

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική εργασία με θέμα :
«Μοντελοποίηση και εκτίμηση αναγκών
αποθήκευσης του ηλεκτρικού
συστήματος της Ελλάδας για παραγωγή
ενέργειας αποκλειστικά από ΑΠΕ»

ΠΑΠΑΝΤΩΝΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο ολοκλήρωσης των σπουδών στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. τον Οκτώβριο του 2019.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον καθηγητή κ. Αναγνωστόπουλο Ιωάννη για την ανάθεση της εργασίας, την καθοδήγηση και τη στήριξη που μου έδειξε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της. Χωρίς την πολύτιμη βοήθειά του δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΑΠΕ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	11
2.1 Το ζήτημα της κλιματικής αλλαγής και η Ευρωπαϊκή Ενεργειακή Πολιτική	11
2.1.1 Ιστορική αναδρομή	11
2.1.2 Μελλοντικά Σχέδια	14
2.2 Οι ανάγκες σε ενέργεια και η συμβολή των ΑΠΕ σήμερα	15
2.2.1 Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	18
2.3 Η κατάσταση στην Ελλάδα	24
2.3.1 Κατανάλωση ενέργειας.....	24
2.3.2 Χρήση των ΑΠΕ στον ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα	27
2.4 Ανάπτυξη των ΑΠΕ. Δυνατότητες και περιορισμοί.	33
2.5 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.....	35
2.5.1 Διατάξεις Βραχυπρόθεσμης Αποθήκευσης	36
2.5.2 Τεχνολογία μπαταριών	36
2.5.3 Μονάδες αντλησιοταμίευσης	38
2.6 Ενεργειακή αποθήκευση για ηλεκτροπαραγωγή 100% από ΑΠΕ	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΚΩΔΙΚΑΣ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ.....	43
3.1 Εισαγωγή.....	43
3.2 Τα δεδομένα	43
3.3 Επεξεργασία δεδομένων	47
3.3.1 Το πρώτο στάδιο του κώδικα.....	48
3.3.2 Το δεύτερο στάδιο του κώδικα	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	59
4.1 Εισαγωγή.....	59
4.2 Σενάριο Α.	59
4.2.1 Διερεύνηση βέλτιστου συνδυασμού εγκατεστημένης ισχύος Αιολικών και Φ/Β για την κάλυψη των αναγκών του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.	59
4.2.2 Οι καμπύλες διάρκειας των περικόπων ενέργειας για τους βέλτιστους συνδυασμούς εγκατεστημένης ισχύος του σεναρίου Α.	66
4.3 Σενάριο Β. Διερεύνηση βέλτιστου συνδυασμού εγκατεστημένης ισχύος Αιολικών και Φ/Β για διαφορετικές καιρικές συνθήκες.....	69
4.3.1 Σενάριο Β1. Δυσμενές έτος παραγωγής ενέργειας από Αιολικά.	70

4.3.2 Σενάριο Β2. Δυσμενές έτος παραγωγής ενέργειας από Φωτοβολταϊκά.....	72
4.3.3 Σενάριο Β3. Ευνοϊκό έτος παραγωγής ενέργειας από Φωτοβολταϊκά.	74
4.3.4 Σενάριο Β4. Ευνοϊκό έτος συμπαραγωγής ενέργειας από Αιολικά.	76
4.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ.....	83

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ζήτημα της κλιματικής αλλαγής, καθώς και η οικονομική κατάσταση σε παγκόσμιο, αλλά και εθνικό επίπεδο, καθιστούν επιτακτικό τον επαναπροσδιορισμό του ενεργειακού χάρτη τις επόμενες δεκαετίες. Η συντριπτική πλειοψηφία των κρατών, μέσα από μία σειρά διαβουλεύσεων και συμφωνιών, έχει συμφωνήσει την μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του ανθράκα, για μετάβαση σε μία κοινωνία χαμηλού άνθρακα. Επομένως, κυρίαρχο ρόλο στη διαμόρφωση του ενεργειακού σχεδιασμού και στην Ελλάδα θα επιτελέσουν οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (κυρίως η αιολική και η ηλιακή). Στόχος είναι η πολύ υψηλή διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας και κυρίως στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Προκύπτουν, όμως, τεχνικοί περιορισμοί επάρκειας εφοδιασμού και ευστάθειας του ηλεκτρικού συστήματος, που επιβάλλουν όριο στο ποσοστό διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η αποθήκευση της πλεονάζουσας παραγωγής ΑΠΕ, αποτελεί το συνδετικό κρίκο στο ενεργειακό σύστημα, για την αντιμετώπιση των περιορισμών αυτών.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία εξετάζεται η δυνατότητα πλήρους κάλυψης των αναγκών του ηλεκτρικού συστήματος της Ελλάδας με αποκλειστική χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, καθώς αυτός ο στόχος έχει ήδη τεθεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση για τις επόμενες δεκαετίες. Για την πραγματοποίηση της μελέτης λαμβάνονται υπόψιν οι μηνιαίες καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα 11 ετών (2008-2018), καθώς επίσης και οι μηνιαίες ποσότητες ενέργειας που έχουν παραχθεί από αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα στο ίδιο χρονικό διάστημα, 2008-2018. Με βάση τα δημοσιευμένα στοιχεία του διαχειριστή του δικτύου (ΑΔΜΗΕ) και του λειτουργού αγοράς ενέργειας (ΛΑΓΗΕ).

Με κατάλληλο λογισμικό που αναπτύχθηκε, υπολογίζονται οι αντίστοιχες, μηνιαίες ανάγκες για πρόσθετη ενέργεια, όταν η ζήτηση (κατανάλωση) υπερβαίνει την παραγωγή των ΑΠΕ. Σε ένα σύστημα με 100% ΑΠΕ, η πρόσθετη αυτή ενέργεια θα πρέπει να παρέχεται από τις μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Επομένως, η σωρευτική ανάγκη χρησιμοποίησης της ενέργειας αυτής κατά τη διάρκεια των ετών αποθηκευμένης ενέργειας ισοδυναμεί με τη μέγιστη απαιτούμενη αποθηκευτική ικανότητα (σε μονάδες ενέργειας) που πρέπει να διαθέτει το ηλεκτρικό σύστημα. Από την άλλη πλευρά, όταν η παραγωγή των ΑΠΕ είναι μεγαλύτερη από την κατανάλωση, η πλεονάζουσα ενέργεια αποθηκεύεται, εφόσον υπάρχει διαθέσιμη χωρητικότητα στο σύστημα, διαφορετικά, απορρίπτεται.

Στην Εργασία διερευνάται, αρχικά, η απαιτούμενη αποθηκευτική ικανότητα του ελληνικού συστήματος για διάφορους συνδυασμούς εγκατεστημένης αιολικής και φωτοβολταϊκής ισχύος, και προκύπτουν οι βέλτιστοι συνδυασμοί της για δεδομένη δυνατότητα αποθήκευσης του συστήματος. Στη συνέχεια, για δυνατότητα αποθήκευσης 0.5, 1, 1.5 και 2 μέσων ημερών κατανάλωσης παρουσιάζονται αναλυτικά διαγράμματα της μηνιαίας συμπεριφοράς της αποθήκευσης και των απορρίψεων της παραγωγής ΑΠΕ για το διάστημα 2008-2018. Γίνεται, επίσης, παρουσίαση των καμπύλων διάρκειας των περικοπών ενέργειας στις διάφορες αυτές περιπτώσεις, ώστε να εκτιμηθεί η δυνατότητα αξιοποίησής τους σε άλλες εφαρμογές. Τέλος, διεξάγεται παραμετρική διερεύνηση της επίπτωσης της πιθανής διαφοροποίησης της παραγωγής ΑΠΕ από έτος σε έτος, λόγω μεταβολής των καιρικών

συνθηκών, εξετάζοντας διάφορα ευνοϊκά και δυσμενή σενάρια παραγωγής των εγκατεστημένων αιολικών πάρκων ή/και των φωτοβολταϊκών συστημάτων στη Χώρα.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για την κάλυψη των αναγκών του ηλεκτρικού συστήματος απαιτείται είτε πολύ μεγάλη, μη εφικτή πρακτικά, αποθηκευτική ικανότητα, είτε πολύ μεγάλη εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ΑΠΕ με σημαντικές απορρίψεις της παραγωγής τους. Για ρεαλιστικές τιμές της δυνατότητας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, τάκης μίας μέσης ημέρας κατανάλωσης, απαιτείται συνολική παραγωγή ΑΠΕ στα 11 έτη που να υπερκαλύπτει τη ζήτης κατά 25% έως 55%, αναλόγως του σεναρίου ετήσιας παραγωγής αιολικών και φωτοβολταϊκών, που αντιστοιχεί σε εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ περίπου 36 έως 51 GW.

ABSTRACT

The issue of climate change, as well as the economic situation at global and national level, make it imperative to redefine the energy map in the coming decades. The vast majority of states, through a series of consultations and agreements, have agreed to cut carbon dioxide emissions in order to transit to a low-carbon society. Therefore, Renewable Energy Sources (mainly wind and solar) will play a key role in the forming of the energy planning of Greece. The aim is the very high penetration of Renewable Energy Sources in the final energy consumption and mainly in the electricity sector. However, there are technical limitations connected to supply efficiency and stability of the electrical system, that impose a limit on the rate of renewable energy penetration. Storage of surplus energy produced by RES is the connecting link in the energy system, in order to confront these limitations.

The present Thesis examines the possibility of fully covering the needs of Greece's electricity system with the exclusive use of Renewable Energy Sources. The European Union has already set this goal for the next decades. The study takes into account the monthly electricity demands for a long period of 11 years (2008-2018) and the monthly wind and solar energy production at the same period, according to the published statistics of the network operator (ADMIE) and operator of the energy market (LAGIE).

Developing the appropriate software, the monthly needs for addition energy are calculated when demand (consumption) exceeds the production of RES. In a 100% RES system this additional energy should be provided by the energy storage units. Therefore, the cumulative need of using this energy over the years of stored energy equals the maximum required storage capacity (in units of energy) that the electrical system must have. On the other hand, when the generation of RES is higher than consumption, the surplus energy is stored if there is available capacity in the system, otherwise it is discarded.

This work initially investigates the required storage capacity of the greek electrical system for various combinations of installed wind and photovoltaic power and derives its optimal combinations for a given storage capacity. Then, for storage capacity of 0.5, 1, 1.5, 2 average consumption days, detailed charts of monthly storage behavior and RES production discards for the period 2008-2018, are presented. The curves of duration of energy cuts are also presented in these various cases, in order to evaluate their applicability in other applications. Finally, a parametric investigation is being carried out on the impact of possible changes in RES production from year to year due to changed at the weather conditions, examining various favorable and unfavorable production scenarios of installed wind farms and/or photovoltaic systems in the Country.

The results show us that meeting the need of the electrical system requires either very high, impractical, storage capacity, or too large installed capacity of RES units with great discharges of their production. For realistic values of electricity storage capacity like 1 day of average consumption, the required total RES generation exceeds the demand by 25% to 55%, depending on the scenario of annual wind and photovoltaic generation, which corresponds to installed RES power from approximately 36 to 51 GW.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κλιματική αλλαγή και η σύγχρονη οικονομική κρίση σε συνδυασμό και με την αύξηση των τιμών των καυσίμων μαζί με την σταδιακή ελάττωση των αποθεμάτων τους έχει οδηγήσει τα κράτη αλλά και τους πολίτες τους να απασχολούνται έντονα με τα ενεργειακά θέματα, τις επιλογές ενεργειακών πηγών και τις τιμές τους. Παράλληλα οι ενεργειακές ανάγκες αυξάνονται συνεχώς με αποτέλεσμα να αποτελεί αναγκαία λύση η διερεύνηση νέων πηγών ενέργειας, φιλικών προς το περιβάλλον. Για αυτό το λόγο τα τελευταία χρόνια οι δυτικές χώρες έχουν προχωρήσει σε πολιτικές και δράσεις που στοχεύουν στην προώθηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) , καθώς αποτελούν έναν εξαιρετικά σημαντικό παράγοντα για την ενεργειακή πολιτική. Συγκεκριμένα οι ΑΠΕ:

- Μπορούν να ελαττώσουν την εξάρτηση του ενεργειακού συστήματος από εισαγόμενα πετρελαϊκά προϊόντα.
- Συμβάλλουν στην μείωση των εκπομπών διοξειδίου του ανθράκα. Καθιστώντας τα κράτη συμβάτα με τις δεσμεύσεις μείωσης τους.
- Δημιουργούν νέες επιχειρηματικές και επενδυτικές ευκαιρίες τόσο στο κομμάτι της διερεύνησης και κατασκευής μηχανημάτων υψηλής τεχνολογίας όσο και στο κομμάτι της εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησής τους, ανοίγοντας μεγάλο αριθμό θέσεων εργασίας ικανές να απορροφήσουν μεγάλο όγκο ειδικευμένου και ανειδίκευτου εργατικού δυναμικού.
- Μπορούν να λύσουν το πρόβλημα της έλλειψης ενέργειας σε απομακρυσμένες γεωγραφικά περιοχές μιας και έχουν τη δυνατότητα για μεγάλη γεωγραφική διασπορά. Σημειώνεται ότι περίπου το 13% του παγκόσμιου πληθυσμού δεν έχει πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια.

Με βάση τα παραπάνω στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αναπτυχθεί, με τη βοήθεια υπολογιστικού κώδικα, μια μοντελοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος της Ελλάδας με αποκλειστική χρήση ΑΠΕ (Αιολικών και Φ/Β) με σκοπό την εκτίμηση των αναγκών αποθήκευσης που προκύπτουν.

Ειδικότερα:

- Στο κεφάλαιο 2: Γίνεται μία γενική παρουσίαση του προβλήματος της κλιματικής αλλαγής, της αναγκαιότητας ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, τους περιορισμούς που προκύπτουν και τους σημερινούς τρόπους αποθήκευσης. Γίνεται επίσης ανάλυση του ελληνικού ενεργειακού χάρτη και αναφορά στο τρόπο με τον οποίο ένα ενεργειακό σύστημα μπορεί να καλύπτει τις ανάγκες τους μόνο μέσω ΑΠΕ.

- Στο κεφάλαιο 3: Γίνεται αναλυτική παρουσίαση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η λειτουργία του υπολογιστικού κώδικα συμπεριλαμβανομένων των δύο βασικών σεναρίων . Ο αλγόριθμος αυτός επεξεργάστηκε στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN με σκοπό την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων.
- Στο κεφάλαιο 4: Γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν σε ότι αφορά την αποκλειστική κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος με αποκλειστική χρήση ΑΠΕ (στην περίπτωση που παρουσιάζει η παρούσα εργασία είναι μόνο Αιολικά και Φωτοβολταϊκά) στα έτη αναφοράς 2008-2018, σύμφωνα με μία σειρά υποθετικών σεναρίων.
- Στο κεφάλαιο 5: Γίνεται παρουσίαση συμπερασμάτων όπως προέκυψαν από την παρούσα εργασία καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο μέλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΑΠΕ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η πρώτη επαφή του αναγνώστη με την υπάρχουσα κατάσταση σε ότι αφορά τη χρήση ΑΠΕ ανά τον κόσμο αλλά και στην Ελλάδα, καθώς και με τις δυνατότητες ανάπτυξης τους, τους περιορισμούς που προκύπτουν και τις δυνατότητες αποθήκευσης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αυτές.

Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει αναφορά στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής και το πως αυτό επηρέασε την ενεργειακή πολιτική στην Ελλάδα, αλλά και στον υπόλοιπο Δυτικό κόσμο. Θα παρουσιαστεί, επίσης, η εξέλιξη των ΑΠΕ μέσα στα χρόνια.

2.1 Το ζήτημα της κλιματικής αλλαγής και η Ευρωπαϊκή Ενεργειακή Πολιτική

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου και γενικότερα η κλιματική αλλαγή αποτελεί πλέον μια κοινώς αποδεκτή πραγματικότητα. Η συντριπτική πλειοψηφία των κρατών, μέσα από μια σειρά διαβουλεύσεων και συμφωνιών έχει συμφωνήσει στη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Η μετάβαση σε μια κοινωνία χαμηλού άνθρακα αποτελεί μια τεράστια πρόκληση, δεδομένου ότι ο ενεργειακός τομέας ευθύνεται για το 80% της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Αυτή η μετάβαση σε χαμηλά επίπεδα ανθρακούχων εκπομπών στοχεύει στο να καταστήσει βιώσιμο τον ενεργειακό τομέα, τονώνοντας την ανάπτυξη, την καινοτομία και την απασχόληση, βελτιώνοντας παράλληλα το βιοτικό επίπεδο των πολιτών.

Από τα όσα διαφαίνονται η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει λάβει ρόλο πρωτοπόρου στη μάχη κατά της κλιματικής αλλαγής, με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή μέσω των προγραμμάτων Έρευνας και Ανάπτυξης, να δρομολογεί εδώ και τρεις δεκαετίες την ανάπτυξη των ΑΠΕ.

2.1.1 Ιστορική αναδρομή

1991

Το έτος αυτό η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έλαβε την πρώτη δράση και πρωτοβουλία σε ότι αφορά την προστασία του Περιβάλλοντος. Εξέδωσε την Κοινοτική Στρατηγική για τον περιορισμό των εκπομπών του Διοξειδίου του Άνθρακα και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Η οδηγία αυτή περιελάμβανε μεταξύ άλλων και την προώθηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. [1]

1996

Σαν συνέχεια της Κοινοτικής Στρατηγικής για τον περιορισμό των εκπομπών του Διοξειδίου του Άνθρακα το 1996 συντάχθηκε η Πράσινη Βίβλος με θέμα «Ενέργεια του μέλλοντος: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», η οποία καθόρισε την Ευρωπαϊκή στρατηγική με στόχο την αύξηση χρήσης των ΑΠΕ. Συγκεκριμένα πρότεινε την συμμετοχή των ΑΠΕ στη συνολική κατανάλωση μέχρι το 2010 σε ποσοστό 12%, ενώ παράλληλα ενθάρρυνε την συνεργασία των κρατών-μελών σχετικά με τις ΑΠΕ. [2],[3]

1997

Ένα χρόνο μετά, στη βάση των όσων όρισε η Πράσινη Βίβλος, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε τη Λευκή Βίβλο με θέμα: «Η ενέργεια του μέλλοντος: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας» προτείνοντας δράσεις. Συγκεκριμένα, επιβεβαίωσε τη δυνατότητα που έθετε η προηγούμενη Πράσινη Βίβλος για συμμετοχή των ΑΠΕ κατά 12%, ξεκαθαρίζοντας πως όχι μόνο είναι εφικτό, αλλά αποτελεί τον ελάχιστο στόχο. Παράλληλα, απαιτούσε από τα κράτη-μέλη να θέσουν τους δικούς τους στόχους και να προτείνουν τα δικά τους σχέδια δράσης που θα συμβαδίζουν με την Ευρωπαϊκή στρατηγική. [4]

Το ίδιο έτος (Δεκέμβριος 1997) έχουμε και την υπογραφή του πρωτοκόλλου του Κιότο, αποτέλεσμα μιας διεθνούς διάσκεψης στο Κιότο της Ιαπωνίας, που βασίστηκε στη Διεθνή Σύμβαση που είχε προκύψει από τη Διάσκεψη του Ρίο το 1992. Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο το οποίο τέθηκε σε εφαρμογή το 2005 και αποτελεί μία ιδιόμορφη συμφωνία με δεσμευτικό χαρακτήρα, αυτή τη στιγμή 191 χωρών, με στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο, οι βιομηχανικές χώρες στο σύνολο τους έχουν την υποχρέωση να μειώσουν τις εκπομπές των αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου κατά 5,2% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, από το 2008 έως το 2012, περίοδος που αποτελεί και την πρώτη περίοδο δέσμευσης. Για τις αναπτυσσόμενες χώρες δεν τέθηκαν περιορισμοί, ενώ οι ΗΠΑ ο μεγαλύτερος ρυπαντής του κόσμου αποχώρησε από το Πρωτόκολλο το 2001, αμφισβητώντας την βασιμότητα του Φαινομένου του Θερμοκηπίου, ενώ ο Καναδάς το 2012 [5],[6]

2000

Το Μάρτιο του 2000 ξεκίνησε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή το πρώτο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα για την Αλλαγή του Κλίματος (ECCP). Στόχος του προγράμματος ήταν η συνεργασία μεταξύ των κρατών μελών της ΕΕ για εμπορία των εκπομπών, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η τήρηση του πρωτοκόλλου του Κιότο στο διάστημα 2008-2012, που προέβλεπε για την ΕΕ, μείωση των εκπομπών κατά 8% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990.[1]

2005

Το 2005 ξεκίνησε η δεύτερη φάση του Ευρωπαϊκού Προγράμματος για την Αλλαγή του Κλίματος (ECCP). Σε αυτήν την φάση τέθηκαν οι στρατηγικές για την επίτευξη του στόχου περιορισμού αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη μέχρι 2°C σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο. [7]

2007

Τον Ιανουάριο του 2007 παρουσιάζεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή το «Πακέτο για την Ενέργεια και το Κλίμα». Το πακέτο αυτό όριζε πιο δραστικά μέτρα με ορίζοντα το 2020. Συγκεκριμένα, πρότεινε τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 έως το 2020. Επίσης, από το σύνολο της καταναλισκόμενης ενέργειας οι ΑΠΕ πρέπει να κατέχουν ποσοστό 20%, από τα

χρησιμοποιούμενα καύσιμα το 10% πρέπει να είναι βιοκαύσιμα, ενώ έθετε ως στόχο και τη μείωση κατανάλωσης της ενέργειας κατά 20%. [8]

2009

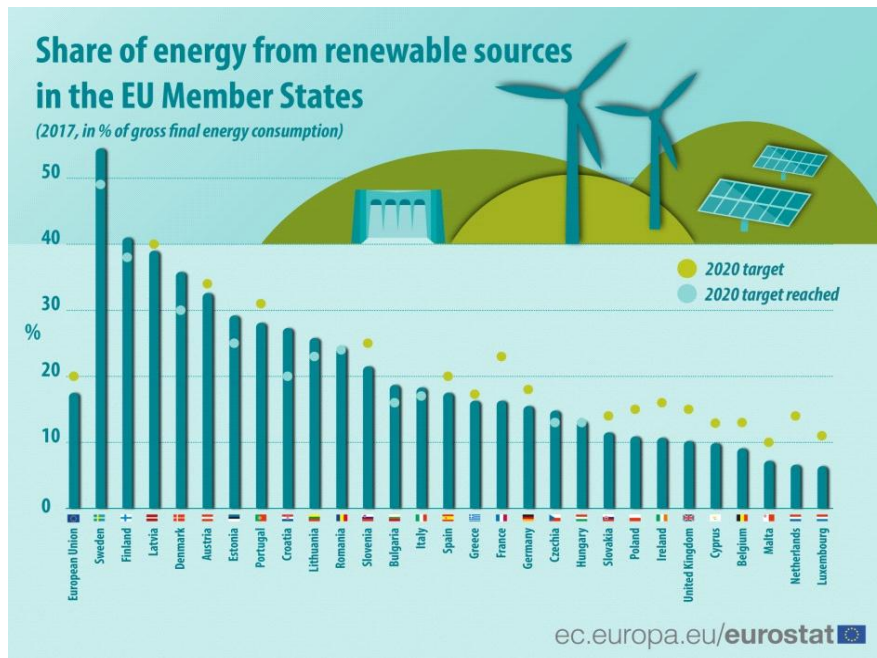
Με την Οδηγία 2009/28/ΕΚ του Απριλίου 2009, είναι η πρώτη φορά, όμως, που η Ευρωπαϊκή Ένωση θεσπίζει δεσμευτικό στόχο για τις ΑΠΕ. Τα Σχέδια Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκπονήθηκαν από τις χώρες της ΕΕ-27 στο πλαίσιο εφαρμογής της Ευρωπαϊκής Ενεργειακής Πολιτικής σε σχέση με την διείσδυση των ΑΠΕ, την Εξοικονόμηση Ενέργειας και τον περιορισμό των εκπομπών αερίων ρύπων του θερμοκηπίου. [9]

Ειδικότερα για το σύνολο των Κρατών-Μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέχρι το 2020, προβλέπεται:

- α) 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 σύμφωνα με την Οδηγία 2009/29/ΕΚ,
- β) 20% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/ΕΚ και
- γ) 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας.

Εκτός των δεσμευτικών εθνικών στόχων που συμφωνήθηκαν από κάθε κράτος μέλος, όλες οι χώρες δεσμεύτηκαν για την τροφοδότηση του τομέα μεταφορών κατά 10% από ΑΠΕ.

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στην ενεργειακή παραγωγή των κρατών-μελών της ΕΕ για το έτος 2017, καθώς και τους επιμέρους στόχους καθενός για το 2020. Παρατηρούμε πως συνολικά στην ΕΕ ενώ ο γενικός στόχος είναι 20% για το έτος 2017 η παραγωγή ΑΠΕ βρισκόταν περίπου στο 17%. Σε ότι αφορά το κάθε κράτος-μέλος τον στόχο του 2020 έχουν ήδη επιτύχει η Σουηδία, η Φιλανδία, η Δανία, η Εσθονία, η Κροατία, η Λιθουανία, η Ρουμανία, η Βουλγαρία, η Ιταλία, η Τσεχία, και η Ουγγαρία ενώ τα υπόλοιπα κράτη-μέλη μεταξύ αυτών και η Ελλάδα, η οποία σύμφωνα με το διάγραμμα είναι πολύ κοντά στον στόχο για το 2020, δεν έχουν επιτύχει ακόμα τον προδιαγεγραμμένο στόχο.



Σχήμα 2.1: Ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στις χώρες της ΕΕ το 2017 σε σχέση με το στόχο που είχε τεθεί για το 2020. (Πηγή: Eurostat [10])

2.1.2 Μελλοντικά Σχέδια

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πραγματοποίησε το πρώτο βήμα προς την κατάρτιση ενός στρατηγικού πλαισίου με ορίζοντα το 2030 σχετικά με τις πολιτικές της ΕΕ για την αλλαγή του κλίματος και την ενέργεια. Η Επιτροπή, στα τέλη του 2013, υπέβαλε το νέο πακέτο ενεργειακών και κλιματικών στόχων ως το 2030 [11], μεταξύ των οποίων ο σημαντικότερος είναι ότι τα κράτη μέλη πρέπει να μειώσουν τις εκπομπές ρυπογόνων αερίων κατά 40% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Με διάφορες περιβαλλοντικές ομάδες να το επικρίνουν θεωρώντας πως η ΕΕ υποβάθμισε τις περιβαλλοντικές της φιλοδοξίες και κάνοντας λόγο για σημαντική υπαναχώρηση σε σχέση με τους στόχους 2020, τους οποίους εντέλει θα αντικαταστήσουν οι στόχοι του 2030. [12]

Παράλληλα, με τον «χάρτη πορείας για τη μετάβαση σε μια ανταγωνιστική οικονομία χαμηλών επιπέδων ανθρακούχων εκπομπών έως το 2050», η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει εξετάσει πέρα από τους βραχυπρόθεσμους στόχους, να καθορίσει ένα οικονομικά αποδοτικό μονοπάτι για την επίτευξη πολύ μεγαλύτερων μειώσεων στις εκπομπές. Όλες οι μεγάλες οικονομίες θα πρέπει να κάνουν σημαντικές μειώσεις των εκπομπών, προκειμένου η υπερθέρμανση του πλανήτη να συγκρατηθεί κάτω από τους 2 ° C σε σύγκριση με τη θερμοκρασία στη προ-βιομηχανική εποχή.

Για το 2050, οι ηγέτιδες χώρες της ΕΕ έχουν θέσει ως στόχο την μείωση των εκπομπών των αερίων θερμοκηπίου στην Ευρώπη κατά 80-95% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, ως μέρος της συνολικής προσπάθειας από τις αναπτυγμένες χώρες να μειώσουν τις εκπομπές τους σε παρόμοιο βαθμό. Από την ανάλυση των διαφόρων σεναρίων προκύπτει ότι εγχώριες μειώσεις των εκπομπών της τάξης του 40% και 60% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 θα αποτελούσαν την οικονομικά συμφέρουσα πορεία μέχρι το

2030 και το 2040, αντίστοιχα. Στο πλαίσιο αυτό, προκύπτει επίσης μείωση κατά 25% το 2020.

Ο χάρτης πορείας δείχνει επίσης, πώς οι κύριοι τομείς που είναι υπεύθυνοι για τις εκπομπές της Ευρώπης – της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, της βιομηχανίας, των μεταφορών, των κτιρίων και των κατασκευών, καθώς και της γεωργίας – μπορούν να κάνουν μια οικονομικά αποδοτική μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. [13]

Τον Νοέμβριο του 2018 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε το νέα μακροπρόθεσμη στρατηγική για το 2050, με τίτλο : «Ένας καθαρός πλανήτης για όλους» [14]

Η συγκεκριμένη στρατηγική αντί να θέτει συγκεκριμένους στόχους ενθαρρύνει την κοινή δράση σε επτά στρατηγικούς τομείς. Την ενεργειακή απόδοση, την ανάπτυξη ΑΠΕ, την καθαρή, ασφαλή και συνδεδεμένη κινητικότητα, την ανταγωνιστική βιομηχανία και την κυκλική οικονομία, τις υποδομές και τις διασυνδέσεις, τη βιοοικονομία και τις φυσικές καταβόθρες άνθρακα, τη δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα για την αντιμετώπιση των εναπομείναντων εκπομπών.

Η μακροπρόθεσμη αυτή στρατηγική αποτελεί πρόσκληση προς όλα τα θεσμικά όργανα της ΕΕ, τα εθνικά κοινοβούλια, τους επιχειρηματικούς τομείς, τις μη κυβερνητικές οργανώσεις, τις πόλεις και τις κοινότητες, καθώς και τους πολίτες και ιδιαίτερα τη νεολαία, για να συμμετέχουν και να στηρίξουν τη μετάβαση στην καθαρή ενέργεια, ενώ παράλληλα ενθαρρύνει και άλλους διεθνείς εταίρους να κάνουν το ίδιο. [14]

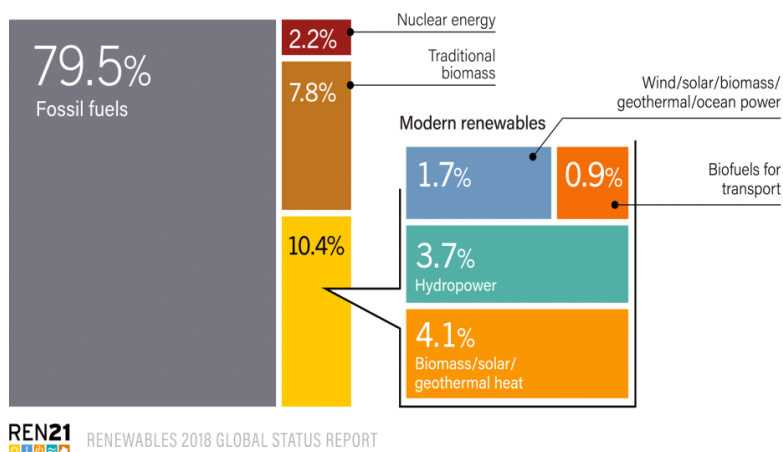
2.2 Οι ανάγκες σε ενέργεια και η συμβολή των ΑΠΕ σήμερα.

Το 2017 ήταν ένα ακόμα έτος ρεκόρ για τις ΑΠΕ, το οποίο χαρακτηρίστηκε από τη μεγαλύτερη αύξηση της δυναμικότητας τους, καθώς και από την πτώση του κόστους, τις αυξήσεις στις επενδύσεις και την πρόοδο των τεχνολογιών. Πολλές εξελίξεις κατά τη διάρκεια του έτους επηρέασαν την ανάπτυξη των ΑΠΕ. Ορισμένες από αυτές είναι οι χαμηλότερες από ποτέ προσφορές για την ηλιακή και αιολική ενέργεια σε όλο τον κόσμο, η αύξηση της ψηφιοποίησης, η αυξημένη προσοχή στην ηλεκτροδότηση των μεταφορών, ορισμένες δικαιοδοσίες που δεσμεύονται για ενέργεια ελεύθερη από άνθρακα, νέες πολιτικές και σχέσεις για την τιμολόγηση του άνθρακα και νέες πρωτοβουλίες και στόχοι που έχουν τεθεί από κυβερνήσεις σε όλα τα επίπεδα.

Η ανάπτυξη αυτή των ΑΠΕ, ιδίως στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας οφείλεται σε διάφορους παράγοντες. Μερικοί από αυτούς είναι η αυξανόμενη πρόσβαση σε χρηματοδότηση, οι παγκόσμιες ανησυχίες για την υγεία περιβάλλοντος και ανθρώπου, οι αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες στις αναπτυσσόμενες και αναδυόμενες οικονομίες, αλλά και η σημαντική μείωση του κεφαλαιακού κόστους των αιολικών και φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. [15]

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2 έως το 2016 οι ΑΠΕ κάλυπταν περίπου το 10% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Τα ορυκτά καύσιμα έχουν τα πρωτεία με περίπου το 80% κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, η κλασική μορφή βιομάζας καλύπτει το 7,8%, ενώ η πυρηνική ενέργεια το 2,2%.

