



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Συμβολή σταθμών ΑΠΕ και αποθήκευσης ενέργειας στην επάρκεια  
ισχύος του ελληνικού συστήματος μέσω της τεχνικής Monte Carlo.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αναστάσιος Μιχελής**

**Επιβλέπων :** Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Συμβολή σταθμών ΑΠΕ και αποθήκευσης ενέργειας στην επάρκεια ισχύος του ελληνικού συστήματος μέσω της τεχνικής Monte Carlo.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αναστάσιος Μιχελής**

Επιβλέπων : Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από τη τριμελή εξεταστική επιτροπή την 3<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2024.

.....  
Στ. Παπαθανασίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γ. Κορρές  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Π. Γεωργιλάκης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

.....

## **Αναστάσιος Α. Μιχελής**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αναστάσιος Α. Μιχελής, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

# Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ερευνά τη συνεισφορά των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και των Μονάδων Αποθήκευσης Ενέργειας στην επάρκεια ισχύος του συστήματος παραγωγής.

Σε αρχική ανάλυση, ορίζεται η έννοια της αξιοπιστίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην επάρκεια ισχύος του συστήματος παραγωγής, ενώ παράλληλα αναλύονται οι μέθοδοι αξιολόγησης συνεισφοράς στην επάρκεια που προκύπτουν κατόπιν υπολογισμού του Equivalent Firm Capacity (EFC) και του Effective Load Carrying Capability (ELCC).

Έπειτα, αναλύονται τα στάδια υλοποίησης του μοντέλου προσομοίωσης του ελληνικού συστήματος ενσωματώνοντας σε αυτό θερμικές μονάδες παραγωγής φυσικού αερίου, φωτοβολταϊκά, χερσαία και υπεράκτια αιολικά πάρκα, υδροηλεκτρικούς σταθμούς καθώς και μονάδες αποθήκευσης. Για την προσομοίωση των θερμικών μονάδων καθώς και για την αξιολόγηση της επάρκειας ισχύος μέσω των δεικτών αξιοπιστίας EENS (Expected Energy Not Served) και LOLE (Loss of Load Expectation) γίνεται χρήση της πιθανοτικής μεθόδου του Monte Carlo.

Εξετάζεται η συνεισφορά των υφιστάμενων ΑΠΕ, για το σύστημα του 2030, στην επάρκεια ισχύος μέσω των δεικτών EFC και του ELCC, ενώ παράλληλα γίνονται διερευνήσεις αυξημένης διείσδυσης των ΑΠΕ στο σύστημα με υπολογισμό των αντίστοιχων δεικτών επάρκειας τους.

Επιπλέον, προσομοιώνεται η λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης στο σύστημα. Για το σκοπό αυτό, αναπτύσσεται πολιτική διαχείρισης των αποθηκευτικών σταθμών προσανατολισμένη στην επάρκεια ισχύος του συστήματος. Εξετάζεται η συμβολή τόσο ενός ενιαίου αποθηκευτικού σταθμού στην επάρκεια ισχύος όσο και πολλαπλών σταθμών που λειτουργούν ταυτόχρονα στο σύστημα. Για την πρώτη περίπτωση διερευνώνται διαφορετικές διαμορφώσεις αποθηκευτικών σταθμών ενώ για τη δεύτερη αναπτύσσονται και συγκρίνονται διαφορετικές πολιτικές διαχείρισης των πολλαπλών σταθμών. Σε κάθε σενάριο γίνεται υπολογισμός της συνεισφοράς των συστημάτων αποθήκευσης μέσω του δείκτη EFC.

Τέλος, συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση αναφορικά με τη συμβολή στην επάρκεια ισχύος τόσο των μονάδων ΑΠΕ όσο και των αποθηκευτικών σταθμών.

Για την υλοποίηση της παραπάνω ανάλυσης έγινε χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος του MATLAB.

**Λέξεις Κλειδιά:** Αξιοπιστία ΣΗΕ, Επάρκεια ΣΗΕ, ΑΠΕ, Συστήματα Αποθήκευσης, Monte Carlo, Δείκτες επάρκειας, Capacity Value, Equivalent Firm Capacity, Effective Load Carrying Capability

# Summary

This thesis investigates the contribution of Renewable Energy Sources and Energy Storage Units to the power adequacy of the generation system.

In an initial analysis, the concept of power system reliability is defined as well as its basic operating characteristics. Special emphasis is given to the power adequacy of the generation system, while the methods for assessing contributions to adequacy resulting from the calculation of Equivalent Firm Capacity (EFC) and Effective Load Carrying Capability (ELCC) are discussed.

Then, the stages of implementation of the Greek system simulation model incorporating thermal gas-fired power plants, photovoltaic, onshore and offshore wind farms, hydroelectric power plants as well as storage units are analyzed. For the simulation of the thermal units and for the assessment of the power adequacy through the reliability indices EENS (Expected Energy Not Served) and LOLE (Loss of Load Expectation), the Monte Carlo probabilistic method is used.

The contribution of existing RES, for the 2030 system, to the power adequacy is examined through the EFC and ELCC indices, while increased penetration of RES in the system is investigated by calculating their respective adequacy indices.

Furthermore, the operation of storage systems in the system is simulated. For this purpose, a storage management policy oriented to the system power adequacy is developed. The contribution of both a single storage station to power adequacy and multiple stations operating simultaneously in the system are considered. For the former case, different storage station configurations are investigated while for the latter, different policies for managing multiple stations are developed and compared. In each scenario, the contribution of the storage systems is calculated through the EFC index.

Finally, the main conclusions drawn from the analysis regarding the contribution to the power adequacy of both RES plants and storage plants are summarized.

The MATLAB programming environment was used to implement the above analysis.

**Key Words:** Power System Reliability, Resource Adequacy, RES, Energy Storage Systems, Monte Carlo, Adequacy Indices, Capacity Value, Equivalent Firm Capacity, Effective Load Carrying Capability

## Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Σταύρο Παπαθανασίου. Τόσο για την ευκαιρία που μου έδωσε να μελετήσω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα αλλά και για το ότι διεύρυνα τις γνώσεις μου σε ότι αφορά αυτό.

Ευχαριστώ επίσης, ιδιαιτέρως τον ερευνητή και υποψήφιο διδάκτορα κ. Παντελή Δράτσα για την προθυμία του να με βοηθήσει σε ό,τι χρειαστώ, χαρίζοντάς μου τις συμβουλές του, τη συνεχή καθοδήγησή του αλλά και την αμέριστη προσοχή του κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Τέλος, δεν θα ήθελα να παραλείψω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου αλλά και τους φίλους μου, Γιάννη και Τάσο, που στάθηκαν δίπλα μου και έδειξαν απόλυτη κατανόηση σε κάθε μου βήμα και κάθε απόφαση που πήρα η οποία σχετιζόταν με τη διπλωματική μου εργασία.



# Περιεχόμενα

|         |                                                                                |    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1       | Εισαγωγή .....                                                                 | 11 |
| 1.1     | Γενικά.....                                                                    | 11 |
| 1.2     | Δομή Εργασίας .....                                                            | 11 |
| 2       | Θεωρητικό Μέρος.....                                                           | 13 |
| 2.1     | Βασικές αρχές λειτουργίας των ΣΗΕ .....                                        | 13 |
| 2.2     | Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας .....                                            | 14 |
| 2.2.1   | Θερμικές Μονάδες .....                                                         | 15 |
| 2.2.2   | Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .....                                              | 15 |
| 2.2.2.1 | Φωτοβολταϊκά Πάρκα .....                                                       | 18 |
| 2.2.2.2 | Αιολικά Πάρκα .....                                                            | 20 |
| 2.2.2.3 | Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί .....                                                   | 21 |
| 2.2.3   | Σταθμοί Αποθήκευσης .....                                                      | 23 |
| 2.3     | Εισαγωγή στην Αξιοπιστία των ΣΗΕ .....                                         | 25 |
| 2.4     | Μέθοδοι Υπολογισμού Επάρκειας Συστήματος Παραγωγής .....                       | 27 |
| 2.4.1   | Αιτιοκρατικές Μέθοδοι Ανάλυσης Αξιοπιστίας .....                               | 28 |
| 2.4.2   | Πιθανοτικές Μέθοδοι Ανάλυσης Αξιοπιστίας .....                                 | 28 |
| 2.4.2.1 | Αναλυτική Μέθοδος.....                                                         | 29 |
| 2.4.2.2 | Μέθοδος Προσομοιώσεων Monte Carlo .....                                        | 29 |
| 2.4.2.3 | Πιθανοτικοί Δείκτες Αξιοπιστίας.....                                           | 30 |
| 2.5     | Μελέτες Επάρκειας των ΣΗΕ .....                                                | 32 |
| 2.5.1   | Μελέτη Επάρκειας του ENTSO-E.....                                              | 32 |
| 2.5.2   | Μελέτη Επάρκειας του ΑΔΜΗΕ .....                                               | 34 |
| 2.6     | Συνεισφορά ΑΠΕ και Αποθήκευσης στην Επάρκεια των ΣΗΕ .....                     | 39 |
| 3       | Μεθοδολογία.....                                                               | 43 |
| 3.1     | Μέθοδοι Επεξεργασίας των Δεδομένων .....                                       | 43 |
| 3.1.1   | Θερμικές Μονάδες και Μέθοδος Monte Carlo.....                                  | 43 |
| 3.1.2   | Υπολογισμός Δεικτών Επάρκειας και Αλγόριθμος RTS .....                         | 52 |
| 3.1.3   | Εισαγωγή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο μοντέλο Εκτίμησης Επάρκειας ..... | 54 |
| 3.1.4   | Ένταξη Αποθηκευτικών Σταθμών και Πολιτικές Ενσωμάτωσης .....                   | 57 |
| 3.2     | Υπολογισμός Capacity Value .....                                               | 64 |
| 3.2.1   | Equivalent Firm Capacity .....                                                 | 67 |
| 3.2.2   | Effective Load Carrying Capability .....                                       | 69 |
| 4       | Δεδομένα Εισόδου .....                                                         | 71 |
| 4.1     | Ζήτηση Φορτίου .....                                                           | 71 |

|       |                                                                                         |     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2   | Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .....                                                       | 72  |
| 4.3   | Υδροηλεκτρικές Μονάδες .....                                                            | 74  |
| 4.4   | Θερμικές Μονάδες .....                                                                  | 75  |
| 4.5   | Μονάδες Αποθήκευσης .....                                                               | 76  |
| 5     | Αποτελέσματα .....                                                                      | 77  |
| 5.1   | Αξιολόγηση Συμβολής των ΑΠΕ στην Επάρκεια Ισχύος .....                                  | 78  |
| 5.1.1 | Συμβολή Υφιστάμενων ΑΠΕ στην Επάρκεια Ισχύος.....                                       | 80  |
| 5.1.2 | Μεμονωμένη Ανάπτυξη ΑΠΕ και η Συμβολή τους στην Επάρκεια .....                          | 83  |
| 5.1.3 | Ταυτόχρονη Ανάπτυξη ΑΠΕ και η Συμβολή τους στην Επάρκεια .....                          | 87  |
| 5.2   | Συμβολή Αποθηκευτικών Σταθμών στην Επάρκεια Ισχύος .....                                | 89  |
| 5.2.1 | Συμβολή Πολλαπλών Αποθηκευτικών Σταθμών στην Επάρκεια Ισχύος μέσω Σειριακής Ένταξης 93  |     |
| 5.2.2 | Συμβολή Πολλαπλών Αποθηκευτικών Σταθμών στην Επάρκεια Ισχύος μέσω Παράλληλης Ένταξης 95 |     |
| 5.2.3 | Εκτίμηση Συμβολής Αποθηκευτικών Σταθμών στην Επάρκεια Ισχύος μέσω EFC .....             | 100 |
| 5.2.4 | Σύγκριση Σεναρίων Λειτουργίας Συστημάτων Αποθήκευσης .....                              | 105 |
| 6     | Επίλογος και Συμπεράσματα .....                                                         | 107 |
| 6.1   | Συμπεράσματα .....                                                                      | 107 |
| 6.2   | Μελλοντικές Προεκτάσεις και Εφαρμογές .....                                             | 109 |
|       | Παράρτημα .....                                                                         | 115 |

## Περιεχόμενα Σχημάτων

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 1: Ανάπτυξη Φ/Β πάρκων στην ελληνική αγορά. [πηγή: HELACPO] .....                                                                                           | 19 |
| Σχήμα 2: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς [MW] αιολικών πάρκων στην Ελλάδα ανά έτος στο διάστημα 1999-2023 [πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ] .....                                      | 21 |
| Σχήμα 3: Αξιοπιστία ΣΗΕ.....                                                                                                                                      | 27 |
| Σχήμα 4: Τυπικό μοντέλο συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας .....                                                                                           | 27 |
| Σχήμα 5: Επίπεδα Αξιοπιστίας Συστήματος Παραγωγής [48] .....                                                                                                      | 32 |
| Σχήμα 6: Εξέλιξη Συνολικής Ζήτησης Ενέργειας μέσα από διαφορετικά σενάρια. [πηγή: ΑΔΜΗΕ] ...                                                                      | 36 |
| Σχήμα 7: Ενδεικτική δειγματοληψία διάρκειας συστήματος που αποτελείται από δύο μονάδες. ....                                                                      | 48 |
| Σχήμα 8: Υπέρθεση συστήματος παραγωγής και φορτίου συστήματος. ....                                                                                               | 48 |
| Σχήμα 9: Συμβατικό μοντέλο δύο καταστάσεων για θερμική μονάδα παραγωγής .....                                                                                     | 49 |
| Σχήμα 10: Σύγκλιση Δεικτών Επάρκειας με βάση το EENS και το LOLE αντίστοιχα.....                                                                                  | 52 |
| Σχήμα 11: α) Ανεπάρκειες ομοιόμορφα κατανεμημένες στο σύστημα παραγωγής, β) υψηλή ανεπάρκεια σε ώρα αιχμής .....                                                  | 53 |
| Σχήμα 12: Αναπαράσταση λειτουργίας ΥΗΣ μέσω του «Peak Shaving» .....                                                                                              | 55 |
| Σχήμα 13: Αναπαράσταση λειτουργίας μονάδας αποθήκευσης. Σύγκριση χρονοσειρών διαθεσιμότητας θερμικών μονάδων και φορτίου (α) πριν την μπαταρία και (β) μετά. .... | 60 |
| Σχήμα 14: Συντελεστές των μονάδων αποθήκευσης με βάση διαφορετικά κριτήρια λειτουργίας .....                                                                      | 62 |
| Σχήμα 15: Συνολική ενέργεια σε ετήσια βάση των 35 χρονοσειρών της ζήτησης του φορτίου. ....                                                                       | 71 |

## Περιεχόμενα Πινάκων

|                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 1: Στοιχεία ΑΠΕ για το 2030.....                                                                                                                        | 72  |
| Πίνακας 2: Στοιχεία ΥΗΣ για το 2030 .....                                                                                                                       | 75  |
| Πίνακας 3: Στοιχεία Θερμικών Μονάδων Παραγωγής [Ονομασία, Ισχύς, FOR, MTTR] όπως<br>αντλήθηκαν από τον ΑΔΜΗΕ και ενσωματώθηκαν στο μοντέλο της Ενότητας 4. .... | 75  |
| Πίνακας 4: Δεδομένα συντήρησης Θερμικών Μονάδων Παραγωγής όπως αντλήθηκαν από τον<br>ΑΔΜΗΕ και ενσωματώθηκαν στο μοντέλο της Ενότητας 4.....                    | 76  |
| Πίνακας 5: Στοιχεία Μονάδων Αποθήκευσης .....                                                                                                                   | 76  |
| Πίνακας 6: Σενάρια ξεχωριστής ανάπτυξης ΦΒ με τα αντίστοιχα CV τους.....                                                                                        | 83  |
| Πίνακας 7: Σενάρια ξεχωριστής ανάπτυξης χερσαίων ΑΠ με τα αντίστοιχα CV τους.....                                                                               | 85  |
| Πίνακας 8: Σενάρια ξεχωριστής ανάπτυξης υπεράκτιων ΑΠ με τα αντίστοιχα CV τους.....                                                                             | 86  |
| Πίνακας 9: Σενάρια Ταυτόχρονης Ανάπτυξης Μείγματος ΑΠΕ .....                                                                                                    | 87  |
| Πίνακας 10: Σενάρια ταυτόχρονης ανάπτυξης ΑΠΕ με τους αντίστοιχους δείκτες επάρκειας και τα CV<br>τους.....                                                     | 88  |
| Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά BESS και Closed Loop κάτω από διάφορα σενάρια.....                                                                                   | 91  |
| Πίνακας 12: Υπολογισμός EFC με βάση το EENS για την κάθε μονάδα αποθήκευσης σε κάθε σενάριο.<br>.....                                                           | 92  |
| Πίνακας 13: Υπολογισμός EFC με βάση το LOLE για την κάθε μονάδα αποθήκευσης σε κάθε σενάριο.<br>.....                                                           | 92  |
| Πίνακας 14: Δείκτες Αξιοπιστίας στην σειριακή πολιτική εισαγωγής .....                                                                                          | 100 |
| Πίνακας 15: Δείκτες Αξιοπιστίας στην παράλληλη πολιτική εισαγωγής .....                                                                                         | 100 |
| Πίνακας 16: Αποτελέσματα EFC βάσει EENS για τις Μονάδες Αποθήκευσης σε κάθε σενάριο .....                                                                       | 101 |
| Πίνακας 17: Αποτελέσματα EFC βάσει LOLE για τις Μονάδες Αποθήκευσης σε κάθε σενάριο .....                                                                       | 101 |
| Πίνακας 18: Χαρακτηριστικά Aggregated Μονάδας με βάση τα αθροιστικά χαρακτηριστικά των<br>επιμέρους μονάδων .....                                               | 105 |

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Η ενεργειακή μετάβαση αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις του 21ου αιώνα για την παγκόσμια κοινότητα. Καθώς οι πηγές ενέργειας γίνονται περισσότερο βιώσιμες και αειφόρες, ο ρόλος των ανανεώσιμων πηγών και της αποθήκευσης ενέργειας αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία. Αυτή η μετάβαση επηρεάζει σημαντικά και την Ελλάδα, η οποία, ακολουθώντας τις ευρωπαϊκές οδηγίες και τους στόχους για απανθρακοποίηση, αναζητά νέους, πιο φιλικούς προς το περιβάλλον και αποτελεσματικούς τρόπους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην επάρκεια των πόρων παραγωγής του ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος. Ειδικότερα, διερευνά πώς οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και οι αποθηκευτικοί σταθμοί μπορούν να συμβάλουν στην επίτευξη της επιθυμητής επάρκειας. Ο στόχος είναι να κατανοηθεί πώς η αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ και η χρήση αποθηκευτικών σταθμών επηρεάζουν την ικανότητα του ελληνικού συστήματος να παράγει ηλεκτρική ενέργεια με ασφάλεια και αξιοπιστία.

Με βάση, λοιπόν, την παρούσα έρευνα προσδοκούμε όχι μόνο να καταλάβουμε καλύτερα τις δυνατότητες και τους περιορισμούς της ενεργειακής μετάβασης στην Ελλάδα, αλλά και να προτείνουμε κατάλληλες στρατηγικές και πολιτικές ενσωμάτωσης νέων σταθμών ΑΠΕ και αποθήκευσης που μπορούν να βοηθήσουν στη μετάβαση προς ένα πιο αποδοτικό ενεργειακό μέλλον.

Κατ' επέκταση, επιδιώκουμε να συμβάλουμε στην ανάπτυξη γνώσης και τεχνολογίας που θα επιτρέψουν στην Ελλάδα να ανταποκριθεί αποτελεσματικά στις μελλοντικές προκλήσεις που ενδέχεται να αντιμετωπίσει.

## 1.2 Δομή Εργασίας

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι ενότητες της εργασίας και το περιεχόμενό τους.

### **ΕΝΟΤΗΤΑ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στη παρούσα ενότητα γίνεται εισαγωγή στο θέμα της επάρκειας ισχύος στο ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα ενέργειας. Καθορίζεται ο προβληματισμός και οι στόχοι της μελέτης που θα συμβάλει στην επίλυση του προβληματισμού αυτού.

### **ΕΝΟΤΗΤΑ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

Σε αυτή την ενότητα γίνεται μία σύντομη επισκόπηση της έννοιας της επάρκειας ισχύος σε ηλεκτρικά συστήματα. Γίνεται αναφορά στις βασικές έννοιες της λειτουργίας του ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος καθώς και εισαγωγή στις έννοιες του ηλεκτρικού συστήματος όπως

οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και οι Μονάδες Αποθήκευσης. Αναλύεται η έννοια της αξιοπιστίας των ΣΗΕ αλλά και οι αντίστοιχες μέθοδοι αξιολόγησης της επάρκειας του από τους αρμόδιους διαχειριστές.

### **ΕΝΟΤΗΤΑ 3: ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ**

Στη συγκεκριμένη ενότητα αναλύονται οι βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή και επεξεργασία των βασικών στοιχείων από τα οποία αποτελείται το ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα. Περιγράφεται η μέθοδος του Monte Carlo αλλά και το πως χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση του ΣΗΕ παράλληλα με τους αντίστοιχους δείκτες επάρκειας. Παρουσιάζονται οι τρόποι ενσωμάτωσης των μονάδων αποθήκευσης στο σύστημα ενώ τέλος γίνεται αναφορά στους βασικούς δείκτες που χρησιμοποιούνται με σκοπό την αξιολόγηση της επάρκειας.

### **ΕΝΟΤΗΤΑ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα της μελέτης. Αξιολογείται η επάρκεια ισχύος με βάση την αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ και της συμβολής των αποθηκευτικών σταθμών.

### **ΕΝΟΤΗΤΑ 5: ΕΠΙΛΟΓΟΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

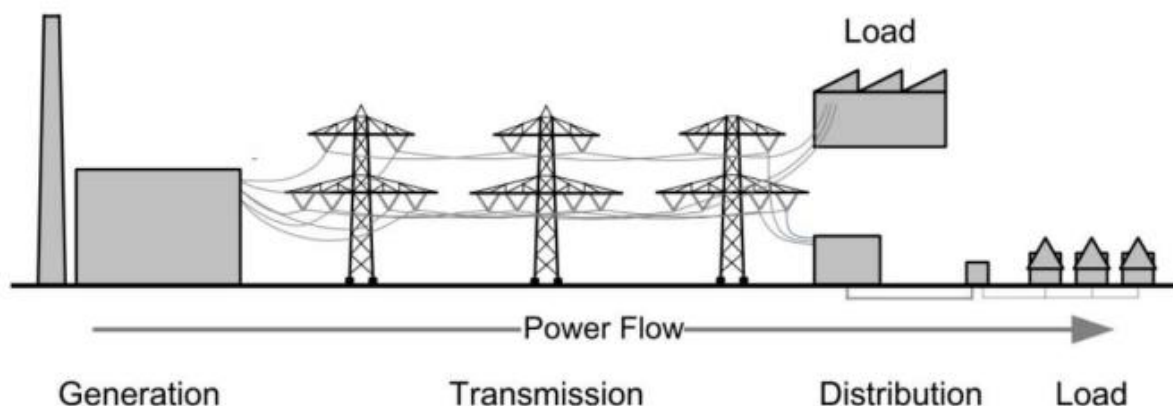
Στη τελευταία ενότητα συνοψίζονται τα κύρια ευρήματα της μελέτης ενώ παράλληλα γίνεται αναφορά στις πιθανές εφαρμογές και τις προοπτικές που υπάρχουν στον συγκεκριμένο τομέα.

## 2 Θεωρητικό Μέρος

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των θεωρητικών σημείων που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία. Γίνεται αναφορά τόσο στις βασικές αρχές λειτουργίας των ΣΗΕ με έμφαση στο στάδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και στην έννοια της αξιοπιστίας του συστήματος παραγωγής. Παρίστανται αναλυτικά οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας – θερμικοί σταθμοί, ανανεώσιμες πηγές και σταθμοί αποθήκευσης - και παρουσιάζονται οι μέθοδοι υπολογισμού της αξιοπιστίας ενός συστήματος με ιδιαίτερη έμφαση στις ήδη υπάρχουσες μελέτες επάρκειας από τους διαχειριστές του συστήματος.

### 2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας των ΣΗΕ

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι μία μορφή ενέργειας που υπάρχει χάρη στην παρουσία ή την κίνηση ηλεκτρικών φορτίων. Καθίσταται μία από τις πιο χρήσιμες μορφές ενέργειας και ίσως μία από τις πιο διαδεδομένες καθώς είναι πολύ εύκολα διαχειρίσιμη και αξιοποιήσιμη. Τα τελευταία χρόνια, οι ανάγκες του ανθρώπινου πληθυσμού, και ιδιαίτερα των αστικών κοινωνιών, σε όρους ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνονται συνεχώς με αποτέλεσμα στα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα να παρατηρείται παγκόσμια κάλυψη της τάξεως του 15% των συνολικών αναγκών σε τελική κατανάλωση ενέργειας [1], [2].



Εικόνα 1: Τυπική Αναπαράσταση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας μέσω Διαγράμματος Ροής Ισχύος [πηγή: (2)]

Τα πρώτα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) εμφανίστηκαν στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα ενώ μετά από μερικά χρόνια έκανε την εμφάνιση της η τεχνολογία του εναλλασσόμενου ρεύματος που αποτέλεσε και επαναστατική αλλαγή για την πρόοδο του ηλεκτρισμού σαν βασικό αγαθό της ανθρωπότητας. Σήμερα, έχουν κατασκευαστεί πολύπλοκα συστήματα σχεδιασμένα για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας με αποτελεσματικό και αξιόπιστο τρόπο προς τους καταναλωτές.

Το φορτίο των καταναλωτών ποικίλλει ανάλογα με τη ζήτηση. Η κατανομή του οικιακού φορτίου κατά τη διάρκεια του 24ώρου εξαρτάται από την περίοδο του έτους, τις καιρικές συνθήκες, από κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες αλλά ασφαλώς ορισμένες φορές και από αστάθμητους παράγοντες (ακραίες καιρικές συνθήκες όπως καύσωνες, απότομες

μεταβολές στη ζήτηση των καυσίμων κτλ.). Διαφορές μπορεί να παρατηρηθούν ακόμα και ανάμεσα στην εβδομάδα όπως ανάμεσα στις καθημερινές και στα σαββατοκύριακα. Εκεί μάλιστα παρατηρείται μεγαλύτερη διαφορά λόγω των βιομηχανικών και εμπορικών φορτίων.

Σημαντικό παράγοντα στην αξιολόγηση των αναγκών της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ο ταυτοχρονισμός της ζήτησης. Οι καταναλωτές δεν ζητούν ταυτόχρονα το μέγιστο φορτίο αλλά ετεροχρονισμένα, με αποτέλεσμα το άθροισμα των επιμέρους μέγιστων φορτίων των καταναλωτών να είναι μικρότερο από το άθροισμα των επιμέρους μέγιστων φορτίων. Το γεγονός αυτό εκφράζεται, μάλιστα, με τον αντίστοιχο συντελεστή ετεροχρονισμού. Παράλληλα, για τη μελέτη και την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται οι καμπύλες φορτίου. Χαρακτηριστικά μεγέθη φορτίων είναι:

- Η αιχμή του φορτίου η οποία είναι η μέγιστη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος μία χρονική στιγμή.
- Η ενέργεια που ζητείται σε ένα χρονικό διάστημα και ισούται με το εμβαδό που σχηματίζεται μεταξύ της καμπύλης και του άξονα του χρόνου.
- Το μέσο φορτίο που ισούται με το φορτίο που αν διατηρούταν σταθερό σε ένα χρονικό διάστημα  $T$  θα κατανάλωνε ενέργεια ίση με  $E$ .
- Ο συντελεστής φορτίου ο οποίος ισούται με το λόγο της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας  $E$  προς τη μέγιστη κατανάλωση που θα μπορούσε να έχει ο καταναλωτής, αν ζητούσε συνεχώς το μέγιστο φορτίο του.

## 2.2 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια, η ανθρωπότητα έχει έρθει αντιμέτωπη με ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα και κάθε μέρα καλείται να βρει ολοένα και πιο αποδοτικές λύσεις για να το αντιμετωπίσει, το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής. Ένας από τους βασικούς της στόχους είναι να δημιουργηθεί μία βιομηχανία με λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Εστιάζοντας στην βιομηχανία της ενέργειας, μία βασική λύση σε αυτό το πρόβλημα αποτελεί η χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.) μιας και η μελέτη σχετικά με αυτές, τα τελευταία χρόνια, έχει αποδείξει το πόσο σημαντική είναι η συνεισφορά τους στην απανθρακοποίηση [3]. Ο άνθρακας ήταν και παραμένει μέχρι σήμερα μία από τις βασικότερες πηγές της ηλεκτρικής παραγωγής στην Ευρώπη, καθώς το 2022 αποτελούσε το 15,8 % της συνολικής παραγωγής ενώ ευρύτερα τα ορυκτά καύσιμα εξακολουθούν να οφείλονται για το 38,7 % αυτής της ενέργειας [4]. Ωστόσο, μεγάλη άνοδο έχουν σημειώσει οι ΑΠΕ μέσα σε 15 χρόνια, καθώς από το σημείο που ευθυνόταν για το 17,6 % έφτασαν να ευθύνονται για το 39,4 % της συνολικής ενέργειας που παράγεται στην Ευρώπη των 27 μελών – κρατών. Σημαντικό παράγοντα σε αυτό το ποσοστό έχει συντελέσει και η Ελλάδα, μιας και το 2022 οι ΑΠΕ βρίσκονταν στο 46 % έναντι των ορυκτών καυσίμων που είναι στο υπόλοιπο 54 % (δεν παράγεται ενέργεια μέσω πυρηνικών αντιδραστήρων). Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα προέρχεται από διάφορες πηγές τις οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια.

### 2.2.1 Θερμικές Μονάδες

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της καύσης συμβατικών ορυκτών καυσίμων και των προϊόντων τους είναι η συνηθέστερη μέθοδος που συναντάται από τα πρώτα χρόνια που ο άνθρωπος ήρθε σε επαφή με τον ηλεκτρισμό. Ο γαιάνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο αποτελούν τις συνηθέστερες μορφές τους σήμερα. Μάλιστα, ανήκουν στην κατηγορία των υδρογονανθράκων λόγω του σχηματισμού τους από δύο χημικά στοιχεία, το υδρογόνο και τον άνθρακα. Τα ορυκτά καύσιμα χρησιμοποιούνται σε μεγάλους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής για την δημιουργία ηλεκτρισμού. Οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων του υδρογόνου και του άνθρακα έχουν αποθηκευμένη ποσότητα ενέργειας, η οποία μέσω της καύσης, με παρουσία οξυγόνου, απελευθερώνεται από το σπάσιμο των δεσμών σχηματίζοντας διοξείδιο του άνθρακα. Έχουν δημιουργηθεί από την αποσύνθεση φυτών και ζώων μέσω μιας διαδικασίας που χρειάστηκε εκατομμύρια χρόνια για να ολοκληρωθεί. Δεν αποτελούν ανανεώσιμη πηγή ενέργειας το οποίο σημαίνει ότι η διαθεσιμότητα τους είναι περιορισμένη και κάποια στιγμή στο μέλλον θα εξαντληθούν.

### 2.2.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, ο ήλιος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Συγκεκριμένα σύμφωνα με την οδηγία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, ως ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές θεωρείται η αιολική, ηλιακή, γεωθερμική, υδροθερμική και ενέργεια των ωκεανών, υδροηλεκτρική, από βιομάζα, από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέρια. [5]

Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Έτσι θεωρούνται από πολλούς μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Γη.

Ως «ανανεώσιμες πηγές» θεωρούνται γενικά οι εναλλακτικές των παραδοσιακών πηγών ενέργειας (π.χ. του πετρελαίου ή του άνθρακα), όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια. Ο χαρακτηρισμός «ανανεώσιμες» είναι κάπως καταχρηστικός, αφού ορισμένες από αυτές τις πηγές, όπως η γεωθερμική ενέργεια, δεν ανανεώνονται σε κλίμακα χιλιετιών. Σε κάθε περίπτωση οι ΑΠΕ έχουν μελετηθεί ως λύση στο πρόβλημα της αναμενόμενης εξάντλησης των (μη ανανεώσιμων) αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων. Οι ΑΠΕ αποτελούν τη βάση του μοντέλου οικονομικής ανάπτυξης της πράσινης οικονομίας και κεντρικό σημείο εστίασης της σχολής των οικολογικών οικονομικών, η οποία έχει κάποια επιρροή στο οικολογικό κίνημα.

Ορισμένες από αυτές τις μορφές αναλύονται παρακάτω.

- Ηλιακή Ενέργεια: χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από την ήλιο. Τέτοιες είναι η φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα καθώς και διάφορες ακτινοβολίες. Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολο της είναι πρακτικά ανεξάντλητη και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της. Αναφορικά με την εκμετάλλευσή της αυτή χωρίζεται σε τρεις βασικές κατηγορίες: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα τελευταία μάλιστα στηρίζονται στην μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου και αποτελούν μία από τις πιο χρησιμοποιημένες μορφές ΑΠΕ στην Ελλάδα και στον κόσμο. [6]
- Αιολική Ενέργεια: ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευσή του ανέμου. Ονομάζεται αιολική προς τιμήν του θεού του ανέμου, τον Αίολο, της ελληνικής μυθολογίας. Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό τους ανέμους [7]. Αποτελεί μία βιώσιμη και ανανεώσιμη ενέργεια και έχει πολύ μικρότερο αντίκτυπο στο περιβάλλον σε σύγκριση με την καύση των ορυκτών καυσίμων, γι' αυτό και αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Το «καύσιμο» της είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν. Δεν εκλύονται αέρια και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Ο άνεμος είναι μια διακοπτόμενη πηγή ενέργειας, η οποία δεν μπορεί να παράγει ηλεκτρισμό ούτε να αποστέλλεται κατόπιν ζήτησης. Παρέχει επίσης μεταβλητή ισχύ, η οποία είναι σταθερή συνολικά από έτος σε έτος, χωρίς δηλαδή σημαντικές διακυμάνσεις αλλά ποικίλλει σε μικρότερα χρονικά διαστήματα. Επομένως, πρέπει να χρησιμοποιείται μαζί με άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας ή να αποθηκεύεται με σκοπό την παροχή αξιόπιστης και συνεχούς τροφοδοσίας. Όταν αυξάνεται το ποσοστό της αιολικής ενέργειας σε μια περιοχή, απαιτούνται συμβατικές πηγές ενέργειας για την υποστήριξη (όπως η ενέργεια από ορυκτά καύσιμα και η πυρηνική ενέργεια). Για να μπορέσει να λειτουργήσει όμως ένα σύστημα, ενδέχεται να χρειάζεται αναβάθμιση. Αυτή η αναβάθμιση μπορεί να επιτευχθεί με τεχνικές διαχείρισης ισχύος, όπως είναι η ύπαρξη πηγών τροφοδοσίας, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η πλεονάζουσα χωρητικότητα, οι γεωγραφικά κατανεμημένοι στρόβιλοι, η εξαγωγή και εισαγωγή ισχύος σε γειτονικές περιοχές, η αποθήκευση ενέργειας ή ακόμα και η μείωση της ζήτησης όταν η παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι χαμηλή. Σημαντική βοήθεια προσφέρει η πρόγνωση του καιρού, η οποία επιτρέπει στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να προετοιμαστεί για τις προβλέψιμες διακυμάνσεις που συμβαίνουν στην παραγωγή.

- Υδραυλική Ενέργεια: και εν μέρει υδροηλεκτρική είναι η ενέργεια που αποταμιεύεται ως δυναμική ενέργεια μέσα σε ένα βαρυτικό πεδίο με τη συσσώρευση μεγάλων ποσοτήτων νερού σε υψομετρική διαφορά από τη συνέχιση της ροής του ελεύθερου νερού, και αποδίδεται ως κινητική μέσω της υδατόπτωσης. Η κινητική ενέργεια, στη συνέχεια, μπορεί είτε να χρησιμοποιείται αυτούσια (π.χ. νερόμυλοι), είτε να μετατρέπεται σε ηλεκτρική ή άλλες μορφές, που την αποθηκεύουν, ώστε τελικά να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις. Στον γήινο κύκλο του νερού η ενέργεια προέρχεται κυρίως από τον ήλιο που εξατμίζει, σηκώνει δηλαδή ψηλά στην ατμόσφαιρα, μεγάλες ποσότητες νερού. Η εκμετάλλευση της ενέργειας στον κύκλο αυτό γίνεται με τη χρήση υδροηλεκτρικών έργων (υδατοταμιευτήρες, φράγματα, κλειστοί αγωγοί πτώσεως, υδροστρόβιλοι, ηλεκτρογεννήτριες).
- Βιομάζα: ορίζεται ως το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων ή υπολειμμάτων βιολογικής προέλευσης, από τη γεωργία (συμπεριλαμβανομένων των φυτικών και των ζωικών ουσιών), τη δασοπονία και τους συναφείς κλάδους, συμπεριλαμβανομένης της αλιείας και της υδατοκαλλιέργειας. Λέγεται επίσης το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των βιομηχανικών αποβλήτων και των οικιακών απορριμμάτων. Ουσιαστικά, η βιομάζα αποτελεί την ύλη που έχει άμεση ή έμμεση βιολογική (οργανική) προέλευση. Η ενέργεια που είναι δεσμευμένη στις φυτικές ουσίες προέρχεται από τον Ήλιο. Με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, τα φυτά μετασχηματίζουν την ηλιακή ενέργεια σε βιομάζα. Οι ζωικοί οργανισμοί αυτή την ενέργεια την προσλαμβάνουν με την τροφή τους και αποθηκεύουν ένα μέρος της. Αυτή την ενέργεια αποδίδει τελικά η βιομάζα, μετά την επεξεργασία και τη χρήση της. Είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας γιατί στην πραγματικότητα είναι αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια που δεσμεύτηκε από τα φυτά κατά τη φωτοσύνθεση.
- Γεωθερμική Ενέργεια: Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της Γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές, είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η επιστημονική κοινότητα ταξινομεί συνήθως τη γεωθερμία στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.). Το υπόγειο νερό ή ο ατμός που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή για την κάλυψη θερμικών αναγκών (άμεσες χρήσεις γεωθερμίας), με την κατάλληλη διαχείριση, δεν θα ελαττωθούν, επειδή η κατείσδυση των επιφανειακών υδάτων θα συνεχίσει να επανατροφοδοτεί τους γεωθερμικούς ταμιευτήρες και δε χρειάζονται μεγάλοι γεωλογικοί χρόνοι (περίοδοι) για αναγέννηση. Αρκεί να μη γίνεται υπεράντληση. Όμως, επειδή οι δεξαμενές γεωθερμίας είναι τεράστιες σε μέγεθος συγκριτικά με τις ανάγκες του ανθρώπου, η γεωθερμική ενέργεια είναι πρακτικά ανανεώσιμη.

Στην Ελλάδα παρατηρείται έντονη δραστηριότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω αυτών των μορφών. Συγκεκριμένα, μεγάλη έμφαση δίνεται στην ηλιακή, έπειτα στην αιολική

και τέλος στην υδραυλική μορφή ενέργειας. Οι υπόλοιπες μορφές αποτελούν αμελητέα ποσότητα ως προς την ετήσια παραγόμενη ενέργεια τους και δεν θα τις συμπεριλάβουμε στην παρούσα μελέτη. Συνεπώς, αξίζει να επικεντρωθούμε στους σταθμούς που έχουν σχηματιστεί προκειμένου να αξιοποιηθούν αυτές οι τρεις πιο διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμων πηγών και στην συνολική συνεισφορά τους στο ηλεκτρικό μας σύστημα. Οι σταθμοί αυτοί είναι:

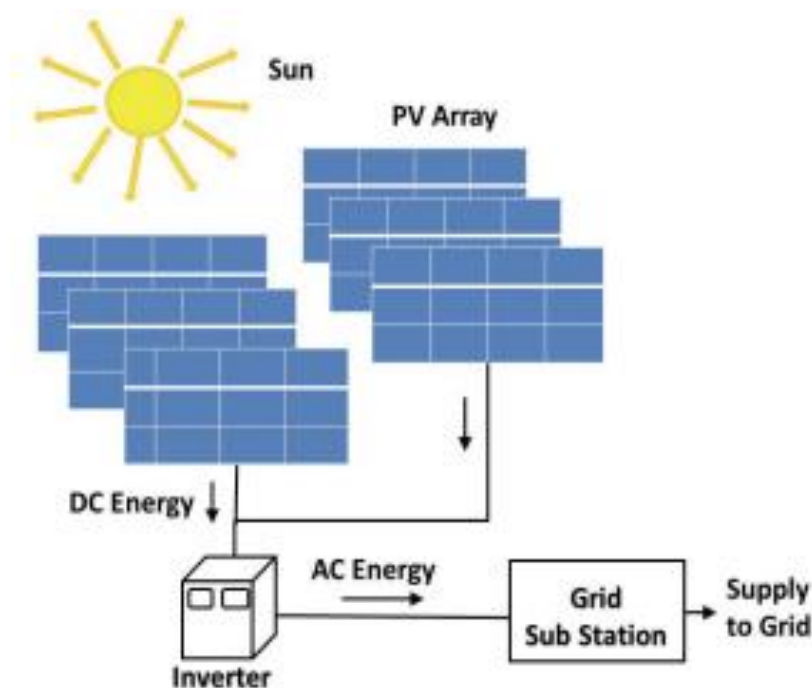
- Φωτοβολταϊκά Πάρκα
- Αιολικά Πάρκα (Χερσαία και Υπεράκτια)
- Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί Παραγωγής

και αναλύονται ως εξής:

### 2.2.2.1 Φωτοβολταϊκά Πάρκα

Με τον γενικό όρο φωτοβολταϊκά πάνελ ονομάζουμε τη βιομηχανική διάταξη πολλών φωτοβολταϊκών κυττάρων σε μία σειρά. Στην ουσία πρόκειται για τεχνητούς ημιαγωγούς (συνηθέστερο στοιχείο το πυρίτιο) οι οποίοι ενώνονται με σκοπό να δημιουργήσουν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα σε σειρά. Οι ημιαγωγοί αυτοί απορροφούν φωτόνια από την ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν μία ηλεκτρική τάση. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ομαδοποιούνται κατάλληλα και συγκροτούν φωτοβολταϊκά πλαίσια ενώ τα πλαίσια όταν συνδέονται ηλεκτρολογικά μεταξύ τους συγκροτούν τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες.

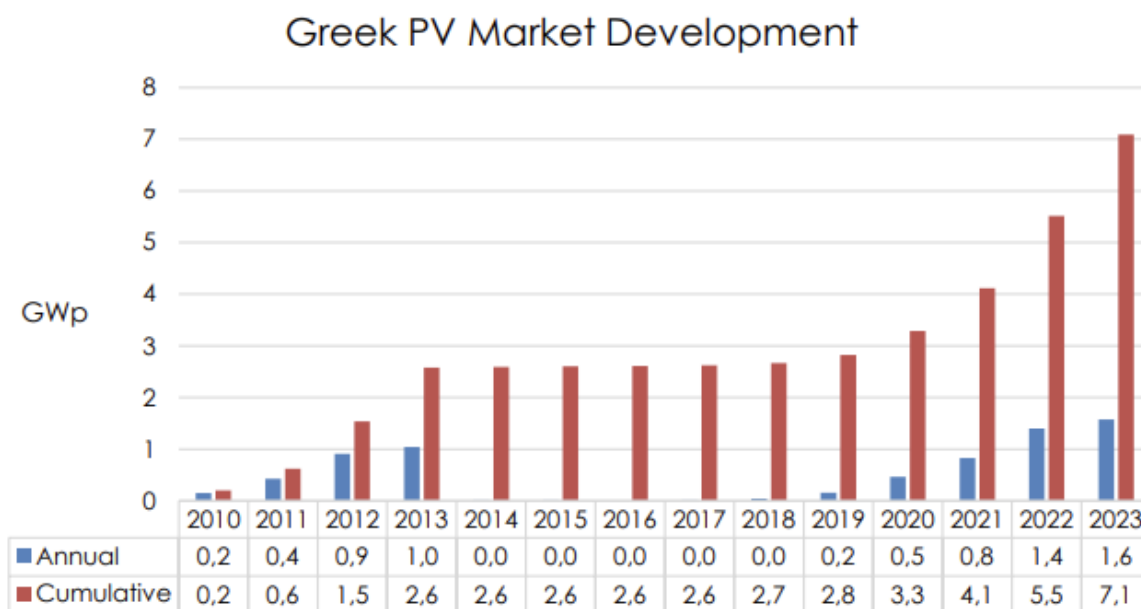


Εικόνα 2: Διάγραμμα διάταξης Φ/Β πάρκου σε σύνδεση στο σύστημα.  
[πηγή: (3)]

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια Φ/Β συστοιχία είναι συνεχούς ρεύματος (DC), και για το λόγο αυτό οι πρώτες χρήσεις των φωτοβολταϊκών αφορούσαν εφαρμογές DC τάσης: κλασικά παραδείγματα είναι ο υπολογιστής τσέπης («κομπιουτεράκι και οι δορυφόροι. Με την προοδευτική αύξηση όμως του βαθμού απόδοσης, δημιουργήθηκαν ειδικές συσκευές – οι αναστροφείς (inverters) - που σκοπό έχουν να μετατρέψουν την έξοδο συνεχούς τάσης της Φ/Β συστοιχίας σε εναλλασσόμενη τάση. Με τον τρόπο αυτό, το Φ/Β σύστημα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει μια σύγχρονη εγκατάσταση (κατοικία, θερμοκήπιο, μονάδα παραγωγής κλπ.) που χρησιμοποιεί κατά κανόνα συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος (AC).

Υπάρχουν δυο κύριες κατηγορίες συστημάτων, το διασυνδεδεμένο με το υπόλοιπο σύστημα και το αυτόνομο. Τα συνδεδεμένα συστήματα μπορούν να υποδιαιρεθούν σ' εκείνα στα οποία το σύστημα ενεργεί απλώς ως μια βοηθητική τροφοδοσία (εφεδρικό σύστημα) και εκείνα τα οποία ίσως λάβουν επίσης πρόσθετη ισχύ από τη Φ/Β γεννήτρια. Μέσα στους Φ/Β σταθμούς όλη η παραγόμενη ισχύς τροφοδοτείται στο σύστημα. Στην παρούσα μελέτη θα επικεντρωθούμε στα διασυνδεδεμένα συστήματα.

Η ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα έχει ξεκινήσει από το 2006 ενώ σήμερα η συμμετοχή τους στην αγορά έχει γνωρίσει μία σημαντική άνοδο η οποία αξιολογείται ότι θα συνεχίσει να υφίσταται. Το 2023, εγκαταστάθηκαν συνολικά 1,6 GW νέων Φ/Β έργων στο σύστημα, αυξάνοντας την συνολική εγκατεστημένη ισχύ στα 7,1 GW. Αυτή η αύξηση αποτέλεσε σημείο ρεκόρ για τα ελληνικά δεδομένα και ένα πολύ σημαντικό βήμα προς τους «πράσινους» στόχους που έχουν τεθεί για το συνολικό σύστημα. [8]



Σχήμα 1: Ανάπτυξη Φ/Β πάρκων στην ελληνική αγορά.  
[πηγή: HELACPO]

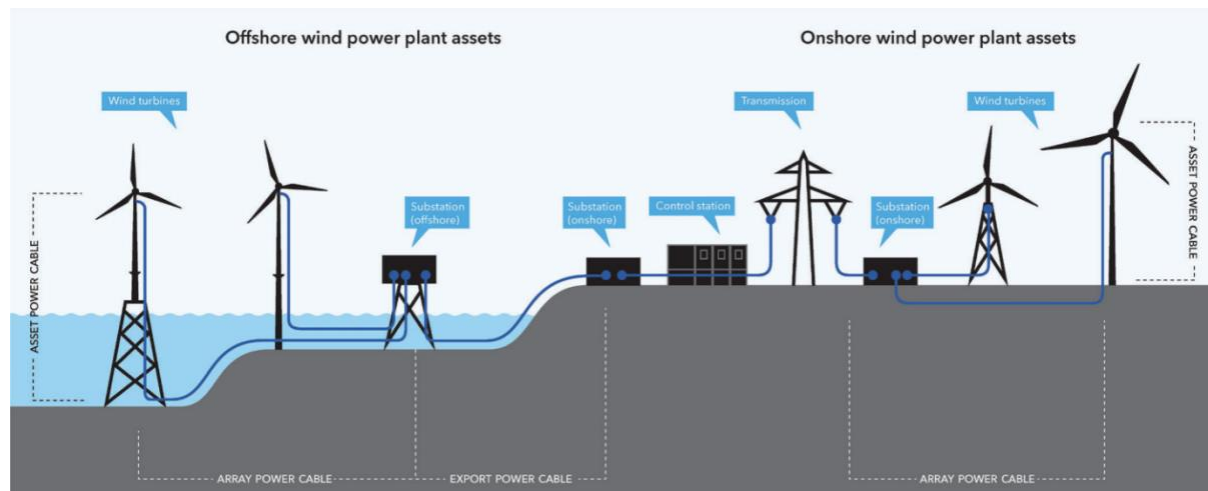
Σε «καθαρούς» όρους ζήτησης φορτίου, η ηλιακή ενέργεια το 2023 κάλυψε το 16,7 % της συνολικής ζήτησης ενώ παραμένει η πιο φθηνή τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής μέχρι σήμερα. Χάρη στα Φ/Β αποφεύχθηκαν 5,7 εκατομμύρια τόνοι εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, σημαντικό επίτευγμα για τον στόχο της απανθρακοποίησης του συστήματος.

Τέλος, σημαντικό να αναφερθεί ότι ο στόχος που έχει τεθεί για το 2030 είναι η εγκατεστημένη ισχύς των Φ/Β πλαισίων να ανέρχεται στα 13,4 GW, η οποία αντιστοιχίζεται σχεδόν στο διπλάσιο των σημερινών δεδομένων. [9]

### 2.2.2.2 Αιολικά Πάρκα

Αιολικό πάρκο ή Αιολικός Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΣΠΗΕ) ονομάζεται η χερσαία ή θαλάσσια έκταση στην οποία έχει τοποθετηθεί ένας αριθμός ανεμογεννητριών με σκοπό τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική. Συγκεκριμένα είναι βιομηχανικές εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες αποτελούνται από τις ανεμογεννήτριες, τα καλώδια μεταφοράς ρεύματος, τους μετεωρολογικούς ιστούς, τους σταθμούς μετασχηματισμού και βοηθητικές υποδομές συμπεριλαμβανομένων των δρόμων.

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους δε ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα με τη παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα ή άλλων αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η ρύπανση που σχετίζεται με τους ΑΣΠΗΕ είναι έμμεση λόγω του ότι λαμβάνει χώρα κατά τη παραγωγή, τη μεταφορά, τη διάνοιξη δρόμων όπου θεωρηθεί αναγκαίο και την εγκατάσταση των στοιχείων που το απαρτίζουν καθώς επίσης και με τη δυνατότητα ανακύκλωσης ή μη, των υλικών μετά το πέρας λειτουργίας του ΑΣΠΗΕ. [10]



Εικόνα 3: Διάγραμμα Σύνδεσης χερσαίων και υπεράκτιων αιολικών πάρκων στο σύστημα.  
[πηγή (4)]

Όπως αναφέρθηκε, οι ΑΣΠΗΕ μπορεί να είναι είτε σε χερσαία ή θαλάσσια έκταση. Τα θαλάσσια αιολικά πάρκα παράγουν ρεύμα από τον άνεμο που φυσά στη θάλασσα. Τα θεμέλια των ανεμογεννητριών κατασκευάζονται στο βυθό της θάλασσας και ο πύργος της ανεμογεννήτριας έξω από το νερό. Όμως υπάρχει τεράστιο κόστος, μεγαλύτερο από ένα επίγειο αιολικό πάρκο, για να κατασκευαστεί ένα θαλάσσιο αιολικό πάρκο, γι' αυτό ο αριθμός τους είναι πολύ περιορισμένος.

Ιδιαίτερη έμφαση αξίζει να δώσουμε στην τεχνολογία της Ανεμογεννήτριας καθώς επρόκειτο για μία εξαιρετική τεχνολογική κατασκευή.

Για το 2023, το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος των αιολικών πάρκων ανέρχεται στα 5,226 MW, ξεπερνώντας το ορόσημο των 5 GW ενώ αποτέλεσε το 23,5 % της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής. [11]



Σχήμα 2: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς [MW] αιολικών πάρκων στην Ελλάδα ανά έτος στο διάστημα 1999-2023  
[πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ]

Η Ελλάδα έχει ως στόχο για το 2030 τα χερσαία αιολικά να ανέλθουν σε 7,6 GW. Με 5,226 GW ήδη εγκατεστημένα στη στεριά εκτιμάται ότι ο στόχος θα επιτευχθεί. Τα χερσαία αιολικά θα συνεχίσουν να αποτελούν τα 2/3 των νέων εγκαταστάσεων την περίοδο 2024-2030, ωστόσο τα υπεράκτια αιολικά θα «ανεβάσουν» ταχύτητα προς το τέλος της δεκαετίας. Γι' αυτό και στόχος έχει οριστεί να έχουν επίσης εγκατασταθεί 1,9 GW υπεράκτια αιολικά πάρκα μέχρι το 2030. Να τονιστεί ότι δεν έχει υπάρξει κάποιο υπεράκτιο αιολικό πάρκο σε λειτουργία μέχρι και σήμερα και τα πρώτα έργα αναμένεται να έχουν ολοκληρωθεί μετά το 2027. [9]

### 2.2.2.3 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

Η λειτουργία των υδροηλεκτρικών μονάδων βασίζεται στην κίνηση του νερού λόγω διαφοράς μανομετρικού ύψους μεταξύ των σημείων εισόδου και εξόδου. Για το σκοπό αυτό κατασκευάζεται ένα φράγμα που συγκρατεί την απαιτούμενη ποσότητα νερού στον δημιουργούμενο ταμιευτήρα. Κατά τη διέλευσή του από τον αγωγό πτώσεως κινεί έναν στρόβιλο ο οποίος θέτει σε λειτουργία τη γεννήτρια.

Τα υδροηλεκτρικά έργα ταξινομούνται σε μεγάλης και μικρής κλίμακας. Τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα διαφέρουν σημαντικά από της μεγάλης κλίμακας σε ότι αφορά τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να ξέρουμε τον ρόλο και τις διαφορές αυτών καθώς παίζουν μεγάλο ρόλο ανάλογα με το σκοπό μας.

Οι μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικές μονάδες απαιτούν τη δημιουργία φραγμάτων και τεράστιων δεξαμενών με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η κατασκευή φραγμάτων περιορίζει τη μετακίνηση των ψαριών, της άγριας ζωής και επηρεάζει ολόκληρο το οικοσύστημα καθώς μεταβάλλει ριζικά τη μορφολογία της περιοχής.

Αντίθετα, τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά εγκαθίστανται δίπλα σε ποτάμια ή κανάλια και η λειτουργία τους παρουσιάζει πολύ μικρότερη περιβαλλοντική όχληση. Για το λόγο αυτό, οι

υδροηλεκτρικές μονάδες μικρότερης δυναμικότητας των 30 MW χαρακτηρίζονται ως μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα και συμπεριλαμβάνονται μεταξύ των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Κατά τη λειτουργία τους, μέρος της ροής ενός ποταμού οδηγείται σε στρόβιλο για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας και συνακόλουθα ηλεκτρικής μέσω της γεννήτριας. Η χρησιμοποιούμενη ποσότητα νερού κατόπιν επιστρέφει στο φυσικό ταμιευτήρα ακολουθώντας τη φυσική της ροή. [12]

Ειδικότερα, οι σταθμοί διακρίνονται στους σταθμούς φυσικής ροής και στους σταθμούς δεξαμενής:

Σε ποταμούς με μεγάλη παροχή σε όλη τη διάρκεια του έτους συμφέρει η αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας με σταθμούς φυσικής ροής. Σε αυτούς δεν ρυθμίζεται σημαντικά η ποσότητα του νερού. Χρησιμοποιούνται κυρίως σαν εργοστάσια βάσης. Αυτοί έχουν μικρή ή και καθόλου δυνατότητα αποθήκευσης. Χωρίς να απαιτούν σημαντικά έργα υποδομής, δεν προκαλούν σχεδόν καθόλου διατάραξη του οικοσυστήματος εξαιτίας των φραγμάτων τους και των αντίστοιχων δεξαμενών τους. Ένα τμήμα του ποταμού εκτρέπεται μέσω του στομίου εισόδου σε μια δεξαμενή φόρτισης, που λειτουργεί ως δεξαμενή αποθήκευσης μικρής χωρητικότητας. Από εκεί το νερό οδεύει μέσα σε ένα σύστημα σωληνώσεων, που ονομάζεται αγωγός πτώσης και μεταφέρει νερό υπό πίεση σε έναν στρόβιλο/γεννήτρια σε έναν σταθμό παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος που βρίσκεται σε κάποιο ύψος κάτω από το επίπεδο λήψης. Αν αυτός είναι ένας πολύ μικρός αυτόνομος (εκτός συστήματος) σταθμός μπορεί επίσης να διαθέτει μια συστοιχία συσσωρευτών, για να βοηθήσει στην κάλυψη των απαιτούμενων φορτίων μέγιστης ζήτησης, που υπερβαίνουν τη μέση αποδιδόμενη ισχύ της γεννήτριας.

