



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

Συμβολή Υδροηλεκτρικών Σταθμών στην Επάρκεια Ισχύος του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΧΡΙΣΤΙΝΑΣ Η. ΚΩΣΤΑΚΗ

Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2024



Συμβολή Υδροηλεκτρικών Σταθμών στην Επάρκεια Ισχύος του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΧΡΙΣΤΙΝΑΣ Η. ΚΩΣΤΑΚΗ

Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 12η Απριλίου 2024.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Copyright © - All rights reserved. Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
Χριστίνα Κωστάκη, 2024.

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.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης. Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Πτυχιακή μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Πτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

(Υπογραφή)

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

Απρίλιος 2024

Περίληψη

Ο στόχος επίτευξης ενεργειακής ουδετερότητας που έχει τεθεί μεταξύ των κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, επιφέρει σημαντικές αλλαγές στη διαμόρφωση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ), με κυριότερες την σταδιακή απόσυρση των θερμικών μονάδων παραγωγής προς όφελος της εδραίωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Για να εξασφαλιστεί η επάρκεια ισχύος σε ένα απανθρακοποιημένο σύστημα ενέργειας υψηλής διεύθυνσης ΑΠΕ, απαιτούνται ευέλικτες μονάδες βάσης, ικανές να καλύπτουν τις διακυμάνσεις του φορτίου και να δρουν συμπληρωματικά στην απρόβλεπτη ανανεώσιμη παραγωγή. Τέτοιες μονάδες στα υφιστάμενα ΣΗΕ αποτελούν οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής (ΥΗΣ) και οι μονάδες αποθήκευσης. Διαπιστώνεται, ωστόσο, πως, η υδροηλεκτρική παραγωγή εντάσσεται με μονοδιάστατο τρόπο στις ισχύουσες μελέτες επάρκειας των συστημάτων ενέργειας, με αποτέλεσμα να μην αξιολογείται ορθά η ικανότητα συμβολής της στην αξιοπιστία του συστήματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται μια νέα μεθοδολογία μοντελοποίησης των ΥΗΣ με και χωρίς δυνατότητα άντλησης στο πλαίσιο των μελετών επάρκειας ισχύος του ΣΗΕ. Η κεντρική ιδέα της μεθόδου έγκειται στον έλεγχο κάλυψης της ζήτησης του συστήματος και την αναπροσαρμογή της λειτουργίας των ΥΗΣ σε πραγματικό χρόνο με σκοπό τον μετριασμό των γεγονότων απώλειας φορτίου, χωρίς η λειτουργία τους να αποκλίνει σημαντικά από μια θεωρούμενη βέλτιστη προγραμματισμένη λειτουργία. Σε περίπτωση εμφάνισης ανεπάρκειας, οι ΥΗΣ καλούνται να συνεισφέρουν στο σύστημα, τηρουμένων των τεχνικών και λειτουργικών τους ορίων. Μετά το πέρας του γεγονότος ανεπάρκειας, επιδιώκεται η επαναφορά τους στην προγραμματισμένη λειτουργία, η οποία εξασφαλίζει την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του συστήματος. Λαμβάνονται υπόψη, επίσης, οι μη προγραμματισμένες βλάβες των μονάδων αυτών, καθώς και λοιποί σκοποί τους οποίους εξυπηρετούν πέραν της ηλεκτροπαραγωγής (ανάγκες άρδευσης, ύδρευσης). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ρεαλιστική προσομοίωση της λειτουργίας των ΥΗΣ, λαμβάνοντας υπόψιν το εύρος δυνατοτήτων αλλά και τους πραγματικούς περιορισμούς τους. Μέσω της εφαρμογής της μεθόδου εξάγονται οι βασικοί δείκτες επάρκειας ισχύος, LOLE (Loss of Load Expectation) και EENS (Expectation of Energy Not Supplied), καθώς και η ικανότητα συνεισφοράς των μονάδων στην επάρκεια του συστήματος (Capacity Value). Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας αναδεικνύεται μέσω της υλοποίησης σε ΣΗΕ διαφορετικού επιπέδου επάρκειας και μέσω της σύγκρισής με τις διαδεδομένες πολιτικές διαχείρισης των ΥΗΣ (Peak Shaving και Capacity Expansion Planning) στις μελέτες επάρκειας ισχύος. Σε όλα τα σενάρια εφαρμογής, η προτεινόμενη μέθοδος επιφέρει σταθερά υψηλές τιμές ικανότητας συνεισφοράς ισχύος, χάρη στη δυνατότητα αναπροσαρμογής της λειτουργίας των ΥΗΣ σε πραγματικό χρόνο, ενώ παράλληλα αποτελεί την πιο πλήρη και αντιπροσωπευτική μοντελοποίηση των μονάδων, συγκριτικά με τις λοιπές τεχνικές. Το επίπεδο επάρκειας του συστήματος υπολογίζεται με

την τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo και το υπό εξέταση ΣΗΕ αποτελείται από θερμικές μονάδες, ΑΠΕ, μονάδες αποθήκευσης και υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Η συμβολή των ΥΗΣ στην επάρκεια εξετάζεται τόσο ανά τεχνολογία σταθμών - με και χωρίς δυνατότητα άντλησης - όσο και από κοινού.

Λέξεις Κλειδιά

Επάρκεια Ισχύος, Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί, Τεχνική Προσομοίωσης Monte Carlo, Ικανότητα Συνεισφοράς Ισχύος (Capacity Value), Ανακατανομή Λειτουργίας σε Πραγματικό Χρόνο

Abstract

The net-zero energy target agreed by EU Member States provides for the fundamental transformation of existing power systems, including the gradual decommissioning of thermal power plants in favor of amplified renewable energy sources (RES) penetration in the energy mix. In such a RES-dominated landscape, flexible assets, such as hydropower and storage stations, are required to complement intermittent renewable generation and mitigate any loss of load events, thus allowing the system to preserve acceptable resource adequacy levels. However, specifically regarding resource adequacy studies, the literature review findings showcase that hydropower plants (HPPs) are modeled in a rather simplistic manner, which fails to fully capture their ability to contribute to system reliability. The main objective of this dissertation is the development of a novel methodology for modeling both traditional HPPs and open-loop pumped storage HPPs in the context of resource adequacy studies. The underlying assumption of the proposed methodology is that the HPPs should contribute to system adequacy to the maximum extent, adhering to their technical constraints and utilizing the energy reserves maintained in their upper reservoirs while, at the same time, avoiding severe deviations from their market schedule. For the realization of the latter, the proposed algorithm ensures that at the end of a disturbance event a corrective action takes place to restore the power output of HPPs to scheduled levels. This remedial action is an important feature of the proposed model, as it guarantees the continuity of market decisions after the clearance of unexpected loss of load events. The proposed methodology accounts for the unscheduled outages of hydropower units occurring during real-time operation. It further considers the operation of hydropower fleet for purposes other than electrification, including mandatory water outflows to cover irrigation and water supply needs. Hence, a realistic simulation of the HPPs' operation is achieved, taking into account their full potential to contribute to adequacy while respecting their inherent constraints. The application of the method derives the key adequacy indices, namely LOLE (Loss of Load Expectation) and EENS (Expectation of Energy Not Supplied), as well as the Capacity Value of HPP assets, calculated by the Equivalent Firm Capacity (EFC) metric. The effectiveness of the proposed methodology is demonstrated through its implementation in power systems with different levels of adequacy and by comparing it with the widely used HPP modeling methods in resource adequacy studies (Peak Shaving and Capacity Expansion Planning). In all study cases, the proposed methodology yields consistently high capacity values due to its ability to redispatch the operation of HPPs in real-time, while providing the most consistent and representative modeling of HPPs compared to other techniques. Resource adequacy is performed using the Monte Carlo simulation technique. The contribution of HPPs to system adequacy is assessed both

per plant technology - with and without pumping capability - and in terms of how they cooperate.

Keywords

Resource Adequacy, Monte Carlo Method, Adequacy Metrics, Capacity Value, Real-time Redispatch, Hydropower Plants

Ευχαριστίες

Θα ήθελα, πρωτίστως, να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Σταύρο Παπαθανασίου, Καθηγητή Ε.Μ.Π., ο οποίος με ενέπνευσε να ασχοληθώ με τον τομέα της ενέργειας και μου έδωσε την ευκαιρία να εντρυφήσω σε ένα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα. Ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Παντελή Δράτσα για την καθοδήγηση, τη στήριξη και την επιμονή του στις λεπτομέρειες καθ' όλη τη διάρκεια αυτού του εγχειρήματος. Ευχαριστώ, επίσης, τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Γιώργο Ψαρρό για τις καίριες επεμβάσεις και συμβουλές του κατά την εκπόνηση της εργασίας. Ακόμη, ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Βαγγέλη Χατζηστυλιανό για την παροχή των δεδομένων εισόδου του μοντέλου που αναπτύχθηκε. Είμαι ευγνώμων για όλους μου τους φίλους, κοντινούς και μακρινούς, και συμφοιτητές μου για τις ανησυχίες, τα άγχη, τα όνειρα και τις φιλοδοξίες που μοιραστήκαμε στην κοινή φοιτητική μας ζωή. Θέλω να ευχαριστήσω τον Άλεξ, που έκανε αυτό το διάστημα να μοιάζει ομορφότερο, την Ελίνα, τη Σοφία, την Άντα, που γέμισαν αυτά τα χρόνια με φως και την Ευτυχία, που μεγαλώνουμε και εξελισσόμαστε μαζί. Τέλος, θέλω να εκφράσω το μεγαλύτερο ευχαριστώ προς τους γονείς μου, Σοφία και Ηλία, για την απεριόριστη στήριξη, κατανόηση και αγάπη τους όλα αυτά τα χρόνια. Τους αφιερώνω όσα έχω καταφέρει έως σήμερα.

Αθήνα, Μάρτιος 2024

Χριστίνα Κωστάκη

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Ευχαριστίες	11
1 Εισαγωγή	21
1.1 Γενικά	21
1.2 Αντικείμενο της Εργασίας	22
1.3 Συνεισφορά	23
1.4 Δομή και Οργάνωση	24
2 Επάρκεια Ισχύος ΣΗΕ	25
2.1 Αξιοπιστία και Επάρκεια Ισχύος ΣΗΕ	25
2.1.1 Βασικές Έννοιες Αξιοπιστίας ΣΗΕ	25
2.1.2 Μέθοδοι Υπολογισμού Επάρκειας ΣΗΕ	28
2.2 Ικανότητα Συνεισφοράς Ισχύος στην Επάρκεια ΣΗΕ	39
2.2.1 Δείκτες Υπολογισμού Ικανότητας Συνεισφοράς Ισχύος	41
3 Υδροηλεκτρική Ενέργεια	45
3.1 Είδη Υδροηλεκτρικών Σταθμών	47
3.1.1 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί Φυσικής Ροής	47
3.1.2 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί με Ταμιευτήρα	48
3.1.3 Υδροαντλητικοί Σταθμοί	49
3.1.4 Υπεράκτιοι Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί	52
3.2 Διαδικασία Παραγωγής Ενέργειας	53
3.3 Διαδικασία Άντλησης Ενέργειας	55
3.4 ΥΗΣ στο Ελληνικό Σύστημα	57
3.5 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	58
4 Μεθοδολογία Προβλήματος	63
4.1 Μεθοδολογία Μελέτης Επάρκειας ΣΗΕ	64
4.1.1 Μεθοδολογία Ένταξης Συμβατικών Μονάδων Παραγωγής	64
4.1.2 Μεθοδολογία Υπολογισμού Υπολειπόμενου Φορτίου	66
4.1.3 Μεθοδολογία Ένταξης Υδροηλεκτρικών Σταθμών	67
4.1.4 Υπολογισμός των Δεικτών Επάρκειας	68

4.2	Μεθοδολογία Μοντελοποίησης Υδροηλεκτρικών Σταθμών	71
4.2.1	Μοντελοποίηση ΥΗΣ χωρίς Δυνατότητα Άντλησης	72
4.2.2	Μοντελοποίηση ΥΗΣ με Δυνατότητα Άντλησης	74
4.2.3	Μοντελοποίηση Κοινής Συμβολής στην Επάρκεια Ισχύος	77
4.2.4	Λοιποί Περιορισμοί και Διερευνήσεις	80
4.3	Υπολογισμός Ικανότητας Συνεισφοράς Ισχύος	85
5	Αποτελέσματα	87
5.1	Σενάριο Αναφοράς: Αποτελέσματα Προτεινόμενης Μεθοδολογίας	87
5.1.1	Αποτελέσματα Μοντελοποίησης ΥΗΣ χωρίς Δυνατότητα Άντλησης	89
5.1.2	Αποτελέσματα Μοντελοποίησης ΥΗΣ με Δυνατότητα Άντλησης	92
5.1.3	Αποτελέσματα Μοντελοποίησης Κοινής Συμβολής στην Επάρκεια Ισχύος	95
5.2	Μεθοδολογία προς Σύγκριση - Τεχνική Αποκοπής Αιχμών	99
5.3	Παραλλαγές Εγκατεστημένης Υδροηλεκτρικής Παραγωγής	110
6	Συμπεράσματα και Προοπτικές	117
6.1	Συμπεράσματα	117
6.2	Προοπτικές - Μελλοντικές Επεκτάσεις	119
	Παραρτήματα	121
	Α΄ Δεδομένα Εισόδου Μοντέλου	123
	Βιβλιογραφία	133

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Καμπύλη Κόστους - Αξιοπιστίας Συστήματος	27
2.2	Αξιοπιστία - Ασφάλεια - Επάρκεια [1]	28
2.3	Διαδικασία Σύγκλισης στη Μέθοδο Monte Carlo	34
2.4	Διαδικασία Σύνθεσης Αθροιστικής Χρονοσειράς Διαθεσιμότητας	36
2.5	Μέθοδοι Αξιολόγησης των Μετρικών Capacity Value	43
3.1	Διατάξεις Αντλίας - Στροβίλου σε Υδροαντλητικούς Σταθμούς Παραγωγής	50
4.1	Χρονοσειρά Διαθεσιμότητας Θερμικής Παραγωγής ενός Δείγματος Monte Carlo	65
4.2	Διαδικασία Σύνθεσης Υπολειπόμενου Φορτίου	67
4.3	Διαγράμματα Λειτουργίας ΥΗΣ	68
4.4	Σύγκριση Χρονοσειρών Παραγωγής και Ζήτησης	69
4.5	Αλγόριθμος HPP Reservoir Redispatch	73
4.6	Διάγραμμα Υλοποίησης HPP Reservoir Redispatch	74
4.7	Αλγόριθμος Open-loop PSH Redispatch	75
4.8	Παράδειγμα Υλοποίησης Open-loop PSH Redispatch	76
4.9	Αλγόριθμος HPP Reservoir &Open-loop PSH Redispatch	78
4.10	Παράδειγμα Υλοποίησης Redispatch	79
4.11	Διαχείριση Πλεονάζουσας Ενέργειας - Open-loop PSH	81
4.12	Διαφορετικές Μέθοδοι Διαχείρισης Πλεονάζουσας Ενέργειας - Ετήσια Καμπύλη Φόρτισης HPP Reservoir	82
4.13	Παράδειγμα Λειτουργίας του HPP Reservoir σύμφωνα με την Προτεινόμενη Διαχείριση Πλεονάζουσας Ενέργειας	83
4.14	Μεθοδολογία Αξιολόγησης του Capacity Value βάσει του δείκτη EFC	85
5.1	Συγκεντρωτική Αναπαράσταση Καμπυλών Λειτουργίας των HPP Reservoir	88
5.2	HPP Reservoir: Αποτελέσματα LOLE για 35 Κλιματικά Έτη	89
5.3	HPP Reservoir: Αποτελέσματα EENS για 35 Κλιματικά Έτη	90
5.4	HPP Reservoir: Αποτελέσματα Capacity Value για 35 Κλιματικά Έτη	90
5.5	Παράδειγμα Περιορισμού Παραγωγής HPP Reservoir λόγω Μερικής Διαθεσι- μότητας	91
5.6	Open-Loop PSH: Αποτελέσματα LOLE για 35 Κλιματικά Έτη	92
5.7	Open-Loop PSH: Αποτελέσματα EENS για 35 Κλιματικά Έτη	93
5.8	Open-Loop PSH: Αποτελέσματα Capacity Value για 35 Κλιματικά Έτη	93
5.9	Παράδειγμα Αντιμετώπισης Ανεπάρκειας με Redispatch στους Open-loop PSH	94
5.10	Κοινή Συμβολή: Αποτελέσματα LOLE για 35 Κλιματικά Έτη	95

5.11	Κοινή Συμβολή: Αποτελέσματα EENS για 35 Κλιματικά Έτη	96
5.12	Κοινή Συμβολή: Αποτελέσματα Capacity Value για 35 Κλιματικά Έτη	96
5.13	Παράδειγμα Λειτουργίας Συστήματος λόγω Κοινής Συμβολής στην Επάρκεια Ισχύος	97
5.14	Διαδικασία Υπολογισμού Peak Shaving	100
5.15	Αναπαράσταση Χρονοσειράς Φορτίου μετά την Εφαρμογή του Peak Shaving .	100
5.16	Αποτελέσματα Peak Shaving για Διαφορετικά Χρονικά Διαστήματα Εφαρμογής	102
5.17	Καμπύλες Διάρκειας Φορτίου και Καμπύλες Λειτουργίας των Open-loop PSH για Διαφορετικά Χρονικά Διαστήματα Εφαρμογής της Τεχνικής Peak Shaving	104
5.18	Καμπύλες Διάρκειας Φορτίου και Καμπύλες Λειτουργίας των HPP Reservoir για Διαφορετικά Χρονικά Διαστήματα Εφαρμογής της Τεχνικής Peak Shaving	105
5.19	Σύγκριση Τιμών Capacity Value μεταξύ Peak Shaving και Redispatch ανά είδος ΥΗΣ	106
5.20	Αποτελέσματα Capacity Value των HPP Reservoir για Διαφορετικά Επίπεδα Επάρκειας ΣΗΕ ανά Χρονικό Διάστημα Εφαρμογής Peak Shaving	107
5.21	Παράδειγμα Σύγκρισης της Λειτουργίας των ΥΗΣ μέσω Peak Shaving και Redispatch	108
5.22	Καμπύλη Λειτουργίας HPP Reservoir του 23ου Κλιματικού Έτους	110
5.23	Προσθήκη ΥΗΣ στο ΣΗΕ - Σενάριο 8.3 GW CCGT	111
5.24	Προσθήκη ΥΗΣ στο ΣΗΕ - Σενάριο 5.3 GW CCGT	113
5.25	Τελικοί Δείκτες Επάρκειας μετά την Προσθήκη +700MW ΥΗΣ	114
5.26	Βελτίωση Δεικτών Επάρκειας με την Προσθήκη ΥΗΣ για Διαφορετικά Επίπεδα Επάρκειας ΣΗΕ	115
A.1	Χρονοσειρά Διαθεσιμότητας Θερμικής Παραγωγής	125
A.2	Δεδομένα Λειτουργίας ΣΗΕ 35 Κλιματικών Ετών	127

Κατάλογος Εικόνων

3.1	Ποσοστό Παραγωγής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές ανά Τεχνολογία [2]	45
3.2	Αναπαράσταση του Κύκλου του Νερού [3]	46
3.3	Αναπαράσταση ΥΗΣ Φυσικής Ροής [4]	47
3.4	Αναπαράσταση ΥΗΣ με Ταμιευτήρα [5]	49
3.5	Αναπαράσταση Υδροαντλητικών Σταθμών Ανοιχτού και Κλειστού Βρόγχου [6]	51
3.6	Γεννήτριες Παλιρροιακών Ρευμάτων [7]	52
3.7	Φράγματα Παλιρροιακών Ρευμάτων [8]	53
3.8	Διάταξη Στροβίλου Pelton [9]	54
3.9	Διατάξεις Στροβίλων Ανάδρασης	55

Κατάλογος Πινάκων

3.1	Υφιστάμενοι ΥΗΣ Συνδεδεμένοι στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας	57
3.2	Δείκτες Συνεισφοράς ΥΗΣ στην Επάρκεια Ισχύος	61
5.1	Χαρακτηριστικά του υπό μελέτη ΣΗΕ	88
Α.1	Δεδομένα Παραγωγής ΣΗΕ	124
Α.2	Χαρακτηριστικά Θερμικών Μονάδων Παραγωγής	125
Α.3	Δεδομένα Λειτουργίας ΣΗΕ : Μέσες Τιμές 35 Κλιματικών Ετών	126

Κεφάλαιο **1**

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Οι αλληπάλληλες κοινωνικοοικονομικές εξελίξεις των τελευταίων χρόνων σε συνδυασμό με την υφιστάμενη κλιματική κρίση έχουν θέσει τον τομέα της ενέργειας στο επίκεντρο του διεθνούς αλλά και του εγχώριου ενδιαφέροντος. Η αυξητική τάση του παγκόσμιου πληθυσμού παράλληλα με τις αναπτυσσόμενες ανάγκες των πολιτών, οδηγούν σε ολοένα και μεγαλύτερες απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτές συμβάλλει η ενεργειακή μετάβαση, την οποία επιδιώκει η πλειονότητα των ανεπτυγμένων χωρών, αποσκοπώντας στην επίτευξη σταδιακής κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050. Ο στόχος αυτός μεταφράζεται ως απομάκρυνση των ορυκτών καυσίμων από την βιομηχανία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς, ως μορφή ενέργειας, ευθύνεται για το υψηλό ποσοστό εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, υπαίτια για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Αυτή η απόφαση έχει ως αποτέλεσμα τον εξηλεκτρισμό της συντριπτικής πλειοψηφίας των τομέων της οικονομίας, επιφέροντας ριζικές αλλαγές στη φύση και τον τρόπο λειτουργίας των διαδικασιών παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η διεθνής πορεία προς την απανθρακοποίηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ), υπογραμμίζει την αναγκαιότητα αφενός ορθής αξιοποίησης των υπαρχόντων πόρων και αφετέρου εύρεσης καινοτόμων λύσεων, προκειμένου να διασφαλιστεί η βιώσιμη ανάπτυξη και η προστασία του περιβάλλοντος για τις επόμενες γενιές.

Η απόσυρση των θερμικών μονάδων παραγωγής από το ενεργειακό μείγμα μεταθέτει την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε άλλες μορφές παραγωγής ενέργειας. Πρόκειται για τεχνολογίες, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), οι οποίες αξιοποιούν τους φυσικούς πόρους του περιβάλλοντος και δεν το επιβαρύνουν με την εκπομπή επιβλαβών αερίων κατά τη λειτουργία τους. Παρά το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα των ΑΠΕ συγκριτικά με τις θερμικές μονάδες παραγωγής υπό το πρίσμα της προστασίας του περιβάλλοντος, υστερούν ως προς την αξιοπιστία και την συνέπεια της παραγωγής τους. Η στοχαστικότητα της παραγωγής αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό όλων των ΑΠΕ, εξαιτίας της μεταβλητής και τυχαίας φύσης των "πρώτων υλών", κυρίως της ηλιοφάνειας και του ανέμου. Ως εκ τούτου, οι ΑΠΕ καθίστανται δύσχρηστες, εάν δεν συνδυάζονται με ευέλικτες παραγωγικές μονάδες, ικανές να προσαρμόζουν τη λειτουργία τους στην ανανεώσιμη παραγωγή. Παραδοσιακά, την απρόβλεπτη ανανεώσιμη παραγωγή αντιστάθμιζαν οι θερμικές μονάδες παραγωγής, μέσω της αδράνειας και της αδιάλειπτης παραγωγής - ανάλογης της ζήτησης - που προσέφεραν

στο ΣΗΕ. Σύντομα, τον ρόλο αυτό θα κληθούν να αναλάβουν τόσο λοιπά συμβατικά στοιχεία του υπάρχοντος συστήματος όσο και νέες εντάξεις αποθηκευτικών μονάδων.

Τα κυριότερα υφιστάμενα στοιχεία παραγωγής, κατάλληλα να συμβάλουν στην διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας και της επάρκειας του ΣΗΕ, πλην των θερμικών μονάδων, είναι οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί ενέργειας. Η ιδιαιτερότητα της ενέργειας προερχόμενη από την κίνηση των υδάτων και οι διαφορετικές ανεπτυγμένες τοπολογίες υδροηλεκτρικών σταθμών, τους καθιστά τη βέλτιστη επιλογή μονάδων βάσης, ικανών να εξασφαλίσουν την εύρυθμη και αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος ενέργειας, υπό συνθήκες αυξημένης διείσδυσης ΑΠΕ. Οι κλασσικοί υδροηλεκτρικοί σταθμοί με ταμιευτήρα, παρά το γεγονός πως αποτελούν κι αυτοί μια μορφή ΑΠΕ, διακρίνονται για την ικανότητά τους να διαχειρίζονται κατά βούληση την αποθηκευμένη ενέργειά τους για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Το γεγονός αυτό συνεισφέρει στην ευελιξία του συστήματος, ενώ η συμβολή τους ενισχύεται στην περίπτωση των υδροηλεκτρικών σταθμών που διαθέτουν και λειτουργία άντλησης. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει τη συνδυαστική λειτουργία με ΑΠΕ, σε συνθήκες αδυναμίας απορρόφησής τους από το σύστημα, οδηγώντας έτσι στην καλύτερη αξιοποίηση τους.

1.2 Αντικείμενο της Εργασίας

Οι υφιστάμενες προσεγγίσεις ένταξης των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής (ΥΗΣ) στις μελέτες επάρκειας των ΣΗΕ περιορίζονται στην υιοθέτηση μιας δεδομένης πολιτικής λειτουργίας, με γνώμονα είτε την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος είτε την συνεισφορά τους στην επάρκεια ισχύος. Επιπλέον, συχνά καταφεύγουν σε απλοποιήσεις αναφορικά με τη λειτουργία των εν λόγω σταθμών, μη λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα των επιμέρους λειτουργικοτήτων τους και αμελώντας την επίδραση απρόοπτων γεγονότων απώλειας δυναμικού παραγωγής που συμβαίνουν σε πραγματικό χρόνο στο προφίλ της παραγωγής τους. Για τον λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η επανεξέταση του τρόπου ενσωμάτωσης των ΥΗΣ στις μελέτες επάρκειας ισχύος.

Στοχεύοντας στη ρεαλιστική και πλήρη μοντελοποίηση των ΥΗΣ, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη μιας διαφορετικής μεθόδου αξιολόγησης της συμβολής τους στην επάρκεια του ΣΗΕ. Η βασική ιδέα έγκειται στον έλεγχο επάρκειας του υπό εξέταση συστήματος, σε πραγματικό χρόνο, και στην κατάλληλη διαχείριση των ΥΗΣ, όταν διαπιστώνεται πως η διαθέσιμη λοιπή παραγωγή του συστήματος αδυνατεί να ικανοποιήσει το φορτίο ζήτησης.

Κατά την προτεινόμενη μέθοδο, η λειτουργία των ΥΗΣ αρχικά καταστρώνεται σύμφωνα με τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος υπό το πρίσμα ελαχιστοποίησης του κόστους παραγωγής του, λαμβάνοντας υπόψιν τα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε σταθμού καθώς και το σύνολο των λειτουργικοτήτων του (ηλεκτροπαραγωγή, κάλυψη αναγκών άρδευσης κ.λπ.). Στη συνέχεια, το προφίλ λειτουργίας τους τροποποιείται, όταν, με βάση τον έλεγχο επάρκειας που υλοποιείται σε πραγματικό χρόνο, παρίσταται ζήτημα απώλειας φορτίου εντός του ΣΗΕ. Στην περίπτωση αυτή, η λειτουργία των ΥΗΣ ανακατανέμεται, με σεβασμό προς τους λειτουργικούς τους περιορισμούς, στοχεύοντας στην εξάλειψη του γεγονότος ανεπάρκειας. Όσο το ΣΗΕ δεν αντιμετωπίζει ζητήματα απώλειας φορτίου, η λειτουργία των ΥΗΣ ταυτίζεται με αυτή του αρχικού προγραμματισμού που εξασφαλίζει την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής του ΣΗΕ. Σημειώνεται ότι, η παρούσα εργασία, εστιάζει στη δημιουργία του μοντέλου

ανακατανομής των ΥΗΣ σε πραγματικό χρόνο σύμφωνα με τις ανάγκες ισχύος του ΣΗΕ, ενώ για τον αρχικό προγραμματισμό της λειτουργίας τους αξιοποιείται μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας του ΣΗΕ που έχει αναπτυχθεί σε παλαιότερη διπλωματική εργασία.

Η μελέτη επάρκειας του ΣΗΕ που αναπτύσσεται εντός της παρούσας εργασίας, υλοποιείται βάσει της τεχνικής Monte Carlo, προκειμένου να προσομοιωθεί η στοχαστικότητα της διαθέσιμης συμβατικής παραγωγής. Μέσω της τεχνικής αυτής επιτυγχάνεται η ενσωμάτωση της τυχαιότητας εμφάνισης μη προγραμματισμένων διακοπών λειτουργίας των μονάδων παραγωγής στη διαδικασία υπολογισμού του επιπέδου επάρκειας του ΣΗΕ, εξασφαλίζοντας την ρεαλιστική προσομοίωση του συστήματος παραγωγής. Πέραν των συμβατικών μονάδων παραγωγής, στην παρούσα μοντελοποίηση εντάσσεται η πιθανότητα εμφάνισης μη προγραμματισμένων βλαβών και για τους ΥΗΣ, αποσκοπώντας στην αντιπροσωπευτική ένταξή τους στη μελέτη επάρκειας ισχύος.

Η προτεινόμενη μέθοδος εξετάζει δύο είδη ΥΗΣ φυσικών εισροών - με και χωρίς δυνατότητα άντλησης. Διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος των ΥΗΣ και εφαρμόζεται τόσο μεμονωμένα σε κάθε σύνολο μονάδων ίδιας τεχνολογίας, όσο και συνολικά, εξετάζοντας την από κοινού συμβολή των δύο ειδών στην επάρκεια του συστήματος.

1.3 Συνεισφορά

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας μοντελοποίησης των ΥΗΣ στα πλαίσια των μελετών επάρκειας, στοχεύοντας στην ρεαλιστική αναπαράσταση της λειτουργίας τους με γνώμονα την συμβολή στην επάρκεια ισχύος αλλά και τη διατήρηση ενός αντιπροσωπευτικού προφίλ λειτουργίας που εξασφαλίζει την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας του ΣΗΕ. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στον κεντρικό άξονα, γύρω από τον οποίο αναπτύχθηκε η προτεινόμενη μέθοδος, τον έλεγχο επάρκειας του ΣΗΕ και την αναπροσαρμογή της λειτουργίας των ΥΗΣ σε πραγματικό χρόνο. Η ρεαλιστική ένταξη των ΥΗΣ στην προτεινόμενη μεθοδολογία εξασφαλίζεται μέσω της ενσωμάτωσης των τεχνικών και λειτουργικών τους περιορισμών, των απρόβλεπτων απωλειών δυναμικού παραγωγής που διέπουν τη λειτουργία τους και τις λοιπές ανάγκες που καλούνται να εξυπηρετήσουν, πέραν της ηλεκτροπαραγωγής.

Το κύριο πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι το γεγονός, πως δεν καταφεύγει σε μονοδιάστατες προσεγγίσεις μοντελοποίησης της λειτουργίας των ΥΗΣ, αποκλειστικά π.χ. υπό το πρίσμα της επάρκειας ή της οικονομικότητας του συστήματος παραγωγής, όπως συμβαίνει στις επικρατούσες πολιτικές ένταξής τους σε μελέτες επάρκειας. Αντιθέτως, ακολουθείται ένα μοντέλο λειτουργίας που διασφαλίζει τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος το οποίο δύναται να τροποποιηθεί δυναμικά σε πραγματικό χρόνο με στόχο τη μείωση των απωλειών φορτίου. Η προτεινόμενη μεθοδολογία δύναται να εφαρμοστεί συνδυαστικά με οποιαδήποτε πολιτική λειτουργίας ακολουθείται από τους ΥΗΣ γεγονός που την καθιστά γενικεύσιμη σε οποιοδήποτε προφίλ προγραμματισμένης λειτουργίας των ΥΗΣ και εφαρμόσιμη σε οποιοδήποτε σύστημα εξέτασης.

Προκειμένου να αναδειχθεί η προτεινόμενη μέθοδος, εξετάζεται σε διαφορετικά, ως προς το επίπεδο επάρκειας, ΣΗΕ και υπολογίζεται η βελτίωση που επιφέρει στους αντίστοιχους δείκτες επάρκειας. Σε όλο το εύρος αξιολόγησης της μεθόδου, η συνεισφορά των υδροη-

λεκτρικών σταθμών στην επάρκεια του ΣΗΕ λαμβάνει σταθερά υψηλές τιμές, γεγονός που αποδεικνύει την αποτελεσματικότητά της ανεπτυγμένης μεθοδολογίας σε διαφορετικά επίπεδα επάρκειας.

Ως εκ τούτου, αποτελεί χρήσιμο εργαλείο προσομοίωσης της υδροηλεκτρικής παραγωγής σε μελέτες επάρκειας συστημάτων ενέργειας, αλλά και γενικότερα, σε οποιοδήποτε πλαίσιο αξιολογείται η συμπεριφορά και το εύρος δυνατοτήτων των υδροηλεκτρικών σταθμών.

1.4 Δομή και Οργάνωση

Η εργασία αυτή είναι οργανωμένη σε έξι κεφάλαια :

- Στο **Κεφάλαιο 2** παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο των εννοιών της αξιοπιστίας και της επάρκειας του ΣΗΕ, με τους αντίστοιχους τρόπους υπολογισμού και δείκτες ποσοτικοποίησης της ικανότητας συνεισφοράς των μονάδων στην επάρκεια του συστήματος.
- Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται αναφορά στα είδη των ΥΗΣ και τις κύριες λειτουργίες τους. Ακόμη, περιέχεται μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με τον τρόπο ένταξης των υδροηλεκτρικών μονάδων σε μελέτες επάρκειας συστημάτων ενέργειας.
- Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται εκτενώς η προτεινόμενη μεθοδολογία ανακατανομής της λειτουργίας των ΥΗΣ σε πραγματικό χρόνο, ανά τεχνολογία αλλά και από κοινού.
- Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου. Πέραν του κύριου συνόλου των αποτελεσμάτων, διερευνώνται διαφορετικές τοπολογίες και πραγματοποιείται σύγκριση με υφιστάμενες πολιτικές ένταξης των υδροηλεκτρικών σταθμών σε μελέτες επάρκειας.
- Στο **Κεφάλαιο 6** αναφέρονται τα συμπεράσματα αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και μελλοντικές επεκτάσεις της.

Κεφάλαιο 2

Επάρκεια Ισχύος ΣΗΕ

Στο κεφάλαιο ορίζονται οι βασικές έννοιες της αξιοπιστίας και της επάρκειας των ΣΗΕ. Ακολουθώντας, παρατίθενται οι κύριες μεθοδολογίες εκτίμησης της επάρκειας των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και παρουσιάζονται οι βασικοί δείκτες για την αξιολόγηση της. Ακόμη, ορίζεται η έννοια της ικανότητας συνεισφοράς ισχύος (Capacity Value) μιας παραγωγικής μονάδας, ως το μέτρο αξιολόγησης της συμβολής της στην επάρκεια ισχύος του συστήματος, και περιγράφεται η μέθοδος υπολογισμού της, ανάλογα με την τεχνολογία των επιμέρους στοιχείων παραγωγής του ΣΗΕ.

2.1 Αξιοπιστία και Επάρκεια Ισχύος ΣΗΕ

2.1.1 Βασικές Έννοιες Αξιοπιστίας ΣΗΕ

Ο πρωταρχικός σκοπός των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι η παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας με ασφάλεια, σε χαμηλό κόστος και υψηλή ποιότητα στους καταναλωτές. Για το σκοπό, αυτό, το ηλεκτρικό σύστημα ενέργειας, προγραμματίζεται έτσι, ώστε να ελαχιστοποιούνται η πιθανότητα, η χρονική διάρκεια αλλά και η συχνότητα εμφάνισης διακοπών παροχής ενέργειας του δικτύου. Πρωταρχικό ρόλο στον προγραμματισμό αυτό διαδραματίζει το σύστημα παραγωγής και η σχεδίαση αυτού ώστε να ικανοποιείται ανά πάσα στιγμή το ισοζύγιο ενέργειας, ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις που ενδέχεται να παρουσιάζει η ζήτηση. Για να επιτευχθεί η εξασφάλιση αδιάλειπτης και ποιοτικής παροχής ενέργειας ακόμη και σε περιπτώσεις βλαβών ή προγραμματισμένων εργασιών των μονάδων παραγωγής, απαιτείται πληθώρα εφεδρειών. Αυτές οι εφεδρείες αφορούν σε επιπλέον εξοπλισμό των συστημάτων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής, σε διασυνδέσεις με δίκτυα γειτονικών χωρών και σε εναλλακτικά συστήματα τροφοδοτήσεως σε χαμηλότερα επίπεδα - π.χ. παρουσία μονάδων UPS [10].

Όλα τα προαναφερθέντα μέτρα που υιοθετούνται από τους διαχειριστές των ΣΗΕ για την αποφυγή γεγονότων διακοπής της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, συνοψίζονται στην έννοια της αξιοπιστίας του ΣΗΕ. Η αξιοπιστία ενός ΣΗΕ εκφράζει την ικανότητά του να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε όλα τα σημεία κατανάλωσης, εντός των αποδεκτών λειτουργικών περιορισμών και στις απαιτούμενες ποσότητες [11]. Λόγω της ευρύτητας του όρου της αξιοπιστίας, αυτή διαιρείται σε δύο θεμελιώδεις έννοιες: την ασφάλεια και την επάρκεια.

Ο όρος της ασφάλειας σχετίζεται με την ικανότητα του ΣΗΕ να ανταποκρίνεται σε δυναμι-

κές ή παροδικές διαταραχές εντός του δικτύου, όπως τα βραχυκυκλώματα και οι απρόβλεπτες απώλειες των μονάδων παραγωγής σε συνδυασμό με λειτουργικούς περιορισμούς. Ακόμη, εμπεριέχει και τον όρο της ακεραιότητας, δηλαδή της διατήρησης της λειτουργίας του διασυνδεδεμένου συστήματος ή την αποφυγή της εκτός ελέγχου διάσπασης του συστήματος παρουσία ορισμένων ισχυρών διαταραχών. Συνεπώς, η ασφάλεια συνδέεται με την απόκριση του συστήματος στις διαταραχές που υφίσταται, και αναφέρεται εναλλακτικά ως δυναμική αξιοπιστία [11]. Στον υπολογισμό της ασφάλειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αξιολογείται η ανταπόκριση του ΣΗΕ σε διαταραχές, όπως οι προαναφερθείσες, καθώς και η ομαλή μετάβαση από μια δεδομένη κατάσταση σε μία επόμενη. Η αξιολόγηση της ασφάλειας περικλείεται στους ακόλουθους όρους:

- Μέγιστη αποδεκτή ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς
- Πλήθος επικουρικών υπηρεσιών (πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τριτεύουσα εφεδρεία), και
- Διαθεσιμότητα αέργου ισχύος για τη ρύθμιση της τάσης

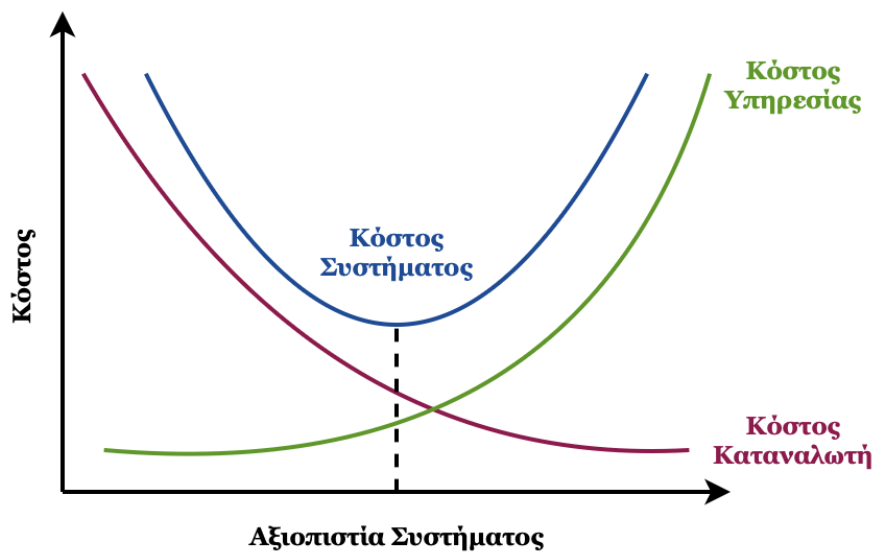
Η επάρκεια αφορά την ικανότητα του ΣΗΕ να ικανοποιείται το φορτίο ζήτησης κάθε χρονική στιγμή και υπό οποιοσδήποτε συνθήκες, λαμβάνοντας υπόψιν τους λειτουργικούς περιορισμούς και τα τεχνικά όρια των ηλεκτρικών στοιχείων. Με τον όρο στοιχεία εννοούνται οι μονάδες παραγωγής, αλλά και οι εγκαταστάσεις μεταφοράς και διανομής, μέχρι να φτάσει η ηλεκτρική ενέργεια στον τελικό καταναλωτή. Επισημαίνεται πως η επάρκεια δεν αναφέρεται σε δυναμικές ή μεταβατικές διαταραχές του συστήματος, για το λόγο αυτό καλείται και στατική αξιοπιστία [12]. Η αξιολόγηση της επάρκειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας δύναται να διαιρεθεί και να υλοποιηθεί διακριτά για τις ακόλουθες λειτουργικές ζώνες του δικτύου:

- Υπηρεσίες Παραγωγής
- Υπηρεσίες Μεταφοράς
- Υπηρεσίες Διανομής

Η μελέτη, λοιπόν, της επάρκειας του συστήματος γίνεται ανά επίπεδο λειτουργίας, με το πρώτο να αφορά μόνο το σύστημα παραγωγής, το δεύτερο τα συστήματα μεταφοράς και παραγωγής και το τρίτο, και το δίκτυο διανομής. Όσο χαμηλότερο το επίπεδο ιεραρχίας, τόσο λεπτομερέστερη η μελέτη, σε σημείο που στο τρίτο επίπεδο συχνά απλουστεύεται λόγω τεράστιου όγκου δεδομένων και παραμέτρων. Σε μελέτες που αφορούν το πρώτο λειτουργικό επίπεδο, θεωρείται πως η ποσότητα παραγόμενης ενέργειας φτάνει στον τελικό καταναλωτή αναλλοίωτη, δηλαδή τα συστήματα μεταφοράς και διανομής προσομοιώνονται ως ένας ισοδύναμος ζυγός. Ανάλογα με την εμβέλεια του συστήματος που πρόκειται να μελετηθεί αλλά και τις απαιτήσεις ως προς τη λεπτομέρεια προσομοίωσής του, επιλέγεται το κατάλληλο επίπεδο μελέτης.

Ο ορισμός του επιθυμητού επιπέδου επάρκειας ενός ΣΗΕ οφείλει, εφόσον εξετάζει και την οικονομική διάσταση του συστήματος, να αναπαριστά το σημείο τομής μεταξύ του κόστους

των νέων επενδύσεων και του κόστους της μη εξυπηρετούμενης ενέργειας. Στην πράξη, η επίτευξη της απόλυτης επάρκειας καθίσταται αδύνατη, λόγω των σημαντικά υψηλών επενδυτικών δαπανών, οι οποίες υπερβαίνουν τα αντίστοιχα οφέλη προς το ΣΗΕ και τους τελικούς καταναλωτές. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια συνεπής αξιολόγηση της οικονομίας και της αξιοπιστίας του ΣΗΕ, κρίνεται απαραίτητη η σύγκριση του κόστους επάρκειας - δηλαδή του επενδυτικού κόστους που απαιτείται για την επίτευξη ενός δεδομένου επιπέδου επάρκειας -, με την αξία της επάρκειας - το όφελος που αποκομίζει το ΣΗΕ. Μια προτεινόμενη προσέγγιση του ζητήματος, αποτελεί ο ορισμός ενός επιπέδου επιτρεπτού κόστους, αποδεκτό από το ΣΗΕ και τους καταναλωτές. Επενδυτικά σχήματα που κοστολογούνται χαμηλότερα από την τιμή αυτού του ορίου, αξιολογούνται ως βιώσιμα, ενώ όσα το υπερβαίνουν, απορρίπτονται. Η κεντρική ιδέα αναπαρίσταται στο Σχήμα 2.1. Το κόστος υπηρεσιών αυξάνεται, όσο αυξάνεται το επίπεδο αξιοπιστίας του ΣΗΕ, ενώ το κόστος προς τον τελικό καταναλωτή, εξαιτίας απωλειών φορτίου, μειώνεται με την αύξηση της αξιοπιστίας. Το συνολικό κόστος του συστήματος είναι το άθροισμα των δύο καμπυλών. Το ελάχιστο αυτής της καμπύλης υποδεικνύει το σημείο, όπου επιτυγχάνεται το οικονομικά βέλτιστο επίπεδο αξιοπιστίας [13].



Σχήμα 2.1: Καμπύλη Κόστους - Αξιοπιστίας Συστήματος

Καταληκτικά, η ασφάλεια σχετίζεται με την λειτουργία του συστήματος ενέργειας ενώ επάρκεια με τον σχεδιασμό του. Στην έννοια της επάρκειας εμπεριέχεται η μακροπρόθεσμη ικανότητα του συστήματος να καλύπτει το φορτίο, λαμβάνοντας υπόψιν την αβεβαιότητα της παραγωγής και της ζήτησης και την μελλοντική διεύρυνση του δικτύου. Ωστόσο, ο συνδυασμός των δύο εννοιών επιφέρει την εξασφάλιση της αξιοπιστίας ενός ΣΗΕ. Χωρίς την ασφάλεια του δικτύου, όσο επαρκής κι αν είναι η παραγωγή των μονάδων, η ισχύς δεν καταφέρνει να φτάσει στο τελικό σημείο κατανάλωσης. Από την άλλη, η υψηλών προδιαγραφών ασφάλεια δεν συνεπάγεται την ικανοποιητική παραγωγή και μεταφορά, ώστε να καλυφθεί η ολική ζήτηση του ΣΗΕ [14]. Στην παρούσα εργασία, η μελέτη της αξιοπιστίας εστιάζει στην αξιολόγηση της επάρκειας του συστήματος παραγωγής.

Αξιοπιστία ΣΗΕ	
Ασφάλεια	Επάρκεια
Ικανότητα του συστήματος να ανταποκρίνεται σε διαταραχές	Ικανότητα του συστήματος να παράγει την ζητούμενη ενέργεια
Στατικές συνθήκες	Δυναμικές συνθήκες
Βραχυπρόθεσμη Εμβέλεια	Μακροπρόθεσμη Εμβέλεια

Σχήμα 2.2: Αξιοπιστία - Ασφάλεια - Επάρκεια [1]

2.1.2 Μέθοδοι Υπολογισμού Επάρκειας ΣΗΕ

Όλες οι μεθοδολογίες, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί, προκειμένου να καθοριστεί και να υπολογιστεί το επίπεδο επάρκειας ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζονται στα ακόλουθα θεμελιώδη σημεία :

- Τον ορισμό του μοντέλου παραγωγής, το οποίο συμπεριλαμβάνει τις υπό εξέταση μονάδες παραγωγής, τα τεχνικά και λειτουργικά τους χαρακτηριστικά, καθώς και νέες εντάξεις μονάδων, οι οποίες θα λάβουν χώρα εντός του χρονικού ορίζοντα της μελέτης επάρκειας.
- Το προφίλ της ζήτησης του συστήματος, με στόχο να ενσωματωθούν ισχύουσες και μελλοντικές συμπεριφορές κατανάλωσης ενέργειας. Βασίζεται σε μοντέλα πρόβλεψης και εκτιμήσεις, τα οποία καθορίζουν τις κύριες μεταβλητές που επηρεάζουν την διαμόρφωση της ζήτησης (οικονομικά, κλιματικά δεδομένα κ.α.).
- Την ανάπτυξη ενός κοινού μοντέλου, όπου ενσωματώνονται η παραγωγή και η ζήτηση και αξιολογούνται οι μετρικές επάρκειας.

Σε παραδοσιακά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθιερωμένης δομής, οι μελέτες επάρκειας ανάγουν την εξασφάλιση αδιάλειπτης παροχής ενέργειας του συστήματος σε αποκλειστική ευθύνη του διαχειριστή του ΣΗΕ. Η απελευθέρωση της αγοράς και η ριζική αλλαγή που έχει επιφέρει στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτεί την ενεργό συμμετοχή και τον ανταγωνισμό των επί μέρους στοιχείων του ΣΗΕ για την αντιμετώπιση ζητημάτων αξιοπιστίας και επάρκειας [1].

Όσον αφορά τον τρόπο υπολογισμού της επάρκειας, διακρίνονται δύο κύριες κατηγορίες μεθοδολογιών: οι αιτιοκρατικές και οι πιθανοτικές. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά οι διάφορες μέθοδοι και παρατίθενται οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση του βαθμού επάρκειας ενός συστήματος - οι δείκτες επάρκειας.

Αιτιοκρατικές Μέθοδοι Υπολογισμού Επάρκειας ΣΗΕ

Οι αιτιοκρατικές ή ντετερμινιστικές μέθοδοι υπολογισμού εστιάζουν στην αξιολόγηση ενός συγκεκριμένου συνόλου καταστάσεων του συστήματος, των πιο αντιπροσωπευτικών και

ταυτόχρονα απαιτητικών, από άποψη φορτίου, περιόδων, προκειμένου να καθορίσουν την επάρκεια του ΣΗΕ. Ως εκ τούτου, αρκούνται σε χαμηλό υπολογιστικό χρόνο και περιορισμένα δεδομένα, αλλά απαιτούν βαθιά γνώση του υπό εξέταση συστήματος, κατά κανόνα παρεχόμενη από τους διαχειριστές του. Για τον υπολογισμό της μελέτης επάρκειας εξετάζεται ένα σύνολο διακριτών καταστάσεων του συστήματος (π.χ. τοπολογίες συστήματος και πλήθος μονάδων παραγωγής), ένα εύρος λειτουργικών καταστάσεων των στοιχείων (δηλαδή, κατανομή του φορτίου προς κάλυψη στις επί μέρους μονάδες παραγωγής), ένα σύνολο πιθανών διακοπών (π.χ. βλάβες των μονάδων παραγωγής), και διάφοροι δείκτες επίδοσης του ΣΗΕ (π.χ. τιμές τάσης, συχνότητας κ.α.). Τα παραπάνω δεδομένα, συνδυασμένα μεταξύ τους, έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικές λειτουργικές καταστάσεις του συστήματος, στις οποίες εξετάζεται η απόδοσή του, δηλαδή, σε τι βαθμό επιτυγχάνεται η ικανοποίηση της ζήτησης. Η ανάλυση του επιπέδου επάρκειας του συστήματος με χρήση ντετερμινιστικών μεθόδων βασίζεται στους ακόλουθους δείκτες [15]:

- **Περιθώριο Εφεδρείας (Reserve Margin)** ⇒ Ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος αιτιοκρατικός δείκτης επάρκειας, ο οποίος μετράει την πλεονάζουσα παραγωγή σε σχέση με την προβλεπόμενη ζήτηση. Ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής ενέργειας του ΣΗΕ και της αιχμής της ζήτησης, διαιρεμένη με την αιχμή της ζήτησης.
- **Δείκτης Κάλυψης (Coverage Index)** ⇒ Υπολογίζει την αναλογία της διαθέσιμης παραγόμενης ενέργειας ως προς την αιχμή του φορτίου.
- **Μεγαλύτερη Μονάδα (Largest Unit)** ⇒ Ο συγκεκριμένος δείκτης συγκρίνει τη διαφορά μεταξύ της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος και του, μειωμένου κατά τη μέγιστη ισχύ της μεγαλύτερης μονάδας του ΣΗΕ, φορτίου αιχμής. Πρακτικά, αξιολογεί, εάν το ΣΗΕ δύναται να καλύψει την αιχμή της ζήτησης του ακόμη και στην περίπτωση που η μεγαλύτερη μονάδα παραγωγής του βρίσκεται εκτός λειτουργίας.

Συνήθως οι παραπάνω δείκτες εξετάζονται μακροσκοπικά, αγνοώντας τη λειτουργία και τους περιορισμούς που επιφέρει η διαδικασία της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε γενικές γραμμές, η χρήση αιτιοκρατικών μεθόδων αξιολόγησης της επάρκειας του συστήματος, χάριν απλούστευσης και ταχύτητας αποτελέσματος, οδηγεί σε άμεσα και εύληπτα αποτελέσματα, ωστόσο παρουσιάζει συγκεκριμένα μειονεκτήματα. Αρχικά, αντιλαμβάνεται και αξιολογεί ένα δεδομένο, πολύ μικρό σύνολο καταστάσεων του συστήματος ως βάση για τον υπολογισμό της επάρκειας, οι οποίες έχουν επιλεγεί σύμφωνα με υποκειμενικά κριτήρια. Αυτά τα σύνολα καταστάσεων, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, έχουν συντεθεί από διαφορετικά σύνολα δεδομένων, στα οποία δεν υπεισέρχεται με κανέναν τρόπο η αλληλεξάρτηση των μεταβλητών τους, και η επίδραση αυτής στα δεδομένα εξόδου. Ακόμη, κάθε ένα από αυτά τα δεδομένα εξόδου θεωρείται πως έχει ίση πιθανότητα εμφάνισης, δηλαδή δεν γίνεται καμία ανάλυση ως προς το πόσο σύνηθες ή σπάνιο είναι ένα συγκεκριμένο προφίλ του υπό εξέταση συστήματος. Το μεγαλύτερο, όμως, μειονέκτημα των συγκεκριμένων μεθόδων έγκειται στην απουσία προσομοίωσης της συμβολής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στην επάρκεια του συστήματος. Αυτό οφείλεται στην αδυναμία μοντελοποίησης της στοχαστικότητας της ανανεώσιμης παραγωγής - η οποία βασίζεται σε μεταβλητά μετεωρολογικά δεδομένα, τα

οποία ενσωματώνονται μέσω μοντέλων πρόβλεψης. Γενικότερα, αγνοείται η στοχαστικότητα του συστήματος όσον αφορά όλες τις μεταβλητές του, για παράδειγμα δεν υπολογίζεται η τυχαιότητα εμφάνισης βλάβης στις μονάδες παραγωγής.