FIGURE 1. Estimated Renewable Share of Total Final Energy Consumption, 2016



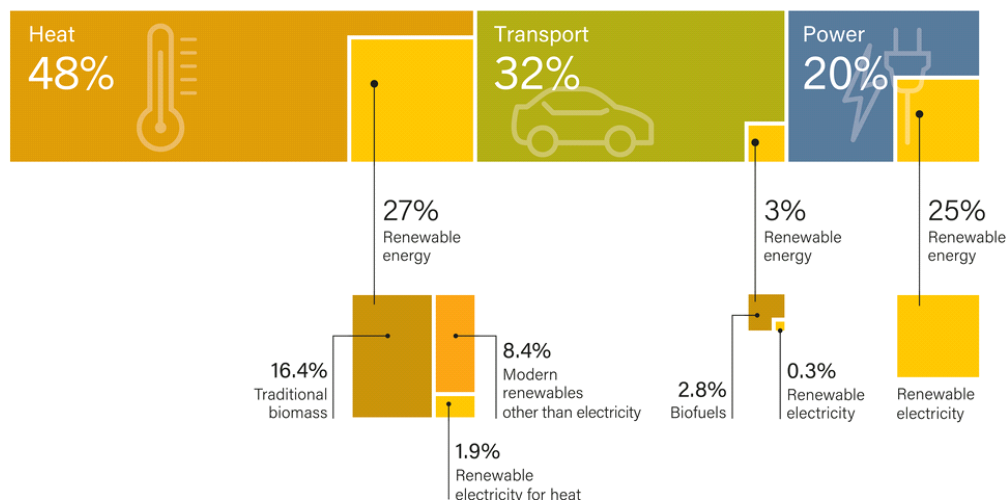
REN21 RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS REPORT

Σχήμα 2.2: Εκτιμώμενη παγκόσμια συμμετοχή κάθε πηγής ενέργειας για το έτος 2016 (Πηγή: REN21 “Renewables 2018 a global status overview”) [15]

Οι ενεργειακές ανάγκες σήμερα συνοψίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες κατά σειρά αναγκών. Θέρμανση-Ψύξη, Μεταφορές και Ηλεκτρική ισχύς. Στο Σχήμα 2.3 βλέπουμε την κατανομή των ενεργειακών αναγκών σε καθένα από τους παραπάνω τομείς, καθώς και τη συνεισφορά των ΑΠΕ σε καθέναν τους. Η πρόοδος στους τομείς της ανανεώσιμης θέρμανσης και ψύξης και των μεταφορών εξακολουθεί να είναι σχετικά αργή παρά τις διάφορες πρωτοβουλίες για την ενίσχυση το ρόλου των ΑΠΕ και την ηλεκτροδότηση της θέρμανσης και των μεταφορών. Η ανανεώσιμη θέρμανση και ψύξη έχει λάβει πολύ μικρότερη προσοχή από τους υπεύθυνους για τη χάραξη πολιτικής σε σχέση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μάλιστα, έχει χαρακτηριστεί ως ο «γιγάντιος ύπνος του δυναμικού των ΑΠΕ» για την τελευταία δεκαετία. Χαρακτηριστικό είναι πως στο διάστημα 2007-2015 η προσφορά των ΑΠΕ στον τομέα της θέρμανσης-ψύξης αυξήθηκε κατά 20,5%, ενώ το ίδιο διάστημα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε κατά 56,6%.

Σε ότι αφορά τον τομέα των μεταφορών, η μεγάλη πλειοψηφία των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών εξακολουθούν να καλύπτονται από το πετρέλαιο (92%) , με μικρές συνεισφορές από τα βιοκαύσιμα (2,8%) και την ηλεκτρική ενέργεια (1,3%). Από το 2015 η σύγχρονη βιοενέργεια είναι η κυρίαρχη συμβολή των ΑΠΕ στις μεταφορές , καθώς και στην ανανεώσιμη θέρμανση. [15]

FIGURE 3. Renewable Energy in Total Final Energy Consumption, by Sector, 2015



REN21 RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS REPORT

Σχήμα 2.3: Παγκόσμια συμμετοχή των ΑΠΕ στους τρεις τομείς κατανάλωσης ενέργειας (Θέρμανση-Ψύξη, Μεταφορές, Ηλεκτρική Ενέργεια) για το έτος 2015.

(Πηγή: REN21 “Renewables 2018 a global status overview”) [15]

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση η συμβολή των ΑΠΕ στους τομείς της Θέρμανσης και της Ηλεκτρικής Ενέργειας γίνεται ως εξής : [15]

Θέρμανση-Ψύξη: Η ΕΕ εξακολούθησε να παράγει την περισσότερη ενέργεια για θέρμανση και ψύξη από ΑΠΕ σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη περιοχή του πλανήτη, με την πλειοψηφία της παραγόμενης αυτής ενέργειας να καταναλώνεται στα κτήρια. Η συμβολή των ΑΠΕ στη θερμότητα αυξάνεται ως αποτέλεσμα των υποχρεωτικών στόχων που έχει θέσει η ΕΕ για αυτές. Τον Νοέμβριο του 2017 το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο ενέκρινε αλλαγές στο σχεδιασμό της Ενεργειακής Ευρωπαϊκής πολιτικής για τη θερμότητα με αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ κατά 1% ως το 2030. Σήμερα η ΕΕ εκτιμάται ότι καλύπτει το 19% της συνολικής ζήτησης θέρμανσης και ψύξης με ΑΠΕ.

Ηλεκτρική Ενέργεια: Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη έχει επιβραδυνθεί σε πολλές χώρες της ΕΕ. Ωστόσο, το 2017, για πρώτη φορά, η παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας από μη υδροηλεκτρικές ΑΠΕ (Αιολική, Ηλιακή και Βιομάζα) υπερέβη την παραγωγή λιγνίτη και λιθάνθρακα και παρήγαγαν το 30% της ηλεκτρικής ενέργειας. Για λόγους σύγκρισης, μόλις πέντε χρόνια πριν, η παραγωγή άνθρακα ήταν περισσότερο από το διπλάσιο της παραγωγής από ΑΠΕ. Με την Αιολική και Ηλιακή Φωτοβολταϊκή ενέργεια να αντιπροσωπεύουν τα τρία τέταρτα της αύξησης της δυναμικότητας των ΑΠΕ.

2.2.1 Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι ΑΠΕ γενικότερα αποτελούν τις πηγές ενέργειας εκείνες που βρίσκονται σε αφθονία στη φύση. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας ορίζονται ως: «οι μη ορυκτές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δηλαδή η Αιολική, η Ηλιακή και η Γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια των κυμάτων, η υδραυλική ενέργεια, η παλιρροϊκή ενέργεια, τα αέρια τα εκλυόμενα από χώρους υγειονομικής ταφής, από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και το βιοαέριο, όπως ορίζει η ΟΔΗΓΙΑ 2001/77/ΕΚ» [16]

Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)

Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ(σύμφωνα με τον Ν 2773/1999) [16] είναι η Ηλεκτρική Ενέργεια η προερχόμενη από:

- Την εκμετάλλευση Αιολικής ή Ηλιακής Ενέργειας ή βιομάζας ή Βιοαερίου.
- Την εκμετάλλευση Γεωθερμικής Ενέργειας, εφόσον το δικαίωμα εκμετάλλευσης του σχετικού Γεωθερμικού Δυναμικού έχει παραχωρηθεί στον ενδιαφερόμενο, σύμφωνα με τις ισχύουσες κάθε φορά διατάξεις.
- Την εκμετάλλευση της Ενέργειας από την Θάλασσα.
- Την εκμετάλλευση Υδάτινου Δυναμικού με Μικρούς Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς μέχρι 10 MW.
- Συνδυασμό των ανωτέρω.
- Τη Συμπαράγωγή, με χρήση των Πηγών Ενέργειας, των (1) και (2) και συνδυασμό τους.

Στη συνέχεια, θα αναλύσουμε τις δύο μορφές ΑΠΕ με τις οποίες θα ασχοληθούμε στην συγκεκριμένη εργασία. Την Αιολική και την Ηλιακή, προερχόμενη κυρίως από Φωτοβολταϊκά.

Αιολική Ενέργεια

Αιολική είναι η ενέργεια που προκύπτει από την εκμετάλλευση του ανέμου. Συγκεκριμένα, είναι η κινητική ενέργεια που παράγεται από τη δύναμη του ανέμου και μετατρέπεται σε μηχανική ή/και ηλεκτρική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται ως ανανεώσιμη μιας και η δύναμη του ανέμου βρίσκεται σε αφθονία στη φύση. Παράλληλα, χαρακτηρίζεται και ως «καθαρή» πηγή ενέργειας μιας και δεν εκπέμπει ούτε προκαλεί ρύπους.

Την αιολική ενέργεια ο άνθρωπος την εκμεταλλεύεται από την αρχαιότητα με χαρακτηριστικά τα παραδείγματα των ανεμόμυλων και των ιστιοφόρων. Σήμερα, η εκμετάλλευση της για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω των Ανεμογεννητριών (Α/Γ).

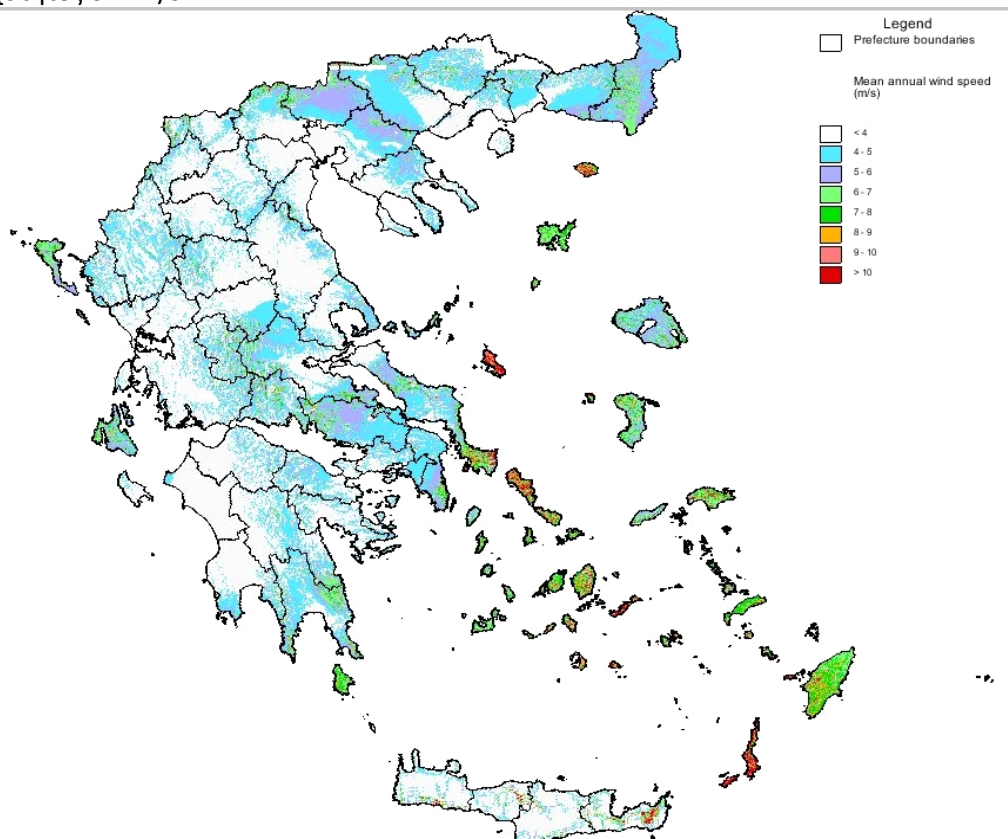
Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της πτερωτής, έχουμε την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια με την μορφή περιστροφής του άξονα της πτερωτής και στο δεύτερο στάδιο, μέσω της γεννήτριας, επιτυγχάνουμε την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Οι Α/Γ χρησιμοποιούνται για την πλήρη κάλυψη ή και τη συμπλήρωση των ενεργειακών αναγκών. Το παραγόμενο από τις ανεμογεννήτριες ηλεκτρικό ρεύμα είτε καταναλώνεται επιτόπου, είτε εγχέεται και διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να καταναλωθεί αλλού.

Η εκμετάλλευση του υψηλού της δυναμικού στη χώρα μας, σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών που ενσωματώνεται στις σύγχρονες αποδοτικές ανεμογεννήτριες, έχει τεράστια σημασία για τη βιώσιμη ανάπτυξη, την εξοικονόμηση

ενεργειακών πόρων, την προστασία του περιβάλλοντος και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

Στο Σχήμα 2.4 βλέπουμε τον χάρτη Αιολικού Δυναμικού της Ελλάδας. Παρατηρούμε, όπως θα αναμέναμε, ότι το μεγαλύτερο αιολικό δυναμικό παρουσιάζεται στην νησιωτική περιοχή της Ελλάδας και ιδιαίτερα στα νησιά του Αιγαίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις όπως η Σκύρος και η Κάρπαθος βλέπουμε πως η μέση ετήσια ταχύτητα του αέρα ξεπερνάει τα 10 m/s. Στην ηπειρωτική Ελλάδα παρατηρούμε μέσες ετήσιες ταχύτητες αέρα κάτω από 4 m/s, ενώ σε λίγες περιοχές όπως νότια Θράκη και η νοτιοανατολική Πελοπόννησος παρατηρούνται ταχύτητες 6-7 m/s.



Σχήμα 2.4: Χάρτης Αιολικού Δυναμικού Ελλάδας (Πηγή: ΚΑΠΕ) [17]

Πλεονεκτήματα εκμετάλλευσης Αιολικής Ενέργειας μέσω Α/Γ

- Ανεξαρτησία από ορυκτά καύσιμα (δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με αέριους ρύπους, παρέχει προστασία έναντι της αστάθειας τιμών των ορυκτών καυσίμων).
- Ιδιαίτερα φιλική στο περιβάλλον με αμελητέες επιδράσεις στη πανίδα και ελάχιστες απαιτήσεις γης.
- Τεχνολογικά ώριμη, οικονομικά ανταγωνιστική, γρήγορη και τυποποιημένη συναρμολόγηση και εγκατάσταση.
- Χαμηλό λειτουργικό κόστος.
- Ελεύθερη, άφθονη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας.
- Βοηθά στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος μειώνοντας απώλειες μεταφοράς ενέργειας.
- Η επίδραση στις γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Το 99% της γης που φιλοξενεί ένα αιολικό πάρκο είναι διαθέσιμο για άλλες χρήσεις.
- Ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία κάθε χώρας.
- Δημιουργεί θέσεις απασχόλησης στην περιφέρεια.
- Σύστημα παραγωγής ενέργειας με μικρές απώλειες.
- Ανεξάρτητη από κεντρικά δίκτυα διανομής.

Μειονεκτήματα εκμετάλλευσης Αιολικής Ενέργειας μέσω Α/Γ

- Ο εκπεμπόμενος θόρυβος προέρχεται από τα περιστρεφόμενα μηχανικά τμήματα και από την περιστροφή των πτερυγίων. Εκτιμάται σε περίπου 44 db σε απόσταση 200 m για ταχύτητα ανέμου 8 m/s.
- Η οπτική όχληση είναι κάτι υποκειμενικό αλλά κάποιος που είναι ευνοϊκά διακείμενος απέναντι στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, αποδέχεται οπτικά τις ανεμογεννήτριες. Δεδομένου ότι οι ανεμογεννήτριες είναι ορατές από απόσταση, πρέπει να γίνεται προσπάθεια ενσωμάτωσής τους στο τοπίο.
- Το ποσοστό των πουλιών που σκοτώνονται ετησίως από πρόσκρουση σε ανεμογεννήτριες είναι ασήμαντο (0.5%) σχετικά με το αυτό που οφείλεται σε πρόσκρουση με οχήματα και τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (60%). Πάντως θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη χωροθέτηση τυχόν προστατευόμενες περιοχές και να εξετάζεται η τοποθέτηση συστήματος υπερήχων.
- Η απρόβλεπτη διακύμανση ενέργειας που δίνουν οι αιολικές μηχανές λόγω του ότι ο αέρας είναι διακοπτόμενη πηγή ενέργειας.
- Σχετικά υψηλό κόστος έρευνας του αιολικού δυναμικού και εγκατάστασης της μηχανής.

Σύμφωνα με τα μηνιαία στατιστικά δελτία ΑΠΕ του ΛΑΓΗΕ [34] τον Δεκέμβριο του 2018 η εγκατεστημένη ισχύς Αιολικών ήταν 2555,27 MW.

Ηλιακή Ενέργεια

Ηλιακή Ενέργεια σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας είναι: « το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Το φως και η θερμότητα που ακτινοβολούνται, απορροφούνται από στοιχεία και ενώσεις στη Γη και μετατρέπονται σε άλλες μορφές ενέργειας.» [18]

Η τεχνολογία σήμερα αξιοποιεί ένα μηδαμινό ποσοστό της προσπίπτουσας στην επιφάνεια του πλανήτη μας ηλιακής ενέργειας με τριών ειδών συστήματα: τα θερμικά ηλιακά, τα παθητικά ηλιακά και τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Θερμικά Ηλιακά Συστήματα

Η πιο απλή και διαδεδομένη μορφή των θερμικών ηλιακών συστημάτων είναι οι γνωστοί σε όλους μας ηλιακοί θερμοσίφωνες, οι οποίοι απορροφούν την ηλιακή ενέργεια και στη συνέχεια, τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε κάποιο ρευστό, όπως το νερό για παράδειγμα.

Παθητικά Ηλιακά Συστήματα

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από δομικά στοιχεία, κατάλληλα σχεδιασμένα και συνδυασμένα μεταξύ τους, ώστε να υποβοηθούν την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για τον φυσικό φωτισμό των κτιρίων ή για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας μέσα σε αυτά. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αποτελούν την αρχή της Βιοκλιματικής Αρχιτεκτονικής και μπορούν να εφαρμοσθούν σε όλους σχεδόν τους τύπους κτιρίων.

Φωτοβολταϊκά Συστήματα

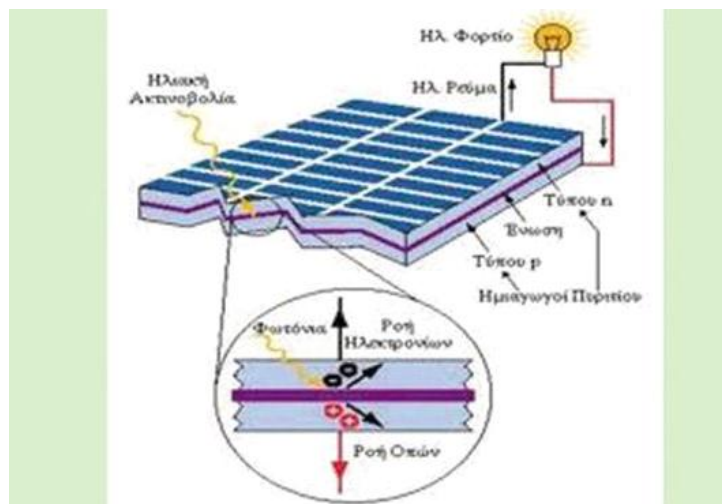
Πρόκειται για τα συστήματα εκείνα που μετατρέπουν την ακτινοβολία του ήλιου και σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα συστήματα αυτά εδώ και χρόνια χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε μη διασυνδεδεμένες με το ηλεκτρικό δίκτυο καταναλώσεις. Τέτοιες καταναλώσεις είναι για παράδειγμα οι φάροι, οι δορυφόροι ακόμα και απομονωμένα σπιτικά. Η Ελλάδα λόγω της υψηλής ηλιοφάνειας της, διαθέτει υψηλό ηλιακό δυναμικό γεγονός που ευνοεί σημαντικά την ανάπτυξη και εφαρμογή των Φ/Β συστημάτων. Η ηλεκτροπαραγωγή από Φωτοβολταϊκά έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Αποδίδει την μέγιστη ισχύ της κατά τη διάρκεια της ημέρας που παρουσιάζεται η μέγιστη ζήτηση.

Ανάλογα με τη χρήση του παραγόμενου ρεύματος, τα Φ/Β κατατάσσονται σε:

- Αυτόνομα συστήματα, η παραγόμενη ενέργεια των οποίων καταναλώνεται επιτόπου και εξολοκλήρου από την παραγωγή στην κατανάλωση.
- Διασυνδεδεμένα συστήματα, η παραγόμενη ενέργεια των οποίων διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να μεταφερθεί και να καταναλωθεί αλλού.

Η λειτουργία των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5 σύμφωνα με το φαινόμενο η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή των φωτονίων

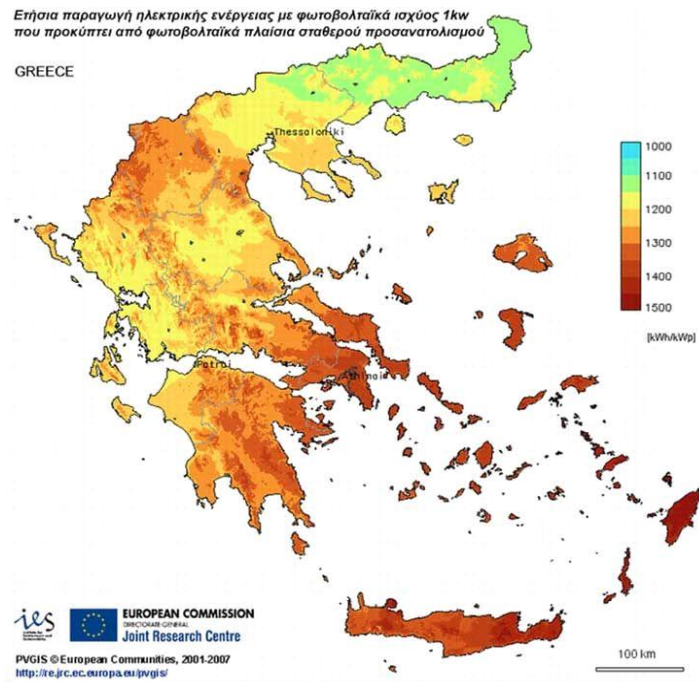
σε ηλεκτρική ενέργεια πραγματοποιείται στις ηλιακές κυψέλες του κάθε φωτοβολταϊκού στοιχείου. Οι κυψέλες είναι κατασκευασμένες από ημιαγωγικά υλικά με πιο διαδεδομένο στην κατασκευή τους το πυρίτιο (Si). Πολλές κυψέλες, λοιπόν, συνδεδεμένες σε σειρά και παράλληλα αποτελούν ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. Με τα πάνελ δημιουργούνται συστοιχίες έτσι ώστε να καλυφτούν οι ζητούμενες ανάγκες.



Σχήμα 2.5: Απεικόνιση λειτουργίας Φωτοβολταϊκών στοιχείων [19]

Σύμφωνα με τα μηνιαία στατιστικά δελτία ΑΠΕ του ΛΑΓΗΕ [34] τον Δεκέμβριο του 2018 η εγκατεστημένη ισχύς Φωτοβολταϊκών είναι 2139,85 MW.

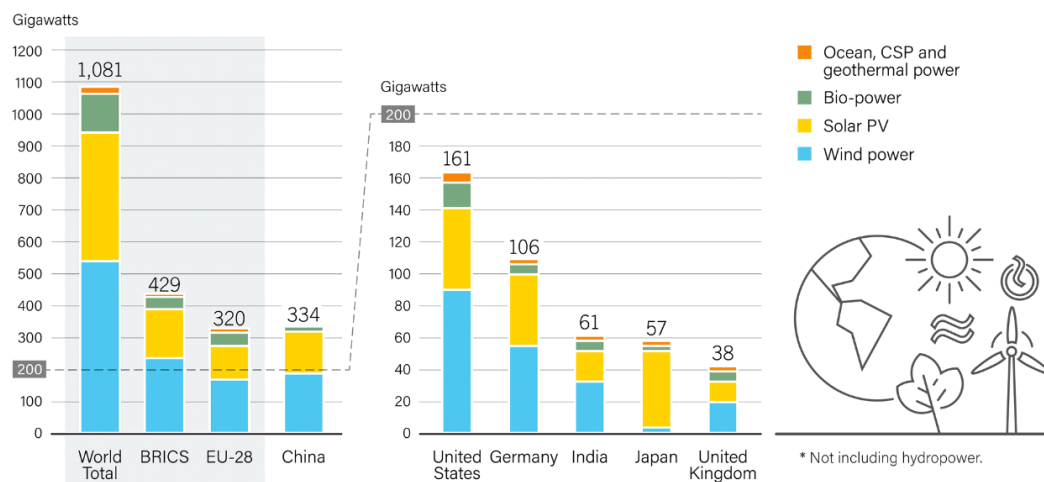
Στο Σχήμα 2.6 που ακολουθεί παρουσιάζεται το δυναμικό φωτοβολταϊκής παραγωγής στην Ελλάδα, εκφρασμένο ως ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενός Φ/Β μοναδιαίας ισχύος 1Kw και σταθερού προσανατολισμού. Σε αυτό το διάγραμμα, παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο δυναμικό (παραγωγή) παρατηρείται στην Αττική, στην Νότια Εύβοια, τις Κυκλάδες, τα Δωδεκάνησα, την Πελοπόννησο και την Κρήτη, ενώ το χαμηλότερο δυναμικό παρατηρείται στην Ανατολική Μακεδονία και τη Θράκη.



Σχήμα 2.6: Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με Φ/Β ισχύος 1Kw που προκύπτει από Φωτοβολταϊκά πλαίσια σταθερού προσανατολισμού [20]

Τέλος, στο Διάγραμμα του Σχήματος 2.7 που ακολουθεί, φαίνεται η εγκατεστημένη ισχύς από διάφορες πηγές ΑΠΕ ανά τον κόσμο για το 2017. Παρατηρείται ότι η Αιολική και η Ηλιακή εγκατεστημένη ισχύς αποτελούν περίπου το 85% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ. Με την εικόνα αυτή να μην αλλάζει ιδιαίτερα αν την εξειδικευτεί στην ΕΕ (περίπου 88%), τα κράτη μέλη των BRICS (περίπου 90%), όπως και σε ισχυρά κράτη του πλανήτη όπως οι ΗΠΑ (περίπου 87%), η Κίνα (περίπου 95%), η Γερμανία (περίπου 95%), η Ινδία (περίπου 85%), η Ιαπωνία (περίπου 92%) και το Ηνωμένο Βασίλειο (περίπου 80%).

FIGURE 7. Renewable Power Capacities in World, EU-28 and Top 6 Countries, 2017



REN21 RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS REPORT

Σχήμα 2.7: Εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ ανά τον κόσμο για το έτος 2017. (Πηγή: REN21 «Renewables 2018 a global status overview») [15]

2.3 Η κατάσταση στην Ελλάδα

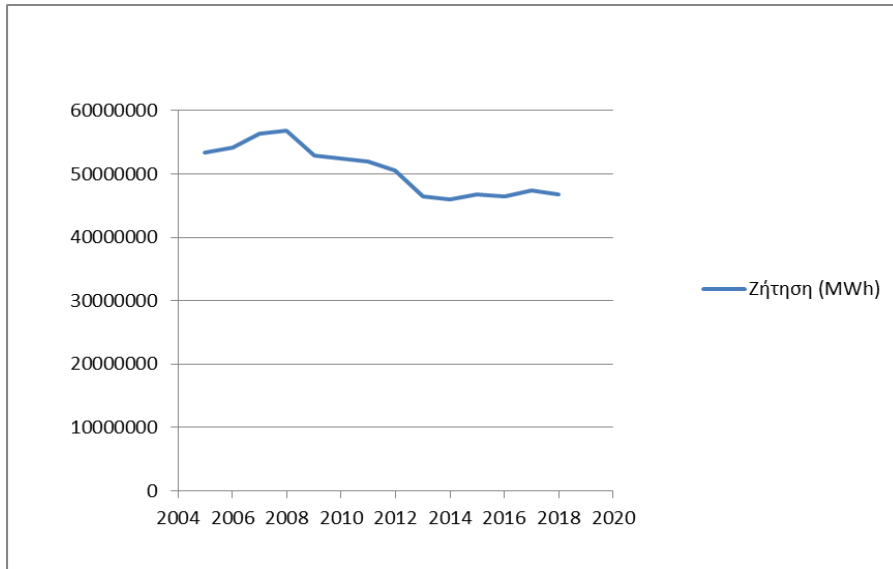
Μεταξύ 1970-2008 η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα σημειώνει σημαντική αύξηση ενώ από το 2008 έως το 2018 παρουσιάζει μία σχετική σταθερότητα. Στο διάστημα 1970-2008 η αύξηση της είναι ταχύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και ικανοποιείται σε αυξανόμενο βαθμό από ηλεκτρισμό που παράγεται, σε επίσης αυξανόμενο βαθμό, από λιγνίτη, ένα καύσιμο φτωχό ενεργειακά και ρυπογόνο περιβαλλοντικά. Τα κύρια χαρακτηριστικά του διασυνδεδεμένου ηλεκτρικού συστήματος της Ελλάδας κατά το έτος αναφοράς 2011 ήταν: Συνολική κατανάλωση περίπου 53 TWh με ετήσια αιχμή ζήτησης 10.1 GW και συμμετοχή των ΑΠΕ (συμπεριλαμβανομένων των υδροηλεκτρικών) περίπου 13%.

Η αυξητική πορεία των εκπομπών CO₂ είναι ακόμα ταχύτερη σε σχέση τόσο με το ρυθμό μεγέθυνσης της ελληνικής οικονομίας όσο και με το ρυθμό αύξησης της ενεργειακής ζήτησης. Η εξέλιξη των εκπομπών CO₂ στην Ελλάδα την περίοδο 1970-2005 είναι η πλέον δυσμενής σε σύγκριση με τις υπόλοιπες κοινοτικές χώρες. Τη μεγαλύτερη άμεση συμμετοχή στις εκπομπές CO₂ έχει ο τομέας της ηλεκτροπαραγωγής. Την περίοδο μάλιστα 1990-2006 οι εκπομπές CO₂ αυξήθηκαν στην Ελλάδα κατά 31%. Κατά συνέπεια για να τηρήσει η Ελλάδα τη Συνθήκη του Κιότο την οποία επικύρωσε το ελληνικό κοινοβούλιο θα πρέπει να σταθεροποιήσει και να μειώσει τις εκπομπές CO₂, αλλιώς θα υποστεί τις συνέπειες. Πρόστιμο για κάθε τόνο CO₂ που θα παράγεται επιπλέον του επιτρεπόμενου ορίου. Η επίτευξη αυτού το στόχου οδήγησε και οδηγεί στην άσκηση δυναμικής πολιτικής για την ενέργεια, βασικό στοιχείο της οποίας είναι και οι ΑΠΕ. Αυτές περιλαμβάνουν την ανάπτυξη μονάδων Αιολικής και Φωτοβολταϊκής Ενέργειας, Θερμικών Ηλιακών Συστημάτων, Υδροηλεκτρικών, Βιομάζας και Γεωθερμικής Ενέργειας.

2.3.1 Κατανάλωση ενέργειας

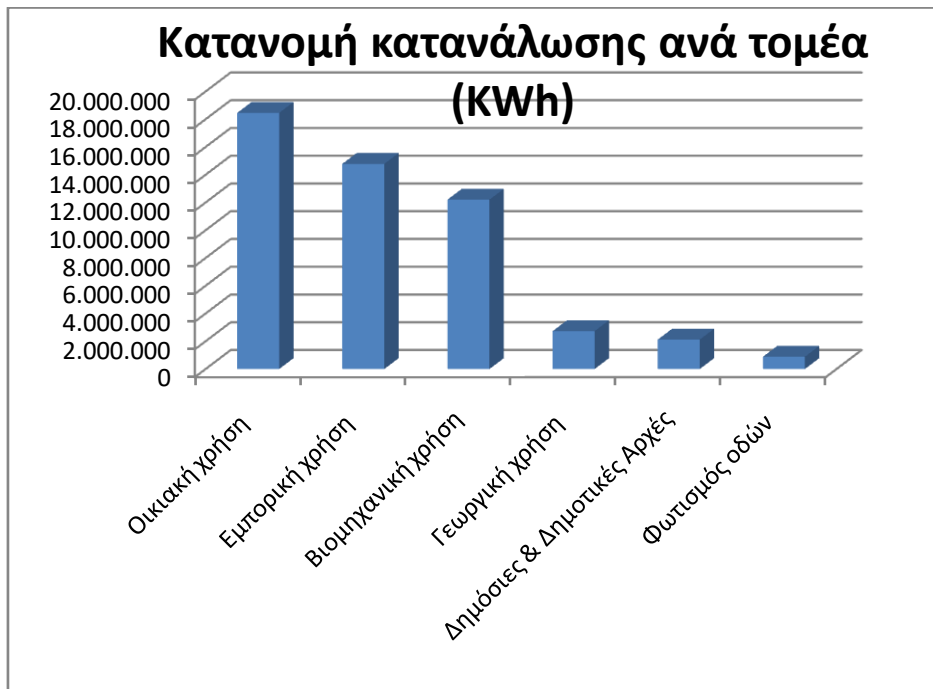
Όσον αφορά την Ελλάδα, ο ενεργειακός τομέας χαρακτηρίζεται ως ένα ολοένα μη αποδοτικό σύστημα κατανάλωσης κυρίως στους τομείς των μεταφορών και του τριτογενούς οικιακού τομέα. Επίσης παρατηρείται ανεπάρκεια της εσωτερικής παραγωγής και υψηλή εξωτερική ενεργειακή εξάρτηση. Κύρια εγχώρια πηγή ενέργειας αποτελεί ο λιγνίτης ο οποίος διοχετεύεται εξ ολοκλήρου στην παραγωγή ηλεκτρισμού, καθώς και το φυσικό αέριο. Ενδεικτικά, για το έτος 2018 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη διαμορφώθηκε στο 29% (14907 GWh), ενώ από φυσικό αέριο στο 28% (14136 GWh) [21]

Σύμφωνα με τη μελέτη του ΚΑΠΕ (2009), όπως προαναφέρθηκε, παρατηρείται συνεχόμενη αύξηση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στο διάστημα 1990-2006, η αύξηση αυτή συνοδεύεται από την αύξηση του ΑΕΠ εκείνη την περίοδο. Με την κατανάλωση να έχει μειούμενη πορεία από την έναρξη της κρίσης και μετά (2008), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.8, που σχεδιάστηκε με βάση τα δεδομένα της παρούσας εργασίας.

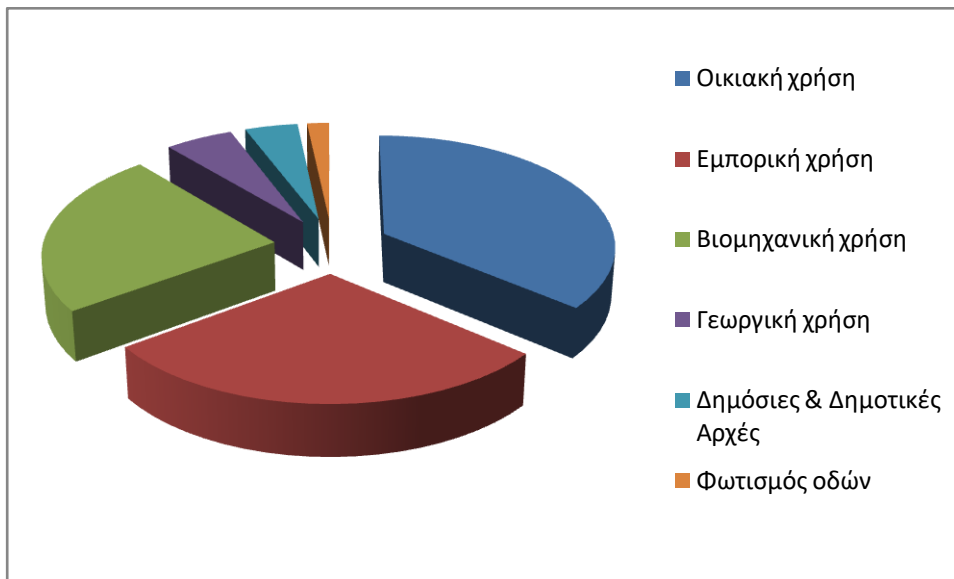


Σχήμα 2.8: Πορεία ζήτησης Ηλεκτρικής Ενέργειας στο διάστημα 2005-2018

Για το έτος 2012 σύμφωνα με τα στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 2.9 και 2.10, την πρωτιά στην κατανάλωση ενέργειας έχει η Οικιακή Χρήση με 18.454.589 KWh, ακολουθεί η Εμπορική Χρήση με 14.782.312 KWh, η Βιομηχανική Χρήση 12.202.237, οι Δημόσιες και Δημοτικές Αρχές με 2.118.450 KWh και ο Οδοφωτισμός 883.335 KWh.

