



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**«Ανάπτυξη μεθοδολογίας υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ με
αντλησιοταμίευση και δεξαμενή υδρογόνου στο νησί της Λήμνου»**

Αναστασία – Αλκμήνη Αγαπητίδου

Επιβλέπων: Ευάγγελος Μπαλτάς, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία, ολοκληρώνεται η φοίτησή μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το κεφάλαιο αυτό θα αποτελεί σημαντικό κομμάτι στα επόμενα βήματά μου, και δεν θα ήταν το ίδιο χωρίς την συμβολή μερικών ανθρώπων.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου. Η υποστήριξή τους καθ' όλη την διάρκεια αυτού του ταξιδιού ήταν πολύτιμη.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της διπλωματικής μου κ. Ευάγγελο Μπαλτά, ο οποίος μου ανέθεσε ένα τόσο καινοτόμο θέμα σαν διπλωματική εργασία, και μου παρείχε την απαραίτητη καθοδήγηση.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την υποψήφια διδάκτορα Σοφία Σκρουφούτα, για τον χρόνο και την συνεχή βοήθεια που προσέφερε για να υπάρξει αυτό το αποτέλεσμα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος και ιδιαίτερα τα μέλη της επιτροπής κ. Ευστρατιάδη και κ. Μαμάση, οι οποίοι μέσω της διδασκαλίας τους προσέφεραν σημαντικές γνώσεις και πραγματική ώθηση για την ενασχόληση με τα αντίστοιχα μαθήματα της σχολής.

Αναστασία – Αλκμήνη Αγαπητίδου

Οκτώβριος 2021

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	iii
Extended Abstract.....	viii
Introduction.....	viii
Study area	ix
Methodology	x
Estimation of produced energy.....	xv
Comparison – Discussion of operating scenarios.....	xviii
Conclusions – Future research	xxv
1. Εισαγωγή	1
1.1 Γενική αναφορά.....	1
1.2 Αντικείμενο μελέτης	3
1.3 Διάρθρωση εργασίας.....	3
2. Υβριδικά συστήματα ενέργειας – Συστήματα αφαλάτωσης	5
2.1 Στοιχεία υβριδικών συστημάτων	5
2.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στα υβριδικά συστήματα	6
2.2.1 Αιολική ενέργεια	6
2.2.2 Υδροηλεκτρική ενέργεια.....	8
2.3 Αποθήκευση ενέργειας.....	10
2.3.1 Γενικά στοιχεία.....	10
2.3.2 Τύποι αποθήκευσης ενέργειας	11
2.4 Αφαλάτωση	13
2.4.1 Γενικά στοιχεία αφαλάτωσης	13
2.4.2 Αντίστροφη ώσμωση (RO)	13
2.4.3 Αφαλάτωση με ΑΠΕ.....	14
3. Περιοχή μελέτης	16
3.1 Γενικά στοιχεία	16
3.2 Μορφολογικά δεδομένα.....	17
3.3 Γεωλογικά δεδομένα	18
3.4 Σεισμικότητα.....	18
3.5 Δημογραφικά στοιχεία.....	18

3.6 Χρήσεις γης.....	19
3.7 Προστατευόμενες περιοχές (Natura 2000).....	20
3.8 Ύδρευση και άρδευση περιοχής.....	21
3.9 Ενέργεια	22
4. Συλλογή και ανάλυση δεδομένων	24
4.1 Παραγωγή συνθετικής χρονοσειράς βροχόπτωσης.....	24
4.2 Παραγωγή συνθετικής χρονοσειράς θερμοκρασίας.....	27
4.3 Παραγωγή συνθετικής χρονοσειράς ανέμου	30
4.4 Εκτίμηση ενεργειακών, υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών	34
4.4.1 Υδρευτικές Ανάγκες	37
4.4.2 Ενεργειακές Ανάγκες	39
4.4.3 Αρδευτικές Ανάγκες.....	42
4.5 Εκτίμηση παραγόμενης ενέργειας	49
4.5.1 Εκτίμηση παραγόμενης αιολικής ενέργειας.....	49
4.5.2 Εκτίμηση παραγόμενης υδροηλεκτρικής ενέργειας.....	51
4.6 Αφάλατωση	51
4.7 Εκτίμηση συνολικού όγκου δεξαμενής πόσιμου νερού.....	51
4.8 Αποθήκευση υδρογόνου και χρήση	52
5. Αποτελέσματα – Συζήτηση	57
5.1 Περιγραφή υβριδικού συστήματος.....	57
5.2 Σενάριο λειτουργίας 1 – ΥΣ με Υδροηλεκτρικό Έργο.....	58
5.3 Σενάριο λειτουργίας 2 – Υβριδικό σύστημα με δεξαμενή υδρογόνου	70
5.4 Σύγκριση – Συζήτηση σεναρίων λειτουργίας.....	81
6. Συμπεράσματα – Μελλοντική έρευνα	90
6.1 Συμπεράσματα	90
6.2 Μελλοντική έρευνα	91
7. Βιβλιογραφία	93

Extended Abstract

Introduction

Energy has a key role in the evolution of society and the development of culture. Humanity has used every source of energy that has been discovered and as a result nowadays everyone relies mostly on energy. Global energy consumption has been increased 20 times since 1850, 10 times since 1900 and 4 times since 1950. Today, 80% of global energy consumption is derived from fossil fuels (coal, oil, gas, uranium) which cause severe environmental issues and affect negatively the climate exacerbating the greenhouse effect. The question that arises is how humanity will accommodate its enormous energy needs without risking the viability of the planet.

Unfortunately, climate change has already made its appearance. Over the past years, extreme weather phenomena and disasters have taken place with unprecedented frequency. Nevertheless, the average temperature of the planet is just 1.1 °C higher than the temperature in the beginning of the Industrial Revolution. The origin of the phenomenon is quite known: greenhouse emissions caused by fossil fuel combustion for generating electricity, intensive livestock farming and the general devastation of ecosystems, such as forests and oceans, are considered to be the main causes.

Electricity is considered to be the flagship of forms of energy and is directly associated with progress and development from the post war years and onwards. Stats show the Gross National Product (GDP) of a country increases according to the domestic consumption of electricity. The growing demand for producing electricity using clean energy, in order that the greenhouse effect will not worsen, has led to fast – growing of Renewable Energy Sources (RES) in the last 20 years. RES can be divided in continuous production units (from always available sources such as geothermal, biomass and biogas units), elastic production (from optionally available sources such as small hydropower plants) and intermittent or stochastic production (from solar or wind RES systems).

To promote decarbonization, meaning the abolishment of lignite share in electricity generation by 2028, storage technology advancements are crucial. Specifically, the National Plan for Energy and Climate (NPEC) has in view the construction of new pumping and storage systems with a total capacity of 700 MW by 2025.

The subject of this paper is a hybrid renewable energy system (HRES) on the island of Lemnos with two possible operating scenarios. In particular, the wind energy can be stored, either in the form of hydraulic energy (pump storage) or in the form of hydrogen (by electrolyzing water). The objective of this project is to account for the water needs, irrigation and energy of the island. The HRES, in both the two possible scenarios, contains a wind farm, a desalination plant and a tank for drinking water. In case wind energy is stored in the form of hydraulic energy, the system includes a hydroelectric station, a pumping station and a

seawater reservoir. Alternatively, when the wind energy is stored in the form of hydrogen, the system includes an electrolysis unit, hydrogen storage tanks and fuel cells. Through this simulation, it is evident the HRES functions with the two possible ways of energy storage. Furthermore, it is estimated at what percentage can the HRES cover energy and water needs.

Study area

Lemnos belongs to the Region of North Aegean, known as the Thracian Sea, and is the eighth largest island in Greece and the fourth in coastal length. Myrina is the capital and the main port of the island. Lemnos has a total area of 476 km² and a coast line of 263 km. Lemnos is mostly flat (hence being more than 30 sand beaches), but the west, and especially the northwestern part, is rough and mountainous. The highest point is Mount Skopia or Mount Vigla at an altitude of 430 m.



Figure 1: Map of Lemnos (Source: ArcGIS Pro)

According to the latest census of the country's population (Hellenic Statistical Authority, 2011), Lemnos is inhabited by 17000 permanent residents. The climate in Lemnos is Mediterranean, as in most Aegean islands. Winters are generally mild, although there is the possibility of occasional snowfall. The most known feature of the island are the strong winds in August and during the winter. Rainfall mostly occurs in the fall and winter rarely in the summer. The average total annual precipitation reaches 480 mm.

No Municipal Water Supply and Sewage Company exists, which means that the Municipality is the provider of water supply and irrigation. Most of the water, which is equal to 1,377,577.50 m³/year with a unit financial cost of 1.12€/ m³ and recovery rate circa 59%, comes from drilling. Furthermore, the Local Land Improvement Organization and the municipality provide water supply service for agricultural use. (Ministry of Environment & Energy, 2017)

Lemnos has an Autonomous Power Station (APS), which was built in 1980 in the Avlona area. The station is only three kilometers from the island's capital and is located very close to the sea, so that it takes advantage of both the direct supply of liquid fuel and seawater, using the latter to cool the generators. The APS of Lemnos consists of 3 generators with 2.7 MW capacity each, and 2 generators with 6.5 MW capacity respectively, all working on oil. In addition, Public Power Corporation of Greece (PPC) operates 3 gensets at the station to ensure adequate power supply to the island, and there is also a backup genset to start the station. The total installed capacity therefore equals to 23.6 MW. (Alexandrou, 2020) The fluctuation of electricity demand also affects the operation of the station. During the summer, due to tourism, the operation of all 8 generators is considered necessary, while under normal conditions the rest of the year, the demand for electricity can be met with the operation of 2 to 5 generators. Furthermore, 3 wind turbines with rated power 900 kW each and total expected annual production of 5300 MWh have been installed in the island.

Methodology

From the perspective of probability theory, hydrological processes are treated as stochastic developments. For example, the rainfall or flow of a river at a particular location at time t is a random variable, since there is no definitive method of determining its value with complete certainty. Therefore, this process is a stochastic evolution in continuous time, while a series of measurements at regular intervals is a time series. (Koutsogiannis, Efstratiadis, 2004)

In the present project, historical time series of rainfall, temperature and wind of the study area are available, with measurements of 47 years (1974 – 2020). However, due to imprecise data quality, not all measurements are being used. The study of the HRES is carried for a period of 25 years. The production of the synthetic time series of the aforementioned natural processes has a total length of 25 years respectively with an hourly step.

For the generation of the rainfall timeseries, the 30-year length historical data (1991 – 2020) of the Hellenic National Meteorological Service is utilized. The models considered for the generation of the rainfall timeseries are the autoregression second order AR (2) and the first – order autoregressive – first – order moving average ARMA (1,1).

The first method represents a random process, which claims that the output variable, in this case the rain, is prescribed linearly by its two previous values since the model is of the second order, and by a contemplative term, white noise, which introduces the randomness. White noise is defined, at a district time, as a distinct signal whose samples are considered to be a sequence of unrelated random variables with zero mean and finite variance, or else a momentary and discrete variation in the sample.

On the other hand, the second method is a combination of the AR method and the MA mobile process. It must be noted that MA mobile models are useful for describing phenomena where events produce an immediate effect, the effect of which does not stop but continues. The combination of the two methods, known as ARMA, has proven to be a model suitable for the analysis of historical time series, but also the production of future synthetic time series.

The selection of the optimal synthetic time series production model is made through the Anderson test (Mimikou et al. 2016). The model which is mostly within the limits $\{-(\frac{1}{N})^{0.5}, (\frac{1}{N})^{0.5}\}$, where N is the months of the synthetic time series produced, it appears to be the most suitable for the simulation of the HRES. The model ARMA (1,1) is selected according to the Figure 2.

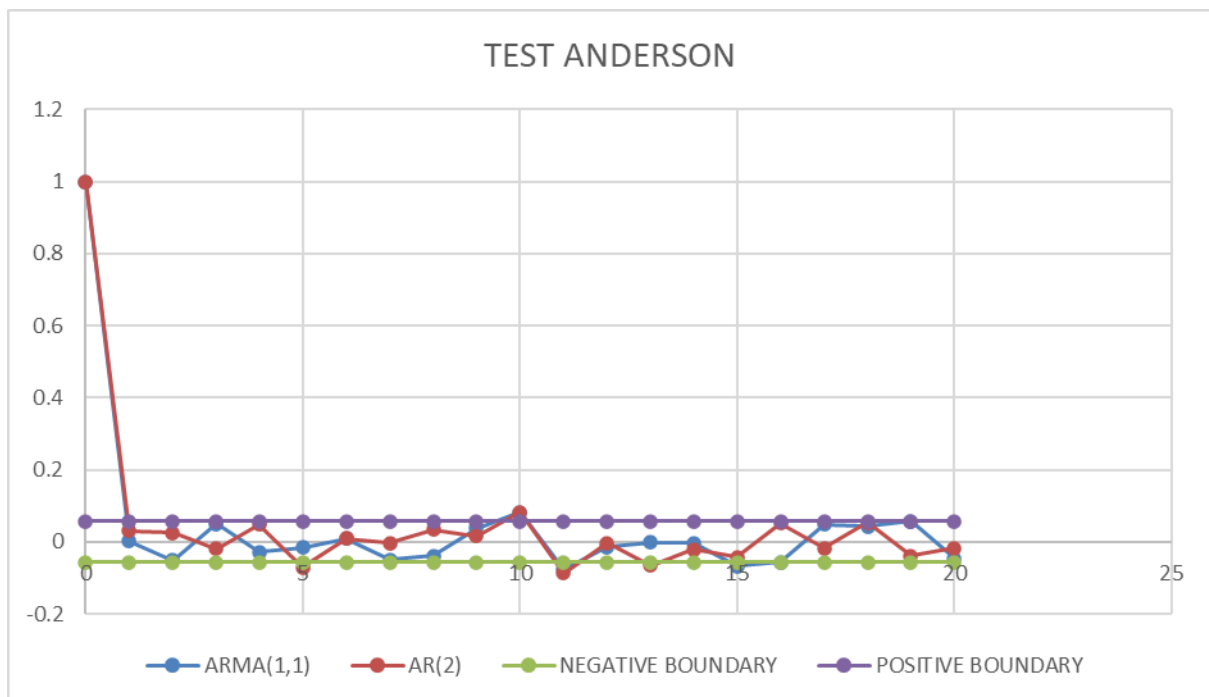


Figure 2: Anderson Test for the Rainfall Time Series

For the production of the synthetic time series of temperature, the procedure is the same as before, which means the models AR (2) and ARMA (1,1) are considered. The Anderson test takes place once again, and the model ARMA (1,1) is selected.

The historical data of the wind series received by the Hellenic National Meteorological Service have a three-hour step. Due to lack of wind data, the historical series that is being used is 25 years long (1996-2020). The aforementioned series is the input data for the method followed for the production of synthetic wind series. The output of this method is a one-year synthetic time series with a three-hour step. The method is repeated as many times as the period of time the HRES is being studied, which means 25 times. The software tool used for the production of the wind series is Microsoft Office Excel. Finally, all the time series that derive from the method are converted to a one-hour step, so that all synthetic series including rainfall and temperature have a common hour step.

The steps of producing a synthetic wind series are the following (Negra et al., 2007):

- The classification of historic wind speed data based on their speed
- The wind speed state probability
- The state frequency
- The average state duration
- The transition rates, one for the transition up and one for the transition down.

Once probability tables for each month are defined, it is possible to produce synthetic wind speed time series. The step-by-step procedure is described as follows:

- The wind speed vector takes an initial value while the time variable receives the initial value of 0 hour. For the first simulation year, the initial wind speed vector takes the value that corresponds to the average historic wind speed.
- Two random numbers are created in the interval (0,1) one for the transition up and one for the transition down.
- Calculation of time to up (TTU) and time to down (TTD). h represents the simulation period which is one year.
- If $TTU < TTD$ the wind speed goes to the upper state after TTU hours.
- If $TTD < TTU$ the wind speed goes to the lower state after TTD hours.
- Vector and variable t are updated.
- The procedure is repeated until t is equal or exceeds h .
- Every time, the initial wind speed vector takes the latest value of the previous synthetic wind speed times series.

In order to understand the maintenance of the hourly variation and the seasonality of the wind, the frequencies – speeds of the historical and the produced time series of the wind are compared. As shown in Figure 3 there is a similarity between the two and therefore the reliability of the model is verified.

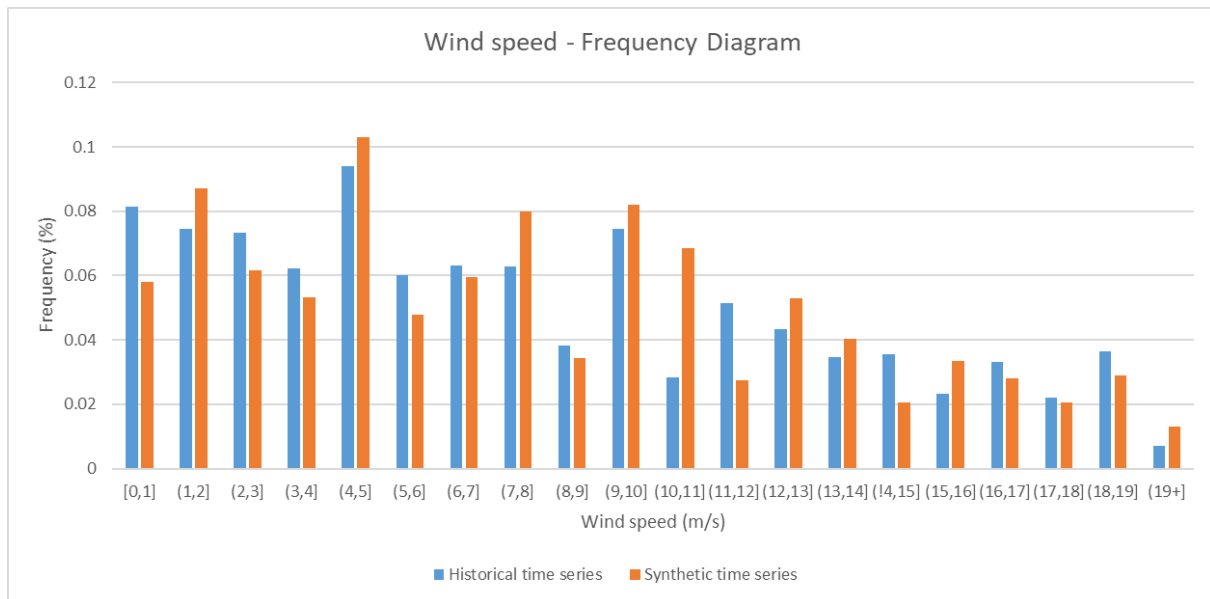


Figure 3: Wind Speed – Frequency Diagram

Besides the collection and analysis of the rainfall, temperature and wind data, it is also necessary to assess the needs of the study area. The water, irrigation and energy needs must be estimated for the lifespan of the HRES, which means for 25 years. It is clear that the study cannot be based on the current population or the current needs, but both must be estimated for the next 25 years.

To begin with, the reduction of the population must take place, as water and energy needs are based on. Vacationers, as well as tourists, contribute to the assessment of the island’s needs. The main tourist season is during June, July and August, but that doesn’t exclude visitors during May and September. The island can be accessed by boat or by airplane. The number of tourists and vacationers varies depending the month.

For the estimation of the water needs of Lemnos, it is necessary to evaluate the water consumption per type of inhabitant. In particular, the average daily consumption is equal to 170 l/d/capita for permanent residents, 225 l/d/capita for vacationers and 170 l/d/capita for tourists (Koutsogiannis, Efstratiadis, 2015). However, due to increased water demands during summertime and in September, an additional 20% of water consumption is taken under consideration for the total population. Once the reduction of the population takes place for the year – target 2045, the water needs can be then calculated. Figure 4 shows the monthly water supply variation every 5 years. The results are considered reasonable, because the demands during the summer are increased but in total as the years go by, the water needs rise due to the population growth.

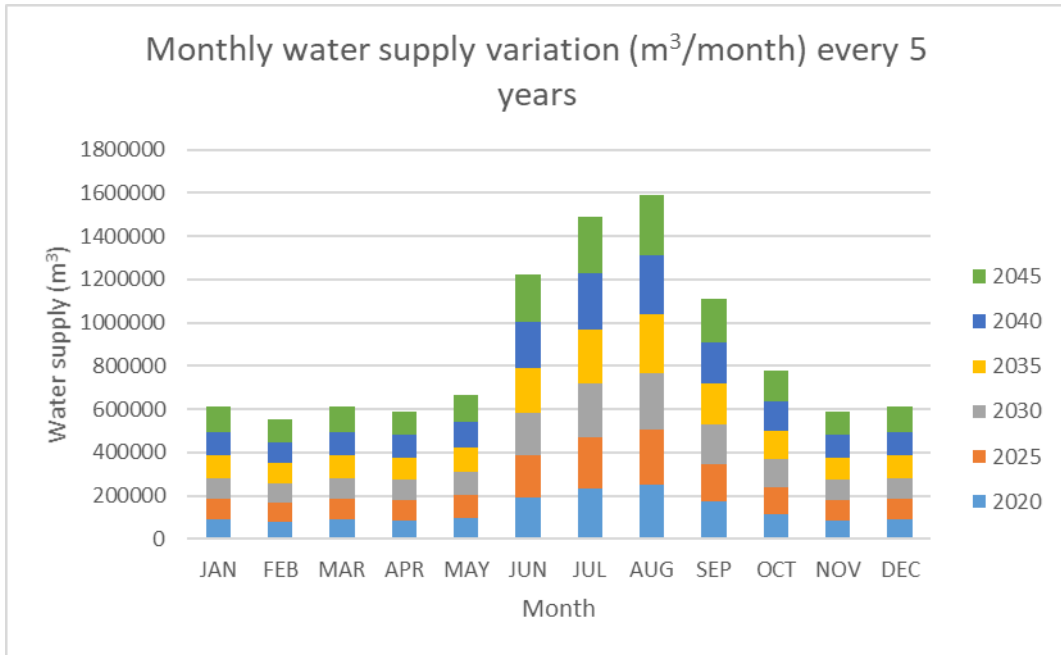


Figure 4: Monthly Water Supply Variation every 5 years

Irrigation is needed for the crops and livestock of the island. To estimate the irrigation needs of crops, the Blaney – Criddle method is being used (Mimikou, Baltas, 2018). Blaney – Criddle developed an empirical equation that accounts for evaporation, the average air temperature and the percentage of daylight hours. In Figure 5 the irrigation consumption of the crops for the 1st and the 25th year of the HRES is presented.

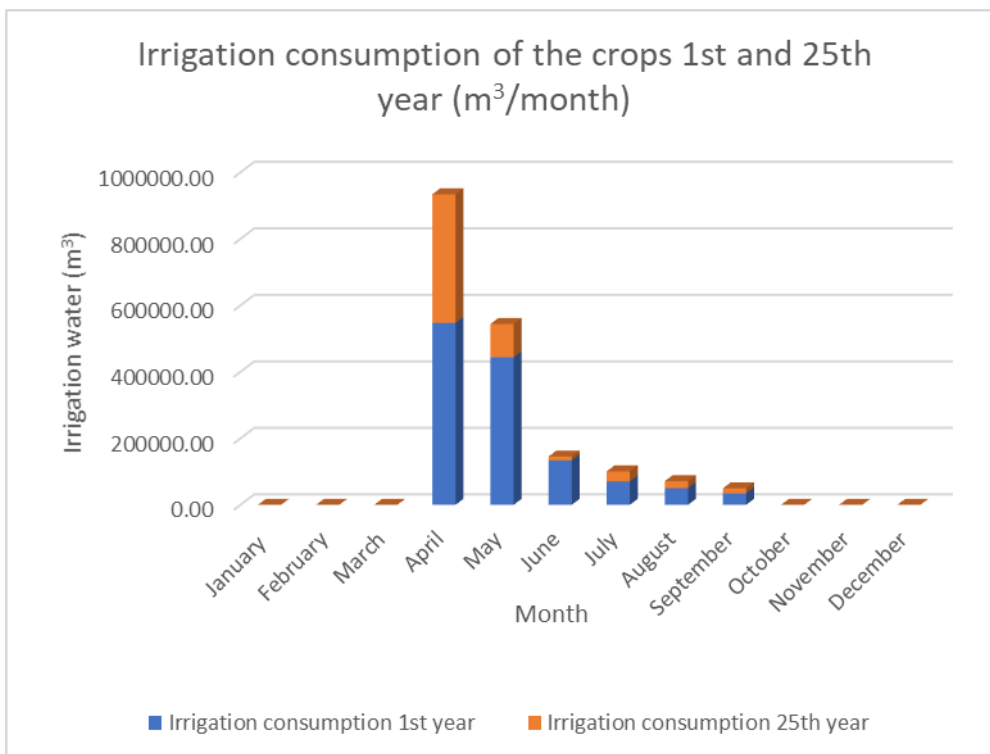


Figure 5: Irrigation Consumption of the crops for the 1st and 25th year

The energy needs of Lemnos are fully covered by the Autonomous Power Station (APS), with a total installed capacity of 23.6 MW. The energy consumption data from 2016 to 2020 with a monthly step, are obtained from the Hellenic Electricity Distribution Network Operator (HEDNO). The average monthly demand for the year 2020 is presented in Table 1.

Table 1: Average Monthly Demand (MWh) 1st year

MONTH	Average Monthly Demand (MWh) 1 st year
JAN	5545.84
FEB	4792.35
MAR	4735.68
APR	4176.64
MAY	4036.18
JUN	4829.90
JUL	6218.08
AUG	6900.14
SEP	4896.83
OCT	4135.04
NOV	4419.39
DEC	5232.19

Estimation of produced energy

As it has already been indicated, Lemnos has 3 wind turbines of Enercon E-44 installed with rated power 900 kW each, in the southeastern part of the island. Nevertheless, the construction of a new wind farm is considered to be essential because of the increased water and energy demands. The siting of the wind farm is suggested to be in the northwestern part of the island. This is due to the Natura 2000 protected areas located on the east side of Lemnos, and the favorable winds occurring on the north side. The types of wind turbines considered are the Enercon E-101 of 3050 kW, the Enercon E-82 of 2350 kW and the Enercon E-82 of 3000 kW. The first is the optimal choice, considering it operates at low wind speed and takes advantage of the strong wind potential of the area. In Figure 6 the power curve of E-101 of 3050 kW rated power is presented.

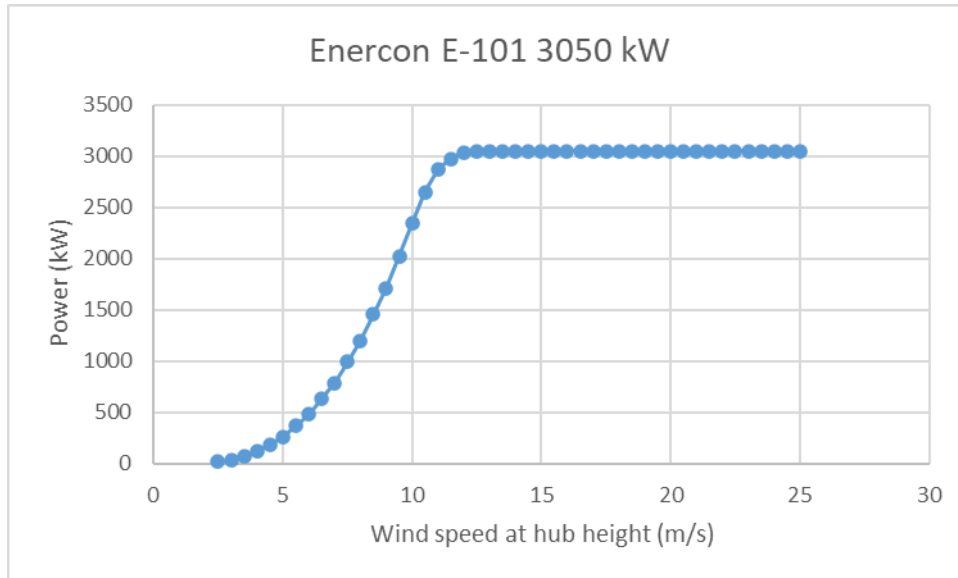


Figure 6: Power Curve of E – 101 3050 kW

Hydrogen is a way of storing and transporting energy. Hydrogen produced by electrolysis is in gaseous form. Hydrogen is an extremely light gas that occupies a significant volume under atmospheric conditions. Its density is 0.09 kg/m^3 . For efficient storage and transport of hydrogen, this volume must be reduced. The storage tanks considered in this study include hydrogen in compressed gaseous form and hydrogen in liquid form. The first case of hydrogen requires for its compression 4.05 kWh per kg of H_2 produced. Pragmatically, the temperature at which the gas is located remains constant and the pressure increases. At a value of 700 bar, which means 700 times the atmospheric pressure, hydrogen has a density of 42 kg/m^3 . Under these conditions, about 5 kg of H_2 can be stored in a 125-liter tank. In the second case of hydrogen, its liquefaction requires 12 kWh per kg of H_2 produced. Hydrogen is converted from a gaseous form to a liquid form at a temperature below -253°C (critical temperature). At this temperature and at atmospheric pressure, the density of the liquid hydrogen is approximately 71 kg/m^3 . That means, 5 kg of liquid H_2 (LH_2) can be stored in a 75-liter tank. Therefore, for the production of hydrogen, the energy need of the electrolysis system is taken into account, as well as the energy need for the respective case of hydrogen storage. Under normal conditions of temperature and pressure, 1kg of H_2 will occupy 12.15 m^3 possessing an energy content of 33.5 kWh (Gkanas, Dimokritos, 2020).

The HRES under study, examines a hybrid system – wind power plant and a desalination plant, with two possible energy storage systems, i.e., by the method of pump storage or by use of hydrogen produced through electrolysis. Therefore, two operating scenarios are simulated and examined. The purpose of both storage methods is to cover as much as possible of the water supply, irrigation and energy needs. During the simulation of both scenarios, 30% of the wind energy produced is driven directly to the grid, while the rest 70% is provided to the

HRES. Moreover, in case of inability to meet the energy needs, the APS supplies electricity to the island. The lifespan of the project is 25 years.

The model is simulated using Microsoft Office Excel 365 program and the input data with an hourly step are:

- The time series of wind energy produced,
- The time series of energy needs,
- The time series of water supply needs,
- The time series of irrigation needs,
- The capacity and the required energy for the desalination plant,
- The capacity of the drinking water tank,
- The height where the seawater reservoir is installed, its maximum and minimum water level, its capacity, as well as the power of the pumps used for pumping water. All of the above fall under the hydroelectric power plant,

The aforementioned time series are 25 years long, which is the lifespan of the project. The output data of the model with an hourly step are:

- The time series of generated hydroelectric energy,
- The time series of total energy from renewable sources,
- The time series of deficit and its coverage by the Autonomous Power Station,
- The time series of water supply,
- The time series of irrigation,
- The time series of the water level of the drinking water tank and the reservoir of the hydroelectric power plant,
- The reliability of meeting water supply, irrigation and energy needs,
- The time series of hydrogen produced by electrolysis.



Figure 7: Positioning of the units of HRES (Source: ArcGIS Pro)

Comparison – Discussion of operating scenarios

The first operating scenario of the hybrid system consists of a wind farm of 9 turbine type Enercon E-101 of 3050 kW rated power each, a desalination plant with 490 m³/h capacity, a drinking water tank with 490000 m³ capacity and a hydroelectric power plant with seawater reservoir of 3.5 hm³ capacity. In Figure 8 demonstrates the schematic diagram of operating scenario 1.

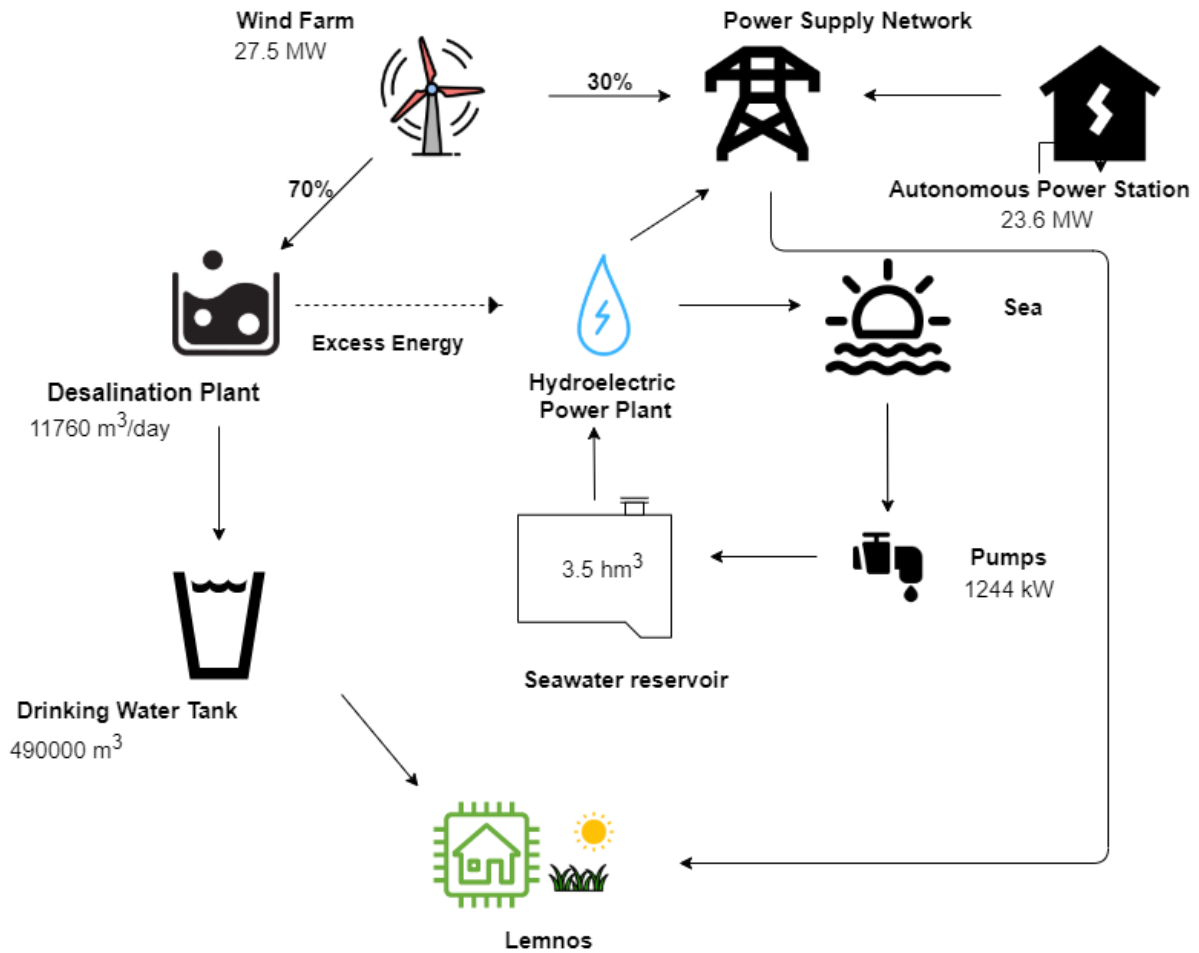


Figure 8: Schematic Diagram of Operating Scenario 1

The second operating scenario of the HRES consists of the same type of wind farm with 9 wind turbines, the same desalination plant with 490 m³/h capacity, a drinking water tank of equal capacity as before and a seawater electrolysis unit for the production and later storage of hydrogen. Figure 9 presents the schematic diagram of operating scenario 2.

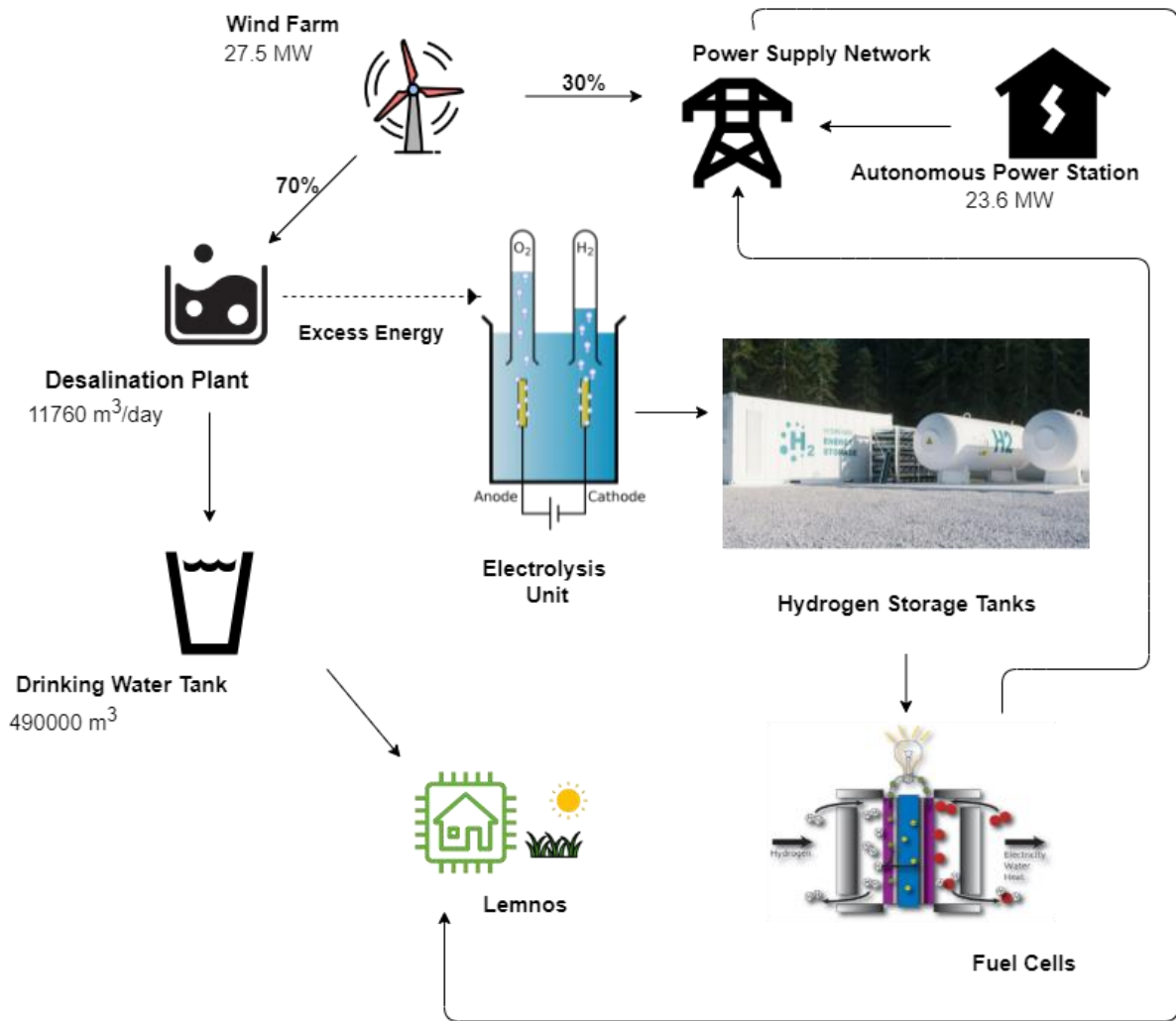


Figure 9: Schematic Diagram of Operating Scenario 2

The two operating scenarios of the HRES differ in the way energy is stored and therefore its use in case the grid requires electricity. Table 2 contains the basic elements of both scenarios.

Table 2: Basic Elements of Operating Scenarios 1,2

Operating scenario 1			Operating scenario 2		
Type of construction	Quantity	Capacity/ Dimensions	Type of construction	Quantity	Capacity/ Dimensions
Wind turbines	9	3050 (kW)	Wind turbines	9	3050 (kW)
Desalination	1	11760 m ³ /day	Desalination	1	11760 m ³ /day

Drinking water tank	1	490000 m ³	Drinking water tank	1	490000 m ³
Pumps		1244 kW	Electrolysis	1	
Seawater reservoir	1	3.5 hm ³	Hydrogen storage tanks	29	100000 L
			Fuel cells		33.5 kWh/kg H ₂

The primary goal of both the scenarios is to cover the water needs of Lemnos fully. This goal is achieved from both of them with 99.99% reliability. 70% of the wind energy, is offered directly to the HRES and it is first used by the desalination plant for the production of drinking water. The irrigation needs are next. In correspondence with the water supply cover, the water used for irrigation derives from the desalination plant and therefore from the drinking water tank. If the water tank is 20% full of its capacity or more, it can offer water for the coverage of irrigation needs. The desalination plant and the drinking water tank are common features of the two operating scenarios, resulting in the same percentage of reliability, i.e., 66%.

However, the scenarios differ significantly in meeting energy needs. The first one, which is with the hydroelectric plant, has reliability equal to 91%. The energy, that is given to the hydroelectric plant, is actually the wind energy that hasn't been used from the desalination plant. This energy channels the process of pump storage. When the need of electricity arises, water is channeled through the turbines and dynamic energy is converted to electricity. Figure 10 presents the energy that is being offered to and produced by the hydroelectric project. The generated energy of the hydroelectric, which is channeled to the grid, appears to be every year approximately 20000 MWh for the lifespan of the HRES. In addition, the hydroelectric covers the energy needs of the desalination plant, for the production of drinking water.

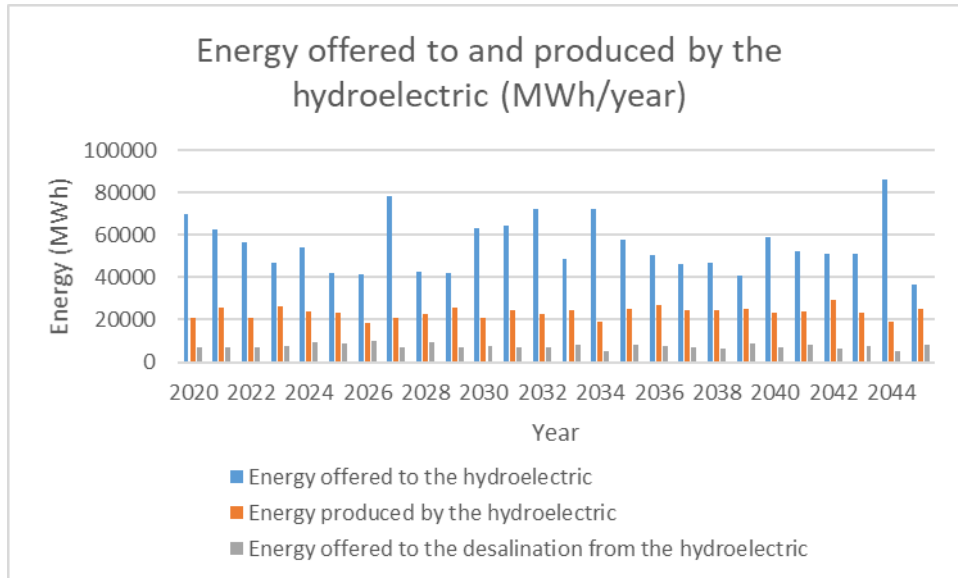


Figure 10: Energy Offered to and Produced by the Hydroelectric Yearly

The HRES of the first scenario can cover 91% of the energy needs of Lemnos. From that, 53.75% derives from wind energy and the rest 37.63% from the energy of the hydroelectric plant. As for the 10% that is not covered by the current hybrid system, the Autonomous Power Station offers the energy needed. The APS remains in operation at 15% of its capacity, despite the existence of the HRES.

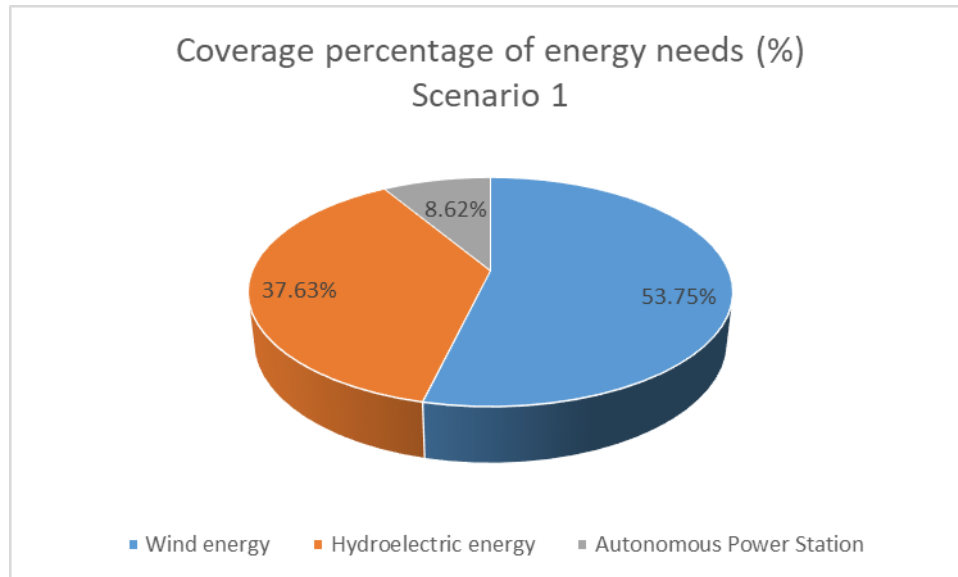


Figure 11: Percentage of Covered Energy Demands Operating Scenario 1

The second scenario, the one that contains hydrogen storage, has reliability of covering energy needs equal to 57%. This percentage stays fixed, using either compressed gas hydrogen or liquefied hydrogen. The energy that is being offered, first in the electrolysis and then in the respective storage tank, is actually the wind energy that was not used from the desalination plant. The electrolysis unit produces hydrogen gas, which can then be stored at

very high pressures (compressed) or at very low temperatures (liquefied). Nevertheless, if compressed hydrogen is selected, then wind energy meets 35% of the energy needs and the remaining 22% is covered by the conversion of compressed hydrogen to electricity through fuel cells. If the use of liquefied hydrogen is chosen, then 37% of the needs are met by wind energy and 20% by the conversion of liquefied hydrogen to electricity through fuel cells. In both cases, APS which operates at a part of its capacity, covers 43% of the needs. The percentages of each choice are shown in Figures 12 and 13. Figure 14 shows the energy offered in electrolysis and subsequent storage of hydrogen, as well as the energy produced by each form of hydrogen. The difference observed in energy production between compressed and liquefied hydrogen, even though narrow, is attributed to the higher energy needed for the latter.