Για τους παραπάνω λόγους, οι ντετερμινιστικές μέθοδοι αξιολόγησης της επάρκειας του συστήματος χαρακτηρίζονται ως ανακριθείς και, στις περισσότερες μελέτες επάρκειας φορέων έχουν αντικατασταθεί από πιθανοτικά μοντέλα προσομοίωσης της συμπεριφοράς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιθανοτικές Μέθοδοι Υπολογισμού Επάρκειας ΣΗΕ

Οι πιθανοτικές μέθοδοι υπολογισμού εστιάζουν στην εκτίμηση της πιθανότητας ικανοποίησης της ζητούμενης ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψιν μεταβλητές και αβεβαιότητες που σχετίζονται με τις μονάδες παραγωγής και το προφίλ της ζήτησης. Τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν στις αιτιοκρατικές μεθόδους αξιολόγησης της επάρκειας, επιλύονται στην πιθανοτική προσέγγιση, καθώς αυτή εμπεριέχει την τυχαία φύση της παραγωγής και της ζήτησης, αξιολογεί σενάρια ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισής τους και περιέχει ένα ευρύ πλήθος καταστάσεων του συστήματος ενέργειας, χωρίς να εστιάζει σε συγκεκριμένες "κρίσιμες" περιόδους. Στο παρελθόν, βασικό ανασταλτικό παράγοντα για την ευρεία χρήση των πιθανοτικών μοντέλων αποτελούσε ο μεγάλος υπολογιστικός χρόνος και η αντίστοιχη υψηλή πολυπλοκότητα, εξαιτίας του πλήθους των μεταβλητών εισόδου και της φύσης της υπολογιστικής διαδικασίας. Με την πάροδο του χρόνου και την συνεχή τεχνολογική εξέλιξη, αυτό το ζήτημα έχει αντιμετωπιστεί, καθιστώντας τη δυναμική μελέτη του συστήματος την πλέον χρησιμοποιούμενη τακτική προσδιορισμού της επάρκειας του.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι κυριότερες πιθανοτικές μέθοδοι υπολογισμού της επάρκειας ισχύος.

Αναλυτική Μέθοδος

Στην αναλυτική μέθοδο αξιολόγησης του επιπέδου επάρκειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, σύννηθες εργαλείο μοντελοποίησης της παραγωγής του ΣΗΕ αποτελεί ο Πίνακας Πιθανότητας Απώλειας Ισχύος (Capacity Outage Probability Table - COPT). Ο πίνακας αυτός δημιουργείται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας και περιέχει τα διαφορετικά επίπεδα ισχύος του συστήματος, συνδεδεμένα με την αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισής τους. Κατά τη δημιουργία του, εισάγονται διαδοχικά όλες οι μονάδες παραγωγής του ΣΗΕ, με τις ανάλογες λειτουργικές τους καταστάσεις. Η πιθανότητα που χαρακτηρίζει κάθε ένα από τα επίπεδα ισχύος του συστήματος, αναπαριστά την αθροιστική πιθανότητα $P(X \geq C)$ της εμφάνισης απώλειας ισχύος X MW ίση ή μεγαλύτερη από C MW [16]. Στη συγκεκριμένη μέθοδο υπολογισμού, κάθε μονάδα παραγωγής αναπαρίσταται είτε από ένα μοντέλο δύο καταστάσεων - εντός και εκτός λειτουργίας -, είτε από μοντέλο περισσότερων επιπέδων λειτουργίας, όπως τα πολυεπίπεδα μαρκοβιανά μοντέλα. Για την περίπτωση του μοντέλου των δύο καταστάσεων, παρατίθεται η συνάρτηση μάζας πιθανότητας ενός δεδομένου επιπέδου ισχύος (X MW), λαμβάνοντας υπόψιν τη μη διαθεσιμότητα των μονάδων μέσω του δείκτη FOR (Forced Outage Ratio). Ο δείκτης αυτός αναπαριστά την πιθανότητα εμφάνισης μη προγραμματισμένων διακοπών στη λειτουργία του στοιχείου.

$$P^A(X) = (1 - FOR) * P^B(X) + FOR * P^B(X - C) \quad (2.1)$$

όπου $P^A(X)$ και $P^B(X)$ είναι οι συναρτήσεις μάζας πιθανότητας του δεδομένου επίπεδου του συστήματος (X MW) μετά και πριν την εφαρμογή του μοντέλου λειτουργίας των δύο καταστάσεων, αντίστοιχα [17].

Όσον αφορά τη ζήτηση του υπό μελέτη συστήματος, αυτή υπεισέρχεται στον υπολογισμό είτε με τη μορφή καμπύλης διάρκειας φορτίου, είτε με χρονολογική απεικόνιση του φορτίου. Όποια μορφή και να έχει, συνδυάζεται με τον Πίνακα Πιθανότητας Απώλειας Ισχύος, προκειμένου να εξαχθούν οι δείκτες επάρκειας. Κάθε κατάσταση απώλειας ισχύος του συστήματος, η οποία αδυνατεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση του ΣΗΕ, για έναν ορισμένο χρονικό ορίζοντα, συγκαταλέγεται στα συμβάντα ανεπάρκειας και συνυπολογίζεται στους αντίστοιχους δείκτες, πολλαπλασιασμένη με την αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισής της. Οι δείκτες επάρκειας παρατίθενται στο τέλος της παρούσας ενότητας. Παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη αναλυτική μέθοδος παρουσιάζει σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των υποκειμενικών, μη συμπεριληπτικών αιτιοκρατικών μεθόδων αξιολόγησης της επάρκειας, αμελεί την χρονολογική φύση της παραγωγής και της ζήτησης. Το γεγονός ότι εξετάζει το σύστημα χωρίς να συνυπολογίζει τις χρονικές εξαρτήσεις και τη διαδοχή των καταστάσεων λειτουργίας, έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία ορισμού των δεικτών επάρκειας που εξαρτώνται από τον χρόνο.

Μέθοδος Monte Carlo

Η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo (MC) πρόκειται για μια μαθηματική διαδικασία, η οποία χρησιμοποιείται στην μοντελοποίηση προβλημάτων που περιλαμβάνουν πληθώρα τυχαίων μεταβλητών [18]. Μέσω της μεθόδου εκτιμάται η πιθανότητα εμφάνισης ενός εύρους αποτελεσμάτων, λαμβάνοντας υπόψιν την αβεβαιότητα των μεταβλητών του συστήματος. Η διαδικασία στηρίζεται στην εκτέλεση πολλών επαναλήψεων, σε κάθε μία από τις οποίες, οι μεταβλητές του προβλήματος ανατίθενται σε τυχαίες τιμές, βάσει κάποιου εύρους εκτιμήσεων ή κάποιας συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας. Με το πέρας της προσομοίωσης, κάθε μεταβλητή συγκλίνει σε κάποια τιμή, η οποία αποτελεί και την τελική εκτίμησή της. Στηριζόμενη στο νόμο των μεγάλων αριθμών, η μέθοδος Monte Carlo εγγυάται ακριβή αποτελέσματα, ανάλογα με το πλήθος των επαναλήψεων που πραγματοποιούνται. Αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη διαδικασία στους τομείς των επενδύσεων, των επιχειρήσεων και ευρύτερα της οικονομίας, καθώς λειτουργεί ως εργαλείο ανάλυσης ρίσκων και εξαγωγής ασφαλών μακροπρόθεσμων προβλέψεων [19].

Στην εφαρμογή της τεχνικής Monte Carlo σε μελέτες αξιολόγησης επάρκειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, προσομοιώνονται όλα τα στοιχεία του υπό εξέταση ΣΗΕ, λαμβάνοντας υπόψιν την στοχαστική φύση τους, και εξάγεται η εκτίμηση ικανοποίησης της ζητούμενης ενέργειας, μέσω ποσοτικοποιημένων δεικτών επάρκειας που θα παρατεθούν στη συνέχεια.

Η μέθοδος Monte Carlo διακρίνεται σε δύο εναλλακτικές υλοποιήσεις: στη διαδοχική προσομοίωση Monte Carlo (sequential MC simulation) και τη μη διαδοχική προσομοίωση Monte Carlo (non-sequential MC simulation). Η τελευταία μοντελοποιεί τις καταστάσεις του συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια της υλοποίησης τυχαία, χωρίς να εξετάζεται η έννοια του χρόνου και η αλληλεξάρτηση διαδοχικών καταστάσεων λειτουργίας. Σε αυτή τη μέθοδο

υπολογισμού, τα αποτελέσματα, ύστερα από πλήθος επαναλήψεων, εξάγονται ανεξάρτητα για κάθε ξεχωριστή κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. Υπό αυτό το πρίσμα, φαίνεται να μοιάζει αρκετά με τις αναλυτικές μεθόδους που παρατίθενται παραπάνω. Αντιθέτως, η διαδοχική ή χρονολογική προσέγγιση σέβεται την ακολουθία των καταστάσεων και αξιολογεί τη συμπεριφορά του συστήματος, προσομοιώνοντας όσο το δυνατόν ακριβέστερα την πραγματική λειτουργία του ΣΗΕ για το δεδομένο χρονικό διάστημα της μελέτης [20]. Οι ακόλουθες παράγραφοι, αλλά και η υλοποίηση της παρούσας εργασίας στηρίζεται στο διαδοχικό μοντέλο προσομοίωσης Monte Carlo.

Όσον αφορά τις μεταβλητές εισόδου της προσομοίωσης MC, ο τυχαίος χαρακτήρας τους καθορίζεται είτε από κάποιο εύρος εκτιμήσεων είτε μέσω μιας συνάρτησης κατανομής πιθανότητας. Οι συναρτήσεις αυτές ορίζουν την πιθανότητα εμφάνισης μιας τυχαίας μεταβλητής, διακριτής ή συνεχούς τιμής. Οι διακριτές συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας - όπως αυτές που χαρακτηρίζουν την κατάσταση λειτουργίας μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας - αναπαρίστανται συνήθως από μια ακολουθία πεπερασμένων αριθμών και συχνά ακολουθούν μια συγκεκριμένη κατανομή. Τέτοιες κατανομές μπορεί να είναι η κανονική, η ομοιόμορφη, η τριγωνική κατανομή κ.α.

Η διάρθρωση του μαθηματικού μοντέλου Monte Carlo για τη μελέτη επάρκειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στα ακόλουθα στοιχεία:

- **Μεταβλητές Εισόδου** \Rightarrow Πρόκειται για όλα τα στοιχεία του συστήματος, τα οποία επιδρούν στην αξιολόγηση της επάρκειάς του. Αυτά είναι οι μονάδες παραγωγής και το προφίλ της ζήτησης. Η αβεβαιότητα των στοιχείων αυτών, συναντάται, μεταξύ άλλων, στις απρόβλεπτες βλάβες των συμβατικών μονάδων παραγωγής, στα μετεωρολογικά στοιχεία που καθορίζουν την παραγωγή μέσω ΑΠΕ και στη διαμόρφωση της τελικής ζήτησης. Η τυχαιότητα όλων αυτών των μεταβλητών επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα του μοντέλου, οπότε και συνυπολογίζεται κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης.
- **Μεταβλητές Εξόδου** \Rightarrow Αποτελούν τα ζητούμενα αποτελέσματα της ανάλυσης Monte Carlo. Στην προκειμένη περίπτωση, είναι οι δείκτες αξιοπιστίας, οι οποίοι υπολογίζονται σε κάθε επανάληψη του μοντέλου. Η αναπαράστασή τους, συνήθως, έχει τη μορφή μιας συνεχούς καμπύλης, η οποία συγκλίνει σε κάποια δεδομένη τιμή.
- **Μαθηματικό Μοντέλο** \Rightarrow Αφορά τις μαθηματικές σχέσεις που συνδέουν τις μεταβλητές εισόδου με τα δεδομένα εξόδου. Στη μελέτη επάρκειας ενός ΣΗΕ, η συνολική παραγωγή ενέργειας συγκρίνεται με τη ζήτηση και υπολογίζονται οι επιθυμητοί δείκτες. Αυτή η σύγκριση αποτελεί την μαθηματική σχέση που συνδέει τις δύο ομάδες μεταβλητών και πραγματοποιείται σε κάθε επανάληψη του Monte Carlo, δηλαδή σε κάθε ορισμένο χρονικό ορίζοντα εξέτασης του ΣΗΕ, εν προκειμένω το ένα ημερολογιακό έτος. Ένα έτος της προσομοίωσης αναφέρεται ως ένα δείγμα Monte Carlo. Σε κάθε δείγμα Monte Carlo παράγονται τυχαίες μεταβλητές εισόδου, οι οποίες ευθύνονται για τη διαφορετική μορφή του ΣΗΕ και τις διαφορετικές τιμές που λαμβάνουν οι δείκτες εξόδου. Με το πέρας της προσομοίωσης, οι τελικές τιμές των δεικτών αποτελούν τις εκτιμήσεις της ανάλυσης.

- Συνθήκη Τερματισμού \Rightarrow Αναφέρεται στο κριτήριο, βάσει του οποίου ολοκληρώνεται η προσομοίωση Monte Carlo. Αυτό δύναται να έχει είτε στατικό είτε δυναμικό χαρακτήρα, δηλαδή να αντιστοιχεί σε ένα σταθερό πλήθος επαναλήψεων ή σε κάποια συνθήκη τερματισμού, η οποία εφαρμόζεται σε έναν δείκτη εξόδου. Σύνηθες κριτήριο αποτελεί ο συντελεστής διακύμανσης μιας μεταβλητής εξόδου, ο οποίος ορίζεται μαθηματικά στη συνέχεια. Το μοντέλο τερματίζει, μόλις ενεργοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού.

Σχετικά με τον υπολογισμό του συντελεστή διακύμανσης ενός δείκτη επάρκειας, έστω x , ως συνθήκη τερματισμού της προσομοίωσης, ακολουθείται η εξής διαδικασία.

Θεωρείται ως x_i η τιμή του επιλεγμένου δείκτη στο i -οστό δείγμα MC, η οποία λαμβάνει μη αρνητικές τιμές καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Η μέση τιμή του δείκτη υπολογίζεται βάσει του ακόλουθου τύπου :

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.2)$$

όπου N είναι το σύνολο των δειγμάτων MC.

Η διακύμανση του x προκύπτει ως εξής :

$$V(x) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2 \quad (2.3)$$

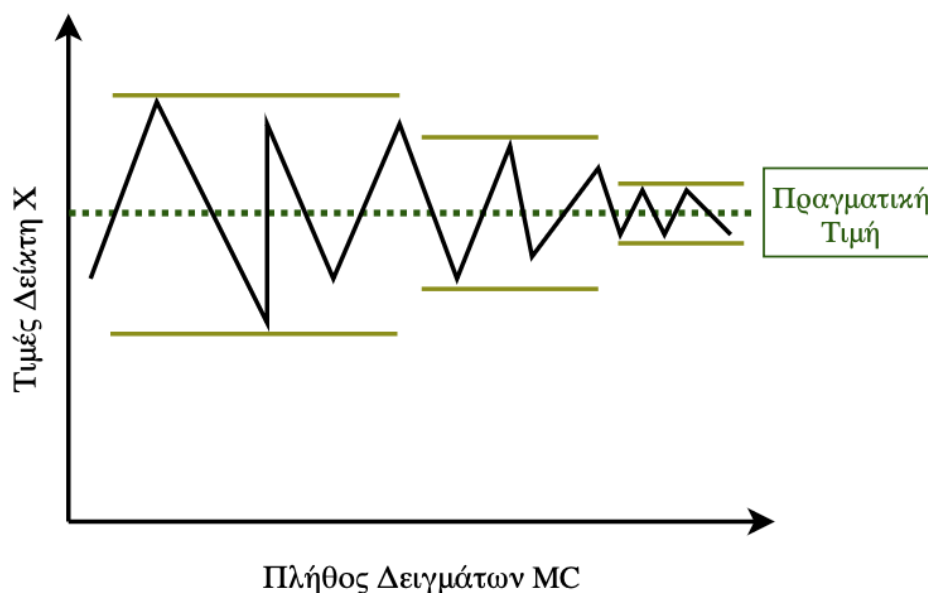
Για μεγάλο μέγεθος δειγμάτων N , η παραπάνω σχέση παίρνει την ακόλουθη μορφή

$$V(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2 \quad (2.4)$$

Ο συντελεστής διακύμανσης ορίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση :

$$a = \frac{\sigma}{\bar{X}} = \frac{\sqrt{V(x)}}{\bar{X}} \quad (2.5)$$

Ο συγκεκριμένος συντελεστής αποτυπώνει το κατά πόσο αποκλίνει η τιμή ενός μεγέθους x από τη μέση τιμή του, \bar{X} . Διαφορετικοί συντελεστές διακύμανσης αντιστοιχούν σε διαφορετικούς δείκτες επάρκειας, καθώς διαφέρει η ταχύτητα σύγκλισης στην τελική τιμή τους. Ως συνθήκη τερματισμού επιλέγεται μια δεδομένη τιμή του συντελεστή διακύμανσης ενός δείκτη, η οποία σηματοδοτεί ότι έχουν πραγματοποιηθεί επαρκείς επαναλήψεις, ώστε η τιμή που λαμβάνει ο δείκτης, να αντιπροσωπεύει το τελικό αποτέλεσμα της προσομοίωσης, δηλαδή την πραγματική τιμή του [12]. Αξίζει να σημειωθεί πως, η επιλογή ενός δυναμικού κριτηρίου, όπως ο συντελεστής διακύμανσης, ως συνθήκη τερματισμού του Monte Carlo, καθιστά άγνωστο εξ αρχής το πλήθος των επαναλήψεων N που θα πραγματοποιηθούν μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Για τον λόγο αυτό, η μέση τιμή \bar{X} του δείκτη x υπολογίζεται εκ νέου σε κάθε δείγμα MC και αφορά την i -οστή μέση τιμή \bar{X}_i , η οποία είναι ο μέσος όρος των τιμών του δείκτη μέχρι την επανάληψη i .



Σχήμα 2.3: Διαδικασία Σύγκλισης στη Μέθοδο Monte Carlo

Όπως γίνεται αντιληπτό από τη Σχέση 2.5, όσο μικρότερες τιμές λαμβάνει ένας δείκτης επάρκειας, για σταθερή τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή του, τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής διακύμανσής του. Για παράδειγμα, ένας δείκτης που έχει μέση τιμή $\bar{X} = 10$, και τυπική απόκλιση $V(x) = 1$, έχει συντελεστή διακύμανσης $a = 10\%$. Αντίστοιχα, εάν η μέση τιμή ενός δείκτη είναι $\bar{X} = 100$, για την ίδια τυπική απόκλιση - δηλαδή απόκλιση κάθε τιμή του δείκτη x_i κατά 1 μονάδα από τη μέση τιμή του - ο συντελεστής διακύμανσης διαμορφώνεται στο $a = 1\%$. Αυτό μεταφράζεται ως γρηγορότερη σύγκλιση και κατ'επέκταση τερματισμό του Monte Carlo σε μικρότερο χρονικό διάστημα, για μεγάλες τιμές των δεικτών επάρκειας, δηλαδή σε συστήματα που χαρακτηρίζονται από υψηλά επίπεδα ανεπάρκειας.

Όσον αφορά την τυχαία παραγωγή τιμών για τις μεταβλητές εισόδου, στις οποίες ενσωματώνεται ο στοχαστικός χαρακτήρας τους, αυτή πραγματοποιείται μέσω μιας διαδικασίας παραγωγής τυχαίων τιμών, η οποία περιγράφεται στη συνέχεια. Ως παράδειγμα θα ληφθεί η εκτίμηση της εμφάνισης βλαβών μιας μονάδας παραγωγής. Στο συγκεκριμένο ζήτημα, τυχαιότητα εμφανίζουν η στιγμή εμφάνισης μιας βλάβης και η στιγμή ολοκλήρωσης αυτής. Κάθε μία από τις αναφερθείσες μεταβλητές, έστω T , - χρόνος μέχρι την επόμενη βλάβη και χρόνος μέχρι την αποκατάστασή της - ακολουθεί εκθετική κατανομή, βάσει των ακόλουθων σχέσεων.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της μεταβλητής t είναι η ακόλουθη

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

Με συνάρτηση μάζας πιθανότητας

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

και αντίστροφη συνάρτηση

$$U = F(t) = 1 - e^{-\beta t} \implies \quad (2.8)$$

$$T = F^{-1}(U) = -\frac{1}{\beta} \ln(1 - U) \quad (2.9)$$

Λόγω του ότι το $(1-U)$ κατανέμεται ομοιόμορφα με τον ίδιο τρόπο όπως το U στο διάστημα $[0,1]$,

$$T = -\frac{1}{\beta} \ln U \quad (2.10)$$

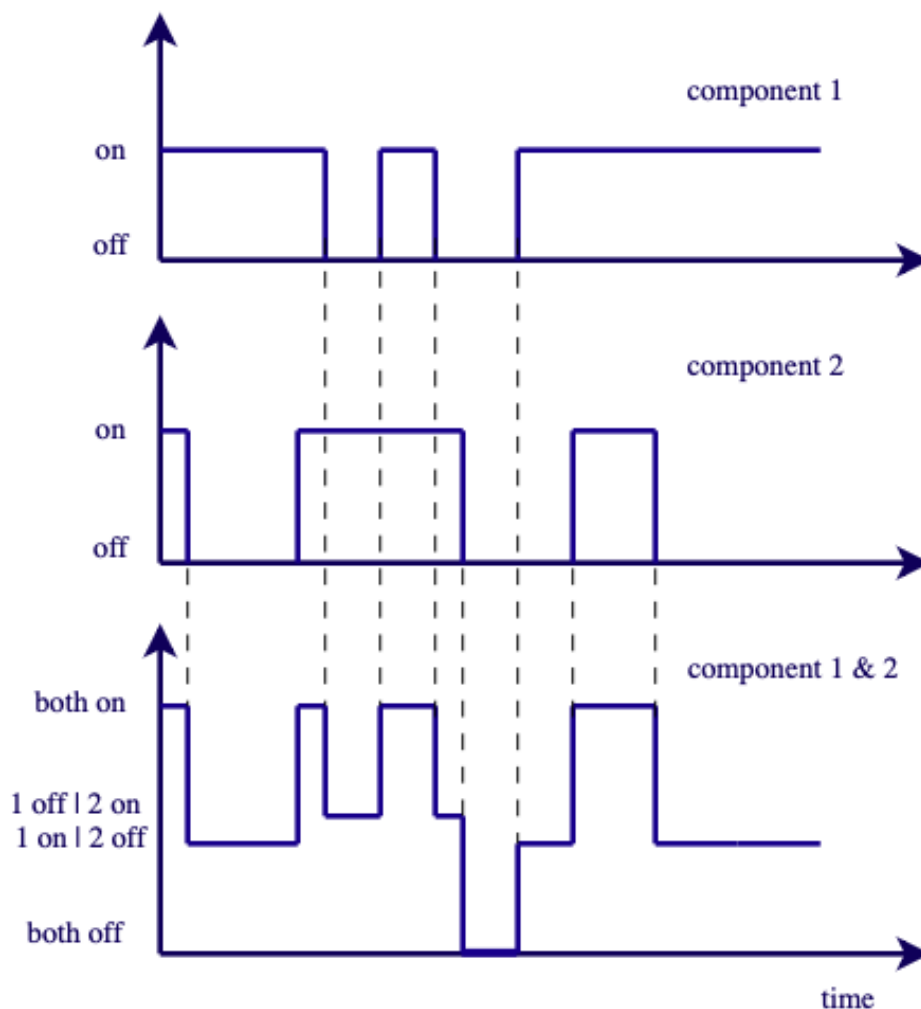
Συνεπώς, η μεταβλητή T , που αντιπροσωπεύει την έννοια της αμέσως επόμενης χρονικής στιγμής, ακολουθεί εκθετική κατανομή, με μέση τιμή την $\frac{1}{\beta}$, η οποία συνιστά ονομαστικό μέγεθος κάθε υπό εξέταση μονάδας παραγωγής. Η τιμή T λαμβάνει διαφορετικές τιμές λόγω του μεγέθους U , το οποίο παράγεται μέσω μιας γεννήτριας τυχαίων, ομοιόμορφα κατανεμημένων τιμών εντός του διαστήματος $[0,1]$.

Για τη μοντελοποίηση της συνολικής συμβατικής παραγωγής του υπό μελέτη ΣΗΕ, χρησιμοποιείται η δειγματοληψία διάρκειας κατάστασης (State Duration Sampling Approach). Σε αυτή την προσέγγιση, αρχικά προσομοιώνονται μέσω της προαναφερθείσας διαδικασίας οι χρονοσειρές μετάβασης καταστάσεων για όλα τα στοιχεία, ανεξάρτητα. Στη συνέχεια, η συνολική χρονοσειρά μετάβασης καταστάσεων του συστήματος - ή αλλιώς χρονοσειρά διαθεσιμότητας των μονάδων παραγωγής - συντίθεται από τον συνδυασμό των επί μέρους χρονοσειρών των στοιχείων.

Για τη σύνθεση της χρονοσειράς του κάθε στοιχείου χρησιμοποιούνται οι παραπάνω μαθηματικές σχέσεις και το μοντέλο λειτουργίας των δύο καταστάσεων - εντός και εκτός λειτουργίας.

1. Στο πρώτο στάδιο, καθορίζεται η κατάσταση λειτουργίας κάθε στοιχείου. Συνήθως κάθε μονάδα αρχικά βρίσκεται εντός λειτουργίας.
2. Υπολογίζεται το διάστημα παραμονής κάθε μονάδας στην ισχύουσα κατάσταση λειτουργίας, σύμφωνα με τη Σχέση 2.10. Εάν η μονάδα i βρίσκεται σε λειτουργία, τότε ο δείκτης β_i σηματοδοτεί το ρυθμό εμφάνισης βλάβης της μονάδας, ενώ αν βρίσκεται εκτός λειτουργίας, το β_i αναπαριστά τον ρυθμό αποκατάστασης της βλάβης.
3. Επαναλαμβάνεται το Βήμα 2. για όλη τη διάρκεια ενός δείγματος της προσομοίωσης Monte Carlo (π.χ. ένα έτος) και συντίθεται η χρονοσειρά καταστάσεων λειτουργίας - ή χρονοσειρά διαθεσιμότητας - κάθε στοιχείου.
4. Αθροίζονται οι χρονοσειρές των μονάδων παραγωγής με σκοπό την διαμόρφωση της χρονοσειράς διαθεσιμότητας της συνολικής συμβατικής παραγωγής του ΣΗΕ.
5. Βάσει αυτής της χρονοσειράς διαθεσιμότητας, αλλά και λοιπών μεταβλητών εισόδου της προσομοίωσης, μεταξύ άλλων της ζήτησης του συστήματος και της ανανεώσιμης παραγωγής ενέργειας, ολοκληρώνεται η μοντελοποίηση του συστήματος ηλεκτρικής

ενέργειας. Σε κάθε επανάληψη - δείγμα της προσομοίωσης Monte Carlo αξιολογείται η συνολική συμπεριφορά του ΣΗΕ και υπολογίζονται οι δείκτες επάρκειας.



Σχήμα 2.4: Διαδικασία Σύνθεσης Αθροιστικής Χρονοσειράς Διαθεσιμότητας

Πιθανοτικοί Δείκτες Επάρκειας ΣΗΕ

Οι δείκτες επάρκειας ενός ΣΗΕ στοχεύουν στην ποσοτικοποίηση της επάρκειας του συστήματος και λειτουργούν ως όρια προσδιορισμού της ικανοποίησης ή όχι του επιθυμητού επαρκειακού επιπέδου. Στη συνέχεια παρατίθενται οι βασικοί δείκτες επάρκειας πιθανοτικών μεθόδων και οι τρόποι υπολογισμού τους:

1. Αναμενόμενη Απώλεια Φορτίου - Loss of Load Expectation [μέρες/έτος ή ώρες/έτος] ⇒ Ορίζεται ως η εκτίμηση του πλήθους των ημερών ή ωρών, για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα - συνήθως ένα έτος -, κατά τις οποίες η συνολική διαθέσιμη παραγωγή είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη ζήτηση. Μαθηματικά ορίζεται ως

$$LOLE = \sum_{i \in S} p_i * T \quad (2.11)$$

όπου p_i είναι η πιθανότητα εμφάνισης της κατάστασης i του ΣΗΕ και S είναι το σύνολο όλων των πιθανών καταστάσεων του ΣΗΕ. Όταν ορίζεται ως σύνολο ημερών ανά έτος, σηματοδοτεί τις ημέρες, όπου η ημερήσια αιχμή του φορτίου ξεπερνάει τη διαθέσιμη παραγωγή, χωρίς να σημαίνει πως κάθε στιγμή της δεδομένης ημέρας, η παραγωγή αδυνατεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση. Παρότι δεν εμπεριέχει την έννοια της διάρκειας ή της συχνότητας εμφάνισης απώλειας φορτίου, αποτελεί τον πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο δείκτη επάρκειας.

2. Αναμενόμενη Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργεια - Expectation of Energy Not Supplied [MWh/έτος] \Rightarrow Πρόκειται για το εκτιμώμενο ποσό της ενέργειας, το οποίο δεν καλύπτεται από τη διαθέσιμη παραγωγή του ΣΗΕ, λόγω του ότι η ζήτηση υπερτερεί της παραγόμενης ενέργειας. Εκφράζεται ως

$$EENS = \sum_{i \in S} 8760 * p_i * C_i \quad (2.12)$$

με τις ίδιες μεταβλητές με προηγούμενως, συν της C_i , η οποία αναπαριστά την απώλεια φορτίου για την i -οστή κατάσταση του συστήματος. Ο δείκτης EENS ενσωματώνει το ύψος των ανεπαρκειών, σε συνδυασμό με τη διάρκεια και το πλήθος τους. Έτσι, αξιολογείται η επίδραση των απωλειών φορτίου και η πιθανότητα εμφάνισής τους. Το γεγονός αυτό καθιστά τη συγκεκριμένη μετρική επάρκειας ιδανική για αξιολόγηση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα σε όσα εξετάζεται η αντικατάσταση συμβατικών πηγών ενέργειας με εναλλακτικές μορφές. Το συμπλήρωμα του EENS, δηλαδή η ενέργεια που παρέχεται στο σύστημα, μπορεί να διαιρεθεί με τη συνολική απαίτηση ενέργειας και να προκύψει ο δείκτης ενεργειακής αξιοπιστίας - Energy Index of Reliability (EIR). Ο δείκτης αυτός ορίζει μια κοινή βάση για την αξιολόγηση της επάρκειας σε συστήματα ενέργειας που διαφέρουν ως προς το μέγεθός τους.

3. Αναμενόμενη Συχνότητα Απώλειας Φορτίου - Loss of Load Frequency [συμβάντα/έτος] \Rightarrow Αφορά το πλήθος των συμβάντων ανεπάρκειας, δηλαδή των γεγονότων, όπου δεν ικανοποιήθηκε το φορτίο του συστήματος. Μαθηματικά ορίζεται ως

$$LOLF = \sum_{i \in S} (F_i - f_i) \quad (2.13)$$

όπου F_i είναι η συχνότητα αναχώρησης από την i -οστή κατάσταση του συστήματος και f_i είναι το ποσοστό της F_i , που αντιστοιχεί στη μη μετάβαση από το επίπεδο απώλειας φορτίου προς το επίπεδο κάλυψης του φορτίου. Αξίζει να τονισθεί πως ο όρος "γεγονός" αναφέρεται σε καταστάσεις μετάβασης από μια κατάσταση επάρκειας σε μία κατάσταση ανεπάρκειας.

4. Αναμενόμενη Διάρκεια Απώλειας Φορτίου - Loss of Load Duration [ώρες/διαταραχή] \Rightarrow Η συχνότητα και η διάρκεια αποτελούν επεκτάσεις του κλασσικού δείκτη LOLE, καθώς ποσοτικοποιούν την εκτιμώμενη συχνότητα εμφάνισης ανεπαρκειών και την

αναμενόμενη διάρκεια αυτών των διαταραχών.

$$LOLD = \frac{LOLE}{LOLF} \quad (2.14)$$

Περιλαμβάνουν επιπρόσθετα χαρακτηριστικά, τα οποία καθιστούν τους συγκεκριμένους δείκτες επάρκειας πιο ευαίσθητους σε επιπλέον παραμέτρους της παραγωγής του ΣΗΕ και ενέχουν περισσότερη πληροφορία, απαραίτητη για τους σχεδιαστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Οι δύο τελευταίοι δείκτες επάρκειας, βρίσκουν ευρύτερη εφαρμογή σε μελέτες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οπότε δεν χρησιμοποιούνται τόσο στην αξιολόγηση της επάρκειας του πρώτου ιεραρχικού επιπέδου του ΣΗΕ - της παραγωγής.

Οι πλέον χρησιμοποιούμενοι από τους προαναφερθέντες δείκτες είναι η Αναμενόμενη Απώλεια Φορτίου (LOLE) και η Αναμενόμενη Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργεια (EENS). Αξίζει να τονισθεί πως το EENS δίνει μια ακριβέστερη εικόνα του επιπέδου επάρκειας του συστήματος, συγκριτικά με το LOLE, που αποτελεί μια εκτίμηση των ωρών (ή ημερών) του έτους, κατά τις οποίες δεν ικανοποιείται η ζήτηση. Οι ώρες απώλειας φορτίου δεν μεταφράζονται ως ώρες που η συνολική ζήτηση δεν καλύπτεται, αλλά πρόκειται για χρονικές περιόδους στις οποίες ένα ποσοστό του φορτίου αναγκαστικά δεν τροφοδοτείται.

2.2 Ικανότητα Συνεισφοράς Ισχύος στην Επάρκεια ΣΗΕ

Η ικανότητα συνεισφοράς ισχύος (Capacity Value) μιας μονάδας παραγωγής αποτελεί ένα μέτρο υπολογισμού της συμβολής της στην αξιοπιστία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ορίζεται είτε ως η ποσότητα του επιπρόσθετου φορτίου (σε MW) που δύναται να καλυφθεί εξαιτίας της προσθήκης μιας νέας μονάδας παραγωγής, διατηρώντας σταθερό το επίπεδο αξιοπιστίας του ΣΗΕ, είτε ως η επιπλέον αξιοπιστία που επιφέρει στο ΣΗΕ η ένταξη της εν λόγω μονάδας παραγωγής [21]. Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της παραγωγικής ικανότητας του υπό εξέταση συστήματος ενέργειας. Εφαρμόζεται σε κάθε είδος τεχνολογίας παραγωγής και εκφράζεται ως ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος της. Πρόκειται για ένα θεμελιώδες μέγεθος στις μελέτες επάρκειας του συστήματος, καθώς ανάγει τις διαφορετικές τεχνολογίες παραγωγής με τα επί μέρους χαρακτηριστικά τους, σε μια κοινή βάση αξιολόγησης και σύγκρισης της συνεισφοράς κάθε μονάδας παραγωγής στο επίπεδο αξιοπιστίας του ΣΗΕ. Οι διαφορετικές ιδιότητες κάθε τεχνολογίας παραγωγής είναι τα στοιχεία που διαφοροποιούν την αντίστοιχη διαδικασία υπολογισμού του Capacity Value, αναδεικνύοντας ευρύτερα τη συμβολή και το εύρος αυτής, για κάθε διακριτή μονάδα παραγωγής.

Όσον αφορά τις **συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας**, η ικανότητα συνεισφοράς ισχύος τους καθορίζεται από τη συχνότητα και τη διάρκεια των μη προγραμματισμένων διακοπών τους, πληροφορίες που εμπεριέχονται στον δείκτη FOR (Forced Outage Ratio) κάθε μονάδας. Σε περίπτωση μηδενικών απρόβλεπτων βλαβών, μια συμβατική μονάδα παραγωγής μπορεί να αποδίδει κάθε χρονική στιγμή τη μέγιστη ισχύ της, συνεπώς έχει Capacity Value ίσο με 100%. Αυτό προφανώς δεν συναντάται στην πράξη, ανάλογα με την τοπολογία και την πρώτη ύλη κάθε συμβατικής μονάδας παραγωγής, το εύρος του Capacity Value τους κυμαίνεται μεταξύ 35 - 95 % [22].

Η μέθοδος υπολογισμού της ικανότητας συνεισφοράς ισχύος των συμβατικών μονάδων παραγωγής βασίζεται στους δείκτες επάρκειας που έχουν προκύψει από την εκάστοτε μελέτη επάρκειας, η οποία έχει αναπτυχθεί στο ανάλογο ΣΗΕ. Αυτοί οι δείκτες, κυρίως η Αναμενόμενη Απώλεια Φορτίου (LOLE) και η Αναμενόμενη Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργεια (EENS), χρησιμοποιούνται ως μέτρο σύγκρισης για τις μετρικές υπολογισμού του Capacity Value που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Ως εκ τούτου, ο υπολογισμός της ικανότητας συνεισφοράς μιας μονάδας, εξαρτάται άμεσα από τη μέθοδο αξιολόγησης της επάρκειας του ΣΗΕ. Επισημαίνεται πως, η ικανότητα συνεισφοράς ισχύος αφορά είτε μια μεμονωμένη μονάδα παραγωγής είτε ένα σύνολο εγκαταστάσεων παραγωγής, ακόμη και διαφορετικής τεχνολογίας.

Αναφορικά με τις **ανανεώσιμες μονάδες παραγωγής ενέργειας**, μέχρι πρότινος δεν εξεταζόταν η συμβολή τους στην εξασφάλιση αξιοπιστίας του ΣΗΕ, εξαιτίας της μεταβλητής φύσης της παραγωγής τους. Το γεγονός πως οι ΑΠΕ αποτελούν μη κατανεμόμενες μονάδες, εγείρει σοβαρές ανησυχίες ως προς την ικανότητά τους να συμβάλουν στην αξιοπιστία του ΣΗΕ και κατά συνέπεια να αμείβονται για τη συμβολή τους μέσω των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας [23]. Ωστόσο, πλέον ενσωματώνεται ο στοχαστικός τους χαρακτήρας στις μελέτες επάρκειας, εξετάζοντας την παραγωγή τους σε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας. Η παρα-

γωγή αυτή αφαιρείται από τη ζήτηση του ΣΗΕ και προκύπτει το υπολειπόμενο φορτίο. Η αξιολόγηση της επάρκειας του ΣΗΕ έγκειται στη σύγκριση παραγωγής και υπολειπόμενης ζήτησης, συνεπώς οι ΑΠΕ λαμβάνονται υπόψιν έμμεσα στη διαδικασία υπολογισμού. Όπως γίνεται αντιληπτό, η αφαίρεση της παραγωγής των ΑΠΕ από τη ζήτηση, έχει ως αποτέλεσμα λιγότερα σε πλήθος και μικρότερα σε ύψος συμβάντα ανεπάρκειας, επιδρώντας θετικά στους δείκτες επάρκειας του ΣΗΕ, μειώνοντάς τους [15].

Ο προσδιορισμός της τιμής του Capacity Value μιας μονάδας ΑΠΕ εξαρτάται τόσο από τα δεδομένα χαρακτηριστικά της ανανεώσιμης παραγωγής (π.χ. αιολικό δυναμικό, ηλιακή ακτινοβολία) όσο και από το προφίλ της ζήτησης (π.χ. χρονικές στιγμές εμφάνισης αιχμών). Η αλληλεπίδραση της παραγωγής των ΑΠΕ με το φορτίο του συστήματος επιδρά καταλυτικά στα αποτελέσματα της μελέτης επάρκειας, και, κατ' επέκταση στον υπολογισμό του Capacity Value. Για παράδειγμα, σε περίπτωση συγχρονισμού της ανανεώσιμης παραγωγής με τις αιχμές του φορτίου, οι εξαγόμενοι δείκτες επάρκειας θα παρουσιάζονται αισθητά μειωμένοι, σε σύγκριση με την εμφάνιση υψηλής ζήτησης του ΣΗΕ σε ώρες που οι ΑΠΕ αδυνατούν να παράξουν σημαντική ισχύ (π.χ. βραδινές ώρες). Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα και η αντικειμενικότητα του αποτελέσματος, κρίνεται απαραίτητη η εξέταση πολλών διαφορετικών σεναρίων, ώστε να ενσωματωθούν όλες οι πιθανές συσχετίσεις φορτίου - παραγωγής ΑΠΕ.

Η αξιολόγηση της ικανότητας συνεισφοράς των **μονάδων αποθήκευσης ενέργειας** ενός ΣΗΕ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς επηρεάζεται από μια πληθώρα διαφορετικών παραγόντων. Αρχικά, ανάλογα με την προγραμματισμένη λειτουργία που ακολουθούν οι αποθηκευτικές μονάδες, διαμορφώνεται και η συμβολή τους στην επάρκεια του συστήματος. Έχει αποδειχθεί πως στρατηγικές λειτουργίας, βάσει των οποίων, οι μονάδες αποθήκευσης εκφορτίζουν σε ώρες αιχμής φορτίου και φορτίζουν, αντίστοιχα, σε ώρες χαμηλής ζήτησης, παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές Capacity Value [24]. Αντίθετα, σε πολιτικές λειτουργίας με γνώμονα την ευελιξία και τη μείωση του ολικού κόστους του συστήματος, οι μονάδες αποθήκευσης χαρακτηρίζονται από μειωμένη ικανότητα συνεισφοράς ισχύος στο ΣΗΕ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως χρησιμοποιούνται κατά κανόνα ως άμεσες εφεδρείες, κρίσιμες για την εξασφάλιση της ασφάλειας του ΣΗΕ και της ομαλής ένταξης των ΑΠΕ, με αποτέλεσμα να εκφορτίζουν για πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα και να επανακτούν την ενέργειά τους άμεσα.

Πέραν των πολιτικών λειτουργίας, σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση της συνεισφοράς ισχύος των μονάδων αποθήκευσης διαδραματίζουν τα ονοματικά τους μεγέθη, δηλαδή η εγκατεστημένη ισχύς και η χωρητικότητα. Έχει διαπιστωθεί πως, όσο αυξάνεται η χωρητικότητα των μονάδων, δηλαδή η διάρκεια συνεχόμενης φόρτισης - εκφόρτισης υπό ονομαστική ισχύ, τόσο αυξάνεται και η τιμή του Capacity Value, καθώς οι μεγαλύτερες χωρητικότητες επιτρέπουν την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας για σκοπούς εξισορρόπησης της ζήτησης [24] [25] [26]. Αυτό παρατηρείται τόσο σε συστήματα αποθήκευσης μπαταριών όσο και σε αντλησιοταμιευτικά έργα, με τα δεύτερα να χαρακτηρίζονται από αισθητά μεγαλύτερες χωρητικότητες συγκριτικά με τα πρώτα. Η συσχέτιση της ικανότητας συνεισφοράς ισχύος με την εγκατεστημένη ισχύ μιας μονάδας αποθήκευσης φαίνεται να διαφέρει. Όσο αυξάνεται το μέγεθος μιας αποθηκευτικής μονάδας, τόσο μειώνεται η τιμή του Capacity

Value. Παρά το γεγονός πως η πωτική αυτή τάση είναι μικρή, οφείλεται στον σταδιακό κορεσμό που επέρχεται όσο αυξάνεται η ισχύς μιας προστιθέμενης μονάδας, καθώς οι ανάγκες του ΣΗΕ ικανοποιούνται και η βελτίωση της αξιοπιστίας του καθίσταται περιττή.

Όσον αφορά την αλληλεπίδραση μονάδων αποθήκευσης και ΑΠΕ, παρατηρείται έντονη επίδραση της φωτοβολταϊκής παραγωγής στον προσδιορισμό του Capacity Value των αποθηκευτικών μονάδων. Αυτό οφείλεται στη μορφή που λαμβάνει το υπολειπόμενο φορτίο εξαιτίας της αφαίρεσης της φωτοβολταϊκής παραγωγής από την αρχική ζήτηση του συστήματος. Λόγω της συσσωρευμένης παραγωγής φωτοβολταϊκών τις μεσημεριανές ώρες, το υπολειπόμενο φορτίο αποκτά ένα πιο αιχμηρό σχήμα, διαχωρίζοντας την πρωινή από τη βραδινή αιχμή του με τη μεσολάβηση μιας κοιλάδας στη μέση της ημέρας. Αυτή η κοιλάδα ευνοεί τις μονάδες αποθήκευσης, καθώς την αξιοποιούν με στόχο να φορτίσουν - αντλήσουν ενέργεια από το δίκτυο και να είναι σε θέση να συμβάλλουν σε περισσότερα συμβάντα ανεπάρκειας, σε σύγκριση με πριν, όπου αρκούσαν στις πρώτες πρωινές ώρες για τις ανάγκες αύξησης του ενεργειακού περιεχομένου τους. Η αυξημένη διείσδυση της φωτοβολταϊκής παραγωγής ευνοεί περισσότερο τους αποθηκευτικούς σταθμούς μικρής χωρητικότητας, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να πραγματοποιούν συχνότερους κύκλους φόρτισης - εκφόρτισης.

Η αξιολόγηση της ικανότητας συνεισφοράς ισχύος των **υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής** ταυτίζεται με τον τρόπο αντιμετώπισης των συμβατικών μονάδων και εν μέρει όσα αφορούν τις μονάδες αποθήκευσης, αναφορικά με τους ΥΗΣ με δυνατότητα άντλησης. Αξίζει να επισημανθεί πως η αβεβαιότητα των μη προγραμματισμένων διακοπών υπεισέρχεται σε όλες τις τοπολογίες ΥΗΣ, μέσω των δεικτών FOR, MTTF (Mean Time To Failure) και MTTR (Mean Time To Repair), οι οποίοι χαρακτηρίζουν κάθε μονάδα παραγωγής.

2.2.1 Δείκτες Υπολογισμού Ικανότητας Συνεισφοράς Ισχύος

Η ποσοτικοποίηση της ικανότητας συνεισφοράς ισχύος μιας παραγωγικής μονάδας πραγματοποιείται μέσω των αντίστοιχων δεικτών. Ακολουθούν οι πιο ευρέως διαδεδομένοι δείκτες Capacity Value [27]:

- Καθαρό Μεταφερόμενο Φορτίο - Effective Load Carrying Capability (ELCC) \Rightarrow Αναφέρεται στην επιτρεπτή ποσότητα αύξησης του φορτίου, εξαιτίας της προσθήκης της υπό εξέτασης μονάδας παραγωγής, χωρίς να μεταβληθεί το επίπεδο αξιοπιστίας του ΣΗΕ. Ανάλογα με την επιλεγμένη προσέγγιση, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί δείκτες επάρκειας για τον υπολογισμό του, με συνηθέστερους τους δείκτες LOLE και EENS. Παρά τις διαφορετικές υλοποιήσεις, η κεντρική ιδέα υπολογισμού του δείκτη ELCC είναι κοινή. Βάσει της μελέτης επάρκειας του ΣΗΕ που έχει επιλεγεί, εξάγονται οι αντίστοιχες δείκτες αξιοπιστίας, προ ένταξης της παραγωγικής μονάδας που μέλει να αξιολογηθεί. Έπειτα, υπολογίζονται οι ίδιοι δείκτες με την προσθήκη των υπό εξέταση μονάδων. Όπως είναι αναμενόμενο, οι δείκτες στη δεύτερη περίπτωση θα είναι μειωμένοι συγκριτικά με πριν. Στη μελέτη του ΣΗΕ που συμπεριλαμβάνει την μονάδα προς αξιολόγηση, αυξάνεται με σταθερό βήμα το φορτίο του συστήματος, εξάγοντας και συγκρίνοντας σε κάθε επανάληψη τους δείκτες αξιοπιστίας με αυτούς του αρχικού επιπέδου, προ ένταξης. Όταν οι δείκτες ταυτιστούν, ολοκληρώνεται η επαναληπτική

διαδικασία. Η τιμή του δείκτη ELCC ισούται με το ποσό του πρόσθετου φορτίου, κατά το οποίο αυξήθηκε η αρχική ζήτηση, μέχρι την ταύτιση των δύο δεικτών. Σημειώνεται πως ο δείκτης ELCC εκφράζεται σε MW και η ικανότητα συνεισφοράς ισχύος της υπό μελέτη μονάδας προκύπτει διαιρώντας την τιμή του ELCC προς την ονομαστική της ισχύ. Η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών τοπολογιών του ΣΗΕ - με και χωρίς την ένταξη της εν λόγω μονάδας παραγωγής - πραγματοποιείται στον δείκτη επάρκειας που θεωρείται ο πιο κρίσιμος για την αξιολόγηση του εκάστοτε συστήματος [28].

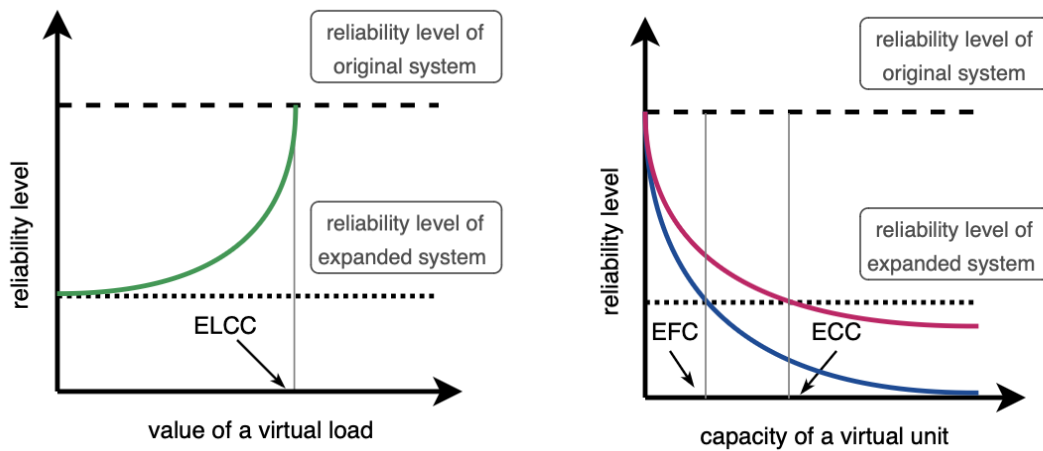
Ο δείκτης ELCC χρησιμοποιείται τόσο για συμβατικές μονάδες παραγωγής όσο και για ΑΠΕ και μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Στις συμβατικές μονάδες λαμβάνει μεγάλες τιμές, εξαιτίας της υψηλής διαθεσιμότητάς τους, δηλαδή του χαμηλού ποσοστού εμφάνισης απρόβλεπτων βλαβών (χαμηλός δείκτης FOR). Προσεγγιστικά, ο ELCC μπορεί να οριστεί ως $(1 - FOR) * C$, εκφρασμένος σε MW, όπου C είναι η ονομαστική ισχύς της συμβατικής μονάδας παραγωγής [29]. Στις λοιπές παραγωγικές μονάδες ο προσδιορισμός του ELCC καθίσταται πιο περίπλοκος, λόγω της επίδρασης πληθώρας παραγόντων, όπως αναφέρεται σε προηγούμενη παράγραφο.

- Ισοδύναμη Ισχύς - Equivalent Firm Capacity (EFC) ή Equivalent Conventional Capacity (ECC) \Rightarrow Η ποσότητα αυτή αποδίδεται στην ιδανική (EFC) ή πραγματική (ECC) απαίτηση ισχύος για την επίτευξη του ίδιου επιπέδου αξιοπιστίας του ΣΗΕ, με αυτό που επιφέρει η προσθήκη της μονάδας παραγωγής που εξετάζεται. Ο διαχωρισμός των EFC και ECC έγκειται στη φύση της παραγωγής, βάσει της οποίας αξιολογείται η υπό μελέτη μονάδα. Στην πρώτη περίπτωση, πρόκειται για μια ιδανική, πλήρως αξιόπιστη μονάδα παραγωγής ($FOR = 0$), ενώ στη δεύτερη, θεωρείται μια πραγματική μονάδα παραγωγής, με δεδομένα χαρακτηριστικά αξιοπιστίας ($FOR \neq 0$). Ως πραγματική μονάδα παραγωγής συνήθως εννοείται ένας αεριοστρόβιλος συνδυασμένου κύκλου (Combined Cycle Gas Turbine). Έτσι, το ECC λαμβάνει πάντα μεγαλύτερες τιμές από το EFC.

Ομοίως με τον δείκτη προσδιορισμού ικανότητας συνεισφοράς ισχύος ELCC, η λογική ορισμού του δείκτη ισοδύναμης ισχύος είναι η ακόλουθη. Υπολογίζονται οι δείκτες επάρκειας πριν και μετά την ενσωμάτωση της υπό εξέταση μονάδας παραγωγής στο ΣΗΕ. Στη συνέχεια, στο σύστημα όπου δεν περιλαμβάνεται η νέα μονάδα, προστίθεται σταδιακά ισχύς στην ήδη υπάρχουσα παραγωγή και υπολογίζονται εκ νέου οι επιλεγμένοι δείκτες επάρκειας. Η διαδικασία τερματίζει όταν επιτευχθεί το ίδιο επίπεδο αξιοπιστίας με εκείνο του ΣΗΕ που περιέχει την εν λόγω μονάδα. Το μέγεθος του EFC/ECC είναι ίσο με την συνολική ισχύ που προστέθηκε στο ΣΗΕ προκειμένου να προσεγγιστεί το επιθυμητό επίπεδο επάρκειας. Πρακτικά, συγκρίνεται η συμβολή της μονάδας που εξετάζεται με την αντίστοιχη συμβολή μιας ιδανικής ή ρεαλιστικής μονάδας παραγωγής στην επάρκεια του ΣΗΕ. Αντίστοιχα, το Capacity Value της μονάδας παραγωγής προκύπτει διαιρώντας την τιμή του δείκτη EFC/ECC με την ονομαστική της ισχύ.

Ανάμεσα στους δύο δείκτες, συνήθως ο ELCC προτιμάται για την αξιολόγηση ΑΠΕ και μονάδων αποθήκευσης, ενώ οι δείκτες EFC/ECC επιλέγονται για τις συμβατικές μονάδες

παραγωγής. Στην παρούσα διπλωματική η ικανότητα συνεισφοράς ισχύος των ΥΗΣ προσδιορίζεται μέσω του δείκτη ισοδύναμης ιδανικής ισχύος (EFC).



(α) Μέθοδος Καθαρού Μεταφερόμενου Φορτίου

(β) Μέθοδος Ισοδύναμης Ισχύος

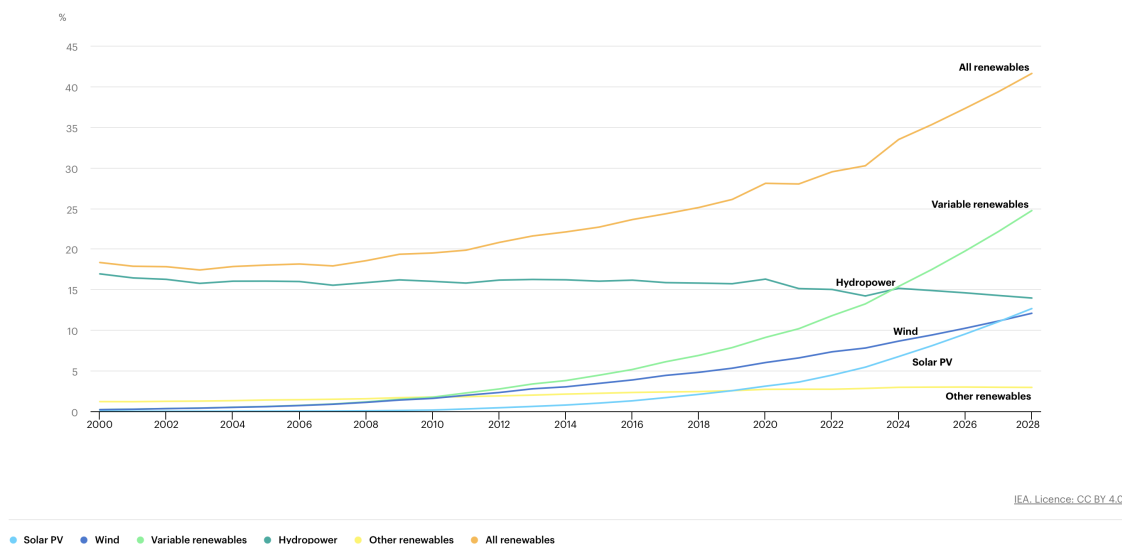
Σχήμα 2.5: Μέθοδοι Αξιολόγησης των Μετρικών Capacity Value

Οι μεθοδολογίες υπολογισμού των προαναφερθέντων δεικτών διακρίνονται στις ίδιες κατηγορίες με τις μελέτες επάρκειας, τις αιτιοκρατικές και τις πιθανοτικές. Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιείται η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo για τον καθορισμό του δείκτη EFC, χρησιμοποιώντας τη μετρική επάρκειας LOLE ως μέγεθος αναφοράς.