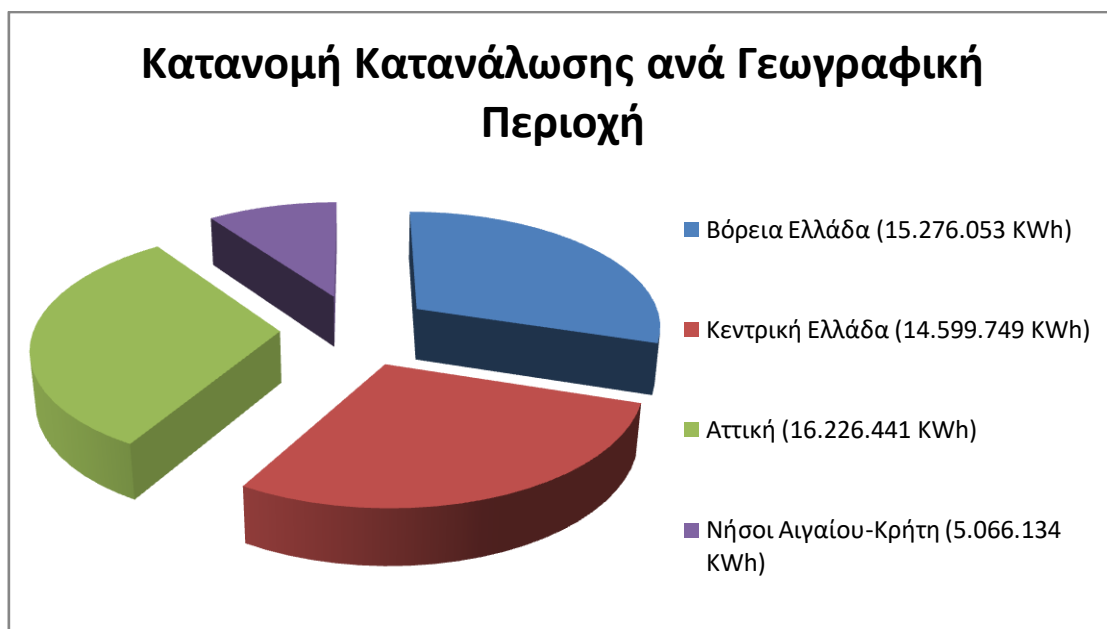


Σχήμα 2.9 Κατανομή ενεργειακής κατανάλωσης σε KWh ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα για το έτος 2012 (πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)[22]



Σχήμα 2.10: Ποσοστιαία κατανομή κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε KWh στην Ελλάδα για το έτος 2012 (πηγή: ΕΛΣΤΑΤ) [22]

Ενώ σύμφωνα με τα ίδια στοιχεία όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11 η μεγαλύτερη κατανάλωση υπάρχει στην Αττική με την Βόρεια Ελλάδα και την Κεντρική να ακολουθούν.



Σχήμα 2.11: Κατανομή κατανάλωσης σε KWh ηλεκτρικής ενέργειας ανά γεωγραφική περιοχή το έτος 2012 (πηγή: ΕΛΣΤΑΤ) [22]

2.3.2 Χρήση των ΑΠΕ στον ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα

Στον τομέα των ΑΠΕ έχει εκδοθεί τα τελευταία χρόνια ένας μεγάλος αριθμός αδειών παραγωγής από τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ, www.rae.gr), που αφορούν κυρίως αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα, ενώ υπάρχει και ένας αριθμός μονάδων μικρών υδροηλεκτρικών, βιομάζας και βιοαερίου. Η συνολική ισχύς των αδειοδοτημένων μονάδων προσεγγίζει τα 30 GW. [23]

Το 2010, η ελληνική κυβέρνηση συνέταξε και δημοσιοποίησε το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΕΣΔΑΕ) για την περίοδο μέχρι το 2020 (Νόμος 3851/2010). Στόχος είναι η σημαντική αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20%, που εξειδικεύεται σε 40% στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% στη θέρμανση-ψύξη και 10% στις μεταφορές .

Σύμφωνα με το σενάριο Επίτευξης των Στόχων , η εγκατεστημένη ισχύς αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων θα φθάσει έως το 2020 στα 7.5 GW και 2.2 GW αντιστοίχως. Οι εκτιμήσεις αυτές αναπροσαρμόστηκαν αργότερα σε περίπου 6.5 GW και 2.5 GW αντιστοίχως. [24],[25],[26]

Με τα πραγματικά δεδομένα το 2018 να είναι: εγκατεστημένη ισχύς αιολικών περίπου 2.5 GW και Φ/Β περίπου 2.2 GW. [27]

Τον Ιούνιο του 2012 εκπονήθηκε και δημοσιοποιήθηκε από την Εθνική Ενεργειακή Στρατηγική Επιτροπή ένας μακροπρόθεσμος εθνικός ενεργειακός σχεδιασμός του ελληνικού συστήματος, με τη μορφή Οδικού Χάρτη για την περίοδο 2020-2050 (ΕΟΧ-50) [28]

Η μελέτη αυτή παρέχει τις κατευθυντήριες γραμμές της εθνικής ενεργειακής στρατηγικής για τις επόμενες δεκαετίες, οι βασικοί στόχοι της οποίας είναι η μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενη ενέργεια και της κατανάλωσης πετρελαιοειδών και άνθρακα, με παράλληλη μεγιστοποίηση της διείσδυσης των ΑΠΕ, επιτυγχάνοντας σημαντικό περιορισμό των εκπομπών CO₂ μέχρι το έτος 2050. Περιλαμβάνει επίσης διάφορα πιθανά σενάρια εξέλιξης του ενεργειακού συστήματος, ώστε να προσδιοριστούν και να αξιολογηθούν εναλλακτικά μέτρα και πολιτικές για την εκπλήρωση των εθνικών και ευρωπαϊκών στόχων [28]. Η συμμετοχή ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή μπορεί να φθάσει έως το 100% στα δύο πιο επιθυμητά και φιλόδοξα σενάρια (Μέτρα μεγιστοποίησης διείσδυσης ΑΠΕ – ΜΕΑΠ και Περιβαλλοντικά μέτρα Ελάχιστου Κόστους – ΠΕΚ), ενώ στο πιο συντηρητικό σενάριο (Υφιστάμενων Πολιτικών – ΥΦ) προβλέπεται μέτρια διείσδυση ΑΠΕ στο ηλεκτρικό σύστημα, έως 75% το 2050.

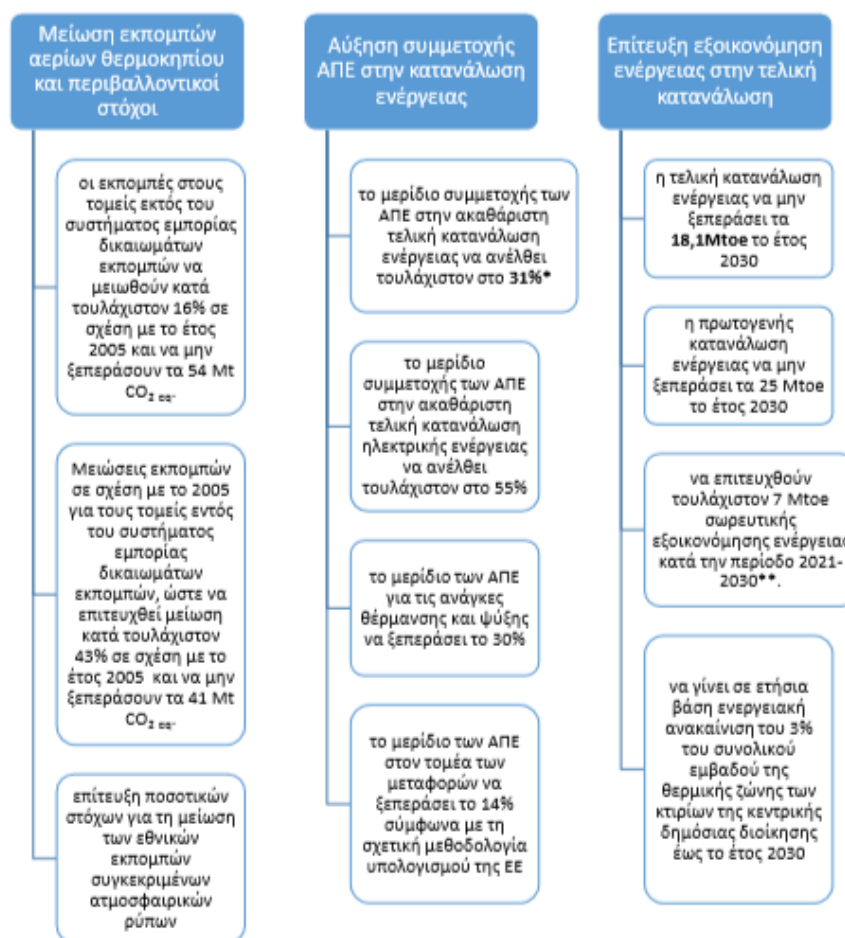
Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής ΑΠΕ προβλέπεται να προέρχεται από εκμετάλλευση αιολικής και ηλιακής ενέργειας, το δυναμικό των οποίων είναι σημαντικό σε πολλές περιοχές, συμπεριλαμβανομένων των νησιών του Αιγαίου. Ωστόσο, λόγω της περιορισμένης ευελιξίας του συστήματος παραγωγής και των ασθενών διεθνών διασυνδέσεων, το υπάρχον δίκτυο δεν μπορεί να διαχειριστεί και να απορροφήσει μεγάλες

ποσότητες κυμαινόμενης ισχύος παραγωγής, όπως η αιολική και η ηλιακή. Μερικές πρώτες μελέτες [29],[30],[31] έδειξαν ότι το σημερινό σύστημα θα μπορούσε να απορροφήσει σχεδόν το σύνολο της παραγωγής έως περίπου 5 GW εγκατεστημένης ισχύος αιολικών πάρκων.

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, προκειμένου να επιτευχθεί μεγάλη διείσδυση παραγωγής από ΑΠΕ χωρίς σημαντικά ποσοστά απορριπτόμενης ενέργειας, απαιτείται η εξασφάλιση επαρκούς ικανότητας αποθήκευσης ενέργειας κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών. Η χρήση υδροηλεκτρικών μονάδων αντλησιοταμίευσης αποτελεί σήμερα την πλέον ώριμη και αξιόπιστη τεχνολογία για μεγάλης κλίμακας αποθήκευση ενέργειας και, επιπλέον, είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την τοπολογία του εδάφους της Ελλάδας. ***Επομένως, θεωρείται μέχρι σήμερα η βέλτιστη τεchnο-οικονομική λύση.*** [23]

Πρόσφατα, τον Ιανουάριο του 2019, συντάχθηκε και το νέο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα. Το συγκεκριμένο σχέδιο θέτει ως στόχο την «βιώσιμη και αειφόρο ανάπτυξη του ενεργειακού τομέα από το στάδιο της παραγωγής έως την τελική χρήση, προστατεύοντας ταυτόχρονα το περιβάλλον και συμβάλλοντας στην αντιμετώπιση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής.» [32], με παράλληλο στόχο την «διαφύλαξη και διαχείριση των ενεργειακών πόρων κατά τρόπο που να διασφαλίζεται η ομαλή, αδιάλειπτη και αξιόπιστη κάλυψη των εγχώριων ενεργειακών αναγκών, καθώς και η πρόσβαση όλων των καταναλωτών (πολίτες, επιχειρήσεις και φορείς του δημόσιου τομέα) σε προσιτή και ασφαλή ενέργεια. Η επίτευξη του στόχου αυτού σχετίζεται με την εξασφάλιση των ενεργειακών πόρων, μέσω της διαφοροποίησης των πηγών και των ροών ενέργειας, καθώς και την εκμετάλλευση των εγχώριων πηγών ενέργειας, προκειμένου να μειωθεί η ενεργειακή εξάρτηση της χώρας, να εξασφαλιστεί ο εφοδιασμός της εγχώριας αγοράς και να προστατευθούν οι καταναλωτές σε περίπτωση διαταραχής εφοδιασμού και έκτακτης ανάγκης.» [32]

Οι βασικές αρχές του νέου εθνικού σχεδίου συνοψίζονται στο Σχήμα 2.12



*χωρίς να συνυπολογιστεί η συνεισφορά των ΑΠΕ για την κάλυψη ψυκτικών αναγκών

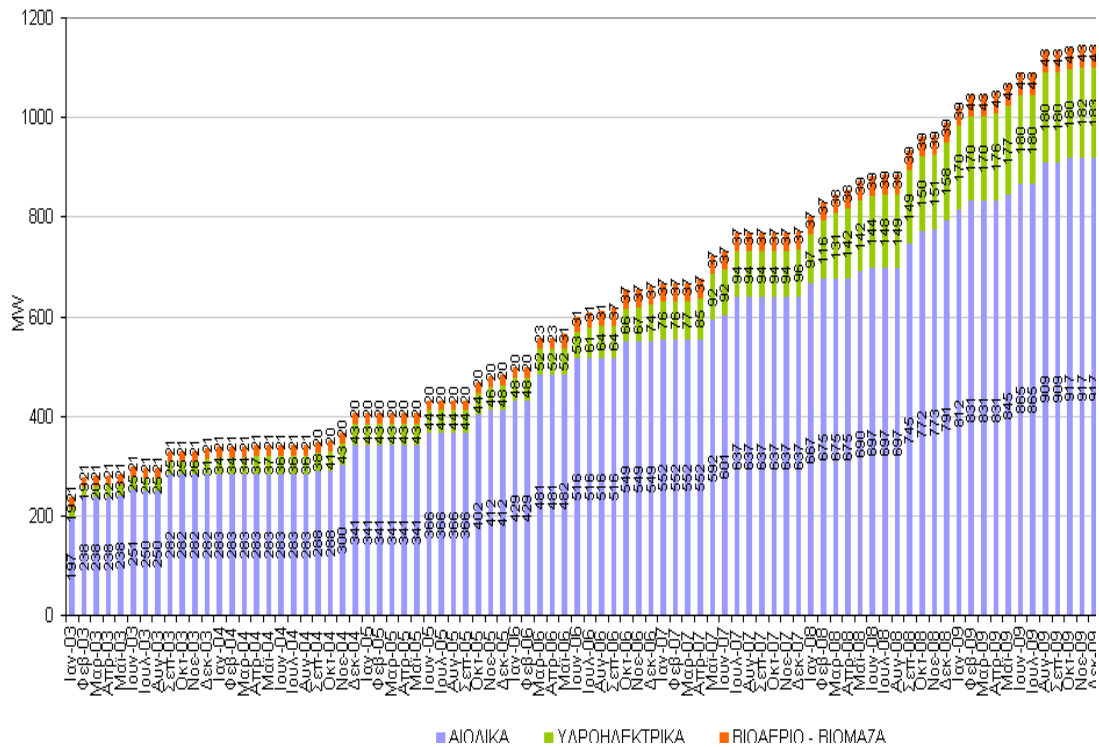
**Ο στόχος θα επαναυπολογιστεί βάσει των απολογιστικών στοιχείων τελικής κατανάλωσης ενέργειας των ετών 2016 – 2018

Σχήμα 2.12: Βασικές αρχές νέου εθνικού σχεδίου για την ενέργεια και το κλίμα [32]

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μια σειρά διαγραμμάτων για παρατήρηση της εξέλιξης παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ στο ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα.

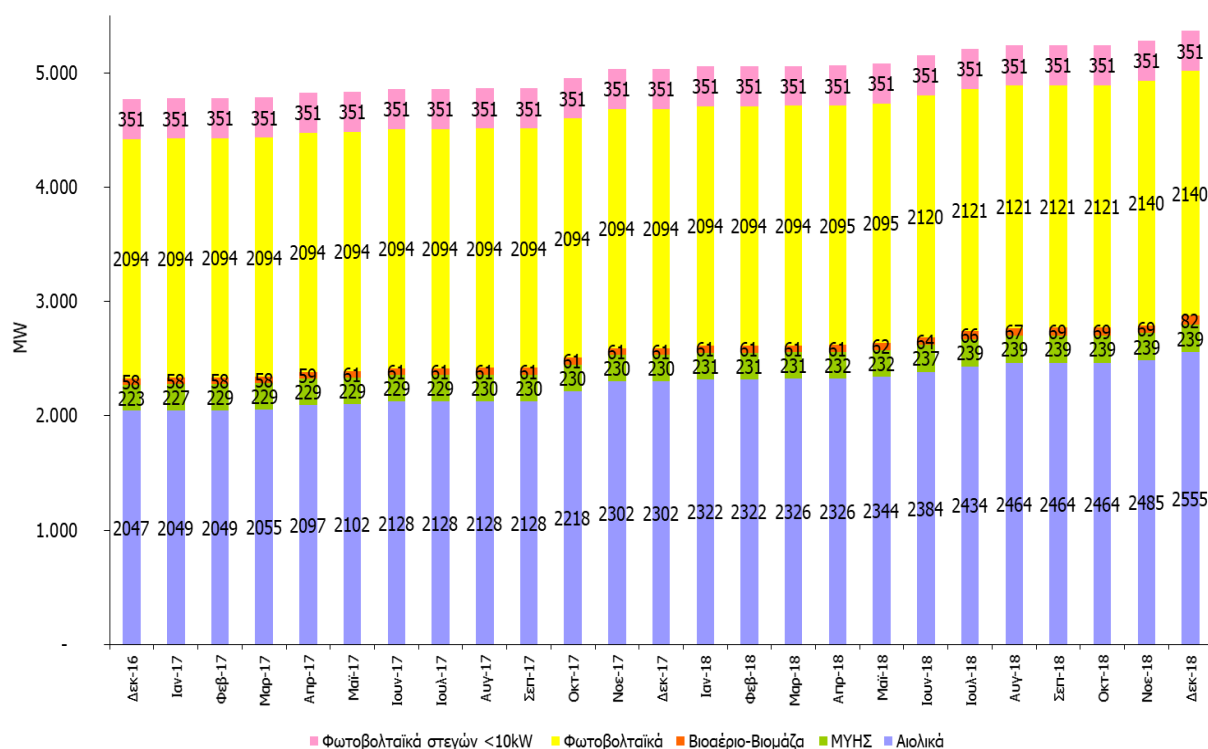
Συγκεκριμένα στο Σχήμα 2.13 παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ισχύς (MW) ΑΠΕ από τον Ιανουάριο του 2003 μέχρι το Δεκέμβριο του 2009. Παρατηρούμε ότι το διάστημα εκείνο τον κύριο λόγο τον είχαν τα αιολικά και ακολουθούν τα υδροηλεκτρικά και το βιοαέριο-βιομάζα. Με φανερό την πλήρη απουσία Φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ειδικότερα, τον Ιανουάριο του 2003 έχουμε 197MW Αιολική ισχύς, 19MW υδροηλεκτρικά και 21 MW βιοαέριο-βιομάζα. Ενώ το Δεκέμβριο το 2009 η εικόνα είναι φανερά αλλαγμένη με την εγκατεστημένη ισχύ των Αιολικών να βρίσκεται στα 917MW, των υδροηλεκτρικών στα 183MW και του βιοαερίου-βιομάζας στα 43MW.

2003 – 2009
 ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW) ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ
 (Άρθρο 9 Ν.3468/2006)



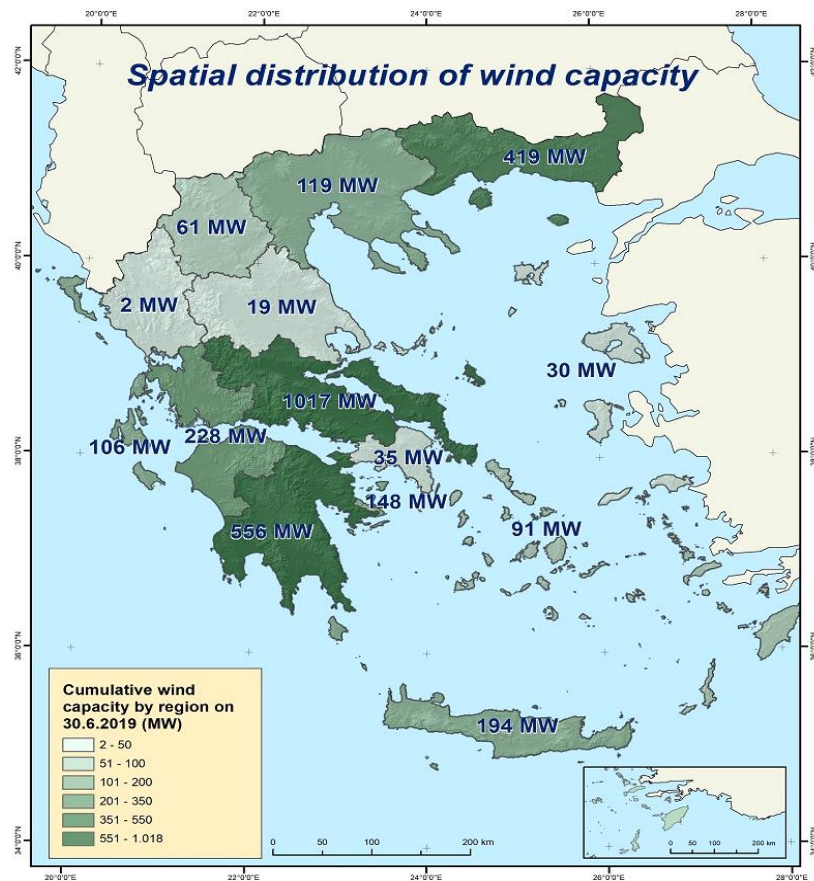
Σχήμα 2.13: Εγκατεστημένη Ισχύς (MW) μονάδων ΑΠΕ στο διασυνδεδεμένο σύστημα της Ελλάδας για την περίοδο 2003-2009. (Πηγή: ΔΕΣΜΗΕ) [33]

Χαρακτηριστική είναι η πλήρης απουσία Φωτοβολταϊκών συστημάτων τα οποία από τα επόμενα χρόνια και μετά άρχισαν να αναπτύσσονται ραγδαία, χάρις στα εξαιρετικά οικονομικά κίνητρα (πολύ υψηλές τιμές πώλησης της παραγωγής) που αποφάσισε η Πολιτεία. Έτσι πολύ μεγάλη διαφορά παρατηρείται 10 χρόνια αργότερα, δηλαδή το έτος 2018, όπως βλέπουμε και από το Σχήμα 2.14. Τον Δεκέμβριο του 2016 έχουμε εγκατεστημένη ισχύ Φωτοβολταϊκών συστημάτων 2094 MW, η οποία φτάνει έως τα 2140 MW τον Δεκέμβριο του 2018. Τους αντίστοιχους μήνες τα εγκατεστημένα Αιολικά είναι 2047 MW και 2555 MW.



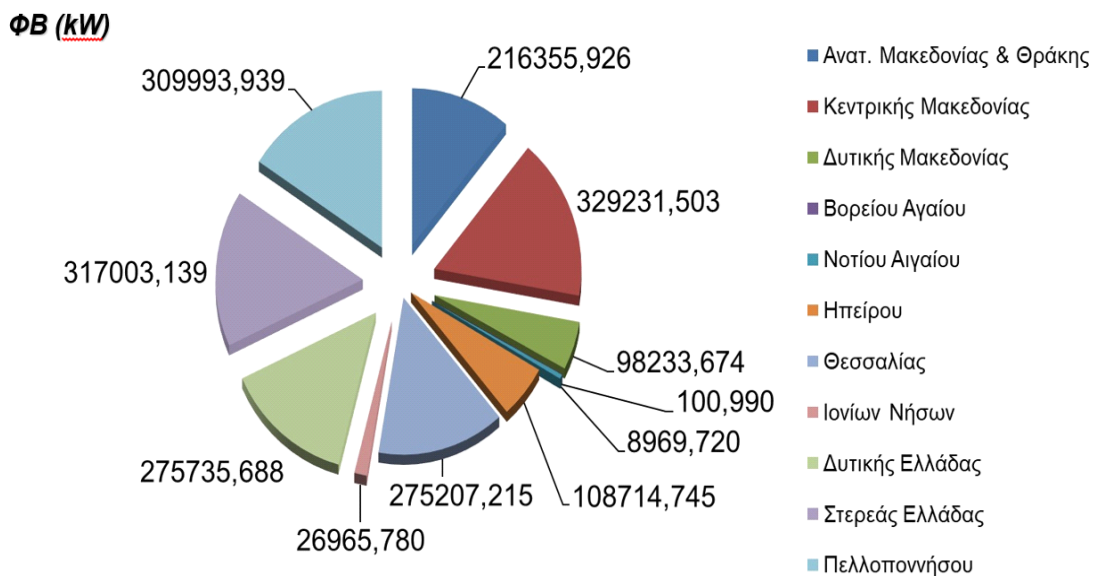
Σχήμα 2.14: Εγκατεστημένη Ισχύς(MW) μονάδων ΑΠΕ σε λειτουργία στο ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα την περίοδο 2017-2018. (Πηγή:ΔΑΠΕΕΠ)[34]

Στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζεται η γεωγραφική κατανομή της εγκατεστημένης Αιολικής Ισχύος στον Ελλαδικό χώρο με βάση την κατάσταση που επικρατούσε στις 30.06.2019. Παρατηρούμε ότι την περισσότερη εγκατεστημένη ισχύ την έχουν η Στερεά Ελλάδα, η Πελοπόννησος και η Θράκη. Παρόλο που σύμφωνα με το Σχήμα 2.4 τα νησιά του Αιγαίου είναι αυτά με το μεγαλύτερο αιολικό δυναμικό, λόγω γεωγραφικών περιορισμών και τεχνικών περιορισμών του μη-διασυνδεδεμένου δικτύου τους, έχουν πολύ λιγότερη εγκατεστημένη ισχύ σε σχέση με την ηπειρωτική Ελλάδα.



Σχήμα 2.15: Γεωγραφική κατανομή Αιολικής Ισχύος την 30.06.2019 (πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ) [35]

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 2.16 παρουσιάζεται η γεωγραφική κατανομή της εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β για το έτος 2018. Με την περισσότερη εγκατεστημένη ισχύ να βρίσκεται στις περιοχές της Κεντρικής Μακεδονίας (περίπου 329 MW), της Στερεάς Ελλάδας (περίπου 317 MW), της Πελοποννήσου (περίπου 310 MW), Δυτικής Ελλάδας και Θεσσαλίας (περίπου 275 MW έκαστη) και την Ανατολική Μακεδονία & Θράκη με περίπου 216 MW.



Σχήμα 2.16 Γεωγραφική κατανομή εγκατεστημένης Ισχύος Φ/Β στην Ελλάδα για το έτος 2018.
(Πηγή: ΛΑΓΗΕ) [34]

2.4 Ανάπτυξη των ΑΠΕ. Δυνατότητες και περιορισμοί.

Η πρόκληση της μεγάλης ανάπτυξης και εκμετάλλευσης των ΑΠΕ κατά τις επόμενες δεκαετίες απαιτεί αρκετά μεγάλη διείσδυση σε διακοπτόμενες πηγές ενέργειας, όπως η Αιολική και τα Φ/Β, στα ηλεκτρικά συστήματα πολλών χωρών. Αυτό μπορεί να έχει πολλαπλές επιπτώσεις στην ασφάλεια λειτουργίας, την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων και μπορεί να αντιμετωπίσει ορισμένους τεχνικούς περιορισμούς που θέτουν οι συμβατικές μονάδες παραγωγής. Αυτοί οι περιορισμοί, σε συνδυασμό με την αξιοσημείωτη διακύμανση της καθημερινής και εποχικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν να απαγορεύσουν την επίτευξη υψηλού επιπέδου διείσδυσης για την πλήρη εκμετάλλευση του υπάρχοντος ανανεώσιμου δυναμικού, ιδιαίτερα σε μη διασυνδεδεμένα ή απομονωμένα ηλεκτρικά δίκτυα.

Η ενσωμάτωση της υψηλής παραγωγής ΑΠΕ μπορεί να υποστηριχθεί από τη διασύνδεση των εθνικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, με τη βελτίωση της ευελιξίας στην παραγωγή και τη ζήτηση ενέργειας, καθώς και με την ανάπτυξη και ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Όσον αφορά την αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας η πρόοδος στην τεχνολογία των ανεμογεννητριών και στα δίκτυα ηλεκτρισμού είναι σημαντική, αν και πολλές προκλήσεις βρίσκονται ακόμη σε εξέλιξη.

Προκειμένου να αποφευχθεί η ανάγκη για νέους συμβατικούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς που θα χρησιμοποιηθούν ως υποστήριξη στις ΑΠΕ, καθώς και για την πλήρη αξιοποίηση των περιβαλλοντικών οφελών των αυξημένων σε ισχύ εγκαταστάσεων ΑΠΕ, απαιτούνται νέες επενδύσεις σε αποθήκευση ενέργειας μαζικής κλίμακας.

Η αποθήκευση είναι ο σύνδεσμος που λείπει στο ενεργειακό σύστημα. Εδώ και περισσότερα από εκατό χρόνια, ο κανόνας ήταν ότι η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να καταναλώνεται τη στιγμή που παράγεται. Ωστόσο η τεχνολογία σήμερα μας στέλνει μηνύματα για αλλαγή αυτής της κατάστασης. Μετά από χρόνια έρευνας, η τεχνολογία αποθήκευσης διευρύνεται και γίνεται σιγά σιγά κυρίαρχη.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση που η συνδυασμένη παραγωγή από αιολικά και Φ/Β ξεπεράσει το ελάχιστο όριο που απαιτείται για την παροχή φορτίου, τότε η πλεονάζουσα ενέργεια που δεν μπορεί να αποθηκευτεί, πρέπει να απορριφθεί. Με άλλα λόγια η παραγωγή ενέργειας από συγκεκριμένες εγκαταστάσεις πρέπει να περιοριστεί σε σχέση με τις δυνατότητες που έχουν. Ο περιορισμός αυτός των αιολικών και ηλιακών πόρων συμβαίνει συνήθως λόγω της υφιστάμενης δυνατότητας μεταφοράς (συμφόρησης) ή λόγω της δυνατότητας απορρόφησης της παραγωγής σε ένα μη διασυνδεδεμένο σύστημα, για λόγους ευστάθειας και ασφάλειας του συστήματος. Μπορεί επίσης να συμβεί σε περιπτώσεις υπερπαραγωγής κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ζήτησης φορτίου.

Στην συγκεκριμένη εργασία περιορίζουμε την έρευνα μας σε περικοπές που συμβαίνουν αποκλειστικά λόγω της παραγωγής πλεονάζουσας συνδυασμένης παραγωγής αιολικής και ηλιακής ενέργειας. **Επομένως, τα προτεινόμενα συστήματα σε αυτή την εργασία είναι εκείνα που ελαχιστοποιούν την παραγωγή ενέργειας ΑΠΕ και συνάμα και την απώλεια ενέργειας για ένα δεδομένο μέγεθος/χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας.** Αυτό συμβαδίζει και με άλλες μελέτες σχετικά με πλήρως ή μερικώς ανανεώσιμα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που προσδιορίζουν το βέλτιστο επίπεδο αιολικής και ηλιακής ενέργειας, εξετάζοντας το ελάχιστο ποσό της πλεονάζουσας ηλεκτρικής παραγωγής από ΑΠΕ.

Σε αυτό το σημείο κρίνεται αναγκαία μία σύντομη αναφορά στα υπάρχοντα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

2.5 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Όπως προαναφέρθηκε η ενεργειακή αποθήκευση έχει και θα έχει κυρίαρχο ρόλο στο ενεργειακό σύστημα. Τα κυριότερα οφέλη που προκύπτουν από αυτήν είναι :

- Μπορεί να συνδυαστεί με τις ΑΠΕ, αυξάνοντας έτσι την αξία της ενέργειας που παράγεται από Αιολικά και Φ/Β, καθιστώντας την ικανή για χρήση τις στιγμές αυξημένης ζήτησης φορτίου ή/και μειωμένης παραγωγής ΑΠΕ.
- Βοηθάει στην αποτελεσματικότερη και οικονομικότερη διαχείριση πόρων, καθώς προσφέρει ευελιξία στο δίκτυο παροχής ηλεκτρισμού. Ως παραγωγική πηγή μπορεί να επιφέρει εξοικονόμηση στις λειτουργικές δαπάνες ή την επένδυση κεφαλαίων.
- Συνεισφέρει στην μείωση της έντασης στις μεμονωμένες γραμμές μεταφοράς που είναι κοντά στη μέγιστη ονομαστική τιμή, με τη μείωση του φορτίου αιχμής του υποσταθμού. Παράλληλα συμβάλλει στην ευστάθεια των γραμμών μεταφοράς για σύγχρονη λειτουργία ώστε να αποτραπεί η καθίζηση του συστήματος, στη ρύθμιση τάσης και στην παράταση ζωής ή αναβάθμισης των γραμμών μεταφοράς και διανομής, των μετασχηματιστών, συστοιχιών πυκνωτών και υποσταθμών.
- Παρέχει τη δυνατότητα ελεγχόμενης διαχείρισης από μέρους της ζήτησης, παρέχοντας ανταποδοτικές υπηρεσίες. Ορισμένες από αυτές είναι η ποιότητα ισχύος σε διακυμάνσεις ή βυθίσεις που διαρκούν έως και πέντε δευτερόλεπτα και η αδιάλειπτη τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος σε διακοπές που διαρκούν έως και δέκα λεπτά.

Οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας κατηγοριοποιούνται, με κριτήριο τη διάρκεια αποθήκευσης, σε μονάδες βραχυπρόθεσμης, μεσοπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης αποθήκευσης.

Οι μονάδες βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης αφορούν την προσφορά ή απορρόφηση ενέργειας για διάστημα από λίγα δευτερόλεπτα έως λίγα λεπτά. Οι μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης χρησιμοποιούνται για διάρκεια από μερικά λεπτά έως μερικές ώρες. Αυτές είναι και οι μονάδες αποθήκευσης που αφορούν τις ΑΠΕ. Τέλος, οι μακροπρόθεσμης αποθήκευσης αφορούν χρήση από μερικές ώρες έως και μήνες.