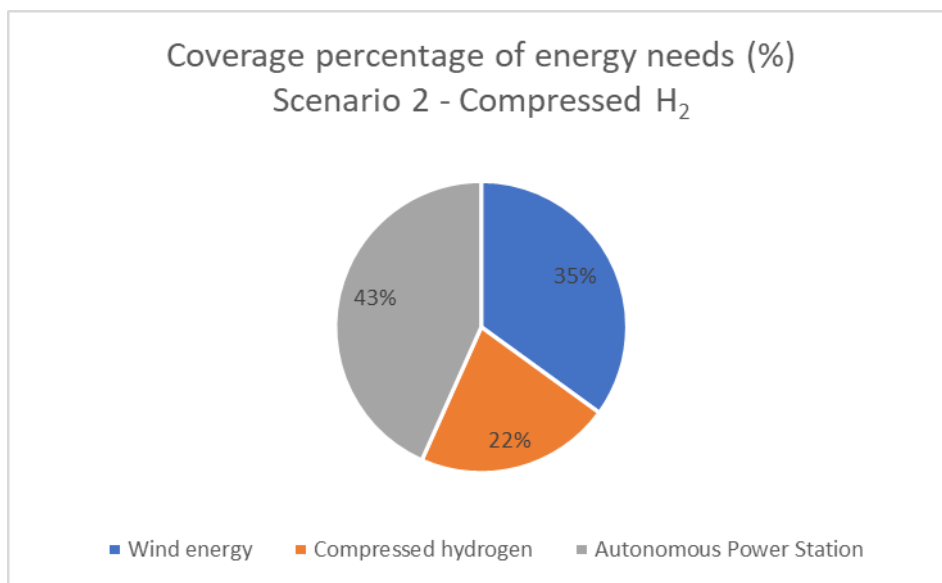


Figure 12: Percentage of Covered Energy Demands with Compressed H₂

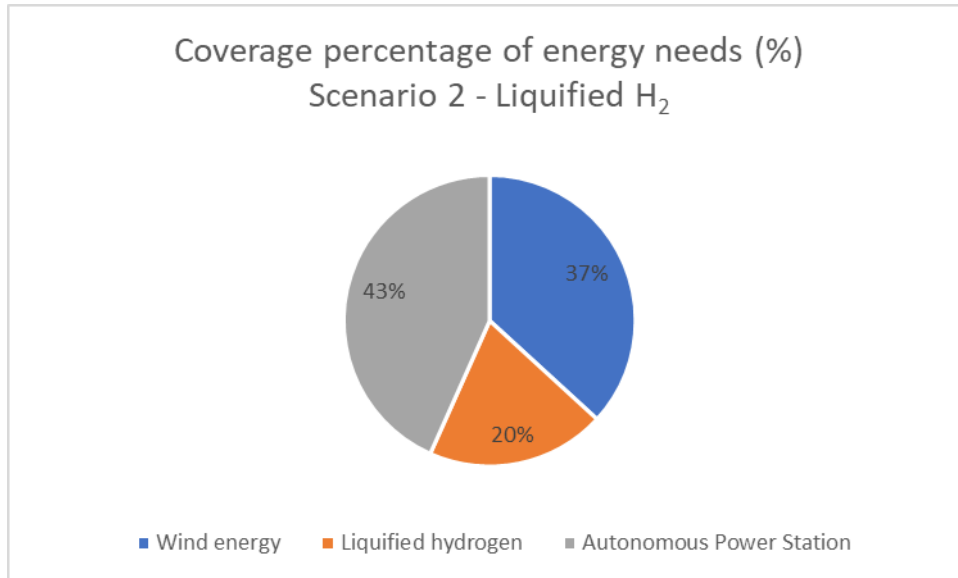


Figure 13: Percentage of Covered Energy Demands with Liquefied H₂

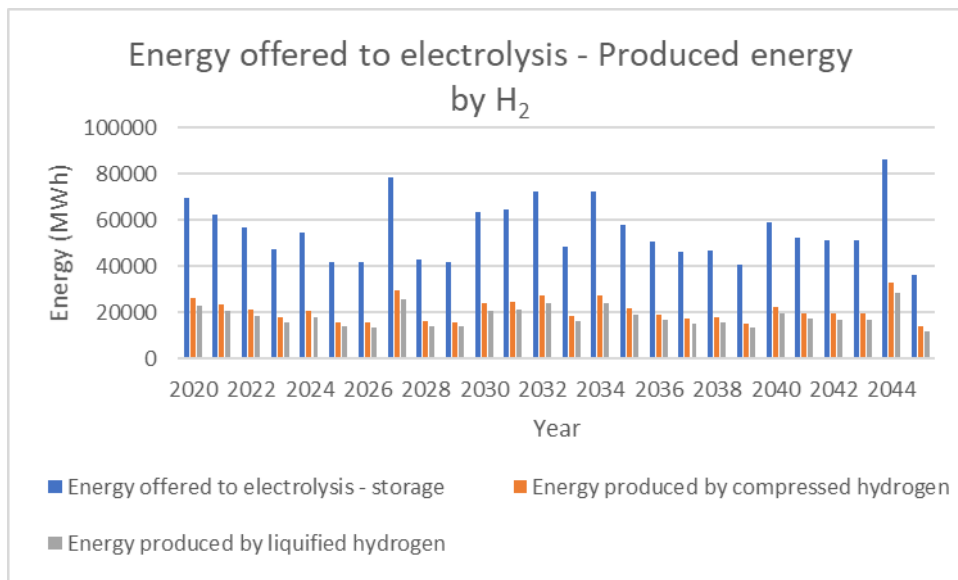


Figure 14: Energy Offered to Electrolysis – Produced Energy by H₂

The energy offered in both cases of wind energy storage is the same. However, the two systems do not deliver the same energy. The hydroelectric has an efficiency of 80%, while with the use of a fuel cell, the efficiency is just 60%. Judging by Figure 15, that presents the comparison of the produced energy, it is easily noted that the hydroelectric plant does not always exceed the production of energy using hydrogen. In the years when there is a high amount of excess energy, i.e., 2027 and 2044, operating scenario 2 responds better than scenario 1, despite the form of hydrogen used. On the contrary, in cases of low energy surplus, such as years 2039 and 2045, the hydroelectric plant generates significantly more electricity than using hydrogen. The production of energy through the hydroelectric seems to be relatively stable, while through the fuel cells more fluctuations are observed. The process of hydrogen production and its subsequent conversion requires a significant amount of

electricity. When that amount exists and it is greater than 60000 MWh, then there is high generation of electricity due to the use of hydrogen. When the excess energy is approximately equal to 60,000 MWh, then the differences in electricity production are small, while in cases where there is less than 60,000 MWh available, the electricity generation of the hydroelectric plant is higher.

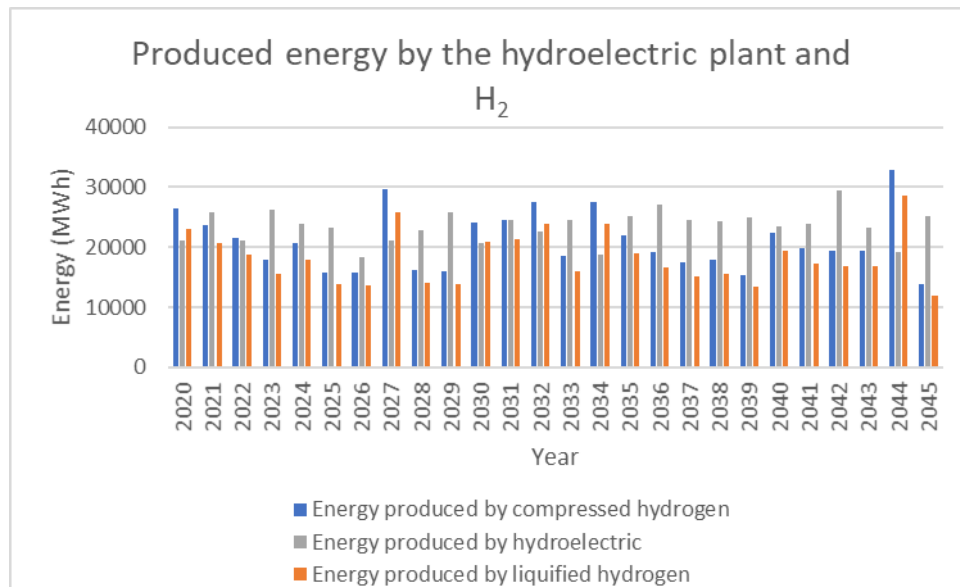


Figure 15: Produced Energy by the Hydroelectric plant and H₂

Of course, it is necessary to choose the form of hydrogen that will be used in the HRES of the operating scenario 2. Besides comparing power generation between the two options, an important factor is also the safety of use and storage of each form of hydrogen. Since both forms of hydrogen pose significant risks, the number of tanks needed to store hydrogen must also be taken into account. Tanks that store liquefied hydrogen (LH₂) are significantly fewer than those that store compressed gaseous hydrogen (cGH₂). The former needs very low temperatures – cryogenic conditions to be stored, while the latter needs very high pressures. Thus, in terms of storage pressure, liquid hydrogen poses fewer potential hazards than compressed gas. Furthermore, liquefied hydrogen has a higher density than compressed hydrogen, i.e., it takes up less volume and therefore more hydrogen can be stored. The choice for the HRES of operation scenario 2, therefore, is proposed to be the liquefaction of the hydrogen gas produced by the electrolysis, in cryogenically compressed tanks, which use slightly higher pressures than the typical pressure conditions.

Conclusions – Future research

The use of RES is becoming more and more imperative, especially in a country like Greece, which can benefit significantly from them. Most of its areas have wind, solar, geothermal energy and more. Climate change, which is aggravated due to the use of fossil fuels, highlights

the need to produce energy from RES as much as possible and at the same time eliminate greenhouse gas emissions. This need, as well as other environmental and economic reasons, leads to the research and development of HRESs that tap into the benefits of RES. The operation of HRESs with the use of exclusively RES, especially in non-interconnected islands, are the way to achieve energy autonomy. The study area is actually a case of non-interconnected island. However, beyond energy dependence on conventional power plants, the islands face significant problems with a lack of water and irrigation water due to limited water resources. Water shortages are not uncommon, and problems are made worse during the summer by temporary surge in population and irrigation needs.

The primary purpose of the HRES here is the complete coverage of the water supply needs. This is achieved by installing a desalination plant, designed with the most advanced method of reverse osmosis and the use of a drinking water tank. Reverse osmosis is the most common desalination method, recommended for its low energy consumption in relation to its high efficiency, as well as for its ease of being associated with RES. **Whichever operating scenario is chosen, the water supply needs throughout the lifecycle of the project can be met, taking into account the ever-increasing needs due to the corresponding increase in population.**

Consequently, from the comparison of the two operating scenarios in terms of meeting the energy needs, **the superiority of the hydroelectric project in relation to the production, storage and conversion of hydrogen into electricity becomes apparent.** It is a logical outcome since the operation of a hydroelectric project is fully developed technically. With the use of the first operating scenario, the ASP of Lemnos provides the minimum possible electricity, gaining significant energy dependence. The coverage of the energy needs is carried out primarily by the wind energy, thus making good use of the high wind potential of the study area and then follows the hydroelectric energy. Another factor that affects the production of hydrogen is the efficiency of the hydroelectric project in relation to the electrolysis units and the fuel cells. The hydroelectric has an efficiency of 80%, the electrolysis also 80% while the fuel cells only 60%. Nevertheless, **the comparison of the two scenarios shows that in cases where the wind energy surplus exceeds 60,000 MWh, then hydrogen produces significantly more energy than the hydroelectric plant.** This is an important and encouraging result for the future, as it demonstrates the efficacy of hydrogen contributing in future HRESs.

Further, the influence of the form of hydrogen that is chosen to be used in the second operating scenario of the study is remarkable. Bearing in mind that the production of hydrogen is done only with the use of excess wind energy ("green hydrogen") and not by conventional units. This energy is first channelled to the electrolysis unit to produce hydrogen gas. The liquefaction of hydrogen resulting from electrolysis and its storage in cryogenic conditions requires more energy than the compression of hydrogen gas. Of course, in the final energy production, i.e., after the hydrogen is funneled through the fuel cells, the difference

between the two possible storage methods is not large. However, with the choice of LH₂ (Liquid H₂), fewer storage tanks are needed, since in this form hydrogen has a high energy density, so it occupies less volume. Thus, it is less likely to be exposed to hazardous sources either in the event of tank failure or to exogenous factors.

This dissertation presents results that can be further explored. The methodology analyzed can be applied to Greek islands, which still depend on conventional power plants or the PPC network, to meet their necessary needs.

Future research is highly recommended to focus on the development of hydrogen production and use. More specifically, it is recommended to develop electrolysis units that use purely seawater to produce hydrogen gas, instead of using desalinated, if not drinking water. In addition, the reason why hydrogen requires significant amounts of energy for its production is the energy needed for electrolysis, which for the production of 1kg H₂ needs 49kWh. Therefore, it becomes necessary to minimize the energy need of electrolysis, but also the high energy demand for the conversion of hydrogen gas into liquid.

Finally, the production of energy and its sale on neighbouring islands or even in the PPC network is a remarkable alternative that must be explored. The production and sale of hydrogen is an innovative process, from which the Municipality of Lemnos can benefit significantly. So, it becomes necessary to conduct a cost-benefit analysis of the HRES for the two possible operating scenarios. Other economic and technical issues that are useful to explore are the connection of Lemnos with the interconnected electricity system, as opposed to full energy autonomy. An additional issue to be considered is the case of complete elimination of the drilling to cover water supply and irrigation with the construction of a water transmission network.

1.Εισαγωγή

1.1 Γενική αναφορά

Ο Αριστοτέλης ήταν ο πρώτος που εισήγαγε τη λέξη ενέργεια τον 4ο π.Χ. αιώνα στο έργο του Ηθικά Νικομάχεια. Ωστόσο, η λέξη ενέργεια δεν υπεισήλθε στην επιστήμη παρά στις αρχές του 19ου αιώνα από τον Thomas Young (Χριστοφόρου Λ., 2021). Έκτοτε, η έννοια και η σημασία της ενέργειας αναγνωρίστηκαν σταδιακά, όπως και οι διάφορες μορφές της ενέργειας (λ.χ. κινητική, δυναμική, θερμική, ηλεκτρική).

Όλα τα φαινόμενα που σχετίζονται με την εκτέλεση έργου συνδέονται μέσω της ενέργειας. Η ενέργεια συνεπώς ταυτίζεται με την ικανότητα ενός συστήματος να εκτελεί έργο. Από τον 19ο αιώνα, άρχισε να αναγνωρίζεται η ενέργεια υπό τη σημερινή της έννοια, αν και οι νόμοι πάνω στους οποίους στηριζόταν τροποποιήθηκαν όταν ανακαλύφθηκε ότι η μάζα είναι μία μορφή ενέργειας. Νέοι τρόποι μετασχηματισμού της ενέργειας από μια μορφή σε άλλη ανακαλύφθηκαν και νέες μηχανές εφευρέθηκαν για τις χρήσεις των νέων μορφών ενέργειας. Η επιστήμη και η τεχνολογία της ενέργειας συνεχίζουν έκτοτε ακατάπαυστα να εξελίσσονται.

Η ενέργεια έχει διαδραματίσει βασικό ρόλο στην εξέλιξη της κοινωνίας και την ανάπτυξη του πολιτισμού. Ο άνθρωπος χρησιμοποίησε κάθε πηγή ενέργειας που ανακάλυψε με αποτέλεσμα ο σύγχρονος πολιτισμός να στηρίζεται στην ενέργεια σε μεγάλο βαθμό. Η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση εικοσαπλασιάστηκε από το 1850 έως σήμερα, δεκαπλασιάστηκε από το 1900 και τετραπλασιάστηκε από το 1950. Σήμερα, το 80% της παγκόσμιας κατανάλωσης προέρχεται από ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ουράνιο), που προκαλούν έντονα περιβαλλοντικά προβλήματα και επιδρούν αρνητικά στο κλίμα εντείνοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Προκύπτει λοιπόν επιτακτικό το ερώτημα: **πώς θα μπορέσει η ανθρωπότητα να ικανοποιήσει τις τεράστιες ενεργειακές της ανάγκες χωρίς να τεθεί σε κίνδυνο η βιωσιμότητα του πλανήτη;**

Δυστυχώς, η κλιματική αλλαγή έχει ήδη κάνει αισθητή την παρουσία της. Τα τελευταία χρόνια, έχουν διαπιστωθεί ακραία καιρικά φαινόμενα και καταστροφές με συχνότητα πρωτοφανή. Εν τούτοις, η μέση θερμοκρασία του πλανήτη είναι μόλις 1.1°C πιο υψηλή σε σχέση με τις αρχές της βιομηχανικής επανάστασης. Η προέλευση του φαινομένου είναι γνωστή: τα αέρια του θερμοκηπίου που προκαλούνται από την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η εντατική κτηνοτροφία και η καταστροφή των φυσικών οικοσυστημάτων, όπως είναι τα δάση και οι ωκεανοί, θεωρούνται τα βασικότερα αίτια.

Η ηλεκτρική ενέργεια θεωρείται η κορωνίδα των μορφών ενέργειας και είναι άμεσα συνδεδεμένη με την πρόοδο και την ανάπτυξη από τα μεταπολεμικά χρόνια και μετά. Είναι δεδομένο ότι το Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν (ΑΕΠ) μιας χώρας αυξάνεται ανάλογα με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τη χώρα αυτή. Η ανάγκη για αυξανόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με καθαρό τρόπο, ώστε να μην επιβαρύνεται το φαινόμενο του θερμοκηπίου, έχει οδηγήσει τα τελευταία 20 χρόνια στη ραγδαία ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). 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).

Η κατανομή εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων ΑΠΕ του Διασυνδεδεμένου Συστήματος ανά τεχνολογία στην Ελλάδα διαμορφώθηκε στο τέλος του 2020 ως εξής (Διαχειριστής ΑΠΕ & Εγγυήσεων Προέλευσης- ΔΑΠΕΕΠ Α.Ε, 2021):

- Αιολικοί Σταθμοί 3.861 MW
- Μικροί Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί 245 MW
- Σταθμοί Βιοαερίου-Βιομάζας 97 MW
- Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί 2.779 MW
- Φωτοβολταϊκά Στεγών 352 MW
- Μονάδες Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού-Θερμότητας 108 MW

Είναι προφανές ότι τη μερίδα του λέοντος κατέχουν οι στοχαστικές ΑΠΕ. Προκειμένου η εκμετάλλευσή τους να γίνει αποτελεσματική, καθίσταται βασική προϋπόθεση η δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να εξομαλυνθούν οι διαφορές ζήτησης και προσφοράς, όπως για παράδειγμα η νυχτερινή παραγωγή από αιολικά σε ώρες πολύ χαμηλής ζήτησης.

Με το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), η χώρα έθεσε φιλόδοξους ενεργειακούς και κλιματικούς στόχους μέχρι το έτος 2030, οι οποίοι θα συμβάλουν καθοριστικά στην απαραίτητη ενεργειακή μετάβαση προς την καθαρή ενέργεια με τον πιο οικονομικά ανταγωνιστικό τρόπο για την εθνική οικονομία, ώστε να επιτευχθεί η δραστική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Υπ. Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2019). Για τις ΑΠΕ, τίθεται στόχος το μερίδιο συμμετοχής στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας να φθάσει στο 35%, που είναι υψηλότερο και από τον κεντρικό ευρωπαϊκό στόχο για τις ΑΠΕ που είναι στο 32%. Αξίζει να επισημανθεί ο ενεργειακός μετασχηματισμός που θα πρέπει να επιτευχθεί στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, καθώς προβλέπεται το μερίδιο συμμετοχής των ΑΠΕ στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας να υπερβεί το 60%.

Με δεδομένη την απόφαση για πλήρη απολιγνιτοποίηση, δηλαδή την οριστική μείωση του μεριδίου λιγνίτη στην ηλεκτροπαραγωγή μέχρι το 2028, οι τεχνολογίες αποθήκευσης αποκτούν κομβική σημασία. Σημειώνεται ότι αναφορικά με την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, το ΕΣΕΚ προβλέπει την κατασκευή νέων αντλησιοταμιευτικών συστημάτων συνολικής ισχύος περίπου 700 MW ως το 2025.

Στο ηπειρωτικό δίκτυο της Ελλάδας, υπάρχουν σήμερα μόνο δύο αντλησιοταμιευτικοί σταθμοί, στον Θησαυρό (Δράμα) και τη Σφηκιά (Ημαθία) συνολικής ισχύος 699 MW. Στο μη διασυνδεδεμένο δίκτυο, υπάρχουν δύο πολύ μικρότερα συστήματα αποθήκευσης. Συγκεκριμένα, το 2018 τέθηκε σε λειτουργία στο νησί της Τήλου το πρώτο υβριδικό σύστημα ΑΠΕ στη Μεσόγειο, αποτελούμενο από μία μικρή ανεμογεννήτρια ισχύος 800 KW, ένα μικρό φωτοβολταϊκό ισχύος 160 KW και δύο πρότυπους συσσωρευτές NaNiCl_2 με αποθηκευτική ικανότητα 2.8 MWh, ενώ στην Ικαρία το 2019 τέθηκε σε λειτουργία το υβριδικό σύστημα της ΔΕΗ Ανανεώσιμες «Ναέρας» που αποτελείται από 3 ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 2.7 MW, δύο μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα 1.05 MW και 3.1 MW και συνολική αντλητική ισχύ 3 MW.

Η **αντλησιοταμίευση** αποτελεί με διαφορά την πιο διαδεδομένη τεχνολογία αποθήκευσης. Σύμφωνα με πρόσφατα στοιχεία του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ, υπάρχουν παγκοσμίως 1363 έργα αποθήκευσης ενέργειας σε λειτουργία με συνολική ισχύ 173.7 GW. Η αντλησιοταμίευση κατέχει μερίδιο 97% της συνολικής, παγκόσμιας αποθηκευτικής ισχύος με 167.8 GW. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή θερμότητας βρίσκονται στη δεύτερη θέση με μερίδιο 1.4% ή 2.4 GW, ενώ στην τρίτη θέση βρίσκονται οι διάφορες τεχνολογίες ηλεκτροχημικής αποθήκευσης σε συσσωρευτές (μπαταρίες) με μερίδιο 1% και 1.79 GW. Επίσης, υπάρχουν 1.66 GW συστημάτων ηλεκτρομηχανικής αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων πεπιεσμένου αέρα, που αντιστοιχούν σε μερίδιο 0.95% της παγκόσμιας αποθηκευτικής ισχύος, ενώ πρόσφατα ξεκίνησαν να λειτουργούν και τα πρώτα 9 έργα αποθήκευσης ενέργειας με **τεχνολογίες υδρογόνου**. [The Green Tank, 2020]

1.2 Αντικείμενο μελέτης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται ένα υβριδικό σύστημα στο νησί της Λήμνου με δύο πιθανά σενάρια λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται ο τρόπος αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας, ο οποίος μπορεί να πραγματοποιηθεί υπό μορφή υδραυλικής ενέργειας (αντλησιοταμίευση) και εναλλακτικά με τη μορφή υδρογόνου (ηλεκτρόλυση του νερού). Σκοπός του έργου, είναι η μέγιστη δυνατή κάλυψη των υδρευτικών, αρδευτικών και ενεργειακών αναγκών του νησιού. Το υβριδικό σύστημα περιλαμβάνει στα δύο σενάρια λειτουργίας αιολικό πάρκο, μία μονάδα αφαλάτωσης και μία δεξαμενή πόσιμου νερού. Στην περίπτωση που η αιολική ενέργεια αποθηκεύεται υπό μορφή υδραυλικής ενέργειας, το σύστημα περιλαμβάνει ένα υδροηλεκτρικό έργο, έναν αντλητικό σταθμό και ένα ταμιευτήρα θαλασσινού νερού. Εναλλακτικά, για την αποθήκευση της αιολικής ενέργειας με τη μορφή υδρογόνου, το σύστημα περιλαμβάνει μία μονάδα ηλεκτρόλυσης, δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου και κυψέλες καυσίμου. Μέσω της προσομοίωσης, γίνεται κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του υβριδικού συστήματος με τους δύο πιθανούς τρόπους αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον, εκτιμάται η παραγόμενη ενέργεια και η αξιοπιστία κάλυψης των υδρευτικών, αρδευτικών και ενεργειακών αναγκών για κάθε σενάριο λειτουργίας.

1.3 Διάρθρωση εργασίας

Στο 2^ο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα υβριδικά συστήματα, η λειτουργία τους και οι ΑΠΕ που χρησιμοποιούνται. Ακόμη, παρουσιάζεται η διαδικασία της αφαλάτωσης με την μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης, καθώς και οι τρόποι αποθήκευσης ενέργειας.

Στη συνέχεια, στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης. Περιλαμβάνονται ιστορικά, μορφολογικά και πληθυσμιακά στοιχεία, καθώς και η υπάρχουσα κατάσταση που επικρατεί όσον αφορά στην ύδρευση, την άρδευση και την ενέργεια.

Το 4^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει την ανάπτυξη της μεθοδολογίας, που ακολουθείται για την προσομοίωση του υβριδικού συστήματος. Παρουσιάζεται η ανάλυση και επεξεργασία των βροχομετρικών, θερμοκρασιακών και ανεμολογικών δεδομένων για το νησί της Λήμνου. Επιπλέον, εκτιμώνται οι υδρευτικές, αρδευτικές και ενεργειακές ανάγκες του νησιού για την διάρκεια ζωής του έργου.

Στη συνέχεια, στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του κάθε σεναρίου λειτουργίας και η αποδοτικότητα τους. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνει χώρα η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Στο 6^ο και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας, καθώς γίνεται επιλογή ενός σεναρίου λειτουργίας. Ακόμη, προτείνεται περαιτέρω μελλοντική έρευνα για την βέλτιστη λειτουργία του υβριδικού συστήματος.

2. Υβριδικά συστήματα ενέργειας – Συστήματα αφαλάτωσης

Η Ελλάδα υλοποιεί ολοκληρωμένες μεταρρυθμίσεις στον ενεργειακό τομέα, για να προωθήσει την απολιγνιτοποίηση και τις ανταγωνιστικές αγορές. Η κυβέρνηση επικεντρώνεται σε μία δίκαιη και προσιτή ενεργειακή μετάβαση, που ωφελεί όλους τους πολίτες. Η Ελλάδα έχει θέσει ως στόχο να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 56% έως το 2030 σε σύγκριση με αυτών του 2005 και να διαθέτει κλιματικά ουδέτερη οικονομία έως το 2050. Στη χώρα εφαρμόζονται μεταρρυθμίσεις για την τυποποίηση και απλούστευση των διαδικασιών αδειοδότησης για έργα ΑΠΕ και διερευνώνται οι επιλογές για υπεράκτιες αιολικές μεταφορές. Υπάρχουν επίσης έργα για διασυνδέσεις και ΑΠΕ για την απαλλαγή εκπομπών άνθρακα, λόγω σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα ελληνικά νησιά. Η Ελλάδα έχει μεταρρυθμίσει την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας για να υποστηρίξει την καλύτερη σύνδεση με την υπόλοιπη Ευρώπη, η οποία θα έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερες τιμές. (International Energy Agency)

Οι τεχνολογίες ΑΠΕ δεν εξυπηρετούν μόνο στο να βοηθήσουν στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αλλά είναι πολύ χρήσιμες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, όπου δεν διατίθενται άλλα μέσα ισχύος (Sajid Ali and Choong – Man Jang, 2020). Έχει γίνει επιτακτική η ανάγκη για την αναζήτηση ΑΠΕ ενέργειας όπως ο ήλιος, ο άνεμος, η γεωθερμία και η βιομάζα ως βιώσιμες, οικονομικά αποδοτικές και φιλικές προς το περιβάλλον εναλλακτικές λύσεις για τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Ωστόσο, η μη διαθεσιμότητα αυτών των πηγών ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους οδήγησε σε έρευνα στον τομέα των υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ (Prabodh Bajrai, Vaishalee Dash, 2012). Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να αυξήσουν την εκμετάλλευση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως επίσης και την αξιοπιστία της αγροτικής πρόσβασης σε ενέργεια (Low Carbon Green Growth Roadmap for Asia and the Pacific Fact Sheet) .

2.1 Στοιχεία υβριδικών συστημάτων

Ένα «Υβριδικό Σύστημα Ενέργειας» (ΥΣ) αποτελείται από μία ανανεώσιμη και μία συμβατική πηγή ενέργειας ή περισσότερες από μία ανανεώσιμη συμπεριλαμβάνοντας ή μη συμβατική πηγή ενέργειας και μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα ή να συνδεθεί σε υπάρχον δίκτυο (ELMA, 2005). Τα υβριδικά συστήματα γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλή για την αυτόνομη παραγωγή ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές, λόγω των προόδων σε τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας και σε ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Τα παραπάνω χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της ανεξέλεγκτης ενέργειας, που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές σε χρήσιμη ισχύ. Το αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό των συστημάτων είναι ότι συνδυάζει δύο ή περισσότερες τεχνολογίες παραγωγής ΑΠΕ, για να αξιοποιηθούν στο μέγιστο τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους και να αποκτήσουν υψηλότερη αποδοτικότητα από αυτήν που θα είχαν από μία μόνο πηγή ενέργειας. Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να αντιμετωπίσουν περιορισμούς όσον αφορά στην ευελιξία καυσίμου,

την αποδοτικότητα, την αξιοπιστία, τις εκπομπές αερίων και την οικονομία. (Prabodh Bajrai, Vaishalee Dash, 2012)

Οι φωτοβολταϊκές (Φ/Β) συστοιχίες και αιολικά συστήματα αποτελούν τις πρωτεύουσες πηγές ενέργειας σε ένα ΥΣ. Η ενέργεια αυτή υπάρχει σε αφθονία, αλλά είναι διαλείπουσα στη φύση και στη τοποθεσία. Για να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα, εφεδρικές συσκευές ενέργειας (δευτερεύουσες πηγές) εισάγονται στο σύστημα για να καλύψουν την έλλειψη ισχύος και να φροντίσουν τις παροδικές απαιτήσεις φορτίου. Η αιολική ενέργεια και τα φωτοβολταϊκά πάνελ εξαρτώνται από την τοποθεσία και δεν ρυπαίνουν, καθώς αποτελούν πιθανές πηγές εναλλακτικής ενέργειας. Παρ' όλα αυτά, τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση φορτίου μόνο για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο είναι διαθέσιμη ηλιοφάνεια, αντίστοιχα και τα συστήματα ανέμου με τον άνεμο. Ως εκ τούτου, τα ΥΣ περιλαμβάνουν κατά κανόνα εφεδρικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, για την κάλυψη φορτίου ζήτησης ανά πάσα στιγμή. Τα στοιχεία των εφεδρικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι είτε κυψέλη καυσίμου (Fuel Cells), είτε μπαταρία ή γεννήτρια ντίζελ (Diesel Generator) ή υπερ-πυκνωτής (Ultra-Capacitor) ή συνδυασμός αυτών των πηγών (Nayar, 1997). Οι διάφορες πιθανές διαμορφώσεις ΥΣ μπορούν να σχεδιαστούν με βάση τη διαθεσιμότητα των πρωτογενών πηγών ενέργειας (Φ/Β και/ή ανέμου) επιτόπου. Οι εφεδρικές πηγές ενέργειας είναι συμπληρωματικής φύσεως, λόγω της διαφοράς στο κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας, στα χαρακτηριστικά ισχύος και στην ευελιξία καυσίμου.

2.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στα υβριδικά συστήματα

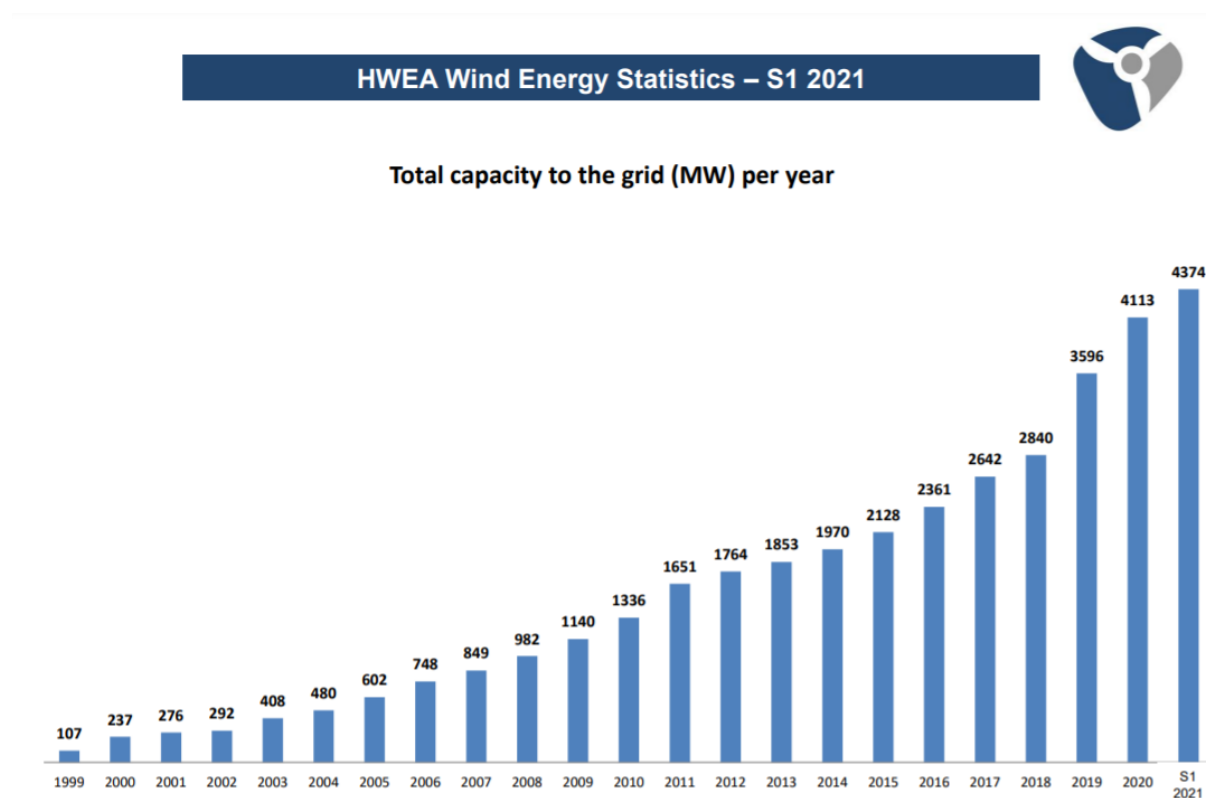
2.2.1 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας. Ο άνεμος χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας κινητική ενέργεια που δημιουργείται από τον αέρα σε κίνηση. Αυτό μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας ανεμογεννήτριες ή συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας. Η χρήση της αυξάνεται παγκοσμίως, επειδή το κόστος μειώνεται. Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην ξηρά και υπεράκτια αυξήθηκε 75 φορές τις τελευταίες δύο δεκαετίες, μεταπηδώντας από 7.5 GW το 1997 σε περίπου 564 GW έως το 2018. Πολλά μέρη του κόσμου έχουν ισχυρές ταχύτητες ανέμου, αλλά οι καλύτερες τοποθεσίες για την παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι συχνά απομακρυσμένες. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια η υπεράκτια αιολική ενέργεια προσφέρει τεράστιες δυνατότητες. (IRENA)

Οι ανεμογεννήτριες πρωτοεμφανίστηκαν πριν από περισσότερο από έναν αιώνα. Μετά την εφεύρεση της ηλεκτρικής γεννήτριας τη δεκαετία του 1830, οι μηχανικοί άρχισαν να προσπαθούν να αξιοποιήσουν την αιολική ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή αιολικής ενέργειας πραγματοποιήθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο και στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1887 και το 1888, αλλά η σύγχρονη αιολική ενέργεια θεωρείται ότι

αναπτύχθηκε πρώτη φορά στη Δανία, όπου κατασκευάστηκαν ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα το 1891. Το 1897 ξεκίνησε να λειτουργεί μία ανεμογεννήτρια 22.8 μέτρων. (IRENA)

Η Ελλάδα απολαμβάνει έναν αξιοσημείωτο αιολικό πόρο με τοπικές μέσες ταχύτητες ανέμου (στο ύψος του ρότορα) που συχνά ξεπερνούν τα 8 – 10 m/s, ειδικά στα νησιά του Αιγαίου και στις κορυφογραμμές της ηπειρωτικής χώρας (Norton Rose Fulbright, 2016). Το 1982 εγκαθίσταται το πρώτο εμπορικό αιολικό πάρκο της Ευρώπης στην Κύθνο. Έκτοτε, η χώρα έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο στην προώθηση και υποστήριξη των ΑΠΕ. Σύμφωνα με την ΕΛΕΤΑΕΝ, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στο δίκτυο για το 2021 ανέρχεται σε 4374 MW, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς στο Δίκτυο 1999 – 2021 (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ,2021)

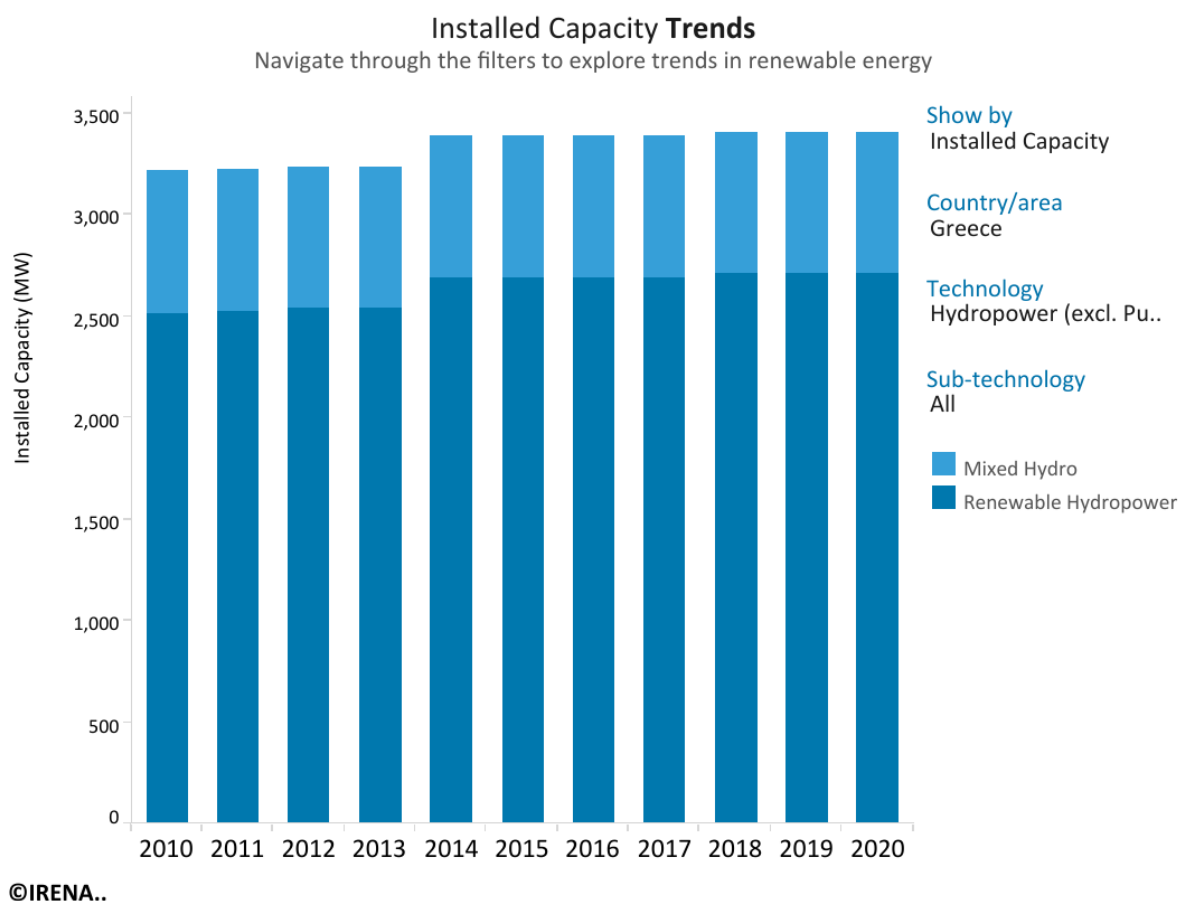
Η αιολική ενέργεια είναι μία καθαρή και ανανεώσιμη ενέργεια. Σε αντίθεση με τον άνθρακα, το φυσικό αέριο ή το πετρέλαιο, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο δεν έχει ως αποτέλεσμα εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Ενώ υπάρχουν ορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την κατασκευή μεγάλων αιολικών πάρκων, μόλις λειτουργήσουν, οι ίδιες οι ανεμογεννήτριες δεν απαιτούν καύση ορυκτών καυσίμων για τη λειτουργία τους. Επιπλέον, ο άνεμος υπάρχει άφθονος στο περιβάλλον, σε σχέση με τους παραδοσιακούς πόρους ορυκτών καυσίμων που αναπληρώνονται πολύ αργά. Ταυτόχρονα, αυτό σημαίνει ότι η αποτελεσματικότητα μίας ανεμογεννήτριας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από τον καιρό. Έτσι, μπορεί να είναι δύσκολο να προβλεφθεί ακριβώς πόση ηλεκτρική ενέργεια θα παράγει μία ανεμογεννήτρια με την πάροδο του χρόνου. Εάν οι

ταχύτητες ανέμου είναι πολύ χαμηλές οποιαδήποτε μέρα, ο ρότορας του στροβίλου δεν θα περιστρέφεται. Κάθε ανεμογεννήτρια διαθέτει ένα διάγραμμα από τον κατασκευαστή της που ονομάζεται καμπύλη ισχύος. Μέσω της καμπύλης αυτής μπορεί να διακριθεί η ελάχιστη ταχύτητα ανέμου στο ύψος του ρότορα, κάτω από την οποία δεν παράγεται ηλεκτρική ενέργεια, και η μέγιστη ταχύτητα ανέμου πάνω από την οποία η ανεμογεννήτρια παύει να λειτουργεί.

2.2.2 Υδροηλεκτρική ενέργεια

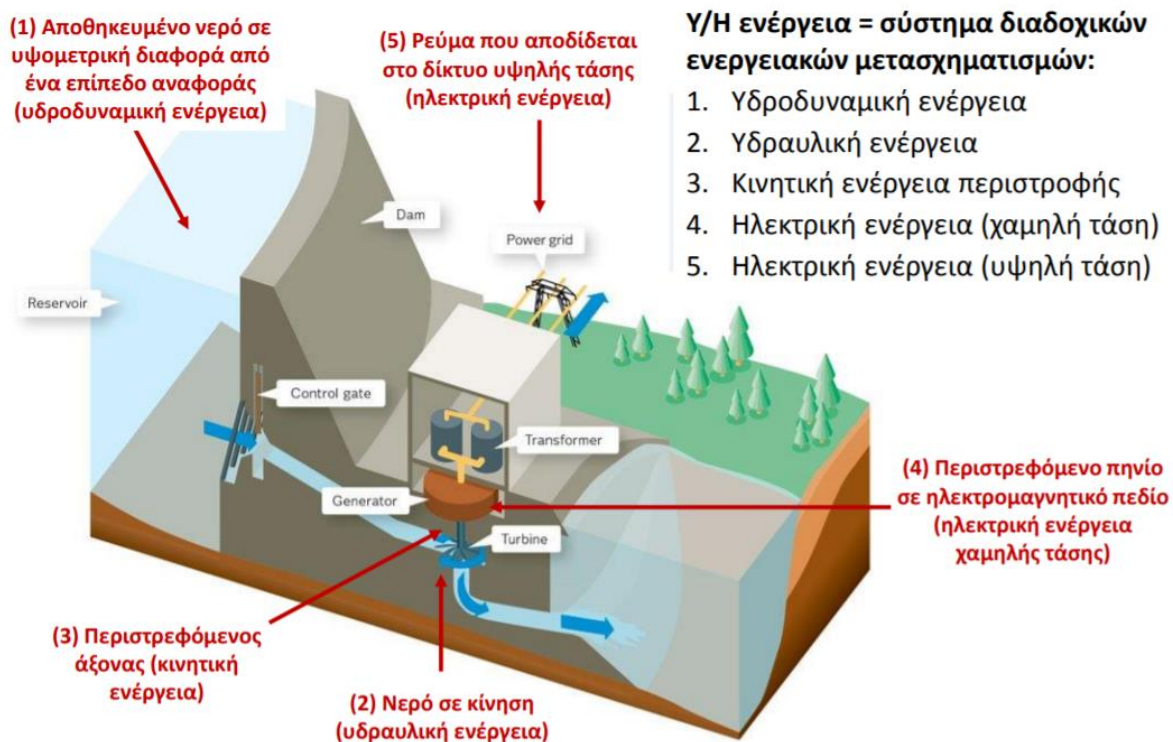
Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η ενέργεια που προέρχεται από τρεχούμενο νερό. Πριν από περισσότερα από 2000 χρόνια, οι αρχαίοι Έλληνες χρησιμοποιούσαν τη δύναμη του νερού για να στρέφουν τροχούς για την άλεση σιτηρών. Σήμερα, είναι ένα από τα πιο οικονομικά αποδοτικά μέσα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και είναι συχνά η προτιμώμενη μέθοδος, όπου μπορεί να εφαρμοστεί. Στη Νορβηγία, για παράδειγμα, το 99% της ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από υδροηλεκτρική ενέργεια. Η υδροηλεκτρική ενέργεια αναμένεται να παραμείνει η μεγαλύτερη πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στον κόσμο και να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στην απαλλαγή από τον άνθρακα του συστήματος ισχύος και στη βελτίωση της ευελιξίας του συστήματος. (IEA, 2020)

Η βασική αρχή της υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι η χρήση νερού για την κίνηση στροβίλων. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί αποτελούνται από δύο βασικές διαμορφώσεις: με φράγματα και δεξαμενές ή χωρίς. Τα φράγματα υδροηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη δεξαμενή μπορούν να αποθηκεύσουν νερό για μικρές ή μεγάλες περιόδους για να καλύψουν την αιχμή της ζήτησης. Οι εγκαταστάσεις μπορούν επίσης να χωριστούν σε μικρότερα φράγματα για διαφορετικούς σκοπούς, όπως νυχτερινή ή ημερήσια χρήση, εποχιακή αποθήκευση ή αναστρέψιμες μονάδες άντλησης αποθήκευσης, τόσο για άντληση όσο και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υδροηλεκτρική ενέργεια χωρίς φράγματα και δεξαμενές σημαίνει παραγωγή σε μικρότερη κλίμακα, συνήθως από εγκατάσταση σχεδιασμένη να λειτουργεί σε ποτάμι χωρίς να παρεμβαίνει στη ροή του. Για το λόγο αυτό, πολλοί θεωρούν την υδροηλεκτρική μικρής κλίμακας μια πιο φιλική προς το περιβάλλον επιλογή. (IRENA) Στην παρακάτω Εικόνα 2 παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ισχύς υδροηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα από το 2010 έως το 2020.



Εικόνα 2: Εγκατεστημένη Ισχύς Υδροηλεκτρικής Ενέργειας (Πηγή: IRENA, 2021)

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί με δεξαμενή βασίζονται στην αποθήκευση νερού σε δεξαμενή. Αυτό παρέχει την ευελιξία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τη ζήτηση και μειώνει την εξάρτηση από τη μεταβλητότητα των εισροών. Οι πολύ μεγάλες δεξαμενές μπορούν να διατηρήσουν μήνες και χρόνια μέσω εισροών και μπορούν επίσης να παρέχουν αντιπλημμυρικές υπηρεσίες και υπηρεσίες άρδευσης. Οι αντλητικές μονάδες αποθήκευσης χρησιμοποιούν νερό που αντλείται από μια χαμηλότερη δεξαμενή σε μία άνω δεξαμενή, όταν η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας υπερβαίνει τη ζήτηση ή μπορεί να παραχθεί με χαμηλό κόστος. Όταν η ζήτηση υπερβαίνει τη στιγμιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η ηλεκτρική ενέργεια έχει υψηλή τιμή, το νερό απελευθερώνεται για να ρέει από την άνω δεξαμενή μέσω στροβίλων για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η αντλούμενη αποθήκευση αντιπροσωπεύει σήμερα τη συντριπτική πλειοψηφία της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. (International Energy Agency) Στην παρούσα εργασία, αφορά σε ένα υδροηλεκτρικό έργο με αποθήκευση ενέργειας μέσω της αντλησιοταμίευσης.