Κεφάλαιο 3

Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η παγκόσμια υδροηλεκτρική παραγωγή, σήμερα, ξεπερνά την αθροιστική παραγωγή των λοιπών πηγών αναγνώσιμης ενέργειας και αναμένεται να διατηρήσει το ίδιο ποσοστό στο μείγμα ΑΠΕ την επόμενη δεκαετία, σύμφωνα με την Έκθεση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (International Energy Agency - IEA) [2]. Τα ερχόμενα έτη, λόγω της σημαντικής αύξησης των λοιπών μορφών ΑΠΕ, θα διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην πορεία απανθρακοποίησης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και στην παροχή υπηρεσιών ευελιξίας, ανάγκη, την οποία επιφέρει η απομάκρυνση των θερμικών μονάδων παραγωγής και η μεταβλητότητα της ανανεώσιμης παραγωγής. Όσον αφορά τη συνολική κατάταξη όλων των τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, η υδροηλεκτρική ενέργεια έρχεται τρίτη παγκοσμίως, μετά τον άνθρακα και το φυσικό αέριο [30].

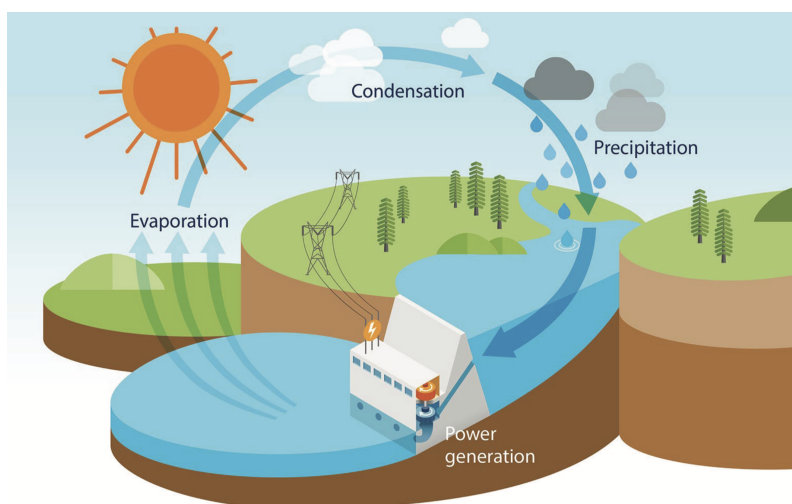


Εικόνα 3.1: Ποσοστό Παραγωγής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές ανά Τεχνολογία [2]

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας μετρούν αρκετά χρόνια παρουσίας στο ενεργειακό μείγμα, ιδιαίτερα σε ανεπτυγμένες οικονομίες, με τη διάρκεια ζωής του μέσου υδροηλεκτρικού σταθμού στην Ευρώπη να ανέρχεται στα 45 έτη. Παρά το γεγονός πως πρόκειται για μια ώριμη τεχνολογία παραγωγής ενέργειας, το πλεονεκτήματά της τίθενται ξανά στο προσκήνιο, λόγω της επιτακτικής ανάγκης μετάβασης προς ένα σύστημα ενέργειας απαλλαγμένο από εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς

στόχους που έχουν τεθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση [31]. Ο υψηλός βαθμός ευελιξίας που χαρακτηρίζει τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς ενέργειας και η ικανότητα προσαρμογής στις διακυμάνσεις της ζήτησης και στις διαταραχές της προσφοράς, τους καθιστά μια ελκυστική επιλογή για συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, χαρακτηριζόμενα από υψηλή διείσδυση μεταβλητών μορφών ενέργειας, όπως η αιολική και η φωτοβολταϊκή παραγωγή.

Η παραγωγή της ενέργειας μέσω ενός υδροηλεκτρικού σταθμού (ΥΗΣ) οφείλεται στην μετατροπή της ενέργειας του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι ΥΗΣ εκμεταλλεύονται τον φυσικό, αέναο κύκλο του νερού προκειμένου να παράξουν ηλεκτρική ενέργεια. Διακρίνονται σε διαφορετικούς τύπους υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων, εκ των οποίων όλοι αξιοποιούν την κινητική ενέργεια που ενέχει το νερό καθώς ρέει προς τα κάτω. Η κινητική αυτή ενέργεια, με παρουσία γεννητριών, μετατρέπεται σε ηλεκτρική και συνδέεται στο ενιαίο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω του οποίου φτάνει στους τελικούς καταναλωτές [32].



Εικόνα 3.2: Αναπαράσταση του Κύκλου του Νερού [3]

Αναλυτικότερα, ανάλογα με την τεχνολογία κάθε ΥΗΣ, η κινητική ή/και δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε μηχανική, μέσω της περιστροφής ενός στροβίλου. Ο στρόβιλος αυτός συνδέεται με μία γεννήτρια, η οποία αξιοποιεί την κίνηση του στροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τοποθεσία των ΥΗΣ είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ύπαρξη πηγής ή ροής νερού, και σε πολλές περιπτώσεις επιβάλλεται η κατασκευή ενός φράγματος, για την βέλτιστη ενεργειακά αξιοποίηση της κίνησης του νερού. Η διαθέσιμη ενέργεια εξαρτάται τόσο από τον όγκο του υπάρχοντος νερού όσο και από την αλλαγή του υψομέτρου μεταξύ της λεκάνης του ΥΗΣ και του στροβίλου. Όσο αυξάνεται ο όγκος και η διαφορά ύψους, τόσο περισσότερη δυναμική ενέργεια δύναται να παραχθεί. Αυτή η βασική αρχή λειτουργίας εφαρμόζεται σε όλες τις τοπολογίες των ΥΗΣ.

Το γεγονός πως το πρωτογενές καύσιμο της συγκεκριμένης τεχνολογίας βρίσκεται ακόρεστο στη φύση - και δεν "καταναλώνεται" από τους ΥΗΣ, απλώς γίνεται εκμετάλλευση της κίνησής του - καθιστά την υδροηλεκτρική παραγωγή, όπως και τις λοιπές πηγές ανανε-

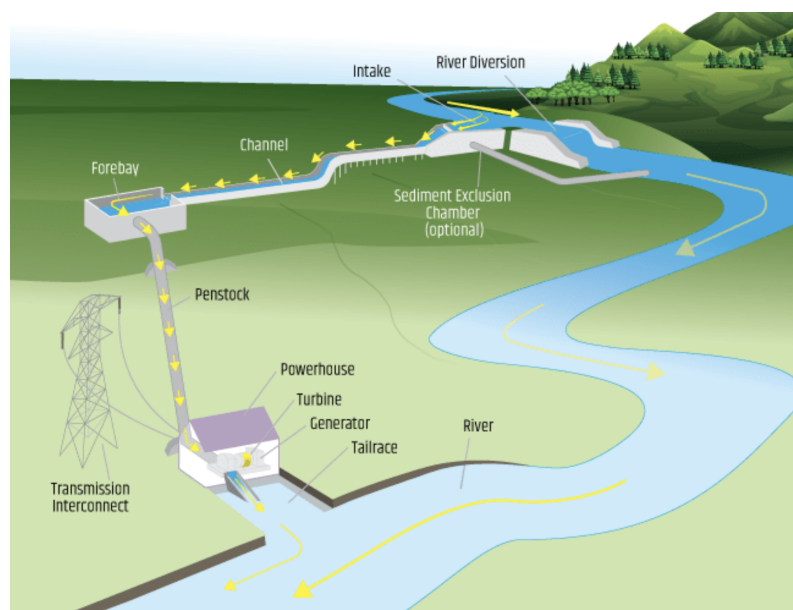
ώσιμης ενέργειας, μια καθόλου δαπανηρή και απολύτως φιλική προς το περιβάλλον μορφή ενέργειας.

3.1 Είδη Υδροηλεκτρικών Σταθμών

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τοπολογίες υδροηλεκτρικών σταθμών, οι οποίες διαφοροποιούνται στον τρόπο με τον οποίο εκμεταλλεύονται την ύπαρξη και κίνηση του νερού προκειμένου να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Οι κατηγορίες, στις οποίες διαιρούνται, διαφέρουν τόσο ως προς την τεχνολογία που χρησιμοποιούν όσο και ως προς τις κατασκευαστικές και χωροταξικές απαιτήσεις τους. Σε κάποιες περιπτώσεις συνδυάζονται επί μέρους τοπολογίες και δημιουργούνται ΥΗΣ που ενέχουν χαρακτηριστικά παραπάνω τεχνολογιών.

3.1.1 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί Φυσικής Ροής

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί ενέργειας φυσικής ροής συναντώνται πλησίον ποταμών ή μεγάλων ροών νερού. Αξιοποιούν τη φυσική κίνηση του νερού, μετατρέποντας την κινητική του ενέργεια σε ηλεκτρική. Δεν διαθέτουν αποθηκευτική ικανότητα, και για τον λόγο αυτό, δεν απαιτούν την κατασκευή κάποιου ταμιευτήρα. Συνηθίζουν να κατασκευάζονται σε ποταμούς οι οποίοι έχουν δεδομένη ροή νερού και μεγάλη κλίση, χαρακτηριστικό που συνδράμει στην επιτάχυνση του νερού. Για τον λόγο αυτό, επιλέγονται ποτάμια σταθερής, αδιάλειπτης ροής, ώστε ο ΥΗΣ να καταφέρνει να αξιοποιεί όλη την παρεχόμενη ενέργεια. Σε τοποθεσίες όπου συναντάται χαμηλή ροή για ένα διάστημα και στη συνέχεια έντονη κορύφωση, υπάρχει μεγάλη ποσότητα αναξιοποίητου νερού, εξαιτίας της αδυναμίας αποθήκευσής του, οπότε και δεν προτιμούνται για την υπό εξέταση τεχνολογία.



Εικόνα 3.3: Αναπαράσταση ΥΗΣ Φυσικής Ροής [4]

Όσον αφορά την κατασκευή των ΥΗΣ φυσικής ροής, το τρεχούμενο νερό οδηγείται μέσω ενός καναλιού (channel) και στην πορεία αγωγού (penstock) στον σταθμό ηλεκτροπαραγωγής

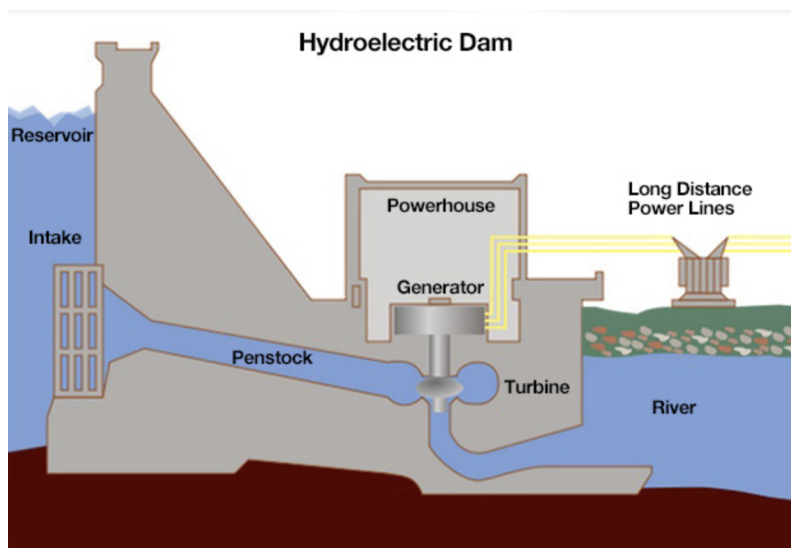
(powerhouse). Συνήθως, στο σημείο αυτό, υπάρχει υψομετρική διαφορά, τεχνητά ή φυσικά, με στόχο την αύξηση της δυναμικής και κινητικής ενέργειας του εκτρεπόμενου υδάτινου όγκου. Η ποσότητα του νερού που εισέρχεται στον σταθμό, κινεί έναν περιστρεφόμενο στρόβιλο, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με μία γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αφού χρησιμοποιηθεί, το νερό οδηγείται ξανά στον ποταμό. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η αναλλοίωτη ροή του ποταμού και προκαλείται η ελάχιστη δυνατή διάβρωση του περιβάλλοντος, ειδικότερα σε σύγκριση με άλλες τοπολογίες ΥΗΣ. Σε μερικές περιπτώσεις, παρά το γεγονός πως πρόκειται για ΥΗΣ χωρίς αποθήκευση, συναντάται κάποια μικρή δεξαμενή νερού (forebay), η οποία εξυπηρετεί την εύρυθμη και συνεχή λειτουργία του σταθμού, αποτρέποντας διαταραχές στον ρυθμό άφιξης του νερού μέσω του αγωγού. Δεν αναφέρεται ωστόσο ως αποθηκευτική ικανότητα του ΥΗΣ, καθώς το νερό που κατακρατείται, χρησιμοποιείται εντός της ίδιας μέρας και δεν αφορά μελλοντικές χρήσεις [33]. Συγκριτικά με τις λοιπές μορφές υδροηλεκτρικής παραγωγής, οι ΥΗΣ φυσικής ροής είναι έργα λιγότερα κοστοβόρα και χρονοβόρα, όσον αφορά την κατασκευή τους. Ακόμη, δεν συμβάλλουν σε πλημμυρικά φαινόμενα, όπως συχνά κατηγορούνται μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα, λόγω της πολύ μικρότερης ή μηδαμινής λίμνης που σχηματίζουν. Ωστόσο, το μέγεθος και η τεχνολογία εκμετάλλευσης των υδάτινων πόρων, δεν τους επιτρέπει την υψηλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συγκριτικά με μεγαλύτερους, άλλης τοπολογίας ΥΗΣ. Λόγω της αδυναμίας αποθήκευσης ποσότητας νερού, η παραγωγή του καθίσταται λιγότερο αξιόπιστη, καθώς υπόκειται σε καιρικούς και εποχικούς περιορισμούς. Η φύση της υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι συνδεδεμένη με πολύ χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, οι οποίες εμφανίζονται μόνο κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου και όχι κατά τη λειτουργία του. Για τον λόγο αυτό, ιδιαίτερα οι ΥΗΣ φυσικής ροής, που αποτελούν μικρότερης κλίμακας εγκαταστάσεις, έχουν αισθητά χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα στην ευρύτερη περιοχή. Μια αρνητική πτυχή της επίδρασής τους στο οικοσύστημα αφορά την διαδικασία εκτροπής του ποταμού και τις αλλαγές που αυτή επιφέρει στον τρόπο λειτουργίας της υδάτινης πανίδας, επηρεάζοντας τη συνολική υγεία του ποταμού.

3.1.2 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί με Ταμιευτήρα

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί με ταμιευτήρα στηρίζουν τον τρόπο λειτουργίας τους στην ύπαρξη μιας μεγάλης δεξαμενής νερού, η οποία παρέχει αποθηκευτική ικανότητα και ευέλικτη παραγωγή ενέργειας. Η δημιουργία αυτής της δεξαμενής προϋποθέτει την κατασκευή ενός φράγματος, δηλαδή μιας μεγάλης, ανθεκτικής κατασκευής πάνω στο υδάτινο σώμα, η οποία συγκρατεί το νερό. Πέραν της υδροηλεκτρικής παραγωγής, το φράγμα εξυπηρετεί στον έλεγχο της ροής του ποταμού και στη διαχείριση των πλημμυρών. Ο χώρος αποθήκευσης του νερού, η περιοχή δηλαδή πίσω από το φράγμα, όπου δημιουργούνται μεγάλα μόνιμα υδάτινα σώματα, ονομάζεται ταμιευτήρας. Οι ταμιευτήρες χρησιμοποιούνται για την κάλυψη αναγκών άρδευσης, παροχής νερού και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τοποθετούνται στην κοίτη του ποταμού, προκειμένου να ελέγχουν βέλτιστα τη στάθμη του νερού [34]. Η ποσότητα ενέργειας που αντιστοιχεί στην κάλυψη των αναγκών ύδρευσης και άρδευσης καλείται "υποχρεωτικά νερά" και υπερέρχει των λοιπών λειτουργιών του ΥΗΣ. Η εγκατάσταση του φράγματος περιλαμβάνει και έναν εκχειλιστή, ένα κανάλι διέλευσης της

πλεονάζουσας ποσότητας νερού, σε περιπτώσεις αυξημένων εισροών.

Όσον αφορά τη διάταξη του ΥΗΣ με ταμιευτήρα, αρχικά κατασκευάζεται το φράγμα (dam), το οποίο συγκρατεί το νερό στον ταμιευτήρα. Το ύψος ή επίπεδο του ταμιευτήρα υποδηλώνει το ποσό της εν δυνάμει διαθέσιμης ενέργειας. Στο κάτω μέρος αυτού βρίσκονται οι υδατοφράκτες ή βαλβίδες(intake), μηχανισμοί που ρυθμίζουν την ποσότητα του νερού που εκρέει από τον ταμιευτήρα προς τον υδροηλεκτρικό σταθμό, μέσω ενός αγωγού (penstock). Ο σταθμός παραγωγής (powerhouse) τοποθετείται χαμηλότερα από τον ταμιευτήρα, είτε στη βάση του φράγματος είτε σε μακρύτερη απόσταση από αυτό, διατηρώντας την υψομετρική τους διαφορά. Εκεί βρίσκονται οι στρόβιλοι(turbines), οι οποίοι εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια λόγω της πτώσης του νερού, μετατρέποντάς την σε περιστροφική. Οι στρόβιλοι είναι συνδεδεμένοι με μια γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος (generator), η οποία ενεργοποιείται εξαιτίας της περιστροφής των στρόβιλων. Στη συνέχεια, η γεννήτρια αυτή συνδέεται σε κάποια γραμμή μεταφοράς του δικτύου ενέργειας, το οποίο μεταφέρει την ενέργεια στα τελικά σημεία κατανάλωσης.



Εικόνα 3.4: Αναπαράσταση ΥΗΣ με Ταμιευτήρα [5]

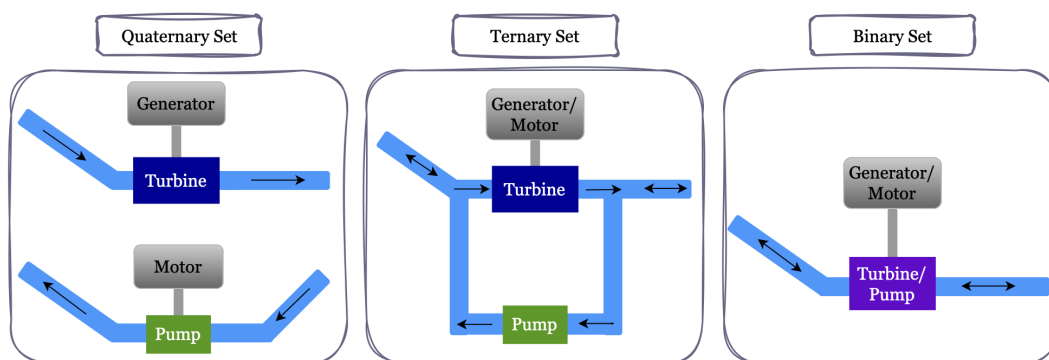
Οι ΥΗΣ με ταμιευτήρα λειτουργούν κατά κανόνα ως μονάδες βάσης, καθώς έχουν τη δυνατότητα διακοπής και εκκίνησης της παραγωγής τους σε σύντομο χρονικό διάστημα, ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου. Η ύπαρξη του ταμιευτήρα προσφέρει στους ΥΗΣ μια μεγάλη ευελιξία όσον αφορά τον προγραμματισμό της λειτουργίας τους, καθώς δύνανται να παράγουν ανεξάρτητα από τις υδρολογικές εισροές για συνεχόμενες ημέρες ή και εβδομάδες. Στο Ελληνικό σύστημα, αλλά και παγκοσμίως, αποτελούν τη μεγαλύτερη κατηγορία υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής, βάσει συνολικής εγκατεστημένης ισχύος [35].

3.1.3 Υδροαντλητικοί Σταθμοί

Οι υδροαντλητικοί σταθμοί ή σταθμοί αντλησιοταμίευσης αποθηκεύουν ενέργεια χρησιμοποιώντας ένα σύστημα δύο διασυνδεδεμένων ταμιευτήρων, οι οποίοι έχουν μεταξύ τους υψομετρική διαφορά. Το νερό αντλείται από τον κατάντη ταμιευτήρα προς τον ανάντη, σε ώρες χαμηλής ζήτησης του συστήματος, και αντίστοιχα, ρέει από τον ανάντη προς τον κα-

τάντη, τις ώρες αυξημένου φορτίου, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Θεωρείται σαν μια πολύ μεγάλης χωρητικότητας μπαταρία, λόγω της ικανότητάς του να αποθηκεύει ενέργεια και να την απελευθερώνει τις πιο συμφέρουσες οικονομικά ώρες. Τις ώρες της άντλησης, ο ΥΗΣ λειτουργεί ως καταναλωτής ενέργειας, αφού τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο, προκειμένου να κινηθούν οι αντλίες και να στείλουν ποσότητα νερού στην άνω λεκάνη. Αντίστοιχα, τις ώρες της έγχυσης νερού προς την κάτω λεκάνη, ο ΥΗΣ λαμβάνει την ιδιότητα του παραγωγού. Η δυνατότητα επιλογής και προγραμματισμού των ωρών άντλησης και παραγωγής, καθιστά τα αντλησιοταμιευτικά έργα επικερδή.

Σχετικά με την διάταξη της δεδομένης τοπολογίας ΥΗΣ, παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με τους ΥΗΣ με ταμιευτήρα. Η ειδοποιός διαφορά έγκειται στην προσθήκη των αντλιών για την επίτευξη της άντλησης. Αρχικά, οι πρώτες εγκαταστάσεις υδροαντλητικών έργων, πριν το 1920, περιελάμβαναν μια αντλία, τροφοδοτούμενη από έναν κινητήρα και έναν στρόβιλο συνδεδεμένο με μια γεννήτρια (quaternary set). Δεν υπήρχε καμία σύνδεση μεταξύ των λειτουργιών της άντλησης και της παραγωγής, ούτε μεταξύ των αγωγών ροής των αντίστοιχων ποσοτήτων νερού. Στην πορεία, συγχωνεύθηκε η γεννήτρια με τον κινητήρα και συνδέθηκαν με την αντλία και τον στρόβιλο σε κοινό άξονα, διατηρώντας και πάλι διακριτούς δρόμους ροής του νερού. Κατά την παραγωγή, η αντλία αποσυνδέεται από τον κοινό άξονα, ενώ ο στρόβιλος περιστρέφεται και κινεί τη γεννήτρια (ternary set). Στην άντληση, ο κινητήρας εκκινεί την αντλία, και, αντίστοιχα, απομονώνεται ο στρόβιλος. Πλέον, η ευρέως διαδεδομένη συνδεσμολογία περιλαμβάνει έναν κινητήρα/γεννήτρια και μια αντλία/στρόβιλο, συνήθως την αναστρέψιμη τουρμπίνα Francis (binary set). Το νερό ρέει προς τις δύο κατευθύνσεις εντός ενός κοινού αγωγού, γεγονός που υποδηλώνει πως κάθε χρονική στιγμή ο ΥΗΣ ακολουθεί μια λειτουργία, δεν έχει τη δυνατότητα να τις παραλληλίσει. Η πιο πρόσφατη διάταξη υπερिशύει οικονομικά και παρουσιάζει μικρότερη πολυπλοκότητα, ωστόσο έχει επιφέρει μεγαλύτερους χρόνους απόκρισης και χαμηλότερους δείκτες απόδοσης στους υδροαντλητικούς σταθμούς παραγωγής [36].

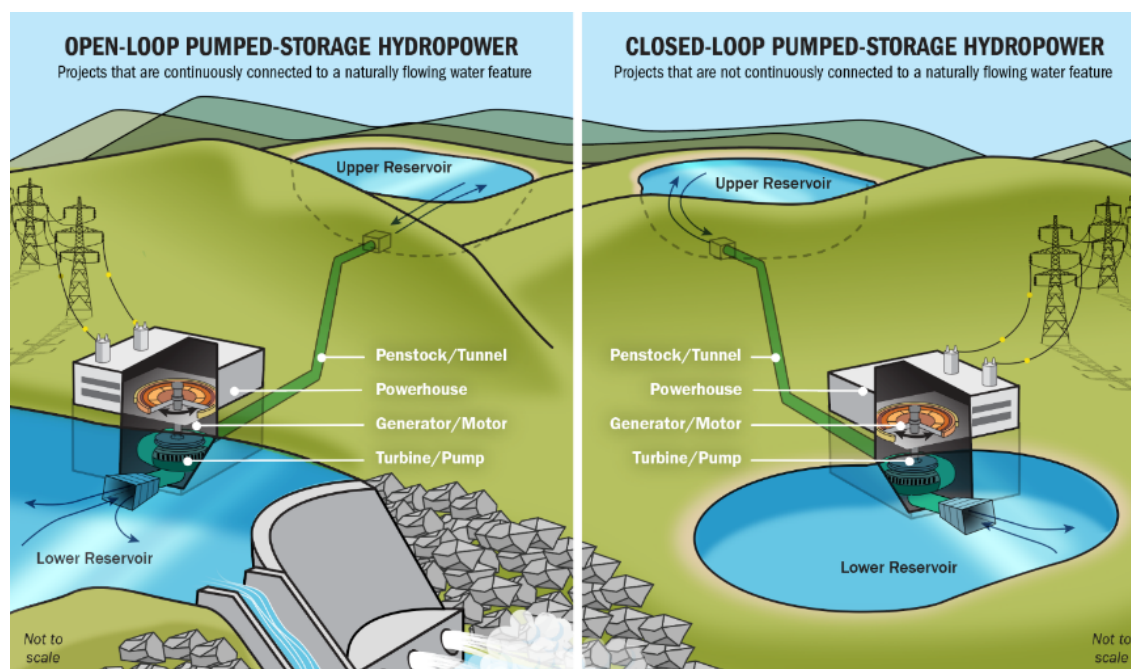


Σχήμα 3.1: Διατάξεις Αντλίας - Στρόβιλου σε Υδροαντλητικούς Σταθμούς Παραγωγής

Πέραν της μορφολογίας των διατάξεων των δύο λειτουργιών - παραγωγής και άντλησης - οι υδροαντλητικοί σταθμοί διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το είδος υδάτινων σωμάτων στα ποία συνδέονται [6]. Οι υδροαντλητικοί σταθμοί ανοιχτού βρόγχου - Open-loop Pumped Hydro Storage - είναι συνεχώς συνδεδεμένοι σε μια φυσική πηγή νερού, σε

αντίθεση με τους υδροαντλητικούς σταθμούς κλειστού βρόγχου, οι οποίοι δεν είναι συνεχώς συνδεδεμένοι σε ρέοντα υδάτινα στοιχεία. Η έννοια "συνεχώς" αποτελεί το κλειδί στους δεδομένους ορισμούς, καθώς ορισμένοι υδροαντλητικοί σταθμοί κλειστού βρόγχου ενδέχεται να αντλούν νερό από φυσικές πηγές για την αρχική φόρτιση του ταμιευτήρα τους και περιοδικά, για την αντιστάθμιση απωλειών. Αντιθέτως, οι υδροαντλητικοί σταθμοί ανοιχτού βρόγχου τροφοδοτούνται από φυσικές υδάτινες εισροές σε σταθερή βάση.

Στην πράξη, οι σταθμοί αντλιοσταμίου ανοιχτού βρόγχου έχουν δύο εναλλακτικές τροφοδότησης - αύξησης της στάθμης του ανάντη ταμιευτήρα τους - τις φυσικές εισροές από τα υδάτινα σώματα στα οποία συνδέεται ο κατάντη ταμιευτήρας και τη λειτουργία της άντλησης. Οι σταθμοί κλειστού βρόγχου, από την άλλη, αρκούνται στην αύξηση του επιπέδου φόρτισης αποκλειστικά μέσω της άντλησης. Για τον λόγο αυτό, χαρακτηρίζονται και ως φυσικές "μπαταρίες". Σύμφωνα με μια πρόσφατη μελέτη του Εθνικού Εργαστηρίου Αναανεώσιμης Ενέργειας (National Renewable Energy Laboratory - NREL) [37], οι υδροαντλητικοί σταθμοί κλειστού τύπου έχουν αποδειχθεί πως παράγουν τις χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, μεταξύ των ακόλουθων μορφών αποθήκευσης ενέργειας: μπαταρίες ιόντων λιθίου, μπαταρίες μολύβδου-οξέος, μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου και αποθήκευση ενέργειας πεπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage - CAES). Παράλληλα, αποτελεί, τη δεδομένη στιγμή, την μεγαλύτερη, από άποψη εγκατεστημένης χωρητικότητας, μορφή αποθήκευσης ενέργειας παγκοσμίως.

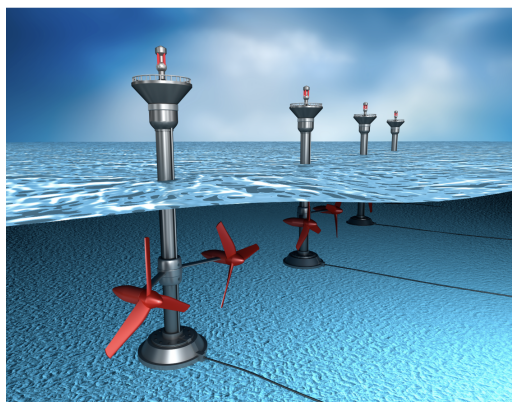


Εικόνα 3.5: Αναπαράσταση Υδροαντλητικών Σταθμών Ανοιχτού και Κλειστού Βρόγχου [6]

3.1.4 Υπεράκτιοι Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

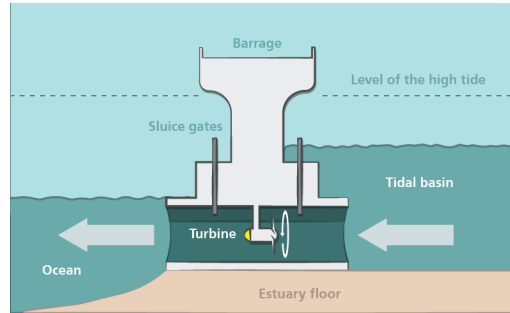
Ως μια υποκατηγορία της υδροηλεκτρικής ενέργειας, συστήνεται η υπεράκτια υδροηλεκτρική ενέργεια ή αλλιώς μετατροπή της παλιρροιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Πρόκειται για μια πρόσφατη και μερικώς διαδεδομένη τεχνολογία, η οποία βασίζεται στην αξιοποίηση του ωκεάνιου ενεργειακού δυναμικού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιες θαλάσσιες πηγές ενέργειας είναι η ενέργεια των ρευμάτων, η κίνηση των κυμάτων, το παλιρροιακό θερμικό και η παλιρροιακή ενέργεια, δηλαδή η εκμετάλλευση της διαδοχής άμπωτης και παλίρροιας. Οι αντίστοιχοι υπεράκτιοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί διακρίνονται εξίσου σε επί μέρους κατηγορίες, με κοινό παρανομαστή την κατασκευή τους στον πυθμένα των θαλάσσιων. Οι κυριότερες διατάξεις είναι:

- οι Γεννήτριες Παλιρροιακών Ρευμάτων (Tidal Stream Generators): Μονάδες ή συστοιχίες γεννητριών, οι οποίες βρίσκονται στο βυθό της θάλασσας. Λειτουργούν παρόμοια με τις γεννήτριες των αιολικών πάρκων, περιστρεφόμενες χάρη στην κινητική ενέργεια των θαλάσσιων ρευμάτων. Λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας του νερού συγκριτικά με τον αέρα, η διαθέσιμη ισχύς για την παραγωγή ενέργειας σε μια θαλάσσια περιοχή τείνει να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από ότι στη στεριά. Οι γεννήτριες παλιρροιακών ρευμάτων θεωρούνται η λιγότερο επεμβατική τοπολογία υπεράκτιας υδροηλεκτρικής παραγωγής.



Εικόνα 3.6: Γεννήτριες Παλιρροιακών Ρευμάτων [7]

- τα Παλιρροιακά Φράγματα (Tidal Barrages): Ευθέως ανάλογα με τα υδροηλεκτρικά φράγματα, τα παλιρροιακά φράγματα διαθέτουν βαλβίδες υπεύθυνες για τον έλεγχο της παλιρροιακής ροής, η οποία κινεί τις τουρμπίνες και παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια. Η απαιτητική υποβρύχια κατασκευή, σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος επένδυσης και την περιορισμένη ύπαρξη θέσεων παλιρροιακού δυναμικού, καθιστούν τη συγκεκριμένη τεχνολογία λιγότερο ελκυστική ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μεγαλύτερη συμβολή παρουσιάζει στη ρύθμιση των θαλάσσιων ρευμάτων και τη διαχείριση πλημμυρών σε περιοχές χαμηλού υψομετρικού επιπέδου.
- η Δυναμική Παλιρροιακή Ενέργεια (Dynamic Tidal Power): Συνδυάζει τις προαναφερθείσες τεχνολογίες, εκμεταλλευόμενη την αλληλεπίδραση μεταξύ κινητικής και δυναμικής ενέργειας της παλίρροιας. Αφορά στην κατασκευή μεγάλων φραγμάτων,



Εικόνα 3.7: Φράγματα Παλιρροιακών Ρευμάτων [8]

εκτεινόμενα από την ακτή προς τη θάλασσα, σε περιοχές όπου οι παλίρροιες ρέουν παράλληλα στις ακτές. Κατά την κίνηση της παλίρροιας, η μια στάθμη του φράγματος βρίσκεται υψηλότερα από την άλλη. Το νερό ρέει μέσω του φράγματος, κινώντας τις τουρμπίνες, η οποίες με τη σειρά τους παράγουν ενέργεια. Οι τουρμπίνες αυτές έχουν τη δυνατότητα 180 μοιρών περιστροφής, ώστε να εκμεταλλεύονται και τις δύο κατευθύνσεις κίνησης της θάλασσας, μεγιστοποιώντας την ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας [38]. Η συγκεκριμένη τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο.

Σε γενικές γραμμές, η υπεράκτια υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μια νέα μορφή ανανεώσιμης παραγωγής ενέργειας, η οποία χρήζει περαιτέρω διερεύνησης και δοκιμών. Η φύση της τεχνολογίας αυτής καθιστά τις εφαρμογές της γεωγραφικά περιορισμένες, δαπανηρές και απαιτητικές σχεδιαστικά. Σε εθνικό επίπεδο δεν υφίσταται κάποιο υπεράκτιο υδροηλεκτρικό έργο ούτε τίθεται προς συζήτηση ως εναλλακτική μορφή ανανεώσιμης ενέργειας, εξαιτίας της έλλειψης των απαιτούμενων γεωμορφολογικών συνθηκών. Για τον λόγο αυτό, δεν υπεισέρχεται στη μοντελοποίηση της παρούσας διπλωματικής, απλώς παρατίθεται για λόγους πληρότητας της θεωρητικής εισαγωγής.

3.2 Διαδικασία Παραγωγής Ενέργειας

Το υδροδυναμικό που χαρακτηρίζει μια μάζα νερού m (kg), αποθηκευμένη σε υψόμετρο h , υπολογίζεται ως εξής:

$$E_{\Delta} = mgh = \rho gVh = \gamma Vh \quad (3.1)$$

όπου ρ η πυκνότητα του νερού ($1000\text{kg}/\text{m}^3$), g η επιτάχυνση της βαρύτητας ($9.81\text{m}/\text{s}^2$), γ το ειδικό βάρος του νερού ($9.81\text{kN}/\text{m}^3$) και V ο όγκος του (m^3). Το μέγεθος αυτό συμμετέχει στον χαρακτηρισμό ενός υδατικού δυναμικού ως αξιοποιήσιμο ή μη. Όσον αφορά την τελική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, αυτή προκύπτει:

$$E = \eta\gamma Vh_n \quad (3.2)$$

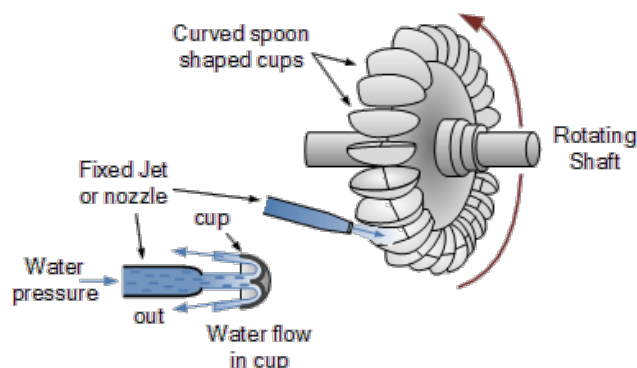
όπου η είναι ο βαθμός απόδοσης των στροβίλων και h_n το καθαρό ύψος πτώσης. Το

τελευταίο αντιστοιχεί στην διαφορά μεταξύ του ανάντη και κατόντη ενεργειακού υπομέτρου, αφαιρώντας τις υδραυλικές απώλειες, οι οποίες οφείλονται στη μετατροπή της υδροδυναμικής ενέργειας του νερού σε υδραυλική. Ο βαθμός απόδοσης αναφέρεται στην απόδοση των στροβίλων, κατά τη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε ηλεκτρική, και λαμβάνει τιμές $\eta > 0.85$ για ΥΗΣ μεγάλης κλίμακας [39]. Σύμφωνα με τις προηγούμενες μαθηματικές σχέσεις, η τελική παραγόμενη ενέργεια συνδέεται άμεσα με το μέγεθος του ταμιευτήρα - ως μέγιστη δυνατή αποθήκευση του αντίστοιχου όγκου νερού - και την υψομετρική διαφορά άνω με κάτω στάθμης νερού.

Οι σρόβιλοι διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τη λειτουργία τους [40]:

- Δράσης \Rightarrow Στρόβιλος Pelton, Στρόβιλος Εγκάρσιας Ροής
- Ανάδρασης \Rightarrow Στρόβιλος Francis, Στρόβιλος Kaplan, Στρόβιλος Ελεύθερης Ροής

Οι σρόβιλοι δράσης είναι ευρέως διαδεδομένοι σε εφαρμογές σημαντικού ύψους πτώσης του νερού και σχετικά χαμηλής ροής. Η λειτουργία τους έγκειται στην αξιοποίηση της μεγάλης ταχύτητας πτώσης του νερού στα σκαφίδια (cups) του στροβίλου. Η μεγιστοποίηση της ορμής του νερού επιτυγχάνεται μέσω ενός ακροφυσίου (nozzle), συνδεδεμένο στην απόληξη του σωλήνα μεταφοράς του νερού μεταξύ των δύο λεκανών. Η πίεση που ασκείται στα σκαφίδια, επιφέρει την περιστροφή του στροβίλου, ενώ το νερό μεταφέρεται στις εξωτερικές πλευρές των σκαφιδίων και αποβάλλεται. Πρακτικά, πρόκειται για έναν συνήθη υδροτροχό με ειδικά σχεδιασμένα, σε μορφή κυπέλλου πτερύγια.

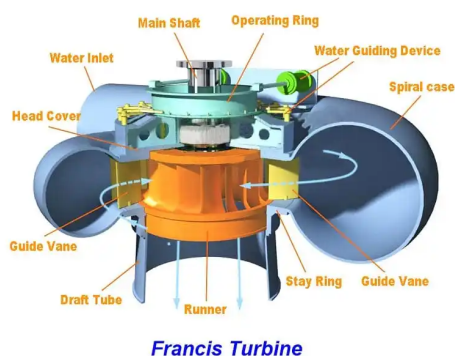


Εικόνα 3.8: Διάταξη Στροβίλου Pelton [9]

Αναφορικά με τους σρόβιλους ανάδρασης, βρίσκουν εφαρμογή σε μεγαλύτερο εύρος υδροηλεκτρικών τοπολογιών και ισχύων εξόδου. Σε αντίθεση με τους σρόβιλους δράσης, οι σρόβιλοι ανάδρασης εκμεταλλεύονται απευθείας την πίεση του νερού για την κίνηση των περυγίων αντί για τη μεσολάβηση της μετατροπής του σε κινητική ενέργεια. Συνεπώς, οι σρόβιλοι ανάδρασης βρίσκονται βυθισμένοι στο νερό και είναι εξοπλισμένα με αντίστοιχα ανθεκτικά εξαρτήματα εσωτερικά και εξωτερικά. Όσον αφορά την διάταξη Francis, διακρίνεται για την ακτινική εισροή του νερού στον σρόβιλο. Το νερό φτάνει στην τουρμπίνα κάθετα στον άξονα περιστροφής της και ρέει συνεχώς προς το κέντρο της. Κατά την έξοδό του, ακολουθεί αξονική κατεύθυνση. Συναντώνται σε μεσαία ή μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα και έχουν τη δυνατότητα οριζόντιας και κάθετης τοποθέτησης.

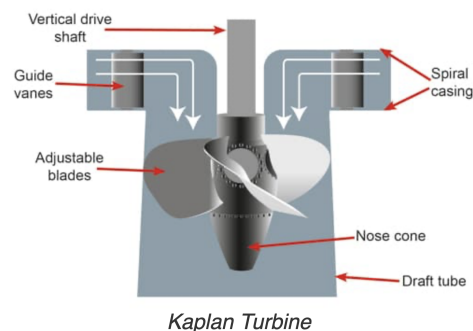
Οι σρόβιλοι Kaplan ξεχωρίζουν λόγω της ικανότητάς τους να αλλάζουν τη γωνία των περυγίων τους κατά βούληση, διατηρώντας έτσι τη μέγιστη δυνατή απόδοση ανάλογα με τον

ρυθμό κίνησης του νερού. Έχουν παρόμοια διάταξη εισόδου με τους στρόβιλους Francis, με τη διαφορά πως το νερό εισέρχεται με αξονική φορά στο σπειροειδές κέλυφος (scroll casing). Στην πορεία τα κινητά πτερύγια (guide vanes) κατευθύνουν το νερό προς τα πτερύγια του δρομέα (runner blades). Αυτά έχουν την δυνατότητα προσαρμογής της κλίσης τους, προκειμένου να επιτυγχάνεται η βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης του νερού και να μεγιστοποιείται η απόδοση του ΥΗΣ. Μετά τη διέλευση του νερού από τον δρομέα, κινείται προς το σωλήνα απορρόφησης και εξέρχεται από τη διάταξη και πάλι αξονικά. Οι στρόβιλοι Kaplan αποτελούν τη μοναδική τοπολογία, ικανή να χρησιμοποιηθεί και σε ΥΗΣ σχετικά χαμηλού ύψους πτώσης, χάρη στην ευελιξία κίνησης των πτερυγίων του.



Francis Turbine

(α) Διάταξη Στροβίλου Francis [41]



Kaplan Turbine

(β) Διάταξη Στροβίλου Kaplan [42]

Εικόνα 3.9: Διατάξεις Στροβίλων Ανάδρασης

3.3 Διαδικασία Άντλησης Ενέργειας

Η άντληση ως λειτουργία συναντάται στους υδροαντλητικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, για τη μεταφορά του όγκου νερού από τον καπάντη προς τον ανάντη ταμιευτήρα. Αυτή η διαδικασία, κατά κανόνα, πραγματοποιείται τις ώρες, κατά τις οποίες η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας και η τιμή πώλησης αυτής βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα. Τότε, ο ΥΗΣ καταναλώνει ενέργεια, προκειμένου να επιτευχθεί η πλήρωση του άνω ταμιευτήρα, με στόχο την εκφόρτισή του - και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας - τις ώρες υψηλού φορτίου και αντίστοιχα υψηλών τιμών πώλησης ενέργειας. Η διάταξη που επιτρέπει την άντληση του νερού λαμβάνει διάφορες διαφοροποιήσεις, με κυριότερες τις ακόλουθες:

- Τριμερείς Αντλιοστροβιλικές Μονάδες (Ternary Pump Turbine Units) ⇒ Αποτελούνται από έναν στρόβιλο δράσης (συνήθως Pelton), μια αντλία και έναν κινητήρα-γεννήτρια. Οι διαδικασίες της παραγωγής και άντλησης εναλλάσσονται μέσω ενός συμπλέκτη ή μετατροπέα ροπής, με τον δεύτερο να παρουσιάζει συγκριτικά ταχύτερους χρόνους σύνδεσης-αποσύνδεσης. Η συγκεκριμένη διάταξη υστερεί όσον αφορά το κόστος επένδυσης, εξαιτίας του επιπλέον μηχανολογικού εξοπλισμού και των διακριτών αγωγών ροής του νερού. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί ο διαχωρισμός των δύο λειτουργιών, επιτρέποντας αφενός την ατομική βελτιστοποίηση κάθε στοιχείου και αφετέρου τον παραλληλισμό παραγωγής και άντλησης.

- Αναστρέψιμες Αντλίες - Στρόβιλοι (Reversible Pump-Turbines) \Rightarrow Πρόκειται για διατάξεις, οι οποίες χρησιμοποιούν κοινή μονάδα αντλίας-στροβίλου, όπως η μονάδα Francis. Η μηχανική της σχεδίαση, επιτρέπει την αλλαγή κατεύθυνσης των πτερυγίων της τουρμπίνας, συνδυάζοντας τις λειτουργίες της παραγωγής και άντλησης σε μία υδραυλική μονάδα. Λόγω της μεγαλύτερης πολυπλοκότητας της άντλησης, η διάταξη σχεδιάζεται αρχικά ως αντλία. Το βασικό μειονέκτημα των αναστρέψιμων μηχανισμών έγκειται στην αδυναμία προσαρμογής της ταχύτητας περιστροφής, και, ως εκ τούτου, τη λειτουργία υπό μερικό φορτίο. Ωστόσο, αποτελούν οικονομικότερες και απλούστερες υδραυλικές εγκαταστάσεις σε σχέση με τις τριμερείς αντλιοστροβιλικές μονάδες, για αυτό και προτιμούνται περισσότερο [43].

Οι προαναφερθείσες διατάξεις αναπαρίστανται στο Σχήμα 3.9.

3.4 ΥΗΣ στο Ελληνικό Σύστημα

Στην Ελλάδα, η κάλυψη της ζήτησης προερχόμενη από υδροηλεκτρική παραγωγή αναλογεί στο 9% της συνολικής παραγωγής [44]. Παρά τη σχετικά μικρή συνεισφορά των ΥΗΣ στο μείγμα ενέργειας, η συνολική εγκατεστημένη υδροηλεκτρική ισχύς ανέρχεται στο 17%, γεγονός που οφείλεται στις χαμηλές υδρολογικές εισροές. Η εγκατεστημένη ισχύς των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων ανέρχεται στα 3.170 MW, εκ των οποίων τα 699 MW αφορούν ΥΗΣ με δυνατότητα άντλησης (*). Ακόμη, λειτουργούν επιπλέον 47 MW υδροηλεκτρικών σταθμών φυσικής ροής (Run-of-river Hydropower Plants) [45]. Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται οι μεγάλοι ΥΗΣ της χώρας, δηλαδή ΥΗΣ των οποίων οι εγκατεστημένη ισχύς ξεπερνά τα 15 MW. Συνήθως, δεν αποτελούν αποσυνδεδεμένα έργα, αλλά μέρος ενός μεγαλύτερου συγκροτήματος υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλησίον ενός ποταμού, όπως φαίνεται στη συνέχεια.

Πίνακας 3.1: Υφιστάμενοι ΥΗΣ Συνδεδεμένοι στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΙΣΧΥΣ (MW)	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ
ΥΗΣ Άγρας	50	Συγκρότημα Αλιάκμονα
ΥΗΣ Ασωμάτων	108	Συγκρότημα Αλιάκμονα
ΥΗΣ Εδεσσαίου	19	Συγκρότημα Αλιάκμονα
ΥΗΣ Θησαυρού *	384	Συγκρότημα Νέστου
ΥΗΣ Καστρακίου	320	Συγκρότημα Αχελώου
ΥΗΣ Κρεμαστών	437,2	Συγκρότημα Αχελώου
ΥΗΣ Λάδωνα	70	
ΥΗΣ Πηγών Αώου	210	Συγκρότημα Αράχθου
ΥΗΣ Πλαστήρα	129,9	
ΥΗΣ Πλατανόβρυσης	116	Συγκρότημα Νέστου
ΥΗΣ Πολύφυτου	375	Συγκρότημα Αλιάκμονα
ΥΗΣ Πουρναρίου	333,6	Συγκρότημα Αράχθου
ΥΗΣ Στράτου	150	Συγκρότημα Αχελώου
ΥΗΣ Σφηκιάς *	315	Συγκρότημα Αλιάκμονα
ΥΗΣ Ιλαρίωνα	153	Συγκρότημα Αλιάκμονα
Σύνολο Ισχύος ΥΗΣ	3170,7	

Παρά το γεγονός πως η ισχύουσα λίστα εγκατεστημένων ΥΗΣ παραμένει ίδια από το 2014 έως και σήμερα, η εικόνα προβλέπεται να αλλάξει στο εγγύς μέλλον, με την προσθήκη πέντε ΥΗΣ συνολικής ισχύος 1.030 MW. Δύο εξ αυτών, αθροιστικής ονομαστικής ισχύος 730 MW, αφορούν την ανάπτυξη του μεγαλύτερου έργου αντλησιοταμίευσης της χώρας, ικανού να παράγει κατά προσέγγιση 816 GWh ετησίως [46].

3.5 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στην συγκεκριμένη ενότητα εξετάζεται η ένταξη των υδροηλεκτρικών σταθμών σε μελέτες επάρκειας, όπως αυτή συναντάται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Οι σύγχρονες μελέτες επάρκειας, προερχόμενες είτε από διαχειριστές του δικτύου ενέργειας είτε από ανεξάρτητους φορείς, έχουν στραφεί προς την χρήση των πιθανοτικών μοντέλων υπολογισμού. Αυτό οφείλεται στο κύριο μειονέκτημα των ντετερμινιστικών μεθόδων, όσον αφορά την αδυναμία υπολογισμού της πιθανότητας εμφάνισης ανεπάρκειας, με αποτέλεσμα να μην προσδιορίζονται επαρκώς οι κίνδυνοι απώλειας φορτίου του ΣΗΕ. Ο υπολογισμός της πιθανότητας εμφάνισης ανεπάρκειας καθίσταται ολοένα και πιο απαραίτητος για την αξιολόγηση της επάρκειας του ΣΗΕ, λόγω της εδραίωσης της ανανεώσιμης παραγωγής. Η παραγωγή αυτή, όπως και άλλες παράμετροι του ΣΗΕ, χαρακτηρίζονται από υψηλή αβεβαιότητα, η οποία αποτυπώνεται βέλτιστα μέσω πιθανοτικών δεικτών [1].

Μέχρι πρότινος, τα πιθανοτικά μοντέλα υπολογισμού δεν επιλέγονταν εξαιτίας των υψηλών απαιτήσεων σε υπολογιστικό χρόνο και πόρους, ειδικά σε συστήματα ενέργειας πολλών μεταβλητών. Πλέον, η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει επιλύσει αυτά τα ζητήματα, καθιστώντας τις πιθανοτικές μεθόδους την πλέον ελκυστική επιλογή για τον προσδιορισμό και την αξιολόγηση του επιπέδου επάρκειας των σύγχρονων ΣΗΕ [47].

Όσον αφορά τον τρόπο ένταξης των ΥΗΣ στις μελέτες επάρκειας ισχύος, συναντώνται διάφορες παραλλαγές αναφορικά με τον τρόπο λειτουργίας τους και τις παραμέτρους που αξιολογούνται.

Ο Διαχειριστής του Ελληνικού Συστήματος Ενέργειας (Α.Δ.Μ.Η.Ε.), στην πιο πρόσφατη μελέτη επάρκειάς του [45], εντάσσει τους ΥΗΣ με γνώμονα τη μείωση των αιχμών της χρονοσειράς του φορτίου. Η τεχνική αυτή, αναφερόμενη ως μέθοδος Αποκοπής Αιχμών (Peak Shaving), θεωρεί γνωστή την χρονοσειρά της ζήτησης για το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα - εν προκειμένω, ένα έτος - και κατανέμει τις υδρολογικές εισροές των ΥΗΣ στις αιχμές του φορτίου, καθώς αυτές αξιολογεί ως τις πιο κρίσιμες περιόδους για την εμφάνιση γεγονότων ανεπάρκειας. Με παρόμοιο τρόπο εισάγονται στη μελέτη και οι ΥΗΣ με δυνατότητα άντλησης, οι οποίοι προσομοιώνονται ώστε να παράγουν στις αιχμές του φορτίου και να αντλούν τις ώρες χαμηλής ζήτησης. Αξίζει να σημειωθεί, πως η συγκεκριμένη τεχνική δεν λαμβάνει υπόψιν αφενός τον χρονοισμό των εισροών μέσα στο έτος, και αφετέρου τους ενεργειακούς περιορισμούς των υδροηλεκτρικών μονάδων. Στη μελέτη επάρκειας του Α.Δ.Μ.Η.Ε. εξετάζονται τρία διαφορετικά σενάρια υδρολογικών εισροών, τα οποία αντιστοιχούν σε ξηρό, μέσο και υγρό κλιματικό έτος και 35 σενάρια χρονοσειρών της ζήτησης, τα οποία έχουν προκύψει από την Πανευρωπαϊκή Κλιματική Βάση Δεδομένων (Pan-European Climate Database - PECD). Η μέθοδος υπολογισμού των δεικτών επάρκειας βασίζεται στον Πίνακα Πιθανότητας Απώλειας Ισχύος (Capacity Outage Probability Table - COPT), η υλοποίηση του οποίου περιγράφεται στην Ενότητα 2.1.2.

Με παρόμοιο τρόπο ενσωματώνουν και οι Διαχειριστές του ΣΗΕ των Ηνωμένων Πολιτειών τους ΥΗΣ στις μελέτες επάρκειάς τους. Συγκεκριμένα, η μελέτη του PJM Interconnection LLC (PJM) για το έτος 2023 και η μελέτη του Northwest Power and Conservation Council

(NWPPC) για το 2019 αναφέρουν τη μοντελοποίηση των ΥΗΣ σύμφωνα με την τεχνική Αποκοπής Αιχμών, με την αντίστοιχη παραλλαγή που αναφέρεται στη μελέτη επάρκειας του Α.Δ.Μ.Η.Ε. για τους ΥΗΣ με δυνατότητα άντλησης. Και στις δύο αναφορές, οι δείκτες επάρκειας προκύπτουν από το μοντέλο προσομοίωσης Monte Carlo, όπου μοντελοποιούνται πολλοί συνδυασμοί ιστορικών ετών και χρονοσειρών διαθεσιμότητας της θερμικής παραγωγής.

Η μελέτη του PJM [48] χρησιμοποιεί δεδομένα 8 ιστορικών ετών όσον αφορά τις υδρολογικές συνθήκες των ΥΗΣ και τις χρονοσειρές της ζήτησης και της παραγωγής ΑΠΕ. Η κατανομή των εισροών των ΥΗΣ στις ώρες αιχμής του φορτίου γίνεται σε μηνιαία βάση και καθορίζεται από το ενεργειακό περιεχόμενο και τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ που χαρακτηρίζει τον δεδομένο μήνα του επιλεγμένου ιστορικού έτους. Στη συγκεκριμένη ανάλυση δεν συνυπολογίζονται οι μη προγραμματισμένες βλάβες των ΥΗΣ.