Επιπρόσθετα, με κριτήριο τον τρόπο αποθήκευσης προκύπτουν διάφορες μορφές αποθήκευσης. Ορισμένες από αυτές είναι σε ηλεκτρική μορφή συνεχούς ρεύματος σε συστοιχία ηλεκτρικών συσσωρευτών, δηλαδή μπαταρίες, υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα, σε μηχανική μορφή, υπό μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου, υπό μορφή μαγνητικού πεδίου, υπό μορφή υδρογόνου, σε υδραυλική μορφή (αντλησιοταμίευση). Στη συγκεκριμένη εργασία θα ασχοληθούμε με τις μορφές που αφορούν τη μεσοπρόθεσμη αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με δεδομένη χωρητικότητα. Όπως για παράδειγμα η αντλησιοταμίευση και οι μπαταρίες.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που αφορούν τις μονάδες αποθήκευσης ενέργειας είναι τα εξής:

Η ενεργειακή πυκνότητα, η χωρητικότητα αποθήκευσης, η εκτιμώμενη ενέργεια που μπορεί να παράσχει η μονάδα, η ενεργειακή απόδοση, ο χρόνος εκφόρτισης, η αυτό-εκφόρτιση, η διάρκεια ζωής, τα κόστη και οι περιβαλλοντικές επιδράσεις.

2.5.1 Διατάξεις Βραχυπρόθεσμης Αποθήκευσης

Οι διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης χρησιμοποιούνται σε μικρής κλίμακας συστήματα και είναι κατάλληλες για εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την ενίσχυση συστημάτων μετά από μικρής διάρκειας διαταραχή.

Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και σε κατάλληλα μη διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με σημαντική διείσδυση αιολικής ενέργειας, όπως αυτά των ελληνικών νησιών. Εκεί χρησιμοποιούνται από τη μία για αποφυγή προσωρινών διαταραχών στο δίκτυο και από την άλλη για την εξομάλυνση των διακυμάνσεων της αιολικής παραγωγής.

Τέτοιες διατάξεις είναι :

- Οι σφόνδυλοι, δηλαδή μια περιστρεφόμενη μάζα γύρω από έναν άξονα η οποία αποθηκεύει ενέργεια μηχανικά υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας. Σπάνια χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγές εφαρμογές.
- Οι εξελιγμένοι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές (υπερπυκνωτές), οι οποίοι αποτελούν λύση για την εξυπηρέτηση γρήγορων και απότομων μεταβολών του φορτίου. Βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης ως τεχνολογία ενεργειακής αποθήκευσης για ηλεκτροπαραγωγή.

2.5.2 Τεχνολογία μπαταριών

Μία σημαντική μορφή αποθήκευσης ενέργειας η οποία εξελίσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια είναι αυτή των μπαταριών. Η αποθήκευση της ενέργειας σε αυτές γίνεται με δύο τρόπους αποθηκεύοντας ή/και παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια, εναλλάσσοντας τις φάσεις φόρτισης και εκφόρτισης με ηλεκτροχημικές αντιδράσεις.

Οι μπαταρίες έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων μορφών αποθήκευσης, καθώς δεν είναι ρυπογόνες, ανταποκρίνονται άμεσα στις μεταβολές του φορτίου και έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης. Διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Τις συμβατικές μπαταρίες και τις μπαταρίες ροής. Η διαφορά τους αφορά τον τρόπο που πραγματοποιούνται οι χημικές αντιδράσεις. Στις συμβατικές μπαταρίες πραγματοποιούνται με τη βύθιση δύο ηλεκτροδίων, θετικό και αρνητικό, σε δοχείο που περιέχει ηλεκτρολύτη, ενώ στις μπαταρίες ροής οι χημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται μεταξύ δύο ηλεκτρολυτών. [36],[37]

Ορισμένοι τύποι μπαταριών είναι:

- Μπαταρίες μολύβδου-οξέος [36],[37]: Ανακαλύφθηκαν το 1859 και αποτελούν την παλαιότερη και πιο διαδεδομένη κατηγορία επαναφορτιζόμενων μπαταριών.
Τα κύρια πλεονεκτήματα τους είναι το χαμηλό κόστος, ο υψηλός βαθμός απόδοσης (70-90%), η απλή τεχνολογία φόρτισης, οι περιορισμένες απαιτήσεις συντήρησης και ο χαμηλός βαθμός αυτοεκφόρτισης τους. Στα μειονεκτήματα τους συγκαταλέγονται ο μικρός κύκλος ζωής (500-1000 κύκλοι), η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα (30-50 Wh/Kg) και το περιορισμένο βάθος εκφόρτισης. Τα μειονεκτήματά τους αυτά τις καθιστούν μη χρήσιμες για ζητήματα ενεργειακής διαχείρισης, μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία σε υβριδικά συστήματα.
- Μπαταρίες νικελίου-καδμίου [36],[37]: Κατατάσσονται όπως και οι μολύβδου-οξέος στις ωριμότερες και πιο δημοφιλείς τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτροχημικής ενέργειας. Οι μπαταρίες NiCd έχουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα (50-75 Wh/kg) από τις μολύβδου οξέος, ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης και είναι αξιόπιστες, ωστόσο έχουν χαμηλό κύκλο ζωής (2000-2500 κύκλοι), χαμηλό βαθμό απόδοσης (60%-75%), υψηλό κόστος λόγω της διαδικασίας κατασκευής τους και εμφανίζουν το φαινόμενο της μνήμης, δηλαδή αν η εκφόρτιση φτάνει συχνά σε ένα ορισμένο ποσοστό, τότε η μπαταρία τείνει να θυμάται αυτό το ποσοστό και να λειτουργεί σωστά μέχρι αυτό.
- Μπαταρίες νατρίου-θείου [36],[37]: Αυτή η τεχνολογία αποθήκευσης παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Έχουν καλή ισορροπία μεταξύ ικανότητας ισχύος και αναλογίας πυκνότητας ενέργειας (150-240Wh/kg και 150-230W/kg), ενώ παράλληλα μπορούν να παράγουν συνεχόμενα την ονομαστική τους ισχύ καθόλη τη διάρκεια της εκφόρτισης ή να αποδίδουν το σύνολο της αποθηκευμένης ενέργειας σε μικρό χρονικό διάστημα. Έχουν, επίσης, υψηλό βαθμό απόδοσης (75-90%) και περιορισμένο βαθμό αυτοεκφόρτισης, υψηλό κύκλο ζωής. Ένα μειονέκτημα τους είναι η απαραίτητη διατήρησή τους σε υψηλές θερμοκρασίες (290°C-390°C). Τα παραπάνω πλεονεκτήματά τους τις καθιστούν κατάλληλες για εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας.
- Μπαταρίες Νατρίου-Νικελίου-Χλωριδίου (ZEBRA) [36],[37]: Οι συγκεκριμένες μπαταρίες, αλλιώς γνωστές ως ZEBRA αναπτύχθηκαν το 1985 και ανήκουν στα αποθηκευτικά μέσα υψηλής θερμοκρασίας (300°C). Συγκρινόμενες με τις Νατρίου-Θείου έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε υπερφορτίσεις και βραχυκυκλώματα, είναι ασφαλέστερες, παράγουν υψηλότερη τάση αλλά έχουν χαμηλότερη πυκνότητα ισχύος. Γενικά δε χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.
- Μπαταρίες Ιόντων-Λιθίου [36],[37]: Πρωτοεμφανίστηκαν το 1960 με την πρώτη τους εμπορική εφαρμογή να γίνεται το 1990. Έχουν μεγάλη εξέλιξη σε ότι αφορά την ενεργειακή τους πυκνότητα (200 Wh/kg) και στη διάρκεια ζωής (10000 κύκλοι), η τάση κελιού κυμαίνεται από 2,5V έως 4,2V, έχουν πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης (90-100%), πολύ μικρό βαθμό αυτοεκφόρτισης και ελάχιστες

απαιτήσεις συντήρησης. Αποτελούν την ταχύτερα αυξανόμενη και αναπτυσσόμενη τεχνολογία αποθήκευσης αυτή τη στιγμή. **Τέτοιου είδους είναι και οι μπαταρίες Tesla Powerwall** οι οποίες προορίζονται για οικιακή αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια για ηλιακή αυτό-κατανάλωση, εφεδρική ισχύ και χρήση εκτός δικτύου. **Οι μεγαλύτερες μπαταρίες Powerpack** προορίζονται για χρήση στο ηλεκτρικό δίκτυο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το κόψιμο των κορυφών της ζήτησης (peak shaving), τη μετατόπιση του φορτίου, την εφεδρική ισχύ, την ανταπόκριση στη ζήτηση, τα μικροσυστήματα, την ενσωμάτωση των ΑΠΕ, τη ρύθμιση της συχνότητας και τον έλεγχο της τάσης [38]

- Μπαταρίες Βαναδίου Οξειδοαναγωγής [36],[37]: Είναι μπαταρίες ροής που πρωτοεμφανίστηκαν το 1980. Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης, δεν έχουν φαινόμενο αυτοεκφόρτισης και μεγάλη ταχύτητα ανταπόκρισης. Είναι κατάλληλες για βιομηχανικές εφαρμογές και εφαρμογές δικτύου, όπως η αύξηση της διασφάλισης ισχύος και διείσδυσης μονάδων ΑΠΕ.
- Μπαταρίες Ψευδαργύρου-Βρωμίου [36],[37]: Αναπτύχθηκαν στα στις αρχές του 1970. Έχουν χαμηλό βαθμό απόδοσης σε σχέση με τις υπόλοιπες, περίπου 75%.
- Μπαταρίες Πολυθειούχου Βρωμίου [36],[37]: Παρέχουν μια αντιστρεπτή ηλεκτροχημική αντίδραση μεταξύ δύο διαλυμάτων ηλεκτρολυτών άλατος. Η τεχνολογία αυτή έως τώρα έχει εφαρμοστεί σε ερευνητικά εργαστήρια και σε έργα επίδειξης.

2.5.3 Μονάδες αντλησιοταμίευσης

Όπως προαναφέρθηκε οι μονάδες αντλησιοταμίευσης αποτελούν το κυρίαρχο τρόπο αποθήκευσης ενέργειας παραγόμενης από ΑΠΕ σήμερα.

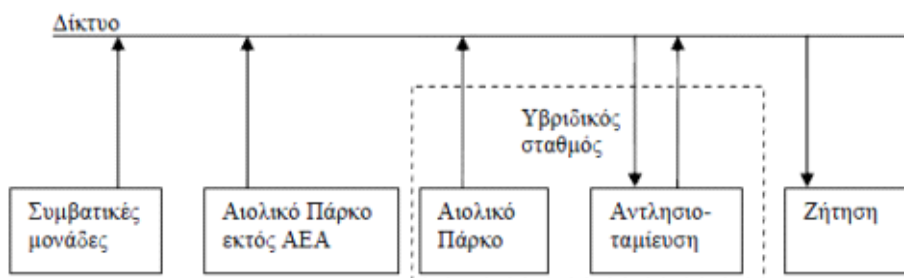
Ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα :

- Το αντλιοστάσιο, που μπορεί να αποτελείται από μια αντλία ή ένα σύστημα παράλληλα συνδεδεμένων αντλιών και υδροστροβίλους, ή από αναστρέψιμες αντλίες, υδροστροβίλους.
- Τον άνω ταμιευτήρα.
- Τον κάτω ταμιευτήρα ή τη θάλασσα, που θα πρέπει να είναι σε ικανή υψομετρική διαφορά από τον άνω.
- Τον υδροστρόβιλο ή ένα σύστημα παράλληλα συνδεδεμένων υδροστρόβιλων.
- Ένα σύνολο σωληνώσεων που θα κάνει την άντληση από τον κάτω ταμιευτήρα στον άνω.
- Ένα σύνολο σωληνώσεων για την προσαγωγή του νερού από το άνω ταμιευτήρα στον κάτω, μέσω του υδροστρόβιλου για την παραγωγή ενέργειας.
- Την κεντρική μονάδα εποπτικού ελέγχου.

Γενικά υπάρχουν δύο τρόποι διασύνδεσης του συστήματος αιολικής ή ηλιακής ενέργειας με αντλιοσταμείωση. Ο *άμεσος*, όπου το σύστημα αντλιοσταμείωσης συνδέεται με τα πάρκα που θα συνεισφέρουν στην άντληση με ανεξάρτητη του δικτύου, γραμμή μεταφοράς. Ο *έμμεσος*, όπου το σύστημα αντλιοσταμείωσης συνδέεται με τα πάρκα μέσω του κεντρικού δικτύου. Οι δύο αυτοί τρόποι διασύνδεσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.17 και 2.18 που ακολουθούν.



Σχήμα 2.17: Άμεση διασύνδεση αιολικού πάρκου-αντλιοσταμείωσης.[39]



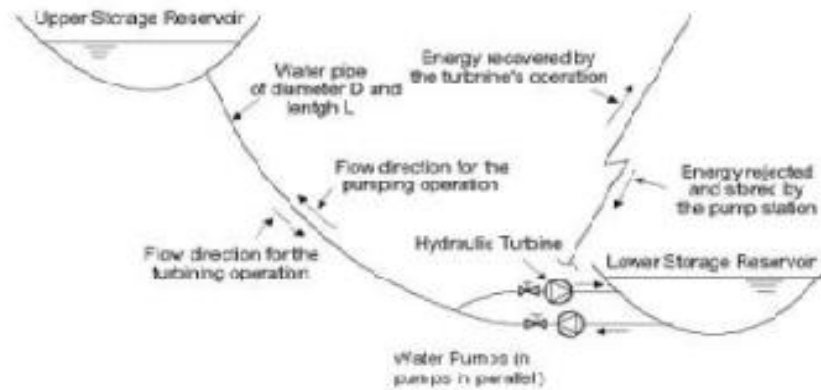
Σχήμα 2.18: Έμμεση διασύνδεση αιολικού πάρκου-αντλιοσταμείωσης. [39]

Στα συστήματα αντλιοσταμείωσης δύο είναι και οι τρόποι σχεδίασης. Με μονή σωλήνωση ή με διπλή σωλήνωση, δηλαδή δύο ανεξάρτητες σωλήνες μία για το στρόβιλο και μία για τις αντλίες.

Μονή σωλήνωση: Έχει το πλεονέκτημα της πιο οικονομικής λύσης, μειώνοντας τα έξοδα της εγκατάστασης. Ωστόσο, θέτει περιορισμό στη λειτουργία μιας και δεν μπορούν να λειτουργήσουν ταυτόχρονα στρόβιλος και αντλία. Για αυτό είναι σημαντικό να καθορίσουμε αν έχει προτεραιότητα ο στρόβιλος ή η αντλία.

Προτεραιότητα στην αντλία δίνεται στα διαστήματα κατά τα οποία η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις θερμικές μονάδες ή από τις υδροηλεκτρικές μονάδες

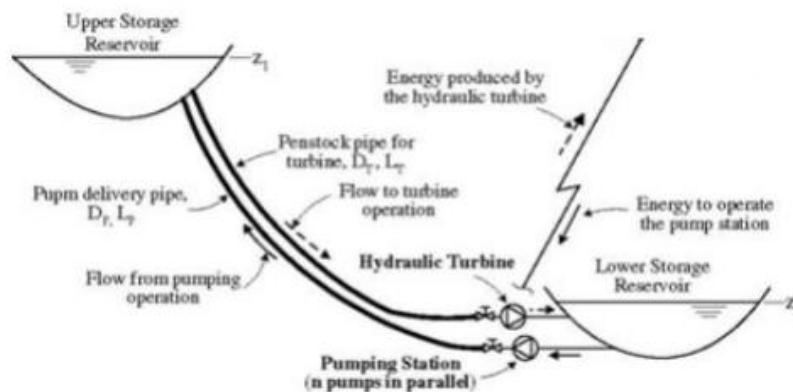
βάσεως είναι μεγαλύτερες από τη ζήτηση, ενώ προτεραιότητα στο στρόβιλο δίνεται στην αντίθετη περίπτωση. Αυτός ο τρόπος σχεδίασης φαίνεται στο Σχήμα 2.19 που ακολουθεί.



Σχήμα 2.19: Σύνδεση μονής σωληνώσεως.[39]

Διπλή σωληνώση: Σε ώρες αιχμής της ζήτησης και ταυτόχρονα περίσσειας ισχύος των μονάδων βάσεως, από τη μία υπάρχει περικοπή ισχύος και απαιτείται λειτουργία των αντλιών, από την άλλη πρέπει να λειτουργήσει ο στρόβιλος λόγω της υψηλής ζήτησης.

Στο Σχήμα 2.20 φαίνεται η σύνδεση διπλής σωληνώσεως.



Σχήμα 2.20: Σύνδεση διπλής σωληνώσεως.[39]

Η μέθοδος της αντλησιοταμίευσης προσφέρει ουσιαστικά **δύο σημαντικά πλεονεκτήματα**. Το πρώτο είναι η αποκοπή των ακροτάτων ισχύος. Τα συνήθη τεχνικά ελάχιστα αυξάνουν με την άντληση και την αποθήκευση ενέργειας, ενώ οι υδροστροβιλικές μηχανές καλύπτουν τα ημερήσια μέγιστα. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση των μονάδων παραγωγής.

Το δεύτερο και πολύ σημαντικό είναι ότι τα συστήματα αυτά μπορούν να συμβάλλουν αισθητά στην αύξηση της δυνατότητας διεύθυνσης των αιολικών και Φ/Β συστημάτων, τα οποία είναι συστήματα μη εγγυημένης ισχύος.

2.6 Ενεργειακή αποθήκευση για ηλεκτροπαραγωγή 100% από ΑΠΕ

Όπως προαναφέρθηκε η αποθήκευση είναι ο απαραίτητος συνδετικός κρίκος στο ηλεκτρικό ενεργειακό μας σύστημα. Το κόστος παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ έχει πέσει σε τέτοιο βαθμό που σε λίγο δεν θα χρειάζεται πλέον επιδοτήσεις. Παρόλα αυτά, η φτηνή αυτή ενέργεια από ΑΠΕ είναι κυμαινόμενη και όχι ελεγχόμενη, με αποτέλεσμα να τίθενται θέματα ευστάθειας του συστήματος, όταν η παραγωγή είναι υψηλή, και να προκύπτει ανάγκη για περικοπές. Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται ακόμη στο διασυνδεδεμένο σύστημα της χώρας, στο οποίο λειτουργούν ήδη αρκετές ευέλικτες μονάδες φυσικού αερίου, αλλά είναι υπαρκτό στα αυτόνομα συστήματα των νησιών (π.χ. Κρήτη)

Αυτές οι τεχνικές δυσκολίες στη λειτουργία ενός μελλοντικού ηλεκτρικού συστήματος με πολύ υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και χωρίς θερμικές μονάδες παραγωγής **φαίνεται να έχουν πλέον μία γενική λύση**. Την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε όλα τα δυνατά επίπεδα. Στην παραγωγή, στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής και σε επίπεδο τελικού καταναλωτή (διεσπαρμένη αποθήκευση). Η ενεργειακή αποθήκευση είναι αυτή η οποία αλλάζει την έως τώρα κατάσταση. Με αυτόν τον τρόπο δε χρειάζεται πλέον να βρίσκεται σε διαρκή ισορροπία η παραγωγή με την τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, αφού μπορεί να γίνεται εξισορρόπηση μέσω των μονάδων αποθήκευσης.

Η πολύ υψηλή, έως 100%, ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ είναι ένα σενάριο το οποίο αρχίζει πλέον να είναι αντικείμενο της Ευρωπαϊκής πολιτικής, στοχεύοντας σε μια κατάσταση με μηδενικές εκπομπές CO₂ έως το 2050 [40], το οποίο σημαίνει είτε παραγωγή μόνο από ΑΠΕ, είτε συμπαραγωγή ΑΠΕ με πυρηνική ενέργεια. Υπάρχουν ήδη ακόμη πιο αισιόδοξοι στόχοι ανά τον κόσμο. Για παράδειγμα [40], στην Καλιφόρνια και την Χαβάη τίθεται ο στόχος της παραγωγής ενέργειας 100% από ΑΠΕ έως το 2045, στο Queensland της Αυστραλίας, όπου έχει τεθεί ο στόχος για 50% παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ έως το 2030, καθώς και σε ορισμένες «έξυπνες πόλεις» όπως στο San Diego της Καλιφόρνια με στόχο την παραγωγή 100% ΑΠΕ έως το 2035.

Δύο είναι οι βασικοί τρόποι [40] για να μπορέσει να αντέξει το μελλοντικό ηλεκτρικό σύστημα μία τόσο μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ. Η βελτίωση της ευελιξίας με εγκατάσταση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας και οι διασυννοριακές ανταλλαγές ενέργειας, με τις γειτονικές χώρες, στα πλαίσια μια πανευρωπαϊκής αγοράς και ενός ενοποιημένου συστήματος.

Για την ομαλή και αποτελεσματική λειτουργία αυτού του μελλοντικού μοντέλου ηλεκτρικού συστήματος απαιτούνται αρκετά μέτρα που θα πρέπει να ληφθούν παράλληλα: Μεγάλες και διασκορπισμένες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις και αιολικά πάρκα, σημαντικές ενισχύσεις στο εθνικό δίκτυο μεταφοράς και διανομής, πρόσθετες γραμμές διασύνδεσης με τις γειτονικές χώρες, υψηλή διείσδυση των μικροδικτύων και πολλαπλασιασμό των παραγωγών/καταναλωτών (prosumers), και βέβαια, μεγάλη ανάπτυξη μονάδων αποθήκευσης ενέργειας σε όλα τα επίπεδα (παραγωγή, μεταφορά, διανομή και τελική κατανάλωση).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΚΩΔΙΚΑΣ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

3.1 Εισαγωγή

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η περιγραφή και η αναλυτική παρουσίαση των δεδομένων και των σεναρίων, που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, σχετικά με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα, τη μοντελοποίηση της κάλυψής της αποκλειστικά με τη χρήση Ανανέωσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και τη διερεύνηση των αναγκών αποθήκευσης ενέργειας που προκύπτουν.

3.2 Τα δεδομένα

Αρχικά, στον κώδικα διαβάζονται τα δεδομένα, τα οποία περιλαμβάνουν τη μηνιαία συνολική ζήτηση σε MWh για τα 11 τελευταία έτη, από το 2008 έως το 2018. Τα αρχεία αυτά έχουν διαμορφωθεί από την ωριαία ζήτηση για τα παραπάνω έτη, που παρασχέθηκε από τον ΑΔΜΗΕ. Στη συνέχεια, αφαιρείται η αντίστοιχη υδροηλεκτρική παραγωγή, προκειμένου να παραμείνει η ζήτηση που πρέπει να καλυφθεί από ΑΠΕ, που θεωρείται εδώ ότι αποτελούνται αποκλειστικά από αιολικά και φωτοβολταϊκά. Οι χρονοσειρές αυτές πολλαπλασιάστηκαν με κατάλληλο συντελεστή, ώστε κάθε έτος να έχει την ίδια συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενός «μέσου έτους αναφοράς», ίση με 50 TWh.

Στη συνέχεια εισάγονται τα δεδομένα της μηνιαίας παραγωγής Αιολικών και Φ/Β της χώρας που κανονικοποιούνται για εγκατεστημένη ισχύ κάθε τεχνολογίας ίση με 1 GW. Τα πρωτογενή δεδομένα ελήφθησαν από την ιστοσελίδα του «Λειτουργού Αγοράς της Ηλεκτρικής Ενέργειας» (ΛΑΓΗΕ, www.lagie.gr) [41],[42]

Ενδεικτικά, στους Πίνακες 3.1, 3.2, 3.3 και 3.4 παρουσιάζονται τα δεδομένα από την ιστοσελίδα του ΛΑΓΗΕ για τα έτη 2010 και 2016. Παρατηρούμε ότι για το έτος 2010 η εγκατεστημένη αιολική ισχύς είναι 1039,39 MW και η φωτοβολταϊκή είναι μόλις 152,92 MW, ενώ το 2016 γίνονται 2047,17 MW και 2093,52 MW, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μονάδων ΑΠΕ διασυνδεδεμένου συστήματος για το έτος 2010 (Πηγή: ΛΑΓΗΕ) [41]


ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 2010
(Άρθρο 9 Ν.3468/2006)

Μήνας	Αιολικά		Υδροηλεκτρικά		Βιοαέριο-Βιομάζα		Σύνολο	
	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
Ιανουάριος	231.075	922,61	80.996	182,61	15.700	40,80	327.771	1.146,01
Φεβρουάριος	197.363	940,61	81.403	182,61	14.184	40,80	292.950	1.164,01
Μάρτιος	179.761	940,61	91.192	182,61	16.086	40,80	287.039	1.164,01
Απρίλιος	179.989	940,61	80.844	183,97	16.033	40,80	276.866	1.165,37
Μάιος	104.659	940,61	71.231	183,97	16.823	40,80	192.713	1.165,37
Ιούνιος	105.918	940,61	51.661	183,97	16.573	40,80	174.152	1.165,37
Ιούλιος	139.247	940,61	41.604	183,97	16.271	40,80	197.122	1.165,37
Αύγουστος	148.824	963,39	32.565	185,12	16.524	40,80	197.914	1.189,30
Σεπτέμβριος	148.964	983,19	32.458	185,12	16.017	40,80	197.438	1.209,10
Οκτώβριος	162.048	1003,19	53.154	192,21	16.801	40,80	232.002	1.236,20
Νοέμβριος	220.747	1005,89	63.586	194,52	16.477	40,80	300.810	1.241,21
Δεκέμβριος	243.084	1039,09	72.803	196,83	16.444	41,05	332.330	1.276,97
	2.061.678		753.497		193.933		3.009.109	

Πίνακας 3.2: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας φωτοβολταϊκών σταθμών διασυνδεδεμένου συστήματος για το έτος 2010 (Πηγή: ΛΑΓΗΕ)[41]

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 2010 (Άρθρο 9 Ν.3468/2006)			
ΜΗΝΑΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWh)	ΙΣΧΥΣ (MW)	
		ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΣΥΜΒΟΛΑΙΟΠΟΙΗΜΕΝΗ	ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
Ιανουάριος	4.251,47	111	53,70
Φεβρουάριος*	2.713,03	116	55,55
Μάρτιος	5.640,74	120	58,76
Απρίλιος	7.165,10	160**	63,10
Μάιος	8.252,14	195**	71,20
Ιούνιος*	18.949,59	207**	77,76
Ιούλιος	9.729,84	215**	84,76
Αύγουστος	10.672,45	300**	99,25
Σεπτέμβριος	11.523,12	330**	113,70
Οκτώβριος*	25.868,34	446	127,87
Νοέμβριος	14.296,16	511	139,84
Δεκέμβριος	12.888,65	613	152,92
ΣΥΝΟΛΟ (MWh)	131.950,63	* Μήνες εκκαθαριστικών λογαριασμών για τα Φ/Β ΧΤ ** Ενδεικτική τιμή	

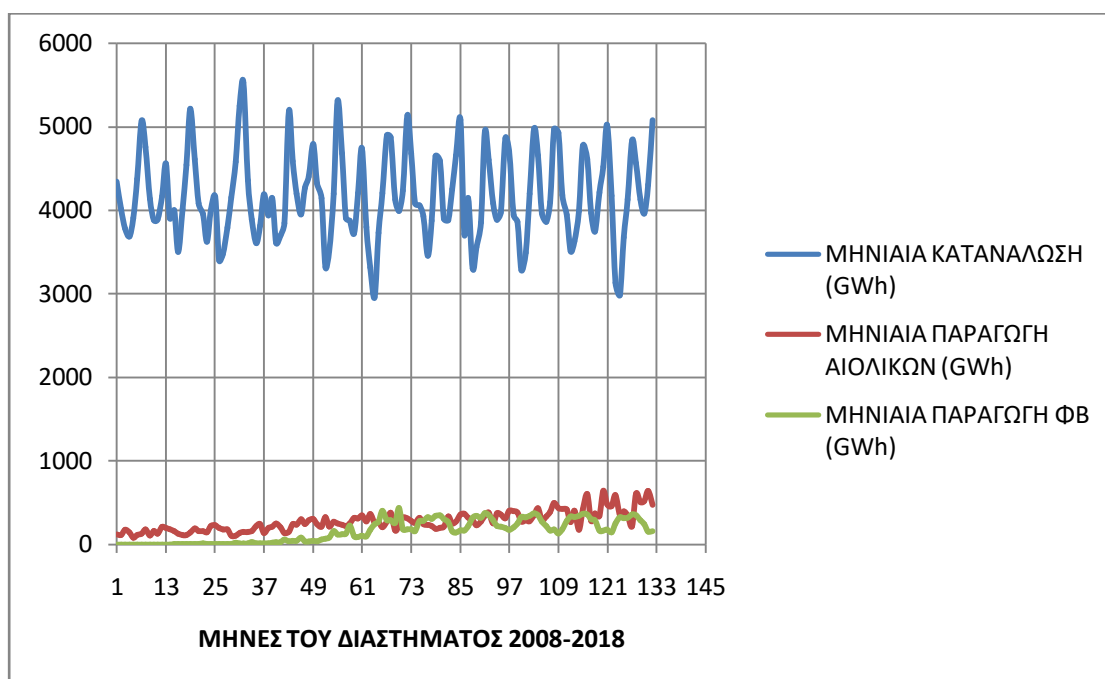
Πίνακας 3.3: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μονάδων ΑΠΕ διασυνδεδεμένου συστήματος για το έτος 2016 (Πηγή: ΛΑΓΗΕ)[42]

 12_2016 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (Άρθρο 9 ν.3468/2006) (1/3)							
ΑΙΟΛΙΚΑ				ΜΥΗΣ			
Μήνας	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Συντελεστής Φόρτισης (%)	Μήνας	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Συντελεστής Φόρτισης (%)
Ιανουάριος	401.207	1856,62	29,05%	Ιανουάριος	78.316	223,53	47,09%
Φεβρουάριος	398.728	1856,62	30,86%	Φεβρουάριος	76.112	223,53	48,92%
Μάρτιος	382.648	1856,62	27,70%	Μάρτιος	99.536	223,13	59,96%
Απρίλιος	275.155	1856,62	20,58%	Απρίλιος	78.618	223,13	48,94%
Μάιος	291.242	1856,62	21,08%	Μάιος	75.079	223,13	45,23%
Ιούνιος	279.770	1960,22	19,82%	Ιούνιος	54.214	223,13	33,75%
Ιούλιος	353.757	1962,77	24,22%	Ιούλιος	35.108	223,13	21,15%
Αύγουστος	435.403	1981,37	29,54%	Αύγουστος	29.346	222,19	17,75%
Σεπτέμβριος	293.090	1981,37	20,54%	Σεπτέμβριος	35.894	222,19	22,44%
Οκτώβριος	335.037	1987,37	22,66%	Οκτώβριος	44.797	222,19	27,10%
Νοέμβριος	391.934	2043,57	26,64%	Νοέμβριος	63.938	223,18	39,79%
Δεκέμβριος	492.909	2047,17	32,36%	Δεκέμβριος	50.406	223,18	30,36%
	4.330.880				721.365		

Πίνακας 3.4: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας φωτοβολταϊκών σταθμών διασυνδεδεμένου συστήματος για το έτος 2016 (Πηγή: ΛΑΓΗΕ)[42]

Φ/Β ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ				ΠΙΝΑΚΑΣ 6
ΜΗΝΑΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWh)	ΙΣΧΥΣ (MW)		ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (%) (**)
		ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΣΥΜΒΟΛΑΙΟΠΟΙΗΜΕΝΗ	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ	
Ιανουάριος	172.784,26	3.083	2.093,12	11,10%
Φεβρουάριος*	200.964,49	3.083	2.093,12	13,79%
Μάρτιος	248.595,72	3.083	2.093,12	15,96%
Απρίλιος	329.146,55	3.083	2.093,12	21,84%
Μάιος	324.168,13	3.083	2.093,12	20,82%
Ιούνιος*	341.213,27	3.083	2.093,12	22,64%
Ιούλιος	372.486,43	3.083	2.093,12	23,92%
Αύγουστος	350.318,95	3.083	2.093,52	22,49%
Σεπτέμβριος	274.364,32	3.083	2.093,52	18,20%
Οκτώβριος*	216.485,34	3.083	2.093,52	13,90%
Νοέμβριος	166.239,65	3.083	2.093,52	11,03%
Δεκέμβριος	178.309,79	3.083	2.093,52	11,45%
ΣΥΝΟΛΟ (MWh)	3.175.076,89	* Μήνες εκκαθαριστικών λογαριασμών για τα Φ/Β ΧΤ		

Στο Διάγραμμα του Σχήματος 3.1, μετά από επεξεργασία των δεδομένων της εργασίας, παρουσιάζεται η μηνιαία κατανάλωση, η μηνιαία παραγωγή αιολικών και η μηνιαία παραγωγή Φ/Β σε MWh για το διάστημα των 11 ετών (2008-2018)

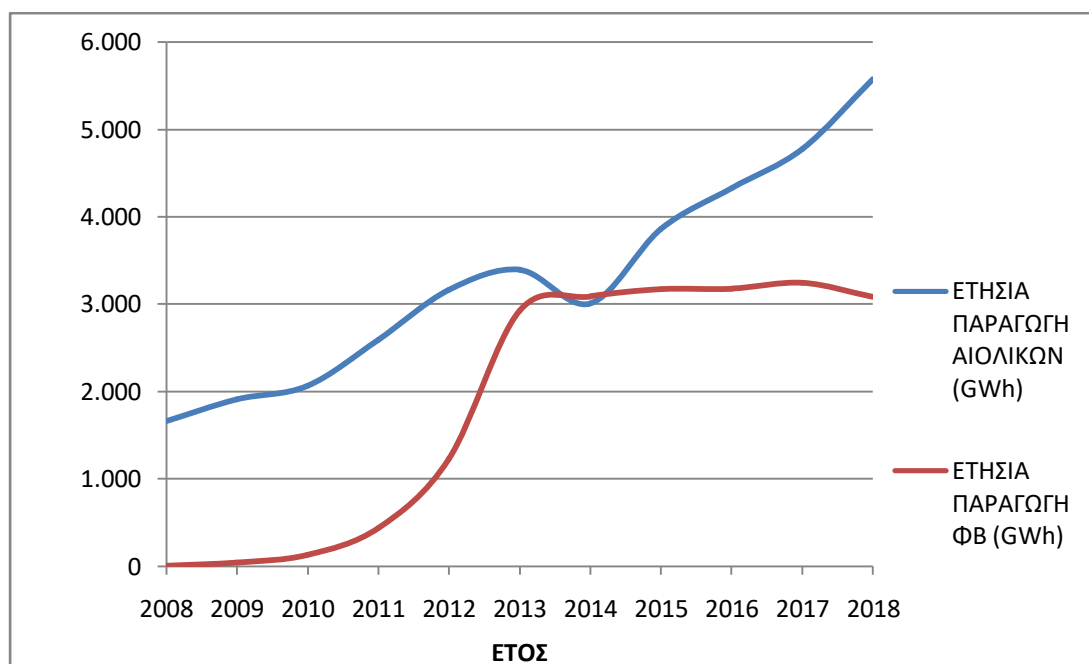


Σχήμα 3.1: Η μηνιαία κατανάλωση και η παραγωγή αιολικών και Φ/Β σε GWh για το χρονικό διάστημα 2008-2018.