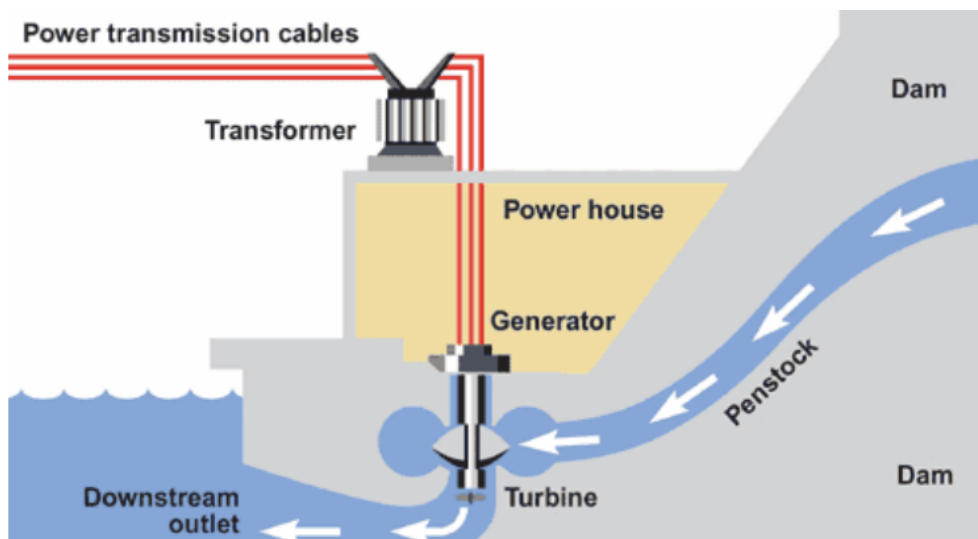
Ο ποταμός φράζεται σε κατάλληλο σημείο και το νερό διοχετεύεται, ελεγχόμενα, με αγωγούς σε στροβίλους Kaplan ή Francis. Λόγω του φράγματος υπάρχει υψομετρική διαφορά μεταξύ της στάθμης προσαγωγής και της στάθμης φυγής του νερού.

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί δεξαμενής είναι οι πιο κοινοί σταθμοί παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας. Η διαμόρφωση ενός υδροηλεκτρικού σταθμού δεξαμενής εξαρτάται κυρίως από τη μορφολογία του εδάφους. Για την κατασκευή της δεξαμενής χρησιμοποιούνται χαράδρες από τις οποίες ρέει η φυσική κοίτη του νερού. Σε κάποιο σημείο εκροής που δεν έχει μεγάλο πλάτος φράζεται κατάλληλα η εκροή και δημιουργείται μια δεξαμενή μέσα στην οποία συσσωρεύεται νερό. Οι τυπικές χωρητικότητες των ταμιευτήρων νερού είναι της τάξης των 1-10 km<sup>3</sup>. Αγωγοί μεγάλης διαμέτρου, π.χ. 8 m, μεταφέρουν το νερό από το κάτω μέρος της δεξαμενής στον υδροηλεκτρικό σταθμό. Η μορφολογία του εδάφους αξιοποιείται όσο είναι δυνατόν, ώστε να βελτιωθεί η υψομετρική διαφορά. Έτσι ο σταθμός μπορεί να τοποθετηθεί πολλά χιλιόμετρα μακριά από το φράγμα. Η ρύθμιση της ισχύος γίνεται με βελονοειδείς βαλβίδες στους στροβίλους τύπου Pelton, ή με ρυθμιζόμενα πτερύγια στους στροβίλους τύπου Francis.

Τέτοιες εγκαταστάσεις συχνά υπηρετούν πολλαπλούς σκοπούς, εκτός από την παραγωγή ενέργειας, στους οποίους περιλαμβάνεται η αστική ύδρευση, ο έλεγχος πλημμυρών, η άρδευση και η αναψυχή. Στις περιπτώσεις αυτές συνήθως υπάρχει στην έξοδο του

εργοστασίου μια μικρή δεξαμενή ώστε να ρυθμίζονται οι ποσότητες νερού που χρησιμοποιούνται για άρδευση ή ύδρευση. Ενώ συνίσταται πρόβλεψη για μια ελεγχόμενη υπερχειλίση της δεξαμενής, στην περίπτωση όπου οι εισροές είναι μεγαλύτερες από τις εκροές, σε περιόδους μεγάλης υδραυλικότητας, ή όταν ο υδροηλεκτρικός σταθμός είναι εκτός λειτουργίας για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί δεξαμενής, αν και χρησιμοποιούνται για κάλυψη μέσου φορτίου και αιχμών, δηλαδή εντάσσονται στο σύστημα προσαρμοσμένοι στη χρονικά μεταβαλλόμενη ζήτηση, μπορεί πολλές φορές να χρησιμοποιηθούν και για την παραγωγή δευτερογενούς ενέργειας. Αυτό συμβαίνει στις περιπτώσεις που οι εισροές νερού είναι μεγάλες και μια υπερχειλίση του φράγματος δεν ενδείκνυται. Το εμφανές και σημαντικό πλεονέκτημα της αποθήκευσης (στη δεξαμενή) είναι ο ρόλος της στην αποσύνδεση του χρόνου βροχοπτώσεων και λιώσιμου των πάγων από το συνεχές μεταβαλλόμενο φορτίο που το σύστημα πρέπει να ικανοποιήσει.



Εικόνα 4: Διάγραμμα Σύνδεσης Υδροηλεκτρικών Σταθμών παραγωγής με το σύστημα.

Γενικότερα, να σημειωθεί ότι, μεγάλο πλεονέκτημα τους αποτελεί ότι οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί δύναται να τεθούν σε λειτουργία αμέσως μόλις απαιτηθεί, σε αντίθεση με τους θερμικούς σταθμούς που απαιτούν σημαντικό χρόνο προετοιμασίας.

Ειδικότερα, στην Ελλάδα τα υδροηλεκτρικά έργα σε λειτουργία ανέρχονται στα 3,1 GW μέχρι σήμερα ενώ εκτιμάται ότι θα έχουν σπάσει το φράγμα των 3,8 GW μέχρι το 2030.

### 2.2.3 Σταθμοί Αποθήκευσης

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντική καθώς με την αποθήκευση της μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεταγενέστερα και όταν κριθεί σκόπιμο. Συνήθως αυτό συμβαίνει σε ημέρες με ακραίες θερμοκρασίες, είτε είναι πολύ υψηλές ή χαμηλές. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν έναν ασφαλή τρόπο αντιμετώπισης των ανισορροπιών που προκαλούνται από την αύξηση του μεριδίου των μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Σημαντικό να αναφερθεί ότι η παραγόμενη από ανανεώσιμες πηγές ηλεκτρική ενέργεια, μπορεί να

συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων καθώς η παραγωγή και η χρήση ενέργειας ευθύνονται για το 79% των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στην ΕΕ. [2]

Την πιο γνωστή και διαδεδομένη τεχνολογία μονάδων αποθήκευσης αποτελούν οι συσσωρευτές (κοινώς μπαταρίες). Αυτές συναντώνται παντού, από τα ρολόγια και τα κινητά τηλέφωνα μέχρι και ένα από τα βασικά «καύσιμα» των αυτοκινήτων. Οι συσσωρευτές αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια σε χημική μορφή και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρισμό. Στα συστήματα ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας, για διαστήματα ωρών και ημερών, όπως για τη μεταβαλλόμενη ημερήσια αιχμή της ζήτησης. Έτσι, δύναται να ενισχύσουν το σύστημα τις ώρες αιχμής, που η ζήτηση είναι αυξημένη, και να τεθούν εκτός λειτουργίας τις βραδινές ώρες που η ζήτηση μειώνεται. Ωστόσο, παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα καθώς μετά τη φόρτιση, δεν μπορούν να διατηρήσουν την αποθηκευμένη ενέργεια για εβδομάδες ή μήνες χωρίς σοβαρές απώλειες. Ήδη οι κατασκευαστές επεξεργάζονται εναλλακτικές λύσεις, όπως τους συσσωρευτές λιθίου στερεάς κατάστασης με στόχο να μειώσουν τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν.

Μία όχι και τόσο συνηθισμένη αλλά εξαιρετικά αξιόπιστη μορφή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί η αντλησιοταμίευση. Αυτή, ορίζεται ως η τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας σε αντλούμενο νερό και είναι μία πλήρως εμπορευματοποιημένη τεχνολογία που παρέχει παγκοσμίως κοντά στα 130 GW αποθήκευσης. Τα περισσότερα συστήματα εμπορικής κλίμακας χρησιμοποιούν μία αντιστρεπτή μονάδα αντλίας/στροβίλου Francis συνδεδεμένης με έναν κινητήρα/γεννήτρια έτσι ώστε ο ίδιος εξοπλισμός να χρησιμοποιείται για να αντλείται νερό και επίσης για να παράγει ισχύ όταν το νερό κατέρχεται. Με τις χαρακτηριστικές αποδόσεις κυκλικής διαδρομής της τάξης του 75% - 85%, είναι σήμερα οικονομικά ο πιο αποδοτικός τρόπος να παρέχεται μεγάλης κλίμακας αποθήκευση ενέργειας. Οι επιπτώσεις που υφίστανται τα συστήματα αυτά λόγω των απωλειών απόδοσης αντισταθμίζονται εύκολα από τα οικονομικά οφέλη που μπορούν να εξασφαλιστούν γεμίζοντας την άνω δεξαμενή κατά τη διάρκεια των περιόδων εκτός αιχμής και πουλώντας αυτή την ενέργεια κατά τη διάρκεια των περιόδων ζήτησης αιχμής.

Η άντληση – αποθήκευση, εκτός από την παροχή ισχύος αιχμής όπου απαιτείται, προσφέρει αρκετά άλλα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Τα συστήματα αυτά μπορούν να ξεκινήσουν και να σταματήσουν τη λειτουργία τους σε λίγα λεπτά και μπορούν να μεταβούν από λειτουργία αντλίας σε λειτουργία γεννήτριας σε λιγότερο από μισή ώρα. Η γρήγορη ανταπόκρισή τους σε διαφορετικά φορτία τα καθιστά ιδανικά για την παρακολούθηση των φορτίων, και τη σταθεροποίηση του συστήματος, καθώς επίσης παρόχους μη ρυπογόνων στρεφόμενων εφεδρειών. Από την άποψη της μεγάλης κλίμακας, του μεγάλου όγκου αποθήκευσης συστήματος, η αντλούμενη υδροηλεκτρική ενέργεια είναι προς το παρόν η πιο αποδοτική οικονομικά σε σχέση με τους αναδυόμενους ανταγωνιστές της. Ο βασικός ανταγωνιστής της είναι η συμβατική μεγάλη υδροηλεκτρική ενέργεια με αποθήκευση (ταμιευτήρας νερού - δεξαμενή), η οποία ούτως ή άλλως είναι η πρώτη επιλογή για οποιαδήποτε καλή τοποθεσία εφαρμογής.

Καθώς οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας υπεισέρχονται όλο και περισσότερο στο σύστημα ισχύος, τα υδροηλεκτρικά συστήματα αντλησιοταμίευσης δεν μπορούν απλώς να παρέχουν εφεδρική ενέργεια όταν η αιολική ή η ηλιακή μειώνεται, αλλά μπορεί επίσης να βοηθήσουν στην αποφυγή περικοπής από αυτές τις πηγές, όταν παράγεται περίσσεια ισχύος που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το σύστημα. Έτσι, συνιστούν μία πολύ ελκυστική λύση για την αποφυγή περικοπών αλλά όχι τόσο οικονομική μιας και η πιο συμφέρουσα ανάπτυξη είναι αυτή της τεχνολογίας των μπαταριών.

Τέλος, να σημειωθεί ότι σημαντικό κριτήριο στη λειτουργία των μονάδων αποθήκευσης παίζει ο βαθμός απόδοσης ο οποίος αποτελεί ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας με την οποία μία μπαταρία μπορεί να αποθηκεύσει και να αποδώσει ενέργεια. Ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που μπορεί να αποδώσει η μπαταρία κατά την εκφόρτιση προς την ενέργεια που απαιτείται για την πλήρη φόρτισή της.

## 2.3 Εισαγωγή στην Αξιοπιστία των ΣΗΕ

Οι οικονομικές, κοινωνικές και πολιτικές συνθήκες που επηρεάζουν τη λειτουργία των επιχειρήσεων παροχής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν υποστεί σημαντικές μεταβολές κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Παλαιότερα, ο προγραμματισμός και ο σχεδιασμός της κατάλληλης ισχύος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ήταν σχετικά εύκολος διότι η κατασκευή των σταθμών ήταν ιδιαίτερα απλή, ο χρόνος κατασκευής ελάχιστος και η διαχείριση τους σταθερή. Αυτό το τοπίο άλλαξε δραστικά μετά τα μέσα της δεκαετίας του 1970 λόγω του πληθωρισμού και της τεράστιας αύξησης στη ζήτηση στην πετρελαϊκή αγορά. Η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές εκτοξεύθηκε ενώ, ταυτόχρονα, αυξανόταν και ο ρυθμός της ζήτησης του φορτίου λόγω συνεχούς εξέλιξης της τεχνολογίας και αυξανόμενου πληθυσμού. Έτσι, στο τέλος της δεκαετίας του 1970, έγινε αντιληπτό ότι οι πυρηνικοί σταθμοί δεν μπορούν πλέον να θεωρηθούν ως μοναδική λύση για την ικανοποίηση των ολοένα και αυξανόμενων αναγκών στη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι δυσκολίες κατασκευής των πυρηνικών σταθμών αλλά και η δυσκολία εξασφάλισης ομαλής και αξιόπιστης λειτουργίας τους αποτελούσαν τροχοπέδη. Παράλληλα, η ευαισθητοποίηση για ζητήματα περιβάλλοντος και αειφορίας είχε ήδη αρχίσει να αποτελεί βασικό γνώμονα στην εξέλιξη της ενέργειας. Η εξοικονόμηση ενέργειας έγινε ένα κύριο θέμα εφαρμογής στις ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις ενώ οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ήλιος, άνεμος, κύματα, βιομάζα κ.α.) άρχισαν να θεωρούνται ως πρακτικές εναλλακτικές μορφές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, οι εγκαταστάσεις αυτών των πηγών ενέργειας έχουν περιορισμένη δυνατότητα να αντικαταστήσουν τους παραδοσιακούς θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για λόγους που σχετίζονται βασικότερα με τη στοχαστικότητα της παραγόμενης ισχύος τους (εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες, ηλιοφάνεια, ένταση ανέμου κτλ.).

Σήμερα, στο πλαίσιο του νέου θεσμικού περιβάλλοντος της ανταγωνιστικής αγοράς στην ηλεκτρική ενέργεια, που εφαρμόζεται σε πολλές χώρες του κόσμου, ειδικότερα στην Ευρώπη και κατ' επέκταση στην Ελλάδα, υπάρχουν σημαντικές εξελίξεις στα θέματα που αφορούν τις σχέσεις μεταξύ των επιχειρήσεων ηλεκτρισμού και των αντίστοιχων καταναλωτών ηλεκτρισμού και χρηστών των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η έννοια «Καταναλωτής»

δεν εμπεριέχει μόνο τους καταναλωτές ηλεκτρισμού αλλά και όλους τους χρήστες συστημάτων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιοι μπορεί να είναι οι παραγωγοί, οι προμηθευτές και τα άλλα συστήματα μεταφοράς με τα οποία υπάρχουν διασυνδέσεις.

Η σκοπός των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι η παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας με το μικρότερο δυνατό κόστος χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα και η αξιοπιστία της τροφοδοσίας των καταναλωτών τους. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο αξιοπιστίας, την πιο απαραίτητη ένδειξη στα συστήματα αποτελούν η εφεδρείες στους σταθμούς παραγωγής, η διασύνδεση με γειτονικά δίκτυα ή χώρες, αλλά και εναλλακτικά συστήματα τροφοδοτήσεων στα συστήματα διανομής ή μεταφοράς. Οι μηχανικοί που είναι υπεύθυνοι πάνω στον σχεδιασμό των ΣΗΕ αναγνωρίζουν την αναλωσιμότητα των εξαρτημάτων και, επομένως, προβλέπουν τις πιθανές βλάβες τους και την ανάγκη να τεθούν εκτός λειτουργίας για τις προγραμματιζόμενες ώρες εργασίας της προληπτικής συντήρησης τους. Έτσι, προκύπτει αναλυτικός υπολογισμός της αξιοπιστίας λειτουργίας του συστήματος. [13], [14]

Ο όρος της αξιοπιστίας έχει ένα μεγάλο εύρος εννοιών και σημασιών. Ο γενικός της όρος επικεντρώνεται στην ικανότητα ενός συστήματος να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε όλα τα σημεία κατανάλωσης εντός των αποδεκτών ορίων και στις ποσότητες που απαιτείται. Διαχωρίζεται σε δύο βασικές έννοιες: την έννοια της επάρκειας και την έννοια της ασφάλειας του συστήματος.

Η επάρκεια σχετίζεται άμεσα με την ικανότητα των εγκαταστάσεων μέσα σε ένα ηλεκτρικό σύστημα να εξυπηρετήσουν τη συνολική ζήτηση ενέργειας που προορίζεται για κατανάλωση. Οι συγκεκριμένες εγκαταστάσεις αφορούν τα στοιχεία του συστήματος που είναι υπεύθυνα για τη παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, ο όρος της επάρκειας σχετίζεται άμεσα με στατικές καταστάσεις και δεν λαμβάνεται υπόψη το δυναμικό στοιχείο ή οι τυχαίες διαταραχές του συστήματος. Η απώλεια της ικανότητας τροφοδότησης ισχύος των συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ενδεχομένως να οφείλεται στην εμφάνιση διάφορων κατηγοριών βλαβών όπως:

- Μειωμένη στάθμη της ποιότητας τροφοδότησης των φορτίων – μη αποδεκτή στάθμη τάσης και συχνότητας, ανομοιομορφία του τριφασικού συστήματος τροφοδότησης.
- Έκτακτες καταστάσεις βλάβης που οφείλονται στην υπέρβαση της ικανότητας τροφοδότησης του συστήματος μέσω της ζήτησης, όπως οι εκτεταμένες βλάβες των μονάδων παραγωγής ή των κλάδων των συστημάτων μεταφοράς.
- Διακοπές τροφοδότησης της ηλεκτρικής ισχύος στους καταναλωτές ως αποτέλεσμα ξαφνικής αλλά ελεγχόμενης απώλειας τροφοδότησης των φορτίων.

Η ασφάλεια, από την άλλη, σχετίζεται με την ικανότητα ενός συστήματος να ανταποκρίνεται σε δυναμικές ή προσωρινές διαταραχές που προκύπτουν στο σύστημα. Επομένως, η ασφάλεια σχετίζεται άμεσα με την απόκριση ενός συστήματος σε οποιαδήποτε κατάσταση. Οι συγκεκριμένες διαταραχές, μάλιστα, μπορεί να αφορούν τόσο τοπικές όσο και καθολικές διαταραχές οι οποίες συμβάλουν σε μη αναμενόμενη απώλεια βασικής παραγωγής

ενέργειας η οποία μπορεί αυτομάτως να συντελέσει σε αστάθεια του συστήματος παραγωγής.

Συνοπτικά, οι όροι της επάρκειας και της ασφάλειας ενός ΣΗΕ διαχωρίζονται ως εξής:

| ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ                                        |                                              |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| ΕΠΑΡΚΕΙΑ                                          | ΑΣΦΑΛΕΙΑ                                     |
| Ικανότητα συστήματος κάλυψης απαιτούμενης ζήτησης | Ικανότητα συστήματος απόκρισης σε διαταραχές |
| Στατικές συνθήκες                                 | Δυναμικές συνθήκες                           |
| Μακροπρόθεσμη Εφαρμογή                            | Βραχυπρόθεσμη Εφαρμογή                       |

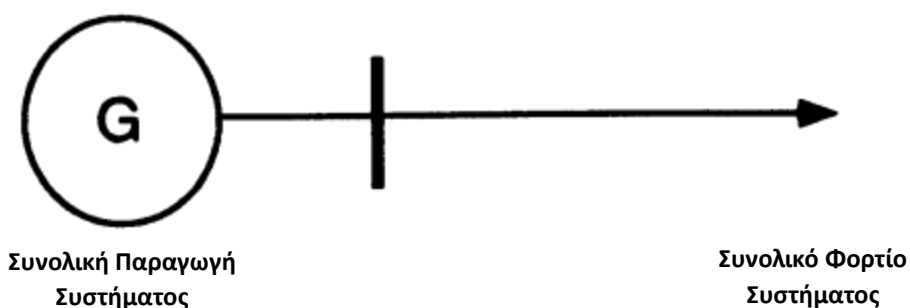
Σχήμα 3: Αξιοπιστία ΣΗΕ

Κρίνεται αξιοσημείωτο να αναφέρουμε ότι οι περισσότερες από τις πιθανολογικές τεχνικές για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας που είναι σήμερα διαθέσιμες ανήκουν στον τομέα της αξιολόγησης επάρκειας. Συνεπώς, η ικανότητα αξιολόγησης της ασφάλειας είναι πολύ περιορισμένη. Η πιθανολογική αξιολόγηση της μεταβατικής ευστάθειας ανήκει σε αυτόν τον τομέα μαζί με τις τεχνικές για την ποσοτικοποίηση του κινδύνου δέσμευσης μονάδων και του κινδύνου απόκρισης. Αυτός ο περιορισμός οφείλεται στην πολυπλοκότητα που συνδέεται με τη μοντελοποίηση του συστήματος στον τομέα της ασφάλειας. Οι περισσότεροι δείκτες που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος είναι δείκτες επάρκειας και όχι δείκτες συνολικής αξιοπιστίας. Οι δείκτες που προκύπτουν από την αξιολόγηση παρελθούσας απόδοσης του συστήματος περιλαμβάνουν την επίδραση όλων των σφαλμάτων και των αποτυχιών του συστήματος ανεξάρτητα από την αιτία, και συνεπώς περιλαμβάνουν την επίδραση της ανασφάλειας καθώς και εκείνες που οφείλονται στην ανεπάρκεια. Αυτή η θεμελιώδης διαφορά είναι ένα σημαντικό σημείο που πρέπει σαφώς να αναγνωριστεί.

## 2.4 Μέθοδοι Υπολογισμού Επάρκειας Συστήματος Παραγωγής

Οι βασικές τεχνικές αξιολόγησης της επάρκειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στα στάδια του συστήματος στα οποία επεμβαίνουν. Αυτά αφορούν την παραγωγή, την μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στον τελικό καταναλωτή.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στο στάδιο της ηλεκτρικής παραγωγής. Στο μοντέλο του συστήματος παραγωγής αμελείται η αξιοπιστία λειτουργίας ή οι περιορισμοί του συστήματος μεταφοράς, καθώς γίνεται θεώρηση ότι το φορτίο του συστήματος είναι



Σχήμα 4: Τυπικό μοντέλο συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

συνδεδεμένο στον ισοδύναμο ζυγό του συστήματος μεταφοράς (Σχήμα 4). Σε ένα σύστημα παραγωγής, λοιπόν, αξιολογείται η ικανότητα κάλυψης της ζήτησης του φορτίου. Η βασική μέθοδος υπολογισμού χωρίζεται σε τρία μέρη: το μοντέλο της παραγωγής, το μοντέλο της ζήτησης και τους δείκτες αξιοπιστίας. Οι επιμέρους μεθοδολογίες που εμφανίζονται στις μελέτες επάρκειας των συστημάτων παραγωγής διακρίνονται σε αιτιοκρατικές και πιθανοτικές.

#### 2.4.1 Αιτιοκρατικές Μέθοδοι Ανάλυσης Αξιοπιστίας

Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι επικεντρώνονται στην ανάλυση συγκεκριμένων συνθηκών του συστήματος, οι οποίες θεωρούνται ως οι πλέον αντιπροσωπευτικές κρίσιμες καταστάσεις για το μέλλον (συνήθως κατά τις χειμερινές ή καλοκαιρινές περιόδους) και έχουν ορισμένη συχνότητα εμφάνισης. Σε μια αιτιοκρατική διαδικασία, η απόδοση του συστήματος υπολογίζεται για διάφορα σενάρια που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες κρίσιμης σημασίας. Ένα κύριο μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι η παράβλεψη της στοχαστικής φύσης του συστήματος. Ειδικότερα, οι αιτιοκρατικές μέθοδοι δεν καταγράφουν ούτε λαμβάνουν υπόψη την έμφυτη αβεβαιότητα των τυχαίων μεταβλητών του συστήματος και παραβλέπουν ότι οι βλάβες των συστατικών του συστήματος μπορούν να εμφανιστούν με διαφορετικές συχνότητες και να έχουν ποικίλες συνέπειες. Επιπλέον, τέτοιες μελέτες δεν λαμβάνουν υπόψη τη μεταβολή της ζήτησης φορτίου κατά τη διάρκεια του έτους και την συμβολή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην επάρκεια του συστήματος.

Οι πιο κοινά χρησιμοποιούμενοι αιτιοκρατικοί δείκτες αξιοπιστίας περιλαμβάνουν:

- Περιθώριο Εφεδρείας (Reserved Margin - RM): Αυτός ο δείκτης αναφέρεται στην επιπλέον παραγωγική ικανότητα σε σύγκριση με την προβλεπόμενη ζήτηση. Υπολογίζεται ως ο λόγος της διαφοράς μεταξύ της αιχμής φορτίου και της διαθέσιμης παραγωγής προς την αιχμή φορτίου.
- Δείκτης Κάλυψης (Coverage Index - CI): Αυτός ο δείκτης εκφράζει τη σχέση της διαθέσιμης παραγωγικής ικανότητας με την αιχμή φορτίου του συστήματος, υπολογίζοντας τον λόγο της διαθέσιμης ικανότητας παραγωγής προς την αιχμή του φορτίου.
- Κριτήριο N-1 ή Κριτήριο Μεγαλύτερης Μονάδας (Largest Unit - LU): Αυτό το κριτήριο διασφαλίζει ότι διατηρείται η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς παραγωγής, ώστε σε περίπτωση απώλειας μιας μονάδας με ισχύ ίση με αυτήν της μεγαλύτερης μονάδας που συμμετέχει στον Μηχανισμό Διασφάλισης Επαρκούς Ισχύος, να μην υπάρχει ανάγκη για περικοπή φορτίου. [15]

#### 2.4.2 Πιθανοτικές Μέθοδοι Ανάλυσης Αξιοπιστίας

Οι πιθανοτικές μέθοδοι στοχεύουν στον υπολογισμό της πιθανότητας κάλυψης του φορτίου λαμβάνοντας υπόψη τις διακυμάνσεις και τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με την παραγωγή ή τη ζήτηση του συστήματος. Οι πιθανοτικές μέθοδοι θεωρούν όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία του συστήματος παραγωγής και εξετάζουν την επάρκεια αυτού σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας του. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται

διακρίνονται σε αναλυτικές μεθόδους και σε μεθόδους προσομοιώσεων μέσω της τεχνικής Monte Carlo.

#### 2.4.2.1 Αναλυτική Μέθοδος

Η αναλυτική μέθοδος για τον υπολογισμό των δεικτών επάρκειας του συστήματος παραγωγής περιλαμβάνει τρία στάδια:

1. Ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης φορτίου: αποσκοπεί στον υπολογισμό του αναμενόμενου φορτίου του συστήματος.
2. Ανάπτυξη μοντέλου τυχαίας συμπεριφοράς της διαθεσιμότητας των μονάδων παραγωγής: αναλύεται η στοχαστική συμπεριφορά της διαθεσιμότητας των παραγωγικών μονάδων.
3. Ανάπτυξη και εφαρμογή πιθανοτικών μαθηματικών μεθόδων: γίνεται υπολογισμός των δεικτών αξιοπιστίας που σχετίζονται με τον συνδυασμό του φορτίου και της παραγωγής.

Σε μαθηματικούς όρους, ο συνδυασμός των μοντέλων φορτίου και παραγωγικής ικανότητας για τον προσδιορισμό των δεικτών αξιοπιστίας γίνεται μέσω του υπολογισμού της πιθανοτικής κατανομής της διαφοράς μεταξύ των δύο τυχαίων μεταβλητών, δηλαδή της ζήτησης και της παραγωγής. Αν οι τυχαίες μεταβλητές είναι συνεχείς, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διαφοράς τους προκύπτει από το ολοκλήρωμα της συνέλιξης τους. Ο υπολογισμός αυτού του ολοκληρώματος είναι συχνά δύσκολος και πολλές φορές δεν υπάρχει αναλυτική λύση, γι' αυτό χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές μέθοδοι. Αν οι τυχαίες μεταβλητές είναι διακριτές, η μέση τιμή της διαφοράς τους υπολογίζεται εύκολα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο συνέλιξης διακριτών μεταβλητών. [16]

#### 2.4.2.2 Μέθοδος Προσομοιώσεων Monte Carlo

Η μέθοδος Monte Carlo αποτελεί μία κλασική τεχνική επίλυσης προβλημάτων τυχαίων μεταβλητών, που ειδικότερα εφαρμόζεται πολύ συχνά για αξιολόγηση ασφάλειας ορισμένων συστημάτων. Κύριος πυλώνας αυτής της υπολογιστικής μεθόδου είναι η επαναληπτική δειγματοληψία τυχαίων μεταβλητών έχοντας ως σημεία αναφοράς το εύρος εκτιμήσεων τους και την πιθανοτική τους κατανομή. Κατά την υλοποίηση προσομοίωσης δημιουργείται ένας μεγάλος αριθμός τυχαίων δειγμάτων για κάθε μεταβλητή, τα οποία ακολουθούν την κατάλληλη πιθανοτική κατανομή. Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία αυτή για εκατοντάδες ή και χιλιάδες φορές μέχρις ότου να έχουμε εκτελέσει την προσομοίωση για να έναν ικανοποιητικό αριθμό επαναλήψεων, βασιζόμενοι πάντα σε τυχαίες τιμές εισόδου. [17]

Όταν ο τομέας εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου αφορά την περίπτωση υπολογισμού των δεικτών αξιοπιστίας ενός ΣΗΕ είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη όλες οι παράμετροι που μπορούν να αποτελέσουν δυνητικό πρόβλημα για την εξυπηρέτηση της ζήτησης του φορτίου. Συγκεκριμένα αυτές οι παράμετροι είναι:

- τα μετεωρολογικά στοιχεία που επηρεάζουν την διακύμανση του φορτίου λόγω διαφορετικών απαιτήσεων στην θέρμανση και την ψύξη που σχετίζονται άμεσα με την εναλλαγή της θερμοκρασίας ανάμεσα σε χειμώνα και καλοκαίρι,
- τις μη προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας θερμικών μονάδων,
- την αιολική και φωτοβολταϊκή παραγωγή,
- τις ανάγκες συντήρησης των μονάδων.

Στην περίπτωση της μελέτης επάρκειας ενός ΣΗΕ, επομένως, στο μοντέλο επίλυσης του προβλήματος εισάγονται κάθε φορά οι τυχαίες μεταβλητές εισόδου, με τιμές τυχαία επιλεγμένες βάσει των πιθανοτικών τους κατανομών ενώ παράλληλα εξάγονται οι αντίστοιχοι δείκτες αξιοπιστίας. Το πλήθος επαναλήψεων της διαδικασίας αυτής καθορίζεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να έχει επιτευχθεί ένα αποδεκτό επίπεδο στατιστικής σύγκλισης. Ο βαθμός αυτός υπολογίζεται σύμφωνα με την τυπική απόκλιση των υπολογιζόμενων κάθε φορά δεικτών. Όταν η διακύμανση του εκάστοτε δείκτη αξιοπιστίας είναι ίση ή μικρότερη από ένα κοινώς αποδεκτό επίπεδο στατιστικής σύγκλισης του, τότε η προσομοίωση ολοκληρώνεται και αντλούνται τα αντίστοιχα αποτελέσματα προκειμένου να αξιολογηθούν.

Επιπλέον, η μέθοδος Monte Carlo μπορεί να ενσωματώσει τεχνικές όπως η σημαντική δειγματοληψία, η μείωση της διακύμανσης και η ομαλή δειγματοληψία για τη βελτίωση της απόδοσης και την επιτάχυνση της σύγκλισης. Αυτές οι τεχνικές στοχεύουν να εστιάσουν την υπολογιστική προσπάθεια σε περιοχές του χώρου δειγματοληψίας όπου η μεταβλητή στην οποία εστιάζουμε εμφανίζει σημαντική διακύμανση, μειώνοντας έτσι την διακύμανση του εκτιμητή και βελτιώνοντας την υπολογιστική απόδοση.

Ως συμπέρασμα, η μέθοδος Monte Carlo αποτελεί ένα ισχυρό υπολογιστικό εργαλείο που βασίζεται στην τυχαία δειγματοληψία και επιτρέπει την εκτίμηση πολύπλοκων μαθηματικών ποσοτήτων και την επίλυση προβλημάτων με υψηλή διάσταση ή πιθανοτικά χαρακτηριστικά. Η ευελιξία της, η ακρίβεια και η ικανότητά της να αντιμετωπίζει διάφορους τομείς προβλημάτων την καθιστούν αναπόσπαστο εργαλείο στην επιστημονική έρευνα, το σχεδιασμό μηχανολογικών συστημάτων και τη στατιστική ανάλυση.

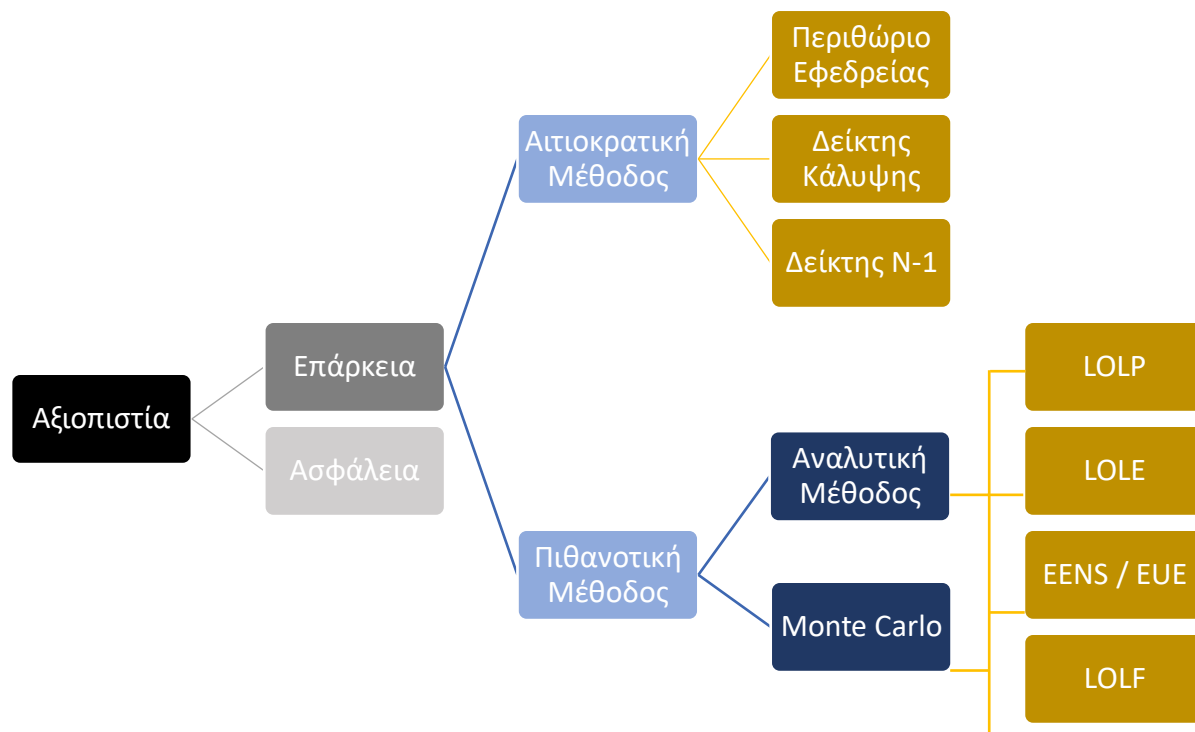
#### 2.4.2.3 Πιθανοτικοί Δείκτες Αξιοπιστίας

Σε τελική ανάλυση, η επάρκεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει βάσει συγκεκριμένων δεικτών επάρκειας οι οποίοι λαμβάνουν επιτρεπτά όρια. Η ικανοποίηση των ορίων αποδεικνύει την επάρκεια του συστήματος, ενώ αντίστοιχα η παραβίαση των ορίων υποδεικνύει την ανάγκη για ενισχύσεις και επεκτάσεις του συστήματος. Οι βασικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται διεθνώς για την εκτίμηση των επιπέδων επάρκειας ενός ΣΗΕ δίνονται παρακάτω:

- 1) Πιθανότητα Απώλειας Φορτίου (Loss of Load Probability - LOLP). Ορίζεται ως η πιθανότητα η ημερήσια αιχμή ή η ωριαία αιχμή της ζήτησης του συστήματος να ξεπεράσει τη διαθέσιμη ικανότητα παραγωγής σε μία δεδομένη χρονική περίοδο. Η πιθανότητα αυτή συνήθως υπολογίζεται είτε μέσω των ημερήσιων αιχμών φορτίου, είτε μέσω του ωριαίου φορτίου (μέσω της καμπύλης διάρκειας φορτίου).

- 2) Αναμενόμενη Απώλεια Φορτίου (Loss of Load Expected - LOLE) [συνήθως σε ώρες/έτος]. Ορίζεται ως ο αναμενόμενος αριθμός ωρών για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο (συνήθως για ένα έτος) κατά τις οποίες η ζήτηση υπερβαίνει τη διαθέσιμη ισχύ παραγωγής. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος δείκτης δεν παρέχει πληροφορία για το μέγεθος της ανεπάρκειας κάλυψης του φορτίου δηλαδή μας πληροφορεί απλώς μακροσκοπικά για τις ώρες που παρουσιάζονται ανεπάρκειες. Ωστόσο, αποτελεί τον πλέον χρησιμοποιούμενο δείκτη επάρκειας των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- 3) Αναμενόμενη Απώλεια Ενέργειας ή Αναμενόμενη Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργεια (Expected Unserved Energy – EUE or Expected Energy No Served - EENS) [MWh/έτος]. Πρόκειται για το άθροισμα της αναμενόμενης ζήτησης σε MWh, που δεν εξυπηρετείται κατά τη διάρκεια μίας δεδομένης περιόδου, εξαιτίας της μη εξυπηρέτησης της ζήτησης μέσω της παραγωγής. Ο συγκεκριμένος δείκτης απεικονίζει το ύψος των αντίστοιχων ανεπαρκειών του συστήματος παραγωγής. Να σημειωθεί εδώ ότι, καθώς επρόκειτο για το άθροισμα της ενέργειας που δεν εξυπηρετήθηκε, ο συγκεκριμένος δείκτης δεν μας ενημερώνει για το είδος της κάθε ανεπάρκειας ξεχωριστά παρά μόνο αποτελεί μία συνολική εκτίμηση της συνολικής απώλειας ενέργειας. Καλύτερη εκτίμηση ως προς το είδος των ανεπαρκειών μπορεί να γίνει σε συνάρτηση με την αναμενόμενη ωριαία απώλεια φορτίου.
- 4) Αναμενόμενα Περιστατικά Απώλειας Φορτίου ή Αναμενόμενη Συχνότητα Απώλειας Φορτίου (Loss of Load Frequency - LOLF). Ορίζεται ως το πλήθος των γεγονότων κατά τα οποία δεν εξυπηρετήθηκε η ζήτηση από το σύστημα παραγωγής, για μία δεδομένη χρονική περίοδο. Από τους παραπάνω, οι πλέον διαδεδομένοι δείκτες αξιοπιστίας που χρησιμοποιούνται διεθνώς είναι η Αναμενόμενη Απώλεια Φορτίου (LOLE) και η Αναμενόμενη Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργεια (EUE ή EENS). Σημειώνεται ωστόσο ότι η Αναμενόμενη Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργεια προσδιορίζει άμεσα την ικανότητα επάρκειας του συστήματος παραγωγής, ενώ η Αναμενόμενη Απώλεια Φορτίου αποτελεί απλά ένδειξη των ωρών (ή ημερών) κατά τη διάρκεια του έτους κατά τις οποίες δεν μπορεί να ικανοποιηθεί πλήρως η ζήτηση, χωρίς να διευκρινίζει την ποσότητα της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης και ως αποτέλεσμα τη σοβαρότητα της ανεπάρκειας του συστήματος παραγωγής.

Επίσης, οι υψηλές τιμές των δεικτών αυτών δεν σηματοδοτούν δεδομένη απώλεια φορτίου. Η τιμή του δείκτη LOLE δεν υποδεικνύει ότι για το συγκεκριμένο αριθμό ωρών θα γίνονται διακοπές στην ηλεκτροδότηση. Ωστόσο, οι υψηλές τιμές των δεικτών παρέχουν σαφή ένδειξη ότι είναι απαραίτητο να αυξηθεί η εγκατεστημένη ισχύς ηλεκτρικής παραγωγής, ώστε να καλύπτεται ασφαλώς η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή γίνεται σύντομη αξιολόγηση σχετικά με το ύψος του κινδύνου απέναντι στην ικανότητα ενός συστήματος παραγωγής να καλύψει τη ζήτηση. [18]



Σχήμα 5: Επίπεδα Αξιοπιστίας Συστήματος Παραγωγής [48]

## 2.5 Μελέτες Επάρκειας των ΣΗΕ

Κατά τη διάρκεια μιας μελέτης επάρκειας ισχύος, πραγματοποιούνται λεπτομερείς αναλύσεις του συστήματος μετάδοσης, λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες παραμέτρους όπως τα φορτία, οι γεννήτριες, οι ΑΠΕ και άλλα. Στόχος είναι η αξιολόγηση της ικανότητας του συστήματος να αντέξει σε διάφορες συνθήκες φορτίου και να διασφαλιστεί ότι η μεταφορά ισχύος μπορεί να γίνει με αξιοπιστία και ασφάλεια. Οι μελέτες του ευρωπαϊκού και του ελληνικού διαχειριστή των συστημάτων παραγωγής, αντίστοιχα, αποτελούν δύο από τις βασικότερες μελέτες οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια. [19], [20]

### 2.5.1 Μελέτη Επάρκειας του ENTSO-E

Το ευρωπαϊκό σύστημα των διαχειριστών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας απαρτίζεται από 40 επιμέρους συστήματα μεταφοράς σε 36 χώρες κατά μήκος της Ευρώπης. Ιδρύθηκε πριν από 15 χρόνια σχεδόν, με σκοπό την ασφαλή και συντονισμένη λειτουργία ενός ενιαίου ευρωπαϊκού συστήματος που αποτελεί μάλιστα το μεγαλύτερο διασυνδεδεμένο σύστημα στον κόσμο στις μέρες μας. Η μελέτη επάρκειας ισχύος σύμφωνα με τον ENTSO-E είναι μία αξιολόγηση επάρκειας ισχύος του ευρωπαϊκού συστήματος με δεκαετή χρονικό ορίζοντα. Βασίζεται σε μεθοδολογίες βάσει πιθανοτικών αξιολογήσεων με στόχο την μοντελοποίηση και την ανάλυση πιθανών γεγονότων που ενδέχεται να επηρεάσουν αρνητικά την ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελεί παράλληλα, ένα πολύ

βασικό εργαλείο προκειμένου να αξιοποιηθεί για σημαντικές αποφάσεις και πολιτικές που αποτελούν σημαντικό παράγοντα για την βελτίωση τόσο της οικονομικής κατάστασης μιας χώρας όσο και την επιδίωξη μίας ενεργειακής εξέλιξης με «πράσινο» ορίζοντα.

Η συγκεκριμένη μελέτη (ERAA) έχει υιοθετηθεί από το 2019 και επιδιώκοντας ισορροπία ανάμεσα σε παραγωγή και ζήτηση εστιάζει στους εξής πυλώνες:

- Παραγωγή: σε πρώτη ανάλυση είναι σημαντικό να υπολογιστεί πόσοι είναι οι διαθέσιμοι πόροι για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ορυκτά καύσιμα, υδροηλεκτρική ενέργεια, ανανεώσιμες πηγές και οποιαδήποτε άλλη διαθέσιμη πηγή ενέργειας που μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική και αξιοποιείται από τον εκάστοτε διαχειριστή συμπεριλαμβάνεται σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης. Ωστόσο, η διαθεσιμότητα ενδέχεται να επηρεαστεί από τις καιρικές συνθήκες ή τις μακροχρόνιες μεταβολές στο κλίμα. Για παράδειγμα το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό ή η ηλιοφάνεια σε μία περιοχή μπορεί να ελαττωθούν μέσα στη μέρα ενώ σε βάθος χρόνου οι διαθέσιμοι πόροι για μία υδροηλεκτρική μονάδα παραγωγής μπορεί να διαφέρουν ανά έτος. Σε συνδυασμό με τις ολοένα αυξανόμενες τεχνολογίες στον τομέα της ενέργειας αλλά και την προσθήκη των αποθηκευτικών συστημάτων τα οποία επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη διαθεσιμότητα της ενέργειας, τα παραπάνω στοιχεία λαμβάνονται υπόψη προκειμένου να γίνει μία τελική ανάλυση και αξιολόγηση του ευρωπαϊκού συστήματος, εφόσον φυσικά έχουν ήδη προηγηθεί αναλύσεις για τους διαχειριστές του κάθε συστήματος ξεχωριστά.
- Ζήτηση: όσο το σύστημα γίνεται πιο διαδεδомένο σε πολλά σημεία της Ευρώπης τότε η πλευρά των καταναλωτών αρχίζει να αποκτά πιο ενεργητικό ρόλο από τον αμιγώς παθητικό που είχε μέχρι πρωτίστως. Αυτό συνεπάγεται ότι ορισμένοι καταναλωτές μπορούν να ανταποκριθούν στην ενεργειακή αγορά σε πραγματικό χρόνο τροποποιώντας τις ενεργειακές απαιτήσεις τους προκειμένου να επωφεληθούν από την διαφορετική οικονομική βαρύτητα που δίνεται από τον εκάστοτε διαχειριστή και τις πολιτικές που εφαρμόζει. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό σε μία μοντελοποίηση να λαμβάνεται υπόψη και το πως μεταβάλλεται η συμπεριφορά των καταναλωτών παράλληλα με τον χρόνο.

Συνοψίζοντας τα χαρακτηριστικά που αναλύθηκαν συνεπάγονται μία πληθώρα από δείκτες και πολυπλοκότητες που πρέπει να αξιολογηθούν προκειμένου να απαντηθεί αποτελεσματικά και με ακρίβεια το παρακάτω ερώτημα: «Υπάρχει κάποιος κίνδυνος απέναντι στην ζήτηση που μπορεί να αποφευχθεί;». Σε γενικές γραμμές, η ERAA μεταφράζει την επάρκεια ενός συστήματος σε όρους LOLE (Loss of Load Expectation) δηλαδή τις πιθανές ώρες που η παραγωγή δεν μπορεί να καλύψει τη ζήτηση. Να σημειωθεί ότι ακόμα και αν μία μελέτη καταλήξει σε μη μηδενικό LOLE αυτό δεν συνεπάγεται μία εντελώς ρεαλιστική πρόβλεψη καθώς η συγκεκριμένη μελέτη υπολογίζει πιθανοτικά την κατάσταση ενός συστήματος και λαμβάνει υπόψη της ακόμα και τα ακραία δεδομένα αλλά σίγουρα προειδοποιεί για ενδεχόμενους κινδύνους που μπορεί να συνιστούν τα συγκεκριμένα αποτελέσματα.

Χάρη στη συγκεκριμένη μελέτη, οι διαχειριστές του ηλεκτρικού συστήματος αλλά και οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας έχουν τη δυνατότητα να αντιμετωπίσουν τους πιθανούς κινδύνους. Μία τεχνική όπως η απόκριση της ζήτησης αποτελεί άμεσο εργαλείο για την επαναφορά της ισορροπίας του συστήματος. Σε περαιτέρω ανάλυση, οικονομικές αναλύσεις μπορεί να αποτελέσουν σημαντικό εργαλείο για την διατήρηση των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ουσιαστική και αποτελεσματική λειτουργία καθιστώντας τους διαθέσιμους να ανταποκριθούν σε συγκεκριμένες μεταβολές της ζήτησης στο σύστημα ανά πάσα στιγμή. Έχοντας πάντα ως άξονα μελέτης την κλιματική ουδετερότητα το 2050, το ευρωπαϊκό ενεργειακό σύστημα καλείται να ανταποκριθεί σε ένα σύνολο απαιτήσεων και να μετασχηματιστεί κατάλληλα. Η μελέτη του ENTSO-E αποτελεί και θα συνεχίσει να αποτελεί το βασικότερο εργαλείο προκειμένου το σύστημα να συνεχίσει να εξελίσσεται ομαλά διατηρώντας μία ασφαλή και οικονομική διάθεση του ηλεκτρικού φορτίου με ταυτόχρονο και απαραίτητο γνώμονα την βιωσιμότητα.

## 2.5.2 Μελέτη Επάρκειας του ΑΔΜΗΕ

Ο ΑΔΜΗΕ (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) έχει σαν σκοπό τη λειτουργία, τον έλεγχο, τη συντήρηση και την ανάπτυξη του ΕΣΜΗΕ (Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας), ώστε να διασφαλίζεται ο εφοδιασμός της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια, με τρόπο επαρκή, ασφαλή, αποδοτικό και αξιόπιστο καθώς και τη λειτουργία της Αγοράς Εξισορρόπησης και του διασυνοριακού εμπορίου σύμφωνα με τις αρχές της διαφάνειας, της ισότητας και του ελεύθερου ανταγωνισμού.

Η μελέτη επάρκειας ισχύος του ΑΔΜΗΕ αναφέρεται στην ανάλυση της ικανότητας του συστήματος μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας να ανταποκριθεί στις ανάγκες μεταφοράς ισχύος σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Η επάρκεια ισχύος όπως αναλύθηκε αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την εξασφάλιση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας του ηλεκτρικού συστήματος. Καθώς οι στόχοι που τίθενται στα Εθνικά Σχέδια για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) αποκτούν δεσμευτικό χαρακτήρα, οι υποθέσεις που περιγράφονται σε αυτά θα πρέπει να αποτελούν βασικές παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό του Ηλεκτρικού Συστήματος. Συνεπώς, ο Διαχειριστής του ΕΣΜΗΕ προβαίνει σε εύλογες παραλογές όσον αφορά τη διαθεσιμότητα του παραγωγικού δυναμικού, την εξέλιξη της ζήτησης και του διασυνοριακού εμπορίου, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τα επενδυτικά σχέδια για τα περιφερειακά δίκτυα και τα δίκτυα κοινοτικής εμβέλειας. Η συγκεκριμένη μελέτη εκπονείται από τον Διαχειριστή με βάση τους κανόνες της επιστήμης και της τεχνικής σύμφωνα με την εκάστοτε εγκεκριμένη από τη ΡΑΕ μεθοδολογία που έχει χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα από τον ENTSO-E. Η ΡΑΕ παρακολουθεί την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού, ιδίως σε σχέση με το ισοζύγιο προσφοράς και ζήτησης στην ελληνική αγορά ενέργειας, το επίπεδο της προβλεπόμενης μελλοντικής ζήτησης, το προβλεπόμενο πρόσθετο δυναμικό παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και Φυσικού Αερίου που βρίσκεται υπό προγραμματισμό ή υπό κατασκευή, την ποιότητα και το επίπεδο συντήρησης και αξιοπιστίας των συστημάτων μεταφοράς και των δικτύων διανομής, και την εφαρμογή μέτρων για την κάλυψη της αιχμής ζήτησης, καθώς και

τις συνθήκες της αγοράς ενέργειας σε σχέση με τη δυνατότητα ανάπτυξης νέου παραγωγικού δυναμικού. [21], [22]

Τα βασικότερα κριτήρια που καθορίζουν την επάρκεια του συστήματος παραγωγής για αξιόπιστη εξυπηρέτηση ζήτησης (ενέργειας και αιχμής) είναι τα εξής:

- Η εξέλιξη του φορτίου,
- Η διαθεσιμότητα μονάδων παραγωγής,
- Οι συνθήκες υδραυλικότητας,
- Η διαθεσιμότητα ισχύος για εισαγωγές από διασυνδέσεις,
- Και ο βαθμός διείδυσης μονάδων ΑΠΕ.

Η πιο κρίσιμη παράμετρος των μονάδων παραγωγής όσων αφορά τη συμβολή τους στην επάρκεια του συστήματος αποτελεί η διαθεσιμότητα τους. Οι μονάδες ενδέχεται να βρίσκονται σε κατάσταση εκτός λειτουργίας είτε λόγω τυχαίας βλάβης είτε λόγω προγραμματισμένης συντήρησης. Να σημειωθεί ότι οι τυχαίες βλάβες επηρεάζουν κατά μεγάλο αρνητικό βαθμό την αξιοπιστία του συστήματος καθώς η εμφάνιση και η διάρκεια τους έχουν απρόβλεπτο χαρακτήρα. Συνεπώς, η επίδραση των συγκεκριμένων βλαβών λαμβάνεται υπόψη πιθανοτικά μέσω της προσομοίωσης λειτουργίας όλων των μονάδων παραγωγής. Αναφορικά με τις υπόλοιπες παραμέτρους που αναφέρθηκαν η επίδραση τους εκτιμάται μέσω ανάλυσης με εναλλακτικά σενάρια και υποθέσεις λόγω του στοχαστικού τους χαρακτήρα.

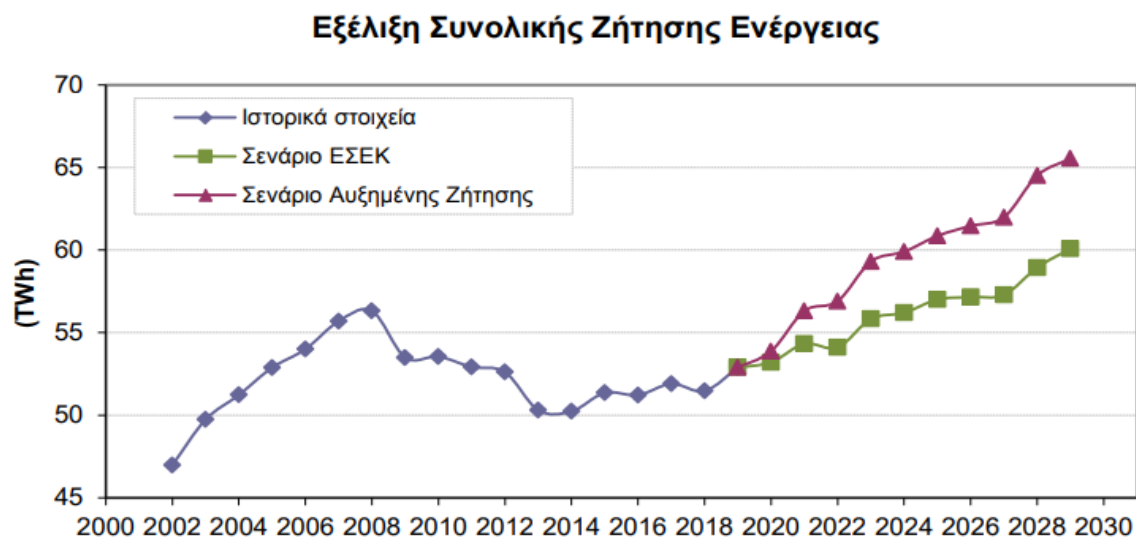
Καθόσον η συγκεκριμένη μελέτη έχει στοχαστικό χαρακτήρα είναι πρακτικά αδύνατο να εγγυηθεί ότι ένα σύστημα ηλεκτροπαραγωγής θα μπορεί να ανταποκριθεί πλήρως στις ανάγκες της ζήτησης κάτω υπό οποιεσδήποτε συνθήκες. Συνεπώς, είναι απαραίτητος ο καθορισμός ενός επιπέδου αξιοπιστίας ώστε το ρίσκο μη κάλυψης της ζήτησης να είναι ανεκτό από οικονομική και κοινωνική σκοπιά. Γι' αυτό γίνεται αξιοποίηση δύο δεικτών αξιοπιστίας, του LOLE (Loss of Load Expectation) και του EUE (Expected Unserved Energy) οι οποίοι εμφανίζονται πολύ συχνά σε μελέτες επάρκειας μέσω πιθανοτικής προσομοίωσης. Ο δεύτερος δείκτης μάλιστα συχνά εντοπίζεται και σαν EENS (Expected Energy Not Served). Καθώς ο ορίζοντας της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι το 2030, έγινε αξιοποίηση της μελέτης για την επάρκεια του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής για την χρονική περίοδο 2020 – 2030.

## **ΕΞΕΛΙΞΗ ΖΗΤΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ**

Αναφορικά με την πρόβλεψη της ζήτησης ενέργειας αξιολογούνται διάφοροι παράγοντες που μπορεί να επιδρούν στη διαμόρφωση της σε μακροπρόθεσμη βάση όπως:

- Οι οικονομικές συνθήκες της χώρας με κριτήριο μέτρησης το ΑΕΠ
- Οι αλλαγές στις καταναλωτικές συνήθειες (κλιματισμός, χρήση ηλεκτρισμού στις μεταφορές κλπ.) λόγω βελτίωσης βιοτικού επιπέδου αλλά και βελτίωσης συνθηκών διαβίωσης
- Αλλαγές στον ενεργειακό τομέα και της αγοράς ηλεκτρισμού (επίπεδο τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, ανταγωνισμός με Φυσικό Αέριο και όλα ορυκτά καύσιμα)

- Πληθυσμιακή εξέλιξη και
- Διάφορα άλλα μέτρα εξειδίκευσης πολιτικών εθνικών και ευρωπαϊκών σχεδίων όπως εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση εκπομπών ρύπων και άλλοι περιβαλλοντικοί περιορισμοί.