Όσον αφορά τη μελέτη του NWPPC [49], τα υδρολογικά δεδομένα αντιπροσωπεύουν 80 ιστορικά έτη. Ο χρονικός ορίζοντας μοντελοποίησης της λειτουργίας των ΥΗΣ είναι εβδομαδιαίος και παρατηρείται η εξής διαφοροποίηση αναφορικά με την κατανομή των εισροών: επιλέγονται τόσο ώρες υψηλής ζήτησης όσο και ώρες μερικής διαθεσιμότητας των θερμικών μονάδων παραγωγής - αυτό συμβαίνει γιατί οι ΥΗΣ εντάσσονται τελευταίοι στον υπολογισμό της επάρκειας, συνεπώς η λειτουργία των θερμικών μονάδων και η χρονοσειρά του φορτίου έχουν ήδη εξαχθεί και θεωρούνται γνωστές.

Ωστόσο, σύμφωνα με τους P. Carvallo, N. Zhang και B. Leibowicz [50], προκύπτει το συμπέρασμα πως η μοντελοποίηση των ΥΗΣ στις προαναφερθείσες μελέτες δεν αντιπροσωπεύει τον ρεαλιστικό τρόπο λειτουργίας των μονάδων αυτών. Στην συγκεκριμένη αναφορά αξιολογούνται οι μελέτες επάρκειας ισχύος που ακολουθούνται από τους διαχειριστές και φορείς ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών και προτείνονται τρόποι βελτίωσης των υφιστάμενων μεθοδολογιών και παραδοχών. Μεταξύ αυτών, τίθεται το ζήτημα ένταξης των ΥΗΣ στην αξιολόγηση της επάρκειας λαμβάνοντας υπόψιν οικονομικούς και λειτουργικούς παράγοντες, προκειμένου να παρουσιάζεται πιο αντιπροσωπευτικά η συμπεριφορά τους εντός του ΣΗΕ και να υπολογίζεται ορθότερα η συμβολή τους στην επάρκεια ισχύος.

Στο πλαίσιο αυτό, υπάρχουν οργανισμοί, όπως ο Pentilateral Energy Forum (PENTA), ο European Network of Transmission System Operators (ENTSO-e) και ο National Grid ESO, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψιν την οικονομικότητα του συστήματος και τις επιμέρους τεχνικές και λειτουργικές παραμέτρους των μονάδων παραγωγής, στον υπολογισμό της επάρκειας του ΣΗΕ. Στις τελευταίες μελέτες τους, [47], [51] και [52], αντίστοιχα, εφαρμόζεται ένα μοντέλο οικονομικής βελτιστοποίησης της λειτουργίας όλων των στοιχείων του ΣΗΕ, στοχεύοντας κάθε στιγμή στο χαμηλότερο συνολικό κόστος του συστήματος. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψιν διάφορα μεγέθη που επηρεάζουν τη λειτουργία των ΥΗΣ, όπως τα όρια ισχύος, τα επιτρεπτά όρια της στάθμης του ταμιευτήρα και τον χρονοισμό των εισροών τους. Η απόκριση του μοντέλου είναι ωριαία, και καθορίζει τις χρονοσειρές λειτουργίας των ΥΗΣ για το σύνολο του εξεταζόμενου χρονικού ορίζοντα. Τα δεδομένα που εισάγονται στο μοντέλο βελτιστοποίησης, στις δύο πρώτες μελέτες, προέρχονται από την PECD και αφορούν 35 κλιματικά έτη. Η αναφορά του Διαχειριστή του Ηνωμένου Βασιλείου, National Grid ESO, μελετά επιλεγμένα ιστορικά έτη, τα οποία αντιπροσωπεύουν κρίσιμες καταστάσεις του ΣΗΕ - π.χ. ακραία

καιρικά φαινόμενα. Οι δείκτες επάρκειας, και στις τρεις μελέτες επάρκειας, προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo, προκειμένου να πραγματοποιηθούν όσο το δυνατόν περισσότεροι συνδυασμοί κλιματικών ετών και ετήσιας διαθεσιμότητας των θερμικών μονάδων παραγωγής.

Αξίζει να σημειωθεί πως στη μελέτη ERAA - 2023 [51] λαμβάνονται υπόψιν, επιπλέον των παραπάνω, τα υποχρεωτικά νερά των ΥΗΣ και η αντιμετώπιση της πλεονάζουσας ενέργειας, στην περίπτωση που οι υδρολογικές εισροές υπερβαίνουν την ενέργεια παραγωγής εντός του ορίζοντα βελτιστοποίησης (μία εβδομάδα).

Η εφαρμογή ενός μοντέλου οικονομικής βελτιστοποίησης για την εξαγωγή της λειτουργίας των ΥΗΣ παρέχει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα συγκριτικά με τη μέθοδο της Αποκοπής Αιχμών, καθώς συνυπολογίζει επιπλέον τεχνικές και λειτουργικές παραμέτρους. Ωστόσο, ακόμη αμελούνται οι μη προγραμματισμένες βλάβες των σταθμών και δεν λαμβάνεται υπόψιν σε πραγματικό χρόνο η συνολική εικόνα του συστήματος, ώστε να προσομοιωθεί η συμπεριφορά των ΥΗΣ σε ένα επικείμενο συμβάν ανεπάρκειας.

Μια διαφορετική μέθοδος ένταξης των ΥΗΣ υιοθετείται από τον διαχειριστή του Συστήματος Ενέργειας του Καναδά, Independent Electricity System Operator (IESO), στην πρόσφατη έκδοση της μελέτης επάρκειας του [53]. Η δεδομένη μέθοδος αξιολόγησης της επάρκειας θέτει έναν επαρκειακό δείκτη - στόχο και υπολογίζει το περιθώριο του υφιστάμενου ΣΗΕ ως προς τον στόχο αυτό για κάθε εβδομάδα του έτους. Η λειτουργία των ΥΗΣ προκύπτει από την υδροηλεκτρική παραγωγή 20 ιστορικών ετών, εστιάζοντας στις τιμές παραγόμενης ισχύος που αντιστοιχούν στις εβδομαδιαίες αιχμές του φορτίου. Η μερική διαθεσιμότητα των ΥΗΣ λόγω απρόβλεπτων βλαβών λαμβάνεται υπόψιν, μέσω των ιστορικών ετών λειτουργίας. Το εβδομαδιαίο περιθώριο ισχύος προκύπτει μέσω ενός Πίνακα Πιθανότητας Απώλειας Ισχύος και αξιολογείται ως κρίσιμο, όταν λαμβάνει αρνητικές τιμές, όταν δηλαδή η διαθέσιμη παραγωγή είναι χαμηλότερη της ζήτησης συν μια ποσότητα απαιτούμενης εφεδρείας. Αξίζει να αναφερθεί πως ο IESO διαφοροποιεί τη μελέτη επάρκειας ισχύος από τη μελέτη επάρκειας ενέργειας. Η δεύτερη αποτελεί μια πιο μακροσκοπική μελέτη του ΣΗΕ και περιλαμβάνει πιθανές μελλοντικές αποσύρσεις και εντάξεις νέων μονάδων παραγωγής. Σε αυτή, η λειτουργία των ΥΗΣ προκύπτει μέσω ενός μοντέλου οικονομικής βελτιστοποίησης, το οποίο δέχεται ως παραμέτρους τα ενεργειακά και λειτουργικά όρια των ΥΗΣ, σύμφωνα με ιστορικά δεδομένα. Το αποτέλεσμα της μελέτης είναι ένα μελλοντικό ενεργειακό μείγμα, βάσει χρονοσειρών πρόβλεψης της ζήτησης, το οποίο αξιολογεί την ικανότητα του εξεταζόμενου ΣΗΕ να ικανοποιήσει την αναμενόμενη ζήτηση.

Ο ακόλουθος Πίνακας 3.2 περιέχει ορισμένους δείκτες συνεισφοράς των ΥΗΣ στην επάρκεια ισχύος του ΣΗΕ, όπως αυτοί βρίσκονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Οι τρόποι με τους οποίους εντάσσονται οι ΥΗΣ στις συγκεκριμένες μελέτες έχουν παρουσιαστεί παραπάνω. Τα αποτελέσματα της αναφοράς [54] αναφέρονται σε ΥΗΣ που λειτουργούν βάσει της τεχνικής αποκοπής αιχμών, λαμβάνοντας υπόψιν τα δεδομένα λειτουργίας των ετών 2005 - 2022.

Οι διαφορετικές αποτιμήσεις της ικανότητας συνεισφοράς ισχύος των ΥΗΣ, οφείλονται στις διαφορετικές τεχνικές μοντελοποίησης των σταθμών που υιοθετούνται στις επί μέρους

μελέτες επάρκειας. Για παράδειγμα, η τιμή του 100% Capacity Value που αποδίδει η αναφορά [55] στα Open-loop PSH, μαρτυρά πως η συγκεκριμένη μελέτη εξισώνει την ικανότητα συνεισφοράς ισχύος των ΥΗΣ με εκείνη μιας ιδανικής, συνεχώς διαθέσιμης μονάδας παραγωγής, γεγονός που στερείται ρεαλισμού.

Πίνακας 3.2: Δείκτες Συνεισφοράς ΥΗΣ στην Επάρκεια Ισχύος

Capacity Value	HPP Reservoir	Open-loop PSH
<i>NWPCC, RA in the Pacific Northwest, 2019 [49]</i>	53% - 57%	NaN
<i>PJM, ELCC Report, 2021 [55]</i>	96%	98% - 100%
<i>National Grid ESO, Electricity Capacity Report, 2022 [56]</i>	91% - 92%	94% - 95%
<i>U.S. Water Power Technologies Office, Hydropower Market Report, 2023 [54]</i>	33% - 45%	NaN

Επιπλέον των μελετών επάρκειας ισχύος των Διαχειριστών ΣΗΕ, ενδιαφέρον παρουσιάζει η αναφορά των Karki και Billinton [57], στην οποία εξετάζεται η συν-λειτουργία των ΥΗΣ χωρίς δυνατότητα άντλησης με την αιολική παραγωγή. Οι ΥΗΣ θεωρούνται πως λειτουργούν είτε ως μονάδες αιχμής - εντάσσονται στο ΣΗΕ σε περίπτωση κινδύνου απώλειας φορτίου - είτε ως μονάδες εξισορρόπησης της μεταβλητής αιολικής παραγωγής. Η διερεύνηση αφορά την βέλτιστη κατανομή των ΥΗΣ στις δύο κατηγορίες, για την επίτευξη του υψηλότερου επιπέδου επάρκειας του συστήματος. Διαπιστώνεται, πως όταν οι ΥΗΣ λειτουργούν αποκλειστικά ως μονάδες αιχμής έχουν πολύ χαμηλά ποσοστά παραγωγής και κατ' επέκταση υψηλά ποσοστά αναξιοποίητης ενέργειας μέσα στη διάρκεια του έτους. Οι χαμηλότεροι δείκτες επάρκειας (LOLE) προκύπτουν όταν το 1/3 των υφιστάμενων ΥΗΣ λειτουργούν ως εξισοροπιστές της αιολικής παραγωγής και το υπόλοιπο ως μονάδες αιχμής, εφόσον οι ετήσιες υδρολογικές εισροές και η εγκατεστημένη αιολική ισχύς είναι σε υψηλά επίπεδα. Η συγκεκριμένη ανάλυση εισάγει μια εναλλακτική χρήση των ΥΗΣ - ως επικουρικές μονάδες στην αβέβαιη ανανεώσιμη παραγωγή - η οποία δίνει ικανοποιητικά επαρκειακά αποτελέσματα και αναμένεται να αποτελέσει πιθανή πολιτική λειτουργίας σε συστήματα με ολοένα και αυξανόμενη διείσδυση ΑΠΕ.

Κεφάλαιο 4

Μεθοδολογία Προβλήματος

Στο παρόν Κεφάλαιο αναλύεται η προτεινόμενη μεθοδολογία μοντελοποίησης των ΥΗΣ με άξονα την επάρκεια ισχύος του συστήματος.

Η βασική αρχή αξιοποίησης του δυναμικού της υδροηλεκτρικής παραγωγής έγκειται στην ανακατανομή (Redispatch) της προκαθορισμένης λειτουργίας των ΥΗΣ ανάλογα με τις ανάγκες επάρκειας του υπό μελέτη ΣΗΕ. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ελέγχου εμφάνισης ανεπαρκειών εντός του ΣΗΕ, ο οποίος πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο, κάθε ώρα, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Σε περίπτωση αδυναμίας κάλυψης του φορτίου, οι ΥΗΣ προσαρμόζουν τη λειτουργία τους, ώστε να αποφύγουν το συμβάν ανεπάρκειας, σεβόμενοι παράλληλα τους λειτουργικούς τους περιορισμούς. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, δύναται να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε προφίλ προγραμματισμένης λειτουργίας υπόκεινται οι σταθμοί. Μέσω αυτής της μεθοδολογίας, κάθε υδροηλεκτρική μονάδα παραγωγής αντιμετωπίζεται ως αυτόνομο στοιχείο του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψιν όλους τους τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς, καθώς και τα ρεαλιστικά όρια απόκλισής της από την υιοθετημένη πολιτική λειτουργίας. Οι παράμετροι που έχουν συμπεριληφθεί στην προτεινόμενη μεθοδολογία είναι τα μέγιστα/ελάχιστα όρια ισχύος, η μέγιστη/ελάχιστη επιτρεπτή στάθμη του ταμιευτήρα, η προγραμματισμένη καμπύλη λειτουργίας, οι υδρολογικές εισροές, ο βαθμός απόδοσης, τα υποχρεωτικά νερά και οι μη προγραμματισμένες βλάβες κάθε υδροηλεκτρικής μονάδας. Η διαδικασία της ανακατανομής της λειτουργίας των ΥΗΣ λαμβάνει χώρα εντός του μοντέλου υπολογισμού της επάρκειας του συστήματος. Το υπό εξέταση ΣΗΕ αποτελείται από συμβατικές μονάδες παραγωγής, ΑΠΕ, μονάδες αποθήκευσης και υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Η ανάπτυξη του μοντέλου έγινε στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB.

Αρχικά γίνεται αναφορά στην μεθοδολογία επάρκειας του συστήματος, η οποία στηρίζεται στην τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo. Στη συνέχεια παρατίθεται ο αλγόριθμος υλοποίησης της λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών, δηλαδή το Redispatch από την προγραμματισμένη λειτουργία με σκοπό την συνεισφορά σε συμβάντα ανεπάρκειας του συστήματος, διακρίνοντας τρεις περιπτώσεις: τις υδροηλεκτρικές μονάδες χωρίς δυνατότητα άντλησης (HPP Reservoir), τις υδροηλεκτρικές μονάδες με δυνατότητα άντλησης (Open-Loop PSH) και την συν-λειτουργία των προαναφερθεισών δύο τεχνολογιών στο ίδιο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο τέλος του παρόντος Κεφαλαίου, παρατίθεται ο τρόπος υπολογισμού της ικανότητας συνεισφοράς σε ισχύ των υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής (Capacity Value) στο πλαίσιο

της προτεινόμενης μεθόδου.

4.1 Μεθοδολογία Μελέτης Επάρκειας ΣΗΕ

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της επάρκειας του συστήματος περιγράφεται συνοπτικά στην Ενότητα 2.1 και στην παρούσα Ενότητα αναλύεται όπως αυτή εφαρμόζεται ανά τμήμα του ΣΗΕ. Το μοντέλο λαμβάνει ως είσοδο τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά αξιοπιστίας των μονάδων παραγωγής, τις χρονοσειρές ζήτησης και παραγωγής των ΑΠΕ και των μονάδων αποθήκευσης και τις χρονοσειρές προγραμματισμένης λειτουργίας (παραγωγής και άντλησης) των υδροηλεκτρικών μονάδων. Ως έξοδο, το μοντέλο υπολογίζει τους δείκτες επάρκειας της Αναμενόμενης Απώλειας Φορτίου (Loss of Load Expectation - LOLE) και της Αναμενόμενης μη Εξυπηρετούμενης Ενέργειας (Expectation of Energy not Supplied), σε ετήσια βάση, μετά από ένα μεγάλο πλήθος επαναλήψεων. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος μοντελοποίησης κάθε τμήματος του ΣΗΕ.

4.1.1 Μεθοδολογία Ένταξης Συμβατικών Μονάδων Παραγωγής

Τα κύρια χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν μια συμβατική μονάδα παραγωγής, είναι η εγκατεστημένη ισχύς της και ο συντελεστής μη διαθεσιμότητάς της. Η βασική παράμετρος προσδιορισμού της αξιοπιστίας μιας μονάδας παραγωγής είναι η πιθανότητα εμφάνισης βλάβης κάποια στιγμή στο μέλλον, η οποία ορίζεται μέσω του Ρυθμού μη Προγραμματισμένων Διακοπών ή Forced Outage Ratio.

Σύμφωνα με τον Διαχειριστή του Συστήματος, μέσα στην έννοια του FOR εμπεριέχονται βλάβες ή μη προγραμματισμένες διακοπές των μονάδων, οι οποίες υπάγονται στις ακόλουθες κατηγορίες [58]:

- Τεχνική βλάβη
- Ανωμαλία συστήματος
- Προγραμματισμένη συντήρηση
- Μη διαθεσιμότητα λόγω Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού (ΗΕΠ)
- Εργασίες Σταθμού
- Αναστολή Αποδεικτικού Διαθεσιμότητας Ισχύος (ΑΔΙ)

Αξίζει να σημειωθεί πως στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, ο δείκτης FOR περιέχει μόνο τις δύο πρώτες κατηγορίες βλαβών.

Θεωρώντας ένα μοντέλο λειτουργίας δύο καταστάσεων - δηλαδή, η μονάδα έχει τις καταστάσεις on και off -, ο δείκτης μη διαθεσιμότητάς της FOR σχετίζεται με την συχνότητα βλαβών (λ) και τον ρυθμό αποκατάστασης των βλαβών (μ) ως εξής:

$$FOR = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (4.1)$$

Η συχνότητα λ και ο ρυθμός μ περιγράφονται καλύτερα από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad (4.2)$$

και

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (4.3)$$

όπου $MTTF = \text{Mean Time To Failure}$ και $MTTR = \text{Mean Time To Repair}$.

Οι παραπάνω δείκτες, εκφρασμένοι σε ώρες, αποτελούν τα δεδομένα εισόδου κάθε μονάδας του συστήματος και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των ετήσιων χρονοσειρών διαθεσιμότητάς τους. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται ο χρόνος μέχρι την επόμενη βλάβη (Time To Failure - TTF) και ο χρόνος μέχρι την αποκατάσταση αυτής (Time To Repair - TTR), οι οποίοι είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν εκθετική κατανομή με μέσες τιμές τις $MTTF$ και $MTTR$, αντίστοιχα, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

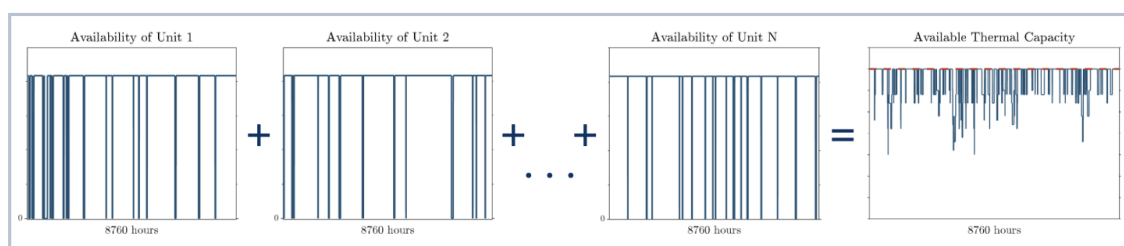
$$TTF = -MTTF * \ln U \quad (4.4)$$

και

$$TTR = -MTTR * \ln U' \quad (4.5)$$

όπου οι όροι U και U' είναι ακολουθίες τυχαία παραγόμενων αριθμών στο διάστημα $[0, 1]$.

Σύμφωνα με τις προηγούμενες σχέσεις, υπολογίζονται και προστίθενται οι χρονοσειρές διαθεσιμότητας όλων των συμβατικών μονάδων, με αποτέλεσμα την συνολική χρονοσειρά διαθεσιμότητας της θερμικής ισχύος του συστήματος, όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 4.1 [24].



Σχήμα 4.1: Χρονοσειρά Διαθεσιμότητας Θερμικής Παραγωγής ενός Δείγματος Monte Carlo

Η παραπάνω χρονοσειρά αφορά ένα έτος - δείγμα της προσομοίωσης Monte Carlo. Προκειμένου να επιτευχθεί η ελάχιστη δυνατή απώλεια πληροφορίας, οι καταστάσεις των μονάδων παραγωγής στο πρώτο δείγμα αρχικοποιούνται τυχαία και συνεχίζουν να παράγονται αδιάλειπτα καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Για παράδειγμα, εάν την τελευταία ώρα του έτους M μια μονάδα είναι off, και προβλέπεται να τεθεί σε λειτουργία σε 25 ώρες, αυτή η μονάδα θα ξεκινήσει την πρώτη ώρα του έτους $M + 1$ εκτός λειτουργίας και θα γίνει διαθέσιμη στην αρχή της δεύτερης ημέρας του χρόνου.

Οι θερμικές μονάδες παραγωγής στο υπό εξέταση σύστημα είναι μονάδες φυσικού αερίου και αναφέρονται λεπτομερώς, μαζί με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά και τους δείκτες διαθεσιμότητάς τους στο Παράρτημα Α'.

4.1.2 Μεθοδολογία Υπολογισμού Υπολειπόμενου Φορτίου

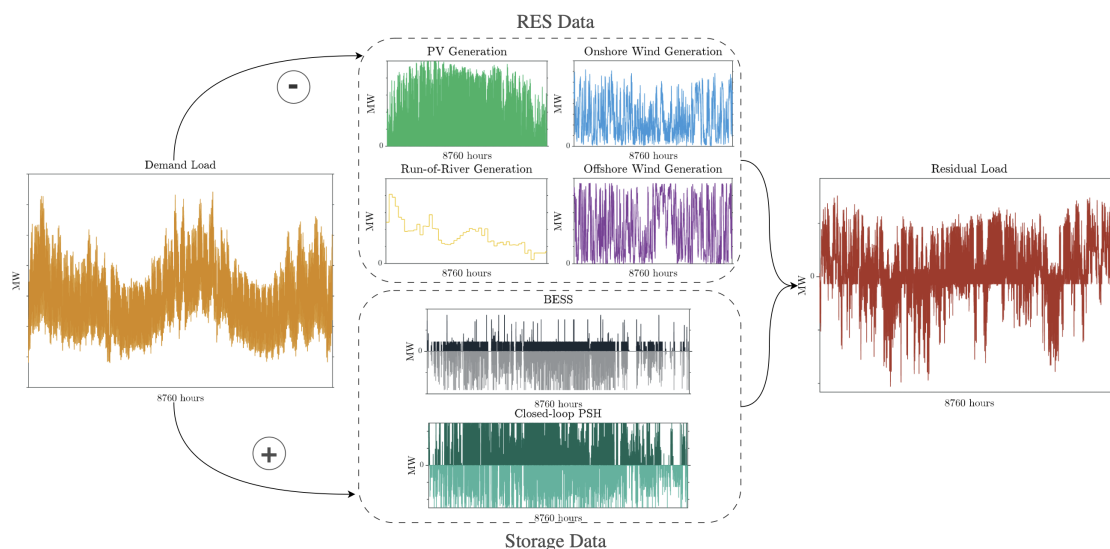
Στη Μελέτη Επάρκειας που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία, οι ετήσιες χρονοσειρές του φορτίου, των ΑΠΕ και των μονάδων αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων και των ΥΗΣ, έχουν προκύψει από ένα μοντέλο οικονομικής βελτιστοποίησης, η κεντρική ιδέα του οποίου περιγράφεται στο Παράρτημα Α'.

Στις ΑΠΕ εντάσσονται τα αιολικά πάρκα (onshore και offshore), τα φωτοβολταϊκά πάρκα και οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί εκτρεπόμενης ροής (run-of-river hydro power plants). Η αξιολόγηση της συνεισφοράς τους στην εξασφάλιση της επάρκειας του συστήματος εξασφαλίζεται μέσω της αφαίρεσης της παραγωγής τους από το φορτίο του ΣΗΕ. Η στοχαστικότητα της παραγωγής των ΑΠΕ, εξαιτίας της εξάρτησής της από απρόβλεπτους μετεωρολογικούς παράγοντες, αντιμετωπίζεται με τη διεξαγωγή διαφορετικών σεναρίων, συνήθως αναφερόμενα και ως κλιματικά έτη. Κάθε σενάριο αντιστοιχεί σε μια ετήσια χρονοσειρά παραγωγής, ωριαίας απόκρισης, για κάθε τεχνολογία ΑΠΕ, η οποία αφαιρείται από την αντίστοιχη χρονοσειρά της ζήτησης.

Όσον αφορά τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, δηλαδή τα συστήματα μπαταριών (Battery Energy Storage Systems - BESS) και τους αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς (Closed-loop Pumped Storage Hydro), η ωριαία λειτουργία τους είναι απόρροια του μοντέλου οικονομικής βελτιστοποίησης, διαφορετική για κάθε υπό εξέταση σενάριο παραγωγής και ζήτησης. Η αρχή λειτουργίας τους έγκειται στο να φορτίζουν ή να γεμίζουν τον ταμιευτήρα τους τις ώρες που η ζήτηση του συστήματος είναι χαμηλή - και κατ' επέκταση η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας μειωμένη - και να εκφορτίζουν στις αιχμές του φορτίου. Η φόρτιση και εκφόρτιση των μονάδων αυτών (αντίστοιχα, παραγωγή και άντληση) επίσης προσθαφαιρείται στη χρονοσειρά της ζήτησης. Ως εκ τούτου, η ενσωμάτωση της λειτουργίας των ΑΠΕ και των μονάδων αποθήκευσης στη ζήτηση του ΣΗΕ, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του υπολειπόμενου φορτίου. Με αυτόν τον τρόπο, ο έλεγχος ανεπάρκειας που υλοποιείται κάθε ώρα στη διάρκεια του έτους, μέσα στο Monte Carlo Simulation - MCS συγκρίνει την χρονοσειρά της διαθέσιμης παραγωγής με τη χρονοσειρά του υπολειπόμενου φορτίου [26].

Το Σχήμα 4.2 [24] παρουσιάζει τη σύνθεση των διαφορετικών χρονοσειρών για την δημιουργία του υπολειπόμενου φορτίου, για ένα τυχαίο κλιματικό έτος, θεωρώντας διείσδυση ΑΠΕ στο 80%.

Το προαναφερθέν, υψηλό ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ δεν ανταποκρίνεται στα σημερινά δεδομένα, αλλά αφορά την ελληνική πραγματικότητα του 2030, σύμφωνα με τους στόχους που έχουν τεθεί στο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα [59]. Ο στόχος αυτός οδηγεί ορισμένες ώρες σε αρνητικές τιμές του υπολειπόμενου φορτίου, δηλαδή ενέργεια αποκλειστικά παραγόμενη από ΑΠΕ (πριν την προσθήκη των συμβατικών μονάδων παραγωγής), η οποία υπερτερεί της ζήτησης. Στο πλαίσιο της παρούσας υλοποίησης διατηρούνται αυτές οι αρνητικές τιμές ως περιθώριο άντλησης των υδροηλεκτρικών μονάδων που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, ωστόσο στην πραγματικότητα μεταφράζονται είτε ως ποσά εξαγόμενης ενέργειας μέσω των διασυνδέσεων με γειτονικές χώρες είτε ως επιβαλλόμενες περικοπές της ανανεώσιμης παραγωγής, λόγω της ανάγκης τήρησης, κάθε χρονική στιγμή, του ενεργειακού ισοζυγίου παραγωγής - ζήτησης.



Σχήμα 4.2: Διαδικασία Σύνθεσης Υπολειπόμενου Φορτίου

4.1.3 Μεθοδολογία Ένταξης Υδροηλεκτρικών Σταθμών

Στην Ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο τρόπος ένταξης των ΥΗΣ στη μελέτη επάρκειας, σύμφωνα με την προγραμματισμένη λειτουργία τους. Σε επόμενη Ενότητα εξηγείται η προτεινόμενη μεθοδολογία ανακατανομής της προγραμματισμένης λειτουργίας, με στόχο τη συμβολή στην επάρκεια ισχύος.

Με τον όρο "προγραμματισμένη λειτουργία" εννοείται η λειτουργία των ΥΗΣ σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου οικονομικής βελτιστοποίησης, το οποίο έχει καθορίσει και τη συμπεριφορά των λοιπών μονάδων παραγωγής, όπως εξηγήθηκε στις προηγούμενες ενότητες. Πέραν της χρονοσειράς λειτουργίας των υδροηλεκτρικών μονάδων, δίνεται επιπλέον ως δεδομένο αναφοράς και η καμπύλη λειτουργίας τους, δηλαδή η στάθμη του ταμιευτήρα τους κάθε χρονική στιγμή μέσα στη διάρκεια του έτους.

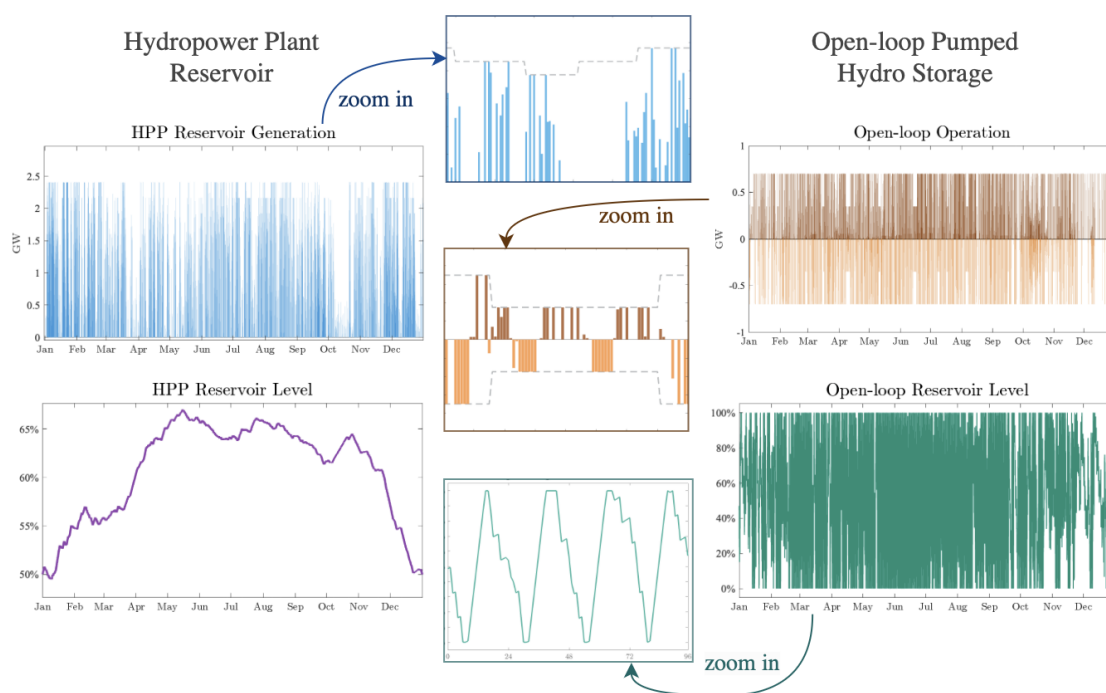
Οι υδροηλεκτρικές μονάδες που εξετάζονται στην εργασία, όπως αναφέρεται και στην αρχή του Κεφαλαίου, κατατάσσονται στις ακόλουθες δύο κατηγορίες: ΥΗΣ χωρίς δυνατότητα άντλησης (HPP Reservoir) και ΥΗΣ με δυνατότητα άντλησης (Open-loop PSH). Και οι δύο τεχνολογίες γεμίζουν τους ταμιευτήρες τους με φυσικές εισροές, απλώς η δεύτερη διαθέτει επιπλέον την ικανότητα να αντλεί, τις ώρες που το φορτίο είναι χαμηλό, για να αυξήσει περαιτέρω τις εισροές της. Όπως είναι αναμενόμενο, οι ΥΗΣ χωρίς άντληση ακολουθούν κατά κανόνα ετήσιο κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης, καθώς η λειτουργία τους βασίζεται αποκλειστικά στις φυσικές εισροές νερού, που ακολουθούν τη διαδοχή των εποχών μέσα στον χρόνο, ενώ οι ΥΗΣ με άντληση, ανάλογα με τη χωρητικότητα του ταμιευτήρα τους ενδέχεται να έχουν από ημερήσιους κύκλους, μέχρι και κύκλους κάποιων εβδομάδων.

Στο πλαίσιο της παρούσας μοντελοποίησης, δεν γίνεται διάκριση στις επιμέρους υδροηλεκτρικές μονάδες κάθε τεχνολογίας, αλλά θεωρείται ένας κοινός ταμιευτήρας για τα HPP Reservoir και ένας για τα Open-loop PSH.

Προτού υλοποιηθεί η στρατηγική συμβολής των ΥΗΣ στην επάρκεια, εκείνοι μοντελοποιούνται βάσει της προγραμματισμένης λειτουργίας τους, η οποία είναι απολύτως σύμφωνη με την καμπύλη λειτουργίας τους. Η παραγωγή τους προστίθεται στη θερμική παραγωγή των

μονάδων φυσικού αερίου και μαζί αποτελούν τη συνολική παραγωγή του συστήματος, ενώ η άντληση συνυπολογίζεται στο υπολειπόμενο φορτίο. Για λόγους ακριβέστερης προσομοίωσης, υπολογίζονται και για τους ΥΗΣ μη προγραμματισμένες βλάβες, με την ίδια διαδικασία που ακολουθείται στις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Σε αυτή την περίπτωση, επειδή λαμβάνεται υπόψιν πλήθος μονάδων που αποτελούν τον θεωρούμενο κοινό ταμειευτήρα και τη συνολική αποδιδόμενη ισχύ, το μοντέλο των δύο καταστάσεων - on και off - έχει αντικατασταθεί από την ποσοστιαία διαθεσιμότητα, κάθε χρονική στιγμή. Με άλλα λόγια, η χρονοσειρά διαθεσιμότητας κάθε είδους ΥΗΣ δίνει το ποσοστό επί τοις 100 της εγκατεστημένης ισχύος που είναι διαθέσιμο κάθε ώρα του έτους.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι χρονοσειρές λειτουργίας και οι καμπύλες αναφοράς, τα οποία λαμβάνονται ως είσοδος στη Μελέτη Επάρκειας. Όπως φαίνεται στις εστιασμένες εικόνες, η ωριαία παραγωγή και άντληση κάθε τεχνολογίας ΥΗΣ περιορίζεται από τη διαθέσιμη ισχύ κάθε δεδομένη στιγμή. Ακόμη, αναδεικνύεται η διαφορά που επισημάνθηκε προηγουμένως σχετικά με τους διαφορετικούς κύκλους φόρτισης των ΥΗΣ, η οποία έγκειται στη διαφορετική χωρητικότητα των δύο υπό εξέταση υδροηλεκτρικών μονάδων.

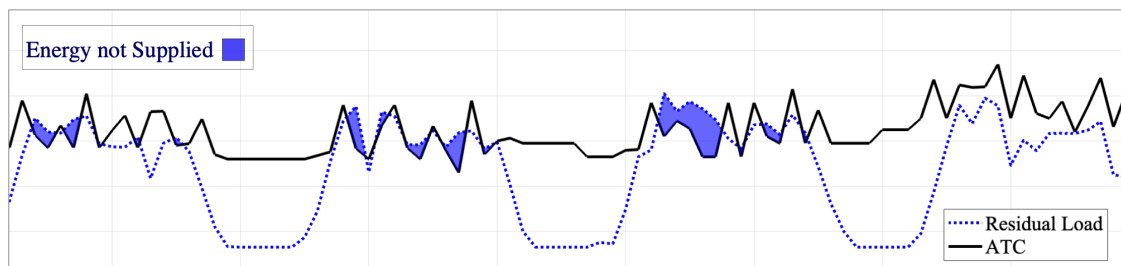


Σχήμα 4.3: Διαγράμματα Λειτουργίας ΥΗΣ

4.1.4 Υπολογισμός των Δεικτών Επάρκειας

Εφόσον μοντελοποιήθηκαν όλα τα στοιχεία του συστήματος, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των δεικτών επάρκειας. Προκειμένου να οριστούν και στην πορεία να υπολογιστούν, απαιτείται η υπέρθεση της χρονοσειράς του υπολειπόμενου φορτίου στην χρονοσειρά της συνολικής συμβατικής παραγωγής.

Για να θεωρηθεί ένας σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας απολύτως επαρκές, θα πρέπει για κάθε χρονική στιγμή - εν προκειμένω, κάθε ώρα - όλων των επαναλήψεων του MCS, η δια-



Σχήμα 4.4: Σύγκριση Χρονοσειρών Παραγωγής και Ζήτησης

θέσιμη παραγωγή να είναι ίση ή μεγαλύτερη από τη ζήτηση. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν οι απαιτήσεις του φορτίου ξεπερνούν την παραγωγή, πρόκειται για συμβάν ανεπάρκειας. Στην πραγματικότητα αυτό μεταφράζεται ως αδυναμία κάλυψης μέρους της ζήτησης για κάθε ώρα που υφίσταται αυτή η διαφορά και συνεπώς περικοπές του υπολειπόμενου φορτίου.

Παρότι οι έννοιες του Αναμενόμενου μη Εξυπηρετούμενου Φορτίου (LOLE) και της Αναμενόμενης Μη Εξυπηρετούμενης Ενέργειας (EENS) έχουν εξηγηθεί στο προηγούμενο Κεφάλαιο, εδώ εισάγεται ο τρόπος υπολογισμού τους μέσα στο μοντέλο προσομοίωσης. Σε κάθε έτος - δείγμα i του MC υπολογίζεται το πλήθος των στιγμών όπου η ζήτηση (Residual Load - ResLoad) υπερτερεί της παραγωγής (Available Thermal Capacity - ATC) ως Loss of Load Duration - LLD, εκφρασμένο σε ώρες ανά έτος σύμφωνα με τον τύπο:

$$LLD_i = \sum_{h=1}^{8760} (ATC_{i,h} < ResLoad_{i,h}) \quad (4.6)$$

Αντίστοιχα, υπολογίζεται το μη εξυπηρετούμενο ποσό ενέργειας (Energy Not Supplied - ENS), εκφρασμένο σε MWh ανά έτος:

$$ENS_i = \sum_{h=1}^{8760} (\max(0, ResLoad_{i,h} - ATC_{i,h})) \quad (4.7)$$

Πρέπει να καταστεί σαφές πως η μία ώρα LLD δεν συνεπάγεται μη εξυπηρετούμενη ενέργεια για ολόκληρη την ώρα, απλώς δεδομένου του ωριαίου βήματος της προσομοίωσης, ο δείκτης LLD υποδηλώνει την πιθανότητα μη κάλυψης ολόκληρης της ζήτησης τη δεδομένη ώρα [60]. Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτουν οι δείκτες επάρκειας, LOLE και EENS ως μέσες τιμές των LLD και ENS, αντίστοιχα:

$$LOLE_{N_{MCS}} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{MCS}} LLD_n}{N_{MCS}} \quad (4.8)$$

$$EENS_{N_{MCS}} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{MCS}} ENS_n}{N_{MCS}} \quad (4.9)$$

Οι δείκτες αυτοί υπολογίζονται στο τέλος των επαναλήψεων N_{MCS} της προσομοίωσης και αποτελούν το κύριο κριτήριο αξιοπιστίας της Μελέτης Επάρκειας. Αξίζει να σημειωθεί πως μια αναμενόμενη τιμή, όπως οι δείκτες επάρκειας, δεν αποτελεί νομοτελειακή παράμετρο του υπό εξέταση συστήματος, αλλά μια ένδειξη για την συμπεριφορά του συστήματος,

βασιζόμενη σε ένα μεγάλο πλήθος ανεξάρτητων επαναλήψεων. Οι αναμενόμενες τιμές παρέχουν έγκυρους δείκτες επάρκειας που αντικατοπτρίζουν διάφορους παράγοντες, όπως η διαθεσιμότητα και η χωρητικότητα των στοιχείων του συστήματος, τα χαρακτηριστικά και η αβεβαιότητα του φορτίου, οι διαμορφώσεις και οι συνθήκες λειτουργίας του συστήματος κλπ. [12].

Για να τερματίσει το μοντέλο προσομοίωσης - MCS, όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2.1.2 απαιτείται ένας ικανοποιητικός αριθμός δειγμάτων, με σκοπό να εξασφαλιστεί η ορθότητα και η ακρίβεια του αποτελέσματος. Σύνηθες κριτήριο τερματισμού συνιστά ένας αντικειμενικά μεγάλος αριθμός δειγμάτων, π.χ. 1.000-10.000 χρόνια. Εναλλακτικά, μπορεί να ληφθεί υπόψιν ο ρυθμός σύγκλισης των δεικτών επάρκειας, όσο αυξάνονται οι επαναλήψεις, στην τελική τους τιμή, και να οριστεί μία τιμή ρυθμού σύγκλισης ως συνθήκη τερματισμού. Μεταξύ των δύο δεικτών που υπολογίζονται, έχει παρατηρηθεί πως η ταχύτητα σύγκλισης του EENS είναι μικρότερη εκείνης του LOLE, οπότε και προτιμάται. Στην παρούσα εργασία έχει επιλεγεί ως κριτήριο τερματισμού ένας συνδυασμός του αριθμού των επαναλήψεων και της τιμής του συντελεστή διακύμανσης στο 1% του δείκτη EENS. Αυτό μεταφράζεται ως υλοποίηση μεγάλου πλήθους δειγμάτων (10.000), ώστε να εξασφαλιστεί η επίτευξη του 1% του συντελεστή διακύμανσης του EENS. Η διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή διακύμανσης εντός της προσομοίωσης Monte Carlo φαίνεται στη συνέχεια :

$$a = \frac{\sigma}{EENS_{N_{MCS}}} \quad (4.10)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N_{MCS} * (N_{MCS} - 1)} * \sum_{n=1}^{N_{MCS}} (ENS_n - EENS_{N_{MCS}})^2 \quad (4.11)$$

4.2 Μεθοδολογία Μοντελοποίησης Υδροηλεκτρικών Σταθμών

Στη συγκεκριμένη Ενότητα περιγράφεται η προτεινόμενη μεθοδολογία μοντελοποίησης των υδροηλεκτρικών μονάδων, με γνώμονα την εξασφάλιση επάρκειας ισχύος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεθοδολογία αυτή στηρίζεται στην προγραμματισμένη λειτουργία τους, που έχει προκύψει από το μοντέλο οικονομικής βελτιστοποίησης, και διαφοροποιείται από αυτή στις περιπτώσεις που το σύστημα αδυνατεί να καλύψει τη ζήτησή του, σεβόμενη τους λειτουργικούς περιορισμούς των ΥΗΣ. Για το λόγο αυτό αναφέρεται και ως Redispatch, δηλαδή απόκλιση από τον προγραμματισμό, και δύναται να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε στρατηγική λειτουργίας έχει υιοθετηθεί.

Εξηγείται, αρχικά, εν συντομία, η κεντρική ιδέα του αλγορίθμου, και στη συνέχεια ακολουθεί εκτενής περιγραφή για το πως αυτός εφαρμόζεται στις δύο διαφορετικές τεχνολογίες των ΥΗΣ. Στο τέλος εισάγεται ο τρόπος μοντελοποίησης τους σε ένα κοινό ΣΗΕ, όπου δηλαδή τα δύο είδη ΥΗΣ συν-λειτουργούν και συμβάλλουν από κοινού όποτε παρουσιαστεί γεγονός ανεπάρκειας.

Ξεκινώντας την υλοποίηση του μοντέλου, εισάγονται οι χρονοσειρές λειτουργίας για κάθε στοιχείο του συστήματος, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη Ενότητα. Η παραγωγή ταυτίζεται με τη χρονοσειρά της διαθέσιμης θερμικής ισχύος ATC, ενώ η χρονοσειρά της ζήτησης με αυτή του υπολειπόμενου φορτίου - ακόμη δεν έχουν ενταχθεί οι υπό εξέταση ΥΗΣ.

Η λειτουργία των ΥΗΣ στηρίζεται στην προγραμματισμένη στάθμη φόρτισης τους ή επίπεδο πλήρωσης του ταμιευτήρα τους, το οποίο από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως επίπεδο φόρτισης. Κάθε ώρα του έτους - δείγματος MC, ελέγχεται εάν ο ΥΗΣ βρίσκεται σε συμφωνία με το επίπεδο φόρτισης. Στην περίπτωση αυτή, λειτουργεί όπως θα λειτουργούσε βάσει του προγραμματισμού του (παράγει, αντλεί ή βρίσκεται σε ηρεμία) και η παραγόμενη ή αντλούμενη ισχύς προστίθεται στην ATC ή στο υπολειπόμενο φορτίο, αντίστοιχα. Πλέον, έχοντας εντάξει και τους ΥΗΣ στο σύστημα, ακολουθεί ο έλεγχος της επάρκειας του ΣΗΕ. Σε περίπτωση που η συνολική παραγωγή (Available Conventional Capacity - ACC) υπερέρχει της υπολειπόμενης ζήτησης, δεν απαιτείται κάποια ενέργεια από τους ΥΗΣ και ο αλγόριθμος προχωρά στον υπολογισμό των δεικτών επάρκειας - τις ώρες αυτές η προγραμματισμένη λειτουργία ταυτίζεται με τη λειτουργία του ΣΗΕ σε πραγματικό χρόνο.

Σε αντίθετη περίπτωση, εξετάζεται η κατάσταση λειτουργίας των ΥΗΣ και οι λειτουργικοί τους περιορισμοί τη δεδομένη ώρα. Εφόσον είναι σε θέση, συμβάλλουν στην ανεπάρκεια είτε περιορίζοντας την άντληση, είτε αυξάνοντας την παραγωγή τους - αναλόγως το είδος και της κατάστασής τους. Η επιπλέον ισχύς που δόθηκε στην συνολική παραγωγή ή αυτή που μείωσε το υπολειπόμενο φορτίο, συνυπολογίζονται στη συνολική παραγωγή και ζήτηση και τροποποιούνται ανάλογα οι χρονοσειρές τους. Αυτή η συνθήκη αποτελεί το Redispatch και επιφέρει διαφορετική εικόνα του συστήματος από εκείνη του προγραμματισμού.

Μετά την ανακατανομή της λειτουργίας των ΥΗΣ για λόγους επάρκειας επιδιώκεται η αποκατάσταση του επιπέδου φόρτισής τους βάσει του αρχικού προγραμματισμού τους. Συγκεκριμένα, η προσπάθεια επαναφοράς της στάθμης του ταμιευτήρα στα επίπεδα που ορίζει η προγραμματισμένη λειτουργία ξεκινά τις αμέσως επόμενες ώρες μετά από την ανακατανομή

και εφόσον δεν διακινδυνεύεται η επάρκεια ισχύος του ΣΗΕ. Η αποκατάσταση αυτή μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω μείωσης της παραγωγής των ΥΗΣ ή μέσω αύξησης της άντλησης, προκειμένου να επανέλθει η στάθμη του ταμιευτήρα τους σε αυτή της καμπύλης λειτουργίας. Σημειώνεται ότι η φάση επαναφοράς της στάθμης του ταμιευτήρα στο προγραμματισμένο επίπεδο της είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εξασφάλιση της ελάχιστης απόκλισης από την προγραμματισμένη λειτουργία, η οποία προσδιορίζει τη βέλτιστη λειτουργία των ΥΗΣ από την σκοπιά της οικονομικότητας του συστήματος, ενώ παράλληλα εγγυάται την υποχρεωτική απόδοση όγκου νερών.

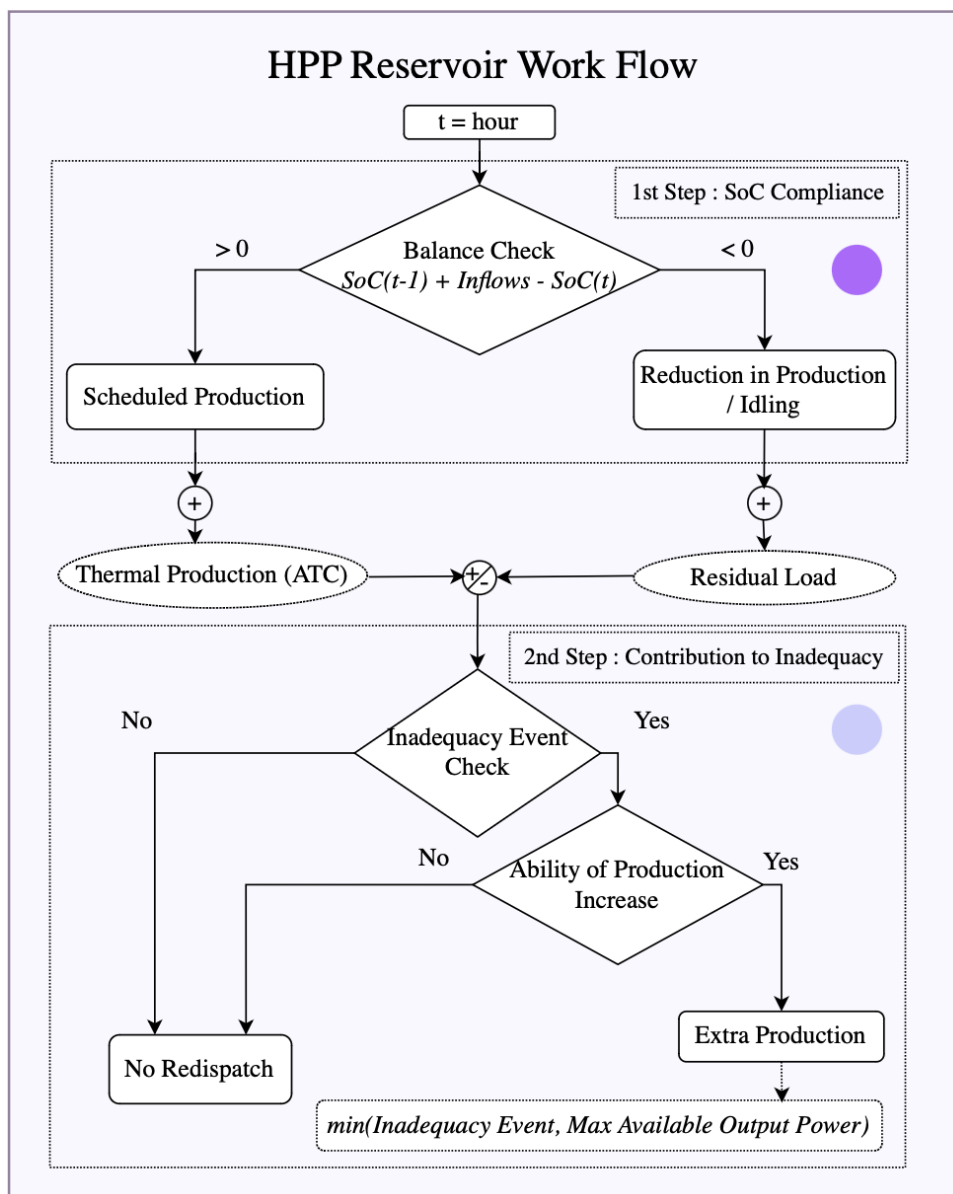
4.2.1 Μοντελοποίηση ΥΗΣ χωρίς Δυνατότητα Άντλησης

Εδώ θα δοθεί έμφαση στον αλγόριθμο υλοποίησης των κλασσικών υδροηλεκτρικών μονάδων, των οποίων οι ταμιευτήρες γεμίζουν μόνο με φυσικές εισροές, ως το μόνο στοιχείο του συστήματος που λειτουργεί υπό την αρχή της ανακατανομής της λειτουργίας του σε πραγματικό χρόνο.

Το πρώτο βήμα του αλγορίθμου, το οποίο αναφέρεται στο ακόλουθο διάγραμμα λειτουργίας ως SoC (State of Charge) Compliance, δηλαδή συμφωνία με τον προγραμματισμό, έχει ως στόχο την τήρηση της καμπύλης λειτουργίας. Στη φάση αυτή ο ΥΗΣ είτε συμβαδίζει πλήρως με την προγραμματισμένη λειτουργία του είτε βρίσκεται σε φάση αποκατάστασης (η οποία έπεται προηγούμενης συμβολής ισχύος σε συμβάν ανεπάρκειας) και μειώνει την ισχύ εξόδου του - έως και τον μηδενισμό της - για να φτάσει την επιθυμητή στάθμη του ταμιευτήρα.

Στην πορεία, όση ισχύ προσέφερε στο πρώτο στάδιο της υλοποίησης, την προσθέτει στην διαθέσιμη συμβατική ισχύ και γίνεται η σύγκριση της συνολικής παραγωγής με τη ζήτηση. Εάν παρουσιαστεί ζήτηση μεγαλύτερη της παραγωγής, ελέγχεται η ικανότητα του ΥΗΣ να συμβάλει, αυξάνοντας την ωριαία ισχύ του, και εφόσον μπορεί, εγγχεί επιπλέον ισχύ στο σύστημα. Κάθε ώρα, η παραγωγή του ΥΗΣ φράσσεται από τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ. Η τελική ισχύς που προκύπτει από τα βήματα 1 & 2 είναι εκείνη που λαμβάνεται υπόψιν στη χρονοσειρά λειτουργίας του ΥΗΣ με τη μέθοδο του Redispatch.

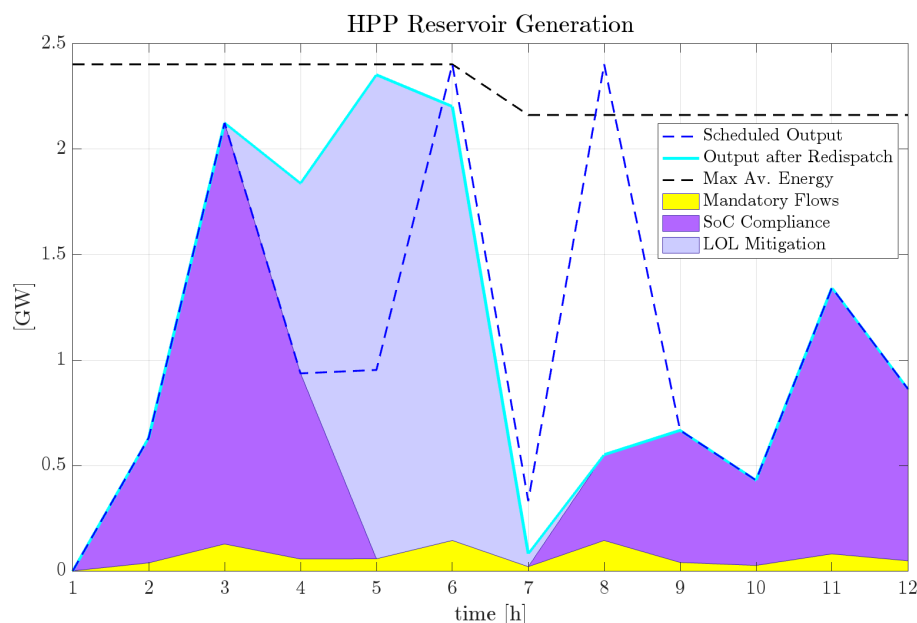
Αξίζει να προστεθεί πως, λόγω της φύσης των κλασσικών υδροηλεκτρικών μονάδων, όταν το επίπεδο φόρτισής τους real-time είναι χαμηλότερο του επιθυμητού, αναμένουν την πλήρωση του ταμιευτήρα τους μέσω των ωριαίων φυσικών εισροών και αποφεύγουν την παραγωγή ενέργειας. Εξαιρέση αποτελούν τα υποχρεωτικά νερά, μια ποσότητα της προγραμματισμένης ισχύος παραγωγής (όχι απαραίτητα κάθε ώρα), τα οποία εξυπηρετούν σκοπούς επιπλέον της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, μεταξύ άλλων άρδευσης, ύδρευσης, και δίνονται στο δίκτυο αναγκαστικά, ανεξαρτήτως επιπέδου ταμιευτήρα.