Από το Διάγραμμα του Σχήματος 3.1 μπορούμε να παρατηρήσουμε τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τους χειμερινούς μήνες και την αύξηση της κατά τους θερινούς. Το ίδιο μπορούμε να παρατηρήσουμε και για τη μηνιαία παραγωγή Φ/Β, η οποία ως αναμενόταν είναι μεγαλύτερη τους θερινούς μήνες από ότι τους χειμερινούς. Από την άλλη πλευρά, για την αιολική παραγωγή δε μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα σε ότι αφορά τη συμπεριφορά της ανάλογα την εποχή.

Παράλληλα, είναι φανερό και η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια των 11 αυτών ετών, ως αποτέλεσμα της οικονομικής κρίσης.

Στη συνέχεια, στο Διάγραμμα του Σχήματος 3.2 παρουσιάζονται οι ετήσιες τιμές της παραγωγής ενέργειας από αιολικά και φωτοβολταϊκά για αυτά τα 11 έτη (2008-2018).



Σχήμα 3.2: Ετήσιες παραγωγές ηλεκτρικής ενέργειας (MWh) από αιολικά και φωτοβολταϊκά για το διάστημα 2008-2018.

Από το Διάγραμμα του Σχήματος 3.2 φαίνεται αυτό που έχει ξανααναφερθεί στην εργασία, δηλαδή, η σημαντική αύξηση στην παραγωγή ενέργειας τόσο από αιολικά όσο και από φωτοβολταϊκά. Συγκεκριμένα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά παρατηρούμε μία συνεχώς αυξανόμενη τάση με εξαίρεση το έτος 2014 που η συνολική παραγωγή είναι για πρώτη φορά λιγότερη από αυτήν του προηγούμενου έτους. Σε ότι αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά παρατηρούμε μια ραγδαία αύξηση μεταξύ των ετών 2010-2013, λόγω των εξαιρετικά υψηλών κρατικών επιδοτήσεων την περίοδο αυτή, και στη συνέχεια μια σχετική στασιμότητα, λόγω αλλαγής του πλαισίου τιμολόγησής τους.

3.3 Επεξεργασία δεδομένων

Η επεξεργασία των δεδομένων αποτελείται από δύο ξεχωριστά στάδια/διαδικασίες τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω. Αρχικά, θα ορισθούν ορισμένες παράμετροι, που είναι κοινές και στις δύο διαδικασίες.

- Η συνολική ετήσια ζήτηση (κατανάλωση) ηλεκτρικής ενέργειας L , που προαναφέρθηκε, η οποία είναι σταθερή για κάθε «μέσο έτος αναφοράς» και ίση με 50 TWh.
- Η μέση ημερήσια ζήτηση ορίζεται ως μέση κατανάλωση ενέργειας στο σύστημα σε ημερήσια βάση, δηλαδή ίση με $50 \text{ TWh} / 365 = 0,1369863 \text{ TWh} = 136986,3 \text{ MWh}$.

- Ο παράγοντας **Fg** ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$Fg = \frac{\text{Συνολική παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ}}{\text{Συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας } L} \quad \text{και μας δείχνει τη σχέση μεταξύ της}$$

συνολικής ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ σε αυτά τα ένδεκα έτη (2008-2018) και της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος σε αυτά τα έτη, η οποία είναι $L=11 \times 50 \text{ TWh}=550 \text{ TWh}$).

- Ο συντελεστής **A** που χαρακτηρίζει το ποσοστό συμμετοχής στη συνολική παραγωγή της ενέργειας που παράγεται από αιολικά πάρκα. Αφού εξετάζεται η περίπτωση κατά την οποία όλη η ενέργεια παράγεται αποκλειστικά από Αιολικά και Φ/Β, το αντίστοιχο ποσοστό συμμετοχής των Φ/Β θα είναι **100-A**.

3.3.1 Το πρώτο στάδιο του κώδικα

Στην πρώτη φάση επεξεργασίας γίνεται η εξής διαδικασία.

Ο υπολογιστικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε λειτουργεί ως εξής. Αρχικά, για δεδομένη εγκατεστημένη ισχύ Αιολικών και Φ/Β, υπολογίζεται η μηνιαία παραγωγή τους για την περίοδο των 11 ετών, με βάση τα αντίστοιχα πραγματικά δεδομένα. Από τη συνολική ενέργεια που παράγεται, προκύπτει και η τιμή του παράγοντα fg , που πρέπει να είναι μεγαλύτερη της μονάδας.

Η αναγκαιότητα χρήσης αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει κατά τις ώρες/μήνες που η συνολική παραγωγή ΑΠΕ δεν επαρκεί για την κάλυψη της αντίστοιχης κατανάλωσης. Τότε, επιστρατεύεται η ενέργεια που (θα πρέπει να) είναι αποθηκευμένη στις μονάδες αποθήκευσης. Αντιθέτως, όταν η παραγωγή των ΑΠΕ υπερκαλύπτει τη ζήτηση, το πλεόνασμα ενέργειας αποθηκεύεται, έως ότου γεμίσουν πλήρως οι διαθέσιμες μονάδες αποθήκευσης, επομένως μειώνεται η αναγκαία ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας. Έτσι, προκύπτει η καμπύλη του Σχήματος 3.3, που αναπαριστά με αρνητικό πρόσημο την συσσωρευμένη ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας που απαιτείται να είναι διαθέσιμη για την κάλυψη της ζήτησης σε όλη την περίοδο. Η ποσότητα αυτή μπορεί να αυξάνει (κατ' απόλυτη τιμή) εάν υπάρχει έλλειμα παραγωγής ΑΠΕ σε συνεχόμενους μήνες, ή να μειώνεται, εάν σε κάποιον μήνα υπάρχει πλεόνασμα παραγωγής ΑΠΕ. Όταν φθάνει στην τιμή μηδέν, υπάρχει πληρότητα των σταθμών αποθήκευσης, επομένως κάθε νέο πλεόνασμα της παραγωγής ΑΠΕ δεν θα μπορεί να αποθηκευθεί. Η καμπύλη αυτή της απορριπτόμενης παραγωγής ΑΠΕ σχεδιάζεται στο Σχήμα 3.4.

Η μέγιστη χωρητικότητα που θα πρέπει να διαθέτουν οι αποθηκευτικοί σταθμοί του συστήματος ισούται με την ελάχιστη τιμή της καμπύλης αναγκών αποθήκευσης, που στο παράδειγμα του Σχήματος 3.3 είναι περίπου 3 TWh και εμφανίζεται δύο φορές στο διάστημα των 11 ετών. Αντίστοιχα, οι περικοπές ΑΠΕ φθάνουν τις 5 TWh σε κάποιον μήνα (Σχ. 3.4), ενώ η συνολική απορριπτόμενη παραγωγή τους είναι εδώ 20% της συνολικής κατανάλωσης στα 11 έτη (επειδή είναι $fg = 1.2$).

Παρακάτω δίνεται το τμήμα του αλγορίθμου που εκτελεί την κύρια διαδικασία υπολογισμού της ποσότητας αναγκαίας χωρητικότητας αποθήκευσης του συστήματος.

```
X_AP_AIOL(J,I)=SYNTEL_AIOL*ΧΑΙΟΛ(J,I)
X_AP_FV(J,I)=SYNTEL_FV*ΧFV(J,I)
X_AP_ATH(J)=X_AP_AIOL(J,I)+X_AP_FV(J,I)
DIAFOR(J)=X_AP_ATH(J)-ΖΙΤΙΣΙ(J,I)
```

```
IF (DIAFOR(J).LT.0) THEN
```

```
    S(J+1)= S(J)+ DIAFOR(J)
    PER1(J)=PERR
```

```
ELSE
```

```
    IF (S(J)+DIAFOR(J).LT. SS) THEN
```

```
        S(J+1)=S(J)+DIAFOR(J)
        PER1(J)=PERR
```

```
    ELSE
```

```
        PER1(J)=S(J)+DIAFOR(J)
        S(J+1)=SS
```

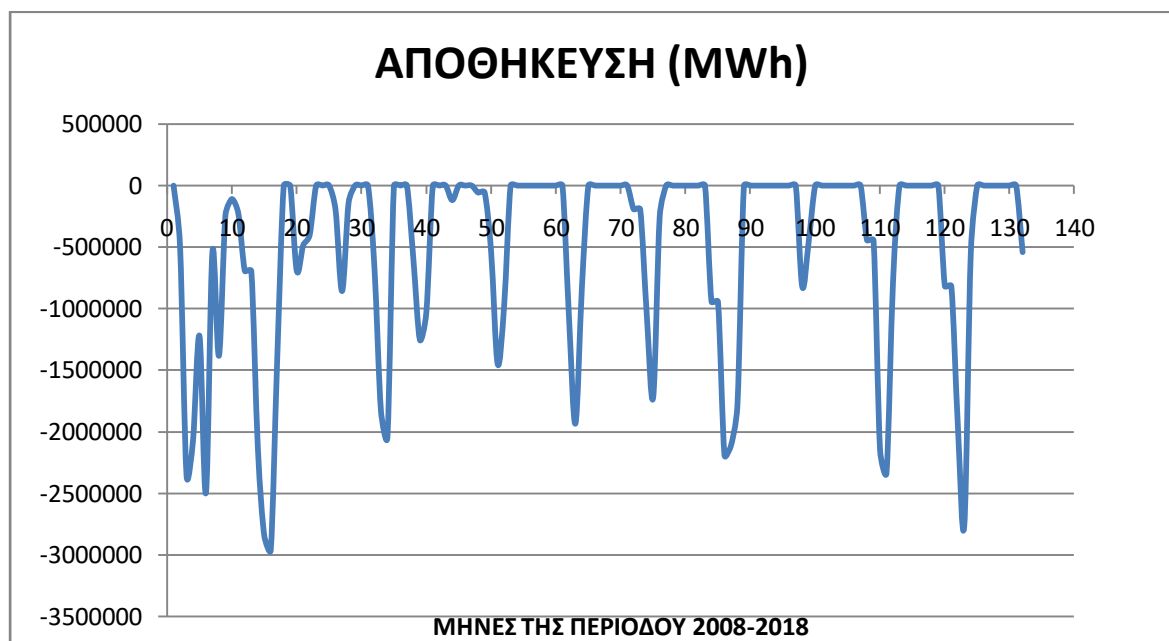
```
    END IF
```

```
END IF
```

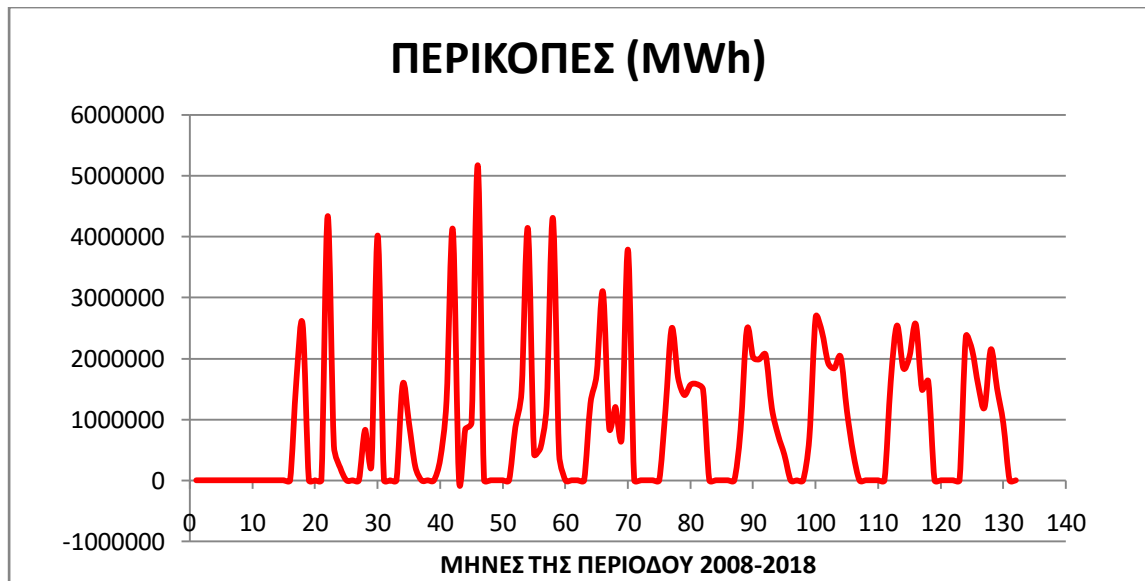
ΛΙΣΤΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ:

ΟΝΟΜΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ	ΕΞΗΓΗΣΗ	ΜΟΝΑΔΕΣ
DIAFOR()	ΜΗΝΙΑΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΚΑΙ Φ/Β ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ	MWh
ZITISI()	ΜΗΝΙΑΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΓΙΑ ΤΑ 11 ΕΤΗ (2008-2018)	MWh
PERR	ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΠΕΡΙΚΟΠΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΗΣ ΑΠΟ ΑΠΕ	MWh
PER1()	ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΠΕΡΙΚΟΠΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΗΣ ΑΠΟ ΑΠΕ	MWh
S()	ΜΗΝΙΑΙΑ ΕΛΛΕΙΨΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	MWh
SS	ΑΡΧΙΚΗ ΑΝΑΓΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	MWh
SYNTEL_AIOL	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΕΥΡΕΣΗ ΤΗΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΙΟΛΙΚΑ	-
SYNTEL_FV	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΕΥΡΕΣΗ ΤΗΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ Φ/Β	-

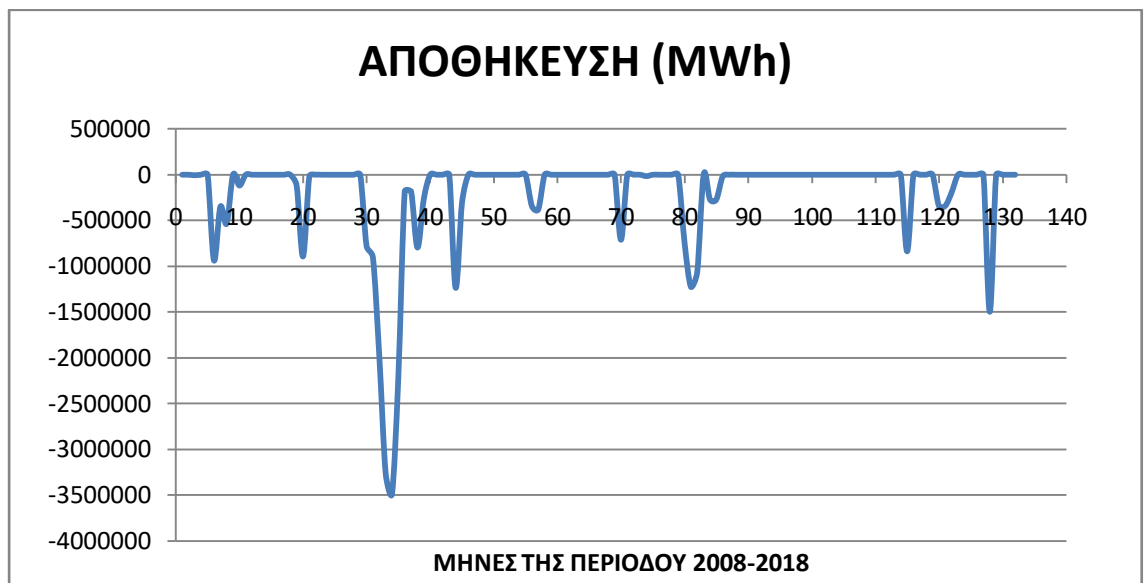
XAIOL()	ΜΗΝΙΑΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΑ 11 ΕΤΗ (2008-2018) ΜΕ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥ 1GWh	MWh
XFV()	ΜΗΝΙΑΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ Φ/Β ΓΙΑ ΤΑ 11 ΕΤΗ (2008-2018) ΜΕ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥ 1GWh	MWh
X_AP_AIOL	ΜΗΝΙΑΙΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΙΟΛΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ 11 ΕΤΗ	MWh
X_AP_FV	ΜΗΝΙΑΙΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ Φ/Β ΓΙΑ ΤΑ 11 ΕΤΗ	MWh
X_AP_ATH	ΜΗΝΙΑΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΙΟΛΙΚΑ ΚΑΙ Φ/Β ΓΙΑ ΤΑ 11 ΕΤΗ	MWh



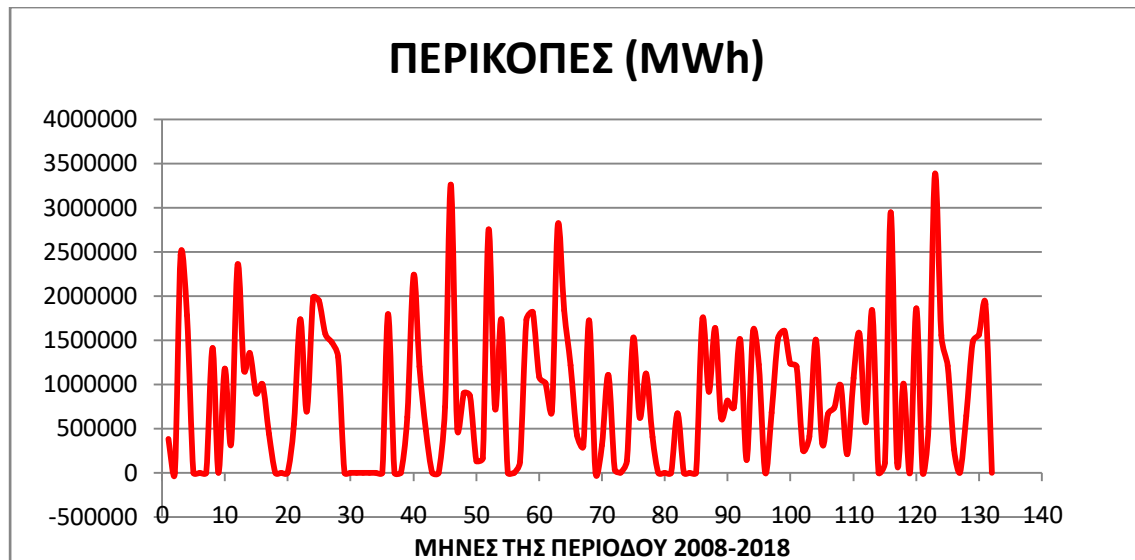
Σχήμα 3.3: Μηνιαίες ανάγκες αποθήκευσης ενέργειας για τα έτη 2008-2018 στην περίπτωση που $F_g=1.2$ και ποσοστό συμμετοχής αιολικών $A=20\%$.



Σχήμα 3.4: Μηνιαίες περικοπές ενέργειας για τα έτη 2008-2018 στην περίπτωση που $F_g=1.2$ και ποσοστό συμμετοχής αιολικών $A=20\%$.



Σχήμα 3.5: Μηνιαίες ανάγκες αποθήκευσης ενέργειας για τα έτη 2008-2018 στην περίπτωση που $F_g=1.2$ και ποσοστό συμμετοχής αιολικών $A=80\%$.



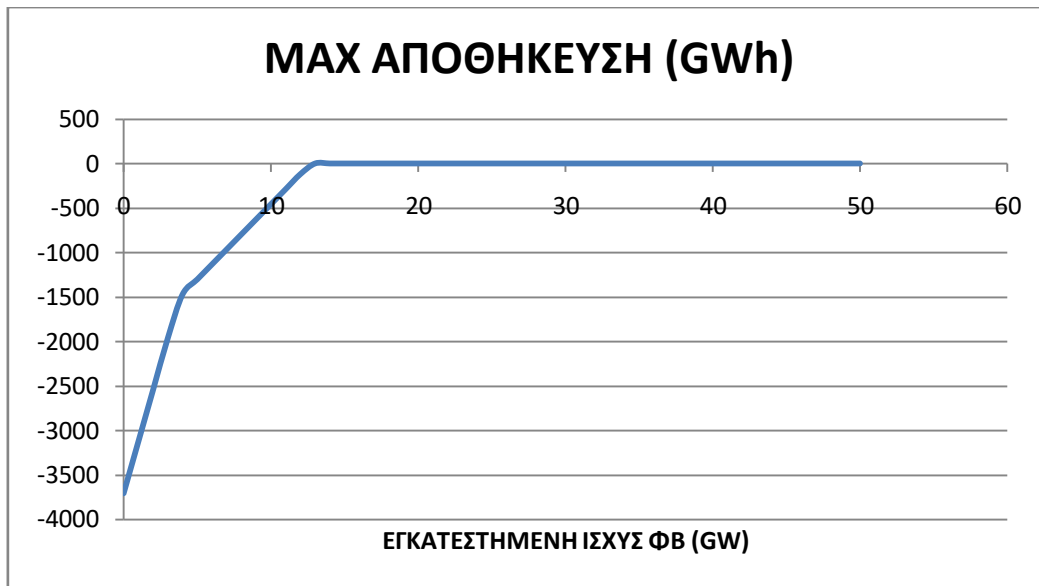
Σχήμα 3.6: Μηνιαίες περικοπές ενέργειας για τα έτη 2008-2018 στην περίπτωση που $F_g=1.2$ και ποσοστό συμμετοχής αιολικών $A=80\%$.

Για το ίδιο F_g και συμμετοχή, αλλά πολύ μεγαλύτερη συμμετοχή των αιολικών σταθμών 80% (αντί για 20%), από τα διαγράμματα 3.5 και 3.6 μπορεί να παρατηρηθεί ότι η αναγκαία χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας είναι λίγο μεγαλύτερη περίπου 3,5 TWh, αν και προκύπτει μόνο μία φορά στη διάρκεια των 11 ετών, ενώ σε όλους τους άλλους μήνες είναι λιγότερη από 1,5 TWh. Οι μέγιστες περικοπές είναι μικρότερες, περίπου 3,5 TWh, επομένως η σχετική καμπύλη είναι λίγο ομαλότερη, αφού οι συνολικές απορρίψεις είναι και πάλι 20% της κατανάλωσης. Είναι φανερό ότι η αναγκαία αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος εξαρτάται σημαντικά από την τιμή του συντελεστή A , δηλαδή το μίγμα εγκατεστημένων αιολικών και Φ/Β μονάδων.

3.3.2 Το δεύτερο στάδιο του κώδικα

Στο δεύτερο στάδιο του κώδικα η παραπάνω διαδικασία εκτελείται επαναληπτικά, για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς εγκατεστημένης Αιολικής και Φωτοβολταϊκής Ισχύος από 0 έως 50 GW, και λαμβάνονται τέσσερα αποτελέσματα. Η ισχύς των Αιολικών και Φ/Β, η μέγιστη αναγκαία χωρητικότητα αποθήκευσης, καθώς και ο συντελεστής F_g , που αυτή την φορά υπολογίζεται και δεν λαμβάνεται ως δεδομένο.

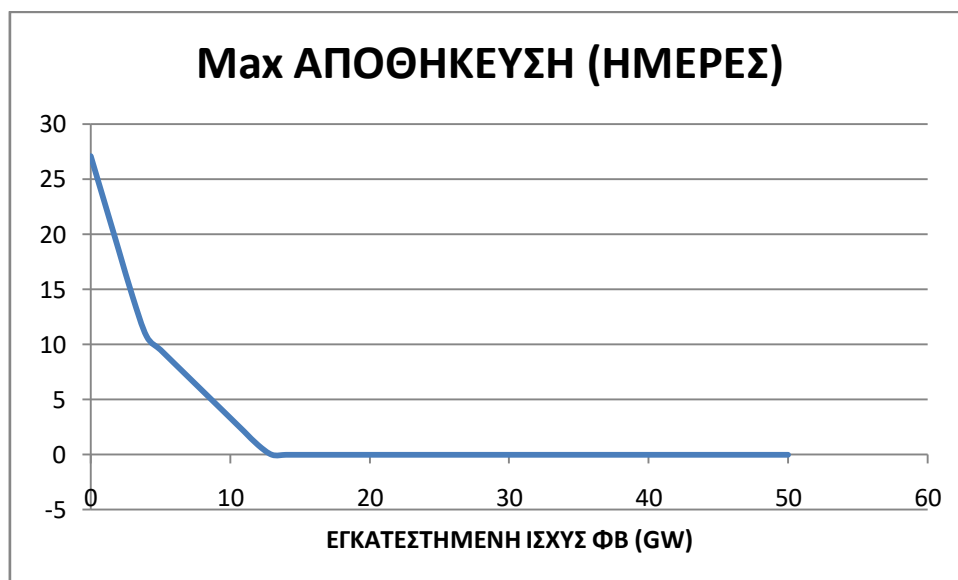
Ενδεικτικά, για εγκατεστημένη αιολική ισχύ 30 GW, προκύπτει το διάγραμμα του Σχήματος 3.7, όπου στον οριζόντιο άξονα είναι η εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β, ενώ στο κατακόρυφο άξονα η ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας σε MWh.



Σχήμα 3.7: Η μέγιστη αποθήκευσης ενέργειας (GWh) σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ Φ/Β (GW) για εγκατεστημένη ισχύ αιολικών 30GW.

Όπως αναμενόταν παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς των Φ/Β, δεδομένου ότι τα 30 GW εγκατεστημένης ισχύος αιολικών είναι ήδη υψηλή τιμή, από ένα σημείο και μετά, περίπου στα 12 GW Φ/Β, οι ανάγκες αποθήκευσης ενέργειας μηδενίζονται. Ενώ, για 30 GW αιολικών και 0 GW Φ/Β η μέγιστη ανάγκη αποθήκευσης είναι περίπου 3,5 TWh.

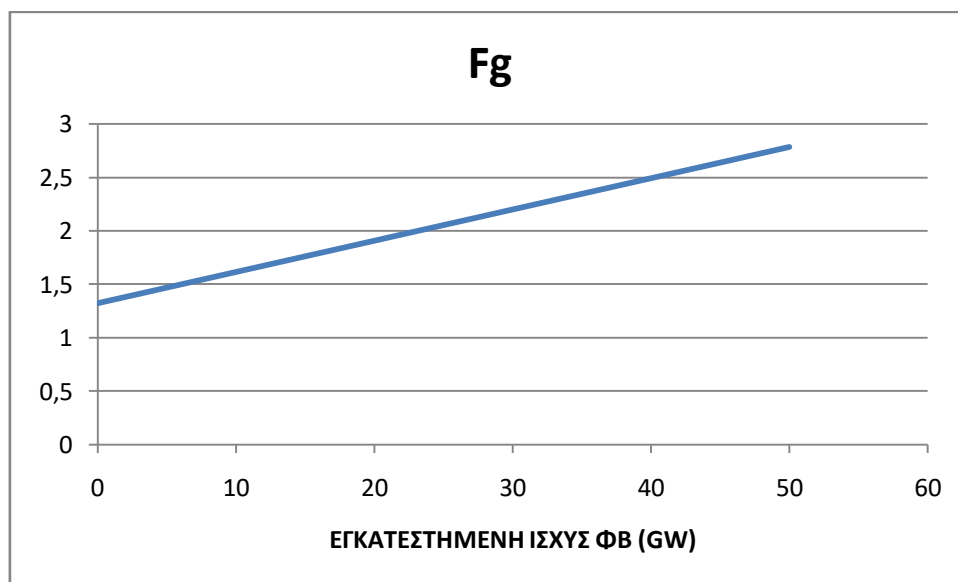
Λαμβάνοντας υπόψιν τη ζήτηση της μέσης ημέρας (136,9863 GWh) η αναγκαία χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να εκφραστεί και σε μέσες ημέρες κατανάλωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.



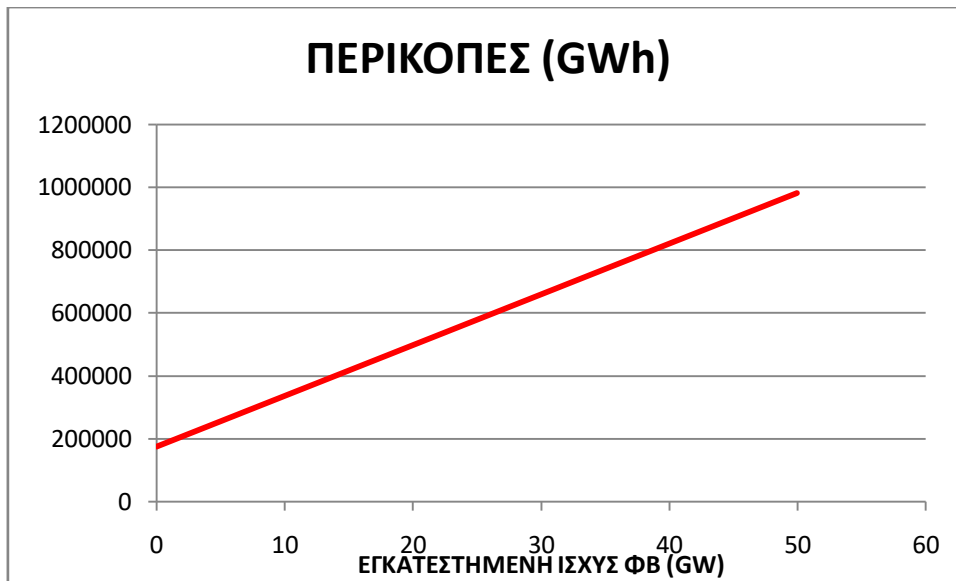
Σχήμα 3.8: Η μέγιστη ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας (σε ημέρες) σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ Φ/Β (GW) για εγκατεστημένη ισχύ αιολικών 30GW

Διαπιστώνεται έτσι, ότι οι ανάγκες για αποθηκευμένη ενέργεια αυξάνουν απότομα εάν η εγκατεστημένη ισχύς των Φ/Β δεν είναι επαρκής. Ήδη, για μείωση κατά 2 GW (από 12 σε 10 GW), οι ανάγκες αποθήκευσης αυξάνουν από το μηδέν σε περίπου 3 ημέρες μέσης κατανάλωσης, που πολύ δύσκολα μπορούν να εξασφαλισθούν σε ένα μελλοντικό σύστημα της Χώρας.

Στο Σχήμα 3.9 μπορεί να παρατηρηθεί η σχέση μεταξύ της εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β και του παράγοντα F_g , και πάλι για εγκατεστημένη αιολική ισχύ 30GW. Όπως αναμένεται, η τιμή του F_g αυξάνει γραμμικά με την εγκατεστημένη ισχύ Φ/Β και φθάνει περίπου στο 1,7 όταν μηδενίζονται σχεδόν οι ανάγκες αποθήκευσης ενέργειας στο σύστημα. Ανάλογη είναι και η συμπεριφορά των συνολικών περικοπών της παραγωγής ΑΠΕ, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10, αφού αντιστοιχούν στο $(1-F_g)$ της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.

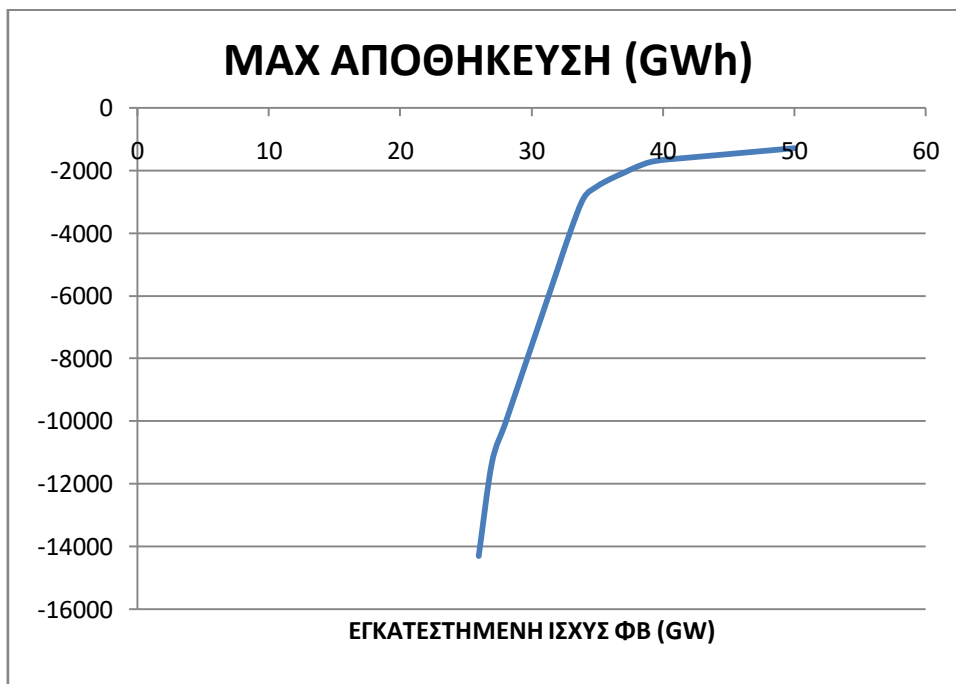


Σχήμα 3.9: Η σχέση μεταξύ του παράγοντα F_g και της εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β (GW) για εγκατεστημένη ισχύς αιολικών 30GW.



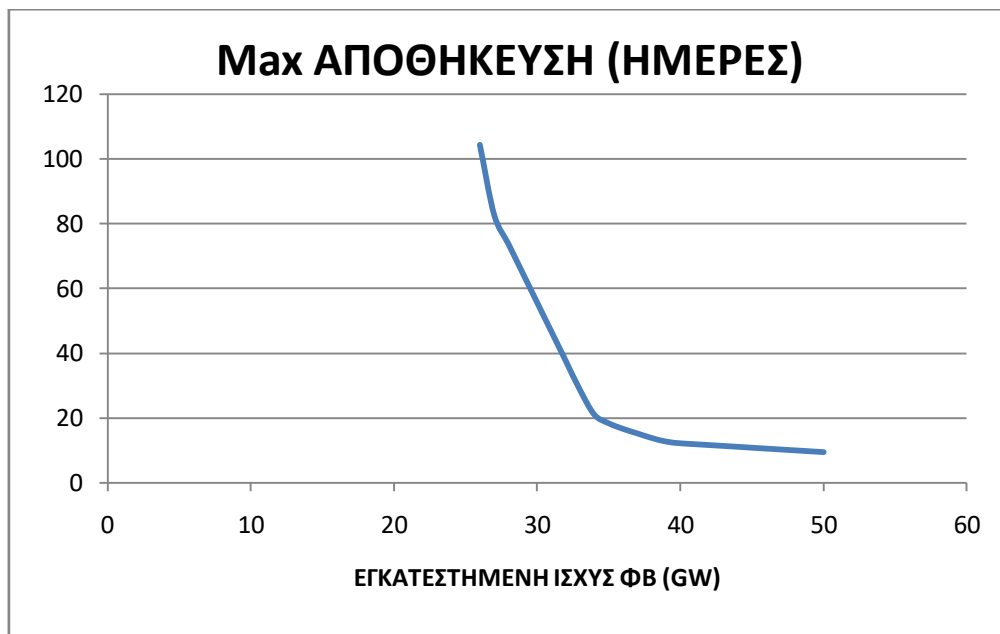
Σχήμα 3.10: Οι συνολικές περικοπές ενέργειας σε GWh για το διάστημα των 11 ετών 2008-2018 σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ ΦΒ σε GW για εγκατεστημένη αιολική ισχύ 30 GW.