Σχήμα 6: Εξέλιξη Συνολικής Ζήτησης Ενέργειας μέσα από διαφορετικά σενάρια.  
[πηγή: ΑΔΜΗΕ]

Αναλυτικότερα τα δεδομένα της ζήτησης που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του ΑΔΜΗΕ υπόκειντο σε δύο διαφορετικά σενάρια:

- 1) Το Σενάριο ΕΣΕΚ που θέτει ως βασικό στόχο την μεγάλη αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας (εξοικονόμηση ενέργειας) και την αποσύνδεση της οικονομικής ανάπτυξης από την ακαθάριστη εγχώρια κατανάλωση ενέργειας. Ως αποτέλεσμα η αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας προβλέπεται να είναι σχετικά ελάχιστη.
- 2) Το Σενάριο Αυξημένης Ζήτησης από την άλλη έχει διαμορφωθεί βάσει προηγούμενων διαθέσιμων ιστορικών στοιχείων της ζήτησης ενώ παράλληλα, καθώς λαμβάνονται υπόψη διάφορες άλλες μελέτες που έχουν γίνει όπως για τη μεσοπρόθεσμη εξέλιξη του ΑΕΠ, θεωρείται ότι η συνολική ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας ενδέχεται να αυξάνεται συνεχώς. Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας για την αξιολόγηση της ζήτησης αποτελεί η αιχμή του φορτίου. Η συγκεκριμένη πρόβλεψη παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερη αβεβαιότητα από την πρόβλεψη της συνολικής ζήτησης ενέργειας. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η μέγιστη ετήσια αιχμή εξαρτάται πολύ έντονα από τον καιρό και ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες ενώ παράλληλα με την αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ φαίνεται να αυξάνει ολοένα και περισσότερο η αβεβαιότητα της πρόβλεψης.

## ΘΕΡΜΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Καθώς, λοιπόν, το ΣΗΕ ολοένα και μετασχηματίζεται είναι απαραίτητη η στενή παρακολούθηση των αλλαγών που πραγματοποιούνται αλλά και των επιπτώσεων τους στην επάρκεια και αξιοπιστία του συστήματος. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς θερμικών μονάδων στο ΕΣΜΗΕ σήμερα ανέρχεται στα 8,65 GW και να αποτελεί το 48% της συνολικής

εγκατεστημένης ισχύος. Οι θερμικές μονάδες αποτελούνται από λιγνιτικές και μονάδες φυσικού αερίου και καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο στόλος των θερμικών μονάδων μπορεί να χαρακτηριστεί πεπαλαιωμένος σε γενικές γραμμές, αφού σχεδόν οι μισές μονάδες έχουν συμπληρώσει πάνω από είκοσι χρόνια λειτουργίας, αν και την τελευταία δεκαετία τέθηκαν σε εμπορική λειτουργία πέντε νέες μονάδες συνδυασμένου κύκλου συνολικής καθαρής ισχύος 2115 MW και μία κατανεμημένη μονάδα ΣΗΘΥΑ καθαρής ισχύος 334 MW. Στα πλαίσια της υφιστάμενης νομοθεσίας των Ειδικών Όρων και των Άδειων Παραγωγής των νέων μονάδων της μάλιστα, η ΔΕΗ Α.Ε. οφείλει να αποσύρει ή να θέσει σε καθεστώς εφεδρείας εκτάκτων αναγκών πεπαλαιωμένες μονάδες ισόποσης ισχύος. Για το σκοπό αυτό έχουν ήδη προβλεφθεί ορισμένες απεντάξεις και τροποποιήσεις στο υπάρχον σύστημα μονάδων οι οποίες έχουν ήδη προγραμματιστεί στο άμεσο μέλλον.

## **ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των υδροηλεκτρικών μονάδων, από την άλλη, ανέρχεται σήμερα στα 3,171 GW και εντοπίζεται κυρίως στη δυτική και τη βόρεια Ελλάδα. Παρόλο που η εγκατεστημένη ισχύς των υδροηλεκτρικών μονάδων στο ελληνικό σύστημα παραγωγής είναι σημαντική (17%), η συνεισφορά τους στο ενεργειακό ισοζύγιο είναι σχετικά μικρή. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα νερών έχει ως αποτέλεσμα οι υδροηλεκτρικές μονάδες να χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για την κάλυψη των αιχμών. Γι' αυτό, και μέσα στο πλαίσιο της εκπόνησης της Μελέτης Επάρκειας του ΑΔΜΗΕ λαμβάνονται υπόψη και σενάρια χαμηλής, μεσαίας και υψηλής υδραυλικότητας.

Ήδη έως και το έτος 2022, στο ΕΣΜΗΕ λειτουργούσαν σταθμοί ΑΠΕ συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 8846 MW, εκ των οποίων τα 4426 MW αφορούν Α/Π και τα 4199 MW Φ/Β.

## **ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ**

Από τον Οκτώβριο του 2004, το ελληνικό Σύστημα επαναλειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το διασυνδεδεμένο ευρωπαϊκό Σύστημα υπό το γενικότερο συντονισμό του ENTSO-E. Η παράλληλη λειτουργία του ελληνικού Συστήματος με τον ευρωπαϊκό επιτυγχάνεται μέσω διασυνδετικών Γραμμών Μεταφοράς, κυρίως 400 kV, με τα Συστήματα της Αλβανίας, της Βουλγαρίας, της Βόρειας Μακεδονίας και της Τουρκίας. Επιπλέον, το Ελληνικό Σύστημα συνδέεται ασύγχρονα (μέσω υποβρυχίου συνδέσμου συνεχούς ρεύματος) με την Ιταλία. Τα συγκεκριμένα στοιχεία, ωστόσο, δεν θα συμπεριληφθούν στο τελικό μοντέλο.

## **ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ**

Δεδομένου, λοιπόν, ότι η ηλεκτρική ενέργεια δεν δύναται να αποθηκευτεί στην παρούσα φάση και ότι τόσο η ζήτηση όσο και η παραγωγή επηρεάζονται από απρόβλεπτους παράγοντες είναι πρακτικά αδύνατη η εκτίμηση της αξιοπιστίας ενός συστήματος ηλεκτροπαραγωγής. Μάλιστα, ορισμένες φορές ενδέχεται να απαιτηθεί η διακοπή τροφοδότησης ορισμένων καταναλωτών ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία μεταξύ της

παραγωγής και της ζήτησης. Απαραίτητος έτσι, λοιπόν, αποτελεί ο ακριβής καθορισμός του επιθυμητού επιπέδου αξιοπιστίας προκειμένου το ρίσκο μη ικανοποίησης της ζήτησης να είναι ανεκτό.

Αναλυτικότερα, η «Αναμενόμενη Απώλεια Φορτίου» (LOLE) που σε ώρες ανά έτος εκφράζει τις ώρες του έτους για τις οποίες το συγκεκριμένο σύστημα παραγωγής δεν μπορεί να ικανοποιήσει πλήρως τη ζήτηση, ανεξαρτήτως μεγέθους ελλείμματος κάθε ώρα και η «Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργεια ή το Απορριπτόμενο Φορτίο» (EUE ή EENS) που σε ετήσια βάση εκφράζει τις MWh που αναμένεται να μη μπορεί να καλύψει το συγκεκριμένο σύστημα παραγωγής, αποτελούν τους πιο διαδεδομένους δείκτες για την αξιολόγηση της επάρκειας ενός συστήματος παραγωγής. Όμως οι συγκεκριμένοι δείκτες είναι απαραίτητο να αξιολογούνται από κοινού. Συνεπώς, η Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργεια προσδιορίζει την ικανότητα επάρκειας του συστήματος παραγωγής ενώ η Πιθανότητα Απώλειας Φορτίου το ποσοστό των ωρών κατά τη διάρκεια ενός έτους κατά τις οποίες δεν μπορεί να ικανοποιηθεί πλήρως η ζήτηση. Συμβατικά, οι τιμές του LOLE κυμαίνονται από 2,4 έως 10 ώρες ετησίως ενώ στην παρούσα μελέτη του ΑΔΜΗΕ το κατώφλι για το δείκτη LOLE θεωρήθηκαν οι 3 ώρες ετησίως.

Κατά τη διεξαγωγή της μελέτης, λοιπόν, παρατηρήθηκε ότι στο πλαίσιο εναρμόνισης της μεθοδολογίας με την αντίστοιχη του ENTSO-E για κάθε σενάριο εξέλιξης της ζήτησης και έτος διαμορφώθηκαν 35 διαφορετικές χρονοσειρές φορτίων και παραγωγής ΑΠΕ χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα ιστορικά στοιχεία της βάσης δεδομένων PECD 2.0 που τηρεί ο ENTSO-E. Οι χρονοσειρές αυτές αντιστοιχούν σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες. Έπειτα, υπολογίστηκαν οι δείκτες αξιοπιστίας του συστήματος παραγωγής σε συνθήκες διασυνδεδεμένης λειτουργίας για τη περίοδο του 2020 – 2030 για το Σενάριο Αναφοράς ΕΣΕΚ σε συνδυασμό με όλα τα σενάρια υδραυλικότητας (ξηρό, μέσο και υγρό έτος). Για κάθε σενάριο εξετάστηκε η ικανότητα του συστήματος παραγωγής να ικανοποιήσει τη ζήτηση, δηλαδή εάν ικανοποιείται το υιοθετούμενο κριτήριο αξιοπιστίας των 3 ωρών ανά έτος για τον επαρκειακό δείκτη LOLE. Κατόπιν, εξετάστηκε η ευαισθησία των αποτελεσμάτων ως προς δύο βασικές παραμέτρους της αβεβαιότητας, την εξέλιξη της ζήτησης και την ένταξη νέων μονάδων και έτσι η μελέτη κατέληξε στο εξής συμπέρασμα. Συνοψίζοντας, λοιπόν, κατά τη διεξαγωγή της μελέτης κρισιμότερη περίοδος για την επάρκεια του συστήματος φάνηκε να είναι εκείνη που προβλέπεται η πλήρης απόσυρση των υφιστάμενων λιγνιτικών μονάδων. Σε περίπτωση, μάλιστα, που τα μέτρα εξοικονόμησης δεν αποδώσουν σε ικανοποιητικό βαθμό, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξηθεί περισσότερο και οι προβλεπόμενες νέες μονάδες δεν ενταχθούν εγκαίρως υπάρχει σημαντική πιθανότητα το σύστημα παραγωγής να μην μπορεί να ικανοποιήσει επαρκώς τις αιχμές φορτίου υπό δυσμενείς συνθήκες.

## 2.6 Συνεισφορά ΑΠΕ και Αποθήκευσης στην Επάρκεια των ΣΗΕ

### ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι σημερινοί στόχοι για την διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα προβλέπουν την μεγάλη αύξηση τους μέσα στα επόμενα χρόνια. Η απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων παραγωγής από ΑΠΕ μπορεί να είναι τεχνικά εφικτή σε αρκετό βαθμό, όμως προκύπτουν εμπόδια που σχετίζονται περισσότερο με τα κοινωνικά και οικονομικά αποδεκτά κόστη. [23] Η μείωση του κόστους των τεχνολογιών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και οι συνεχώς αυξανόμενοι διεθνείς και εθνικοί περιβαλλοντικοί στόχοι (όπως η μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα - CO<sub>2</sub>) καθιστούν τις ΑΠΕ έναν συνεχώς αναπτυσσόμενο παράγοντα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, οι μονάδες ΑΠΕ, όπως οι αιολικοί και οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί, δεν λαμβάνονται υπόψη στις περισσότερες μελέτες αξιοπιστίας ΣΗΕ καθώς δεν είναι κατανεμόμενες μονάδες. Παρατηρείται όμως ότι, καθώς η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξάνεται σε παγκόσμιο επίπεδο, και το μερίδιο τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μείζονος σημασίας, το ενδιαφέρον για την εκτίμηση της συμβολής των συγκεκριμένων μονάδων στην επάρκεια του συστήματος παραγωγής ολοένα και αυξάνεται. Έτσι διαμορφώνεται η ανάγκη να υπολογιστεί η ποσότητα ισχύος ζήτησης η οποία μπορεί να καλυφθεί με ασφάλεια από τις ΑΠΕ. Η συγκεκριμένη ποσότητα ορίζεται συνήθως στη βιβλιογραφία ως ικανότητα ή αξία συνεισφοράς σε ισχύ (Capacity Credit ή Capacity Value). [24]

Ένας συντελεστής που χρησιμοποιείται ως σημείο βάσης για την αξιολόγηση λειτουργίας ενός σταθμού ΑΠΕ είναι το Capacity Factor. Ο συντελεστής αυτός αποτελεί μέτρο αποδοτικότητας ενός σταθμού ΑΠΕ και χρησιμοποιείται συχνά για τα αιολικά πάρκα. Συγκεκριμένα, ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής παραγωγής ενέργειας ενός σταθμού κατά την περίοδο αναφοράς προς τη θεωρητικά μέγιστη παραγωγή που θα είχε ο σταθμός, εάν παρήγαγε την ονομαστική του ισχύ καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου αναφοράς.

$$\text{Capacity Factor} = \frac{\text{Παραγωγή Ενέργειας κατά την Περίοδο Αναφοράς [MWh]}}{\text{Ονομαστική Ισχύς Μονάδας [MW]} \cdot \text{Διάρκεια Περιόδου Αναφοράς [h]}}$$

Το Capacity Factor υποδηλώνει μία αρχική εκτίμηση της ικανότητας παραγωγής μίας μονάδας, σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία, και δε σχετίζεται με τη σύνθεση της συμβατικής παραγωγής, ούτε τη διακύμανση του φορτίου και το αποδεκτό επίπεδο αξιοπιστίας.

### ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

Η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί ίσως μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που συναντάται στον τομέα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι πριν από ορισμένα χρόνια η πεποίθηση ότι η ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται ακριβώς την ίδια χρονική στιγμή που παράγεται θεωρούνταν παγιωμένη. Ωστόσο, η ανάπτυξη εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας απέδειξε ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να διατηρείται στην ίδια ή και σε άλλες μορφές (χημική ή δυναμική ενέργεια κλπ.) και να καταναλώνεται ετεροχρονισμένα από τη στιγμή παραγωγής της. Σε συνδυασμό με τις

έντονες ανησυχίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης ορυκτών καυσίμων και τη μεγάλη επέκταση των ηλεκτρικών δικτύων παγκοσμίως, η αναζήτηση περισσότερων λύσεων στον τομέα της αποθήκευση ενέργειας γίνεται επιτακτική.

Μέσα από συγκεκριμένες μελέτες επισημαίνεται το θετικό αντίκτυπο που μπορεί να έχει η αποθήκευση ενέργειας στη λειτουργία των ΣΗΕ. [25] [26]

Οι εξοικονομήσεις που μπορούν να γίνουν σε επίπεδο επενδύσεων στην παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας χάρη στους σταθμούς αποθήκευσης, η μείωση στο λειτουργικό κόστος των συστημάτων, η αποδοτικότερη εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και η δεδομένη μείωση εκπομπών ρύπων αποτελούν κάποια από τα βασικά πλεονεκτήματα της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. [27]

Καθώς τα τελευταία χρόνια το κόστος των μπαταριών μειώνεται συνεχώς, κάτι που μέχρι σήμερα αποτελούσε τροχοπέδη για την επένδυση σε αυτές, η αποθήκευση ενέργειας συμμετέχει και εκτελεί λειτουργίες που μέχρι τώρα αναλάμβαναν εξ ολοκλήρου οι συμβατικές μονάδες ολοένα και πιο ενεργά. [28] Η εξισορρόπηση της ζήτησης ενέργειας, η μείωση των αιχμών της ζήτησης, η παροχή επικουρικών υπηρεσιών, και η βελτίωση της ποιότητας της παρεχόμενης ισχύος είναι κάποιοι από τους τομείς που η αποθήκευση μπορεί να συμβάλει στη λειτουργία των ΣΗΕ. [29]

Οι πρώτες εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας με τη χρήση μπαταριών στα σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) εστιάζουν σε εξειδικευμένες χρήσεις, κυρίως σχετικές με τις επικουρικές υπηρεσίες και την ασφαλή λειτουργία του συστήματος. Παρόλο που οι μονάδες αποθήκευσης, και ειδικά οι μπαταρίες, αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στην παροχή επικουρικών υπηρεσιών, το μέγεθος αυτής της αγοράς παραμένει συγκριτικά μικρότερο σε σχέση με τις αγορές ηλεκτρικής ισχύος και ενέργειας. Η μόνιμη ενσωμάτωση των συστημάτων αποθήκευσης στα σημερινά ηλεκτρικά δίκτυα απαιτεί και την επέκταση της χρήσης τους στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας και ισχύος. Σε παγκόσμιο επίπεδο, παρατηρείται ότι οι περισσότερες εφαρμογές μακροχρόνιας αποθήκευσης ενέργειας (διάρκειας 4 ωρών και άνω) συνδυάζονται με φωτοβολταϊκά πάρκα. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται προς το απόγευμα, η παραγωγή από φωτοβολταϊκά δεν είναι διαθέσιμη κατά τις ώρες υψηλής ζήτησης, όταν οι οριακές τιμές συστήματος είναι επίσης υψηλές (ετεροχρονισμός υψηλής παραγωγής από φωτοβολταϊκά και υψηλής ζήτησης φορτίου). Οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπουν την αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάρκα τις πρωινές ώρες, για παροχή στο σύστημα τις βραδινές και άλλες ώρες υψηλής ζήτησης. Αυτό το γεγονός εξισορροπεί την ενεργειακή ζήτηση μεταξύ των ωρών με χαμηλές και υψηλές οριακές τιμές συστήματος, μειώνοντας την αιχμή φορτίου και τη διάρκειά της, ελαχιστοποιώντας την ανάγκη χρήσης συμβατικών μονάδων παραγωγής. Η συνέργεια μεταξύ φωτοβολταϊκών και μπαταριών αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα έξυπνης διαχείρισης πόρων του συστήματος, υπογραμμίζοντας τον κρίσιμο ρόλο της αποθήκευσης ενέργειας στην αγορά ηλεκτρικής ισχύος και ενέργειας. [30] [31]

Σε ένα σχεδιασμό ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη βασικοί παράγοντες. Ορισμένοι από αυτούς είναι η οικονομικότητα των μονάδων και η

βιωσιμότητα του συστήματος ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται η επάρκεια των πόρων και η ασφαλής λειτουργία του συστήματος.

Η αξιοπιστία είναι ο πιο κρίσιμος παράγοντας που θα κρίνει αν οι μονάδες αποθήκευσης, σε συνεργασία με τις μονάδες ΑΠΕ [32], μπορούν να συναγωνιστούν και να αρχίσουν να αντικαθιστούν τις συμβατικές μονάδες σε επίπεδο αγοράς παροχής ηλεκτρικής ισχύος. Σημαντικό αντικείμενο μελέτης αποτελεί, λοιπόν, η ενσωμάτωση και η λειτουργία μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στα σύγχρονα ΣΗΕ, με σκοπό τη συμβολή τους στην επάρκεια ισχύος του συστήματος παραγωγής. [33]

## **ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ EFC ΚΑΙ ELCC ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ EENS ΚΑΙ LOLE**

Η συνεχής αύξηση της διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο ηλεκτρικό σύστημα θέτει προκλήσεις στην αξιολόγηση της επάρκειας ισχύος. Για τον υπολογισμό της συμβολής των ΑΠΕ στη σταθερότητα και την επάρκεια του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται διάφοροι δείκτες αξιολόγησης, με δύο από τους σημαντικότερους να είναι το Equivalent Firm Capacity (EFC) και το Extra Load Carrying Capability (ELCC). Παρά την κοινή τους χρήση για την εκτίμηση της αξίας των ΑΠΕ, τα αποτελέσματα που παράγουν αυτοί οι δύο δείκτες διαφέρουν σημαντικά, ειδικά όταν οι υπολογισμοί βασίζονται σε διαφορετικές μεθόδους αξιολόγησης όπως το Expected Energy Not Served (EENS) και το Loss of Load Expectation (LOLE).

Το **Equivalent Firm Capacity (EFC)** αποτελεί έναν δείκτη που μετρά την ποσότητα ισχύος που μπορεί να αντικαταστήσει μια συμβατική πηγή ενέργειας με μια ισοδύναμη από ΑΠΕ, χωρίς να μειώνεται η αξιοπιστία του συστήματος. Το EFC αναδεικνύει την αξία των ΑΠΕ στη διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου, καθορίζοντας ποια ποσοστό της παραγωγής τους μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμο με την ισχύ μιας αξιόπιστης, συμβατικής πηγής. Ωστόσο, η φύση του EFC επικεντρώνεται κυρίως στη σύγκριση της παραγωγής ΑΠΕ με μια σταθερή, αξιόπιστη μονάδα παραγωγής, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες και την δυναμική συμπεριφορά των ΑΠΕ σε πραγματικό χρόνο.

Το **Extra Load Carrying Capability (ELCC)**, από την άλλη πλευρά, αποτελεί έναν πιο ευέλικτο και περιεκτικό δείκτη, καθώς μετρά το επιπλέον φορτίο που μπορεί να υποστηρίξει το ηλεκτρικό σύστημα λόγω της παρουσίας των ΑΠΕ, διατηρώντας το ίδιο επίπεδο αξιοπιστίας. Το ELCC αξιολογεί τη συνολική συμβολή των ΑΠΕ όχι μόνο ως προς την αντικατάσταση συμβατικών μονάδων παραγωγής αλλά και ως προς την ικανότητά τους να ενισχύσουν το σύστημα, επιτρέποντάς του να εξυπηρετεί περισσότερο φορτίο χωρίς να αυξάνει τον κίνδυνο διακοπών.

Οι διαφορές μεταξύ των δύο δεικτών γίνονται εμφανείς όταν οι υπολογισμοί γίνονται με βάση το EENS και το LOLE. Το ELCC λαμβάνει υπόψη τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος και την ικανότητα των ΑΠΕ να καλύπτουν αυξανόμενη ζήτηση, ενώ το EFC εστιάζει περισσότερο στην απλή αντικατάσταση ισχύος από ΑΠΕ με σταθερή ισχύ.

Η βασική διαφορά μεταξύ EFC και ELCC έγκειται στη φιλοσοφία τους. Το EFC εξετάζει την ισοδύναμη αντικατάσταση θερμικής ισχύος από ΑΠΕ, δίνοντας έμφαση στη σύγκριση μεταξύ σταθερής ισχύος και της στοχαστικής παραγωγής των ΑΠΕ. Αντίθετα, το ELCC αξιολογεί τη δυνατότητα του συστήματος να καλύψει πρόσθετο φορτίο λόγω της συνεισφοράς των ΑΠΕ, λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική των μεταβολών στη ζήτηση και την παραγωγή. Το ELCC παρέχει μια πιο συνολική εικόνα της πραγματικής συμβολής των ΑΠΕ, ενώ το EFC επικεντρώνεται στη σχέση ισχύος με τις συμβατικές μονάδες.

## 3 Μεθοδολογία

### 3.1 Μέθοδοι Επεξεργασίας των Δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, πολλά από τα δεδομένα δεν βρίσκονται σε κατάλληλη μορφή για να ενσωματωθούν στο μοντέλο. Στη συνέχεια, θα γίνει ανάλυση των μεθοδολογιών καθώς και των απαραίτητων διαδικασιών που απαιτούνται για κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Συνοπτικά, λόγω της στοχαστικότητας βλαβών των θερμικών μονάδων, κάνοντας χρήση της μεθόδου προσομοίωσης Monte Carlo έχει δημιουργηθεί ο κατάλληλος αλγόριθμος «System Monte Carlo Simulation (SMCS)», ο οποίος έχει τη δυνατότητα να παραγάγει τις απαραίτητες ετήσιες χρονοσειρές των μονάδων που θα ενταχθούν στο υπόλοιπο σύστημα ισχύος προκειμένου να εξομαλυνθεί η αβεβαιότητα. Για την αξιολόγηση της επάρκειας του συστήματος γίνεται χρήση κατάλληλων συναρτήσεων και δημιουργείται ο αλγόριθμος «Reliability Test System (RTS)». Κατά την εισαγωγή των Υδροηλεκτρικών Συστημάτων Ενέργειας δημιουργείται ο αλγόριθμος «Hydro Peak Shaving» ο οποίος εστιάζει στην ένταξη των ΥΗΣ με βάση τις ημερήσιες αιχμές του φορτίου. Επιπλέον, για την ένταξη των μονάδων αποθήκευσης στο σύστημα, με δύο διαφορετικές πολιτικές, δημιουργούνται οι αλγόριθμοι «ESS Series» και «ESS Parallel», εφόσον οι μονάδες ενσωματώνονται διαδοχικά ή ταυτόχρονα, αντίστοιχα. Τέλος, προκειμένου να γίνει κατάλληλη αξιολόγηση των ΑΠΕ και των μονάδων αποθήκευσης που θα ενταχθούν μέσω των δεικτών αξιολόγησης EFC και ELCC έγινε δημιουργία των αντίστοιχων αλγορίθμων «EFC Calculator» και «ELCC Calculator».

Το μοντέλο υλοποιείται στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB [34].

#### 3.1.1 Θερμικές Μονάδες και Μέθοδος Monte Carlo

Κάθε συμβατική μονάδα παραγωγής μοντελοποιείται για τον υπολογισμό της αξιοπιστίας του συστήματος παραγωγής χρησιμοποιώντας την μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ της και το Ρυθμό Μη Προγραμματισμένων Διακοπών της (Forced Outage Rate - FOR). Η βασική παράμετρος αξιοπιστίας μίας μονάδας παραγωγής είναι η πιθανότητα βλάβης της σε μία τυχαία χρονική στιγμή στο μέλλον. Η πιθανότητα αυτή ορίζεται μέσω του δείκτη Ρυθμού Μη Προγραμματισμένων Διακοπών, ως η πιθανότητα μη διαθεσιμότητας της μονάδας. Ο συγκεκριμένος δείκτης παριστάνει μία πιθανότητα και όχι ένα ρυθμό. [17]

Σε ένα απλό μοντέλο δύο καταστάσεων [0,1] αναφορικά με τη λειτουργία μίας μονάδας, η πιθανότητα μη λειτουργία της δίνεται από το δείκτη μη διαθεσιμότητας FOR, ο οποίος εφόσον υπολογίζεται για μία μακρά περίοδο (π.χ. ενός ολόκληρου έτους) μπορεί να εκφραστεί μέσω των παραμέτρων της συχνότητας βλαβών ( $\lambda$ ) και του ρυθμού επισκευής της βλάβης ( $\mu$ ), ως εξής:

$$FOR = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (3.1)$$

Πρακτικά, ο αντίστοιχος ελληνικός Διαχειριστή του Συστήματος χρησιμοποιεί ένα σύνθετο τύπο υπολογισμού του δείκτη FOR για να μπορέσει να συνδυάσει όλες τις πιθανές αιτίες μη λειτουργίας των μονάδων. Αυτές οι αιτίες είναι: [35]

- 1) μηχανολογική βλάβη,
- 2) προγραμματισμένη συντήρηση,
- 3) μη διαθεσιμότητα λόγω του ΗΕΠ,
- 4) εργασίες σταθμού,
- 5) ανωμαλία συστήματος και
- 6) αναστολή Αποδεικτικού Διαθεσιμότητας Ισχύος (ΑΔΙ).

Οι δείκτες  $FOR_D$  που χρησιμοποιήθηκαν για τις συμβατικές μονάδες παραγωγής δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η πιθανότητα κάλυψης του φορτίου λαμβάνοντας υπόψη τις διακυμάνσεις και τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με την παραγωγή ή τη ζήτηση του συστήματος γίνεται χρήση πιθανοτικών μεθόδων. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται διακρίνονται σε αναλυτικές μεθόδους και σε μεθόδους προσομοιώσεων μέσω της τεχνικής Monte Carlo.

Ένα βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου μέσω Monte Carlo είναι η αποτελεσματικότητα με την οποία διαχειρίζονται και επιλύονται σύνθετα και πολυδιάστατα προβλήματα όπου μέσω της αναλυτικής μεθόδου θα ήταν σχεδόν απίθανο να επιλυθούν. Παράγοντας μεγάλους αριθμούς τυχαίων μεταβλητών και εξισορροπώντας τα αποτελέσματα στον μέσο όρο τους, οι προσομοιώσεις του Monte Carlo μπορούν να παρέχουν προσεγγίσεις με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Αυτή η ακρίβεια συνδέεται άμεσα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα (Κ.Ο.Θ.) καθώς τα προβλήματα τα οποία προσεγγίζει συνήθως αναφέρονται σε μεγάλο αριθμό δειγμάτων με αποτέλεσμα όσο περισσότερο αυξάνεται το  $N$ , τόσο αυξάνεται και η ακρίβεια της προσέγγισης.

Έτσι ανάμεσα σε αυτές τις δύο τεχνικές προτιμότερη είναι η τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo. [36]

## ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE CARLO

Η μέθοδος Monte Carlo αποτελεί μία κλασική τεχνική επίλυσης προβλημάτων τυχαίων μεταβλητών, που ειδικότερα εφαρμόζεται για αξιολόγηση ασφάλειας ορισμένων συστημάτων. Κύριος πυλώνας της υπολογιστικής μεθόδου είναι η επαναληπτική δειγματοληψία τυχαίων μεταβλητών έχοντας ως σημείο αναφοράς το εύρος εκτιμήσεων τους και την πιθανοτική τους κατανομή. Κατά την υλοποίηση της προσομοίωσης Monte Carlo δημιουργείται ένας μεγάλος αριθμός τυχαίων δειγμάτων για κάθε μεταβλητή, τα οποία ακολουθούν κατάλληλη πιθανοτική κατανομή. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για έναν ικανοποιητικό αριθμό επαναλήψεων, με βάση τυχαίες τιμές εισόδου.

Καθώς η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην επάρκεια ισχύος των ΣΗΕ θα πραγματοποιηθεί η αντίστοιχη προσέγγιση της παρούσας μεθόδου. Η πιο σημαντική παράμετρος στην αξιολόγηση της αξιοπιστίας ενός συστήματος είναι και η πιθανότητα

σφάλματος του. Ορίζοντας ως  $Q$  την μη διαθεσιμότητα του συστήματος και ως  $x_i$  μία μοναδιαία μεταβλητή που ισούται με:

$$\begin{aligned} x_i &= 0, & \text{εάν το σύστημα είναι διαθέσιμο} \\ x_i &= 1, & \text{εάν το σύστημα **δεν** είναι διαθέσιμο} \end{aligned}$$

τότε η ποσότητα  $Q$  ισούται με:

$$Q = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.2)$$

όπου  $N$  ο αριθμός των συνολικών δειγμάτων για την κατάσταση ενός συστήματος.

Η διακύμανση προκύπτει ως εξής:

$$V(x) = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{Q})^2 \quad (3.3)$$

Ενώ όταν ο αριθμός των δειγμάτων είναι σχετικά μεγάλος η εξίσωση 3.3 μετασχηματίζεται σε:

$$V(x) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{Q})^2 \quad (3.4)$$

Στην προσομοίωση οι μεταβλητές  $x_i$  έχουν δυαδική μορφή και συνεπώς προκύπτει ότι η εξίσωση για την διακύμανση του κάθε δείγματος καταλήγει στην τελική μορφή:

$$\begin{aligned} V(x) &= \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N 2x_i \bar{Q} + \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \bar{Q}^2 \\ &= \bar{Q} - 2\bar{Q}^2 + \bar{Q}^2 = \bar{Q} - \bar{Q}^2 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Ενώ αναφορικά με το επίπεδο ακρίβειας της συγκεκριμένης μεθόδου αυτή μπορεί να προσεγγιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1 - \bar{Q}}{N\bar{Q}}} \quad (3.6)$$

## ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΥΧΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Ένας τυχαίος αριθμός μπορεί να παραχθεί είτε με φυσική είτε με μαθηματική μέθοδο. Η μαθηματική μέθοδος είναι η πιο συνηθισμένη, καθώς μπορεί να εγγυηθεί αναπαραγωγιμότητα και μπορεί να εκτελεστεί εύκολα σε ψηφιακό υπολογιστή. Ένας τυχαίος αριθμός που παράγεται με μαθηματική μέθοδο δεν είναι πραγματικά τυχαίος και ως εκ τούτου αναφέρεται ως ψευδοτυχαίος αριθμός. Κατ' αρχήν, μια ακολουθία ψευδοτυχαίων αριθμών θα πρέπει να ελέγχεται στατιστικά για να διασφαλίζεται η τυχαιότητα της.

Οι βασικές απαιτήσεις για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών είναι οι εξής:

- 1) Ομοιομορφία: Οι τυχαίοι αριθμοί πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι μεταξύ  $[0, 1]$ .
- 2) Ανεξαρτησία: Θα πρέπει να υπάρχει ελάχιστη συσχέτιση μεταξύ των τυχαίων αριθμών.
- 3) Μεγάλη περίοδος: Η περίοδος επανάληψης πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλη.

Μία τυχαία μεταβλητή, λοιπόν, αναφέρεται σε μια μεταβλητή που ακολουθεί μια δεδομένη κατανομή. Οι μέθοδοι παραγωγής τυχαίων αριθμών είναι ουσιαστικά αυτές που παράγουν μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί μια ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ  $[0, 1]$ . Οι γεννήτριες τυχαίων μεταβλητών που ακολουθούν άλλες κατανομές βασίζονται σε ομοιόμορφα κατανεμημένους τυχαίους αριθμούς μεταξύ  $[0, 1]$ . Οι διαδικασίες για τη δημιουργία μη ομοιόμορφα κατανεμημένων τυχαίων μεταβλητών μπορούν γενικά να καταταγούν σε τρεις τεχνικές:

- 1) Αντίστροφος μετασχηματισμός
- 2) Μέθοδος σύνθεσης και
- 3) Μέθοδος αποδοχής-απόρριψης.

Υπάρχουν επίσης ειδικές μέθοδοι για συγκεκριμένες κατανομές. Η μέθοδος του αντίστροφου μετασχηματισμού είναι αυτή που χρησιμοποιείται συχνότερα, ενώ η εκθετική και η κανονική κατανομή είναι οι πιο σημαντικές στην αξιολόγηση της αξιοπιστίας.

## ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η προσέγγιση δειγματοληψίας διάρκειας κατάστασης βασίζεται στη δειγματοληψία της κατανομής πιθανότητας της διάρκειας κατάστασης ενός στοιχείου του συστήματος. Σε αυτή την προσέγγιση, οι χρονολογικές διαδικασίες μετάβασης καταστάσεων για όλα τα στοιχεία προσομοιώνονται πρωτίστως μέσω δειγματοληψίας. Στη συνέχεια, η μετάβαση στην χρονολογική κατάσταση του συστήματος δημιουργείται από το συνδυασμό της χρονολογικής κατάστασης όλων των συνιστωσών του συστήματος. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιεί τις συναρτήσεις κατανομής της διάρκειας των καταστάσεων των επιμέρους στοιχείων. Σε μια αναπαράσταση ενός στοιχείου δύο καταστάσεων, αυτές είναι οι λειτουργικές και επισκευαστικές καταστάσεις και συνήθως θεωρούνται εκθετικές. Ωστόσο, μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν και άλλες κατανομές.

Η προσέγγιση δειγματοληψίας διάρκειας κατάστασης μπορεί να συνοψιστεί στα ακόλουθα βήματα:

- 1) Προσδιορισμός της αρχικής κατάστασης κάθε στοιχείου του συστήματος. Συνήθως θεωρείται ότι όλα τα στοιχεία είναι αρχικά σε κατάσταση 1 (κατάσταση λειτουργίας)
- 2) Δειγματοληψία της διάρκειας κάθε στοιχείου στην παρούσα φάση του. Για παράδειγμα, για μία εκθετική κατανομή, δίνεται ότι η τιμή δειγματοληψίας για τη διάρκεια μιας κατάστασης ορίζεται ως:

$$T_i = \frac{1}{\lambda_i} \ln U_i \quad (3.7)$$

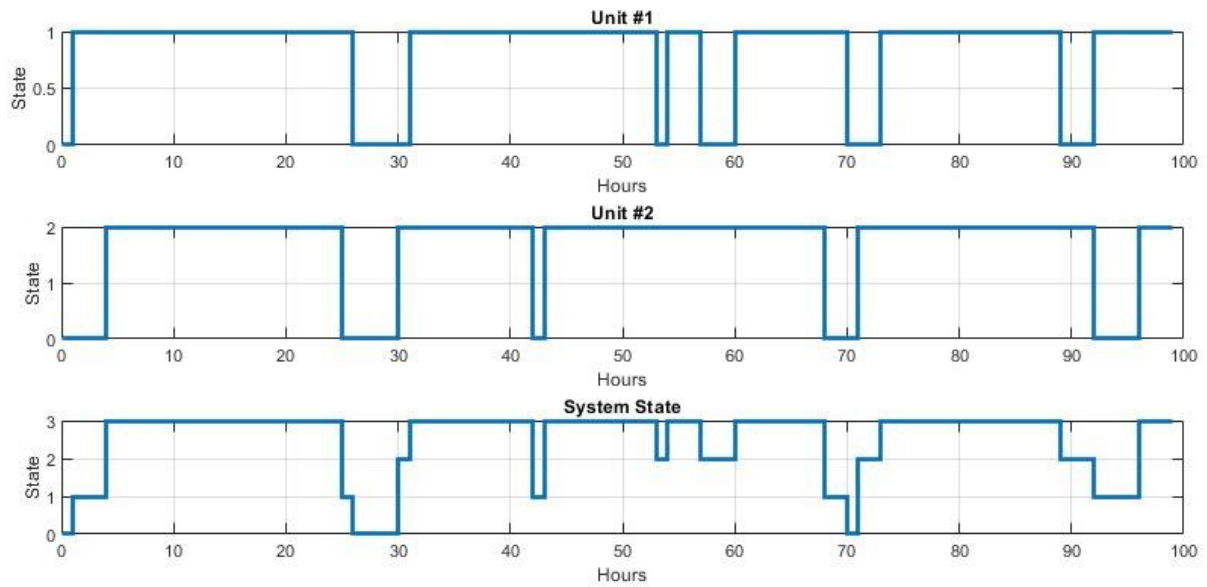
Όπου  $U_i$  ορίζεται μία ανομοιόμορφη κατανομή τυχαίων αριθμών στο διάστημα  $[0,1]$  και αναφέρεται στο  $i$  στοιχείο του συστήματος. Εάν η τωρινή κατάσταση είναι η κατάσταση λειτουργίας, το  $\lambda_i$  είναι ο χρόνος έως τη βλάβη του  $i$ -οστού στοιχείου ενώ αν βρισκόμαστε σε κατάσταση βλάβης το  $\lambda_i$  αναφέρεται στο χρόνο που απαιτείται για να επιδιορθωθεί το συγκεκριμένο στοιχείο.

- 3) Επανάληψη του βήματος 2 για δεδομένες επαναλήψεις σε ένα χρονικό διάστημα (για παράδειγμα για ένα έτος) και αποθήκευση όλων των τιμών της δειγματοληψίας για όλα τα στοιχεία του συστήματος σε κάθε κατάσταση. Δημιουργία χρονοσειράς κατάστασης για κάθε στοιχείο ξεχωριστά.
- 4) Δημιουργία συνολικής χρονοσειράς κατάστασης συστήματος μέσω αθροίσματος των χρονοσειρών των επιμέρους στοιχείων.
- 5) Διεξαγωγή ανάλυσης συστήματος για κάθε κατάσταση προκειμένου να αξιολογηθεί η αξιοπιστία του.

Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι μέσω αυτής μπορεί να υπολογιστεί η συχνότητα ενός συμβάντος με μεγάλη ακρίβεια, να γίνει θεώρηση οποιασδήποτε διάρκειας κατάστασης, ενώ ακόμα μπορεί να υπολογιστεί η στατιστική πιθανοτική κατανομή των δεικτών αξιοπιστίας του συστήματος.

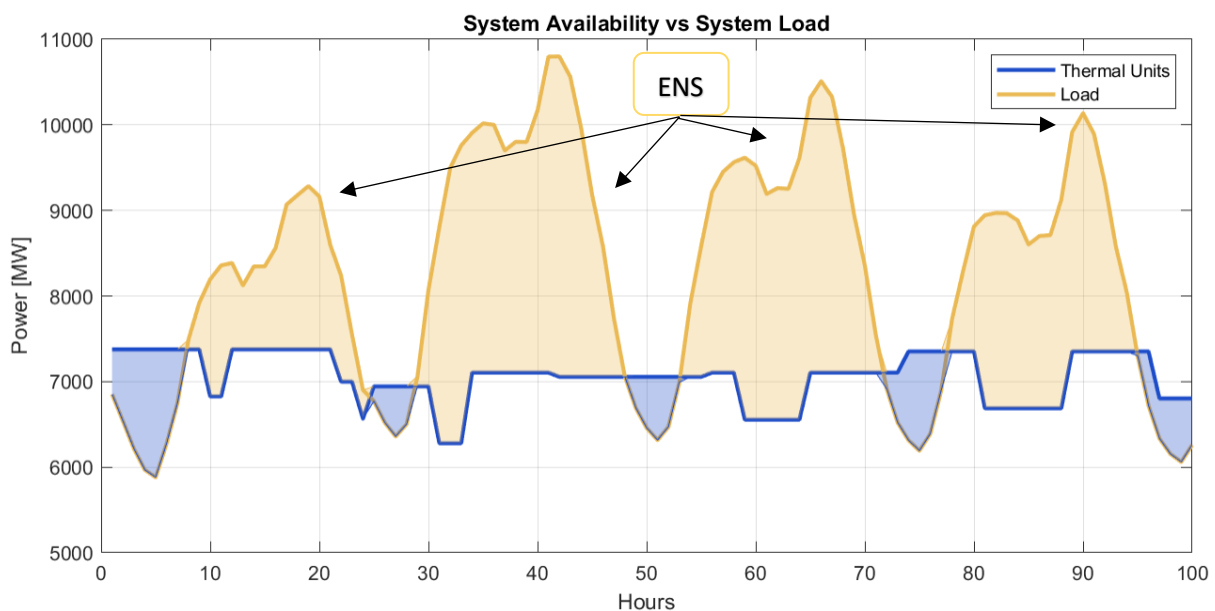
Από την άλλη, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Βασικότερο είναι ότι η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο και χρησιμοποιεί αρκετούς υπολογιστικούς πόρους (αποθηκευτικός χώρος) καθώς για την παραγωγή τυχαίων μεταβλητών για κάθε στοιχείο ξεχωριστά καθώς για την παραγωγή και αποθήκευση των αντίστοιχων χρονοσειρών τους παράγεται μεγάλος όγκος δεδομένων. Επίσης, αυτή η προσέγγιση απαιτεί παραμέτρους που σχετίζονται με τις κατανομές διάρκειας κατάστασης όλων των στοιχείων. Ακόμη και υπό απλή εκθετική παραδοχή, πρόκειται για όλους τους ρυθμούς μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων κάθε στοιχείου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ειδικά για μια αναπαράσταση στοιχείου με πολλές καταστάσεις, μπορεί να είναι αρκετά δύσκολο να παρέχονται όλα αυτά τα δεδομένα σε μια πραγματική εφαρμογή του συστήματος. [37], [38]

## ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ



Σχήμα 7: Ενδεικτική δειγματοληψία διάρκειας συστήματος που αποτελείται από δύο μονάδες.

Προκειμένου η συγκεκριμένη τεχνική να εφαρμοστεί για ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω ενέργειες. Αρχικά, κατασκευάστηκε το ιστορικό διαθεσιμότητας για κάθε μονάδα παραγωγής αντλώντας δειγματοληπτικές τιμές TTF (Time To Failure) και TTR (Time To Repair) της μονάδας. Το ιστορικό λειτουργίας κάθε μονάδας έχει τη μορφή χρονολογικού κύκλου λειτουργίας με άνοδο – κάθοδο σε καταστάσεις 0 και 1. Αθροίζοντας τις επιμέρους χρονοσειρές προκύπτει η αντίστοιχη χρονοσειρά του συνολικού συστήματος (Σχήμα 7). Επόμενο στάδιο αποτελεί η υπέρθεση της καμπύλης της διαθέσιμης δυναμικότητας του συστήματος με την αντίστοιχη χρονολογική καμπύλη ωριαίου φορτίου προκειμένου να προκύψουν τα αντίστοιχα όρια του συστήματος.



Σχήμα 8: Υπέρθεση συστήματος παραγωγής και φορτίου συστήματος.

Σύμφωνα με το Σχήμα 8, ένα θετικό όριο υποδηλώνει ότι η παραγωγή του συστήματος επαρκεί για να καλύψει το φορτίο του συστήματος, ενώ ένα αρνητικό ότι το φορτίο του συστήματος πρέπει να περικοπεί.

Το τρίτο βήμα είναι ο υπολογισμός των κατάλληλων δεικτών αξιοπιστίας. Σε κάθε έτος δειγματοληψίας, για παράδειγμα το έτος  $i$ , η διάρκεια απώλειας φορτίου (LLDi) σε ώρες, η συχνότητα εμφάνισης απώλειας φορτίου (LLOi) και η μη παρεχόμενη ενέργεια (ENSi) σε MWh μπορούν να με την παρατήρηση των ορίων του μοντέλου. Συνεπώς, οι δείκτες αξιοπιστίας σε  $N$  έτη δειγματοληψίας μπορούν να εκτιμηθούν από τις ακόλουθες εξισώσεις:

1) Loss of Load Expectation (LOLE), hr/yr:

$$LOLE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N LLD_i \quad (3.8)$$

2) Loss of Load Expectation (LOEE ή EENS), MWh/yr:

$$EENS = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N ENS_i \quad (3.9)$$

3) Loss of Load Frequency (LOLF), occ./yr

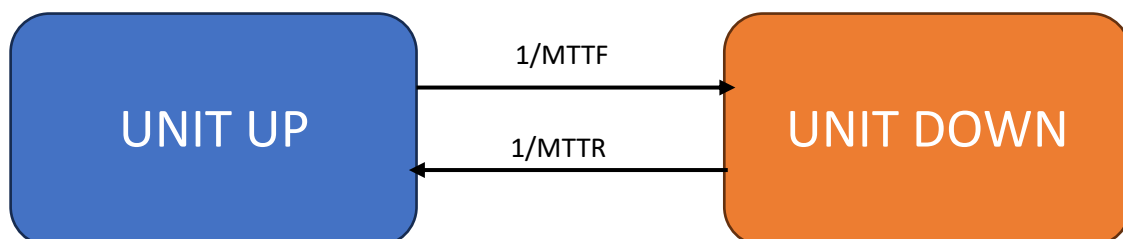
$$LOLF = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N LLO_i \quad (3.10)$$

Ο ρυθμός της σύγκλισης των εξισώσεων 3.8 – 3.10 μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον στατιστικό δείκτη της σύγκλισης, που ορίζεται ως:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=L}^N [x_i - E(x)]^2 \quad (3.11)$$

όπου  $E(X)$  ο μέσος όρος της μεταβλητής  $x$ .

Έτσι, από τα παραπάνω βήματα προκύπτει ότι το πιο σημαντικό στάδιο είναι η μοντελοποίηση της μονάδας παραγωγής. Οι υπόλοιπες ενέργειες αποτελούν τον συνδυασμό των κύκλων λειτουργίας όλων των μονάδων, την υπέρθεση των καμπύλων της διαθέσιμης δυναμικότητας του συστήματος με την αντίστοιχη χρονοσειρά του φορτίου, τις καταγραφές των παρατηρούμενων τιμών και τους τελικούς απλούς υπολογισμούς. Το μοντέλο μονάδας παραγωγής παρέχει ένα τεχνητό ιστορικό λειτουργίας της μονάδας σε δειγματοληψία διάρκειας κατάστασης όλων των μονάδων.



Σχήμα 9: Συμβατικό μοντέλο δύο καταστάσεων για θερμική μονάδα παραγωγής

Ένα συμβατικό μοντέλο δύο καταστάσεων για μία θερμική μονάδα παρουσιάζεται στο Σχήμα 9 όπου και οι δύο χρόνοι λειτουργίας και επισκευής κατανέμονται εκθετικά. Ως MTTF ορίζεται ο μέσος χρόνος μέχρι τη βλάβη και MTTR ο μέσος χρόνος μέχρι την επισκευή. Τιμές δειγματοληψίας του TTF και του TTR μπορούν να ληφθούν με την εξαγωγή τυχαίων μεταβλητών που ακολουθούν εκθετικές κατανομές με παραμέτρους  $\lambda=1/MTTF$  και  $\mu=1/MTTR$  αντίστοιχα.

$$TTF = -MTTF * \ln U \quad (3.12)$$

$$TTR = -MTTR * \ln U' \quad (3.13)$$

Όπου U και U' δύο ομοιόμορφα κατανεμημένες ακολουθίες τυχαίων αριθμών μεταξύ [0,1].

### ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΑΣ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ

Η προσομοίωση Monte Carlo είναι μία διαδικασία σύγκλισης με διακυμάνσεις. Καθώς η προσομοίωση εξελίσσεται, οι εκτιμώμενοι δείκτες θα προσεγγίζουν τις «πραγματικές» τους τιμές. Η προσομοίωση θα πρέπει να τερματιστεί όταν οι εκτιμώμενοι δείκτες αξιοπιστίας επιτυγχάνουν έναν καθορισμένο βαθμό εμπιστοσύνης. Ο σκοπός ενός κανόνα διακοπής είναι να παρέχει ένα συμβιβασμό μεταξύ της απαιτούμενης ακρίβειας και του υπολογισμού του κόστους. Καθώς ο συντελεστής διακύμανσης χρησιμοποιείται συχνά ως κριτήριο σύγκλισης της συγκεκριμένης τεχνικής αυτός ορίζεται ως:

$$\alpha = \frac{\sigma}{E(x)} \quad (3.14)$$

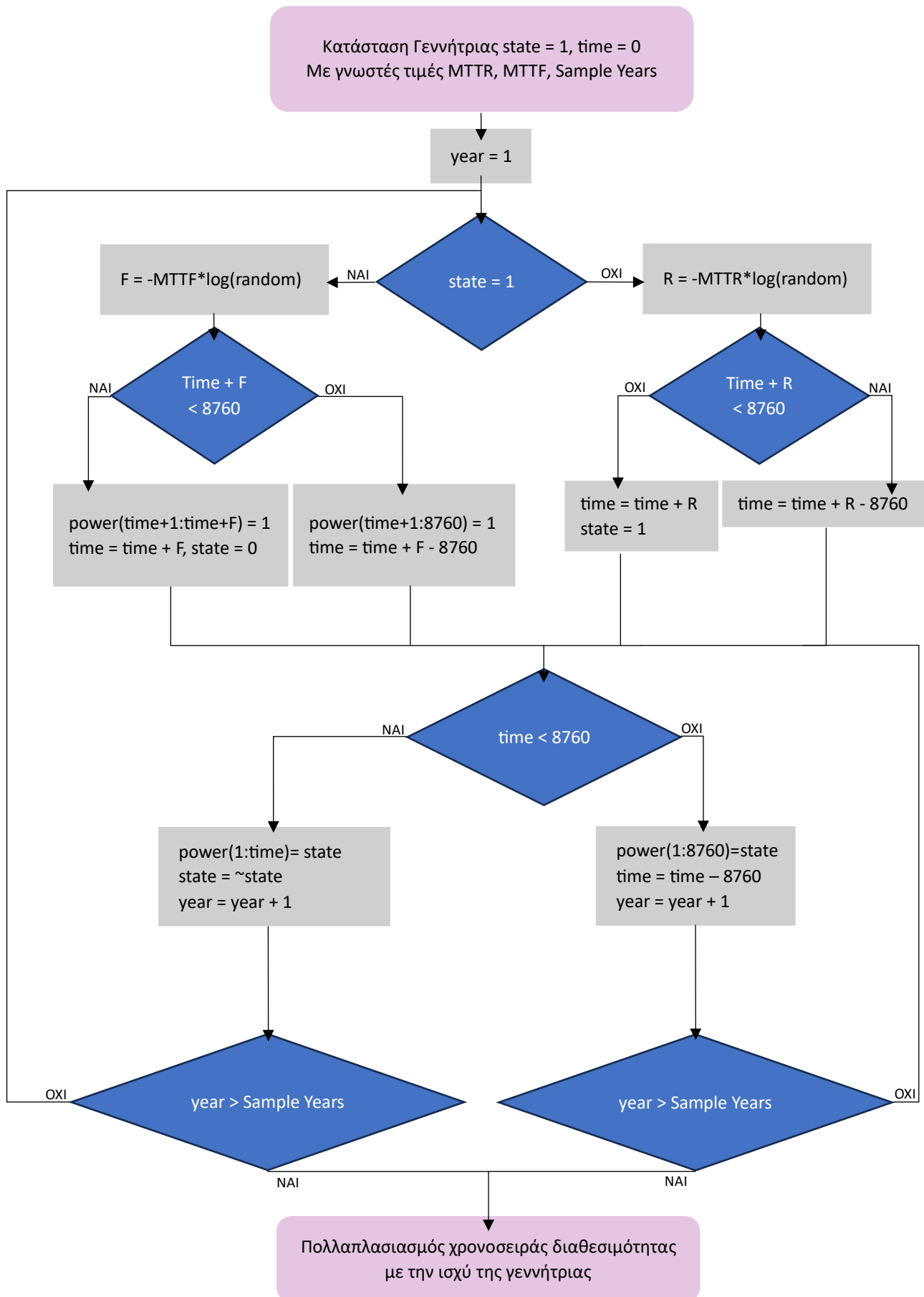
Όπου E(X) είναι η εκτιμώμενη πρόβλεψη του δείκτη και σ η τυπική απόκλιση της όπως διατυπώθηκε στην εξίσωση 3.11. Ορισμένοι υπολογισμοί [39] δείχνουν ότι ο συντελεστής διακύμανσης για το EENS έχει τη χαμηλότερη ταχύτητα σύγκλισης σε σύγκριση με άλλους δείκτες. Συνεπώς, κατά τον υπολογισμό πολλών δεικτών συνίσταται η χρήση του δείκτη EENS ως κριτήριο σύγκλισης.

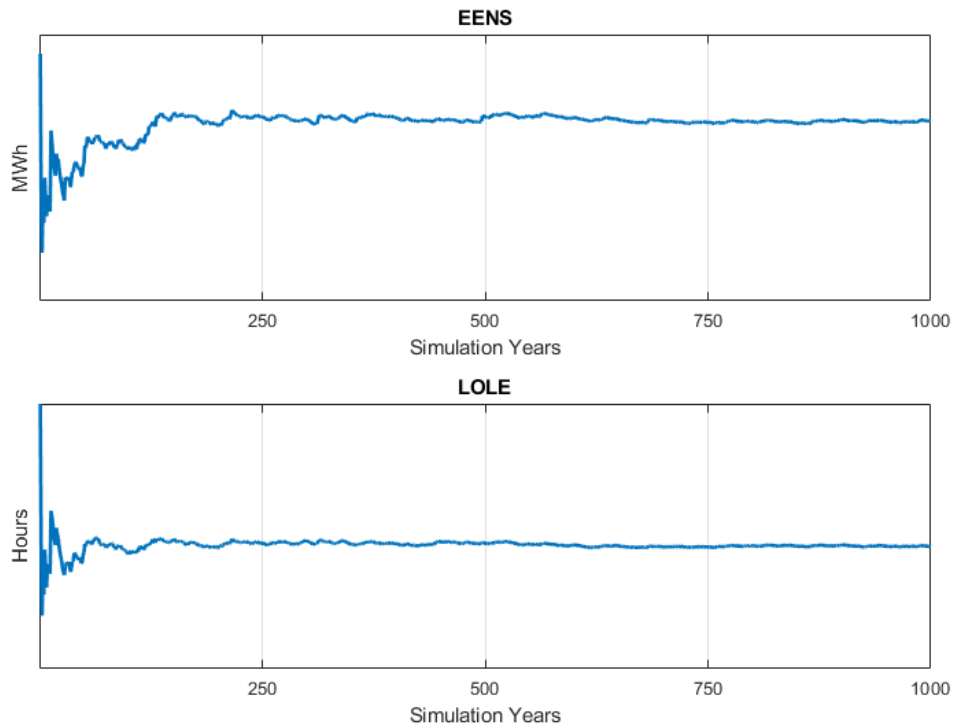
Σε γενικές γραμμές ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο κανόνες διακοπής:

- 1) Η προσομοίωση σταματά όταν ο συντελεστής μεταβλητότητας α είναι μικρότερος από μία προκαθορισμένη τιμή ανοχής
- 2) Η προσομοίωση διακόπτεται σε έναν δεδομένο αριθμό δειγμάτων και ελέγχεται εάν ο συντελεστής διακύμανσης είναι αποδεκτός. Εάν όχι, ο αριθμός των δειγμάτων μπορεί να αυξηθεί.