Εικόνα 3: Χαρακτηριστικά Υδροηλεκτρικών Έργων (Πηγή: Ευστρατιάδης κ.α., 2019)

Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, η χρήση νερού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν απελευθερώνει επιβλαβείς ρύπους στον αέρα ή στο νερό. Επιπλέον, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί δεν καταναλώνουν ούτε μολύνουν το νερό καθώς λειτουργούν, καθιστώντας της υδροηλεκτρική ενέργεια μία πλήρως ανανεώσιμη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Καθώς ο κύκλος του νερού τρέχει φυσικά, η υδροηλεκτρική ενέργεια θα είναι πάντα ένας βιώσιμος τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Βέβαια πολλοί υδροηλεκτρικοί σταθμοί είναι μεγάλα έργα υποδομής που περιλαμβάνουν την κατασκευή φράγματος, ταμιευτήρα και αγωγούς, ώστε να απαιτούνται έτσι σημαντικές οικονομικές επενδύσεις. Ενώ μία μεγάλη εγκατάσταση υδροηλεκτρικής ενέργειας μπορεί συχνά να παρέχει χαμηλού κόστους ηλεκτρική ενέργεια για 50 έως 100 χρόνια μετά την κατασκευή της, το αρχικό κόστος κατασκευής μπορεί να είναι μεγάλο. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι κατάλληλοι χώροι για ταμιευτήρες σπανίζουν με την πάροδο του χρόνου, σημαίνουν ότι το κόστος κατασκευής υδροηλεκτρικών σταθμών μεγάλης κλίμακας μπορεί να συνεχίσει να αυξάνεται.

2.3 Αποθήκευση ενέργειας

2.3.1 Γενικά στοιχεία

Η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί μία εκ των επιλογών για την παροχή ευελιξίας σε ένα ενεργειακό σύστημα. Ωστόσο, η ελκυστικότητά της πρέπει να αξιολογηθεί σε σχέση με άλλα μέτρα, όπως η ανταπόκριση στη ζήτηση ή η αναβάθμιση των σταθμών παραγωγής ενέργειας. Τα υβριδικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συνδυάζουν δύο ή περισσότερες

τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, με συμπληρωματικά χαρακτηριστικά για την επίτευξη μίας βέλτιστης λύσης που δεν θα μπορούσε να προσφερθεί από μία μόνο τεχνολογία. Σε ένα υβριδικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, συνήθως ο ένας χώρος αποθήκευσης είναι υπεύθυνος για την κάλυψη ζήτησης «υψηλής ισχύος», των παροδικών και γρήγορων φορτίων και ως εκ τούτου χαρακτηρίζεται από γρήγορο χρόνο απόκρισης, υψηλή απόδοση και μεγάλο κύκλο ζωής. Ο άλλος χώρος αποτελεί την αποθήκευση «υψηλής ενέργειας» με χαμηλό ρυθμό αποφόρτισης και χαμηλότερο ενεργειακό κόστος εγκατάστασης. Ένα από τα πλεονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος αποθήκευσης είναι η μείωση του συνολικού επενδυτικού κόστους σε σύγκριση με ένα ενιαίο σύστημα αποθήκευσης, αφού ο δεύτερος χώρος αποθήκευσης καλείται να καλύψει τη μέση ζήτηση ισχύος. Επιπλέον, αυξάνεται η συνολική απόδοση του συστήματος λόγω της λειτουργίας του δεύτερου χώρου αποθήκευσης σε βελτιστοποιημένα σημεία υψηλής απόδοσης και ταυτόχρονα σημεία μείωσης των δυναμικών απωλειών, καθώς και η συνολική διάρκεια ζωής του έργου. (Thilo Bocklisch, 2015)

Με τις εγκαταστάσεις ηλιακής και αιολικής ενέργειας να αυξάνονται συνεχώς κάθε χρόνο, κρίνεται αναγκαία η εξέταση καλύτερων τρόπων ενσωμάτωσης ΑΠΕ στο δίκτυο. Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μία βασική επιλογή που διατίθεται για τη διαχείριση της μεταβλητότητας και την εξασφάλιση παροχής ενέργειας όλο το 24ωρο. Η μείωση του κόστους και η βελτίωση της χωρητικότητας καθιστούν τις μπαταρίες και άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης όλο και πιο πρακτικές για την αναβάθμιση υφιστάμενων συστημάτων ισχύος.

Βραχυπρόθεσμα, η αποθήκευση μέσω μπαταριών μπορεί να βοηθήσει στη μετάβαση από τις γεννήτριες με βάση το ντίζελ, σε ανανεώσιμες επιλογές για απομονωμένα συστήματα, όπως σε νησιά ή σε απομακρυσμένες περιοχές. Για μεγαλύτερα συστήματα, η υδροηλεκτρική ενέργεια με αντλία αποθήκευσης παραμένει μια βασική τεχνολογία που υποστηρίζει την ενσωμάτωση ΑΠΕ. Μακροπρόθεσμα, η σύζευξη τεχνολογιών αποθήκευσης με ηλιακά Φ/Β πάνελ ή ανεμογεννήτριες θα μπορούσε να διευκολύνει σημαντικά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και άρα την τοπική τροφοδοσία ρεύματος.

2.3.2 Τύποι αποθήκευσης ενέργειας

Η κυρίαρχη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας σήμερα είναι η μέθοδος της αντλησιοταμίευσης. Αποτελεί μία ώριμη τεχνολογία με βαθμό απόδοσης έως και 80% (The Green Tank, 2020). Όπως αναφέρεται παραπάνω, η υδροηλεκτρική ενέργεια περιλαμβάνει την άντληση νερού από χαμηλότερα υψόμετρα σε υψηλότερα, σε περιόδους χαμηλής ενεργειακής ζήτησης. Το νερό αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή και σε περιόδους υψηλής ενεργειακής ζήτησης απελευθερώνεται, μέσω στροβίλων, για τη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας. Η απόκριση του συστήματος είναι άμεση και καλύπτονται τα κενά στη ζήτηση ενέργειας (World Economic Forum, 2021). Βέβαια, λόγω της απαραίτητης κατασκευής

ταμιευτήρων ή/και φραγμάτων, η τοποθεσία στην οποία μπορεί να δημιουργηθεί ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελεί σύνθετο θέμα.

Ένας άλλος τρόπος αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν οι μπαταρίες. Οι μπαταρίες υπάρχουν από το 1800 και μετατρέπουν αποθηκευμένη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Με τις εξελίξεις στην τεχνολογία και τη μείωση των τιμών τους, αυξάνονται συνεχώς οι εγκαταστάσεις μπαταριών δικτύου που μπορούν να αποθηκεύσουν ολόένα και μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας (World Economic Forum, 2021). Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε κινητά τηλέφωνα ή σε ηλεκτροκίνητα αμάξια περιέχουν ιόντα λιθίου. Αυτού του είδους οι μπαταρίες μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε μέσα στο δίκτυο και παρέχουν ενέργεια πολύ γρήγορα. Η απόκρισή τους είναι ταχύτερη και μπορούν να διαθέτουν έως και τέσσερις ώρες αποθήκευσης ενέργειας, βοηθώντας τα δίκτυα ηλεκτροδότησης να αντιμετωπίσουν ξαφνικές διακοπές στην παραγωγή ενέργειας. Ωστόσο, μακροπρόθεσμα δεν αποτελούν μία οικονομικά βέλτιστη λύση, λόγω της περιορισμένης διάρκειας ζωής τους (Lombard Odier, 2021).

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας χρησιμοποιείται ιδιαίτερα. Περιλαμβάνει την αποθήκευση περίσσειας ενέργειας, συνήθως πλεονάζουσας ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ή απορριπτόμενης θερμότητας, για να χρησιμοποιηθεί αργότερα για θέρμανση, ψύξη ή παραγωγή ενέργειας. Υγρά, όπως νερό, ή στερεά υλικά, όπως άμμος ή πέτρες, μπορούν να αποθηκεύσουν θερμική ενέργεια. Χημικές αντιδράσεις ή αλλαγές στα υλικά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση και απελευθέρωση θερμικής ενέργειας.

Μια από τις νέες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας αποτελεί το υδρογόνο. Η αποθήκευση ενέργειας από υδρογόνο είναι μία διαδικασία κατά την οποία το πλεόνασμα ενέργειας, που δημιουργείται από ΑΠΕ σε περιόδους χαμηλής ενεργειακής ζήτησης, χρησιμοποιείται για την ηλεκτρόλυση, προκειμένου να διαχωριστεί το υδρογόνο. Το παραγόμενο υδρογόνο αποθηκεύεται σε κατάλληλες δεξαμενές. Όταν προκύψει υψηλή ενεργειακή ζήτηση το H_2 διοχετεύεται σε σταθερές κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το υδρογόνο που δημιουργείται μέσω της ηλεκτρόλυσης θεωρείται πολλά υποσχόμενο ως οικονομική επιλογή καυσίμου, καθώς ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) προβλέπει ότι το υδρογόνο που παράγεται από την αιολική ενέργεια θα είναι φθηνότερο από το φυσικό αέριο μέχρι το 2030.

Τα υβριδικά συστήματα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε απομακρυσμένες περιοχές ή νησιά. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάζονται σενάρια αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας είτε με την μέθοδο της αντλησιοταμίευσης, είτε με τις δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου.

2.4 Αφαλάτωση

2.4.1 Γενικά στοιχεία αφαλάτωσης

Ως αφαλάτωση ορίζεται οποιαδήποτε διαδικασία που αφαιρεί περίσσεια αλάτων και μετάλλων από το νερό ή αλλιώς η χημική διαδικασία αλλαγής θαλασσινού νερού σε πόσιμο νερό. Αυτές οι διαδικασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δημοτική, βιομηχανική ή οποιαδήποτε εμπορική χρήση. Στις περισσότερες μεθόδους αφαλάτωσης, προκύπτουν δύο προϊόντα από το νερό που τροφοδοτείται στην διαδικασία αυτή. Το πρώτο είναι το επεξεργασμένο πόσιμο γλυκό νερό, που έχει λιγότερες ποσότητες αλατιού και μετάλλων, και το δεύτερο το συμπύκνωμα ή άλμη, που έχει συγκεντρώσεις αλατιού και ανόργανων συστατικών υψηλότερες από αυτές του αρχικού νερού ζωοτροφών ή του αλμυρού νερού. (Manish Thimmaraju et al., 2018)

Στο σύνολό της η Ελλάδα διαθέτει ένα από τα καλύτερα κατά κεφαλήν αποθέματα νερού στη Μεσόγειο, αλλά οι βροχοπτώσεις της ποικίλλουν πολύ σε ολόκληρη τη χώρα. Ενώ στα δυτικά, τα βουνά μπορούν να έχουν βροχόπτωση 2150 χιλιοστά ετησίως, άλλες περιοχές έχουν μόλις 400 χιλιοστά βροχή, πολύ λιγότερο από ό,τι χρειάζονται για να ικανοποιήσουν την ζήτηση. Το 40% του νερού που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα αντλείται από υπόγειους υδροφορείς, ιδιαίτερα νησιά. Συχνά όμως η άντληση των υπόγειων υδροφορέων γίνεται με γρηγορότερο ρυθμό από αυτόν που χρειάζονται για να αναπληρωθούν φυσικά, με αποτέλεσμα να αποστραγγίζει σταθερά τον υδροφόρο ορίζοντα και να επιτρέπει στο θαλασσινό νερό να εισχωρήσει και να μολύνει ολόκληρη την παροχή. (Heggie J., 2020)

Τα νησιά της Ελλάδας αντιμετωπίζουν το μεγαλύτερο πρόβλημα όσον αφορά στην παροχή νερού, ειδικά κατά την διάρκεια των θερινών μηνών όπου αυξάνεται σημαντικά η ζήτηση σε κάθε περιοχή. Παλαιότερα τα περισσότερα νησιά είχαν πρόσβαση σε νερό μέσω βυτίων νερού ή αλλιώς υδροφόρες, που προέρχονταν από την ηπειρωτική χώρα, μία από τις πιο ακριβές μεταφορές νερού. Την δεκαετία όμως του 1960, μερικά νησιά ξεκίνησαν να διερευνούν την λύση της αφαλάτωσης. Πλέον, η αφαλάτωση αποτελεί την καλύτερη και μακροπρόθεσμη λύση νερού για τα νησιά.

2.4.2 Αντίστροφη ώσμωση (RO)

Η αφαλάτωση είναι μία ασφαλής πηγή νερού, που δεν εξαρτάται από την βροχή. Η αφαλάτωση θαλασσινού νερού είναι η απομάκρυνση αλατιού και ακαθαρσιών από το θαλασσινό νερό για την παραγωγή γλυκού νερού. Οι μονάδες αφαλάτωσης, που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούν την διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης (Reverse Osmosis – RO) (Water corporation). Το θαλασσινό νερό αντλείται στη μονάδα αφαλάτωσης από τον ωκεανό και περνάει από διήθηση πριν από την επεξεργασία, για να αφαιρέσει τα περισσότερα από τα μεγάλα και μικρά σωματίδια. Η αντίστροφη ώσμωση είναι μία διαδικασία όπου απομεταλλώνεται ή απιονίζεται το νερό, διοχετεύοντάς το υπό πίεση μέσω μίας ημιδιαπερατής μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης.

Η ώσμωση είναι ένα φυσικό φαινόμενο και μία από τις σημαντικότερες διαδικασίες στη φύση. Είναι μία διαδικασία όπου το ασθενέστερο αλατούχο διάλυμα τείνει να μεταναστεύσει σε ένα ισχυρό αλατούχο διάλυμα. Παραδείγματα ώσμωσης είναι οι ρίζες των φυτών που απορροφούν νερό από το έδαφος. Ενώ η ώσμωση συμβαίνει φυσικά, για να αντιστραφεί η διαδικασία της ώσμωσης πρέπει να εφαρμοστεί ενέργεια στο πιο αλατούχο διάλυμα. Μία μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης είναι ημιπερατή και επιτρέπει τη διέλευση μορίων νερού κατακρατώντας την πλειοψηφία των διαλυμένων αλάτων, οργανικών, βακτηρίων και πυρογόνων. Για να συμβεί αυτό, το νερό πρέπει να διοχετευτεί υπό πίεση μέσα από την μεμβράνη προκειμένου να αφαλατωθεί, διαχωρίζοντας έτσι το καθαρό νερό και τους ρύπους. Η ποσότητα πίεσης που απαιτείται εξαρτάται από τη συγκέντρωση άλατος του νερού τροφοδοσίας. Όσο πιο συμπυκνωμένο είναι το νερό που παρέχεται στη μονάδα, τόσο περισσότερη πίεση απαιτείται για να ξεπεραστεί η ωσμωτική πίεση. (Puretec Industrial Water, 2021)

Τα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης χρησιμοποιούν διασταυρούμενο φιλτράρισμα και όχι τυπικό φιλτράρισμα, όπου οι μολυσματικοί παράγοντες συλλέγονται μέσα στο φίλτρο. Με διασταυρούμενο φιλτράρισμα, το διάλυμα διέρχεται από το φίλτρο το οποίο καταλήγει σε δύο εξόδους: το φιλτραρισμένο νερό είναι η πρώτη έξοδος και το μολυσμένο νερό η δεύτερη. Για να αποφευχθεί η συσσώρευση ρύπων, το φιλτράρισμα διασταυρούμενης ροής επιτρέπει στο νερό να παρασύρει την συσσώρευση μολυσματικών ουσιών και επίσης επιτρέπει την ύπαρξη τυρβώδους ροής για να διατηρήσει καθαρή την επιφάνεια της μεμβράνης. (Puretec Industrial Water, 2021)

2.4.3 Αφαλάτωση με ΑΠΕ

Οι ΑΠΕ για χρήση σε διαδικασίες αφαλάτωσης περιλαμβάνουν την αιολική ενέργεια, τα Φ/Β συστήματα, υβριδικό Φ/Β σύστημα ανέμου και τη γεωθερμία. Τα συστήματα αφαλάτωσης, που βασίζονται σε ΑΠΕ, εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει θερμικές διαδικασίες που προέρχονται από θερμότητα που παράγεται από τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει διαδικασίες που λειτουργούν με ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ. Επί του παρόντος, η αντίστροφη ώσμωση είναι η πιο αποτελεσματική τεχνολογία αφαλάτωσης νερού που δεν απαιτεί θερμική ενέργεια. Η κατανάλωση ισχύος για αυτή τη διαδικασία κυμαίνεται από 2 έως 5 kWh/m³ ανάλογα τον τύπο νερού που επιλέγεται για αφαλάτωση, δηλαδή υφάλμυρο νερό ή θαλασσινό νερό. Η αφαλάτωση με ΑΠΕ είναι μία τεχνολογία για την παραγωγή πόσιμου νερού χωρίς να αφήνει ίχνη άνθρακα.

Η πιο διαδεδομένη ΑΠΕ για την τροφοδότηση μονάδων αφαλάτωσης με χαμηλή ισχύ, έπειτα από την ηλιακή ενέργεια, είναι η αιολική ενέργεια. Ιδιαίτερα για τις παράκτιες περιοχές όπου υπάρχουν σημαντικοί αιολικοί πόροι, η τεχνολογία των ανεμογεννητριών και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μία εμπορικά ώριμη τεχνολογία. Οι διαδικασίες αφαλάτωσης, που χρησιμοποιούν αντίστροφη ώσμωση που κινείται από αιολική ενέργεια,

μπορούν να λειτουργήσουν σε νησιωτικές περιοχές και σε συστήματα που συνδέονται στο δίκτυο ηλεκτροδότησης.

3.Περιοχή μελέτης

3.1 Γενικά στοιχεία

Η Λήμνος ανήκει στο Νομό Λέσβου και είναι το όγδοο μεγαλύτερο νησί της Ελλάδας και τέταρτο σε μήκος ακτών. Βρίσκεται στο βόρειο Αιγαίο, στο Θρακικό πέλαγος, ανάμεσα στο Άγιον Όρος, τη Σαμοθράκη, την Ίμβρο και τη Λέσβο. Μαζί με τον Άγιο Ευστράτιο αποτελούν την επαρχία Λήμνου του νομού Λέσβου. Πρωτεύουσα και κύριο λιμάνι της Λήμνου είναι η Μύρινα, που πήρε το όνομα της γυναίκας του πρώτου βασιλιά του νησιού, του Θόαντα. Ως το 1955, η Μύρινα ονομαζόταν Κάστρο, ονομασία που επικράτησε κατά την ύστερη βυζαντινή περίοδο και άτυπα ακόμα έτσι αποκαλείται από τους παλιότερους Λημιούς.

Η λέξη Λήμνος κατά μία εκδοχή (των φοινικιστών) είναι φοινικική, που σημαίνει λευκή, άσπρη, λαμπερή, που προήλθε ίσως από την εικόνα που παρουσιάζει το νησί, ιδιαίτερα κατά τον χειμώνα, όπου οι άκρες των αφρισμένων κυμάτων καλύπτουν τις ακτές του με τον λευκό τους αφρό ή ίσως επειδή είναι χαμηλή, χωρίς ψηλά βουνά, μόνο με λόφους, γυμνούς από δένδρα δίνοντας στον επισκέπτη που την πλησιάζει μία τέτοια αίσθηση. Ο F. G. Welcker συσχετίζει το όνομα «Λήμνος» με την αρχ. λέξη «λήιον = σπαρμένο χωράφι έτοιμο για θερισμό».

Από την ίδια ρίζα με το λήιον προέρχεται και η λέξη «ληίς = κοπάδι» και δεν είναι απίθανο από εκεί να προήλθε το θέμα λη- του «Λήμνος», σαν πρώτο συνθετικό της λέξης, το δεύτερο συνθετικό θα πρέπει ν' αναζητηθεί, στο θέμα μη- της αρχαιοελληνικής λέξης «μήλον = πρόβατο». Έτσι, με την προσθήκη της τοπωνυμικής κατάληξης -ος, σχηματίστηκε ο τύπος «λή-μη-ος = τόπος με κοπάδια προβάτων», από όπου εύκολα προέκυψε το «Λήμνος», επειδή η Λήμνος είναι το πεδινότερο νησί του Αιγαίου με μεγάλη παραγωγή αγροτικών και κτηνοτροφικών προϊόντων από την αρχαιότητα. (Δήμος Λήμνου, 2021)



Εικόνα 4: Χάρτης Λήμνου (Πηγή: ArcGIS Pro)

3.2 Μορφολογικά δεδομένα

Η Λήμνος έχει συνολική έκταση 476 km² και μήκος ακτών 263 km. Σε αντίθεση με άλλα μεγάλα νησιά του Αιγαίου, οι υψομετρικές διαφορές και τα μέγιστα υψόμετρα είναι μικρά. Αυτό οφείλεται κυρίως στην απουσία ασβεστολιθικών πετρωμάτων από το μεγαλύτερο μέρος του νησιού και στην κυριαρχία των ηφαιστειακών, σχιστολιθικών και ψαμμιτικών πετρωμάτων.

Το νησί μπορεί να διακριθεί σε δύο κύρια τμήματα, το ανατολικό και το δυτικό, τα οποία συνδέονται με έναν ισθμό, πλάτους 3.5 χλμ περίπου. Το ανατολικό τμήμα του νησιού είναι επίμηκες, με διεύθυνση άξονα ΒΑ-ΝΔ, έχει μήκος 30 χλμ και πλάτος 5 χλμ περίπου. Ο ψηλότερος λόφος της Λήμνου είναι η κορυφή της Βίγλας, υψομέτρου 430 μ., που βρίσκεται στο ΒΔ τμήμα του νησιού. (Terra lemnia, 2020)

Από το 1998 ως το 2010, το νησί χωρίστηκε σε 4 δήμους με 32 δημοτικά διαμερίσματα σύμφωνα με το σχέδιο Καποδίστριας. Με τη νέα διοικητική διαίρεση που προβλέπει το Σχέδιο Καλλικράτης, από το 2011 όλοι οι δήμοι του νησιού εντάσσονται στο νέο Δήμο Λήμνου ως δημοτικές ενότητες. Ο Δήμος Λήμνου μαζί με το Δήμο Αγίου Ευστρατίου εντάχθηκαν στην Περιφερειακή Ενότητα Λήμνου (τέως Επαρχείο Λήμνου), που ανήκει στην Περιφέρεια Βορείου Αιγαίου.

3.3 Γεωλογικά δεδομένα

Γεωτεκτονικά, η Λήμνος δεν ανήκει σε καμία γεωτεκτονική ζώνη εξαιτίας της κάμψης των γεωτεκτονικών ζωνών στο χώρο του Αιγαίου κατά Α-Δ. Η στρέψη κατά Α-Δ και στην συνεχεία η κάμψη κατά ΒΑ-ΝΔ οφείλονται στη διάταξη των μικροπλακών στην περιοχή του ΒΑ Αιγαίου, η οποία με τη σειρά της οφείλεται στην επώθηση της Αιγιακής μικροπλάκας πάνω στην Αφρικανική, ακολουθώντας μια βορειοανατολική κατεύθυνση προς την περιοχή της Ελληνικής τάφρου. Η Λήμνος έχει την ιδιαιτερότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα νησιά του Αιγαίου ότι τα παλαιότερα πετρώματα της είναι σχετικά νέα και αποτελούνται από Ηωκαινικούς έως Ολιγοκαινικούς ψαμμίτες και μάργες. Τα ηφαιστειακά πετρώματα που αναπτύσσονται σ' όλη την έκταση του νησιού είναι λάβες, ηφαιστειακοί τόφφοι και πλουτώνια πετρώματα. Γεωλογικά, η Λήμνος μπορεί να χωριστεί σε 2 ενότητες: την κατώτερη ενότητα η οποία αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος των ιζηματογενών πετρωμάτων την νησιού και την ανώτερη ενότητα της οποίας υπολείμματα δημιουργούν κάποιους μικρούς λόφους από πλουτώνια και ηφαιστειακά πετρώματα. (Ρουμελιώτη, 2013)

3.4 Σεισμικότητα

Οι τάφροι του Βορείου Αιγαίου και της Σκύρου οριοθετούν αντίστοιχα την βορειοδυτική και νοτιοανατολική πλευρά ενός τεκτονικού τεμάχους, σχήματος τραπεζίου με τη μεγάλη βάση, στα βορειοδυτικά. Βορειοδυτικά της νήσου Λήμνου, η τάφρος του Βορείου Αιγαίου αλλάζει διεύθυνση και από ΑΒΑ-ΔΝΔ γίνεται ΒΑ-ΝΔ. Το σημείο αυτό λειτουργεί ως άρθρωση, εκατέρωθεν της οποίας οι περιοχές διαφοροποιούνται. Παρ' όλα αυτά, δεν παρατηρείται σεισμική δραστηριότητα νοτίως της τάφρου του Βορείου Αιγαίου μεταξύ των νήσων Γιούρα (Βόρειες Σποράδες), Αγίου Ευστρατίου και Λήμνου, καθώς και ανατολικά της Λήμνου μεταξύ των νησιών Ίμβρου και Τενέδου και ανατολικότερα στον Ελλήσποντο μέχρι τον Γρανικό ποταμό. (Μπαράκου et al., 2001)

Σημαντικός σεισμός εκδηλώθηκε στις 24/05/2014 μεγέθους 6.3 στην κλίμακα Ρίχτερ, στο θαλάσσιο χώρο μεταξύ Σαμοθράκης και Λήμνου. Στη συνέχεια, ακολούθησαν μετασεισμοί μεγέθους 4 έως 5 στην κλίμακα Ρίχτερ στο βόρειο Αιγαίο, στο τόξο που εκτείνεται από την Χαλκιδική έως τα τουρκικά παράλια. (in.gr, 2014)

3.5 Δημογραφικά στοιχεία

Σύμφωνα με την τελευταία απογραφή του πληθυσμού της χώρας, η Λήμνος αποτελείται από 17000 μόνιμους κατοίκους. (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

Πίνακας 1: Απογραφή Πληθυσμού Λήμνου (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

Δημοτική Ενότητα	Απογραφή 1991	Απογραφή 2001	Απογραφή 2011
Δημοτική ενότητα Μύρινας	7062	7602	8006
Δημοτική ενότητα Ατσικής	3027	2727	2535
Δημοτική ενότητα Μούδρου	4747	4518	3925
Δημοτική ενότητα Νέας Κούταλης	2876	2698	2526

Δήμος Λήμνου (Σύνολο δημοτικών ενοτήτων)	17712	17545	16992
Δήμος Αγίου Ευστρατίου	251	307	270
Περιφερειακή ενότητα Λήμνου	17963	17852	17262

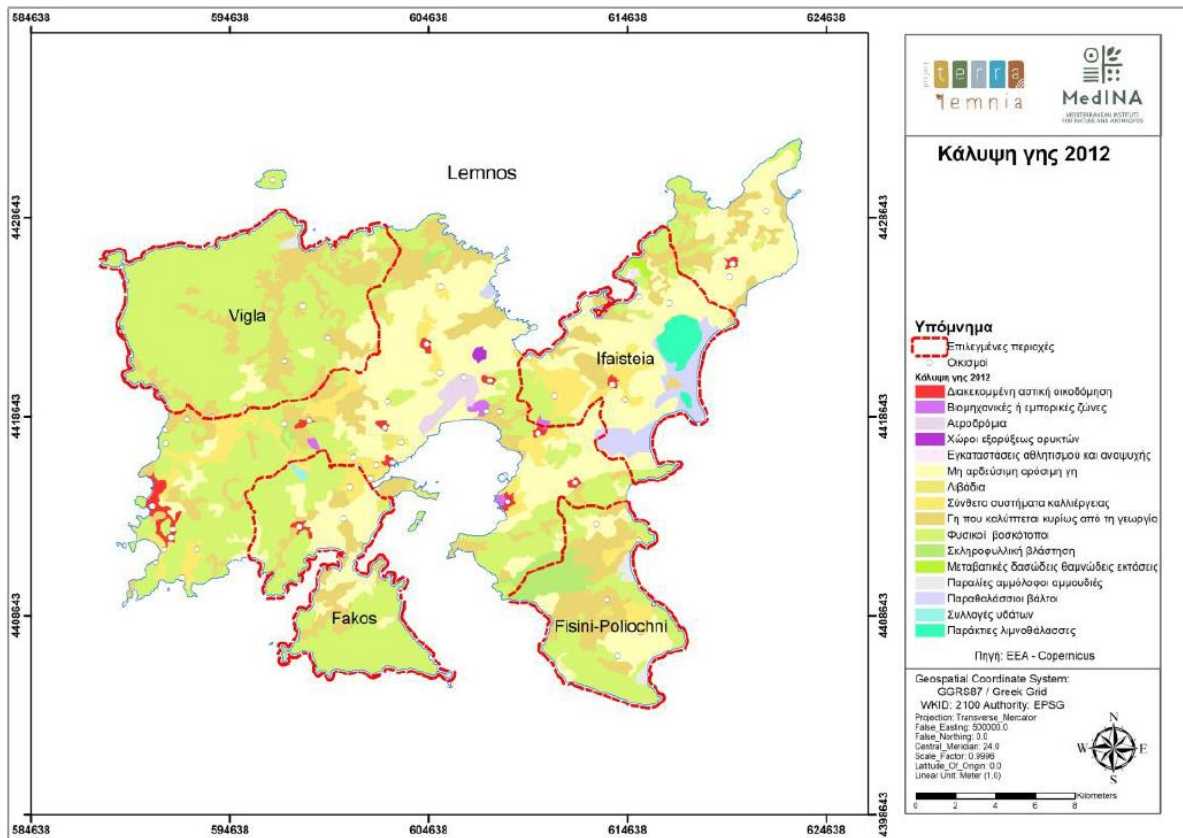
3.6 Χρήσεις γης

Για τις χρήσεις γης στην περιοχή της Λήμνου, χρησιμοποιούνται δεδομένα από την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία (2004), τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 με τα αντίστοιχα στρέμματα και ποσοστά κάλυψης που καταλαμβάνουν.

Πίνακας 2: Χρήσεις Γης Λήμνου (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ, 2004)

Χρήσεις γης	Στρέμματα	Ποσοστό
Αρόσιμη γη	159000	33.91%
Μόνιμες καλλιέργειες	400	0.01%
Βοσκότοποι - Μεταβατικές δασώδεις/ θαμνώδεις εκτάσεις	300	0.00%
Βοσκότοποι - Συνδυασμοί θαμνώδους και/ή ποώδους βλάστησης	129400	27.54%
Βοσκότοποι - Εκτάσεις με αραιή ή καθόλου βλάστηση	29600	6.30%
Ετερογενείς γεωργικές περιοχές	56600	12.05%
Δάση	0	0.00%
Μεταβατικές δασώδεις - θαμνώδεις εκτάσεις	380	0.01%
Συνδυασμοί θαμνώδους και/ή ποώδους βλάστησης	57800	12.30%
Εκτάσεις με αραιή ή καθόλου βλάστηση	10900	2.32%
Εκτάσεις που καλύπτονται από νερά	14200	3.02%
Τεχνητές εκτάσεις	7900	1.68%

Επιπλέον, στην Εικόνα 5 παρατίθεται και ο χάρτης χρήσεων γης του νησιού κατά Corine 2012. (Terra Lemnia, 2020)



Εικόνα 5: Χάρτης Χρήσεων Γης Λήμνου κατά Corine 2012 (Πηγή: Terra Lemnia, 2020)

3.7 Προστατευόμενες περιοχές (Natura 2000)

Το Ευρωπαϊκό οικολογικό δίκτυο Natura 2000 είναι ένα δίκτυο ζωνών προστασίας της φύσης, που εκτείνεται σε ολόκληρη την Κοινότητα και έχει ως στόχο να διασφαλίσει τη μακροπρόθεσμη διατήρησή των πιο πολύτιμων και των πλέον απειλούμενων ειδών και ενδιαιτημάτων της σε ικανοποιητικό επίπεδο.

Το Δίκτυο Natura 2000 αποτελεί ένα Ευρωπαϊκό Οικολογικό Δίκτυο περιοχών, οι οποίες φιλοξενούν φυσικούς τύπους οικοτόπων και οικοτόπους ειδών, που είναι σημαντικοί σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Αποτελείται από δύο κατηγορίες περιοχών:

- τις «Ζώνες Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ)» (Special Protection Areas – SPA) για την Ορνιθοπανίδα, όπως ορίζονται στην Οδηγία 79/409/ΕΚ «για τη διατήρηση των άγριων πτηνών»
- τους «Τόπους Κοινοτικής Σημασίας (ΤΚΣ)» (Sites of Community Importance – SCI) όπως ορίζονται στην Οδηγία 92/43/ΕΟΚ. Για τον προσδιορισμό των ΤΚΣ λαμβάνονται υπόψη οι τύποι οικοτόπων και τα είδη των Παραρτημάτων I και II της Οδηγίας 92/43/ΕΟΚ καθώς και τα κριτήρια του Παραρτήματος III αυτής. (υπουργείο περιβάλλοντος και ενέργειας)

Σύμφωνα με την Βάση Δεδομένων για την Ελληνική Φύση ΦΙΛΟΤΗΣ (<https://filotis.itia.ntua.gr/>), η Λήμνος περιλαμβάνει μία περιοχή Natura 2000 με κωδικό GR4110001, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6 .



Εικόνα 6: Βιότοπος Natura Λήμνου (Πηγή: <https://filotis.itia.ntua.gr/>)

Πρόκειται για την παράκτια αλμυρή λιμνοθάλασσα Αλυκή και ένα παράκτιο εποχικό, υφάλμυρο έλος την Χορταρολίμνη, οι οποίες βρίσκονται στην ανατολική πλευρά του νησιού, σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Η συνολική έκταση της προστατευόμενης περιοχής ανέρχεται στα 18231.66 ha και η χερσαία έκταση είναι 5288.38 ha. Η πρόσβαση στον υγρότοπο είναι δύσκολη κατά την περίοδο των βροχοπτώσεων. Η Αλυκή καλύπτεται κατά το μεγαλύτερο μέρος του έτους με θαλασσινό νερό, σε αντίθεση με τη Χορταρολίμνη η οποία στερείται νερού κατά το μεγαλύτερο μέρος του έτους. Οι ισχυροί άνεμοι, καθώς και η λειψυδρία, δεν φαίνεται να είναι σημαντικοί παράγοντες για την αλλοίωση του βιότοπου. Σημαντικό κίνδυνο δυστυχώς αποτελεί η οποιαδήποτε ανθρώπινη παρέμβαση, είτε με την μορφή ανεξέλεγκτου κυνηγιού, είτε με την υπέρμετρη εκμετάλλευση της λίμνης Αλυκής για την παραγωγή αλατιού, όποτε αυτό υλοποιείται.

3.8 Ύδρευση και άρδευση περιοχής

Το νησί της Λήμνου ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Νήσων Αιγαίου (EL14). Στον Πίνακα 3 καταγράφονται τα υδατικά συστήματα και ο σκοπός απόληψής τους σύμφωνα με την 1^η αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Νήσων Αιγαίου (EL14).

Πίνακας 3: Υδατικά συστήματα Λήμνου (Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2017)

Υδατικό Σύστημα	Είδος ΥΣ	Σκοπός Απόληψης	Ετήσια Απολήψιμη ποσότητα (10 ⁶ m ³)	Οικολογική κατάσταση/δυναμικό
Καταλακος	Ποτάμι	Κτηνοτροφία	0.01	Μέτρια

Ατσικη	Ποτάμι	Ύδρευση, Κτηνοτροφία	0.02	Καλή
Αυλων Ρ.	Ποτάμι	Ύδρευση, Κτηνοτροφία	0.01	Καλή
Κασπακας Ρ.	Ποτάμι	Κτηνοτροφία	0.005	Καλή
Κατσαϊτη Ρ.	Ποτάμι	Κτηνοτροφία	0	Καλή

Η περιοχή δεν διαθέτει Δημοτικές Επιχειρήσεις Ύδρευσης Αποχέτευσης (ΔΕΥΑ), οπότε ο Δήμος αποτελεί τον πάροχο ύδρευσης και άρδευσης. Η διακινούμενη ποσότητα νερού, η οποία προέρχεται και από γεωτρήσεις πέρα από τις προαναφερθείσες πηγές, ανέρχεται σε 1,377,577.50 m³/έτος, με μοναδιαίο χρηματικοοικονομικό κόστος σε 1.12 €/m³ και το ποσοστό ανάκτησης σε 59%. Επιπλέον, στην Λήμνο παρέχεται από τους Τοπικούς Οργανισμούς Εγγείων Βελτιώσεων (ΤΟΕΒ) Κοντιά Λήμνου, Κάμπου Χώρας και Καρλοβάσσου και τον Δήμο, υπηρεσία παροχής νερού για αγροτική χρήση. (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2017)



Εικόνα 7: Χημική Κατάσταση των Υπόγειων Υδατικών Συστημάτων (ΥΥΣ) του ΥΔ Νήσων Αιγαίου (ΕΙ14)

3.9 Ενέργεια

Η Λήμνος διαθέτει έναν Αυτόνομο Σταθμό Παραγωγής (ΑΣΠ), κατασκευασμένο το 1980 στην περιοχή Αυλώνα. Ο σταθμός απέχει μόνο τρία χιλιόμετρα από την πρωτεύουσα του νησιού

και βρίσκεται πολύ κοντά στην θάλασσα, έτσι ώστε να εκμεταλλεύεται τόσο την άμεση τροφοδοσία με υγρά καύσιμα, όσο και το θαλασσινό νερό, χρησιμοποιώντας το για την ψύξη των γεννητριών. Ο ΑΣΠ Λήμνου αποτελείται από 3 γεννήτριες ισχύος 2.7 MW, η κάθε μία και 2 ισχύος 6.5 MW αντίστοιχα, με καύσιμο λειτουργίας όλων των παραπάνω το μαζούτ. Επιπλέον, η ΔΕΗ διαχειρίζεται 3 ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη στον σταθμό για την εξασφάλιση επαρκούς τροφοδότησης των νησιών, καθώς υπάρχει και ένα εφεδρικό ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος για την εκκίνηση του σταθμού. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς λοιπόν ανέρχεται στα 23.6 MW. (Αλεξάνδρου, 2020) Η διακύμανση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζει και την λειτουργία του σταθμού. Τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω του τουρισμού που αναπτύσσεται, κρίνεται αναγκαία η λειτουργία των 8 γεννητριών, ενώ υπό κανονικές συνθήκες, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να καλυφθεί με την λειτουργία 2 έως 5 γεννητριών.

Η Λήμνος αποτελεί νησί με υψηλό αιολικό δυναμικό λόγω των βόρειων ανέμων που αναπτύσσονται. Διαθέτει άλλωστε εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες και συνδεδεμένες στο δίκτυο διανομής, το οποίο διαχειρίζεται πλήρως ο ΔΕΔΔΗΕ. Πιο συγκεκριμένα, το νησί διαθέτει 3 ανεμογεννήτριες με ονομαστική ισχύ 900 kW έκαστη και συνολική αναμενόμενη ετήσια παραγωγή 5300 MWh. Οι πρώτες δύο, τύπου ENERCON E-44 τοποθετήθηκαν από τη ΔΕΗ Ανανεώσιμες το 2012 στην περιοχή Άγιος Σώζων, ενώ η τρίτη ανεμογεννήτρια ίδιου τύπου εγκαταστάθηκε στη θέση Τουρλί από ιδιωτική εταιρεία. Στο υψηλότερο σημείο του νησιού, η κορυφή του όρους Βίγλα, υπάρχουν 8 ανεμογεννήτριες, οι οποίες όμως δεν χρησιμοποιούνται πλέον.

4. Συλλογή και ανάλυση δεδομένων

Από την οπτική γωνία της θεωρίας πιθανοτήτων, οι υδρολογικές διεργασίες αντιμετωπίζονται ως στοχαστικές ανελίξεις. Για παράδειγμα, η βροχόπτωση ή η παροχή ενός ποταμού σε μια συγκεκριμένη θέση κατά την χρονική στιγμή t είναι μια τυχαία μεταβλητή, δεδομένου ότι δεν υπάρχει προσδιοριστική μέθοδος καθορισμού της τιμής της με πλήρη βεβαιότητα. Συνεπώς, η εν λόγω διεργασία είναι μια στοχαστική ανέλιξη σε συνεχή μάλιστα χρόνο, ενώ μια σειρά μετρήσεων της ανά τακτά χρονικά διαστήματα αποτελεί μια χρονοσειρά (Κουτσογιάννης, Ευστρατιάδης, 2004).

Στην παρούσα μελέτη, είναι διαθέσιμες ιστορικές χρονοσειρές βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και ανέμου της περιοχής μελέτης, με μετρήσεις 47 χρόνων (1974-2020). Ωστόσο, λόγω της ποιότητας των δεδομένων, δεν χρησιμοποιούνται όλες οι μετρήσεις. Επιπλέον, η μελέτη του ΥΣ γίνεται για διάρκεια 25 ετών. Η παραγωγή λοιπόν των συνθετικών χρονοσειρών των παραπάνω φυσικών διεργασιών, έχει συνολικό μήκος 25 έτη αντίστοιχα.

4.1 Παραγωγή συνθετικής χρονοσειράς βροχόπτωσης

Τα ιστορικά δεδομένα βροχόπτωσης 47 χρόνων (1974-2020) λαμβάνονται από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), από τον σταθμό «Λήμνος» με κωδικό 16650 και έχουν ημερήσιο βήμα. Για την προσομοίωση του μοντέλου όμως, λαμβάνονται υπόψη τα τελευταία 30 χρόνια (1991-2020), λόγω αρκετών ελλείψεων σε μετρήσεις στα προηγούμενα έτη. Οι ημερήσιες μετρήσεις μετατρέπονται σε μηνιαίες και στη συνέχεια μονιμοποιούνται, έτσι ώστε να υπολογιστούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς για την μετέπειτα παραγωγή της συνθετικής. Με βάση τον Πίνακα 4, δηλαδή την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των μηνών της ιστορικής χρονοσειράς, εφαρμόζονται τα μοντέλα παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών.

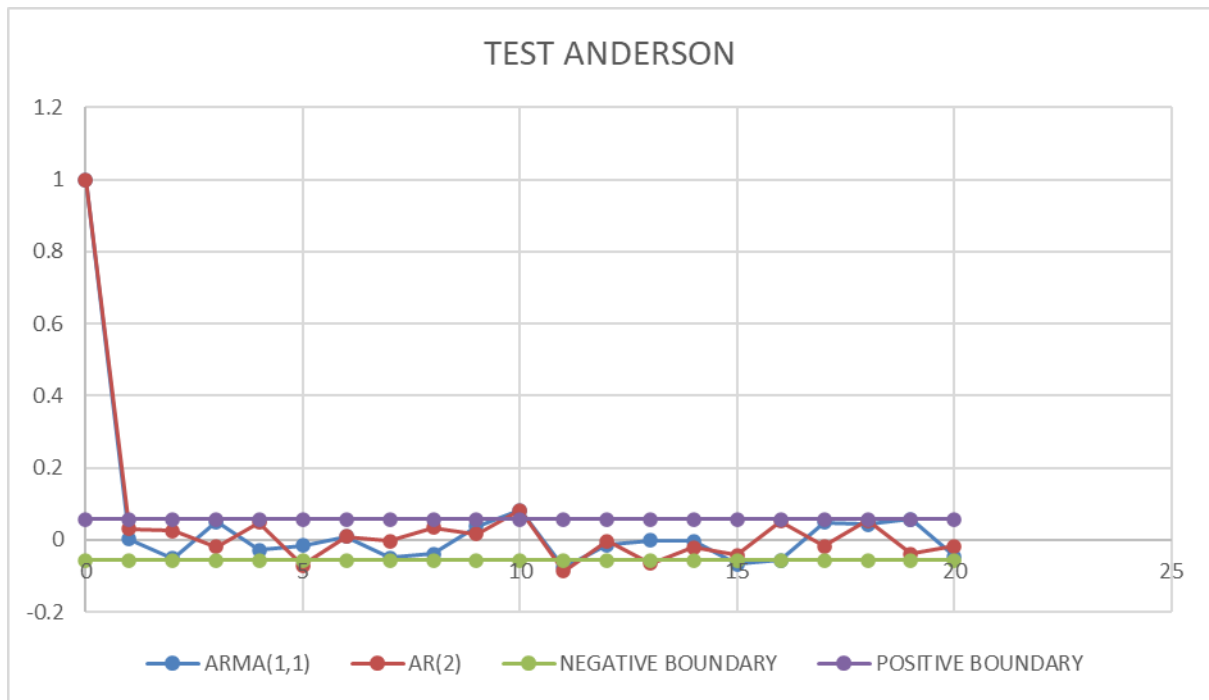
Πίνακας 4: Μέση Τιμή και Τυπική Απόκλιση Βροχόπτωσης ανά Μήνα

Μήνας	Μέση Τιμή (mm)	Τυπική Απόκλιση (mm)
Ιανουάριος	72.01	57.00
Φεβρουάριος	61.66	53.38
Μάρτιος	54.49	44.65
Απρίλιος	40.18	31.96
Μάϊος	28.98	30.45
Ιούνιος	12.98	14.00

Ιούλιος	13.28	18.17
Αύγουστος	8.13	14.79
Σεπτέμβριος	34.77	42.68
Οκτώβριος	50.15	41.63
Νοέμβριος	72.82	59.04
Δεκέμβριος	89.61	57.75

Τα μοντέλα που εξετάζονται για το παρόν ΥΣ είναι το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης δεύτερης τάξης AR(2) (autoregression second order) και το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης – κινούμενου μέσου πρώτης τάξης ARMA(1,1) (first-order autoregressive – first-order moving average). Η πρώτη μέθοδος αναπαριστά μια τυχαία διαδικασία, που στηρίζει ότι η μεταβλητή εξόδου, η βροχή εν προκειμένω, ορίζεται γραμμικά από τις δύο προηγούμενες τιμές της, αφού το μοντέλο είναι δεύτερης τάξης, και από έναν στοχαστικό όρο, το λευκό θόρυβο, ο οποίος εισάγει την τυχαιότητα. Ως λευκός θόρυβος ορίζεται, σε διακριτό χρόνο, ένα διακριτό σήμα του οποίου τα δείγματα θεωρούνται ως ακολουθία ασυσχέτιστων τυχαίων μεταβλητών με μηδενική μέση τιμή και πεπερασμένη διακύμανση, ή αλλιώς μια στιγμιαία και διακριτή διακύμανση στο δείγμα. Από την άλλη, η δεύτερη μέθοδος είναι ένας συνδυασμός από τη μέθοδο AR και από διαδικασία κινητού μέσου MA. Να σημειωθεί ότι τα υποδείγματα κινητού μέσου MA είναι χρήσιμα για την περιγραφή φαινομένων, όπου τα γεγονότα παράγουν ένα άμεσο αποτέλεσμα, η επίδραση του οποίου δεν σταματά εκεί αλλά συνεχίζει. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων, γνωστός ως ARMA, έχει αποδειχτεί ως ένα μοντέλο κατάλληλο για την ανάλυση ιστορικών χρονοσειρών, αλλά και την παραγωγή μελλοντικών συνθετικών χρονοσειρών.

Η επιλογή του βέλτιστου μοντέλου παραγωγής συνθετικής χρονοσειράς γίνεται μέσω του ελέγχου Anderson (Mimikou et al., 2016). Το μοντέλο το οποίο βρίσκεται ως επί το πλείστον εντός των ορίων $\{-\left(\frac{1}{N}\right)^{0.5}, \left(\frac{1}{N}\right)^{0.5}\}$, όπου N οι μήνες της παραγόμενης συνθετικής χρονοσειράς, αποτελεί το καταλληλότερο για την προσομοίωση του ΥΣ. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 1 επιλέγεται το μοντέλο ARMA(1,1).



Διάγραμμα 1: Έλεγχος Anderson για τη Χρονοσειρά Βροχόπτωσης

Για την μετατροπή των μηνιαίων τιμών της συνθετικής χρονοσειράς σε ημερήσιες τιμές, κατασκευάζεται ο Πίνακας 5, με τα ποσοστά των μέσων ημερήσιων βροχοπτώσεων της δεδομένης ιστορικής χρονοσειράς. Οι μέσες τιμές της βροχόπτωσης κάθε μήνα για την περίοδο 1991-2020 προκύπτουν από το άθροισμα των επιμέρους ημερήσιων βροχοπτώσεων του αντίστοιχου μήνα.