Στο Σχήμα 3.11 που ακολουθεί δίδεται η ευκαιρία να μελετηθεί η ανάγκη ικανότητας αποθήκευσης ενέργειας σε περίπτωση που η εγκατεστημένη ισχύς είναι αρκετά λιγότερη σε σχέση με το Σχήμα 3.7, δηλαδή όταν έχουμε μόνο 5GW εγκατεστημένης αιολικής ισχύος, για όλα τα F_g μεγαλύτερα ή ίσα του 1.



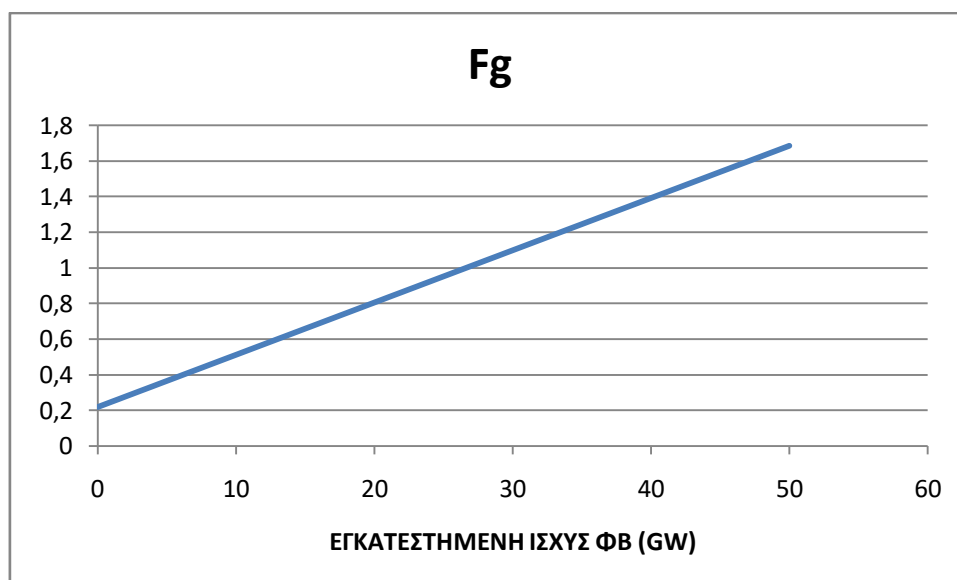
Σχήμα 3.11: Η μέγιστη αποθήκευσης ενέργειας (GWh) σε σχέση με την εγκατεστημένη ενέργεια Φ/Β (GW) για εγκατεστημένη ισχύ αιολικών 5GW, για F_g μεγαλύτερο ή ίσο του 1.

Σε αυτήν την περίπτωση, προκύπτει ότι οι ανάγκες αποθήκευσης ενέργειας δεν μηδενίζονται, όσο μεγάλη και αν είναι η εγκατεστημένη ισχύς των Φ/Β (έως 50 GW), και παραμένουν της τάξης των 10 ημερών, δηλαδή μη ρεαλιστικές.



Σχήμα 3.12: Η μέγιστη ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας (σε ημέρες) σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ Φ/Β (GW) για εγκατεστημένη ισχύ αιολικών 5GW για τα F_g μεγαλύτερα ή ίσα του 1.

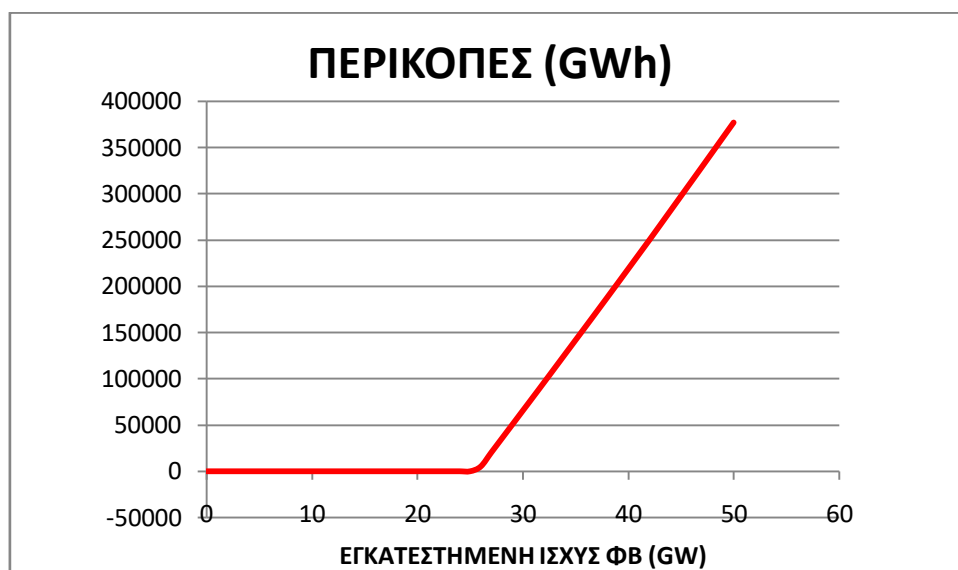
Στη συνέχεια, στο Σχήμα 3.13 σχεδιάζεται η γραμμική συσχέτιση του F_g με την εγκατεστημένη ισχύ Φ/Β για εγκατεστημένη αιολική ισχύ 5GW.



Σχήμα 3.13: Η σχέση μεταξύ του παράγοντα F_g και της εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β (GW) για εγκατεστημένη ισχύς αιολικών 5GW.

Παρατηρείται ότι, το διάγραμμα του σχήματος 3.13 έχει την ίδια μορφή και συμπεριφορά με αυτό του Σχήματος 3.9 με τη διαφορά να φαίνεται στην αρχική και τελική τιμή του F_g , οι οποίες όπως είναι λογικό, μιας και η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι λιγότερη, κυμαίνονται από περίπου 0,2 έως περίπου 1,7.

Τέλος, στο Διάγραμμα του Σχήματος 3.14 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι συνολικές περικοπές ενέργειας για τα ένδεκα έτη 2008-2018 σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ ΦΒ για εγκατεστημένη αιολική ισχύ 5 GW.



Σχήμα 3.14: Οι συνολικές περικοπές ενέργειας σε GWh για το διάστημα των 11 ετών 2008-2018 σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ ΦΒ σε GW για εγκατεστημένη αιολική ισχύ 5 GW.

Από το Διάγραμμα του Σχήματος 3.14, παρατηρείται ότι για τις τιμές του F_g μικρότερες του 1, δηλαδή για εγκατεστημένη ισχύ ΦΒ μικρότερη των 26 GW, όπως αναμενόταν δεν υπάρχουν περικοπές. Συγκρίνοντας, μάλιστα, με το Διάγραμμα του Σχήματος 3.10 μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι συνολικές περικοπές για τις διάφορες τιμές της εγκατεστημένης ισχύς ΦΒ, είναι τώρα πολύ μικρότερες. Αυτό είναι, λογικό, μιας και στη δεύτερη περίπτωση η εγκατεστημένη αιολική ισχύς είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση του Σχήματος 3.10.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν σύμφωνα με τα υποθετικά σενάρια που λαμβάνονται στην παρούσα εργασία.

Πιο συγκεκριμένα διερευνάται ο βέλτιστος συνδυασμός αναγκαίας εγκατεστημένης ισχύος Αιολικών και Φ/Β και του βέλτιστου παράγοντα Fg (όπως αυτός ορίστηκε στο κεφάλαιο 3), με βάση τις πραγματικές χρονοσειρές ζήτησης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για έντεκα έτη (2008-2018), έτσι ώστε να μπορούν να καλυφθούν, με ρεαλιστικό τρόπο, οι ανάγκες του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή για συνολική αποθηκευτική ικανότητα που κυμαίνεται από 0 -3 μέρες ημέρες κατανάλωσης.

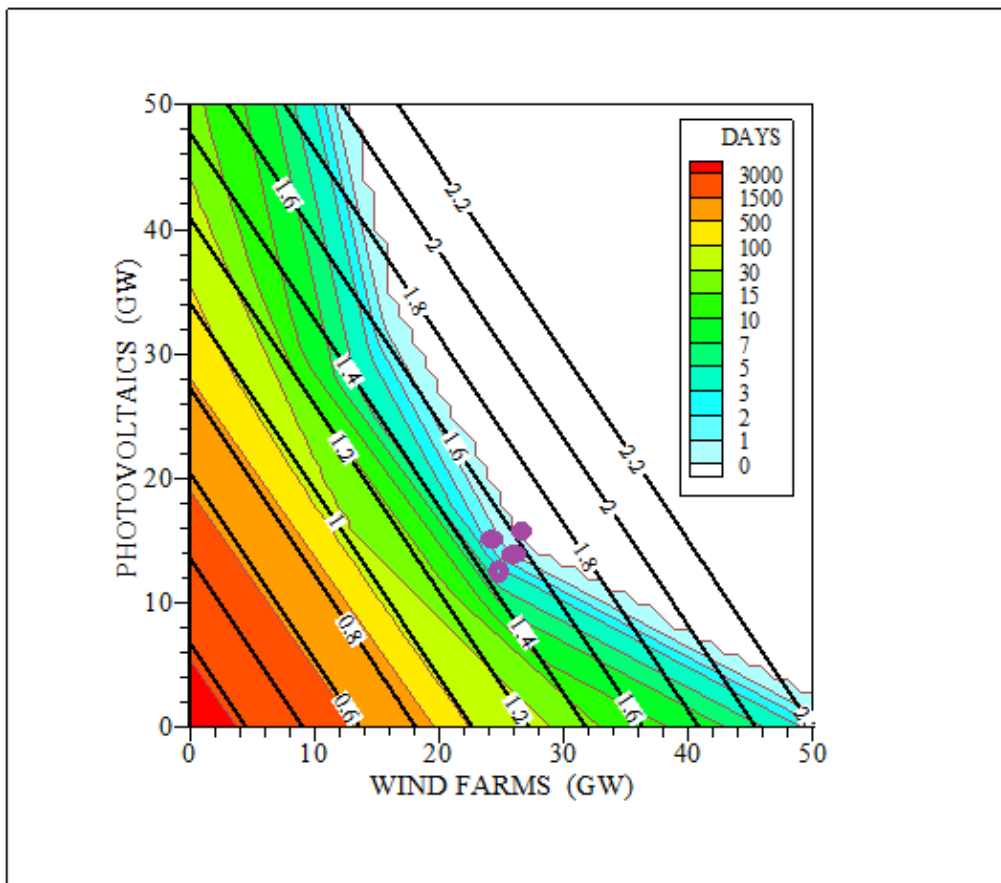
Για τους βέλτιστους αυτούς συνδυασμούς υπολογίζονται και σχεδιάζονται οι καμπύλες διάρκειας των περικοπών της παραγωγής ΑΠΕ, προκειμένου να διερευνηθούν οι δυνατότητες αξιοποίησης τους σε άλλες εφαρμογές.

Στην συνέχεια, διερευνάται η διακύμανση της αναγκαίας εγκατεστημένης ισχύος Αιολικών και Φ/Β, καθώς και του παράγοντα Fg, ανάλογα με την ενδεχόμενη μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας από τις μονάδες αυτές, εάν επικρατήσουν δυσμενέστερες ή ευνοϊκότερες καιρικές συνθήκες για μια σειρά ετών. Για τη δημιουργία των σεναρίων αυτών, επιλέγονται συγκεκριμένα έτη από τα 11 διαθέσιμα, κατά τα οποία η παραγωγή Αιολικών ή Φ/Β ή και των δύο γίνεται μέγιστη ή ελάχιστη, και θεωρείται ότι το έτος αυτό επαναλαμβάνεται 11 φορές, καλύπτοντας δηλαδή όλη την περίοδο μελέτης του συστήματος. Τα διάφορα σενάρια που μελετήθηκαν, καθώς και τα αντίστοιχα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.2 του υποκεφαλαίου 4.3.

4.2 Σενάριο Α.

4.2.1 Διερεύνηση βέλτιστου συνδυασμού εγκατεστημένης ισχύος Αιολικών και Φ/Β για την κάλυψη των αναγκών του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε εκτελείται και πάλι επαναληπτικά, μοντελοποιώντας το εθνικό σύστημα για διάστημα 11 ετών (2008-2018), με βάση τη διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.3.2, αυτή τη φορά όμως μεταβάλλοντας την εγκατεστημένη ισχύ τόσο των Αιολικών όσο και των Φ/Β σταθμών παραγωγής. Έτσι, προκύπτουν οι ισοσταθμικές καμπύλες του διαγράμματος στο Σχήμα 4.1.



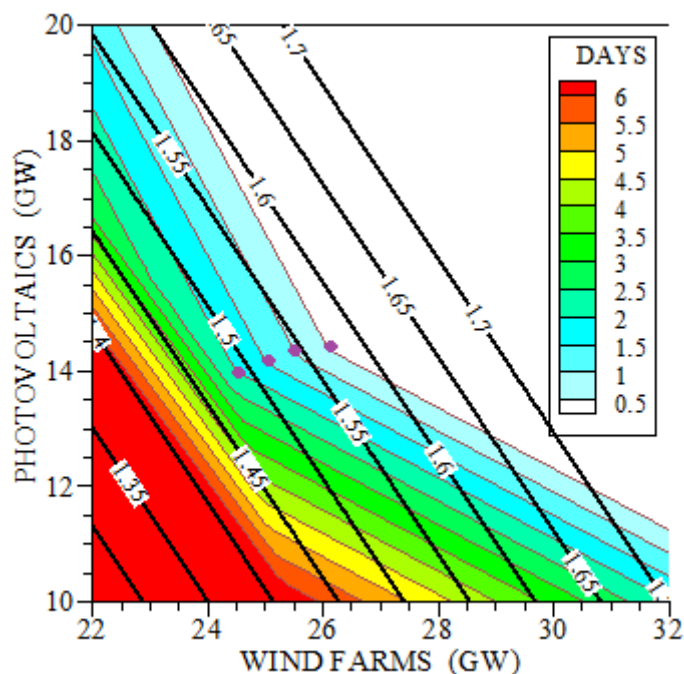
Σχήμα 4.1: Συσχέτιση των αναγκών εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ και αποθηκευτικής ικανότητας του ελληνικού συστήματος, καθώς και του παράγοντα F_g στο Σενάριο Α.

Στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος τίθεται η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων σε GW, ενώ στον κατακόρυφο η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών, επίσης σε GW. Επίσης, οι διαγώνιες μαύρες γραμμές δείχνουν την τιμή του παράγοντα F_g , ενώ οι χρωματισμένες ισοσταθμικές καμπύλες αντιστοιχούν στις ανάγκες αποθηκευμένης ενέργειας, μετρούμενες σε ενέργεια μέσω ημερών κατανάλωσης.

Όπως είναι αναμενόμενο, παρατηρείται η μείωση των ημερών αποθηκευμένης ενέργειας, καθώς αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς αιολικών και φωτοβολταϊκών, και συνάμα και ο παράγοντας F_g . Πιο συγκεκριμένα, θα αναλύσουμε ειδικότερα τη ρεαλιστική περιοχή που ενδιαφέρει, σύμφωνα με τις εκτιμώμενες σημερινές και μελλοντικές δυνατότητες αποθήκευσης ενέργειας, κυμαίνεται από 0-3 ημέρες. Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.1 τα τέσσερα μωβ σημάδια υποδεικνύουν ενδεικτικά τους βέλτιστους συνδυασμούς εγκατεστημένης αιολικής και φωτοβολταϊκής ισχύος για ανάγκες μέγιστης αποθηκευμένης ενέργειας 0,1,2,3 ημερών αντίστοιχα, για τους οποίους ελαχιστοποιείται η τιμή του παράγοντα f_g , επομένως και της συνολικής παραγωγής και εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ στο σύστημα.

Για μεγαλύτερη ακρίβεια, η υπολογιστική διαδικασία επαναλαμβάνεται με μικρότερα βήματα, καλύπτοντας μικρότερο εύρος ισχύων (περιοχή 22GW – 32GW για την εγκατεστημένη ισχύ των Αιολικών πάρκων και 10GW – 20GW για την εγκατεστημένη ισχύ των Φ/Β) και προκύπτει το διάγραμμα του Σχήματος 4.2.

Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ευκρινέστερα η περιοχή ενδιαφέροντος και λαμβάνονται τα εξής αποτελέσματα, για 0.5, 1, 1.5 και 2 μέσες ημέρες αποθηκευτικής ικανότητας:



Σχήμα 4.2: Ακριβέστερη συσχέτιση των αναγκών εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ και αποθηκευτικής ικανότητας του ελληνικού συστήματος, καθώς και του παράγοντα F_g στο Σενάριο Α.

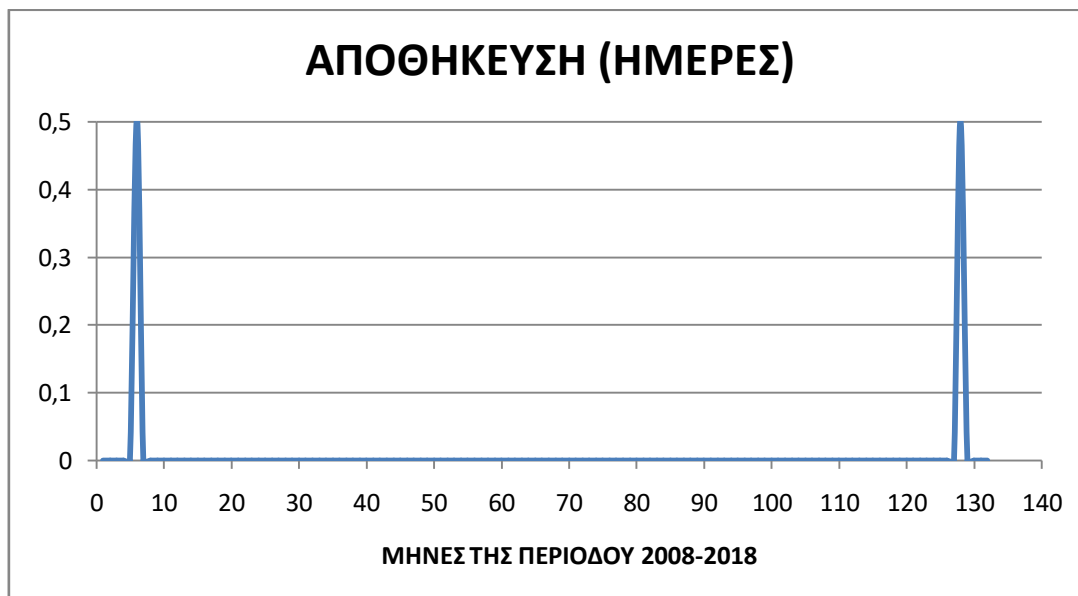
Οι βέλτιστοι συνδυασμοί σε σχέση με την αποθηκευτική ικανότητα όπως προέκυψαν από το Διάγραμμα του Σχήματος 4.2 συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.1: Παρουσίαση των βέλτιστων συνδυασμών σε σχέση με την αποθηκευτική ικανότητα.

	Αποθηκευτική ικανότητα (μέσες ημέρες)			
	0.5	1	1.5	2
ΑΙΟΛΙΚΑ (GW)	26,1	25,5	25,1	24,6
Φ/Β (GW)	14,4	14,3	14,2	14,0
A (%)	73,2	72,8	72,6	72,3
F_g	1,57	1,54	1,52	1,49
ΑΠΟΡΡΙΨΕΙΣ (GWh)	313.499,754	296.999,804	287.279,934	271.369,450

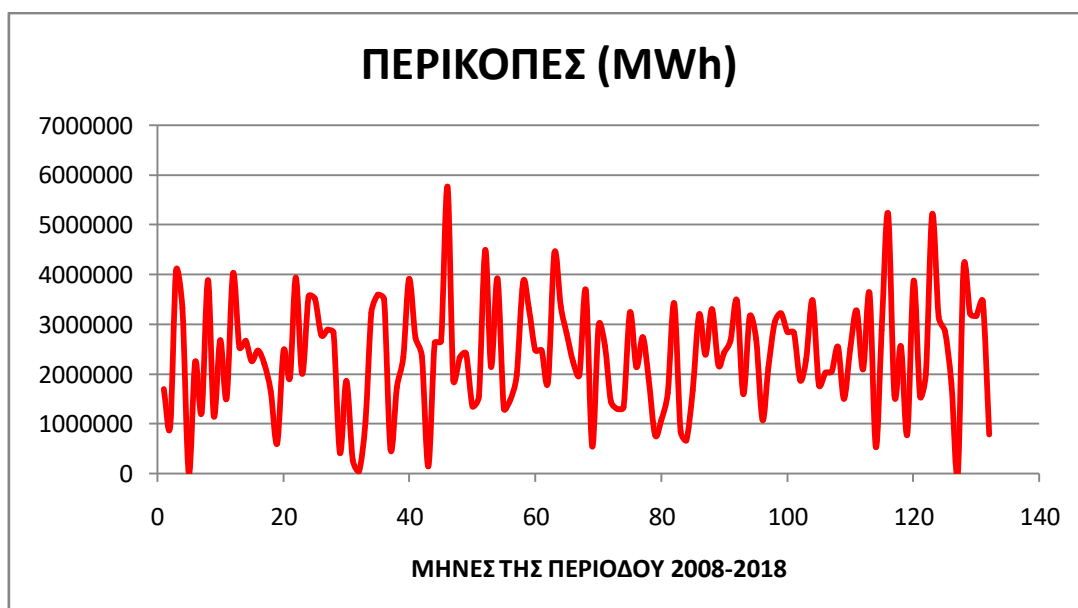
Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί μία σειρά διαγραμμάτων που αφορούν τις μηνιαίες ανάγκες αποθηκευμένης ενέργειας και τις μηνιαίες περικοπές ΑΠΕ, στο διάστημα 2008-2018, για τους βέλτιστους συνδυασμούς εγκατεστημένης ισχύος στις τέσσερις παραπάνω περιπτώσεις.

Συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα του Σχήματος 4.3 βλέπουμε τις μηνιαίες ανάγκες αποθηκευμένης ενέργειας, στο διάστημα 2008-2018, για μέγιστη ανάγκη 0.5 ημερών. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι ανάγκες χρησιμοποίησης αποθηκευμένης ενέργειας φθάνουν τις 0.5 ημέρες μόνο σε δύο μήνες σε όλο το διάστημα των 11 ετών, ενώ σε όλους τους υπόλοιπους είναι ελάχιστες.



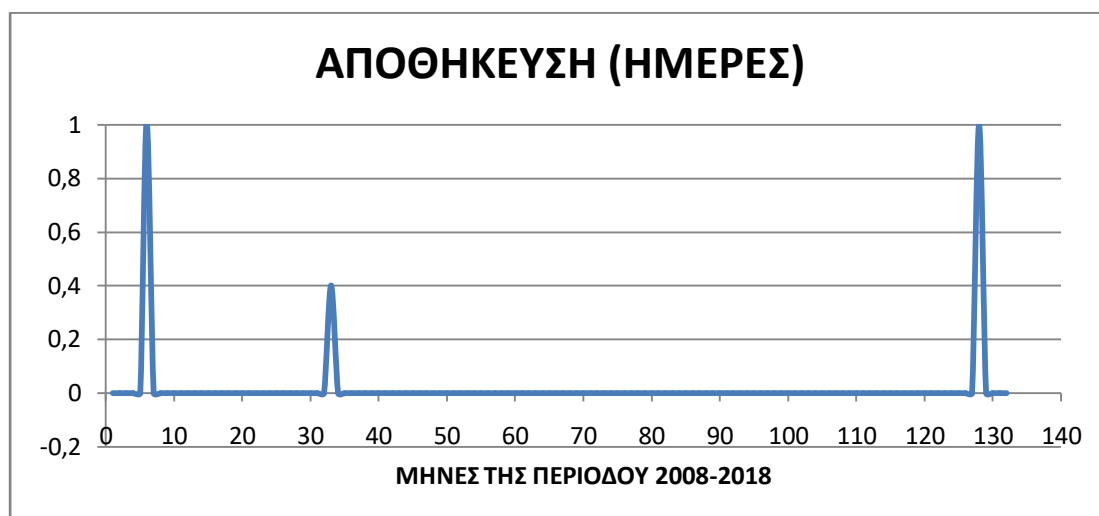
Σχήμα 4.3: Μηνιαίες ανάγκες αποθηκευμένης ενέργειας (ημέρες) στο διάστημα 2008-2018, για μέγιστη ανάγκη αποθήκευσης 0.5 ημερών.

Στη συνέχεια, στο Διάγραμμα του Σχήματος 4.4 φαίνονται οι μηνιαίες περικοπές ενέργειας σε MWh, στο διάστημα 2008-2018, για μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης 0.5 ημερών. Η καμπύλη είναι αρκετά ομοιόμορφη, καθώς πρόκειται για τη βέλτιστη δυνατή λύση, με τη μικρότερη δυνατή τιμή του Fg.



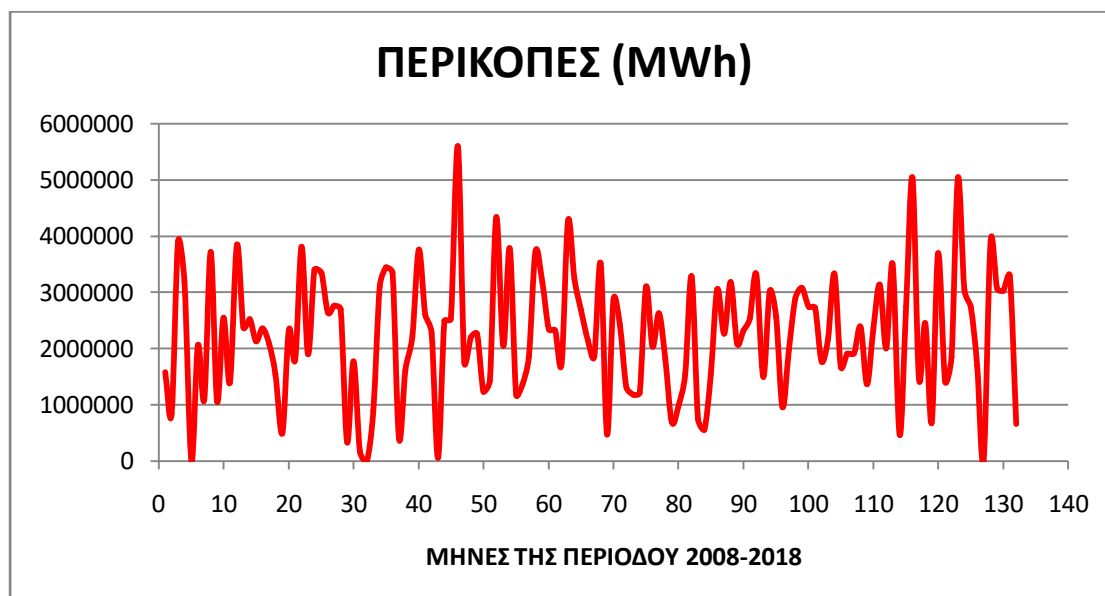
Σχήμα 4.4: Μηνιαίες περικοπές παραγωγής ΑΠΕ (MWh) στο διάστημα 2008-2018, για μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης 0.5 ημερών.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.5 φαίνονται οι μηνιαίες ανάγκες αποθηκευμένης ενέργειας, στο διάστημα 2008-2018, για μέγιστη ανάγκη αποθηκευμένης ενέργειας 1 ημερών. Και εδώ παρατηρείται ότι, η ανάγκη τόσο μεγάλης αποθήκευσης εμφανίζεται μόνο σε 3 από τους 132 μήνες που εξετάζονται.



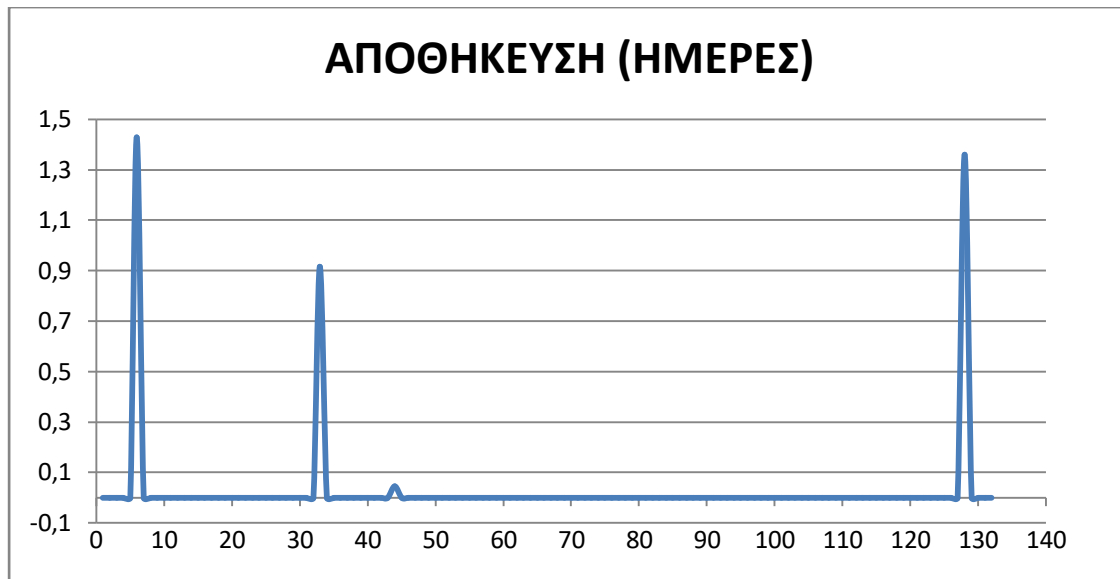
Σχήμα 4.5: Μηνιαίες ανάγκες αποθηκευμένης ενέργειας (ημέρες) στο διάστημα 2008-2018, για μέγιστη ανάγκη αποθήκευσης 1 ημερών.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.6 σχεδιάζεται η αντίστοιχη καμπύλη μηνιαίων περικοπών ενέργειας, για μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης 1 ημερών.



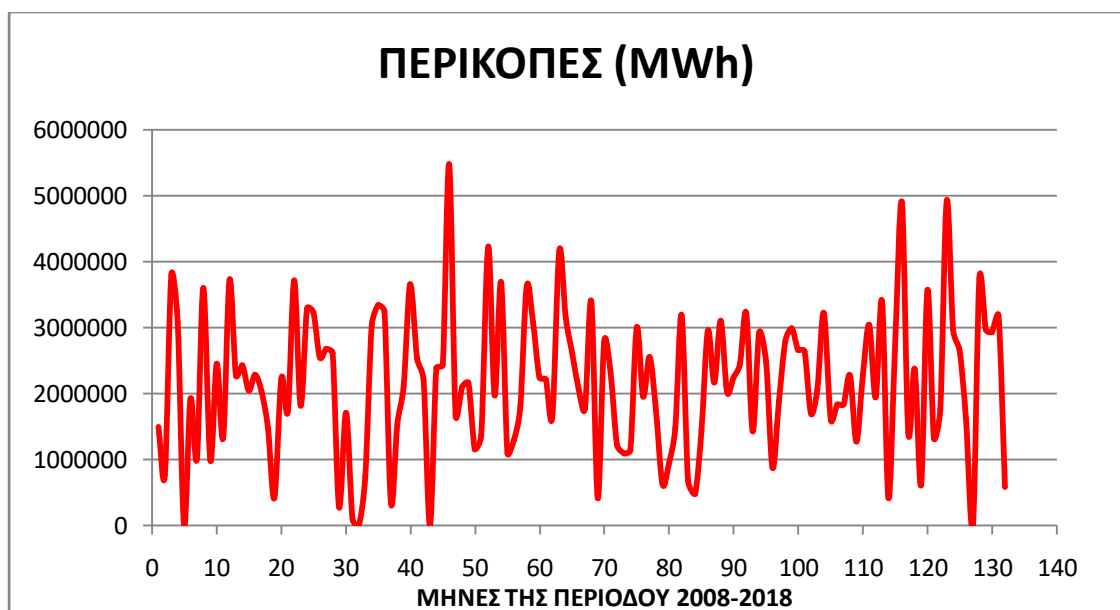
Σχήμα 4.6: Μηνιαίες περικοπές παραγωγής ΑΠΕ(MWh) στο διάστημα 2008-2018, για μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης 1 ημερών.

Στο Διάγραμμα του Σχήματος 4.7, βλέπουμε τις μηνιαίες ανάγκες αποθηκευμένης ενέργειας, στο διάστημα 2008-2018, για μέγιστη ανάγκη 1.5 ημερών, όπου και πάλι η μέγιστη αποθηκευτική ανάγκη προκύπτει μόνο τρεις φορές.



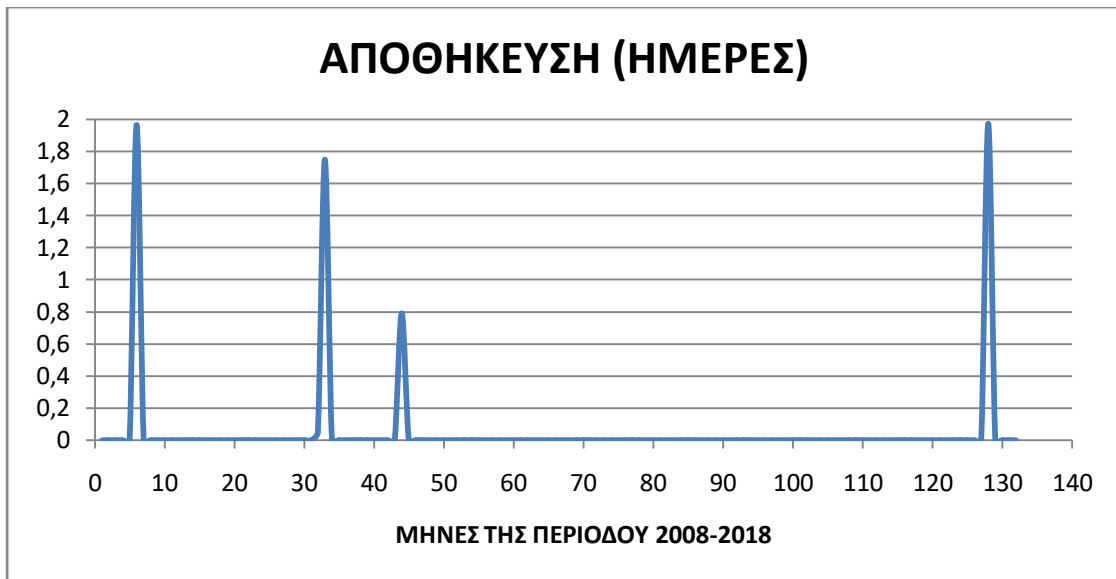
Σχήμα 4.7: Μηνιαίες ανάγκες αποθηκευμένης ενέργειας(ημέρες) στο διάστημα 2008-2018, για μέγιστη ανάγκη αποθηκευμένης ενέργειας 1 ημερών.