Ωστόσο, στο μοντέλο της παρούσας διπλωματικής η αρχική προσέγγιση έγινε μέσω του συντελεστή μεταβλητότητας με αρχική τιμή ανοχής το 0,01. Καθώς, όμως, ο δείκτης EENS συγκλίνει αρκετά πιο γρήγορα από ότι αναμένεται (Σχήμα 10 - λιγότερα από 2000 χρόνια προσομοίωσης) και σύμφωνα με την τυπική βιβλιογραφία [40] τα χρόνια προσομοίωσης ορίστηκαν στα δέκα χιλιάδες. Έτσι, σε κάθε ανάλυση της επάρκειας του συστήματος λαμβάνονται υπόψη οι δέκα χιλιάδες διαφορετικές χρονοσειρές που έχουν δημιουργηθεί για την δειγματοληψία κατάστασης συστήματος μονάδων παραγωγής. Τέλος, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος SMCS που είναι υπεύθυνος για την παραγωγή των χρονοσειρών διαθεσιμότητας.

## ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ SMCS



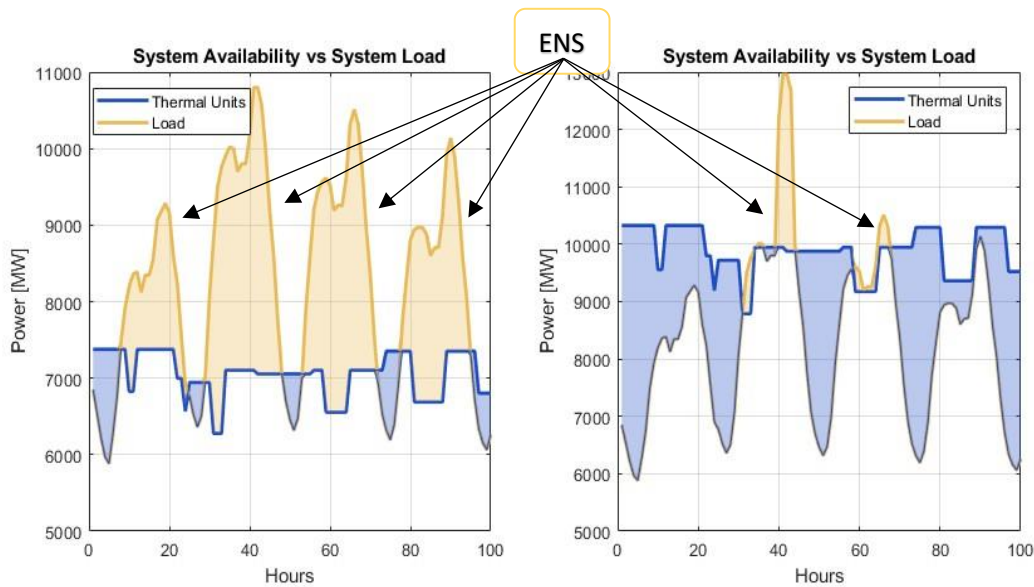


Σχήμα 10: Σύγκλιση Δεικτών Επάρκειας με βάση το EENS και το LOLE αντίστοιχα

### 3.1.2 Υπολογισμός Δεικτών Επάρκειας και Αλγόριθμος RTS

#### ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ

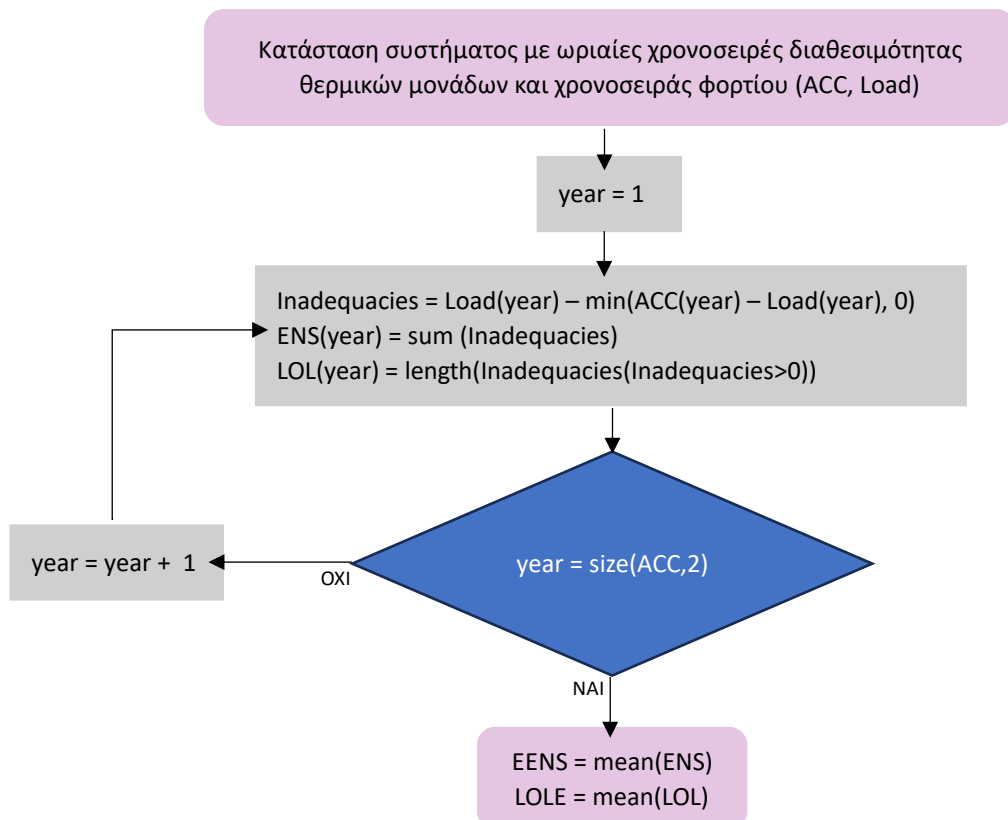
Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2, οι δείκτες αξιοπιστίας που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι το LOLE, το EENS και το LOLF. Το συγκεκριμένο μοντέλο εστιάζει στο LOLE και το EENS, δύο δείκτες που αντιστοιχίζονται στις συνολικές ώρες και την συνολική ενέργεια, αντίστοιχα, που το σύστημα παραγωγής δεν καλύπτει το φορτίο. Να τονιστεί ότι οι συγκεκριμένοι δείκτες είναι σημαντικό να αξιολογούνται από κοινού σε ένα σύστημα. Εύκολα διαπιστώνεται ότι υπολογίζονται δύο εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά του συστήματος παραγωγής. Από τη μία πλευρά το LOLE αναφέρεται στις συνολικές ώρες μέσα σε ένα έτος που αναμένεται απώλεια φορτίου, αλλά δεν αναφέρεται στο πόσο πρέπει να αυξηθεί η διαθέσιμη συνολική παραγωγή προκειμένου να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του συστήματος. Το EENS από την άλλη, αναφέρεται στη συνολική ενέργεια που δεν καλύφθηκε από το σύστημα αλλά χωρίς να είναι γνωστό πως η ενέργεια είναι κατανομημένη σε ετήσια βάση. Έτσι, οι απαιτούμενες αλλαγές προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία του συστήματος παραμένουν αμφίβολες. Εάν οι ανεπάρκειες είναι ομοιόμορφα κατανομημένες μέσα στο έτος (Σχήμα 11α) τότε απαραίτητη είναι μία μόνιμη λύση στο σύστημα παραγωγής (π.χ. προσθήκη επιπλέον θερμικής μονάδας ή μονάδας αποθήκευσης με μεγάλη χωρητικότητα ενέργειας). Εάν από την άλλη, οι ανεπάρκειες συναντώνται σε μικρή συχνότητα και για μικρό χρονικό διάστημα αλλά το ύψος τους είναι μεγάλο συγκριτικά με την διαθέσιμη εγκατεστημένη ισχύ παραγωγής (Σχήμα 11β), τότε η προτιμότερη λύση είναι μία βραχυπρόθεσμη και ευέλικτη που θα μπορεί να λειτουργεί σαν εφεδρεία ανά πάσα στιγμή και για μικρό χρονικό διάστημα μέσα στο έτος (π.χ. μονάδα αποθήκευσης μεγάλης ισχύος, μικρής αποθηκευτικής ικανότητας αλλά υψηλού βαθμού απόδοσης για ευελιξία με το σύστημα).



Σχήμα 11: α) Ανεπάρκειες ομοιόμορφα κατανεμημένες στο σύστημα παραγωγής, β) υψηλή ανεπάρκεια σε ώρα αιχμής

## ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ RTS

Ο αντίστοιχος αλγόριθμος υπολογισμού παρουσιάζεται μέσα από το ακόλουθο διάγραμμα. (Η πρώτη διάσταση των χρονοσειρών ACC, Load έχει μήκος 8760 ώρες ως συνήθως).



Σημειώνεται ότι, για τον υπολογισμό των δεικτών επάρκειας του συστήματος μπορεί να γίνει χρήση του συγκεκριμένου αλγορίθμου σε οποιαδήποτε στάδιο υλοποίησης του μοντέλου. Είτε κατά το στάδιο του αρχικού φορτίου (Initial Load), είτε το στάδιο του εναπομένοντος φορτίου (Residual Load), ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ανταποκρίνεται εξίσου πλήρως.

### 3.1.3 Εισαγωγή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο μοντέλο Εκτίμησης Επάρκειας

#### ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΦΒ ΚΑΙ ΑΠ

Αναφορικά με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για τη μελέτη επάρκειας ισχύος του συστήματος παραγωγής έγινε χρήση της μεθοδολογίας που περιγράφεται στην Ενότητα 2.5.2 και εφαρμόζεται σήμερα από τον ΑΔΜΗΕ. Η συνεισφορά των μονάδων ΑΠΕ στην μελέτη επάρκειας ισχύος αναλογεί στην ενέργεια που διοχετεύεται στο σύστημα μέσα από αυτές. Κατά αυτόν τον τρόπο μειώνεται το φορτίο ζήτησης εξυπηρετούμενο από συμβατικές μονάδες κατά το ποσό φορτίου που καλύπτεται από τις μονάδες ΑΠΕ. Έτσι λοιπόν, για τον υπολογισμό του φορτίου ζήτησης εξυπηρετούμενου από συμβατικές μονάδες, δηλαδή το υπολειπόμενο φορτίο (Residual Load) ορίζεται ως το συνολικό φορτίο ζήτησης μειωμένο κατά την συνολική αιολική και φωτοβολταϊκή παραγωγή.

$$ResidualLoad_t = Load_t - WF_t - PV_t \forall t \in T \quad (3.15)$$

Αφού προκύψει η χρονοσειρά για το φορτίο ζήτησης εξυπηρετούμενο από συμβατικές υπολογίζονται οι δείκτες αξιοπιστίας ακριβώς όπως αναλύθηκε στην Ενότητα 3.2.2. Ουσιαστικά, οι δείκτες προσδιορίζονται πλέον τροποποιώντας τη χρονολογική καμπύλη διάρκειας φορτίου, αφαιρώντας δηλαδή την υπολογιζόμενη παραγωγή ΑΠΕ από το συνολικό φορτίο. Κατά αυτό τον τρόπο η καμπύλη του φορτίου ζήτησης μειώνεται, και κατά συνέπεια οι δείκτες αξιοπιστίας βελτιώνονται.

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η στοχαστικότητα των ΑΠΕ, εξετάστηκαν πολλαπλά σενάρια πρόβλεψης της παραγωγής τους. Προσεγγίστηκαν δύο διαφορετικές στρατηγικές ανάπτυξης τους, τόσο της μεμονωμένης ανάπτυξης της εκάστοτε τεχνολογίας όσο και την ταυτόχρονη ανάπτυξη του συνολικού μίγματος των ΑΠΕ.

#### ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΥΗΣ

Ωστόσο, δύο συγκεκριμένες τεχνολογίες των υδροηλεκτρικών σταθμών, στην παρούσα μελέτη αυτές των Reservoir και Opened Loop (Ταμιευτήρες και Αντλίες Ανοιχτού Βρόγχου), χρησιμοποιούνται συνήθως με σκοπό την εξομάλυνση των αιχμών του φορτίου μέσω του αλγορίθμου Hydro Peak Shaving [41]. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εκτελείται αναλυτικά από τα εξής βήματα:

##### Δεδομένα:

- Ημερήσια χρονοσειρά υδραυλικότητας
- Ωριαία χρονοσειρά ζήτησης εναπομένοντος φορτίου (Αρχική Ζήτηση – Λοιπές ΑΠΕ)

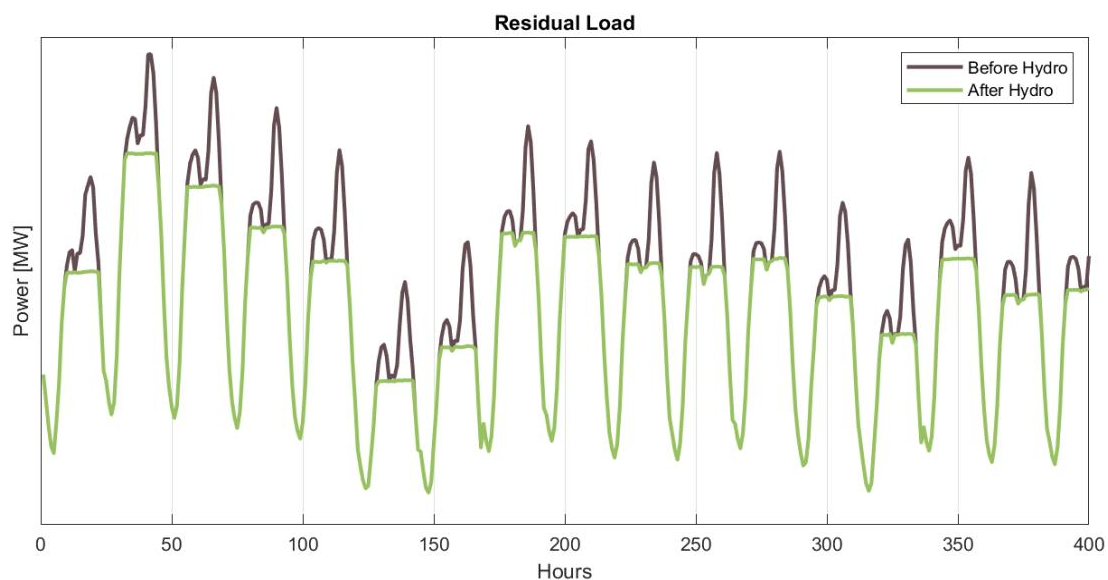
##### Ζητούμενο:

- Ημερήσια διοχέτευση της ενέργειας των ΥΗΣ με σκοπό την μείωση ωριαίων αιχμών (όπου υπάρχουν) και την εξομάλυνση του φορτίου.

Συνεπώς, θεωρώντας γνωστή τη χρονοσειρά του εναπομένοντος φορτίου σε ημερήσιο ορίζοντα, μέσα από τη σύγκριση των δύο χρονοσειρών, ΥΗΣ και φορτίου, διοχετεύεται όλη η ενέργεια των ταμιευτήρων και των αντλιών ανοιχτού βρόγχου στις ώρες της ημέρας που παρατηρείται η μεγαλύτερη ζήτηση. Ουσιαστικά, ο τρόπος που λειτουργεί ο συγκεκριμένος αλγόριθμος βασίζεται στην επαναληπτική μέθοδο. Κάθε μέρα αντλούνται δεδομένα από τη συνολική διαθέσιμη ενέργεια προς παραγωγή και την αντίστοιχη ζητούμενη. Θέτοντας ως κριτήριο την μέγιστη ζήτηση (max) μέσα στην ημέρα και έχοντας θεωρήσει ένα σταθερό βήμα «step» MW, γίνεται αρχική διαχείριση της απαιτούμενης ενέργειας ανάμεσα στην μέγιστη τιμή (max) και το κατώφλι που έχει τεθεί κατά μία μονάδα λιγότερη (max – step) στον κατακόρυφο άξονα του φορτίου. Αποθηκεύονται οι ωριαίες τιμές που οι ταμιευτήρες χρειάστηκαν να δράσουν και τα αντίστοιχα MW των ενεργειών τους και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία θέτοντας καινούργια όρια ελέγχου μειωμένα κατά «step» MW. Ο αλγόριθμος συνεχίζει να εκτελείται μέχρι η διαθέσιμη ωριαία ενέργεια των ΥΗΣ να έχει εξαντληθεί για όλες τις ώρες. Ωστόσο, καθώς η διαθέσιμη ενέργεια από τα ΥΗΣ συσσωρεύεται σε ημερήσια βάση, η ωριαία ελάττωση του φορτίου δεν μπορεί να ξεπερνά σε MW την ονομαστική ικανότητα της γεννήτριας για παραγωγή. Γι' αυτό το λόγο, στον αλγόριθμο που ακολουθεί γίνεται αναφορά και στην μέγιστη ωριαία ικανότητα των γεννητριών για παραγωγή (Daily Flows). [42]

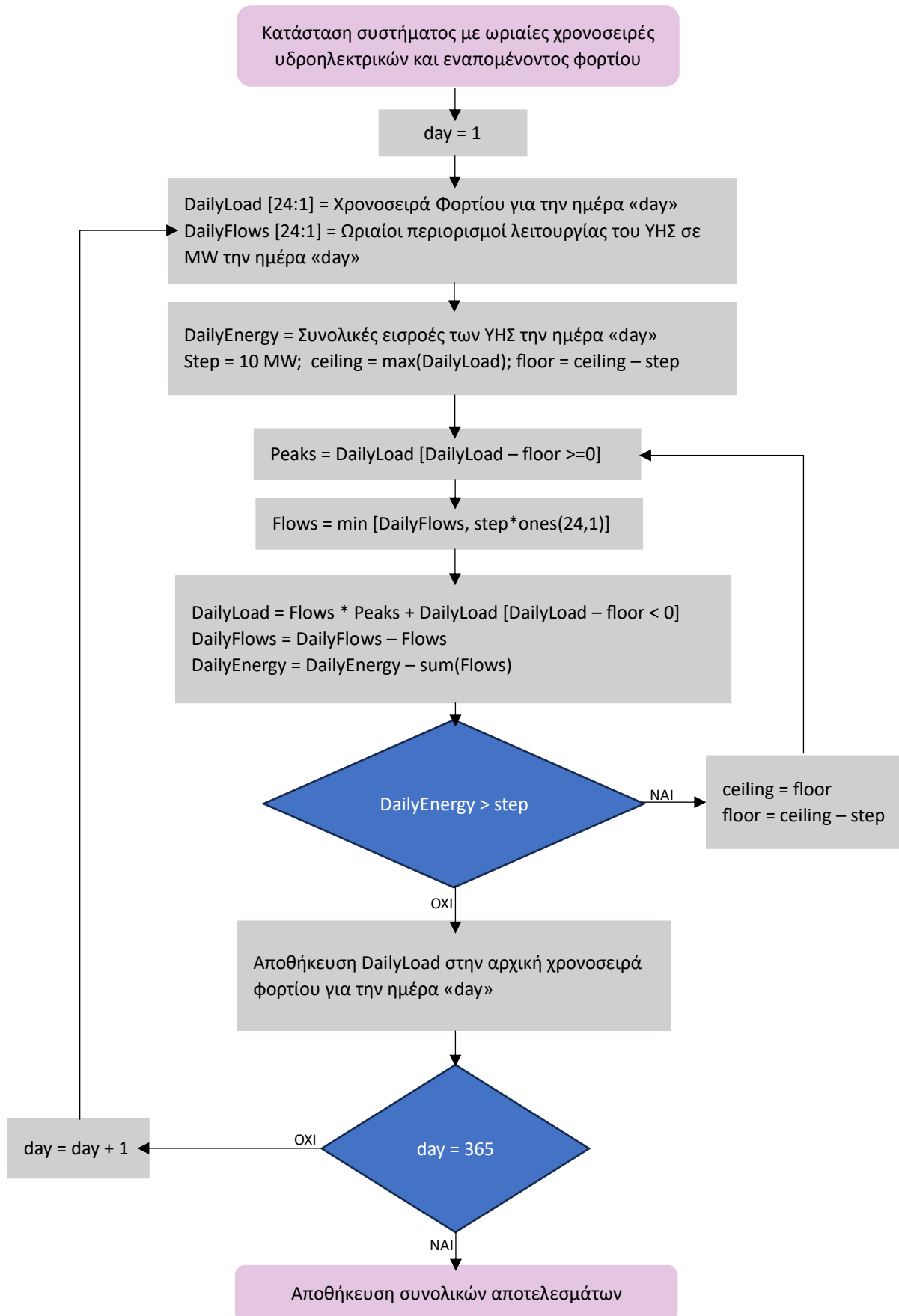
Στο Σχήμα 12 όπου απεικονίζεται η τυπική λειτουργία του αλγορίθμου Hydro Peak Shaving παρατηρείται πως έχουν εξομαλυνθεί όλες οι προηγούμενες αιχμές και το υπολειπόμενο φορτίο διακρίνεται από μικρότερη διακύμανση.

Σημειώνεται ότι οι συνθήκες υδραυλικότητας των Υδροηλεκτρικών Σταθμών αγνοούνται και θεωρείται πως η ενέργεια τους είναι διαθέσιμη ανά πάσα στιγμή σύμφωνα με τα στοιχεία που αντλήθηκαν.



Σχήμα 12: Αναπαράσταση λειτουργίας ΥΗΣ μέσω του «Peak Shaving»

## ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ HYDRO PEAK SHAVING

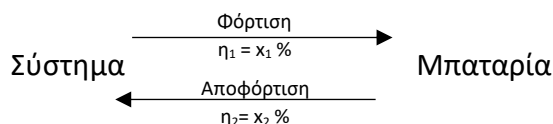


### 3.1.4 Ένταξη Αποθηκευτικών Σταθμών και Πολιτικές Ενσωμάτωσης

Στην παρούσα ενότητα γίνεται ανάλυση της διαδικασίας ένταξης των αποθηκευτικών σταθμών στο μοντέλο έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερο επίπεδο επάρκειας. Μία μονάδα αποθήκευσης αποτελείται από τα παρακάτω βασικά χαρακτηριστικά:

- την Ισχύ (P)
- την Ενέργεια (E)
- και τον Βαθμό Απόδοσης (N)

Η ισχύς (P) και η ενέργεια (E) αξιολογούνται από την πλευρά του συστήματος, δηλαδή στην έξοδο του αντιστροφέα ισχύος του κυκλώματος, και διαφέρουν από τα αντίστοιχα μεγέθη στο εσωτερικό του κυκλώματος. Ο βαθμός απόδοσης N (roundtrip efficiency) αποτελεί το μέτρο της αποδοτικότητας της μπαταρίας, κατά έναν πλήρη κύκλο λειτουργίας φόρτισης – αποφόρτισης της. Κατά τη διαδικασία της φόρτισης, όπου διοχετεύεται ενέργεια  $E_1$  από το σύστημα προς την μπαταρία, ορισμένη από αυτή μετατρέπεται σε θερμότητα. Έτσι, ένα μικρότερο μέρος της καταλήγει σαν χημική ενέργεια στην μπαταρία και αυτή φορτίζει. Το ποσοστό της ωφέλιμης ενέργειας που καταλήγει στην μονάδα έναντι της συνολικής ενέργειας που απορροφήθηκε από το σύστημα ορίζεται ως  $\eta_1$ . Το ίδιο ισχύει και για την αντίστροφη διαδικασία της αποφόρτισης και ο αντίστοιχος συντελεστής ορίζεται ως  $\eta_2$ .



Το γινόμενο των βαθμών απόδοσης  $\eta_1 \cdot \eta_2$  ορίζεται ως ο βαθμός απόδοσης ενός πλήρους κύκλου λειτουργίας δηλαδή  $N = \eta_1 \cdot \eta_2$  και θεωρώντας ότι  $\eta_1 \approx \eta_2 \approx \eta$  προκύπτει ότι  $N = \eta^2$ .

Καθώς παρατηρείται η συμπεριφορά των μονάδων από πλευράς συστήματος (δηλαδή στο ανάντι του κυκλώματος της μπαταρίας) είναι σημαντικό να γίνει αναγωγή της ροής ενέργειας στην ανάλογη πλευρά. Έτσι, όταν είναι γνωστό το επίπεδο φόρτισης μίας μπαταρίας (σε MWh) αλλά το ζητούμενο είναι η τελική ενέργεια που θα καταλήξει στο σύστημα κατά τη διαδικασία της αποφόρτισης της, τότε αυτή θα ισούται με  $E_{grid} = E_{BESS} \cdot \sqrt{N_{BESS}}$ .

Αντίστροφα, κατά τη διαδικασία της φόρτισης της μπαταρίας, η συνολική ενέργεια που θα απορροφηθεί από το σύστημα ισούται με  $E_{grid} = \frac{E_{BESS}}{\sqrt{N_{BESS}}}$ .

Τρία δευτερεύοντα χαρακτηριστικά που απορρέουν από τα βασικά και θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια είναι:

- Το Επίπεδο Φόρτισης (SoC)
- Οι Ώρες Λειτουργίας στην ονομαστική ισχύ (H)
- Η Μέγιστη Χωρητικότητα (Cap)

Όπου η ώρες λειτουργίας προκύπτουν από τον λόγο  $H = \frac{E}{P}$  και η μέγιστη χωρητικότητα από τον λόγο  $Cap = \frac{E}{\sqrt{N}}$ .

Βασικός στόχος είναι να καλυφθούν οι ανεπάρκειες που δεν μπόρεσαν να καλυφθούν σε προγενέστερο στάδιο και να καλυφθεί όσο δυνατόν περισσότερο φορτίο. Έτσι, δίνεται έμφαση στην ενέργεια που εναλλάσσεται με το σύστημα (φόρτιση – αποφόρτιση) χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οικονομικοί παράγοντες ή να θεωρείται γνωστή η μελλοντική κατάσταση του συστήματος βάσει των προβλέψεων (Perfect foresight). Ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται ακολουθεί μία «λαίμαργη» προσέγγιση (Greedy Method) καθώς η λειτουργία των μονάδων στο σύστημα γίνεται σε ωριαίο ορίζοντα. [43] [44] Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε κάθε ανταλλαγή ενέργειας να αξιοποιείται η μέγιστη δυνατή που μπορεί να διοχετευθεί είτε από το σύστημα προς την μπαταρία (φόρτιση) ή από την μπαταρία προς το σύστημα (αποφόρτιση).

Συνεπώς, μέσα από τα βασικά χαρακτηριστικά (P, E, N) μίας μονάδας αποθήκευσης, το επίπεδο φόρτισης της (SoC), καθώς και την κατάσταση του συστήματος (χρονοσειρές θερμικών μονάδων και εναπομένοντος φορτίου) προκύπτει η τελική συμπεριφορά της. Καθώς δεν θεωρείται γνωστός ο χρονικός ορίζοντας, ο συγκεκριμένος έλεγχος υφίσταται κάθε ώρα.

Συγκεκριμένα, εφόσον μία τυχαία ώρα  $n$ , η χρονοσειρά των θερμικών μονάδων ξεπερνά σε ισχύ την χρονοσειρά του φορτίου, η μονάδα αποθήκευσης (ESS) θα απορροφήσει ενέργεια από το σύστημα και θα την αποθηκεύσει για μελλοντική χρήση. Ωστόσο, λόγω ορισμένων περιορισμών λειτουργίας που αφορούν το σύστημα και τα χαρακτηριστικά του ESS, η ισχύς που θα απορροφήσει η μπαταρία πρέπει να ικανοποιεί την εξής συνθήκη:

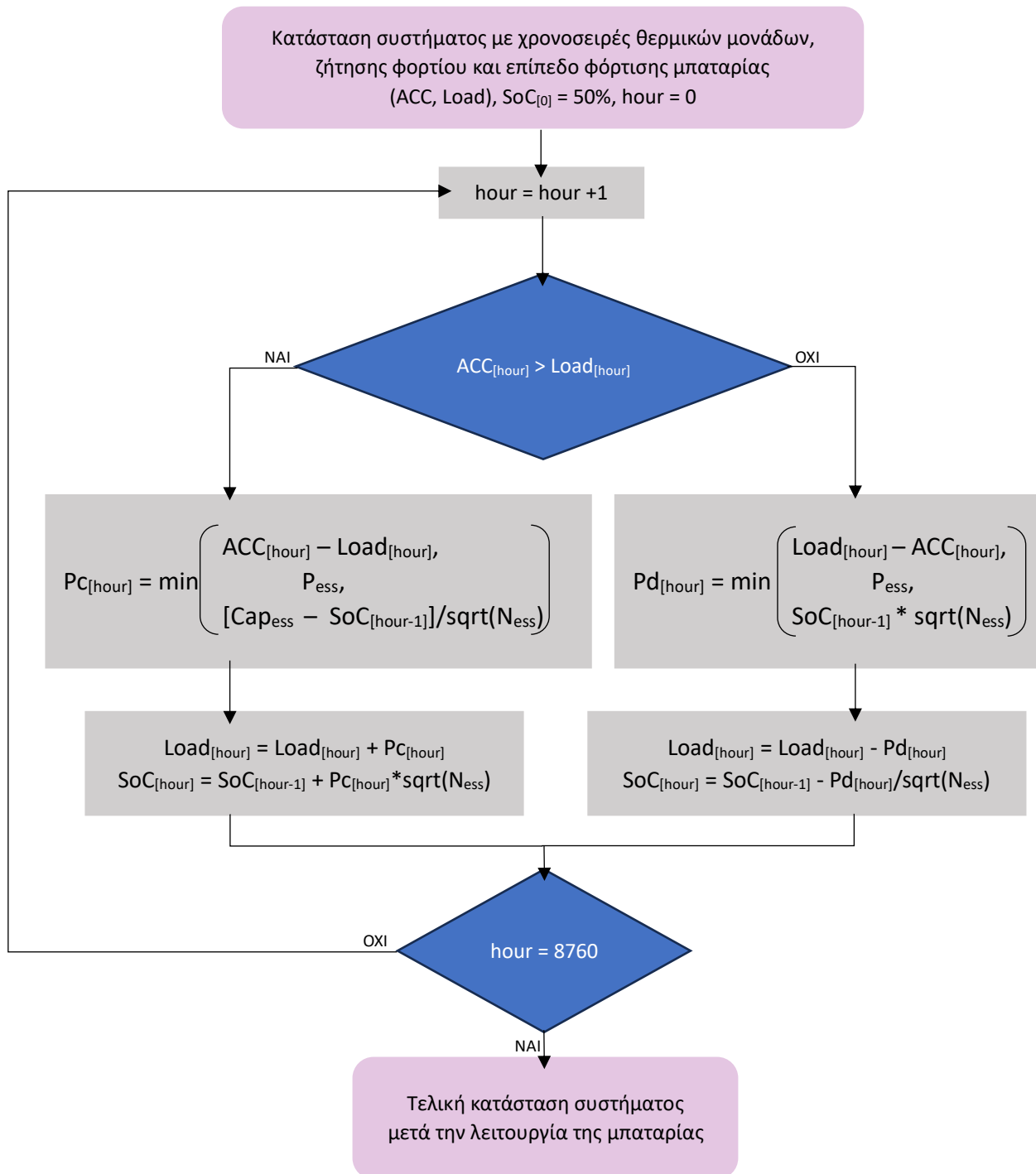
$$P_c = \min \left( ACC_{[n]} - Load_{[n]}, P_{ESS}, \frac{Cap_{ESS} - SoC_{[n-1]}}{\sqrt{N_{ESS}}} \right) \quad (3.16)$$

Αντίστοιχη συνθήκη πρέπει να ισχύει και για την διαδικασία της αποφόρτισης, δηλαδή όταν η χρονοσειρά του φορτίου, μία τυχαία ώρα  $n$ , είναι μεγαλύτερη σε ισχύ από τη χρονοσειρά των θερμικών μονάδων, και ορίζεται ως εξής:

$$P_d = \min (Load_{[n]} - ACC_{[n]}, P_{ESS}, \sqrt{N_{ESS}} \cdot SoC_{[n-1]}) \quad (3.17)$$

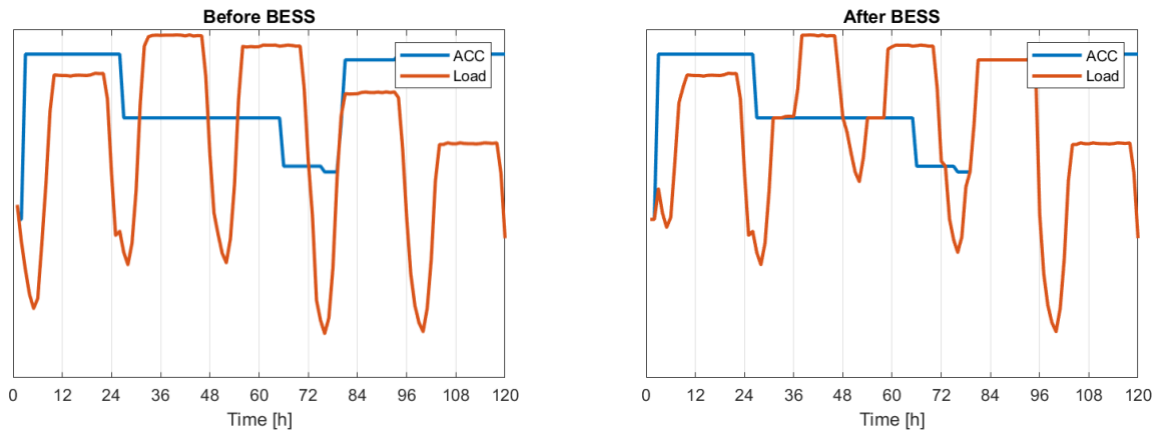
με τις μεταβλητές  $P_c$  και  $P_d$  να αποτελούν τις ισχύς που ρέουν από το σύστημα προς την μονάδα και από τη μονάδα προς το σύστημα, αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τον ευρωπαϊκό διαχειριστή το αρχικό επίπεδο του State of Charge μίας μονάδας αποθήκευσης θεωρείται ίσο με 50%.



Οι μονάδες αυτές μπορούν να ενσωματωθούν με το σύστημα σύμφωνα με δύο βασικές στρατηγικές: α) σειριακά ή β) παράλληλα. Συγκεκριμένα, σε ένα σύστημα που αποτελείται από πολλές μονάδες αποθήκευσης με διαφορετικά τα χαρακτηριστικά τους, τότε αυτές μπορεί να λειτουργήσουν είτε διαδοχικά, δηλαδή η μία μετά την άλλη, είτε ταυτόχρονα. Έστω  $M$  ο αριθμός των μπαταριών με διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς την ισχύ, την ενέργεια και τον βαθμό απόδοσης τους. Τότε, σύμφωνα με την στρατηγική διαδοχικής ενσωμάτωσης

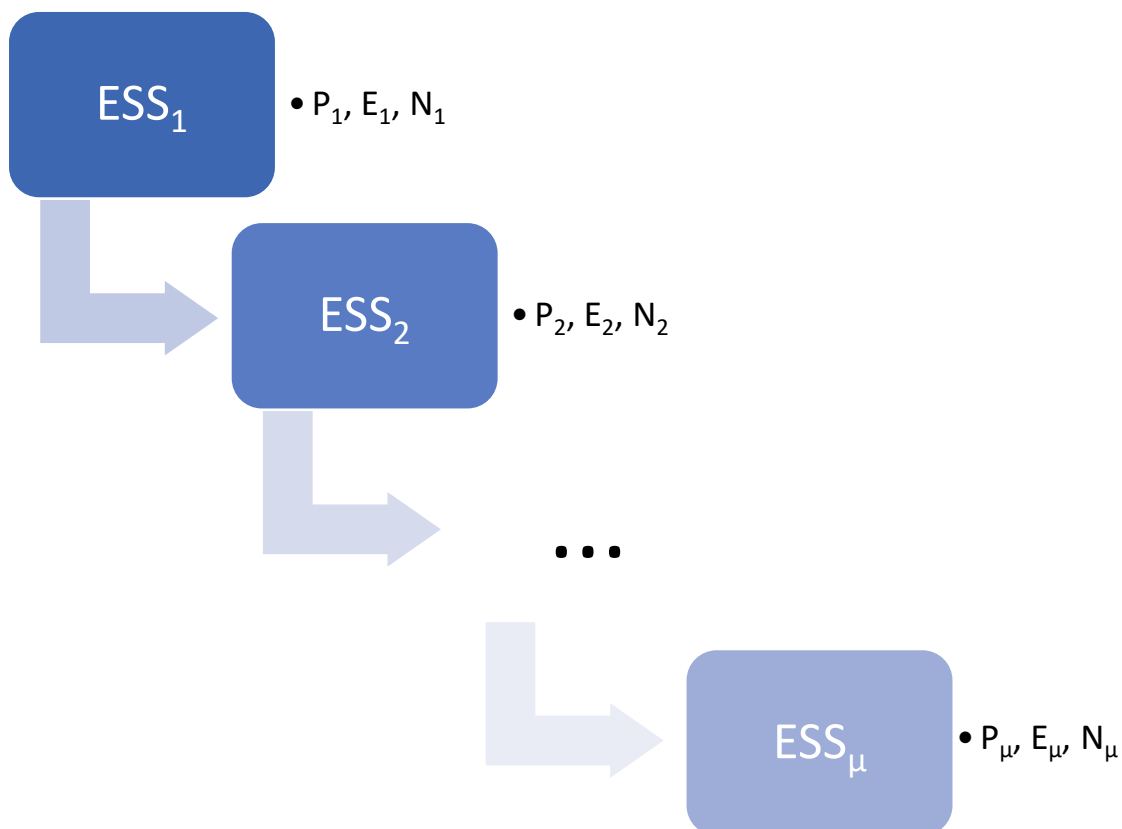
[Α] η κάθε μία από αυτές ενεργεί αυτόνομα με βάση την κατάσταση του συστήματος που την ώρα που επεμβαίνει σε αυτό και αγνοεί οποιαδήποτε άλλη μονάδα που μπορεί να προηγείται ή να έπεται αυτής. Αντίστοιχα, σύμφωνα με την στρατηγική της ταυτόχρονης λειτουργίας [Β], η κάθε μία μονάδα εξαρτάται από την κατάσταση της άλλης και επεμβαίνει στο σύστημα έχοντας πάντα υπόψη της την κατάσταση των υπολοίπων  $M - 1$  μονάδων.



Σχήμα 13: Αναπαράσταση λειτουργίας μονάδας αποθήκευσης. Σύγκριση χρονοσειρών διαθεσιμότητας θερμικών μονάδων και φορτίου (α) πριν την μπαταρία και (β) μετά.

## ΣΕΙΡΙΑΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ

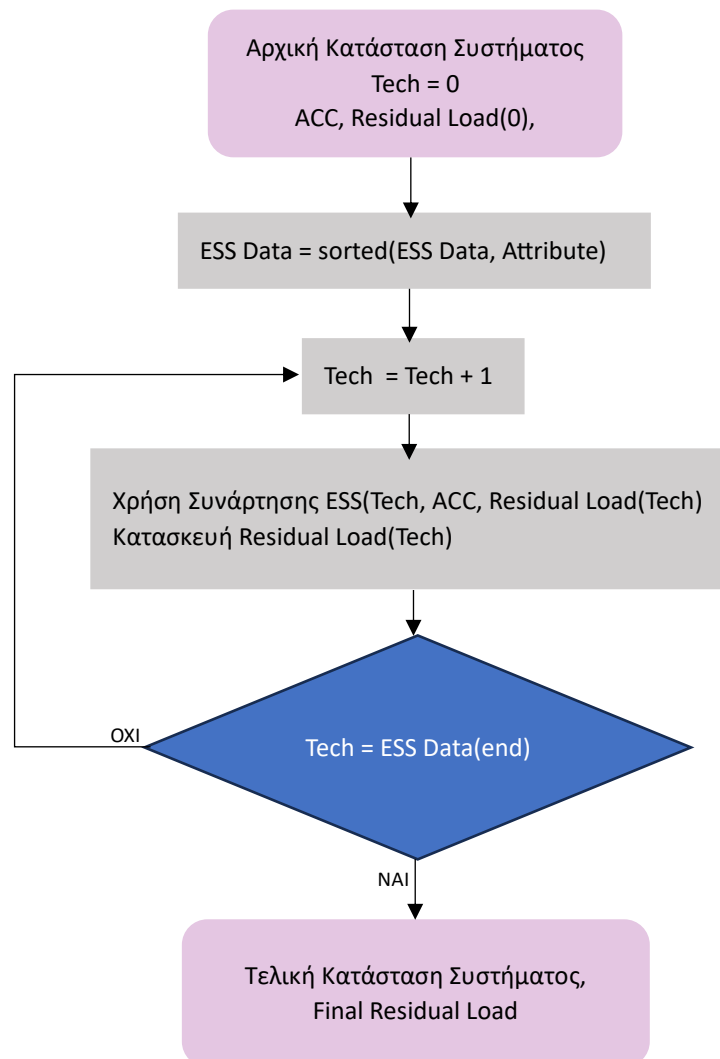
Έχει αναφερθεί ότι οι μονάδες αποθήκευσης ενσωματώνονται στο σύστημα διαδοχικά και χωρίς η μία να επηρεάζει τη λειτουργία των υπολοίπων. Ωστόσο, πρέπει να δοθεί συγκεκριμένη προτεραιότητα έτσι ώστε να είναι καθορισμένη η σειρά με την οποία θα λειτουργήσουν. Αυτή η προτεραιότητα καθορίζεται από τα βασικά χαρακτηριστικά τους που είναι: 1) η Ισχύς «P», 2) η Ενέργεια «E» και 3) ο Βαθμός Απόδοσης «N».



Έτσι, εφόσον δίνεται προτεραιότητα εισόδου στις μονάδες αποθήκευσης με βάση την ισχύ τους, τότε πρώτη θα λειτουργήσει η μονάδα με την μεγαλύτερη ισχύ, δεύτερη με την αμέσως επόμενη μεγαλύτερη κ.ο.κ. Όπως είναι προφανές, το ίδιο θα ισχύσει και αν η προτεραιότητα δοθεί με βάση κάποιο άλλο βασικό χαρακτηριστικό τους. Να σημειωθεί ότι σε περίπτωση που υπάρξουν δύο ή παραπάνω μονάδες με παρόμοια χαρακτηριστικά (πχ ίση ενέργεια ή ίδιος βαθμός απόδοσης) τότε ανάμεσα τους ο κανόνας προτεραιότητας θα ισχύσει για κάποιο άλλο βασικό χαρακτηριστικό τους. Για παράδειγμα, έστω ότι οι μονάδες εισέρχονται στο σύστημα με βάση την ενέργεια τους και δύο από αυτές έχουν την ίδια ενέργεια. Τότε θα δοθεί προτεραιότητα σε αυτή με τον καλύτερο βαθμό απόδοσης ενώ στην περίπτωση που έχουν και τον ίδιο βαθμό απόδοσης θα δοθεί προτεραιότητα σε αυτή με την μεγαλύτερη ισχύ κ.ο.κ..

Στη συνέχεια παρατίθεται ο αντίστοιχος αλγόριθμος που υλοποιήθηκε προκειμένου να εξυπηρετηθεί η παρούσα πολιτική.

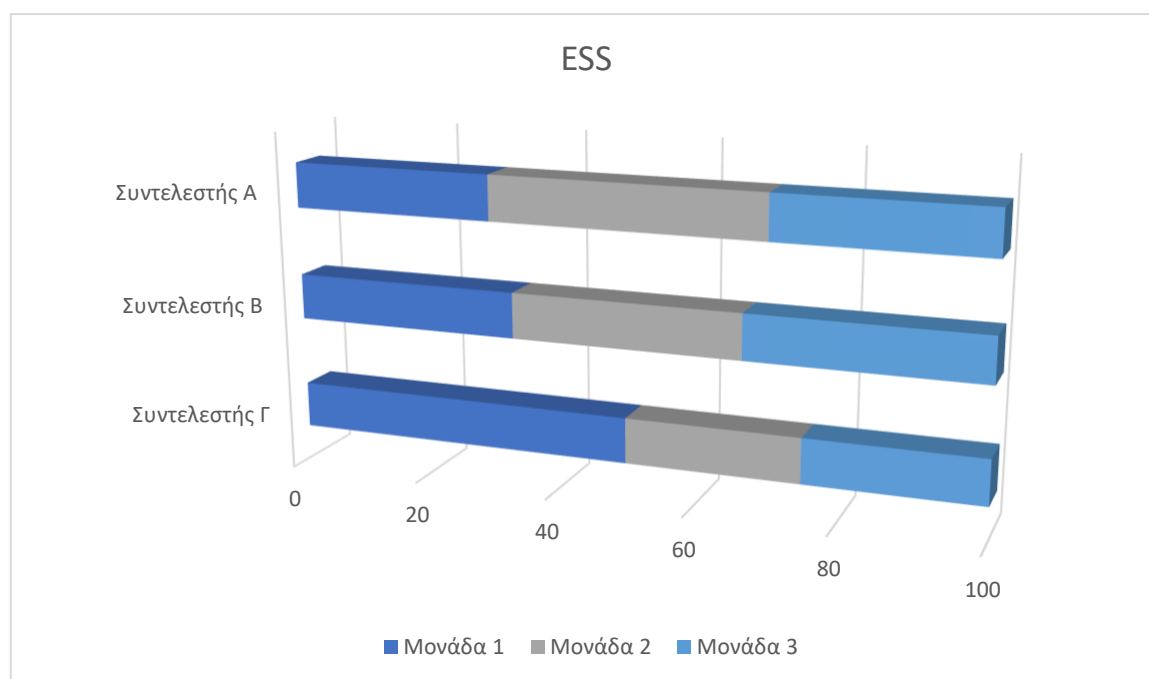
### ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ESS SERIES



## ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ

Από την άλλη, μία εναλλακτική πολιτική ενσωμάτωσης των μονάδων αποθήκευσης αποτελεί η ταυτόχρονη ενσωμάτωση τους στο σύστημα, επηρεάζοντας η μία την λειτουργία των υπολοίπων. Συγκεκριμένα, στην παρούσα πολιτική εφαρμόζεται αναλογική εισαγωγή των μονάδων με βάση κάποιο από τα βασικά τους χαρακτηριστικά: 1) την Ισχύ «P», 2) την Ενέργεια «E» και 3) τις ονομαστικές ώρες λειτουργίας της «H» (δηλαδή τον λόγο της ενέργειας προς την ισχύ της «E/P»). Έτσι, σε κάθε ανταλλαγή ενέργειας με το σύστημα, κάθε μονάδα είναι υπεύθυνη για το μερίδιο της ενέργειας που της αναλογεί. Για παράδειγμα, η ισχύς της κάθε μονάδας αποτελεί ένα ποσοστό της συνολικής ισχύος του συστήματος αποθήκευσης. Η εκάστοτε μονάδα θα κληθεί να διαχειριστεί το ίδιο ποσοστό ενέργειας, εφόσον η ισχύς έχει τεθεί ως κριτήριο αναλογικότητας. Οι μονάδες θα έχουν αντίστοιχη συμπεριφορά, θέτοντας ως κριτήριο οποιαδήποτε άλλο χαρακτηριστικό τους.

Καθώς ο βασικός στόχος της παρούσας μελέτης παραμένει η κάλυψη των ελλειμμάτων του συστήματος και η βελτίωση της επάρκειας του, είναι σημαντικό να τεθεί ένας κανόνας προκειμένου να δίνεται προτεραιότητα στην επάρκεια του συστήματος και έπειτα στην εφαρμογή του κριτηρίου της αναλογικότητας. Αυτός ο κανόνας προκύπτει μέσα από τον παρακάτω αλγόριθμο.



Σχήμα 14: Συντελεστές των μονάδων αποθήκευσης με βάση διαφορετικά κριτήρια λειτουργίας

## ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ESS PARALLEL



## 3.2 Υπολογισμός Capacity Value

### ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΕΠΑΡΚΕΙΑ ΙΣΧΥΟΣ

Σύμφωνα με τον ελληνικό Διαχειριστή του Συστήματος, αφαιρώντας από τη συνολική ζήτηση του φορτίου, την υπολογιζόμενη παραγωγή ΑΠΕ, προκύπτει το υπολειπόμενο φορτίο (Residual Load). Οι δείκτες αξιοπιστίας, που αποτελούν το βασικό κριτήριο αξιολόγησης της επάρκειας ισχύος του συστήματος παραγωγής, όπως η Αναμενόμενη Απώλεια Φορτίου (LOLE) και η Αναμενόμενη Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργεια (EUE), προσδιορίζονται σύμφωνα με την τροποποιημένη χρονοσειρά. Καθώς η καμπύλη ζήτησης του φορτίου μειώνεται, οι δείκτες αξιοπιστίας αναμένεται να βελτιωθούν. Πώς αξιολογείται, ωστόσο, η συνεισφορά των ΑΠΕ στην επάρκεια ισχύος του συστήματος παραγωγής;

### ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΑΡΚΕΙΑ ΙΣΧΥΟΣ

Η ανάπτυξη μεθοδολογίας που θα υπολογίζει τη συνεισφορά της αποθήκευσης ενέργειας στην επάρκεια του συστήματος παραγωγής αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα. Συγκεκριμένα, πρέπει να διερευνηθεί ο τρόπος που οι μονάδες αποθήκευσης επηρεάζουν τους βασικούς δείκτες αξιοπιστίας (LOLE και EENS), καθώς και να υπολογιστεί η αξία συνεισφοράς τους στην επάρκεια του συστήματος (Capacity Value) [45]. Η σύγκριση των πολιτικών ενσωμάτωσης των μονάδων αποθήκευσης είναι καταλυτική, προκειμένου να κατανοηθεί πλήρως η αξία των μονάδων που προσδίδουν στο σύστημα παραγωγής και να οριστεί η βέλτιστη στρατηγική που θα πρέπει να εφαρμοστεί.

### ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Όπως έχει ήδη τονιστεί στην αρχή της παρούσας εργασίας, μπορεί ο βασικός πυλώνας της μελέτης να είναι η επάρκεια του συστήματος, ωστόσο, ο συνολικός μετασχηματισμός του συστήματος από την σημερινή του κατάσταση στην αντίστοιχη του έτους 2030 γίνεται με γνώμονα την απανθρακοποίηση και την ενεργειακή ανεξαρτησία. Συνεπώς, κρίνεται ύψιστης σημασίας οι αλλαγές που πραγματοποιούνται σε επίπεδο θερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και η προσθήκη επιπλέον ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μονάδων αποθήκευσης να μπορούν να αξιολογηθούν μέσω κατάλληλων δεικτών. Οι δείκτες αξιολόγησης των μονάδων (Capacity Value) ποικίλλουν [46] και σχετίζονται με τον σκοπό της εκάστοτε μελέτης. Η παρούσα ανάλυση επικεντρώνεται σε δύο βασικούς δείκτες αξιολόγησης του Capacity Value:

- Equivalent Firm Capacity και
- Effective Load Carrying Capability.

Οι δείκτες EFC και ELCC αποτελούν τους πιο σημαντικούς καθώς επικεντρώνονται σε δύο πολύ βασικά στοιχεία, την ικανότητα του συστήματος για απανθρακοποίηση (ο όρος EFC συνεπάγεται αντικατάσταση θερμικών μονάδων παραγωγής) και εξυπηρέτηση επιπλέον φορτίου αντίστοιχα, διατηρώντας το ίδιο επίπεδο επάρκειας στο σύστημα.

Τα αποτελέσματα για το Capacity Value των ανανεώσιμων πηγών μέσω των μεθόδων Equivalent Firm Capacity (EFC) και Effective Load Carrying Capability (ELCC) μπορούν να είναι

διαφορετικά λόγω των διαφορετικών τρόπων με τους οποίους οι δύο μέθοδοι προσεγγίζουν και αξιολογούν την ικανότητα συνεισφοράς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην επάρκεια ισχύος του συστήματος.

Το EFC υπολογίζει την ποσότητα της σταθερής (Firm) ικανότητας που μπορεί να αντικατασταθεί από μία ανανεώσιμη πηγή χωρίς να αλλάξει η επάρκεια του συστήματος. Εκτιμά τη σταθερή ικανότητα που μπορεί να αφαιρεθεί από το σύστημα και να αντικατασταθεί από την ανανεώσιμη πηγή, διατηρώντας την ίδια αξιοπιστία του συστήματος. Η EFC βασίζεται στη στοχαστική αξιολόγηση της διαθεσιμότητας της ανανεώσιμης πηγής και την πιθανότητα να καλύψει τα φορτία ενώ εξαρτάται από την κατανομή των φορτίων, την αξιοπιστία του υπάρχοντος σταθμού παραγωγής, καθώς και τη μεταβλητότητα και τη στοχαστικότητα της παραγωγής της ανανεώσιμης πηγής.

Το ELCC μετρά την επιπλέον ζήτηση φορτίου που μπορεί να καλυφθεί από την προσθήκη της ανανεώσιμης πηγής χωρίς να αυξάνεται το επίπεδο κινδύνου του συστήματος. Αξιολογεί την ικανότητα της ανανεώσιμης πηγής να προσθέσει επιπλέον φορτίο στο σύστημα διατηρώντας το ίδιο επίπεδο αξιοπιστίας. Μέσα από το συγκεκριμένο δείκτη εξετάζεται η επιπλέον ζήτηση που μπορεί να καλυφθεί με τη συνεισφορά της ανανεώσιμης πηγής, ενώ παράλληλα λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα διαθεσιμότητας της ανανεώσιμης πηγής, η καμπύλη φορτίου του συστήματος και η ικανότητα της ανανεώσιμης πηγής να ανταποκριθεί σε περιόδους αιχμής. [21,24]

Συγκριτικά, η EFC συγκρίνει την ανανεώσιμη πηγή με μια σταθερή ικανότητα, ενώ η ELCC συγκρίνει τη συνεισφορά της ανανεώσιμης πηγής με την επιπλέον ζήτηση που μπορεί να καλυφθεί. Γι' αυτό, η EFC μπορεί να είναι πιο ευαίσθητη στις μεταβολές και τη στοχαστικότητα της ανανεώσιμης πηγής, ενώ η ELCC αξιολογεί την συνολική δυνατότητα κάλυψης επιπλέον φορτίου. Επιπλέον, η EFC και η ELCC συνήθως καταλήγουν σε διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με το προφίλ φορτίου και τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Η μία μέθοδος μπορεί να δείχνει υψηλότερη ή χαμηλότερη αξία ανάλογα με το πώς το σύστημα αντιδρά στην προσθήκη ή την αντικατάσταση του φορτίου.

Ωστόσο, η διαφορά στα αποτελέσματα μεταξύ των δύο μεθόδων προκύπτει από τις διαφορετικές παραδοχές, τους παράγοντες και τις συνθήκες που λαμβάνονται υπόψη για την αξιολόγηση της συμβολής των ανανεώσιμων πηγών. Είναι σημαντικό να κατανοηθούν αυτές οι διαφορές και να γίνει επιλογή της μεθόδου που είναι πιο κατάλληλη για τον συγκεκριμένο σκοπό της μελέτης. Επίσης, η συνδυαστική χρήση των δύο μεθόδων μπορεί να παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της απόδοσης και της αξιοπιστίας των ανανεώσιμων πηγών στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε περαιτέρω ανάλυση, η διαφορά στα αποτελέσματα που μπορεί να προκύψουν από τον υπολογισμό του Capacity Value με βάση το EENS (Expected Energy Not Supplied) και το LOLE (Loss of Load Expectation) οφείλεται στη φύση των δύο δεικτών αξιοπιστίας και στον τρόπο που αξιολογούν την επάρκεια του συστήματος.

Το EENS μετρά την αναμενόμενη ποσότητα ενέργειας που δεν μπορεί να καλυφθεί από το σύστημα λόγω έλλειψης παραγωγικής ικανότητας. Δηλαδή, εκφράζει την ενεργειακή

ανεπάρκεια του συστήματος κατά τη διάρκεια των περιόδων όπου υπάρχει ανεπαρκής ισχύς για να καλύψει τη ζήτηση. Όταν χρησιμοποιείται το EENS για τον υπολογισμό του CV, το μοντέλο εστιάζει στο σύνολο της ενέργειας που δεν έχει καλυφθεί, κάτι που μπορεί να επηρεάζεται περισσότερο από τις παρατεταμένες περιόδους έλλειψης ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι οι ΑΠΕ μπορεί να εμφανίζονται ως λιγότερο αξιόπιστες, ειδικά αν δεν μπορούν να συνεισφέρουν ικανοποιητικά σε μεγάλες χρονικές περιόδους όπου το σύστημα έχει αυξημένες ανάγκες.

Το LOLE, από την άλλη, μετρά τον αναμενόμενο αριθμό ωρών ανά έτος κατά τις οποίες το σύστημα δεν θα είναι σε θέση να καλύψει τη ζήτηση. Εστιάζει κυρίως στις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες το φορτίο υπερβαίνει τη διαθέσιμη παραγωγή. Όταν υπολογίζεται το CV με βάση το LOLE, το σύστημα αποδίδει μεγαλύτερη αξία στις χρονικές στιγμές όπου οι ΑΠΕ μπορούν να βοηθήσουν να αποφευχθεί η απώλεια φορτίου, ακόμα κι αν η συνολική ποσότητα ενέργειας που παρέχεται είναι μικρή. Επομένως, το LOLE μπορεί να δείχνει μεγαλύτερη συμβολή από τις ΑΠΕ, επειδή αυτές μπορούν να μειώσουν σημαντικά τον αριθμό των περιόδων όπου υπάρχει κίνδυνος απώλειας φορτίου, ακόμα κι αν δεν εξαλείφουν πλήρως την ενεργειακή ανεπάρκεια.

