



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

**Εκτίμηση επάρκειας ισχύος σε ευρύτερη περιοχή
διασυνδεδεμένων ηλεκτρικών συστημάτων με την τεχνική Monte
Carlo**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Χ. Κωστανίκος

Επιβλέπων : Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2024



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

Εκτίμηση επάρκειας ισχύος σε ευρύτερη περιοχή διασυνδεδεμένων ηλεκτρικών συστημάτων με την τεχνική Monte Carlo

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Χ. Κωστανίκος

Επιβλέπων : Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26 Ιουνίου 2024

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

.....
Α. Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Γεωργιλάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2024

.....

Ιωάννης Χ. Κωστανίκος

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

Copyright © Ιωάννης Χ. Κωστανίκος, 2024
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά την μετάβαση του ηλεκτρικού συστήματος της νοτιοανατολικής (NA) Ευρώπης το 2030 προς ένα σύστημα με αυξημένες ΑΠΕ και περισσότερες τεχνολογίες ευελιξίας, όπως σταθμοί αποθήκευσης και διασυννοριακές διασυνδέσεις. Σε αυτό το περιβάλλον, βασικός στόχος της εργασίας είναι η εκτίμηση της επάρκειας ισχύος σε ένα σύνολο διασυνδεδεμένων περιοχών με τη τεχνική Monte Carlo και η διερεύνηση διαφορετικών μεθοδολογιών και στρατηγικών διαχείρισης των πόρων ευελιξίας.

Για το σκοπό αυτό αναπτύσσονται και μοντελοποιούνται διαφορετικές στρατηγικές διαχείρισης των αποθηκευτικών σταθμών και των διασυνδέσεων στα πλαίσια μοντέλου εκτίμησης της επάρκειας ισχύος πολλαπλών διασυνδεδεμένων περιοχών. Οι εναλλακτικές στρατηγικές υλοποιούνται ως προβλήματα βελτιστοποίησης που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση της μη εξυπηρετούμενης ενέργειας και διαφοροποιούνται ως προς τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος σε περιπτώσεις ανεπάρκειας. Για κάθε εναλλακτική στρατηγική που εξετάζεται υπολογίζονται και συγκρίνονται οι βασικοί δείκτες αξιοπιστίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας: LOLE (Loss of Load Expectation) και EENS (Expected Energy Not Served). Το μοντέλο εκτίμησης της επάρκειας ισχύος λαμβάνει υπόψη το στοχαστικό χαρακτήρα της διαθεσιμότητας των πόρων παραγωγής αξιοποιώντας την πιθανοτική μέθοδο Monte Carlo. Για την αποτελεσματικότερη ανάδειξη των μεθοδολογιών, πέρα από το βασικό σενάριο για το 2030, γίνονται διερευνήσεις με μειωμένη θερμική παραγωγή προς ανάδειξη του ρόλου της αποθήκευσης στην επάρκεια ισχύος. Για την μοντελοποίηση και τη βελτιστοποίηση του προβλήματος αξιοποιήθηκε το λογισμικό MATLAB.

Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία προσφέρει μια εκτίμηση για την επάρκεια ενός συνόλου διασυνδεδεμένων χωρών υπό την παρουσία ΑΠΕ και αποθήκευσης μέσα από τη σύγκριση διαφορετικών στρατηγικών διαχείρισης των πόρων παραγωγής και ευελιξίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Λέξεις-Κλειδιά: Επάρκεια Ισχύος , Τεχνική Προσομοίωσης Monte Carlo , Δείκτες αξιοπιστίας, Διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (Multi Area)

Abstract

This thesis explores the transition of the SE European power system in 2030 towards a system with increased RES and greater flexibility technologies such as storage stations and cross-border interconnections. In this environment, the main objective of the thesis is to estimate the power adequacy in a set of interconnected regions with the Monte Carlo technique and to investigate different methodologies and strategies for managing flexibility resources.

For this purpose, different management strategies of the storage stations and interconnections are developed and modeled in the context of a power adequacy assessment model of multiple interconnected areas. The alternative strategies are implemented as optimization problems aimed at minimizing the unserved energy and differ in how the system operates in cases of insufficiency. For each alternative strategy considered, the main reliability indicators of electricity systems are calculated and compared: LOLE (Loss of Load Expectation) and EENS (Expected Energy Not Served). The capacity adequacy estimation model considers the stochastic nature of the availability of generation resources by leveraging the probabilistic Monte Carlo method. In order to highlight the methodologies more effectively, beyond the basic scenario for 2030, investigations are carried out with reduced thermal production to highlight the role of storage in power sufficiency. MATLAB software was used to model and optimize the problem.

In summary, this thesis offers an assessment of the adequacy of a set of interconnected countries in the presence of RES and storage through the comparison of different storage integration techniques.

Keywords: Power Adequacy, Monte Carlo Simulation Technique, Reliability Indicators, Interconnected Power Systems (Multi Area)

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Σταυρό Παπαθανασίου, καθηγητή Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πρώτα από όλα για την ευκαιρία που μου έδωσε, κι ύστερα για την εμπιστοσύνη, την στήριξη του καθώς και την συμβολή του στην ενδυνάμωση της οπτικής και κρίσης μου αναφορικά με τα πλέον επίκαιρα ζητήματα του ενεργειακού τομέα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παντελή Δράτσα, υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π για την στήριξη και την υπομονή που έδειξε να με βοηθήσει αφιερώνοντας ατελείωτο χρόνο σε συζητήσεις και επίλυση αποριών.

Θα ήθελα να αφιερώσω αυτή την εργασία στους ανθρώπους που με στηρίζαν ώστε να φτάσω στο τέλος αυτού του ταξιδιού, την οικογένεια μου και τους φίλους και συνοδοιπόρους στη ζωή. Ειδική μνεία στον συμφοιτητή μου Τάσο που διαβήκαμε μαζί αυτόν τον μαραθώνιο και στους παιδικούς μου φίλους Βαγγέλη και Δημήτρη. Θα ήθελα να εκφράσω την αμέριστη ευγνωμοσύνη και αγάπη στους γονείς μου, Χρήστο και Χριστίνα, στην αδερφή μου, Μαρίνα, για τη στήριξη που μου παρείχαν και για τα εφόδια που με προίκισαν ώστε να μπορώ να υπάρξω σε αυτό το κόσμο. Τέλος, θα ήθελα να τιμήσω τη μνήμη των παππούδων μου Ιωάννη και Βάιας που δε βρίσκονται πλέον κοντά μας αλλά τόσο πολύ συνέβαλλαν στην διαμόρφωση του χαρακτήρα μου.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	3
Abstract	6
Ευχαριστίες	9
Κατάλογος σχημάτων.....	- 14 -
Κατάλογος Πινάκων	- 16 -
1. Εισαγωγή	- 18 -
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	- 19 -
1.2 Δομή της εργασίας.....	- 19 -
2. Αξιοπιστία και Επάρκεια ΣΗΕ	- 21 -
2.1 Εισαγωγή στην αξιοπιστία.....	- 21 -
2.2 Ιεραρχικά επίπεδα μελετών αξιοπιστίας ΣΗΕ	- 22 -
2.3 Δείκτες αξιοπιστίας.....	- 24 -
2.4 Κόστος Αξιοπιστίας	- 27 -
2.4.1 Ο δείκτης VoLL.....	- 28 -
3. Η μέθοδος Monte Carlo.....	- 32 -
3.1 Παραγωγή τυχαίων αριθμών.....	- 33 -
3.2 Στρατηγικές προσομοίωσης στην εκτίμηση Αξιοπιστίας	- 33 -
3.2.1 Μη ακολουθιακή (State Sampling) μέθοδος.....	- 33 -
3.2.2 Ακολουθιακή (State Duration Sampling) μέθοδος.....	- 34 -
3.3 Συντελεστής διακύμανσης	- 36 -
4. Βιβλιογραφική ανασκόπηση για την επάρκεια ισχύος των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	- 38 -
4.1 Εξέλιξη της επάρκειας παραγωγής σε συστήματα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας -	38 -

4.2	Αξία της αποθήκευσης στην επάρκεια ισχύος.....	- 42 -
4.3	Επάρκεια σε διασυνδεδεμένα συστήματα	- 43 -
4.4	Μελέτες επάρκειας ισχύος.....	- 47 -
4.4.1	Μελέτη ERAA	- 47 -
4.4.2	Μελέτη επάρκειας του Διαχειριστή του Ελληνικού Δικτύου Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ).....	- 51 -
5.	Μεθοδολογία: Μοντέλο εκτίμησης επάρκειας ισχύος	- 56 -
5.1	Μοντελοποίηση σταθμών παραγωγής	- 56 -
5.1.1	ΑΠΕ	- 57 -
5.1.2	Υδροηλεκτρικοί σταθμοί.....	- 57 -
5.1.3	Θερμικοί σταθμοί.....	- 59 -
5.1.4	Διασυνδέσεις.....	- 60 -
5.1.5	Αποθηκευτικοί σταθμοί	- 60 -
5.2	Εναλλακτικές πολιτικές διαχείρισης διασυνδέσεων και αποθηκευτικών σταθμών.....	- 61 -
5.2.1	Απλοποιημένη μέθοδος.....	- 62 -
5.2.2	Αναλυτική μέθοδος	- 66 -
5.3	Περιοχή Μελέτης.....	- 70 -
5.4	Δεδομένα εισόδου.....	- 74 -
5.4.1	Εγκατεστημένη ισχύς.....	- 74 -
5.4.2	Δείκτες αξιοπιστίας ανά τεχνολογία και ανά περιοχή	- 74 -
5.4.3	Κόστος λειτουργία θερμικών μονάδων και κόστη καυσίμων και δικαιωμάτων εκπομπών CO ₂	- 75 -
5.4.4	Κόστος απώλειας φορτίου	- 75 -
5.4.5	Επιλογή κλιματικών δεδομένων ΑΠΕ και ζήτησης.....	- 76 -
5.4.6	Ζήτηση	- 77 -
6.	Αποτελέσματα	- 78 -

6.1	Λειτουργία του μοντέλου με την απλοποιημένη μέθοδο.....	- 78 -
6.2	Λειτουργία του μοντέλου με την αναλυτική μέθοδο	- 80 -
6.2.1	Adequacy-oriented στρατηγική	- 81 -
6.2.2	Market oriented στρατηγική	- 82 -
6.2.3	Λειτουργία αποθηκών.....	- 84 -
6.3	Δείκτες Επάρκειας του συστήματος με τις δύο μεθόδους	- 85 -
6.4	Συνολικοί δείκτες επάρκειας για τη περιοχή μελέτης.....	- 87 -
6.5	Βαθμός χρησιμοποίησης διασυνδέσεων με την αναλυτική μέθοδο	- 88 -
6.6	Βαθμός χρησιμοποίησης θερμικής ισχύος ανά τεχνολογία	- 89 -
6.7	Περικοπές και διείσδυση ΑΠΕ με την αναλυτική μέθοδο	- 91 -
6.7.1	Διείσδυση ΑΠΕ.....	- 91 -
6.7.2	Περικοπές ΑΠΕ.....	- 93 -
6.8	Εισαγωγές-εξαγωγές ενέργειας με την αναλυτική μέθοδο	- 94 -
6.9	Αναλύσεις ευαισθησίας.....	- 99 -
6.9.1	Βηματική μείωση θερμικής παραγωγής με την αναλυτική μέθοδο.....	- 99 -
6.9.2	Προσομοίωση συστήματος με κοινό VoLL	- 103 -
7.	Επίλογος.....	- 108 -
7.1	Συμπεράσματα	- 108 -
7.2	Μελλοντικές προεκτάσεις.....	- 109 -
	Βιβλιογραφία	- 110 -

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1 : Αξιοπιστία ΣΗΕ	- 21 -
Σχήμα 2 : Επίπεδα ιεράρχησης ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	- 22 -
Σχήμα 3 : Μοντέλο ΙΕΙ.....	- 23 -
Σχήμα 4 : Κόστος για τον καταναλωτή , την εταιρεία κοινής ωφέλειας και συνολικά σε συνάρτηση με την αξιοπιστία του συστήματος[5].....	- 28 -
Σχήμα 5 : Τιμές του VoLL για τα νοικοκυριά σε διαφορετικές περιοχές της Ευρώπης..	- 30 -
Σχήμα 6 : Παράδειγμα TTF TTR[15]	- 35 -
Σχήμα 7 : Μεταβολή στο δείκτη LOLP όσο η διείσδυση αιολικής ενέργειας αυξάνει από ένα base σενάριο σε 10%(case 1) ,15%(case 2),20%(case 3) της εγκατεστημένης ισχύος[22]	- 39 -
Σχήμα 8 : Ένα σύστημα 3 περιοχών και η αναπαράσταση του δικτύου μεταφοράς	- 45 -
Σχήμα 9 : Capacity value των διασυνδέσεων μεταξύ 2 γειτονικών συστημάτων GB-FR (αριστερά) και DE-FR (δεξιά) με διαφορετικούς στόχους αξιοπιστίας.....	- 47 -
Σχήμα 10 : Το διασυνδεδεμένο ευρωπαϊκό σύστημα ενέργειας που μοντελοποιείται στην ERAA 2023	- 48 -
Σχήμα 11 Οι αρχές της προσομοίωσης MC για έναν δοσμένο έτος-στόχο	- 50 -
Σχήμα 12 : Περιγραφή των σταδίων κατάστρωσης της μελέτης επάρκειας-Διάγραμμα ροής.....	- 56 -
Σχήμα 13 : Σύνολο μεθόδων και στρατηγικών που αναπτύχθηκαν	- 62 -
Σχήμα 14 : Περιοχή Μελέτης.....	- 71 -
Σχήμα 15 : Η περιοχή μελέτης ανά ζώνη-κόμβο.....	- 72 -
Σχήμα 16 : Τιμές VoLL ανά χώρα	- 76 -
Σχήμα 17 : Συνολική ζήτηση ανά ζώνη και ανά χώρα	- 77 -
Σχήμα 18 : Λειτουργία του νησιωτικού κόμβου Κρήτη με την απλοποιημένη μέθοδο..	- 78 -
Σχήμα 19 : Λειτουργία του μοντέλου με την απλοποιημένη μέθοδο για την Σαρδηνία (ITSA)	- 79 -
Σχήμα 20 : Λειτουργία του μοντέλου με την 1 ^η στρατηγική της αναλυτικής μεθόδου για την Κρήτη (GR03)	- 81 -

Σχήμα 21 : Λειτουργία του μοντέλου με την 1 ^η στρατηγική της αναλυτικής μεθόδου για την Κύπρο (CY00)	- 82 -
Σχήμα 22 : Λειτουργία του μοντέλου με την 2η στρατηγική της αναλυτικής μεθόδου για την Κρήτη (GR03)	- 83 -
Σχήμα 23 : Λειτουργία του μοντέλου με την 2η στρατηγική της αναλυτικής μεθόδου για την Κύπρο (CY00)	- 83 -
Σχήμα 24 : Λειτουργία ITSA με τη στρατηγική adequacy-oriented	- 84 -
Σχήμα 25 : Λειτουργία ITSA με τη στρατηγική market-oriented	- 85 -
Σχήμα 26 : LOLE ανά κόμβο	- 86 -
Σχήμα 27 : EENS ανά κόμβο	- 87 -
Σχήμα 28 : Συνολικό EENS για τη περιοχή μελέτης	- 87 -
Σχήμα 29 : Συντελεστής διακύμανσης για το EENS	- 88 -
Σχήμα 30 : Βαθμοί χρησιμοποίησης θερμικής παραγωγής ανά κόμβο.....	- 90 -
Σχήμα 31 : Διεισδύσεις ΑΠΕ ανά ζώνη/κόμβο	- 92 -
Σχήμα 32 : Περικοπές ΑΠΕ.....	- 94 -
Σχήμα 33 : Εξαγωγές-Εισαγωγές ανά κόμβο	- 95 -
Σχήμα 34 : Ροές ισχύος μεταξύ των κόμβων	- 96 -
Σχήμα 35 : Μέσο προφίλ λειτουργίας διασυνδέσεων στη διάρκεια μιας ημέρας.....	- 98 -
Σχήμα 36 : Δείκτες LOLE ανά κόμβο με 10% μείωση της θερμικής παραγωγής	- 99 -
Σχήμα 37 : Δείκτες LOLE ανά κόμβο με 20% μείωση της θερμικής παραγωγής	- 100 -
Σχήμα 38 : LOLE ανά κόμβο με βηματική μείωση της θερμικής παραγωγής με την Adequacy στρατηγική.....	- 101 -
Σχήμα 39 : LOLE ανά κόμβο με βηματική μείωση της θερμικής παραγωγής με την Market στρατηγική.....	- 101 -
Σχήμα 40 : EENS ως ποσοστό της ζήτησης (%) ανά κόμβο με βηματική μείωση της θερμικής παραγωγής με την Adequacy στρατηγική	- 102 -
Σχήμα 41 : EENS ως ποσοστό της ζήτησης (%) ανά κόμβο με βηματική μείωση της θερμικής παραγωγής με την Market στρατηγική.....	- 103 -
Σχήμα 42 : Δείκτης LOLE με την στρατηγική Adequacy Oriented με την διερεύνηση για το VoLL.....	- 104 -

Σχήμα 43 : Δείκτης LOLE με την στρατηγική Market Oriented με την διερεύνηση για το VoLL	- 104 -
Σχήμα 44 : Συγκριτικά αποτελέσματα LOLE για κοινό και διαφορετικό VoLL με μείωση 20% της θερμικής παραγωγής.....	- 105 -
Σχήμα 45 : Δείκτης EENS με την στρατηγική Adequacy Oriented με την διερεύνηση για το VoLL	- 106 -
Σχήμα 46 : Δείκτης EENS με την στρατηγική Market Oriented με την διερεύνηση για το VoLL	- 107 -
Σχήμα 47 : Συγκριτικά αποτελέσματα EENS για κοινό και διαφορετικό VoLL με μείωση 20% της θερμικής παραγωγής.....	- 107 -

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 : Πιθανότητες καταστάσεων στοιχείων του ΣΗΕ,2 καταστάσεις.....	- 34 -
Πίνακας 2 : Πιθανότητες καταστάσεων στοιχείων του ΣΗΕ,3 καταστάσεις.....	- 34 -
Πίνακας 3 : Αναλυτική παράθεση κόμβων και διασυνδέσεων.....	- 73 -
Πίνακας 4 : Εγκατεστημένη ισχύς παραγωγής ανά τεχνολογία.....	- 74 -
Πίνακας 5 : Δείκτες αξιοπιστίας θερμικών τεχνολογιών ανά ζώνη	- 75 -
Πίνακας 6 : Μεταβλητό κόστος παραγωγής ανά τεχνολογίας(€/MWh).....	- 75 -
Πίνακας 7 : Βαθμός χρησιμοποίησης διασυνδέσεων.....	- 89 -
Πίνακας 8 : Διεισδύσεις ΑΠΕ Ελλάδας, Ιταλίας.....	- 93 -

1. Εισαγωγή

Σε μια εποχή όπου η αειφορία και η ανανεώσιμη ενέργεια καθίστανται κεντρικοί πυλώνες της ενεργειακής πολιτικής, η επάρκεια ισχύος αποκτά νέα διάσταση και σημασία. Στην Ευρώπη, η μετάβαση προς τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι πλέον αναπόφευκτη, ως μέρος των προσπαθειών να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να επιτευχθεί η κλιματική αλλαγή. Η υψηλή διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα της Ευρώπης φέρνει μια νέα προοπτική, αλλά και νέες προκλήσεις στον τομέα της επάρκειας ισχύος.

Η σημασία της επάρκειας ισχύος σε αυτό το πλαίσιο είναι διπλής φύσης. Αφενός, η ανάγκη για σταθερότητα και αξιοπιστία του ενεργειακού συστήματος είναι πιο επίκαιρη από ποτέ. Η αυξημένη στοχαστικότητα που σχετίζεται με τις ΑΠΕ, λόγω της διακυμαντικής φύσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, επιβάλλει την ανάγκη για επίτονη προσοχή στην εξασφάλιση της σταθερότητας του ηλεκτρικού δικτύου και της διαθεσιμότητας ενέργειας.

Από την άλλη πλευρά, η επάρκεια ισχύος αποτελεί κλειδί για την αποδοτική ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα. Η ικανότητα να προσαρμοστεί το σύστημα παραγωγής και διανομής ενέργειας σε μεταβαλλόμενες συνθήκες προκύπτει ως κρίσιμη προϋπόθεση για την επιτυχή ένταξη των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα. Με την ανάπτυξη μεθόδων και τεχνολογιών που επιτρέπουν την αντιμετώπιση της στοχαστικότητας και την ασφαλή λειτουργία του συστήματος ακόμη και σε συνθήκες υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ, η επάρκεια ισχύος καθίσταται πυρήνας της ενεργειακής μετάβασης προς ένα πιο βιώσιμο και ανθρώπινο μέλλον.