Στο Σχήμα 4.8 δίνεται για λόγους πληρότητας και το αντίστοιχο διάγραμμα μηνιαίων περικοπών της παραγωγής ΑΠΕ.



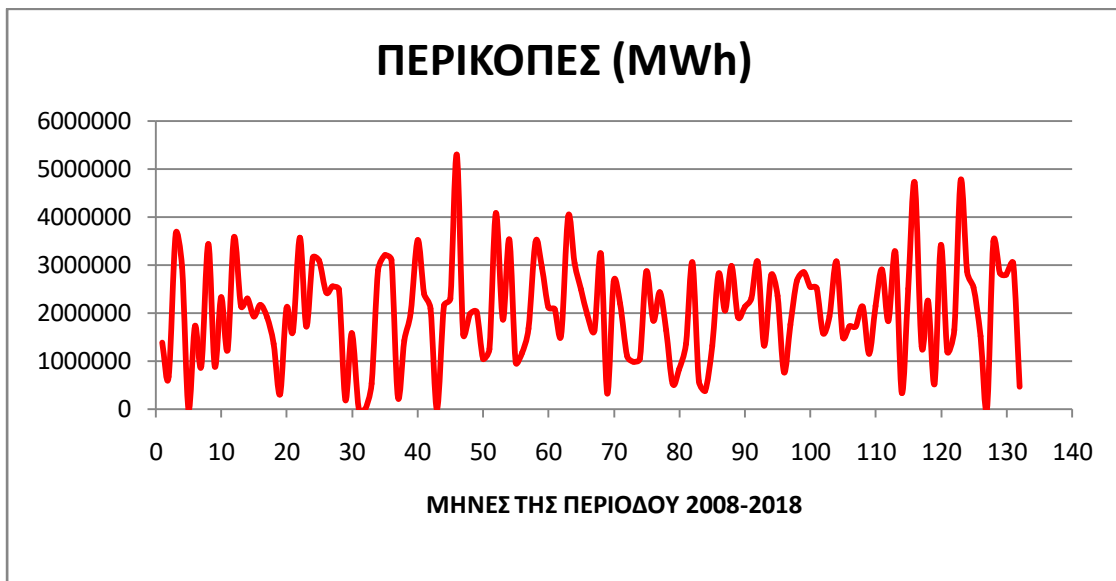
Σχήμα 4.8: Μηνιαίες περικοπές παραγωγής ΑΠΕ (MWh) στο διάστημα 2008-2018, για μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης 1.5 ημερών.

Τέλος, στο Διάγραμμα του Σχήματος 4.9, δίνονται οι μηνιαίες ανάγκες αποθηκευμένης ενέργειας, στο διάστημα 2008-2018, για μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα 2 ημερών. Η ανάγκη χρήσης μεγάλης ποσότητας αποθηκευμένης ενέργειας εμφανίζεται και εδώ μόνο 3-4 φορές (μήνες) κατά τη διάρκεια των 11 ετών. Όμως, σε αυτές τις περιπτώσεις/συμβάντα δεν θα υπάρχει άλλος τρόπος επίτευξης της ασφάλειας εφοδιασμού του συστήματος που θα βασίζεται 100% σε παραγωγή από ΑΠΕ.



Σχήμα 4.9: Μηνιαίες ανάγκες αποθηκευμένης ενέργειας (ημέρες) στο διάστημα 2008-2018, για μέγιστη ανάγκη αποθηκευμένης ενέργειας 2 ημερών.

Στο Σχήμα 4.10 δίνεται και η αντίστοιχη καμπύλη μηνιαίων περικοπών της παραγωγής ΑΠΕ.



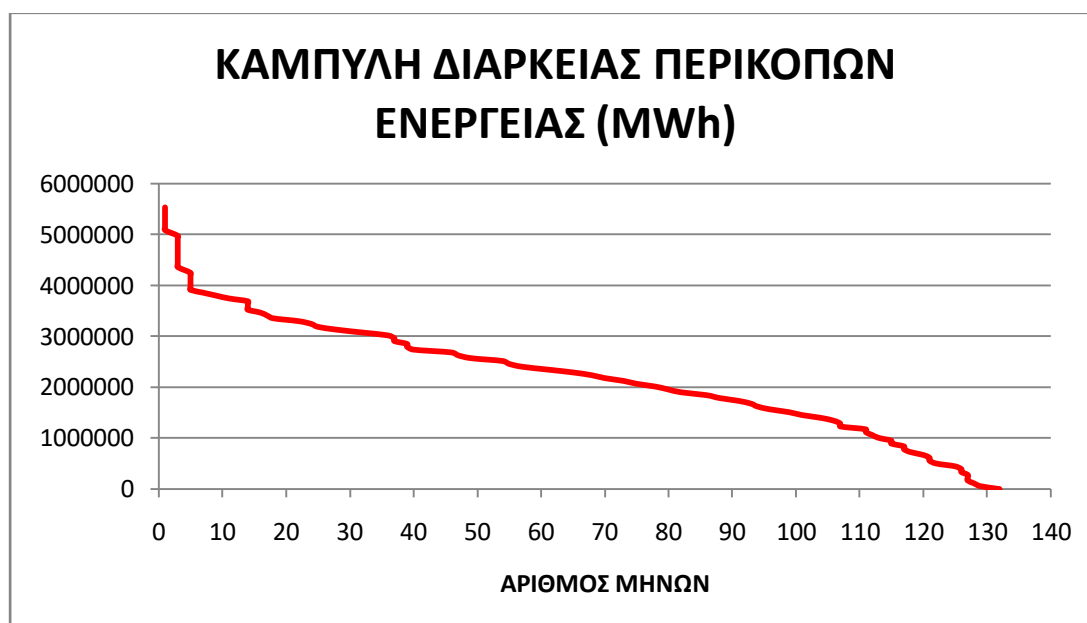
Σχήμα 4.10: Μηνιαίες περικοπές παραγωγής ΑΠΕ (MWh) στο διάστημα 2008-2018, για μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης 2 ημερών.

4.2.2 Οι καμπύλες διάρκειας των περικοπών ενέργειας για τους βέλτιστους συνδυασμούς εγκατεστημένης ισχύος του σεναρίου Α.

Στο κεφάλαιο 4.2.1 βρέθηκαν οι βέλτιστοι συνδυασμοί εγκατεστημένης ισχύος αιολικών και φωτοβολταϊκών για μέγιστη ανάγκη αποθήκευσης 0.5, 1, 1.5 και 2 ημερών, που δίνονται στον Πίνακα 4.1. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι αντίστοιχες 4 καμπύλες διάρκειας των περικοπών παραγωγής ΑΠΕ σε αυτές τις περιπτώσεις για το διάστημα 2008-2018. Αυτό έχει ως σκοπό την εκτίμηση της δυνατότητας αξιοποίησης αυτών των ποσών ενέργειας σε άλλες εφαρμογές, όπως για την παραγωγή υδρογόνου ή βιοκαυσίμων.

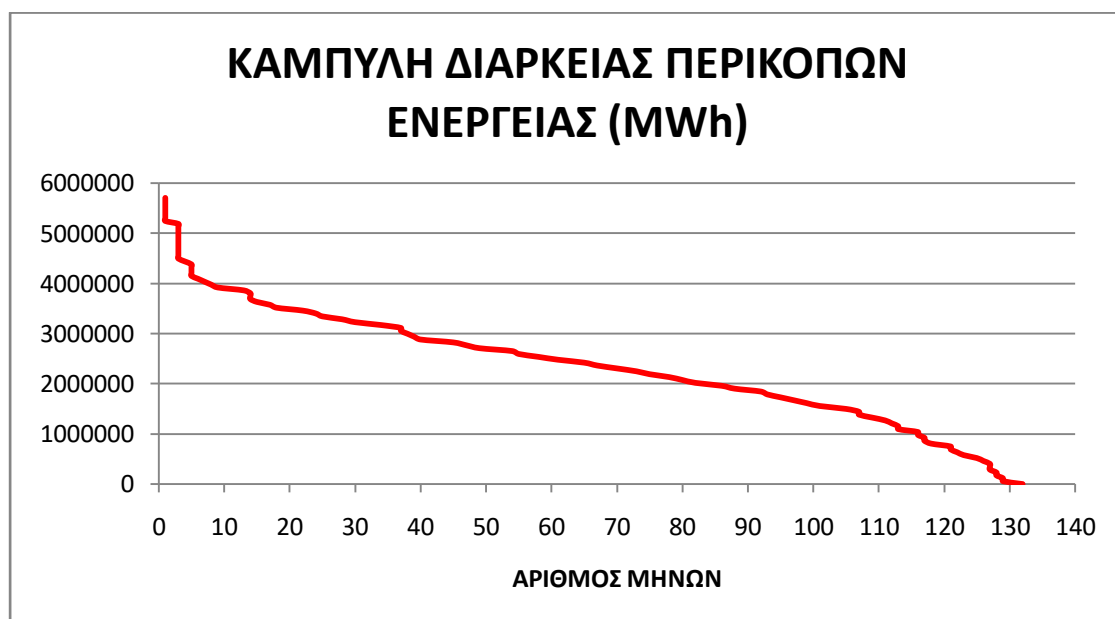
Οι καμπύλες διάρκειας δημιουργούνται με έναν αλγόριθμο ως εξής. Για διάφορες τιμές των μηνιαίων περικοπών υπολογίζεται ο αριθμός των μηνών του διαστήματος 2008-2018, στους οποίους οι περικοπές είναι μεγαλύτερες ή ίσες των τιμών αυτών. Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.11 σχεδιάζεται η καμπύλη διάρκειας των περικοπών ενέργειας για τον βέλτιστο συνδυασμό εγκατεστημένης ισχύος για μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης 0.5 ημερών. Στον οριζόντιο άξονα παρατίθενται οι μήνες του χρονικού διαστήματος, ενώ στον κατακόρυφο άξονα οι μηνιαίες περικοπές ενέργειας σε MWh. Για την περίπτωση αυτή, οι συνολικές περικοπές ενέργειας στα 11 έτη προκύπτει ότι ανέρχονται σε 313.499.754,8 MWh = 313,5 TWh.

Παρατηρείται ότι, η καμπύλη δεν έχει μεγάλη κλίση, επομένως θα ήταν δυνατό οι απορρίψεις να τροφοδοτήσουν έναν σταθμό παραγωγής π.χ. υδρογόνου, που αν έχει ονομαστική ισχύ της τάξης των 3 GW, θα μπορεί να λειτουργεί σε πλήρες φορτίο για περισσότερο από 50% του χρόνου (3 GW απορροφούν περίπου $3 \times 30 \times 24 = 2160$ GWh τον μήνα).

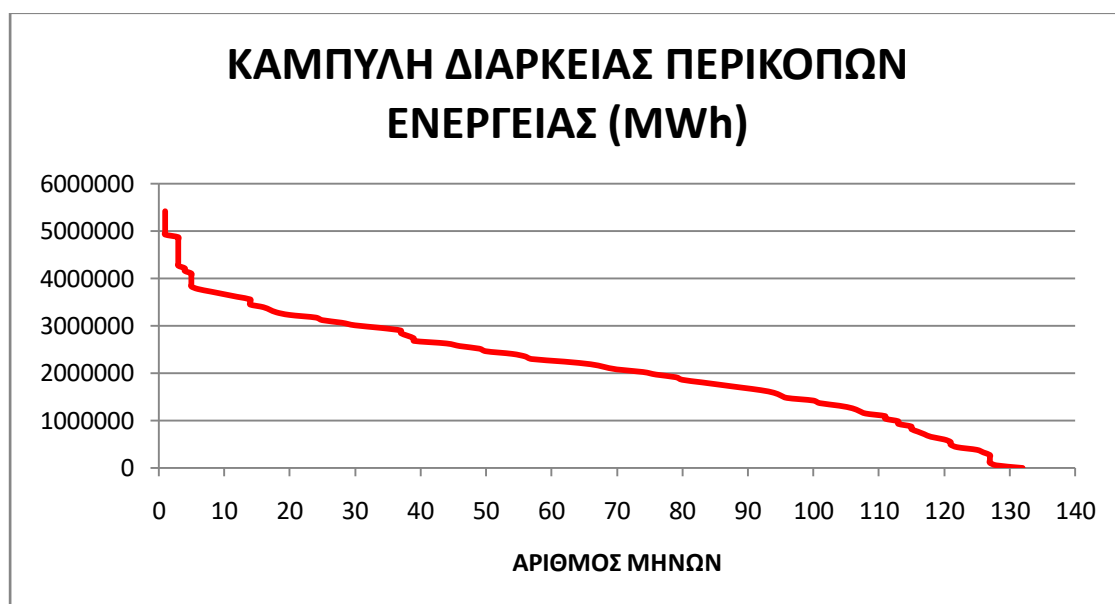


Σχήμα 4.11: Η καμπύλη διάρκειας των περικοπών ΑΠΕ για το βέλτιστο συνδυασμό εγκατεστημένης ισχύος τους και μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας 0.5 μέσων ημερών.

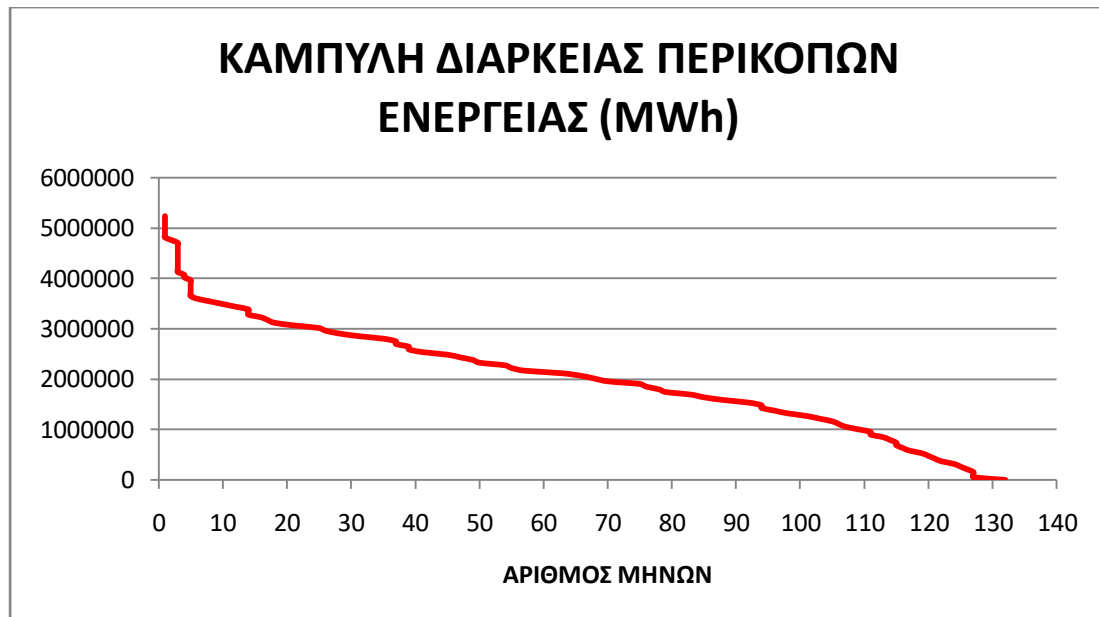
Στα επόμενα Διαγράμματα των Σχημάτων 4.12, 4.13 και 4.14, σχεδιάζονται οι καμπύλες διάρκειας για τις άλλες τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, δηλαδή για αποθηκευτική ικανότητα 1, 1.5 και 2 ημερών. Η μορφή των καμπυλών είναι παρόμοια, επομένως ισχύει και εδώ το παραπάνω συμπέρασμα.



Σχήμα 4.12: Η καμπύλη διάρκειας των περικοπών ΑΠΕ για το βέλτιστο συνδυασμό εγκατεστημένης ισχύος τους και μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας 1 μέσων ημερών.



Σχήμα 4.13: Η καμπύλη διάρκειας των περικοπών ΑΠΕ για το βέλτιστο συνδυασμό εγκατεστημένης ισχύος τους και μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας 1.5 μέσων ημερών.



Σχήμα 4.14: Η καμπύλη διάρκειας των περικοπών ΑΠΕ για το βέλτιστο συνδυασμό εγκατεστημένης ισχύος τους και μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας 2 μέσων ημερών.

Παρατηρείται όμως ότι όσο αυξάνεται η ικανότητα αποθήκευσης, τόσο οι καμπύλες διάρκειας μετατοπίζονται χαμηλότερα και μειώνονται οι συνολικές περικοπές παραγωγής ΑΠΕ. Συγκεκριμένα, για 1 μέση ημέρα αποθήκευσης οι συνολικές περικοπές ΑΠΕ γίνονται 297 TWh, για 1.5 ημέρα γίνονται 287,3 TWh και για 2 ημέρες 271,4 TWh. Αυτό υποδεικνύει μια μικρή βελτίωση του συντελεστή εκμετάλλευσης των εγκατεστημένων ΑΠΕ, αλλά μικρότερη χρήση των μονάδων αξιοποίησης της περίσσειας παραγωγής.

4.3 Σενάριο Β. Διερεύνηση βέλτιστου συνδυασμού εγκατεστημένης ισχύος Αιολικών και Φ/Β για διαφορετικές καιρικές συνθήκες.

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφ.4 εξετάζονται διάφορες υποθετικές περιπτώσεις κατά τις οποίες η συνολική παραγωγή Αιολικών ή/και Φ/Β κατά την περίοδο των 11 ετών που μελετάται, ενδέχεται να διαφοροποιηθεί και να γίνει είτε μεγαλύτερη είτε μικρότερη, αναλόγως των καιρικών συνθηκών. Με τον τρόπο αυτό θα εξεταστεί η ευαισθησία των αποτελεσμάτων της προηγούμενης διερεύνησης (Σενάριο Α), στις πιθανές μεταβολές του συντελεστή παραγωγής ΑΠΕ.

Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 4.2, όπου το έτος αναφοράς κάθε μίας θεωρείται ότι επαναλαμβάνεται (ως προς την παραγωγή των ΑΠΕ μόνο), 11 φορές, καλύπτοντας όλη την περίοδο προσομοίωσης του συστήματος. Στις δύο τελευταίες στήλες του Πίνακα 4.2 δίνεται ενδεικτικά η συνολική παραγωγή των Αιολικών και των Φ/Β σταθμών του συστήματος για $F_g=1$ και ίδια εγκατεστημένη ισχύ των δύο τεχνολογιών.

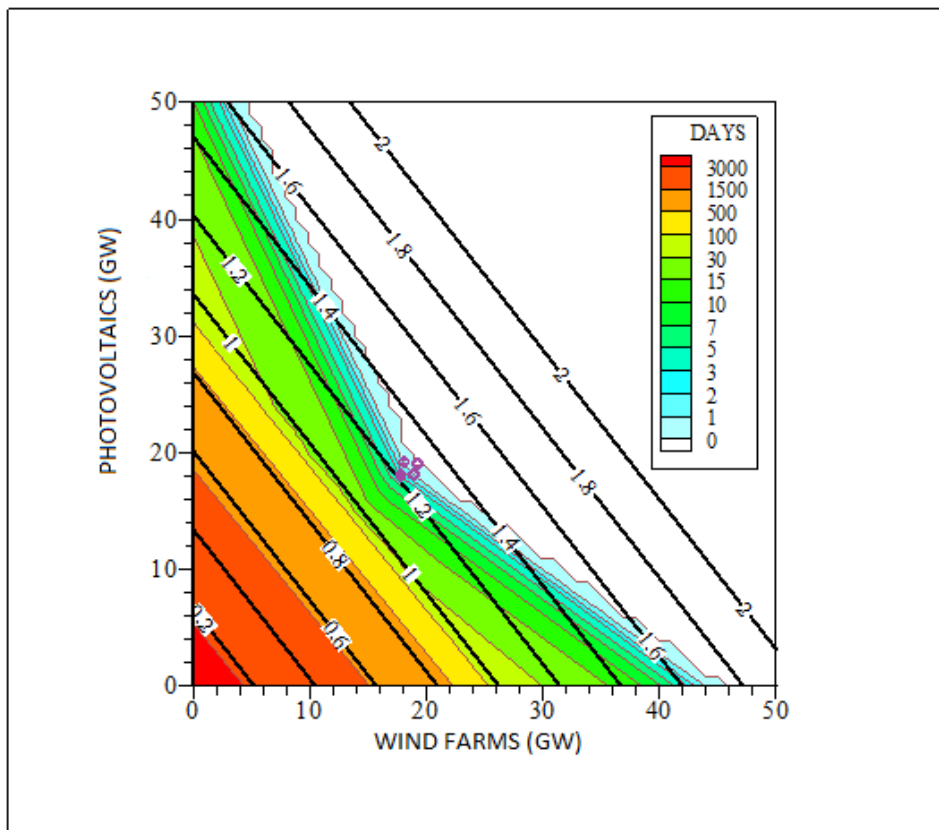
Πίνακας 4.2: Συνοπτική παρουσίαση των σεναρίων διερεύνησης του παρόντος κεφαλαίου και η συνολική παραγωγή των Αιολικών και των Φ/Β για $F_g=1$ και ίδια εγκατεστημένη ισχύ των δύο τεχνολογιών.

	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΕΤΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ Α/Π ΓΙΑ $F_g=1$ ΚΑΙ ΙΣΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΚΑΙ Φ/Β ΠΑΡΚΩΝ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ Φ/Β ΓΙΑ $F_g=1$ ΚΑΙ ΙΣΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΚΑΙ Φ/Β ΠΑΡΚΩΝ
ΣΕΝΑΡΙΟ Α	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	2008-2018	329.448,320 GWh (13,6 GW)	219.013,584 GWh (13,6 GW)
ΣΕΝΑΡΙΟ Β1	ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ Α/Π & ΜΕΙΩΜΕΝΟ ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ Α/Π ΚΑΙ Φ/Β	2014	310.393,280 GWh (14,8 GW)	241.945,728 GWh (14,8 GW)
ΣΕΝΑΡΙΟ Β2	ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟ Φ/Β & ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟ Α/Π	2008	373.782,496 GWh (14,6 GW)	179.509,328 GWh (14,6 GW)

ΣΕΝΑΡΙΟ Β3	ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟ Φ/Β	2012	322.442,240 GWh (13,2 GW)	225.364,832 GWh (13,2 GW)
ΣΕΝΑΡΙΟ Β4	ΑΥΞΗΜΕΝΟ ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ Α/Π ΚΑΙ Φ/Β	2017	323.748,256 GWh (13,2 GW)	224.896,448 GWh (13,2 GW)

4.3.1 Σενάριο Β1. Δυσμενές έτος παραγωγής ενέργειας από Αιολικά.

Στην περίπτωση αυτή λαμβάνεται ως έτος αναφοράς το 2014, κατά το οποίο η συνολική παραγωγή Αιολικών και Φ/Β ήταν η μικρότερη από όλα τα υπόλοιπα έτη (Πίνακας 4.2). Το έτος αυτό είναι και **το δυσμενέστερο για την παραγωγή από Αιολικούς σταθμούς**. Αναλύοντας τα δεδομένα λαμβάνεται το διάγραμμα του Σχήματος 4.15.

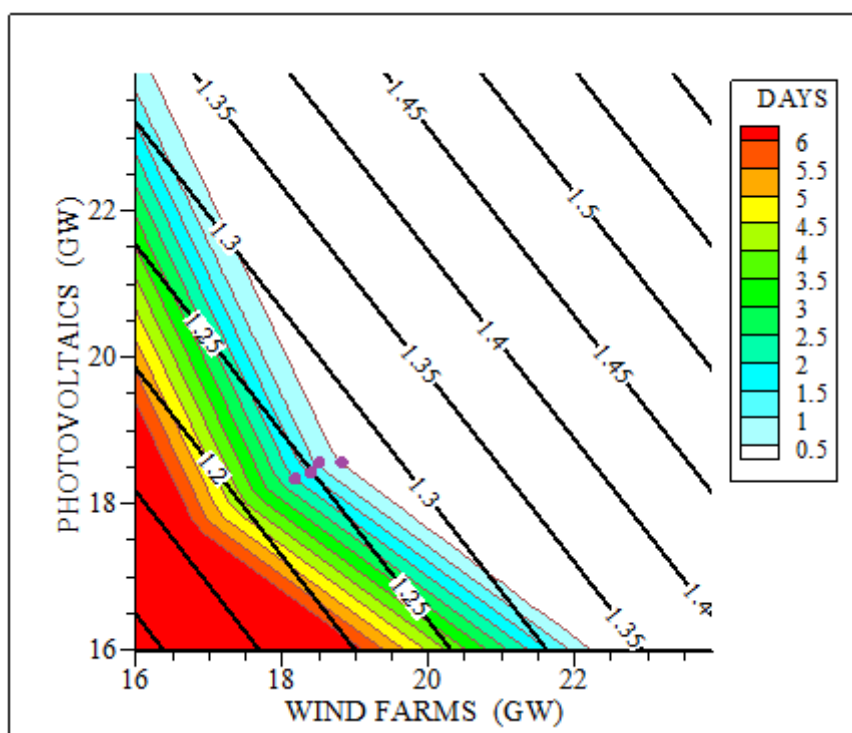


Σχήμα 4.15: Συσχέτιση των αναγκών εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ και αποθηκευτικής ικανότητας του ελληνικού συστήματος, καθώς και του παράγοντα F_g στην περίπτωση του Σεναρίου Β1.

Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του Σεναρίου Α (Σχήμα 4.1) παρατηρείται ότι για τον ίδιο συνδυασμό εγκατεστημένης ισχύος των δύο διαγραμμάτων το F_g , είναι, μικρότερο, καθώς η συνολική παραγωγή ΑΠΕ είναι λιγότερη. Όμως, για την ίδια αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος, η συνολική αυτή παραγωγή των ΑΠΕ που απαιτείται για το σύστημα είναι μικρότερη (π.χ. για 1 ημέρα αποθήκευσης το f_g είναι περίπου 1.3, ενώ στο Σενάριο Α ήταν περίπου 1.6). Αυτή η σημαντική διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι το προφίλ της

παραγωγής των ΑΠΕ είναι πιο ομοιόμορφο στο διάστημα των 11 ετών, καθώς το ίδιο έτος επαναλαμβάνεται 11 φορές.

Για μεγαλύτερη ακρίβεια, η υπολογιστική διαδικασία επαναλαμβάνεται με μικρότερα βήματα, καλύπτοντας μικρότερο εύρος ισχύων (περιοχή 16GW-24GW για την εγκατεστημένη ισχύ των Αιολικών πάρκων και 16GW-24GW για την εγκατεστημένη ισχύ των Φ/Β) και προκύπτει το διάγραμμα του Σχήματος 4.16, στο οποίο σημειώνονται οι βέλτιστοι συνδυασμοί εγκατεστημένης ισχύος για αποθηκευτική ικανότητα 0,5, 1, 1,5 και 2 ημερών.



Σχήμα 4.16: Ακριβέστερη συσχέτιση των αναγκών εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ και αποθηκευτικής ικανότητας του ελληνικού συστήματος, καθώς και του παράγοντα F_g στην περίπτωση δυσμενούς παραγωγής αιολικών.

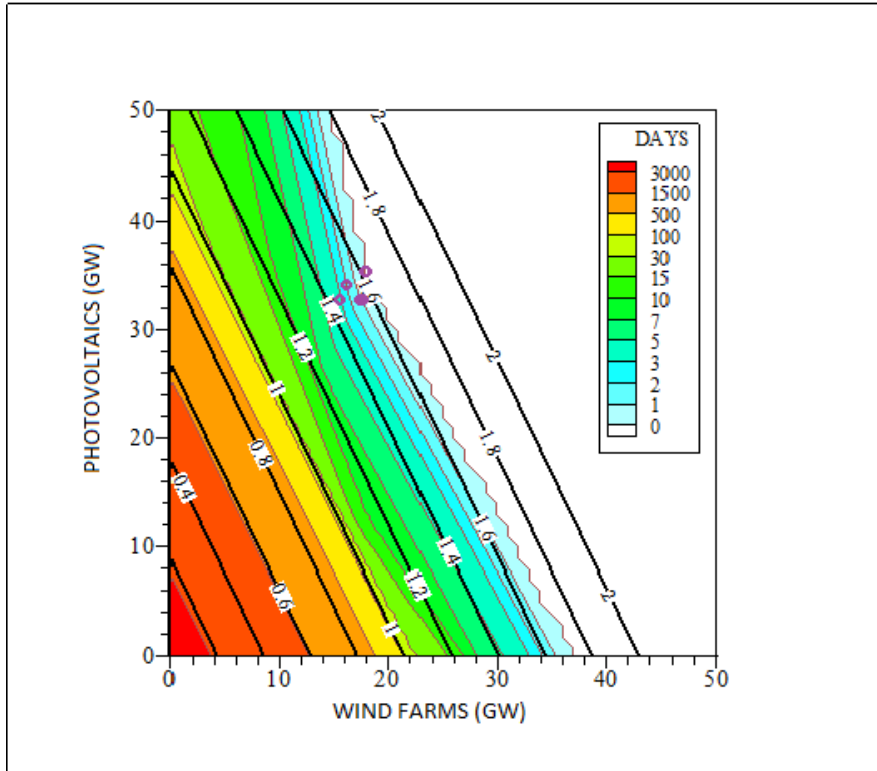
Τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα στα σημεία αυτά συνοψίζονται στον Πίνακα 4.3

Πίνακας 4.3 : Σύνοψη αποτελεσμάτων διαγράμματος του Σχήματος 4.16

	Αποθηκευτική ικανότητα (μέσες ημέρες)			
	0.5	1	1.5	2
ΑΙΟΛΙΚΑ (GW)	18,8	18,6	18,4	18,2
Φ/Β (GW)	18,6	18,6	18,4	18,3
A (%)	56,45	56,20	56,19	56,05
F_g	1,27	1,26	1,24	1,24
ΑΠΟΡΡΙΨΕΙΣ (GWh)	151.228,969	147.298,758	140.208,616	125.370,476

4.3.2 Σενάριο B2. Δυσμενές έτος παραγωγής ενέργειας από Φωτοβολταϊκά.

Στο σενάριο B2 λαμβάνεται ως έτος αναφοράς το 2008, το οποίο εμφανίζει τη μικρότερη παραγωγή Φ/Β και ταυτόχρονα τη μεγαλύτερη παραγωγή Αιολικών σταθμών, μεταξύ των 11 ετών που μελετήθηκαν. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.17.

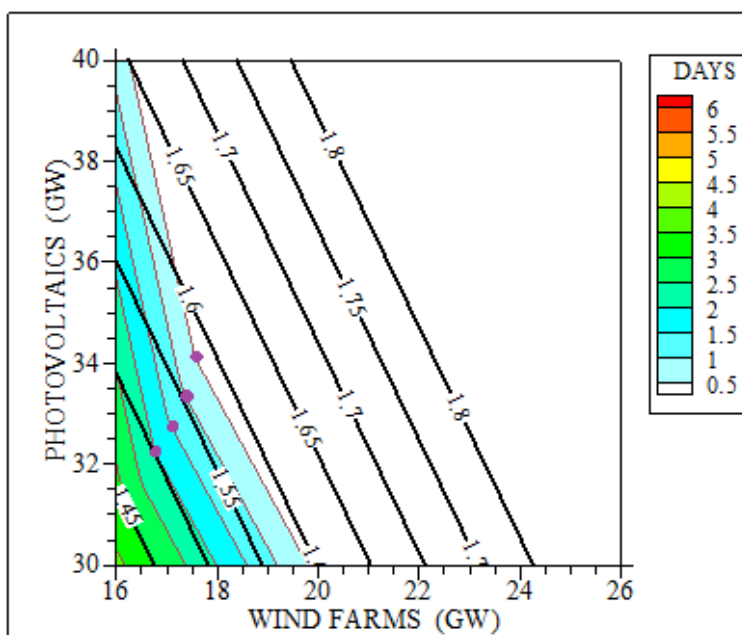


Σχήμα 4.17: Συσχέτιση των αναγκών εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ και αποθηκευτικής ικανότητας του ελληνικού συστήματος, καθώς και του παράγοντα F_g στην περίπτωση του Σεναρίου B2.

Από το διάγραμμα του σχήματος 4.17 μπορούμε να αντλήσουμε χρήσιμα συμπεράσματα, καθώς δύο διαφορετικές καταστάσεις συμβαίνουν ταυτόχρονα, δηλαδή η δυσμενέστερη παραγωγή Φ/Β και η υψηλότερη παραγωγή αιολικών.

Παρατηρείται ότι για δεδομένη αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος, η απαιτούμενη συνολική παραγωγή ΑΠΕ είναι παρόμοια με το Σενάριο Α (π.χ. για 1 ημέρα αποθήκευσης το f_g είναι περίπου 1.6 και στις δύο περιπτώσεις, βλ. και Σχ. 4.1). Όμως, το βέλτιστο μίγμα Αιολικών-Φ/Β διαφοροποιείται σημαντικά: Από 25.5 / 14.3 GW στο Σενάριο Α (Πίν. 4.1), σε 17.5 - 33.4 GW στο παρόν σενάριο (Σχήμα 4.18 και Πίνακας 4.4). Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η εξέλιξη των καιρικών συνθηκών κατά τις επόμενες δεκαετίες, λόγω και της κλιματικής αλλαγής, μπορεί να επηρεάσει το βέλτιστο μίγμα Αιολικών και Φ/Β εγκαταστάσεων στη Χώρα, και επομένως πρέπει να ληφθεί υπόψη στον εθνικό ενεργειακό σχεδιασμό. Αν για παράδειγμα η ανάπτυξη των ΑΠΕ γίνει με βάση το Σενάριο Α (π.χ. 25.5 GW Αιολικά και 14.3 GW Φ/Β), αλλά τελικά επικρατήσουν οι καιρικές συνθήκες του Σεναρίου B2, τότε θα απαιτηθεί πολύ μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα στο σύστημα,

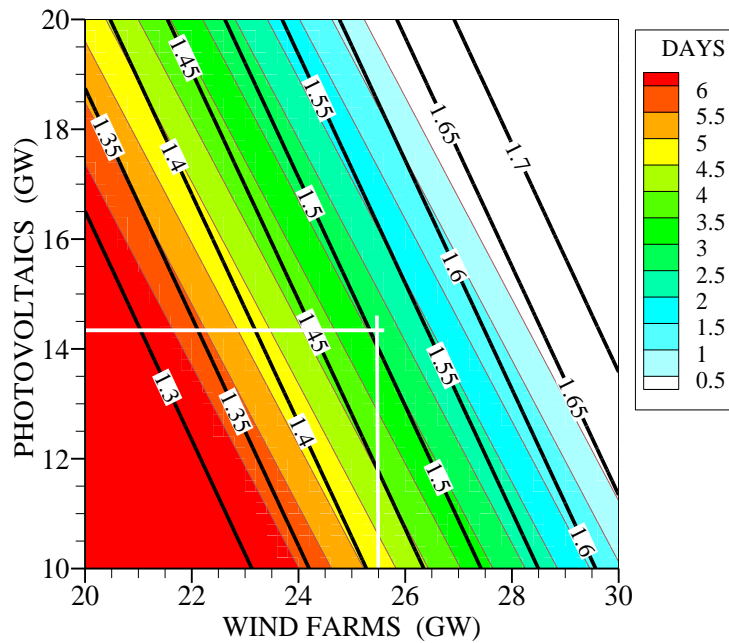
της τάξης των 3-3.5 ημερών αντί για 1 ημέρα με τον σχεδιασμό με βάση το Σενάριο Α, όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.19.