### 3.2.1 Equivalent Firm Capacity

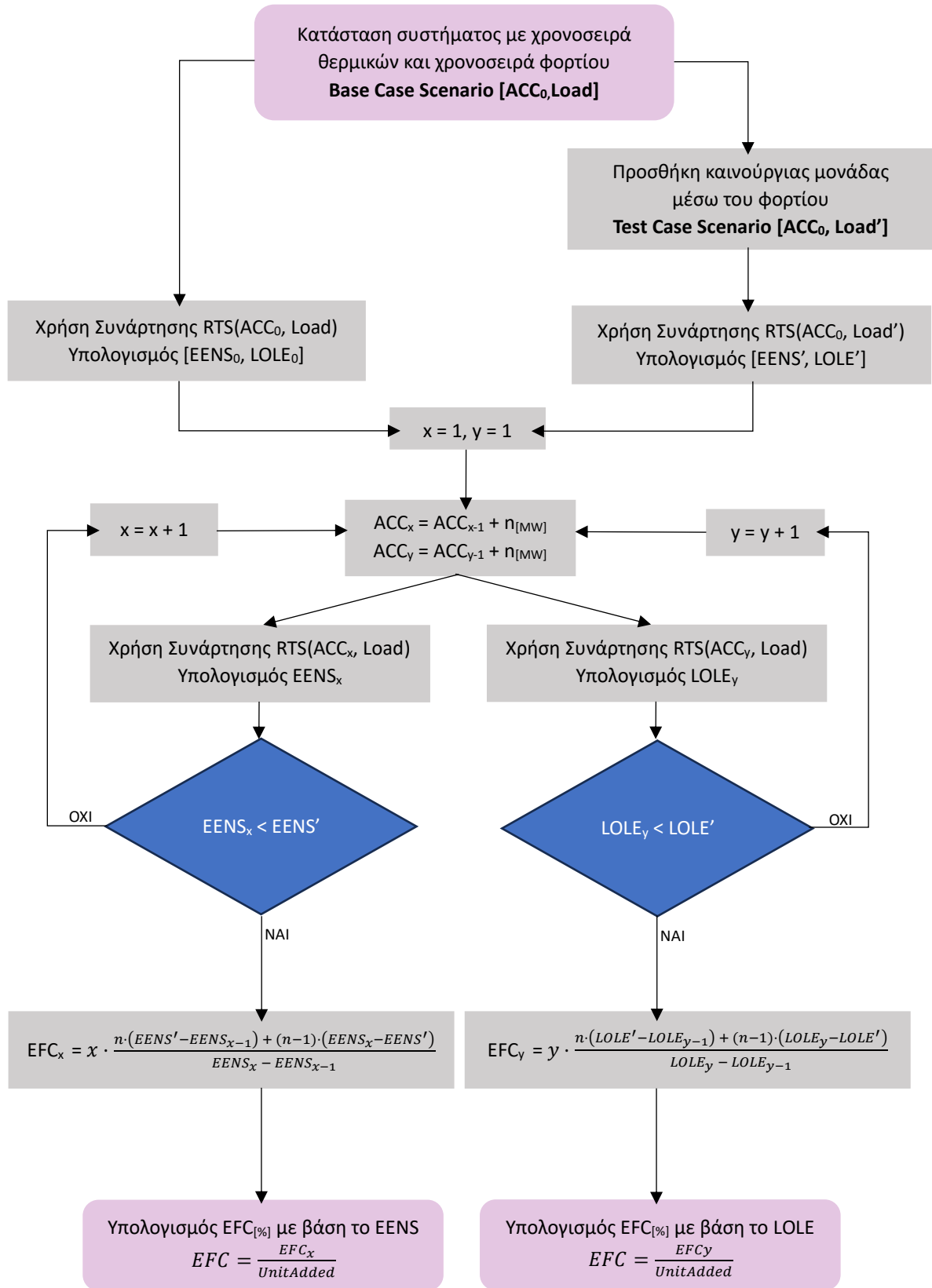
Η Equivalent Firm Capacity (ή η ισοδύναμη χωρητικότητα συμβατικής μονάδας) και εφεξής **EFC**, επρόκειτο για έναν δείκτη αξιολόγησης της επί τοις εκατό (%) αντιστοιχίας μίας τυχαίας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας απέναντι σε μία «τέλεια» συμβατική μονάδα παραγωγής. Η «τέλεια» συμβατική μονάδα παραγωγής αναφέρεται σε ένα μη πραγματικό στοιχείο και είναι μία θερμική μονάδα που δεν παρουσιάζει βλάβες ή διακοπές, δηλαδή λειτουργεί συνεχόμενα και επ' αορίστου στην ονομαστική της ισχύ εξόδου. Η απαιτούμενη οριζόντια αύξηση στη χρονοσειρά των θερμικών μονάδων που θα επιφέρει το ίδιο επίπεδο επάρκειας του συστήματος με το αντίστοιχο της πραγματικής μονάδας που προστέθηκε ορίζεται ως EFC. Η σύγκριση γίνεται μέσω των δεικτών του EENS και του LOLE. Αναλυτικότερα, ακολουθεί ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε μέσω της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB.

Ο αλγόριθμος υλοποιήθηκε μέσα από τα εξής:

- 1) Δεδομένα συστήματος:
  - a. Χρονοσειρά Διαθεσιμότητας Θερμικών Μονάδων **[ACC]**
  - b. Χρονοσειρά Ζήτησης Φορτίου **[Load]**
- 2) Κατάσταση συστήματος πριν την προσθήκη της εξεταζόμενης μονάδας και υπολογισμός των δεικτών επάρκειας EENS και LOLE. **[Base Case Scenario]**
- 3) Κατάσταση συστήματος μετά την προσθήκη ΑΠΕ ή αποθηκευτικής μονάδας και υπολογισμός των νέων δεικτών επάρκειας EENS και LOLE. **[Test Case Scenario]**
- 4) Ισχύς μονάδας που προστέθηκε στο σύστημα. **[Power Added]**

Έχοντας ως σημείο αφετηρίας το Base Case και ως σημείο τερματισμού το Test Case η χρονοσειρά των συμβατικών μονάδων παραγωγής αυξάνεται βηματικά (το βήμα είναι 2-3 τάξεις μεγέθους μικρότερο από τα δεδομένα του συστήματος για μεγαλύτερη ακρίβεια). Ύστερα από κάθε οριζόντια αύξηση της χρονοσειράς πραγματοποιείται εκ νέου υπολογισμός των δεικτών επάρκειας του συστήματος. Καθώς η ικανότητα κάλυψης του φορτίου από θερμικές μονάδες αυξάνεται, αυξάνεται και το επίπεδο επάρκειας του συστήματος και συνεπώς οι αντίστοιχοι δείκτες μειώνονται. Όμως, οι δείκτες EENS και LOLE αποτελούν δύο διαφορετικά μετρικά μεγέθη. Γι' αυτό το λόγο ο αλγόριθμος στη συνέχεια διχοτομήθηκε ανάμεσα στα αποτελέσματα που αφορούν τον δείκτη EENS και στα αντίστοιχα με βάση το LOLE. Ενώ η διαδικασία συνεχίζεται παράλληλα, η βηματική οριζόντια αύξηση στη χρονοσειρά των θερμικών μονάδων επαναλαμβάνεται μέχρις ότου το σύστημα να καταλήξει οριακά στην κατάσταση Test Case (δείκτες επάρκειας ίσοι ή μικρότεροι από τους αντίστοιχους του Test Case). Έστω, λοιπόν, ότι απαιτήθηκαν 'n' επαναλήψεις προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς η βηματική αύξηση της χρονοσειράς γίνεται με προσθήκη ακέραιου αριθμού, πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στην επανάληψη 'n-1' και την 'n' με βάση τον ανάλογο δείκτη στην κατάσταση Test Case. Η ποσότητα που υπολογίστηκε (σε MW), προκειμένου από το Base Case το σύστημα να καταλήξει στο Test Case, διαιρείται με την ισχύ της μονάδας που εξετάζεται και προκύπτει το επί τοις εκατό [%] Capacity Value σε όρους EFC.

## ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ EFC CALCULATOR



Όπου «n» η ποσότητα σε MW που προστέθηκε σε κάθε βήμα στην χρονοσειρά των θερμικών μονάδων, ενώ με δείκτη «x» ή «y» συμβολίζονται οι μεταβλητές που αφορούν το EENS ή το LOLE αντίστοιχα.

### 3.2.2 Effective Load Carrying Capability

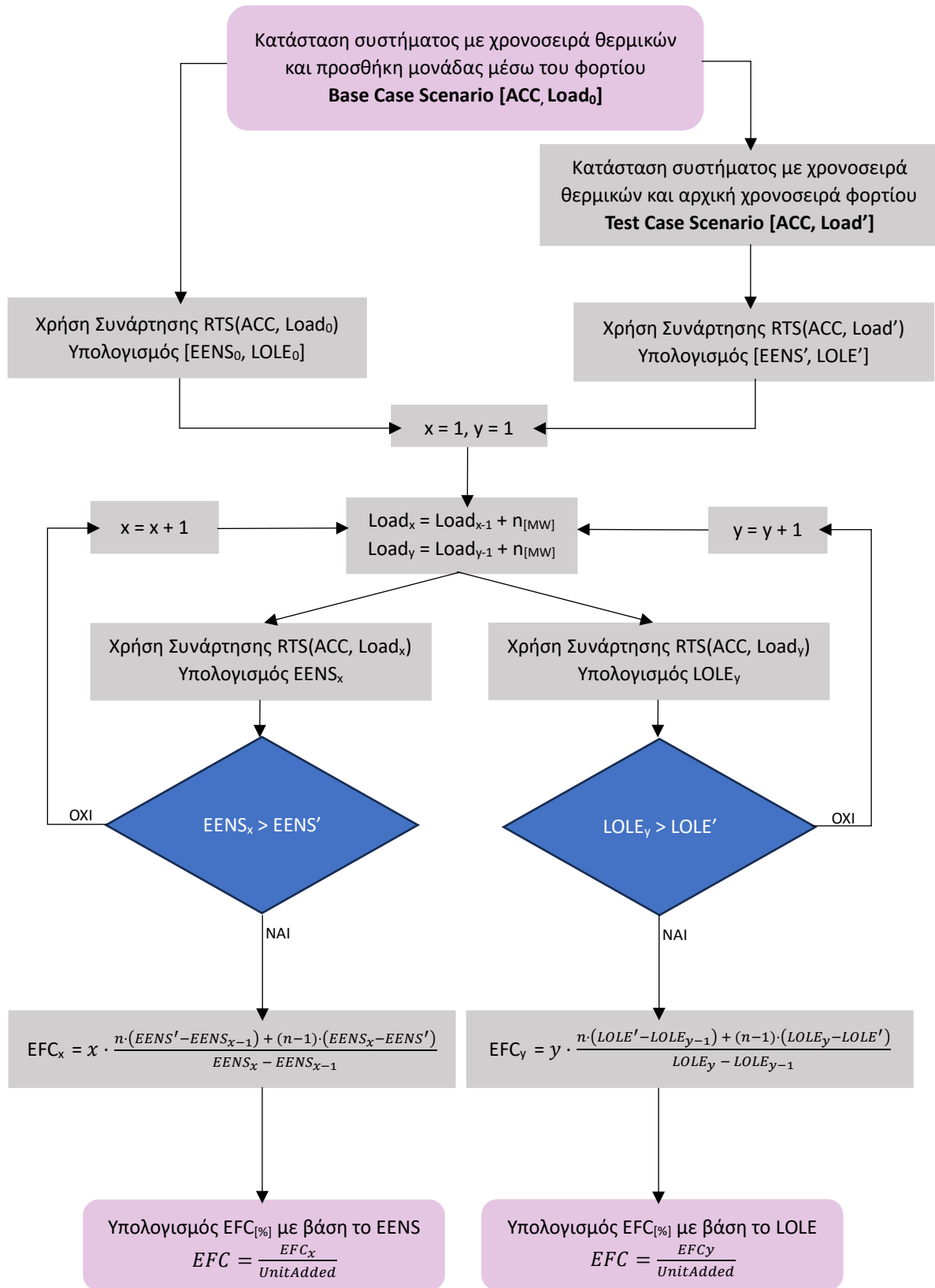
Η Effective Load Carrying Capability (ή η ικανότητα εξυπηρέτησης επιπλέον φορτίου) και εφεξής **ELCC**, επρόκειτο για έναν δείκτη αξιολόγησης της επί τοις εκατό (%) αντιστοιχίας μίας τυχαίας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, απέναντι στην επιπλέον ενέργεια που μπορεί να καλύψει, διατηρώντας ωστόσο, το ίδιο επίπεδο επάρκειας στο σύστημα. Συγκεκριμένα, όταν γίνεται προσθήκη μίας μονάδας, τότε το επίπεδο επάρκειας του συστήματος αυξάνεται. Η απαιτούμενη οριζόντια αύξηση στη χρονοσειρά του φορτίου που θα επαναφέρει την επάρκεια του συστήματος στην κατάσταση που βρισκόταν πριν την προσθήκη της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται ως ELCC. Η σύγκριση γίνεται μέσω και των δύο δεικτών του EENS και του LOLE. Αναλυτικότερα, ακολουθεί ο αλγόριθμος υλοποιηθεί μέσω της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB.

Ο αλγόριθμος υλοποιήθηκε μέσα από τα εξής:

- 1) Δεδομένα συστήματος:
  - a. Χρονοσειρά Διαθεσιμότητας Θερμικών Μονάδων **[ACC]**
  - b. Χρονοσειρά Ζήτησης Φορτίου **[Load]**
- 2) Κατάσταση συστήματος πριν την προσθήκη της εξεταζόμενης μονάδας και υπολογισμός των δεικτών επάρκειας EENS και LOLE **[Test Case Scenario]**
- 3) Κατάσταση συστήματος μετά την προσθήκη ΑΠΕ ή αποθηκευτικής μονάδας και υπολογισμός των νέων δεικτών επάρκειας EENS και LOLE. **[Base Case Scenario]**
- 4) Ισχύς μονάδας που προστέθηκε στο σύστημα. **[Power Added]**

Έχοντας ως σημείο αφετηρίας το Base Case και ως σημείο τερματισμού το Test Case η χρονοσειρά του φορτίου Load αυξάνεται βηματικά (το βήμα είναι 2-3 τάξεις μεγέθους μικρότερο από τα δεδομένα του συστήματος για μεγαλύτερη ακρίβεια). Ύστερα από κάθε οριζόντια αύξηση της χρονοσειράς πραγματοποιείται εκ νέου υπολογισμός των δεικτών επάρκειας του συστήματος. Καθώς η ικανότητα κάλυψης του φορτίου από θερμικές μονάδες μειώθηκε, μειώθηκε και το επίπεδο επάρκειας του συστήματος και συνεπώς οι αντίστοιχοι δείκτες αυξήθηκαν. Όμως, οι δείκτες EENS και LOLE αποτελούν δύο διαφορετικά μετρικά μεγέθη και ο αλγόριθμος διχοτομείται ανάμεσα στα αποτελέσματα που αφορούν των δεικτών EENS και σε αυτά που αφορούν το LOLE, ακολουθώντας τη συμπεριφορά του αλγορίθμου υπολογισμού του EFC. Έτσι, ενώ η διαδικασία συνεχίζεται παράλληλα, η βηματική οριζόντια αύξηση στη χρονοσειρά της ζήτησης επαναλαμβάνεται μέχρις ότου το σύστημα να καταλήξει οριακά στην κατάσταση Test Case (δείκτες επάρκειας ίσοι ή μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους του Test Case). Έστω, λοιπόν, ότι απαιτήθηκαν 'n' επαναλήψεις προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς η βηματική αύξηση της χρονοσειράς γίνεται με προσθήκη ακέραιου αριθμού, πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στην επανάληψη 'n-1' και την 'n' με βάση τον ανάλογο δείκτη στην κατάσταση Test Case. Η ποσότητα που υπολογίστηκε (σε MW), προκειμένου από το Base Case το σύστημα να καταλήξει στο Test Case, διαιρείται με την ισχύ της μονάδας που εξετάζεται και προκύπτει το επί τοις εκατό [%] Capacity Value σε όρους ELCC.

## ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ELCC CALCULATOR



Όπου «n» η ποσότητα σε MW που προστέθηκε σε κάθε βήμα στην χρονοσειρά των θερμικών μονάδων, ενώ με δείκτη «x» ή «y» συμβολίζονται οι μεταβλητές που αφορούν το EENS ή το LOLE αντίστοιχα.

## 4 Δεδομένα Εισόδου

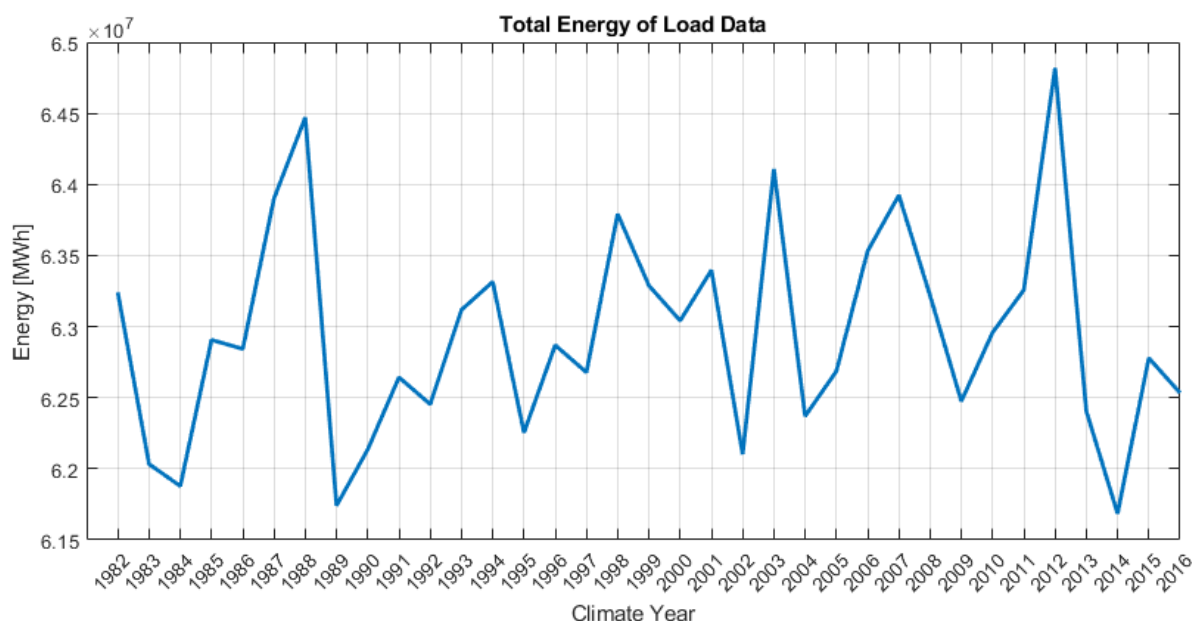
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος. Συγκεκριμένα αυτά αποτελούνται από:

- Ζήτηση Φορτίου
- Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
- Υδροηλεκτρικά Συστήματα Παραγωγής
- Θερμικές Μονάδες Παραγωγής
- Μονάδες Αποθήκευσης

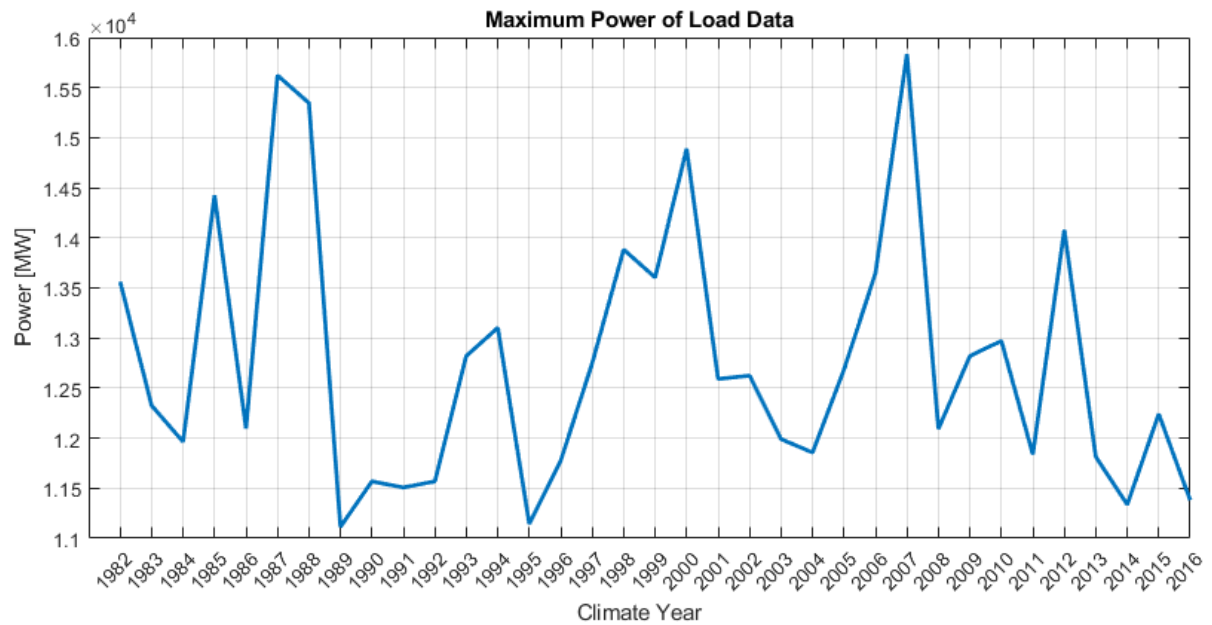
Τα δεδομένα εισόδου της ανάλυσης προέρχονται από τη βάση δεδομένων του ENTSO-e και αντιστοιχούν στα δημοσίως διαθέσιμα δεδομένα της μελέτης ERAA 2022 [42]. Αξιοποιούνται οι χρονοσειρές της ζήτησης του φορτίου, της παραγωγής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και των υδροηλεκτρικών σταθμών που αφορούν την περιοχή της ηπειρωτικής Ελλάδας [GR00] για τα 35 κλιματικά έτη που διατίθενται (από το 1982 έως και το 2016). Στη συνέχεια, παρατίθενται κάποια βασικά χαρακτηριστικά των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν.

### 4.1 Ζήτηση Φορτίου

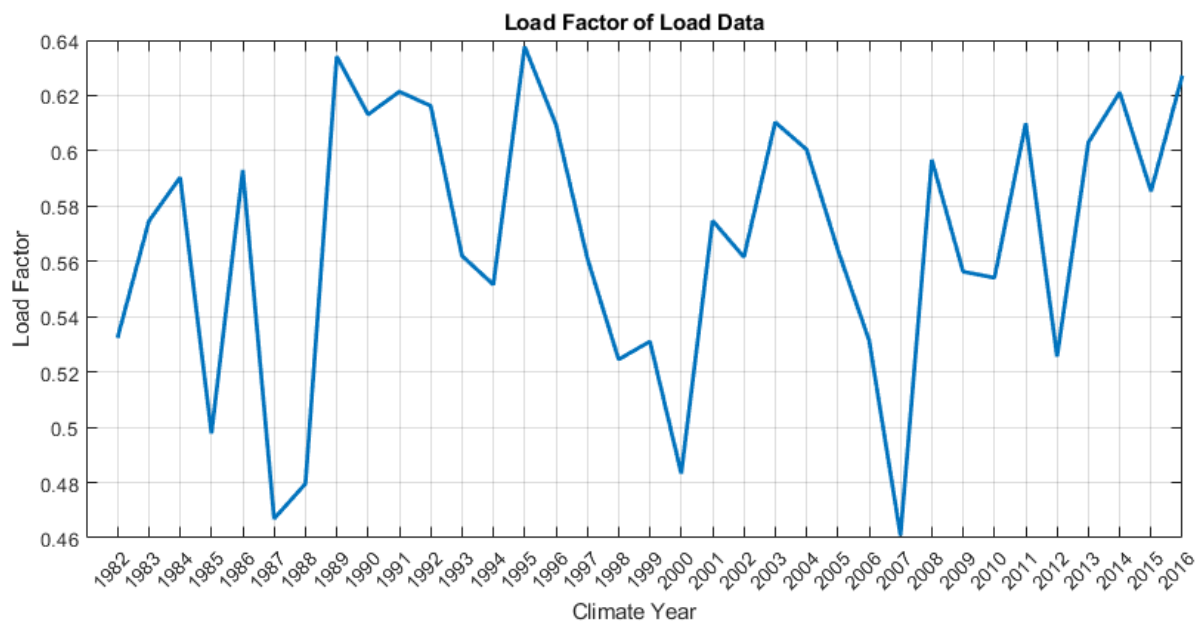
Παρακάτω απεικονίζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των χρονοσειρών της ζήτησης του φορτίου, για κάθε κλιματικό έτος. Στο Σχήμα 15 παρουσιάζεται η συνολική ετήσια ενέργεια των 35 χρονοσειρών της ζήτησης του φορτίου, στο Σχήμα 16 οι μέγιστες αιχμές του κάθε κλιματικού έτους ενώ στο Σχήμα 17 οι συντελεστές φορτίου της κάθε χρονοσειράς.



Σχήμα 15: Συνολική ενέργεια σε ετήσια βάση των 35 χρονοσειρών της ζήτησης του φορτίου.



Σχήμα 16: Ετήσιες αιχμές των 35 χρονοσειρών της ζήτησης του φορτίου



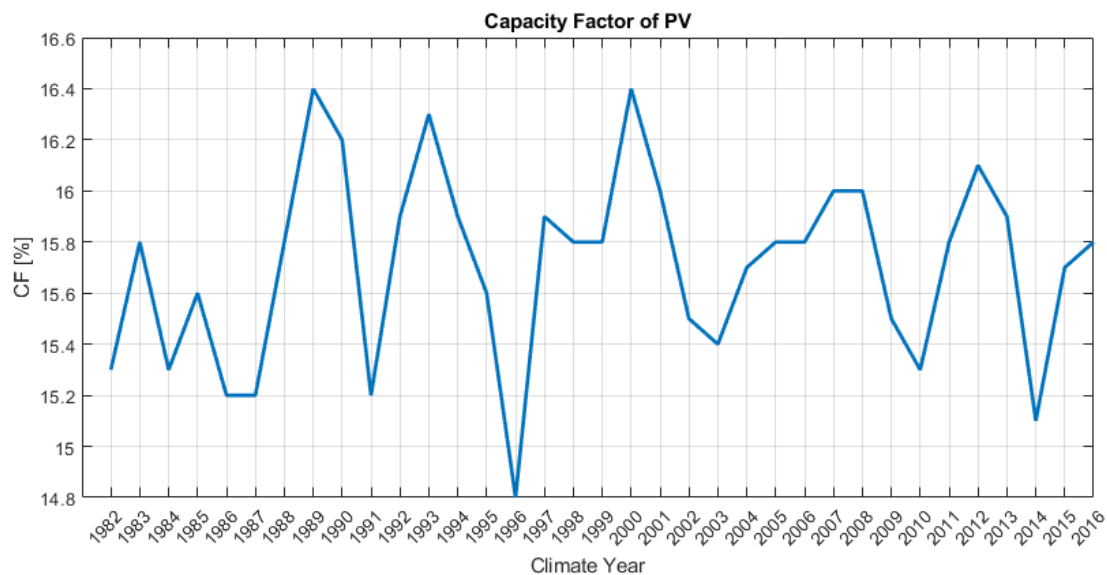
Σχήμα 17: Συντελεστής φορτίου των 35 χρονοσειρών της ζήτησης του φορτίου

## 4.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

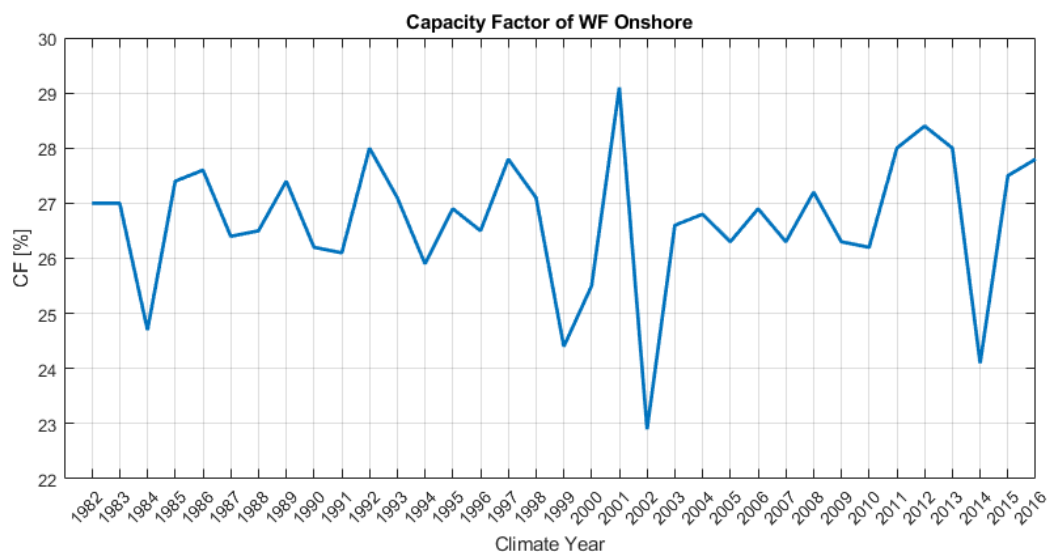
Το μείγμα των ΑΠΕ που προβλέπεται να έχει τεθεί σε λειτουργία το 2030 είναι:

| Τεχνολογία                   | Ισχύς [MW] |
|------------------------------|------------|
| [ΦΒ] Φωτοβολταϊκά Πάρκα      | 13400      |
| [ΑΠ] Χερσαία Αιολικά Πάρκα   | 7600       |
| [ΑΠ] Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα | 1900       |

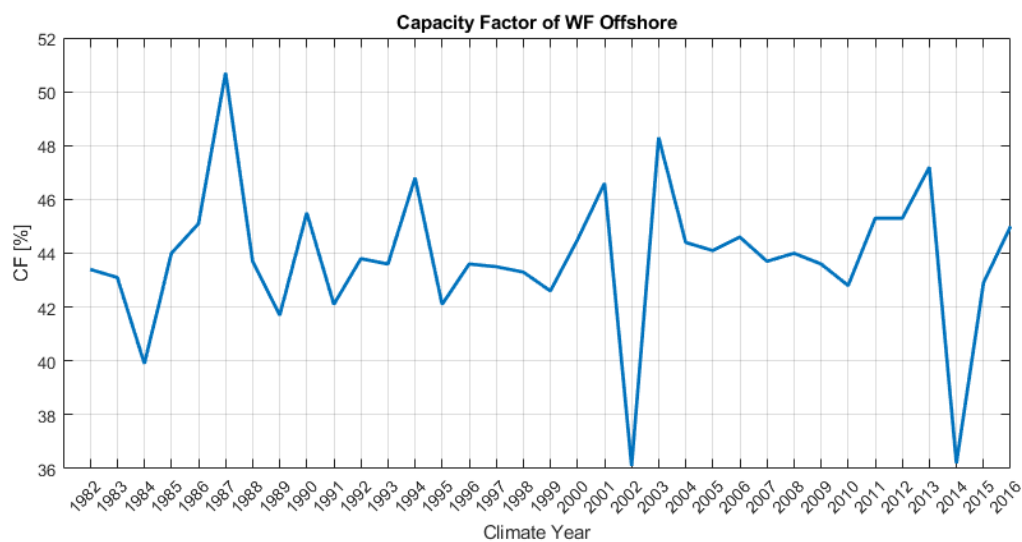
Πίνακας 1: Στοιχεία ΑΠΕ για το 2030



Σχήμα 18: Capacity Factor των ΦΒ ανά τα 35 κλιματικά έτη



Σχήμα 19: Capacity Factor των χερσαίων ΑΠ ανά τα 35 κλιματικά έτη



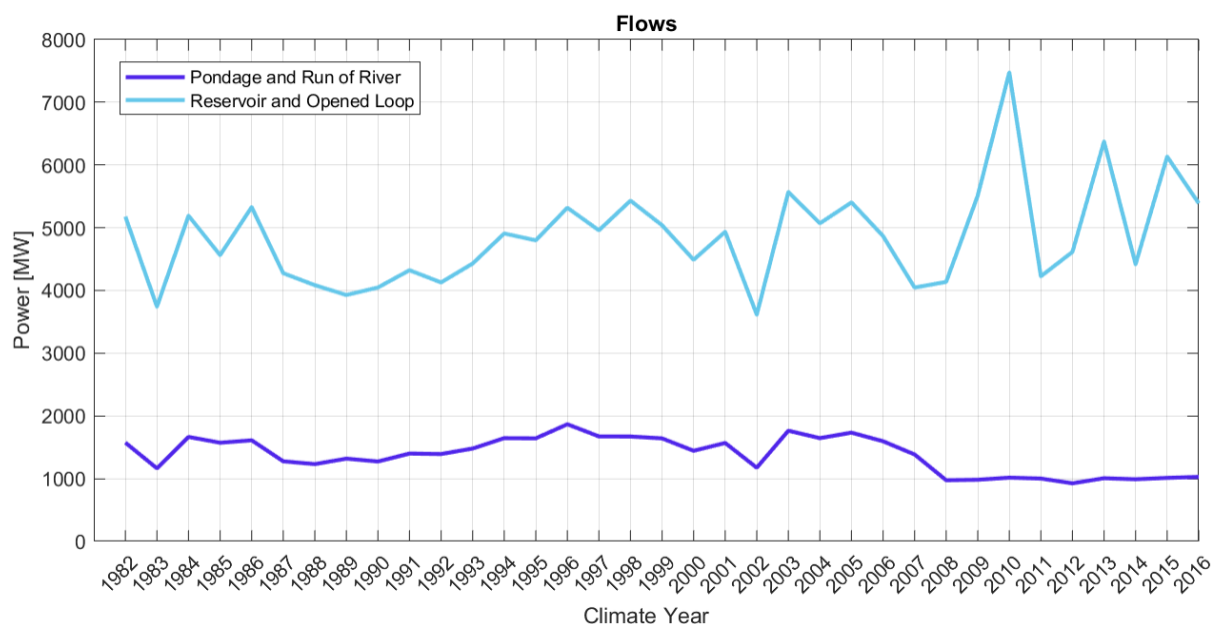
Σχήμα 20: Capacity Factor των υπεράκτιων ΑΠ ανά τα 35 κλιματικά έτη

Στα σχήματα 18,19 και 20 απεικονίζονται οι συντελεστές χωρητικότητας των τεχνολογιών ΑΠΕ των φωτοβολταϊκών πάρκων, των χερσαίων αιολικών πάρκων και των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, αντίστοιχα. Η απεικόνιση τους πραγματοποιείται σε ετήσια βάση για κάθε ένα από τα 35 κλιματικά έτη στο διάστημα 1982 – 2016.

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3, οι ΑΠΕ ενσωματώνονται στο μοντέλο κατόπιν αφαίρεσης των χρονοσειρών τους από την αντίστοιχη χρονοσειρά του φορτίου.

### 4.3 Υδροηλεκτρικές Μονάδες

Η επόμενη εισαγωγή αφορά τις χρονοσειρές των υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής. Αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες με βάση την λειτουργία τους. Η πρώτη αφορά τις τεχνολογίες των Run of River και Pondage οι οποίες συμπεριφέρονται ακριβώς όπως και οι προηγούμενες ΑΠΕ στο σύστημα και η διαδικασία ενσωμάτωσης τους παραμένει γνωστή, ενώ οι τεχνολογίες των Reservoir και Opened Loop χρησιμοποιούνται για εξομάλυνση του φορτίου διοχετεύοντας την ενέργεια τους στις αιχμές του.



Σχήμα 21: Συνολικές ετήσιες ροές των ΥΗΣ για τις τεχνολογίες των ποταμών και των λιμνών

Στο Σχήμα 21 απεικονίζεται η συνολική ενέργεια που παράχθηκε και από τις δύο διαφορετικές κατηγορίες τεχνολογιών των ΥΗΣ κατά τη διάρκεια του κάθε κλιματικού έτους. Η μπλε καμπύλη (κάτω) αναφέρεται στις τεχνολογίες των Pondage και Run Of River όπου η διαθέσιμη ενέργεια τους είναι γνωστή μέσα στο έτος και διοχετεύεται στο υπολειπόμενο φορτίο αμέσως μετά τις ΑΠΕ. Η γαλάζια καμπύλη (πάνω) απεικονίζει τη συνολική ετήσια ενέργεια που παράχθηκε από τις τεχνολογίες των Reservoir και Opened Loop με σκοπό να γίνει εξομάλυνση των αιχμών του υπολειπόμενου φορτίου. Η παραγόμενη ενέργεια εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της καμπύλης του φορτίου αλλά και από τους περιορισμούς λειτουργίας των υδροηλεκτρικών μονάδων. Συγκεκριμένα, οι τεχνολογίες των Reservoir και Opened Loop μπορούν να παράξουν μέγιστη ισχύ ανά ώρα, όπως αναγράφεται στον παρακάτω πίνακα.

| Τεχνολογία        | Μέγιστη Ισχύς Παραγωγής [MW] |
|-------------------|------------------------------|
| [ΥΗΣ] Reservoir   | 2750                         |
| [ΥΗΣ] Opened Loop | 700                          |

Πίνακας 2: Στοιχεία ΥΗΣ για το 2030

#### 4.4 Θερμικές Μονάδες

Τα δεδομένα των θερμικών μονάδων παραγωγής αντλήθηκαν μέσω της Μελέτης Επάρκειας του ΑΔΜΗΕ [21] για το χρονικό διάστημα 2020 – 2030. Η συνολική διαθέσιμη ισχύς των μονάδων φυσικού αερίου (υφιστάμενες και μελλοντικές εντάξεις) αντιστοιχίζεται στα **8202 MW** με τα 7052 MW από αυτά να αποτελούν μονάδες μέσα από τη μελέτη του ΑΔΜΗΕ και τα υπόλοιπα 1150 MW να αντιστοιχίζονται σε δύο μονάδες, μία των 550 MW και μία των 600 MW, αντίστοιχα. Τα αναλυτικά στοιχεία των 19 θερμικών μονάδων παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

| Μονάδα Παραγωγής         | Εγκατεστημένη Ισχύς [MW] | FOR [%]        | MTTR [h] |
|--------------------------|--------------------------|----------------|----------|
| Αλιβέρι V                | 417                      | 12,835         | 24       |
| ΜΣΚ Κομοτηνής            | 476                      | 6,802          | 24       |
| Λαύριο IV («Μεγάλη ΜΣΚ») | 550                      | 15,479         | 24       |
| Λαύριο V («Νέα ΜΣΚ»)     | 378                      | 15,054         | 24       |
| Μεγαλόπολη V             | 500                      | 5,67           | 24       |
| ΜΣΚ ΕΝΘΕΣ                | 400                      | 3,525          | 24       |
| ΜΣΚ ΗΡΩΝ II              | 422                      | 2,793          | 24       |
| ΜΣΚ Αγ. Θεοδώρων         | 434                      | 1,975          | 24       |
| ΜΣΚ Θίσβης               | 410                      | 5,511          | 24       |
| ΜΣΚ Αγ. Νικολάου         | 433                      | 2,723          | 24       |
| ΗΡΩΝ (3 Μονάδες)         | 148,5 (3x49,5)           | 0,6            | 24       |
| Αλουμινίου               | 334                      | 1,069          | 24       |
| Πτολεμαΐδα V*            | 660                      | 6,42           | 24       |
| ΜΣΚ Αγ. Νικολάου II*     | 826                      | 5,67           | 24       |
| ΜΣΚ ΒΙ.ΠΕ. Κομοτηνής*    | 665                      | 5,67           | 24       |
| Μονάδες I**              | 550                      | 5,67           | 24       |
| Μονάδα II**              | 600                      | 5,67           | 24       |
| <b>Σύνολο:</b>           | <b>19 Γεννήτριες</b>     | <b>8202 MW</b> |          |

Πίνακας 3: Στοιχεία Θερμικών Μονάδων Παραγωγής [Ονομασία, Ισχύς, FOR, MTTR] όπως αντλήθηκαν από τον ΑΔΜΗΕ και ενσωματώθηκαν στο μοντέλο της Ενότητας 4.

\*Οι μονάδες Πτολεμαΐδα V, ΜΣΚ Αγίου Νικολάου II και ΜΣΚ ΒΙ.ΠΕ. Κομοτηνής επρόκειτο για νέες εντάξεις θερμικών σταθμών συνολικής ισχύος περίπου 2150 MW που έχουν ζητήσει και λάβει Προσφορά Σύνδεσης η οποία παραμένει σε ισχύ. [21]

\*\*Οι Συμπληρωματικές Μονάδες I και II αποτελούν μονάδες μη υφιστάμενες αλλά υποθετικές μελλοντικές εντάξεις οι οποίες έχουν διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε να συμφωνούν με τα σημερινά δεδομένα του συστήματος.

Να σημειωθεί ότι οι δείκτες FOR (Forced Outage Ratio) και MTTR (Mean Time To Repair) αποτελούν δείκτες που αφορούν τυχαίες βλάβες των μονάδων όπως έχουν ήδη αναλυθεί στην Ενότητα 3.2.1

Πέραν των μην προγραμματιζόμενων διακοπών λειτουργίας των θερμικών μονάδων λόγω βλαβών που ενσωματώνονται στο μοντέλο μέσω της τεχνικής Monte Carlo, λαμβάνονται υπόψη και οι προγραμματισμένες μη διαθεσιμότητες των μονάδων λόγω συντήρησης. Το πρόγραμμα συντήρησης των θερμικών μονάδων που υιοθετείται φαίνεται στο στον πίνακα 17, όπως αυτό αντλήθηκε από τον αρμόδιο διαχειριστή. [47], [47]

| Μονάδα Παραγωγής         | Διάρκεια Συντήρησης (Ημέρες) | Αρχή  | Τέλος |
|--------------------------|------------------------------|-------|-------|
| Αλιβέρι V                | 10                           | 30/03 | 08/04 |
|                          | 92                           | 19/08 | 18/11 |
| ΜΣΚ Κομοτηνής            | 20                           | 11/11 | 30/11 |
| Λαύριο IV («Μεγάλη ΜΣΚ») | 28                           | 22/05 | 18/06 |
|                          | 04                           | 01/09 | 04/09 |
| Λαύριο V («Νέα ΜΣΚ»)     | 07                           | 13/05 | 19/05 |
|                          | 03                           | 11/09 | 13/09 |
|                          | 08                           | 02/12 | 09/12 |
| Μεγαλόπολη V             | 40                           | 15/04 | 24/05 |
|                          | 05                           | 26/05 | 30/05 |
| ΜΣΚ ΕΝΘΕΣ                | 30                           | 26/04 | 25/05 |
| ΜΣΚ ΗΡΩΝ II              | 25                           | 16/04 | 10/05 |
|                          | 07                           | 13/10 | 19/10 |
| ΜΣΚ Αγ. Θεοδώρων         | 96                           | 28/08 | 01/12 |
| ΜΣΚ Θίβης                | 07                           | 20/04 | 26/04 |
|                          | 20                           | 30/09 | 19/10 |
| ΗΡΩΝ I                   | 15                           | 23/09 | 07/10 |
| ΗΡΩΝ II                  | 03                           | 20/03 | 22/03 |
| ΗΡΩΝ III                 | 03                           | 23/03 | 25/03 |
| Αλουμινίου               | 61                           | 01/09 | 31/10 |

Πίνακας 4: Δεδομένα συντήρησης Θερμικών Μονάδων Παραγωγής όπως αντλήθηκαν από τον ΑΔΜΗΕ και ενσωματώθηκαν στο μοντέλο της Ενότητας 4.

## 4.5 Μονάδες Αποθήκευσης

Τέλος, αντλώντας στοιχεία από τον ENTSO-e γίνεται χρήση δύο μπαταριών (BESS) των 1000 και 500 MW αντίστοιχα και μίας μονάδας αντλησιοταμίευσης (Closed Loop) των 700 MW με τα στοιχεία τους να παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

| Μονάδα Αποθήκευσης | P - Ισχύς | E - Ενέργεια | N - Βαθμός Απόδοσης |
|--------------------|-----------|--------------|---------------------|
| BESS 1             | 1000 MW   | 2000 MWh     | 0,85                |
| BESS 2             | 500 MW    | 2000 MWh     | 0,9                 |
| Closed Loop        | 700 MW    | 4900 MWh     | 0,75                |

Πίνακας 5: Στοιχεία Μονάδων Αποθήκευσης

## 5 Αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της συμβολής στην επάρκεια των σταθμών ΑΠΕ αλλά και των μονάδων αποθήκευσης εφαρμόζεται για το ελληνικό σύστημα όπως αναμένεται να αναπτυχθεί το 2030. Συγκεκριμένα, λαμβάνονται υπόψη θερμικές μονάδες παραγωγής, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μονάδες αποθήκευσης και το φορτίο ζήτησης για το έτος αναφοράς όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην αξιολόγηση της συνεισφοράς των ΑΠΕ και των μονάδων αποθήκευσης στην συνολική επάρκεια του συστήματος προκύπτουν τα ανάλογα αποτελέσματα.

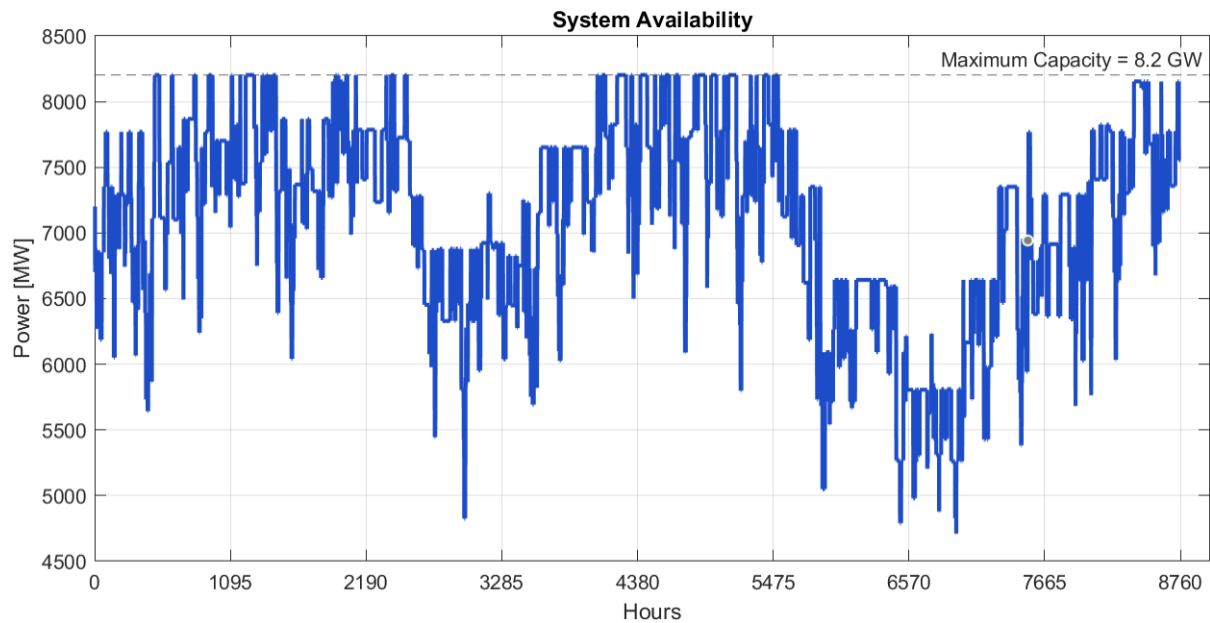
Τα στοιχεία του συστήματος που σχετίζονται αμιγώς με την παραγωγή της ηλεκτρικής είναι οι θερμικές μονάδες παραγωγής, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και οι Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί. Πολλαπλασιάζοντας τις ανά μονάδα χρονοσειρές των ΑΠΕ με τις αντίστοιχες ονομαστικές ισχύς των τεχνολογιών προκύπτει η τελική χρονοσειρά των ΑΠΕ. Ενσωματώνοντας τες στο σύστημα, μέσω της μεθοδολογίας που αναλύθηκε στην Ενότητα 3, προκύπτει το υπολειπόμενο φορτίο. Επιπλέον, το σύστημα αποτελείται από ΥΗΣ τεσσάρων διαφορετικών τεχνολογιών. Η ενσωμάτωσή τους στο σύστημα χωρίζεται σε δύο στάδια, διαφορετικά μεταξύ τους ως προς την μεθοδολογία ενσωμάτωσης. Οι τεχνολογίες των Run of River και Pondage συμπεριφέρονται ακριβώς όπως και οι προηγούμενες ΑΠΕ στο σύστημα και η διαδικασία ενσωμάτωσης τους είναι γνωστή, ενώ οι τεχνολογίες των Reservoir και Opened Loop χρησιμοποιούνται για εξομάλυνση του φορτίου διοχετεύοντας την ενέργεια τους στις αιχμές του.

### **ΖΗΤΗΣΗ ΥΠΟΛΕΙΠΟΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ = ΑΡΧΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ – (ΑΠΕ + ΥΗΣ)**

Η σειρά προτεραιότητας που ορίστηκε προκειμένου οι συγκεκριμένες τεχνολογίες να ενσωματωθούν στο σύστημα σχετίζεται με τη συμβολή των ΑΠΕ στην επάρκεια. Έπειτα από κατάλληλες διερευνήσεις, το σύστημα είναι περισσότερο επαρκές στο σενάριο που η λειτουργία των ΥΗΣ διαδέχεται την λειτουργία των ΑΠΕ. Επίσης, αναλύοντας περισσότερο τη λειτουργία της κάθε τεχνολογίας παρατηρήθηκε ότι οι τεχνολογίες των ΦΒ, χερσαίων και υπεράκτιων ΑΠ καθώς και των Pondage και Run Of River από τους ΥΗΣ, δεν εξαρτώνται από τη ζήτηση του φορτίου αλλά από τις καιρικές συνθήκες του εκάστοτε κλιματικού έτους. Οι τεχνολογίες των Reservoir και Opened Loop από την άλλη μπορεί μεν να έχουν τους ίδιους βασικούς περιορισμούς (υγρό ή ξηρό έτος), ωστόσο η λειτουργία τους μέσα στο σύστημα καθορίζεται από τις αιχμές της ζήτησης του φορτίου. Συνεπώς, καθώς η ενσωμάτωση των ΑΠΕ πραγματοποιείται μέσω αφαίρεσης τους από το αρχικό φορτίο είναι πιο λογικό η λειτουργία των Reservoir και Opened Loop να διαδέχεται την λειτουργία των υπολοίπων ΑΠΕ.

Η πιθανότητα βλάβης των θερμικών μονάδων αποτελεί ένα στοχαστικό φαινόμενο. Συνεπώς, προκειμένου να υπάρξει μία ρεαλιστική απεικόνιση της διαθεσιμότητας της κάθε γεννήτριας, οι αντίστοιχες χρονοσειρές παράχθηκαν μέσω της συνάρτησης SMCS όπως αναλύθηκε στην Ενότητα 3.2.1. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία για δέκα χιλιάδες χρόνια έχουν παραχθεί

οι χρονοσειρές διαθεσιμότητας των μονάδων, διαφορετικές μεταξύ τους, με βάση τα αντίστοιχα FOR και MTTR και των 19 μονάδων (Σχήμα 22).

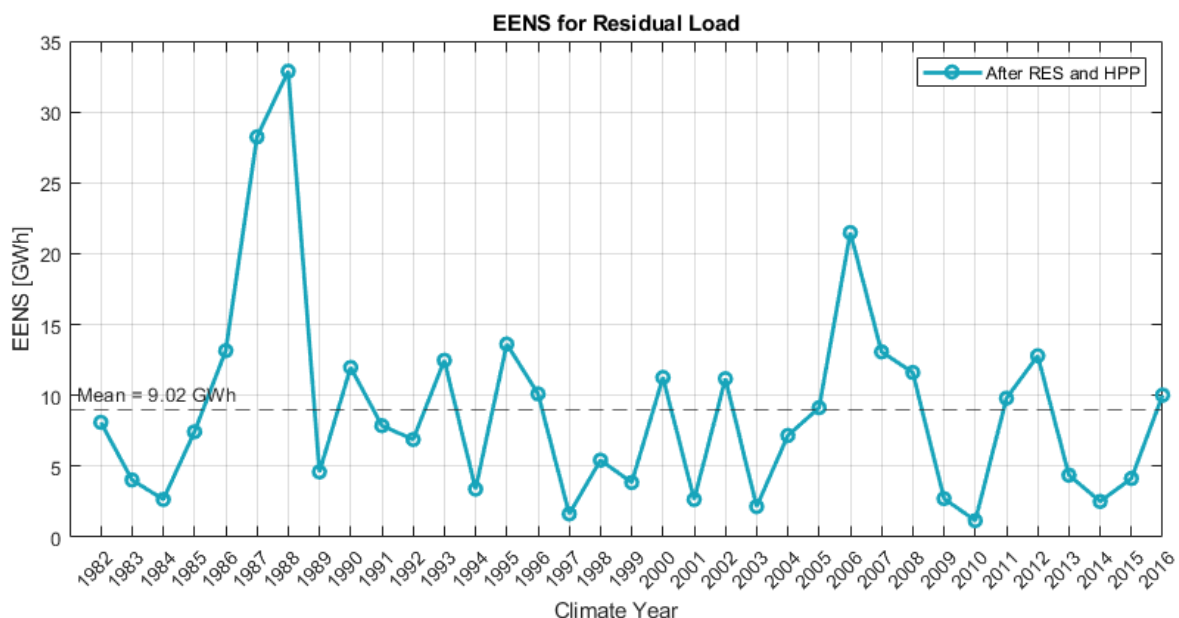


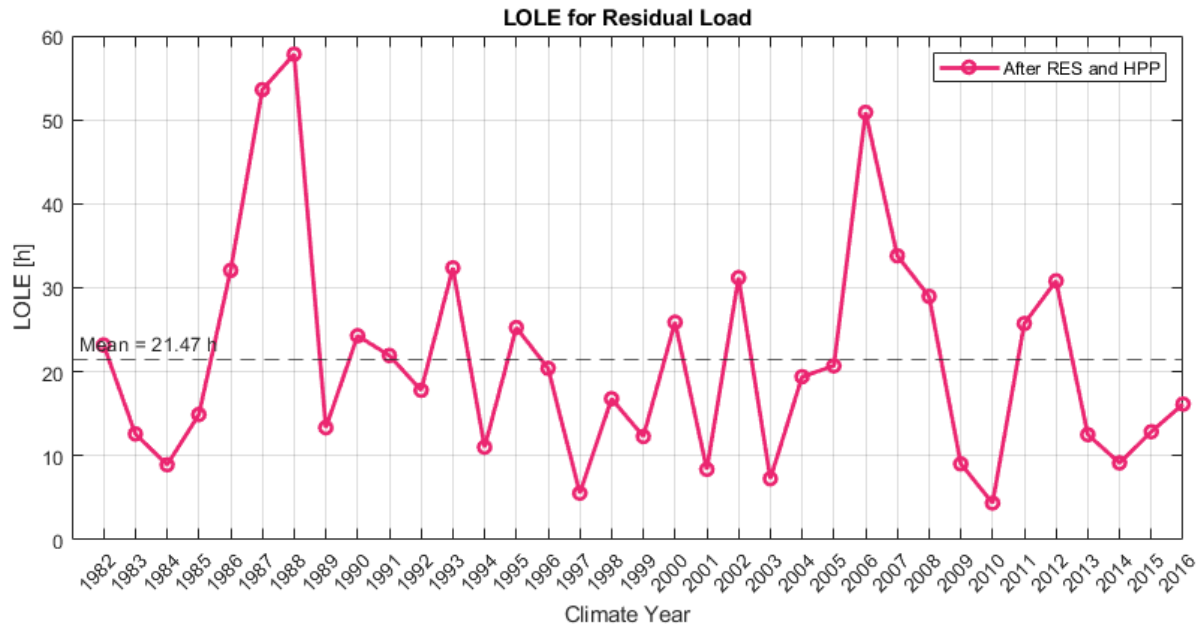
Σχήμα 22: Τυπική Αναπαράσταση Διαθεσιμότητας Συστήματος Θερμικών Μονάδων Παραγωγής

## 5.1 Αξιολόγηση Συμβολής των ΑΠΕ στην Επάρκεια Ισχύος

Κάνοντας χρήση της συνάρτησης Reliability Test System (RTS) προκύπτει σύγκριση της χρονοσειράς του υπολειπόμενου φορτίου με τις δέκα χιλιάδες χρονοσειρές διαθεσιμότητας των θερμικών μονάδων, για κάθε ένα από τα 35 κλιματικά έτη, και υπολογίζονται οι αντίστοιχοι δείκτες αξιοπιστίας του συστήματος (EENS και LOLE).

Στο Σχήμα 23 απεικονίζονται οι αντίστοιχοι δείκτες, για κάθε κλιματικό έτος ξεχωριστά. Το μέσο EENS υπολογίζεται στις 9 GWh (Σχήμα 23α) ενώ το LOLE στις 21 ώρες ετησίως (Σχήμα 23β).





Σχήμα 23: Δείκτες Επάρκειας Συστήματος αναφορικά με το υπολειπόμενη ζήτηση φορτίου μετά τις ΑΠΕ. α) EENS, β) LOLE.