Πίνακας 5: Ποσοστό Μέσης Ημερήσιας Βροχόπτωσης ανά Μήνα

Μέση Ημερήσια Βροχόπτωση ανά Μήνα (mm)												
A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.038	0.015	0.009	0.022	0.013	0.033	0.006	0.000	0.011	0.064	0.003	0.033
2	0.021	0.081	0.019	0.053	0.015	0.073	0.024	0.000	0.005	0.013	0.001	0.024
3	0.095	0.041	0.013	0.027	0.036	0.015	0.222	0.010	0.002	0.008	0.035	0.018
4	0.031	0.045	0.018	0.064	0.027	0.104	0.000	0.000	0.005	0.009	0.024	0.014
5	0.041	0.055	0.025	0.124	0.010	0.037	0.000	0.000	0.009	0.018	0.018	0.024
6	0.036	0.025	0.016	0.087	0.023	0.039	0.003	0.006	0.026	0.005	0.026	0.027
7	0.025	0.098	0.097	0.038	0.044	0.038	0.013	0.247	0.050	0.064	0.048	0.046
8	0.008	0.035	0.063	0.026	0.023	0.049	0.127	0.000	0.024	0.028	0.038	0.019
9	0.007	0.002	0.023	0.017	0.016	0.040	0.011	0.000	0.003	0.050	0.039	0.034
10	0.033	0.015	0.029	0.023	0.038	0.000	0.018	0.000	0.002	0.037	0.013	0.052
11	0.035	0.050	0.043	0.007	0.000	0.011	0.046	0.021	0.023	0.037	0.027	0.039
12	0.019	0.015	0.074	0.032	0.003	0.007	0.031	0.252	0.029	0.026	0.033	0.030
13	0.041	0.033	0.018	0.086	0.020	0.041	0.000	0.048	0.003	0.017	0.033	0.042
14	0.043	0.021	0.034	0.028	0.003	0.036	0.034	0.000	0.030	0.063	0.061	0.047
15	0.014	0.048	0.007	0.012	0.005	0.037	0.009	0.010	0.093	0.079	0.019	0.037

16	0.029	0.007	0.023	0.036	0.003	0.000	0.048	0.142	0.027	0.026	0.015	0.045
17	0.032	0.009	0.014	0.041	0.009	0.013	0.174	0.131	0.069	0.045	0.010	0.018
18	0.039	0.012	0.041	0.046	0.145	0.044	0.000	0.000	0.038	0.036	0.021	0.046
19	0.022	0.036	0.031	0.063	0.087	0.050	0.000	0.000	0.014	0.013	0.021	0.082
20	0.013	0.020	0.037	0.009	0.019	0.077	0.025	0.000	0.114	0.018	0.093	0.017
21	0.038	0.011	0.035	0.034	0.040	0.004	0.000	0.000	0.097	0.012	0.054	0.014
22	0.081	0.018	0.085	0.012	0.076	0.009	0.000	0.000	0.021	0.057	0.047	0.049
23	0.019	0.110	0.054	0.025	0.048	0.003	0.001	0.003	0.011	0.046	0.045	0.023
24	0.019	0.023	0.032	0.007	0.113	0.031	0.029	0.000	0.045	0.058	0.044	0.028
25	0.038	0.045	0.015	0.026	0.034	0.031	0.001	0.000	0.009	0.035	0.043	0.020
26	0.037	0.017	0.019	0.020	0.012	0.009	0.035	0.040	0.022	0.008	0.034	0.006
27	0.019	0.024	0.015	0.018	0.031	0.001	0.046	0.004	0.018	0.028	0.054	0.030
28	0.030	0.027	0.062	0.003	0.011	0.010	0.083	0.068	0.013	0.025	0.030	0.023
29	0.029	0.042	0.023	0.006	0.060	0.003	0.014	0.000	0.150	0.025	0.030	0.046
30	0.036	0.019	0.005	0.007	0.025	0.018	0.001	0.012	0.035	0.026	0.042	0.028
31	0.029	0.000	0.021	0.000	0.010	0.138	0.000	0.006	0.000	0.025	0.001	0.038

4.2 Παραγωγή συνθετικής χρονοσειράς θερμοκρασίας

Η ιστορική χρονοσειρά της θερμοκρασίας, όπως και τα δεδομένα της βροχόπτωσης, λήφθηκε από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) για περίοδο 47 χρόνων (1974-2020). Από αυτά, χρησιμοποιούνται οι τιμές που αντιστοιχούν στα τελευταία 30 έτη (1991-2020). Η διαδικασία παραγωγής της συνθετικής χρονοσειράς είναι η ίδια όπως προηγουμένως, χρησιμοποιώντας τα μοντέλα AR(2) και ARMA(1,1), καθώς και τον έλεγχο Anderson. Σημαντική διαφορά στην περίπτωση επεξεργασίας της θερμοκρασίας, είναι ότι η μέση τιμή κάθε μήνα της περιόδου 1991-2020 προκύπτει από την μέση τιμή των ημερών του εκάστοτε μήνα και όχι από το άθροισμα όπως στη προηγούμενη περίπτωση. Εφαρμόζοντας τα παραπάνω, προκύπτει ότι το μοντέλο ARMA(1,1) είναι το βέλτιστο για την παραγωγή της συνθετικής χρονοσειράς. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των μηνών της ιστορικής χρονοσειράς, τα οποία λαμβάνονται υπόψη στα στοχαστικά μοντέλα, ενώ ο Πίνακας 7 περιλαμβάνει τα ποσοστά των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών ανά μήνα, για την μετατροπή των μηνιαίων τιμών σε ημερήσιων.

Πίνακας 6: Μέση Τιμή και Τυπική Απόκλιση Θερμοκρασίας ανά Μήνα

Μήνας	Μέση Τιμή (°C)	Τυπική Απόκλιση (°C)
Ιανουάριος	7.68	1.43
Φεβρουάριος	8.27	1.80

Μάρτιος	10.46	1.70
Απρίλιος	14.07	1.34
Μάιος	19.13	1.02
Ιούνιος	23.45	4.45
Ιούλιος	25.78	4.86
Αύγουστος	25.57	4.82
Σεπτέμβριος	21.34	4.11
Οκτώβριος	16.66	3.30
Νοέμβριος	12.99	1.70
Δεκέμβριος	9.27	1.89

Πίνακας 7: Ποσοστό Μέσης Ημερήσιας Θερμοκρασίας ανά Μήνα

Μέση Ημερήσια Θερμοκρασία ανά Μήνα (%)												
A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3.44	3.34	2.92	2.83	3.11	2.85	3.31	3.21	3.58	3.55	3.80	4.01
2	3.40	3.18	3.25	2.90	2.79	2.76	3.18	3.24	3.65	3.62	4.04	3.62
3	3.27	3.15	3.73	2.70	2.81	2.97	3.30	3.26	3.94	3.93	3.87	4.12
4	3.04	3.54	3.16	2.97	2.81	3.03	3.07	3.42	3.61	3.76	3.71	3.69
5	3.05	3.51	3.44	3.16	2.72	3.02	3.28	3.51	3.64	3.55	3.75	4.08
6	3.30	2.98	2.88	3.19	2.83	2.67	3.15	3.38	3.53	3.54	3.67	3.99
7	3.23	3.37	3.04	3.19	2.90	3.23	3.28	3.31	3.37	3.78	3.82	3.58
8	3.13	3.23	2.55	2.85	2.70	3.21	3.21	3.19	3.41	3.17	3.86	3.02
9	3.36	3.28	2.61	3.06	2.87	2.92	3.35	3.46	3.53	3.24	3.86	3.22
10	3.50	3.41	2.79	3.27	3.06	3.46	3.28	3.30	3.24	3.51	3.73	3.23
11	3.41	3.69	2.61	3.42	3.04	3.25	3.16	3.17	3.33	3.25	3.38	3.02
12	3.32	3.47	3.26	3.60	3.09	3.16	3.06	3.15	3.57	3.63	3.75	2.87
13	3.33	3.29	2.82	3.35	3.20	3.43	3.33	3.26	3.43	3.42	2.97	2.92
14	3.47	2.99	3.26	3.41	3.22	3.39	3.32	3.32	3.33	2.98	3.46	2.89
15	3.50	3.04	2.76	3.38	3.38	3.20	3.09	3.21	3.27	3.32	3.39	3.52
16	2.79	3.15	3.09	3.52	3.17	3.53	2.98	3.35	3.25	3.04	3.39	2.77
17	3.07	3.36	2.97	3.45	3.29	3.70	3.34	3.27	3.31	3.00	3.32	3.00
18	3.37	3.27	3.30	3.25	3.33	3.38	3.38	3.14	3.52	3.39	2.88	2.85
19	3.38	3.58	3.29	3.45	3.10	3.50	3.16	3.27	3.47	3.27	3.49	3.01
20	3.28	3.62	3.16	3.29	3.45	3.64	3.00	3.30	3.39	2.94	3.02	2.78

21	3.51	3.81	3.09	3.28	3.61	3.39	3.41	3.29	3.11	3.17	2.75	3.07
22	3.30	4.16	3.41	3.64	3.21	3.49	3.51	3.16	3.16	3.06	2.67	3.13
23	3.48	3.88	3.58	3.47	3.55	3.75	3.17	3.37	3.10	3.16	3.27	2.69
24	2.71	3.71	3.12	3.19	3.62	3.76	3.17	3.23	2.95	3.04	2.83	3.07
25	2.81	3.94	3.66	3.29	3.50	3.52	3.42	3.23	3.00	3.04	3.01	3.06
26	2.99	3.84	3.74	3.55	3.62	3.64	3.04	3.12	3.01	3.01	2.65	3.57
27	3.09	3.75	3.24	3.65	3.52	3.18	3.14	2.93	3.16	2.90	2.82	3.05
28	2.79	3.61	3.60	3.83	3.46	3.49	3.27	3.14	3.01	2.68	2.97	3.26
29	3.59	2.26	3.81	3.84	3.67	3.50	3.20	3.04	2.98	2.87	2.89	2.93
30	2.98	0.58	4.03	4.02	3.50	3.65	3.29	3.08	3.15	2.81	2.98	2.96
31	3.13	0.00	3.81	0.00	3.88	0.32	3.13	2.71	0.00	2.39	0.02	3.00

4.3 Παραγωγή συνθετικής χρονοσειράς ανέμου

Τα ιστορικά δεδομένα του ανέμου προέρχονται από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY) και περιλαμβάνουν τιμές 47 χρόνων (1974-2020), με τρίωρο βήμα. Ο άνεμος έχει μονάδες μέτρησης m/s, ενώ ο σταθμός μέτρησης της Λήμνου βρίσκεται σε ύψος 4.8 m. Ωστόσο, λόγω των αρκετών ελλείψεων τιμών, χρησιμοποιούνται τα ιστορικά δεδομένα με μήκος 25 έτη (1996-2020). Η συμπλήρωση των κενών στα δεδομένα που χρησιμοποιούνται τελικά, αποσκοπεί στη διατήρηση της εποχικότητας και της ημερήσιας διακύμανσης του ανέμου για κάθε μήνα. Εντοπίζοντας τις ημέρες, οι οποίες είναι πλήρως συμπληρωμένες από τιμές, υπολογίζεται η μέση τιμή κάθε τρίωρου κάθε ημέρας για κάθε μήνα, για να δημιουργηθεί το ποσοστό κάθε τρίωρου κάθε ημέρας κάθε μήνα ως προς τη μέση ημερήσια τιμή. Με αυτό τον τρόπο, συμπληρώνονται τα κενά της ιστορικής χρονοσειράς.

Η παραγωγή της συνθετικής χρονοσειράς ανέμου δεν μοιάζει με αυτή της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται βασίζεται στους Negra et al. (2007). Πιο συγκεκριμένα, η συμπληρωμένη πλέον ιστορική χρονοσειρά, αποτελεί δεδομένο εισόδου για την μεθοδολογία, ενώ αποτέλεσμα αυτής είναι μία συνθετική χρονοσειρά μήκους ενός έτους και τρίωρου βήματος. Εφόσον η μελέτη του ΥΣ γίνεται για 25 έτη, η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται 25 φορές. Τέλος, οι συνθετικές χρονοσειρές τρίωρου βήματος που προκύπτουν, μετατρέπονται σε χρονοσειρές ωριαίου βήματος για λόγους πληρότητας και συμβατότητας με αυτές της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας.

Τα βήματα της μεθοδολογίας είναι:

- Δημιουργία ενός πίνακα που περιλαμβάνει κλάσεις ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου.
- Για κάθε κλάση, υπολογίζεται η πιθανότητα εμφάνισης της , State Probability $p_{ws,i}$, με τη σχέση (4.1):

$$p_{ws,i} = \frac{\sum_{j=1}^{Mws} D_{ws,ij}}{\sum_{k=1}^{Mws} \sum_{j=1}^{Mws} D_{ws,kj}} \quad (4.1)$$

Όπου $p_{ws,i}$ η πιθανότητα εμφάνισης, $D_{ws,ij}$ ο χρόνος παραμονής στην εκάστοτε κλάση πριν μεταβεί στην επόμενη ή προηγούμενη.

- Στη συνέχεια, υπολογίζεται η συχνότητα εμφάνισης, Frequency, δηλαδή πόσο συχνά ο άνεμος μετακινείται στην εξεταζόμενη κλάση από μια προηγούμενη ή επόμενη κλάση, με τη σχέση (4.2):

$$f_{ws,i} = N_{ws,i,i+1} + N_{ws,i,i-1} \quad (4.2)$$

- Για κάθε κλάση, υπολογίζεται η συχνότητα που ο άνεμος μετακινείται από προηγούμενη κλάση στην κλάση που εξετάζουμε, Up (συμβάντα ανά έτος).
- Για κάθε κλάση, υπολογίζεται η συχνότητα που ο άνεμος μετακινείται από επόμενη κλάση στην κλάση που εξετάζουμε, Down (συμβάντα ανά έτος).
- Για κάθε κλάση, υπολογίζεται η μέση διάρκεια παραμονής στη συγκεκριμένη κλάση, με τη σχέση (4.3):

$$d_{ws,i} = \frac{p_{ws,i}}{f_{ws,i}} \quad (4.3)$$

- Υπολογίζονται οι τιμές των συντελεστών $\lambda_{ws,i+}$ και $\lambda_{ws,i-}$, οι οποίοι σχετίζονται με την πιθανότητα να έχουμε μετακίνηση στην αμέσως προηγούμενη ή στην αμέσως επόμενη αντίστοιχα, από μία συγκεκριμένη κλάση, με τη σχέση (4.4):

$$\lambda_{ws,i\pm} = \frac{N_{ws,i\pm}}{p_{ws,i}} \quad (4.4)$$

Εφόσον προσδιορίζονται οι αντίστοιχες παράμετροι, ακολουθεί η παραγωγή των χρονοσειρών ανέμου με βήμα αντίστοιχο της ιστορικής χρονοσειράς, σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα:

- Το διάνυσμα της ταχύτητας αποκτά μια αρχική ταχύτητα. Στο πρώτο χρονικό, ως αρχική τιμή επιλέγεται η μέση ετήσια ταχύτητα.
- Για κάθε χρονικό βήμα, δημιουργούνται δύο τυχαίοι αριθμοί U_1^i και U_2^i στο διάστημα $(0,1)$, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν την πιθανότητα το διάνυσμα της ταχύτητας να μετατοπιστεί στην αμέσως επόμενη ή προηγούμενη κλάση.
- Υπολογίζεται ο χρόνος μετάβασης στην αμέσως επόμενη και στην αμέσως προηγούμενη κλάση, με τις σχέσεις (4.5) και (4.6):

$$TUU^i = \frac{h}{\lambda_{up}} \ln(U_1^i) \quad (4.5)$$

$$TUD^i = \frac{h}{\lambda_{down}} \ln(U_2^i) \quad (4.6)$$

Όπου h η περίοδος προσομοίωσης σε τρίωρα, όπως και η ιστορική χρονοσειρά. Η μικρότερη τιμή μεταξύ των σχέσεων καθορίζει σε ποια κατάσταση θα βρεθεί το νέο διάνυσμα της ταχύτητας.

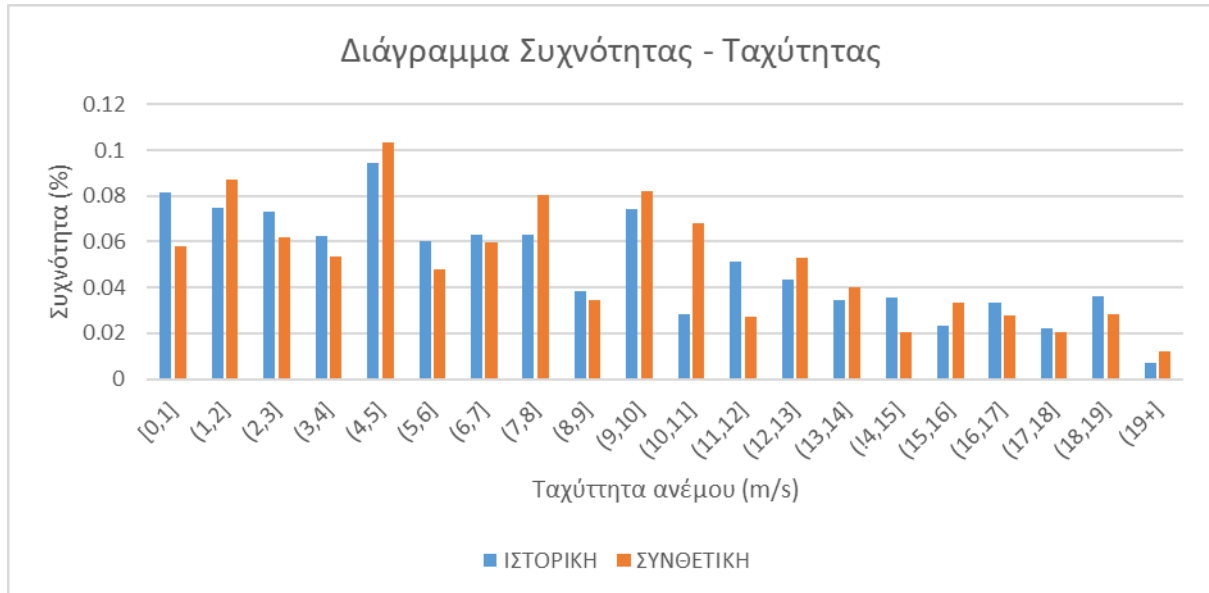
- Σε περίπτωση που $TTU^i = 0$, τότε θεωρείται ότι ο άνεμος δεν μπορεί να μετατοπιστεί σε μεγαλύτερη κλάση και, επομένως, μετατοπίζεται στην αμέσως χαμηλότερη σε χρονικό διάστημα TTD^i . Αντίθετα, στην περίπτωση που $TTD^i = 0$ θεωρείται ότι ο άνεμος δεν μπορεί να μετατοπιστεί σε μικρότερη κλάση και μετατοπίζεται, τελικά, στην αμέσως μεγαλύτερη σε χρονικό διάστημα TTU^i .
- Όταν η τιμή της ταχύτητας είναι μηδέν, τότε αναγκαστικά μετατοπίζεται σε μεγαλύτερη κλάση ενώ, αντίστοιχα, ο άνεμος δε μπορεί να λάβει τιμές μεγαλύτερες από εκείνες που δεν έχουν παρατηρηθεί στην ιστορική χρονοσειρά.
- Σε περίπτωση που $TTU^i < TTD^i$, το διάνυσμα της ταχύτητας μεγαλώνει μια μονάδα ενώ στην αντίθετη περίπτωση το διάνυσμα μειώνεται κατά μία μονάδα. Μετά από κάθε βήμα, το χρονικό διάστημα αυξάνεται κατά $t^i = t^{i-1} + TTU^i$ για την πρώτη περίπτωση και $t^i = t^{i-1} + TTD^i$ για τη δεύτερη.
- Τα βήματα 2 έως και 4 επαναλαμβάνονται μέχρις ότου το t να ισούται ή να ξεπερνάει το h .

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται οι πιθανότητες εμφάνισης για κάθε κλάση ανέμου ανά μήνα.

Πίνακας 8: Πιθανότητα Εμφάνισης κάθε κλάσης ανά Μήνα

Κλάσεις	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
[0,1]	0.20	0.18	0.18	0.22	0.20	0.20	0.14	0.13	0.19	0.22	0.24	0.21
(1,2]	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
(2,3]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
(3,4]	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04
(4,5]	0.05	0.05	0.05	0.06	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05
(5,6]	0.05	0.06	0.06	0.08	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05
(6,7]	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05
(7,8]	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.04	0.05	0.04
(8,9]	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05
(9,10]	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03
(10,11]	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05
(11,12]	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03
(12,13]	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05
(13,14]	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
(14,15]	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04
(15,16]	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
(16,17]	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
(17,18]	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03
(18,19]	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03
(19+]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

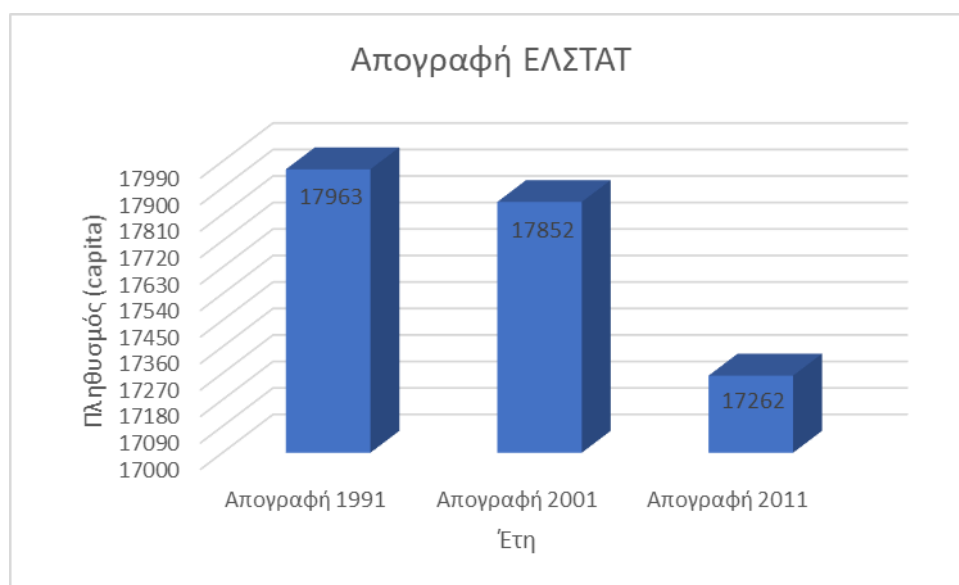
Ο άνεμος αποτελεί ένα από τα πιο ευαίσθητα δεδομένα εισόδου του ΥΣ. Καθίσταται λοιπόν αναγκαίος ο έλεγχος αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων που εξάγονται από το μοντέλο παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών. Για να γίνει αντιληπτή η διατήρηση της ωριαίας διακύμανσης και της εποχικότητας του ανέμου, συγκρίνονται οι συχνότητες – ταχύτητες της ιστορικής και της παραγόμενης χρονοσειράς ανέμου. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 2 υπάρχει ομοιότητα μεταξύ των δύο και άρα επαληθεύεται η αξιοπιστία του μοντέλου.



Διάγραμμα 2: Σύγκριση Ιστορικής και Συνθετικής Χρονοσειράς

4.4 Εκτίμηση ενεργειακών, υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών

Για την καλύτερη προσέγγιση του ΥΣ, πέρα από την ορθή συλλογή και ανάλυση των δεδομένων της βροχής, της θερμοκρασίας και του ανέμου, απαραίτητη είναι και η εκτίμηση των αναγκών της περιοχής μελέτης. Σκοπός είναι ο υπολογισμός των ενεργειακών, υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών που αντιστοιχούν στον μελλοντικό πληθυσμό. Το έργο δύναται να έχει διάρκεια ζωής τα επόμενα 25 έτη, έτσι η μελέτη δεν μπορεί να βασιστεί μόνο στην υφιστάμενη κατάσταση των αναγκών του νησιού, αλλά απαιτείται να εκτιμηθούν και αυτές των επόμενων 25 ετών. Πρώτο βήμα αποτελεί η αναγωγή του πληθυσμού. Στο Διάγραμμα 3 φαίνονται τα αποτελέσματα των απογραφών του 1991, 2001 και 2011 σύμφωνα με την Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία. Βάσει του διαγράμματος αυτού το νησί της Λήμνου το 2011 είχε σύνολο 17262 μόνιμους κάτοικους

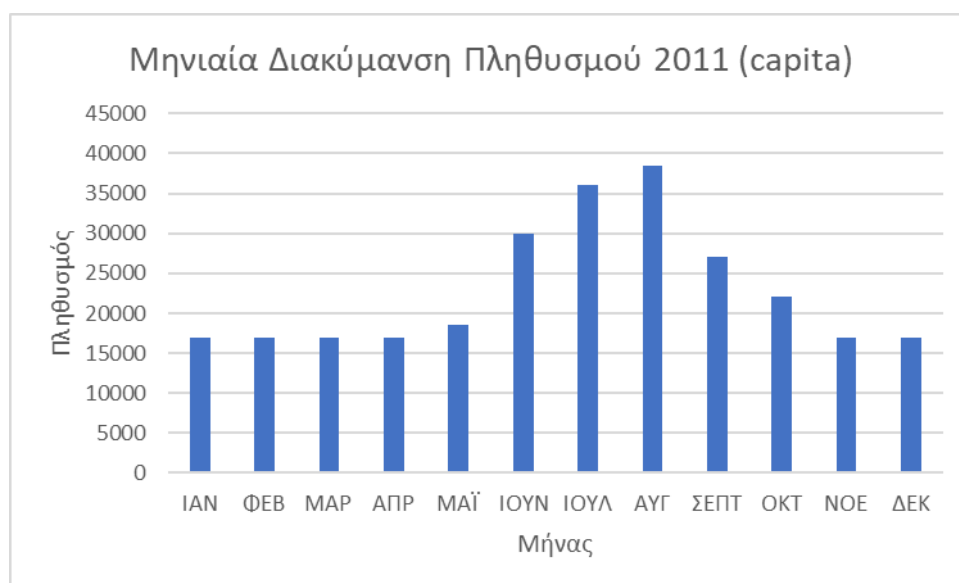


Διάγραμμα 3: Απογραφή Πληθυσμού Λήμνου (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

Οι παραθεριστές, καθώς και οι τουρίστες, συμβάλλουν στις ανάγκες που προκύπτουν στο νησί. Η τουριστική περίοδος διαρκεί κυρίως τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο, χωρίς όμως αυτό να αναιρεί την εμφάνιση επισκεπτών τον Μάιο και τον Σεπτέμβριο. Η πρόσβαση στο νησί γίνεται ακτοπλοϊκώς και αεροπορικώς. Το λιμάνι βρίσκεται στη Μύρινα, η οποία είναι η πρωτεύουσα του νησιού, και εξυπηρετούνται αρκετά δρομολόγια τόσο από Αθήνα, όσο και από Θεσσαλονίκη, Καβάλα και Αλεξανδρούπολη. Επιπλέον, το αεροδρόμιο της Λήμνου βρίσκεται στο κέντρο του νησιού και συνδέεται με το διεθνές αεροδρόμιο της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης. Η εκτίμηση των παραθεριστών και τουριστών φαίνονται στον Πίνακα 9, ενώ στο Διάγραμμα 4 φαίνεται συνολικά η μηνιαία διακύμανση του πληθυσμού σύμφωνα με την απογραφή του 2011.

Πίνακας 9: Διάρθρωση Συνολικού Πληθυσμού της Λήμνου ανά Μήνα για το έτος 2011

Μήνας	Μόνιμοι Κάτοικοι	Παραθεριστές	Τουρίστες
ΙΑΝ	17000	0	0
ΦΕΒ	17000	0	0
ΜΑΡ	17000	0	0
ΑΠΡ	17000	0	0
ΜΑΪ	17000	1000	500
ΙΟΥΝ	17000	3000	10000
ΙΟΥΛ	17000	3000	16000
ΑΥΓ	17000	3500	18000
ΣΕΠΤ	17000	3000	7000
ΟΚΤ	17000	1000	4000
ΝΟΕ	17000	0	0
ΔΕΚ	17000	0	0



Διάγραμμα 4: Μηνιαία Διακύμανση Πληθυσμού για το Έτος 2011

Για την σωστή εκτίμηση των ενεργειακών και υδρευτικών αναγκών του νησιού είναι απαραίτητη η αναγωγή του πληθυσμού για τα επόμενα 25 έτη. Αυτό επιτυγχάνεται με παραδοχή σταθερής γεωμετρικής αύξησης κάθε έτος, σύμφωνα με την αναδρομική σχέση (4.7) (Τσακίρης., 2010):

$$P_i = \alpha * P_{i-1} \quad (4.7)$$

Όπου: $\alpha = 1 + \gamma$, $\gamma = \frac{P_i - P_{i-1}}{P_{i-1}}$, και i το εκάστοτε έτος.

Στους Πίνακες 10 και 11, παρουσιάζονται τα στοιχεία της πληθυσμιακής αναγωγής και η αναγωγή του μέγιστου εκτιμώμενου ετήσιου πληθυσμού για τα επόμενα 25 έτη.

Πίνακας 10: Στοιχεία Πληθυσμιακής Αναγωγής

ΑΝΑΓΩΓΗ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ	
P ₀	17000
P ₂₅	21801.34
α	1.01
γ	0.01
n	25
Συνολική Αύξηση (%)	0.282432

Πίνακας 11: Συντελεστές Αναγωγής του Συνολικού Πληθυσμού για τα επόμενα 25 Έτη

A/A	ΕΤΟΣ	ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ	ΣΥΝΤ. ΑΝΑΓΩΓΗΣ
1	2020	17000	1.000
2	2021	17170	1.010
3	2022	17342	1.020
4	2023	17515	1.030
5	2024	17690	1.041
6	2025	17867	1.051
7	2026	18046	1.062
8	2027	18226	1.072
9	2028	18409	1.083
10	2029	18593	1.094
11	2030	18779	1.105
12	2031	18966	1.116
13	2032	19156	1.127
14	2033	19348	1.138
15	2034	19541	1.149
16	2035	19736	1.161
17	2036	19934	1.173
18	2037	20133	1.184
19	2038	20335	1.196
20	2039	20538	1.208
21	2040	20743	1.220
22	2041	20951	1.232
23	2042	21160	1.245
24	2043	21372	1.257
25	2044	21585	1.270
26	2045	21801	1.282

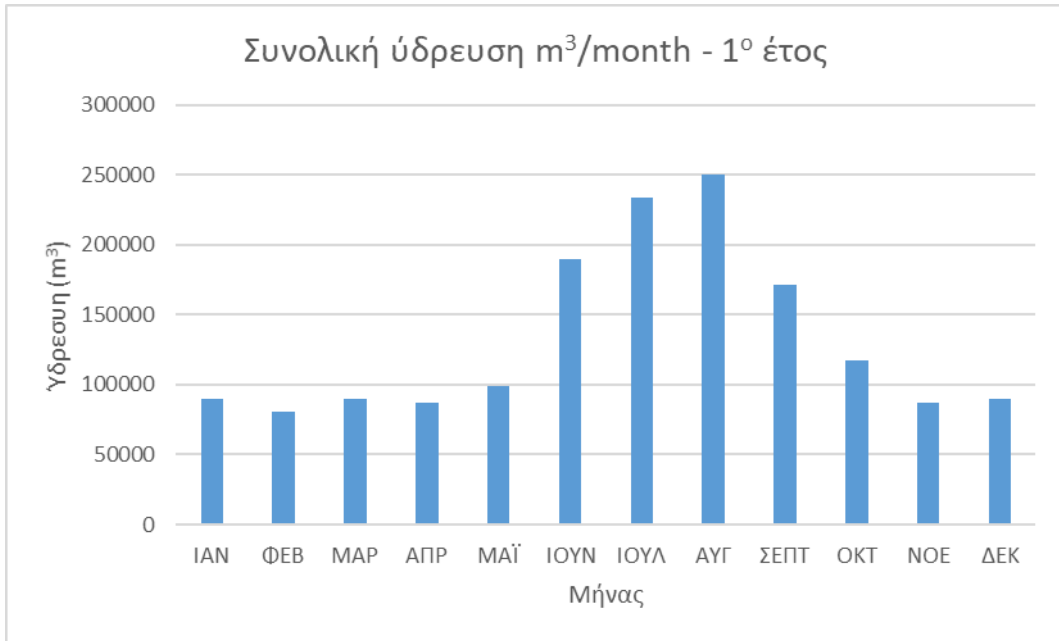
4.4.1 Υδρευτικές Ανάγκες

Για τον υπολογισμό των υδρευτικών αναγκών της Λήμνου, είναι απαραίτητη η εκτίμηση της κατανάλωσης νερού ανά κάτοικο. Πιο συγκεκριμένα, η μέση ημερήσια κατανάλωση λαμβάνεται ίση με 170 L/d/capita για τους μόνιμους κατοίκους, 225 L/d/capita για τους παραθεριστές και 170 L/d/capita για τους τουρίστες (Κουτσογιάννης, Ευστρατιάδης, 2015). Ωστόσο, λόγω της αυξημένης ζήτησης νερού τους καλοκαιρινούς μήνες και τον Σεπτέμβριο, συνυπολογίζεται επιπλέον 20% κατανάλωση νερού για τον συνολικό πληθυσμό. Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται οι μέσες ημερήσιες καταναλώσεις των εποχιακών και μόνιμων κατοίκων ανά μήνα.

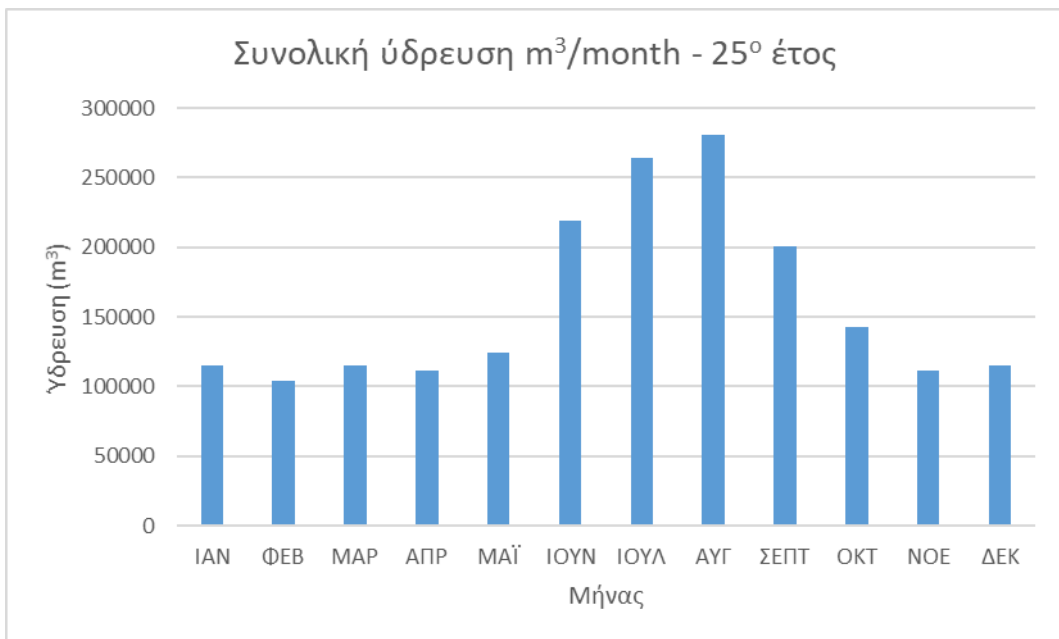
Πίνακας 12: Μέση Ημερήσια Κατανάλωση Εποχιακών και Μόνιμων κατοίκων ανά Μήνα

A/A	ΜΗΝΑΣ	Μόνιμοι Κάτοικοι (m ³ /d)	Παραθεριστές (m ³ /d)	Τουρίστες (m ³ /d)	Συνολική Ύδρευση (m ³ /d)
1	ΙΑΝ	3706	0	0	3706
2	ΦΕΒ	3706	0	0	3706
3	ΜΑΡ	3706	0	0	3706
4	ΑΠΡ	3706	0	0	3706
5	ΜΑΪ	3706	225	85	4016
6	ΙΟΥΝ	4447	810	2040	7297
7	ΙΟΥΛ	4447	810	3264	8521
8	ΑΥΓ	4447	945	3672	9064
9	ΣΕΠΤ	4447	810	1428	6685
10	ΟΚΤ	3706	225	680	4611
11	ΝΟΕ	3706	0	0	3706
12	ΔΕΚ	3706	0	0	3706

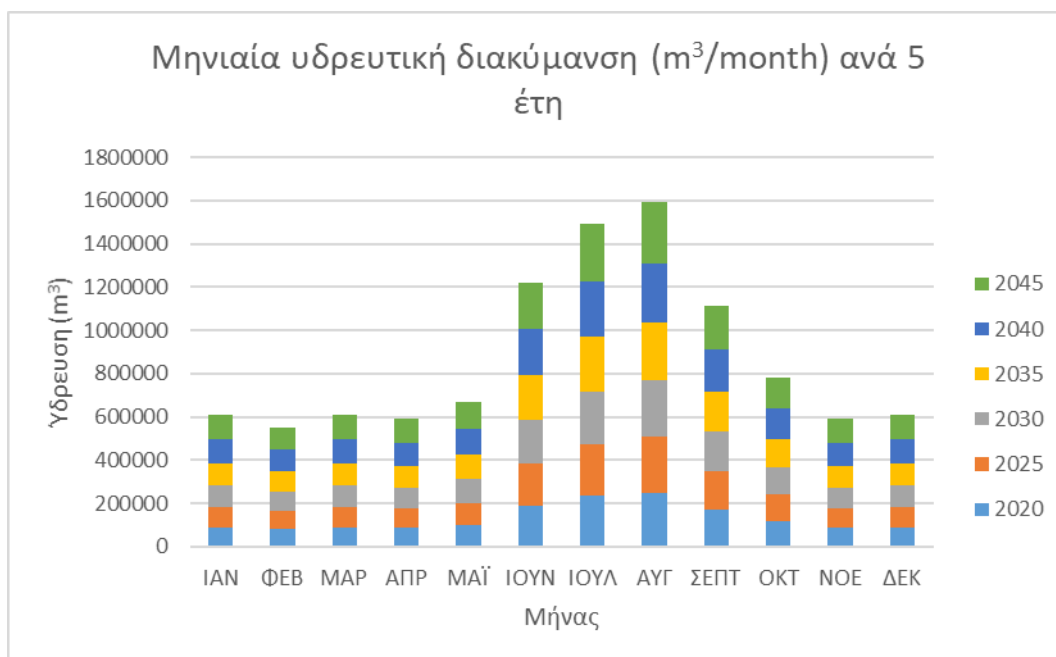
Εφόσον λάβει χώρα η αναγωγή του πληθυσμού για το έτος – στόχο 2045, μπορούν πλέον να υπολογισθούν και οι αντίστοιχες υδρευτικές ανάγκες. Στα Διαγράμματα 5 και 6, φαίνονται οι μηνιαίες διακυμάνσεις των υδρευτικών αναγκών για το έτος – βάση 2020 και για το 25^ο έτος (2045).



Διάγραμμα 5: Συνολική Μηνιαία Υδρευτική Κατανάλωση 1^{ου} Έτους



Διάγραμμα 6: Συνολική Μηνιαία Υδρευτική Κατανάλωση 25^{ου} Έτους



Διάγραμμα 7: Συνολική Μηνιαία Διακύμανση Υδρευτικής Κατανάλωσης ανά 5 Έτη

Τέλος στο Διάγραμμα 7, παρουσιάζεται η συνολική μηνιαία διακύμανση ύδρευσης ανά 5 έτη. Τα αποτελέσματα θεωρούνται εύλογα, καθώς πέρα από την εντονότερη ζήτηση κατά τους θερινούς μήνες, παρατηρείται σημαντική αύξηση των υδρευτικών αναγκών ανά τα χρόνια, λόγω της πληθυσμιακής μεγέθυνσης.

4.4.2 Ενεργειακές Ανάγκες

Οι ενεργειακές ανάγκες της Λήμνου καλύπτονται εξ ολοκλήρου από τον αυτόνομο σταθμό παραγωγής, όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 3. Η συνολική ισχύς του σταθμού ανέρχεται στα 23.6 MW, ενώ στο δίκτυο είναι διασυνδεδεμένες και οι 3 ανεμογεννήτριες του νησιού. Τα δεδομένα ενεργειακής κατανάλωσης έχουν ληφθεί από τον Διαχειριστή Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ), με στοιχεία από το 2016 έως και το 2020, με μηνιαίο βήμα. Η μέση μηνιαία ενεργειακή ζήτηση σε MWh για το έτος 2020 παρουσιάζεται στον Πίνακα 13 .

Πίνακας 13: Μέση Μηνιαία Ενεργειακή Ζήτηση για το 1^ο Έτος

ΜΗΝΑΣ	ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΖΗΤΗΣΗ MWh 1 ^{ου} έτους
ΙΑΝ	5545.84
ΦΕΒ	4792.35
ΜΑΡ	4735.68
ΑΠΡ	4176.64
ΜΑΪ	4036.18
ΙΟΥΝ	4829.90
ΙΟΥΛ	6218.08
ΑΥΓ	6900.14
ΣΕΠΤ	4896.83

ΟΚΤ	4135.04
ΝΟΕ	4419.39
ΔΕΚ	5232.19

Γίνεται αντιληπτό, ότι η ενέργεια που παράγεται από τις προϋπάρχουσες ανεμογεννήτριες, μπορούν να καλύψουν λιγότερο από το 10% των ενεργειακών αναγκών του νησιού, μιας και η ετήσια παραγωγή τους μπορεί να είναι ίση με 5300 MWh.

Επιπλέον, είναι διαθέσιμο το φορτίο της Λήμνου ανά ώρα έτους για το 2020 σε MW. Από τα δεδομένα αυτά, προκύπτει η ημερήσια διακύμανση κατανάλωσης ανά μήνα. Έτσι, η μηνιαία ζήτηση μπορεί να μετατραπεί σε ημερήσια και στη συνέχεια σε ωριαία. Η μέση μηνιαία ζήτηση του έτους – στόχου, δηλαδή για το 2045, προκύπτει από την αναγωγή του αναμενόμενου πληθυσμού ανά έτος, όπως περιγράφεται και στις υδρευτικές ανάγκες. Στον Πίνακα 14 παρουσιάζονται οι μηνιαίες ζητήσεις για το 1^ο και το 25^ο έτος και στον Πίνακα 15 οι μέσες ημερήσιες ζητήσεις ανά μήνα για το 1^ο και το 25^ο έτος. Όπως είναι αναμενόμενο, ο Αύγουστος διαθέτει την μεγαλύτερη τιμή σε ζήτηση για κάθε περίπτωση.

Πίνακας 14: Μέση Μηνιαία Ενεργειακή Ζήτηση 1^{ου} και 25^{ου} Έτους

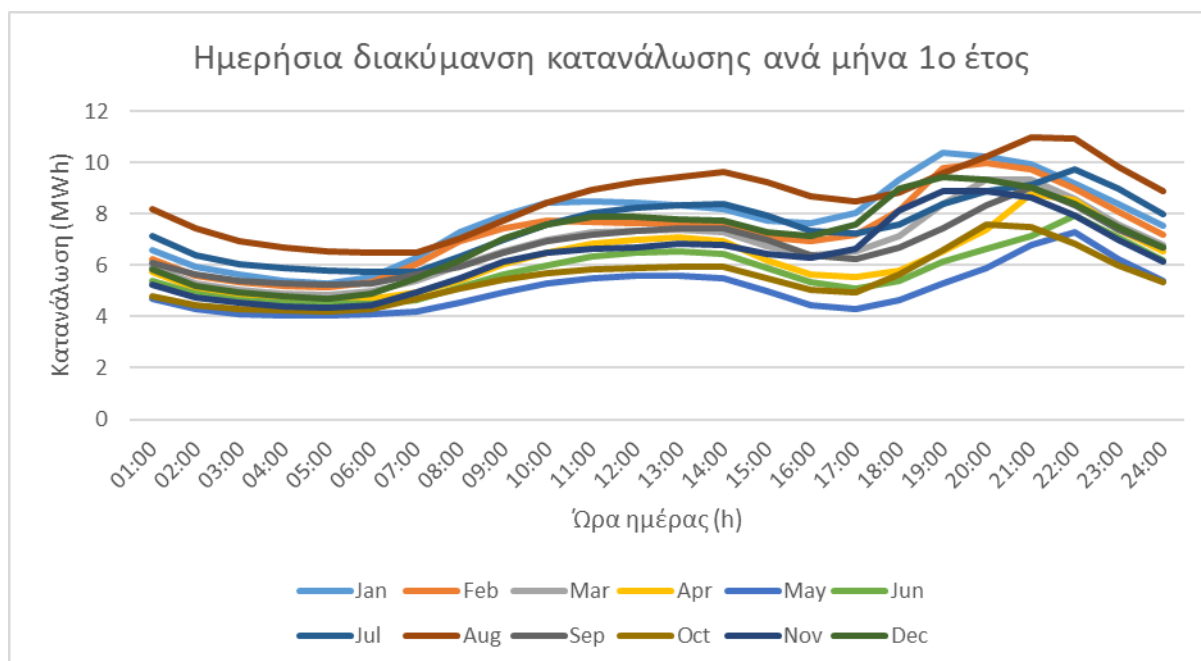
ΜΗΝΑΣ	Μέση μηνιαία ζήτηση 1ο Έτος (MWh/month)	Μέση μηνιαία ζήτηση 25ο Έτος (MWh/month)
ΙΑΝ	5545.84	7041.74
ΦΕΒ	4792.35	6085.01
ΜΑΡ	4735.68	6013.06
ΑΠΡ	4176.64	5303.23
ΜΑΪ	4036.18	5124.88
ΙΟΥΝ	4829.90	6132.69
ΙΟΥΛ	6218.08	7895.32
ΑΥΓ	6900.14	8761.35
ΣΕΠΤ	4896.83	6217.68
ΟΚΤ	4135.04	5250.40
ΝΟΕ	4419.39	5611.45
ΔΕΚ	5232.19	6643.49

Πίνακας 15: Μέση Ημερήσια Ενεργειακή Ζήτηση 1^{ου} και 25^{ου} Έτους

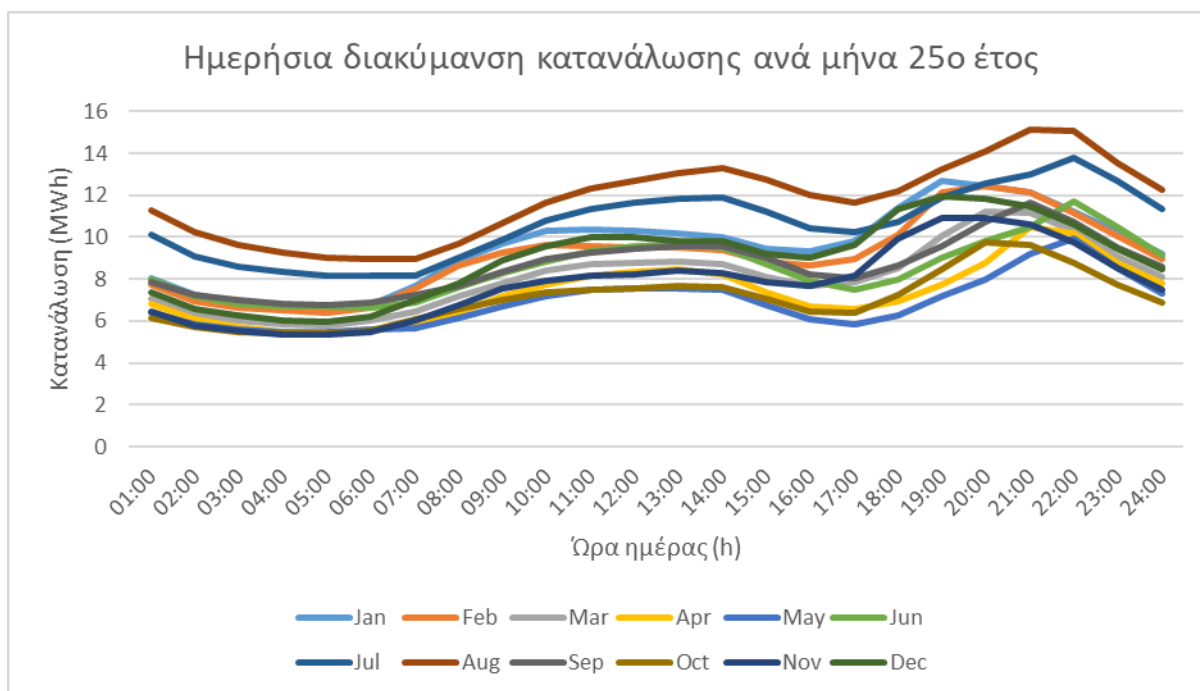
ΜΗΝΑΣ	Μέση ημερήσια ζήτηση 1ο Έτος (MWh)	Μέση ημερήσια ζήτηση 25ο Έτος (MWh)
ΙΑΝ	178.90	227.15
ΦΕΒ	171.16	217.32
ΜΑΡ	152.76	193.97
ΑΠΡ	139.22	176.77
ΜΑΪ	130.20	165.32
ΙΟΥΝ	161.00	204.42
ΙΟΥΛ	200.58	254.69

ΑΥΓ	222.59	282.62
ΣΕΠΤ	163.23	207.26
ΟΚΤ	133.39	169.37
ΝΟΕ	147.31	187.05
ΔΕΚ	168.78	214.31

Αντίστοιχα, στα Διαγράμματα 8 και 9 διαφαίνονται οι ημερήσιες διακυμάνσεις της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας του νησιού για το 2020 και για το 2045.