Σχήμα 4.18: Ακριβέστερη συσχέτιση των αναγκών εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ και αποθηκευτικής ικανότητας του ελληνικού συστήματος, καθώς και του παράγοντα Fg στην περίπτωση του Σεναρίου Β2.

Πίνακας 4.4: Σύνοψη αποτελεσμάτων διαγράμματος του Σχήματος 4.18.

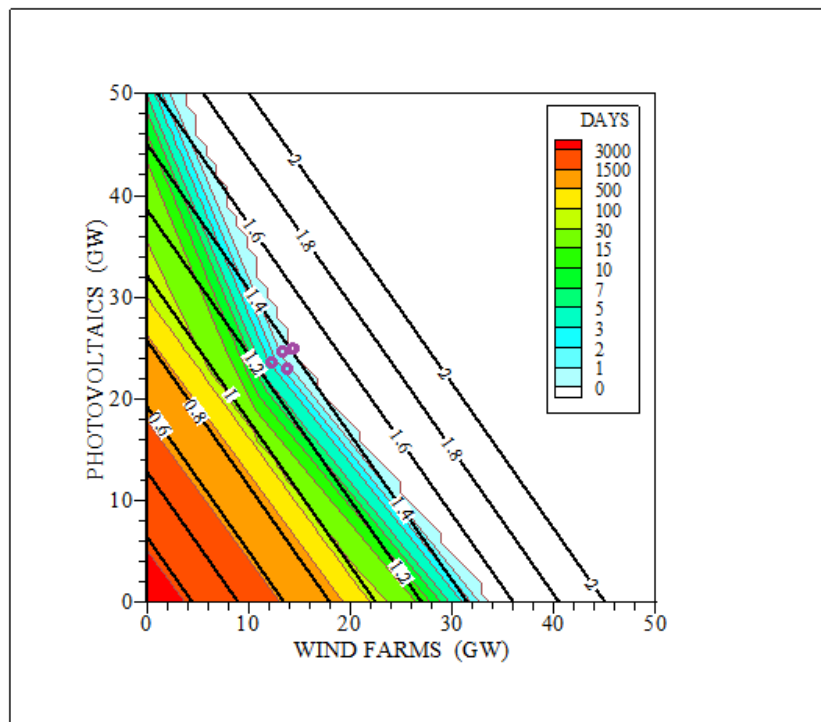
	Αποθηκευτική ικανότητα (μέσες ημέρες)			
	0.5	1	1.5	2
ΑΙΟΛΙΚΑ (GW)	17,7	17,5	17,2	16,8
Φ/Β (GW)	34,2	33,4	32,7	32,3
A (%)	51,86	52,17	52,27	51,99
Fg	1,58	1,55	1,53	1,50
ΑΠΟΡΡΙΨΕΙΣ (GWh)	324.082,141	309.125,672	294.169,156	279.010,447



Σχήμα 4.19: Εκτίμηση της αναγκαίας ικανότητας αποθήκευσης ενέργειας με βάση το Σενάριο B2, σε περίπτωση που η εγκατεστημένη ισχύς αιολικών και Φ/Β έχει καθοριστεί με βάση το Σενάριο A.

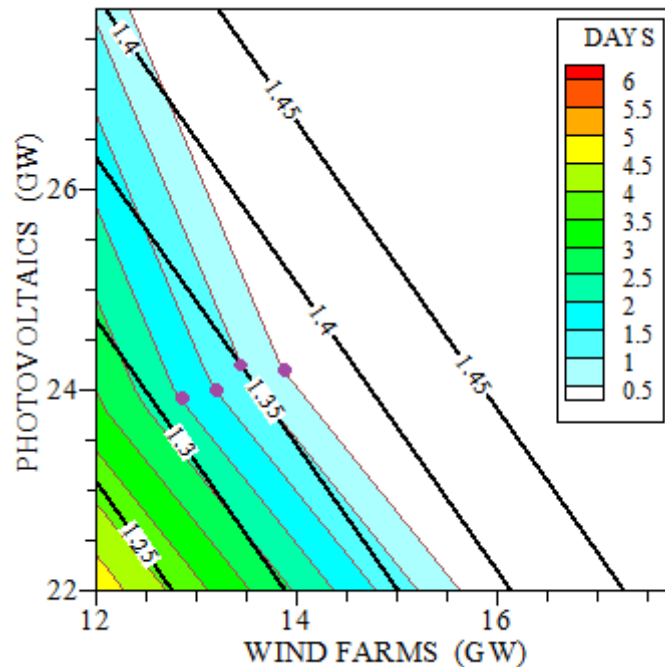
4.3.3 Σενάριο B3. Ευνοϊκό έτος παραγωγής ενέργειας από Φωτοβολταϊκά.

Το έτος με την υψηλότερη παραγωγή Φ/Β, είναι το 2012. Επομένως, ακολουθείται η ίδια διαδικασία και προκύπτει το διάγραμμα του Σχήματος 4.20.



Σχήμα 4.20: Συσχέτιση των αναγκών εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ και αποθηκευτικής ικανότητας του ελληνικού συστήματος, καθώς και του παράγοντα F_g στην περίπτωση του Σεναρίου B3.

Στα διαγράμματα των Σχημάτων 4.20 και 4.21 παρατηρείται μετατόπιση της βέλτιστης περιοχής προς υψηλότερες τιμές της εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β και σε χαμηλότερες τιμές εγκατεστημένης ισχύος αιολικών, καθώς υπάρχει υψηλή παραγωγή των Φ/Β, η οποία έχει ομαλότερη καμπύλη από την καμπύλη παραγωγής των Αιολικών, και επομένως απαιτεί μικρότερη αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος.



Σχήμα 4.21: Ακριβέστερη συσχέτιση των αναγκών εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ και αποθηκευτικής ικανότητας του ελληνικού συστήματος, καθώς και του παράγοντα Fg στο Σενάριο B3.

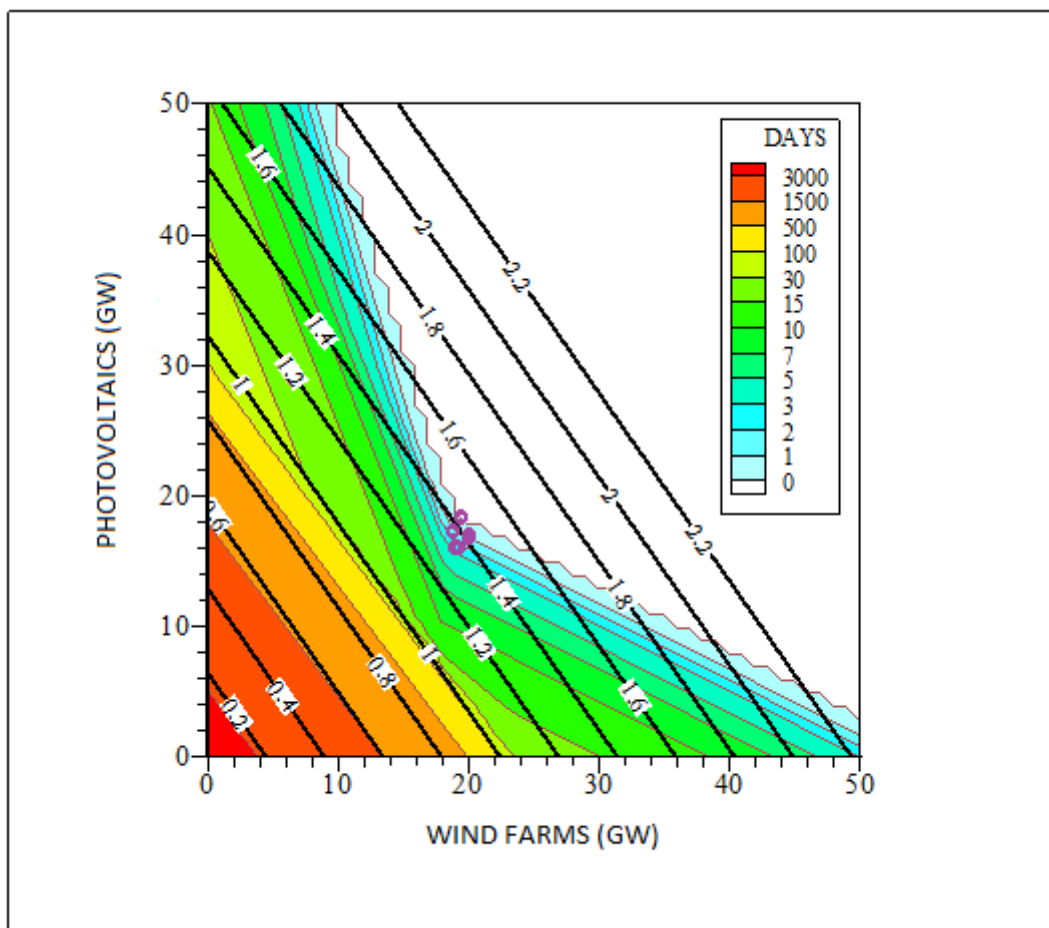
Από το διάγραμμα του Σχήματος 4.21 λαμβάνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα, που συνοψίζονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5 : Σύνοψη αποτελεσμάτων διαγράμματος του Σχήματος 4.21.

	Αποθηκευτική ικανότητα (μέσες ημέρες)			
	0.5	1	1.5	2
ΑΙΟΛΙΚΑ (GW)	14,0	13,5	13,2	13,0
Φ/Β (GW)	24,2	24,3	24,0	23,9
A (%)	45,29	44,37	44,04	43,87
Fg	1,37	1,35	1,33	1,32
ΑΠΟΡΡΙΨΕΙΣ (GWh)	205.680,829	198.213,255	183.442,936	175.393,103

4.3.4 Σενάριο B4. Ευνοϊκό έτος συμπαραγωγής ενέργειας από Αιολικά.

Το έτος με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας από αιολικούς σταθμούς είναι το 2012, το οποίο παρουσιάζει και τη μέγιστη συνολική παραγωγή από ΑΠΕ. Τα αποτελέσματα των σχετικών υπολογισμών δίνονται στα Σχ. 4.22 και 4.23.

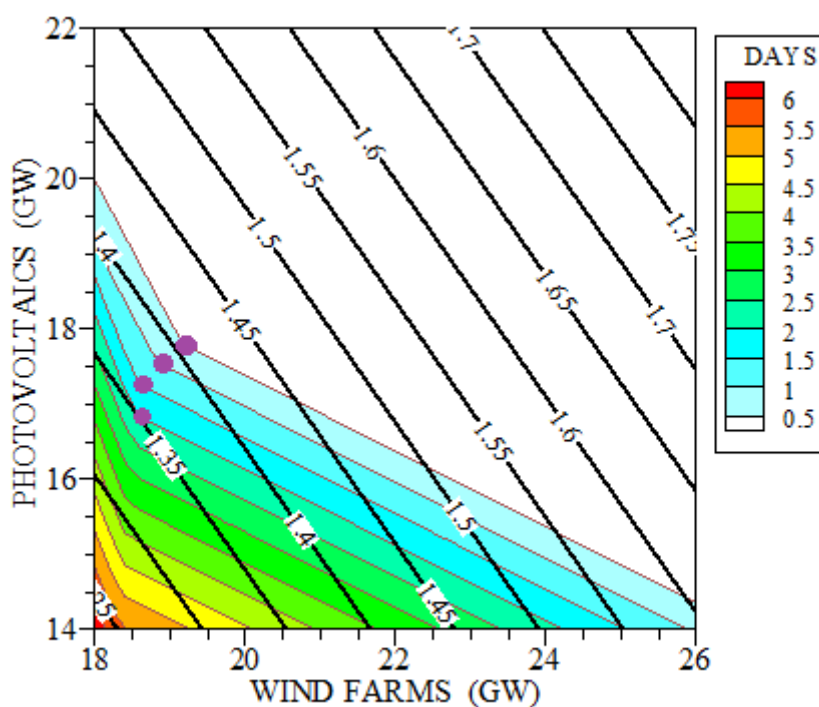


Σχήμα 4.22: Συσχέτιση των αναγκών εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ και αποθηκευτικής ικανότητας του ελληνικού συστήματος, καθώς και του παράγοντα F_g στο Σενάριο B4.

Συγκρίνοντας το διάγραμμα του Σχήματος 4.22 με το διάγραμμα του Σχήματος 4.15 που αφορά την κατάσταση του έτους δυσμενέστερης συμπαραγωγής αιολικής και ηλιακής ενέργειας, είναι φανερό πως για τις ίδιες τιμές της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος το F_g είναι μεγαλύτερο στις περίπτωση του σχήματος 4.22.

Στην περίπτωση αυτή η βέλτιστη περιοχή, όπως αυτή παρουσιάζεται από τα μωβ σημάδια στο διάγραμμα του σχήματος 4.22 είναι : εγκατεστημένη αιολική ισχύς 18GW-26GW και εγκατεστημένα Φ/Β 14GW-22GW.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.23 μπορούμε να δούμε αναλυτικότερα την περιοχή ενδιαφέροντος.



Σχήμα 4.23: Ακριβέστερη συσχέτιση των αναγκών εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ και αποθηκευτικής ικανότητας του ελληνικού συστήματος, καθώς και του παράγοντα F_g στο Σενάριο Β4.

Από το διάγραμμα του Σχήματος 4.23 λαμβάνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα του Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Σύνοψη αποτελεσμάτων διαγράμματος του Σχήματος 4.23.

	Αποθηκευτική ικανότητα (μέσες ημέρες)			
	0.5	1	1.5	2
ΑΙΟΛΙΚΑ (GW)	19,3	19,0	18,6	18,6
Φ/Β (GW)	17,7	17,5	17,3	17,3
A (%)	61,07	60,96	60,89	60,89
F_g	1,41	1,39	1,36	1,36
ΑΠΟΡΡΙΨΕΙΣ (GWh)	225.668,212	212.233,736	198.715,870	198.715,870

4.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στα υποκεφάλαια 4.2 και 4.3 βρέθηκαν οι βέλτιστοι συνδυασμοί εγκατεστημένης ισχύος αιολικών και φωτοβολταϊκών σε διάφορες περιπτώσεις για διάφορες τιμές της μέγιστης ανάγκης αποθήκευσης ενέργειας (0.5, 1, 1.5, 2 ημέρες), καθώς και οι τιμές του παράγοντα F_g της σχέσης δηλαδή της συνολικά παραγόμενης ενέργειας ως προς τη συνολική ζήτηση. Ο Πίνακας 4.7 συνοψίζει τους συνδυασμούς αυτούς για 1 ημέρα αποθήκευσης, ενδεικτικά, ενώ ανάλογες συσχετίσεις προκύπτουν και για μικρότερη ή μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος. Παρατηρείται και πάλι ότι τόσο οι βέλτιστοι συνδυασμοί εγκατεστημένης ισχύος Αιολικών και Φ/Β, όσο και οι αντίστοιχες τιμές της συνολικής παραγωγής ΑΠΕ (f_g) και της μη αποθηκεύσιμης παραγωγής τους (απορρίψεις), διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ των διαφόρων σεναρίων που εξετάστηκαν.

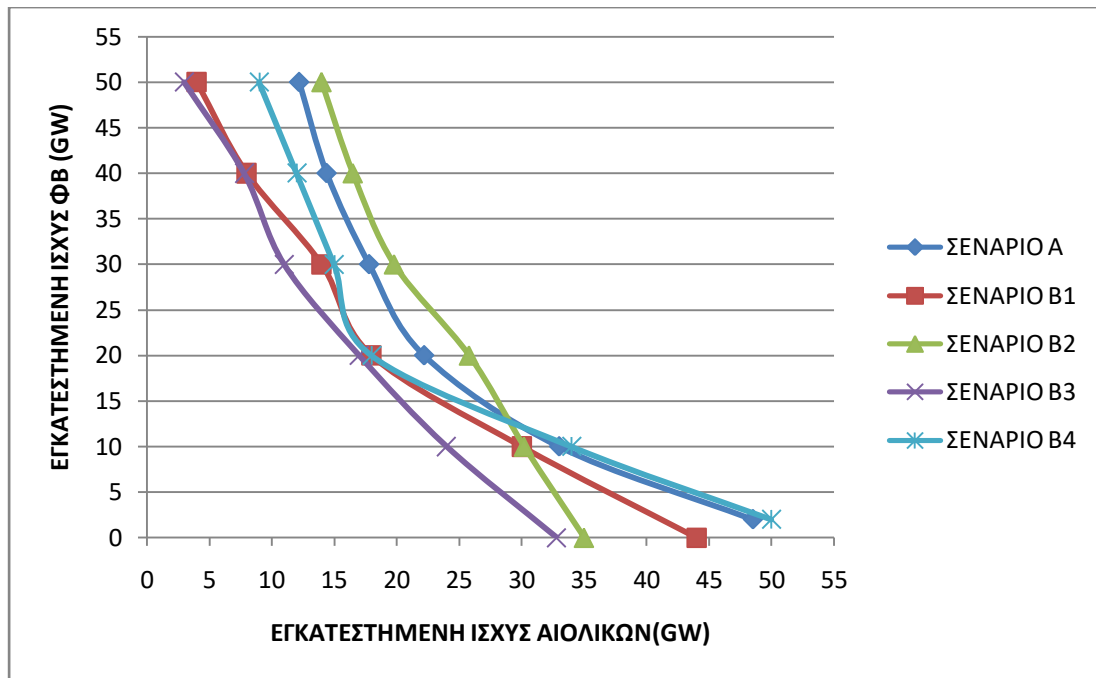
Πίνακας 4.7: Συγκριτικός πίνακας για τις διάφορες βέλτιστες λύσεις για 1 ημέρα μέγιστης ανάγκης αποθήκευσης ενέργειας.

	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ Α/Π (GW)	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ Φ/Β (GW)	F_g	ΑΠΟΡΡΙΨΕΙΣ (GWh)
ΣΕΝΑΡΙΟ Α	25,5	14,3	1,54	296.999,804
ΣΕΝΑΡΙΟ Β1	18,6	18,6	1,26	147.298,758
ΣΕΝΑΡΙΟ Β2	17,5	33,4	1,55	309.125,672
ΣΕΝΑΡΙΟ Β3	13,5	24,3	1,35	198.213,255
ΣΕΝΑΡΙΟ Β4	19,0	17,5	1,39	212.233,736

Στο Σχήμα 4.24 σχεδιάζονται μαζί οι βέλτιστες τιμές (καμπύλες) εγκατεστημένης ισχύος Αιολικών και Φ/Β για όλα τα Σενάρια που μελετήθηκαν στην Εργασία, για μια ενδεικτική και ρεαλιστική μέγιστη ικανότητα αποθήκευσης του μελλοντικού ηλεκτρικού συστήματος της Χώρας, που λαμβάνεται ίση με 1 μέση ημέρα κατανάλωσης.

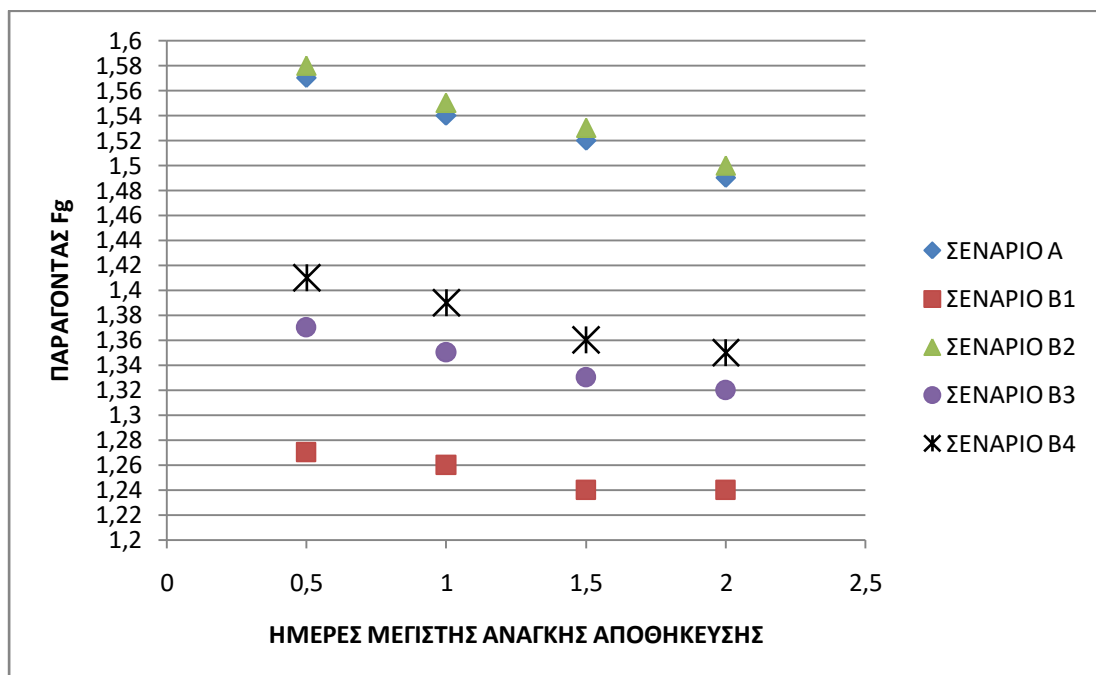
Ένα τέτοιο διάγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τελική επιλογή της εγκατεστημένης ισχύος και του μίγματος αιολικών και Φ/Β, που εξασφαλίζει την επάρκεια και ασφάλεια εφοδιασμού του συστήματος σε όλα τα σενάρια που εξετάζονται, εφόσον διατίθεται μια συγκεκριμένη αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος. Αυτά τα ζεύγη τιμών θα βρίσκονται στη περιβάλλουσα των καμπυλών αυτών, προς τη δεξιά πλευρά του διαγράμματος.

Για παράδειγμα, με βάση το Σχ. 4.24, το μίγμα μπορεί να κυμαίνεται από εγκατεστημένη ισχύ Αιολικών – Φ/Β 15 – 50 GW (άνω αριστερά), έως 50 – 2 GW (κάτω δεξιά), ενώ εάν π.χ. εγκατεστημένη ισχύς των δύο τεχνολογιών ζητείται να είναι ίση, τότε θα πρέπει να είναι περίπου 23 – 23 GW (ενδιάμεσο σημείο).



Σχήμα 4.24: Βέλτιστοι συνδυασμοί εγκατεστημένης ισχύος αιολικών και Φ/Β για 1 ημέρα μέγιστης αποθηκευτικής ικανότητας.

Τέλος, στο διάγραμμα του Σχήματος 4.25 παρουσιάζεται η διακύμανση του F_g ανάλογα με τις ημέρες αποθήκευσης για τα διάφορα σενάρια που αναπτύχθηκαν στα υποκεφάλαια 4.2 και 4.3.



Σχήμα 4.25: Ο παράγοντας F_g σε συνάρτηση των ημερών μέγιστης ανάγκης αποθήκευσης για τα διάφορα σενάρια των υποκεφαλαίων 4.2 και 4.3.

Και πάλι παρατηρείται ένα μεγάλο εύρος τιμών του F_g μεταξύ των διαφόρων σεναρίων, για συγκεκριμένη αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος και προκύπτει ότι για την επίτευξη 100% ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ μπορεί να απαιτηθεί εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ (αιολικών και Φ/Β) και αντίστοιχη παραγωγή από τουλάχιστον 25% έως και 57% υψηλότερη της συνολικής ζήτησης του συστήματος. Μια περίσσεια ενέργειας της τάξης του 25% είναι υψηλή και επαρκής για την ανάπτυξη και λειτουργία βιώσιμων μονάδων αξιοποίησής της, και μετατροπής της π.χ. σε υδρογόνο, μεθάνιο ή βιοκαύσιμα.

Ένα ακόμη σημαντικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από το Σχ. 4.25 είναι ότι η επιπλέον παραγωγή (και εγκατεστημένη ισχύς) ΑΠΕ που απαιτείται προκειμένου να μειωθεί η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας από 2 μέσες ημέρες σε 0.5 μέσες ημέρες κατανάλωσης (δηλαδή στο 1/4), είναι σχετικά μικρή. Στη χειρότερη περίπτωση των Σεναρίων Α και Β2 προκύπτει περίπου 5% (fg από 1.5 σε 1.57), ενώ στα υπόλοιπα Σενάρια είναι ακόμη χαμηλότερη. Επομένως, με δεδομένη και τη δυνατότητα αξιοποίησης της περίσσειας παραγωγής των ΑΠΕ, θα πρέπει να διερευνηθεί εάν η εγκατάσταση περισσότερων μονάδων ΑΠΕ είναι πιο συμφέρουσα από οικονομικής πλευράς, αλλά και από πλευράς ασφάλειας εφοδιασμού του συστήματος, έναντι της εγκατάστασης περισσότερων μονάδων αποθήκευσης ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σκοπός της παρούσας Εργασίας είναι η εξέταση της δυνατότητας κάλυψης των αναγκών του ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος ενέργειας με αποκλειστική χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Για τη διεξαγωγή της μελέτης ελήφθησαν υπόψη ως δεδομένα οι μηνιαίες καταναλώσεις ενός μεγάλου χρονικού διαστήματος 11 ετών (2008-2018), καθώς και οι μηνιαίες ποσότητες ενέργειας που έχουν παραχθεί από αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα της χώρας το ίδιο διάστημα.

Αξιοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα με κατάλληλο λογισμικό που αναπτύχθηκε, βρέθηκαν η απαιτούμενη αποθηκευτική ικανότητα του ελληνικού συστήματος για διάφορους συνδυασμούς εγκατεστημένης αιολικής και φωτοβολταϊκής ισχύος, καθώς και οι βέλτιστοι συνδυασμοί της για ρεαλιστικές δυνατότητες αποθήκευσης του συστήματος (0.5, 1, 1.5 και 2 μέρες ημέρες κατανάλωσης). Βρέθηκαν επίσης οι ίδιοι συνδυασμοί σε διάφορες παραλλαγές σχετικές με ενδεχόμενες μεταβολές των καιρικών συνθηκών στα μελλοντικά έτη.

Συμπεράσματα και Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

Από τα αποτελέσματα της Εργασίας γίνεται κατανοητό πως για την κάλυψη των αναγκών του ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος με αποκλειστική χρήση ΑΠΕ απαιτείται αποθηκευτική ικανότητα που με τα σημερινά δεδομένα είναι ανέφικτη. Ο μόνος τρόπος για την κάλυψη των αναγκών αυτών είναι η μεγάλη αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων. Από τα αποτελέσματα που ελήφθησαν για ρεαλιστικές τιμές της δυνατότητας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ πρέπει να κυμαίνεται από περίπου 36 ως 51 GW και να υπερκαλύπτει τη ζήτηση κατά 25% έως 55%. Σήμερα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ είναι περίπου 4,7 GW. Επομένως, γίνεται λόγος για περίπου δεκαπλασιασμό της υπάρχουσας εγκατεστημένης ισχύος.

Ένα ακόμη σημαντικό συμπέρασμα, που εξάγεται είναι η σημασία του μίγματος της συμπαραγωγής αιολικών και φωτοβολταϊκών. Παρατηρείται, πως η αναγκαία αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος εξαρτάται σημαντικά από το μίγμα εγκατεστημένων αιολικών και Φ/Β μονάδων. Συγκεκριμένα για την ίδια ποσότητα συνολικά παραγώμενης ενέργειας οι καμπύλες αποθήκευσης και περικοπών ενέργειας γίνονται ομαλότερες στην περίπτωση που υπερισχύουν τα αιολικά στο μίγμα. Αυτό συμβαίνει επειδή τα τελευταία δεν παρουσιάζουν σημαντική εποχιακή διακύμανση της παραγωγής τους, σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά, τα οποία έχουν αυξημένη παραγωγή τους θερινούς μήνες, και σημαντικά μειωμένη κατά τους χειμερινούς.

Ακόμη, διαπιστώθηκε ότι οι ανάγκες αποθήκευσης ενέργειας μειώνονται δραστικά με μικρή σχετικά αύξηση της εγκατεστημένης παραγωγής ΑΠΕ, επομένως η ανάπτυξη αυτών των δύο τεχνολογικών θα πρέπει να είναι άμεσα συσχετισμένη.

Επιπλέον, μέσω της διερεύνησης της επίδρασης των καιρικών συνθηκών παρατηρήθηκε ότι οι καιρικές συνθήκες, λόγω της κλιματικής αλλαγής, μπορεί να επιδράσουν σημαντικά στο βέλτιστο μίγμα Αιολικών και Φ/Β εγκαταστάσεων στη Χώρα και επομένως πρέπει να ληφθούν υπόψη στον ενεργειακό σχεδιασμό.

Τα παραπάνω συμπεράσματα υποδεικνύουν ότι απαιτείται ένα λεπτομερέστερο λογισμικό μοντελοποίησης της λειτουργίας του εθνικού ηλεκτρικού συστήματος, π.χ. με ανάλυση μίας ημέρας έως και μίας ώρας, για την εξαγωγή ακριβέστερων και ασφαλέστερων συμπερασμάτων. Για τον σκοπό αυτόν, απαιτείται η εξέταση πολυάριθμων εναλλακτικών σεναρίων μελλοντικής εξέλιξης τόσο της ζήτησης όσο και των τεχνολογιών παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και άλλων κρίσιμων παραμέτρων, όπως η κλιματική αλλαγή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

- [1] https://ec.europa.eu/clima/policies/eccp_en
- [2] <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/cc2c79e2-c8e6-4e60-a386-846580bf42fc/language-en>
- [3] http://www.ecocrete.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=683&Itemid=0
- [4] https://europa.eu/documents/comm/white_papers/pdf/com97_599_en.pdf
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Kyoto_Protocol
- [6] <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol/status-of-ratification>
- [7] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=LEGISSUM:I28157>
- [8] <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=446&language=el-GR>
- [9] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EL>
- [10] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics
- [11] https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en
- [12] https://www.euro2day.gr/ftcom_gr/article-ft-gr/1176406/ee-oi-neoi-stohoi-gia-energeia-klima-2030.html
- [13] <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0112:FIN:EL:PDF>
- [14] <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2050-long-term-strategy>
- [15] “REN 21: A global status report 2018”
http://www.ren21.net/gsr-2018/chapters/chapter_01/chapter_01/
- [16] <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=285&language=el-GR>
- [17] <http://aims.cres.gr/grwind150/viewer.htm>
- [18] <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=286&language=el-GR>
- [19] www.4green.gr
- [20] http://www.ergopack.gr/iliako_dinamiko_elladas.html
- [21] <https://energypress.gr/news/pos-diamorfothike-migma-ilektroparagotis-tis-horas-2018-kai-ti-synevi-stis-diasyndeseis>
- [22] <http://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SIN03/2012>

- [23] «Εκτίμηση μελλοντικών αναγκών αποθήκευσης ενέργειας στο ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα» Ι.Αναγνωστόπουλος, Δ.Παπαντώνης, Απρίλιος 2013.
- [24] Νόμος 3851/2010: “Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, ΦΕΚ 85, 4-6-2010.
- [25] Επιτροπή 20-20-20, Ανάλυση Ενεργειακών Σεναρίων διεύθυνσης των τεχνολογιών ΑΠΕ στο Ενεργειακό Σύστημα και Επίτευξης των Εθνικών Στόχων του 2020 με χρήση των μοντέλων MARKAL, ENPER, WASP, COST, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής, Αθήνα, Ιούλιος 2010.
- [26] National Renewable Energy Action Plan in Scope of Directive 2009/28/EC, Ministry of Environment, Energy & Climate Change, 2010 (σύνοψη στα ελληνικά: www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=285)
- [27] ΔΑΠΕΕΠ: «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας & ΣΗΘΥΑ» Συνοπτικό πληροφοριακό δελτίο, Δεκέμβριος 2018
- [28] Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός – Οδικός Χάρτης για το 2050, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, Μάρτιος 2012
- [29] Διαλυνάς Ε., “Επιπτώσεις της υψηλής στάθμης αιολικής διεύθυνσης στη λειτουργία του ελληνικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας”, Ημερίδα Τεχνικού Επιμελητηρίου, Χαλκίδα, 10-11 Απριλίου 2009
- [30] Caralis G., Papantonis D., Zervos A., “The role of pumped storage systems towards the large scale wind integration in the Greek power supply system”, Ren. Sust. Energy Rev., 2012, 16, 2558-65.
- [31] Μπουλαξής Ν., “Η Διεύθυνση των ΑΠΕ στο Ηλεκτρικό Δίκτυο και οι Εθνικοί Στόχοι για το 2020”, 2η Επιστημονική Συνάντηση του Energy Institute of Southeast Europe (IENE), Αθήνα, 24 Νοεμβρίου 2009.
- [32] «Εθνικό σχέδιο για την ενέργεια και το κλίμα», Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, Ιανουάριος 2018.
<http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=nOeUqsWGeBM%3D&tabid=37&language=el-GR>
- [33] http://www.desmie.gr/fileadmin/user_upload/Files/ape/deltio_ape_march_2009.pdf
- [34] http://www.lagie.gr/fileadmin/groups/EDRETH/RES/DELTIO_APE_DEKEMBRIOS_2018.pdf
- [35] http://eletaen.gr/wp-content/uploads/2019/07/2019_7_19_hwea_statistics_greece_H1_2019.pdf

[36] «Μελέτη επίδρασης της εγκατάστασης αποθηκευτικού συστήματος μπαταρίας κεντρικής διαχείρισης στη λειτουργία μη διασυνδεδεμένων νησιών υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ», Κοκκολιός Σπυρίδων, 2018

[37] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," 2009

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S100200710800381X?token=A2F6FD8E9B72E7F46C45E05AB22A496F488E5421FF5B4AA479E65D6AB058FC704B917732225AA7C9B75EA9E94BF40679>

[38] https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Powerwall

[39] «Ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας – Μέθοδοι αποθήκευσης και εφαρμογές», Αγγελική Σαγάνη, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Έτος 2009

[40] «Energy storage for reaching 100% CO2 free and 100% RES – preliminary case study for Romania», Mihai Sanduleac, Lucian Toma, Constantin Bulac, Mircea Eremia, Nicolae Golovanov, Radu Porumb, Mihaela Albu, Stefan Gheorghe, Catalin Chimirel, 2017

[41] http://www.lagie.gr/fileadmin/user_upload/Files/ape/deltio_ape_december_2010.pdf

[42] http://www.lagie.gr/fileadmin/groups/EDRETH/RES/2016_12_RES.pdf