Σχήμα 4.5: Αλγόριθμος HPP Reservoir Redispatch

Ακολουθεί ένα διάγραμμα, το οποίο εξηγεί σχηματικά τα δύο στάδια του αλγορίθμου και την τελική real-time λειτουργία του ΥΗΣ συγκρινόμενη με την προγραμματισμένη.

Φαίνεται πως μέχρι την 3η ώρα, η real-time παραγωγή είναι ίση με την προγραμματισμένη. Τις ώρες 4-7 παρουσιάζεται ανεπάρκεια στο σύστημα, η οποία αναγκάζει τον ΥΗΣ να προσφέρει επιπλέον ισχύ στο σύστημα, αυξάνοντας την real-time παραγωγή του. Μόλις παρέλθει το συμβάν της ανεπάρκειας, η ισχύς εξόδου σε πραγματικό χρόνο μειώνεται συγκριτικά με του προγραμματισμού, προκειμένου να φτάσει ο ταμιευτήρας την επιθυμητή του στάθμη - φάση αποκατάστασης:



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα Υλοποίησης HPP Reservoir Redispatch

4.2.2 Μοντελοποίηση ΥΗΣ με Δυνατότητα Άντλησης

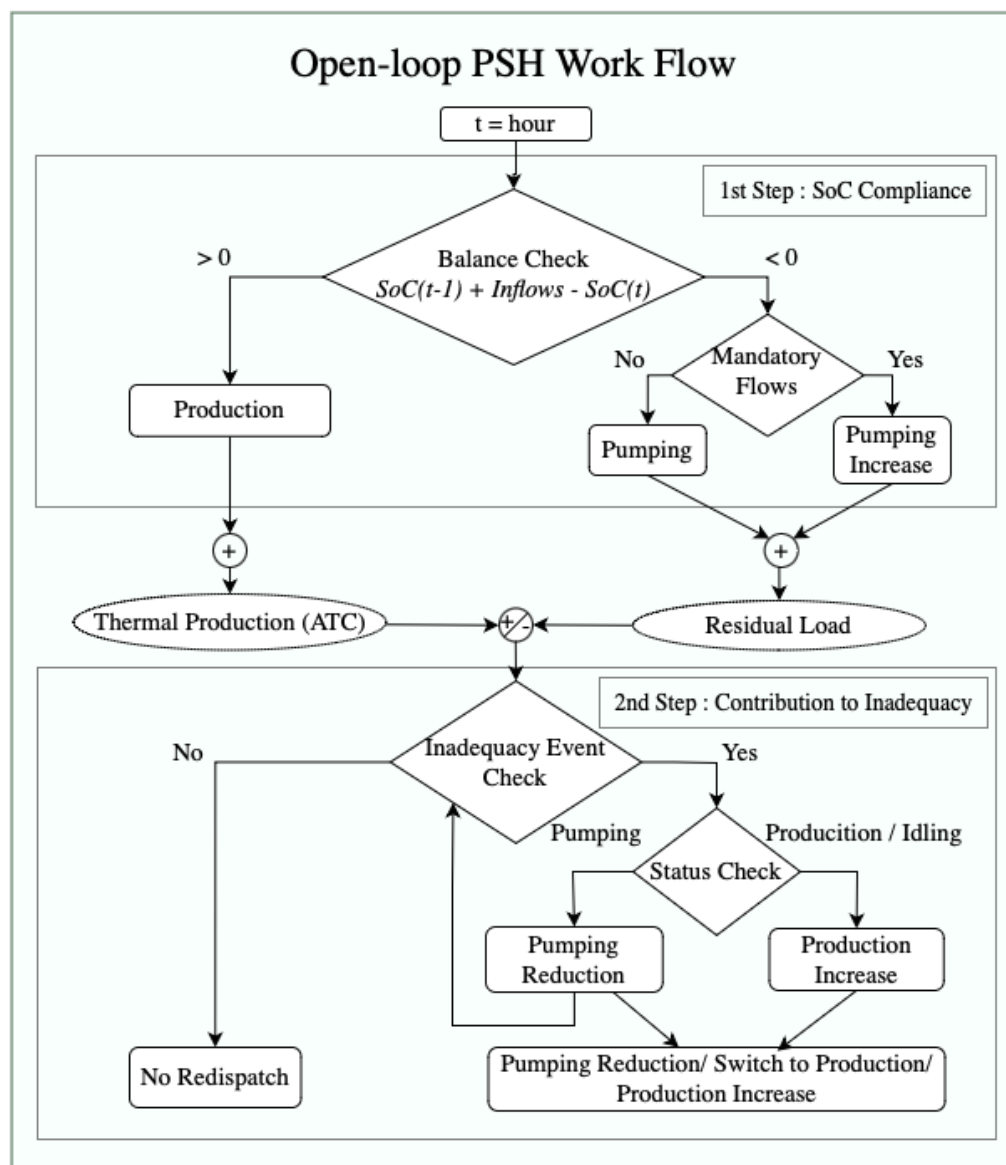
Όσον αφορά τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς με δυνατότητα άντλησης, ο αλγόριθμος του Redispatch διαφοροποιείται ελαφρώς και στα δύο στάδια. Ακολουθεί μια επεξήγηση του διαγράμματος ροής, εστιασμένη στις διαφορές με τους κλασσικούς ΥΗΣ της προηγούμενης Ενότητας.

Στο πρώτο βήμα πραγματοποιείται ο ίδιος έλεγχος με πριν, με τη διαφορά πως σε περίπτωση που οι φυσικές εισροές προστιθέμενες στο προηγούμενο επίπεδο φόρτισης είναι χαμηλότερες του επιθυμητού, ο ΥΗΣ θα αντλήσει ενέργεια από το δίκτυο, προκειμένου να αυξήσει το περιεχόμενό του. Στο σημείο αυτό υπεισέρχεται ένας ακόμη έλεγχος υποχρεωτικών νερών, τα οποία σε περίπτωση που υπάρχουν στη χρονοσειρά του προγραμματισμού, δίνονται στο δίκτυο και αυξάνεται επιπλέον η αντλούμενη ενέργεια. Αυτό το ποσό ενέργειας που αντλήθηκε, αυξάνει το υπολειπόμενο φορτίο, συνεπώς προστίθεται στη χρονοσειρά αυτού. Η συνολική παραγωγή, όπως και πριν, ισούται με το άθροισμα της ATC και της παραγωγής του ΥΗΣ.

Στο επόμενο στάδιο λαμβάνει χώρα ο έλεγχος ανεπάρκειας. Ανάλογα με την κατάσταση που βρίσκεται ο ΥΗΣ - δηλαδή αν στο 1ο στάδιο του αλγορίθμου παρήγαγε ή αντλούσε - ακολουθεί τις παρακάτω ενέργειες για να αντιμετωπίσει την ανεπάρκεια:

- Άντληση \Rightarrow Μείωση άντλησης και επανεξέταση ανεπάρκειας,
- Ηρεμία ή Παραγωγή \Rightarrow Αύξηση παραγωγής μέχρι τη μέγιστη διαθέσιμη ωριαία ισχύ,

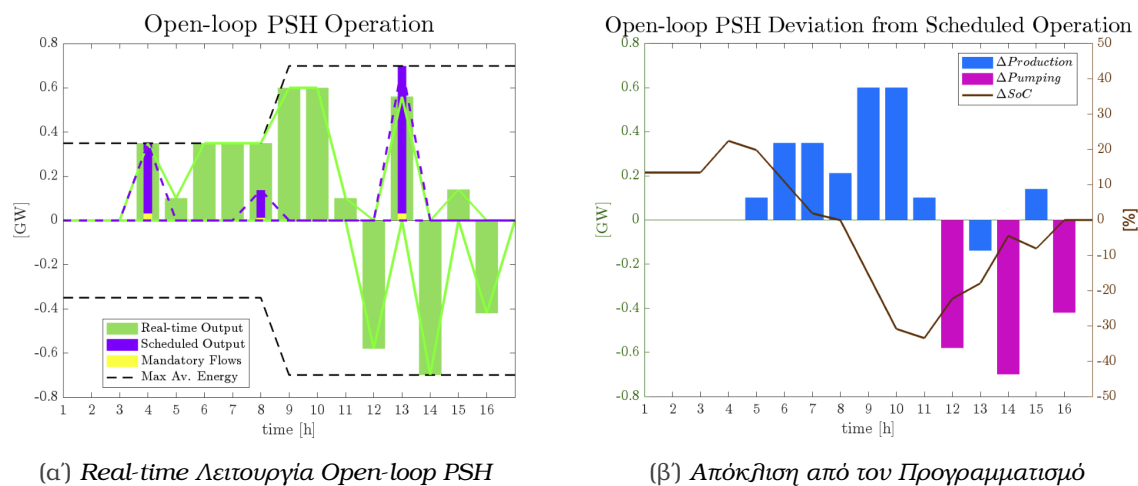
Σε κάθε περίπτωση, κάθε ώρα, ο ΥΗΣ μπορεί να παράγει ή να αντλεί ισχύ ίση με τη μέγιστη διαθέσιμη.



Σχήμα 4.7: Αλγόριθμος Open-loop PSH Redispatch

Στο Σχήμα 4.8 παρατίθεται ένα παράδειγμα Redispatch των Open-loop PSH, για να γίνει πιο κατανοητός ο παραπάνω αλγόριθμος.

Μέχρι την 5η ώρα, ο ΥΗΣ λειτουργεί βάσει προγραμματισμού, με τη διαφορά πως έχει περιορισμό έγχυσης ισχύος στο 50%. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αποθηκεύονται οι επιπλέον εισροές στον ταμιευτήρα, συνεπώς να αυξάνει η στάθμη του σε σχέση με τον προγραμματισμό (ΔSoC στο δεξί διάγραμμα). Από την 5η έως την 11η ώρα παράγεται επιπλέον ενέργεια (στη 2η φάση του αλγορίθμου) με στόχο την αντιμετώπιση κάποιας ανεπάρκειας στο σύστημα. Ο ΥΗΣ δίνει είτε όσο είναι το ποσό της ανεπάρκειας κάθε ώρα, είτε όση είναι η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς του. Μετά την 13η ώρα δεν παρουσιάζεται κίνδυνος ανεπάρκειας, και ο ΥΗΣ μειώνει την παραγωγή του συγκριτικά με την προγραμματισμένη ή περνά σε κατάσταση άντλησης αποκλίνοντας από τον προγραμματισμό, προκειμένου να επανέλθει η επιθυμητή στάθμη φόρτισης, γεγονός που επιτυγχάνεται την 16η ώρα της ημέρας.



Σχήμα 4.8: Παράδειγμα Υλοποίησης Open-loop PSH Redispatch

Στην παρούσα και την προηγούμενη υποενότητα εξετάζεται κάθε τεχνολογία υδροηλεκτρικής παραγωγής ενέργειας ως το μοναδικό στοιχείο του συστήματος που αναδιαμορφώνει σε πραγματικό χρόνο τη λειτουργία του με στόχο την επίτευξη επάρκειας στο σύστημα. Το άλλο είδος ΥΗΣ λαμβάνεται υπόψιν βάσει της ετήσιας χρονοσειράς λειτουργίας του, αφαιρώντας την από το υπολειπόμενο φορτίο. Με άλλα λόγια, πρόκειται για ισοδύναμα συστήματα, όπου διαφοροποιείται σε κάθε μοντελοποίηση η υπό εξέταση μονάδα και οι λειτουργικοί περιορισμοί της. Στη συνέχεια θα εξετασθεί πως οι δύο αυτές τεχνολογίες μαζί επιτελούν παράλληλα Redispatch από τον προγραμματισμό τους και συμβάλλουν από κοινού στην αντιμετώπιση των συμβάντων ανεπάρκειας.

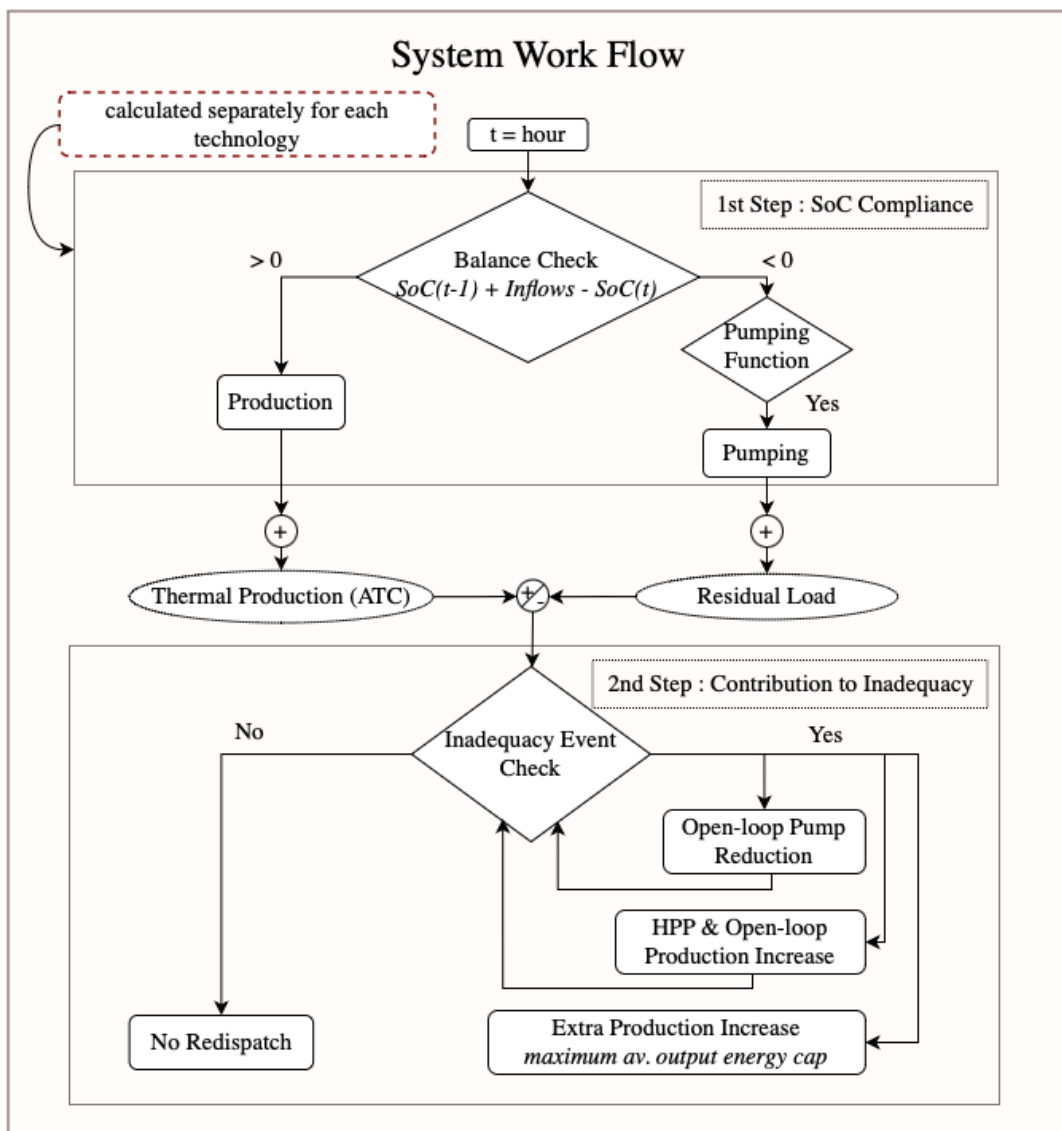
4.2.3 Μοντελοποίηση Κοινής Συμβολής στην Επάρκεια Ισχύος

Το πλήρες μοντέλο αξιολόγησης της συνεισφοράς των ΥΗΣ στην επάρκεια του συστήματος περιλαμβάνει το Redispatch και των δύο τεχνολογιών και εισάγει το ζήτημα της από κοινού συμβολής τους όταν παρουσιάζονται γεγονότα ανεπάρκειας.

Στο κοινό αυτό μοντέλο προσομοίωσης Monte Carlo το κάθε είδος ΥΗΣ υλοποιεί το πρώτο στάδιο του αλγορίθμου, δηλαδή την συμμόρφωση με τον προγραμματισμό, ξεχωριστά. Η λειτουργία που προκύπτει κάθε ώρα συνυπολογίζεται στις χρονοσειρές παραγωγής και ζήτησης, όπως αποτυπώθηκε αναλυτικότερα στα προηγούμενα διαγράμματα ροής. Κάθε ώρα γίνεται ο έλεγχος επάρκειας του συστήματος και ακολουθείται μια σειρά βημάτων, σε περίπτωση που διαπιστωθεί ανεπάρκεια:

1. Μείωση - Μηδενισμός Άντλησης \Rightarrow Αποτελεί την πρώτη ενέργεια αντιμετώπισης της ανεπάρκειας και αφορά τις μονάδες με ικανότητα άντλησης. Σε περίπτωση που η ανεπάρκεια εμφανίζεται σε ώρα που αντλούν, μειώνεται ή σταματάει η άντληση (ανάλογα με το ύψος της) με σκοπό να περιοριστεί το υπολειπόμενο φορτίο. Σε περίπτωση μηδενισμού της αντλούμενης ενέργειας, ελέγχεται εκ νέου η διαφορά παραγωγής - ζήτησης. Αν η ανεπάρκεια παραμένει, ο αλγόριθμος προχωρά στο επόμενο βήμα, αλλιώς τερματίζει.
2. Διαμοιρασμός της Ανεπάρκειας και Ταυτόχρονη Συμβολή \Rightarrow Εφόσον πρόκειται για ώρα που το Open-loop PSH δεν αντλεί ή η πρώτη ενέργεια δεν εξάλειψε την ανεπάρκεια, έχει σειρά η αύξηση της παραγωγής. Αυτή πραγματοποιείται αναλογικά και ταυτόχρονα, από τα δύο είδη ΥΗΣ, εφόσον τους το επιτρέπει η κατάσταση λειτουργίας τους. Βάσει της εγκατεστημένης ισχύος της, κάθε τεχνολογία καλείται να παράξει επιπλέον ενέργεια, μέχρι να καλύψει το ποσό της ανεπάρκειας ή μέχρι να φτάσει το ωριαίο όριο έγχυσης ισχύος της. Αν η ανεπάρκεια παραμένει, υλοποιείται το τρίτο - και τελευταίο - στάδιο του αλγορίθμου.
3. Επιπλέον Παραγωγή Ισχύος \Rightarrow Στην περίπτωση που δεν έχει καταφέρει να καλυφθεί η ανεπάρκεια αλλά ένα από τα δύο είδη ΥΗΣ έχει ακόμα περιθώριο παραγωγής, τότε συμπληρώνει εκείνο όση ενέργεια μπορεί. Είναι σαφές πως, αν κανένα από τα δύο είδη δεν έχει περιθώριο αύξησης της παραγωγής του, τότε ο αλγόριθμος θα είχε τερματίσει στο προηγούμενο βήμα.

Σε κάθε ένα από τα προαναφερθέντα βήματα, ανανεώνονται οι χρονοσειρές παραγωγής και ζήτησης, η τελική μορφή των οποίων λαμβάνεται υπόψιν για να υπολογιστούν οι δείκτες επάρκειας με τη μέθοδο του Redispatch, δηλαδή, μετά από όλες τις δυνατές μεταβολές στην λειτουργία των ΥΗΣ, υπολογίζεται πόσες ώρες και πόση φορτίο ζήτησης δεν ικανοποιείται μέσα στο έτος.



Σχήμα 4.9: Αλγόριθμος HPP Reservoir & Open-loop PSH Redispatch

Το Σχήμα 4.10 αποτυπώνει στιγμιότυπα της ίδιας χρονικής περιόδου, υπό το πρίσμα διαφορετικών στοιχείων του ΣΗΕ. Στο επάνω μέρος παρουσιάζεται η συνολική παραγωγή και ζήτηση του συστήματος, όπου συγκρίνεται η εικόνα του ΣΗΕ σύμφωνα με τον προγραμματισμό με εκείνη που προκύπτει λόγω του Redispatch των ΥΗΣ. Στο κάτω μέρος παρατίθενται τα επιμέρους διαγράμματα λειτουργίας των δυο ειδών ΥΗΣ. Στο δεδομένο χρονικό παράθυρο, παρουσιάζεται μια μερική αντιμετώπιση ενός συμβάντος ανεπάρκειας, τις ώρες 4 έως 8. Στο διάστημα αυτό φαίνεται πως οι ΥΗΣ αυξάνουν την παραγωγή τους, αναλογικά, παρεκκλίνοντας από την προγραμματισμένη χρονοσειρά λειτουργίας τους. Φτάνουν και οι δύο τα μέγιστα επιτρεπτά όρια ισχύος εξόδου τους, αλλά αδυνατούν να καλύψουν πλήρως τη ζήτηση. Αξίζει να σημειωθεί πως οι ώρες μη "εξυπηρετούμενου" φορτίου παραμένουν ίδιες σε σχέση με την προγραμματισμένη λειτουργία (5 ώρες), αλλά η συνολική ενέργεια που δεν εξυπηρετήθηκε είναι λιγότερη στην περίπτωση του Redispatch. Μόλις επέλθει η ανεπάρκεια, οι ΥΗΣ περνούν στη φάση της αποκατάστασης, είτε μειώνοντας την παραγωγή τους (HPP Reservoir), είτε περνώντας σε λειτουργία άντλησης (Open-loop PSH).



Σχήμα 4.10: Παράδειγμα Υλοποίησης Redispatch

Η επιλογή της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος ανά τεχνολογία ΥΗΣ ως κριτήριο διανομορασμού του ποσού της ανεπάρκειας, δεν αποτελεί μονοσήμαντη απάντηση στον συγκεκριμένο προβληματισμό. Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι, όχι μόνο η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας Redispatch ατομικά, ανά είδος ΥΗΣ, αλλά και πως περισσότερα redispatchable στοιχεία του ΣΗΕ (διαφορετικές τεχνολογίες ΥΗΣ ή ακόμη και άλλες μονάδες π.χ. συστήματα αποθήκευσης μπαταριών) συνεργάζονται και συν-λειτουργούν από κοινού υπό την παρουσία μιας ανεπάρκειας. Προκειμένου να διερευνηθεί αυτή η κοινή συμβολή, πρέπει να βρεθεί ένα αντικειμενικό κριτήριο που θα επιτρέψει - από πλευράς υλοποίησης - την μετάφραση της "ταυτόχρονης" συμβολής στην επάρκεια στα δεδομένα της υλοποίησης και παράλληλα θα εισάγει ένας γνώμονα για την διαχείριση της ανεπάρκειας στην πράξη. Η εγκατεστημένη ισχύς αποτελεί ονομαστικό χαρακτηριστικό κάθε μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, απαλλαγμένο από οποιαδήποτε γνώση σχετικά με την λειτουργική ή τεχνική κατάσταση της μονάδας κάθε δεδομένη στιγμή. Με αυτό το μέτρο σύγκρισης, επιτυγχάνεται μια αρχικά δίκαιη και απρόσκοπτη κατανομή του προς κάλυψη ποσού στις επί μέρους μονάδες. Στην πορεία, ενδέχεται το αρχικό αυτό κριτήριο να καταρριφθεί, αν π.χ. κάποια μονάδα αδυνατεί να συμβάλει τη δεδομένη στιγμή, η ανεπάρκεια αντιμετωπίζεται

από τις υπόλοιπες μονάδες, αφού πρωταρχικός σκοπός της στρατηγικής λειτουργίας είναι η εξάλειψη των ανεπαρκειών. Ωστόσο, παραμένει ένα αξιοκρατικό κριτήριο, το οποίο επιτρέπει και την ακριβέστερη αξιολόγηση των μονάδων όσον αφορά την ικανότητα συνεισφοράς τους σε ισχύ, όπως θα εξηγηθεί σε επόμενη Ενότητα.

Σε μια εναλλακτική μεθοδολογία στράτευσης των μονάδων για την κάλυψη της ανεπάρκειας, αυτές θα μπορούσαν να δρουν σειριακά, βάσει της προγραμματισμένης λειτουργίας τους την ώρα της ανεπάρκειας σε συνδυασμό με το περιθώριο αύξησής της παραγωγής τους. Ένα ακόμη κριτήριο επιλογής θα ήταν το επίπεδο φόρτισης, εάν πρωταρχικός στόχος της υλοποίησης είναι ο ΥΗΣ να συμβαδίζει όσο το δυνατόν περισσότερο με την προγραμματισμένη λειτουργία. Οι συγκεκριμένες διερευνήσεις πραγματοποιήθηκαν, προτού αποφασιστεί το κριτήριο της αναλογίας βάσει ισχύος, αλλά απορρίφθηκαν λόγω της μεροληψίας που εμπεριέχουν, η οποία έγινε αντιληπτή και στην αξιολόγηση της ικανότητας συνεισφοράς των μονάδων σε ισχύ.

4.2.4 Λοιποί Περιορισμοί και Διερευνήσεις

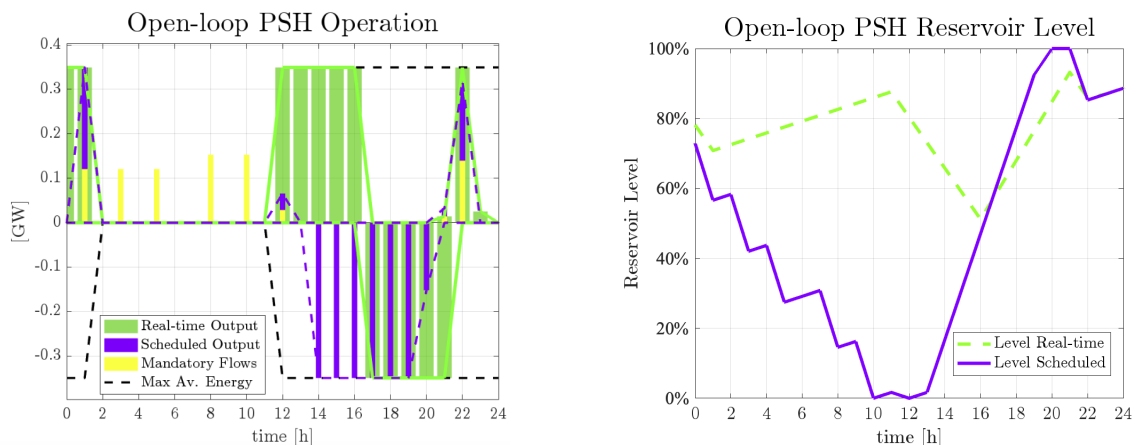
Στις προηγούμενες υποενότητες αποτυπώθηκε η μεθοδολογία της υλοποίησης γύρω από το Redispatch και τις προεκτάσεις αυτού. Στην παρούσα Ενότητα γίνεται λόγος για ποικίλους περιορισμούς στους οποίους υπόκειται η λειτουργία των ΥΗΣ, οι οποίοι δεν αφορούν μόνο τη δυνατότητα συμβολής τους στην επάρκεια ισχύος, και πως αυτοί λαμβάνονται υπόψιν και παραμετροποιούνται στη συγκεκριμένη μελέτη.

Οι εν λόγω περιορισμοί σχετίζονται με την χωρητικότητα των ταμιευτήρων των υδροηλεκτρικών μονάδων και τα όρια τίθενται, όταν ο ΥΗΣ παρεκκλίνει από τη στάθμη του προγραμματισμού του. Εξετάζονται, μέσω εφαρμογών, το εύρος στο οποίο δύναται να λειτουργεί ο ΥΗΣ, σε σχέση με την καμπύλη λειτουργίας του, και οι επιπτώσεις που επιφέρει τόσο η μέθοδος του Redispatch όσο και οι επιβαλλόμενες χρονοσειρές διαθεσιμότητας στην τελική λειτουργία του. Γίνεται αναφορά σε διαφορετικής χωρητικότητας αθροιστικούς ταμιευτήρες, συγκεκριμένα σε αυτόν των κλασικών ΥΗΣ που χαρακτηρίζεται από μεγάλη συσσωρευτική ικανότητα, και σε αυτόν των ΥΗΣ με άντληση, μικρότερης ικανότητας αποθήκευσης.

Η πρώτη υπό εξέταση περίπτωση αφορά την επιβολή της χρονοσειράς διαθεσιμότητας στην προγραμματισμένη λειτουργία των ΥΗΣ. Αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας του ταμιευτήρα λόγω αδυναμία του ΥΗΣ να παράξει το 100% της ισχύος του. Για παράδειγμα, εάν για κάποιες συνεχόμενες ώρες είχε προγραμματιστεί να παράγει το μέγιστο, αλλά τις ώρες αυτές η διαθεσιμότητά του είναι χαμηλότερη του 100%, τότε το ποσό που δεν παράχθηκε, μένει στον ταμιευτήρα, ξεπερνώντας το επίπεδο της καμπύλης λειτουργίας. Αυτό, πέραν της απόκλισης από τον προγραμματισμό, ελοχεύει και τον ρεαλιστικό κίνδυνο της υπερχειλίσης, ο οποίος εντείνεται όσο το υπό εξέταση ΣΗΕ γίνεται όλο και πιο επαρκές, δηλαδή όσο μειώνεται η επιπλέον παραγόμενη ισχύς του ΥΗΣ για λόγους συμβολής στην επάρκεια. Έτσι, τίθεται το ζήτημα διαχείρισης αυτής της περίσσειας ενέργειας, για το οποίο εξετάζονται οι εξής εναλλακτικές πολιτικές:

- Άμεση έγχυση με το πέρας του χρονικού διαστήματος της μη διαθεσιμότητας ⇒ Αυτή η τακτική εφαρμόζεται σε μικρής χωρητικότητας ταμιευτήρες, όπου δεν υφίσταται η

δυνατότητα αποθήκευσης της επιπλέον ενέργειας που δεν δόθηκε λόγω περιορισμένης διαθεσιμότητας. Έτσι, τα νερά εγχέονται στο σύστημα με την πρώτη ευκαιρία, και αυτομάτως το real-time επίπεδο της στάθμης του ταμιευτήρα ταυτίζεται ξανά με την καμπύλη λειτουργίας.



(α) Λειτουργία Open-loop PSH

(β) Στάθμη ταμιευτήρα Open-loop PSH

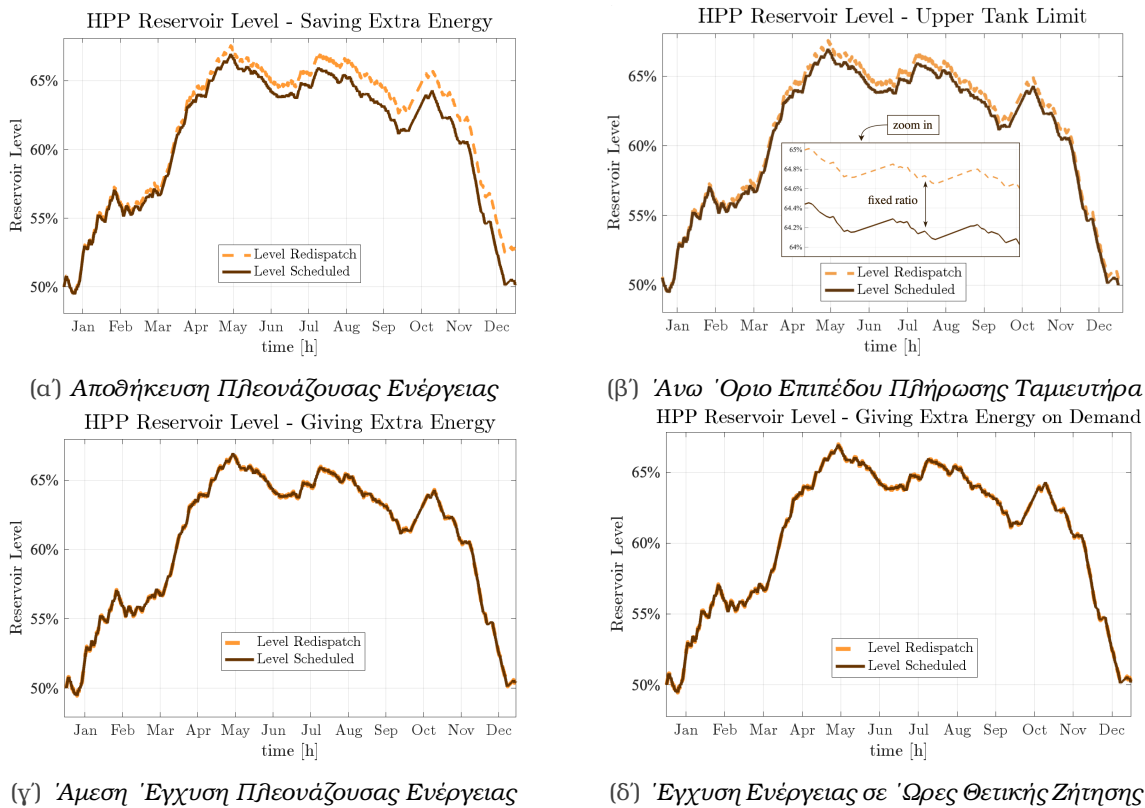
Σχήμα 4.11: Διαχείριση Πλεονάζουσας Ενέργειας - Open-loop PSH

Η συγκεκριμένη τακτική παρουσιάζει ενδιαφέρον ειδικά σε μονάδες που διαθέτουν και άντληση. Οι μονάδες αυτές, σε ώρες περιορισμένης ή μηδενικής διαθεσιμότητας, είτε παράγουν, είτε αντλούν είτε ηρεμούν, βάσει προγραμματισμού. Εάν πρόκειται για κατάσταση άντλησης, τότε ο ταμιευτήρας του Open-loop PSH γεμίζει λιγότερο συγκριτικά με την καμπύλη λειτουργίας, συνεπώς βρίσκεται κάτω από αυτή και επιδιώκει να την φτάσει. Το παραπάνω στιγμιότυπο αφορά μια τέτοιου είδους συνθήκη, όπου αρχικά ο ταμιευτήρας βρίσκεται άνω της καμπύλης λειτουργίας και στη συνέχεια κάτω από αυτή. Αναλυτικότερα, η μηδενική διαθεσιμότητα του χρονικού διαστήματος 2 έως 11 προκαλεί πλήρωση του ταμιευτήρα στο 80%, αντί για το προγραμματισμένο, σταδιακό άδειασμα αυτού. Συνεπώς, μόλις ο ΥΗΣ γίνει ξανά μερικώς διαθέσιμος, εγχείρει την πλεονάζουσα ενέργεια, - παρότι βάσει προγραμματισμού θα αντλούσε - και προσεγγίζει την προγραμματισμένη στάθμη φόρτισης την 16η ώρα. Από εκεί κι έπειτα, δεδομένης και πάλι της μερικώς διαθεσιμότητάς του, αντλεί μεν, αλλά όχι το πλήρες ποσό ενέργειας, με αποτέλεσμα να παρατείνει την άντλησή του μέχρι και την 21η ώρα. Από την 22η ώρα, η λειτουργία του ΥΗΣ ταυτίζεται με τον προγραμματισμό.

Υποσημείωση: Επισημαίνεται πως, υιοθετείται αυτή η στρατηγική διαχείρισης της επιπλέον ενέργειας λόγω της δεδομένης χωρητικότητας του συγκεκριμένου ταμιευτήρα και κατ' επέκταση του μικρού περιθωρίου απόκλισης από τον προγραμματισμό, δεν αποτελεί πάγια τακτική σε όλους του ΥΗΣ με δυνατότητα άντλησης.

- Στοχευμένη έγχυση κατά τη διάρκεια του έτους \Rightarrow Αυτή η δυνατότητα παρουσιάζεται σε ΥΗΣ μεγάλης αποθηκευτικής ικανότητας, στους οποίους δεν επείγει η μεταφορά της ενέργειάς τους προς και από το δίκτυο. Σε τέτοιου είδους τοπολογίες, τα ποσά ενέργειας που δεν δόθηκαν λόγω μη διαθεσιμότητας, εξυπηρετούν και σκοπούς συμβολής στην επάρκεια, εφόσον παραμένουν στον ταμιευτήρα και απλώς μετατοπίζουν προς τα πάνω

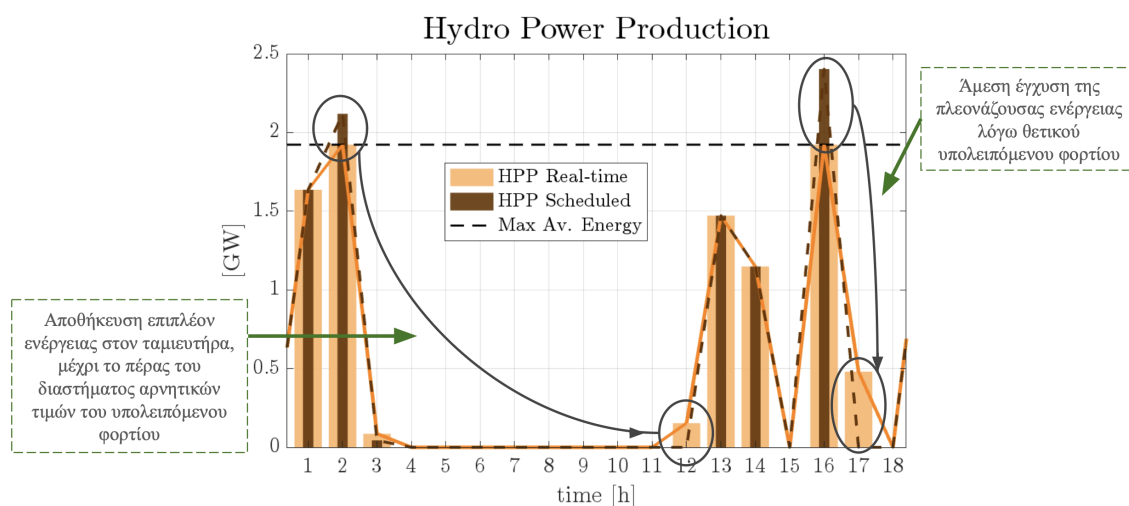
τη στάθμη του. Το πρόβλημα αναδεικνύεται, ξανά, σε σχετικά επαρκή δίκτυα, όπου αυτή η επιπλέον ενέργεια δεν βρίσκει τη ευκαιρία να εγχυθεί στο ΣΗΕ. Τότε, δύναται να εφαρμοστεί μια διαφορετική στρατηγική διοχέτευσης της ενέργειας, βάσει της οποίας, ο ταμιευτήρας “αδειάζει” σταδιακά, σε συγκεκριμένες ώρες μέσα στο έτος λειτουργίας - όταν βρίσκεται άνω του προγραμματισμένου επιπέδου. Το κριτήριο επιλογής των ωρών που θα παραχθεί αυτή η επιπλέον ενέργεια μπορεί να αφορά είτε μεμονωμένα δεδομένα λειτουργίας του ΥΗΣ είτε να λαμβάνει υπόψιν τη συνολική εικόνα του συστήματος. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσεται π.χ. η εφαρμογή ενός άνω φράγματος στη στάθμη του ταμιευτήρα, οπότε όταν πάει να ξεπεραστεί, να εγχέεται ισχύς στο δίκτυο και ο ΥΗΣ να προσεγγίζει την καμπύλη λειτουργίας του. Στην περίπτωση που εξετάζεται η εικόνα του ΣΗΕ, ένα κριτήριο έγχυσης της πλεονάζουσας ισχύος θα μπορούσε να είναι η επιλογή ωρών χαμηλής παραγωγής ΑΠΕ, άρα θετικών τιμών υπολειπόμενου φορτίου, έτσι ώστε η ζήτηση να καλύπτεται από την υδροηλεκτρική αντί της θερμικής παραγωγής.



Σχήμα 4.12: Διαφορετικές Μέθοδοι Διαχείρισης Πλεονάζουσας Ενέργειας - Ετήσια Καμπύλη Φόρτισης HPP Reservoir

Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η μαζική έγχυση για ταμιευτήρες περιορισμένης ικανότητας αποθήκευσής, εν προκειμένω οι ταμιευτήρες των Open-loop PSH, και η στοχευμένη έγχυση σύμφωνα με τη συνολική εικόνα του συστήματος για τα HPP Reservoir. Ως κριτήριο επιλογής για την έγχυση της πλεονάζουσας ενέργειας στους ΥΗΣ χωρίς δυνατότητα άντλησης επιλέχθηκαν οι ώρες όπου το υπολειπόμενο φορτίο είναι θετικό, τις υπόλοιπες ώρες τυχόν επιπλέον ενέργεια αποθηκεύεται στον ταμιευτήρα μέχρι την επόμενη επιτρεπτή

χρονική στιγμή έγχυσης. Η προηγούμενη τετράδα διαγραμμάτων παρουσιάζει το επίπεδο φόρτισης του ταμιευτήρα, σε πραγματικό χρόνο και βάσει προγραμματισμού, για τις διαφορετικές μεθόδους διαχείρισης της πλεονάζουσας ενέργειας που αναφέρθηκαν. Οπτικά, τα δύο κάτω σχήματα, που αντιστοιχούν στην άμεση έγχυση της επιπλέον ενέργειας και την έγχυση αυτής σε ώρες θετικού φορτίου, φαίνεται να ταυτίζονται, γεγονός που οφείλεται στο ότι οι ώρες θετικής ζήτησης σε αρκετές περιπτώσεις είναι οι αμέσως επόμενες διαθέσιμες χρονικά ώρες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.13.



Σχήμα 4.13: Παράδειγμα Λειτουργίας του HPP Reservoir σύμφωνα με την Προτεινόμενη Διαχείριση Πλεονάζουσας Ενέργειας

Αντίστοιχο ζήτημα προς διερεύνηση αποτελεί το κατά πόσο επιτρέπεται να παρεκκλίνει ο ΥΗΣ από τον προγραμματισμό του, εξαιτίας του Redispatch. Οφείλει να εξετασθεί αρχικά εάν υφίσταται κίνδυνος μηδενισμού της στάθμης του ταμιευτήρα και δευτερευόντως πως αυτός μπορεί να αντιμετωπιστεί, ανά περίπτωση. Η πιθανότητα εμφάνισης ενός τέτοιου προβλήματος είναι κι αυτή άρρηκτα συνδεδεμένη με το επίπεδο επάρκειας του ΣΗΕ. Αυξάνεται, όσο το σύστημα γίνεται λιγότερο επαρκές και είναι σημαντική όταν πλέον ξετάζονται ΣΗΕ που παρουσιάζουν εκατοντάδες ώρες μη εξυπηρετούμενου φορτίου. Σε αυτά τα συστήματα η real-time λειτουργία του ΥΗΣ διαφοροποιείται εντελώς από αυτή του προγραμματισμού του, καθώς συμβάλλει στις πρώτες χρονικά ανεπάρκειες που αντιλαμβάνεται μέχρι να αδειάσει η αποθηκευμένη του ενέργεια. Αυτή η συμπεριφορά παρατηρείται εξαιτίας των συνεχόμενων γεγονότων ανεπάρκειας στο ΣΗΕ σε συνδυασμό με φυσικές εισροές ανίκανες να τις καλύψουν. Συνεπώς, εάν δεν επιβληθεί κάποιος περαιτέρω περιορισμός συμβολής ισχύος σε γεγονότα ανεπάρκειας, ο ΥΗΣ καταλήγει κάποια χρονική στιγμή μέσα στο έτος να έχει έναν άδειο ταμιευτήρα και να εγγέει κάθε ώρα το ποσό των φυσικών εισροών. Για να αποφευχθεί αυτή η κατάσταση, κρίνεται αναγκαία η εφαρμογή ενός κάτω ορίου στο επίπεδο της στάθμης του ταμιευτήρα. Αυτό το όριο δύναται να έχει τη μορφή απόλυτης χωρητικότητας ή ποσοστού επί της προγραμματισμένης στάθμης κάθε ώρας.

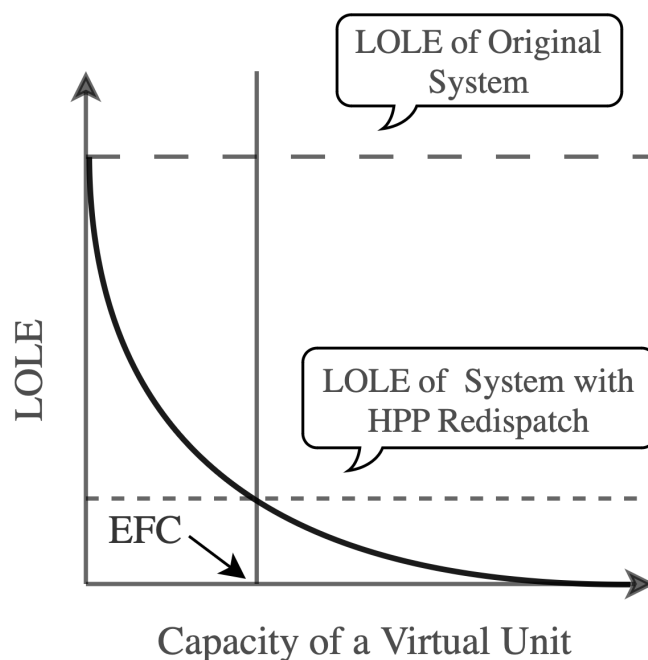
Επαναλαμβάνεται πως το συγκεκριμένο μέτρο προτείνεται μόνο σε περιπτώσεις σημαντικά ανεπαρκών ΣΗΕ και ιδίως σε ΥΗΣ χωρίς δυνατότητα άντλησης, οι οποίοι βασίζονται αποκλειστικά στις φυσικές εισροές. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, ενδέχεται να επιφέρει απο-

τελέσματα αντίθετα από τα επιθυμητά, καθώς λειτουργεί ως ανασταλτικός παράγοντας στη συμβολή των ΥΗΣ για αποφυγή γεγονότων ανεπάρκειας. Για να αποφασιστεί εάν θα ενταχθεί ο συγκεκριμένος περιορισμός, θα πρέπει να εξεταστούν τα υπό μελέτη συστήματα με τις αντίστοιχες τεχνολογίες και να αξιολογηθούν βάσει και της τελικής λειτουργίας τους, αλλά και της συνολικής συνεισφοράς στην επάρκεια. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κρίθηκε πως δεν υφίσταται κίνδυνος απώλειας ενεργειακού περιεχομένου σε κανένα σενάριο λειτουργίας, οπότε δεν ενσωματώθηκε κανένα επιπλέον κριτήριο αναφορικά με τον έλεγχο της χωρητικότητας των μονάδων. Ο μόνος περιορισμός που επιβάλλεται αφορά την περίπτωση του ταμειυτήρα των ΥΗΣ με άντληση, όπου η μικρή χωρητικότητά του έχει ως συνέπεια τον συχνό μηδενισμό και αντίστοιχα, πλήρωση του ταμειυτήρα - και λόγω Redispatch αλλά και βάσει προγραμματισμού. Αυτός ο περιορισμός υλοποιείται αυτόματα και στο Redispatch, δηλαδή ο ΥΗΣ, προφανώς, δεν συμβάλλει όταν η στάθμη του ταμειυτήρα του έχει φτάσει στο μηδέν.

Αξίζει να τονιστεί πως, τα παραπάνω κριτήρια άπτονται της ευχέρειας εκείνου που υλοποιεί την μοντελοποίηση και δεν επηρεάζουν σημαντικά την τελική εικόνα του εξεταζόμενου συστήματος ως προς την Μελέτη Επάρκειας, γι' αυτό κιόλας δεν αναφέρονται ως πρωταρχικά σημεία προσοχής της μεθοδολογίας. Πρόκειται για παράπλευρες επιπτώσεις της εφαρμογής του Redispatch, οι οποίες απλώς παρατίθενται για λόγους πληρότητας της διερεύνησης και ως αφορμή για περαιτέρω σκέψη και συζήτηση.

4.3 Υπολογισμός Ικανότητας Συνεισφοράς Ισχύος

Υπενθυμίζεται ότι η συνεισφορά ισχύος στην επάρκεια του συστήματος μιας νέας μονάδας παραγωγής, ορίζεται ως η ποσότητα του επιπρόσθετου φορτίου που μπορεί να εξυπηρετηθεί το ΣΗΕ, διατηρώντας σταθερό το επίπεδο αξιοπιστίας του. Στην παρούσα υλοποίηση, για τον υπολογισμό της ικανότητας συνεισφοράς ισχύος Capacity Value των ΥΗΣ, επιλέγεται ο δείκτης της ισοδύναμης σταθερής ισχύος ή Equivalent Firm Capacity - EFC. Αυτή η ισοδύναμη σταθερή ισχύς αναφέρεται σε μια ιδανική μονάδα παραγωγής, πλήρως διαθέσιμη και αξιόπιστη, η συνεισφορά της οποίας συγκρίνεται με εκείνη των υπό εξέταση υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής. Ως δείκτης αξιολόγησης της αξιοπιστίας του ΣΗΕ και ορισμού του Capacity Value των ΥΗΣ έχει επιλεγεί το Αναμενόμενο Μη Εξυπηρετούμενο Φορτίο - LOLE.



Σχήμα 4.14: Μεθοδολογία Αξιολόγησης του Capacity Value βάσει του δείκτη EFC

Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα, η τιμή του EFC των ΥΗΣ ορίζεται ως το σημείο τομής της καμπύλης ισχύος του EFC με την τιμή του LOLE που επιτυγχάνεται στο ΣΗΕ με την λειτουργία των ΥΗΣ. Παρατίθενται τα βήματα υπολογισμού για να καταστεί σαφής η μεθοδολογία ορισμού του Capacity Value:

Η τελική τιμή του EFC ισούται με την καθαρή ισχύ, η οποία επιφέρει το ίδιο επίπεδο επάρκειας στο ΣΗΕ με την υπό εξέταση μονάδα. Διαιρεμένη με την συνολική εγκατεστημένη ισχύ της μονάδας ΥΗΣ έχει ως αποτέλεσμα το Capacity Value της συγκεκριμένης υδροηλεκτρικής μονάδας, δηλαδή το κατά πόσο συνεισφέρει σε ισχύ ως προς το ονομαστικό της μέγεθος.

Το βήμα της παραπάνω επαναληπτικής διαδικασίας συνήθως λαμβάνει μικρή τιμή, ώστε να εξασφαλισθεί ο τερματισμός της όταν τα δύο μεγέθη προς σύγκριση ταυτίζονται.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ 4.1: Υπολογισμός δείκτη EFC - Equivalent Firm Capacity

```

1:  $EENS_{ref} \leftarrow EENS_{Redispatch}$ 
2:  $LOLE_{ref} \leftarrow LOLE_{Redispatch}$ 
3:  $EENS_{new} \leftarrow EENS_{EFC}$ 
4:  $LOLE_{new} \leftarrow LOLE_{EFC}$ 
5:  $EFC \leftarrow STEP_{EFC}$ 
6: while  $LOLE_{new,t} > LOLE_{ref}$  do
7:    $ACC_t \leftarrow ATC_t + STEP_{EFC}$ 
8:   calculate  $LOLE_{new,t}$ 
9:   calculate  $EENS_{new,t}$ 
10:   $EFC \leftarrow EFC + STEP_{EFC}$ 
11: end while

```

Ο υπολογισμός της ικανότητας συνεισφοράς ισχύος αναφέρεται σε κάθε περίπτωση σε μια μονάδα με μια ορισμένη λειτουργία. Για παράδειγμα, είναι διαφορετική η τιμή της συνεισφοράς ισχύος ενός ΥΗΣ χωρίς άντληση που ακολουθεί την προγραμματισμένη λειτουργία του, συγκριτικά με την περίπτωση που ο ίδιος ΥΗΣ ακολουθεί τη στρατηγική του Redispatch. Αυτό συμβαίνει διότι η σύγκριση στηρίζεται στον δείκτη επάρκειας που προκύπτει από κάθε διαφορετική λειτουργία του υπό εξέταση στοιχείου. Για τις περιπτώσεις όπου μοντελοποιείται μόνο μια τεχνολογία ΥΗΣ με την τακτική του Redispatch, προκύπτει εύκολα η τιμή του Capacity Value, αφού η τελική τιμή του EFC απλώς διαιρείται με την συνολική ισχύ του συγκεκριμένου είδους ΥΗΣ. Στην κοινή υλοποίηση, όπου συνυπάρχουν και συμβάλλουν από κοινού στις ανεπάρκειες τα δύο είδη ΥΗΣ - με και χωρίς δυνατότητα άντλησης -, το Capacity Value αξιολογείται συνολικά. Λαμβάνεται υπόψιν το συνολικό αποτέλεσμα που επιφέρει η κοινή τους δράση στο ΣΗΕ και ορίζεται ως LOLE αναφοράς στην παραπάνω διαδικασία, εκείνο που έχει προκύψει ύστερα από το παράλληλο Redispatch των δύο τεχνολογιών ΥΗΣ.

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας, όπως αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4. Το σύστημα στο οποίο εφαρμόζεται η μελέτη επάρκειας ισχύος περιλαμβάνει θερμικές μονάδες παραγωγής, υδροηλεκτρικούς σταθμούς, ΑΠΕ και μονάδες αποθήκευσης. Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά αυτών παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α'.

Στο πρώτο μέρος των αποτελεσμάτων περιέχονται οι δείκτες επάρκειας και οι τιμές ικανότητας συνεισφοράς ισχύος, όπως προκύπτουν από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας στο σύστημα αναφοράς. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η στοχαστικότητα της παραγωγής των ΑΠΕ, του φορτίου ζήτησης και των υδραυλικών συνθηκών και να αξιολογηθούν όσο το δυνατόν περισσότερες καταστάσεις λειτουργίας του ΣΗΕ, η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται σε 35 διαφορετικά κλιματικά έτη. Συγκεκριμένα για το σκοπό αυτό αξιοποιούνται οι χρονοσειρές φορτίου ζήτησης, παραγωγής ΑΠΕ και φυσικών εισροών των ΥΗΣ που διατίθενται από τον ENTSO-e και χρησιμοποιούνται στις μελέτες επάρκειας που διεξάγει ([61]). Εξετάζονται τα τρία σενάρια λειτουργίας των ΥΗΣ, με τη σειρά που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 4 της μεθοδολογίας: οι ΥΗΣ χωρίς δυνατότητα άντλησης (HPP Reservoir), οι ΥΗΣ με δυνατότητα άντλησης (Open-Loop PSH) και η από κοινού λειτουργία τους.

Ακολουθεί η σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με μια εναλλακτική πολιτική ενσωμάτωσης της υδροηλεκτρικής παραγωγής στις μελέτες επάρκειας ισχύος, την τεχνική Αποκοπής Αιχμών (Peak Shaving).

Τέλος, γίνεται μια διερεύνηση αναφορικά με την ένταξη νέων σταθμών υδροηλεκτρικής παραγωγής, προσθέτοντας ΥΗΣ ανά είδος και αξιολογώντας την επίδρασή τους στο εξεταζόμενο ΣΗΕ. Η συγκεκριμένη διερεύνηση εξετάζει τη βελτίωση των δεικτών επάρκειας που επιτυγχάνεται, βάσει του είδους ΥΗΣ που προστίθενται στο σύστημα, και εφαρμόζεται σε ΣΗΕ διαφορετικού επιπέδου επάρκειας, με στόχο την ανάδειξη της προτεινόμενης μεθόδου σε μεγαλύτερο εύρος συστημάτων.