Η μέθοδος Monte Carlo αποτελεί μια ισχυρή αριθμητική τεχνική που επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων συστημάτων με τη χρήση τυχαίων αριθμών. Η εφαρμογή της στον τομέα της ενεργειακής πολιτικής μπορεί να παράσχει σημαντικές εκτιμήσεις και προβλέψεις σχετικά με την επάρκεια ισχύος, λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα και την αβεβαιότητα που σχετίζονται με τον ενεργειακό τομέα

1.1 Σκοπός της εργασίας

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία επιδιώκει να διερευνήσει την επάρκεια ισχύος στη Νοτιοανατολική Ευρώπη με τη χρήση της μεθόδου Monte Carlo. Η επάρκεια ισχύος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφάλεια και την ομαλή λειτουργία του ενεργειακού συστήματος, καθώς επηρεάζει τη δυνατότητα της περιοχής να αντιμετωπίσει τις ενεργειακές ανάγκες της και να αντιμετωπίσει πιθανές κρίσεις. Βασικός σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας εκτίμησης επάρκειας σε μια περιοχή διασυνδεδεμένων ζωνών με έτος αναφοράς το 2030. Για την υλοποίηση του μοντέλου, γίνεται χρήση της μεθόδου Monte Carlo για την πιθανοτική ανάλυση και του λογισμικού MATLAB. Ένας δεύτερος σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη διαφορετικών στρατηγικών διαχείρισης των σταθμών αποθήκευσης του δικτύου ως στοιχεία ευελιξίας και η συνεισφορά της κάθε μίας στην επάρκεια και στην εν γένει λειτουργία του συστήματος

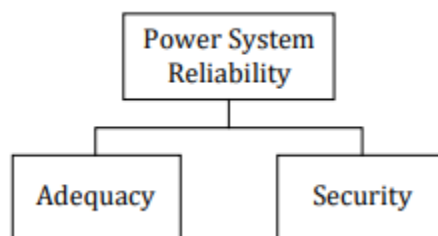
1.2 Δομή της εργασίας

Η εργασία οργανώνεται σε 7 κεφάλαια. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια εισαγωγή στην ορολογία της αξιοπιστίας και ειδικότερα της επάρκειας σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Το κεφάλαιο 3 αφιερώνεται στην εξήγηση της μεθοδολογίας Monte Carlo για τη πιθανοτική προσομοίωση του προβλήματος. Μια βιβλιογραφική ανασκόπηση γύρω από θέματα που αφορούν την συνεισφορά διαφόρων συνιστωσών του συστήματος μαζί με δημοσιευμένες μελέτες επάρκειας δίνεται στο κεφάλαιο 4. Στο κεφάλαιο 5 ακολουθεί η περιγραφή των μεθοδολογιών που ακολουθήθηκε, οι τρόποι μοντελοποίησης, οι παραδοχές του μοντέλου και τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια, το κεφάλαιο 6 παρουσιάζει παραδείγματα εφαρμογής των αναπτυσσόμενων μεθοδολογιών, τα αποτελέσματα επάρκειας των μεθοδολογιών καθώς και λειτουργίας του μοντέλου. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια ανάλυση ευαισθησίας ώστε να υπολογιστούν οι δείκτες επάρκειας ισχύος υπό συνθήκες μειωμένης θερμικής παραγωγής και διαφορετικής προτεραιοποίησης στην κάλυψη των ελλειμμάτων. Τέλος, στο κεφάλαιο 7 γίνεται μια σύνοψη της εργασίας και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν σε συνδυασμό και με τις μελλοντικές προεκτάσεις της.

2. Αξιοπιστία και Επάρκεια ΣΗΕ

2.1 Εισαγωγή στην αξιοπιστία

Η αξιοπιστία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας διαχωρίζεται σε δύο βασικές έννοιες, την ασφάλεια και την επάρκεια του συστήματος [1], [2], λαμβάνοντας υπόψιν διαφορετικές όψεις της ανάλυσης αξιοπιστίας.



Σχήμα 1 : Αξιοπιστία ΣΗΕ

Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο, είναι ότι οι μελέτες επάρκειας σχετίζονται με το στατικές συνθήκες ενός συστήματος, ενώ η αξιολόγηση ασφάλειας συνδέεται με τις δυναμικές καταστάσεις του συστήματος. Η αξιολόγηση επάρκειας ενός συστήματος ισχύος είναι στην απλούστερη μορφή του μια αξιολόγηση του αν η ικανότητα παραγωγής ενός συστήματος είναι επαρκής για να καλύψει την απαίτηση φορτίου του συστήματος. Άλλες εκτιμήσεις μπορούν επίσης να συμπεριληφθούν στην αξιολόγηση, όπως εάν οι υποδομές μεταφοράς και διανομή του συστήματος μπορούν να παρέχουν επαρκή μεταφορά ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στους τελικούς καταναλωτές.

Η αξιολόγηση της ασφάλειας σχετίζεται με τα δυναμικά φαινόμενα που προκαλούνται στο σύστημα όταν το σύστημα εκτίθενται σε διάφορες διαταραχές που προκύπτουν μέσα στο σύστημα, π.χ. σφάλματα γραμμής ή απώλεια μεγάλων μονάδων παραγωγής. Κάτω από τέτοιες διαταραχές όπου προκαλούνται παροδικά φαινόμενα, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στο εάν το σύστημα μπορεί να παραμείνει εντός των ορίων ευστάθειας του. Στην πράξη, αυτές οι επιπτώσεις υπάρχουν επίσης κάθε φορά που ένα σύστημα εισέρχεται ή αποχωρεί από οποιαδήποτε κατάσταση συστήματος. Μελέτες επάρκειας συνήθως αγνοούν τις σχετικές επιδράσεις και εξετάζουν μόνο εάν στη σταθερή κατάσταση του συστήματος πληρούνται οι απαιτήσεις για κάθε κατάσταση συστήματος [2]. Τόσο η κατάσταση αναχώρησης όσο και η κατάσταση άφιξης μπορεί να είναι επαρκείς καταστάσεις, αλλά η ίδια η μετάβαση μπορεί να είναι ουσιαστική για τον προσδιορισμό

του εάν η κατάσταση άφιξης είναι μια μεταβατική ή στατική κατάσταση. Ως εκ τούτου, μπορεί να υποστηριχθεί ότι ο διαχωρισμός σε δύο υποκατηγορίες γίνεται για λόγους άνεσης και όχι λόγω της πρακτικής συμπεριφοράς του συστήματος [1].

2.2 Ιεραρχικά επίπεδα μελετών αξιοπιστίας ΣΗΕ

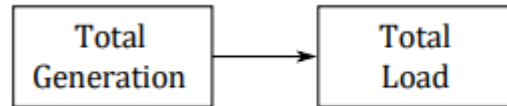
Οι μελέτες αξιοπιστίας ΣΗΕ συχνά χωρίζονται σε ιεραρχικά επίπεδα (ΙΕ), που καθορίζονται από ποιες λειτουργικές ζώνες του ΣΗΕ συμπεριλαμβάνονται[2]. Το 1^ο επίπεδο (ΙΕΙ) αξιολογεί την επάρκεια στο σύστημα παραγωγής όταν το 2^ο επίπεδο (ΙΕΙΙ) περιλαμβάνει τόσο τα στοιχεία παραγωγής αλλά και μεταφοράς ενέργειας στην αξιολόγηση. Μια ολοκληρωμένη μελέτη αξιολόγησης της επάρκειας του συστήματος (ΙΕΙΙΙ) ,περιλαμβάνει και το δίκτυο διανομής επιπλέον των στοιχείων που περιλαμβάνονται στις μελέτες ΙΕΙΙ.Το κύριο πρόβλημα των ΙΕΙΙΙ μελετών είναι ότι η συμπερίληψη των εγκαταστάσεων διανομής του συστήματος απαιτεί τη δημιουργία ενός πολύ μεγάλου μοντέλου για την ολοκληρωμένη προσομοίωση του συστήματος.



Σχήμα 2 : Επίπεδα ιεράρχησης ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι μελέτες ΙΕΙ ασχολούνται με την τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας και την ικανότητα τους να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις φορτίου του συστήματος. Σε αυτές τις μελέτες , η μεταφορική ικανότητα του συστήματος στους διάφορους κόμβους του συστήματος μένει εκτός ανάλυσης .Μια αναπαράσταση των στοιχείων που απαιτούνται σε ένα ΙΕΙ μοντέλο φαίνονται στο σχήμα 3,όπου οι μονάδες παραγωγής συνδυάζονται σε ένα ισοδύναμο μοντέλο και τα φορτία συνδυάζονται παρομοίως. Διάφορα ντετερμινιστικά κριτήρια έχουν και ακόμη χρησιμοποιηθεί από διαχειριστές για να αξιολογηθεί η επάρκεια του συστήματος. Ανάμεσα σε αυτά είναι το κριτήριο N-1 και διάφορα κριτήρια

ποσοστιαίας εφεδρείας ισχύος.[2] Το κριτήριο N-1 δηλώνει ότι το σύστημα πρέπει να μπορεί να διαχειριστεί την απώλεια της μεγαλύτερης μονάδας παραγωγής ενώ το ποσοστιαίο κριτήριο ότι ένα ποσοστό της διαθέσιμης ισχύος παραγωγής πρέπει να διατηρείται ως εφεδρεία για έκτακτες καταστάσεις. Αυτά τα κριτήρια θεωρούνται ντετερμινιστικά, επειδή συσχετίζουν ένα προκαθορισμένο (pre-determined) αποτέλεσμα στην περίπτωση απρόβλεπτων καταστάσεων.



Σχήμα 3 : Μοντέλο IEI

Τα κριτήρια που είναι βασισμένα σε πιθανοτικές μεθόδους έχουν αποκτήσει αυξημένο ενδιαφέρον ,λόγω της αντανάκλασης τους σε αληθινούς παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία του συστήματος. Στις μελέτες IEI η βασική προσέγγιση της μοντελοποίησης είναι να συνδυαστεί το μοντέλο παραγωγής και το μοντέλο φορτίου για να σχηματιστεί ένα πιθανοτικό μοντέλο ρίσκου. Οι δείκτες αξιοπιστίας αξιολογούνται συγκρίνοντας την τελική διαθέσιμη παραγωγή με τις συνολικές απαιτήσεις φορτίου. Οι μέθοδοι αξιοπιστίας που είναι βασισμένοι στην πιθανότητα μπορούν ευρύτατα να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, αναλυτικές και προσομοιώσεις. Οι αναλυτικές μέθοδοι αναπαριστούν το σύστημα σαν ένα μαθηματικό μοντέλο, από το οποίο οι δείκτες αξιοπιστίας υπολογίζονται λύνοντας ένα σετ εξισώσεων. Διάφορες αναλυτικές μέθοδοι έχουν δημιουργηθεί, ανάμεσά τους η μέθοδος χωρικής κατάστασης, η μέθοδος απαρίθμησης ενδεχομένων και η μέθοδος σετ minimal-cut[3]. Η μέθοδος χωρικής κατάστασης θεωρεί όλες τις πιθανές καταστάσεις του συστήματος κατά την αξιολόγησή του. Εάν το μέγεθος του συστήματος είναι τεράστιο, αυτό θα οδηγήσει σε μια τεράστια ποσότητα από καταστάσεις του συστήματος που θα πρέπει να αξιολογηθούν. Έτσι η μέθοδος εξαρτάται από τις απλοποιήσεις που θα κάνουμε όπως τεχνικές απομείωσης του δικτύου, για να μειωθεί σημαντικά ο αναγκαίος υπολογιστικός φόρτος. Η μέθοδος απαρίθμησης ενδεχομένων αξιολογεί μόνο έναν επιλεγμένο αριθμό ενδεχομένων, όπου είναι σύνθητες ο επιθυμητός βαθμός ακρίβειας που επιθυμείτε να καθορίζει το βάθος των ενδεχομένων. Στην minimal cut μέθοδο ,τέλος, η προσοχή δίνεται στον υπολογισμό των δεικτών αξιοπιστίας σε συγκεκριμένα σημεία του

φορτίου και όχι σε ολόκληρο το σύστημα. Έτσι αξιολογούνται μόνο ενδεχόμενα που μπορούν να επηρεάσουν τους κόμβους φορτίου οδηγώντας σε μείωση του υπολογιστικού χρόνου.

Οι μέθοδοι προσομοίωσης, πιο συχνά με θεμέλιο την μεθοδολογία Monte Carlo (MC), προσομοιώνουν μια σειρά από αληθινά πειράματα στο μαθηματικό μοντέλο αναπαράστασης του συστήματος. Η διαδικασία προσομοίωσης μπορεί να εντοπίσει τη τυχαία συμπεριφορά του συστήματος. Επιπλέον των παρεχόμενων μέσων τιμών των δεικτών, οι μέθοδοι MC μπορούν να δώσουν κατανομές για αυτούς τους δείκτες αν η μέθοδος που θα επιλεγεί είναι ακολουθιακή αντί για μη ακολουθιακή [4]. Οι ακολουθιακές μέθοδοι πρέπει επίσης να επιλέγονται όταν η λειτουργία του συστήματος βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα. Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύεται λεπτομερώς η μέθοδος MC και τα διάφορα στάδια της.

2.3 Δείκτες αξιοπιστίας

Οι πιθανοτικές μελέτες αξιοπιστίας που συχνά χρησιμοποιούνται σήμερα είναι βασισμένες στα loss of load (LOL) συμβάντα του συστήματος. Οι βασικοί δείκτες αξιολογούν την συχνότητα και τις διάρκειες των συμβάντων LOL, αλλά δεν ποσοτικοποιούν το μέγεθος σε ενέργεια του συμβάντος LOL. Για αυτό έχουμε και δείκτες που αξιολογούν αυτή ακριβώς τη διάσταση της πιθανής ανεπάρκειας του συστήματος. Στα [1], [5], [6] έχουμε τη περιγραφή διάφορων δεικτών. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ερμηνεία του υπολογισμένου δείκτη εξαρτάται άμεσα από την επιλογή του μοντέλου φορτίου που προσομοιώνεται [7]. Σε κοινά μοντέλα χρησιμοποιούνται η ετήσια αιχμή του φορτίου, η ημερήσια αιχμή του φορτίου και η ωριαία αιχμή του φορτίου. Σε αυτή τη διπλωματική θα ακολουθηθεί η τρίτη επιλογή, δηλαδή η ωριαία αναπαράσταση του φορτίου.

Ο πρώτος σημαντικός δείκτης είναι η Αναμενόμενη Απώλεια Φορτίου (Loss of Load Expected - LOLE) [μέρες/έτος ή ώρες/έτος]. Ο δείκτης αυτός εκφράζει τον αναμενόμενο αριθμό σε μονάδες χρόνου στη περίοδο μελέτης που το σύστημα θα εμφανίσει LOL.

$$LOLE = \sum_{i \in S} p_i \cdot T \quad (1)$$

Ένα σύστημα έχει αρκετές πιθανές καταστάσεις κάθε μία από τις οποίες έχει πιθανότητα εμφάνισης p_i . Το σετ των καταστάσεων που έχουν LOL συμβολίζονται με S. Για τον υπολογισμό του δείκτη πραγματοποιείται μια άθροιση των πιθανοτήτων εμφάνισης των καταστάσεων αυτών. Το άθροισμα έπειτα πολλαπλασιάζεται με την με την περίοδο μελέτης T. Συνήθεις επιλογές του T είναι σε μέρες ή σε ώρες ανά έτος. Μία συχνότητα μέρες/έτος αποκτάται με την χρήση ημερήσια αιχμής φορτίου, ενώ μια συχνότητα ώρες/έτος αποκτάται χρησιμοποιώντας την ωριαία αιχμή φορτίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι η άμεση μετατροπή από μέρες/έτος σε ώρες/έτος δεν μπορεί να γίνει καθώς αυτά αποκτούνται με διαφορετικό μοντέλο φορτίου[7].

Σε αυτή τη διπλωματική χρησιμοποιούνται μέθοδοι Montecarlo (MC) για την προσομοίωση των καταστάσεων του συστήματος που προσομοιώνονται για πολλαπλά χρόνια. Οι δείκτες αξιοπιστίας, λοιπόν, υπολογίζονται για κάθε έτος προσομοίωσης, πριν οι τελικοί δείκτες υπολογιστούν σαν ο μέσος όρος των ετήσιων δεικτών. Έτσι η (1) γίνεται:

$$LOLE = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^M x_j \cdot \Delta t \right)}{N} \quad (2)$$

Ο αριθμός των διενεργηθέντων ετών προσομοίωσης δίνεται από το N. Ένα έτος προσομοίωσης αποτελείται από M χρονικές στιγμές, που συμπεριφέρονται ως διακριτές καταστάσεις του συστήματος. Για κάθε χρονική στιγμή, υπάρχει ένα αποτέλεσμα x_j , το οποίο είναι 1 αν έχουμε LOL και 0 αν όχι. Η διάρκεια της χρονικής μεταβολής δίνεται από την Δt . Στον υπολογισμό του δείκτη LOLE, κάθε αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με την διάρκεια της χρονικής μεταβολής πριν να αθροιστούν όλα τα αποτελέσματα. Το σύνολο που προκύπτει διαιρείται με τον αριθμό των ετών προσομοίωσης.

Ένας πιθανοτικός δείκτης που χρησιμοποιείται είναι και η Πιθανότητα Απώλειας Φορτίου (Loss of Load Probability - LOLP). Σε κάποιες εφαρμογές, ο δείκτης υπολογίζεται από την διαίρεση του δείκτη LOLE με τον αριθμό των διακριτών χρονικών στιγμών ανά έτος (πχ 8760 αν ο δείκτης είναι σε ώρες/έτος). Μια γενική αναπαράσταση του δείκτη είναι η :

$$LOLP = \sum_{i \in S} p_i \quad (3)$$

Ο δείκτης υπολογίζεται με παρόμοιο τρόπο όπως ο δείκτης LOLE, με εξαίρεση ότι οι πιθανότητες δε έχουν βαρύτητα σχετική με τη περίοδο μελέτης, δίνεται δηλαδή σαν το άθροισμα των πιθανοτήτων των καταστάσεων ανεπαρκειών. Ο δείκτης LOLP μπορεί να διαφέρει από το αν υπολογίζεται από το ημερήσιο ή το ωριαίο μοντέλο αιχμής φορτίου. Ένας υπολογισμός λοιπόν του LOLP προκύπτει από την διαίρεση του δείκτη LOLE από τον αριθμό των χρονικών διαστημάτων M ανά έτος.

$$LOLP = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^M x_j \cdot \Delta t \right)}{N \cdot M} \quad (4)$$

Ένας επόμενος δείκτης αξιοπιστίας που αποτιμά και την σοβαρότητα και της ανεπάρκειας είναι η Αναμενόμενη Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργεια (Expected Energy Not Served - EENS) [MWh/έτος]. Ο δείκτης υπολογίζεται με παρόμοιο τρόπο όπως και ο LOLE με την εξαίρεση ότι η σοβαρότητα του ενεργειακού ελλείμματος C_i , συμπεριλαμβάνεται στο γινόμενο των πιθανοτήτων. Έτσι η μαθηματική εξίσωση δίνεται στην (5), όπου το T δίνεται σε ώρες ανά έτος.

$$EENS = \sum_{i \in S} p_i \cdot C_i \cdot T \quad (5)$$

Για αυτήν την διπλωματική, αξιοποιείται η εξίσωση (6). Στο υπολογισμό του δείκτη, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πολλαπλασιάζονται με το ενεργειακό έλλειμμα και την διάρκεια της χρονικής στιγμής. Αν το σύστημα δε εμφανίζει LOL, το ενεργειακό έλλειμμα ισούται με 0.

$$EENS = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^M x_j \cdot C_j \cdot \Delta t \right)}{N} \quad (6)$$

Τέλος, παρουσιάζεται ο δείκτης της Αναμενόμενης Συχνότητας Απώλειας Φορτίου (Loss of Load Frequency-LOLF). Ορίζεται ως ο αριθμός των περιστατικών κατά τα οποία η ζήτηση υπερβαίνει την παραγωγή του συστήματος, για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Από τους παραπάνω, οι πιο διαδομένοι δείκτες αξιοπιστίας που χρησιμοποιούνται διεθνώς είναι η Αναμενόμενη Απώλεια Φορτίου (LOLE) και η Αναμενόμενη Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργεια (EENS). Παρατηρείται, ωστόσο, ότι γενικά η Αναμενόμενη Μη

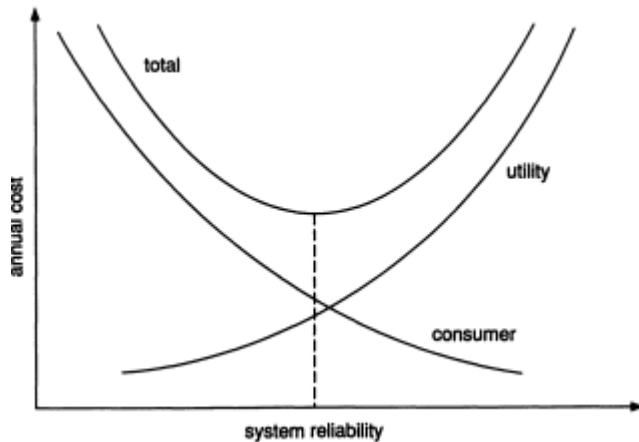
Εξυπηρετούμενη Ενέργεια καθορίζει απευθείας την ικανότητα επάρκειας του συστήματος παραγωγής, ενώ η Αναμενόμενη Απώλεια Φορτίου απλώς υποδηλώνει τις ώρες (ή ημέρες) κατά τις οποίες η ζήτηση δεν μπορεί να ικανοποιηθεί πλήρως, χωρίς να δίνει συγκεκριμένα στοιχεία για την μη εξυπηρετούμενη ζήτηση και, συνεπώς, το μέγεθος του προβλήματος στο σύστημα παραγωγής.

Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι οι υψηλές τιμές των ανωτέρων δεικτών δεν σημαίνουν απαραίτητα απώλεια φορτίου. Η τιμή του δείκτη LOLE δεν δηλώνει απαραίτητα ότι θα υπάρξουν διακοπές στην ηλεκτροδότηση για το συγκεκριμένο αριθμό ωρών. Ωστόσο, οι υψηλές τιμές αυτών των δεικτών αποτελούν σαφή ένδειξη ότι απαιτείται αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για να καλυφθεί ασφαλώς η ζήτηση, δηλώνοντας το υψηλότερο ρίσκο σχετικά με την ικανότητα του συστήματος παραγωγής να εξυπηρετήσει τη ζήτηση.