Διάγραμμα 8: Ημερήσια Διακύμανση Ενεργειακής Κατανάλωσης ανά Μήνα για το 1^ο Έτος



Διάγραμμα 9: Ημερήσια Διακύμανση Ενεργειακής Κατανάλωσης ανά Μήνα για το 25^ο Έτος

4.4.3 Αρδευτικές Ανάγκες

Οι αρδευτικές ανάγκες προκύπτουν από τον συνδυασμό της ανάγκης νερού για τις καλλιέργειες που απαντώνται στο νησί, καθώς και της ανάγκης νερού για την κτηνοτροφία. Για την ακριβή εκτίμηση της κατανάλωσης των ζώων σε νερό είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε το είδος των ζώων, το πλήθος τους, την ηλιακή κατανομή τους, καθώς και το ποσοστό υγρασίας του γρασιδιού (ξηρό ή χλωρό γρασίδι) (Σκρουφούτα, 2020). Τα εδάφη της Λήμνου χαρακτηρίζονται κυρίως ως καλώς αποστραγγιζόμενα, δηλαδή το έδαφος παραμένει υγρό μόνο κατά την υγρή περίοδο του έτους (Terra Lemnia). Στον Πίνακα 16, παρουσιάζονται το είδος των ζώων που εκτρέφονται, το πλήθος τους και η κατά κεφαλή κατανάλωσή τους ημερησίως και ετησίως.

Πίνακας 16: Κατά Κεφαλή Κατανάλωση ανά Είδος Ζώου

Ζώα	Πλήθος	Κατά κεφαλή κατανάλωση (L/d)	Κατανάλωση συνολική (L/d)	Κατανάλωση συνολική (L/year)
Αίγες	11031	5	55155	20131575
Ερίφια (νεαρό κατσίκι)	898	70	62860	22943900
Προβατίνες	65153	5	325765	118904225
Αμνοί	7402	10	74020	27017300
Κριοί και τράγοι	3033	70	212310	77493150
Βοοειδή αρσενικά	329	140	46060	16811900

Βοσειδή θηλυκά μικρότερα των 24 μηνών	251	140	35140	12826100
Αγελάδες	781	150	117150	42759750
Χοιρομητέρες	31	40	1240	452600

Για την εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών των καλλιεργειών, χρησιμοποιείται η μέθοδος Blaney – Criddle (Μιμικού, Μπαλτάς, 2018). Οι Blaney – Criddle (1962) ανέπτυξαν μια εμπειρική σχέση η οποία συνδέει την εξατμισοδιαπνοή, τη μέση θερμοκρασία του αέρα και το ποσοστό των ωρών της ημέρας. Η εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται άμεσα από το άθροισμα των γινομένων των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών του αέρα και των μηνιαίων ποσοστών ωρών ημέρας, σε μια αναπτυσσόμενη καλλιέργεια με επαρκή περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό και υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (4.8) (Μαστροκώστα, 2016):

$$ET = k_c F = k_c \frac{(1.8 * T + 32) * p}{3.94} \quad (4.8)$$

Όπου:

- ET η ημερήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm,
- k_c ο εμπειρικός συντελεστής καλλιέργειας,
- T η μέση ημερήσια θερμοκρασία σε °C και
- p το μέσο ημερήσιο ποσοστό διάρκειας των ωρών της ημέρας.

Η μέση ημερήσια θερμοκρασία T υπολογίζεται από την παραγωγή συνθετικής χρονοσειράς θερμοκρασίας (Κεφάλαιο 4.2). Το μέσο ημερήσιο ποσοστό διάρκειας των ωρών ημέρας για κάθε μήνα, βασίζεται στο γεωγραφικό πλάτος της περιοχής και την μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας σε ώρες. Η Λήμνος βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος 39.55°. Στον Πίνακα 17, παρουσιάζονται η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας για κάθε μήνα, και το μέσο ημερήσιο ποσοστό διάρκειας των ωρών της ημέρας κάθε μήνα.

Πίνακας 17: Μέση Αστρονομική Διάρκεια Ημέρας σε ώρες και ποσοστό ανά Μήνα

A/A	ΜΗΝΑΣ	DAYS/MONTH	N (h)	p (%)
1	ΙΑΝ	31	9.96	0.41
2	ΦΕΒ	28	11.04	0.46
3	ΜΑΡ	31	12.41	0.52
4	ΑΠΡ	30	13.66	0.57
5	ΜΑΪ	31	14.59	0.61
6	ΙΟΥΝ	30	14.76	0.62
7	ΙΟΥΛ	31	14.09	0.59
8	ΑΥΓ	31	12.89	0.54
9	ΣΕΠΤ	30	11.57	0.48
10	ΟΚΤ	31	10.28	0.43
11	ΝΟΕ	30	9.40	0.39

12	ΔΕΚ	31	9.25	0.39
----	-----	----	------	------

Για την εκτίμηση του φυτικού συντελεστή k_c πρέπει να είναι γνωστά τα τέσσερα στάδια βλάστησης, δηλαδή αρχικό, κύριο, μέσο και τελικό, οι αντίστοιχοι φυτικοί συντελεστές κάθε σταδίου, καθώς και η περίοδος φύτευσης. Τα προαναφερθέντα στοιχεία συλλέγονται από το [FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 Crop Evapotranspiration](#). Στην περίπτωση των αμπελιών, τα στοιχεία αυτά λαμβάνονται από τους Παναγιώλια και Δήμου (2000), θεωρώντας ότι ανταποκρίνονται καλύτερα στα ελληνικά δεδομένα. Επιπλέον, οι ελαιώνες δεν θεωρούνται αρδευόμενη καλλιέργεια, με αποτέλεσμα ο φυτικός συντελεστής που τους αντιστοιχεί να είναι μηδενικός καθόλη τη διάρκεια του έτους. Σύμφωνα με τις γεωργικές στατιστικές της ΕΛΣΤΑΤ του 2010, η Λήμνος διαθέτει συνολική χρησιμοποιούμενη γεωργική γη ίση με 298753 στρέμματα. Οι αμιγώς γεωργικές εκμεταλλεύσεις ανέρχονται σε ποσοστό 38.6% επί του συνόλου και τα 91661 στρέμματα θεωρούνται αρδευόμενα. Στους Πίνακες 18 έως 21 παρουσιάζονται τα είδη των καλλιεργειών και τα απαραίτητα στοιχεία για την εκτίμηση του φυτικού συντελεστή.

Πίνακας 18: Είδη Καλλιέργειας Λήμνου

Είδος Καλλιέργειας	Έκταση σε στρέμματα	Ποσοστό
Δενδρώδεις	83	0.06%
Υπαίθρια κηπευτικά	128	0.09%
Υπαίθρια κηπευτικά Πατάτες	25	0.02%
Κηπευτικά υπό κάλυψη	31	0.02%
Αμυγδαλιές	73	0.05%
Ελαιώνες	747	0.50%
Ψυχανθή (ρεβίθια)	59	0.04%
Άφκος	45	0.03%
Φασόλια	2049	1.36%
Αρωματικά φυτά	69	0.05%
Λοιπά σιτηρά	10473	6.97%
Κριθάρι Λήμνου	70864	47.20%
Ζωοτροφές υπόλοιπα μίγματα δημητριακών	57725	38.44%
Ζωοτροφές Μηδική	250	0.17%
Σκληρό σιτάρι	2024	1.35%
Αμπέλια οινοποιείας	5488	3.65%
Σαλιγκαροτροφία	18	0.01%
Σύνολο	150151	100.00%

Πίνακας 19: Εκτάσεις Αρδευόμενων Καλλιεργειών

Είδος καλλιέργειας	Έκταση (στρ.)	Ποσοστό (%)
-----------------------	------------------	----------------

Σίτος, βίκος	12497	13.63%
Κριθάρι	70864	77.31%
Μηδική	250	0.27%
Ντομάτα	64	0.05%
Φασόλια	2049	2.24%
Ελαιώνες	0	0.00%
Αμπέλι	5488	5.99%
Μήλα	41.5	0.05%
Αχλάδια	64	0.05%
Εσπεριδοειδή	41.5	0.05%
Αμυγδαλιές	300	0.33%
Πατάτες	25	0.03%
Ρεβίθια	104	0.11%
Σύνολο	91788	1.00

Πίνακας 20: Διάρκεια κάθε σταδίου βλάστησης σε ημέρες

Καλλιέργεια	Ονομασία FAO	Init. (Lini)	Dev. (Ldev)	Mid (Lmid)	Late (Llate)	Total	Plant Date
Σίτος, βίκος	Winter Wheat	30	140	40	30	240	Νοέμβριος
Κριθάρι	Barley	40	60	60	40	200	Νοέμβριος
Μηδική	Alfalfa	5	10	10	5	30	Μάρτιος
Ντομάτα	Tomato	30	40	45	30	145	Απρίλιος/ Μάιος
Φασόλια	Faba bean, broad bean	20	30	35	15	100	Μάρτιος/ Απρίλιος
Αμπέλι	Grapes, wine	30	60	40	80	210	Απρίλιος
Μήλα	Apples (Fruits and Trees)	120	90	120	60	390	Μάρτιος
Αχλάδια	Pears	120	90	120	60	390	Μάρτιος
Εσπεριδοειδή	Citrus	60	90	120	95	365	Ιανουάριος
Αμυγδαλιές	Almonds	20	60	30	40	150	Φεβρουάριος
Πατάτες	Potatoes	30	35	50	30	145	Απρίλιος
Ρεβίθια	Chickpea	20	30	35	15	100	Μάρτιος

Πίνακας 21: Φυτικοί Συντελεστές για κάθε στάδιο βλάστησης

Καλλιέργεια	Ονομασία FAO	Kc ini	Kc dev	Kc mid	Kc end
Σίτος, βίκος	Winter Wheat	0.4	0.775	1.15	0.33
Κριθάρι	Barley			1.15	0.25
Μηδική	Alfalfa	0.4	0.67565	0.9513	0.9
Ντομάτα	Tomato		1.152	1.152	0.8
Φασόλια	Faba bean, broad bean	0.5	0.826	1.152	1.1
Αμπέλι	Grapes, wine	0.3	0.5	0.7	0.45

Μήλα	Apples (Fruits and Trees)	0.6	0.775	0.95	0.7518
Αχλάδια	Pears	0.6	0.775	0.95	0.7518
Εσπεριδοειδή	Citrus	0.65	0.625	0.6	0.65
Αμυγδαλιές	Almonds	0.4	0.65	0.9	0.6518
Πατάτες	Potatoes			1.15	0.754
Ρεβίθια	Chickpea	0.4	0.7	1	0.35

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω στοιχεία, υπολογίζονται οι φυτικοί συντελεστές κάθε καλλιέργειας με ακρίβεια δεκαημέρου, οι οποίοι στη συνέχεια ανάγονται σε ημερήσια κλίμακα. Έχοντας τα ποσοστά κάθε καλλιέργειας ως προς την συνολική έκταση των καλλιεργειών και πολλαπλασιάζοντάς τα με τον εκάστοτε φυτικό συντελεστή, προκύπτει ο σταθμισμένος ημερήσιος φυτικός συντελεστής της Λήμνου. Χρησιμοποιώντας λοιπόν την σχέση της μεθόδου Blaney – Criddle, υπολογίζεται η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή της συνολικής αρδευόμενης έκτασης. Από την τελευταία, αφαιρείται η αντίστοιχη ημερήσια βροχόπτωση και προκύπτουν έτσι οι αρδευτικές ανάγκες. Ο συνολικός ημερήσιος όγκος αρδευόμενου νερού σε κυβικά (m³) υπολογίζεται από τον πολλαπλασιασμό των ημερήσιων αρδευτικών αναγκών (m) με την συνολική αρδευόμενη έκταση (m²). Κατά την εφαρμογή, ο όγκος αυτός διαιρείται με τον βαθμό απόδοσης, ο οποίος υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.9) και τις τιμές του Πίνακα 22 (Παναγούλια, Δήμου, 2000).

$$E_p = E_d \times E_a \quad (4.9)$$

Όπου:

- E_d ο βαθμός απόδοσης διανομής και
- E_a ο βαθμός απόδοσης άρδευσης.

Πίνακας 22: Συντελεστές Απόδοσης για Εκτίμηση Ημερήσιου Όγκου Αρδευόμενου Νερού

Συντελεστές Απόδοσης	
E_d	0.70
E_a	0.95
E_p	0.665

Στον Πίνακα 23 και στα Διαγράμματα 10 και 11 παρουσιάζονται οι τιμές της μέσης μηνιαίας και ημερήσιας κατανάλωσης καλλιεργειών σε αρδευτικό νερό, καθώς και οι εκτιμώμενες τιμές αρδευτικής κατανάλωσης των καλλιεργειών για το 1^ο και 25^ο έτος.

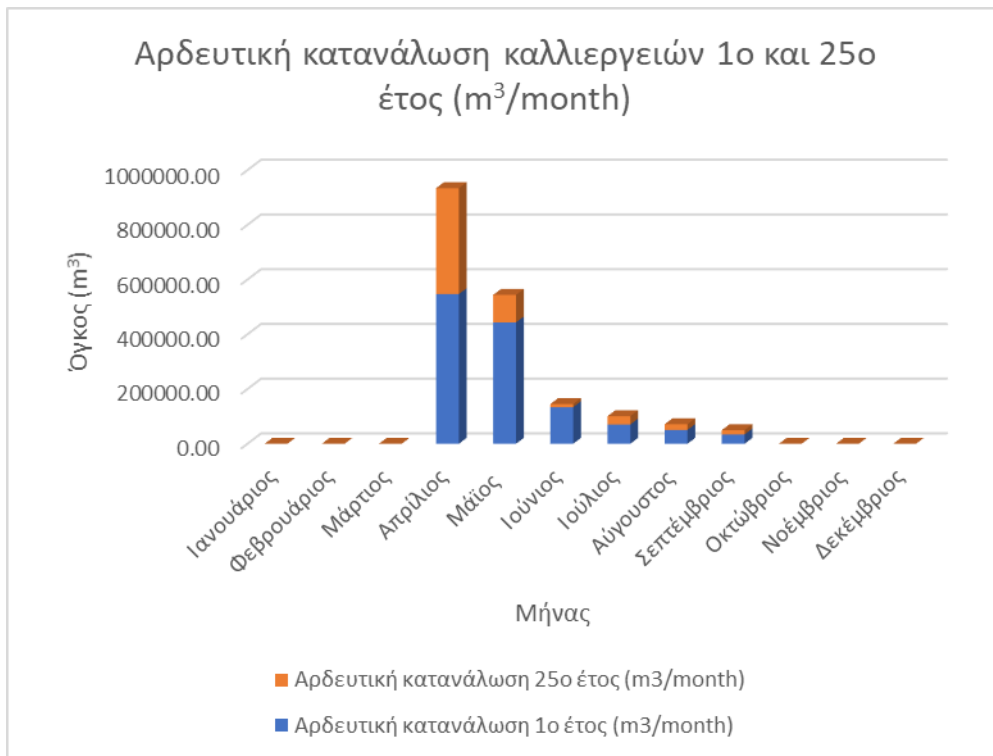
Πίνακας 23: Μέση Μηνιαία και Ημερήσια Κατανάλωση καλλιεργειών σε αρδευτικό νερό

Μήνες	Μέση μηνιαία κατανάλωση (m ³ /month)	Μέση ημερήσια κατανάλωση (m ³ /day)
Ιανουάριος	0.00	0.00
Φεβρουάριος	0.00	0.00
Μάρτιος	0.00	0.00

Απρίλιος	244755.40	8158.51
Μάιος	151561.88	4889.09
Ιούνιος	43176.39	1439.21
Ιούλιος	19341.22	623.91
Αύγουστος	18876.74	608.93
Σεπτέμβριος	6835.09	227.84
Οκτώβριος	0.00	0.00
Νοέμβριος	0.00	0.00
Δεκέμβριος	0.00	0.00



Διάγραμμα 10: Μέση Μηνιαία Κατανάλωση Καλλιεργειών

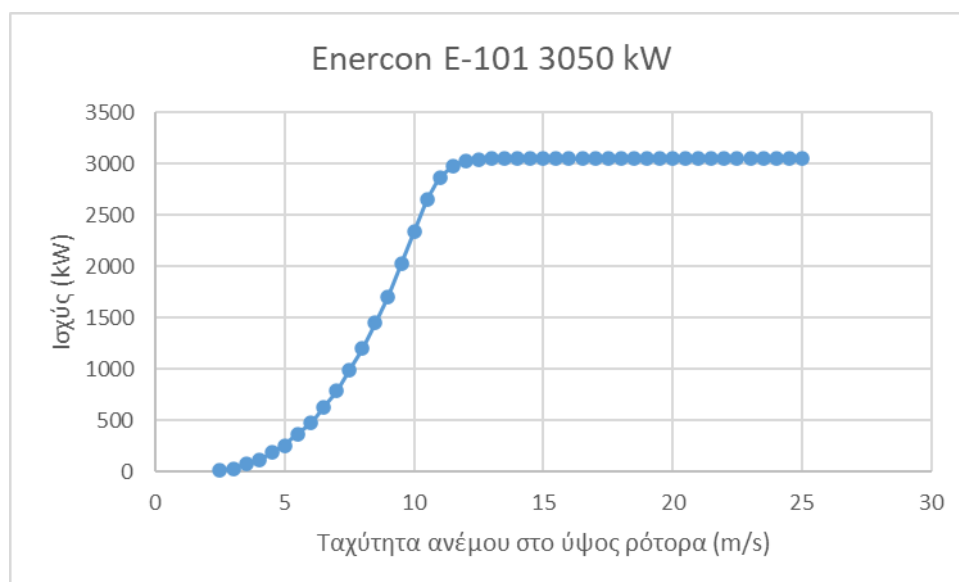


Διάγραμμα 11: Αρδευτική Κατανάλωση Καλλιεργειών 1^ο και 25^ο Έτος

4.5 Εκτίμηση παραγόμενης ενέργειας

4.5.1 Εκτίμηση παραγόμενης αιολικής ενέργειας

Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3, το νησί της Λήμνου διαθέτει ήδη 3 ανεμογεννήτριες τύπου ENERCON E-44 με ονομαστική ισχύ 900 kW η κάθε μία, στο νοτιοανατολικό μέρος του. Παρόλα αυτά, κρίνεται σημαντική η κατασκευή ενός νέου αιολικού πάρκου για την εύρυθμη λειτουργία του ΥΣ. Η χωροθέτηση των ανεμογεννητριών προτείνεται να γίνει στο βορειοδυτικό κομμάτι του νησιού. Η σύσταση αυτή προκύπτει από τις προστατευόμενες περιοχές Natura 2000 που βρίσκονται στην ανατολική πλευρά της Λήμνου, καθώς και από τους έντονους βόρειους ανέμους που επικρατούν. Οι τύποι ανεμογεννητριών που συγκρίνονται για να εγκατασταθούν στο αιολικό πάρκο είναι οι Enercon E – 101 των 3050 kW, Enercon E – 82 των 2350 kW και Enercon E – 82 των 3000 kW. Η πρώτη επιλογή εκ των τριών φαίνεται και η βέλτιστη, αφού εκμεταλλεύεται σημαντικά τις χαμηλές ταχύτητες ανέμου και επωφελείται από το έντονο αιολικό δυναμικό της περιοχής. Στο Διάγραμμα 12, παρουσιάζεται η καμπύλη ισχύος της επιλεγθείσας ανεμογεννήτριας Enercon E – 101 των 3050 kW.



Διάγραμμα 12: Καμπύλη Ισχύος Ανεμογεννήτριας Enercon E – 101 3050 kW

Με την χρήση του λογισμικού ArcGIS Pro, επιλέγεται η θέση των ανεμογεννητριών σε υψόμετρο περίπου 200 m. Γνωρίζοντας πλέον το υψόμετρο των ανεμογεννητριών και το υψόμετρο του μετεωρολογικού σταθμού από το οποίο λήφθηκαν τα ανεμολογικά δεδομένα, μπορεί να διορθωθεί καταλλήλως η συνθετική χρονοσειρά ανέμου που παράχθηκε, σύμφωνα με την σχέση (4.10) (Skroufouta, Baltas, 2021):

$$u_2 = u_1 \times \frac{\ln \frac{z_2}{z_0}}{\ln \frac{z_1}{z_0}} \quad (4.10)$$

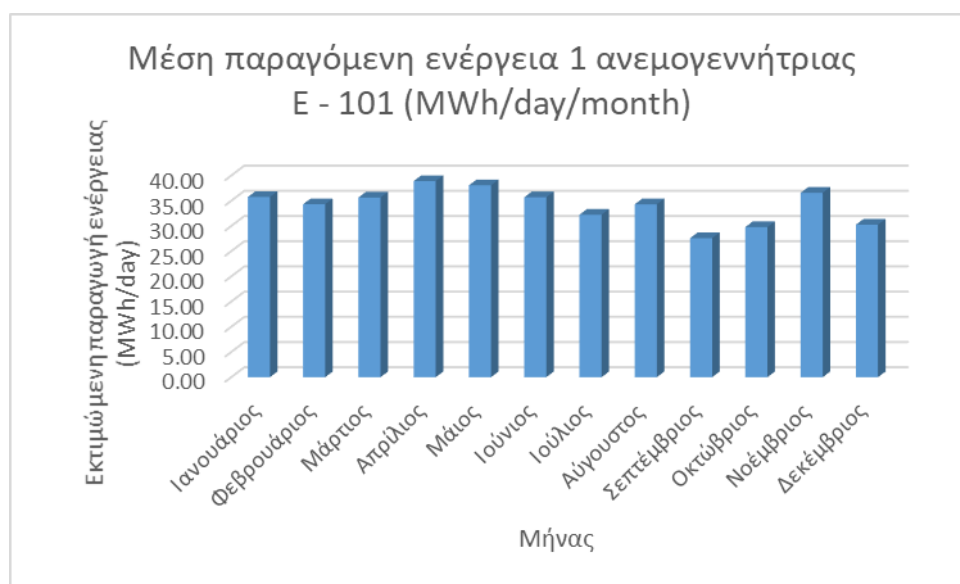
Όπου:

- u_2 η διορθωμένη ταχύτητα του ανέμου σε υψόμετρο $z_2 = 300$ m, που αντιστοιχεί στο υψόμετρο ρότορα των ανεμογεννητριών
- u_1 η ταχύτητα ανέμου από τη συνθετική χρονοσειρά σε υψόμετρο $z_1 = 4.8$ m, που αντιστοιχεί στο υψόμετρο του μετεωρολογικού σταθμού
- z_0 η παράμετρος τραχύτητας του εδάφους οι τιμές της οποίας λαμβάνονται από τον Πίνακα 24. Στην προκειμένη περίπτωση θεωρείται ασφαλτοστρωμένη η επιφάνεια, και άρα λαμβάνει τιμή ίση με 0.002.

Πίνακας 24: Τυπικές Τιμές της παραμέτρου z_0

Τυπικές τιμές 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 1cm	0.1
Χλόη ύψου 1 - 10cm	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

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, και έχοντας εξάγει την διορθωμένη χρονοσειρά ανέμου με τρίωρο βήμα, η τελευταία μετατρέπεται σε ωριαίο χρονικό βήμα. Αυτό επιτυγχάνεται θεωρώντας ότι οι ωριαίες τιμές αντιστοιχούν στο αρχικό τρίωρο που ανήκουν κάθε φορά. Η ενεργειακή χρονοσειρά προκύπτει από την χρονοσειρά ανέμου ωριαίου βήματος και της αντίστοιχης καμπύλης ισχύος της ανεμογεννήτριας, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 13.



Διάγραμμα 13: Μέση Παραγόμενη Ενέργεια Ανεμογεννήτριας E – 101 3050 kW

4.5.2 Εκτίμηση παραγόμενης υδροηλεκτρικής ενέργειας

Το υπό μελέτη υδροηλεκτρικό έργο αποτελείται από ένα ταμιευτήρα θαλασσινού νερού σε ύψος 200 m, στο βορειοδυτικό τμήμα του νησιού. Η ενέργεια που παράγεται από το υδροηλεκτρικό υπολογίζεται με ωριαίο χρονικό βήμα μέσω του υβριδικού μοντέλου που αναλύεται. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των αντλιών είναι 1244 kW. Η ενέργεια που παράγεται από τον υδροστρόβιλο προκύπτει από την σχέση (4.11):

$$E_{YHE} = \gamma \times Q \times H \times n \quad (4.11)$$

Όπου:

- γ : το ειδικό βάρος του νερού (9.81 kN/m³),
- Q : η παροχή που διέρχεται από τον στρόβιλο (m³/s),
- H : η υψομετρική διαφορά μεταξύ της στάθμης του νερού ανάντη και του υψομέτρου του υδροστρόβιλου κατάντη και (m),
- n : ο συντελεστής απόδοσης του στροβίλου.

4.6 Αφαλάτωση

Η μονάδα αφαλάτωσης του συστήματος διαθέτει ισχύ 490 m³/h και καταναλώνει 6 kW/m³ που αφαλατώνει, η κατανάλωση της οποίας υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.12):

$$E = \rho \times g \times V \times H_{\mu} / n \quad (4.12)$$

Όπου:

- ρ : η πυκνότητα του νερού (1000 kg/m³),
- g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s²),
- V : ο όγκος του νερού που αντλείται (m³),
- H_{μ} : το μανομετρικό ύψος (m) και
- n : ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας (0.85).

4.7 Εκτίμηση συνολικού όγκου δεξαμενής πόσιμου νερού

Εκτός από τον ταμιευτήρα θαλασσινού νερού του υδροηλεκτρικού έργου, σημαντικό ρόλο για την σωστή λειτουργία του ΥΣ αποτελεί μια δεξαμενή πόσιμου νερού. Η δεξαμενή αυτή συνδέεται μόνο με το δίκτυο ύδρευσης, άρδευσης και αφαλάτωσης, και βρίσκεται κοντά στην τελευταία. Η λειτουργία της αποσκοπεί πρωταρχικά στην μέγιστη δυνατή κάλυψη των αναγκών ύδρευσης και έπειτα, αν το απόθεμά της το επιτρέπει, της άρδευσης. Επιπλέον,

επιλέγεται ένα σταθερό ποσοστό πληρότητας της δεξαμενής, έτσι ώστε σε περίπτωση ξηρασίας να μπορούν να καλυφθούν οι όποιες ανάγκες ύδρευσης.

Σύμφωνα με τον παραπάνω επιθυμητό τρόπο λειτουργίας, λαμβάνει χώρα η βελτιστοποίηση του συστήματος, έτσι ώστε η αξιοπιστία της ύδρευσης να ανέρχεται στο 99% και της ενέργειας στο 95%. Για το πρώτο σκέλος της βελτιστοποίησης, οι μεταβλητές που επηρεάζουν το σύστημα είναι ο όγκος της δεξαμενής πόσιμου νερού και ο όγκος που αφαλατώνεται. Για το δεύτερο σκέλος, οι μεταβλητές είναι η χωρητικότητα του ταμιευτήρα του υδροηλεκτρικού έργου και το πλήθος των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου.

4.8 Αποθήκευση υδρογόνου και χρήση

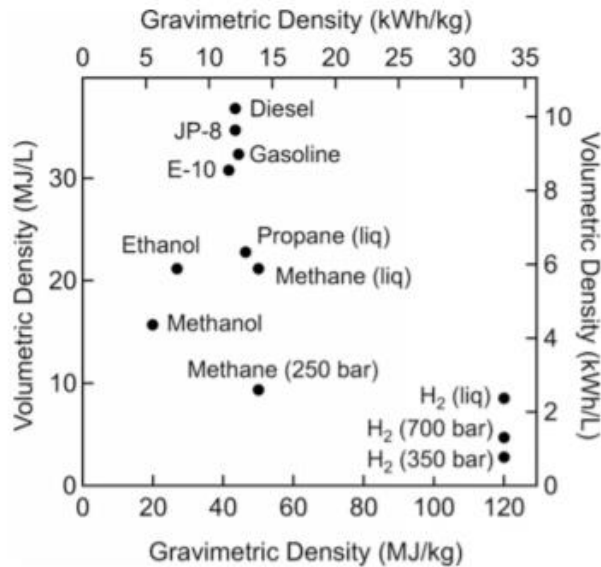
Το υδρογόνο (H_2) αποτελεί ένα αέριο άοσμο, εύφλεκτο, άχρωμο και ελαφρύτερο από τον αέρα. Κατά την καύση του με το οξυγόνο παράγεται νερό (H_2O). Το ατομικό υδρογόνο αποτελεί ένα από τα πιο δραστικά χημικά στοιχεία, αφού μπορεί να ενωθεί με πλήθος άλλων χημικών στοιχείων. Αντίστοιχα, το μοριακό υδρογόνο μπορεί να αντιδράσει με πολλά χημικά στοιχεία και ενώσεις. Για αυτό βρίσκεται στο πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, σε φυτικούς και ζωικούς ιστούς και οργανικές ενώσεις.

Το υδρογόνο λοιπόν αποτελεί πρώτη ύλη, καύσιμο, φορέας ενέργειας και μέσο αποθήκευσης ενέργειας. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι κατά την χρήση του εκπέμπονται ελάχιστοι έως και μηδενικοί ατμοσφαιρικοί ρύποι. Επιπλέον, υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να παραχθεί το υδρογόνο (Ευρωπαϊκή Ένωση, 2020):

- Το «υδρογόνο που βασίζεται στην ηλεκτρική ενέργεια» παράγεται με ηλεκτρόλυση του νερού ανεξάρτητα από την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ποσότητα εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου στην πλήρη κύκλο ζωής εξαρτάται από τον τρόπο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Το «ανανεώσιμο υδρογόνο» ή πράσινο ή καθαρό υδρογόνο (Green H_2), παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενη από ΑΠΕ. Ένας άλλος τρόπος παραγωγής του είναι μέσω αναμόρφωσης του βιοαερίου (αντί του φυσικού αερίου) ή τη βιοχημική μετατροπή της βιομάζας, εφόσον συνάδει με τις απαιτήσεις βιωσιμότητας. Κατά τον πλήρη κύκλο ζωής της παραγωγής αυτού του υδρογόνου, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι μηδενικές.
- Το «υδρογόνο ορυκτών καυσίμων με δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα» (Brown H_2) παράγεται από διάφορες διεργασίες που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα ως πρώτες ύλες, κυρίως την αναμόρφωση φυσικού αερίου ή την αραιοποίηση του γαιάνθρακα. Αυτό το είδος παραγωγής συναντάται πιο συχνά σήμερα. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά την διαδικασία παραγωγής του υδρογόνου δεσμεύονται, λαμβάνοντας υπόψη την αποτελεσματικότητα της δέσμευσης αερίων του θερμοκηπίου (90% κατ' ανώτατο όριο).

- Το «υδρογόνο χαμηλών ανθρακούχων εκπομπών» (Blue H₂) περιλαμβάνει το υδρογόνο ορυκτών καυσίμων με δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα και το υδρογόνο που βασίζεται στην ηλεκτρική ενέργεια, με σημαντικά μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τον πλήρη κύκλο ζωής σε σύγκριση με την υφιστάμενη παραγωγή υδρογόνου.
- Τα συνθετικά καύσιμα που παράγονται από υδρογόνο περιλαμβάνουν διάφορα αέρια και υγρά καύσιμα με βάση το υδρογόνο και τον άνθρακα. Για να θεωρούνται ανανεώσιμα τα συνθετικά καύσιμα, το μέρος του υδρογόνου του συνθετικού αερίου πρέπει να είναι ανανεώσιμο. Τα συνθετικά καύσιμα περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, τη συνθετική κηροζίνη στην αεροπορία, το συνθετικό πετρέλαιο κίνησης για τα αυτοκίνητα και διάφορα μόρια που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή χημικών και λιπασμάτων. Τα συνθετικά καύσιμα μπορεί να συνδέονται με πολύ διαφορετικά επίπεδα εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ανάλογα με τις χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες και διεργασίες. Όσον αφορά στην ατμοσφαιρική ρύπανση, η καύση συνθετικών καυσίμων παράγει επίπεδα εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων παρόμοια με τα επίπεδα των ορυκτών καυσίμων.

Το υδρογόνο διαθέτει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα. Ενώ η ενέργεια ανά μάζα υδρογόνου είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τα περισσότερα άλλα καύσιμα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 8, η ενέργεια κατ' όγκο είναι πολύ μικρότερη από τα υγρά καύσιμα όπως η βενζίνη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της εταιρείας Linde που παράγει, επεξεργάζεται, αποθηκεύει και διανείμει υδρογόνο είναι ότι 3000 L αερίου υδρογόνου περιέχουν την ίδια ποσότητα ενέργειας με ένα λίτρο βενζίνη. Το υδρογόνο, λοιπόν, πρέπει να συμπιεστεί αρκετά για να αυξήσει την ενεργειακή του πυκνότητα και να επιτραπεί η αποτελεσματική αποθήκευση και μεταφορά του. Αυτό συνεπάγεται ότι το αέριο υδρογόνο είτε πρέπει να συμπιεστεί για να παραχθεί συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο, είτε να υγροποιηθεί κρυογονικά για να παραχθεί υγρό υδρογόνο. Υπό φυσιολογικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, ισχύει ότι 1kg H₂ καταλαμβάνει 12.15 m³ και ενεργειακό περιεχόμενο 33.5 kWh (Γκανάς, Δημόκριτος, 2020)



Εικόνα 8: Βαρυμετρικές και ογκομετρικές πυκνότητες ενέργειας κοινών καυσίμων με βάση χαμηλότερες τιμές θερμότητας, υπολογισμένες για θερμοκρασία περιβάλλοντος (U.S. Department of Energy, 2017)

Ένα δίκτυο αγωγών ίσως είναι η καλύτερη επιλογή, εάν απαιτείται υδρογόνο σε μία βιομηχανική τοποθεσία. επίσης, αρκετές εγκαταστάσεις παραγωγής μπορούν να τροφοδοτήσουν H₂ στο δίκτυο και αυτό με τη σειρά του να τροφοδοτήσει με αέριο στις απαραίτητες τοποθεσίες. Υπάρχουν ωστόσο και κρυογονικές δεξαμενές για την αποθήκευση του υδρογόνου, εφόσον δεν επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί απευθείας. Το υγρό υδρογόνο (Liquid H₂, LH₂) αποθηκεύεται αποτελεσματικά σε δεξαμενές μονωμένες, με τέτοιο τρόπο ώστε να παραμένει σε ίση ή χαμηλότερη θερμοκρασία από την κρίσιμη (-239.95 °C για το υδρογόνο), οι οποίες μπορούν να εγκατασταθούν είτε οριζόντια, είτε κάθετα. Στην αγορά, διατίθενται χωρητικότητες από 3000 λίτρα έως και πάνω από 100000 λίτρα και διαθέτουν τυποποιημένες πιέσεις εργασίας 18, 22 ή 36 bar αντίστοιχα. Για μαζική αποθήκευση αέριου υδρογόνου, μία επιλογή αποτελούν οι υπόγειες σπηλιές αλατιού. Το αέριο πρέπει να καθαριστεί και να συμπιεστεί πριν την έγχυσή του στο σπήλαιο. Οι χώροι αυτοί μπορούν να έχουν εφεδρική λειτουργία για ένα δίκτυο αγωγών. Ακόμη, για την αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου υπάρχουν 4 τύποι δεξαμενής υψηλής πίεσης:

- Τύπος I: δεξαμενή πίεσης κατασκευασμένη από μέταλλο,
- Τύπος II: δεξαμενή πίεσης κατασκευασμένη από παχύ μεταλλικό στεφάνι επένδυσης τυλιγμένο με σύνθεση ινών ρητίνης,
- Τύπος III: δεξαμενή πίεσης κατασκευασμένη από μεταλλική επένδυση πλήρως τυλιγμένο με σύνθετο υλικό από ίνες ρητίνης και
- Τύπος IV: δεξαμενή πίεσης κατασκευασμένη από πολυμερή επένδυση πλήρως τυλιγμένο με σύνθετο υλικό από ίνες ρητίνης. Η θύρα είναι μεταλλική και ενσωματωμένη στη δομή.

Στον Πίνακα 25, παρουσιάζονται συνολικά οι καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρίσκεται το H₂ και υπό ποιες συνθήκες.

Πίνακας 25: Μέθοδοι και συνθήκες αποθήκευσης H₂

Μέθοδος	Βαρυτική χωρητικότητα (κατά βάρος)	Ενεργειακή πυκνότητα (κατ'όγκο kg/m ³)	Πίεση (bar= 10 ⁵ N/m ²)	Θερμοκρασία	Προβλήματα
Συμπιεσμένο υδρογόνο	100	30	700	Θερμοκρασία δωματίου	Υψηλή πίεση
Υγρό υδρογόνο	100	70	1	-253	Πιθανή εξάτμιση
Υδρίδια μετάλλων	1.3 - 6.6	95 - 160	1.0 - 50.0	Θ.Δ. – 300	Χαμηλή χωρητικότητα
Χημικά υδρίδια	5.0 - 25.0	50 - 150	10.0 - 60.0	150 – 400	Υψηλή θερμοκρασία, αναστρεπτό
Πορώδη υλικά	6.0 - 14.0	40 - 90	1.0 - 150.0	-196	Χαμηλή θερμοκρασία, υψηλή πίεση

Στη συνέχεια, αφού το υδρογόνο έχει αποθηκευτεί καταλλήλως, χρησιμοποιούνται κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ενέργειας. Η κυψέλη καυσίμου είναι μια συσκευή η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω μίας ηλεκτροχημικής αντίδρασης και όχι καύσης. Στην συσκευή, το υδρογόνο και το οξυγόνο συνδυάζονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και νερού. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μία καθαρή, αποτελεσματική, αξιόπιστη και αθόρυβη πηγή ενέργειας. Σε αντίθεση με την παραγωγή ενέργειας που βασίζεται στην καύση, οι στάσιμες κυψέλες καυσίμου παρέχουν ουσιαστικά ισχύ χωρίς εκπομπές. Οι κυψέλες καυσίμου δεν παράγουν σωματιδιακούς ρύπους, άκαυστους υδρογονάνθρακες ή αέρια που παράγουν όξινη βροχή. Εκπέμπουν λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα από άλλες λιγότερο αποδοτικές τεχνολογίες και όταν χρησιμοποιούν καύσιμο που παράγεται από ΑΠΕ, οι κυψέλες καυσίμου είναι εντελώς ουδέτερες από άνθρακα. Τα συστήματα δεν χρειάζεται να επαναφορτίζονται περιοδικά όπως οι μπαταρίες, αλλά αντίθετα συνεχίζουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια εφόσον παρέχεται μία πηγή καυσίμου, στην συγκεκριμένη περίπτωση υδρογόνο. Η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από την άνοδο, την κάθοδο και μια μεμβράνη ηλεκτρολυτών. Ένα τυπικό σύστημα λειτουργεί περνώντας υδρογόνο μέσω της ανόδου της κυψέλης καυσίμου και οξυγόνο μέσω της καθόδου. Στη θέση της ανόδου, ένας καταλύτης χωρίζει τα μόρια υδρογόνου σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια. Τα πρωτόνια περνούν μέσα από την πορώδη μεμβράνη ηλεκτρολυτών, ενώ τα ηλεκτρόνια αναγκάζονται να περάσουν από ένα κύκλωμα, δημιουργώντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα και περίσσεια θερμότητας. Στην κάθοδο τα πρωτόνια, τα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο συνδυάζονται για να παράγουν μόρια νερού. Καθώς δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη, οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν αθόρυβα και με εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία. Οι κυψέλες καυσίμου είναι εξαιρετικά αποδοτικές, φτάνοντας συνήθως την απόδοση καυσίμου στην

ηλεκτρική ενέργεια κατά 60%, σχεδόν διπλάσια από την απόδοση του σημερινού ηλεκτρικού δικτύου. (Fuel cell and hydrogen association)

5. Αποτελέσματα – Συζήτηση

5.1 Περιγραφή υβριδικού συστήματος

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται η εγκατάσταση ενός υβριδικού συστήματος – αιολικού σταθμού παραγωγής ενέργειας και μονάδας αφαλάτωσης, με δύο πιθανά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, δηλαδή με την μέθοδο της αντλησιοταμίευσης ή με την παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης. Γίνεται λοιπόν προσομοίωση και εξέταση δύο σεναρίων λειτουργίας. Σκοπός και των δύο μεθόδων αποθήκευσης είναι η μέγιστη δυνατή κάλυψη των υδρευτικών, αρδευτικών και ενεργειακών αναγκών. Με τον τρόπο αυτό, το νησί ανεξαρτητοποιείται από την ανάγκη γεωτρήσεων και άρα υπεράντλησης των υδάτινων πόρων. Επιπλέον, λόγω της περιορισμένης λειτουργίας του τοπικού σταθμού, αναμένεται σημαντική μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).

Κατά την προσομοίωση και των δύο σεναρίων, το 30% της παραγόμενης ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες διατίθεται απευθείας στο δίκτυο, ενώ το υπόλοιπο 70% παρέχεται στο εκάστοτε ΥΣ. Επιπλέον, σε περίπτωση αδυναμίας κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, ο ΑΣΠ τροφοδοτεί την Λήμνο με την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια. Η διάρκεια ζωής του έργου είναι 25 χρόνια.

Το ΥΣ προσομοιώνεται σε περιβάλλον Microsoft Excel 365, με ωριαίο βήμα και με δεδομένα εισόδου:

- Την χρονοσειρά παραγόμενης αιολικής ενέργειας,
- Την χρονοσειρά ενεργειακών αναγκών,
- Την χρονοσειρά υδρευτικών αναγκών,
- Την χρονοσειρά αρδευτικών αναγκών,
- Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της αφαλάτωσης, δηλαδή τη δυναμικότητα της και την απαιτούμενη ενέργειά της,
- Την χωρητικότητα της δεξαμενής πόσιμου νερού,
- Τα χαρακτηριστικά μεγέθη του υδροηλεκτρικού, δηλαδή το υψόμετρο του ταμιευτήρα με θαλασσινό νερό, τη μέγιστη και ελάχιστη στάθμη του, την χωρητικότητά του, καθώς και την ισχύ των αντλιών που χρησιμοποιούνται για την άντληση του νερού.

Οι προαναφερθείσες χρονοσειρές έχουν μήκος όσο και η διάρκεια ζωής του έργου, δηλαδή 25 έτη. Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν πάλι σε ωριαίο βήμα:

- Η χρονοσειρά παραγόμενης υδροηλεκτρικής ενέργειας,
- Η χρονοσειρά συνολικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές,
- Η χρονοσειρά ελλείμματος και κάλυψης ενέργειας αυτού από τον Αυτόνομο Σταθμό Παραγωγής,
- Η χρονοσειρά των υδρευτικού νερού,

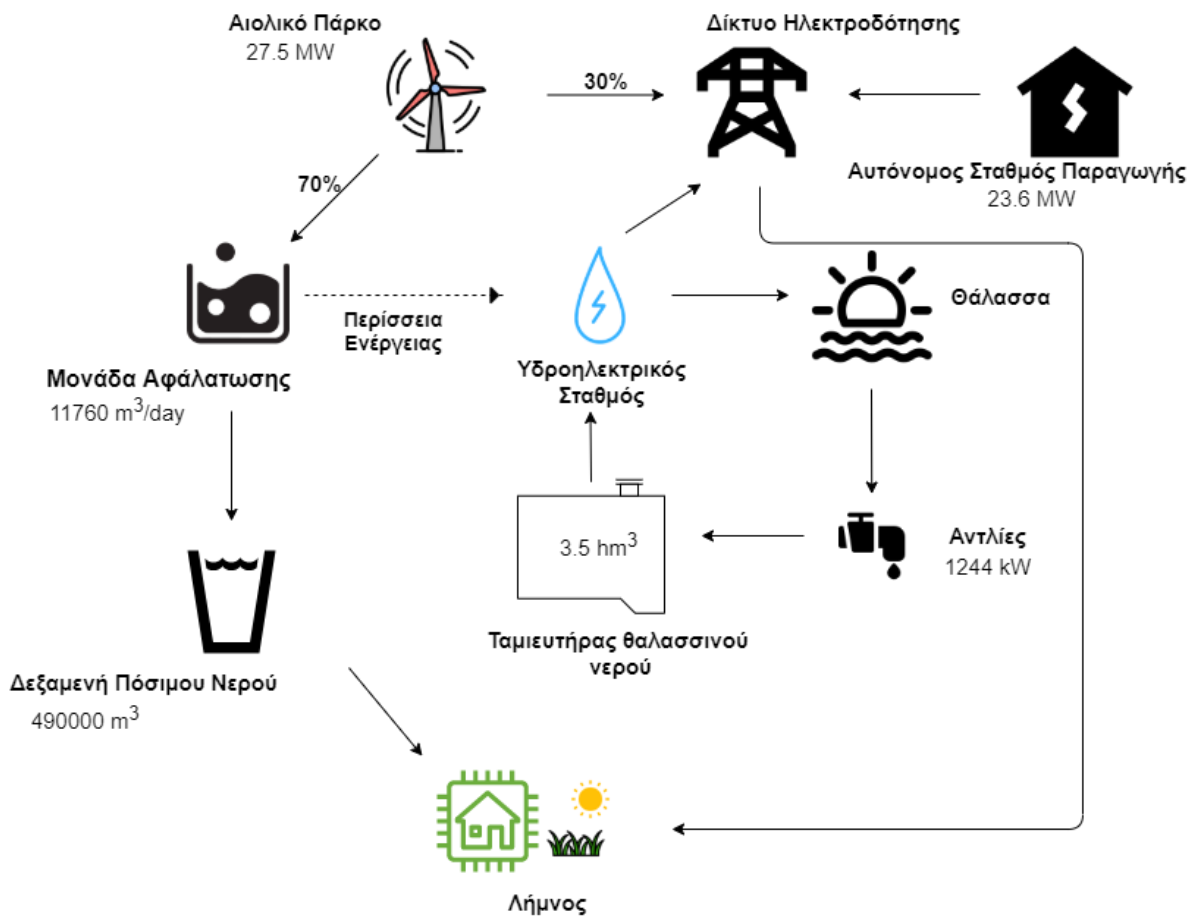
- Η χρονοσειρά αρδευτικού νερού,
- Η χρονοσειρά στάθμης της δεξαμενής πόσιμου νερού και του ταμιευτήρα του υδροηλεκτρικού,
- Η αξιοπιστία κάλυψης των υδρευτικών, αρδευτικών και ενεργειακών αναγκών,
- Η χρονοσειρά παραγόμενου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης.