5.1 Σενάριο Αναφοράς: Αποτελέσματα Προτεινόμενης Μεθοδολογίας

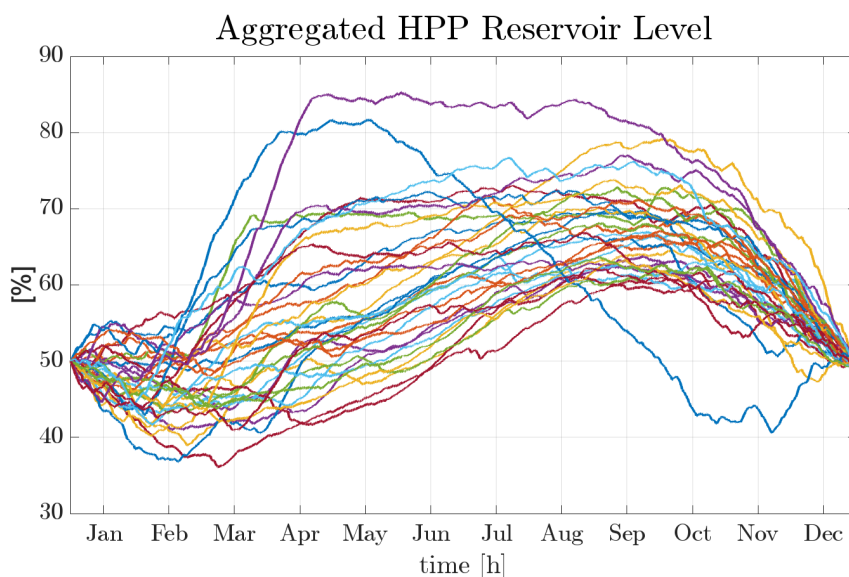
Τα βασικά μεγέθη του εξεταζόμενου ΣΗΕ, στο οποίο εφαρμόζεται η μελέτη επάρκειας ισχύος, σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία, συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1 και αναλυτικότερα στο Παράρτημα Α'. Η παραγωγή των ΑΠΕ και η λειτουργία των μονάδων απο-

θήκευσης ενσωματώνεται στην καμπύλη της ζήτησης και προκύπτει η υπολειπόμενη ζήτηση. Τα χαρακτηριστικά όλων των μονάδων παραγωγής διατηρούνται σταθερά στα 35 κλιματικά έτη. Οι διαφορές αφορούν τις χρονοσειρές παραγωγής των ΑΠΕ, τις χρονοσειρές λειτουργίας των αποθηκευτικών μονάδων, τις υδρολογικές εισροές και τη ζήτηση του συστήματος. Για τον λόγο αυτό, επιλέγεται η εξέταση και ανάλυση των 35 ετών, προκειμένου να μελετηθεί και να αξιολογηθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία σε όλο το εύρος δυνατών συνδυασμών των υδρολογικών εισροών των ΥΗΣ με την υπόλοιπη εικόνα του ΣΗΕ. Οι HPP Reservoir του εξεταζόμενου ΣΗΕ διαθέτουν κατά μέσο όρο 4.2 TWh ετήσιες υδρολογικές εισροές, ενώ οι Open-loop PSH 0.6TWh. Ο ρυθμός μη προγραμματισμένων διακοπών (FOR) των δύο ειδών ΥΗΣ λαμβάνεται ίσος με 5%.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά του υπό μελέτη ΣΗΕ

	GW
Μέση Αιχμή Υπολειπόμενου Φορτίου	9.2
Εγκατεστημένη Θερμική Ισχύς	8.3
Εγκατεστημένη Ισχύς HPP Reservoir	2.4
Εγκατεστημένη Ισχύς Open-Loop PSH	0.7

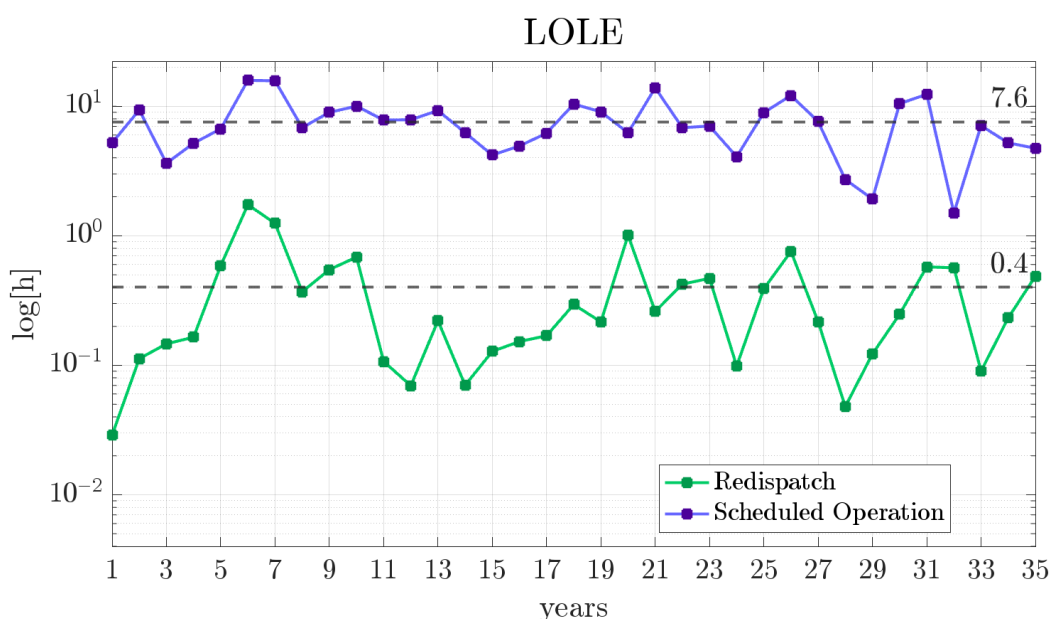
Τα δεδομένα που επηρεάζουν άμεσα την παραγωγή των ΥΗΣ είναι οι υδρολογικές τους εισροές. Αυτές διαφοροποιούνται σημαντικά μέσα στα 35 κλιματικά έτη, όπως γίνεται αντιληπτό μέσω των ετήσιων καμπυλών λειτουργίας των HPP Reservoir του Σχήματος 5.1. Κάθε καμπύλη λειτουργίας των ΥΗΣ διαμορφώνεται από το μοντέλο βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος (Παράτημα Α) βάσει των ετήσιων εισροών και των χαρακτηριστικών κάθε κλιματικού έτους και καθορίζει το προφίλ παραγωγής τους καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Οι διαφοροποιήσεις αυτών των καμπυλών συνεπάγονται διαφορετικά προφίλ λειτουργιών για τα 35 κλιματικά έτη. Συνεπώς αποτελούν ένα ευρύ σύνολο δεδομένων λειτουργίας για την εφαρμογή και την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας Redispatch.



Σχήμα 5.1: Συγκεντρωτική Αναπαράσταση Καμπυλών Λειτουργίας των HPP Reservoir

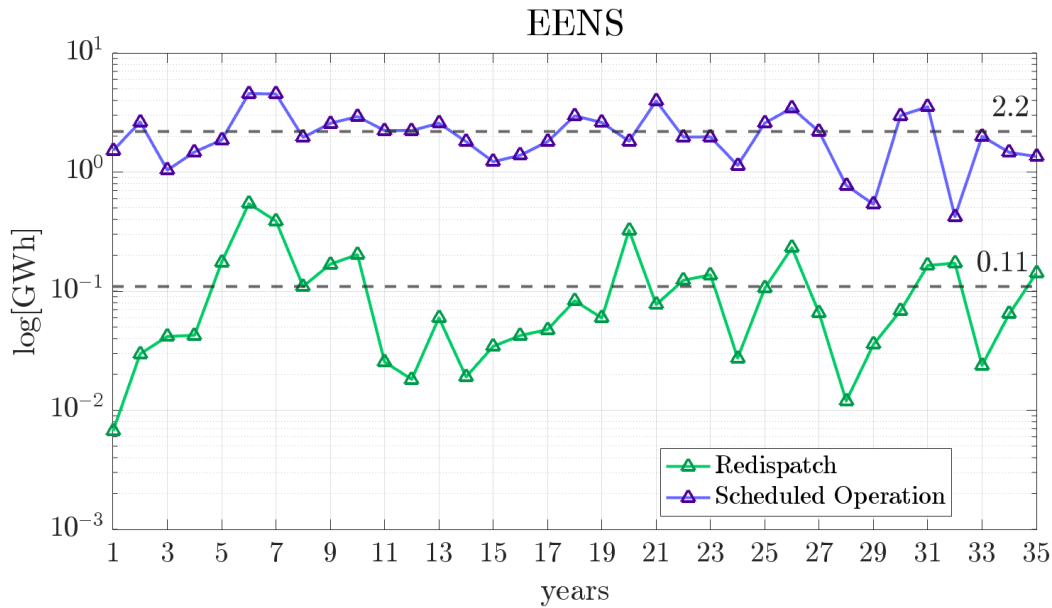
5.1.1 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης ΥΗΣ χωρίς Δυνατότητα Άντλησης

Τα αποτελέσματα της παρούσας υποενότητας αφορούν την μοντελοποίηση, στην οποία οι HPP Reservoir επιτελούν Redispatch, ενώ οι Open-Loop PSH ενσωματώνονται στη μελέτη επάρκειας βάσει της προγραμματισμένης τους λειτουργίας. Στα Σχήματα 5.2 και 5.3 παρουσιάζεται η διακύμανση των τιμών των δεικτών επάρκειας, συγκεκριμένα της Αναμενόμενης Απώλειας Φορτίου (LOLE) και της Εκτιμώμενης μη Εξυπηρετούμενης Ενέργειας (EENS), για τα 35 κλιματικά έτη. Η μωβ γραμμή αντιστοιχεί στους δείκτες επάρκειας, οι οποίοι έχουν προκύψει σύμφωνα με την προγραμματισμένη λειτουργία των ΥΗΣ, ως αποτέλεσμα του μοντέλου Capacity Expansion Planning (CEP) και αφορά και τα δύο είδη ΥΗΣ. Η πράσινη γραμμή αναφέρεται στους δείκτες επάρκειας που επιφέρει η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας στους HPP Reservoir.



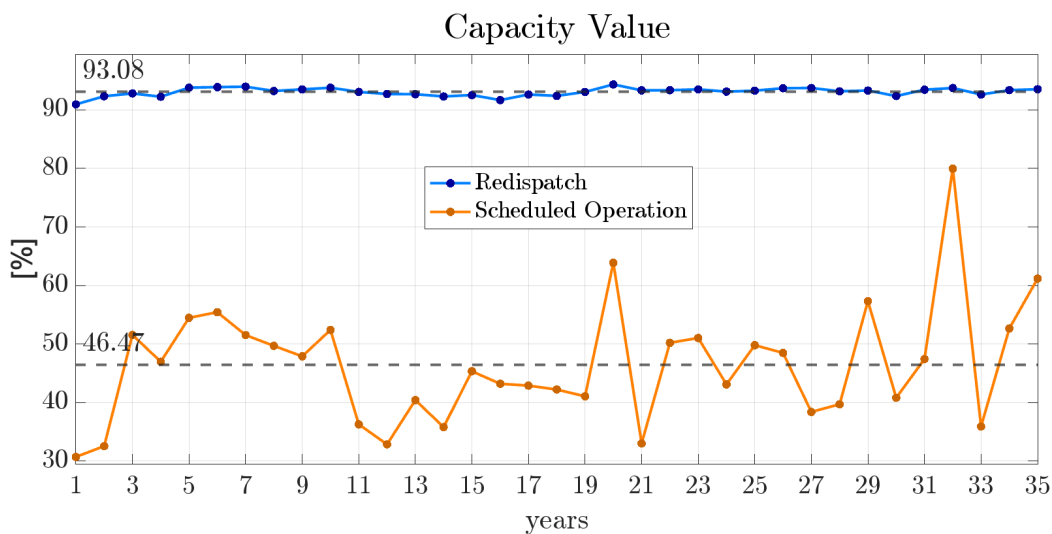
Σχήμα 5.2: HPP Reservoir: Αποτελέσματα LOLE για 35 Κλιματικά Έτη

Η διακύμανση των τιμών LOLE και EENS της προγραμματισμένης λειτουργίας των ΥΗΣ ανά τα χρόνια οφείλεται στις διαφοροποιήσεις που εμφανίζονται αναφορικά με τις εισροές των ΥΗΣ, το φορτίο ζήτησης και την παραγωγή των ΑΠΕ. Συνήθως, μεγάλες τιμές των δεικτών επάρκειας υποδηλώνουν έτη, στα οποία οι υψηλές τιμές του φορτίου ταυτοχρονίζονται με ώρες χαμηλής παραγωγής ΑΠΕ. Εάν αυτή η περίπτωση συνδυαστεί με περιόδους χαμηλών υδρολογικών εισροών και κατά συνέπεια περιορισμένης υδροηλεκτρικής παραγωγής, τότε οι ΥΗΣ συμβάλλουν λιγότερο στην επάρκεια του ΣΗΕ. Αντίστοιχα, στα έτη που σημειώνονται οι χαμηλότεροι επαρκειακοί δείκτες, οι ώρες αιχμής του φορτίου συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό με τις ώρες παραγωγής των μονάδων ΑΠΕ. Όσο περισσότερη και κατάλληλα κατανομημένη στις ώρες αιχμής είναι η υδροηλεκτρική παραγωγή, τόσο υψηλότερο θα είναι και το επίπεδο επάρκειας του ΣΗΕ. Αυτός είναι και ο λόγος που οι τιμές της συνεισφοράς της προγραμματισμένης λειτουργίας στην επάρκεια ισχύος, στο Σχήμα 5.4, παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις.



Σχήμα 5.3: *HPP Reservoir: Αποτελέσματα EENS για 35 Κλιματικά Έτη*

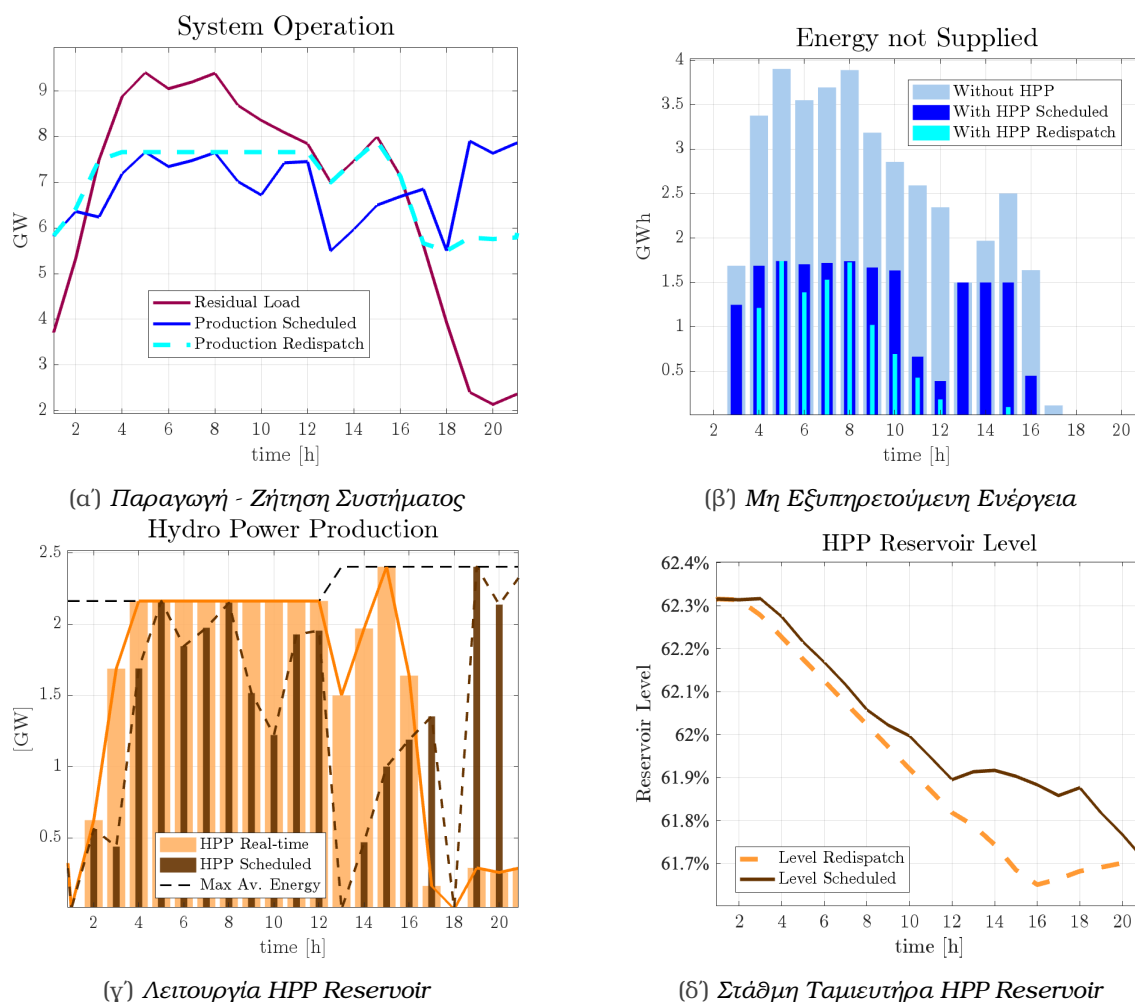
Όσον αφορά τη συμβολή του Redispatch, οι τιμές του Capacity Value λαμβάνουν πολύ υψηλότερες τιμές (93%) συγκριτικά με εκείνες που προκύπτουν από την προγραμματισμένη λειτουργία (47%). Ο λόγος έγκειται στο προφίλ λειτουργίας που ακολουθείται στις δύο περιπτώσεις από τους ΥΗΣ. Η προγραμματισμένη χρονοσειρά λειτουργίας έχει προκύψει βάσει της βέλτιστης οικονομικότητας του συστήματος, χωρίς να λαμβάνει υπόψιν τις επαρκειακές ανάγκες του ΣΗΕ και την ικανότητα συμβολής των ΥΗΣ για την αντιμετώπισή τους σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η πολιτική λειτουργίας δικαιολογεί και τις αντίστοιχες μειωμένες τιμές του Capacity Value, οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές που συναντώνται στη σχετική βιβλιογραφία και υποδηλώνουν τη μη ενσωμάτωση της διάστασης της επάρκειας του ΣΗΕ κατά τη διαδικασία προγραμματισμού της λειτουργίας των ΥΗΣ. Αντιθέτως, η μέθοδος του Redispatch επιτυγχάνει υψηλές τιμές ικανότητας συνεισφοράς ισχύος, συνδυάζοντας τη λειτουργία των ΥΗΣ με γνώμονα τόσο την οικονομικότητα όσο και την επάρκεια του ΣΗΕ.



Σχήμα 5.4: *HPP Reservoir: Αποτελέσματα Capacity Value για 35 Κλιματικά Έτη*

Οι τιμές του Capacity Value που επιφέρει η μέθοδος του Redispatch χαρακτηρίζονται από αισθητά μεγαλύτερη σύγκλιση προς τη μέση τιμή τους. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της βασικής αρχής της προτεινόμενης μεθοδολογίας, τη συνεισφορά των ΥΗΣ σε συμβάντα ανεπάρκειας. Ως εκ τούτου, σε κάθε εμφάνιση ανεπάρκειας εντός του ΣΗΕ, οι ΥΗΣ καλούνται να αυξήσουν την παραγωγή τους για να την αντιμετωπίσουν. Οι περιορισμοί που ενδεχομένως τους εμποδίζουν να συμβάλλουν σε κάθε γεγονός ανεπάρκειας, είναι το χαμηλό ενεργειακό τους περιεχόμενο και η μη διαθεσιμότητα της παραγωγής τους. Οι HPP Reservoir στη δεδομένη μελέτη δεν αντιμετωπίζουν κίνδυνο έλλειψης ενέργειας, εξαιτίας της μεγάλης χωρητικότητας του κοινού τους ταμιευτήρα, συνεπώς ο κυρίαρχος περιορισμός που τους εμποδίζει από την έγχυση της μέγιστης ισχύος τους σε κάθε ανεπάρκεια, είναι η πιθανή μειωμένη διαθεσιμότητα τους εξαιτίας απρόοπτων βλαβών.

Το Σχήμα 5.5 απεικονίζει τον περιορισμό που επιβάλλει η μερική διαθεσιμότητα των ΥΗΣ, κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος ανεπάρκειας.



Σχήμα 5.5: Παράδειγμα Περιορισμού Παραγωγής HPP Reservoir λόγω Μερικής Διαθεσιμότητας

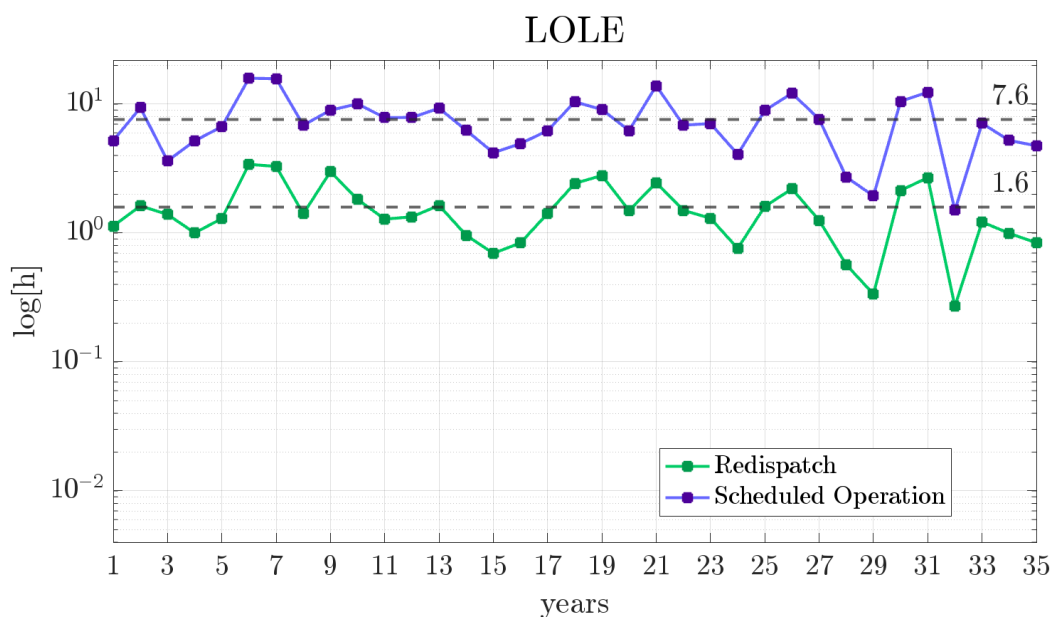
Η λειτουργία των ΥΗΣ βάσει του Redispatch αναπροσαρμόζεται τις ώρες που παρίσταται ανεπάρκεια και μειώνει, σε κάθε περίπτωση το μη εξυπηρετούμενο φορτίο, σε σχέση με

την προγραμματισμένη λειτουργία (Σχήμα 5.5β). Ωστόσο, η μερική διαθεσιμότητα των HPP Reservoir τους περιορίζει από την περαιτέρω αύξηση της παραγωγής τους και εξάλειψη του γεγονότος ανεπάρκειας. Η στάθμη του ταμιευτήρα φαίνεται να επηρεάζεται από την ανακατανομή της λειτουργίας του ΥΗΣ, αλλά σε πολύ μικρό ποσοστό ως προς το προγραμματισμένο επίπεδό του, στο οποίο και επανέρχεται τις επόμενες ώρες (Σχήμα 5.5δ). Το συγκεκριμένο στιγμιότυπο αφορά το κλιματικό έτος με τους υψηλότερους δείκτες επάρκειας για την προτεινόμενη μέθοδο.

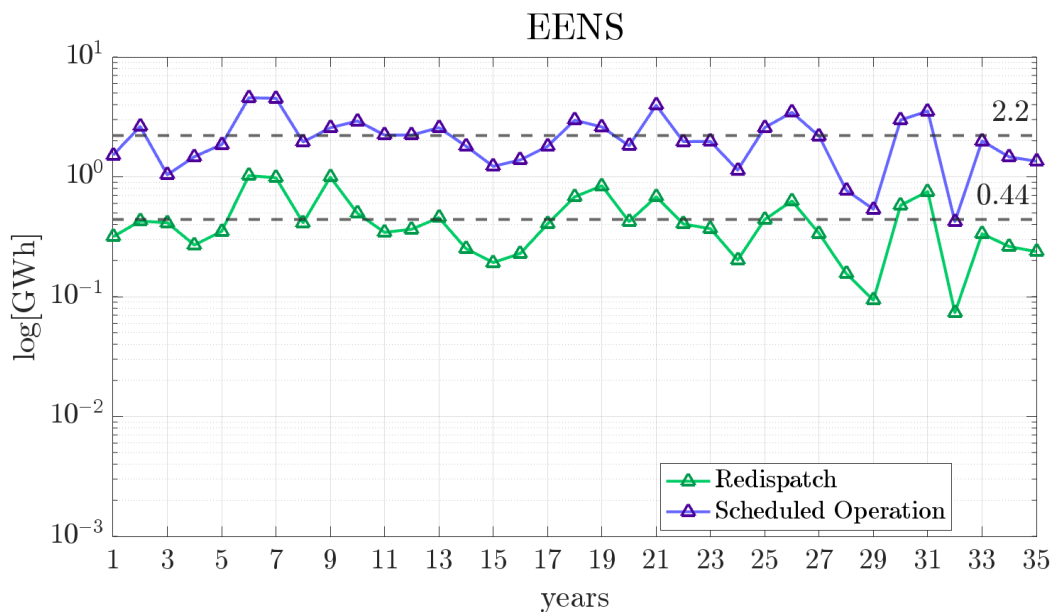
5.1.2 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης ΥΗΣ με Δυνατότητα Άντλησης

Σε αυτή την υποενότητα παρατίθενται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης των Open-Loop PSH βάσει της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Η λειτουργία των HPP Reservoir εντάσσεται στη μελέτη επάρκειας σύμφωνα με τον προγραμματισμό χωρίς να πραγματοποιείται ανακατανομή της λειτουργίας τους σε γεγονότα ανεπάρκειας.

Στα Σχήματα 5.6 και 5.7 απεικονίζονται οι δείκτες επάρκειας, LOLE και EENS, αντίστοιχα, που προκύπτουν από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου στους Open-Loop PSH. Όσον αφορά την αξιολόγηση των εξαγομένων δεικτών επάρκειας ως προς τη διαφοροποίησή τους ανάλογα με τα κλιματικά έτη, οι σχολιασμοί ταυτίζονται με αυτά της προηγούμενης υποενότητας. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα αυτά, οι δείκτες επάρκειας που υπολογίζονται στην περίπτωση των Open-Loop PSH λαμβάνουν υψηλότερες τιμές συγκριτικά με τους εκείνους των HPP Reservoir. Αυτό οφείλεται στην μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ τους και κατ'επέκταση το μικρότερο περιθώριο αναδιαμόρφωσης της λειτουργίας τους για την αντιμετώπιση συμβάντων ανεπάρκειας.

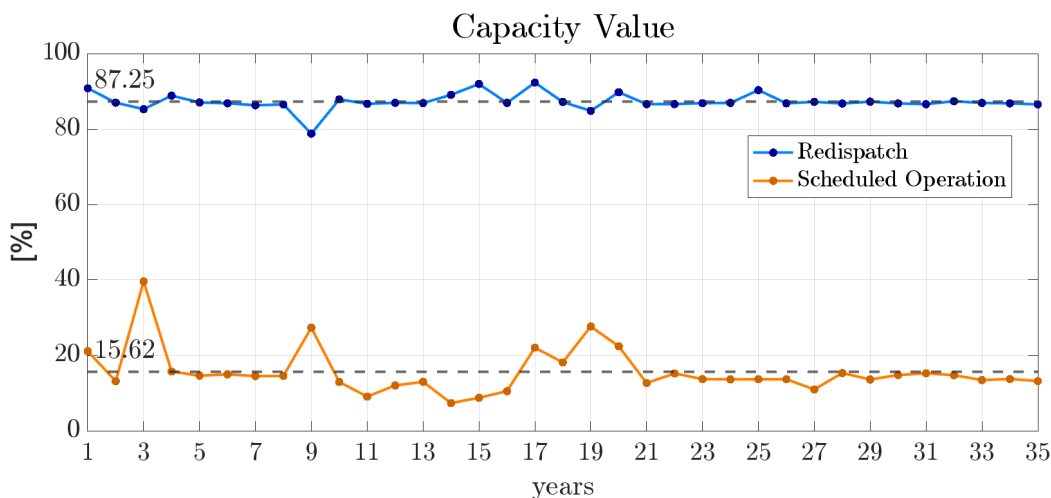


Σχήμα 5.6: Open-Loop PSH: Αποτελέσματα LOLE για 35 Κλιματικά Έτη



Σχήμα 5.7: *Open-Loop PSH: Αποτελέσματα EENS για 35 Κλιματικά Έτη*

Χαμηλότερες είναι και οι τιμές του Capacity Value, σε σύγκριση με αυτές των HPP Reservoir, οι οποίες υπολογίζονται ως ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος της κάθε τεχνολογίας. Ο λόγος έγκειται στην διαφορετική χωρητικότητα των δύο ειδών ΥΗΣ. Τα Open-Loop PSH του υπό μελέτη ΣΗΕ έχουν σχετικά μικρή χωρητικότητα (4.5 GWh), η οποία επηρεάζει άμεσα τη λειτουργία τους. Η χωρητικότητα αυτή συνεπάγεται περίπου 6 συνεχόμενες ώρες παραγωγής ή άντλησης υπό μέγιστη ισχύ, για την πλήρωσή ή το άδειασμα του ταμιευτήρα τους, αντίστοιχα. Ως εκ τούτου, η ικανότητα συνεισφοράς τους σε συμβάντα ανεπάρκειας είναι περιορισμένη σε σχέση με αυτή των ΥΗΣ χωρίς άντληση, καθώς συχνά η χαμηλή στάθμη του ταμιευτήρα τους δεν τους επιτρέπει την αύξηση της παραγωγής τους. Αυτός ο περιορισμός έχει ως αποτέλεσμα αφενός την ανάγκη για συχνούς κύκλους παραγωγής - άντλησης και αφετέρου την ανικανότητα συνεισφοράς σε συμβάντα ανεπάρκειας μεγάλης διάρκειας.

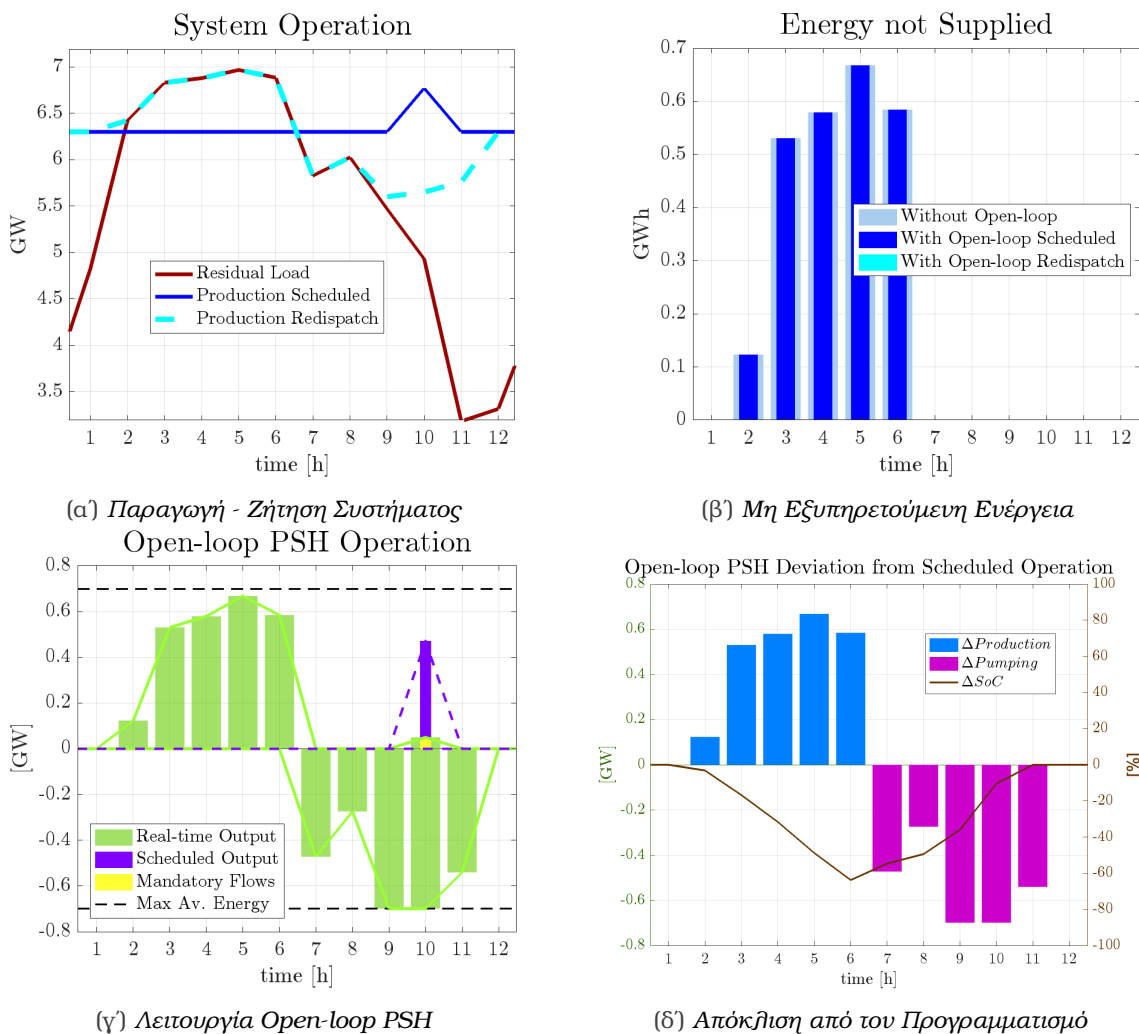


Σχήμα 5.8: *Open-Loop PSH: Αποτελέσματα Capacity Value για 35 Κλιματικά Έτη*

Σε συνδυασμό με τον περιορισμό της ωριαίας διαθέσιμης παραγωγής, η συνεισφορά των

Open-Loop PSH στην επάρκεια του ΣΗΕ είναι κατ' αναλογία χαμηλότερη από εκείνη των HPP Reservoir, όπως αποτυπώνεται και από τις τιμές του Capacity Value στο Σχήμα 5.8. Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα που επιφέρει είναι βελτιωμένα σε σχέση με την προγραμματισμένη λειτουργία. Παρά το γεγονός πως πρόκειται για μικρής χωρητικότητας ΥΗΣ, η λειτουργία της άντλησης επιτρέπει στους Open-Loop PSH να συνεισφέρουν σε συμβάντα ανεπάρκειας μικρής και μεσαίας διάρκειας, αποκαθιστώντας άμεσα τη στάθμη του ταμιευτήρα τους, μόλις παρέλθει η ανάγκη συμβολής ισχύος.

Το Σχήμα 5.9 αναπαριστά ένα σύντομο, αλλά απαιτητικό από πλευράς ισχύος, γεγονός ανεπάρκειας, το οποίο αντιμετωπίζεται εξ ολοκλήρου χάρη στην εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου.



Σχήμα 5.9: Παράδειγμα Αντιμετώπισης Ανεπάρκειας με Redispatch στους Open-loop PSH

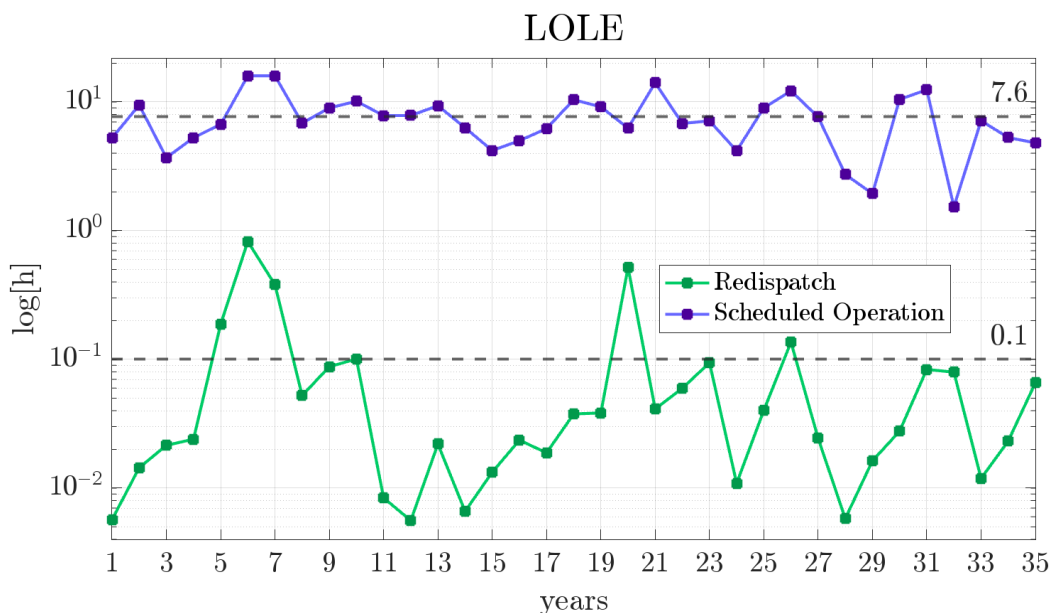
Η αύξηση της παραγωγής των ΥΗΣ προκάλεσε αισθητή μείωση στη στάθμη του ταμιευτήρα τους (-70%) (Σχήμα 5.9δ), η οποία αντισταθμίστηκε άμεσα με το πέρας της ανεπάρκειας, μέσω της διαδικασίας άντλησης. Παρατηρείται, πως, βάσει προγραμματισμού, οι Open-Loop PSH βρίσκονται σε ηρεμία καθ' όλη τη διάρκεια της ανεπάρκειας, με αποτέλεσμα η μη εξυπηρετούμενη ενέργεια να ταυτίζεται με εκείνη στην περίπτωση απουσίας τους από το ΣΗΕ (Σχήμα 5.9β). Το συγκεκριμένο συμβάν ανεπάρκειας επιβεβαιώνει τη μονοδι-

άστατη πολιτική προγραμματισμού της λειτουργίας των ΥΗΣ με γνώμονα την οικονομικότητα του ΣΗΕ, αγνοώντας την ανάγκη συνεισφοράς στην επάρκεια του συστήματος. Το άνω στιγμίοτυπο αναφέρεται στο χειρότερο κλιματικό έτος ως προς τους δείκτες επάρκειας, το οποίο είναι το ίδιο και για τις τρεις μοντελοποιήσεις.

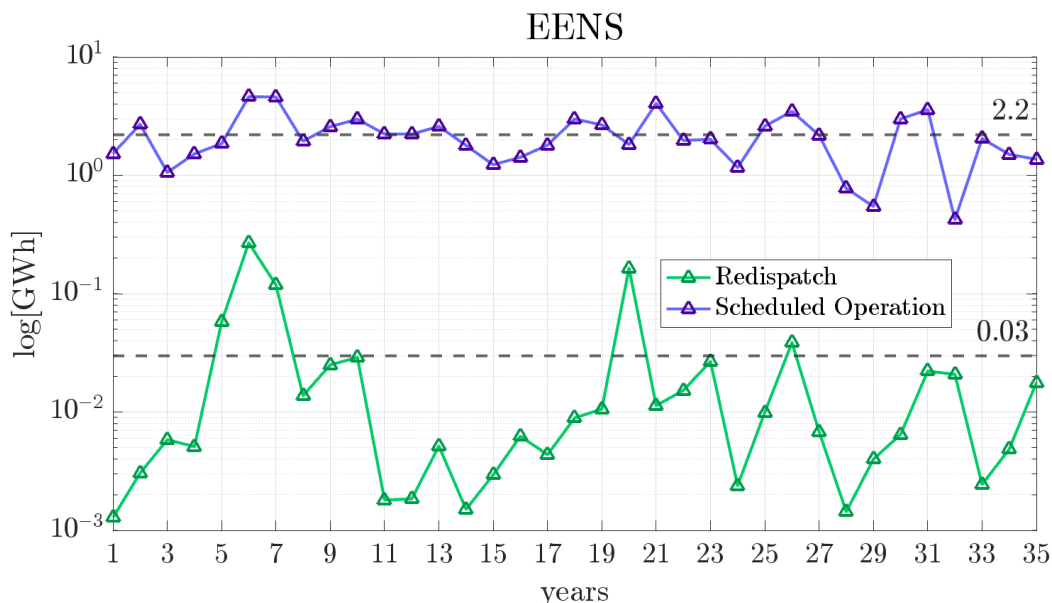
5.1.3 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης Κοινής Συμβολής στην Επάρκεια Ισχύος

Στα επόμενα σχήματα απεικονίζονται τα αποτελέσματα των δεικτών επάρκειας και της ικανότητας συνεισφοράς στην επάρκεια του ΣΗΕ του κοινού Redispatch των δύο ειδών ΥΗΣ. Η τιμή του Capacity Value αναφέρεται στην ικανότητα συμβολής του συνδυασμού της λειτουργίας των δύο ΥΗΣ με στόχο την αντιμετώπιση των γεγονότων ανεπάρκειας εντός του ΣΗΕ.

Στη δεδομένη μοντελοποίηση οι δείκτες που προκύπτουν (Σχήμα 5.10 και 5.11) είναι οι πιο χαμηλοί από τις τρεις περιπτώσεις, καταλήγοντας στο συμπέρασμα πως η συν-λειτουργία των HPP Reservoir και των Open-Loop PSH επιφέρει το καλύτερο επίπεδο επάρκειας στο εξεταζόμενο ΣΗΕ, για όλα τα κλιματικά έτη. Η μείωση που επιφέρει η προτεινόμενη μέθοδος στους δείκτες επάρκειας ξεπερνά το 98% σε σχέση με την προγραμματισμένη λειτουργία των ΥΗΣ, γεγονός που αναδεικνύει την υπεροχή της ως προς τον τρόπο ένταξης και αξιολόγησης της λειτουργίας των ΥΗΣ. Η βελτίωση των δεικτών επάρκειας σε σχέση με τις προηγούμενες μοντελοποιήσεις έγκειται στο γεγονός, ότι η ισχύς στην οποία εφαρμόζεται Redispatch είναι η αθροιστική εγκατεστημένη ισχύς των δύο ειδών ΥΗΣ.

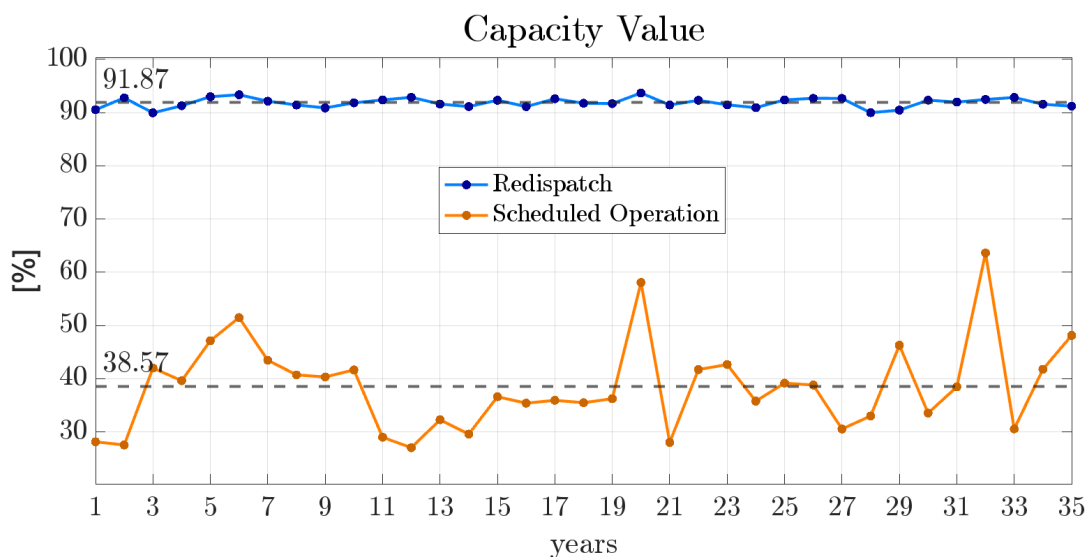


Σχήμα 5.10: Κοινή Συμβολή: Αποτελέσματα LOLE για 35 Κλιματικά Έτη



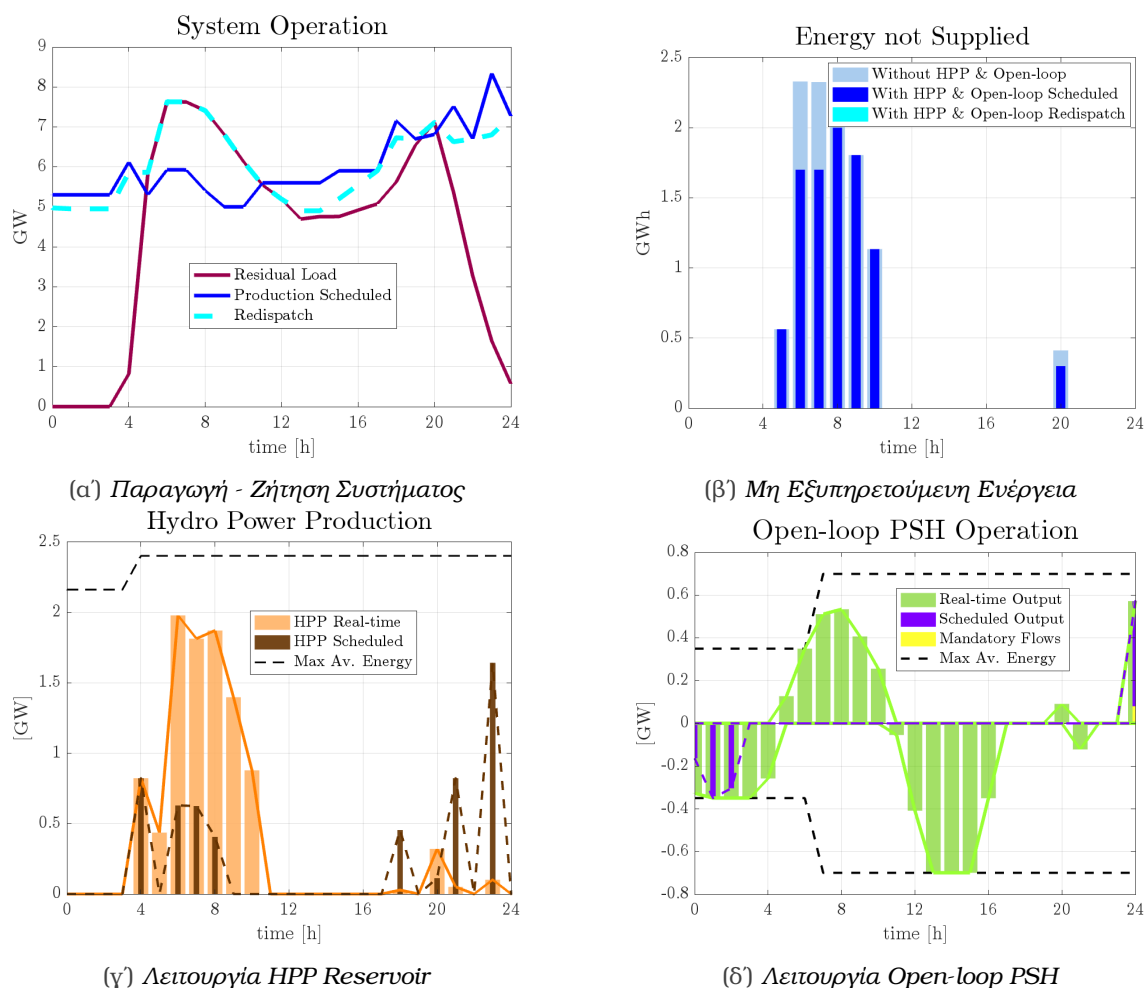
Σχήμα 5.11: Κοινή Συμβολή: Αποτελέσματα EENS για 35 Κλιματικά Έτη

Η ικανότητα συνεισφοράς που επιφέρει η προτεινόμενη μέθοδος, εφαρμοσμένη στο σύνολο των ΥΗΣ, κυμαίνεται μεταξύ των αντίστοιχων τιμών Capacity Value των προηγούμενων μοντελοποιήσεων. Αυτό οφείλεται στο συνδυασμό των δύο ειδών ΥΗΣ. Όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη υποενότητα, οι ενεργειακοί τους περιορισμοί αποτυπώνονται στον υπολογισμό του Capacity Value, μειώνοντάς την ικανότητα συνεισφοράς, και επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο το αποτέλεσμα που προκύπτει στην κοινή μοντελοποίηση. Ωστόσο, η μέση τιμή του Capacity Value της κοινής μοντελοποίησης (92%) των ΥΗΣ τείνει περισσότερο προς την αντίστοιχη τιμή της μοντελοποίησης των HPP Reservoir (93%), αντί της τιμής της μοντελοποίησης των Open-Loop PSH (87%), το οποίο οφείλεται στο ότι το συγκεκριμένο είδος ΥΗΣ καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του συνόλου της υδροηλεκτρικής ισχύος (77%).



Σχήμα 5.12: Κοινή Συμβολή: Αποτελέσματα Capacity Value για 35 Κλιματικά Έτη

Το ακόλουθο Σχήμα 5.13 αναπαριστά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου στην κοινή μοντελοποίηση των δύο ΥΗΣ. Η ανακατανομή της λειτουργίας τους επιτυγχάνει την εξάλειψη όλων των ωρών ανεπάρκειας. Τις επόμενες ώρες, ακολουθεί η αποκατάσταση της στάθμης του ταμιευτήρα κάθε ΥΗΣ, με τους HPP Reservoir να περιορίζουν την παραγωγή ισχύος (Σχήμα 5.13γ') και τους Open-loop PSH να περνούν στη λειτουργία της άντλησης (Σχήμα 5.13δ').



Σχήμα 5.13: Παράδειγμα Λειτουργίας Συστήματος λόγω Κοινής Συμβολής στην Επάρκεια Ισχύος

Από τα αποτελέσματα των τριών εφαρμογών εξάγεται το συμπέρασμα πως, η ανακατανομή της λειτουργίας των ΥΗΣ σε πραγματικό χρόνο, τους καθιστά πολύ πιο αποδοτικούς σε σύγκριση με την προγραμματισμένη λειτουργία από τη σκοπιά της αξιοπιστίας του ΣΗΕ. Αυτό αποδεικνύεται από την επίτευξη χαμηλότερων δεικτών επάρκειας σε όλες τις περιπτώσεις, για κάθε κλιματικό έτος, αλλά και σταθερά υψηλών τιμών στην ικανότητα συνεισφοράς ισχύος. Ο λόγος έγκειται στην ικανότητα της προτεινόμενης μεθόδου, να εξετάζει το σύστημα σε πραγματικό χρόνο (κάθε ώρα) και να τροποποιεί κατάλληλα τη λειτουργία των ΥΗΣ, όποτε παρουσιάζεται κίνδυνος ανεπάρκειας. Παράλληλα, τις ώρες, κατά τις οποίες το ΣΗΕ δεν

αντιμετωπίζει ζήτημα μη κάλυψης της ζήτησης, οι ΥΗΣ ακολουθούν το προγραμματισμένο προφίλ λειτουργίας τους. Αυτό εξασφαλίζει τη λειτουργία τους με άξονα τον συνδυασμό της αρχής της οικονομικότητας και της εξασφάλισης επάρκειας ισχύος του ΣΗΕ, γεγονός που αντιπροσωπεύει την λειτουργία των ΥΗΣ στον πραγματικό κόσμο.

5.2 Μεθοδολογία προς Σύγκριση - Τεχνική Αποκοπής Αιχμών

Στην παρούσα Ενότητα παρουσιάζεται μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία μοντελοποίησης των ΥΗΣ με γνώμονα την επάρκεια ισχύος του συστήματος, η τεχνική Αποκοπής Αιχμών (Peak Shaving). Παρατίθεται η αρχή υλοποίησης της μεθόδου, η οποία στη συνέχεια εφαρμόζεται στο σύστημα αναφοράς των 35 κλιματικών ετών, που εισήχθη στην προηγούμενη Ενότητα. Κατόπιν, υλοποιείται η μελέτη επάρκειας του ΣΗΕ και εξάγονται οι δείκτες επάρκειας και η ικανότητα συνεισφοράς ισχύος των ΥΗΣ. Η μέθοδος Peak Shaving συγκρίνεται με την προτεινόμενη μεθοδολογία τόσο ως προς τις παραμέτρους και παραδοχές που λαμβάνει υπόψιν κατά τη μοντελοποίηση των ΥΗΣ, όσο και ως προς τα τελικά αποτελέσματα που επιφέρει.

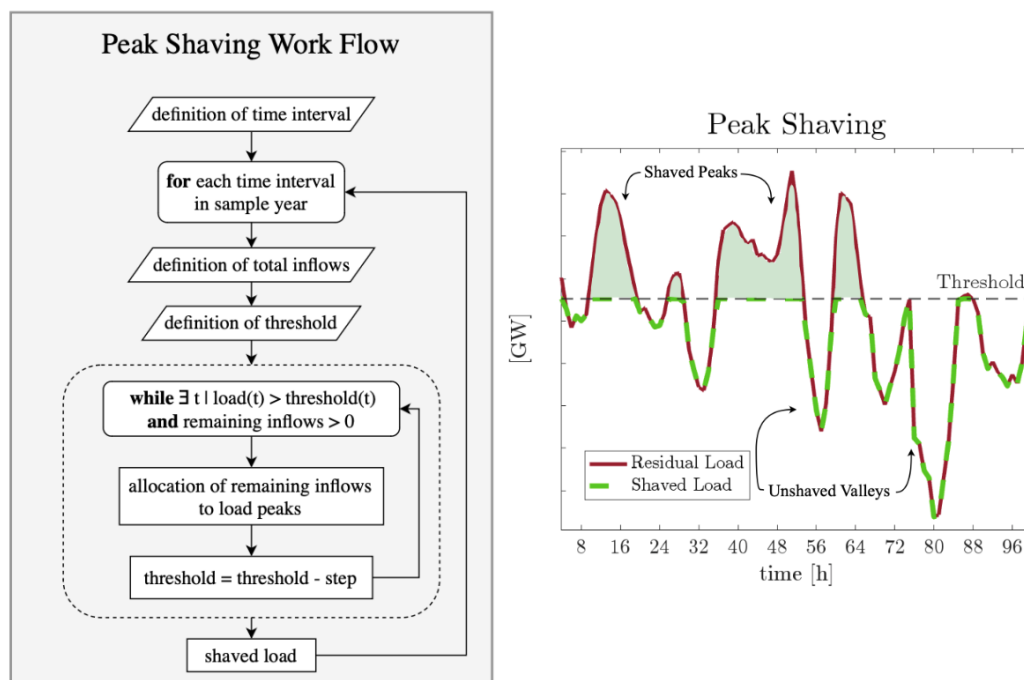
Η λογική της τεχνικής Peak Shaving βασίζεται στην ένταξη των ΥΗΣ ως μονάδες αιχμής στο υπό εξέταση ΣΗΕ. Αυτό συνεπάγεται τη λειτουργία τους με αποκλειστικό σκοπό τη συμβολή στην επάρκεια του συστήματος. Ως εκ τούτου, η παραγωγή των σταθμών προγραμματίζεται για τις περιόδους, κατά τις οποίες το ΣΗΕ ενδέχεται να αντιμετωπίσει ζητήματα ανεπάρκειας. Σύμφωνα με τη δεδομένη τεχνική, τέτοιες περίοδοι είναι οι αιχμές του φορτίου ζήτησης, καθώς αξιολογούνται ως οι πιο πιθανές χρονικές στιγμές αδυναμίας ικανοποίησης της ζήτησης. Έτσι, στη μέθοδο Peak Shaving, οι υδρολογικές εισροές των ΥΗΣ κατανομούνται στις αιχμές του φορτίου. Με τον τρόπο αυτό, ενσωματώνεται η λειτουργία τους στη χρονοσειρά του φορτίου και προκύπτει μια νέα, τροποποιημένη χρονοσειρά της ζήτησης, στην οποία οι αιχμές έχουν "ξυριστεί" (Shaved Load).