2.4 Κόστος Αξιοπιστίας

Οι μελέτες επάρκειας του συστήματος είναι μόνο ένα μέρος από την συνολική αξιολόγηση του. Τα οικονομικά των μερών του συστήματος παίζουν σημαντικό ρόλο στην διαδικασία αποφάσεων για επενδύσεις στο σύστημα. Η πιο απλή προσέγγιση για τη συσχέτιση με την αξιοπιστία περιλαμβάνει τη συμπερίληψη του επενδυτικού κόστους για την επέκταση του συστήματος. Σε αυτή τη προσέγγιση, η αύξηση της αξιοπιστίας συνεκτιμάται ταυτόχρονα με το επενδυτικό κόστος που συνδέεται με αυτή. Διαιρώντας αυτό το κόστος με την αύξηση της αξιοπιστίας μας παίρνουμε το προστιθέμενο κόστος της αξιοπιστίας. Είναι μια ωφέλιμη προσέγγιση όταν επιδιώκουμε να συγκρίνουμε εναλλακτικά σενάρια για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός ανεπαρκούς συστήματος.

Η αδυναμία αυτής της προσέγγισης είναι ότι δε συσχετίζει την πιθανότητα επιστροφής της επένδυσης ή το πραγματικό κέρδος για το καταναλωτή, την εταιρεία κοινής ωφέλειας και τη κοινωνία[5]. Για να έχουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα είναι αναγκαίο να συγκρίνουμε το κόστος επάρκειας (το επενδυτικό κόστος δηλαδή για να εξασφαλιστεί συγκεκριμένο επίπεδο επάρκειας) με την αξία της επάρκειας (το όφελος δηλαδή για την εταιρεία κοινής ωφέλειας, τον καταναλωτή και τη κοινωνία). Ένα βήμα προς αυτή τη κατεύθυνση είναι η εισαγωγή ενός επιπέδου επιπρόσθετου κόστους που πιστεύεται ότι είναι αποδεκτό από το τελικό καταναλωτή της ενέργειας.



Σχήμα 4 : Κόστος για τον καταναλωτή , την εταιρεία κοινής ωφέλειας και συνολικά σε συνάρτηση με την αξιοπιστία του συστήματος[5]

2.4.1 Ο δείκτης VoLL

Ο δείκτης Αξίας της Απώλειας Ενέργειας (Value of Loss Load-VoLL) αποτελεί ένα μέτρο που χρησιμοποιείται στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας για να εκτιμήσει το κόστος της απώλειας φορτίου λόγω έλλειψης ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως ορίζεται ως η οικονομική αξία της απώλειας ενός μοναδιαίου φορτίου που δεν εξυπηρετείται λόγω έλλειψης ηλεκτρικής ενέργειας. Ο τρόπος που ορίζεται ο δείκτης VoLL διαφέρει ανάλογα με την περιοχή και την εφαρμογή. Συνήθως καθορίζεται από τις ανάγκες και τις οικονομικές συνέπειες που προκύπτουν από τη μη διαθεσιμότητα της ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, μπορεί να υπολογιστεί μέσω των επιπτώσεων σε βιομηχανικές διαδικασίες, υποδομές, ζωή και ασφάλεια των ανθρώπων. Ορισμένες μέθοδοι για τον υπολογισμό του VoLL μπορεί να βασίζονται σε στατιστικά δεδομένα, ερωτηματολόγια ή εκτιμήσεις από ειδικούς του τομέα. Συνήθως εκφράζεται σε χρήματα ανά μονάδα φορτίου (συνήθως σε €/MWh).

Για τον υπολογισμό της τιμής του δείκτη δεν υπάρχει μία μεθοδολογία. Για παράδειγμα, στην Μεγάλη Βρετανία η τιμή του VoLL είναι ο σταθμισμένος μέσος με βάση το φορτίο ανάμεσα στο VoLL των νοικοκυριών και των μικρομεσαίων επιχειρήσεων κατά τη χειμερινή αιχμή.[8] Οι μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές δεν λήφθηκαν υπόψιν καθώς θεωρήθηκε ότι θα μπορούσαν να επωφεληθούν από συμβόλαια απόρριψης φορτίου ή άλλου μετριασμού όπως εφεδρείες παραγωγής.

Επίσης αν το VoLL αξιοποιηθεί για να εξεταστούν τα κόστη και τα οφέλη των εγκατάστασεων μεταφοράς και διανομής του δικτύου ,τότε θα ήταν προτιμότερο οι τιμές του να ποικίλλουν αναλόγως με τη χρονική περίοδο και το σετ που εξετάζεται.

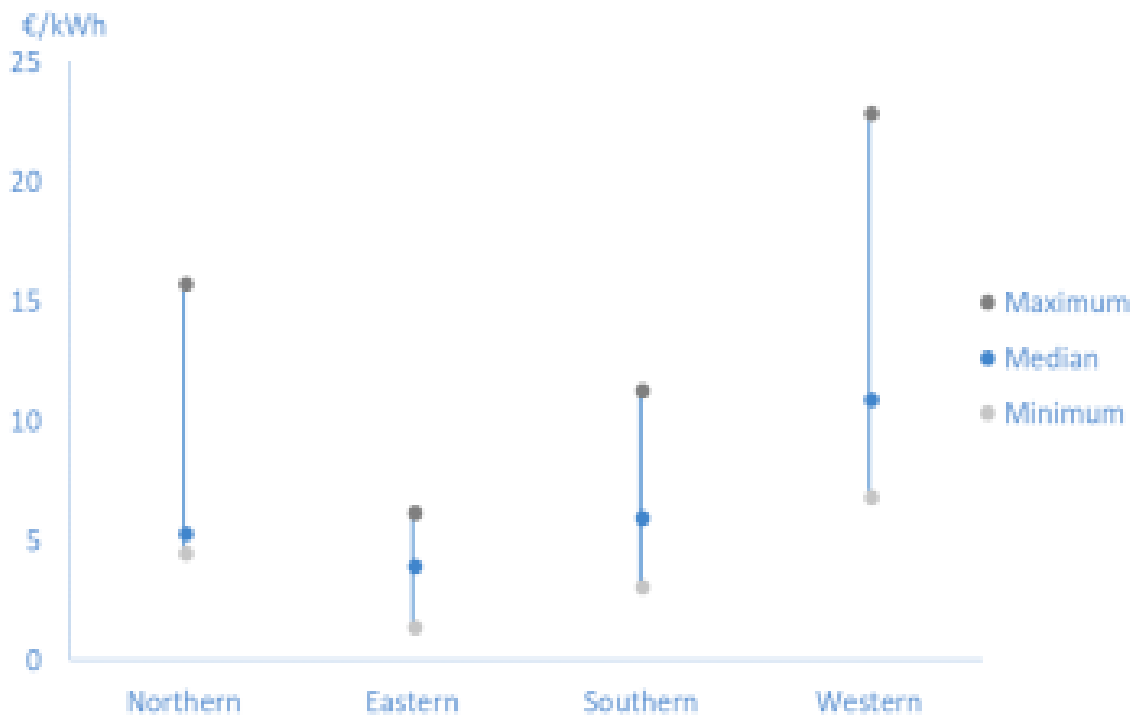
Στην [9] εξετάζεται η θεώρηση διαφορετικών VoLLs και διαφορετικών επίπεδων αξιοπιστίας όσον αφορά τις επενδύσεις στο δίκτυο μεταφοράς. Θέτουν το ζήτημα ότι η «σωστή» τιμή για το VoLL πρέπει να εξαρτάται από το πως γίνεται η περικοπή ηλεκτρικής ενέργειας και αν χρήστες με υψηλότερο VoLL μπορούν να περικοπούν ύστερα από άλλους με μικρότερες τιμές VoLL.Επίσης, η περικοπή συνήθως περιλαμβάνει μιας σειρά από δράσεις πριν την παύση λειτουργίας, όπως η ελεγχόμενη μείωση της τάσης. Αυτές οι θεωρήσεις μελετώνται με λεπτομέρεια στην [8] αλλά η εφαρμογή ενός μοναδικού σταθμισμένου μέσου VoLL φαίνεται σαν μια απόφαση πολιτικής.

Οι δυο πιο κοινές μέθοδοι υπολογισμού του είναι οι «αποκαλυφθείσες» προτιμήσεις και οι «δηλωμένες» προτιμήσεις. Οι πρώτες είναι πιο κοντά στις πραγματικές δράσεις των καταναλωτών. Αυτό συμβαίνει καθώς η μέθοδος δηλωμένων προτιμήσεων είναι μια αποτύπωση του τι ισχυρίζονται οι άνθρωποι ενώ οι αποκαλυφθείσες προτιμήσεις του τι πραγματικά κάνουν. Ωστόσο, οι επιφυλάξεις για τις αποκαλυφθείσες προτιμήσεις περιορίζουν τη χρήση και της γενικότερη καταλληλότητα τους. Η μελέτη [10] τονίζει τους περιορισμούς που συνδέονται με τη μέθοδο των αποκαλυφθείσων προτιμήσεων, οι οποίες περιλαμβάνουν τη δυσκολία στην απόκτηση σημαντικής διασποράς δεδομένων και στην μη ικανότητα της να αξιοποιηθεί αυτή η προσέγγιση για να αξιολογηθεί η ζήτηση του καταναλωτή υπό αυτές τις συνθήκες. Παρομοίως, οι μέθοδοι δηλωμένης προτίμησης επίσης περιέχουν διάφορους περιορισμούς και ένα από τα κυριότερα ζητήματα είναι η υποθετική προκατάληψη που προκύπτει από την εκτροπή των απαντήσεων για υποθετικές μορφές και για μη υποθετικές μορφές.[11].

Για τη μέθοδο της αποκαλυφθείσας προτίμησης ο ACER [12]προτείνει ότι περιπτώσεις μελέτης από προηγούμενες απορρίψεις για τη προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να αξιοποιηθούν ως φυσικά πειράματα ,όπου οι εκτιμήσεις για τα τελικά κόστη για την οικονομία και τους καταναλωτές μπορούν να δώσουν εκτιμήσεις για το VoLL.Ωστόσο, συμβάντα όπου διενεργούνται τέτοιες μελέτες μπορεί να είναι πολύ σπάνια ,δεδομένου της υψηλής ασφάλειας προμήθειας ενέργειας στην Ευρώπη.

Η 2^η μέθοδος για τον υπολογισμό του VoLL βασίζεται στη προσέγγιση των δηλωμένων προτιμήσεων. Αυτή περιλαμβάνει τη διενέργεια ερευνών με τη μέθοδο ενδεχόμενης αποτίμησης (Contingent Valuation Methods-CVM) για να υπολογιστεί η επιθυμία για πληρωμή (Willingness to Pay-WTP) και η επιθυμία για αποδοχή (Willingness to Accept-WTA) μια υποθετική διαταραχή στην προμήθεια ενέργειας.

Στο σχήμα 4 παρουσιάζονται διαφορετικοί τιμές για το VoLL των νοικοκυριών της Ευρώπης με κριτήριο τη γεωγραφική διασπορά. Βλέπουμε ότι οι τιμές είναι υψηλότερες στις Βόρειες και Δυτικές περιοχές της Ευρώπης ,που οφείλεται στο υψηλότερο βιοτικό επίπεδο και την μεγαλύτερη εξάρτηση από την ηλεκτρική ενέργεια σε καθημερινή βάση.



Σχήμα 5 : Τιμές του VoLL για τα νοικοκυριά σε διαφορετικές περιοχές της Ευρώπης

3. Η μέθοδος Monte Carlo

Η μέθοδος Monte Carlo αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο στις μελέτες αξιοπιστίας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Πρόκειται για μια τεχνική προσομοίωσης που βασίζεται στην αναπαράσταση πολλαπλών επαναλήψεων τυχαίων διαδικασιών για τον υπολογισμό πιθανοτήτων και αναμενόμενων τιμών. Η ονομασία της μεθόδου προέρχεται από τα καζίνο του Μόντε Κάρλο στο Μονακό, όπου οι πιθανότητες παιχνιδιού μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια μέσω στατιστικών μεθόδων.

Στο πεδίο των ΣΗΕ, η μέθοδος Monte Carlo εφαρμόζεται για την εκτίμηση της αξιοπιστίας συστημάτων, την ανάλυση κινδύνου, την αξιολόγηση επιδόσεων, καθώς και για την επίλυση προβλημάτων επικοινωνίας και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο βασικός μηχανισμός της μεθόδου Monte Carlo είναι η εκτέλεση ενός μεγάλου αριθμού τυχαίων δοκιμών ή συμβάντων, τα οποία προσομοιώνουν τις δυνατές καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την τυχαία διαμόρφωση παραμέτρων όπως οι φορτίσεις, οι αποτυχίες στον εξοπλισμό, ή άλλες απρόβλεπτες συνθήκες λειτουργίας. Στη συνέχεια, αξιολογούνται οι αποτελεσματικότητες ή αποτελέσματα για κάθε συμβάν, προκειμένου να ανακαλυφθούν οι πιθανές συνέπειες και οι πιθανότητες επίπτωσης.

Μια από τις μεγάλες προτεραιότητες της μεθόδου Monte Carlo είναι η δυνατότητά της να λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα και την πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί το ΣΗΕ. Αυτό επιτρέπει την πιο ρεαλιστική και ακριβή ανάλυση των συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως οι τυχαίες αποτυχίες εξοπλισμού, οι απρόβλεπτες καιρικές συνθήκες, και άλλα ανεξάρτητα γεγονότα που μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία του ΣΗΕ.

Με τη βοήθεια της μεθόδου Monte Carlo, οι μηχανικοί και οι ερευνητές μπορούν να αξιολογήσουν την αξιοπιστία και την απόδοση των ΣΗΕ, να ανακαλύψουν πιθανά προβλήματα και να εξετάσουν εναλλακτικές λύσεις πριν από την εφαρμογή τους στο πραγματικό περιβάλλον. Επίσης, παρέχει έναν πλούσιο τρόπο για την ανάλυση των κινδύνων και την εκτίμηση της απόδοσης μεγάλων και πολύπλοκων συστημάτων

ηλεκτρικής ενέργειας, κάνοντας την αναγκαία για τη βελτίωση της ασφάλειας και της αποδοτικότητας των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.

3.1 Παραγωγή τυχαίων αριθμών

Ένα σημαντικό στοιχείο της μεθοδολογίας MC είναι η παραγωγή των τυχαίων αριθμών από διάφορες κατανομές. Ένας τυχαίος αριθμός μπορεί να παραχθεί είτε με φυσική είτε με μαθηματική μέθοδο. Η μαθηματική μέθοδος είναι πιο κοινή μιας και μπορεί να επιτύχει την αναπαραγωγή και είναι απλό να πραγματοποιηθεί μέσω υπολογιστή. Οι βασικές απαιτήσεις για την παραγωγή τυχαίων αριθμών είναι :

1. Ομοιομορφία: Οι τυχαίοι αριθμοί πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι στο [0 1]
2. Ανεξαρτησία: Πρέπει να υπάρχει μια ελάχιστη συσχέτιση ανάμεσα στους παραγόμενους αριθμούς
3. Μακριά περίοδος: Η περίοδος επανάληψης είναι αναγκαίο να είναι επαρκώς μεγάλη.

Λόγω της ντετερμινιστικού χαρακτήρα των υπολογιστών, είναι ικανοί μόνο για τη παραγωγή ψευδο-τυχαίων αριθμών, δειγματοληπτιμένα από μια ομοιόμορφη κατανομή στο εύρος [0 1].

3.2 Στρατηγικές προσομοίωσης στην εκτίμηση Αξιοπιστίας

Οι προσομοιώσεις MC χρησιμοποιούνται ως εργαλείο για την παραγωγή των καταστάσεων του συστήματος. Οι μέθοδοι MC μπορούν να χωριστούν σε ακολουθιακές και μη-ακολουθιακές. Η μη ακολουθιακή MC μέθοδος αναπαράγει το σετ των καταστάσεων του συστήματος με τυχαίο τρόπο, ενώ η ακολουθιακή δημιουργεί μια ακολουθία των καταστάσεων του συστήματος όπου η κάθε κατάσταση εξαρτάται από την προηγούμενη χρονικά κατάσταση.

3.2.1 Μη ακολουθιακή (State Sampling) μέθοδος

Κάθε κομμάτι του συστήματος(μονάδα παραγωγής ή διασυνδεδετική γραμμή) έχει πιθανότητες να είναι διαθέσιμη ή να βρίσκεται σε βλάβη, η οποία και πιθανότητα δηλώνεται και με τον όρο Ποσοστό Αναγκαστικής Διακοπής Λειτουργίας(Forced Outage Rate-FOR).Αυτή η μέθοδος αποκτά μια κατάσταση του συστήματος από την παραγωγή ενός τυχαίου αριθμού [0 1] για κάθε στοιχείο του συστήματος. Για κάθε στοιχείο ,πραγματοποιείται σύγκριση του παραγόμενου τυχαίου αριθμού με τον FOR του. Αν ο τυχαίος αριθμός είναι ίσος ή μεγαλύτερος από την τιμή του FOR ,το στοιχείο θεωρείται

διαθέσιμο. Αλλιώς βρίσκεται σε εκτός λειτουργίας. Η μέθοδος μπορεί εύκολα να επεκταθεί και σε καταστάσεις μερικής βλάβης(πχ 50%).

Unit State	Probability Table
Up	$U \geq \text{FOR}$
Down	$U < \text{FOR}$

Πίνακας 1 : Πιθανότητες καταστάσεων στοιχείων του ΣΗΕ,2 καταστάσεις

Unit State	Probability Table
Up	$U \geq \text{FOR}_2$
Derated (50%)	$\text{FOR}_1 \leq U < \text{FOR}_2$
Down	$U < \text{FOR}_1$

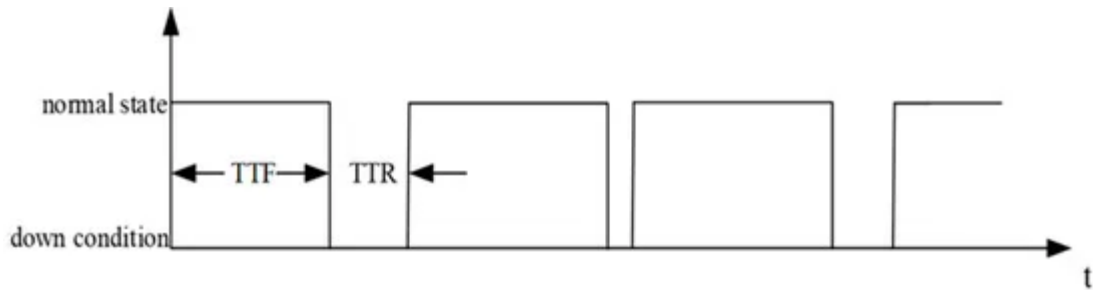
Πίνακας 2 : Πιθανότητες καταστάσεων στοιχείων του ΣΗΕ,3 καταστάσεις

Βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου [5], [13]:

- Η δειγματοληψία είναι σχετικά απλή
- Τα απαιτούμενα δεδομένα αξιοπιστίας είναι σχετικά λίγα. Μόνο οι πιθανότητες κατάστασης των στοιχείων είναι απαραίτητες.
- Η ιδέα της μεθόδου δεν εφαρμόζεται μόνο στις εκδηλώσεις βλαβών των στοιχείων αλλά μπορεί εύκολα να γενικευτεί και σε άλλες παραμέτρους του ΣΗΕ ,όπως το φορτίο ,καιρικά και υδρολογικά έτη κλπ.

3.2.2 Ακολουθιακή (State Duration Sampling) μέθοδος

Με αυτή τη μέθοδο δημιουργείται ένα χρονολογικό σύνολο καταστάσεων για το σύνολο των στοιχείων του συστήματος ξεχωριστά. Αυτό το σύνολο δημιουργείται από την παραγωγή τη χρήση των χρονολογικών καταστάσεων μετάβασης των στοιχείων[5][14].Σέ μια αναπαράσταση δύο καταστάσεων ,υπάρχουν τα χρονικά διαστήματα μέχρι την εμφάνιση βλάβης (Time To Fail-TTF) και τα χρονικά διαστήματα για την αποκατάσταση της βλάβης (Time to Repair-TTR).



Σχήμα 6 : Παράδειγμα TTF TTR[15]

Η διαδικασία της μεθόδου συνοψίζεται ως εξής:

1. Καθορίζεται η αρχική κατάσταση του κάθε στοιχείου, η οποία συνήθως επιλέγεται να είναι κατάσταση λειτουργίας
2. Η χρονική διάρκεια της λειτουργίας (TTF_i) και βλάβης (TTR_i) παράγεται ως τυχαίος αριθμός. Για έναν τυχαίο στοιχείο που προσομοιώνεται με εκθετική κατανομή ισχύει:

$$TTF_i = -\frac{1}{\lambda_i} \ln U_i$$

$$TTR_i = -\frac{1}{\mu_i} \ln U_i$$

όπου λ_i είναι ο ρυθμός εμφάνισης βλαβών και μ_i ο ρυθμός αποκατάστασης των βλαβών. Οι τιμές λ_i , μ_i δίνονται ως δεδομένα εισόδου και συνήθως προκύπτουν από ιστορικά δεδομένα των εν λειτουργία μονάδων/διασυνδεδετικών γραμμών του συστήματος.