Εικόνα 9: Χάρτης Προτεινόμενων Θέσεων Υβριδικού Συστήματος (Πηγή: ArcGIS Pro)

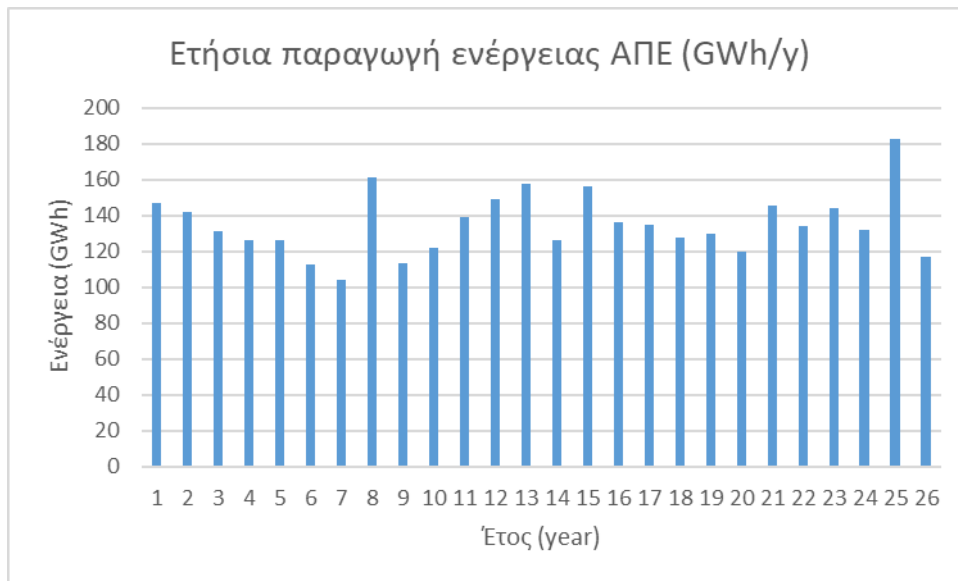
5.2 Σενάριο λειτουργίας 1 – ΥΣ με Υδροηλεκτρικό Έργο

Στο σενάριο λειτουργίας 1, εξετάζεται η περίπτωση του ΥΣ που αποτελείται από το αιολικό πάρκο, την μονάδα αφαλάτωσης και το υδροηλεκτρικό έργο. Σκοπός του σεναρίου, όπως έχει αναφερθεί, είναι η μέγιστη δυνατή κάλυψη των υδρευτικών αναγκών πρωτίστως, και έπειτα των αρδευτικών και ενεργειακών. Όπως φαίνεται από το σχηματικό διάγραμμα, το 30% της ενέργειας που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες μεταφέρεται απευθείας στο δίκτυο. Το υπόλοιπο 70% διατίθεται στην μονάδα αφαλάτωσης για την παραγωγή πόσιμου νερού και στο υδροηλεκτρικό για την διαδικασία της αντλησιοταμίευσης. Καθώς η κάλυψη των υδρευτικών αναγκών είναι πρωτεύουσα, η μονάδα αφαλάτωσης βρίσκεται σε προτεραιότητα για την κατανάλωση της ενέργειας από το αιολικό πάρκο.



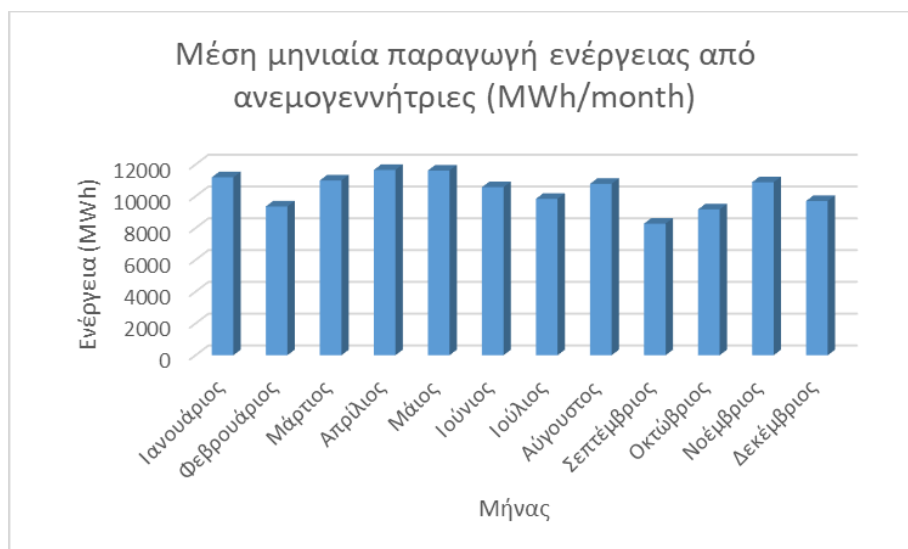
Διάγραμμα 14: Σχηματικό Διάγραμμα Σεναρίου λειτουργίας 1

Έπειτα από την βελτιστοποίηση του συστήματος, για την καλύτερη δυνατή αξιοπιστία γίνεται η επιλογή των παρακάτω μεγεθών. Το αιολικό πάρκο έχει εγκατεστημένες 9 ανεμογεννήτριες τύπου Enercon E – 101 των 3050 kW η κάθε μια. Η μονάδα αφάλατωσης έχει μέγιστη δυναμικότητα 11760 m³/day με απαιτούμενη ενέργεια 6 kWh/m³. Το παραγόμενο νερό οδηγείται σε μία δεξαμενή πόσιμου νερού χωρητικότητας 490000 m³, η οποία βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από την μονάδα, έτσι ώστε να μην είναι απαραίτητη η εγκατάσταση αντλιών. Επιπλέον, ορίζεται ένα σταθερό ποσοστό πληρότητας της δεξαμενής 20%, έτσι ώστε σε περιόδους ξηρασίας να μπορούν καλυφθούν οι υδρευτικές ανάγκες. Στην αρχή της προσομοίωσης, η δεξαμενή θεωρείται κατά το 1/4 γεμάτη. Η περίσσεια ενέργειας οδηγείται στο υδροηλεκτρικό έργο, για την άντληση του θαλασσινού νερού στον αντίστοιχο ταμιευτήρα και έπειτα τη διοχέτευση νερού στους υδροστροβίλους για την απαραίτητη παραγωγή ενέργειας. Το μέγιστο απόθεμα του ταμιευτήρα λοιπόν, ανέρχεται στα 3.5 hm³. Η στάθμη νερού στην έναρξη της προσομοίωσης θεωρείται στα 250 m. Πέρα από την ζήτηση νερού του συστήματος, υπολογίζεται και η ύπαρξη οικολογικής παροχής κατάντη η οποία ανέρχεται στα 1296 m³/day. Στο Διάγραμμα 15, φαίνεται η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας από τις εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες και το υδροηλεκτρικό έργο κάθε χρόνο.

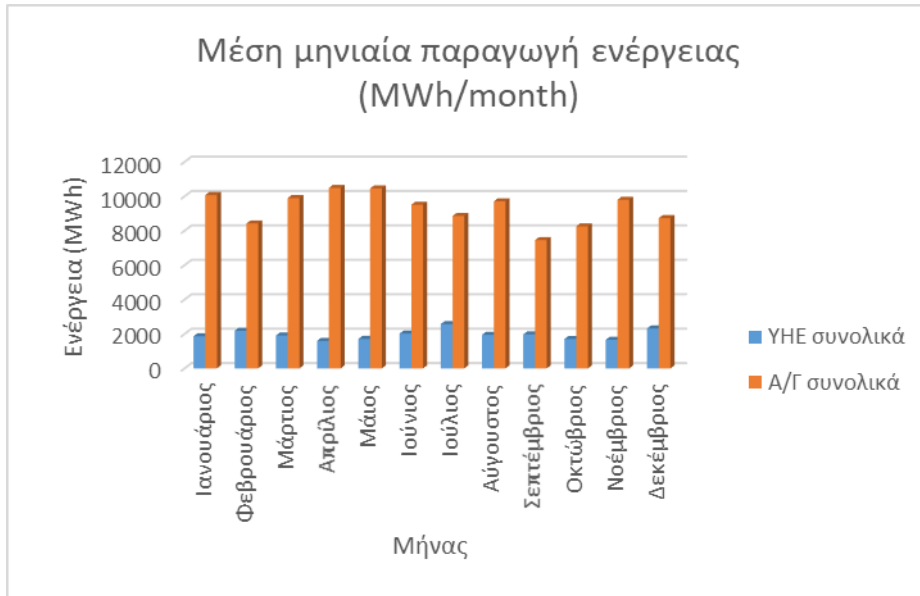


Διάγραμμα 15: Συνολική Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας ΥΣ

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, η αξιοπιστία της ύδρευσης ανέρχεται στο 99.99%, της άρδευσης στο 66% και της ενέργειας στο 91%. Στα Διαγράμματα 15 και 16 παρουσιάζονται η μέση μηνιαία παραγωγή ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες και η σύγκριση αυτής με την παραγωγή του υδροηλεκτρικού έργου. Όπως είναι αναμενόμενο, η παραγωγή ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το υδροηλεκτρικό, αποτέλεσμα λογικό λόγω του πλήθους των ανεμογεννητριών, καθώς και της συγκριτικά λιγότερης λειτουργίας του υδροηλεκτρικού. Επιπλέον, γίνεται αντιληπτό ότι μεγαλύτερη μέση μηνιαία παραγωγή ενέργειας εμφανίζεται τον Απρίλιο και τον Μάιο από την αιολική ενέργεια, ενώ παράγεται περισσότερη υδροηλεκτρική ενέργεια τον Ιούλιο.

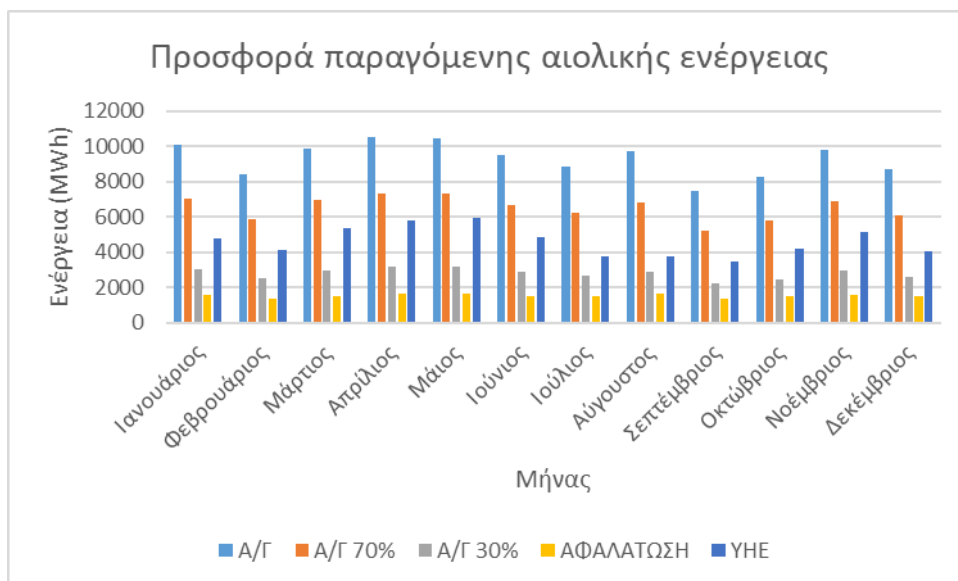


Διάγραμμα 16: Μέση Μηνιαία Παραγωγή Ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες



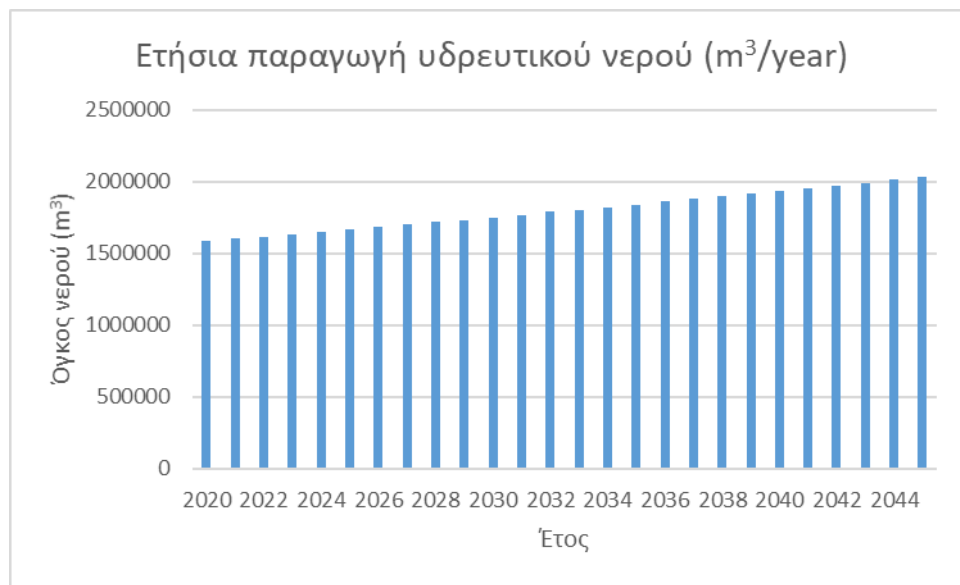
Διάγραμμα 17: Μέση Μηνιαία Παραγωγή Ενέργειας από το ΥΣ συνολικά

Στο Διάγραμμα 18, αναλύεται η κατανομή της αιολικής ενέργειας στα επιμέρους μέρη του ΥΣ, δηλαδή η προσφορά της στη μονάδα αφαλάτωσης και στο υδροηλεκτρικό έργο, καθώς και απευθείας στο δίκτυο ηλεκτροδότησης με το σταθερό ποσοστό 30%. Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, όπως φαίνεται, είναι ικανοποιητική σε όλα τα απαραίτητα μέρη του συστήματος. Παρ' όλα αυτά, στις περιπτώσεις που το σύστημα δεν μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες, ο ΑΣΠ προσφέρει την απαραίτητη ενέργεια στη Λήμνο. Σύμφωνα με την υπάρχουσα νομοθεσία, ο σταθμός είναι απαραίτητο να λειτουργεί κατά μέσο όρο στο 15% της δυναμικότητάς του. Αντίστοιχα, για τις ελάχιστες περιπτώσεις που δεν μπορούν να καλυφθούν οι υδρευτικές ανάγκες, ο απαραίτητος όγκος νερού λαμβάνεται από τις προϋπάρχουσες γεωτρήσεις που εξυπηρετούν σήμερα το νησί.

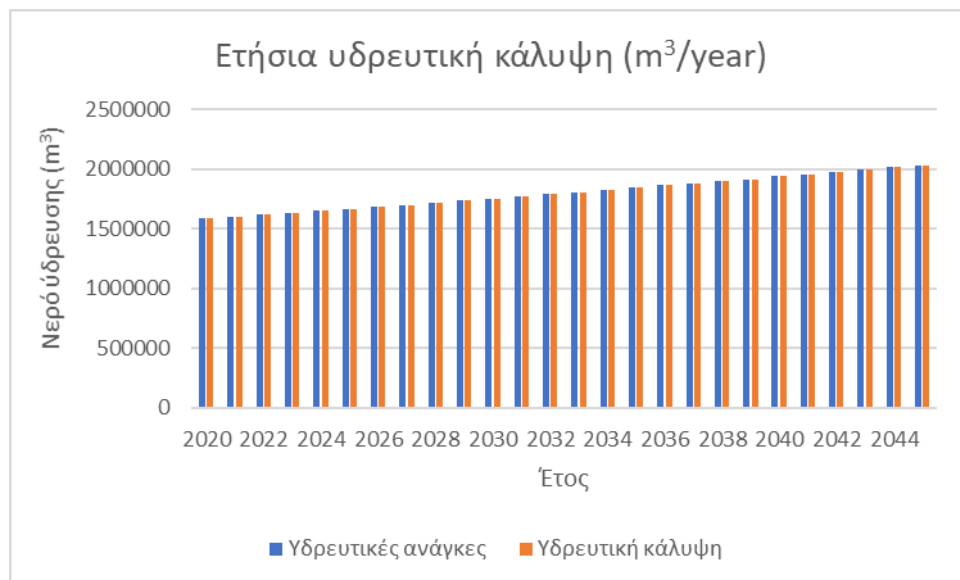


Διάγραμμα 18: Κατανομή Αιολική Ενέργειας στα επιμέρους μέρη του ΥΣ

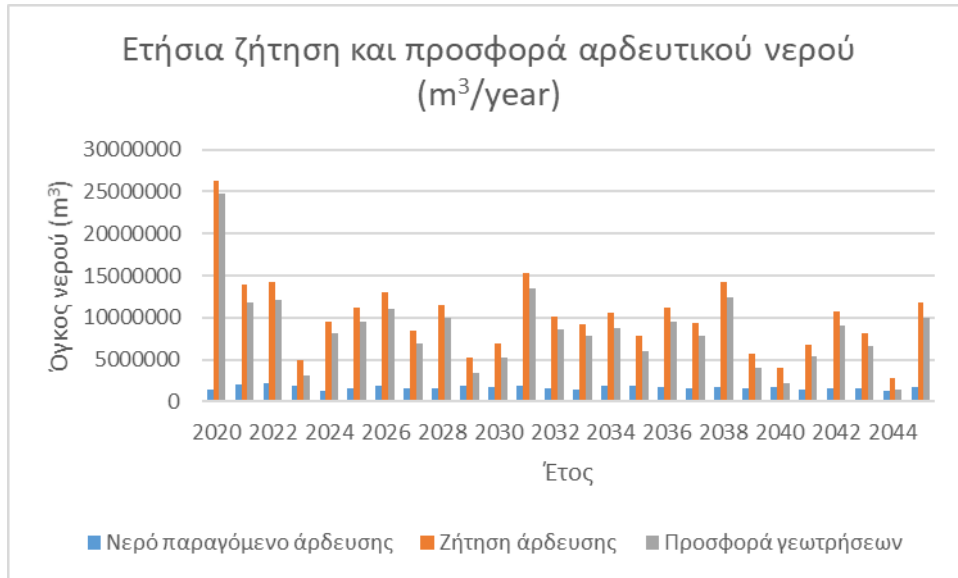
Οι συνολικοί όγκοι νερού ανά έτος της ύδρευσης και άρδευσης, παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα. Για λόγους σύγκρισης, παρατίθενται τα διαγράμματα ζήτησης και προσφοράς υδρευτικού νερού του συστήματος (Διαγράμματα 19 και 20). Το σύστημα ανταποκρίνεται πλήρως στις υδρευτικές ανάγκες, όπως είναι αναμενόμενο από το ποσοστό αξιοπιστίας, το οποίο ανέρχεται στο 99.99%. Όσον αφορά στο Διάγραμμα 21 της ετήσιας ζήτησης και προσφοράς αρδευτικού νερού, γίνεται αντιληπτή η αξιοπιστία του συστήματος η οποία ανέρχεται στο 65% για την συγκεκριμένη χρήση.



Διάγραμμα 19: Ετήσια Παραγωγή Υδρευτικού Νερού

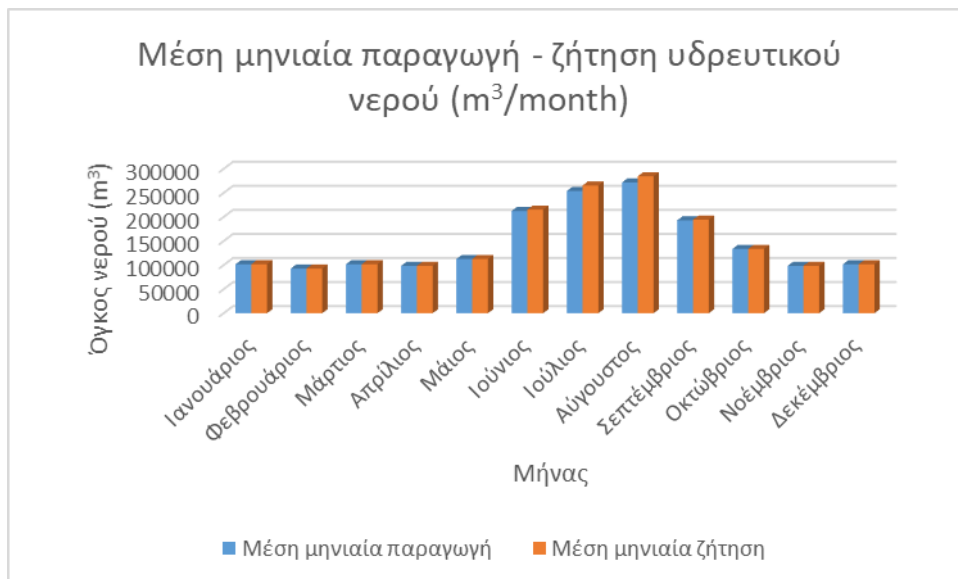


Διάγραμμα 20: Ετήσια Υδρευτική Κάλυψη

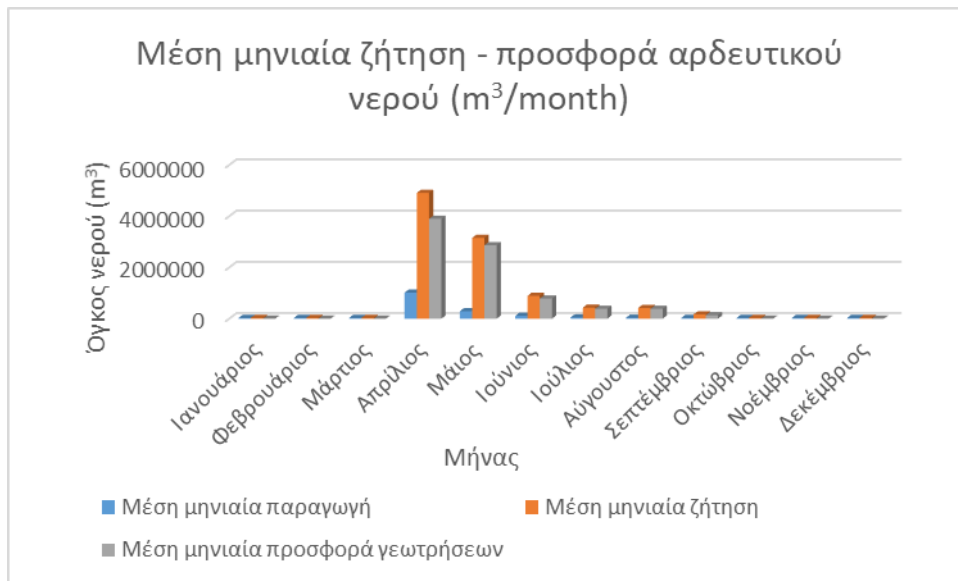


Διάγραμμα 21: Ετήσια Αρδευτική Ζήτηση και Προσφορά

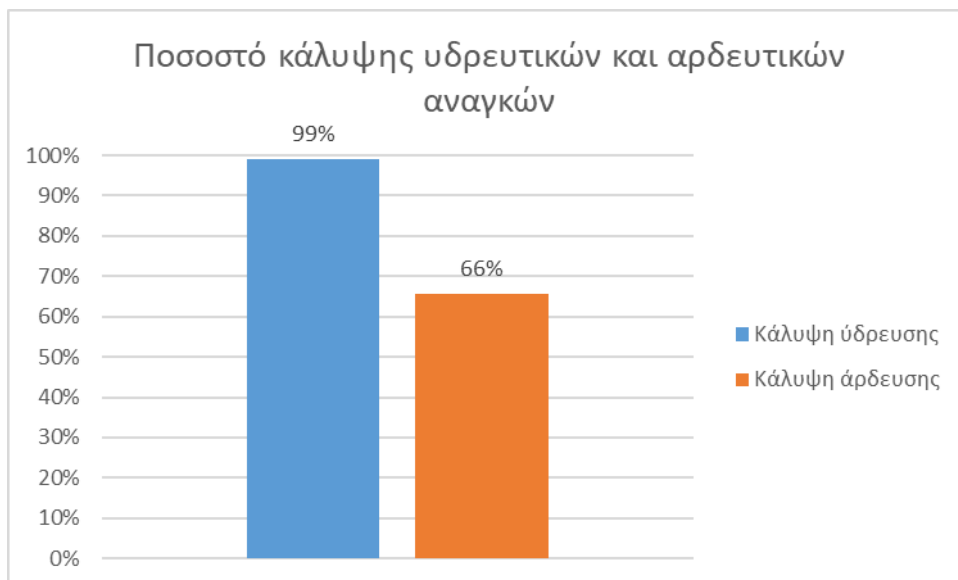
Ακολούθως, στα Διαγράμματα 22 και 23 παρουσιάζονται η μέση μηνιαία παραγωγή και ζήτηση υδρευτικού και αρδευτικού νερού. Όπως διαπιστώνεται εύκολα, η κάλυψη των υδρευτικών αναγκών αγγίζει το 99% το οποίο αποτελεί το ζητούμενο του ΥΣ, ενώ οι αρδευτικές ανάγκες καλύπτονται μόνο στο 65% της ζήτησης. Τα ποσοστά κάλυψης φαίνονται και στο διάγραμμα 24 .



Διάγραμμα 22: Μέση Μηνιαία Παραγωγή και Ζήτηση Υδρευτικού Νερού



Διάγραμμα 23: Μέση Μηνιαία Παραγωγή και Ζήτηση Αρδευτικού νερού



Διάγραμμα 24: Ποσοστό Κάλυψης Υδρευτικών και Αρδευτικών Αναγκών

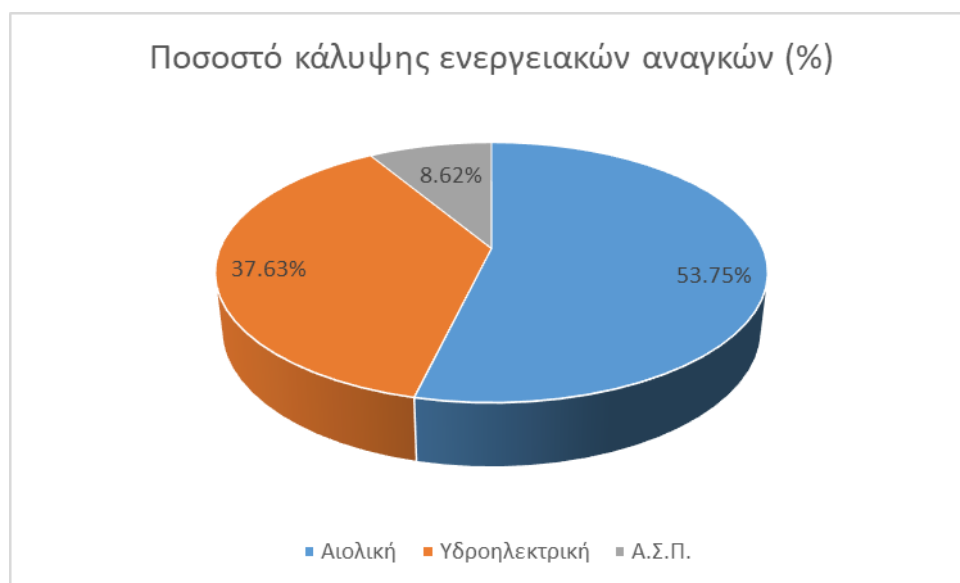
Συμπερασματικά, το σενάριο λειτουργίας 1 που μελετάται ανταποκρίνεται πλήρως στον στόχο του, δηλαδή την αξιοπιστία του συστήματος στην κάλυψη των υδρευτικών αναγκών με ποσοστό 99%, για την διάρκεια ζωής του έργου ήτοι 25 έτη. Το αποτέλεσμα αυτό προέρχεται από την κατάλληλη χωρητικότητα της δεξαμενής πόσιμου νερού, ταυτόχρονα με την παραγωγή επαρκούς ενέργειας για την καλύτερη δυνατή λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης.

Απαραίτητη ωστόσο αποτελεί και η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σύμφωνα με το παρόν σύστημα. Η αξιοπιστία του συστήματος ανέρχεται στο 91%. Στο παρόν σενάριο λειτουργίας η ενέργεια παράγεται μέσω του αιολικού πάρκου και του υδροηλεκτρικού έργου. Έπειτα, πρώτα η μονάδα αφαλάτωσης χρησιμοποιεί την απαραίτητη ηλεκτρική

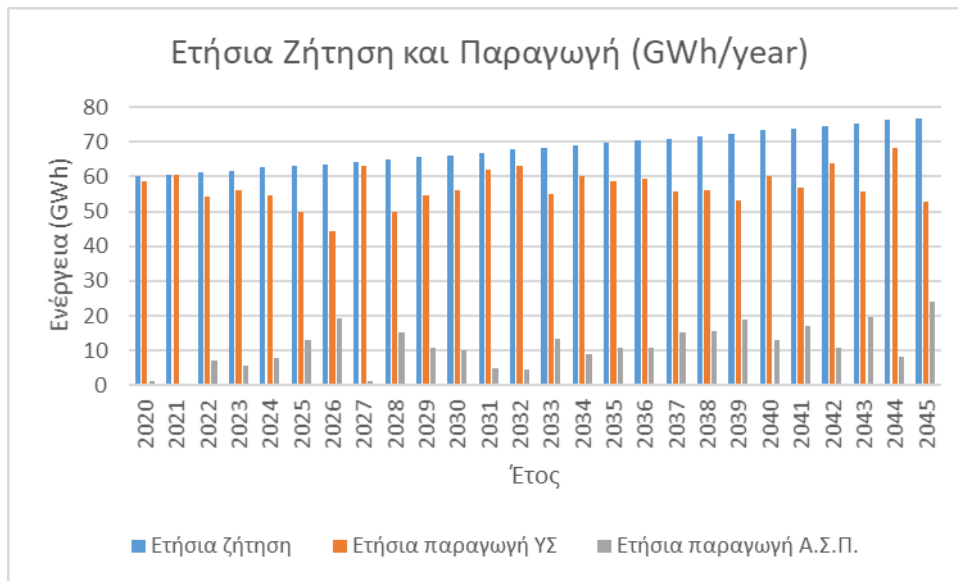
ενέργεια για την παραγωγή πόσιμου νερού, ενώ στη συνέχεια εφόσον υπάρχει περίσσεια ενέργειας χρησιμοποιείται για την άντληση του θαλασσινού νερού προς τον αντίστοιχο ταμιευτήρα. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η παραγόμενη αιολική ενέργεια δεν είναι αρκετή. Τότε, είτε το υδροηλεκτρικό έργο προσφέρει την απαραίτητη ενέργεια, είτε ο ΑΣΠ της Λήμνου. Η αντλησιοταμίευση αποτελεί ένα τρόπο αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας υπό την μορφή υδροδυναμικής ενέργειας. Έτσι, όποτε δημιουργηθεί έλλειμμα στο δίκτυο, το νερό διοχετεύεται στους στροβίλους και η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Αντίστοιχα, ο ΑΣΠ του νησιού αφού ήδη υπάρχει, δεν σταματά τη λειτουργία του λόγω του ΥΣ αλλά χρησιμοποιείται, ιδανικά, μέχρι το 15% της δυναμικότητάς του.

Σημαντικό πλεονέκτημα του παρόντος ΥΣ είναι ότι ο ΑΣΠ δεν χρειάζεται να προσφέρει ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη ενέργειας της μονάδας αφαλάτωσης. Στις περιπτώσεις όπου η αιολική ενέργεια δεν καλύπτει αυτές τις ενεργειακές ανάγκες, το υδροηλεκτρικό έργο αποτελεί την πρώτη επιλογή για χρήση. Πιο συγκεκριμένα, ο ταμιευτήρας του υδροηλεκτρικού έργου εμπεριέχει μόνο θαλασσινό νερό και ο όγκος του έχει υπολογιστεί μέσω βελτιστοποίησης για την μέγιστη κάλυψη των υδρευτικών αναγκών. Εφόσον λοιπόν η στάθμη του δεν εξαρτάται από την βροχόπτωση, ούτε γίνεται κάποια άλλη διεργασία από αυτόν, λόγω χάριν μεταφορά νερού από τον ταμιευτήρα για αφαλάτωση, μπορεί να καλύψει το έλλειμμα ενέργειας που ενδέχεται να προκύψει για την μονάδα αφαλάτωσης.

Το σενάριο λειτουργίας 1 προσφέρει κάλυψη των ενεργειακών αναγκών 91%. Αυτό σημαίνει ότι το υπόλοιπο 9% καλύπτεται από τον ΑΣΠ. Στο Διάγραμμα 25 φαίνονται τα ακριβή ποσοστά κάλυψης της ενεργειακής ζήτησης από τις εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες, το υδροηλεκτρικό έργο, και τον ΑΣΠ. Η ετήσια ενεργειακή ζήτηση και η προσφορά τόσο του ΥΣ, όσο και του σταθμού παραγωγής παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 26.

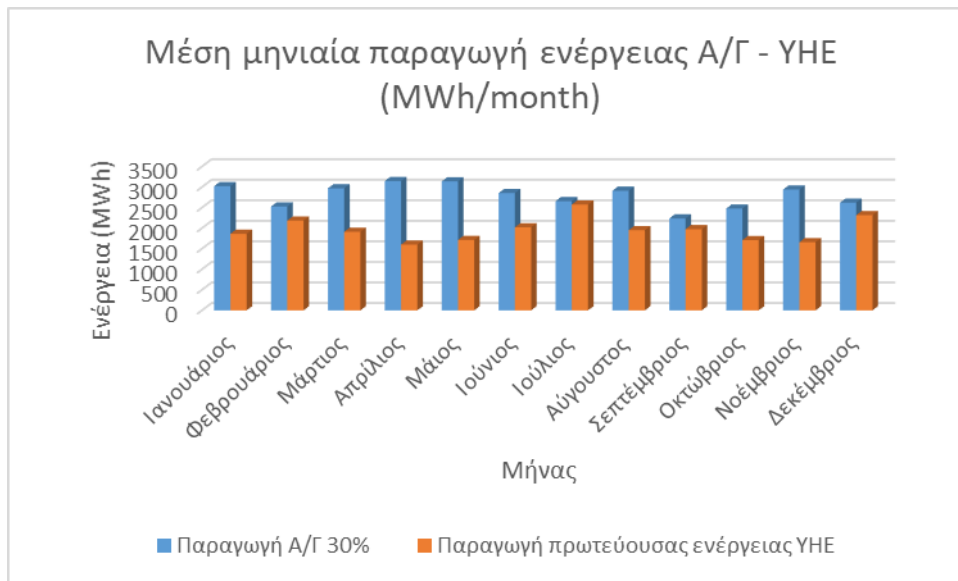


Διάγραμμα 25: Ποσοστό Κάλυψης Ενεργειακών Αναγκών



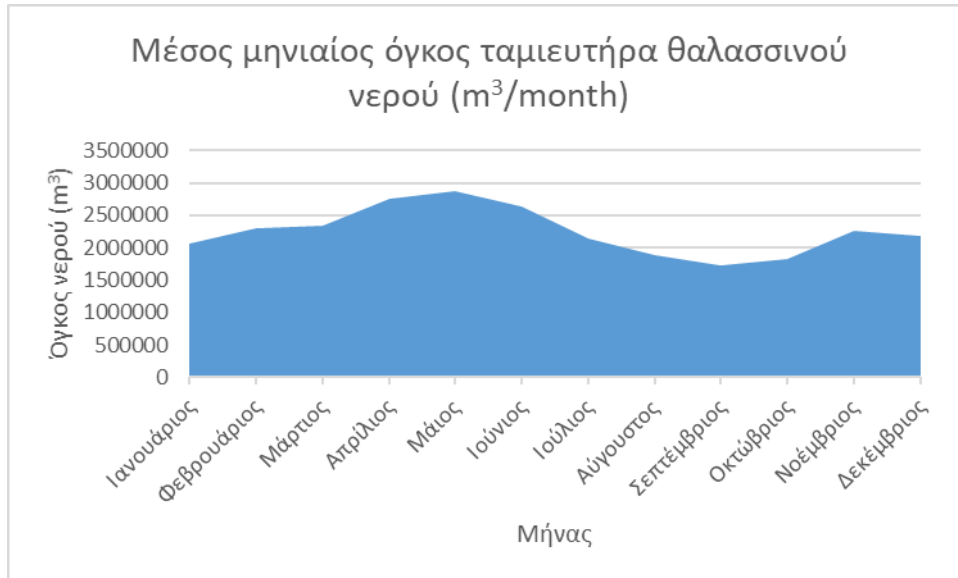
Διάγραμμα 26: Ετήσια Ζήτηση και Παραγωγή Ενέργειας

Το υψηλό ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών από την αιολική ενέργεια είναι λογικό αποτέλεσμα, καθώς διαφαίνεται έτσι το υψηλό αιολικό δυναμικό που διαθέτει το νησί της Λήμνου. Ταυτόχρονα, αναδεικνύεται η γενικότερη προσφορά των ΑΠΕ αφού χρησιμοποιείται ελάχιστο ποσοστό του ΑΣΠ, σε σχέση με την τωρινή κατάσταση. Μπορούν πολύ εύκολα να διακριθούν χρονιές στις οποίες ο ΑΣΠ δεν χρειάζεται να συμβάλλει στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, αποτέλεσμα ενθαρρυντικό για την λειτουργία του ΥΣ. Αυτό ωστόσο δεν σημαίνει ότι ο σταθμός εκείνες τις περιόδους δεν βρίσκεται σε λειτουργία, καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί ο σταθμός λειτουργεί κατά μέσο όρο στο 15% της δυναμικότητας του. Ακόμη, οι ενεργειακές ανάγκες φαίνονται να αυξάνονται ανά έτος, καθώς έχει ληφθεί υπόψη η αύξηση του πληθυσμού του νησιού. Στο Διάγραμμα 27 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία παραγωγή ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες και από το υδροηλεκτρικό έργο που διοχετεύεται στο δίκτυο ηλεκτροδότησης. Η παραγωγή αιολικής ενέργειας φαίνεται να είναι αυξημένη, χωρίς όμως να σημαίνει ότι το υδροηλεκτρικό υστερεί σημαντικά.

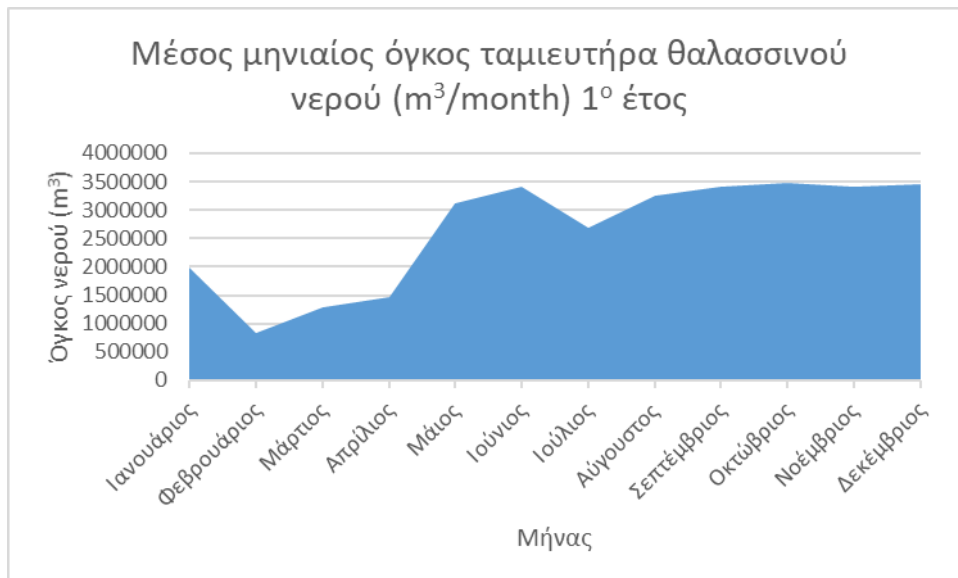


Διάγραμμα 27: Μέση Μηνιαία Παραγωγή Ενέργειας ΥΣ που διοχετεύεται στο δίκτυο

Στη συνέχεια, στο Διάγραμμα 28 παρουσιάζεται ο συνολικός μέσος μηνιαίος όγκος του ταμιευτήρα θαλασσινού νερού του υδροηλεκτρικού έργου. Ο σταθερός ελάχιστος όγκος που βρίσκεται στον ταμιευτήρα αποτελεί τον νεκρό όγκο. Κατά τους μήνες Μάιο έως και Σεπτέμβριο, γίνεται αντιληπτή η μείωση του όγκου του ταμιευτήρα. Αυτό συμβαίνει λόγω της αυξημένης ζήτησης ύδρευσης, άρδευσης και άρα ενέργειας κατά την διάρκεια της τουριστικής περιόδου και γενικότερα του καλοκαιριού. Τα Διαγράμματα 29 και 30 αναπαριστούν τη μέση μηνιαία διακύμανση του όγκου του ταμιευτήρα για το 1^ο και 25^ο έτος. Όσον αφορά στο 1^ο έτος, ο ταμιευτήρας δεν είναι εξαρχής γεμάτος, αλλά μέχρι το τέλος του έτους έχει βρεθεί κοντά στο μέγιστο της χωρητικότητάς του. Γίνεται κατανοητό λοιπόν ότι υπάρχει αξιοσημείωτη ποσότητα περίσσειας ενέργειας, η οποία οδηγείται στο υδροηλεκτρικό. Αντιθέτως, στην αρχή του 25^{ου} έτους, ενώ ο ταμιευτήρας είναι σχεδόν γεμάτος, κατά την διάρκεια του έτους και μέχρι το τέλος του έχει μειωθεί σημαντικά ο όγκος νερού που περιλαμβάνει. Πέρα από τον μήνα Ιούλιο που η ζήτηση σε ύδρευση, άρδευση και ενέργεια είναι αυξημένη, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται θεωρούνται αποδεκτά καθώς έχει ληφθεί υπόψη η γεωμετρική αύξηση του πληθυσμού και άρα, όλων των αναγκών.



Διάγραμμα 28: Μέσος Μηνιαίος Όγκος Ταμιευτήρα Θαλασσινού Νερού



Διάγραμμα 29: Μέσος Μηνιαίος Όγκος Ταμιευτήρα Θαλασσινού νερού 1^{ου} Έτους



Διάγραμμα 30: Μέσος Μηνιαίος Όγκος Ταμειυτήρα Θαλασσινού Νερού 25^{ου} Έτους

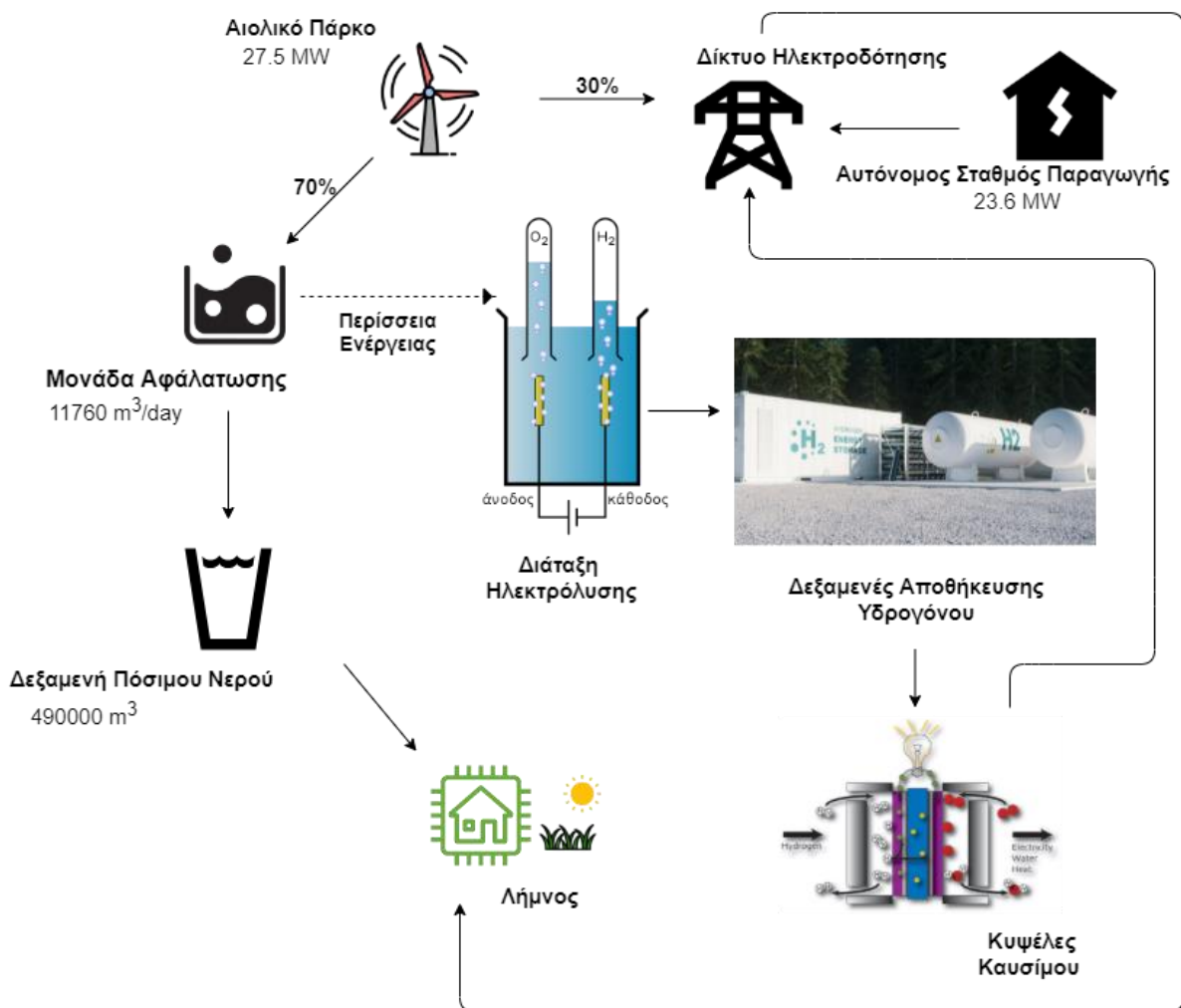
Τέλος, στον Πίνακα 26 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες τιμές παραγωγής ενέργειας συνολικά του ΥΣ, καθώς και το μέσο μηνιαίο ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών της Λήμνου. Καθ' όλη τη διάρκεια του έργου, τα αποτελέσματα του συστήματος θεωρούνται ικανοποιητικά, τόσο για την αξιοπιστία της ύδρευσης, όσο και της ενέργειας.