Σε ορισμένα έτη που το LOLE είναι σχετικά υψηλό (π.χ. το έτος 2010) παρατηρήθηκε ότι δεν συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση του EENS. Συνεπώς γίνεται μία πρώτη εκτίμηση ότι οι δύο δείκτες δεν είναι απαραίτητα συγχρονισμένοι μεταξύ τους. Ήδη είναι γνωστό ότι υπολογίζονται δύο εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά και παρέχουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά της χρονοσειράς, είτε βραχυπρόθεσμα (μέσω EENS), είτε μακροπρόθεσμα (μέσω LOLE). Συνεπώς για λόγους πληρότητας θα υπολογιστεί η συμβολή των ΑΠΕ στην επάρκεια ισχύος έχοντας ως σημείο αναφοράς και τους δύο δείκτες επάρκειας.

Ένας τυπικός δείκτης επάρκειας των ΑΠΕ αποτελεί το Capacity Factor τους, το οποίο πληροφορεί για τον λόγο της «πραγματικής» ενέργειας που παράγεται σε ένα έτος προς την «φαινομενική» ενέργεια που θα παρήγαγε εφόσον λειτουργούσε μονίμως στην ονομαστική της ισχύ.

| Capacity Factor | PV     | WF Onshore | WF Offshore |
|-----------------|--------|------------|-------------|
|                 | 15,7 % | 26,7 %     | 43,8%       |

Ο υπολογισμός του Capacity Value έγινε μέσω δύο δεικτών υπολογισμού, του Equivalent Firm Capacity και του Effective Load Carrying Ability.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 3.3.1, για να υπολογιστεί το EFC μίας τεχνολογίας ΑΠΕ, χρειάζεται να είναι γνωστή η επάρκεια του συστήματος πριν και μετά από την προσθήκη της συγκεκριμένης τεχνολογίας (Base και Test Case Scenarios) αντίστοιχα. Στην προκειμένη, η επάρκεια του συστήματος μετά την προσθήκη των ΑΠΕ αποτελεί το Test Case Scenario ενώ όταν αφαιρείται μία τεχνολογία το Base Case Scenario. Για παράδειγμα αφαιρώντας την ενέργεια που παρήγαγαν τα 13,4 GW Φ/Β στο σύστημα, προκύπτει το Base Case Scenario με την επάρκεια να αντιστοιχίζεται κατά μέσο όρο στο EENS των 17,862 GWh και το LOLE των 258 h. Έτσι, υπολογίζονται πόσα είναι τα MW μίας «τέλειας» συμβατικής μονάδας που απαιτούνται προκειμένου από το Base Case Scenario να προκύψει επαρκειακά

το Test Case Scenario. Τέλος, διαιρείται η συγκεκριμένη ποσότητα με την ονομαστική ισχύ της εκάστοτε τεχνολογίας έτσι ώστε να προκύψει η ποσοστιαία ποσότητα.

Αντίστοιχα για το ELCC, η μεθοδολογία ακολουθεί μία αντίστροφη διαδικασία όπου αυτή τη φορά διατηρείται μία τεχνολογία στο σύστημα και από το Test Case Scenario πρέπει να προκύψει επαρκειακά το Base Case Scenario τροποποιώντας κατάλληλα τη χρονοσειρά του φορτίου. Υπολογίζοντας την αντίστοιχη ποσότητα, λοιπόν, προκύπτουν τα επιπλέον MW φορτίου που η εκάστοτε τεχνολογία είναι σε θέση να καλύψει διατηρώντας το επίπεδο επάρκειας του συστήματος σταθερό.

### 5.1.1 Συμβολή Υφιστάμενων ΑΠΕ στην Επάρκεια Ισχύος

Στο Σχήμα 24 παρατηρείται ότι τα Φ/Β έχουν το μικρότερο Capacity Value και από τις τρεις τεχνολογίες ενώ το μεγαλύτερο έχει προκύψει μέσω της τεχνολογίας των υπεράκτιων Α/Π. Κατά τον υπολογισμό του ELCC βάσει του επαρκειακού δείκτη LOLE προκύπτουν τα μεγαλύτερα αποτελέσματα και για τις τρεις τεχνολογίες, με αυτά να ανέρχονται σε 6,62 %, 17,89% και 32,96 % για τα Φ/Β, χερσαία Α/Π και υπεράκτια Α/Π, αντίστοιχα.

Συμπεραίνεται, έτσι, ότι το Capacity Value της κάθε τεχνολογίας διαφέρει αναλόγως τη μέθοδο. Οι διαφορές που παρατηρούνται ανάμεσα στον υπολογισμό βάσει του EENS και βάσει του LOLE είναι αναμενόμενες καθώς εξαρτώνται από τη φύση υπολογισμού των δεικτών επάρκειας. Το υπολειπόμενο φορτίο παρουσιάζει ανεπάρκειες διαφορετικού μεγέθους ανά ορισμένες ώρες μέσα στο σύστημα. Το LOLE δεν επικεντρώνεται στο ύψος της ανεπάρκειας καθ'αυτής, αλλά στο πόσες ώρες μέσα στο χρόνο το σύστημα δεν μπόρεσε να καλύψει τις απαιτήσεις της ζήτησης. Από την άλλη, στον υπολογισμό του EENS αθροίζονται οι ωριαίες ανεπάρκειες και υπολογίζεται η συνολική ενέργεια που δεν καλύφθηκε μέσα στο έτος, χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη οι αιχμές της ετήσιας καμπύλης.

Η αξιολόγηση της συνεισφοράς των μονάδων στην επάρκεια του συστήματος κρίνεται απαραίτητη εφαρμόζοντας και τις δύο μεθοδολογίες. Ωστόσο, είναι σημαντικό να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της κάθε μεθοδολογίας ανάμεσα στους δύο δείκτες επάρκειας ώστε να προκύψουν τα τελικά συμπεράσματα.

Αξιολογώντας τη συμπεριφορά της χρονοσειράς ενός συστήματος προκύπτουν πολλά συμπεράσματα για τις διαφορές ανάμεσα στις μεθόδους υπολογισμού του CV. Θεωρώντας ένα σύστημα όπου οι ελλειμματικές ώρες του καταλογίζουν μικρή απώλεια ενέργειας προκύπτει ότι και η παραμικρή αύξηση στον κατακόρυφο άξονα της χρονοσειράς διαθεσιμότητας (δηλαδή αύξηση του EFC) θα είχε άμεσο αντίκτυπο στη μείωση του LOLE. Η συνεισφορά είναι εμφανής υπολογίζοντας και τους δύο επαρκειακούς δείκτες, ωστόσο στο LOLE τα αποτελέσματα αναμένονται να είναι πιο υψηλά. Οι ελλειμματικές ώρες του παρόντος συστήματος δεν χαρακτηρίζονται συχνά από υψηλές απώλειες ενέργειας με αποτέλεσμα η προσθήκη μίας μονάδας ΑΠΕ σε αυτό να το καθιστά περισσότερο επαρκές σε όρους LOLE.

Αναφορικά με τις διαφορές που παρατηρήθηκαν σε επίπεδο μεθοδολογιών, επομένως, προκύπτουν τα εξής. Το ELCC υπολογίζει τη συνολική επίδραση των ΑΠΕ στη διαθεσιμότητα ισχύος, λαμβάνοντας υπόψη την ικανότητά τους να υποστηρίζουν επιπλέον φορτίο, ανεξάρτητα από τη σύγκριση του με μια σταθερή πηγή. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να αξιοποιήσει πλήρως τη μεταβλητότητα των ΑΠΕ, ειδικά σε περιπτώσεις όπου η ενέργεια από ΑΠΕ συνδυάζεται με τις απαιτήσεις φορτίου.

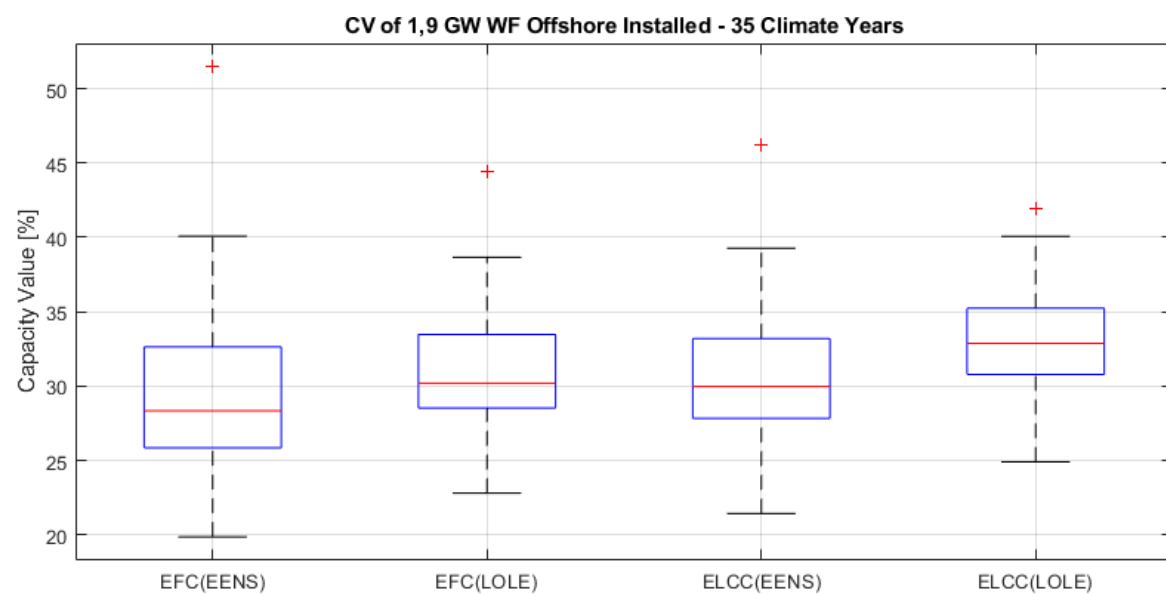
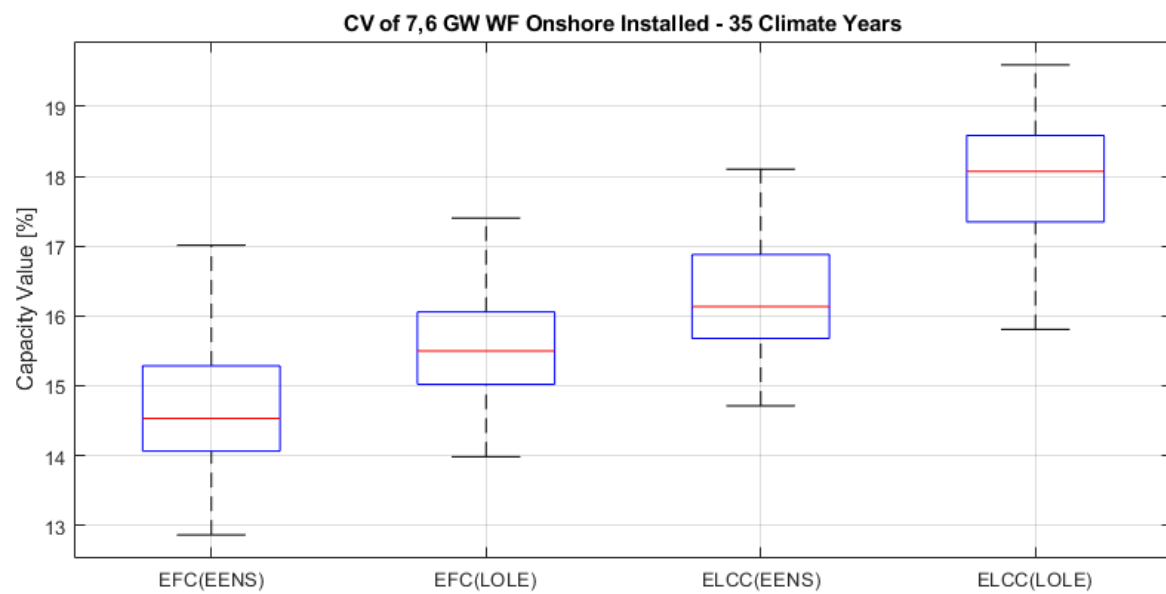
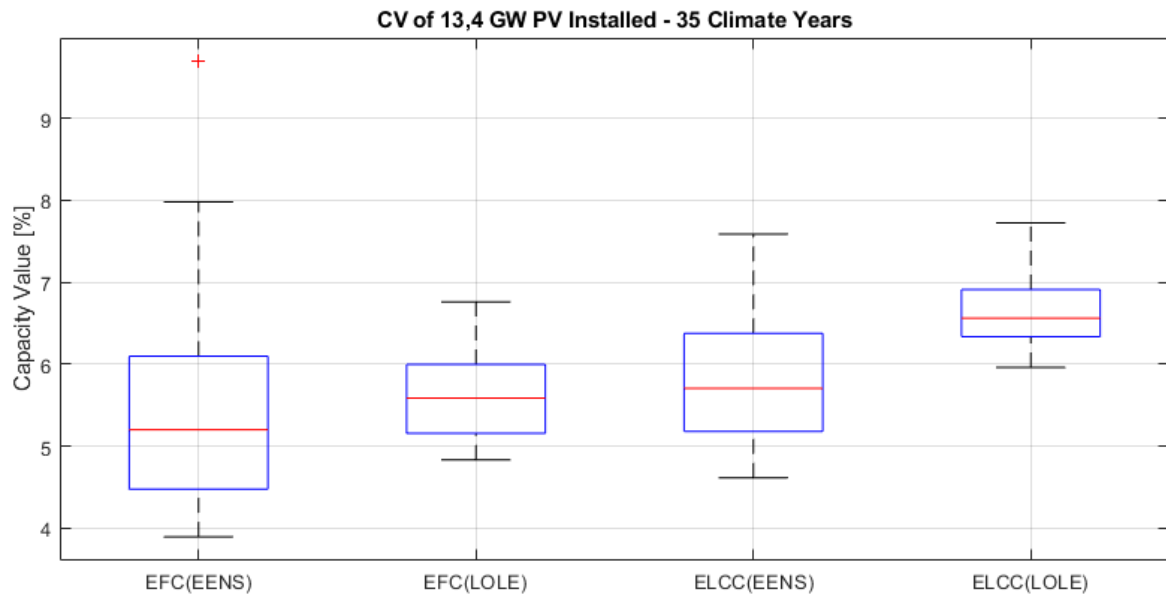
Όταν υπολογίζεται με βάση το LOLE, το ELCC λαμβάνει υπόψη το πόσο συνεισφέρουν οι ΑΠΕ στην αποφυγή διακοπών φορτίου στις ώρες αιχμής, κάτι που είναι πιο αποτελεσματικό σε σχέση με το EFC. Το EFC περιορίζεται στην αντικατάσταση μιας συγκεκριμένης ισχύος, ενώ το ELCC επιτρέπει μια πιο δυναμική εκτίμηση της αξίας των ΑΠΕ.

Το ELCC θεωρείται πιο αντιπροσωπευτικός δείκτης των σύγχρονων απαιτήσεων του ηλεκτρικού συστήματος, καθώς λαμβάνει υπόψη την επίδραση της μεταβλητής παραγωγής των ΑΠΕ στο συνολικό φορτίο του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να προσαρμόζεται καλύτερα στις νέες δυναμικές και ανάγκες της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Έτσι, το ELCC με βάση το LOLE αξιολογεί πώς η προσθήκη ΑΠΕ επιτρέπει στο σύστημα να εξυπηρετεί επιπλέον φορτίο χωρίς να αυξάνει τον κίνδυνο απώλειας φορτίου. Αυτός ο συνδυασμός είναι ιδιαίτερα ισχυρός, γιατί δεν υπολογίζει μόνο την ισχύ που αντικαθίσταται (όπως το EFC), αλλά και το πόσο πιο αξιόπιστο καθίσταται το σύστημα. Η προσέγγιση του ELCC είναι πιο ρεαλιστική, καθώς λαμβάνει υπόψη την πραγματική ευελιξία και την ικανότητα των ΑΠΕ να καλύπτουν αιχμές φορτίου, κάτι που αναδεικνύεται περισσότερο όταν η αξιολόγηση γίνεται με βάση το LOLE.

Συνολικά, η υπεροχή του ELCC, και ιδιαίτερα του ELCC με βάση το LOLE, προκύπτει από την ικανότητά του να αποτυπώνει καλύτερα την πραγματική συμβολή των ΑΠΕ στη σταθερότητα και την επάρκεια του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη την ποικιλία των ωρών αιχμής και την δυναμική τους συμπεριφορά. Ωστόσο, για λόγους πληρότητας των αποτελεσμάτων έχει γίνει ολική διερεύνηση μέσω και των δύο μεθοδολογιών.

| Τεχνολογία        | ΦΒ   | Χερσαία ΑΠ | Υπεράκτια ΑΠ |
|-------------------|------|------------|--------------|
| Εγκατ. Ισχύς [GW] | 13,4 | 7,6        | 1,9          |
| EFC / EENS [%]    | 5,47 | 14,55      | 30,15        |
| EFC / LOLE [%]    | 5,63 | 15,53      | 31,24        |
| ELCC / EENS [%]   | 5,8  | 16,22      | 30,96        |
| ELCC / LOLE [%]   | 6,62 | 17,89      | 32,96        |



Σχήμα 24: Υπολογισμός Capacity Value για τις υφιστάμενες ΑΠΕ και για τα 35 κλιματικά έτη.

Σε περαιτέρω ανάλυση, σημαντική προσέγγιση στην αξιολόγηση των ΑΠΕ μπορεί να γίνει μέσω της ανάπτυξης τους στο υπάρχον σύστημα. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί ξεχωριστά, δηλαδή για κάθε τεχνολογία, ή ταυτόχρονα, δηλαδή να αναπτύσσονται και οι τρεις τεχνολογίες μαζί.

### 5.1.2 Μεμονωμένη Ανάπτυξη ΑΠΕ και η Συμβολή τους στην Επάρκεια

Διατηρώντας σε ισχύ τις ΑΠΕ που έχουν ήδη αναλυθεί – ΦΒ = 13,4 GW, Χερσαία ΑΠ = 7,6 GW, Υπεράκτια ΑΠ = 1,9 GW, πραγματοποιούνται πέντε διαφορετικές διερευνήσεις για κάθε τεχνολογία μεμονωμένα. Γίνεται υπολογισμός του οριακού Capacity Value της κάθε ΑΠΕ αυξάνοντας την ονομαστική της ισχύ, από 1 έως και 5 GW, με βήμα 1 GW τη φορά. Ο υπολογισμός του Capacity Value γίνεται επίσης βηματικά, δηλαδή σε κάθε σενάριο υπολογίζεται ποια είναι η αξία του επιπρόσθετου 1 GW στο σύστημα. Επιπλέον, η ανάπτυξη των ΑΠΕ γίνεται ανεξάρτητα από τα ΥΗΣ. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η εισαγωγή των ΥΗΣ στο σύστημα πάντα έπεται των ΑΠΕ. Έτσι, αναφορικά με τον υπολογισμό του EENS και του LOLE στο τελικό σύστημα το οποίο πλέον συμπεριλαμβάνει την ανάπτυξη των επιπλέον ΑΠΕ, έχει γίνει επαναδρομολόγηση των ΥΗΣ προκειμένου να διαχειριστούν το νέο υπολειπόμενο φορτίο.

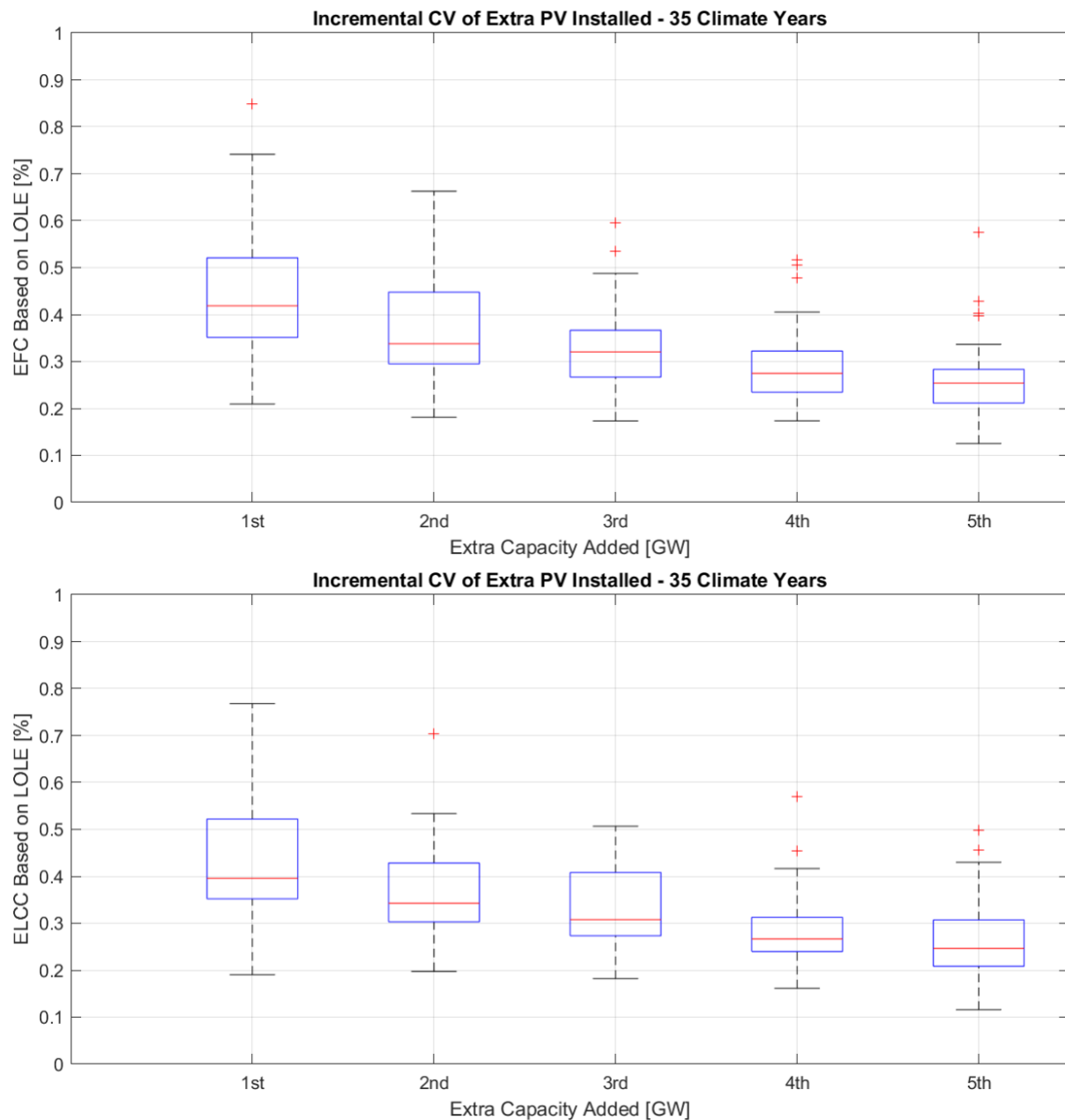
Στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται ανάλυση μέσω της μεθόδου υπολογισμού του EFC και του ELCC με βάση τους επαρκειακούς δείκτες EENS και LOLE. Για λόγους πληρότητας αποτελεσμάτων, τα Capacity Value που προέκυψαν μέσω των μεθόδων παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα.

#### ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ

| Φ/Β               | Σενάριο 0 | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 4 | Σενάριο 5 |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Εγκατ. Ισχύς [GW] | 13,4      | 14,4      | 15,4      | 16,4      | 17,4      | 18,4      |
| EFC / EENS [%]    | 5,46      | 5,1       | 4,79      | 4,51      | 4,26      | 4,04      |
| EFC / LOLE [%]    | 5,63      | 5,27      | 4,95      | 4,67      | 4,42      | 4,19      |
| ELCC / EENS [%]   | 5,8       | 5,42      | 5,08      | 4,79      | 4,52      | 4,28      |
| ELCC / LOLE [%]   | 6,62      | 6,19      | 5,82      | 5,48      | 5,18      | 4,92      |

Πίνακας 6: Σενάρια ξεχωριστής ανάπτυξης ΦΒ με τα αντίστοιχα CV τους.

Αναφορικά με τα Φ/Β (Πίνακας 6) παρατηρείται ότι ο ρυθμός αύξησης του Capacity Value μειώνεται όσο αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς τους. Σύμφωνα με το Σχήμα 25 απεικονίζεται ότι το ύψος αυτού του ρυθμού οδηγείται από το 0,44% στο 0,26 %, το οποίο υποδηλώνει τον κορεσμό που προκαλεί η προσθήκη περισσότερων ΦΒ στο σύστημα.



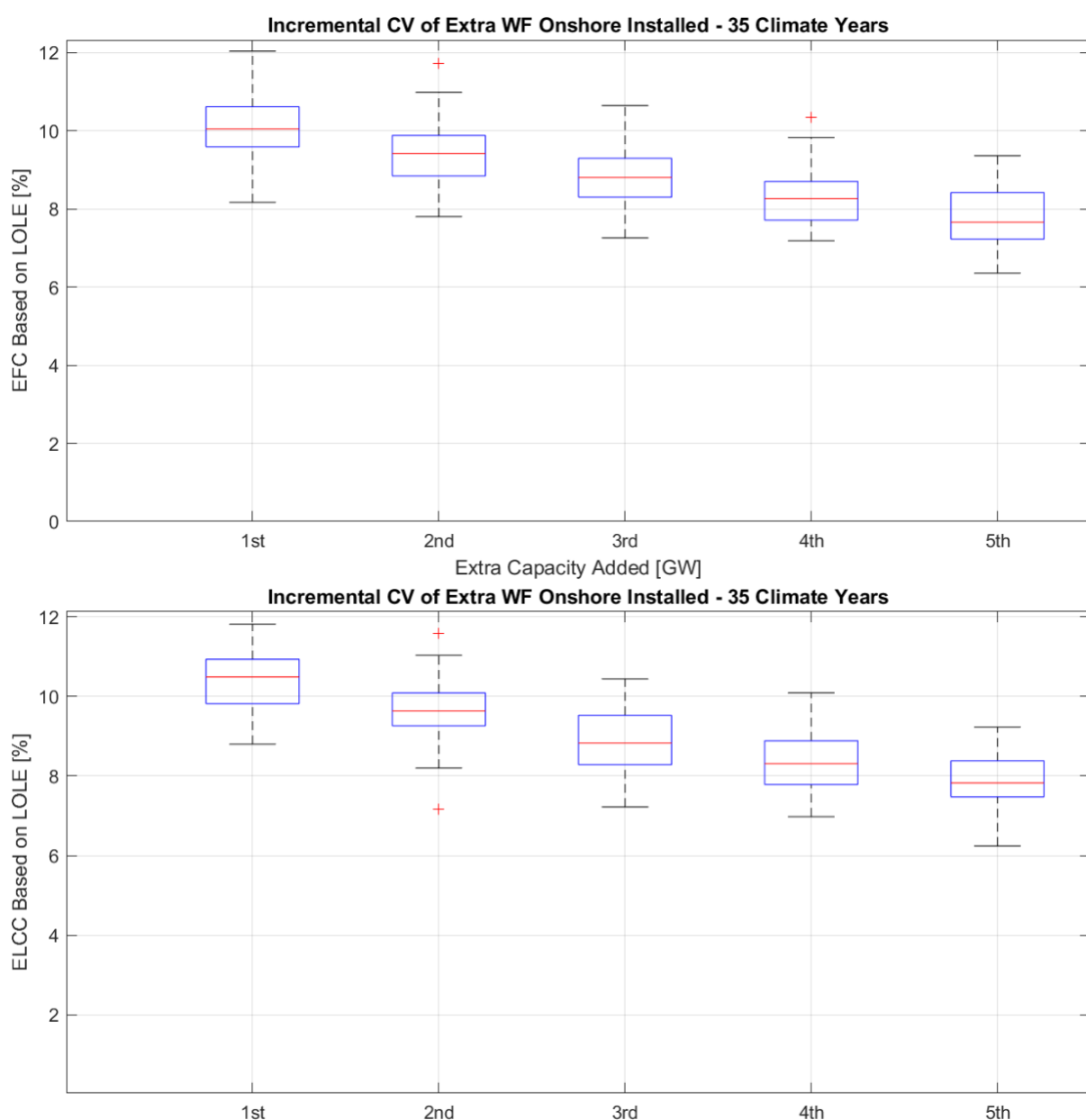
Σχήμα 25: Υπολογισμός του οριακού CV των επιπλέον ΦΒ στο σύστημα. (EFC και ELCC με βάση το LOLE)

## ΧΕΡΣΑΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

Αναφορικά με τα Χερσαία Α/Π (Πίνακας 7) προκύπτει ότι ο ρυθμός αύξησης του Capacity Value μειώνεται. Σύμφωνα με το Σχήμα 26, τα 5 επιπλέον GW ονομαστικής ισχύς συνεισφέρουν έως και 8,88% του EFC σε αντίθεση με το αντίστοιχο 0,34% που υπολογίστηκε για τα ΦΒ. Έτσι, η συγκεκριμένη τεχνολογία συνεισφέρει περισσότερο στην επάρκεια του συστήματος.

| Χερσαία ΑΠ        | Σενάριο 0 | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 4 | Σενάριο 5 |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Εγκατ. Ισχύς [GW] | 7,6       | 8,6       | 9,6       | 10,6      | 11,6      | 12,6      |
| EFC / EENS [%]    | 14,56     | 13,92     | 13,34     | 12,82     | 12,36     | 11,92     |
| EFC / LOLE [%]    | 15,53     | 14,9      | 14,32     | 13,8      | 13,33     | 12,89     |
| ELCC / EENS [%]   | 16,22     | 15,4      | 14,68     | 14,04     | 13,47     | 12,96     |
| ELCC / LOLE [%]   | 17,89     | 17,02     | 16,25     | 15,55     | 14,93     | 14,37     |

Πίνακας 7: Σενάρια ξεχωριστής ανάπτυξης χερσαίων ΑΠ με τα αντίστοιχα CV τους.



Σχήμα 26: Υπολογισμός του οριακού CV των επιπλέον χερσαίων ΑΠ στο σύστημα. (EFC και ELCC με βάση το LOLE)

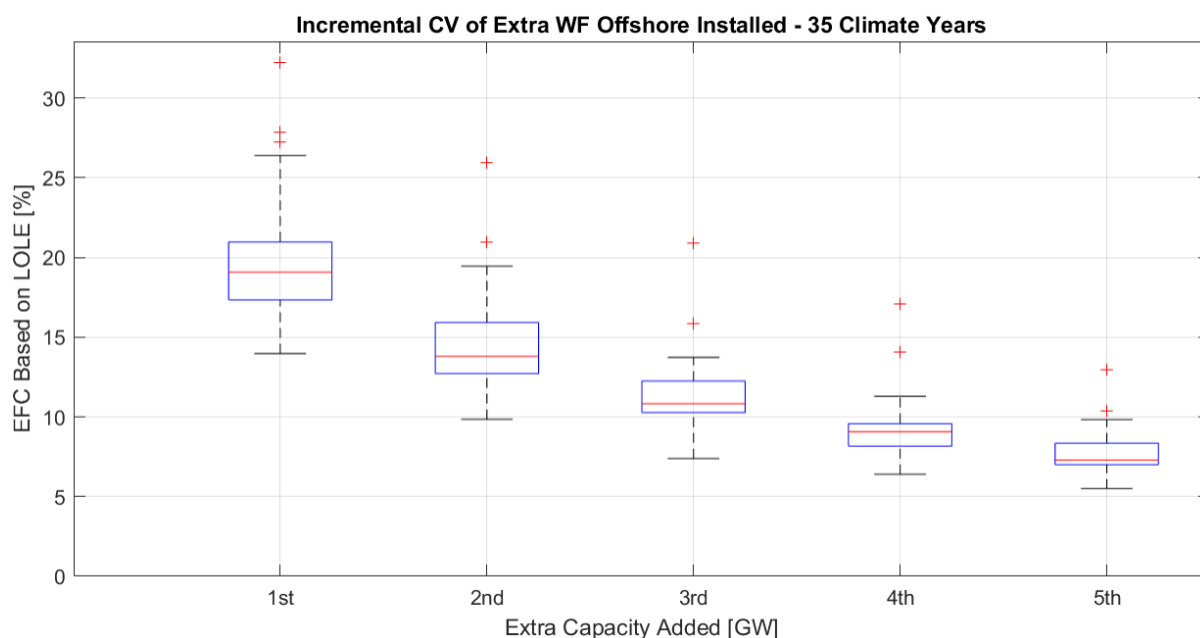
## ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

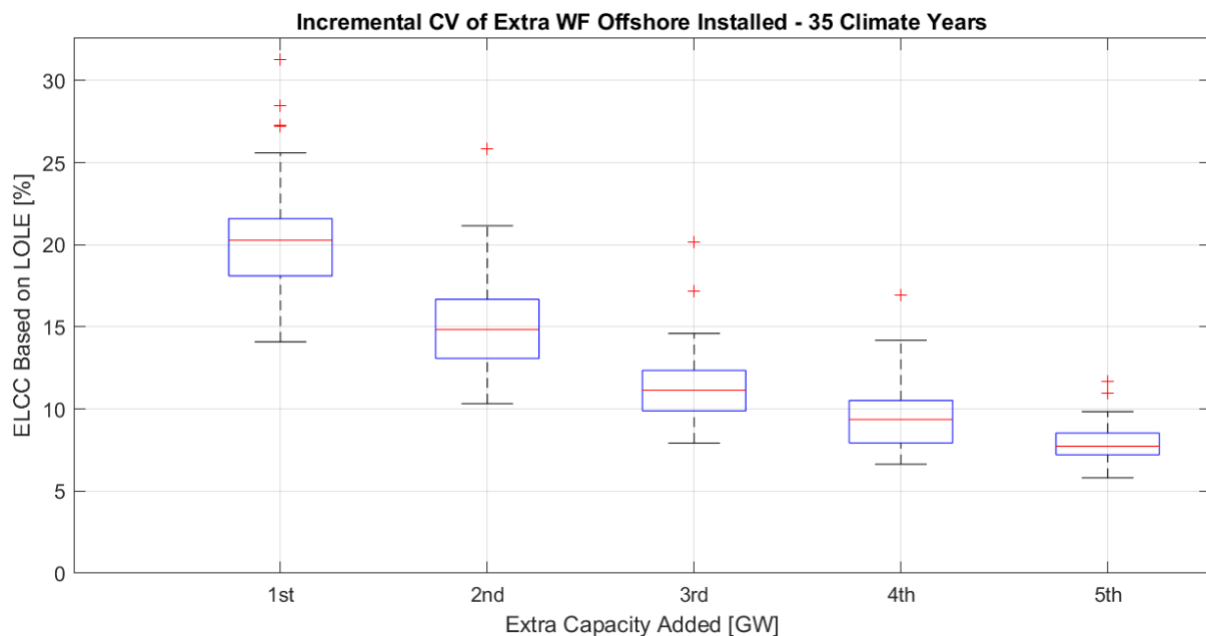
Τέλος υπολογίζοντας τους αντίστοιχους δείκτες για τα υπεράκτια Α/Π (Πίνακας 8) παρατηρείται ότι είναι σε θέση να συνεισφέρουν από 17-33 % στην επάρκεια του συστήματος και να ξεπεράσουν ακόμα και την αξία των χερσαίων ΑΠ θέτοντας την ως την πιο αποτελεσματική τεχνολογία. Επιπροσθέτως, στη βηματική αναπαράσταση των CV (Σχήμα 28), παρατηρείται ότι ο ρυθμός αύξησης του CV μειώνεται πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με αυτή των άλλων τεχνολογιών. Αυτό οφείλεται στο ότι η τεχνολογία των υπεράκτιων ΑΠ δεν έχει αναπτυχθεί τόσο όσο των ΦΒ και των χερσαίων ΑΠ. Συγκρίνοντας την ανάπτυξη των ΑΠ, το 5<sup>ο</sup> επιπλέον GW των υπεράκτιων που προτίθεται στο σύστημα ισούται με 7,3 % σε αντίθεση με το αντίστοιχο 7,8 % των χερσαίων.

| Υπεράκτια ΑΠ      | Σενάριο 0 | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 4 | Σενάριο 5 |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Εγκατ. Ισχύς [GW] | 1,9       | 2,9       | 3,9       | 4,9       | 5,9       | 6,9       |
| EFC / EENS [%]    | 30,15     | 25,93     | 22,6      | 20,01     | 17,97     | 16,32     |
| EFC / LOLE [%]    | 31,24     | 27,27     | 24,01     | 21,41     | 19,33     | 17,65     |
| ELCC / EENS [%]   | 30,96     | 26,6      | 23,15     | 20,48     | 18,38     | 16,68     |
| ELCC / LOLE [%]   | 32,96     | 28,75     | 25,3      | 22,5      | 20,3      | 18,52     |

Πίνακας 8: Σενάρια ξεχωριστής ανάπτυξης υπεράκτιων ΑΠ με τα αντίστοιχα CV τους.

Συνοψίζοντας, αυξάνοντας την ισχύ της κάθε τεχνολογίας ξεχωριστά προκύπτει μείωση του Capacity Value της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Απαραίτητη κρίνεται επομένως η σωστή αξιολόγηση της αλλαγής στο μείγμα των ΑΠE ώστε να είναι η βέλτιστη δυνατή για την βελτίωση της επάρκειας του συστήματος.





Σχήμα 28: Υπολογισμός του οριακού CV των επιπλέον υπεράκτιων ΑΠ στο σύστημα. (EFC και ELCC με βάση το LOLE)

### 5.1.3 Ταυτόχρονη Ανάπτυξη ΑΠΕ και η Συμβολή τους στην Επάρκεια

Μία εναλλακτική διερεύνηση αποτελεί η ταυτόχρονη ανάπτυξη των τεχνολογιών ΑΠΕ με λόγο 3:1:1. Έτσι, κάθε φορά που γίνεται προσθήκη 1 GW χερσαίων Α/Π στο σύστημα, αυτό συνοδεύεται ταυτόχρονα από αύξηση των υπεράκτιων Α/Π κατά 1 GW και αύξηση των Φ/Β κατά 3 GW. Υπολογίζεται αντίστοιχα η οριακή επάρκεια του συστήματος αυξάνοντας την ονομαστική ισχύ των χερσαίων Α/Π, από 0,5 GW έως και 2,5 GW, με βήμα 0,5 GW τη φορά.

Σε κάθε βήμα έγινε προσθήκη συνολικά 2,5 GW επιπλέον ΑΠΕ με τα μείγματα να απεικονίζονται στον Πίνακα 9 ως εξής:

| Τεχνολογία    | Σενάριο 0 | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 4 | Σενάριο 5 |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Φωτοβολταϊκά  | 13,4 GW   | 14,9 GW   | 16,4 GW   | 17,9 GW   | 19,4 GW   | 20,9 GW   |
| Χερσαία Α/Π   | 7,6 GW    | 8,1 GW    | 8,6 GW    | 9,1 GW    | 9,6 GW    | 10,1 GW   |
| Υπεράκτια Α/Π | 1,9 GW    | 2,4 GW    | 2,9 GW    | 3,4 GW    | 3,9 GW    | 4,4 GW    |
| Διείσδυση ΑΠΕ | 68 %      | 84 %      | 100 %     | 116 %     | 132 %     | 149 %     |

Πίνακας 9: Σενάρια Ταυτόχρονης Ανάπτυξης Μείγματος ΑΠΕ

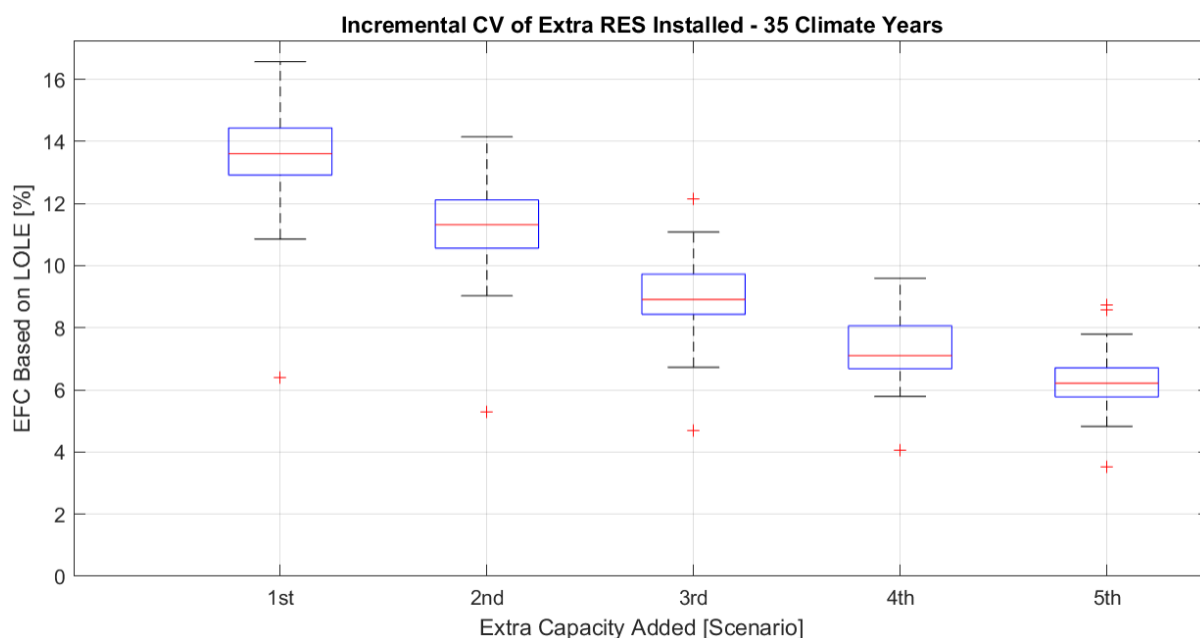
Από τον Πίνακα 10 παρατηρείται ότι παράλληλα με την αύξηση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύς των ΑΠΕ αυξάνεται το Capacity Value για τα δύο πρώτα σενάρια. Αυτό υποδηλώνει ότι στο σύστημα απαιτείται περαιτέρω αύξηση της ονομαστικής ισχύς των ΑΠΕ μιας και η συνεισφορά τους στην επάρκεια συνεχίζει να αυξάνεται.

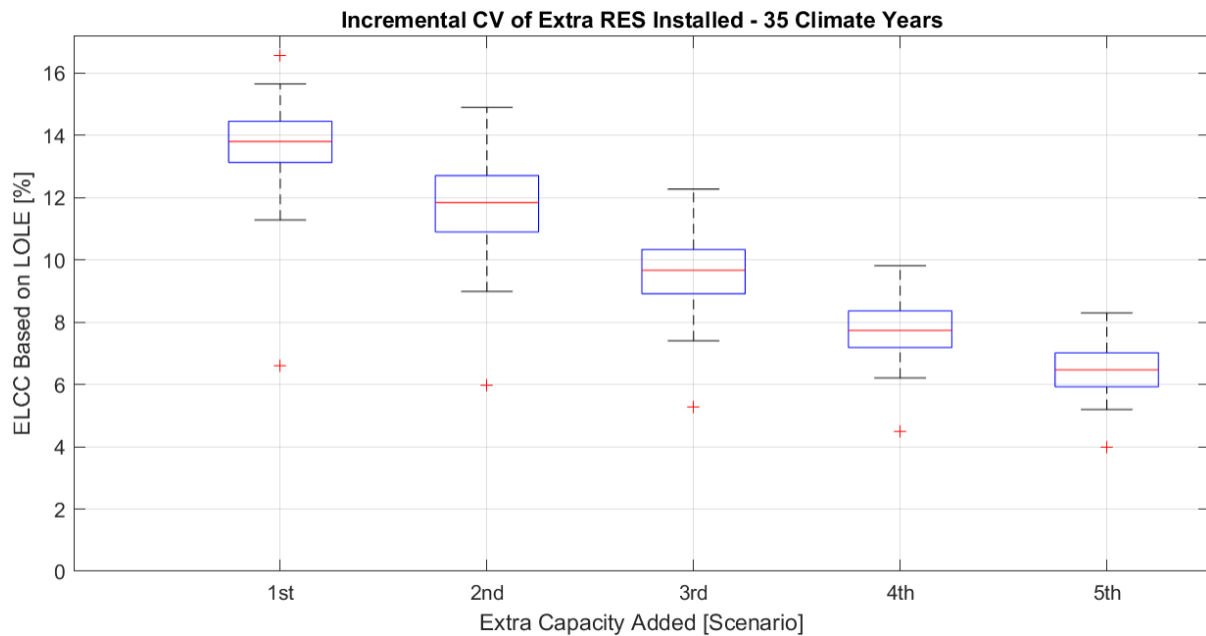
| ΑΠΕ               | Σενάριο 0 | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 4 | Σενάριο 5 |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Εγκατ. Ισχύς [GW] | 22,9      | 25,4      | 27,9      | 30,4      | 32,9      | 35,4      |
| EFC / EENS [%]    | 11,94     | 12,04     | 11,9      | 11,6      | 11,24     | 10,86     |
| EFC / LOLE [%]    | 11,85     | 12,02     | 11,94     | 11,69     | 11,36     | 11        |
| ELCC / EENS [%]   | 14,89     | 14,72     | 14,36     | 13,88     | 13,36     | 12,83     |
| ELCC / LOLE [%]   | 20,72     | 20,02     | 19,27     | 18,47     | 17,66     | 16,87     |
| EENS* [GWh]       | 9,02      | 6,18      | 3,91      | 2,75      | 2,07      | 1,64      |
| LOLE* [h]         | 21,47     | 13,28     | 8,64      | 6,14      | 4,61      | 3,59      |

Πίνακας 10: Σενάρια ταυτόχρονης ανάπτυξης ΑΠΕ με τους αντίστοιχους δείκτες επάρκειας και τα CV τους.

\*Οι υπολογισμοί των δεικτών επάρκειας σε κάθε σενάριο προέκυψαν ύστερα από την επαναδρομολόγηση των ΥΗΣ στο τέλος εισαγωγής του εκάστοτε μείγματος ΑΠΕ.

Από το Σχήμα 29, είναι εμφανές ότι σε όλα τα σενάρια, τα κάθε επιπλέον 2,5 GW που προστίθενται, συνεισφέρουν από 6% έως και 15% της αξίας τους σε όρους EFC. Συγκρίνοντας τα με τα αντίστοιχα διαγράμματα στις περιπτώσεις της ξεχωριστής ανάπτυξης της κάθε τεχνολογίας, η προσθήκη 5 GW συγκεκριμένης τεχνολογίας ΑΠΕ στο σύστημα έχει μικρότερη συνεισφορά από την προσθήκη 5 GW συνολικών μονάδων ΑΠΕ με λόγο 3:1:1 (11,18%).





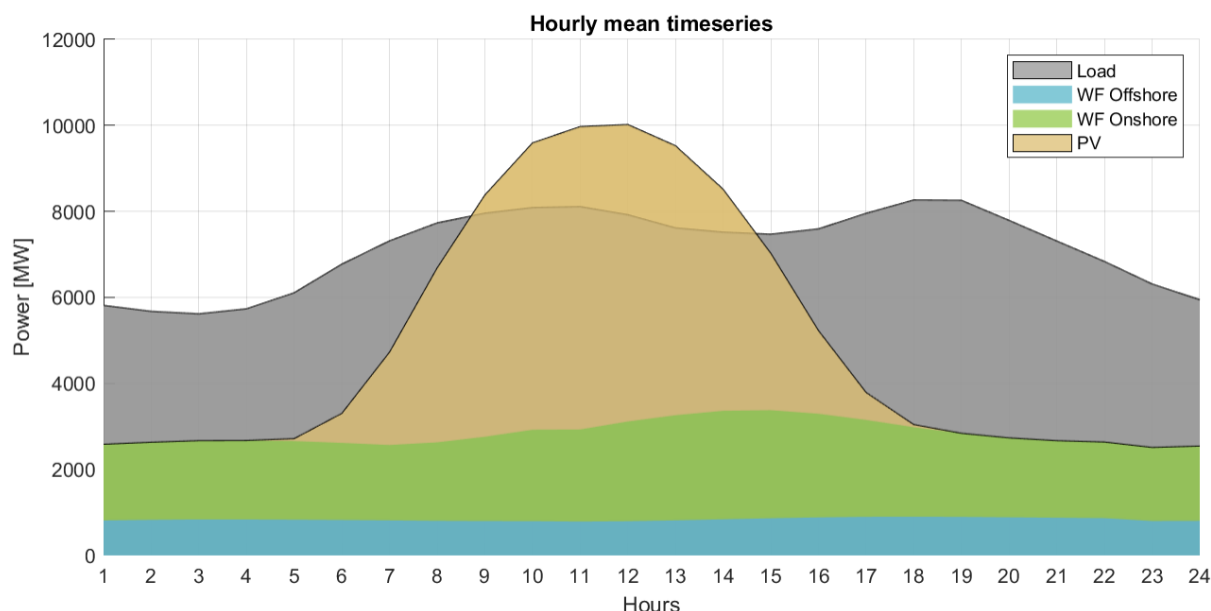
Σχήμα 29: Υπολογισμός του οριακού CV των επιπλέον ΑΠΕ στο σύστημα. (EFC και ELCC με βάση το LOLE)

## 5.2 Συμβολή Αποθηκευτικών Σταθμών στην Επάρκεια Ισχύος

Από τα τελευταία αποτελέσματα ανάπτυξης των ΑΠΕ, παρατηρήθηκε ότι η ανάπτυξη των ΦΒ βρίσκεται σε ένα σημείο κορεσμού καθώς το κάθε 1 επιπλέον GW που συνδέεται στο σύστημα δεν έχει την ίδια συνεισφορά στην επάρκεια του συγκριτικά με το προηγούμενο. Παράλληλα, εστιάζοντας στο ωριαίο προφίλ της κάθε χρονοσειράς (Σχήμα 27) γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι ΑΠΕ συνεισφέρουν περισσότερο τις μεσημεριανές ώρες, 9<sup>η</sup> -15<sup>η</sup> στο ωριαίο διάγραμμα, ενώ παρατηρείται αύξηση στη ζήτηση κατά τις απογευματινές ώρες, 17<sup>η</sup> ώρα και μετά η οποία δεν καλύπτεται. Οι συγκεκριμένες παρατηρήσεις δημιουργούν δύο προβλήματα:

- 1) υπάρχει πλεονάζουσα ενέργεια που δεν αξιοποιείται και θα χρειαστεί να περικοπεί και
- 2) το σύστημα δεν είναι αρκετά προσαρμοσμένο προκειμένου να διαχειριστεί τις απαιτήσεις του φορτίου και πρέπει να μετασχηματιστεί.

Αυτά τα δύο προβλήματα μπορούν να λυθούν πολύ εύκολα ενσωματώνοντας στο μοντέλο μονάδες αποθήκευσης.



Σχήμα 30: Μέση ωριαία χρονοσειρά Φορτίου και ΑΠΕ.

Σύμφωνα με τα όσα έχουν αναφερθεί στις Ενότητες 2 και 3, μέσα στα επόμενα χρόνια οι μονάδες αποθήκευσης τείνουν να αποτελούν έναν από τους πιο βασικούς παράγοντες στην εξισορρόπηση του φορτίου και τη συμβολή τους στην επάρκεια του συστήματος. Η ανάπτυξη του συστήματος μόνο με ΑΠΕ αποτελεί παρελθόν καθώς γίνεται εστίαση σε πιο έξυπνους και αποτελεσματικούς τρόπους μετασχηματισμού του ελληνικού συστήματος.

Συγκρίνοντας τα δεδομένα και τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει μέσα από τις διαφορετικές χρονοσειρές για τα 35 κλιματικά έτη, παρατηρείται ότι το έτος που συγκλίνει περισσότερο στο μέσο όρο των αποτελεσμάτων (EENS και LOLE μετά από ΑΠΕ, ΥΗΣ) είναι το κλιματικό έτος 2005. Έτσι, χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο έτος σαν έτος βάσης για τις χρονοσειρές και διατηρώντας τα ονομαστικά στοιχεία των ΑΠΕ και των ΥΗΣ σύμφωνα με τους Πίνακες 1 και 2 γίνεται ανάπτυξη του μοντέλου εντάσσοντας μονάδες αποθήκευσης.

Υπολειπόμενο Φορτίο Κλιματικού Έτους 2005:

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>Συνολική Ενέργεια</b> | 12,16 TWh |
| <b>Ετήσια Αιχμή</b>      | 7,69 GW   |

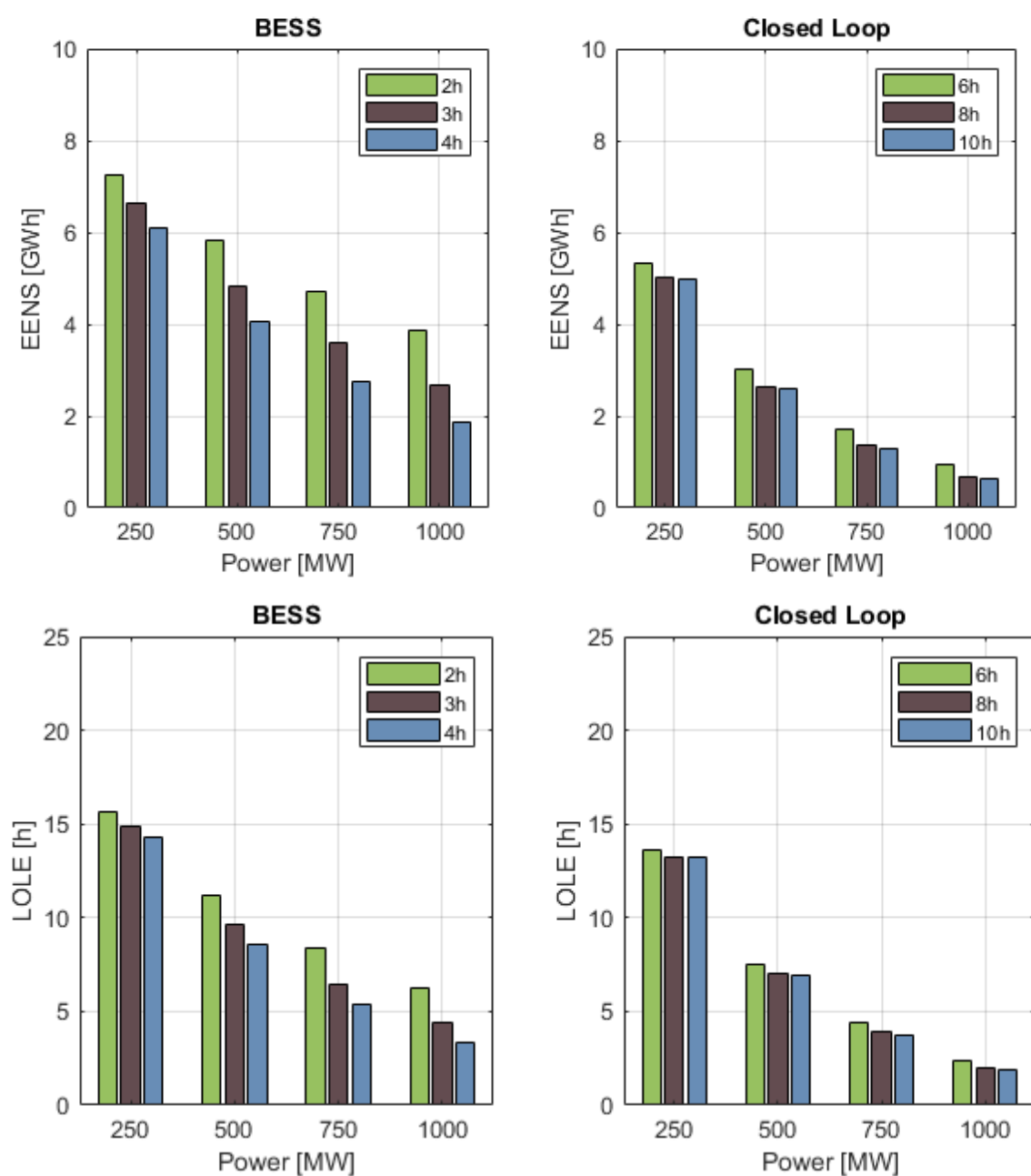
Επάρκεια Κλιματικού Έτους 2005:

|             |          |
|-------------|----------|
| <b>EENS</b> | 9137 MWh |
| <b>LOLE</b> | 20,71 h  |

Γίνεται χρήση των τεχνολογιών της Battery Energy Storage (BESS ή Μπαταρίες) και της Closed Loop (Αντλησιοταμίευση). Πραγματοποιήθηκαν μερικές διερευνήσεις για τις δύο τεχνολογίες τροποποιώντας κάθε φορά ορισμένα από τα χαρακτηριστικά τους. Διατηρώντας, ωστόσο, τον βαθμό απόδοσης για την BESS στο 0.9 και για την Closed Loop στο 0.75, τα σενάρια που ελέγχθηκαν ήταν τα εξής:

| Τεχνολογία  | Ισχύς [MW] | Ώρες Λειτουργίας [h] |   |    |
|-------------|------------|----------------------|---|----|
| BESS        | 250        | 2                    | 3 | 4  |
|             | 500        | 2                    | 3 | 4  |
|             | 750        | 2                    | 3 | 4  |
|             | 1000       | 2                    | 3 | 4  |
| Closed Loop | 250        | 6                    | 8 | 10 |
|             | 500        | 6                    | 8 | 10 |
|             | 750        | 6                    | 8 | 10 |
|             | 1000       | 6                    | 8 | 10 |

Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά BESS και Closed Loop κάτω από διάφορα σενάρια



Σχήμα 31: Απεικόνιση των EENS και LOLE για διαφορετικά σενάρια λειτουργίας BESS και Closed Loop.