Επίσης U_i είναι ένας ομοιόμορφα κατανομημένος τυχαίος αριθμός στο διάστημα [0 1]

3. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία 2 μέχρι να έχουμε αποκτήσει για κάθε στοιχείο του συστήματος το χρονικό διάστημα που μας ενδιαφέρει. Σέ μια προσομοίωση MC συνηθίζεται να αναπαράγονται χρονοσειρές 1000-10000 ετών.
4. Η συνολική κατάσταση του συστήματος προκύπτει συνδυάζοντας σε κάθε χρονική στιγμή τις καταστάσεις όλων των στοιχείων του συστήματος

Πλεονεκτήματα της μεθόδου:

- Είναι εύκολος ο υπολογισμός των ακριβών δεικτών συχνότητας
- Κάθε κατάσταση διάρκειας κατανομής (TTF, TTR) μπορεί εύκολα να θεωρηθεί
- Οι στατιστικές πιθανότητες κατανομής των δεικτών αξιοπιστίας μπορούν εύκολα να υπολογιστούν επιπρόσθετα από τις αναμενόμενες τιμές

Μειονεκτήματα της μεθόδου:

- Σε σύγκριση με τη μη ακολουθιακή μέθοδο, απαιτείται μεγαλύτερος υπολογιστικός χρόνος και αποθηκευτικός χώρος καθώς είναι απαραίτητο να παραχθεί ένας μεγάλος αριθμός τυχαίων χρονικών διαστημάτων TTF_i και TTR_i ακολουθώντας μια δοσμένη κατανομή για κάθε στοιχείο και αποθήκευσης της χρονολογικής κατάστασης των στοιχείων σε ένα μεγάλο χρονικό εύρος.

3.3 Συντελεστής διακύμανσης

Η στατιστική θεμελίωση της μελέτης MC βασίζεται στο θεώρημα μέσου ορίου και στο κανόνα των μεγάλων αριθμών [16]. Μια περιγραφή για το θεώρημα μέσου ορίου μπορεί να βρεθεί σε ένα εγχειρίδιο στατιστικής όπως το [17], ενώ ο κανόνας των μεγάλων αριθμών περιγράφεται περισσότερο στο [16]. Μια μελέτη MC είναι συγκλίνουσα διαδικασία, η οποία δεν παρέχει απαραίτητα μια πιο ακριβή εκτίμηση για τους δείκτες αξιοπιστίας προσθέτοντας μια επιπλέον παρατήρηση στην υπάρχουσα δειγματοληψία. Ωστόσο, με την αύξηση του μεγέθους του δείγματος, η διακύμανση το εκτιμώμενου δείκτη, με άλλα λόγια η ακρίβεια της εκτίμησης μας αυξάνεται. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί ότι η αναμενόμενη εκτίμηση του δείκτη συγκλίνει προς μια τιμή ίση με την αληθινό μέσο της κατανομής του δείκτη. Καλύτερη εικόνα για τα περιεχόμενα μιας MC μελέτης μπορεί να αποκτηθεί από μια διεξοδική ματιά στην στατιστική.

Η τιμή ενός δείκτη αξιοπιστίας σε ένα έτος προσομοίωσης μπορεί να θεωρηθεί ως μια παρατήρηση X_i . Το σύνολο των τιμών που μπορούν να παρατηρηθούν για αυτό το δείκτη αποτελούν τον πληθυσμό του. Μια μελέτη MC αποκτά μια δειγματοληψία, που είναι υποσύνολο του πληθυσμού, περιέχοντας ένα σύνολο παρατηρήσεων ίσο με τα N έτη προσομοίωσης. Η κατανομή του πληθυσμού ίσως να είναι άγνωστη, αλλά θεωρείται ότι από εδώ και μπρος ότι έχει έναν αληθινό μέσο, μ_x , και μια πεπερασμένη διακύμανση, σ_x^2 . Έναν άπειρο σετ από δείγματα, μεγέθους N , μπορεί να αποκτηθεί από τον πληθυσμό πραγματοποιώντας μια νέα μελέτη MC. Από αυτά τα δείγματα μπορεί να υπολογιστεί το \bar{X} , δηλαδή η μέση τιμή και η διακύμανση των δειγμάτων $s^2(x)$.

$$E(X) = \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (7)$$

$$s^2(X) = \frac{1}{N-1} * \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \quad (8)$$

$$Var(\bar{X}) = \sigma^2 = \frac{1}{N} * Var(X) = \frac{1}{N} * \left(\frac{1}{N-1} * \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \right) \quad (9)$$

Ο κανόνας των μεγάλων αριθμών δηλώνει ότι σε μια μελέτη MC η εκτίμηση για τη μέση τιμή και την διακύμανση της δειγματοληψίας τείνει να συγκλίνει στην μέση τιμή και την διακύμανση του πληθυσμού όταν το μέγεθος της δειγματοληψίας αυξάνεται προς το άπειρο όπως φαίνεται στην εξ.10.

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \bar{X} = \mu_x \quad (10)$$

Το θεώρημα μέσου ορίου ωστόσο, δηλώνει ότι η κατανομή του δείγματος του εκτιμώμενου μέσου μπορεί να προσεγγιστεί από μια κανονική κατανομή με μέσο μ_x και διακύμανση σ_x^2/N , με την προϋπόθεση ότι το N είναι επαρκώς μεγάλο. Στις μελέτες MC, είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται ένας συντελεστής χωρίς μονάδες για να μετρηθεί η σύγκλιση της προσομοίωσης. Ο συντελεστής διακύμανσης υπολογίζεται ως το πηλίκο ανάμεσα στην τυπική απόκλιση και στην μέση τιμή των δειγμάτων της προσομοίωσης και είναι μια ποσότητα χωρίς μονάδες. Δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$a = \frac{s(X)}{\sqrt{N} * E(X)} \quad (11)$$

4. Βιβλιογραφική ανασκόπηση για την επάρκεια ισχύος των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

4.1 Εξέλιξη της επάρκειας παραγωγής σε συστήματα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

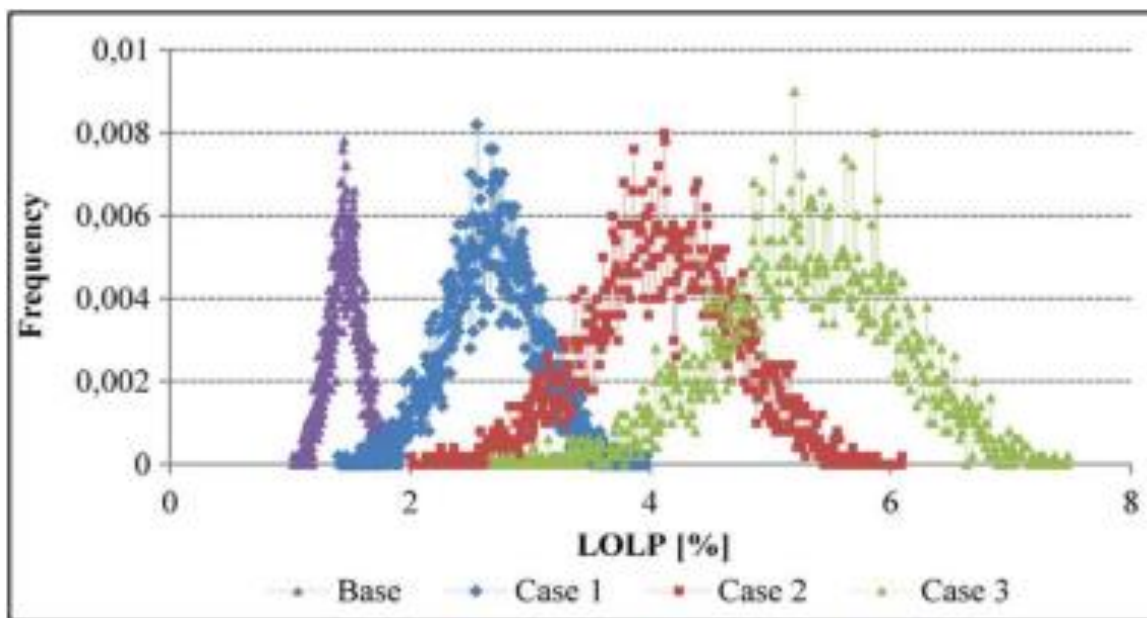
Οι εκτιμήσεις της επάρκειας των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διενεργούνται συνήθως σε εθνικό επίπεδο από τους διαχειριστές του συστήματος μεταφοράς (Transmission System Operators-TSOs). Στην [18] οι Astier και Onaere παρατηρούν ότι πολλά από τα κριτήρια αξιοπιστίας για τα ηλεκτρικά συστήματα τέθηκαν όταν τα γειτονεύοντα συστήματα ενέργειας ήταν ισχυρώς ανεξάρτητα μεταξύ τους και παρότι την ανάπτυξη στην διασύνδεση μεταξύ συστημάτων πολλά από τα επίπεδα αξιοπιστίας δεν έχουν ανανεωθεί. Τονίζεται επίσης ότι η καλύτερη συνεργασία και συντονισμός μεταξύ γειτονικών συστημάτων μπορούν να επιτρέψουν την καλύτερη μοντελοποίηση της ισχύος διασυνδέσεων που μπορεί να συμβάλει σε μια μειωμένη ανάγκη για εγκατάσταση νέας ισχύος παραγωγής

Πλήθος διαφορετικών κριτηρίων επάρκειας υιοθετούνται σε διαφορετικά συστήματα ισχύος. Για παράδειγμα, σε πολλά συστήματα των ΗΠΑ η επιτρεπόμενη απώλεια φορτίου ώστε να θεωρείται το σύστημα επαρκές ορίζεται στη «μία ημέρα στα 10 χρόνια», προδιαγραφή που μεταφράζεται σε 2,4 ώρες εμφάνισης απώλειας φορτίου ανά χρόνο. Στην Ευρώπη, οι περισσότεροι διαχειριστές χρησιμοποιούν το δείκτη LOLE υπολογιζόμενο σε ώρες ανά έτος για την αξιολόγηση της επάρκειας ισχύος. Το επίπεδο του LOLE κάτω από το οποίο το σύστημα παραγωγής θεωρείται επαρκές ποικίλλει από χώρα σε χώρα, ωστόσο κυμαίνεται γενικά από 3 έως 8 ώρες. Ενδεικτικά, στην Ιρλανδία το όριο τίθεται στις 8 ώρες/έτος [19]. Στα συστήματα της Αυστραλίας, οι δείκτες βασίζονται στην μη εξυπηρετούμενη ενέργεια και όχι στη διάρκεια εμφάνισης συμβάντος ανεπάρκειας, [20]. Ειδικά στην Ευρώπη, δεδομένου ότι οι διασυνδέσεις μεταξύ των χωρών ενισχύονται συνεχώς, έχει νόημα για τους διαχειριστές τους συστήματος να εκτιμούν αν τα τωρινά κριτήρια ταιριάζουν με το απαιτούμενο ρίσκο επαρκώς ή αν το υπερβαίνουν [9].

Η σημασία της κατάλληλης επιλογής του κριτηρίου αξιοπιστίας αναδεικνύεται στην [21] όπου εξετάζεται το διασυνδεδεμένο σύστημα 13 Πολιτειών (PJM) στις Ηνωμένες πολιτείες. Εδώ το κριτήριο αξιοπιστίας που χρησιμοποιήθηκε είναι 0.1 μέρες/έτος. Οι

συγγραφείς δείχνουν ότι η επιλογή ενός κριτηρίου αξιοπιστίας 2.4 ωρών/έτος (περίπου ισοδύναμο με 0.1 μέρες/έτος αλλά όχι ανάλογο) μπορεί να συμβάλει στη μείωση των στόχων για παροχή ισχύος (βασισμένο στο περιθώριο εφεδρείας, δηλαδή το ποσοστό ισχύος πέρα από το μέγιστο φορτίο). Στο συγκεκριμένο σύστημα ,αυτό θα σημαίνει ότι 11 GW άνθρακα θα μπορούσαν να αποσυρθούν χωρίς να είναι αναγκαία η αντικατάσταση τους και να παραβιάζεται το κριτήριο αξιοπιστίας. Αυτό θα έχει προφανή οικονομική εξοικονόμηση για το σύστημα.

Όσον αφορά τις ΑΠΕ, η μελέτη [22] παρουσιάζει την επίδραση που μπορεί να έχει ο πολλαπλασιασμός των ΑΠΕ στις υπάρχουσες τεχνολογίες και ειδικότερα στην παραγωγή πυρηνικής ενέργειας.



Σχήμα 7 : Μεταβολή στο δείκτη LOLP όσο η διείσδυση αιολικής ενέργειας αυξάνει από ένα base σενάριο σε 10%(case 1) ,15%(case 2),20%(case 3) της εγκατεστημένης ισχύος[22]

Το Σχήμα 7 δείχνει ότι στο μελετώμενο σύστημα, η αύξηση της διείσδυσης αιολικής ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του δείκτη LOLP.Ο Volcanovski εξηγεί ότι τα συμβάντα απώλειας φορτίου οδηγούν σε απώλεια της παραγωγής του πυρηνικού σταθμού που είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη συχνότητα καίριας ζημίας (Core Damage Frequency-CDF). Αν ο αριθμός των πυρηνικών μονάδων στο σύστημα μελέτης μειωθούν και η αιολική ισχύς αυξηθεί, το CDF των εναπομενοντων μονάδων θα αυξηθεί..

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που πρέπει να συνεκτιμηθεί όταν σχεδιάζονται οι μελλοντικές ανάγκες ισχύος στα συστήματα ενέργειας είναι η μεταβλητή φύση του φορτίου. Στη μελέτη [23] ερευνάται η επίδραση του εξηλεκτρισμού του φορτίου θέρμανσης στην επάρκεια του συστήματος συνυπολογίζοντας την ευαισθησία των μετεωρολογικών δεδομένων. Οι συγγραφείς παρατηρούν ότι τα χρονοδιαγράμματα για την αγορά παράδοσης ισχύος (κοιτώντας μπροστά κατά 1 και 4 χρόνια) και τα πλάνα για απανθρακοποίηση της θέρμανσης δεν είναι συγχρονισμένα μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να είναι δύσκολο να επιλεγεί η κατάλληλη τεχνολογία παραγωγής σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα που θα υποστηρίξει την επάρκεια ισχύος σε μακροπρόθεσμο στην περίπτωση ενός μεταβαλλόμενου συστήματος ενέργειας, από πλευράς παραγωγής και ζήτησης ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, η παρουσία πολλών αντλιών θερμότητας θα προκαλέσουν μια μεγαλύτερη χειμερινή αιχμή φορτίου κατά τη διάρκεια της νύχτας αντί κατά τη διάρκεια της ημέρας, με αποτέλεσμα τεράστιες ποσότητες ηλιακής παραγωγής να μην μπορούν να αξιοποιηθούν για τη κάλυψη της ζήτησης. Το case study της εργασίας εστιάζει στη Μεγάλη Βρετανία. Οι συγγραφείς έδειξαν ότι η εγκατεστημένη ισχύς που απαιτείται για να διατηρηθεί επαρκές επίπεδο παραγωγής επηρεάζεται άμεσα από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τη προσομοίωση της ζήτησης για θέρμανση, με τη λιγότερη ισχύ να απαιτείται αν η θέρμανση μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας δεδομένα ζήτησης αερίου. Διερευνάται λοιπόν η επίδραση του προφίλ της χρονολογικής ζήτησης από αντλίες θερμότητας στην εκτίμηση της απαιτούμενης ισχύος που πρέπει να ενταχθεί στο σύστημα με βάση τις ανάγκες επάρκειας.[23] Η μελέτη δείχνει ότι η θεώρηση μόνο προφίλ ιστορικών χρονοσειρών ζήτησης σύμφωνα με τα μελλοντικά έργα για την αιχμή φορτίου οδηγεί σε υπερ-προμήθεια ισχύος. Στη περίπτωση των αντλιών θερμότητας της Μεγάλης Βρετανίας, η υπερ-προμήθεια υπολογίζεται να κοστίζει € 100 εκ. σε βάθος 10 χρόνων. Το άρθρο κλείνει θέτοντας την ερώτηση στο πως διασυνδεδεμένες περιοχές με μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής θέρμανσης πρέπει να μοντελοποιούνται και να θεωρούνται για την αξιολόγηση της επάρκειας ισχύος και του προγραμματισμού πόρων.

Η [24] προτείνει έξι διαστάσεις για την επάρκεια πόρων που πρέπει να θεωρηθούν όσο τα συστήματα ενέργειας αλλάζουν και έχουν περισσότερη παραγωγή ΑΠΕ, η φύση του φορτίου εξελίσσεται, και οι συμβατικοί θερμικοί σταθμοί αποσύρονται. Αυτές περιλαμβάνουν:

- Την αξιολόγηση του μεγέθους, της συχνότητας, και της διάρκειας των απωλειών για να καθοριστεί με ακρίβεια η ενδεχόμενη απαιτούμενη νέα ισχύς,
- Τη μη διαθεσιμότητα κάθε στοιχείου του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη ότι κανένας πόρος δεν είναι εντελώς αξιόπιστος
- Τη χρονολογική προσομοίωση για πολλαπλά χρόνια λειτουργίας
- Τη συνεισφορά του φορτίου μέσω παρεμβάσεων όπως έξυπνοι μετρητές και απόκριση ζήτησης αλλάζει το πως αξιολογείται η επάρκεια
- Τη λειτουργία των διασυνδέσεων: Γειτονικά/διασυνδεδεμένα συστήματα επίσης σχηματίζουν σημαντικό τμήμα της εκτίμησης επάρκειας ισχύος για ένα συγκεκριμένο σύστημα. Η ισχύς που μπορεί να παρέχουν άλλα συστήματα και οι παράγοντες που επηρεάζουν την διαθεσιμότητα ισχύος σε γειτονικά συστήματα είναι σημαντικό να θεωρηθεί, ειδικά εφόσον συσχετισμένες απώλειες λειτουργίας μπορούν να συμβούν σε δυο ή περισσότερα διασυνδεδεμένα συστήματα.
- Τα κριτήρια αξιοπιστίας: Αυτά πρέπει να επιλέγονται με διαφανή τρόπο ενώ πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και ο οικονομικός αντίκτυπος στο σχεδιασμό των σύγχρονων ΣΗΕ.

Καθώς η ισχύς που παράγεται από ΑΠΕ εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες (την ταχύτητα του ανέμου για την περίπτωση της αιολικής παραγωγής και της ηλιακής ακτινοβολίας για την περίπτωση της φωτοβολταϊκής παραγωγής), αυτοί οι πόροι δεν συμπεριφέρονται όπως οι θερμικές μονάδες. Για το λόγο αυτό απαιτείται μια διαφορετική μεθοδολογία για τη μοντελοποίηση των μονάδων ΑΠΕ στα πλαίσια των μελετών επάρκειας για να αξιολογηθεί κατάλληλα η συνεισφορά τους στην επάρκεια ισχύος. Οι μελέτες [25], [26] προτείνουν η συνεισφορά των ΑΠΕ να θεωρείται ως αρνητικό φορτίο, καταλήγοντας στην έννοια του καθαρού ή υπολειπόμενου φορτίου. Ως καθαρό φορτίο λογίζεται το φορτίο που πρέπει να εξυπηρετηθεί από τους εναπομείναντες πόρους στο σύστημα μετά τον υπολογισμό της συνεισφοράς των ΑΠΕ. Πράγματι, αυτή είναι κοινή πρακτική που αξιοποιείται από τους διαχειριστές των ΣΗΕ παγκοσμίως. Αυτή είναι μια λογική πρόταση καθώς οι ΑΠΕ αποτελούν τη φθηνότερη διαθέσιμη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, δεδομένου του σχεδόν μηδενικού κόστους λειτουργίας τους. Έτσι, σε μια οικονομική κατανομή των διαθέσιμων πόρων, οι ΑΠΕ θα βρίσκονται στη κορυφή της σειράς προτεραιότητας.

Στην μελέτη [27] ερευνάται η επίδραση της τοποθεσίας της αιολικής παραγωγής σε ένα σύστημα. Δεδομένα αιολικής παραγωγής από δυο διαφορετικά αιολικά πάρκα με διαφορετικά προφίλ ανέμου από το ίδιο σύστημα χρησιμοποιήθηκαν. Οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι εάν η μέση τιμή του ανέμου σε ένα πάρκο είναι πιο κοντά στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου των εγκατεστημένων γεννητριών, η συνεισφορά στην επάρκεια της αιολικής παραγωγής σε αυτή τη θέση είναι υψηλότερη, οδηγώντας και σε μικρότερους δείκτες LOLE από τη περίπτωση που η μέση τιμή του ανέμου στη τοποθεσία ήταν μικρότερη. Αυτό αποκαλύπτει δύο σημαντικές θεωρήσεις όταν συνυπολογίζουμε την αιολική παραγωγή στις μελέτες επάρκειας:

1. Τα δεδομένα αιολικής παραγωγής που χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση πρέπει να αντανακλούν τις τοποθεσίες των εγκατεστημένων πάρκων για τη περίοδο που εξετάζεται.
2. Η επιλογή των μελλοντικών θέσεων για αιολικά πάρκα πρέπει να επηρεάζεται τουλάχιστον κατά μέρος από τις θέσεις που θα έχουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην επάρκεια ισχύος.