Η συγκεκριμένη τεχνική, όπως αναφέρεται και στην Ενότητα 3.5, υλοποιείται ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα εντός του συνολικού ορίζοντα της μελέτης επάρκειας. Στις βιβλιογραφικές αναφορές, τα χρονικά διαστήματα εφαρμογής του Peak Shaving που συναντώνται είναι η εβδομάδα, ο μήνας και το έτος. Στο επιλεγμένο χρονικό διάστημα της υλοποίησης, οι υδρολογικές εισροές των ΥΗΣ θεωρούνται γνωστές και διαθέσιμες για να κατανεμηθούν κατά βούληση στις αιχμές της χρονοσειράς του φορτίου. Κατά τη διαδικασία κατανομής των εισροών στις ώρες αιχμής, ο μοναδικός περιορισμός που λαμβάνεται υπόψιν, είναι η μέγιστη ωριαία ισχύς εξόδου του ΥΗΣ.

Το Σχήμα 5.14 περιγράφει τον τρόπο υλοποίησης της τεχνικής Peak Shaving και την εξαγωγή του Shaved Load.

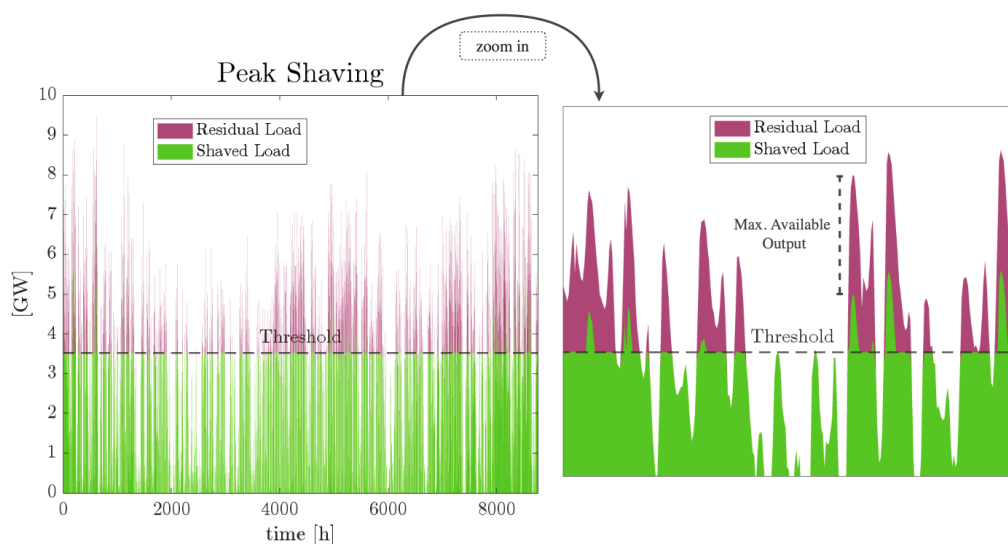
Όσον αφορά τη διαδικασία υπολογισμού, αρχικά επιλέγεται το χρονικό διάστημα εφαρμογής της μεθόδου. Για κάθε ένα από αυτά τα διαστήματα, εφαρμόζεται η ίδια επαναληπτική διαδικασία, μέχρι το τέλος του συνολικού ορίζοντα της μελέτης επάρκειας. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία αφορά την κατανομή των εισροών στις αιχμές του φορτίου και εξασφαλίζει την τήρηση των εξής περιορισμών: της μέγιστης ωριαίας ισχύος εξόδου του ΥΗΣ της κατανομής των εισροών που αντιστοιχούν στο δεδομένο διάστημα εφαρμογής. Η κατανομή πραγματοποιείται σταδιακά, εκκινώντας από τις υψηλές τιμές του φορτίου μέσα στο ορισμένο διάστημα εφαρμογής, και συνεχίζει προς τις χαμηλότερες, μέχρι να μηδενιστούν οι εισροές. Σε κάθε αιχμή της χρονοσειράς του φορτίου, εγγέεται ισχύς ίση με τη μικρότερη τιμή εκ των ακόλουθων: των εισροών που απομένουν ή της μέγιστης ωριαίας ισχύος. Μέσω της διαδικασίας αυτής προκύπτει ένα κατώφλι ισχύος (Threshold), το οποίο καθορίζει τις ώρες αιχμής του φορτίου εντός του χρονικού διαστήματος και σηματοδοτεί κατά πόσο έχει

ξυριστεί η αρχική χρονοσειρά του φορτίου (Residual Load).



Σχήμα 5.14: Διαδικασία Υπολογισμού Peak Shaving

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 5.15, υπάρχουν ώρες, στις οποίες το Shaved Load υπερβαίνει το Threshold, υποδηλώνοντας ότι ο ΥΗΣ, τις ώρες αυτές, έχει παράξει τη μέγιστη ωριαία ισχύ του.



Σχήμα 5.15: Αναπαράσταση Χρονοσειράς Φορτίου μετά την Εφαρμογή του Peak Shaving

Μετά την εξαγωγή του Shaved Load πραγματοποιείται η σύγκρισή του με τη χρονοσειρά της παραγωγής και υπολογίζονται οι δείκτες επάρκειας, σύμφωνα με τη μελέτη επάρκειας που ακολουθείται στην παρούσα εργασία.

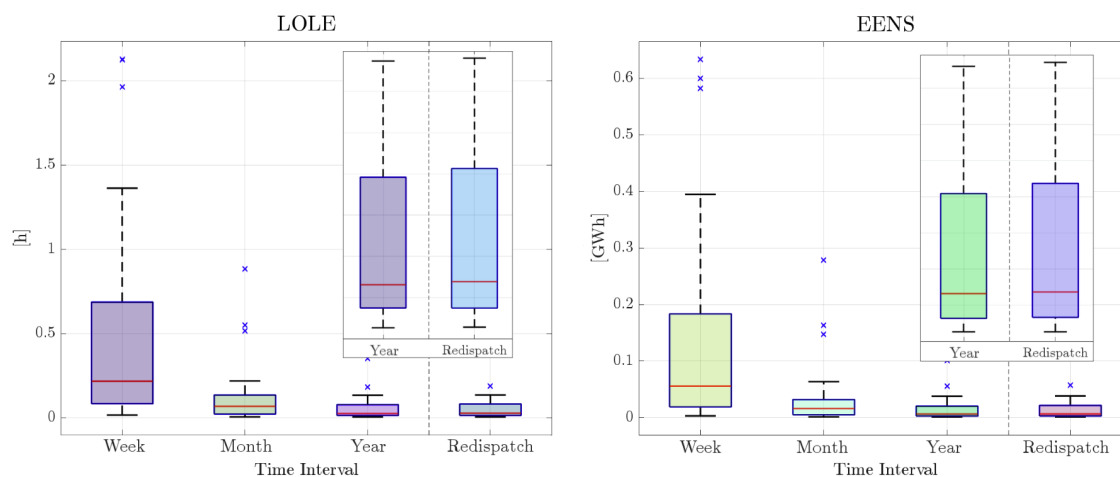
Στην υλοποίηση του Peak Shaving που πραγματοποιείται στο πλαίσιο της εργασίας, έχουν συνυπολογιστεί οι χρονοσειρές διαθεσιμότητας των ΥΗΣ. Αυτή η θεώρηση δεν συνα-

ντάται στις βιβλιογραφικές αναφορές, αλλά πραγματοποιείται εντός της ανάλυσης, προκειμένου να εξασφαλιστεί κοινή βάση σύγκρισης μεταξύ των αποτελεσμάτων του Peak Shaving και του Redispatch. Συνεπώς κάθε ώρα εντός του χρονικού οριζοντα της μελέτης επάρκειας, οι ΥΗΣ δύνανται να συμβάλουν έως τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ τους.

Στο Σχήμα 5.16 παρατίθενται τα αποτελέσματα της τεχνικής Peak Shaving, για τα τρία διαφορετικά χρονικά διαστήματα εφαρμογής που αναφέρθηκαν - εβδομάδα (168h), μήνας (730h) και έτος (8760h) -, συγκρίνοντάς τα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του Redispatch. Η μέθοδος εφαρμόστηκε στο ίδιο σύστημα αναφοράς των 35 κλιματικών ετών, όπως και η προτεινόμενη μεθοδολογία.

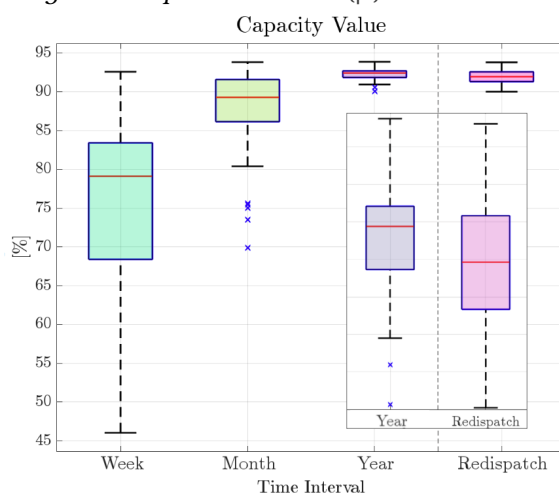
Αρχικά, παρατηρείται, πως όσο αυξάνεται το χρονικό διάστημα εφαρμογής του Peak Shaving, τόσο βελτιωμένοι είναι οι δείκτες επάρκειας και η ικανότητα συνεισφοράς ισχύος των ΥΗΣ. Αυτό εξηγείται ως εξής: όσο μεγαλύτερο το διάστημα εφαρμογής (ιδίως όταν ταυτίζεται με τον χρονικό οριζοντα της μελέτης), τόσο μεγαλύτερο το ποσό των εισροών προς διαχείριση. Αντίστοιχα, αυξάνεται και η πληροφορία που διαθέτει ο αλγόριθμος υπολογισμού σχετικά με το πλήθος και τη θέση των αιχμών του φορτίου μέσα στο έτος - π.χ., σε ετήσιο διάστημα εφαρμογής του Peak Shaving, είναι γνωστές εξ αρχής όλες οι αιχμές του χρόνου και όλη η διαθέσιμη ενέργεια. Ως εκ τούτου, οι εισροές κατανέμονται κατά βέλτιστο τρόπο στις υψηλότερες ώρες ζήτησης του έτους. Αντίστοιχα, όσο μικραίνει ο χρονικός οριζοντας, τόσο πιο περιορισμένες είναι οι διαθέσιμες υδρολογικές εισροές, σε συνδυασμό με το συρρικνωμένο πεδίο εφαρμογής της μεθόδου. Συνεπώς, ο αλγόριθμος έχει σημαντικά λιγότερη ευελιξία ως προς την κατανομή των εισροών στις κατάλληλες ώρες. Για παράδειγμα, σε εβδομαδιαίο διάστημα υλοποίησης Peak Shaving, στην περίπτωση μιας εβδομάδας υψηλών συνολικών εισροών, αλλά χαμηλού φορτίου, όλη η εισερχόμενη ενέργεια αναγκαστικά θα διανεμηθεί στη δεδομένη χρονική περίοδο. Αντιθέτως, εάν την εβδομάδα που παρουσιάζεται η ετήσια αιχμή της ζήτησης, οι εισροές είναι χαμηλές, τότε η παραγωγή των ΥΗΣ θα την ξυρίσει σε πολύ μικρό βαθμό.

Από την παραπάνω ανάλυση των αποτελεσμάτων, καθίσταται σαφής η παράλειψη βασικών παραμέτρων λειτουργίας των ΥΗΣ, οδηγώντας σε μη ρεαλιστική προσομοίωση της λειτουργίας τους, και, κατ' επέκταση μη αντιπροσωπευτικούς δείκτες επάρκειας και ικανότητα συμβολής ισχύος. Οι δύο βασικοί παράγοντες που αγνοούνται κατά τη διαδικασία κατανομής των εισροών των ΥΗΣ στις ώρες αιχμής του φορτίου είναι η χωρητικότητα των ταμειυτήρων τους και ο χρονισμός των υδρολογικών εισροών.



(α) LOLE | Peak Shaving vs Redispatch

(β) EENS | Peak Shaving vs Redispatch



(γ) Capacity Value | Peak Shaving vs Redispatch

Σχήμα 5.16: Αποτελέσματα Peak Shaving για Διαφορετικά Χρονικά Διαστήματα Εφαρμογής

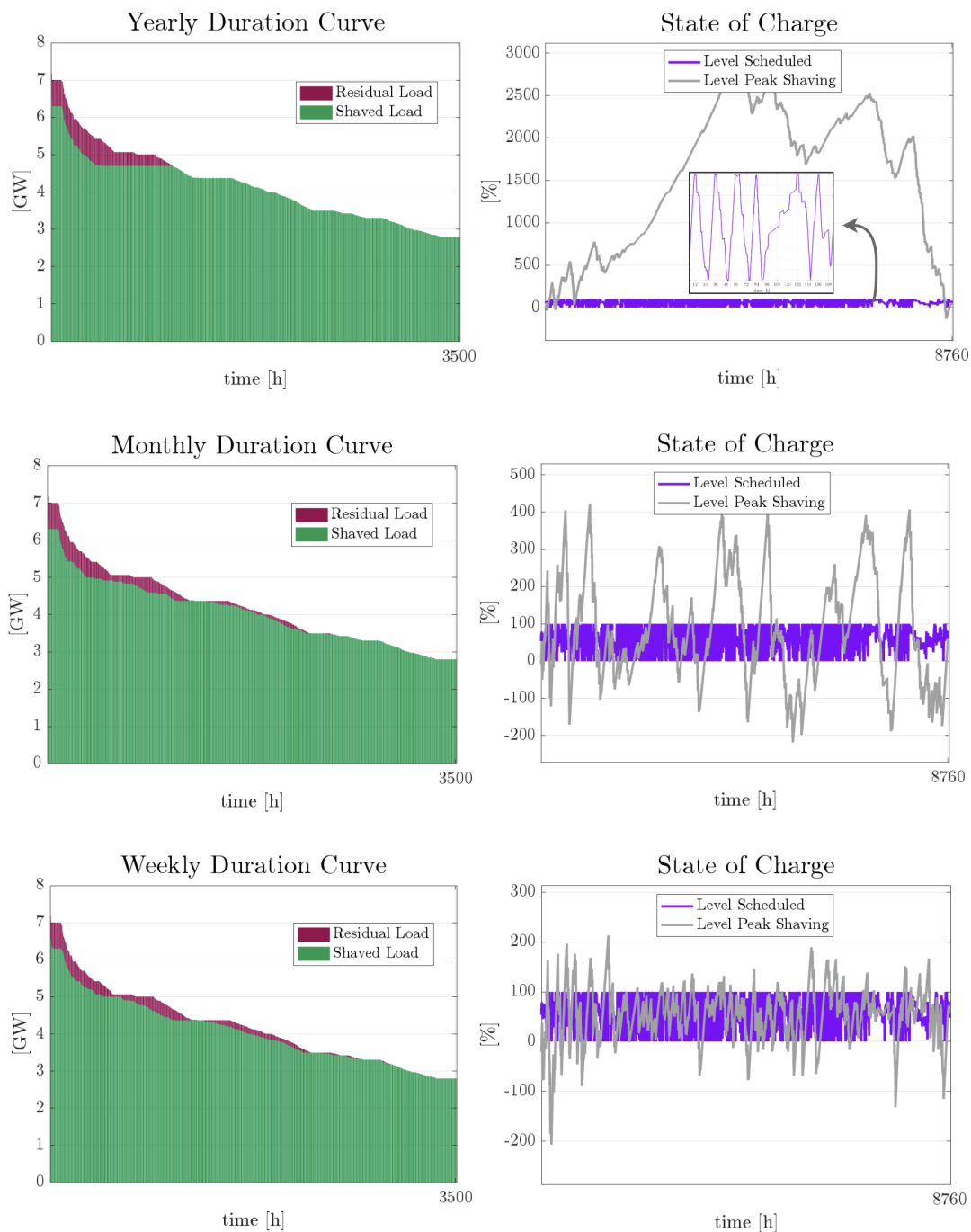
Αναφορικά με τις υδρολογικές εισροές των σταθμών, η τεχνική Peak Shaving τις θεωρεί γνωστές και διαθέσιμες προς κατανομή εντός του εξεταζόμενου χρονικού διαστήματος - παρότι στην πραγματικότητα αυτές εισρέουν με ακανόνιστο τρόπο στους ταμιευτήρες των ΥΗΣ. Αυτή η παραδοχή ελοχεύει τον κίνδυνο κατανομής ενέργειας, την οποία οι ΥΗΣ δεν διαθέτουν, οδηγώντας έτσι σε υπερδιαστασιολόγηση των σταθμών. Όσο αυξάνεται το διάστημα εφαρμογής της μεθόδου, τόσο πιο ανορθολογική καθίσταται η προσομοίωση της παραγωγής των ΥΗΣ, εξαιτίας της αγνόησης της χρονικότητας των εισροών και κατά συνέπεια, του διαθέσιμου ενεργειακού τους περιεχομένου.

Αντίστοιχη υπερτίμηση των δυνατοτήτων των ΥΗΣ επιφέρει και η παράλειψη του περιορισμού της χωρητικότητας των σταθμών. Στην τεχνική Peak Shaving δεν υπεισέρχεται με κανέναν τρόπο ο έλεγχος του ενεργειακού επιπέδου των ΥΗΣ ως προς τη μέγιστη ή ελάχιστη επιτρεπτή στάθμη του ταμιευτήρα τους. Η συγκεκριμένη παράλειψη φαίνεται να επηρεάζει περισσότερο τους ΥΗΣ μικρής χωρητικότητας, - τους Open-loop PSH στην προκειμένη μελέτη -, με αποτέλεσμα, με την εφαρμογή της τεχνικής Peak Shaving, η στάθμη του ταμιευτήρα τους να λαμβάνει τιμές που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Το Σχήμα

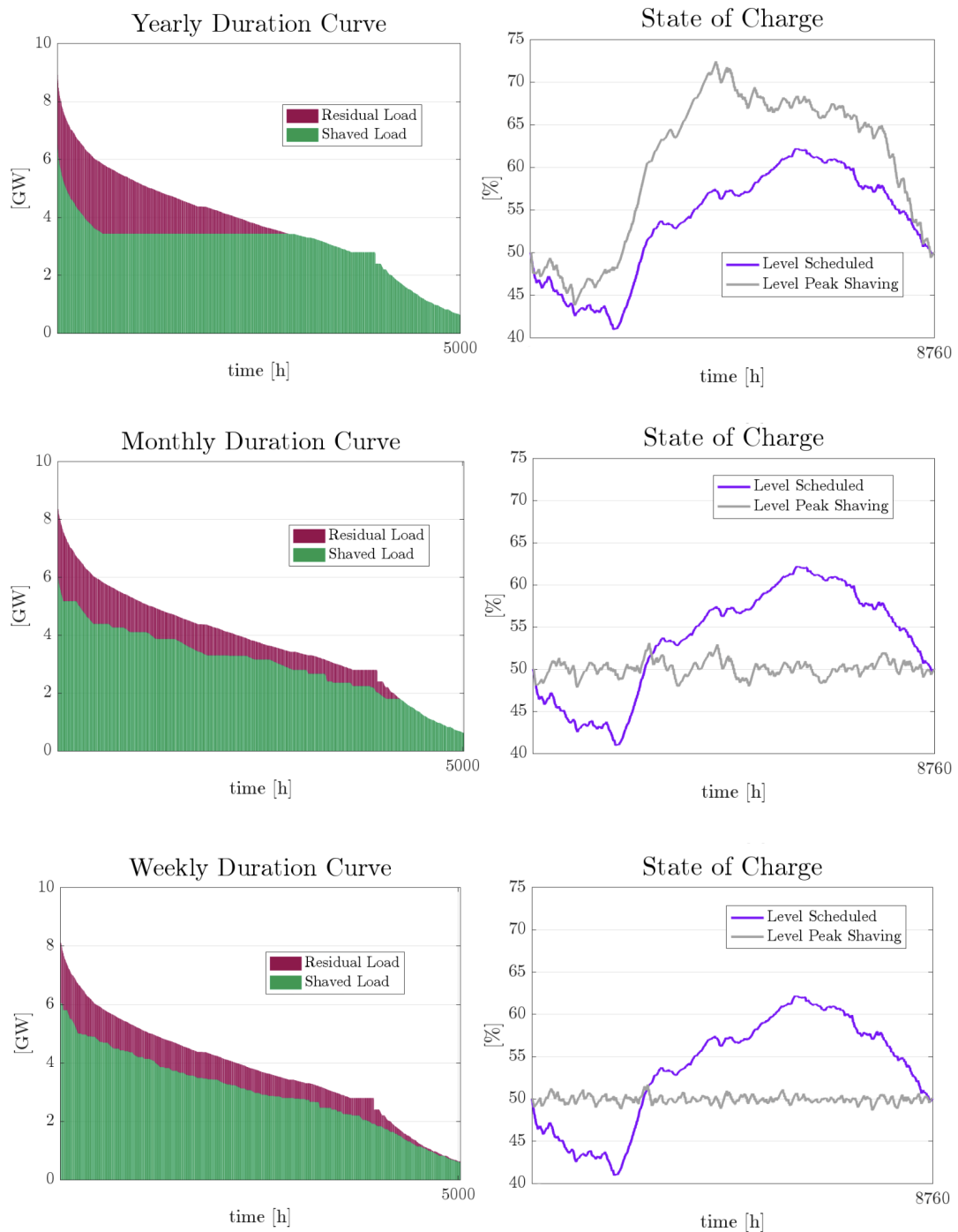
5.17 απεικονίζει αυτή την παραβίαση των ενεργειακών περιορισμών των ΥΗΣ στην περίπτωση των Open-loop PSH.

Όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 5.17, όσο μειώνεται το χρονικό διάστημα εφαρμογής της μεθόδου, η χρονοσειρά της στάθμης φόρτισης των Open-loop PSH με χρήση του Peak Shaving κυμαίνεται πιο κοντά προς τα όρια της στάθμης του ταμιευτήρα τους, χωρίς ωστόσο να καταφέρνει να την προσεγγίσει, για τα δεδομένα χρονικά διαστήματα εφαρμογής. Επισημαίνεται πως οι καμπύλες διάρκειας φορτίου αναπαριστώνται μερικώς, καθώς η υπόλοιπη εικόνα του διαγράμματος είναι κοινή για τις τρεις περιπτώσεις και αφορά τιμές της χρονοσειράς του φορτίου που δεν εξομαλύνονται.

Όσον αφορά τη λειτουργία των HPP Reservoir βάσει του Peak Shaving, η χρονοσειρά της στάθμης φόρτισης φαίνεται να λαμβάνει αποδεκτές τιμές ως προς το μέγεθος του ταμιευτήρα τους, όπως αναπαρίσταται στα δεξιά διαγράμματα του Σχήματος 5.18. Αυτό οφείλεται στη σημαντικά μεγάλη χωρητικότητα του αθροιστικού ταμιευτήρα των HPP Reservoir, η οποία επιτρέπει την υιοθέτηση ανορθόδοξων πολιτικών διαχείρισης της αποθηκευμένης ενέργειας. Όσο μικραίνουν τα διαστήματα εφαρμογής του Peak Shaving, τόσο αποκλίνουν οι χρονοσειρές φόρτισης από την προγραμματισμένη καμπύλη λειτουργίας, γεγονός που υποδηλώνει, πως δεν λαμβάνεται υπόψιν το ετήσιο προφίλ των υδρολογικών εισροών και το εύρος της αποθηκευτικής ικανότητας των HPP Reservoir με στόχο τη βέλτιστη διαχείριση της εισερχόμενης ενέργειας. Αυτό αναδεικνύει την αδυναμία του Peak Shaving να αξιολογήσει και να εκμεταλλευτεί το δυναμικό των HPP Reservoir, όταν υλοποιείται σε μικρότερα διαστήματα, τα οποία ωστόσο αποτελούν πιο ρεαλιστικές επιλογές μοντελοποίησης όσον αφορά το χρονισμό των υδρολογικών εισροών.

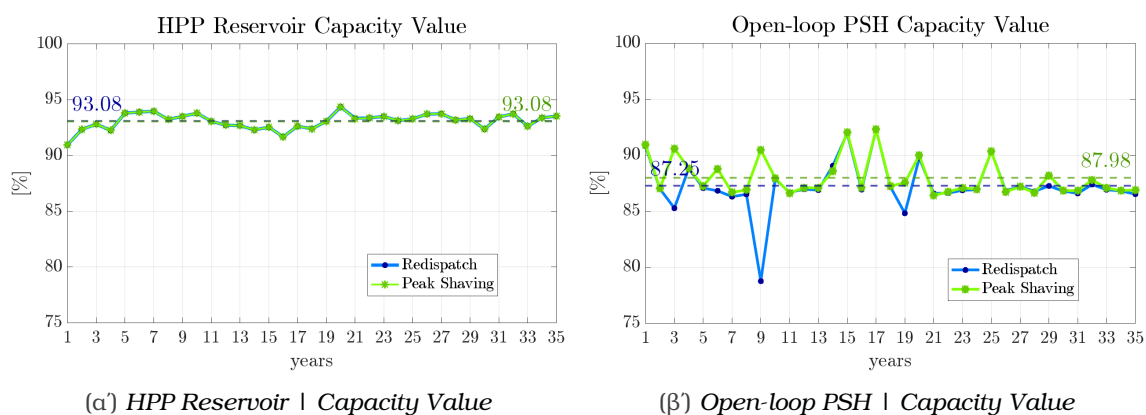


Σχήμα 5.17: Καμπύλες Διάρκειας Φορτίου και Καμπύλες Λειτουργίας των Open-loop PSH για Διαφορετικά Χρονικά Διαστήματα Εφαρμογής της Τεχνικής Peak Shaving



Σχήμα 5.18: Καμπύλες Διάρκειας Φορτίου και Καμπύλες Λειτουργίας των HPP Reservoir για Διαφορετικά Χρονικά Διαστήματα Εφαρμογής της Τεχνικής Peak Shaving

Η παράλειψη των τεχνικών και λειτουργικών περιορισμών των ΥΗΣ στην διαδικασία υπολογισμού της συνεισφοράς τους στην επάρκεια ισχύος, είναι ο λόγος που η τεχνική Peak Shaving επιφέρει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα από το Redispatch, όταν υλοποιείται σε ετήσιο χρονικό ορίζοντα, όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 5.16. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν την εφαρμογή των δύο μεθόδων - προτεινόμενη και συγκρινόμενη μεθοδολογία - στο μοντέλο της από κοινού συμβολής των δύο ειδών ΥΗΣ στην επάρκεια του ΣΗΕ. Στη μοντελοποίηση των HPP Reservoir, οι δείκτες επάρκειας του Peak Shaving δεν είναι σε καμία περίπτωση χαμηλότεροι από τους αντίστοιχους του Redispatch - αντίστοιχα, η ικανότητα συνεισφοράς των ΥΗΣ δεν λαμβάνει υψηλότερες τιμές για κανένα κλιματικό έτος. Αυτό συμβαίνει, καθώς οι HPP Reservoir δεν αντιμετωπίζουν κίνδυνο μηδενισμού του ενεργειακού τους περιεχομένου. Αυτό τους επιτρέπει είτε να παράγουν είτε να βρίσκονται σε ηρεμία για πολλές συνεχόμενες ώρες, χωρίς να κινδυνεύουν από μηδενισμό ή υπερχειλίση του ταμιευτήρα τους, αντίστοιχα. Οι Open-loop PSH, αντιθέτως, περιορίζονται από τα όρια της ενεργειακής τους στάθμης και δεν διαθέτουν τόση ευελιξία ως προς τη διαχείριση των υδρολογικών εισροών τους. Το Σχήμα 5.19 αναπαριστά την ικανότητα συνεισφοράς ισχύος ξεχωριστά για τα δύο είδη ΥΗΣ - όπως αυτή προκύπτει από τις διακριτές τους μοντελοποιήσεις - και επιβεβαιώνει όσα αναφέρονται παραπάνω. Το χρονικό διάστημα εφαρμογής του Peak Shaving είναι ίσο με ένα έτος.

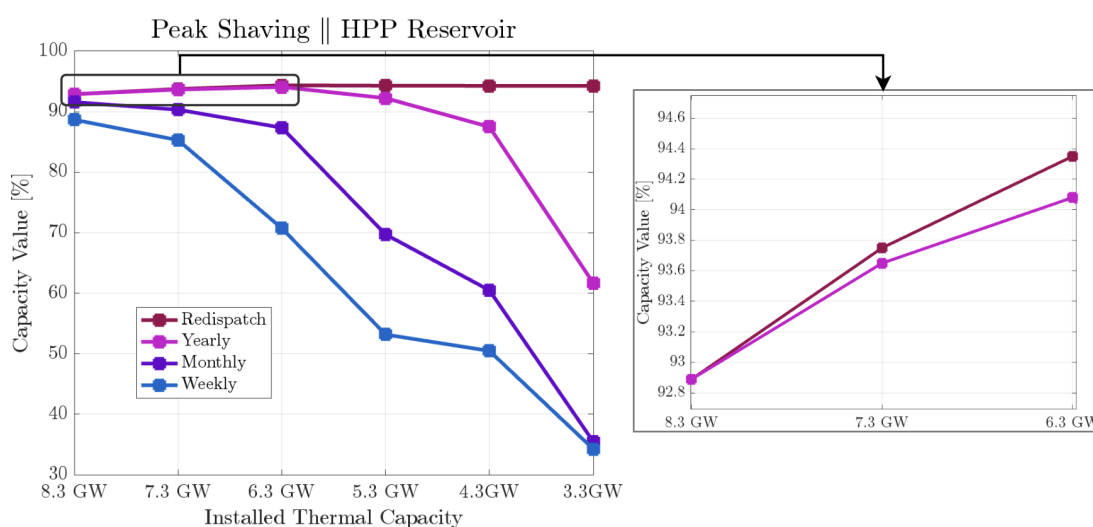


Σχήμα 5.19: Σύγκριση Τιμών Capacity Value μεταξύ Peak Shaving και Redispatch ανά είδος ΥΗΣ

Διαπιστώνεται πως το Capacity Value των HPP Reservoir λαμβάνει τις ίδιες τιμές και στις δύο μεθόδους μοντελοποίησης. Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της μεθόδου του Peak Shaving, - πέραν της υπερτίμησης των δυνατοτήτων των ΥΗΣ -, αυτή οφείλεται στο εν γένει υψηλό επίπεδο επάρκειας του εξεταζόμενου ΣΗΕ. Σε σχετικά επαρκή ΣΗΕ, τα οποία σπάνια αντιμετωπίζουν γεγονότα ανεπάρκειας, είναι αναμενόμενο πως αυτά θα συμβούν, κατά την πλειονότητά τους, σε ώρες αιχμής του φορτίου. Ωστόσο, η παραδοχή αυτή δεν αποτελεί κανόνα. Όσο μειώνεται το επίπεδο επάρκειας του υπό μελέτη ΣΗΕ, ζητήματα ανεπάρκειας εμφανίζονται, και σε χαμηλότερες τιμές της χρονοσειράς του φορτίου. Τέτοιου είδους συμβάντα ανεπάρκειας δεν ανιχνεύονται, και κατ' επέκταση δεν εξαλείφονται, από τη τεχνική Peak Shaving, εξαιτίας του ότι βρίσκονται σε χαμηλότερα τιμές του φορτίου, οι οποίες δεν εξομαλύνονται. Σε αυτές τις περιπτώσεις, γίνεται αντιληπτός ο ντερερμινιστικός

και απλουστευτικός χαρακτήρας του Peak Shaving. Αντιθέτως, η προτεινόμενη μεθοδολογία δύναται να αντιμετωπίσει οποιοδήποτε γεγονός ανεπάρκειας, χάρη στον έλεγχο επάρκειας και στην αναπροσαρμογή της λειτουργίας των ΥΗΣ που πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο εντός της μελέτης επάρκειας.

Αυτή η ιδιότητα αναδεικνύεται στο Σχήμα 5.20, όπου εξετάζεται η ικανότητα συνεισφοράς ισχύος των HPP Reservoir για διαφορετικά επίπεδα επάρκειας του ΣΗΕ και σε διαφορετικά διαστήματα εφαρμογής του Peak Shaving. Διαπιστώνεται πως, όσο πιο ανεπαρκές είναι το ΣΗΕ, τόσο μεγαλύτερη βελτίωση επιφέρει το Redispatch σε σχέση με το ετήσιο Peak Shaving. Η συγκεκριμένη διερεύνηση σε ΣΗΕ διαφορετικού επιπέδου επάρκειας αποδεικνύει, πως η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου οδηγεί σε υψηλότερη συμβολή ισχύος των ΥΗΣ, ακόμη και σε σύγκριση με μια τεχνική, που υπερτιμά τις ικανότητες των ΥΗΣ και αγνοεί κύριους περιορισμούς τους.

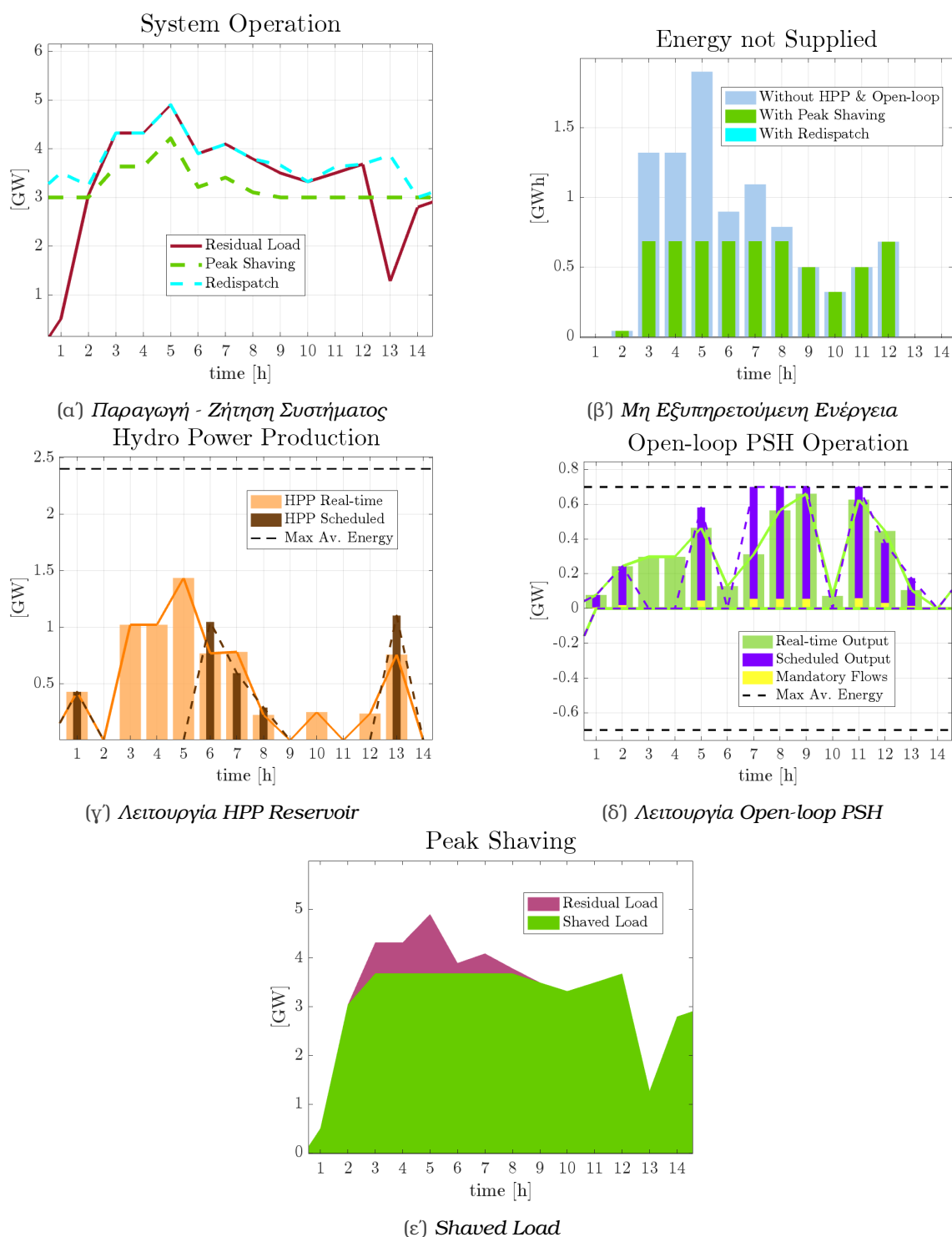


Σχήμα 5.20: Αποτελέσματα Capacity Value των HPP Reservoir για Διαφορετικά Επίπεδα Επάρκειας ΣΗΕ ανά Χρονικό Διάστημα Εφαρμογής Peak Shaving

Το παράδειγμα του Σχήματος 5.21 αποτελεί μια τέτοιου είδους περίπτωση, όπου το συμβάν ανεπάρκειας παρατηρείται σε σχετικά χαμηλή τιμή του φορτίου, με αποτέλεσμα η τεχνική Peak Shaving να αδυνατεί να το εξαλείψει.

Το απεικονιζόμενο σύστημα αποτελεί μια παραλλαγή του υφιστάμενου ΣΗΕ, από το οποίο έχουν αφαιρεθεί 3 GW εγκατεστημένης θερμικής ισχύος. Η λειτουργία του ΣΗΕ αντιστοιχεί στο κλιματικό έτος 2005, τα χαρακτηριστικά του οποίου βρίσκονται κοντά στις μέσες τιμές των δεδομένων των κλιματικών ετών.

Πρόκειται για μια επιτυχή αντιμετώπιση ενός γεγονότος ανεπάρκειας με εφαρμογή της μεθόδου Redispatch, όπου τα δύο είδη ΥΗΣ από κοινού συνεισφέρουν στο ΣΗΕ, ανάλογα με την εγκατεστημένη τους ισχύ. Αντιθέτως, το σύστημα αδυνατεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση στην περίπτωση της υλοποίησης με χρήση της τεχνικής Peak Shaving, προκαλώντας αύξηση κατά 11 ώρες στο σύνολο του ετήσιου μη εξυπηρετούμενου φορτίου. Παρά το γεγονός πως έχει κατανεμηθεί μία ποσότητα εισροών των ΥΗΣ στις πρώτες ώρες της ανεπάρκειας, αυτή φαίνεται πως δεν αρκεί για να αποφευχθεί η επικείμενη απώλεια φορτίου.



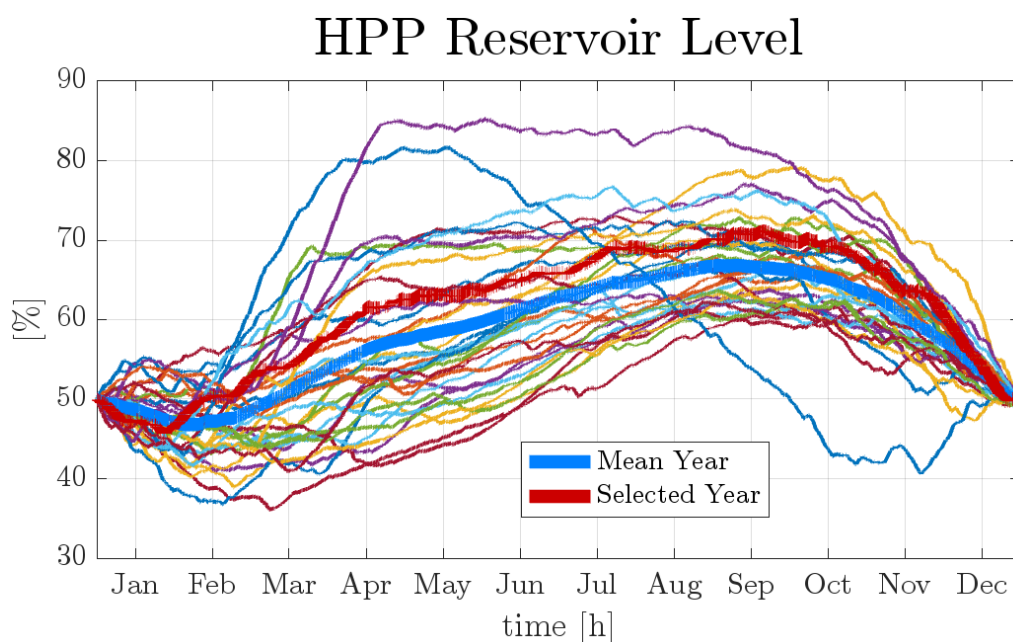
Σχήμα 5.21: Παράδειγμα Σύγκρισης της Λειτουργίας των ΥΗΣ μέσω Peak Shaving και Redispatch

Μέσω της παράθεσης της διαδικασίας υπολογισμού της τεχνικής Peak Shaving, γίνεται αντιληπτή η ελλιπής μοντελοποίηση στοιχειωδών παραμέτρων των ΥΗΣ, με αποτέλεσμα οι εξαγόμενοι δείκτες επάρκειας να μην ανταποκρίνονται στη ρεαλιστική συμπεριφορά τους. Πέραν της παράλειψης των ενεργειακών τους περιορισμών και των μη προγραμματισμένων βλαβών, το Peak Shaving αγνοεί την οικονομική διάσταση της λειτουργίας των ΥΗΣ, προγραμματίζοντας τους να συμβάλλουν αποκλειστικά με γνώμονα την επάρκεια του ΣΗΕ. Ακόμη, δεν λαμβάνει υπόψιν λοιπές λειτουργηκότητες των ΥΗΣ, οι οποίες συνοψίζονται στον όρο των υποχρεωτικών νερών, τα οποία οφείλουν να παρέχουν οι ΥΗΣ στο ΣΗΕ ανεξάρτητα από το προγραμματισμένο προφίλ λειτουργίας τους. Σε συνδυασμό με την απλουστευτική παραδοχή αναφορικά με τις πιθανές ώρες εμφάνισης ανεπάρκειας, αποτελεί μια τεχνική, που αντιμετωπίζει μονοδιάστατα το ζήτημα της ένταξης των ΥΗΣ στη μελέτη επάρκειας ισχύος. Η επιλογή μικρότερων διαστημάτων εφαρμογής της μεθόδου φαίνεται να ενσωματώνει με έναν πιο αληθοφανή τρόπο τον χρονισμό των εισροών, αλλά, και πάλι, δεν προσομοιώνει επαρκώς όλους τους παράγοντες που καθορίζουν τη λειτουργία των ΥΗΣ, ενώ οδηγεί και σε μικρότερη συμβολή των ΥΗΣ στην επάρκεια σε σχέση με την προτεινόμενη μέθοδο.

5.3 Παραλλαγές Εγκατεστημένης Υδροηλεκτρικής Παραγωγής

Σε αυτή την Ενότητα διερευνάται η αύξηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής ανά τεχνολογία ΥΗΣ. Στόχος αυτής της διερεύνησης είναι η αξιολόγηση της επίδρασης κάθε είδους ΥΗΣ στην περαιτέρω βελτίωση του επιπέδου επάρκειας του συστήματος, σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο μοντελοποίησης. Αρχικά παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που επιφέρει η προσθήκη κάθε τεχνολογίας ΥΗΣ στο ίδιο σύστημα αναφοράς. Στη συνέχεια, εξετάζεται η προσθήκη ΥΗΣ σε ΣΗΕ χαμηλότερου επιπέδου επάρκειας, σε σχέση με το σύστημα αναφοράς, με σκοπό να αξιολογηθεί η συμβολή τους στη μείωση διαφορετικών αρχικών δεικτών επάρκειας.

Η διερεύνηση εφαρμόζεται σε ένα κλιματικό έτος, συγκεκριμένα το 23ο (2004), το οποίο αποτελεί αντιπροσωπευτικό έτος ως προς τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των στοιχείων του ΣΗΕ, τις υδρολογικές εισροές, την καμπύλη λειτουργίας των ΥΗΣ και τον μέσο όρο των δεικτών επάρκειας των 35 κλιματικών ετών. Στο Σχήμα 5.22 παρατίθεται η καμπύλη λειτουργίας των HPP Reservoir του επιλεγμένου έτους (κόκκινη καμπύλη) σε σχέση με τη μέση τιμή όλων των καμπυλών λειτουργίας των 35 κλιματικών ετών (μπλε καμπύλη).



Σχήμα 5.22: Καμπύλη Λειτουργίας HPP Reservoir του 23ου Κλιματικού Έτους

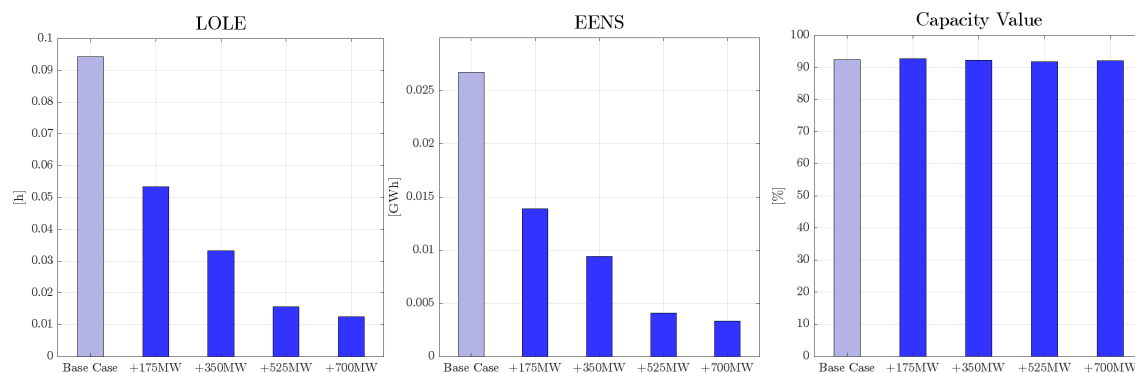
Οι παραλλαγές της υδροηλεκτρικής παραγωγής που εξετάζονται είναι οι ακόλουθες:

- Προσθήκη νέων HPP Reservoir: Πρόκειται για την προσθήκη HPP Reservoir, αυξάνοντας αναλογικά την ισχύ και τη χωρητικότητα τους σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Κατ' αναλογία, αυξάνονται και οι υδρολογικές εισροές.
- Προσθήκη νέων Open-loop PSH: Αφορά την προσθήκη μονάδων Open-loop PSH, με ανάλογη αύξηση των χαρακτηριστικών μεγεθών και των υδρολογικών εισροών.

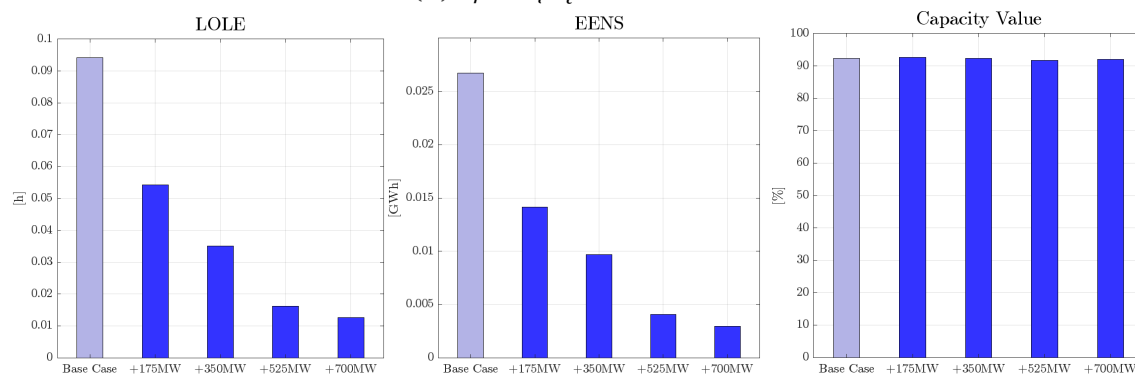
Σημειώνεται ότι κατά το σενάριο προσθήκης ΥΗΣ χωρίς άντληση οι Open-loop PSH παραμένουν όσοι και στο σενάριο αναφοράς, ενώ αντίστροφα, στο σενάριο προσθήκης νέων ΥΗΣ με άντληση οι HPP Reservoir παραμένουν ίσοι με αυτούς του σεναρίου αναφοράς. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται στη μοντελοποίηση της από κοινού συμβολής ισχύος των ΥΗΣ στην επάρκεια του ΣΗΕ και εξάγονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Η προσθήκη ΥΗΣ πραγματοποιείται με βήμα 175MW, για 4 βήματα. Αυτό αντιστοιχεί σε μια τελική αύξηση κατά 700MW, σε σχέση με το σύστημα αναφοράς. Η επιλογή βήματος εξυπηρετεί την ανάγκη αξιολόγησης της τάσης κάθε παραλλαγής.

Αξίζει να σημειωθεί πως σε κάθε βήμα, η συνολική υδροηλεκτρική ισχύς των δύο παραλλαγών είναι η ίδια, στη μια περίπτωση με επιπλέον μονάδες HPP Reservoir, ενώ στην άλλη με επιπλέον Open-loop PSH, σε σχέση με τις αρχικές. Η διαφορά έγκειται στη διαμόρφωση του μείγματος της υδρολογικής παραγωγής. Αυτή η θεώρηση επιτρέπει την ευθεία σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο παραλλαγών, αξιολογώντας τη συνεισφορά κάθε είδους ΥΗΣ στο ίδιο αρχικό επίπεδο επάρκειας του ΣΗΕ.

Το ακόλουθο Σχήμα 5.23 αναπαριστά τους δείκτες επάρκειας στην περίπτωση αύξησης των HPP Reservoir και των Open-loop PSH στο ΣΗΕ αναφοράς. Η εγκατεστημένη θερμική ισχύς του ΣΗΕ (CCGT) ισούται με 8.3GW. Ως Base Case εννοούνται οι τιμές των μεγεθών που έχουν προκύψει από την εφαρμογή του Redispatch στο εξεταζόμενο σύστημα χωρίς προσθήκη νέων ΥΗΣ.



(α) Προσθήκη HPP Reservoir



(β) Προσθήκη Open-loop PSH

Σχήμα 5.23: Προσθήκη ΥΗΣ στο ΣΗΕ - Σενάριο 8.3 GW CCGT

Το υπό μελέτη ΣΗΕ χαρακτηρίζεται από ήδη πολύ χαμηλούς δείκτες επάρκειας (LOLE εκκίνησης < 0.1 ώρες/έτος), οι οποίοι μειώνονται περαιτέρω με την προσθήκη επιπλέον ΥΗΣ.

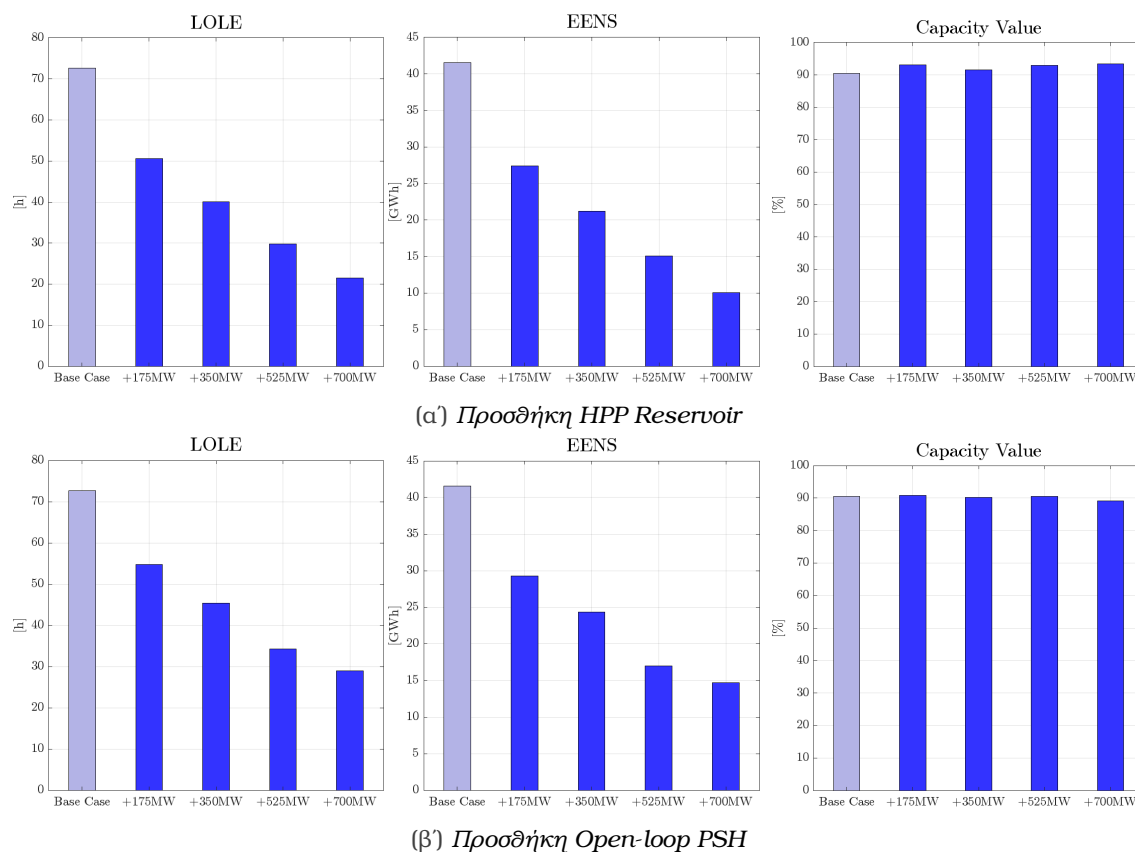
Η βελτίωση του επιπέδου επάρκειας του συστήματος είναι αναμενόμενη, εφόσον προστίθενται μονάδες παραγωγής χωρίς να επηρεάζονται τα υπόλοιπα στοιχεία του ΣΗΕ. Σε σχέση με το αρχικό επίπεδο επάρκειας, οι δύο παραλλαγές επιφέρουν την ίδια μείωση των δεικτών κατά την προσθήκη 700MW υδροηλεκτρικής ισχύος, η οποία αγγίζει το 85% της αρχικής τιμής. Αυτό το πανομοιότυπο αποτέλεσμα μεταξύ των δύο παραλλαγών προσθήκης επιπλέον ΥΗΣ φαίνεται πως οφείλεται στο υψηλό ποσοστό επάρκειας του εξεταζόμενου συστήματος. Σε επαρκή συστήματα, τα γεγονότα ανεπάρκειας είναι περιορισμένα σε πλήθος, μικρού ύψους και συνήθως αραιά μεταξύ τους, γεγονός που επιτρέπει και δύο είδη ΥΗΣ να τα αντιμετωπίζουν εξίσου αποτελεσματικά.