Από το Σχήμα 31 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η ενέργεια μίας μονάδας τόσο αυτή συνεισφέρει στη βελτίωση της επάρκειας του συστήματος. Παράλληλα, συγκρίνοντας δύο μονάδες διαφορετικής τεχνολογίας αλλά ίδιας ισχύς και παραπλήσιας ενέργειας (π.χ. 750 MW, 4 και 6 ώρες αντίστοιχα) παρατηρείται πως ο ρόλος του βαθμού απόδοσης στη λειτουργία τους έχει βαρύνουσα σημασία καθώς με την BESS προκύπτει ένα LOLE κοντά στις 3 ώρες ενώ με την αντίστοιχη Closed Loop το LOLE ξεπερνάει τις 5 ώρες.

| EFC [%] / EENS | Ισχύς [MW] | Ώρες Λειτουργίας [h] |     |     |
|----------------|------------|----------------------|-----|-----|
|                |            | 2                    | 3   | 4   |
| BESS           | 250        | 40%                  | 55% | 68% |
|                | 500        | 38%                  | 52% | 65% |
|                | 750        | 36%                  | 50% | 63% |
|                | 1000       | 34%                  | 48% | 61% |
| EFC [%] / EENS | Ισχύς [MW] | Ώρες Λειτουργίας [h] |     |     |
|                |            | 6                    | 8   | 10  |
| Closed Loop    | 250        | 89%                  | 98% | 99% |
|                | 500        | 87%                  | 97% | 99% |
|                | 750        | 85%                  | 96% | 98% |
|                | 1000       | 83%                  | 94% | 97% |

Πίνακας 12: Υπολογισμός EFC με βάση το EENS για την κάθε μονάδα αποθήκευσης σε κάθε σενάριο.

| EFC [%] / LOLE | Ισχύς [MW] | Ώρες Λειτουργίας [h] |     |     |
|----------------|------------|----------------------|-----|-----|
|                |            | 2                    | 3   | 4   |
| BESS           | 250        | 64%                  | 75% | 82% |
|                | 500        | 62%                  | 73% | 83% |
|                | 750        | 57%                  | 70% | 79% |
|                | 1000       | 54%                  | 69% | 79% |
| EFC [%] / LOLE | Ισχύς [MW] | Ώρες Λειτουργίας [h] |     |     |
|                |            | 6                    | 8   | 10  |
| Closed Loop    | 250        | 92%                  | 98% | 99% |
|                | 500        | 94%                  | 98% | 99% |
|                | 750        | 92%                  | 98% | 99% |
|                | 1000       | 91%                  | 97% | 99% |

Πίνακας 13: Υπολογισμός EFC με βάση το LOLE για την κάθε μονάδα αποθήκευσης σε κάθε σενάριο.

Στους Πίνακες 12 και 13 παρατηρείται γενικότερα ότι οι μονάδες αποθήκευσης συνεισφέρουν περισσότερο στην επάρκεια του συστήματος σε όρους LOLE από ότι σε όρους EENS, για λόγους που έχουν ήδη αναλυθεί στην Ενότητα 3.

Σε περαιτέρω ανάλυση ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρατηρείται σε μία πιο ρεαλιστική ανάπτυξη του συστήματος αποθήκευσης όπου γίνεται ανάπτυξη και των δύο τεχνολογιών (BESS και Closed Loop) και εξετάζονται οι διάφορες πολιτικές με τις οποίες μπορούν να ενσωματωθούν στο υπάρχον σύστημα.

### 5.2.1 Συμβολή Πολλαπλών Αποθηκευτικών Σταθμών στην Επάρκεια Ισχύος μέσω Σειριακής Ένταξης

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές πολιτικές ενσωμάτωσης με τη βασική διαφορά τους να έγκειται στον τρόπο με τον οποίο οι τρεις μονάδες ενσωματώνονται στο σύστημα ισχύος.

Σύμφωνα με την Ενότητα 3, οι μονάδες αποθήκευσης που ακολουθούν την σειριακή πολιτική ενσωμάτωσης επεμβαίνουν στο σύστημα ξεχωριστά χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους την ύπαρξη άλλων μονάδων, χωρίς να έχουν συγκεκριμένο ορίζοντα και έχοντας ως μοναδικό γνώμονα λειτουργίας την κατάσταση του υπολειπόμενου φορτίου σε ωριαία βάση σε σχέση με τη διαθέσιμη θερμική παραγωγή.

Ωστόσο, καθώς υπάρχουν  $3! = 6$  διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους μπορούν να ενσωματωθούν στο σύστημα μας, επιλέχθηκαν τρεις από αυτούς οι οποίοι δίνουν προτεραιότητα στα βασικά χαρακτηριστικά των μονάδων, δηλαδή την ισχύ, την ενέργεια και τον βαθμό απόδοσης. Έτσι, στην περίπτωση που δίνεται προτεραιότητα στη μονάδα με την μεγαλύτερη ενέργεια, πρώτη θα λειτουργήσει η Closed Loop, έπειτα η BESS 2 και τέλος η BESS 1. Στην προκειμένη, μάλιστα, καθώς οι BESS 2 και BESS 1 έχουν την ίδια ενέργεια αλλά η BESS 2 έχει καλύτερο βαθμό απόδοσης, έχει και μεγαλύτερη προτεραιότητα.

Έτσι δημιουργούνται τρεις διαφορετικές παραλλαγές ως εξής:

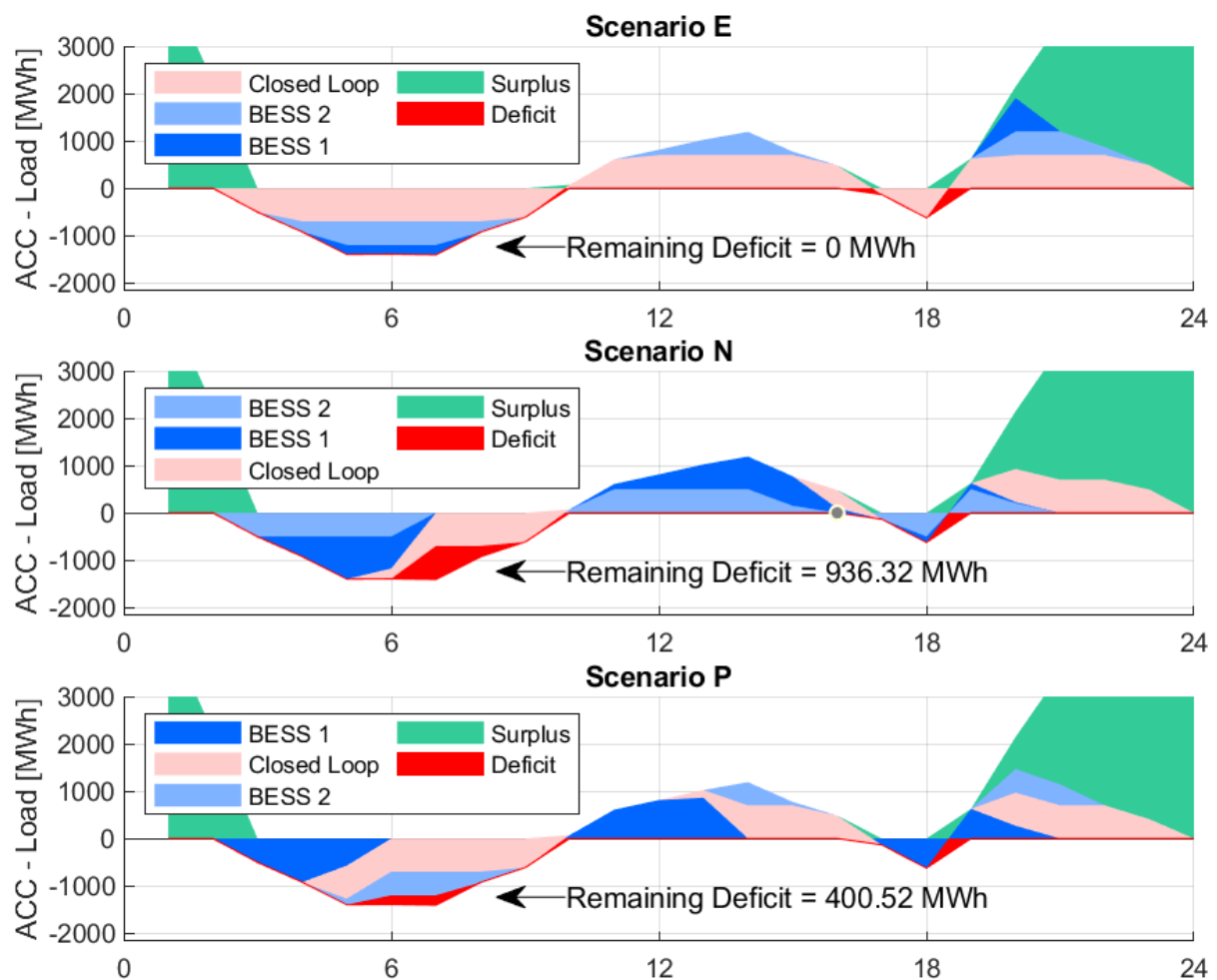
| Πολιτική Ενσωμάτωσης | Σειρά Προτεραιότητας |                |                |
|----------------------|----------------------|----------------|----------------|
|                      | 1 <sup>η</sup>       | 2 <sup>η</sup> | 3 <sup>η</sup> |
| Energy (E)           | Closed Loop          | BESS 2         | BESS 1         |
| Efficiency (N)       | BESS 2               | BESS 1         | Closed Loop    |
| Power (P)            | BESS 1               | Closed Loop    | BESS 2         |

Πίνακας 12: Απεικόνιση ακολουθίας ενσωμάτωσης μονάδων για κάθε χαρακτηριστικό τους

Στο Σχήμα 32 απεικονίζεται ένα τυπικό 24ωρο λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης. Παρατηρείται ότι στο σενάριο λειτουργίας που δίνεται προτεραιότητα εισαγωγής στη μονάδα με την μεγαλύτερη ενέργεια, οι δείκτες επάρκειας λαμβάνουν τις πιο χαμηλές τιμές τους, με το LOLE μάλιστα να ισούται περίπου με μίση ώρα ετησίως. Ακολουθούν το σενάριο που δίνεται προτεραιότητα στην ισχύ και τέλος σε αυτό με προτεραιότητα το βαθμό απόδοσης. Τα αποτελέσματα μπορούν εύκολα να διαπιστωθούν και γραφικά καθώς στο διάγραμμα, από την 2<sup>η</sup> έως και την 9<sup>η</sup> ώρα (8 συνεχόμενες ώρες) εντοπίζεται ένα συνεχόμενο έλλειμμα μέγιστου ύψους των 1400 MW και συνολικής ενέργειας 6,67 GWh. Γνωρίζοντας ότι και οι τρεις μονάδες είναι πλήρως φορτισμένες παρατηρείται ότι στο σενάριο E, η διαχείριση του ελλείμματος γίνεται πιο ομαλά. Αυτό συμβαίνει γιατί η Closed Loop με μέγιστη ικανότητα διαχείρισης ωριαίου ελλείμματος στα 700 MW για 7 συνεχόμενες ώρες (4900 MWh) διαχειρίζεται το μεγαλύτερο μέρος του ελλείμματος ενώ στο σενάριο N, όπου και διοχετεύεται τελευταία, έχοντας μέγιστη ωριαία ικανότητα τα 700 MW και χρονικό ορίζοντα ελλείμματος ακόμα 4 ώρες δεν είναι σε θέση να αξιοποιήσει την ενέργεια που της απομένει για να καλύψει το υπολειπόμενο έλλειμμα των 936,32 MWh.

Το φορτίο, στην κατάσταση που βρίσκεται πριν το σύστημα αποθήκευσης, έχει παρατηρηθεί ότι αποτελείται από πολλές κοιλάδες παρόμοιες με αυτές του Σχήματος 29. Δηλαδή δεν αποτελείται από υψηλά ωριαία ελλείμματα αλλά από διαδοχικά ελλείμματα μέσου ύψους του 1,5 GW και με σχετικά μεγάλη διάρκεια μέσα στη μέρα. Αυτό υποδεικνύει ότι σε ωριαία βάση το σύστημα αποθήκευσης είναι ικανό να διαχειριστεί το ύψος των ελλειμμάτων (Αθροιστική Ισχύς = 1000 + 500 + 700 = 2200 MW) αλλά η διάρκεια του συστήματος περιορίζεται στην αθροιστική του ενέργεια και στις μέγιστες ώρες λειτουργίας του. Έτσι, γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι η καλύτερη πολιτική αποτελεί η προτεραιοποίηση της μονάδας με τη μεγαλύτερη ενέργεια καθώς είναι αυτή που παίζει και τον μεγαλύτερο ρόλο στην βελτίωση της επάρκειας του συστήματος.

Ένα άλλο σημείο παρατήρησης, από την άλλη, αποτελεί και η αξιολόγηση των αντίστοιχων πλεονάσματος ενέργειας του συστήματος παραγωγής. Κατά την αντίστροφη λειτουργία των μονάδων αποθήκευσης, στο σενάριο N δίνεται προτεραιότητα φόρτισης στις BESS 1 και 2. Από το σχήμα παρατηρείται ότι η ενέργεια φόρτισης της Closed Loop τις ώρες 9-16 υπολείπεται της ενέργειας αποφόρτισης της τις ώρες 2-9. Έτσι, σε ένα σενάριο όπου υπάρχουν κατόπιν μεγαλύτερα ελλείμματα, η έλλειψη ικανότητας αναπλήρωσης της ενέργειας αποφόρτισης μπορεί να αποτελέσει σημαντικό τροχοπέδη για την κάλυψη της ζήτησης.



Σχήμα 32: Λειτουργία σειριακού συστήματος αποθήκευσης με διαφορετική προτεραιότητα  
α) Ενέργεια, β) Βαθμός Απόδοσης, γ) Ισχύς

### 5.2.2 Συμβολή Πολλαπλών Αποθηκευτικών Σταθμών στην Επάρκεια Ισχύος μέσω Παράλληλης Ένταξης

Στην Ενότητα 3.4.2 αναλύθηκε η παράλληλη ενσωμάτωση των μονάδων αποθήκευσης. Οι μονάδες ανταλλάσσουν ενέργεια με το σύστημα με ορισμένους συντελεστές αναλογίας οι οποίοι προκύπτουν από τα αντίστοιχα βασικά τους χαρακτηριστικά, την ισχύ, την ενέργεια και το βαθμό απόδοσης. Βέβαια, κατά την προσομοίωση ενδέχεται να υπάρξουν και περιπτώσεις που δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις προκειμένου να γίνει ανταλλαγή ενέργειας και να τηρηθεί το κριτήριο της αναλογικότητας. Στην διαδικασία της φόρτισης για παράδειγμα, εφόσον υπάρχει πλεόνασμα στο σύστημα, μία μονάδα είναι πιθανό να χρειάζεται λιγότερη ενέργεια από αυτή που της αναλογεί. Αντίστοιχα, στην διαδικασία της αποφόρτισης, δηλαδή όταν υπάρχει έλλειμμα στο σύστημα, μία μονάδα μπορεί να έχει λιγότερη ενέργεια από αυτή που απαιτείται για να καλύψει το ποσοστό του ελλείμματος που της αναλογεί. Έτσι, το υποσύστημα, στην προκειμένη, συνεχίζει να λειτουργεί μεταβάλλοντας τους συντελεστές λειτουργίας του ώστε να γίνεται η μέγιστη δυνατή ανταλλαγή ενέργειας με το υπόλοιπο σύστημα παραγωγής. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο άλλωστε, ο κανόνας της αναλογικότητας εφαρμόζεται υπό τον όρο ότι θα εξυπηρετηθεί η ζήτηση του φορτίου κατά το καλύτερο δυνατόν. Εν γένει, μπορούν να προκύψουν τρεις διαφορετικές παραλλαγές της συγκεκριμένης πολιτικής.

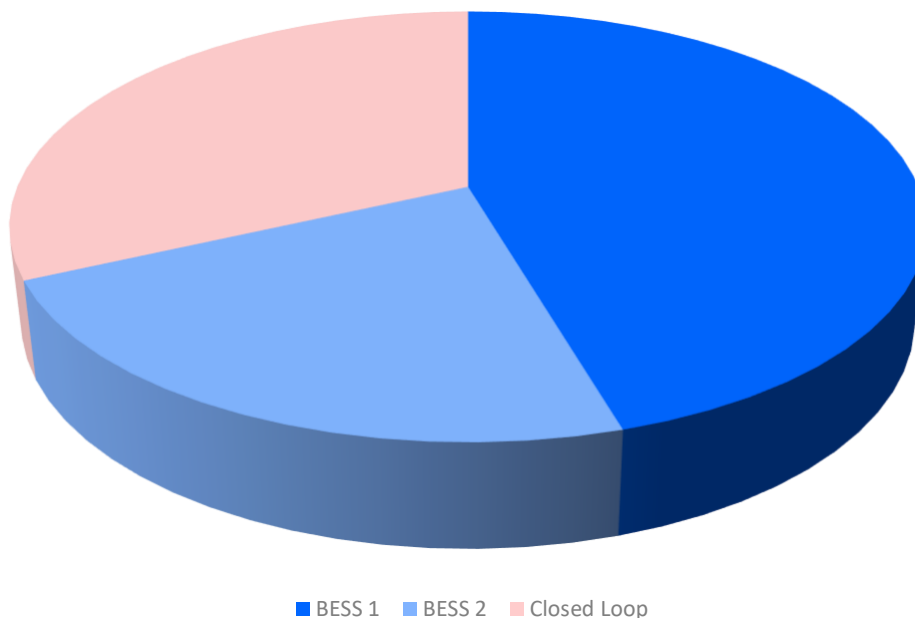
➤ ΣΕΝΑΡΙΟ Αναλογικής Συνεισφοράς με βάση την Ισχύ – Ratio Power (RP)

Σύμφωνα με τον αρχικό πίνακα το σύστημα αποτελείται από τρεις μονάδες και τις αντίστοιχες ισχύς τους.

| Μονάδα Αποθήκευσης | P - Ισχύς |
|--------------------|-----------|
| BESS 1             | 1000 MW   |
| BESS 2             | 500 MW    |
| Closed Loop        | 700 MW    |

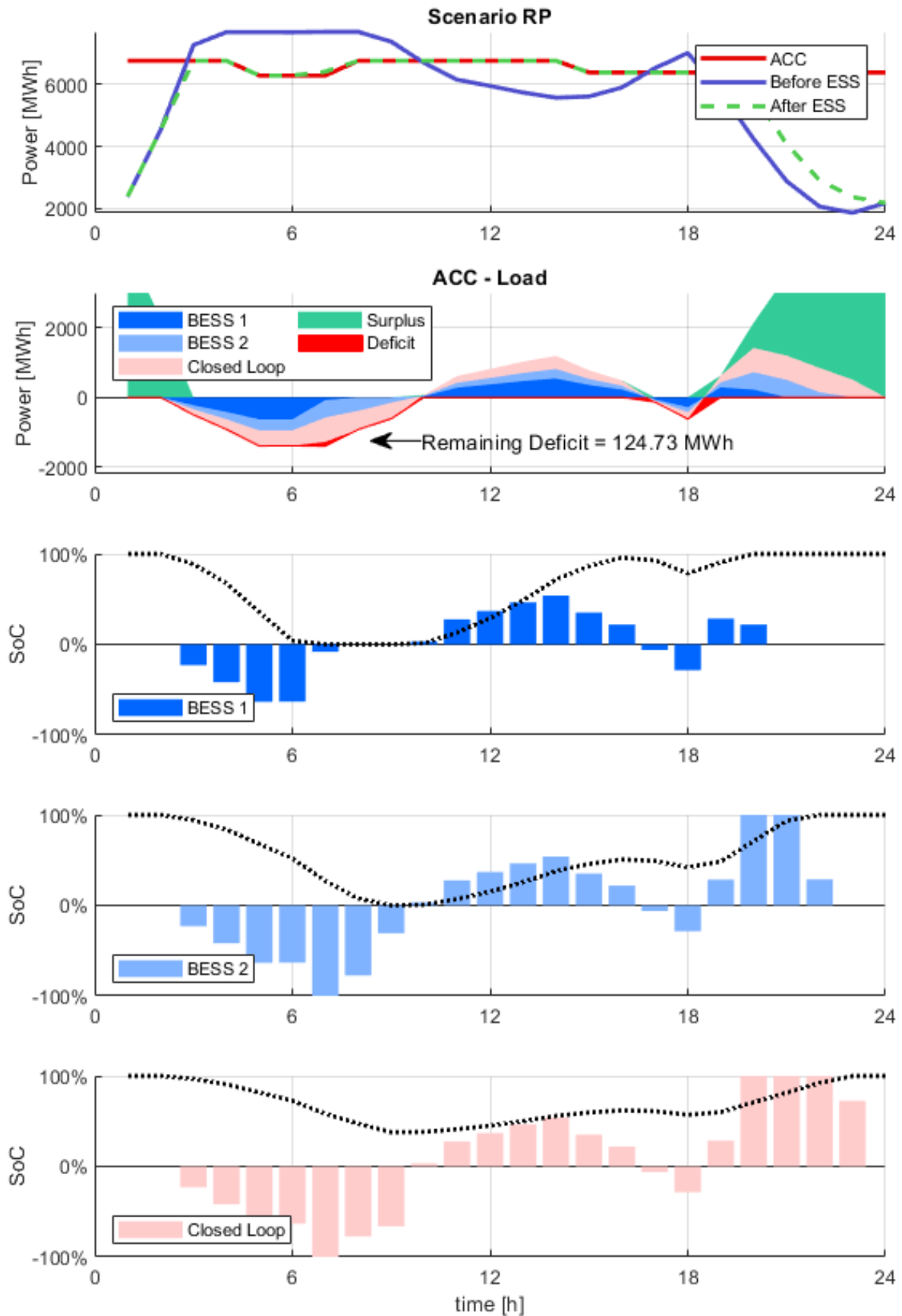
Η συνολική ισχύς του αποθηκευτικού συστήματος ανέρχεται στα 2200 MW και επομένως οι αντίστοιχοι συντελεστές αναλογικότητας προκύπτουν ως εξής:

- Συντελεστής BESS 1 =  $\frac{\text{Ισχύς BESS 1}}{\text{Συνολική Ισχύς}} \times 100\% = \frac{1000 \text{ MW}}{2200 \text{ MW}} \times 100\% \approx 45,45\%$
- Συντελεστής BESS 2 =  $\frac{\text{Ισχύς BESS 2}}{\text{Συνολική Ισχύς}} \times 100\% = \frac{500 \text{ MW}}{2200 \text{ MW}} \times 100\% \approx 22,72\%$
- Συντελεστής Closed Loop =  $\frac{\text{Ισχύς Closed Loop}}{\text{Συνολική Ισχύς}} \times 100\% = \frac{700 \text{ MW}}{2200 \text{ MW}} \times 100\% \approx 31,83\%$



Σχήμα 33: Συντελεστές λειτουργίας μονάδων αποθήκευσης στην παράλληλη πολιτική ενσωμάτωσης με βάση την ισχύ

Από το Σχήμα 34 διαπιστώνεται ότι η παράλληλη πολιτική με κριτήριο την ισχύ των μονάδων καλύπτει ένα πολύ μεγάλο μέρος του αρχικού ελλείμματος των 6,67 GWh, αδυνατώντας να καλύψει τις 124,73 MWh από αυτό. Την στιγμή που το σύστημα παύει να είναι ελλειμματικό παρατηρούμε ότι η στάθμη της ενέργειας της Closed Loop βρίσκεται περίπου στο 40%. Αυτό υποδηλώνει ότι υπάρχει ακόμα διαθέσιμη ενέργεια η οποία θα μπορούσε να έχει αξιοποιηθεί για την κάλυψη του εναπομένοντος ελλείμματος. Καθώς όμως το σύστημα πληροί της προϋποθέσεις για να τεθεί ο κανόνας της αναλογικότητας σε ισχύ και όσο οι μονάδες έχουν την απαιτούμενη ενέργεια, είναι άμεσο επακόλουθο ότι κάθε ώρα η Closed Loop θα συνετελεί στο 32% της κάλυψης του υπολειπόμενου φορτίου.



Σχήμα 34: Τυπική αναπαράσταση λειτουργίας μονάδων αποθήκευσης υπό σενάριο παράλληλης ενσωμάτωσης RP

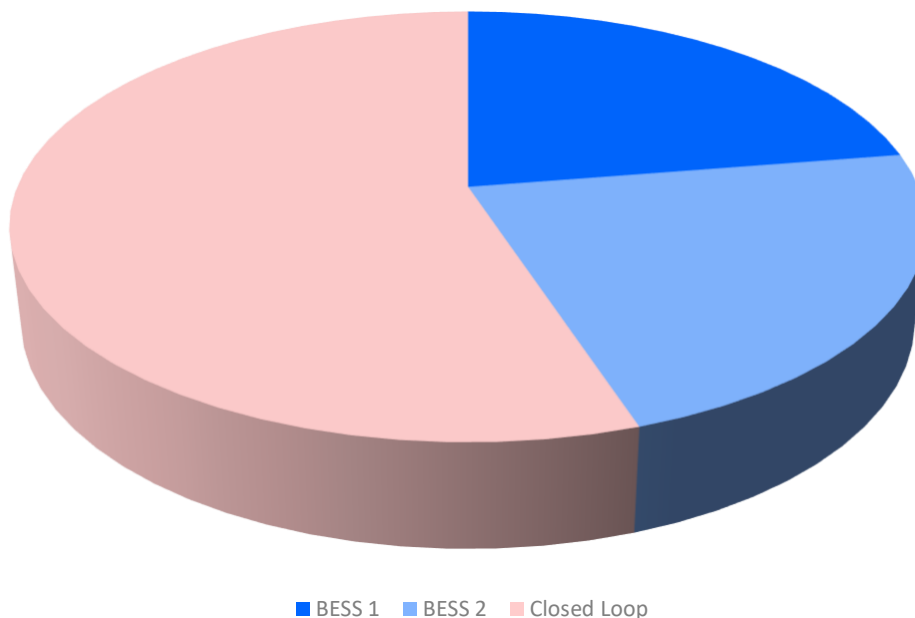
➤ ΣΕΝΑΡΙΟ Αναλογικής Συνεισφοράς με βάση την Ενέργεια - Ratio Energy (RE)

Σύμφωνα με τον αρχικό πίνακα το σύστημα αποτελείται από τρεις μονάδες και τις αντίστοιχες ενέργειες τους.

| Μονάδα Αποθήκευσης | E – Ενέργεια |
|--------------------|--------------|
| BESS 1             | 2000 MW      |
| BESS 2             | 2000 MW      |
| Closed Loop        | 4900 MW      |

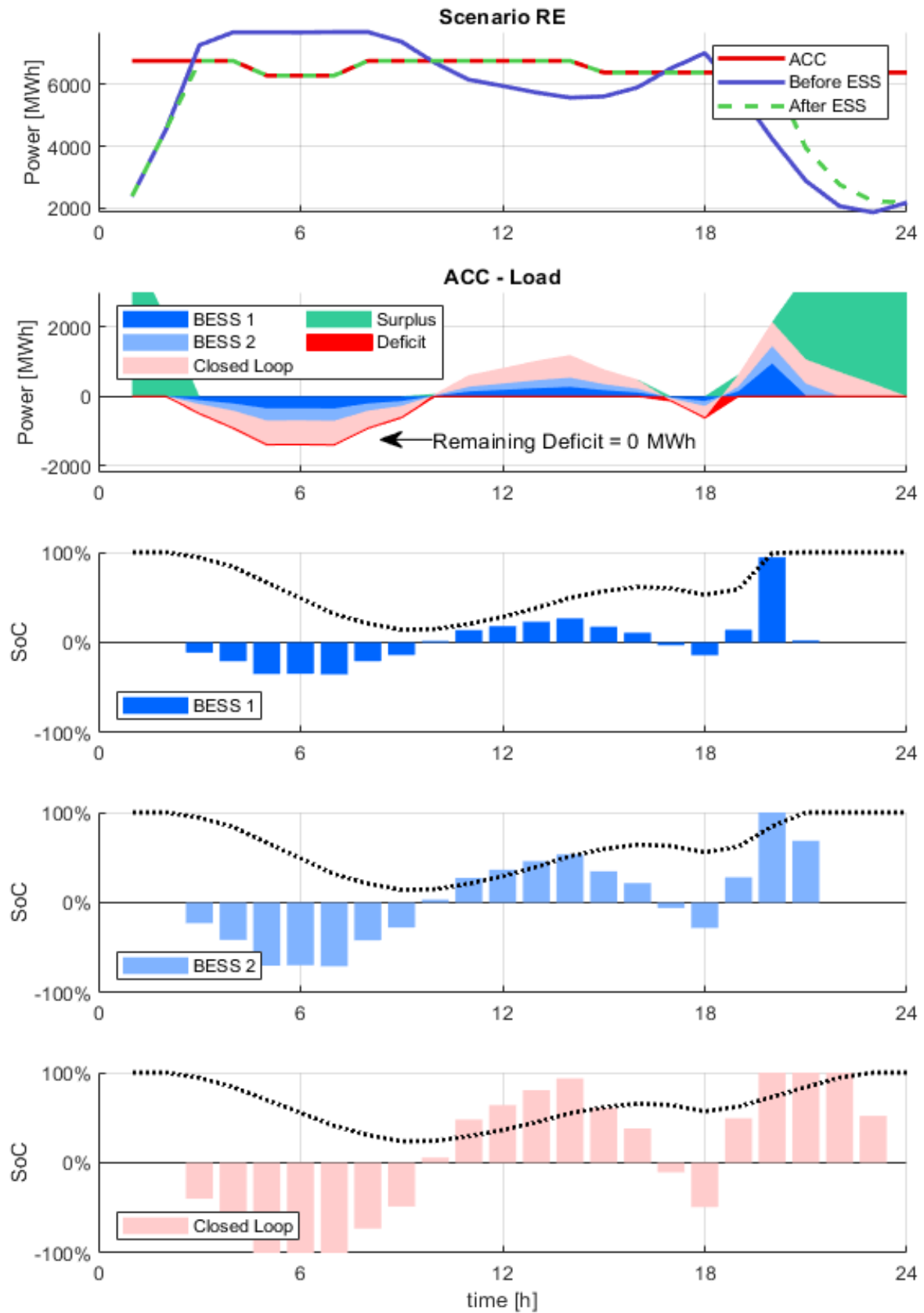
Η συνολική ισχύς του συστήματος ανέρχεται στα 8900 MW και επομένως οι αντίστοιχοι συντελεστές αναλογικότητας προκύπτουν ως εξής:

- Συντελεστής BESS 1=  $\frac{\text{Ενέργεια BESS 1}}{\text{Συνολική Ενέργεια}} \times 100\% = \frac{2000 \text{ MW}}{8900 \text{ MW}} \times 100\% \approx 22,47\%$
- Συντελεστής BESS 2=  $\frac{\text{Ενέργεια BESS 2}}{\text{Συνολική Ενέργεια}} \times 100\% = \frac{2000 \text{ MW}}{8900 \text{ MW}} \times 100\% \approx 22,47\%$
- Συντελεστής Closed Loop=  $\frac{\text{Ενέργεια Closed Loop}}{\text{Συνολική Ενέργεια}} \times 100\% = \frac{4900 \text{ MW}}{8900 \text{ MW}} \times 100\% \approx 55,06\%$



Σχήμα 35: Συντελεστές λειτουργίας μονάδων αποθήκευσης στην παράλληλη πολιτική ενσωμάτωσης με βάση την ενέργεια.

Από το Σχήμα 36 διαπιστώνεται ότι η παράλληλη πολιτική με κριτήριο την ενέργεια των μονάδων καλύπτει όλο το αρχικό έλλειμμα των 6,67 GWh. Τη στιγμή που το σύστημα παύει να είναι ελλειμματικό παρατηρείται ότι η στάθμη της ενέργειας των BESS 1, BESS 2 και Closed Loop βρίσκεται περίπου στο 14%, 14% και 24% αντίστοιχα. Αυτό υποδηλώνει ότι έγινε σωστός καταμερισμός ενέργειας ανάμεσα στις μονάδες και αξιοποιήθηκε η μέγιστη δυνατή προκειμένου να εξυπηρετηθεί το φορτίο. Από ότι φαίνεται και σε αυτό το σενάριο μεγάλο ρόλο εξυπηρετεί η λειτουργία της Closed Loop, η οποία στην προκειμένη συντελεί στο 55 % της ενέργειας που ανταλλάσσεται με το ΣΗΕ κάθε ώρα.



Σχήμα 36: Τυπική αναπαράσταση λειτουργίας μονάδων αποθήκευσης υπό σενάριο παράλληλης ενσωμάτωσης RE

- ΣΕΝΑΡΙΟ Αναλογικής συμπεριφοράς με βάση τις ώρες λειτουργίας - Ratio Hour (RH)

Σύμφωνα με τον αρχικό πίνακα το σύστημα αποτελείται από τρεις μονάδες και τις αντίστοιχες ώρες λειτουργίας τους υπό ονομαστική ισχύ (E/P).

| Μονάδα Αποθήκευσης | H – Ώρες |
|--------------------|----------|
| BESS 1             | 2        |
| BESS 2             | 4        |
| Closed Loop        | 7        |

Αφού υλοποιήθηκε η ίδια διεργασία που περιεγράφηκε στις προηγούμενες δύο διερευνήσεις παράλληλης πολιτικής ενσωμάτωσης, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα αναφορικά με την επάρκεια του συστήματος. Επομένως, στο παρόν μοντέλο η περαιτέρω ανάλυση του συγκεκριμένου σεναρίου δεν κρίνεται απαραίτητη.

### 5.2.3 Εκτίμηση Συμβολής Αποθηκευτικών Σταθμών στην Επάρκεια Ισχύος μέσω EFC

Στους Πίνακες 9 και 10 παρουσιάζονται οι δείκτες επάρκειας όπως προέκυψαν μέσω των έξι διαφορετικών διερευνήσεων.

| Δείκτες Αξιοπιστίας | Base Case | Scenario E | Scenario N | Scenario P |
|---------------------|-----------|------------|------------|------------|
| EENS [MWh]          | 9.137     | 330        | 582        | 380        |
| LOLE [h]            | 21        | 0,52       | 1,29       | 0,93       |

Πίνακας 14: Δείκτες Αξιοπιστίας στην σειριακή πολιτική εισαγωγής

| Δείκτες Αξιοπιστίας | Base Case | Scenario RE | Scenario RH | Scenario RP |
|---------------------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| EENS [MWh]          | 9.137     | 327         | 327         | 376         |
| LOLE [h]            | 21        | 0,52        | 0,52        | 0,77        |

Πίνακας 15: Δείκτες Αξιοπιστίας στην παράλληλη πολιτική εισαγωγής

Παρατηρήθηκε ότι η παράλληλη πολιτική εισαγωγής των μονάδων στο σύστημα επιφέρει εν γένει καλύτερα αποτελέσματα από την σειριακή. Τα δύο καλύτερα σενάρια που προκύπτουν είναι το Σενάριο E για την σειριακή πολιτική και το Σενάριο RE για την παράλληλη πολιτική. Έτσι, και στις δύο περιπτώσεις είναι προφανές ότι η ενέργεια παίζει καταλυτικό ρόλο στην λειτουργία του συστήματος. Είτε αν ορίζεται ως χαρακτηριστικό προτεραιότητας είτε ως συντελεστής αναλογικότητας εστιάζει στην αξιοποίηση της Closed Loop και της ενέργειας της (55 % της συνολικής ενέργειας του συστήματος αποθήκευσης).

Παρόλα αυτά, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στην αξιολόγηση της κάθε μονάδας ξεχωριστά στο κάθε ένα από τα 5 σενάρια (τα σενάρια RE και RH θεωρούνται πανομοιότυπα και δεν θα γίνει περαιτέρω σύγκριση μεταξύ τους). Έτσι, απεικονίζονται τα αποτελέσματα του Capacity Value που προέκυψαν ύστερα από υπολογισμό του EFC μέσω του EENS και του LOLE για την κάθε περίπτωση.

Ο διαδικασία υπολογισμού του EFC σημειώνει σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις δύο πολιτικές εισαγωγής. Ο υπολογισμός του EFC στην σειριακή πολιτική δεν παρουσιάζει αλλαγές καθώς πραγματοποιείται με στιγμιαία αφαίρεση της χρονοσειράς συμπεριφοράς της μονάδας που μας ενδιαφέρει από το υπολειπόμενο φορτίο. Στην παράλληλη πολιτική ωστόσο, παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές ως προς την συμπεριφορά της κάθε μονάδας. Εφόσον αφαιρεθεί η χρονοσειρά λειτουργίας μίας μονάδας από το υπολειπόμενο φορτίο, οι μονάδες που παραμένουν συνδεδεμένες με το σύστημα επαναπρογραμματίζονται και λειτουργούν σαν καινούργιο υποσύστημα. Έτσι δημιουργείται το σημείο αφετηρίας όπως έχει περιγραφεί στον αλγόριθμο της Ενότητας 3.3.1 (Base Case). Η μονάδα που αφαιρέθηκε συνδέεται στο υποσύστημα και προγραμματίζεται ξεχωριστά και εκ νέου προκειμένου να υπολογιστούν οι δείκτες επάρκειας του σημείου τερματισμού του αλγορίθμου (Test Case). Έτσι, ανάμεσα σε αυτά τα δύο σημεία, προκύπτει το EFC της δυναμικής λειτουργίας της εκάστοτε μονάδας.

| EFC Based on EENS [%] |        |        |             |
|-----------------------|--------|--------|-------------|
| Τεχνολογία<br>Σενάριο | BESS 1 | BESS 2 | Closed Loop |
| E                     | 31,29  | 60,02  | 92,89       |
| N                     | 34,01  | 64,9   | 93,77       |
| P                     | 34,11  | 72,42  | 94,43       |
| RP                    | 32,26  | 70,74  | 92,78       |
| RE                    | 31,51  | 67,59  | 93,72       |

Πίνακας 16: Αποτελέσματα EFC βάσει EENS για τις Μονάδες Αποθήκευσης σε κάθε σενάριο

| EFC Based on LOLE [%] |        |        |             |
|-----------------------|--------|--------|-------------|
| Τεχνολογία<br>Σενάριο | BESS 1 | BESS 2 | Closed Loop |
| E                     | 51,9   | 79,08  | 94,58       |
| N                     | 57,61  | 83,24  | 93,99       |
| P                     | 53,86  | 85,04  | 95,88       |
| RP                    | 47,65  | 75,71  | 93,07       |
| RE                    | 47,2   | 63,75  | 92,76       |

Πίνακας 17: Αποτελέσματα EFC βάσει LOLE για τις Μονάδες Αποθήκευσης σε κάθε σενάριο

Από τους Πίνακες 13 και 14 προκύπτει ότι η Closed Loop είναι η μονάδα που έχει την μεγαλύτερη συνεισφορά σε όρους επάρκειας. Τόσο με βάση το EENS όσο και το LOLE, το Capacity Value της αντλησιοταμίευσης κυμαίνεται στο 93-95 % μέσω οποιουδήποτε σεναρίου λειτουργίας. Ακολουθεί η BESS 2, με το μέγιστο CV της να ανέρχεται στο 72 % και 85 % με βάση το EENS και το LOLE αντίστοιχα, υπό το σενάριο στο οποίο επεμβαίνει τελευταία στο σύστημα λόγω της ισχύος της (δηλαδή το σενάριο P). Τέλος για την μονάδα BESS 1 παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της για το EFC μέσω του EENS υπολογίζεται στην μεθοδολογία P (όπου εισέρχεται πρώτη στο σύστημα) ενώ υψηλό EFC μέσω του LOLE έχει υπολογιστεί τόσο για τη μεθοδολογία N (57,61 % - 2<sup>η</sup> σε προτεραιότητα) όσο και για τη μεθοδολογία P (53,86 % - 1<sup>η</sup> σε προτεραιότητα). Σε γενικές γραμμές παρατηρείται ότι οι μετρήσεις για το EFC της BESS 1 με βάση το LOLE είναι σχεδόν 1,6 φορές παραπάνω των αντίστοιχων μετρήσεων για το EFC με βάση το EENS. Αυτό συνεπάγεται ότι κατά τη διαδικασία εισαγωγής της BESS 1 στο σύστημα, η συμπεριφορά της βοηθάει στην μείωση του LOLE περισσότερο από ότι στη μείωση του EENS. Αυτό μπορεί εύκολα να επαληθευτεί μελετώντας τη συμπεριφορά των ελλειμμάτων στο υπολειπόμενο φορτίο.

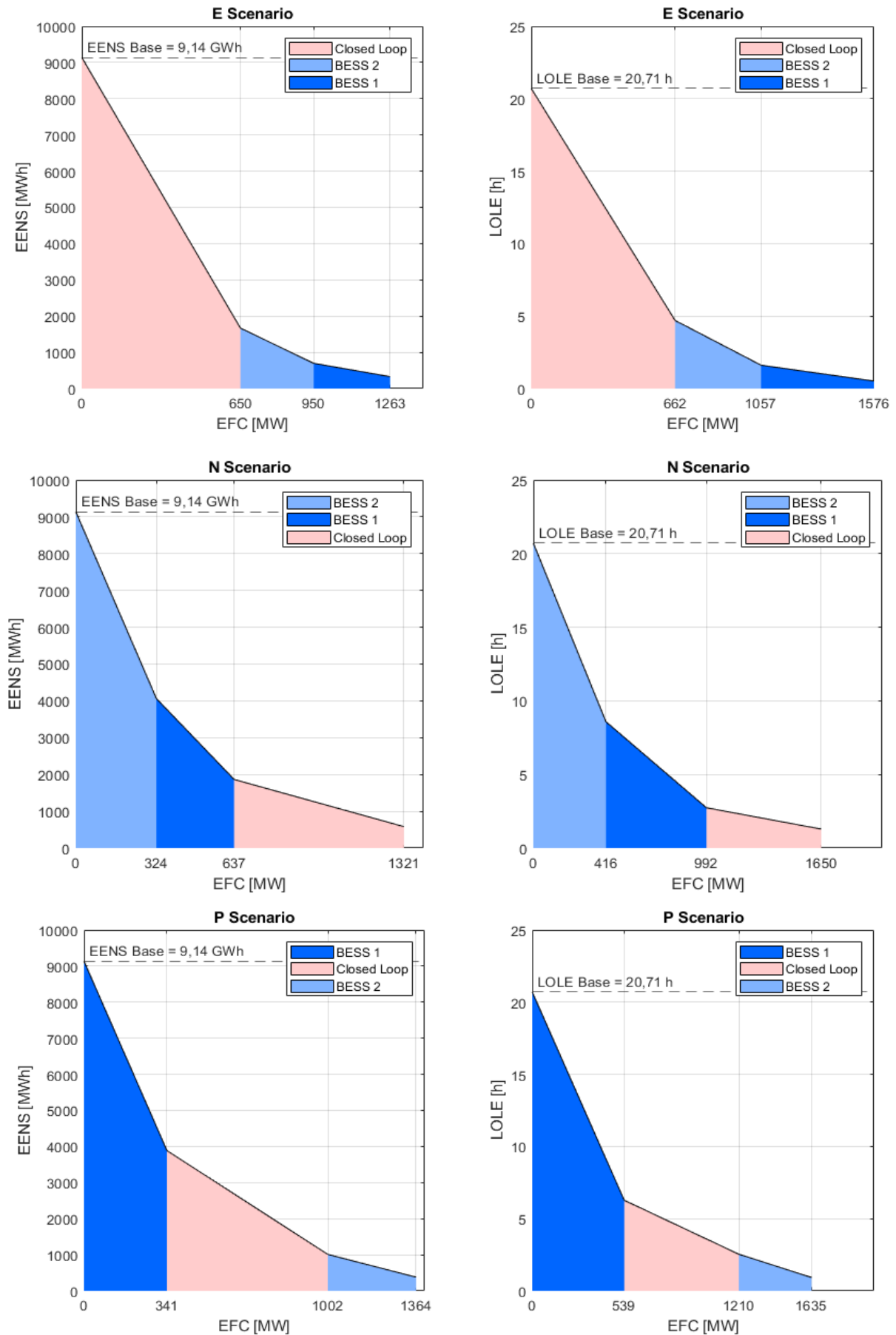
Στο Σχήμα 29 απεικονίστηκε ένα τυπικό έλλειμμα στο σύστημα και η αντίστοιχη συμπεριφορά των μονάδων κάτω από τα σενάρια E, N, P. Οι ελλειμματικές ώρες παρατηρείται ότι είναι διαδοχικές και έχουν μια μέση διάρκεια 6 ωρών, ενώ σχηματίζουν μία κοιλάδα στο διάγραμμα με το μέγιστο ωριαίο έλλειμμα να ανέρχεται στις 1200 MWh. Το συγκεκριμένο σχήμα πληροφορεί ότι οι ελλειμματικές ώρες συνήθως δεν κορυφώνονται ακαριαία στο σύστημα αλλά το έλλειμμα μεγιστοποιείται σταδιακά. Έτσι, από τη στιγμή που το σύστημα περνάει σε ελλειμματική κατάσταση ( $ACC < Load$ ) άρα και την κατάσταση στην οποία οι μονάδες αποθήκευσης αποφορτίζουν, τις πρώτες ώρες τα ελλείμματα είναι σχετικά πιο μικρά από ότι στη συνέχεια. Η BESS 1 έχει μέγιστη διάρκεια τις 2 ώρες κάτω από την ισχύ των 1000 MW το οποίο σημαίνει ότι εφόσον έχει να καλύψει διαδοχικά ελλείμματα των 1000 MW, η ενέργεια της θα έχει εξαντληθεί μέσα σε 2 ώρες.

Μελετώντας τη συμπεριφορά του υπολειπόμενου φορτίου σε μακροπρόθεσμη βάση, παρατηρήθηκε ότι το μέσο μέγιστο ωριαίο έλλειμμα (δηλαδή για τις 10.000 χρονοσειρές) πριν τις μονάδες αποθήκευσης ανέρχεται στα 870 MW. Αυτό σημαίνει ότι η μόνη μονάδα που πληροί τις τεχνικές προϋποθέσεις, εφόσον φυσικά έχει και την απαραίτητη διαθέσιμη ενέργεια να καλύψει το συγκεκριμένο έλλειμμα, είναι η BESS 1. Ωστόσο, όπως περιεγράφηκε, η λειτουργία των μονάδων έγκειται στη διάρκεια του ελλείμματος καθαυτή και όχι τόσο στο ύψος της ανεπάρκειας. Γι' αυτό άλλωστε τα πιο επαρκή συστήματα προκύπτουν μέσω των σεναρίων E, RE, όπου δίνεται προτεραιότητα στην ενέργεια των μονάδων. Αναφορικά με την μονάδα BESS 1, όμως, η λειτουργία της έγκειται στην κάλυψη ολόκληρων των ελλειμμάτων. Ο περιορισμός της ισχύς λειτουργίας της είναι στο ύψος του 1 GW που σε όρους αναλογικότητας με βάση την ισχύ, κατέχει και τον μεγαλύτερο συντελεστή συμμετοχής στο σύστημα. Έτσι, όταν το σύστημα αποθήκευσης έρχεται αντιμέτωπο με ελλείμματα μεγαλύτερα των 700 MW (δηλαδή ελλείμματα που δεν μπορούν να καλύψουν πλήρως οι BESS 2 και η Closed Loop) η συγκεκριμένη μονάδα παίζει πρωταγωνιστικό ρόλο και μάλιστα η συνεισφορά της στην επάρκεια είναι καλύτερη στους όρους του LOLE. Στην περίπτωση,

λοιπόν, που επεμβαίνει στο σύστημα με μεγάλη προτεραιότητα (σενάρια N, P, RP) είναι σε θέση να καλύψει πλήρως τα πρώτα ελλείμματα που συναντάει και η λειτουργία της επηρεάζει άμεσα τη μείωση του LOLE. Από την άλλη, στην περίπτωση που επεμβαίνει με μικρότερη προτεραιότητα στο σύστημα (σενάρια E, RE) ο ρόλος της είναι περισσότερο επικουρικός καθώς οι άλλες μονάδες έχουν ήδη καλύψει μεγάλο μέρος του ελλείμματος, όμως παραμένουν ορισμένα μικρά ωριαία ελλείμματα που εν τέλει καλύπτει η BESS 1 προκαλώντας και πάλι άμεση μείωση του LOLE.

Να υπενθυμιστεί ότι το LOLE είναι ένας δείκτης επάρκειας που είναι διακριτός. Δηλαδή η βασική διαφορά ανάμεσα στην μείωση του EENS και του LOLE είναι ότι οποιαδήποτε κατακόρυφη μετατόπιση στη χρονοσειρά των θερμικών (λειτουργία EFC) θα έχει άμεσο αντίκτυπο στο EENS (ελλειμματικές ώρες με  $ENS = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  MWh θα έχουν  $ENS' = [x_1 + EFC, x_2 + EFC, \dots, x_n + EFC]$  MWh), ενώ το LOLE δεν μεταβάλλεται παρόμοια. Υπό την προσέγγιση της βελτίωσης της επάρκειας επομένως και βάση της συμπεριφοράς του φορτίου που μόλις αναλύθηκε, είναι αναμενόμενο η BESS 2 και η Closed Loop να συνεισφέρουν τόσο μακροπρόθεσμα (LOLE) όσο και βραχυπρόθεσμα (EENS), ενώ η BESS 1 να συνεισφέρει περισσότερο μακροπρόθεσμα.

Στα παρακάτω διαγράμματα αναπαρίσταται γραφικά η συνεισφορά της κάθε μονάδας στην επάρκεια του συστήματος στη σειριακή πολιτική ενσωμάτωσής τους. Έτσι φαίνεται γραφικά ότι η BESS 1 συνεισφέρει αρκετά στη μείωση του LOLE του συστήματος, οποιαδήποτε θέση προτεραιότητας και αν κατέχει ενώ ιδιαίτερη μείωση στους δείκτες επάρκειας παρατηρείται στην περίπτωση που η Closed Loop λειτουργεί πρώτη, επαληθεύοντας τα όσα αναλύθηκαν.



Σχήμα 37: Σταδιακός Υπολογισμός Capacity Value της κάθε μονάδας αποθήκευσης συναρτήσει του EENS και του LOLE για τα σενάρια σειριακής λειτουργίας E, N, P.

## 5.2.4 Σύγκριση Σεναρίων Λειτουργίας Συστημάτων Αποθήκευσης

Ως τελικό σημείο αναφοράς, οι επιμέρους μονάδες αποθήκευσης αθροίστηκαν και πραγματοποιήθηκε επανάληψη της προσομοίωσης με μία ενιαία συγκεντρωτική μονάδα αποθήκευσης, της οποίας η χωρητικότητα ισούται με το άθροισμα των επιμέρους μονάδων. Ακολούθησε σύγκριση των συστημάτων αυτών με τα αντίστοιχα της προηγούμενης ενότητας, θεωρώντας το σύστημα ως ενιαίο. Στη συνέχεια, έγινε υπολογισμός των αντίστοιχων δεικτών επάρκειας.

| Μονάδα Αποθήκευσης | P - Ισχύς      | E - Ενέργεια    | N - Βαθμός Απόδοσης     |
|--------------------|----------------|-----------------|-------------------------|
| BESS 1             | 1000 MW        | 2000 MWh        | 0,85                    |
| BESS 2             | 500 MW         | 2000 MWh        | 0,9                     |
| Closed Loop        | 700 MW         | 4900 MWh        | 0,75                    |
| <b>Aggregated</b>  | <b>2200 MW</b> | <b>8900 MWh</b> | <b>0,83<sup>1</sup></b> |

Πίνακας 18: Χαρακτηριστικά Aggregated Μονάδας με βάση τα αθροιστικά χαρακτηριστικά των επιμέρους μονάδων

Έπειτα υπολογίστηκε το επίπεδο επάρκειας του συστήματος που προκύπτει μέσω της λειτουργίας της Aggregated μονάδας, ενώ παράλληλα υπολογίστηκε το αντίστοιχο EFC για το EENS και το LOLE αντίστοιχα. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα θεωρούνται σαν σημείο αναφοράς για τις υπόλοιπες μεθοδολογίες.

|           | Σενάριο    | Δείκτες Επάρκειας |             | Capacity Value [%] |           |
|-----------|------------|-------------------|-------------|--------------------|-----------|
|           |            | EENS [MWh]        | LOLE [h]    | EFC(EENS)          | EFC(LOLE) |
| Σειριακά  | E          | <b>330</b>        | <b>0,52</b> | <b>53</b>          | <b>64</b> |
|           | N          | 582               | 1,29        | 45                 | 51        |
|           | P          | 380               | 0,93        | 51                 | 56        |
| Παράλληλα | RE         | <b>327</b>        | <b>0,52</b> | <b>53</b>          | <b>64</b> |
|           | RH         | <b>327</b>        | <b>0,52</b> | <b>53</b>          | <b>64</b> |
|           | RP         | 376               | 0,77        | 51                 | 58        |
|           | Aggregated | 310               | 0,43        | 54                 | 66        |

Έτσι, συγκρίνοντας τα EFC που προέκυψαν για κάθε σύστημα, θεωρώντας ως τιμή βάσης του την αθροιστική ισχύ των 2200 MW, σε σχέση με το ενιαίο σύστημα λειτουργίας Aggregated, παρατηρήθηκε ότι η λειτουργία τους προσεγγίζει σε εξαιρετικό βαθμό (97,5 %) τη λειτουργία ενός ενιαίου συστήματος στα σενάρια E, RE, RH. Αυτό συνεπάγεται ότι οι συγκεκριμένες στρατηγικές αξιοποιούν στο έπακρο την ικανότητα λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης. Επομένως, εφαρμόζοντας τα συγκεκριμένα σενάρια προκύπτει η βέλτιστη Greedy λειτουργία του συγκεκριμένου ESS.

<sup>1</sup> Βαθμός Απόδοσης σταθμισμένος ως προς την ισχύ των επιμέρους μονάδων



## 6 Επίλογος και Συμπεράσματα

### 6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μία πλήρης μελέτη της συμβολής των ΑΠΕ και των μονάδων αποθήκευσης στην επάρκεια ισχύος του ηπειρωτικού ελληνικού συστήματος. Το δυναμικό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος αποτελείται από θερμικές μονάδες φυσικού αερίου, φωτοβολταϊκά, χερσαία και υπεράκτια αιολικά πάρκα και υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού του Capacity Value της κάθε ΑΠΕ (EFC και ELCC) βασιζόμενοι και στους δύο επαρκειακούς δείκτες του συστήματος ενώ παράλληλα έγιναν διερευνήσεις αναφορικά με τη μέλλουσα ανάπτυξη των ΑΠΕ στο υπάρχον σύστημα. Αναφορικά με τις μονάδες αποθήκευσης, εισήχθησαν στο μοντέλο με δύο διαφορετικές πολιτικές, την σειριακή και την παράλληλη, ενώ υπολογίστηκε το Capacity Value τους βασιζόμενοι στην μέθοδο του υπολογισμού του Equivalent Firm Capacity χρησιμοποιώντας ως δείκτη αναφοράς και τους δύο επαρκειακούς δείκτες EENS και LOLE. Παρακάτω συνοψίζονται όλα τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την κάθε διερεύνηση.

Αρχικά, κατασκευάζοντας το μοντέλο με τη διαθέσιμη παραγωγή από θερμικές μονάδες, ΑΠΕ και ΥΗΣ, επαληθεύτηκε ότι η καλύτερη σειρά εισαγωγής τους έγκειται στο να δίνεται προτεραιότητα στις ΑΠΕ, να τις διαδέχονται οι ΥΗΣ και τέλος να διαχειρίζονται το υπολειπόμενο φορτίο οι θερμικές μονάδες. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη επάρκεια του συστήματος παραγωγής αλλά και καλύτερη αξιοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας καθώς αποφεύχθηκε περαιτέρω ο ταυτοχρονισμός ενέργειας ανάμεσα στα δύο μίγματα. Έτσι, ενσωματώνοντας 13,4 GW Φ/Β, 7,6 GW Χερσαίων ΑΠ, 1,9 GW Υπεράκτιων ΑΠ, προγραμματίζοντας τους ΥΗΣ να περικόπτουν τις αιχμές του φορτίου και προσομοιώνοντας ένα σύστημα θερμικών μονάδων παραγωγής ονομαστικής ισχύος 8,2 GW το μοντέλο μας κατέληξε σε ένα συγκεκριμένο σημείο επάρκειας. Καθώς οι χρονοσειρές αποτελούσαν ιστορικά στοιχεία 35 κλιματικών ετών υπολογίστηκαν οι μέσοι δείκτες στις 9 GWh και τις 21 ώρες για το EENS και το LOLE αντιστοίχως.

Η διείσδυση των ΑΠΕ στο συγκεκριμένο στάδιο του μοντέλου βρίσκεται στο 68 %, ενώ το υπολειπόμενο φορτίο χαρακτηρίζεται από μέση ετήσια αιχμή των 12,77 GW και τη μέση ετήσια ενέργεια να ανέρχεται στις 63 TWh. Εξετάστηκε μία πληθώρα σεναρίων όπου η διείσδυση των ΑΠΕ αυξήθηκε είτε ξεχωριστά ανά τεχνολογία, είτε παράλληλα κατά το σύνολο των ΑΠΕ. Από το σενάριο της διείσδυσης του 68 % διερευνήθηκαν οι επιπτώσεις τις ξεχωριστής αύξησης της ονομαστικής ισχύος της κάθε τεχνολογίας από 1 έως και 5 GW, ενώ εξετάστηκε και το σενάριο της ταυτόχρονης ανάπτυξης με αναλογία στις ονομαστικές ισχύς των τεχνολογιών 3:1:1 όπου γινόταν σταδιακή προσθήκη 2,5 GW έως και τα 12,5 GW, καταλήγοντας σε σενάριο διείσδυσης του 149 %.