4.2 Αξία της αποθήκευσης στην επάρκεια ισχύος

Στην μελέτη [28] περιγράφεται μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση της επάρκειας ισχύος και τον υπολογισμό την συνεισφοράς σε ισχύ (capacity value) σταθμών αποθήκευσης ενέργειας χρησιμοποιώντας την τεχνική MC σε ένα απομονωμένο σύστημα ενέργειας. Η εργασία εστιάζει κυρίως σε αποθηκευτικούς σταθμούς μικρής διάρκειας και ειδικότερα σε συστήματα μπαταριών, των οποίων το capacity value καθορίζεται από τις διαφορετικές διαμορφώσεις ισχύος και ενέργειας. Η εργασία καταλήγει ότι η συνεισφορά των αποθηκευτικών σταθμών με μπαταρίες στην επάρκεια ισχύος μπορεί να είναι σημαντική (τιμές capacity value ακόμη και έως 85%), με την χωρητικότητα ενέργειας να εμφανίζεται να είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας. Η αποθήκευση μπορεί ταυτόχρονα να ενισχύσει την αξιοπιστία του συστήματος, να μειώσει τα κόστη παραγωγής και να υποστηρίξει την διείσδυση των ΑΠΕ.

Στη μελέτη [29] δηλώνεται η ισχυρή δυνατότητα για συνεισφορά ισχύος από την αποθήκευση ενέργειας και η ικανότητα της να αντικαταστήσει συμβατικές μονάδες. Για αυτό το λόγο προτείνονται δυο μεθοδολογίες για την ποσοτικοποίηση της συνεισφοράς

των αποθηκευτικών σταθμών στην επάρκεια του συστήματος. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι θα πρέπει να βρεθεί ο ιδανικός συνδυασμός χωρητικότητας και διάρκειας του αποθηκευτικού σταθμού λαμβάνοντας υπόψιν το κόστος ενσωμάτωσης μιας μεγάλης ισχύος αλλά ακριβής και μικρής διάρκειας μπαταρίας μαζί με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μιας μακράς διάρκειας μονάδας αντλησιοταμίευσης.

Στις [30] η λειτουργία των αποθηκευτικών σταθμών αποφασίζεται σε πραγματικό χρόνο σύμφωνα με τα γεγονότα ανεπάρκειας στοχεύοντας αμιγώς στην ελαχιστοποίηση των ανεπαρκειών. Στην[31], [32] προτείνεται μια στρατηγική για τον επαναπροσδιορισμό του προγράμματος λειτουργίας των αποθηκευτικών σταθμών σε πραγματικό χρόνο σε περιπτώσεις εκτάκτων συμβάντων. Αυτή η στρατηγική έρχεται σε αντίθεση με την συνηθισμένη πρακτική του προσχεδιασμού συγκεκριμένου χρονοδιαγράμματος λειτουργίας των αποθηκευτικών σταθμών ή τις πολιτικές λειτουργίας των αποθηκευτικών σταθμών με μοναδικό στόχο την ελαχιστοποίηση των συμβάντων ανεπάρκειας. Επιπλέον συχνά στη βιβλιογραφία[33][34][35] αξιολογείται η συμβολή αποθηκευτικών σταθμών στην επάρκεια ισχύος που αναπτύσσονται σε κοινές εγκαταστάσεις ή λειτουργούν συνεργατικά με μονάδες ΑΠΕ. Οι μελέτες αναδεικνύουν την αξία τη συν-λειτουργίας ΑΠΕ και αποθήκευσης προς όφελος της επάρκειας ισχύος των ΣΗΕ, και την ενίσχυση του capacity value των σταθμών ΑΠΕ όταν αυτοί συνοδεύονται και από συστήματα αποθήκευσης.

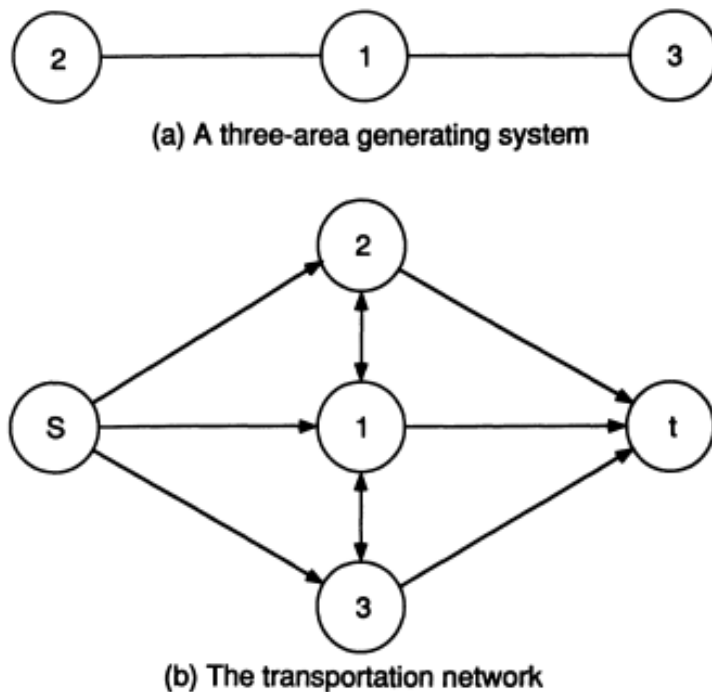
4.3 Επάρκεια σε διασυνδεδεμένα συστήματα

Οι διασυνδέσεις έχουν αποδειχτεί ένα πολύ αποδοτικό μέσο για την ενίσχυση τους αξιοπιστίας προμήθειας ενέργειας μεταξύ γειτονικών περιοχών.. Πρακτικά, η ενίσχυση της αξιοπιστίας προμήθειας ενέργειας αποτελεί κύριο λόγο για την ανάπτυξη μεγάλων διασυνδεδεμένων συστημάτων όπως της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής. Η αξία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην επάρκεια στα συστήματα μεγάλης κλίμακας αυξάνεται λόγω τη σημαντικής διασποράς τους και του ετεροχρονισμού της παραγωγής τους σε ένα ευρύ γεωγραφικό πεδίο. Έτσι πολιτικές συνεργασίας με κριτήριο και την αξιοπιστία αποκτούν μεγαλύτερη σημασία για εξισορροπητικές επιδράσεις (τόσο όσο στο φορτίο όσο και στη παραγωγή) και για την επίτευξη των επιδιωκόμενων επιπέδων αξιοπιστίας σε χαμηλότερο κόστος συγκρινόμενο με την απομονωμένη προσέγγιση.

Τα μοντέλα επάρκειας πολλαπλών περιοχών (multi-area) ονομάζονται και μοντέλα πολλαπλών κόμβων καθώς συχνά αναπαρίσταται ως μη κατευθυνόμενο δίκτυο (undirected network) όπου κάθε κόμβος αναπαριστά ένα σύστημα και κάθε ακμή τη διασυνδετική γραμμή ανάμεσα σε δύο περιοχές. Στα διασυνδεδεμένα συστήματα, λοιπόν, το ρίσκο σε κάθε περιοχή εξαρτάται από την πολιτική διαχείρισης των πόρων που θα επιλεγεί μεταξύ των διαχειριστών, το φορτίο και τη διαθέσιμη τους παραγωγή σε άλλες περιοχές (καθώς αυτό καθορίζει εάν μπορεί να δοθεί βοήθεια) και την ισχύ των διασυνδέσεων. Σε ένα σύστημα δύο περιοχών για παράδειγμα, οι πολιτικές διαχείρισης των πόρων καθορίζουν το τρόπο που θα λειτουργήσει η διασύνδεση όταν το ένα ή και τα δυο συστήματα εμφανίσουν ανεπάρκεια κάλυψης του φορτίου. Δύο από τις πιο συνήθεις πολιτικές στη βιβλιογραφία είναι η πολιτική μη επιμοιρασμού της απώλειας φορτίου(ή veto) και η πολιτική επιμοιρασμού της απώλειας[1]. Με την πολιτική veto ,η ενέργεια ρέει προς μια άλλη περιοχή μόνο αφού έχει καλυφθεί το τοπικό φορτίο, όταν με τη πολιτική share η απώλεια φορτίου μοιράζεται μεταξύ των περιοχών με την εφαρμογή κάποιου κανόνα. Τα multi area μοντέλα μελετώνται τουλάχιστον από τη δεκαετία του 1960. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η [36] όπου γίνεται ο υπολογισμός των δεικτών LOLP για ένα σύστημα δύο περιοχών με την πολιτική veto. Μία από τις πιο απλές και δημοφιλείς προσεγγίσεις για την ενσωμάτωση γειτονικών περιοχών στους υπολογισμούς επάρκειας ενός συστήματος είναι η διαχείριση των διασυνδέσεων ως μονάδων παραγωγής (NTC προσέγγιση) δύο καταστάσεων, των οποίων η πιθανοτική κατανομή διαθεσιμότητας στη συνέχεια συνδυάζεται με την τοπική κατανομή πιθανότητας πλεονάσματος/ελλείμματος για να υπολογιστούν οι δείκτες επάρκειας (με την υπόθεση ότι υπάρχει στατιστική ανεξαρτησία μεταξύ των συστημάτων). Αυτή έχει ονομαστεί προσέγγιση της ισοδύναμης μονάδας ή της ισοδύναμης υποστήριξης [2]. Στην [5] περιγράφονται δύο τρόποι μοντελοποίησης ενός συστήματος πολλαπλών περιοχών:

- **Αλγόριθμος μέγιστης ροής (Max Flow):** Μία διασύνδεση αναπαρίσταται ως ένα βέλος που μπορεί να είναι μίας ή δύο κατευθύνσεων εξαρτώμενη από τον επιτρεπτό προσανατολισμό μεταφοράς ισχύος. Κάθε περιοχή αναπαρίσταται σαν ένας κόμβος Δύο επιπλέον πλασματικοί κόμβοι προστίθενται: ένας κόμβος παραγωγής s και ένας κόμβος φορτίου t . Ο κόμβος s θεωρείται ότι έχει άπειρη εγκατεστημένη ισχύ. Ένα πλασματικό βέλος μονής κατεύθυνσης από το κόμβο s προς κάθε κόμβο εισάγεται για να αναπαραστήσει την μέγιστη δυνατή υποστήριξη Ένα πλασματικό βέλος μονής κατεύθυνσης από κάθε κόμβο

περιοχής προς το κόμβο t δημιουργείται για να αναπαραστήσει την απαιτούμενη ζήτηση που δεν μπορεί να καλύψει μόνος του. Για λόγους απλότητας κάθε βέλος μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι δύο κατευθύνσεων. Έτσι μια χωρητικότητα (C_{ij}, C_{ji}) συνδέεται με κάθε βέλος. Το Σχήμα 8 δείχνει ένα σύστημα 3 περιοχών και την αναπαράστασή του. Αν μία από τις διασυνδετικές γραμμές είναι σε βλάβη τότε ισχύει $(C_{ij}, C_{ji}) = (0, 0)$. Η χωρητικότητα των πλασματικών βελών C_{si} και C_{it} καθορίζεται από ωριαίο πλεόνασμα ή έλλειμμα του κόμβου i . Έπειτα τρέχει ο αλγόριθμος Maxflow και υπολογίζει την ενέργεια που έστειλαν οι πλεονασματικοί κόμβοι στους ελλειμματικούς λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς του δικτύου. Ο αλγόριθμος επομένως τρέχει σε περιπτώσεις που υπάρχει τουλάχιστον μία περιοχή που χρειάζεται υποστήριξη ενέργειας.



Σχήμα 8 : Ένα σύστημα 3 περιοχών και η αναπαράσταση του δικτύου μεταφοράς

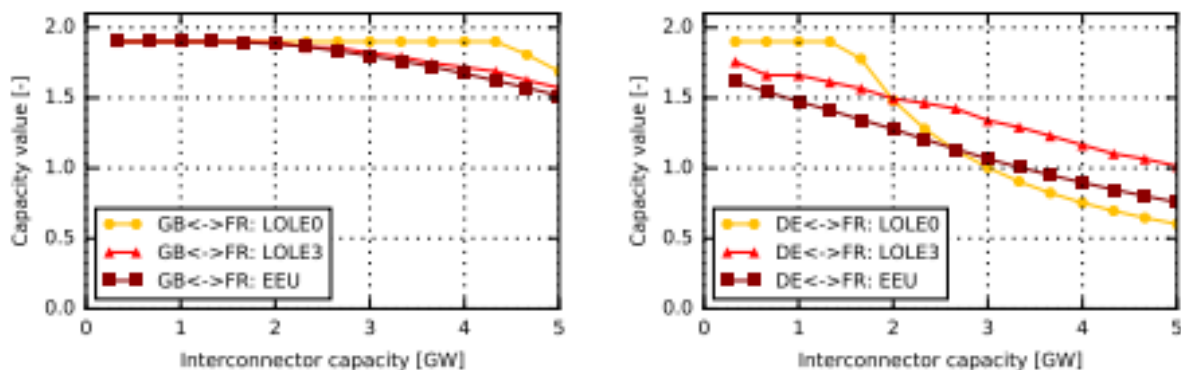
- **Γραμμικός προγραμματισμός:** Όλες οι περιοχές χωρίζονται σε δυο σετ των υποστηρικτικών και των υποστηριζόμενων περιοχών. Σε μια υποστηρικτική περιοχή, η διαθέσιμη παραγωγή είναι μεγαλύτερη από το φορτίο και μια μεταβλητή παραγωγής εισάγεται σε κάθε περιοχή του υποστηρικτικού σετ. Το πάνω όριο αυτής της μεταβλητής είναι το πλεόνασμα του κόμβου. Σε μια

υποστηρικτική περιοχή από την άλλη η διαθέσιμη παραγωγή είναι μικρότερη από το φορτίο οπότε ο κόμβος έχει έλλειμμα. Εισάγεται επίσης μια μεταβλητή πλασματικής παραγωγής για κάθε κόμβο του υποστηριζόμενου σετ που περίπτωση που έχει θετική τιμή μετά τη βελτιστοποίηση αυτό υποδηλώνει απώλεια φορτίου. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση των ελλειμμάτων των υποστηριζόμενων περιοχών λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς του δικτύου μεταφοράς.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του γραμμικού προγραμματισμού είναι ότι διάφορες πολιτικές υποστήριξης μέσω των διασυνδέσεων μπορούν να ενσωματωθούν:

- Πολιτική σειράς προτεραιότητας μεταξύ των κόμβων: Στη περίπτωση που υπάρχουν περισσότεροι από ένας κόμβοι σε έλλειμμα ,ο κόμβος με τη μεγαλύτερη βαρύτητα προτεραιοποιείται.
- Πολιτική της κοντινότερης απόστασης: Το πλεόνασμα ενέργειας ενός κόμβου διοχετεύεται κατά προτεραιότητα στο κοντινότερο ελλειμματικό κόμβο. Για να ενσωματωθεί η συγκεκριμένη πολιτική είναι αναγκαίο να δίνει ως δεδομένο εισόδου τα μήκη των διασυνδετικών γραμμών.
- Πολιτική της αναλογικότητας. Στις καταστάσεις που το συνολικό πλεόνασμα είναι μικρότερο από το συνολικό έλλειμμα ,οι περικοπές ενέργειας είναι αναπόφευκτες. Σχεδιάζεται λοιπόν μια αναλογική κατανομή του ελλείμματος μεταξύ των περιοχών.

Στην [37] γίνεται μια εκτίμηση της συνεισφοράς των διασυνδέσεων στην επάρκεια. Μελετώνται διασυνδέσεις μεταξύ Μεγάλης Βρετανίας-Γαλλίας (GB-FR) και Γερμανίας-Γαλλίας (DE-FR) με τρία διαφορετικά επίπεδα αξιοπιστίας. Από την ανάλυση φαίνεται ότι το capacity value της διασύνδεσης μπορεί να είναι πάνω από 100% λόγω της συνεισφοράς της γραμμής και προς τις δυο κατευθύνσεις. Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα για τις δυο διασυνδέσεις.



Σχήμα 9 : Capacity value των διασυνδέσεων μεταξύ 2 γειτονικών συστημάτων GB-FR (αριστερά) και DE-FR (δεξιά) με διαφορετικούς στόχους αξιοπιστίας

Παρατηρούμε ότι ειδικά στη περίπτωση της διασύνδεσης GB-FR το capacity value παραμένει σε πολύ υψηλά ποσοστά (150+%) ακόμη και με την αύξηση βηματικά της ονομαστικής ισχύος. Η εν λόγω εργασία συνεχίζει και με μελέτη του δικτύου της Ευρώπης και καταλήγει στο συμπέρασμα ότι είναι δυνατή η απόσυρση μονάδων ύψους 32.4 GW χωρίς να πληγεί η αξιοπιστία του συστήματος όταν συγκρίνουμε την διασυνδεδεμένη λειτουργία με την αυτόνομη προσέγγιση. Αυτή η μείωση μεταφράζεται σε περίπου 12.9 Bn € όταν εκτιμάται με τυπικά επενδυτικά κόστη από μια μονάδα ανοιχτού κύκλου.

4.4 Μελέτες επάρκειας ισχύος

4.4.1 Μελέτη ERAA

Η Ευρωπαϊκή Μελέτη Επάρκειας (European Resource Adequacy Assessment-ERAA) δομείται με τις πιο πρόσφατες προβλέψεις για τα επιλεγμένα έτη-στόχοι ,οδηγούμενη από τα πλαίσια πολιτικής και τις απόψεις των συμμετεχόντων[38]. Ο ENTSO-E διεξαγάγει εκτενή άσκηση συλλογή δεδομένων, κατά την οποία οι Διαχειριστές των Συστημάτων Μεταφοράς (Transmission System Operators -TSOs) παρέχουν τις θέσεις τους και τις εκτιμήσεις για το ύψος της ζήτησης, τα διαθέσιμα αποθέματα ισχύος και τα στοιχεία του δικτύου μεταφοράς.

Μια Πανευρωπαϊκή μελέτη φυσικά απαιτεί ένα μεγάλο αριθμό δεδομένων εισόδου, τα οποία κυρίως υπολογίζονται από τους αντίστοιχους TSOs αλλά επίσης κεντρικά από τον ENTSO-E και είναι βασισμένα στις εθνικές πολιτικές και τάσεις. Τα σενάρια φυσικών τάσεων (National Trends) της ERAA 2023 είναι βασισμένα κυρίως στα Εθνικά Σχέδια για

την Ενέργεια και το Κλίμα που ήταν διαθέσιμα κατά τη διάρκεια συλλογής δεδομένων και αντανακλούν τις φιλοδοξίες για την συμμόρφωση με το πακέτο Fit for 55 (FF55).



Σχήμα 10 : Το διασυνδεδεμένο ευρωπαϊκό σύστημα ενέργειας που μοντελοποιείται στην ERAA 2023

Γεωγραφική σκοπιά και βαθμός λεπτομέρειας

Η συγκεκριμένη μελέτη εστιάζει στην Πανευρωπαϊκή περίμετρο και στις γειτονικές ζώνες που είναι συνδεδεμένες στο ευρωπαϊκό σύστημα. Οι ζώνες μοντελοποιούνται είτε λεπτομερώς είτε συνοπτικώς. Οι λεπτομερώς μοντελοποιημένες ζώνες παρουσιάζονται ως κόμβοι αγοράς για τους οποίους θεωρούνται οι ολοκληρωμένες πληροφορίες χρησιμοποιώντας την καλύτερη διαθέσιμη ανάλυση των δεδομένων εισόδου(πληροφορίες για τις μονάδες παραγωγής και τη ζήτηση) και για τις οποίες το πρόβλημα δέσμευσης μονάδων και οικονομικής κατανομής (Unit Commitment & Economic Dispatch -UCED)

επιλύεται. Οι συνοπτικώς μοντελοποιημένες ζώνες είναι κόμβοι αγοράς για τους οποίους τα αναλυτικά δεδομένα του συστήματος ενέργειας δεν είναι διαθέσιμα στον ENTSO-E. Για αυτές τις ζώνες ,εξωγενώς σταθερές ανταλλαγές ενέργειας με τις αναλυτικώς μοντελοποιημένες ζώνες εφαρμόζονται.

Μεθοδολογία αξιολόγησης Επάρκειας με τη μέθοδο Monte Carlo

Η προσομοίωση MC αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό σεναρίων ,που αποτελούνται από διαφορετικούς δείκτες πιθανότητας βλαβών (FOR) για κάθε έτος-στόχος (Target Year-TY) και για κάθε κλιματικό έτος (Climate Year-CY).Πιο συγκεκριμένα, αυτές οι βλάβες συμβαίνουν στις θερμικές μονάδες παραγωγής και στα στοιχεία μεταφοράς του δικτύου (Διασυνδέσεις DC και AC) και η επίπτωση τους στην εγκατεστημένη ισχύ είναι γνωστή κατά τη διάρκεια του UCED βήματος. Ο συνδυασμός τυχαίων βλαβών και κλιματικών σεναρίων οδηγεί σε ένα μεγάλο σετ με πιθανές καταστάσεις του συστήματος που θα μοντελοποιηθούν για κάθε κλιματικό έτος.