Όσο το ΣΗΕ γίνεται πιο ανεπαρκές, διαπιστώνεται πως διαφέρει η βελτίωση των δεικτών επάρκειας, σε σχέση με το ΣΗΕ αναφοράς, ανάλογα με το είδος ΥΗΣ που προστίθεται. Αυτό οφείλεται στη μειωμένη ικανότητα συμβολής ισχύος των Open-loop PSH, εξαιτίας του περιορισμένου ενεργειακού περιεχομένου τους. Τα ανεπαρκή συστήματα παρουσιάζουν συχνές και μεγάλης διάρκειας ανεπάρκειες, τις οποίες καλούνται να αντιμετωπίσουν οι ΥΗΣ αναπροσαρμόζοντας τη λειτουργία τους. Στην περίπτωση των HPP Reservoir, ο μόνος περιορισμός που υπεισέρχεται κατά τη διαδικασία αύξησης της παραγόμενης ισχύος εξόδου με στόχο την αντιμετώπιση γεγονότων ανεπάρκειας, είναι η μέγιστη διαθέσιμη ωριαία ισχύς εξόδου. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη αθροιστική χωρητικότητα του ταμιευτήρα τους, η οποία επιτρέπει την ευέλικτη διαχείριση των ενεργειακών αποθεμάτων χωρίς σημαντικό κίνδυνο πτώσης της ενεργειακής στάθμης. Αντιθέτως, η ανακατανομή της λειτουργίας των Open-loop PSH επηρεάζεται άμεσα και από την χωρητικότητα του ταμιευτήρα τους, εξαιτίας της μικρής, σχετικά, αποθηκευτικής τους ικανότητας. Σε συχνές, μεγάλου ύψους απαιτήσεις συμβολής ισχύος, οι Open-loop PSH αδυνατούν, μετά από ένα χρονικό σημείο, να συνεισφέρουν στην επάρκεια του ΣΗΕ, λόγω μηδενικού ενεργειακού περιεχομένου. Στην περίπτωση αυτή, η ευθύνη κάλυψης του ζητούμενου ποσού ενέργειας μετατίθεται στους HPP Reservoir. Αυτή η αδυναμία συμβολής ισχύος των Open-loop PSH αντανακλάται στη συνολική ικανότητα συνεισφοράς ισχύος των ΥΗΣ, με αποτέλεσμα αυτή να μειώνεται όσο το ΣΗΕ αντιμετωπίζει περισσότερα ζητήματα ανεπάρκειας.

Προκειμένου να καταστεί σαφής η παραπάνω ανάλυση αναφορικά με την διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων της προσθήκης ΥΗΣ βάσει του επαρκειακού επιπέδου του ΣΗΕ, επιλέγεται η εφαρμογή των δύο παραλλαγών σε πιο ανεπαρκή συστήματα. Το Σχήμα 5.24 αναπαριστά τα αποτελέσματα της προσθήκης των δύο ειδών ΥΗΣ σε ένα σύστημα 5.3GW CCGT, το οποίο έχει προκύψει μέσω της αφαίρεσης 3GW από το αρχικό ΣΗΕ αναφοράς.

Παρατηρείται πως, εκκινώντας από το ίδιο επίπεδο επάρκειας του συστήματος των 5.3 GW (Base Case), η προσθήκη HPP Reservoir επιφέρει πιο βελτιωμένους δείκτες επάρκειας από ότι η προσθήκη Open-loop PSH. Συγκεκριμένα, οι επιπλέον HPP Reservoir καταφέρνουν να μειώσουν τον δείκτη LOLE από τις 73, τελικά, στις 21 ώρες, ενώ οι Open-loop PSH στις 30. Κατ' αντιστοιχία, η προσθήκη Open-loop PSH επιφέρει μικρότερη βελτίωση των δεικτών επάρκειας σε κάθε βήμα αύξησης της ισχύος, συγκριτικά με το αντίστοιχο βήμα προσθήκης των HPP Reservoir.

Αρχικά, το σύστημα αναφοράς διαθέτει 2,4 GW ισχύος HPP Reservoir και 0,7 GW ισχύος Open-loop PSH. Στην αρχική αυτή διαμόρφωση, οι HPP Reservoir αποτελούν το 77% της υδροηλεκτρικής παραγωγής, ενώ οι Open-loop PSH το 23%. Σε κάθε παραλλαγή, όσο προ-



Σχήμα 5.24: Προσθήκη ΥΗΣ στο ΣΗΕ - Σενάριο 5.3 GW CCGT

στίθεται υδροηλεκτρική ισχύς, τόσο αυξάνεται το μερίδιο του είδους ΥΗΣ που εξετάζεται, επί του συνόλου της υδροηλεκτρικής παραγωγής. Στην περίπτωση των +700MW HPP Reservoir, η αναλογία υδροηλεκτρικής παραγωγής διαμορφώνεται στο 81% HPP Reservoir και 19% Open-loop PSH. Αντίστοιχα, η προσθήκη +700MW Open-loop PSH αναλογεί σε 63% HPP Reservoir και 37% Open-loop PSH επί της ισχύος.

Δεδομένου ότι η συνολική ισχύς του ΣΗΕ σε κάθε βήμα προσθήκης ΥΗΣ είναι ίδια μεταξύ των δύο παραλλαγών, τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα των δεικτών επάρκειας οφείλονται στη διαμόρφωση του μείγματος της υδροηλεκτρικής παραγωγής.

Όσο μεγαλύτερο μέρος της συνολικής παραγωγής προέρχεται από μη περιορισμένες ενεργειακά, μονάδες ΥΗΣ (HPP Reservoir) τόσο πιο αποτελεσματικά αναπροσαρμόζεται η λειτουργία τους στην προτεινόμενη μεθοδολογία και αντιμετωπίζονται οι ανεπάρκειες του συστήματος. Κατ' επέκταση, σε αυτή την περίπτωση προκύπτουν χαμηλότεροι δείκτες επάρκειας.

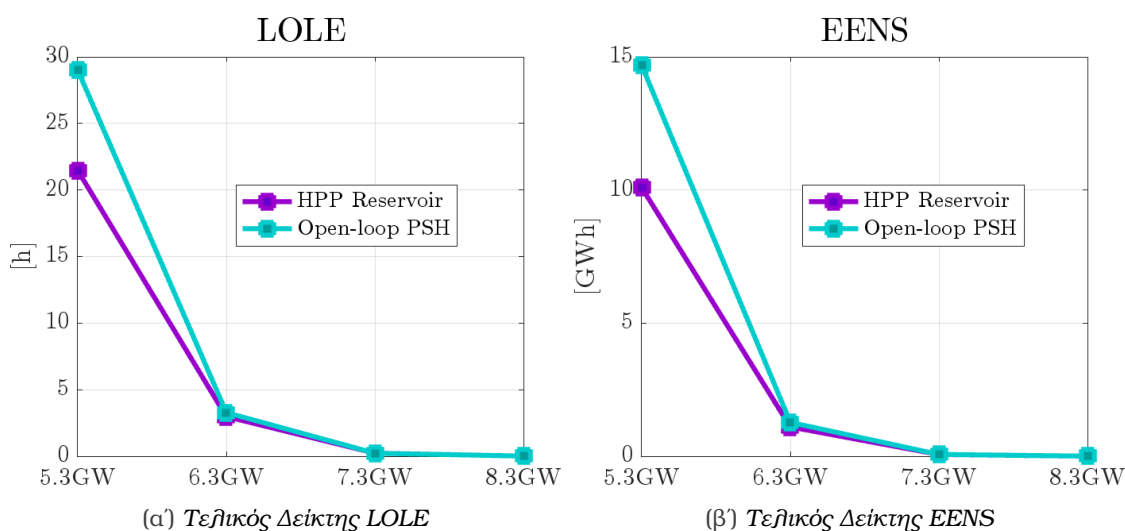
Αντιθέτως, όσο αυξάνεται το μερίδιο ισχύος των Open-loop PSH, μειώνεται η ικανότητα ευελιξίας και βέλτιστης ανακατανομής της λειτουργίας του συνόλου της υδροηλεκτρικής παραγωγής, με αποτέλεσμα να εξαλείφονται λιγότερα συμβάντα ανεπάρκειας σε σχέση με πριν.

Αξίζει να σημειωθεί πως οι τιμές ικανότητας συνεισφοράς ισχύος σε όλες τις παραπάνω παραλλαγές προσθήκης ΥΗΣ διατηρούνται σταθερά σε υψηλά επίπεδα. Ο λόγος έγκειται στην αρχή λειτουργίας της προτεινόμενης μεθόδου, όσον αφορά την αναπροσαρμογή της

προγραμματισμένης λειτουργίας των ΥΗΣ με στόχο την εξάλειψη των ανεπαρκειών εντός του ΣΗΕ. Παρατηρείται μια μικρή πτώση των τιμών του Capacity Value στην περίπτωση 5.24β', η οποία οφείλεται στην αδυναμία συμβολής των Open-loop PSH λόγω περιορισμού χωρητικότητας σε συνδυασμό με το ανεπαρκές σύστημα εφαρμογής.

Τα αποτελέσματα δεικτών επάρκειας και τιμών Capacity Value που παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.23 και 5.24 αναφέρονται σε ένα πολύ επαρκές και ένα πολύ ανεπαρκές ΣΗΕ, αντίστοιχα. Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η επίδραση της αύξησης ισχύος των ΥΗΣ σε ενδιάμεσες τιμές επιπέδων επάρκειας ΣΗΕ, οι προαναφερθείσες παραλλαγές εφαρμόζονται σε συστήματα διαφορετικών τιμών εγκατεστημένης θερμικής ισχύος. Για τους σκοπούς της συγκεκριμένης ανάλυσης, αφαιρούνται σταδιακά θερμικές μονάδες ισχύος από το ΣΗΕ αναφοράς, από τα 8.3GW έως τα 5.3GW, και εξετάζεται η διαμόρφωση των δεικτών επάρκειας ανάλογα με το είδος ΥΗΣ που προστίθεται.

Το Σχήμα 5.25 αναπαριστά τους τελικούς δείκτες επάρκειας που επιφέρει η προσθήκη +700MW ισχύος ΥΗΣ, ανάλογα με το είδος των σταθμών. Αποδεικνύεται πως, η προσθήκη επιπλέον υδροηλεκτρικών σταθμών διατηρεί χαμηλούς τους δείκτες επάρκειας έως και την περίπτωση αφαίρεσης 2 GW θερμικών μονάδων παραγωγής από το σύστημα αναφοράς, και στις δύο παραλλαγές. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των 6.3GW θερμικής ισχύος, η τιμή LOLE που επιτυγχάνεται με την προσθήκη επιπλέον ΥΗΣ κυμαίνεται μεταξύ 2.9 έως 3.3 ώρες ανά έτος - για την προσθήκη HPP Reservoir και Open-loop PSH, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές βρίσκονται εν μέρει εντός των αποδεκτών ορίων LOLE που ορίζονται από την Μελέτη Επάρκειας του ENTSO-e για την Ελληνικό Σύστημα Ενέργειας [51] - έως 3 ώρες ανά έτος.

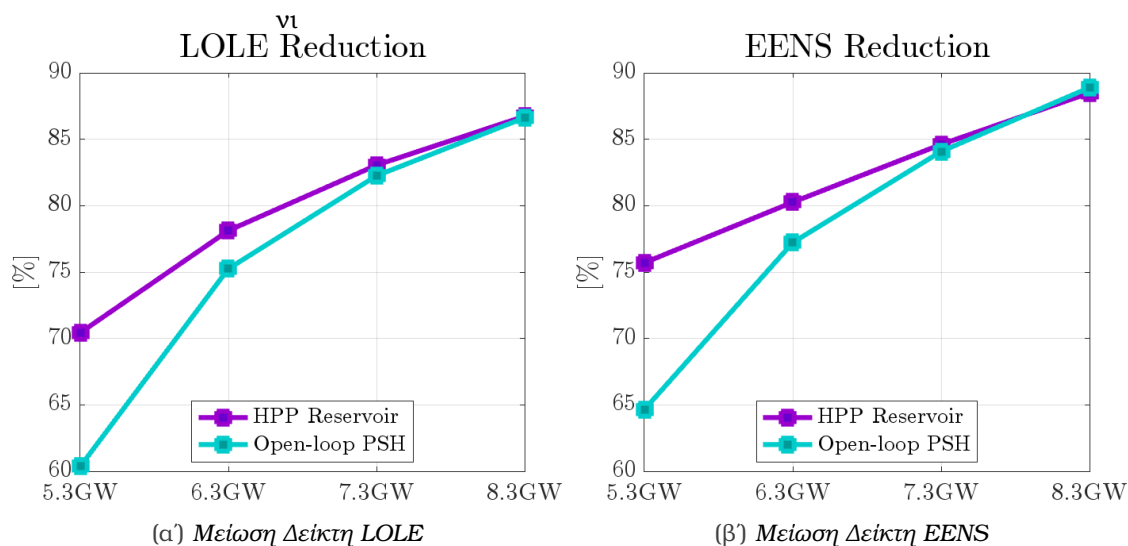


Σχήμα 5.25: Τελικοί Δείκτες Επάρκειας μετά την Προσθήκη +700MW ΥΗΣ

Σε μειωμένες τιμές εγκατεστημένης θερμικής ισχύος, οι δείκτες επάρκειας λαμβάνουν υψηλές τιμές και αποκλίνουν σημαντικά μεταξύ τους, για τις δύο παραλλαγές προσθήκης επιπλέον ΥΗΣ. Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενη παράγραφο, σε χαμηλά επίπεδα επάρκειας, υπεισέρχεται πιο έντονα ο περιορισμός της χωρητικότητας των Open-loop PSH, συνεπώς η προσθήκη επιπλέον HPP Reservoir έναντι Open-loop PSH ίδιας ισχύος, κρίνεται

αποτελεσματικότερη ως προς την συμβολή τους στην επάρκεια του ΣΗΕ.

Αυτή η συνάρτηση του επιπέδου επάρκειας σε συνδυασμό με τη συμβολή που επιφέρει η προσθήκη ΥΗΣ στο αρχικό σύστημα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.26. Στο διάγραμμα αυτό αποτυπώνεται η μείωση του αρχικού δείκτη επάρκειας που επιτυγχάνεται μέσω της προσθήκης 700MW υδροηλεκτρικής παραγωγής, δηλαδή η διαφορά Base Case με +700MW.



Σχήμα 5.26: Βελτίωση Δεικτών Επάρκειας με την Προσθήκη ΥΗΣ για Διαφορετικά Επίπεδα Επάρκειας ΣΗΕ

Τα αποτελέσματα του Σχήματος 5.26 επιβεβαιώνουν όσα έχουν ήδη ειπωθεί αναφορικά με τη σύγκριση συμβολής των επιπλέον σταθμών HPP Reservoir και Open-loop PSH. Ένα ακόμη πόρισμα που εξάγεται από το συγκεκριμένο διάγραμμα, είναι η αυξητική τάση της βελτίωσης των δεικτών επάρκειας του ΣΗΕ, όσο το ΣΗΕ γίνεται πιο επαρκές, και στις δύο παραλλαγές προσθήκης ΥΗΣ. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται αμιγώς στην παρουσία μονάδων περιορισμένης χωρητικότητας στο υπό εξέταση σύστημα (εν προκειμένω, οι Open-loop PSH). Οι εν λόγω ΥΗΣ έχουν περιορισμένη ικανότητα συμβολής στην επάρκεια σε ανεπαρκή συστήματα. Αυτή η συνθήκη επηρεάζει και την ικανότητα από κοινού συμβολής ισχύος των ΥΗΣ σε γεγονότα ανεπάρκειας, ακόμη και στην περίπτωση που οι Open-loop PSH δεν καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος του συνόλου της υδροηλεκτρικής παραγωγής, όπως συμβαίνει στην προσθήκη επιπλέον HPP Reservoir, όπου η ισχύς των Open-loop PSH αντιστοιχεί στο 19% του συνόλου της υδροηλεκτρικής ισχύος. Για αυτό το λόγο, η βελτίωση των δεικτών επάρκειας λαμβάνει χαμηλές τιμές στα συστήματα των 5.3GW και 6.3GW και στις δύο καμπύλες του Σχήματος 5.26.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και Προοπτικές

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία μοντελοποίησης των ΥΗΣ με γνώμονα τη συμβολή τους στην επάρκεια του συστήματος. Η βασική αρχή της μεθόδου αφορά τον έλεγχο επάρκειας του ΣΗΕ σε πραγματικό χρόνο και την αναπροσαρμογή της λειτουργίας των ΥΗΣ με στόχο την ικανοποίηση της ζήτησης. Το αρχικό προφίλ λειτουργίας των ΥΗΣ προκύπτει μέσω ενός μοντέλου ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους του ΣΗΕ. Σε περίπτωση κινδύνου εμφάνισης ανεπάρκειας, το προγραμματισμένο προφίλ λειτουργίας των ΥΗΣ τροποποιείται κατάλληλα, σε σεβασμό στους τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς τους. Η ανεπτυγμένη μεθοδολογία διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος ΥΗΣ που εξετάζεται: ΥΗΣ χωρίς δυνατότητα άντλησης (HPP Reservoir), ΥΗΣ με δυνατότητα άντλησης (Open-loop PSH) και από κοινού συμβολή των δύο τεχνολογιών στην επάρκεια ισχύος του ΣΗΕ. Η λειτουργία των ΥΗΣ εντάσσεται σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο στη μελέτη επάρκειας, η οποία υλοποιείται με χρήση της τεχνικής Monte Carlo. Επιπλέον η προτεινόμενη μέθοδος λαμβάνει υπόψη τη πιθανότητα εμφάνισης μη προγραμματισμένων βλαβών των ΥΗΣ κατά τη διαμόρφωση της λειτουργία τους. Μέσω της μελέτης επάρκειας εξάγονται οι βασικοί δείκτες αξιοπιστίας του συστήματος, LOLE και EENS, και η ικανότητα συνεισφοράς ισχύος των ΥΗΣ, Capacity Value. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε ένα σύστημα αναφοράς πανομοιότυπο του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος, αποτελούμενο από θερμικές μονάδες παραγωγής, ΑΠΕ, μονάδες αποθήκευσης και υδροηλεκτρικούς σταθμούς, με στόχο διεύθυνσης ΑΠΕ της τάξεως του 80%, ενώ εξετάστηκαν 35 διαφορετικά κλιματικά έτη. Για λόγους ανάδειξης της μεθοδολογίας, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με πάγιες πολιτικές ένταξης των ΥΗΣ στις μελέτες επάρκειας ισχύος: με γνώμονα την οικονομικότητα και την επάρκεια ισχύος του συστήματος. Ακόμη, διερευνήθηκαν διαφορετικές διαμορφώσεις της υδροηλεκτρικής παραγωγής και ΣΗΕ διαφορετικών επιπέδων επάρκειας, προκειμένου να αξιολογηθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία σε ένα εύρος εξεταζόμενων ΥΗΣ και συστημάτων εφαρμογής. Παρακάτω συνοψίζονται τα βασικά αποτελέσματα των εφαρμογών της μεθόδου.

Τα κύρια αποτελέσματα της εργασίας αφορούν την εφαρμογή και αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου στο σύστημα αναφοράς των 35 κλιματικών ετών λειτουργίας. Στο συγκεκριμένο σύστημα, οι δείκτες επάρκειας που επιφέρει η εφαρμογή της μεθόδου παρουσιάζουν βελτίωση σε σύγκριση με την προγραμματισμένη λειτουργία, για κάθε μοντελοποίηση των

ΥΗΣ και σε κάθε κλιματικό έτος. Σύμφωνα με την προγραμματισμένη λειτουργία των ΥΗΣ, οι μέσες τιμές των δεικτών LOLE και EENS του συστήματος αναφοράς είναι 7.6 ώρες/έτος και 2.2 GWh/έτος, αντίστοιχα. Η μοντελοποίηση της από κοινού συμβολής των ΥΗΣ καταφέρνει να μειώσει τους παραπάνω δείκτες επάρκειας στις 0.1 ώρες/έτος και 0.03 GWh/έτος, επιφέροντας βελτίωση του επιπέδου επάρκειας του ΣΗΕ κατά 98%. Η ικανότητα συνεισφοράς ισχύος της κοινής μοντελοποίησης των ΥΗΣ λαμβάνει σταθερά υψηλές τιμές, με μέση τιμή 92%, ενώ η αντίστοιχη τιμή στην περίπτωση της προγραμματισμένης λειτουργίας αγγίζει το 39%. Παρόμοια είναι και η βελτίωση που επιφέρουν οι μοντελοποιήσεις ανά είδος ΥΗΣ, με την περίπτωση των Open-loop PSH να πετυχαίνει ελαφρώς μικρότερη μείωση - και αναλογικά, χαμηλότερη ικανότητα συνεισφοράς ισχύος. Αυτό οφείλεται στη μικρότερη χωρητικότητα του ταμιευτήρα του συγκεκριμένου είδους ΥΗΣ, η οποία ευθύνεται για τον περιορισμό της ικανότητας συμβολής ισχύος των Open-loop PSH σε γεγονότα ανεπάρκειας.

Η σημαντική βελτίωση του επιπέδου επάρκειας που επιτυγχάνεται με χρήση της προτεινόμενης μεθόδου, αναδεικνύει την υπεροχή της ως προς τον τρόπο ένταξης των ΥΗΣ στη μελέτη επάρκειας ισχύος, σε σχέση με τη μονοδιάστατη προγραμματισμένη λειτουργία.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με μια κλασική μέθοδο ενσωμάτωσης των ΥΗΣ με άξονα την επάρκεια του συστήματος, την τεχνική Αποκοπήs Αιχμών (Peak Shaving). Η συγκεκριμένη τεχνική προγραμματίζει την παραγωγή ισχύος των ΥΗΣ αποκλειστικά στις ώρες αιχμής του φορτίου ζήτησης, αγνοώντας οποιαδήποτε οικονομική διάσταση της λειτουργίας τους και παραλείποντας βασικούς τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς - όπως τους περιορισμούς χωρητικότητας των σταθμών και τη χρονικότητα των υδρολογικών εισροών τους. Με αυτόν τον τρόπο υπερτιμά τις δυνατότητες παραγωγής ισχύος των ΥΗΣ, ενώ παράλληλα τους προγραμματίζει βάσει ενός μη ρεαλιστικού προφίλ λειτουργίας. Εξαιτίας των παραπάνω, οι εξαγόμενοι δείκτες επάρκειας μέσω της τεχνικής Peak Shaving μειώνονται σημαντικά και η ικανότητα συνεισφοράς ισχύος των ΥΗΣ λαμβάνει εξίσου υψηλές τιμές με εκείνες της προτεινόμενης μεθόδου. Ωστόσο, σε συστήματα χαμηλότερου επιπέδου επάρκειας, η ικανότητα συνεισφοράς ισχύος των ΥΗΣ με τη μέθοδο Peak Shaving φαίνεται να μειώνεται, εξαιτίας της αδυναμίας κάλυψης ανεπαρκειών εκτός των αιχμών του φορτίου. Στο δεδομένο σύστημα εφαρμογής, η αντίστοιχη ικανότητα συνεισφοράς των HPP Reservoir σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία λαμβάνει υψηλότερες τιμές, αποδεικνύοντας πως, παρά τη μη ρεαλιστική αναπαράσταση των ΥΗΣ εντός του Peak Shaving, η αρχή υλοποίησης της προτεινόμενης μεθόδου αξιολογεί υψηλότερα τη δυνατότητα συμβολής ισχύος των ΥΗΣ.

Τέλος, διερευνήθηκε η προσθήκη νέων ΥΗΣ με και χωρίς δυνατότητα άντληση και αξιολογήθηκε η επίδραση των νέων μειγμάτων ΥΗΣ στη βελτίωση του επιπέδου επάρκειας του ΣΗΕ. Η διερεύνηση αφορά δύο παραλλαγές ίδιας προστιθέμενης ισχύος, την αύξηση των HPP Reservoir, διατηρώντας τους Open-loop PSH ίδιους με το αρχικό ΣΗΕ και την αύξηση των Open-loop PSH, ενώ οι HPP Reservoir παραμένουν σταθεροί. Η προσθήκη ΥΗΣ και για τις δύο παραλλαγές επέφερε ισάξια μείωση των δεικτών επάρκειας στο αρχικό σύστημα αναφοράς. Κατόπιν, εξετάστηκαν ΣΗΕ χαμηλότερου επιπέδου επάρκειας, όπου παρατηρήθηκε διαφοροποίηση της συνεισφοράς των δύο παραλλαγών στο αρχικό επίπεδο επάρκειας. Η

προσθήκη επιπλέον HPP Reservoir επέφερε καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με την προσθήκη Open-loop PSH, γεγονός που οφείλεται, και πάλι στην περιορισμένη χωρητικότητα των Open-loop PSH, η επίδραση της οποίας γίνεται πιο έντονα αντιληπτή όσο μειώνεται το επίπεδο επάρκειας του ΣΗΕ και πληθαίνει η συχνότητα και η διάρκεια των εμφανιζόμενων ανεπαρκειών. Ο περιορισμός αυτός υπεισέρχεται και επηρεάζει τα αποτελέσματα όλων των διαμορφώσεων, ωστόσο ενισχύεται όσο αυξάνεται το μερίδιο των Open-loop PSH επί του συνόλου της υδροηλεκτρικής παραγωγής, δηλαδή στην παραλλαγή προσθήκης επιπλέον Open-loop PSH.

Οι παραπάνω διερευνήσεις αποτελούν ένα πλήρες σύνολο υλοποιήσεων της προτεινόμενης μεθόδου με στόχο την εξαγωγή ικανοποιητικού πλήθους αποτελεσμάτων για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς της μεθόδου τόσο ως προς το σύστημα εφαρμογής όσο και σε σύγκριση με άλλες μεθόδους ένταξης των ΥΗΣ σε μελέτες επάρκειας ισχύος. Μέσω αυτών των εφαρμογών αφενός επαληθεύεται η ρεαλιστική προσομοίωση της λειτουργίας των ΥΗΣ και αφετέρου αναδεικνύεται η ικανότητα συμβολής τους στην επάρκεια ισχύος, εφόσον εφαρμοστεί η προτεινόμενη μεθοδολογία ανακατανομής της λειτουργίας τους σε πραγματικό χρόνο.

6.2 Προοπτικές - Μελλοντικές Επεκτάσεις

Η αντιπροσωπευτική ενσωμάτωση της λειτουργίας των ΥΗΣ στις μελέτες επάρκειας ισχύος με στόχο την ανάδειξη της συμβολής τους στην εξασφάλιση επάρκειας αποτελεί μείζον ζήτημα, δεδομένης της ανάγκης αναδιαμόρφωσης και επανεξέτασης των μελετών επάρκειας ισχύος των συστημάτων παραγωγής των σύγχρονων ΣΗΕ. Η μεθοδολογία ελέγχου επάρκειας του ΣΗΕ και αναπροσαρμογής της λειτουργίας των ΥΗΣ σε πραγματικό χρόνο, στοχεύοντας στην ανάδειξη της ικανότητας συμβολής τους στην επάρκεια ισχύος, αποτελεί μια προσέγγιση του παραπάνω ζητήματος, ωστόσο επιδέχεται περαιτέρω βελτιώσεων και επεκτάσεων.

Μια βελτίωση της προτεινόμενης μεθοδολογίας ως προς την ενσωμάτωση των ΥΗΣ στη διαδικασία μοντελοποίησης αφορά τη μεμονωμένη προσομοίωση της λειτουργίας κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού αντί της μοντελοποίησης ενός αθροιστικού ΥΗΣ ανά τεχνολογία. Λαμβάνοντας υπόψιν επιμέρους τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς των σταθμών, θα επιτευχθεί η ακριβέστερη αναπαράσταση και αξιολόγηση της συνεισφοράς των ΥΗΣ στο εξεταζόμενο ΣΗΕ.

Μια ακόμη προσθήκη στη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, σχετίζεται με την αξιολόγηση της οικονομικής διάστασης του συστήματος κατά την αναπροσαρμογή της λειτουργίας των ΥΗΣ. Μέσω αυτής της επέκτασης της προτεινόμενης μοντελοποίησης, θα ελέγχεται σε πραγματικό χρόνο τόσο η επάρκεια του συστήματος όσο και η οικονομικότητα της λειτουργίας των ΥΗΣ και θα επιλέγεται η βέλτιστη ανακατανομή της λειτουργίας των ΥΗΣ βάσει της τομής των δύο παραγόντων. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι συνυπολογίζονται σε πραγματικό χρόνο οι κύριες διαστάσεις λειτουργίας του συστήματος και η παραγωγή των ΥΗΣ καθορίζεται βάσει του συνολικού συμφέροντος του ΣΗΕ, όπως άλλωστε συμβαίνει και στην πραγματική λειτουργία.

Μια επιπλέον εξέλιξη της παρούσας εργασίας αποτελεί η εμβάθυνση κατά τη διαδικα-

σία μοντελοποίησης του ΣΗΕ. Αυτό αφορά την λεπτομερή αναπαράσταση της τοπολογίας του εξεταζόμενου ΣΗΕ, την ενσωμάτωση της λειτουργίας των εξωτερικών διασυνδέσεων του συστήματος (με ΣΗΕ γειτονικών χωρών), καθώς και την ένταξη της αξιοπιστίας του συστήματος μεταφοράς στην αξιολόγηση του επιπέδου επάρκειας. Έτσι θα εξασφαλιστεί η πλήρης προσομοίωση του συστήματος και η συμπερίληψη παραμέτρων, οι οποίοι ενδεχομένως να αποτελέσουν σημαντικούς παράγοντες στον υπολογισμό της επάρκειας του συστήματος.

Παραρτήματα

Δεδομένα Εισόδου Μοντέλου

Στο Παράρτημα αυτό παρατίθενται τα δεδομένα εισόδου που έχουν χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου και την εξαγωγή των βασικών αποτελεσμάτων.

Οι ετήσιες χρονοσειρές λειτουργίας των ΥΗΣ και των αποθηκευτικών μονάδων που χρησιμοποιούνται στην προτεινόμενη μέθοδο για την ανακατανομή της λειτουργίας των ΥΗΣ και την εξαγωγή του υπολειπόμενου φορτίου ζήτησης έχουν προκύψει από ένα μοντέλο εύρεσης του βέλτιστου οικονομοτεχνικά παραγωγικού μείγματος του Ελληνικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, με την ονομασία Capacity Expansion Planning (CEP). Το μοντέλο αυτό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας [40] και αξιοποιήθηκε για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Πρόκειται για ένα εργαλείο, το οποίο αποσκοπεί στην εύρεση του βέλτιστου ενεργειακού μείγματος μιας μελλοντικής εικόνας του ΣΗΕ της χώρας, θεωρώντας υψηλή διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ένταξη νέων μονάδων αποθήκευσης. Αφορά μια πιο απλουστευμένη μορφή ενός Unit Commitment and Economic Dispatch (UC-ED) μοντέλου ως προς την ανάλυση της υπολογιστικής διαδικασίας, ωστόσο ο ετήσιος χρονικός ορίζοντας, στον οποίο υλοποιείται, επιτρέπει την ανάδειξη και αξιολόγηση στοιχείων του ΣΗΕ, που παρουσιάζουν μεγαλύτερους κύκλους λειτουργίας από τον αντίστοιχο ημερήσιο του UC-ED - όπως οι αποθηκευτικές και υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής. Η υλοποίηση του CEP στηρίζεται στην επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης γραμμικού προγραμματισμού, μέσω μιας συνάρτησης βελτιστοποίησης, στην οποία εισάγονται όλοι οι τεχνικοί και λειτουργικοί περιορισμοί των μονάδων με τη μορφή μεταβλητών. Το εν λόγω μοντέλο εξάγει, ανά τεχνολογία, τις χρονοσειρές λειτουργίας των ΑΠΕ, των θερμικών μονάδων, των μονάδων αποθήκευσης και των υδροηλεκτρικών μονάδων, οι οποίες συνιστούν όλες μαζί την πλήρη εικόνα λειτουργίας του ΣΗΕ. Οι χρονοσειρές λειτουργίας των ΥΗΣ που προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου "ΕΠ, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αποτελούν την προγραμματισμένη λειτουργία των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής, πάνω στην οποία εφαρμόζεται η προτεινόμενη μέθοδος της ανακατανομής της λειτουργίας των μονάδων με στόχο την εξασφάλιση ενεργειακής επάρκειας. Επισημαίνεται ότι για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής το μοντέλο "ΕΠ αξιοποιήθηκε αμιγώς για την εξαγωγή των χρονοσειρών λειτουργίας των στοιχείων που χρειάζονται για την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου και όχι για τον προσδιορισμό της βέλτιστης ανάπτυξης του συστήματος. Τα χαρακτηριστικά των επιμέρους στοιχείων παραγωγής (ισχύς θερμικών μονάδων, ΑΠΕ, μονάδων αποθήκευσης, ΥΗΣ και χωρητικότητα μονάδων αποθήκευσης και ΥΗΣ) καθορίστηκαν εξωγενώς του μοντέλου "ΕΠ και

εισήχθησαν σαν παράμετροι εισόδου σε αυτό.

Το ΣΗΕ που επιλέχθηκε για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου προσομοιάζει το Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας στην μελλοντική του ανάπτυξη το 2030, χωρίς όμως να ταυτίζεται εξ ολοκλήρου. Στόχος της παρούσας εργασίας δεν είναι η λεπτομερής αναπαράσταση του δεδομένου ΣΗΕ, αλλά η χρήση ενός συστήματος αναφοράς, το οποίο εξυπηρετεί την εφαρμογή και ανάδειξη της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε.

Στον ακόλουθο Πίνακα Α'.1 παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος παραγωγής του υπό μελέτη ΣΗΕ.

Πίνακας Α'.1: Δεδομένα Παραγωγής ΣΗΕ

ΤΥΠΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΙΣΧΥΣ (GW)
Φωτοβολταϊκή Παραγωγή (PV)	13
Χερσαία Αιολική Παραγωγή (Wind Onshore)	8
Υπεράκτια Αιολική Παραγωγή (Wind Offshore)	1
Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί Φυσικής Ροής (Run-of-River HPP)	0,4
Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί (HPP Reservoir)	2,4
Υδροαντλητικοί Σταθμοί Ανοιχτού Βρόγχου (Open-loop PSH)	0,7 / 5,5h
Υδροαντλητικοί Σταθμοί Κλειστού Βρόγχου (Closed-loop PSH)	1,2 / 12,5h
Μονάδες Αποθήκευσης Ενέργειας (BESS)	1,75 / 2,8h
Θερμικές Μονάδες Παραγωγής (CCGTs)	8,3
Σύνολο Εγκατεστημένης Ισχύος	36,75

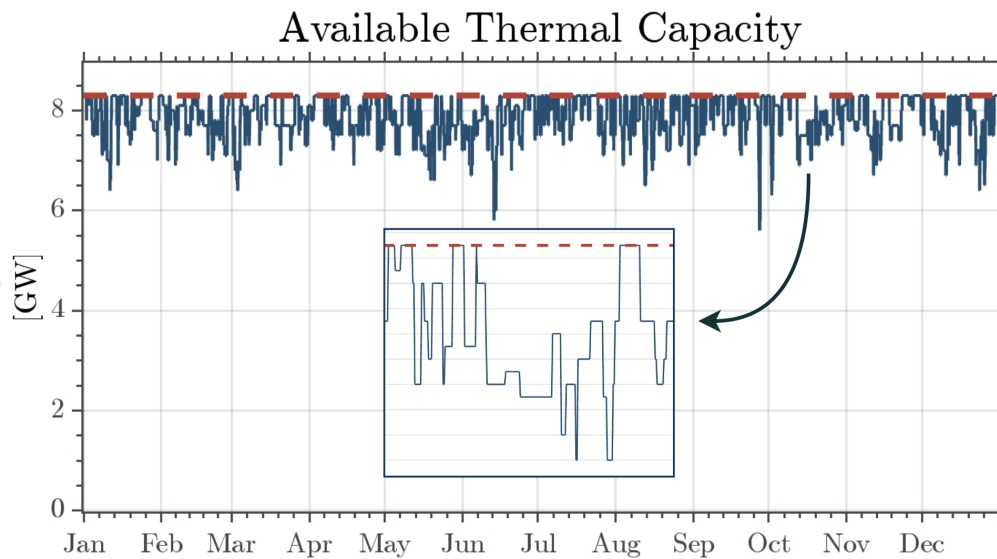
Τα χαρακτηριστικά των θερμικών μονάδων παραγωγής φαίνονται αναλυτικά στον ακόλουθο Πίνακα Α'.2. Οι ρυθμοί μη προγραμματισμένων διακοπών (Forced Outage Ratios - FOR) προκύπτουν από τη Μελέτη Επάρκειας Ισχύος του ENTSO-e [62], στην οποία οι μονάδες φυσικού αερίου έχουν δείκτες FOR ίσους με 5% και 8%, για τις νεότερες και παλαιότερες μονάδες αερίου, αντίστοιχα. Για τις υδροηλεκτρικές μονάδες ο δείκτης FOR ισούται με 5%.

Ο Μέσος Χρόνος Αποκατάστασης Βλαβών (Mean Time To Repair - MTTR) όλων των μονάδων παραγωγής έχει θεωρηθεί ίσος με μία ημέρα (24h).

Το πλήθος και οι παράμετροι των θερμικών μονάδων παραγωγής, δεν αντιστοιχούν στις υφιστάμενες μονάδες του Ελληνικού ΣΗΕ, ωστόσο κυμαίνονται κοντά στις πραγματικές τιμές, με στόχο την δημιουργία μιας ρεαλιστικής χρονοσειράς διαθεσιμότητας της θερμικής παραγωγής. Το Σχήμα Α'.1 απεικονίζει μια καμπύλη διαθεσιμότητας της θερμικής παραγωγής για ένα ενδεικτικό έτος-δείγμα του MC.

Πίνακας Α.2: Χαρακτηριστικά Θερμικών Μονάδων Παραγωγής

ΠΛΗΘΟΣ ΜΟΝΑΔΩΝ	ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ (MW)	FOR
2	200	8%
2	200	5%
5	300	5%
4	500	5%
3	600	5%
1	600	8%
2	800	5%
19	8.300	



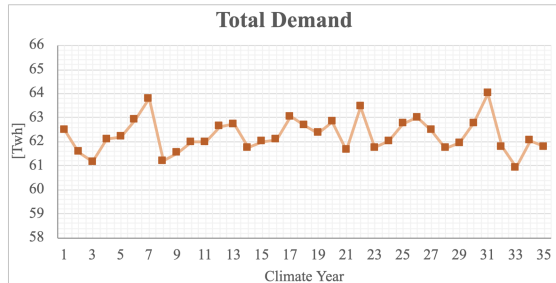
Σχήμα Α.1: Χρονοσειρά Διαθεσιμότητας Θερμικής Παραγωγής

Προκειμένου να εξετασθούν διαφορετικά σενάρια λειτουργίας του ΣΗΕ, βάσει διαφορετικών κλιματικών συνθηκών, η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε ένα σύνολο δεδομένων 35 ιστορικών ετών (1982 - 2016). Στα έτη αυτά, η εγκατεστημένη ισχύς του ΣΗΕ παραμένει η ίδια, ωστόσο αλλάζουν οι υδρολογικές εισροές, οι χρονοσειρές παραγωγής των ΑΠΕ, το προφίλ της ζήτησης και η λειτουργία των μονάδων αποθήκευσης. Ο Πίνακας Α.3 περιέχει τις μέσες τιμές των βασικών μεγεθών που χαρακτηρίζουν τις χρονοσειρές παραγωγής και ζήτησης του ΣΗΕ.

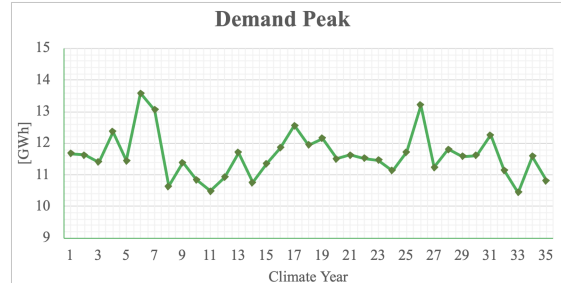
Πίνακας Α'.3: Δεδομένα Λειτουργίας ΣΗΕ : Μέσες Τιμές 35 Κλιματικών Ετών

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΗΕ	Μ.Ο. 35 ΕΤΩΝ
Συνολική Ζήτηση	62,3 TWh
Ετήσια Αιχμή Ζήτησης	11,6 GW
Διείσδυση ΑΠΕ	80%
Εισροές HPP Reservoir	4,2 TWh
Εισροές Open-loop PSH	0,6 TWh
Capacity Factor PV	18%
Capacity Factor Wind Onshore	28%
Capacity Factor Wind Offshore	46%

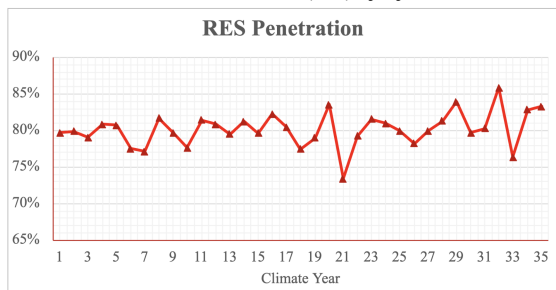
Το εύρος των τιμών των μεγεθών του Πίνακα Α'.3 για τα 35 κλιματικά έτη παρουσιάζεται στα ακόλουθα διαγράμματα. Επισημαίνεται πως τα έτη ακολουθούν τη χρονολογική τους σειρά, δηλαδή το 1ο έτος αντιστοιχεί στο 1982, το 2ο στο 1983 κ.ο.κ..



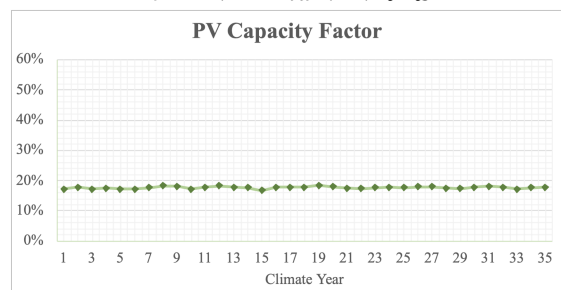
(α) Συνολική Ζήτηση



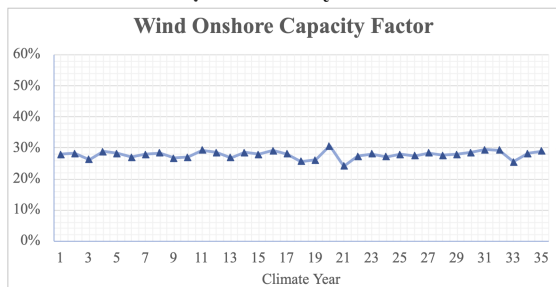
(β) Ετήσια Αιχμή Ζήτησης



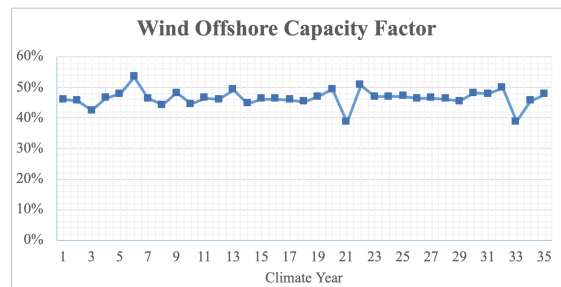
(γ) Διεξόδυση ΑΠΕ



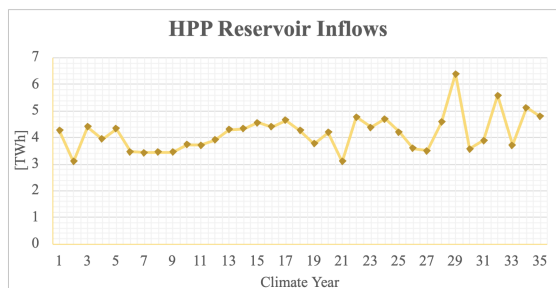
(δ) CF Φωτοβολταϊκών



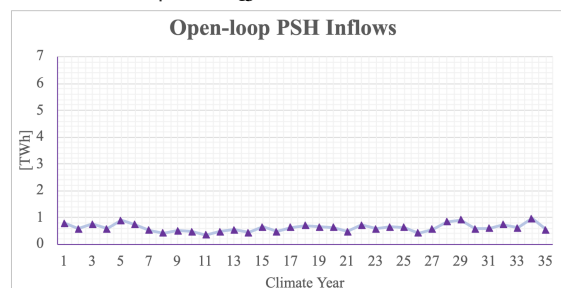
(ε) CF Onshore Αιολικών



(ς) CF Offshore Αιολικών



(ζ) Εισροές HPP Reservoir



(η) Εισροές Open-loop PSH

Σχήμα Α.2: Δεδομένα Λειτουργίας ΣΗΕ 35 Κλιματικών Ετών

Βιβλιογραφία

- [1] Marta Poncela Blanco, Amanda Spisto, Nikola Hrelja και Gianluca Fulli. *Generation Adequacy Methodologies Report. JRC Science for Policy Report*, 2016.
- [2] International Energy Agency. *Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028*. www.iea.org, 2024.
- [3] Bonneville Power Administration. *Hydropower Educational Resources*. www.bpa.gov/learn-and-participate/community-education/educational-activities/hydropower-educational-resources. Ημερομηνία πρόσβασης: 05-02-2024.
- [4] Water Power Technology Office U.S. Department of Energy. *Types of Hydropower Plants*. www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants. Ημερομηνία πρόσβασης: 05-02-2024.
- [5] Energy και the Environment. *Conventional Hydroelectric Dam*. www.e-education.psu.edu/earth104/node/1067. Ημερομηνία πρόσβασης: 05-02-2024.
- [6] Pacific Northwest National Laboratory. *A Comparison of the Environmental Effects of Open-Loop and Closed-Loop Pumped Storage Hydropower*. *Hydrowires*, 2020.
- [7] Resonant Link Technology. *Renewables (Wind and Tidal Energy)*. www.resonantlinktechnology.com/renewables/. Ημερομηνία πρόσβασης: 06-02-2024.
- [8] M. Islam J. Mia, A. Islam. *Powering Offshore Structure Using Renewable Energy: A Review Study*. *SSRN Electronic Journal*, 2021.
- [9] Alterenergytutorials. *Impulse Turbine Design*. www.alternative-energy-tutorials.com/hydro-energy/impulse-turbine. Ημερομηνία πρόσβασης: 07-02-2024.
- [10] U.S. Department of Energy. *Energy Reliability*. www.energy.gov/eere/energy-reliability. Ημερομηνία πρόσβασης: 02-02-2024.
- [11] Lesley Kelley-Regnier. *Power System Reliability Analysis Application Guide. CIGRE WG 03 of SC 38*, 1987.
- [12] Roy Billinton. *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*. Plenum Press, New York, 1994. ISBN:9781489913487.

- [13] D. Lakhanpal R. Billinton. *Impacts of demand-side management on reliability cost/reliability worth analysis*. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 1996.
- [14] European Commission. *Identification of Appropriate Generation and System Adequacy Standards for the Internal Electricity Market. Final Report*, 2016.
- [15] Π. Δράτσας. *Συμβολή Μονάδων Αποθήκευσης Ενέργειας στην Επάρκεια Ισχύος του Συστήματος Παραγωγής ενός Αυτόνομου ΣΗΕ*. Πτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2019.
- [16] Amjad Anvari Moghaddam Behnam Mohammadi-Ivatloo, Amin Mohammadpour Shotorbani. *Energy Storage in Energy Markets*. Academic Press - Elsevier, 2021. ISBN:9780128200957.
- [17] A. Almutairi, M. H. Ahmed και M.M.A. Salama. *Probabilistic generating capacity adequacy evaluation: Research roadmap*. Elsevier, 2015.
- [18] Investopedia. *Monte Carlo Simulation: History, How it Works, and 4 Key Steps*. www.investopedia.com/terms/m/montecarlosimulation.asp. Ημερομηνία πρόσβασης: 01-02-2024.
- [19] Amazon Web Services. *What is The Monte Carlo Simulation?* aws.amazon.com/what-is/monte-carlo-simulation. Ημερομηνία πρόσβασης: 01-02-2024.
- [20] N. Roslan, N. Fauzi και M. Ridzuan. *Sequential and Nonsequential Monte Carlo in Assessing Reliability Performance of Distribution Network*. *IEEE*, 2020.
- [21] A. Keane, M. Milligan, C. Dent, B. Hasche, C. D'Annunzio, K. Dragoon, H. Holttinen, N. Samaan, L. Soder και M. O'Malley. *Capacity Value for Wind Power*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011.
- [22] Investorideas. *Nuclear power deserves a bigger role in our clean energy mix*. www.investorideas.com/news/2023/renewable-energy/08091RichardMills-Nuclear-Power. Ημερομηνία πρόσβασης: 12-02-2024.
- [23] C. Simoglou, P. Biskas, E. Bakirtzis, A. Matenli, A. Petridis και A. Bakirtzis. *Evaluation of the Capacity Credit of RES: The Greek Case*. *IEEE*, 2013.
- [24] P. Dratsas, G. Psarros και S. Papathanasiou. *Battery Energy Storage Contribution to System Adequacy*. *Energies*, 2021.
- [25] P. Dratsas, G. Psarros και S. Papathanasiou. *Capacity Value of Pumped-Hydro Energy Storage*. *IEEE*, 2022.
- [26] P. Dratsas, G. Psarros και S. Papathanasiou. *A Real-time Redispatch Method to Evaluate the Contribution of Storage to Capacity Adequacy*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023.

- [27] Y. Zhou, P. Mancarella και J. Mutale. *Framework for capacity credit assessment of electrical energy storage and demand response*. *IET Journals*, 2016.
- [28] Patricio Rocha Garrido PJM. *Effective Load Carrying Capability (ELCC)*. www.pjm.com/-/media/committees-groups/task-forces/ccstf/2020/20200407/20200407-item-04-effective-load-carrying-capability.ashx.
- [29] M. Milligan και K. Porter. *Determining the Capacity Value of Wind: An Updated Survey of Methods and Implementation*. *NREL/CP-500-43433*, 2008.
- [30] International Energy Agency. *Hydropower Special Market Report*. www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report/executive-summary. Ημερομηνία πρόσβασης: 05-01-2024.
- [31] Environment European Commission Energy, Climate change. *Climate Action*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-targets_en. Ημερομηνία πρόσβασης: 04-02-2024.
- [32] Water Power Technology Office U.S. Department of Energy. *How Hydropower Works*. www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works. Ημερομηνία πρόσβασης: 05-02-2024.
- [33] Energy Education. *Run-of-the-river Hydroelectricity*. energyeducation.ca/encyclopedia/Run-of-the-river_hydroelectricity. Ημερομηνία πρόσβασης: 05-02-2024.
- [34] Energy Education. *Hydroelectric Dam*. energyeducation.ca/encyclopedia/Hydroelectric_dam. Ημερομηνία πρόσβασης: 05-02-2024.
- [35] International Hydropower Association. *Types of Hydropower*. www.hydropower.org/iha/discover-types-of-hydropower. Ημερομηνία πρόσβασης: 05-02-2024.
- [36] Kyle Webb. *Section 3: Pumped-Hydro Energy Storage*. web.engr.oregonstate.edu/~webbky/ESE471. Ημερομηνία πρόσβασης: 05-02-2024.
- [37] T. Simon, D. Inman*, R. Hanes, G. Avery, D. Hettinger και G. Heath. *Life Cycle Assessment of Closed-Loop Pumped Storage Hydropower in the United States*. *Environmental Science and Technology*, 2023.
- [38] U.S. Energy Information Administration. *Hydropower Explained: Tidal Power*. www.eia.gov/energyexplained/hydropower/tidal-power.php. Ημερομηνία πρόσβασης: 06-02-2024.
- [39] Α. Ευστρατιάδης, Ν. Μαμάσης και Δ. Κουτσογιάννης. *Υδροηλεκτρική ενέργεια - Γενικές διατάξεις υδροενεργειακών έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*. www.itia.ntua.gr/el/getfile/2050/2/documents/02_HydropowerLayout.pdf.

- [40] Ε. Χατζηστυλιανός. *Βέλτιστη ανάπτυξη συστημάτων παραγωγής με αξιοποίηση της αποθήκευσης, για επίτευξη ποσού υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ*. Πτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2021.
- [41] The Constructor. *Francis Turbine - its Components, Working and Application*. theconstructor.org/practical-guide/francis-turbines-components-application/. Ημερομηνία πρόσβασης: 07-02-2024.
- [42] Welding Alloys. *Kaplan Turbine*. www.welding-alloys.com/case-studies/hydropower-2/kaplan-turbines/. Ημερομηνία πρόσβασης: 07-02-2024.
- [43] AFRY. *Pumped Storage Systems*. afry.com/sites/default/files/2022-09/afry_pumped_storage_brochure_v1_2021_.pdf.
- [44] Balkan Green Energy News. *Greece breaks records in renewables, energy efficiency in 2023*. balkangreenenergynews.com/greece-breaks-records-in-renewables-energy-efficiency-in-2023. Ημερομηνία πρόσβασης: 08-02-2024.
- [45] ΑΔΜΗΕ. *Μελέτη Επάρκειας Ισχύος για την Περίοδο 2020-2030*. Διεύθυνση Στρατηγικής και Σχεδιασμού Ανάπτυξης Συστήματος, 2019.
- [46] Terna Energy. *Pumped Storage Projects*. www.terna-energy.com/activities-en/pumped-storage-projects. Ημερομηνία πρόσβασης: 08-02-2024.
- [47] Pentilateral Energy Forum Support Group 2. *Generation Adequacy Assessment. Final Report*, 2020.
- [48] PJM. *Manual 21A. Revision 4*, 2023.
- [49] Northwest Power και Conservation Council. *Resource Adequacy in the Pacific Northwest. Methodology*, 2019.
- [50] J. Carvallo, N. Zhang, B. Leibowicz, T. Carr, S. Baik και P. Larsen. *A Guide for Improved Resource Adequacy Assessments in Evolving Power Systems*. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2023.
- [51] ENTSO-e. *European Resource Adequacy Assessment. Annex 2: Methodology*, 2023.
- [52] National Grid ESO. *AFRY Report. Resource Adequacy in the 2030's*, 2022.
- [53] IESO. *Methodology to Perform the Reliability Outlook*. 2021.
- [54] U.S. Department of Energy. *Hydropower Market Report. Water Power Technologies Office*, 2023.
- [55] PJM. *Effective Load Carrying Capability (ELCC). Report*, 2021.
- [56] National Grid ESO. *Electricity Capacity Report*. 2022.

-
- [57] R. Karki και R. Billinton. *Reliability Evaluation Considering Wind and Hydro Power Coordination*. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, No. 2, 2010.
- [58] ΑΔΜΗΕ. *Εγχειρίδιο Μηχανισμού Διασφάλισης Επαρκούς Ισχύος*. Έκδοση 3, 2012.
- [59] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. *Εθνικό Σχέδιο Ενέργειας και Κλίματος*. Προσχέδιο Αναθεωρημένης Έκδοσης, Οκτώβριος 2023.
- [60] EirGrid SONI. *National Resource Adequacy Assessment Methodology for Ireland and Northern Ireland*. Consultation, 2023.
- [61] ENTSO-e. *Downloads 2022: Input Data*. www.entsoe.eu/outlooks/eraa/2022/eraa-downloads/. Ημερομηνία πρόσβασης: 12-03-2024.
- [62] ENTSO-e. *European Resource Adequacy Assessment*. Annex 1: Input Data and Assumptions, 2023.