Πίνακας 26: Μέση Μηνιαία Παραγωγή Ενέργειας του ΥΣ και Μέσο μηνιαίο Ποσοστό Κάλυψης ενεργειακών αναγκών

Μήνας	Παραγωγή ΥΣ (MWh)	Μέσο ποσοστό κάλυψης (%)
Ιανουάριος	4884.70	88.66%
Φεβρουάριος	4711.36	94.40%
Μάρτιος	4880.24	92.96%
Απρίλιος	4746.82	98.97%
Μάιος	4849.53	99.85%
Ιούνιος	4874.10	94.68%
Ιούλιος	5229.67	87.66%
Αύγουστος	4861.40	80.04%
Σεπτέμβριος	4211.31	83.06%
Οκτώβριος	4186.30	90.51%
Νοέμβριος	4597.33	94.14%
Δεκέμβριος	4936.94	92.03%

5.3 Σενάριο λειτουργίας 2 – Υβριδικό σύστημα με δεξαμενή υδρογόνου

Στο σενάριο λειτουργίας 2, εξετάζεται η περίπτωση του ΥΣ που αποτελείται από το αιολικό πάρκο, την μονάδα αφαλάτωσης και την δεξαμενή υδρογόνου. Σκοπός του σεναρίου όπως στο πρώτο, είναι η μέγιστη δυνατή κάλυψη των υδρευτικών αναγκών πρωτίστως, και έπειτα των αρδευτικών και ενεργειακών. Στο σχηματικό διάγραμμα φαίνεται ότι το 30% της ενέργειας που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες μεταφέρεται απευθείας στο δίκτυο. Το υπόλοιπο 70% διατίθεται στην μονάδα αφαλάτωσης για την παραγωγή πόσιμου νερού και εφόσον υπάρχει περίσσεια ενέργειας, αυτή μεταφέρεται στην διάταξη της ηλεκτρόλυσης για την διαδικασία παραγωγής και αποθήκευσης μετέπειτα του υδρογόνου. Η κάλυψη των υδρευτικών αναγκών είναι πρωτεύουσα, οπότε η μονάδα αφαλάτωσης είναι σε προτεραιότητα για την λήψη ενέργειας από το αιολικό πάρκο.

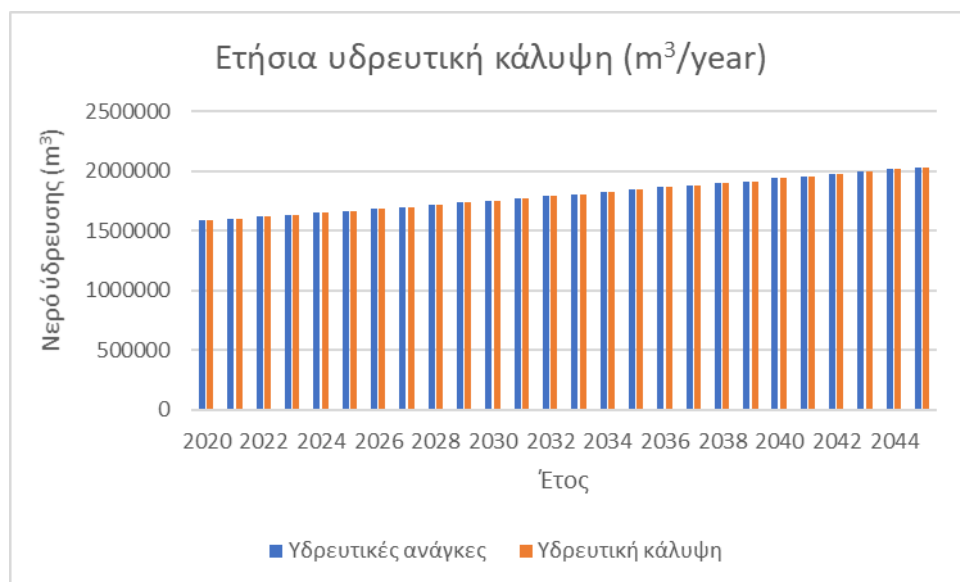


Διάγραμμα 31: Σχηματικό Διάγραμμα Σεναρίου λειτουργίας 2

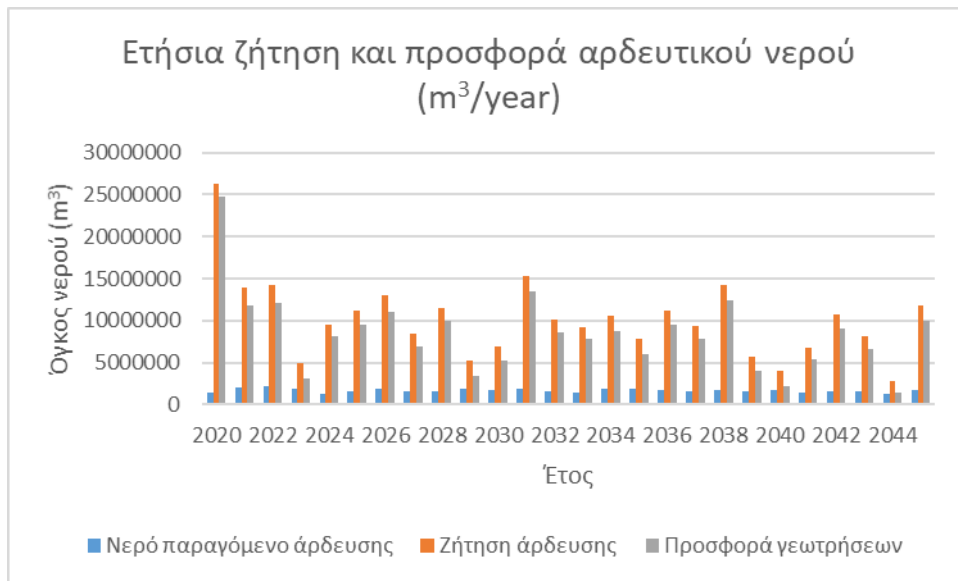
Για λόγους σύγκρισης των δύο περιπτώσεων αποθήκευσης ενέργειας, το πλήθος των ανεμογεννητριών, καθώς και τα χαρακτηριστικά της μονάδας αφαλάτωσης παραμένουν σταθερά. Υπενθυμίζεται ότι το ΥΣ διαθέτει 9 ανεμογεννήτριες τύπου Enercon E – 101 των 3050 kW η κάθε μία. Η μονάδα αφαλάτωσης έχει μέγιστη δυναμικότητα 11760 m³/day με

απαιτούμενη ενέργεια 6 kWh/m³. Το παραγόμενο νερό οδηγείται σε μία δεξαμενή πόσιμου νερού χωρητικότητας 490000 m³, η οποία βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από την μονάδα, έτσι ώστε να μην είναι απαραίτητη η εγκατάσταση αντλιών. Επιπλέον, ορίζεται ένα σταθερό ποσοστό πληρότητας της δεξαμενής 20%, έτσι ώστε σε περιόδους ξηρασίας να μπορούν καλυφθούν οι υδρευτικές ανάγκες. Στην αρχή της προσομοίωσης η δεξαμενή θεωρείται κατά το 1/4 γεμάτη. Η περίσσεια ενέργειας οδηγείται στην διάταξη της ηλεκτρόλυσης, με ενεργειακή ανάγκη 49 kWh/ kg H₂. Η ενέργεια που απαιτείται για την μετατροπή του αέριου υδρογόνου της ηλεκτρόλυσης σε συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο είναι 4.05 kWh/ kg H₂. Αντίστοιχα, για την μετατροπή σε υγρό υδρογόνο η ενέργεια ανέρχεται σε 12 kWh/ kg H₂.

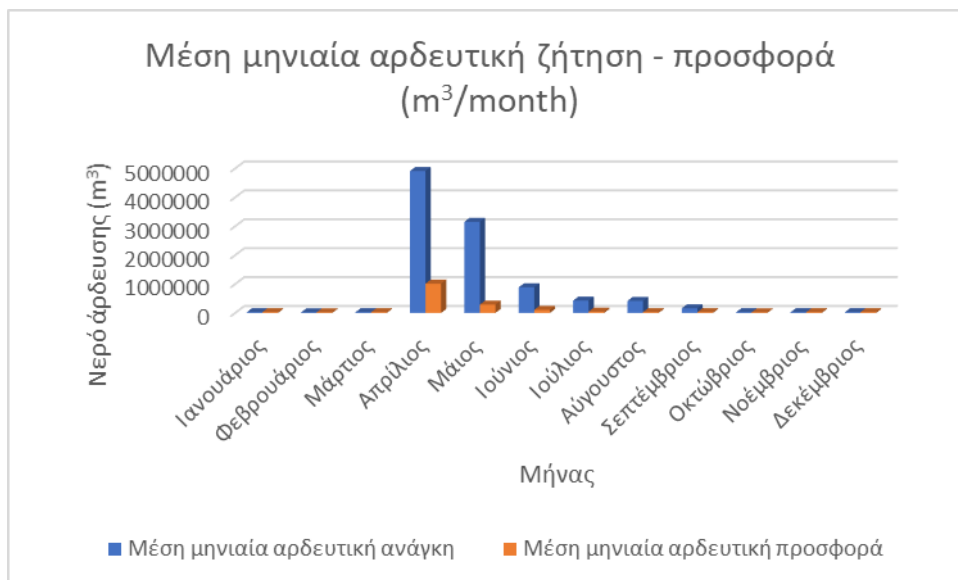
Με το παρόν σενάριο λειτουργίας, η κάλυψη των υδρευτικών αναγκών έχει ποσοστό 99.99%. Εφόσον η αρχική διάταξη του ΥΣ δεν έχει αλλάξει, ο στόχος του όσον αφορά στην ύδρευση έχει επιτευχθεί. Ταυτόχρονα, διατηρείται και το ποσοστό κάλυψης των αρδευτικών αναγκών, δηλαδή 66%, αφού η ύδρευση και η άρδευση εξαρτώνται από τα σταθερά στοιχεία του συστήματος αφαλάτωσης. Ωστόσο, η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ανέρχεται σε ποσοστό 57%. Στα Διαγράμματα 32 έως 34, παρουσιάζονται οι υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες και η κάλυψη αυτών από το σύστημα της αφαλάτωσης. Η παραγωγή υδρευτικού νερού αυξάνεται ανάλογα με την ζήτηση, ενώ η παραγωγή αρδευτικού νερού παρουσιάζει αυξομειώσεις. Όπως συμβαίνει και στο σενάριο λειτουργίας 1, ο όγκος νερού που δεν μπορεί να προσφερθεί από το ΥΣ, λαμβάνεται από τις προϋπάρχουσες γεωτρήσεις του νησιού.



Διάγραμμα 32: Ετήσια Υδρευτική Κάλυψη



Διάγραμμα 33: Ετήσια Ζήτηση και Προσφορά Αρδευτικού Νερού

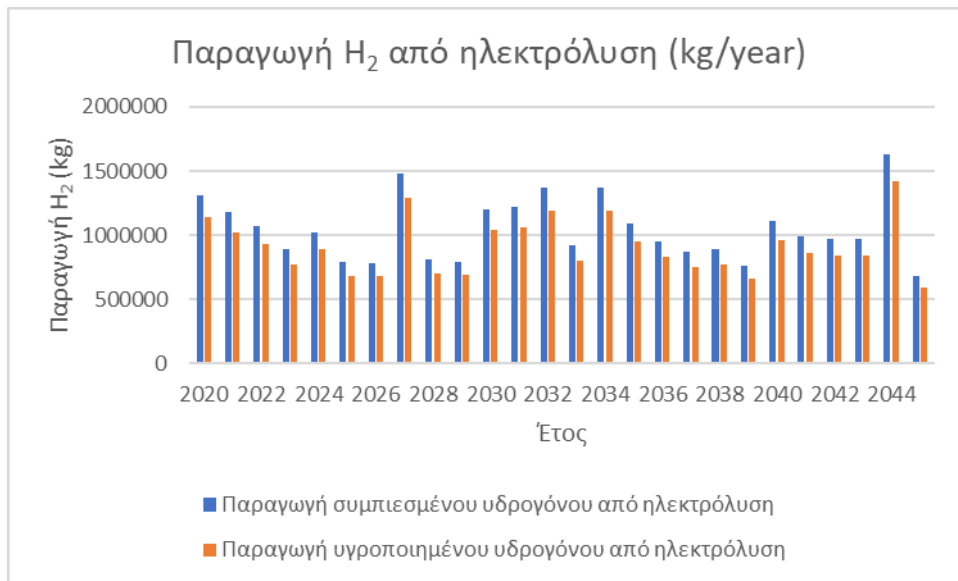


Διάγραμμα 34: Μέση Μηνιαία Αρδευτική Ζήτηση και Προσφορά

Στη συνέχεια, η περίσσεια ενέργειας εφόσον υπάρχει κατευθύνεται στην διάταξη της ηλεκτρόλυσης. Η ηλεκτρόλυση είναι η διαδικασία χρήσης ηλεκτρικού ρεύματος για την διάσπαση του νερού σε αέριο υδρογόνο και οξυγόνο. Το ηλεκτρικό φορτίο που εφαρμόζεται σε δύο ηλεκτρόδια τοποθετημένα στο νερό σπάει τον χημικό δεσμό μεταξύ των ατόμων υδρογόνου και οξυγόνου και παράγει φορτισμένα σωματίδια που ονομάζονται ιόντα. Στο αρνητικό άκρο, λεγόμενο κάθοδος, αναδύεται αέριο υδρογόνο και στο θετικό άκρο, λεγόμενο άνοδος, οξυγόνο. Η ενεργειακή ανάγκη του συστήματος ηλεκτρόλυσης ανέρχεται σε 49 kWh/kg H₂. Στα πλαίσια παραγωγής πράσινου υδρογόνου, η ηλεκτρόλυση προτείνεται να χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό και όχι πόσιμο, καθώς θεωρείται σπατάλη. Το πρόβλημα που εμφανίζεται με την χρήση του νερού αυτού είναι ότι το αρνητικά φορτισμένο χλωρίδιο στο θαλασσινό νερό μπορεί να διαβρώσει το θετικό άκρο περιορίζοντας έτσι τη διάρκεια

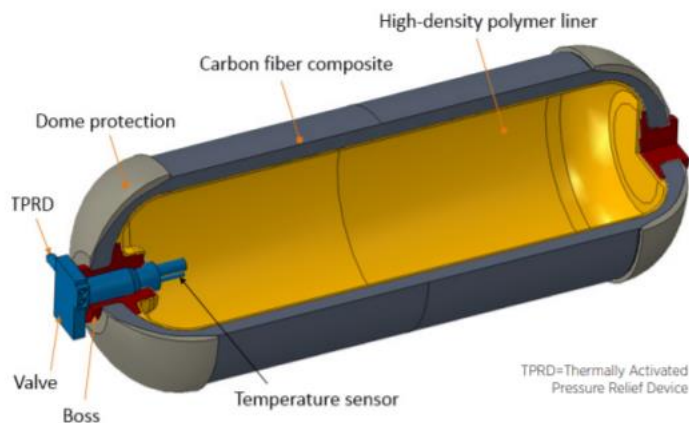
ζωής του συστήματος. Ερευνητές από το Stanford University ανακάλυψαν ότι εάν επικάλυπταν την άνοδο με στρώματα που ήταν πλούσια σε αρνητικά φορτία, τα στρώματα απωθούσαν το χλώριο και επιβράδυναν τη διάσπαση του υποκείμενου μετάλλου. Ακόμη, οι ίδιοι ερευνητές αναφέρουν ότι, χωρίς την επικάλυψη, η άνοδος μπορούσε να είναι σε λειτουργία για μόνο 12 ώρες, ενώ με την ύπαρξη της επικάλυψης η λειτουργία ανέρχεται σε χιλιάδες ώρες.

Η παραγωγή υδρογόνου αποτελεί μέθοδο αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας. Το υδρογόνο που παράγεται μέσω της ηλεκτρόλυσης βρίσκεται σε αέρια μορφή. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το υδρογόνο είναι ένα εξαιρετικά ελαφρύ αέριο που καταλαμβάνει σημαντικό όγκο υπό τυπικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης δηλαδή ατμοσφαιρική πίεση. Η πυκνότητα του ανέρχεται σε 0.09 kg/m^3 . Για την αποτελεσματική αποθήκευση και μεταφορά υδρογόνου, ο όγκος αυτός πρέπει να μειωθεί. Οι δεξαμενές αποθήκευσης που εξετάζονται στο παρόν ΥΣ περιλαμβάνουν το υδρογόνο σε συμπιεσμένη αέρια μορφή και το υδρογόνο σε υγρή μορφή. Η πρώτη περίπτωση υδρογόνου απαιτεί για την συμπίεσή του 4.05 kWh ανά kg H_2 που παράγεται. Πρακτικά, η θερμοκρασία που βρίσκεται το αέριο παραμένει σταθερή και αυξάνεται η πίεση. Σε τιμή 700 bar δηλαδή 700 φορές η ατμοσφαιρική πίεση, το υδρογόνο αποκτά πυκνότητα 42 kg/m^3 . Με αυτές τις συνθήκες, περίπου 5 kg H_2 μπορούν να αποθηκευτούν σε δεξαμενή 125 λίτρων (AirLiquide, 2021). Στην δεύτερη περίπτωση υδρογόνου, για την υγροποίησή του απαιτείται 12 kWh ανά kg H_2 που παράγεται. Το υδρογόνο μετατρέπεται από αέρια μορφή σε υγρή όταν βρεθεί σε θερμοκρασία κάτω από $-253 \text{ }^\circ\text{C}$. Σε αυτή τη θερμοκρασία και σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης, η πυκνότητα του υγρού υδρογόνου ισούται περίπου με 71 kg/m^3 . Δηλαδή, 5 kg υγρού H_2 (LH_2) μπορούν να αποθηκευτούν σε δεξαμενή 75 λίτρων (AirLiquide, 2021). Για την παραγωγή υδρογόνου λοιπόν, λαμβάνεται υπόψη η ενεργειακή ανάγκη του συστήματος ηλεκτρόλυσης, καθώς και η ενεργειακή ανάγκη για την εκάστοτε περίπτωση αποθήκευσης υδρογόνου. Τα kg H_2 που παράγονται και αποθηκεύονται σε συμπιεσμένη ή υγροποιημένη μορφή εμφανίζονται στο Διάγραμμα 35. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, η παραγωγή υδρογόνου σε συμπιεσμένη μορφή είναι μεγαλύτερη από αυτήν σε υγροποιημένη μορφή, αποτέλεσμα λογικό αφού είναι απαραίτητη λιγότερη ενέργεια από το ΥΣ για την πρώτη περίπτωση.



Διάγραμμα 35: Ετήσια Παραγωγή Υδρογόνου από Ηλεκτρόλυση

Στην περίπτωση του παρόντος υβριδικού συστήματος, εφόσον επιλεγεί η παραγωγή συμπιεσμένου υδρογόνου, θεωρείται ότι αποθηκεύεται σε δεξαμενές τύπου IV, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10. Οι δεξαμενές αυτές έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι ελαφριές και ως εκ τούτου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κινητές εφαρμογές αλλά και για σταθερή αποθήκευση μεγάλου όγκου. Το συμπιεσμένο υδρογόνο αποθηκεύεται σε δεξαμενή αποτελούμενη από πολυμερή επένδυση και σύνθετη δομή που υποστηρίζει μηχανικές δυνάμεις. Η περιέλιξη νήματος είναι μία τεχνική που στοχεύει στη βέλτιστη ενίσχυση επένδυσης με σύνθετα υλικά από μακρές ίνες, ώστε να επιτρέπει στο περίβλημα να αντέχει σε υψηλή πίεση (Mahytec, 2021). Χρησιμοποιείται λοιπόν δεξαμενή με εσωτερικό όγκο 300 λίτρων, η οποία μπορεί να αποθηκεύσει έως και 10 kg H₂ σε πίεση 500 bar. Λαμβάνοντας υπόψη την μέγιστη παραγωγή συμπιεσμένου υδρογόνου κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, επιλέγεται ο απαραίτητος αριθμός δεξαμενών αποθήκευσης, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 27. Ο μέγιστος αριθμός δεξαμενών που χρειάζεται είναι 23877 για την παραγωγή συμπιεσμένου υδρογόνου τον Μάιο, ενώ ελάχιστη χρήση δεξαμενών παρουσιάζεται τον μήνα Φεβρουάριο.



Εικόνα 10: Δεξαμενή Τύπου IV για αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου (Πηγή: U.S. Department of Energy, 2017)

Πίνακας 27: Συνολική Μέγιστη Μηνιαία Παραγωγή Συμπιεσμένου H₂ και Απαραίτητος αριθμός Δεξαμενών Αποθήκευσης

Μήνας	Συνολική μέγιστη μηνιαία παραγωγή συμπιεσμένου H ₂ (kg/month)	Απαραίτητες δεξαμενές χωρητικότητας 10 kg
Ιανουάριος	179889.60	17989
Φεβρουάριος	151270.03	15127
Μάρτιος	203675.17	20368
Απρίλιος	202929.00	20293
Μάιος	238770.43	23877
Ιούνιος	186367.99	18637
Ιούλιος	178979.83	17898
Αύγουστος	155140.66	15514
Σεπτέμβριος	156514.97	15651
Οκτώβριος	169849.21	16985
Νοέμβριος	215430.32	21543
Δεκέμβριος	207610.11	20761

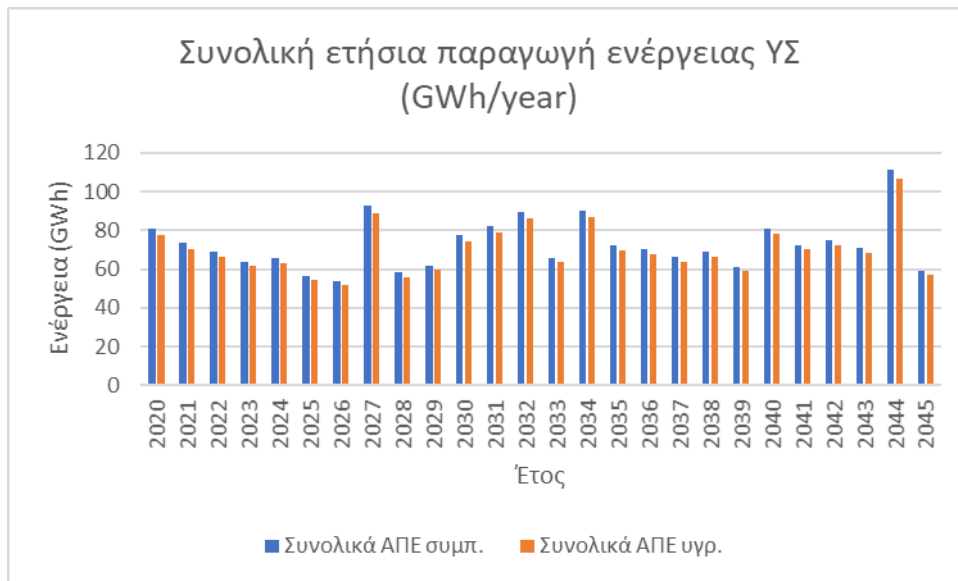
Άλλη εναλλακτική για την αποθήκευση του υδρογόνου αποτελεί η δεξαμενή υγροποιημένου υδρογόνου. Η υγροποίηση είναι η διαδικασία μετατροπής αέριου υδρογόνου σε υγρό υδρογόνο. Η υγροποίηση επιτρέπει στο υδρογόνο να αποθηκεύεται στην πιο πυκνή του κατάσταση και να μεταφέρεται με την υψηλότερη απόδοση. Η υγροποίηση υδρογόνου επιτυγχάνεται μέσω μίας σειράς διαδικασιών συμπίεσης, ψύξης και διαστολής (sapphire technologies). Οι δεξαμενές αποθήκευσης μπορούν να έχουν χωρητικότητα 100000 λίτρα. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, όπως προηγουμένως, λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη παραγωγή υγρού υδρογόνου για τον υπολογισμό του αριθμού δεξαμενών που χρειάζονται. Τα αποτελέσματα των απαραίτητων δεξαμενών παρουσιάζονται στον Πίνακα 28. Όπως προηγουμένως, η μέγιστη παραγωγή υδρογόνου λαμβάνει χώρα τον μήνα Μάιο και με

απαίτηση 29 δεξαμενών, ενώ η ελάχιστη παραγωγή υδρογόνου εμφανίζεται τους μήνες Φεβρουάριο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο.

Πίνακας 28: Συνολική Μέγιστη Μηνιαία Παραγωγή Υγροποιημένου H₂ και Απαραίτητος αριθμός Δεξαμενών Αποθήκευσης

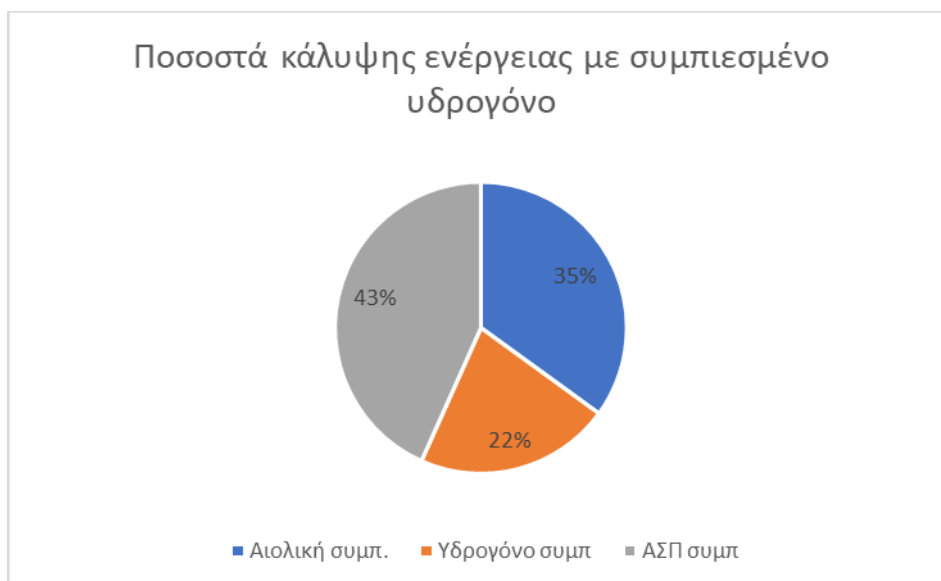
Μήνας	Συνολική μέγιστη μηνιαία παραγωγή υγροποιημένου H ₂ (L/month)	Απαραίτητες δεξαμενές χωρητικότητας 100000L
Ιανουάριος	2203450.30	22
Φεβρουάριος	1852891.94	19
Μάρτιος	2494797.46	25
Απρίλιος	2485657.70	25
Μάιος	2924675.96	29
Ιούνιος	2282803.49	23
Ιούλιος	2192306.68	22
Αύγουστος	1900302.95	19
Σεπτέμβριος	1917136.73	19
Οκτώβριος	2080466.49	21
Νοέμβριος	2638785.19	26
Δεκέμβριος	2542996.20	25

Έπειτα, εφόσον το υδρογόνο έχει διασπαστεί και αποθηκευτεί καταλλήλως σε δεξαμενές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενέργεια μέσω των κυψελών καυσίμων. Η ενεργειακή προσφορά του υδρογόνου, σε οποιαδήποτε από τις δύο πιθανές μορφές που εξετάζονται, είναι ίση με 33.5 kWh/kg H₂. Στο Διάγραμμα 36 παρουσιάζεται η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας του ΥΣ, με χρήση συμπιεσμένου ή υγροποιημένου υδρογόνου. Η παραγωγή ενέργειας προέρχεται από την αιολική ενέργεια και την ενέργεια που αποδίδει το υδρογόνο.



Διάγραμμα 36: Συνολική Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας από ΥΣ

Η ενεργειακή κάλυψη που προσφέρει το παρόν ΥΣ ανέρχεται σε ποσοστό 57%, είτε με την χρήση συμπιεσμένου υδρογόνου, είτε με υγροποιημένο υδρογόνο. Άρα η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών από τον ΑΣΠ είναι ίση με 43%. Στα Διαγράμματα 37 και 38 παρουσιάζονται τα ποσοστά κάλυψης των αναγκών. Για την περίπτωση αποθήκευσης σε συμπιεσμένη μορφή, η αιολική ενέργεια καλύπτει το 35% των ενεργειακών αναγκών και το υπόλοιπο 22% καλύπτεται από το υδρογόνο. Αντίστοιχα, στην περίπτωση της υγροποιημένης αποθήκευσης το 37% των αναγκών αναλαμβάνεται από τις ανεμογεννήτριες και το υπολειπόμενο 20% καλύπτεται από το υδρογόνο. Παρ’ όλα αυτά τα αποτελέσματα που προκύπτουν θεωρούνται ενθαρρυντικά.

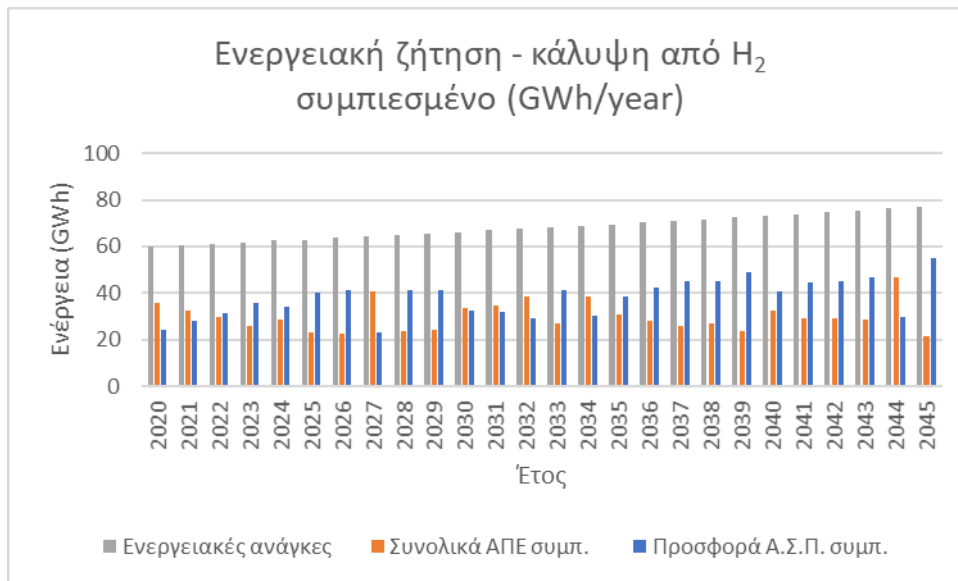


Διάγραμμα 37: Ποσοστό Κάλυψης Ενεργειακών Αναγκών με Συμπιεσμένο H₂

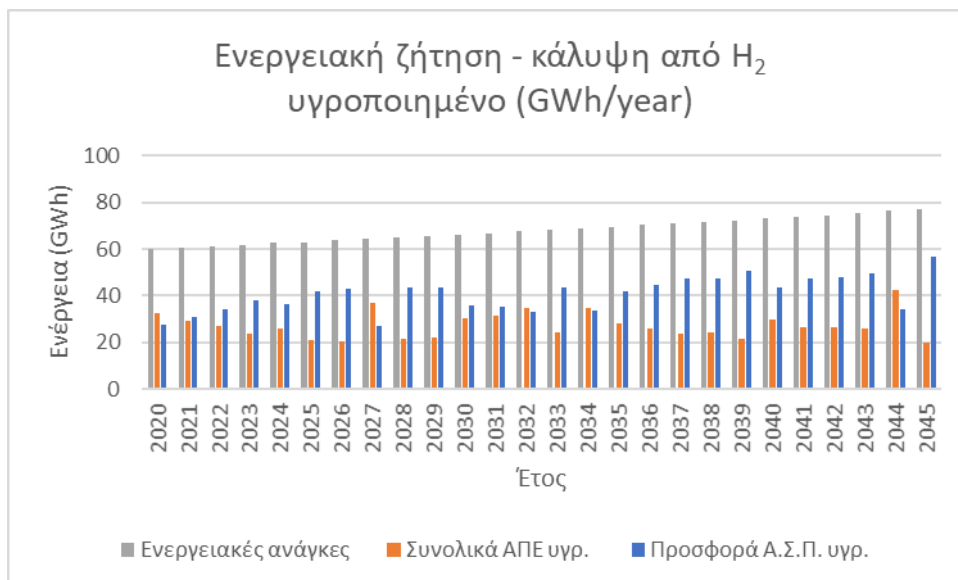


Διάγραμμα 38: Ποσοστό Κάλυψης Ενεργειακών Αναγκών με Υγροποιημένο H₂

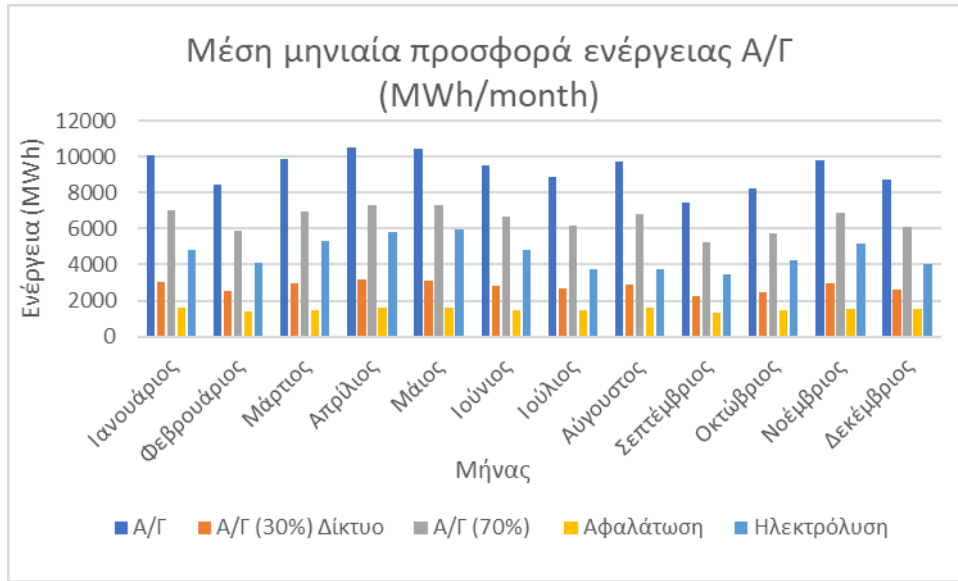
Στη συνέχεια, τα Διαγράμματα 39 και 40 περιέχουν τις συνολικές ετήσιες ενεργειακές ανάγκες και τη κάλυψη αυτών ανάλογα την επιλογή μορφής αποθήκευσης του υδρογόνου. Αξιοσημείωτη είναι η παραγωγή ενέργειας του ΥΣ για το έτος 2027 και 2044. Όπως φαίνεται, ο ΑΣΠ συμμετέχει σε μικρό ποσοστό για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Αντίστοιχα, το έτος 2045 ο σταθμός παραγωγής προσφέρει την μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια στη Λήμνο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Κατά μέσο όρο ο σταθμός παραγωγής λειτουργεί στο 20% της δυναμικότητάς του. Ταυτόχρονα, η σταθερή ετήσια αύξηση των ενεργειακών αναγκών προέρχεται από την πληθυσμιακή αύξηση του νησιού. Επιπλέον, στο Διάγραμμα 41, παρουσιάζεται η κατανομή της προσφοράς της αιολικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, το 30% της ενέργειας διοχετεύεται στο δίκτυο ηλεκτροδότησης ενώ το υπόλοιπο 70% χρησιμοποιείται από το ΥΣ. Η μονάδα αφαλάτωσης λαμβάνει την απαραίτητη ενέργεια, ώστε να καλυφθούν οι υδρευτικές ανάγκες σε ποσοστό 99%. Έπειτα, εφόσον υπάρχει περίσσεια ενέργειας, οδηγείται στην μονάδα ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή και στη συνέχεια αποθήκευση του υδρογόνου.



Διάγραμμα 39: Ετήσια Ενεργειακή Ζήτηση και Προσφορά από Συμπιεσμένο H₂



Διάγραμμα 40: Ετήσια Ενεργειακή Ζήτηση και Προσφορά από Υγροποιημένο H₂



Διάγραμμα 41: Μέση Μηνιαία Κατανομή Αιολική Ενέργειας στα επιμέρους μέρη του ΥΣ

Τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου λειτουργίας του ΥΣ είναι σημαντικά και πολύ ενθαρρυντικά. Η κάλυψη των υδρευτικών αναγκών έχει επιτευχθεί πλήρως, όπως λοιπόν και ο στόχος του ΥΣ. Χρησιμοποιώντας βέβαια δύο διαφορετικές μορφές υδρογόνου, ενώ παράγονται παρόμοιες ποσότητες ενέργειας, διαφέρουν σημαντικά στον τρόπο αποθήκευσής τους.

5.4 Σύγκριση – Συζήτηση σεναρίων λειτουργίας

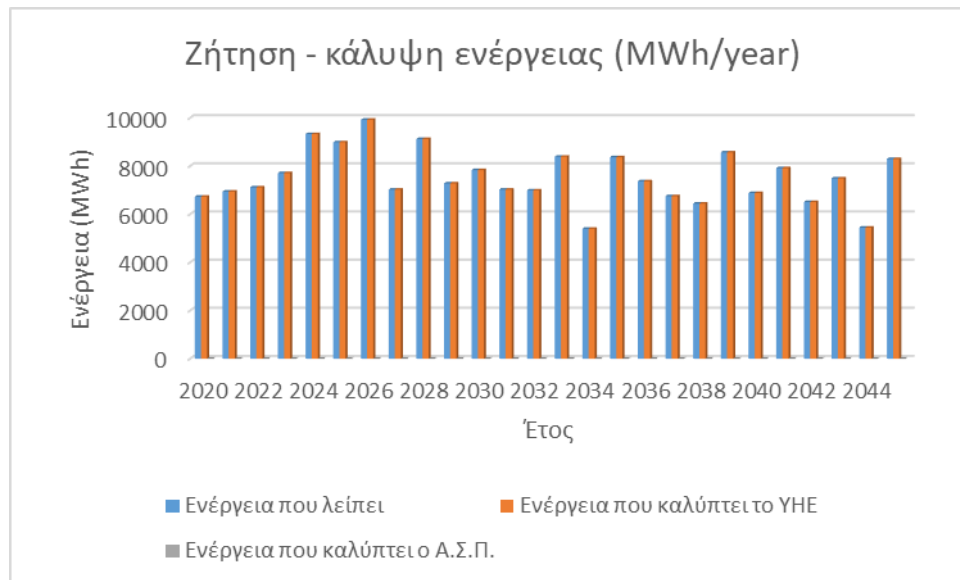
Το πρώτο σενάριο λειτουργίας του υβριδικού συστήματος αποτελείται από ένα αιολικό πάρκο 9 ανεμογεννητριών τύπου Enercon E – 101 των 3050 kW η κάθε μία, μία μονάδα αφαλάτωσης δυναμικότητας 490 m³/h, μία δεξαμενή πόσιμου νερού χωρητικότητας 490000 m³ και ένα υδροηλεκτρικό έργο με ταμιευτήρα θαλασσινού νερού χωρητικότητας 3.5 hm³. Το δεύτερο σενάριο λειτουργίας του υβριδικού συστήματος αποτελείται από τον ίδιο τύπο αιολικού πάρκου 9 ανεμογεννητριών, την ίδια μονάδα αφαλάτωσης δυναμικότητας 490 m³/h, δεξαμενή πόσιμου νερού ίσης χωρητικότητας όπως προηγουμένως και από μία μονάδα ηλεκτρόλυσης θαλασσινού νερού για την παραγωγή και μετέπειτα αποθήκευση υδρογόνου. Από την αιολική ενέργεια που παράγεται, το 30% διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο ηλεκτροδότησης ενώ το υπόλοιπο 70% χρησιμοποιείται από το ΥΣ. Τα δύο ΥΣ διαφέρουν στον τρόπο αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας και άρα τα χρήσης της σε περίπτωση ανάγκης του δικτύου για ηλεκτρική ενέργεια. Στον Πίνακα 29 περιέχονται τα βασικά στοιχεία των δύο σεναρίων.

Πίνακας 29: Βασικά Στοιχεία Σεναρίων Λειτουργίας 1 και 2

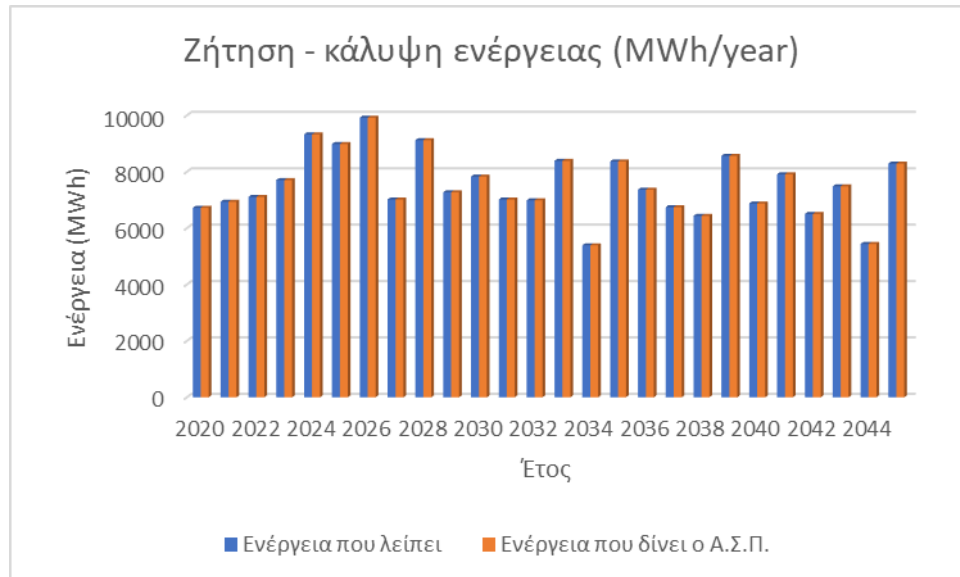
Σενάριο λειτουργίας 1			Σενάριο λειτουργίας 2		
Είδος κατασκευής	Πλήθος	Δυναμικότητα /Διαστάσεις	Είδος κατασκευής	Πλήθος	Δυναμικότητα /Διαστάσεις
Α/Γ	9	3050 (kW)	Α/Γ	9	3050 (kW)
Αφαλάτωση	1	11760 m ³ /day	Αφαλάτωση	1	11760 m ³ /day
Δεξαμενή πόσιμου νερού	1	490000 m ³	Δεξαμενή πόσιμου νερού	1	490000 m ³
Αντλίες		1244 kW	Ηλεκτρόλυση	1	
Άνω ταμιευτήρας υδροηλεκτρικού	1	3.5 hm ³	Δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου	29	100000 L
			Κυψέλες καυσίμου		33.5 kWh/kg H ₂

Ο πρωταρχικός στόχος και των δύο είναι η πλήρης κάλυψη των υδρευτικών αναγκών της Λήμνου. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται, με αξιοπιστία κάλυψης 99.99% και από τα δύο πιθανά ΥΣ. Το 70% της αιολικής ενέργειας, που προσφέρεται στο ΥΣ, χρησιμοποιείται πρώτα από την μονάδα αφαλάτωσης για την παραγωγή πόσιμου νερού. Στην περίπτωση του πρώτου σεναρίου λειτουργίας, εάν δεν υπάρχει η απαραίτητη ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες, τότε το υδροηλεκτρικό προσφέρει την ενέργεια που λείπει. Εάν ούτε το υδροηλεκτρικό έχει τη δυνατότητα αυτή, τότε η ηλεκτρική ενέργεια λαμβάνεται από τον ΑΣΠ. Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 42, το υδροηλεκτρικό μπορεί να προσφέρει την ενέργεια

που λείπει, χωρίς την συμμετοχή του ΑΣΠ. Στην περίπτωση του δεύτερου σεναρίου λειτουργίας, εάν δεν υπάρχει η απαραίτητη ενέργεια αφαλάτωσης από τις ανεμογεννήτριες, τότε η απαραίτητη ενέργεια λαμβάνεται από τον ΑΣΠ. Η ενέργεια που προσφέρει ο ΑΣΠ παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 43. Όπως είναι λογικό και στις δύο περιπτώσεις, η έλλειψη ενέργειας για την μονάδα της αφαλάτωσης είναι η ίδια.



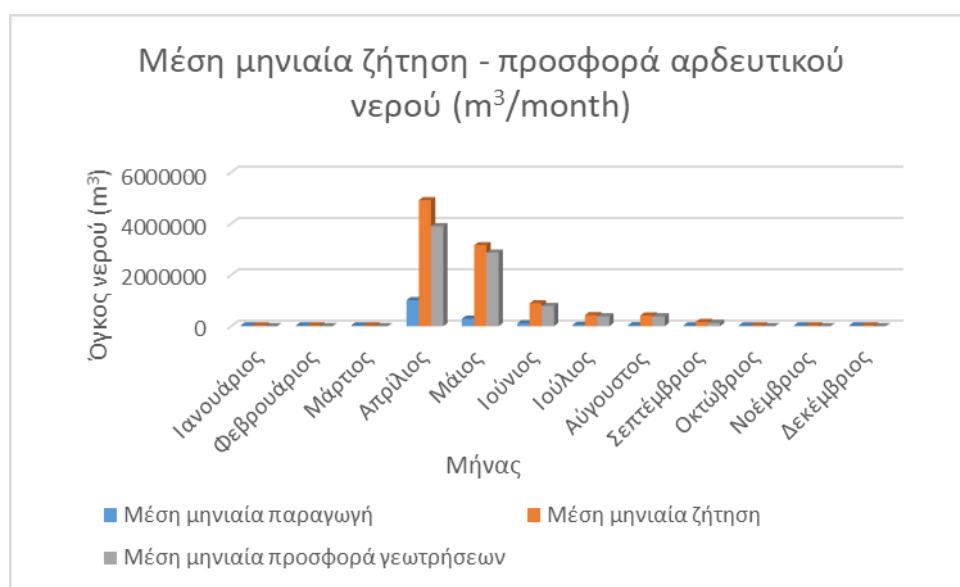
Διάγραμμα 42: Προσφορά Ενέργειας για κάλυψη υδρευτικών αναγκών Σενάριο λειτουργίας 1



Διάγραμμα 43: Προσφορά Ενέργειας για κάλυψη υδρευτικών αναγκών Σενάριο λειτουργίας 2

Εφόσον έχουν καλυφθεί οι υδρευτικές ανάγκες, σειρά έχουν οι αρδευτικές ανάγκες. Σε αντιστοιχία με την κάλυψη της ύδρευσης, το νερό που χρησιμοποιείται για την άρδευση προέρχεται από την μονάδα αφαλάτωσης και άρα από την δεξαμενή πόσιμου νερού. Εφόσον η δεξαμενή είναι γεμάτη κατά το 20% της χωρητικότητας της, μπορεί να προσφέρει ποσότητα αυτής στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Η μονάδα αφαλάτωσης και η

δεξαμενή πόσιμου νερού αποτελούν κοινά χαρακτηριστικά των δύο σεναρίων λειτουργίας, με αποτέλεσμα να προκύπτει το ίδιο ποσοστό κάλυψης των αρδευτικών αναγκών, ήτοι 66%. Στις περιπτώσεις λοιπόν που το ΥΣ δεν μπορεί να προσφέρει την απαραίτητη ποσότητα νερού, χρησιμοποιούνται οι προϋπάρχουσες γεωτρήσεις του νησιού. Στο Διάγραμμα 44, παρουσιάζεται η μέση μηνιαία ζήτηση και προσφορά αρδευτικού νερού από το ΥΣ και τις γεωτρήσεις. Οι γεωτρήσεις φαίνεται να συμβάλουν κυρίως τους μήνες Απρίλιο έως και Σεπτέμβριο. Κατά την διάρκεια αυτών των μηνών, αυξάνονται οι αρδευτικές ανάγκες λόγω του φαινομένου της εξατμισοδιαπνοής, καθώς και οι υδρευτικές ανάγκες εξαιτίας του τουρισμού. Οι τελευταίες καλύπτονται πλήρως από τη δεξαμενή πόσιμου νερού και έτσι μειώνεται η δυνατότητα προσφοράς στην κάλυψη της άρδευσης. Το μέσο ποσοστό κάλυψης των αρδευτικών αναγκών παρουσιάζεται στον Πίνακα 30.