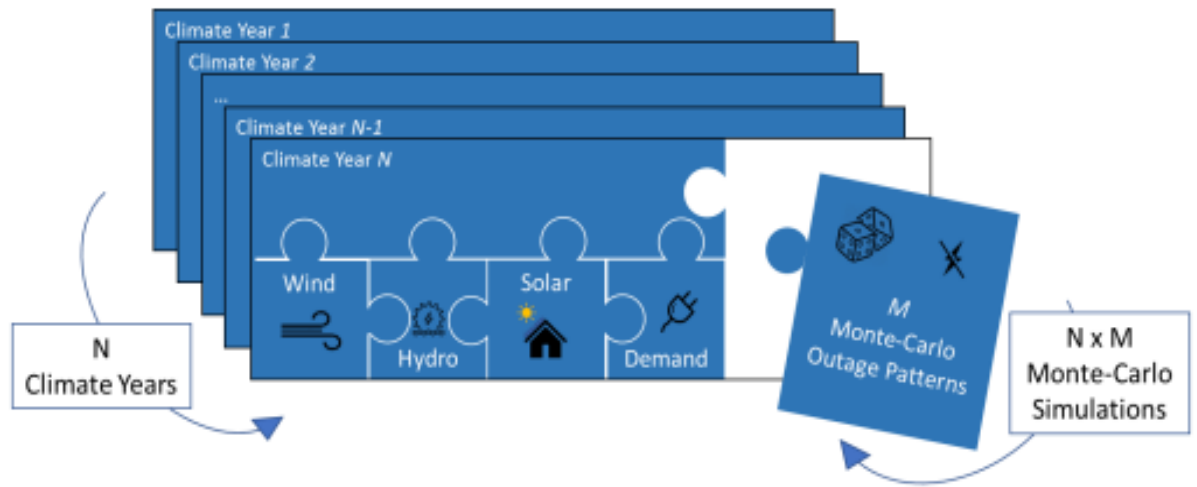
Η διαδικασία ξεκινά καθορίζοντας τα κλιματικά σενάρια ,αποτυπώνοντας τα συνεχή ιστορικά κλιματικά έτη. Κλιματικά έτη από το 1982 έως το 2016 επιλέγονται ένα-προς-ένα. Κάθε κλιματικό έτος αποτυπώνει ένα σετ με :

- Χρονοσειρές ζήτησης εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία
- Χρονοσειρές βαθμού φόρτισης Αιολικών και ΦΒ σταθμών
- Χρονοσειρές για την παραγωγή των Υδροηλεκτρικών σταθμών (ΥΗΣ),εισροές υδάτων, ελάχιστη/μέγιστη παραγωγή ή ικανότητα άντλησης, και ελάχιστη/μέγιστη στάθμη reservoir .
- Κλιματικά εξαρτώμενες χρονοσειρές παραγωγής για τις υπόλοιπες ΑΠΕ και για τις μη ΑΠΕ

Να σημειωθεί ότι τα αναφερόμενα δεδομένων κλιματικών ετών είναι πιθανόν να είναι διαφορετικά για κάθε επιλεγμένο έτος-στόχο.

Σαν δεύτερο βήμα, πολλαπλά σετ τυχαίων βλαβών παράγονται για κάθε κλιματικός έτος (M αριθμός δειγμάτων βλαβών για κάθε κλιματικό έτος, όπου η ποσότητα M είναι γνωστή μόνο αφού επιτευχθεί η σύγκλιση του μοντέλου). Οι τυχαίες βλάβες δεν επηρεάζουν το σχεδιασμένο πρόγραμμα συντηρήσεων των μονάδων. Κάθε τρέξιμο του μοντέλου εκτελείται για ένα κλιματικό έτος και για μια τυχαία θεώρηση βλαβών .Αυτό

αναφέρεται ως έτος MC.Ως συνδυασμός N κλιματικών ετών και M θεωρήσεων για βλάβες οδηγεί σε έναν σύνολο N x M τρεξιμάτων του μοντέλου.



Σχήμα 11 Οι αρχές της προσομοίωσης MC για έναν δοσμένο έτος-στόχο

Δείκτες Αξιοπιστίας

Στις πιθανοτικές μελέτες επάρκειας, οι τυπικοί δείκτες για την επάρκεια ισχύος είναι είτε η πιθανότητα των δεικτών (πχ EENS) είτε ένα εκατοστημόριο των τιμών των ανεξάρτητων δεικτών (πχ 95^ο εκατοστημόριο των τιμών ENS). Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση του επιπέδου επάρκειας για μια δοσμένη γεωγραφική σκοπιά και για δεδομένο χρονικό ορίζοντα είναι:

- Διάρκεια απώλειας φορτίου (LLD)
- LOLE[h]
- ENS(GWh)
- EENS(GWh)

Σύγκλιση Monte Carlo

Η σύγκλιση των μοντέλων αξιολογείται με την σχετική αλλαγή του συντελεστή διακύμανσης α που προκύπτει από το ENS του συνολικού συστήματος μελέτης και δίνεται ως:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\text{Var}[EENS]}}{EENS} \quad (12)$$

Όπου το EENS υπολογίζεται σε κάθε MC έτος που προσομοιώνεται και $\text{Var}[EENS]$ είναι η διακύμανση της αναμενόμενης εκτίμησης ($\text{Var}[EENS] = \frac{\text{Var}[ENS]}{N}$).

Συγκεκριμένα δεδομένα εισόδου και παράμετροι μπορούν να έχουν ένα σημαντικό αποτύπωμα στα αποτελέσματα των δεικτών επάρκειας και στις συγκλίσεις τους, περιλαμβάνοντας:

- Μοντελοποίηση των ΥΗΣ
- Εμπορικές ανταλλαγές ενέργειας ανάμεσα σε χώρες
- Η ύπαρξη/αξιοποίηση ακραίων, αλλά ρεαλιστικών, ιστορικών κλιματικών ετών
- Οι διακοπές λειτουργίας και η μοντελοποίηση τους, συμπεριλαμβάνοντας τόσο τη προγραμματισμένη συντήρηση αλλά και τις απροσδόκητες βλάβες
- Ο αριθμός των μονάδων που βρίσκονται σε βλάβη σε μια χώρα

4.4.2 Μελέτη επάρκειας του Διαχειριστή του Ελληνικού Δικτύου Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ)

Η ανάλυση της Επάρκειας Ισχύος αποσκοπεί στο να επισημάνει τυχόν μελλοντικούς κινδύνους σχετικά με τη δυνατότητα του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να ανταποκριθεί επαρκώς στην αναμενόμενη αύξηση της ζήτησης κατά τα επόμενα έτη. Επιπλέον, η μελέτη επιτρέπει τον καθορισμό των αναγκών σε νέα εγκατεστημένη ισχύ παραγωγής προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφαλής κάλυψη της ζήτησης κατά τη διάρκεια της περιόδου που εξετάζεται.

4.4.2.1 Θεσμικό Πλαίσιο

Σύμφωνα με τις διατάξεις του Ν.4001/2011 και του Κώδικα Διαχείρισης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, ο Διαχειριστής του ΕΣΜΗΕ εκπονεί ειδική μελέτη σχετικά με την επάρκεια ηλεκτρικής ισχύος και τα επαρκή περιθώρια εφεδρείας ισχύος, λαμβάνοντας υπόψη κάθε φορά το εγκεκριμένο δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης του ΕΣΜΗΕ, καθώς και το μακροχρόνιο ενεργειακό σχεδιασμό της χώρας. Σύμφωνα με τον Κανονισμό (ΕΕ) 2018/2019, οι στόχοι που τίθενται στα Εθνικά Σχέδια για την Ενέργεια και για το Κλίμα (ΕΣΕΚ) αποκτούν δεσμευτικό χαρακτήρα και συνεπώς οι υποθέσεις που περιγράφονται σε αυτά θα πρέπει να αποτελούν βασικές παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό του Ηλεκτρικού Συστήματος.

4.4.2.2 Μεθοδολογική Προσέγγιση

Η συγκεκριμένη μελέτη επάρκειας διαμορφώνεται από τις προβλέψεις του Διαχειριστή σχετικά με την μελλοντική επάρκεια του ΣΗΕ και δεν αποτελεί πρόταση βέλτιστης

ανάπτυξης του. Με άλλα λόγια, επιχειρείται να δοθεί μια ρεαλιστική απεικόνιση της κατάστασης του συστήματος παραγωγής για την υπό εξέταση περίοδο, ενώ η παρουσίαση εναλλακτικών σεναρίων επιτρέπει στον αναγνώστη να διαμορφώσει τα δικά του συμπεράσματα, λαμβάνοντας υπόψη την εκτίμησή του σχετικά με την εξέλιξη των παραμέτρων αβεβαιότητας αλλά και συνεκτιμώντας την ευαισθησία της επάρκειας του συστήματος ως προς αυτές.

Τα κυριότερα μεγέθη που καθορίζουν την επάρκεια του συστήματος παραγωγής για την αξιόπιστη εξυπηρέτηση της ζήτησης (ενέργεια και αιχμή) σύμφωνα με τη Μελέτη Επάρκειας Ισχύος του Α.Δ.Μ.Η.Ε. για την περίοδο 2020-2030 είναι:

- Η εξέλιξη του φορτίου (ζήτηση ισχύος και ενέργειας)
- Η διαθεσιμότητα των μονάδων παραγωγής
- Οι συνθήκες υδραυλικότητας
- Η διαθεσιμότητα ισχύος για εισαγωγές από τις διασυνδέσεις
- Ο βαθμός διεύθυνσης μονάδων ΑΠΕ

Η πιο κρίσιμη παράμετρος των μονάδων παραγωγής όσον αφορά τη συμβολή τους στην επάρκεια του συστήματος παραγωγής είναι η διαθεσιμότητα τους. Οι μονάδες μπορεί να είναι εκτός λειτουργίας, είτε λόγω προγραμματισμένης συντήρησης, είτε λόγω τυχαίας βλάβης. Οι τυχαίες βλάβες μπορεί να έχουν δυσμενή επίπτωση στην επάρκεια του συστήματος, καθώς και η εμφάνιση τους και η διάρκεια τους (χρόνος επισκευής) έχουν απρόβλεπτο χαρακτήρα. Η πιθανότητα μη διαθεσιμότητας μιας μονάδας λόγω βλάβης είναι γνωστή ως Ρυθμός Μη Προγραμματιζόμενων Διακοπών (Ρ.Μ.Π.Δ.). Για αυτό το λόγο, η επίδραση της απρόβλεπτης ενσωματώνεται στη Μελέτη Επάρκειας με πιθανοτική προσομοίωση της λειτουργίας των μονάδων παραγωγής. Όσον αφορά τις υπόλοιπες παραμέτρους που επηρεάζουν την επάρκεια του συστήματος, λόγω του στοχαστικού τους χαρακτήρα, η επίδραση τους εκτιμάται με την ανάλυση εναλλακτικών σεναρίων και υποθέσεων.

4.4.2.3 Στοχαστική Εκτίμηση Επάρκειας

Για κάθε σενάριο που εξετάζεται, λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα των τυχαίων βλαβών των μονάδων, γίνεται πιθανοτική προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος παραγωγής σε ετήσια βάση, για το χρονικό ορίζοντα 2020-2030. Για την στοχαστική προσομοίωση του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής χρησιμοποιήθηκε το πιθανοτικό

μοντέλο PROSIM. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τη διαθεσιμότητα των μονάδων παραγωγής³ καθώς και τις απαιτήσεις συντήρησης των μονάδων. Εξετάζεται κάθε έτος της υπό διερεύνηση περιόδου, με διακριτότητα μιας εβδομάδας ώστε να είναι δυνατή η ρεαλιστική μοντελοποίηση των περιόδων συντήρησης των μονάδων παραγωγής. Για κάθε σενάριο υπολογίζονται οι ετήσιοι δείκτες αξιοπιστίας LOLE (Loss of Load Expectation) και EUE (Expected Unserved Energy) βάσει των οποίων γίνεται η αξιολόγηση των διαφορετικών σεναρίων και η εξαγωγή συμπερασμάτων.

Τα βήματα του αλγορίθμου είναι [39]:

1. Σύνθεση των χρονολογικών καμπυλών των περιοχών για τη δημιουργία της συνολικής ετήσιας χρονολογικής καμπύλης.
2. Ένταξη των μη συμβατικών μονάδων(Υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΥΗΣ) βάσης, ΦΒ, Αιολικά, Γεωθερμία κλπ)
3. Τροποποίηση των ωριαίων φορτίων για να ληφθούν υπόψιν οι αγοραπωλησίες του έτους
4. Ένταξη των ΥΗΣ αιχμής
5. Καθορισμός του ετήσιου προγραμματισμού συντήρησης των θερμικών μονάδων με βάση το κριτήριο επιπεδοποίησης της εφεδρείας.
6. Προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος παραγωγής:
 - I. Καθορίζεται η σειρά ένταξης των επιπέδων λειτουργίας των θερμικών μονάδων. Επίπεδα λειτουργίας (blocks) τοποθετούνται σε λίστα προτεραιότητας ενσωματώνοντας συνήθεις πρακτικές της οικονομικής κατανομής φορτίου.
 - II. Εντάσσονται τα επίπεδα λειτουργίας σύμφωνα με τη λίστα προτεραιότητας. Χρησιμοποιούνται πιθανοτικές τεχνικές, ώστε να ληφθούν υπόψη οι P.M.Π.Δ. των μονάδων. Για κάθε θερμική μονάδα υπολογίζονται οι ώρες λειτουργίας, η απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου και οι εκπεμπόμενοι ρύποι.
 - III. Εντάσσονται οι αντλητικές μονάδες για υποχρεωτική και οικονομική λειτουργία.
 - IV. Υπολογίζεται η αξιοπιστία του συστήματος παραγωγής (LOLP και LOLE).
 - V. Υπολογίζεται το απορριπτόμενο φορτίο (EUE). VI. Αποθηκεύει τα αποτελέσματα της εβδομαδιαίας προσομοίωσης σε αρχείο.

7. Εφ' όσον ζητηθεί, γίνεται έλεγχος ορίων καυσίμου ή περιβαλλοντικών περιορισμών. Αν δεν ικανοποιούνται το βήμα (6) επαναλαμβάνεται.
8. Αποθηκεύονται τα συγκεντρωτικά ετήσια αποτελέσματα σε αρχείο.

4.4.2.4 Κριτήριο Αξιοπιστίας

Ως τέτοιο θεωρείται ένα επίπεδο αξιοπιστίας που εξασφαλίζει ένα συμβιβασμό ανάμεσα στο ρίσκο εμφάνισης μιας ανεπάρκειας στη κάλυψη της ζήτησης φορτίου και την επίπτωση αυτού στη χώρα τόσο οικονομικά αλλά και κοινωνικά. Επίσης θα πρέπει να εξασφαλίζει έναν συμβιβασμό μεταξύ των απαιτήσεων ικανοποίησης της ζήτησης και του απαιτούμενου ύψους επενδύσεων για τη κατασκευή νέων μονάδων παραγωγής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η ικανότητα του συστήματος να καλύψει ασφαλώς τις ανάγκες της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο εκφράζεται μέσω δεικτών αξιοπιστίας. Ο Α.Δ.Μ.Η.Ε., όπως και οι περισσότεροι Διαχειριστές Συστημάτων διεθνώς, χρησιμοποιεί για την αξιολόγηση της επάρκειας του συστήματος τους δείκτες της Αναμενόμενης Απώλειας Φορτίου (LOLE) και της Αναμενόμενης Μη Εξυπηρετούμενης Ενέργειας (EUE), και εξετάζει για την πληρότητα της μελέτης τους δύο αυτούς δείκτες από κοινού.

Διεθνώς, οι τιμές του LOLE είναι της τάξεως των λίγων ωρών το έτος και συνήθως κυμαίνονται από 2,4 έως 10 ώρες ετησίως, οι οποίες θεωρούνται εν γένει ικανοποιητικές[40]. Η Μελέτη Επάρκειας του Α.Δ.Μ.Η.Ε. θεωρεί ως ικανοποιητικό κατώφλι για το δείκτη LOLE τις 3 ώρες ετησίως [41].

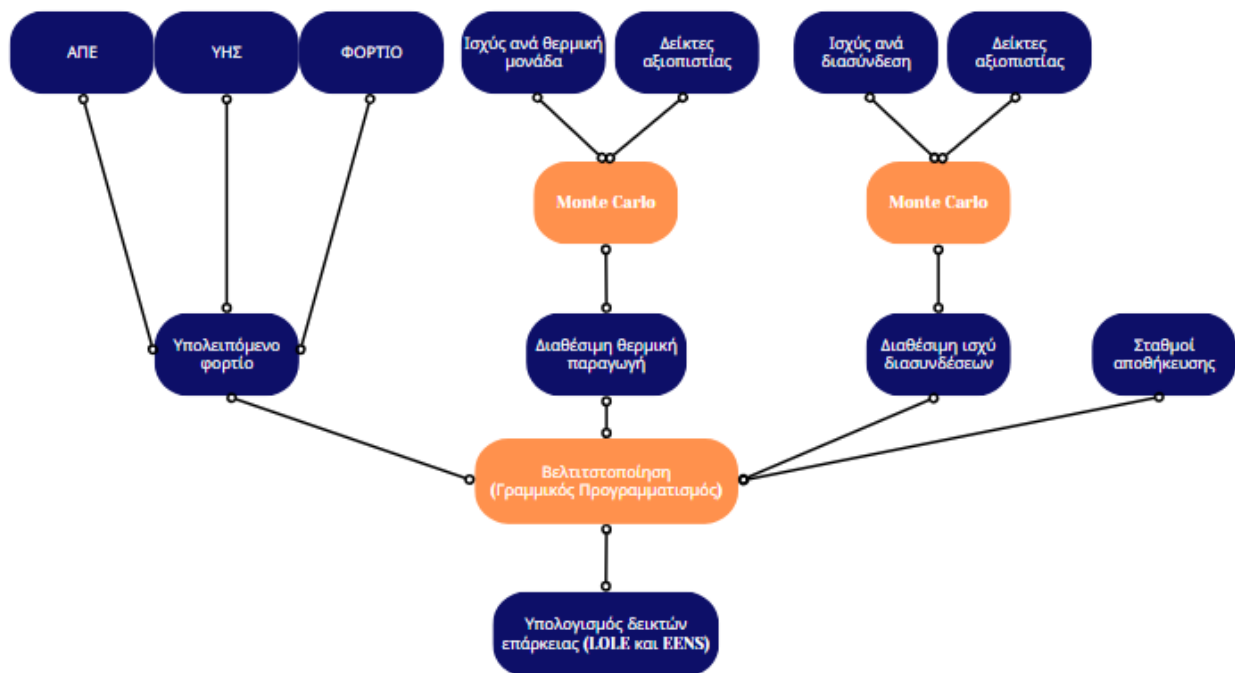
5. Μεθοδολογία: Μοντέλο εκτίμησης επάρκειας ισχύος

Το πειραματικό μέρος της διπλωματικής υλοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB. Το MATLAB είναι ένα προηγμένο περιβάλλον υπολογιστικής ανάλυσης και προγραμματισμού, που χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα της μηχανικής, της επιστήμης των υπολογιστών, των μαθηματικών, της στατιστικής, και σε πολλούς άλλους τομείς. Με τη δυνατότητά του να εκτελεί πολύπλοκες μαθηματικές και αριθμητικές εργασίες, το MATLAB αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάπτυξη αλγορίθμων, την ανάλυση δεδομένων, την απεικόνιση γραφημάτων, και πολλές άλλες εφαρμογές.

Αρχικά, υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος για τη παραγωγή χρονοσειρών διαθεσιμότητας θερμικών μονάδων αλλά και διασυννοριακών γραμμών. Για την δημιουργία αυτών των σετ αξιοποιήθηκε η μέθοδος Monte Carlo.

5.1 Μοντελοποίηση σταθμών παραγωγής

Στο Σχήμα 12 παρουσιάζεται συνοπτικά ο τρόπος ενσωμάτωσης και προσομοίωσης των διάφορων τεχνολογιών παραγωγής. Στις επόμενες υποενότητες αναλύονται όλες οι επιμέρους συνιστώσες παραγωγής και οι τρόποι ενσωμάτωσης κάθε μίας από αυτές.



Σχήμα 12 : Περιγραφή των σταδίων κατάστρωσης της μελέτης επάρκειας-Διάγραμμα ροής

5.1.1 ΑΠΕ

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας που προσομοιώνονται είναι:

- Φωτοβολταϊκοί σταθμοί
- χερσαία αιολικά πάρκα
- θαλάσσια αιολικά πάρκα
- άλλες ΑΠΕ

Για τις προαναφερθείσες τεχνολογίες αξιοποιούνται οι χρονοσειρές ωριαίου βήματος από την Pan-European Climate Database (PECD). Η συνολική εγκατεστημένη ισχύ σε κάθε ζώνη-περιοχή του συστήματος είναι καθορισμένη και ανταποκρίνεται στο άθροισμα της ισχύος των εγκατεστημένων πάρκων. Η ηλιακή και η αιολική παραγωγή είναι κλιματικά εξαρτημένη και είναι αποτέλεσμα της ηλιακής ακτινοβολίας και των συνθηκών ανέμου αντίστοιχα. Στις ωριαίες χρονοσειρές ΑΠΕ συμπεριλαμβάνονται ήδη προγραμματισμένες είτε έκτακτες βλάβες που μπορεί να συμβούν και επομένως δε έχουν μοντελοποιηθεί μέσω της τεχνικής MC.

Η διαθέσιμη ενέργεια ΑΠΕ των τεχνολογιών ανά ζώνη μελέτης εγχέεται στο δίκτυο χωρίς κόστος και αφαιρείται απευθείας από το αντίστοιχο φορτίο ζήτησης για τον υπολογισμό του ωριαίου υπολειπόμενου φορτίου της κάθε ζώνης.

5.1.2 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί

Οι Υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΥΗΣ) ενσωματώνονται ανά ζώνη μελέτης και ανά τεχνολογία. Η διαθεσιμότητα των φυσικών εισροών στους ταμιευτήρες και οι επιπλέον περιορισμοί λειτουργίας των εν λόγω σταθμών καθορίστηκαν από την pan-European Hydropower Modelling Database που είναι ενσωματωμένη στην PECD.