Ακόμα, ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε για προσθήκη μονάδων αποθήκευσης. Θέτοντας ξανά ως αφετηρία την διείσδυση των ΑΠΕ στο 68 %, εξετάστηκαν δύο πολιτικές εισαγωγής, όπου οι

μονάδες ενσωματώνονται στο σύστημα ισχύος είτε σειριακά ή παράλληλα. Και στις δύο πολιτικές, σημαντικό ρόλο συμπεριφοράς των μονάδων έπαιξαν τα βασικά χαρακτηριστικά τους, με την σειριακή πολιτική να εξαρτάται από την ισχύ, την ενέργεια και τον βαθμό απόδοσης και την παράλληλη από την ισχύ, την ενέργεια και τις ώρες λειτουργίας των μονάδων αντίστοιχα. Συνολικά, λοιπόν, δημιουργήθηκαν έξι διαφορετικά σενάρια λειτουργίας ενός συστήματος αποθήκευσης που ανταλλάσσει ενέργεια με το ΣΗΕ. Η συγκεκριμένη ανάπτυξη βασίστηκε πάνω σε μέθοδο Greedy και εξετάστηκαν τα αποτελέσματα της κάθε πολιτικής. Οι μονάδες που επιλέχθηκαν ήταν τρεις: δύο μπαταρίες και μία μονάδα αντλησιοταμίευσης με την αντλησιοταμίευση να διαθέτει την περισσότερη ενέργεια ενώ οι μπαταρίες να διαθέτουν καλύτερο βαθμό απόδοσης σαν βασικό χαρακτηριστικό.

Σε κάθε στάδιο εξετάστηκε η συνεισφορά των μονάδων στην επάρκεια του συστήματος. Σε επίπεδο υφιστάμενων ΑΠΕ (διείσδυση 68 %) και σύστημα των 9 GWh EENS και 21 hr LOLE, υπολογίστηκε ότι η συμβολή των υπεράκτιων ΑΠ στην αξιοπιστία του συστήματος είναι η πιο σημαντική από τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Κατά τον υπολογισμό του Capacity Value τα μεγαλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν για τον υπολογισμό του ELCC βάσει του επαρκειακού δείκτη LOLE (33 % για WF Offshore). Έτσι, τα υπεράκτια ΑΠ είχαν σχεδόν διπλάσια τιμή του CV τους σε σχέση με τα χερσαία ΑΠΕ και 5-6 φορές μεγαλύτερη από τα ΦΒ. Συνεπώς, η μέλλουσα αύξηση των υπεράκτιων αιολικών, όπως έχει προγραμματιστεί για το ελληνικό σύστημα, θα παίξει μείζονα ρόλο στην διατήρηση της επάρκειας του συστήματος.

Κατά αυτή την ανάλυση, προέκυψε η διερεύνηση της περαιτέρω διείσδυσης των ΑΠΕ μέσα από δύο διαφορετικές πολιτικές όπου υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα Capacity Value τους. Θεωρώντας τον υπολογισμό του EFC μέσω του επαρκειακού δείκτη LOLE ως σημείο αναφοράς παρατηρήθηκε ότι στην ξεχωριστή ανάπτυξη του συστήματος, το κάθε επιπλέον GW που προστίθεται στο σύστημα έχει μικρότερη συνεισφορά στην επάρκεια από το προηγούμενο. Τα υπεράκτια αιολικά σημείωσαν και πάλι μεγάλη συνεισφορά με το CV του επιπλέον GW ονομαστικής ισχύος να ανέρχεται στο 20 %, ωστόσο στο 4<sup>ο</sup> και 5<sup>ο</sup> GW που προστέθηκε παρουσιάστηκε μία απότομη πτώση στην αξία τους σε σχέση με τα προηγούμενα. Έτσι, μπορεί η περαιτέρω αύξηση της διείσδυσης των WF Offshore να έχει μεγάλη προστιθέμενη αξία στο σύστημα, αλλά αυτό πρέπει να γίνεται με φειδώ. Σε γενικές γραμμές, είναι απαραίτητο να προηγείται διερεύνηση των επιπέδων κορεσμού της κάθε τεχνολογίας. Για τα ΦΒ έχει παρατηρηθεί ότι από το επίπεδο των 13,4 GW στο επίπεδο των 18,4 GW τα οφέλη στο σύστημα ήταν ελάχιστα αναφορικά με την επάρκεια του (CV της τάξεως του 0,5 %) και γι' αυτό το λόγο η ξεχωριστή περαιτέρω ανάπτυξη τους δεν αποτελεί καλή στρατηγική. Υπό το σενάριο της ταυτόχρονης ανάπτυξης του συστήματος, από την άλλη, διαπιστώθηκε ότι η σταδιακή αύξηση του μείγματος ΑΠΕ κατά 2,5 GW διατηρεί την αξία των συνολικών ΑΠΕ. Έτσι από εκεί που τα 22,9 GW ισούνταν με 11,8% του EFC, τα 35,4 GW έπεσαν μόλις στο 11 %. Αυτό υποδηλώνει ότι η συγκεκριμένη στρατηγική έχει καλύτερα αποτελέσματα αναφορικά με την επάρκεια πέρα του ότι αποτελεί μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση. Μάλιστα, η προσθήκη 5 GW συνολικών ΑΠΕ προσεγγίζει σε αξία την αντίστοιχη των 5 επιπλέον GW υπεράκτιων ΑΠ (EFC = 12,5 %) που υπολογίστηκαν κατά την πολιτική ξεχωριστής ανάπτυξης.

Ακόμα και στο σενάριο υψηλότερης διείσδυσης των ΑΠΕ (149 %), οι δείκτες επάρκειας διαμορφώθηκαν στις 1,64 GWh για το EENS και τις 3,6 hr για το LOLE υποδηλώνοντας ότι η συγκεκριμένη κατεύθυνση ανάπτυξης του συστήματος δεν είναι και τόσο επικερδής (σε όρους CV) ή αποτελεσματική (αργή ανάπτυξη ΑΠΕ). Αυτό που πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια αποτέλεσε σημαντική αλλαγή για την επάρκεια του συστήματος. Από τα 35 κλιματικά έτη, ορίστηκε σαν έτος αναφοράς το 2005 λόγω της μεγάλης του σύγκλισης στο μέσο όρο των αποτελεσμάτων (μέσο EENS, LOLE και μέση ετήσια ζήτηση υπολειπόμενου φορτίου). Πραγματοποιώντας μελέτη μέσω των μονάδων αποθήκευσης, για δύο διαφορετικές πολιτικές εισαγωγής και έξι διαφορετικά σενάρια συνολικά, διαπιστώθηκε ότι η πολιτική παράλληλης εισαγωγής τους στο σύστημα αποτελεί την πιο αποτελεσματική. Η σειριακή πολιτική από την άλλη παραμένει αξιόλογη στρατηγική αναφορικά με την επάρκεια του συστήματος και μελετώντας την, προέκυψαν αποτελέσματα συγκρίσιμα με αυτά της παράλληλης. Απαραίτητη προϋπόθεση, όμως, είναι να ορίσουμε ως κριτήριο προτεραιότητας εισαγωγής την ενέργεια των μονάδων όπου παρατηρείται και η μεγαλύτερη αύξηση της επάρκειας. Συνοπτικά, καλύτερες πολιτικές ενσωμάτωσης αποτελούν οι RE (μαζί με την RH) και η E.

Αξιολογώντας την ξεχωριστή συνεισφορά των μονάδων αποθήκευσης στην επάρκεια του συστήματος σε όρους EFC, υπολογίστηκε το Capacity Value βάσει τόσο του EENS όσο και του LOLE. Παρατηρήθηκε ότι μεγαλύτερη συνεισφορά έχει η Closed Loop, με την BESS 2 να την διαδέχεται και την μικρότερη συνεισφορά να την έχει η BESS 1. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την Closed Loop και την BESS 2 ήταν παρόμοια κάτω από το πρίσμα αξιολόγησης του κάθε δείκτη επάρκειας, ενώ οι μέγιστες τιμές τους παρατηρήθηκαν στο σενάριο P. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την μονάδα BESS 1 παρουσίασαν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στην αξιολόγηση του EENS και του LOLE. Το EFC με βάση το LOLE υπολογίστηκε έως και 1,6 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο EFC με βάση το EENS. Ύστερα από κατάλληλη διερεύνηση στη χρονοσειρά του φορτίου, διαπιστώθηκε ότι η συγκεκριμένη απόκλιση οφείλεται στη φύση των ελλειμμάτων του υπολειπόμενου φορτίου. Λόγω των χαρακτηριστικών της μπαταρίας (υψηλή ισχύς των 1000 MW, λόγος E/P = 2) η μονάδα BESS 1 επιδρά καλύτερα στην βελτίωση του LOLE από ότι στο EENS του συστήματος.

Τέλος, έγινε αξιολόγηση του συνολικού συστήματος αποθήκευσης. Συγκρίνοντας το κάθε σενάριο λειτουργίας του συστήματος με το αντίστοιχο θεωρητικό του (ενιαίο σύστημα λειτουργίας – Aggregated) και υπολογίζοντας τους αντίστοιχους δείκτες επάρκειας αλλά και το συνολικό EFC του συστήματος, επαληθεύτηκε ότι τα σενάρια λειτουργίας RE, RH, E αποτελούν τις βέλτιστες υλοποιήσεις λειτουργίας του ESS, προσφέροντας στο τελικό σύστημα την καλύτερη δυνατή επάρκεια.

## 6.2 Μελλοντικές Προεκτάσεις και Εφαρμογές

Έχοντας παρατηρήσει την τάση ανάπτυξης και ενίσχυσης του ηλεκτρικού συστήματος από ΑΠΕ, που συμβαίνει στον ελληνικό χώρο, είναι θεμιτό και συνετό να γίνονται παράλληλα οι απαραίτητες ενέργειες και μελέτες προκειμένου αυτή η ανάπτυξη να μην γίνεται αλόγιστα και χωρίς κάποιο συγκεκριμένο πλάνο. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας παραμένει ο βασικότερος και προτιμότερος τρόπος ανάπτυξης των ΑΠΕ, ενώ σημαντικός ρυθμός

ανάπτυξης παρατηρείται και στην αιολική ενέργεια με την τελευταία να εισέρχεται σε νέα εποχή εξέλιξης καθώς τα πρώτα έργα αξιοποίησης του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού βρίσκονται ήδη σε εξέλιξη. Τέλος, ακολουθούν τα υδροηλεκτρικά έργα τα οποία αναπτύσσονται με έναν μικρότερο ρυθμό λόγω και του μη ελκυστικού κόστους κατασκευής των περιφερειακών έργων που τα χαρακτηρίζουν, χωρίς όμως να παύουν να αποτελούν ένα σημαντικό συντελεστή στη συνεισφορά στην ετήσια ζήτηση από ΑΠΕ.

Λόγω του ταυτοχρονισμού των φωτοβολταϊκών, της στοχαστικότητας της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας, αλλά και των πιθανών σεναρίων χαμηλής υδραυλικότητας είναι σημαντικό να κατασκευαστούν μοντέλα έτσι ώστε να μπορούν να λάβουν υπόψη τους τους αστάθμητους παράγοντες και τις αντιξοότητες που μπορεί να αντιμετωπίσει η συγκεκριμένη ανάπτυξη. Διόλου ασήμαντος φυσικά παραμένει ο κίνδυνος περικοπών περίσσειας ισχύος που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το σύστημα γιατί αυτό σημαίνει αυτόματα τον κορεσμό ανάπτυξης των επιπλέον ΑΠΕ. Επομένως, πρέπει να δοθεί έμφαση στον τρόπο με τον οποίο θα γίνει αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας στο σύστημα προκειμένου να διοχετευτεί σε άλλες ώρες μέσα στη μέρα, εξασφαλίζοντας πάντα την αξιοπιστία του συστήματος. Αυτή η μετατόπιση της ενέργειας πραγματοποιείται μέσω των μονάδων αποθήκευσης, δηλαδή είτε μέσα από τις μπαταρίες ή από την αντλησιοταμίευση και αποτελεί έναν από τους βασικότερους πυλώνες αυτής της ανάλυσης. Η πιθανοτική μελέτη επάρκειας ισχύος του συστήματος παραγωγής του ελληνικού συστήματος, που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, αποτελεί μία προσέγγιση των παραπάνω ζητημάτων. Ασφαλώς, η συγκεκριμένη μελέτη επιδέχεται βελτιώσεις και οι προοπτικές εξέλιξης της πληθαίνουν.

Μία αρχική προέκταση της παρούσας εργασίας μπορεί να αποτελεί η τροποποίηση των μεθοδολογιών που έχουν αναπτυχθεί αναφορικά με τη λειτουργία των ΑΠΕ συνδυαστικά με αυτή των συστημάτων αποθήκευσης. Τα συστήματα αποθήκευσης μπορούν να αντλούν την ενέργεια που χρειάζονται αυτομάτως από τις ΑΠΕ χωρίς να επιβαρύνουν έτσι το σύστημα θερμικών μονάδων παραγωγής.

Ακόμα, ενδιαφέρον φαίνεται να κατέχει η διερεύνηση νέων μεθόδων υπολογισμού της συμβολής ισχύος (Capacity Value) στην επάρκεια του συστήματος παραγωγής των σταθμών αποθήκευσης. Ακολουθώντας παραδοσιακές μεθόδους υπολογισμού δεικτών που εκφράζουν την συμβολή αυτή κυρίως για μονάδες ΑΠΕ (ELCC, EFC κλπ.) μπορούν να αναπτυχθούν νέες μέθοδοι οι οποίες είναι αμιγώς προσαρμοσμένες στις μονάδες αποθήκευσης. Έτσι θα δίνεται η δυνατότητα ανάλυσης της αξιοπιστίας του συστήματος από την πλευρά αντικατάστασης των υπάρχουσών συμβατικών μονάδων με μονάδες αποθήκευσης ενέργειας.

Τέλος, ένα στοιχείο παραπάνω μελέτης που χρίζει ρεαλιστική προσέγγιση είναι η διερεύνηση μίας πληθώρας μονάδων αποθήκευσης με διαφορετικά χαρακτηριστικά και η υψηλότερη διείσδυση ΑΠΕ και μονάδων αποθήκευσης με ταυτόχρονη μείωση των θερμικών μονάδων παραγωγής. Μπορεί να γίνει διερεύνηση διάφορων σεναρίων που θα εξακολουθούν να έχουν το σκοπό της παρούσας εργασίας αλλά υπό το φάσμα της περαιτέρω απανθρακοποίησης του συστήματος.

## Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Βουρνάς και Κονταξής Γ., Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα: Συμμετρία, 2010.
- [2] M. Kamran, Fundamentals of Smart Grid Systems, Islamabad: ScienceDirect, 2022.
- [3] R. Seminario-Cordova και R. Rojas-Ortega, «Renewable Energy Sources and Energy Production: A Biometric Analysis of the Last Five Years,» 04 July 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi:10.3390/su151310499.
- [4] E. Council, «How is EU electricity produced and sold?,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/how-is-eu-electricity-produced-and-sold/>.
- [5] Η. Παπαθανάσης, «Ενέργεια από τη θάλασσα,» *Περισκόπιο της Επιστήμης*, p. 64, 1997.
- [6] A. O M Maka και J. M. Alabid, «Solar energy technology and its roles in sustainable development,» *Clean Energy*, 11 06 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi:10.1093/ce/zkac023.
- [7] J. Huang, «A 32-year perspective on the origin of wind energy in a warming climate,» *Renewable Energy*, 05 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi:10.1016/j.renene.2014.12.045.
- [8] HELACPO, «Greek PV Stats,» 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://helapco.gr/xoorigle/2024/02/pv-stats\\_greece\\_2023\\_eng.pdf](https://helapco.gr/xoorigle/2024/02/pv-stats_greece_2023_eng.pdf).
- [9] ΥΠΕΝ, Εθνικό Σχέδιο Ενέργειας και Κλίματος 2020-2030, 2023.
- [10] ΕΛΕΤΑΕΝ, «Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://eletaen.gr/>. [Πρόσβαση 2024].
- [11] ΕΛΕΤΑΕΝ, «<https://eletaen.gr/>,» [Ηλεκτρονικό].
- [12] Energy Efficiency & Renewable Energy, «Types of Hydropower Plants,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants>.
- [13] Ε. Διαλυνάς, Σχεδιασμός Συστημάτων Παραγωγής και Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας με Κριτήρια Αξιοπιστίας, Αθήνα: Τσότρας, 2013.
- [14] T. Kemabonta, «A syncretistic approach to grid reliability and resilience,» *ScienceDirect*, Οκτώβριος 2021.

- [15] N. Hrelja, G. Fulli, M. P. Blanco και A. Spisto, «Generation adequacy methodologies review,» EU Publications, 23 09 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi:10.2790/153465.
- [16] NERC, «Probabilistic Adequacy and Measures,» 2018, p. 48.
- [17] R. Billinton και R. Allan, Reliability Evaluation of Power Systems, 1996.
- [18] EirGrid Group; Soni, «All - Island Generation Capacity Statement 2018-2027,» 2018, p. 72.
- [19] ENTSO-e, «European Resource Adequacy Assessment,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.entsoe.eu/>. [Πρόσβαση 2023].
- [20] ENTSO-e, «Mid-term Adequacy Forecast,» 2017. [Ηλεκτρονικό]. [Πρόσβαση 2023].
- [21] ΑΔΜΗΕ, «Μελέτη Επάρκειας Ισχύος για την περίοδο 2020-2030,» 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.admie.gr/sites/default/files/users/dssas/meleti-eparkeias-ishyos-2020-2030.pdf>. [Πρόσβαση 2023].
- [22] ΑΔΜΗΕ, «Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2024-2033,» Ιούνιος 2023. [Ηλεκτρονικό]. [Πρόσβαση 2024].
- [23] I. WIND, Design and Operation of Power Systems with Large Amounts of Wind Power, 2013.
- [24] E. Ibanez και M. Milligan, «Comparing Resource Adequacy Metrics,» 13th Wind Integr. Work., no.1, 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi:10.1109/PMAPS.2014.6960610.
- [25] M. P. Evans, S. H. Tindemans και D. Angeli, «Minimizing unserved energy using heterogeneous storage units,» IEEE Trans. Power Syst., vol.34, no. 5, pp. 3647-3656, 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi:10.1109/TPWRS.2019.2910388.
- [26] A. Zablocki, «Fact Sheet: Energy Storage (2019),» Environmental Energy Study Inst, p.1-9, 2019. [Ηλεκτρονικό].
- [27] G. Strbac, I. Konstantelos, M. Aunedi, M. Pollitt και R. Green, «Delivering future-proof energy infrastructure Report,» *Natl. Infrastruct. Comm.*, p. 54, Φεβρουάριος 2016.
- [28] P. Denholm και R. Margolis, «The potential for Energy Storage to Provide Peaking Capacity in California under increased penetration of Solar PVs,» 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi:10.1016/j.renene.2019.11.117.
- [29] G. Strbac και I. Konstantelos, «Capacity value of energy Storage in distribution networks,» Energy Storage, p.389-401, 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi:10.1016/j.est.2018.06.002.

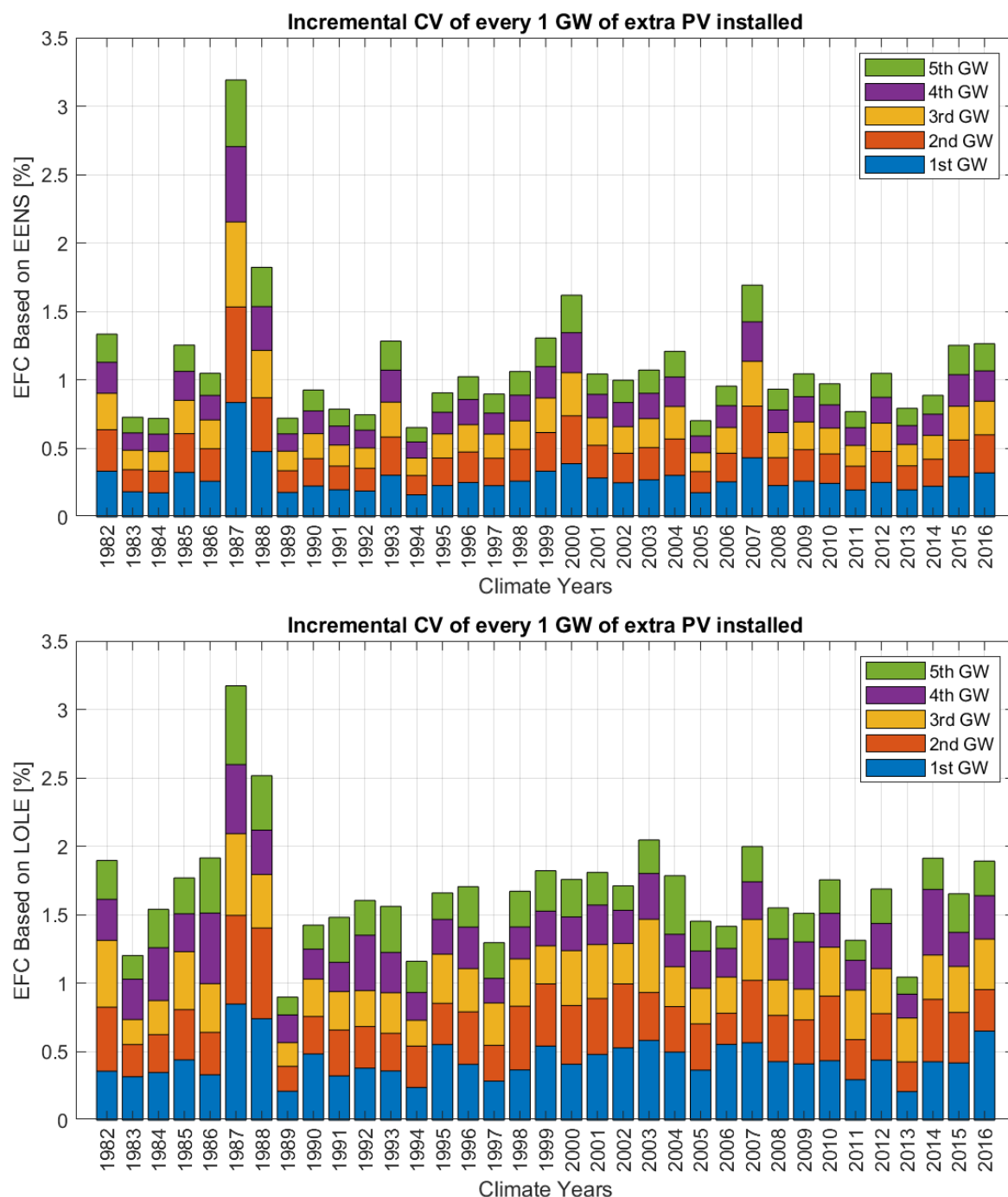
- [30] P. A. Dratsas, G. N. Psarros και S. A. Papathanassiou, «Feasibility of Behind-the-Meter-Battery Storage in Wind Farms Operating on Small Islands,» *Batteries*, vol. 8, no. 12, p. 275, December 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi: 10.3390/batteries8120275.
- [31] D. Stenclik, B. Zhang, R. Rocheleau και J. Cole, «Energy Storage as a Peaker Replacement,» *IEEE Electrification Magazine* vol. 6, pp. 20-26, 2018.
- [32] P. A. Dratsas, G. N. Psarros και S. A. Papathanassiou, «Capacity Value of Wind Powered Pumped Hydro Storage Virtual Power Plants,» in 2023 IEEE 2nd Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference (ONCON), pp. 1-6, December 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi: 10.1109/ONCON60463.2023.10431378.
- [33] L. W. Chong, Y. W. Wong, R. K. Rajkumar και D. Isa, «Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems,» Elsevier, p. 174-189, 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi:10.1016/j.rser.2016.07.059.
- [34] «MATLAB,» MathWorks, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [35] ΑΔΜΗΕ, «Εγχειρίδιο Μηχανισμού Διασφάλισης Επαρκούς Ισχύος,» 2012. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.admie.gr/en/node/2480>.
- [36] R. Billinton και R. Allan, «Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1977-1982,» *IEEE Trans*, pp. 1555-1564, 1988.
- [37] S. Zhang, L. Gengyin και M. Zhou, «Calculation and analysis of capacity credit of wind farms based on Monte-Carlo simulation,» IEEE PES Gen. Meet. PES 2010, p.6-11, 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi:10.1109/PES.2010.5589289.
- [38] M. Milligan και B. Parsons, «A comparison and case study of capacity credit algorithms for wind power plants,» *Wind Eng.* vol. 23, no. 3, pp. 159-166, 1997.
- [39] M. Aldenderfer και R. Blashfield, «Cluster Analysis,» Sage, 1984. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi:10.4135/9781412983648.
- [40] R. Billinton, «A Monte Carlo simulation model for adequacy assessment of multi-area generating systems,» *JET*, 1991.
- [41] C. I. Kostaki, P. A. Dratsas, G. N. Psarros, E. S. Chatzistylianos και S. A. Papathanassiou, «A Novel Method to Integrate Hydropower Plants into Resource Adequacy Assessment Studies,» *Energies*, vol.17, no. 17, p.4237, August 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi: 10.3390/en17174237.
- [42] X. Ge, Y. Ma, Y. Li, Y. Jiao, Z. Wang και F. Wu, «Daily peak shaving operation of mixed pumped-storage hydro plants considering cascade hydraulic coupling,» Elsevier, p.971-978, 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi:10.1016/j.egy.2023.05.207.

- [43] P. Dratsas, G. Psarros και S. Papathanassiou, «Battery Energy Storage Contribution to System Adequacy,» *Energies*, 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi:10.3390/en14165146.
- [44] P. Dratsas, G. Psarros και S. Papathanassiou, «A Real-time Redispatch Method to Evaluate the Contribution of Storage to Capacity Adequacy,» *IEEE Xplore*, 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi:10.1109/TPWRS.2023.3243669.
- [45] P. A. Dratsas, G. N. Psarros και S. A. Papathanassiou, «Capacity Value of Pumped-Hydro Energy Storage,» in 2022 2nd International Conference on Energy Transition in the Mediterranean Area (SyNERGY MED), pp. 1-6, October 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi: 10.1109/SyNERGYMED55767.2022.9941435.
- [46] Y. Zhou, P. Mancarella και J. Mutale, «Framework for capacity credit assessment of electrical energy storage and demand response,» *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, iss. 9, p.2267-2276, 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: doi:10.1049/iet-gtd.2015.0458.
- [47] ΑΔΜΗΕ, «Πρόγραμμα Συντήρησης Μονάδων 2022-2023,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.admie.gr/nea/anakoinosi/programma-syntirisis-monadon-2022-2023>. [Πρόσβαση 2023].
- [48] R. Billinton και W. Li, «Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods».
- [49] R. Billinton και R. Allan, «The IEEE Reliability Test System,» *IEEE Trans on PWR*, Vol. 1, No. 4, pp. 1-7, 1986.
- [50] «ERAA 2022,» ENTSO-e, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.entsoe.eu/outlooks/eraa/2022/>.

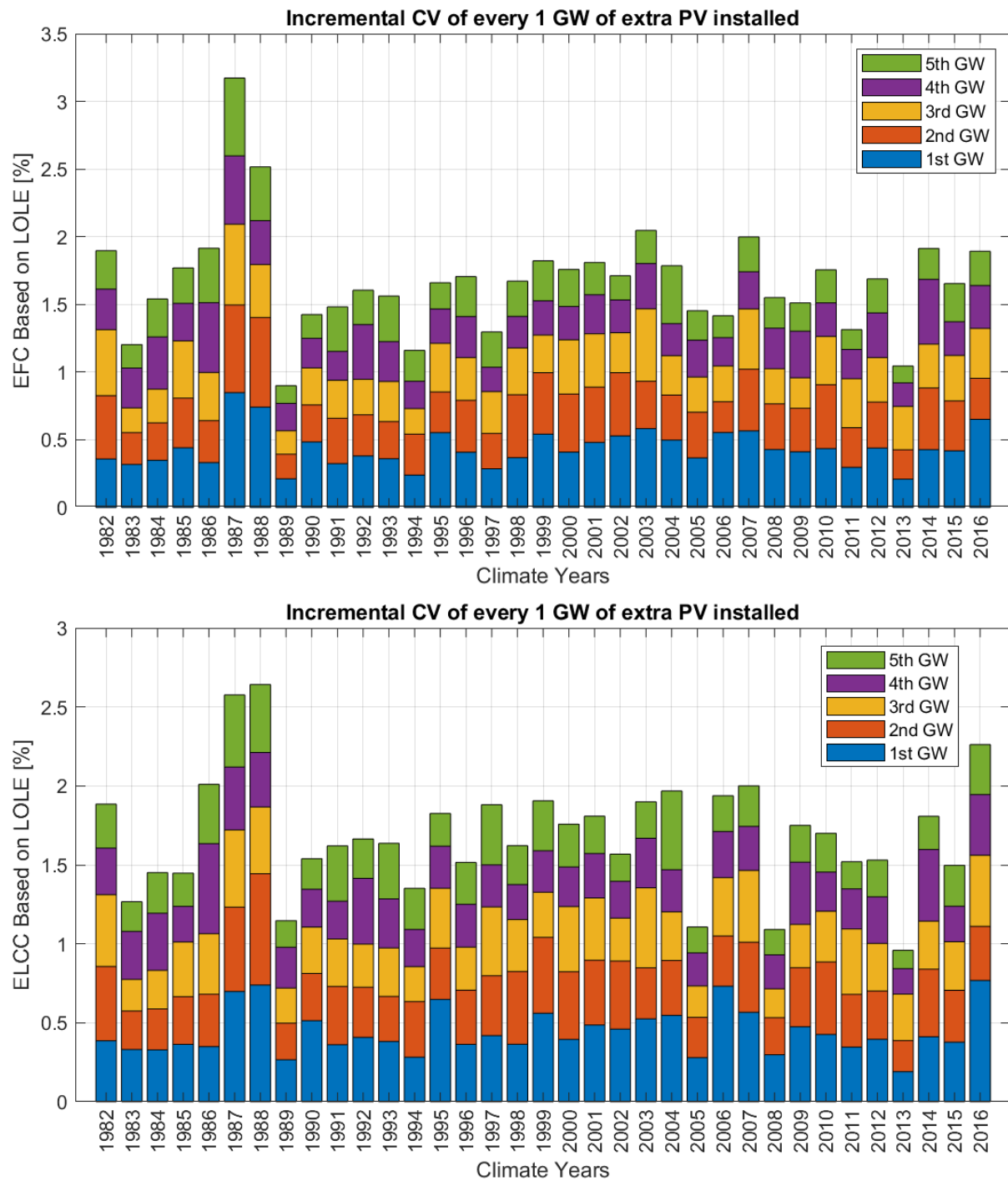
## Παράρτημα

Σε αυτό το παράρτημα γίνεται ολοκληρωμένη παρουσίαση των αποτελεσμάτων όπως προέκυψαν στην Ενότητα 4.1.2 στα σενάρια ανάπτυξης των ΑΠΕ, τόσο για ξεχωριστή ανάπτυξη της κάθε τεχνολογίας όσο και ταυτόχρονη ανάπτυξη των συνολικών ΑΠΕ με λόγο 3:1:1 (ΦΒ / Χερσαία ΑΠ / Υπεράκτια ΑΠ). Γίνεται απεικόνιση των αποτελεσμάτων του Capacity Value για το κάθε σενάριο, όπως προέκυψαν με κάθε μέθοδο υπολογισμού του: EFC βασισμένο στο EENS ή το LOLE και ELCC βασισμένο στο EENS ή το LOLE.

### ΞΕΧΩΡΙΣΤΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ

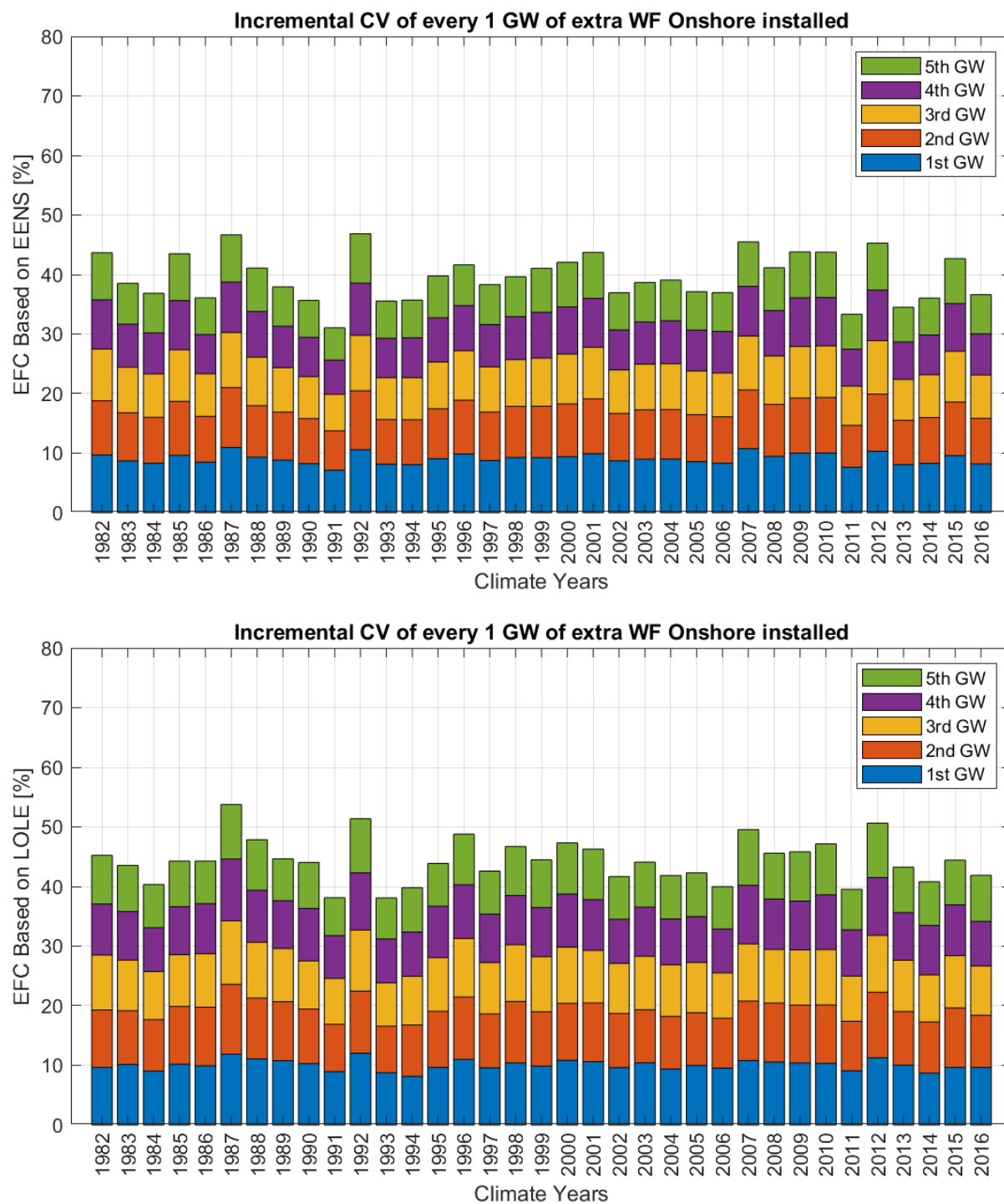


Σχήμα 38: Αποτελέσματα EFC για σενάρια επιπλέον διείσδυσης ΦΒ με βάση το (α) EENS και (β) το LOLE

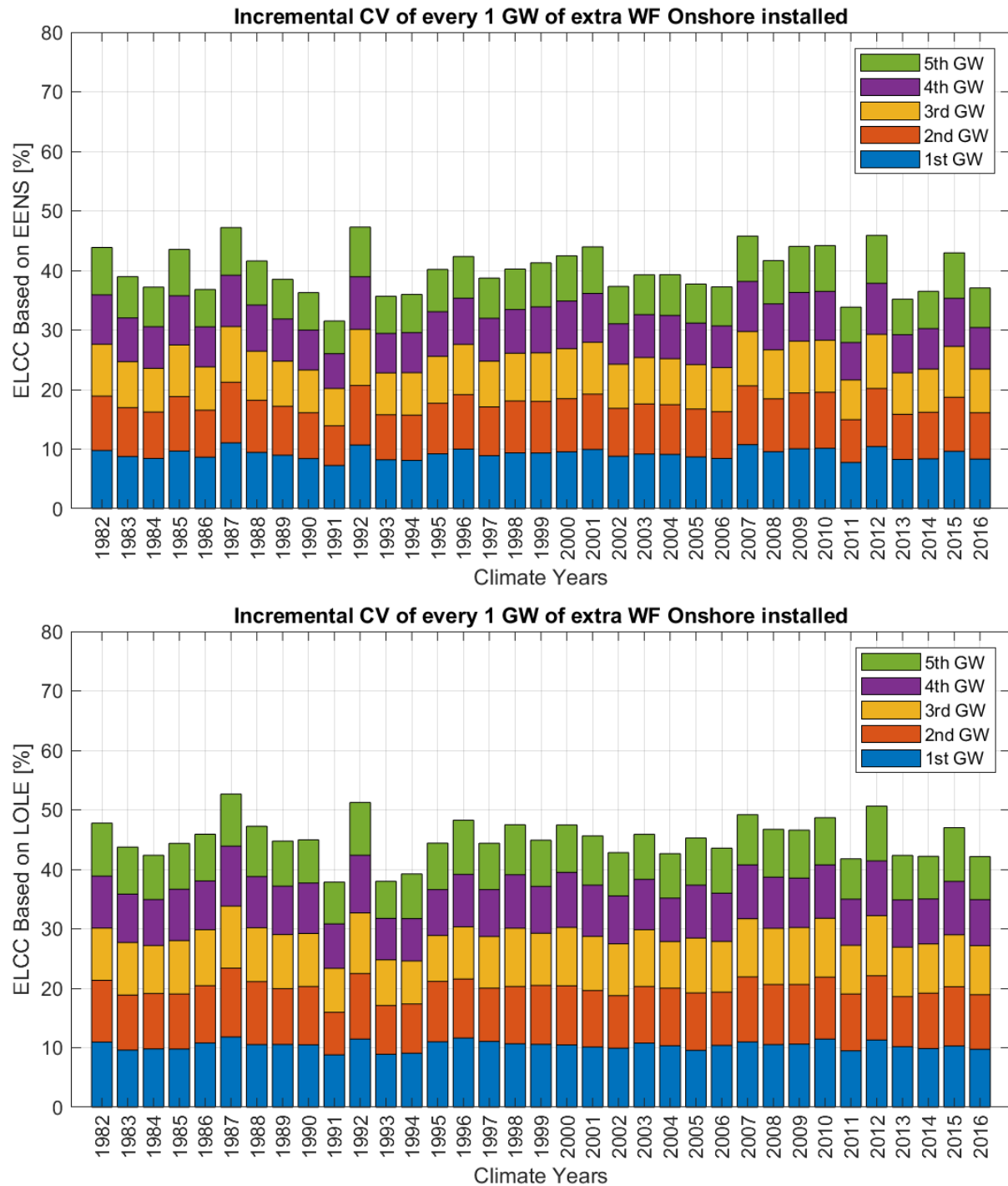


Σχήμα 39: Αποτελέσματα ELCC για σενάρια επιπλέον διείσδυσης ΦΒ με βάση το (α) EENS και (β) το LOLE

## ΞΕΧΩΡΙΣΤΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ

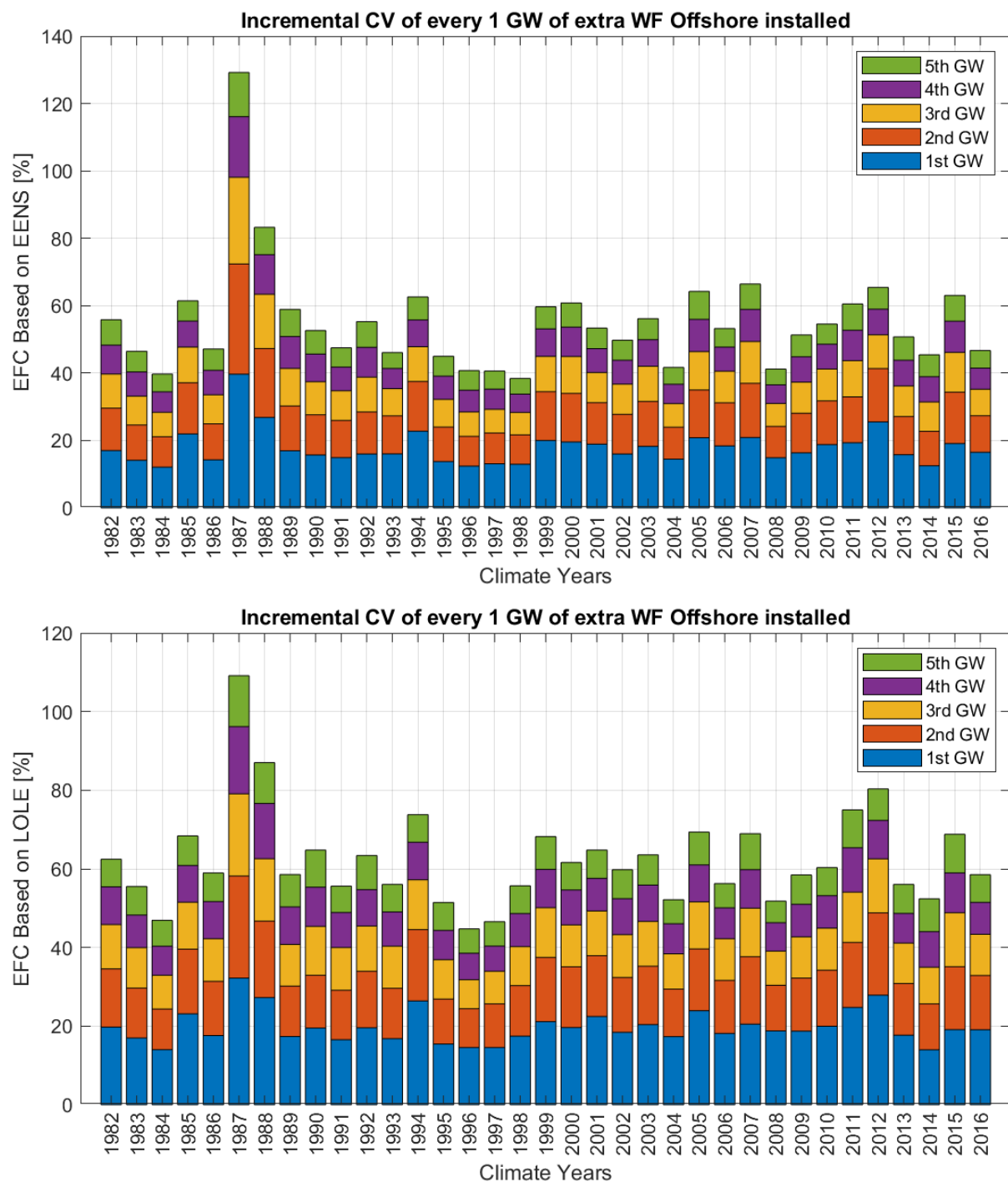


Σχήμα 40: Αποτελέσματα EFC για σενάρια επιπλέον διεύθυνσης χερσαίων ΑΠ με βάση το (α) EENS και (β) το LOLE

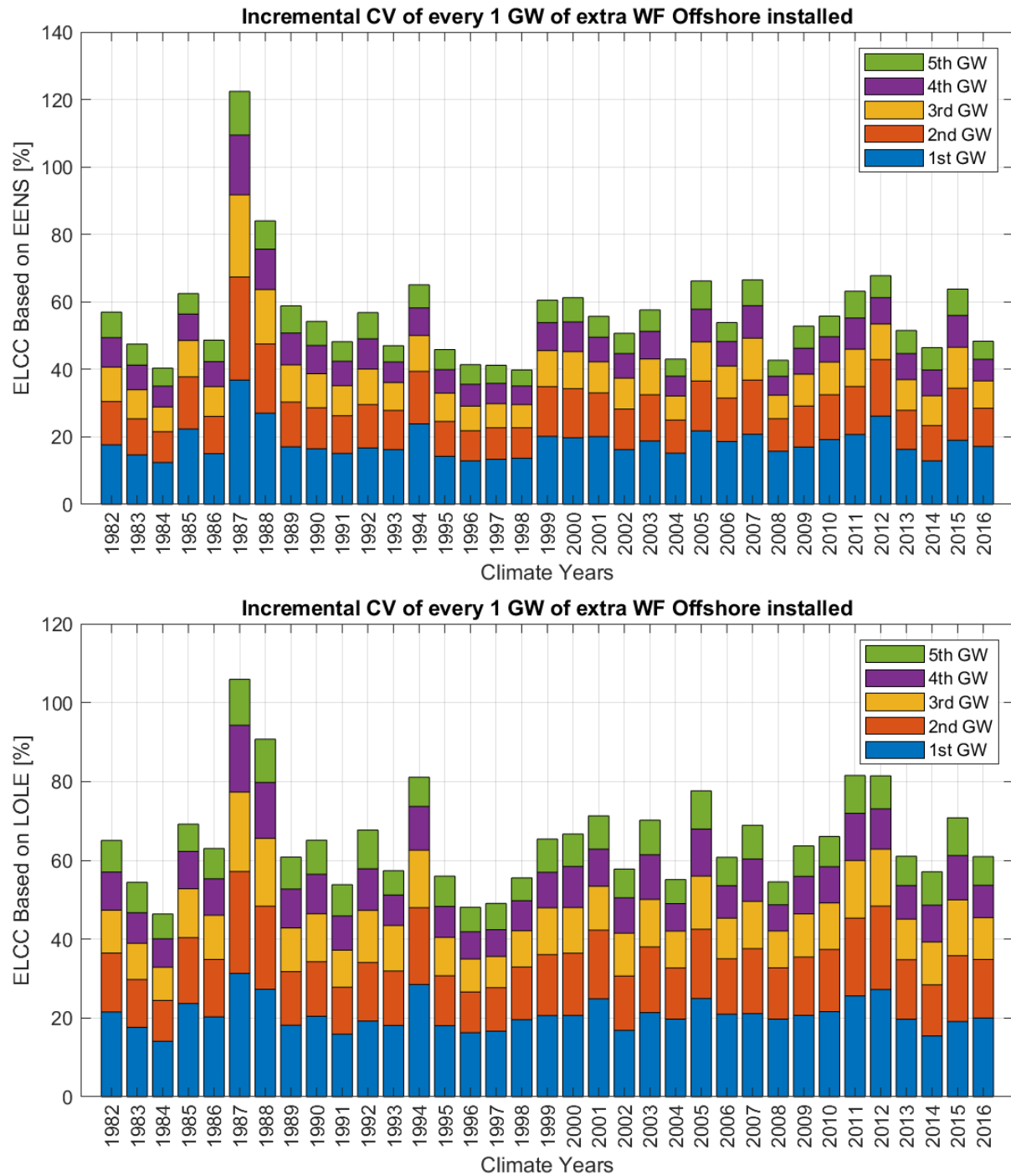


Σχήμα 41: Αποτελέσματα ELCC για σενάρια επιπλέον διεύθυνσης χερσαίων ΑΠ με βάση το (α) EENS και (β) το LOLE

## ΞΕΧΩΡΙΣΤΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ

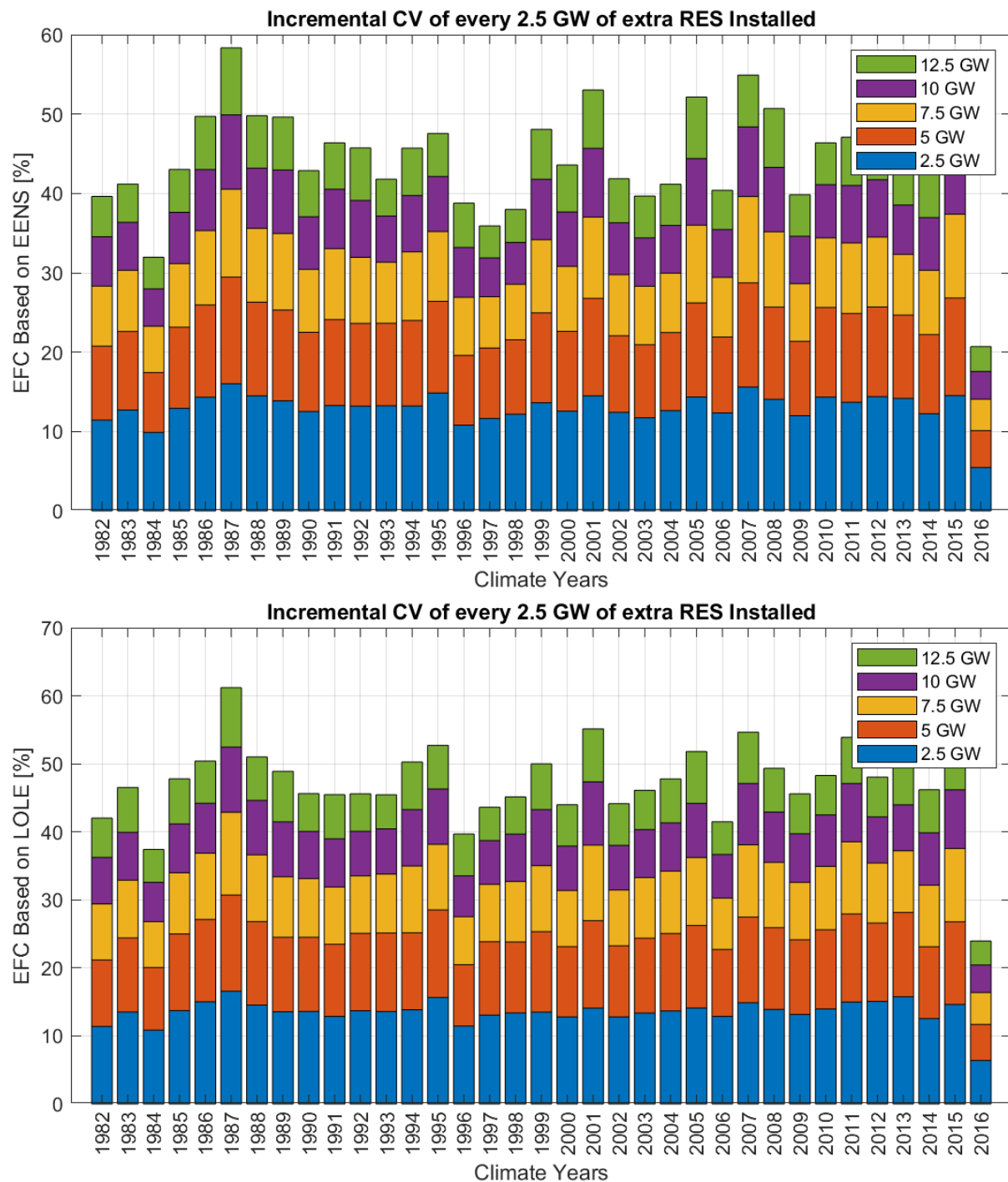


Σχήμα 42: Αποτελέσματα EFC για σενάρια επιπλέον διεύθυνσης υπεράκτιων ΑΠ με βάση το (α) EENS και (β) το LOLE

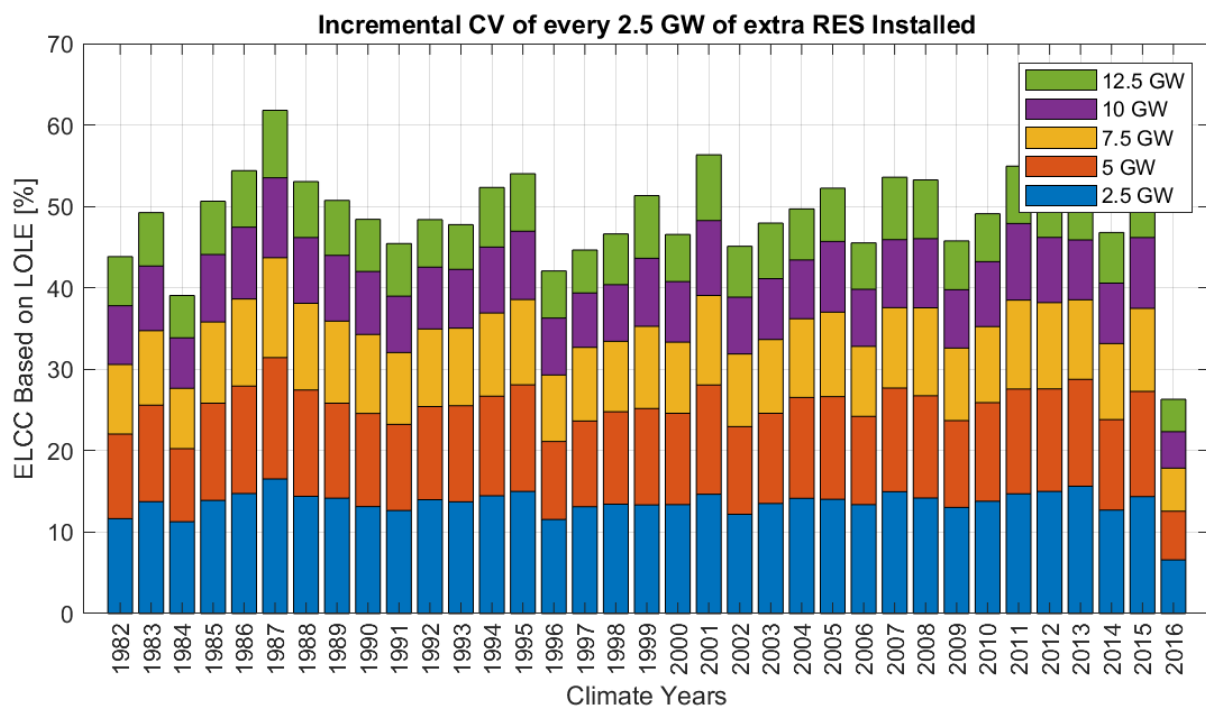
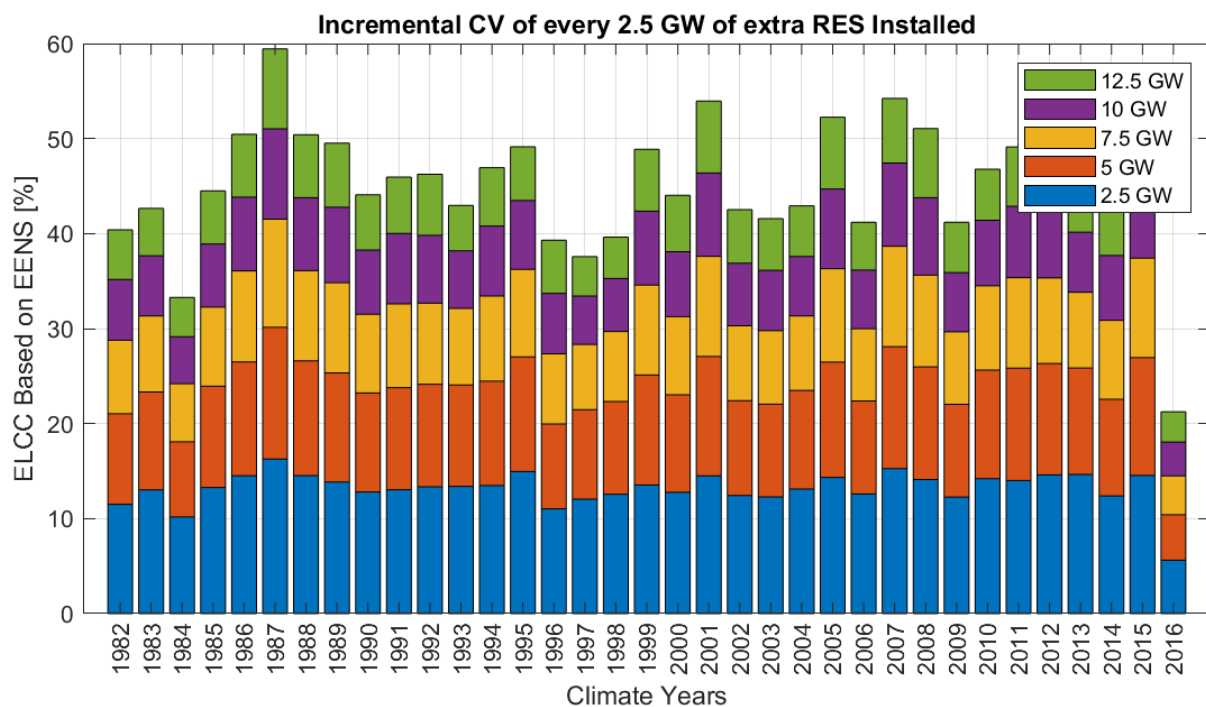


Σχήμα 43: Αποτελέσματα ELCC για σενάρια επιπλέον διείσδυσης υπεράκτιων ΑΠ με βάση το (α) EENS και (β) το LOLE

## ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ



Σχήμα 44: Αποτελέσματα EFC για σενάρια επιπλέον διεύθυνσης ΑΠΕ με βάση το (α) EENS και (β) το LOLE



Σχήμα 45: Αποτελέσματα ELCC για σενάρια επιπλέον διείσδυσης ΑΠΕ με βάση το (α) EENS και (β) το LOLE