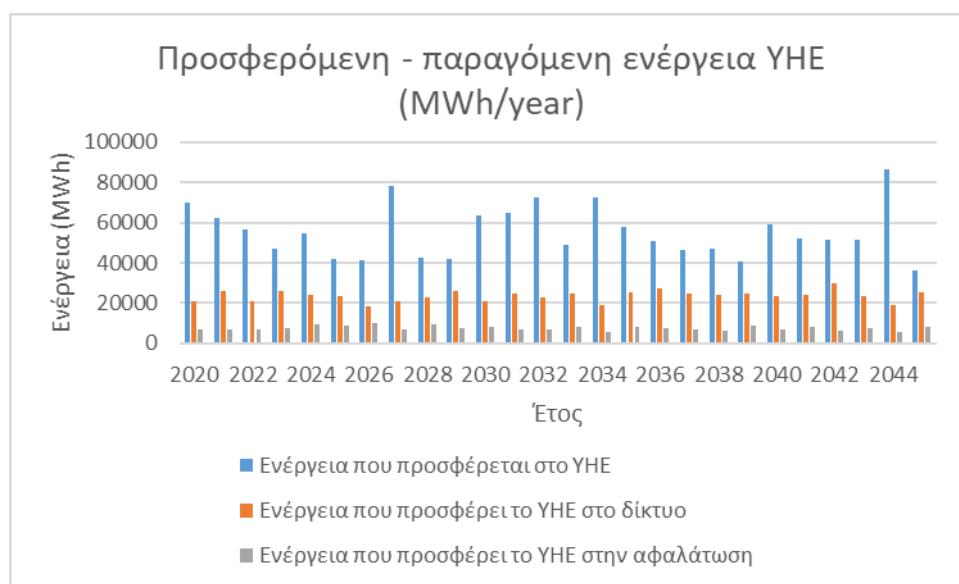
Διάγραμμα 44: Μέση Μηνιαία Ζήτηση και Προσφορά Αρδευτικού Νερού από Σενάριο λειτουργίας 1 και 2

Πίνακας 30: Μέσο Ποσοστό Κάλυψης Άρδευσης ανά Μήνα

Μήνας	Μέσο ποσοστό κάλυψης άρδευσης (%)
Ιανουάριος	99.99%
Φεβρουάριος	99.99%
Μάρτιος	99.99%
Απρίλιος	49%
Μάιος	36%
Ιούνιος	35%
Ιούλιος	26%
Αύγουστος	13%
Σεπτέμβριος	40%
Οκτώβριος	90%

Νοέμβριος	99.99%
Δεκέμβριος	99.99%

Τα σενάρια λειτουργίας ωστόσο διαφέρουν σημαντικά στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Το σενάριο λειτουργίας 1, δηλαδή αυτό που περιλαμβάνει το υδροηλεκτρικό έργο έχει αξιοπιστία κάλυψης 91%. Η ενέργεια που προσφέρεται για την λειτουργία του υδροηλεκτρικού έργου είναι η αιολική ενέργεια που δεν έχει χρησιμοποιηθεί από την μονάδα αφαλάτωσης. Η ενέργεια αυτή εξυπηρετεί την διαδικασία της αντλησιοταμίευσης. Όταν δημιουργηθεί η ανάγκη ηλεκτρικής ενέργειας, το νερό διοχετεύεται στους στροβίλους και η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Στο Διάγραμμα 45 παρουσιάζεται η προσφερόμενη και παραγόμενη ενέργεια του υδροηλεκτρικού έργου. Όσον αφορά στην προσφερόμενη ενέργεια στο υδροηλεκτρικό, τα έτη 2027 και 2044 φαίνεται να έχουν υψηλή ποσότητα περίσσειας ενέργειας. Η παραγόμενη ενέργεια του υδροηλεκτρικού έργου, η οποία διοχετεύεται στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, κυμαίνεται περί των 20000 MWh για την διάρκεια ζωής του έργου. Επιπλέον, όπως έχει αναφερθεί, το υδροηλεκτρικό έργο καλύπτει και τις ανάγκες της μονάδας αφαλάτωσης για την παραγωγή πόσιμου νερού.



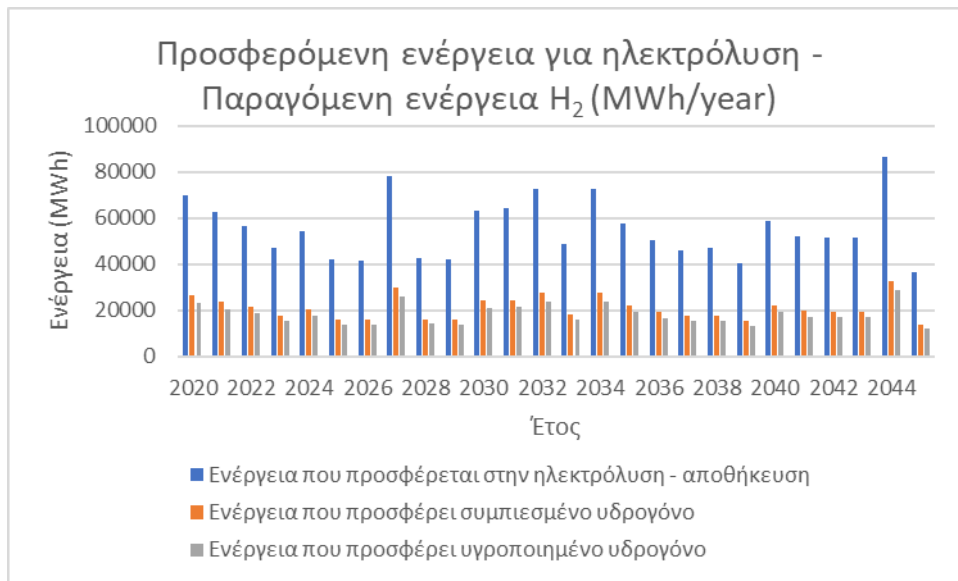
Διάγραμμα 45: Ετήσια Προσφερόμενη και Παραγόμενη Ενέργεια του ΥΗΕ

Το ΥΣ δύναται να καλύψει το 91% των ενεργειακών αναγκών της Λήμνου. Από αυτό, το 53.75% προέρχεται από την αιολική ενέργεια, δηλαδή το 30% της παραγόμενης ενέργειας που παραλαμβάνεται απευθείας από το δίκτυο και το υπόλοιπο 37.63% προέρχεται από την ενέργεια του υδροηλεκτρικού έργου, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Όσο για το 10% των ενεργειακών αναγκών που δεν καλύπτει το υβριδικό σύστημα του σεναρίου λειτουργίας 1, καλύπτεται από τον ΑΣΠ ο οποίος παρά την ύπαρξη του ΥΣ, βρίσκεται σε λειτουργία κατά μέσο όρο στο 15% της δυναμικότητας του.



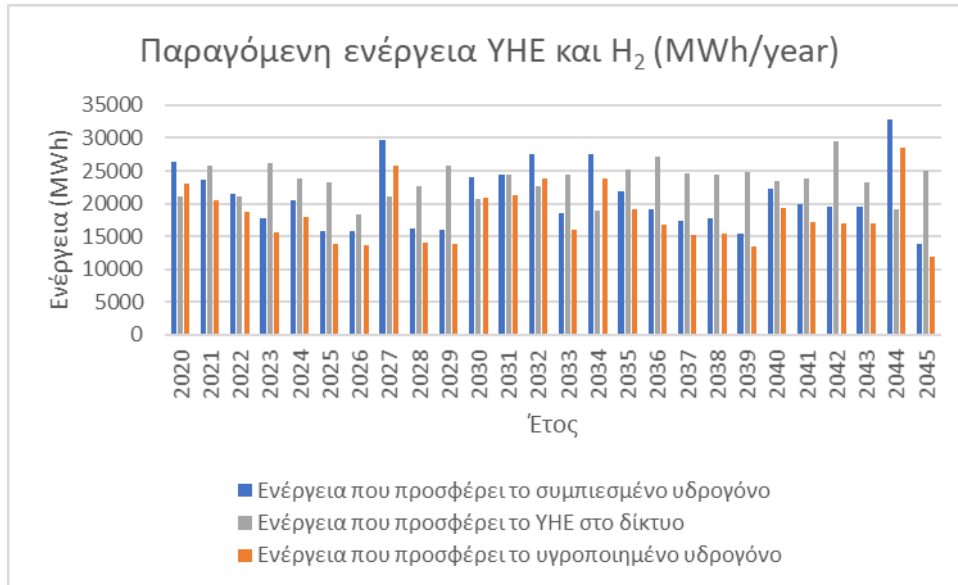
Διάγραμμα 46: Ποσοστό Ενεργειακής Κάλυψης Σεναρίου λειτουργίας 1

Το σενάριο λειτουργίας 2, το υβριδικό σύστημα δηλαδή που περιέχει την αποθήκευση υδρογόνου, έχει αξιοπιστία κάλυψης ενεργειακών αναγκών 57%. Το ποσοστό αυτό παραμένει σταθερό χρησιμοποιώντας είτε συμπιεσμένο υδρογόνο, είτε υγροποιημένο υδρογόνο. Η ενέργεια που προσφέρεται, αρχικά στην διάταξη της ηλεκτρόλυσης και έπειτα στην εκάστοτε δεξαμενή αποθήκευσης, είναι η αιολική ενέργεια που δεν χρησιμοποιήθηκε από την μονάδα αφαλάτωσης. Από την διάταξη της ηλεκτρόλυσης παράγεται αέριο υδρογόνο, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να αποθηκευτεί σε πολύ υψηλές πιέσεις (συμπιεσμένο) ή σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (υγροποιημένο). Παρ' όλα αυτά, εάν επιλεγεί το συμπιεσμένο υδρογόνο, τότε η αιολική ενέργεια καλύπτει το 35% των ενεργειακών αναγκών και το υπόλοιπο 22% καλύπτεται από την μετατροπή συμπιεσμένου υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω κυψελών καυσίμου. Εάν επιλεγεί η χρήση υγροποιημένου υδρογόνου, τότε το 37% των αναγκών καλύπτεται από την αιολική ενέργεια και το 20% από την μετατροπή υγροποιημένου υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω κυψελών καυσίμου. Ο ΑΣΠ και στις δύο περιπτώσεις καλύπτει το 43% των αναγκών, ο οποίος λειτουργεί κατά μέσο όρο στο 20% της δυναμικότητάς του. Στο Διάγραμμα 47 παρουσιάζεται η προσφερόμενη ενέργεια στην ηλεκτρόλυση και μετέπειτα αποθήκευση του υδρογόνου, καθώς και η παραγόμενη ενέργεια από κάθε μορφή υδρογόνου. Η διαφορά παραγωγής ενέργειας που παρατηρείται μεταξύ του συμπιεσμένου και του υγροποιημένου υδρογόνου, αν και μικρή, αποδίδεται στην υψηλότερη ενεργειακή ανάγκη του δευτέρου.



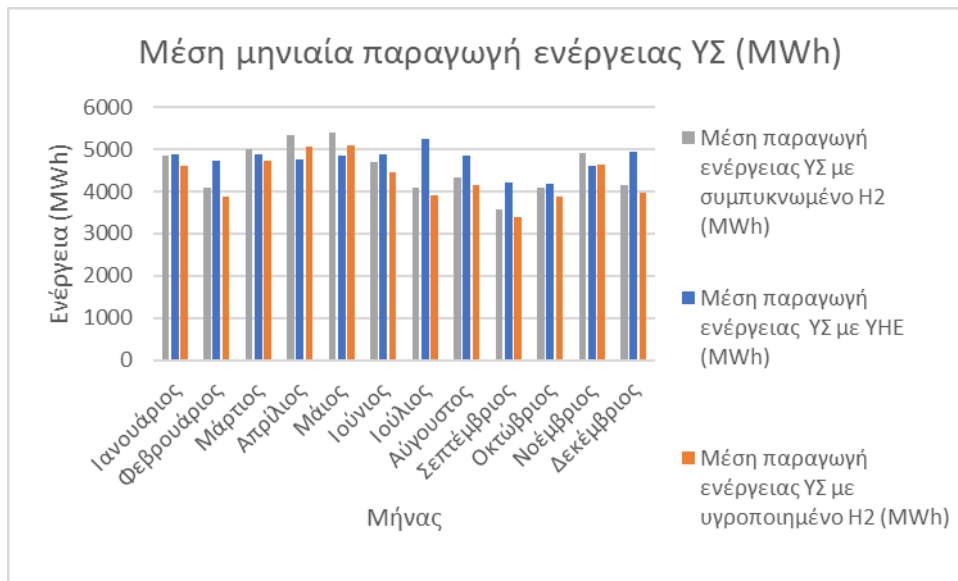
Διάγραμμα 47: Ετήσια Προσφερόμενη Ενέργεια για Ηλεκτρόλυση και Παραγόμενη Ενέργεια από μορφές υδρογόνου

Η προσφερόμενη ενέργεια και στις δύο περιπτώσεις αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας είναι η ίδια. Ωστόσο, τα δύο συστήματα δεν αποδίδουν την ίδια ενέργεια. Το υδροηλεκτρικό έργο διαθέτει βαθμό απόδοσης 80%, ενώ στην περίπτωση του υδρογόνου μέσω της χρήσης κυψέλης καυσίμου, η απόδοση ανέρχεται στο 60%. Κρίνοντας από το Διάγραμμα 48, όπου παρουσιάζεται η σύγκριση της παραγόμενης ενέργειας, διαπιστώνεται εύκολα ότι το υδροηλεκτρικό έργο δεν υπερτερεί πάντοτε της παραγωγής υδρογόνου. Στις χρονιές όπου υπάρχει υψηλή ποσότητα περίσσειας ενέργειας, δηλαδή τις χρονιές 2027 και 2044, το σενάριο λειτουργίας 2 ανταποκρίνεται καλύτερα σε σχέση με το σενάριο λειτουργίας 1, με οποιαδήποτε μορφή υδρογόνου και αν χρησιμοποιείται. Αντιθέτως, στις περιπτώσεις χαμηλής περίσσειας ενέργειας, όπως είναι οι χρονιές 2039 και 2045, το υδροηλεκτρικό έργο παράγει σημαντικά περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από ότι η παραγωγή και μετατροπή υδρογόνου. Η παραγωγή ενέργειας μέσω του υδροηλεκτρικού έργου φαίνεται να είναι σχετικά σταθερή, ενώ μέσω των κυψελών καυσίμου παρατηρούνται περισσότερες αυξομειώσεις. Για την διαδικασία παραγωγής υδρογόνου και την μετέπειτα μετατροπή του, απαιτείται σημαντική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν αυτή υπάρχει και είναι μεγαλύτερη από 60000 MWh, τότε διαπιστώνεται αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω χρήσης του υδρογόνου. Όταν η περίσσεια ενέργειας είναι περίπου ίση με 60000 MWh, τότε οι διαφορές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρές, ενώ στις περιπτώσεις που υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια μικρότερη από 60000 MWh, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του υδροηλεκτρικού έργου είναι υψηλότερη.



Διάγραμμα 48: Ετήσια Σύγκριση Παραγόμενης Ενέργειας από ΥΗΕ και Η₂

Ακόμη, το ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών των δύο σεναρίων διαφοροποιούνται σημαντικά. Το ΥΣ με το υδροηλεκτρικό έργο μπορεί να προσφέρει αξιοπιστία κάλυψης 91%, ενώ το σύστημα με την παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου μόνο 57%. Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των ΥΣ προέρχεται από την αιολική ενέργεια που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο, από την παραγόμενη ενέργεια είτε του υδροηλεκτρικού έργου είτε της μετατροπής του υδρογόνου και από την περίσσεια ενέργεια. Τα ποσοστά που καλύπτει το κάθε σενάριο λειτουργίας έχουν αναφερθεί παραπάνω. Παρακάτω, τα Διαγράμματα 49 και 50 περιέχουν την μέση μηνιαία παραγωγή ενέργειας του ΥΣ και το μέσο ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών αντίστοιχα, για τα σενάρια λειτουργίας 1 και 2. Όσον αφορά στις μέσες μηνιαίες παραγωγές ενέργειας, το ΥΣ που περιλαμβάνει το υδροηλεκτρικό έργο, ως επί το πλείστον υπερτερεί έναντι του ΥΣ με το υδρογόνο. Η υπεροχή αυτή παρατηρείται ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου οι ενεργειακές ανάγκες του νησιού είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Ακόμα μεγαλύτερη διαφορά, παρουσιάζεται στα ποσοστά κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, όπου το σενάριο λειτουργίας 1 αγγίζει μέχρι και το 99.99% τον μήνα Μάιο, ενώ το σενάριο λειτουργίας 2 ανέρχεται σε μέγιστο ποσοστό 65% τον μήνα Απρίλιο.



Διάγραμμα 49: Μέση Μηνιαία Παραγωγή Ενέργειας από Σενάρια λειτουργίας 1 και 2



Διάγραμμα 50: Μέσο Ποσοστό Κάλυψης Ενεργειακών Αναγκών από Σενάρια λειτουργίας 1 και 2

Απαραίτητη βέβαια είναι η επιλογή της μορφής υδρογόνου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στο ΥΣ του σεναρίου λειτουργίας 2. Πέρα από την σύγκριση παραγωγής ενέργειας μεταξύ των δύο επιλογών, σημαντικός παράγοντας αποτελεί η ασφάλεια χρήσης και αποθήκευσης της κάθε μορφής υδρογόνου. Το υδρογόνο στην περίπτωση της αέριας μορφής του αποθηκεύεται σε δεξαμενή υψηλής πίεσης και σε θερμοκρασία δωματίου όμως, το αέριο H₂ είναι άοσμο, άχρωμο και άγευστο οπότε καθίσταται δύσκολη η αντίληψη απελευθέρωσής του, αφού σε περίπτωση καύσης του οι φλόγες του δεν φαίνονται στο φως του ηλίου και δεν παράγεται καπνός. Σε περίπτωση εξωτερικής πυρκαγιάς, θερμότητας ή θερμικής ακτινοβολίας, μπορεί να προκληθεί μηχανική ρήξη μίας δεξαμενής λόγω της θερμικής αποσύνθεσης των πολυμερών και των σύνθετων υλικών. Ακόμη, το υδρογόνο είναι δυνατόν να προκαλέσει ευθραυστότητα μετάλλων, το οποίο οδηγεί σε μείωση της αντοχής του υλικού και κατά συνέπεια στο κάταγμα του δοχείου, οδηγώντας σε διαρροή του

υδρογόνου. Έτσι, ένας άλλος κίνδυνος αποτελεί η ασφυξία λόγω της συσσώρευσης υδρογόνου για μεγάλο χρονικό διάστημα σε κλειστούς χώρους όπως ένα γκαράζ, καθώς ο αέρας αντικαθίσταται με το αέριο υδρογόνο. Ταυτόχρονα, ο σχηματισμός και η πρόσληψη εύφλεκτων μιγμάτων υδρογόνου – οξυγόνου ή υδρογόνου – αέρα σε ένα σύστημα εξαερισμού κτιρίου μπορεί να οδηγήσει σε ανατίναξη ή σε έκρηξη.

Στον αντίποδα, το υδρογόνο σε υγρή μορφή αποθηκεύεται σε δεξαμενές με πολύ χαμηλή θερμοκρασία αλλά σε τυπικές συνθήκες πίεσης. Σε περίπτωση βλάβης στα εξωτερικά τοιχώματα μίας τέτοιας δεξαμενής επηρεάζεται η μόνωση της, προκαλώντας αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δοχείου. Επιπλέον, ο συμπυκνωμένος αέρας μπορεί να σχηματίσει εμπλουτισμένες με οξυγόνο ατμόσφαιρες κοντά στην αποθήκευση του υδροποιημένου υδρογόνου. Οι στερεές αποθέσεις που δημιουργούνται από τον συμπυκνωμένο αέρα και το LH_2 ενδέχεται να εμπλουτιστούν περαιτέρω με οξυγόνο. Αυτό, ενέχει κίνδυνο έκρηξης εάν ο εξωτερικός τοίχος της δεξαμενής δεν είναι σωστά διαμορφωμένος. Σε περίπτωση διαρροής το υγρού υδρογόνου, σχηματίζεται ένα νέφος υδρογόνου, το οποίο μπορεί να ρέει οριζόντια για κάποια απόσταση ή και προς τα κάτω, ανάλογα με το έδαφος και τις καιρικές συνθήκες. Μία πιθανή κατάληξη είναι η ανάφλεξη αυτού του σύννεφου ατμών υγρού υδρογόνου. Τέλος, οι απαραίτητα χαμηλές θερμοκρασίες που πρέπει να βρίσκεται το υδροποιημένο υδρογόνο μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα τη συσσώρευση πάγου στα στοιχεία αποθήκευσης π.χ. στις βαλβίδες, που οδηγούν σε υπερβολικές εξωτερικές πιέσεις και σε πιθανή ρήξη της δεξαμενής.

Εφόσον και οι δύο μορφές υδρογόνου ενέχουν σημαντικούς κινδύνους, όπως περιεγράφηκαν παραπάνω, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ποσότητα των απαραίτητων δεξαμενών για την αποθήκευση του υδρογόνου. Οι δεξαμενές που αποθηκεύουν LH_2 (Liquified H_2) είναι σημαντικά λιγότερες από αυτές που αποθηκεύουν cGH_2 (compressed Gaseous H_2). Έτσι, όσον αφορά στην πίεση αποθήκευσης, το υγρό υδρογόνο ενέχει λιγότερους πιθανούς κινδύνους, σε σύγκριση με το συμπιεσμένο αέριο. Ακόμη, το υδροποιημένο υδρογόνο διαθέτει υψηλότερη πυκνότητα από αυτήν του συμπιεσμένου, δηλαδή καταλαμβάνει λιγότερο όγκο και επομένως μπορεί να αποθηκευτεί περισσότερη ποσότητα υδρογόνου. Η επιλογή λοιπόν για το ΥΣ του σεναρίου λειτουργίας 2, προτείνεται να είναι η υδροποίηση του αέριου υδρογόνου που παράγεται από την ηλεκτρόλυση, σε κρυογονικά συμπιεσμένες δεξαμενές, οι οποίες χρησιμοποιούν λίγο μεγαλύτερες πιέσεις από τις τυπικές συνθήκες πίεσης.

6. Συμπεράσματα – Μελλοντική έρευνα

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εφαρμογή ΥΣ με χρήση ΑΠΕ. Πρώτα, παρουσιάζονται τα ΥΣ, οι ΑΠΕ που χρησιμοποιούνται στην εργασία, καθώς και η διαδικασία της αφαλάτωσης και της ηλεκτρόλυσης. Έπειτα, αναπτύσσονται δύο πιθανά σενάρια λειτουργίας ενός ΥΣ στο νησί της Λήμνου. Το πρώτο σενάριο αποτελείται από ένα αιολικό πάρκο 9 ανεμογεννητριών, μία μονάδα αφαλάτωσης και ένα υδροηλεκτρικό έργο. Το δεύτερο σενάριο αποτελείται από ένα αιολικό πάρκο 9 ανεμογεννητριών, μία μονάδα αφαλάτωσης, μία μονάδα ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή αέριου υδρογόνου, δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου και κυψέλες καυσίμου. Σκοπός του ΥΣ είναι η κάλυψη των υδρευτικών, αρδευτικών και ενεργειακών αναγκών του νησιού. Κατά την μοντελοποίηση του έργου, γίνεται συλλογή και ανάλυση δεδομένων βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και ανέμου, εκτίμηση των αναγκών ύδρευσης, άρδευσης και ενέργειας της περιοχής μελέτης και υπολογισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από αυτό. Η διάρκεια ζωής του έργου ανέρχεται στα 25 έτη.

Η χρήση ΑΠΕ γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική, ειδικά σε μία χώρα όπως η Ελλάδα, η οποία μπορεί να επωφεληθεί σημαντικά από αυτές. Οι περισσότερες περιοχές της διαθέτουν αιολικό, ηλιακό, γεωθερμικό δυναμικό και όχι μόνο. Η κλιματική αλλαγή που οφείλεται κυρίως στη χρήση ορυκτών καυσίμων αναδεικνύει την ανάγκη παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ στο μέγιστο δυνατό βαθμό και την ταυτόχρονη εξάλειψη των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η ανάγκη αυτή, καθώς και άλλοι περιβαλλοντικοί και οικονομικοί λόγοι, οδηγούν στην έρευνα και ανάπτυξη των ΥΣ προκειμένου να γίνει εφικτή η αποθήκευση ενέργειας και η αντιμετώπιση της στοχαστικότητας των ΑΠΕ. Η λειτουργία ΥΣ με χρήση αποκλειστικά ΑΠΕ, ειδικότερα σε μη διασυνδεδεμένα νησιά, αποτελούν τον τρόπο επίτευξης ενεργειακής αυτονομίας. Ένα από αυτά τα νησιά αποτελεί και η περιοχή μελέτης. Ωστόσο, πέρα από την ενεργειακή εξάρτηση από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας, τα νησιά αντιμετωπίζουν σημαντικά προβλήματα με την έλλειψη υδρευτικού και αρδευτικού νερού, λόγω των περιορισμένων υδατικών πόρων. Τα φαινόμενα λειψυδρίας δεν είναι σπάνια, ενώ τα προβλήματα εντείνονται κατά τους θερινούς μήνες από την προσωρινή αύξηση του πληθυσμού και των αρδευτικών αναγκών.

Πρωταρχικός σκοπός του ΥΣ που μελετάται είναι η πλήρης κάλυψη των υδρευτικών αναγκών. Αυτό επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης, με την πλέον ανεπτυγμένη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης και την χρήση δεξαμενής πόσιμου νερού. Η αντίστροφη ώσμωση αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους αφαλάτωσης, η οποία συνιστάται για την χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με την υψηλή αποδοτικότητά της, καθώς και για την ευχέρεια που την διέπει να συνδέεται με ΑΠΕ. **Όποιο σενάριο λειτουργίας εάν επιλεγεί , οι υδρευτικές ανάγκες καθόλη τη διάρκεια ζωής του**

έργου, έχοντας λάβει υπόψη τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες λόγω της αντίστοιχης αύξησης του πληθυσμού, μπορούν να καλυφθούν.

Στη συνέχεια, από την σύγκριση των δύο σεναρίων λειτουργίας όσον αφορά την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, γίνεται αντιληπτή η **υπεροχή του υδροηλεκτρικού έργου σε σχέση με την παραγωγή, αποθήκευση και μετατροπή του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια.** Είναι ένα λογικό αποτέλεσμα αφού η λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού έργου είναι πλήρως ανεπτυγμένη. Με την χρήση του πρώτου σεναρίου λειτουργίας, ο ΑΣΠ της Λήμνου παρέχει την ελάχιστη δυνατή ηλεκτρική ενέργεια, αποκτώντας σημαντική ενεργειακή απεξάρτηση. Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών γίνεται πρωτίστως από την αιολική ενέργεια, αξιοποιώντας έτσι το υψηλό αιολικό δυναμικό της περιοχής μελέτης και έπεται η υδροηλεκτρική ενέργεια. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την παραγωγή υδρογόνου είναι η αποδοτικότητα που διαθέτει το υδροηλεκτρικό έργο σε σχέση με τις μονάδες ηλεκτρόλυσης και τις κυψέλες καυσίμου. Το υδροηλεκτρικό έργο έχει απόδοση 80%, η ηλεκτρόλυση επίσης 80% ενώ οι κυψέλες καυσίμου μόνο 60%. Παρ' όλα αυτά, **από την σύγκριση των δύο σεναρίων προκύπτει ότι στις περιπτώσεις όπου η περίσσεια αιολική ενέργεια υπερβαίνει τις 60000 MWh, τότε το υδρογόνο παράγει αισθητά περισσότερη ενέργεια απ' ότι το υδροηλεκτρικό έργο.** Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό και ενθαρρυντικό για το μέλλον αποτέλεσμα της εργασίας, καθώς διαφαίνεται η δυνατότητα και η αποδοτικότητα της ένταξης του υδρογόνου στα ΥΣ.

Αξιοσημείωτη είναι η επιρροή που έχει στα αποτελέσματα η μορφή του υδρογόνου που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί στο δεύτερο σενάριο λειτουργίας του ΥΣ. Υπενθυμίζεται ότι, η παραγωγή υδρογόνου γίνεται μόνο με χρήση της περίσσειας αιολικής ενέργειας («πράσινο υδρογόνο») και όχι από συμβατικές μονάδες. Η ενέργεια αυτή διοχετεύεται πρώτα στην μονάδα ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή αέριου υδρογόνου. Η υγροποίηση του υδρογόνου που προκύπτει από την ηλεκτρόλυση και η αποθήκευσή του σε κρυογονικές συνθήκες απαιτεί περισσότερη ενέργεια από την συμπίεση του αέριου υδρογόνου. Βέβαια, στην τελική παραγωγή ενέργειας, δηλαδή αφού το υδρογόνο διοχετευτεί στις κυψέλες καύσιμου, η διαφορά μεταξύ των δύο πιθανών τρόπων αποθήκευσης δεν είναι μεγάλη. Με την επιλογή όμως του LH₂ (Liquid H₂), είναι απαραίτητες λιγότερες δεξαμενές αποθήκευσης, αφού σε αυτή τη μορφή το υδρογόνο διαθέτει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, άρα καταλαμβάνει λιγότερο όγκο. Έτσι, προκύπτουν λιγότερες πιθανότητες έκθεσης σε πηγές κινδύνου είτε σε περίπτωση δυσλειτουργίας των δεξαμενών είτε σε εξωγενείς παράγοντες.

6.2 Μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα τα οποία μπορούν να διερευνηθούν περαιτέρω. Με τον τρόπο αυτό, το υπό μελέτη ΥΣ που παρουσιάζεται μπορεί να εξελιχθεί σε μία ολοκληρωμένη μελέτη τεχνικού έργου. Η μεθοδολογία που αναλύεται μπορεί να εφαρμοστεί σε νησιά της Ελλάδας, τα οποία εξαρτώνται ακόμα από συμβατικές

μονάδες παραγωγής ενέργειας ή από το δίκτυο της ΔΕΗ, για να καλύψουν τις απαραίτητες ανάγκες τους.

Η μελλοντική έρευνα προτείνεται να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη της παραγωγής και χρήσης του υδρογόνου. Πιο συγκεκριμένα, συνιστάται η ανάπτυξη μονάδων ηλεκτρόλυσης που χρησιμοποιούν αμιγώς θαλασσινό νερό για την παραγωγή αέριου υδρογόνου, αντί για την χρήση αφαλατωμένου, αν όχι πόσιμου νερού. Επιπλέον, ο λόγος για τον οποίο το υδρογόνο απαιτεί σημαντικά ποσά ενέργειας για την παραγωγή του είναι η ενεργειακή ανάγκη της ηλεκτρόλυσης, η οποία για την παραγωγή 1kg H₂ χρειάζεται 49kWh. Άρα γίνεται απαραίτητη η ελαχιστοποίηση της ενεργειακής ανάγκης της ηλεκτρόλυσης, αλλά και της υψηλής ενεργειακής ζήτησης για την μετατροπή του αέριου υδρογόνου σε υγρό.

Τέλος, η παραγωγή ενέργειας και η πώληση αυτής σε γειτονικά νησιά ή και ακόμα στο δίκτυο της ΔΕΗ αποτελεί μία αξιοσημείωτη εναλλακτική που πρέπει να διερευνηθεί. Η παραγωγή και πώληση του υδρογόνου είναι μία καινοτόμα διαδικασία, από την οποία ο Δήμος Λήμνου μπορεί να επωφεληθεί σημαντικά. Οπότε καθίσταται αναγκαία η ανάλυση κόστους – οφέλους του ΥΣ για τα δύο πιθανά σενάρια λειτουργίας. Άλλα οικονομικοτεχνικά θέματα που είναι χρήσιμο να διερευνηθούν είναι η σύνδεση της Λήμνου με το διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, σε αντιπαράθεση με την πλήρη ενεργειακή αυτονομία. Επιπλέον θέμα προς εξέταση αποτελεί η περίπτωση πλήρους εξάλειψης των γεωτρήσεων για την κάλυψη της ύδρευσης και άρδευσης με την κατασκευή δικτύου μεταφοράς του νερού.

7. Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αλεξάνδρου Π., “Μελέτη εγκατάστασης και λειτουργίας υβριδικού συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στη Λήμνο”, Διπλωματική εργασία, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, Φεβρουάριος 2020.

Γεωργιάδης Ν.Μ., Bergmeier E., Δημητρόπουλος Γ., Καΐρης Ο., Κακαλής Ε., Κοσμάς Κ., Meyer S., Μπεμπέλη Π., Πανίτσα Μ., Περγίδης Δ., Στραχίνης Η., & Χατζηγεωργίου Ι., “Το φυσικό περιβάλλον της Λήμνου με έμφαση στη βιοποικιλότητα και το έδαφος”, Πρόγραμμα Terra Lemnía: Δράσεις καταγραφής ειδών και εδαφικών παραμέτρων, Μεσογειακό Ινστιτούτο για τη Φύση και τον Άνθρωπο (MedINA), Στρατηγική 1.2, Δράση 1.2.3., Αθήνα, Μάρτιος 2020.

Διαχειριστής ΑΠΕ & Εγγυήσεων Προέλευσης- ΔΑΠΕΕΠ Α.Ε., Συνοπτικό Πληροφοριακό Δελτίο Α.Π.Ε. & ΣΗΘΥΑ, Ιανουάριος 2021.

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Ε & Α: Στρατηγική για το υδρογόνο για μια κλιματικά ουδέτερη Ευρώπη, Βρυξέλλες, Ιούλιος 2020.

Ευστρατιάδης Α., Κουτσογιάννης Δ., “Κασταλία: Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών”, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, ΕΜΠ, Έκδοση 2.0, Τεύχος 23, Αθήνα, Ιανουάριος 2004.

Ευστρατιάδης Α., Μαμάσης Ν. & Κουτσογιάννης Δ., Μάθημα «Ανανεώσιμη ενέργεια & υδροηλεκτρικά έργα», Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Ακαδημαϊκό έτος 2018-19.

Καρανάσιος Α., “Ανάπτυξη παγκόσμιου παραμετρικού μοντέλου δυνητικής εξατμισοδιαπνοής”, Μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2016.

Κουτσογιάννης Δ., “Στοχαστικές Μέθοδοι: Στάσιμα στοχαστικά μοντέλα μιας μεταβλητής”, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα – Αναθεώρηση 2019.

Κουτσογιάννης Δ., Ευστρατιάδης Α., Σημειώσεις Αστικών Υδραυλικών Έργων Υδροδοτικά Έργα, 2015.

Λεμονής Α., “Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Εφαρμογής Υβριδικού Συστήματος για την Κάλυψη Υδατικών και Ενεργειακών Αναγκών στη Νήσο Λέρο”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2020.

Μάντζαρης Ν., Χριστοπούλου Ι., “Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας: Προκλήσεις και Προοπτικές”, The Green Tank, Λύσεις πολιτικής για ένα βιώσιμο μέλλον, Αθήνα, Δεκέμβριος 2020.

Μαντζουράνης Ε., “Ολοκληρωμένη αξιολόγηση ενός υβριδικού συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη Νήσο Σκύρο στο πλαίσιο απολιγνιτοποίησης”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, Μάρτιος 2021.

Μαστροκώστα Α., “Εκτίμηση αρδευτικών αναγκών και συσχέτιση αυτών με δείκτες ξηρασίας σε περιοχές της νότιας Ελλάδας”, Μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2016.

Μιμίκου Μ.Α., Μπαλτάς Ε.Α., Τεχνική Υδρολογία, 6η έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2018.

ΜΠΑΡΑΚΟΥ Θ., ΔΕΛΗΜΠΑΣΗΣ Ν., ΒΟΥΛΓΑΡΗΣ Ν., ΒΑΙΕΡ Β., “ΣΕΙΣΜΟΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΒΟΡΕΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ”, Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Πρακτικά 9ου Διεθνούς Συνεδρίου, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2001.

Μπαρούνη Ι., “Ανάλυση και Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού Υβριδικού Υδροηλεκτρικού – Αιολικού Σταθμού, με δύο παράλληλα Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας: Αντλησιοταμίευση και Παραγωγή Υδρογόνου με Ηλεκτρόλυση”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2011.

Μπούκας Ε., “Εκτίμηση του Υδατικού Αποτυπώματος των καλλιεργειών στην κοιλάδα του Σπερχειού”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2017.

Ρουμελιώτη Π., “Υδρογεωλογική Μελέτη της Νήσου Λήμνου με έμφαση στα υδροφόρα συστήματα των ηφαιστειακών πετρωμάτων”, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2013.

Στεφανάτος Ι., “ Χωροθέτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας - Αιολικού & Φωτοβολταϊκού πάρκου με χρήση GIS: Η περίπτωση της Λήμνου”, Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Αιγαίο, Φεβρουάριος, 2008.

Σκρουφούτα Σ., “Διερεύνηση διαστασιολόγησης υβριδικού συστήματος ΑΠΕ για τη διασφάλιση των ενεργειακών και υδατικών αναγκών στο νησί της Καρπάθου”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 2020.

Τριάντης Κ., Γεωργίου Κ., Βαρελίδης Γ., Κακογιάννης Ν., Μακαντάση Φ., Σκώκου Ν., Καραουλάνης Θ., “Προστατευόμενες Περιοχές Natura 2000: Ένα Ολοκληρωμένο Σχέδιο για την Προστασία και τη Βιώσιμη Ανάπτυξή τους”, διαΝΕΟσις Οργανισμός έρευνας και ανάλυσης, Νοέμβριος 2017.

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα, Δεκέμβριος 2019.

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, “1η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Νήσων Αιγαίου (EL 14) Προσχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών”, Ιούνιος 2017.

Χατζηγεωργίου Ι., “Τελική έκθεση για το πρόγραμμα: «Αναχλόαση βοσκοτόπων – δημιουργία λειμώνων στις νήσους Αστυπάλαια και Λήμνο»”, ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ, Αθήνα, Νοέμβριος 2013.

Χριστοφόρου Λουκάς, Ομιλία κατά την Εγκατάσταση Νέων Αρχών με θέμα Ενέργεια, Ακαδημία Αθηνών, Ιανουάριος 2021.

The Green Tank, Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας: Προκλήσεις και Προοπτικές, 2020.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Fu Sun, Jingshan Qin, Zhiyu Wang, Mengzhou Yu, Xianhong Wu, Xiaoming Sun & Jieshan Qiu, “Energy-saving hydrogen production by chlorine-free hybrid seawater splitting coupling hydrazine degradation”, July 2021.

International Renewable Energy Agency, “Renewables and electricity storage, A technology roadmap for Remap 2030”, Germany June 2015.

Lazarov V., Notton G., Zarkov Z., Bochev I., “Hybrid Power Systems with Renewable Energy Sources – Types, Structures, Trends for Research and Development”, ELMA, September 2005.

Mai Ahmed Mohamed Mahmoud, “Renewable energy power reverse osmosis system for seawater desalination plant”, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Alexandria University, Alexandria, Egypt, July 2020.

Manish Thimmaraju, Divya Sreepada, Gummadi Sridhar Babu, Bharath Kumar Dasari, Sai Kiran Velpula and Nagaraju Vallepu, “Desalination of Water”, September 2018.

Meer A.M.Khana, S. Rehman, Fahad A., Al-Sulaiman, “A hybrid renewable energy system as a potential energy source for water desalination using reverse osmosis: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, December 2018.

M.A. Mimikou, E.A. Baltas, and V.A. Tsihrintzis. (2016). Hydrology and Water Resource Systems Analysis, CRC Press-Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA ISBN: 978-1-4665-8130-2.

Mohamed A.Eltawil, Zhao Zhengming, Liqiang Yuan, “A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, December 2009.

Nayar C. V., “Stand alone wind/diesel/battery hybrid energy systems”, Wind Energy, 1997

Negra, N.B., Birgitte, B.J., Sorensen, P., Model of a Synthetic Wind Speed Time Series Generator, 2007.

Prabodh Bajpai, Vaishalee Dash, “Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, June 2012.

Sajid Ali and Choon – Man Jang, “Optimum Design of Hybrid Renewable Energy System for Sustainable Energy Supply to a Remote Island”, MDPI, February 2020.

Salisu Muhammad Lawan and Wan Azlan Wan Zainal Abidin, “A Review of Hybrid Renewable Energy Systems Based on Wind and Solar Energy: Modeling, Design and Optimization”, February 2020.

Sean O’Neil, Unlocking the Potential of Hydrogen Energy Storage, Fuel Cell & Hydrogen Energy Association, July 2019.

Skroufouta S., Baltas E., Investigation of hybrid renewable energy system (HRES) for covering energy and water needs on the Island of Karpathos in Aegean Sea, Renewable Energy Volume 173, August 2021.

Thilo Bocklisch, “Hybrid energy storage systems for renewable energy applications”, 9th International Renewable Energy Storage Conference, IRES 2015.

U.S. Department of Energy, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, “Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs”, October 2009.

Ιστοσελίδες

Απογραφή πληθυσμού ΕΛΣΤΑΤ 2011 <https://www.statistics.gr/2011-census-pop-hous>

Βικιπαίδεια – Ηλεκτρόλυση

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CF%8C%CE%BB%CF%85%CF%83%CE%B7>

ΔΕΗ – Ανανεώσιμες πηγές Υβριδικά συστήματα <https://ppcr.gr/el/hybrid-systems>

Δήμος Λήμνου <https://limnos.gov.gr/%CF%84%CE%BF-%CE%BD%CE%B7%CF%83%CE%AF-%CE%BC%CE%B1%CF%82/%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%81%CE%AF%CE%B1/>

ΕΚΘΕΣΗ ΠΕΠΡΑΓΜΕΝΩΝ 2003 - ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΔΡΑΣΕΩΝ 2004 ΚΑΠΕ
http://www.cres.gr/kape/pdf/download/Apologismos_2003.pdf

Εκπόνηση Μελετών για τη Στρατηγική Περιβαλλοντική Εκτίμηση του Εθνικού Προγράμματος Ανάπτυξης Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων ΚΑΠΕ
http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/MIS_sept15/MIS%20375406_CRES_GSIEROS.pdf

ΕΛΕΤΑΕΝ <https://eletaen.gr/wp-content/uploads/2021/07/2021-07-21-H1-HWEA-Statistics-Greece-.pdf>

Κλιματικά Δεδομένα για επιλεγμένους σταθμούς στην Ελλάδα Λήμνος
http://www.hnms.gr/emy/el/climatology/climatology_city?perifereia=North%20Aegean&poli=Lemnos

Περιφερειακή Ενότητα Λήμνου Λίμνη Αλυκή – Χορταρολίμνη
<http://www.lemnos.gr/lemnos/photo/aksio/chortarolimni.htm>

Σεισμός μεταξύ Λήμνου και Σαμοθράκης
<http://geophysics.geo.auth.gr/ss/AKOLOYTHIES/07/03.pdf>

Σεισμός 6,3 βαθμών μεταξύ Λήμνου και Σαμοθράκης
<https://www.in.gr/2014/05/24/greece/seismos-6-3-bathmwn-metaksy-limnoy-kai-samothrakis/>

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, Δίκτυο NATURA 2000
<https://ypen.gov.gr/perivallon/viopoikilotita/diktyo-natura-2000/>

Air Liquide – Storing Hydrogen <https://energies.airliquide.com/resources-planet-hydrogen/how-hydrogen-stored>

Energetic Electrolysis: The Potentials of Hydrogen Power Activity Guide
http://www.sciencenter.org/climatechange/d/cart_activity_guide_energetic_electrolysis.pdf

Energy press <https://energypress.gr/news/dapeep-7441-mw-i-synoliki-egkatestimeni-ishys-ape-sithyaton-ianoyario>

Energy sage Hydropower pros and cons <https://www.energysage.com/about-clean-energy/hydropower/pros-cons-hydropower/>

FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56
[http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e0b.htm#chapter%206%20%20etc%20%20single%20crop%20coefficient%20\(kc\)](http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e0b.htm#chapter%206%20%20etc%20%20single%20crop%20coefficient%20(kc))

Fuel Cell & Hydrogen Energy Association – Fuel Cell Basics <https://www.fchea.org/fuelcells>

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, “Lecture - Safety of hydrogen storage”
http://www.hyresponse.eu/files/Lectures/Safety_of_hydrogen_storage_notes.pdf

Greentech Media - Hybrid Energy Storage Systems get the best of both worlds
<https://www.greentechmedia.com/articles/read/hybrid-energy-storage-systems-get-best-of-both-worlds>

Heggie J., “Preventing a water crisis in Greece”, National Geographic, May 2020.
<https://www.nationalgeographic.com/science/article/partner-content-where-our-water-goes-greece>

Integrated Design for Efficient Advanced Liquefaction of Hydrogen, Liquid Hydrogen Outline https://www.idealhy.eu/index.php?page=lh2_outline

International Energy Agency – Energy storage <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/energy-storage>

International Energy Agency – Greece <https://www.iea.org/countries/greece#more-greece>

International Energy Agency – Hydropower <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydropower>

International Renewable Energy Agency – Hydropower <https://irena.org/hydropower>

Linde engineering - Cryogenic tanks and air-heated vaporizers <https://www.linde-engineering.com/en/plant-components/cryogenic-tanks-air-heated-vaporizers/index.html>

Linde engineering – From source to service <https://www.linde-engineering.com/en/hydrogen/index.html>

Linde engineering – Powered by hydrogen <https://www.linde-engineering.com/en/about-linde-engineering/success-stories/h2-mobility.html>

Lombard Odier - Storage technologies: paving the way for a renewable energy future <https://www.lombardodier.com/contents/corporate-news/ft-rethink/2021/april/storage-technologies-paving-the.html>

Low Carbon Green Growth Roadmap for Asia and the Pacific Fact Sheet <https://www.unescap.org/sites/default/d8files/35.%20FS-Hybrid-energy-system.pdf>

Mahytec Innovative Energy Solutions – Compressed hydrogen storage <https://www.mahytec.com/en/compressed-hydrogen-storage/>

Norton Rose Fulbright, Investing in the Greek wind power sector, March 2016 <https://www.nortonrosefulbright.com/en/knowledge/publications/b2db1ced/investing-in-the-greek-wind-power-sector>

Power Technology – Realising the hydrogen economy <https://www.power-technology.com/comment/standing-at-the-precipice-of-the-hydrogen-economy/>

Prof. Werner Antweiler, “What role does hydrogen have in the future of electric mobility?”, Werner's Blog — Opinion, Analysis, Commentary, University of British Columbia, September 2020. <https://wernerantweiler.ca/blog.php?item=2020-09-28>

Puretec Industrial Water – What is Reverse Osmosis (RO) <https://puretecwater.com/reverse-osmosis/what-is-reverse-osmosis#how-does-reverse-osmosis-work>

Sapphire Technologies Liquefaction/ Gasification <https://www.sapphiretechnologies.com/hydrogen/>

Stanford news: Stanford researchers create hydrogen fuel from seawater, March 2019

<https://news.stanford.edu/2019/03/18/new-way-generate-hydrogen-fuel-seawater/>

U.S. Department of Energy, Energy efficiency & Renewable Energy, Fuel Cell Technologies

Office <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/fcto-h2-storage-fact-sheet.pdf>

U.S. Department of Energy, Energy efficiency & Renewable Energy, Hydrogen and Fuel Cells
Technology, DOE Technical Targets for Hydrogen Production from Electrolysis

<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-hydrogen-production-electrolysis>

Water corporation – Desalination <https://www.watercorporation.com.au/Our-water/Desalination>

World Economic Forum – How can we store renewable energy? 4 technologies that can help

<https://www.weforum.org/agenda/2021/04/renewable-energy-storage-pumped-batteries-thermal-mechanical/>