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί διακρίνονται σε 5 κατηγορίες τεχνολογιών:

1. Run-of-River (RoR)
2. Pondage
3. Reservoir
4. Open-loop PSP reservoir
5. Closed loop PSP reservoir (αντλησιοταμιευτικοί σταθμοί)

Η παραγωγή των ΥΗΣ εξαρτάται από περιορισμούς όπως την εισροή υδάτων, τη μέγιστη/ελάχιστη παραγωγή ανά τεχνολογία, το άνω και κάτω επίπεδο στάθμης των ταμιευτήρων. Επίσης στα παραπάνω θα πρέπει να προστεθεί και η λειτουργία των ΥΗΣ σε

περιβάλλον αγοράς αλλά και επικουρικές υπηρεσίες που ενδεχομένως καλούνται να προσφέρουν στο δίκτυο. Στην συγκεκριμένη μελέτη επιλέγεται μια λιγότερη σύνθετη διαχείριση τους μιας και δεν αποτελούν το κύριο ζητούμενο της μελέτης. Συγκεκριμένα η παραγωγή των ΥΗΣ αξιοποιείται για την απομείωση του ωριαίου φορτίου και με προτεραιότητα στη μείωση των αιχμών της ζήτησης.

- **Run-of-River (RoR) και Pondage:** Οι διαθέσιμες χρονοσειρές περιλαμβάνουν ημερήσιες χρονοσειρές εισροής υδάτων εκφρασμένες σε GWh και περιορισμούς για τη μέγιστη ωριαία παραγωγή τους ανά ημέρα. Οι χρονοσειρές κατανέμονται ισόποσα στις 24 ώρες κάθε ημέρας, δημιουργώντας την ωριαία παραγωγή, και αφαιρούνται από το υπολειπόμενο φορτίο ανά ζώνη μελέτης.
- **Reservoir και Open-Loop PSP:** Οι διαθέσιμες χρονοσειρές περιλαμβάνουν εβδομαδιαίες εισροές υδάτων στους ταμιευτήρες των δύο τεχνολογιών, περιορισμοί για τη μέγιστη ωριαία παραγωγή τους ανά εβδομάδα και για το μέγιστο/ελάχιστο επίπεδο των ταμιευτήρων. Σαν πρώτο βήμα οι εβδομαδιαίες εισροές υδάτων των δύο τεχνολογιών αθροίζονται και υπολογίζεται η διαθέσιμη ετήσια ενέργεια προς ενσωμάτωση. Για λόγους απλούστευσης θεωρείται ότι η παραγόμενη ενέργεια θα αποτελείται μόνο από εισροές (αγνοούνται οι δυνατότητες άντλησης των Open-Loop PSP).

Όπως αναφέρθηκε, οι δυο τεχνολογίες προσομοιώνονται με στόχο τη μείωση της αιχμής του υπολειπόμενου φορτίου ανά ζώνη. Για το σκοπό αυτό καταστρώθηκε αλγόριθμος που λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου το ωριαίο υπολειπόμενο φορτίο μετά την ενσωμάτωση των ΑΠΕ και των RoR-Pondage, τη διαθέσιμη ενέργεια προς αξιοποίηση και τη μέγιστη ωριαία ενέργεια που μπορεί να παραχθεί ανά εβδομάδα. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ακολουθεί μία επαναληπτική διαδικασία που στοχεύει στην απομείωση των αιχμών του φορτίου και ολοκληρώνεται όταν έχει αξιοποιηθεί όλη η διαθέσιμη ενέργεια των ταμιευτήρων ή έχει μηδενιστεί το φορτίο. Μέσω του αλγορίθμου προγραμματίζεται η παραγωγή των υδροηλεκτρικών σταθμών και προκύπτει το τελικό υπολειπόμενο φορτίο, που είναι δεδομένο εισόδου στη τελική βελτιστοποίηση.

Closed-Loop PSP: Η συγκεκριμένη τεχνολογία δεν διαθέτει εισροές υδάτων. Η λειτουργία τους, ως αποθηκευτικοί σταθμοί, θα ενσωματωθεί στην μοντέλο βελτιστοποίησης που περιγράφεται παρακάτω με τους περιορισμούς που τους διέπουν.

5.1.3 Θερμικοί σταθμοί

Οι θερμικοί σταθμοί είναι καταναμημένοι στις εξής τεχνολογίες:

- Πυρηνικά
- Φυσικό Αέριο
- Λιγνίτης
- Άνθρακας
- Πετρέλαιο
- Άλλες τεχνολογίες

Η εγκατεστημένη ισχύς ανά τεχνολογία και ανά ζώνη μελέτης προέρχεται από την Pan-European Market Modelling Data Base (PEMMDB) του ENTSO-E. Η διαθεσιμότητα θερμικής ισχύος ανά ώρα υπολογίζεται για κάθε μονάδα των επιμέρους συστημάτων και λαμβάνεται υπόψη αξιοποιώντας τη μέθοδο Monte Carlo, η οποία προσομοιώνει τις τυχαίες βλάβες τους. Οι ακόλουθες παράμετροι αξιοποιούνται για την προσομοίωση των φαινομένων διακοπής λειτουργίας των θερμικών μονάδων:

- Η πιθανότητα εμφάνισης βλάβης - FOR
- Μέση τιμή για την αποκατάσταση της βλάβης - MTTR
- Μέση τιμή για την εμφάνιση μιας βλάβης - MTTF

Ο δείκτης FOR είναι θεμελιώδης παράμετρος για τον υπολογισμό του προφίλ βλαβών των μονάδων και εκφράζει την πιθανότητα να εμφανιστεί μια αναπάντεχη βλάβη σε μια μονάδα θερμικής παραγωγής. Το FOR αφορά κάθε μονάδα ξεχωριστά και η τιμή του εξαρτάται από την τεχνολογία και τα χαρακτηριστικά της (π.χ. παλαιότητα). Αναφορικά με τον δείκτη MTTR αυτός θεωρείται ίσος με 24 ώρες [38]

Από την σχέση: $FOR = \frac{MTTR}{MTTR+MTTF}$, υπολογίζεται και ο δείκτης MTTF για τη κάθε μονάδα. Για κάθε μονάδα θεωρούνται δυο καταστάσεις λειτουργίας (ολική βλάβη ή πλήρης διαθεσιμότητα). Με αυτά τα δεδομένα παράγονται τυχαίες τιμές TTF και TTR από εκθετική κατανομή με μέση τιμή $\lambda=1/MTTF$ και $\mu=1/MTTR$ αντίστοιχα ανά μονάδα. Με αυτό το τρόπο διαμορφώνονται οι ωριαίες χρονοσειρές θερμικής ισχύος ανά μονάδα για ένα σύνολο M ετών Monte Carlo. Ο αριθμός των ετών MC που θα μοντελοποιηθούν θα πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλος ώστε οι τελικά υπολογιζόμενοι δείκτες επάρκειας να συγκλίνουν γύρω από μια σταθερή τιμή. Η διαθέσιμη θερμική παραγωγή ανά ζώνη

προκύπτει από το άθροισμα της διαθέσιμης ισχύος των επιμέρους μονάδων και αποτελεί το προφίλ ωριαίας διαθεσιμότητας θερμικής παραγωγής.

Για την αναπαράσταση των θερμικών μονάδων αξιοποιήθηκαν τα διαθέσιμα δεδομένα των εν λειτουργία μονάδων στις ζώνες μελέτης του ENTSO-E για το έτος 2023. Σε περίπτωση που για το 2030, δηλαδή για το έτος-αναφορά της μελέτης, υπάρχει αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος ή τα δεδομένα του ENTSO-E είναι ελλιπή έγινε προσθήκη ισχύος της αντίστοιχης τεχνολογίας μέχρι εκπλήρωσης της προβλεπόμενης εγκατεστημένης ισχύος.

5.1.4 Διασυνδέσεις

Ο υπολογισμός της διαθεσιμότητας μιας διασυνδετικής γραμμής για εξαγωγή και εισαγωγή ενέργειας ακολουθεί παρόμοια φιλοσοφία με τους θερμικούς σταθμούς και υπολογίζεται με τη μέθοδο Monte Carlo. Οι τιμές FOR αντλήθηκαν από τα δεδομένα του ENTSO-E για την ERAA 2023 και παρουσιάζουν διακυμάνσεις ανά διασυνδετική γραμμή και ανά τεχνολογία. Παρατηρήθηκε ότι σε αρκετές από τις διασυνοριακές γραμμές της περιοχής μελέτης είχαν μηδενικές τιμές FOR. Η τιμή για το MTTR τίθεται ίση με 168 ώρες και είναι ίδια τόσο για τις AC όσο και για τις DC διασυνδέσεις. Σημειώνεται ότι οι παραπάνω δείκτες αξιοπιστίας των διασυνδέσεων αναφέρονται σε κάθε πόλο των διασυνδέσεων. Επομένως, σε περίπτωση πολυπολικής διασύνδεσης, μια αδυναμία λειτουργίας ενός πόλου λόγω αναπάντεχης βλάβης δεν μειώνει τη διαθέσιμη ικανότητα της γραμμής σε μηδέν. Η λειτουργία των διασυνδέσεων αποφασίζεται στα πλαίσια του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ανάλογα με τις διαφορετικές πολιτικές που εφαρμόζονται και περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 5.2.

5.1.5 Αποθηκευτικοί σταθμοί

Μπαταρίες

Οι μπαταρίες μεγάλης κλίμακας προσομοιώνονται με βάση τρεις παραμέτρους: την ισχύ έγχυσης στο δίκτυο (ή εκφόρτισης) σε MW, την ισχύ απορρόφησης από το δίκτυο (ή φόρτισης) σε MW και την αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας εκφρασμένη σε MWh. Ο βαθμός απόδοσης της φόρτισης και της εκφόρτισης τίθεται ίσος με 90% και επομένως ο συνολικός βαθμός απόδοσης των μπαταριών ισούται με 81%.

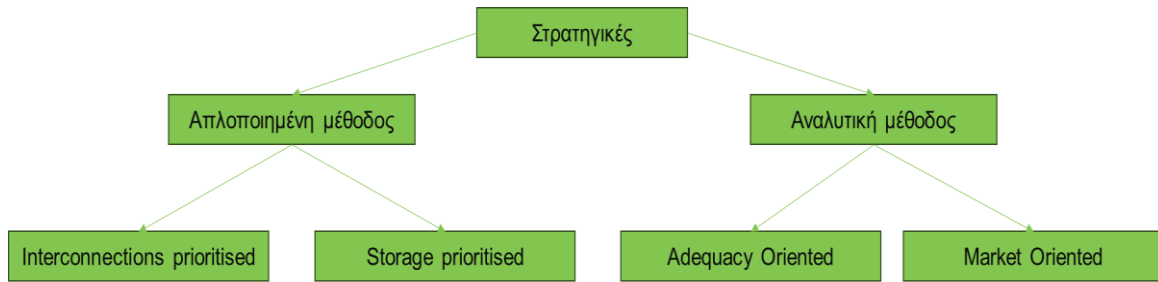
Αντλησιοταμίευση-Closed Loop

Προσομοιώνονται με βάση τρεις παραμέτρους: την ισχύ έγχυσης στο δίκτυο (ή εκφόρτισης) σε MW, την ισχύ απορρόφησης από το δίκτυο(ή φόρτισης/άντλησης) σε MW και την αποθηκευμένη ενέργεια εκφρασμένη σε MWh. Ο βαθμός απόδοσης της φόρτισης και της εκφόρτισης τίθεται ίσος με 80% και επομένως ο συνολικός βαθμός απόδοσης των μπαταριών ισούται με 64%.

5.2 Εναλλακτικές πολιτικές διαχείρισης διασυνδέσεων και αποθηκευτικών σταθμών

Στην παρούσα διπλωματική αναπτύχθηκαν δύο κύριες μεθοδολογίες για την εκτίμηση της επάρκειας ισχύος περιοχής διασυνδεδεμένων συστημάτων, η «απλοποιημένη» και η «αναλυτική», κάθε μία από τις οποίες περιλαμβάνει δύο διαφορετικές στρατηγικές αναφορικά με τη λειτουργία των αποθηκευτικών σταθμών. Συνολικά τέσσερις διαφορετικές προσεγγίσεις αναπτύσσονται και εφαρμόζονται για την εκτίμηση της επάρκειας ισχύος της περιοχής που εξετάζεται. Όλες οι εναλλακτικές πολιτικές διαμορφώνονται ως προβλήματα βελτιστοποίησης που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση των απωλειών φορτίου της υπό εξέταση περιοχής. Σημειώνεται ότι τα προβλήματα βελτιστοποίησης που διαμορφώνονται επιλύονται σε ωριαία βάση και δε υπάρχει χρονικός ορίζοντας για τη λειτουργία των αποθηκευτικών σταθμών.

Η πρώτη μέθοδος («απλοποιημένη») εστιάζει αμιγώς στην επάρκεια ισχύος του εξεταζόμενου συστήματος αξιολογώντας και ενσωματώνοντας στο μοντέλο το ωριαίο πλεόνασμα ή έλλειμμα του κάθε κόμβου. Συγκεκριμένα, από τη διαθέσιμη θερμική παραγωγή κάθε κόμβου (όπως προκύπτει από τις προσομοιώσεις Monte Carlo) αφαιρείται το υπολειπόμενο φορτίο και προκύπτει το ωριαίο πλεόνασμα αν το αποτέλεσμα είναι θετικό ή έλλειμμα του κόμβου αν είναι αρνητικό. Ανάλογα με το πλεόνασμα ή το έλλειμμα κάθε κόμβου αποφασίζεται η λειτουργία των αποθηκευτικών σταθμών και των διασυνδέσεων. Στη δεύτερη μέθοδο («αναλυτική») εκτός από την επάρκεια του συστήματος αξιολογείται και το κόστος λειτουργίας του. Για το σκοπό αυτό στο μοντέλο εισάγεται το μεταβλητό κόστος παραγωγής των μονάδων παραγωγής και αποφασίζεται η ένταξη τους σύμφωνα τόσο με τη διαθεσιμότητα τους όσο και με την οικονομικότητα τους. Αναλυτικότερα οι δύο προσεγγίσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Σχήμα 13 : Σύνολο μεθόδων και στρατηγικών που αναπτύχθηκαν

5.2.1 Απλοποιημένη μέθοδος

Όπως περιεγράφηκε στην εισαγωγή της ενότητας, σε αυτή τη μέθοδο από τη διαθέσιμη θερμική παραγωγή αφαιρείται το υπολειπόμενο φορτίο και προκύπτει το ωριαίο πλεόνασμα ή έλλειμμα του κάθε κόμβου.

Τα δεδομένα εισόδου της βελτιστοποίησης περιλαμβάνουν το πλεόνασμα/έλλειμμα ανά κόμβο, τη διαθέσιμη ισχύ των διασυνδέσεων ανά κατεύθυνση, την ενέργεια των αποθηκών και την ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης της κάθε αποθήκης.

Αντικειμενική Συνάρτηση-Εξίσωση βελτιστοποίησης

Στη παρακάτω εξίσωση παρουσιάζεται η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης της απλοποιημένης μεθόδου:

$$F = \min\{A * \sum_i GF + B * \sum_j TP - C * \sum E_{BAT,i} - C * \sum E_{RHP,i}\} \quad (13)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση στοχεύει στην:

- Ελαχιστοποίηση των ελλειμμάτων όλων των κόμβων ($\min\{A * \sum_i GF\}$)
- Ελαχιστοποίηση διασυνδεδετικών ροών ισχύος ($\min\{B * \sum_j TP\}$)
- Μεγιστοποίηση ενέργειας αποθηκευτικών σταθμών ($\min\{-C * \sum E_{BAT,i} - C * \sum E_{RHP,i}\} = \max\{C * \sum E_{BAT,i} + C * \sum E_{RHP,i}\}$)

Η επιλογή των παραμέτρων A,B,C καθορίζει το τρόπο που λειτουργεί ο αλγόριθμος. Η τιμή A διαφέρει από κόμβο σε κόμβο και ισούται με το VoLL (Value of Loss Load) που περιεγράφηκε παραπάνω και ισχύει ότι $A_i > B_i, C_i$. Δηλαδή η προτεραιότητα του αλγορίθμου είναι στην ελαχιστοποίηση των ελλειμμάτων των κόμβων. Οι διαφορετικές τιμές A_i ανά κόμβο επηρεάζουν τη σειρά με την οποία οι πλεονασματικοί κόμβοι θα συνδράμουν τους ελλειμματικούς. Ο ελλειμματικός κόμβος, λοιπόν, με τη μεγαλύτερη τιμή A (ή VoLL) θα εξυπηρετηθεί πρώτος από τους πλεονασματικούς κόμβους μέσω των

διαθέσιμων διασυνδέσεων. Η σχέση των τιμών B, C μεταξύ τους καθορίζει το πως θα καλύπτονται τα ελλείμματα του κόμβου και πως θα λειτουργούν κατά επέκταση οι διασυνδέσεις και οι αποθηκευτικοί σταθμοί των κόμβων.

Στρατηγική A: Προτεραιοποίηση διασυνδέσεων για την κάλυψη απωλειών φορτίου- Interconnections prioritized ($B_i < C_i$)

Έστω ο ελλειμματικός κόμβος i , αν $B_i < C_i$ τότε το έλλειμμα θα καλυφθεί κατά προτεραιότητα από πιθανούς γειτονικούς πλεονασματικούς κόμβους. Αναγκαία συνθήκη είναι να μην βρίσκονται οι αντίστοιχες διασυνδέσεις σε βλάβη και να υπάρχει «μονοπάτι» προς τους ελλειμματικούς κόμβους. Αν το έλλειμμα δεν έχει μηδενιστεί και δεν υπάρχει επιπλέον διαθέσιμη ενέργεια για εισαγωγή, τότε θα συνδράμουν οι αποθήκες του κάθε κόμβου και θα εκφορτιστούν. Όπως περιεγράφηκε και πιο πάνω ο αλγόριθμος στοχεύει μεταξύ άλλων στην μεγιστοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας στους αποθηκευτικούς σταθμούς. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όπως και σε αυτή που περιγράφεται εδώ, ο βαθμός απόδοσης των μπαταριών είναι μεγαλύτερος από τον βαθμό απόδοσης των σταθμών αντλησιοταμίευσης ($\eta_{BAT} > \eta_{RHP}$). Έτσι σε περίπτωση ανεπάρκειας πρώτα θα δώσουν ενέργεια οι σταθμοί μπαταριών του κόμβου και μετά της άντλησης, ώστε να τηρηθεί αυτή η συνθήκη της βελτιστοποίησης.

Όσον αφορά την φόρτιση των αποθηκών, αν οι αποθήκες ενός κόμβου δε βρίσκονται στο ανώτατο επίπεδο φόρτισης τότε με τη στρατηγική A ο κόμβος μπορεί να αξιοποιήσει το πιθανό πλεόνασμα του κόμβου ή πλεόνασμα γειτονικού κόμβου για να φορτίσει. Η σειρά φόρτισης των αποθηκών καθορίζεται και σε αυτή τη περίπτωση από τους βαθμούς απόδοσης των δύο τεχνολογιών. Επομένως, η φόρτιση των σταθμών αποθήκευσης προηγείται αυτών των σταθμών άντλησης λόγω υψηλότερου βαθμού απόδοσης. Αυτή η στρατηγική, επομένως, τείνει να κρατά τις αποθήκες με μεγαλύτερα ποσά ενέργειας και να αξιοποιεί τις διαθέσιμες ροές ενέργειας από πλεονασματικούς προς ελλειμματικούς κόμβους.

Στρατηγική B: Προτεραιοποίηση αποθηκευτικών σταθμών για την κάλυψη απωλειών φορτίου - Storage prioritized ($B_i > C_i$)

Έστω ο ελλειμματικός κόμβος i , αν $B_i > C_i$ τότε το έλλειμμα καλύπτεται κατά προτεραιότητα από τη διαθέσιμη ενέργεια των αποθηκευτικών σταθμών (μπαταρίες ή αντλησιοταμίευση) και μόνο αν δεν υπάρχει άλλη διαθέσιμη ενέργεια ή έχει συμβεί

μέγιστη ωριαία εκφόρτιση θα συνδράμει κάποιος πλεονασματικός κόμβος. Σε αυτή τη περίπτωση, η εκφόρτιση ξεκινά πρώτα από τους σταθμούς μπαταριών και μετά ακολουθούν οι σταθμοί άντλησης. Αν το έλλειμμα του κόμβου δε έχει μηδενιστεί, τότε ο αλγόριθμος αναζητά αν υπάρχει κάποιος πλεονασματικός κόμβος που μπορεί να υποστηρίξει τον ελλειμματικό κόμβο.

Όσον αφορά τη φόρτιση των αποθηκευτικών σταθμών, η κύρια διαφορά με τη στρατηγική A είναι ότι οι διασυνδέσεις δεν μπορούν να αξιοποιηθούν για την αύξηση της διαθέσιμης ενέργειας των αποθηκών. Έτσι, η φόρτιση επιτυγχάνεται μόνο όταν ο κόμβος έχει διαθέσιμη πλεονασματική ενέργεια και ταυτόχρονα δεν υπάρχει κάποιο έλλειμμα σε γειτονικό κόμβο που θα μπορούσε να το υποστηρίξει. Η φόρτιση των αποθηκευτικών σταθμών ξεκινά και σε αυτή τη περίπτωση από τις μπαταρίες και μετά ακολουθούν οι σταθμοί άντλησης. Η στρατηγική B, λοιπόν, υποστηρίζει μια περισσότερο ανεξάρτητη λειτουργία του κάθε κόμβου καθώς οι διασυνδέσεις αξιοποιούνται μόνο εφόσον οι διαθέσιμοι τοπικοί πόροι (μονάδες παραγωγής και αποθηκευτικοί σταθμοί) δεν επαρκούν

Οι περιορισμοί της βελτιστοποίησης της απλοποιημένης μεθοδολογίας περιγράφονται με τις παρακάτω εξισώσεις και ανισώσεις και ισχύουν και στις δύο στρατηγικές:

Βασικές περιορισμοί βελτιστοποίησης

$$\sum_{j \rightarrow i} TP_j + GF_i + P_{BAT,i}^d - P_{BAT,i}^c + P_{RHP,i}^d - P_{RHP,i}^c = Dp_i \text{ (Ελλειμματικοί κόμβοι)} \quad (14)$$

$$\sum_{j \rightarrow i} TP_j + GP_i + P_{BAT,i}^d - P_{BAT,i}^c + P_{RHP,i}^d - P_{RHP,i}^c = 0 \text{ (Πλεονασματικοί κόμβοι)} \quad (15)$$

$$E_{BAT,i,t} + P_{BAT,i}^d / \sqrt{\eta_{BAT}} - P_{BAT,i}^c * \sqrt{\eta_{BAT}} = E_{BAT,i,t-1} \quad (16)$$

$$E_{RHP,i,t} + P_{RHP,i}^d / \sqrt{\eta_{RHP}} - P_{RHP,i}^c * \sqrt{\eta_{RHP}} = E_{RHP,i,t-1} \quad (17)$$

Οι εξισώσεις (13),(14) παρουσιάζουν το ισοζύγιο της περιοχής/κόμβου i αναλόγως με τον αν είναι ελλειμματικός ή πλεονασματικός πριν τη εφαρμογή της βελτιστοποίησης. Η παράμετρος Dp_i αντιπροσωπεύει το έλλειμμα του κόμβου και η τιμή της είναι μεταβαλλόμενη σε κάθε ώρα. Με GF_i συμβολίζεται το έλλειμμα που παραμένει στο κόμβο i μετά την εφαρμογή της βελτιστοποίησης και GP_i η ενέργεια των πλεονασματικών

κόμβων που αξιοποιήθηκε είτε για εξαγωγές είτε σε φόρτιση αποθηκών. Μέσω των μεταβλητών GF_i υπολογίζονται οι δείκτες επάρκειας τόσο για τη συχνότητα των απωλειών ενέργειας (LOLE) όσο και για το μέγεθος των ανεπαρκειών (EENS). Ο όρος $\sum_{j \rightarrow i} TP$ αφορά το ποσό ενέργειας στη διασύνδεση TP_j που συνδέεται με το κόμβο i . Το πρόσημο της TP_j καθορίζεται από το αν η διασύνδεση εισάγει ενέργεια που το πρόσημο είναι θετικό ή αν η διασύνδεση εξάγει ενέργεια που το πρόσημο είναι αρνητικό. Με άλλα λόγια η μεταβλητή TP_j παίρνει μόνο θετικές τιμές. Τέλος οι όροι $P_{BAT,i}^d, P_{BAT,i}^c, P_{PHP,i}^d, P_{PHP,i}^c$ αντιπροσωπεύουν την ισχύ φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών και της αντλησιοταμίευσης στο κάθε κόμβο του συστήματος μελέτης.

Οι εξισώσεις (15),(16) προσδιορίζουν για κάθε χρονική στιγμή t τη στάθμη φόρτισης των σταθμών συσσωρευτών και των αντλησιοταμιευτικών σταθμών αντίστοιχα λαμβάνοντας υπόψη του βαθμούς απόδοσης η_{BAT}, η_{PHP} της κάθε τεχνολογίας. Τα $E_{BAT,i,t-1}, E_{PHP,i,t-1}$ αντιπροσωπεύουν την ενέργεια που βρίσκεται στους αποθηκευτικούς σταθμούς πριν την έναρξη της βελτιστοποίησης (χρονική στιγμή $t-1$) και με $E_{BAT,i,t}, E_{PHP,i,t}$ την ενέργεια που έχουμε στο τέλος της βελτιστοποίησης (χρονική στιγμή t) και που δίνεται από τις εξισώσεις (15),(16).

Για τις μεταβλητές των (15) και (16) ισχύουν οι παρακάτω περιορισμοί:

$$0 \leq P_{BAT,i}^{d,c} \leq P_{BAT,i}^{d,c} \max \quad (18)$$

$$0 \leq P_{PHP,i}^{d,c} \leq P_{PHP,i}^{d,c} \max \quad (19)$$

$$0.05 * E_{BAT,i} \max \leq E_{BAT,i} \leq 0.95 * E_{BAT,i} \max \quad (20)$$

$$0 \leq E_{PHP,i} \leq E_{PHP,i} \max \quad (21)$$

5.2.2 Αναλυτική μέθοδος

Η αναλυτική μέθοδος προσθέτει στην ανάλυση και την οικονομική οπτική της παραγωγής ενέργειας. Σε ένα πραγματικό ΣΗΕ κάθε παραγόμενη MWh από μια θερμική μονάδα συνοδεύεται από ένα μεταβλητό κόστος (€/MWh) που οφείλεται στις προδιαγραφές της κάθε τεχνολογίας και στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της μονάδας. Ο αλγόριθμος, λοιπόν, θα επιδιώξει να καλύψει τα ελλείμματα των διάφορων κόμβων επιλέγοντας να αξιοποιεί τη φθηνότερη διαθέσιμη θερμική τεχνολογία. Η ανάπτυξη αυτού του μοντέλου αναμένουμε να μας δώσει αποτελέσματα που ανταποκρίνονται περισσότερο στην πραγματική λειτουργία του συστήματος μελέτης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι παράλληλα με τη ικανοποίηση της ζήτησης, είναι ορθότερο να διερευνούμε το τρόπο που αυτό γίνεται με τον πιο οικονομικό τρόπο. Για το σκοπό αυτό, στην αντικειμενική συνάρτηση της προσέγγισης αυτής επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής του συστήματος. Συγκεκριμένα η διαθέσιμη θερμική ισχύς λαμβάνεται υπόψη ανά τεχνολογία και εισάγεται μια παράμετρος κόστους παραγωγής της κάθε τεχνολογίας που έχει υπολογιστεί με βάση τις τιμές καυσίμου, το κόστος εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και τα υπόλοιπα μεταβλητά κόστη λειτουργίας.

Αντικειμενική Συνάρτηση-Εξίσωση βελτιστοποίησης

Στη παρακάτω εξίσωση παρουσιάζεται η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης της αναλυτικής μεθόδου:

$$F = \min \left\{ A * \sum_i GF + D1_i * Nuclear_i + D2_i * NG_i + D3_i * Lignite_i + D4_i * Coal_i + D5_i * Oil_i + D6_i * OtherNonRES_i + B * \sum_j TP - C * \sum E_{BAT,i} - C * \sum E_{PHP,i} \right\} \quad (22)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση της αναλυτικής μεθόδου στοχεύει στην:

- Ελαχιστοποίηση ελλειμμάτων των κόμβων ($\min\{A_i * \sum_i GF\}$)
- Ελαχιστοποίηση κόστους θερμικών μονάδων ($\min\{D1_i * Nuclear_i + D2_i * NG_i + D3_i * Lignite_i + D4_i * Coal_i + D5_i * Oil_i + D6_i * OtherNonRES_i\}$)
- Ελαχιστοποίηση περιττών ροών ισχύος ($\min\{B * \sum_j TP\}$)
- Μεγιστοποίηση ενέργειας αποθηκών ($\min\{C * \sum E_{BAT,i} + C * \sum E_{PHP,i}\}$)

Οι τιμές του A_i όπως και στη πρώτη μέθοδο αντιπροσωπεύουν το κόστος απώλειας του φορτίου (Value of Loss Load-VOLL) και λαμβάνει διαφορετική τιμή ανά κόμβο όπως περιγράφηκε παραπάνω. Μιας και ο κύριος στόχος της βελτιστοποίησης είναι η κάλυψη των ελλειμμάτων, οι παράμετροι A_i πρέπει και είναι πολύ μεγαλύτερες από τις παραμέτρους που παρουσιάζονται στην αντικειμενική συνάρτηση. Οι τιμές $D1_i, D2_i, D3_i, D4_i, D5_i, D6_i$ απεικονίζουν το μεταβλητό κόστος παραγωγής της κάθε θερμικής τεχνολογίας (Πυρηνική, φυσικό αέριο, λιγνίτης, άνθρακας, πετρέλαιο και άλλες τεχνολογίες) ανά κόμβο. Για τις τεχνολογίες εφαρμόζεται μια ενιαία τιμή για το μεταβλητό κόστος της κάθε τεχνολογίας, με εξαίρεση το κόστος του λιγνίτη που έχει τέσσερις διαφορετικές τιμές αναλόγως με το κόμβο μελέτης.

Η επιλογή του συντελεστή C σε σχέση με τις τιμές μεταβλητούς κόστους της θερμικής παραγωγής καθορίζει το τρόπο λειτουργίας των αποθηκευτικών σταθμών, ως προς το πότε θα εκφορτίζουν αλλά και ως προς το από ποια ή ποιες τεχνολογίες θερμικών θα μπορούν να παίρνουν ενέργεια ώστε να ανεβάζουν το επίπεδο διαθέσιμης ενέργειας τους. Για την διερεύνηση της λειτουργίας επιλέχθηκαν δυο στρατηγικές με αυτή τη μέθοδο.

Στρατηγική A: Adequacy Oriented ($C > \max\{D1_i, D2_i, D3_i, D4_i, D5_i, D6_i\}$)

Σε αυτή τη στρατηγική, το πιθανό υπολειπόμενο φορτίο που υπάρχει μετά την ενσωμάτωση των ΑΠΕ και των ΥΗΣ στο κόμβο i θα καλυφθεί με προτεραιότητα από τη φθηνότερη διαθέσιμη θερμική ισχύ που υπάρχει προς παραγωγή είτε στο ίδιο κόμβο είτε σε γειτονικό κόμβο εφόσον υπάρχει διαθέσιμη μεταφορική ικανότητα της διασυνδετικής περιοχής. Αν έχουν αξιοποιηθεί όλες οι πηγές θερμικές ενέργειας και υπάρχει υπολειπόμενο έλλειμμα, τότε θα αξιοποιηθεί και η διαθέσιμη ενέργεια των αποθηκευτικών σταθμών δηλαδή των μπαταριών και της αντλησιοταμίευσης. Καθώς ο βαθμός απόδοσης των μπαταριών είναι μεγαλύτερος από της αντλησιοταμίευσης ($\eta_{BAT} > \eta_{PHP}$), οι μπαταρίες θα εκφορτίσουν πρώτες ενέργεια προς ελάττωση του ελλείμματος και αν δεν επαρκεί θα συνδράμουν και οι αντλησιοταμιευτικοί σταθμοί. Απαραίτητη προϋπόθεση για να συνδράμουν οι αποθηκευτικοί σταθμοί, βεβαίως, είναι να βρίσκονται πάνω από το ελάχιστο επίπεδο φόρτισης.

Όσον αφορά τη φόρτιση με αυτή τη στρατηγική, οι αποθηκευτικοί σταθμοί μπορούν να αξιοποιήσουν τη διαθέσιμη θερμική παραγωγή όλων των τεχνολογιών ώστε να ανεβάσουν τα επίπεδα φόρτισης τους. Η φόρτιση των μπαταριών προτεραιοποιείται έναντι

της αντλησιοταμίευσης λόγω υψηλότερου βαθμού απόδοσης. Η ενέργεια που μπορούν να απορροφήσουν σε μία ώρα περιορίζεται από την ανώτατη ωριαία ισχύ φόρτισης και το άνω επίπεδο φόρτισης της κάθε τεχνολογίας αποθήκευσης του κάθε μελετώμενου κόμβου.

Η στρατηγική A, λοιπόν, δίνει προτεραιότητα στη κάλυψη του υπολειπόμενου φορτίου από τη διαθέσιμη θερμική παραγωγή και κρατά τους αποθηκευτικούς σταθμούς για να τους αξιοποιήσει μόνο αν υπάρχει ανεπάρκεια θερμικών. Μπορεί να λεχθεί ότι λειτουργούν ως μονάδες εφεδρείας του συστήματος αφού επιλέγονται να βρίσκονται σε υψηλά επίπεδα φόρτισης, μιας και φορτίζουν από όλες τις διαθέσιμες πηγές ενέργειας, και να αξιοποιούνται ως τελευταίο καταφύγιο για την μείωση των ελλειμμάτων. Έτσι αναμένουμε ότι οι μονάδες αποθήκευσης θα λειτουργούν για λίγες ώρες μέσα στο έτος και μόνο ώρες αιχμής φορτίου ή ισχυρής ανεπάρκειας θερμικών σταθμών λόγω φαινομένων βλαβών τους.

Στρατηγική B: Market Oriented ($C < \min\{D1_i, D2_i, D3_i, D4_i, D5_i, D6_i\}$)

Στη στρατηγική B, εφόσον ο κόμβος i έχει υπολειπόμενο φορτίο τότε η προτεραιότητα στη κάλυψη του δίνεται στους αποθηκευτικούς σταθμούς. Η σειρά αποφόρτισης τους εξαρτάται από το βαθμό απόδοσης της κάθε τεχνολογίας όπως εξηγήθηκε και παραπάνω. Ως αποτέλεσμα πρώτα θα δοθεί ενέργεια από τους σταθμούς μπαταριών και έπειτα από τους σταθμούς αντλησιοταμίευσης. Η ενέργεια δεν είναι απαραίτητο να προέρχεται μόνο από τους αποθηκευτικούς σταθμούς του κόμβου μιας και μπορούν να αξιοποιηθεί η ενέργεια αποθηκευτικών σταθμών σε γειτονικούς κόμβους. Αν το έλλειμμα δεν έχει μηδενιστεί, τότε θα αξιοποιηθεί και η διαθέσιμη θερμική παραγωγή με τη προτεραιότητα να δίνεται στη φθηνότερη τεχνολογία και έπειτα να ακολουθούν και οι ακριβότερες σε αύξουσα σειρά.

Όσον αφορά τη φόρτιση με αυτή τη στρατηγική, οι αποθηκευτικοί σταθμοί μπορούν να αξιοποιήσουν μόνο τη πιθανή πλεονάζουσα παραγωγή ΑΠΕ που υπάρχει στο κόμβο ή σε γειτονικό κόμβο με τον οποίο διασυνδέεται άμεσα ή έμμεσα για να απορροφήσουν ενέργεια. Και σε αυτή τη περίπτωση οι μπαταρίες θα φορτίσουν πριν την αντλησιοταμίευση.

Η στρατηγική B, λοιπόν, δίνει μεγαλύτερη συμμετοχή των αποθηκευτικών σταθμών στη κάλυψη των φορτίων και αναμένουμε να οδηγήσει σε περισσότερους κύκλους φορτίσεων/εκφορτίσεων. Ο αριθμός αυτός συσχετίζεται και με το ποσοστά διείσδυσης

ΑΠΕ του εκάστοτε κόμβου μιας και όσο μεγαλύτερη η διείσδυση τόσο πιθανότερο είναι να υπάρχουν ώρες που η παραγωγή ΑΠΕ θα υπερβαίνει την ζήτηση και το πλεόνασμα θα μπορεί να αξιοποιηθεί ως ενέργεια φόρτισης των αποθηκευτικών σταθμών.

Βασικοί περιορισμοί βελτιστοποίησης

Μια σημαντική αλλαγή σε σχέση με την απλοποιημένη μέθοδο είναι η σημασία του ωριαίου πλεονάσματος/ ελλείμματος. Λόγω της εισαγωγής του κόστους στη θερμική παραγωγή, το ισοζύγιο του κάθε κόμβου πριν τη βελτιστοποίηση προκύπτει από τη αφαίρεση των χρονοσειρών των ΑΠΕ και των ΥΗΣ από τη ζήτηση του κάθε κόμβου. Θετική τιμή αντιπροσωπεύει την ύπαρξη ελλείμματος προς κάλυψη ενώ αρνητική τιμή υποδηλώνει πλεόνασμα ενέργειας που μπορεί να αξιοποιηθεί είτε για φόρτιση αποθηκευτικών σταθμών ή για την εξαγωγή σε ελλειμματικό κόμβο. Οι εξισώσεις (18),(19) αποτυπώνουν το ισοζύγιο ενέργειας του κάθε κόμβου αναλόγως με το αν είναι ελλειμματικός ή πλεονασματικός πριν τη βελτιστοποίηση με την προσθήκη των επιπλέον μεταβλητών σε σχέση με την απλοποιημένη μέθοδο που αντιπροσωπεύει τη παραγωγή από κάθε διαθέσιμη θερμική τεχνολογία. Στη περίπτωση μας, η μεταβλητή GP_i αντιπροσωπεύει τώρα το ποσό ενέργειας από το ωριαίο πλεόνασμα ΑΠΕ του κόμβου i που αξιοποιείται για τη φόρτιση των αποθηκευτικών σταθμών ή για την εξαγωγή της σε κόμβο που την έχει ανάγκη. Μέσω των μεταβλητών GFi , που αντιπροσωπεύουν και εδώ το ωριαίο έλλειμμα, υπολογίζονται οι δείκτες επάρκειας LOLE και EENS. Οι εξισώσεις (25),(26) είναι ίδιες με την απλοποιημένη μέθοδο και υπολογίζουν το επίπεδο ενέργειας στους αποθηκευτικούς σταθμούς μετά τη βελτιστοποίηση.

$$\sum_{j \rightarrow i} TP + GF_i + Nuclear_i + NG_i + Lignite_i + Coal_i + Oil_i + OtherNonRES_i + P_{BAT,i}^d - P_{BAT,i}^c + P_{RHP,i}^d - P_{RHP,i}^c = Dp_i \text{ (Ελλειμματικοί κόμβοι)} \quad (23)$$

$$\sum_{j \rightarrow i} TP + GP_i + Nuclear_i + NG_i + Lignite_i + Coal_i + Oil_i + OtherNonRES_i + P_{BAT,i}^d - P_{BAT,i}^c + P_{RHP,i}^d - P_{RHP,i}^c = 0 \text{ (Πλεονασματικοί κόμβοι)} \quad (24)$$

$$E_{BAT,i,t} + P_{BAT,i}^d / \sqrt{\eta_{BAT}} - P_{BAT,i}^c * \sqrt{\eta_{BAT}} = E_{BAT,i,t-1} \quad (25)$$

$$E_{RHP,i,t} + P_{RHP,i}^d / \sqrt{\eta_{RHP}} - P_{RHP,i}^c * \sqrt{\eta_{RHP}} = E_{RHP,i,t-1} \quad (26)$$

5.3 Περιοχή Μελέτης

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, ειδικότερα, προωθεί τη στενή συνεργασία μεταξύ των κρατών μελών της σε θέματα ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, μέσω του Μοντέλου Στόχου, η Ένωση έχει ως στόχο τη δημιουργία μιας Ενιαίας Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (EAHE), στην οποία η ανταγωνιστικότητα και η αυτορρύθμιση συνδυάζονται με ένα στιβαρό και διαφανές ρυθμιστικό πλαίσιο.

Τα κίνητρα και τα γεγονότα που οδήγησαν σε αυτήν την κατεύθυνση της ΕΕ έχουν αναλυθεί στο θεωρητικό μέρος της εργασίας. Επιπλέον, έχει τονιστεί η σημασία των Δυτικών Βαλκανίων για την Ευρώπη, καθώς αυτές οι χώρες περικυκλώνονται από κράτη μέλη της ΕΕ και βρίσκονται ακόμα σε νεαρά στάδια ανάπτυξης σε σύγκριση με την υπόλοιπη Ευρώπη. Αυτό επηρεάζει αναμφισβήτητα την ΕΕ και τα φιλόδοξα της σχέδια για τη δημιουργία ενός πανευρωπαϊκού ενεργειακού δικτύου. Τα τελευταία χρόνια, η ΕΕ προσπαθεί να ενισχύσει τις Δυτικές Βαλκανικές χώρες και να τις καθοδηγήσει προς την επίτευξη ενεργειακής αυτάρκειας και συμμόρφωσης με τα πρότυπα της ΕΕ.

Στο πλαίσιο της ενεργειακής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι διασυνδέσεις ενέργειας αναδεικνύονται ως κρίσιμης σημασίας παράγοντας για την επάρκεια του ενεργειακού τομέα στην Ευρώπη. Οι διασυνδέσεις αυτές αφορούν τη σύνδεση των διαφόρων ενεργειακών δικτύων των κρατών μελών της ΕΕ, όπως η διασύνδεση δικτύων φυσικού αερίου ή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι διασυνδέσεις αυτές έχουν σημαντικό ρόλο στη διασφάλιση της ενεργειακής ασφάλειας και επάρκειας της ΕΕ. Με την ενίσχυση των διασυνδέσεων, διασφαλίζεται η δυνατότητα εφοδιασμού από διάφορες πηγές ενέργειας και προμηθευτές, μειώνοντας την εξάρτηση από μονοπωλιακούς προμηθευτές και τυχόν ενεργειακούς περιορισμούς. Επιπλέον, οι διασυνδέσεις επιτρέπουν τη μεταφορά ενέργειας από περιοχές με υπερπαραγωγή σε περιοχές με έλλειψη, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα του ενεργειακού συστήματος και την ανταγωνιστικότητά του.

Επιπλέον, οι διασυνδέσεις συμβάλλουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς επιτρέπουν την ενσωμάτωση περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο και τη μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων.



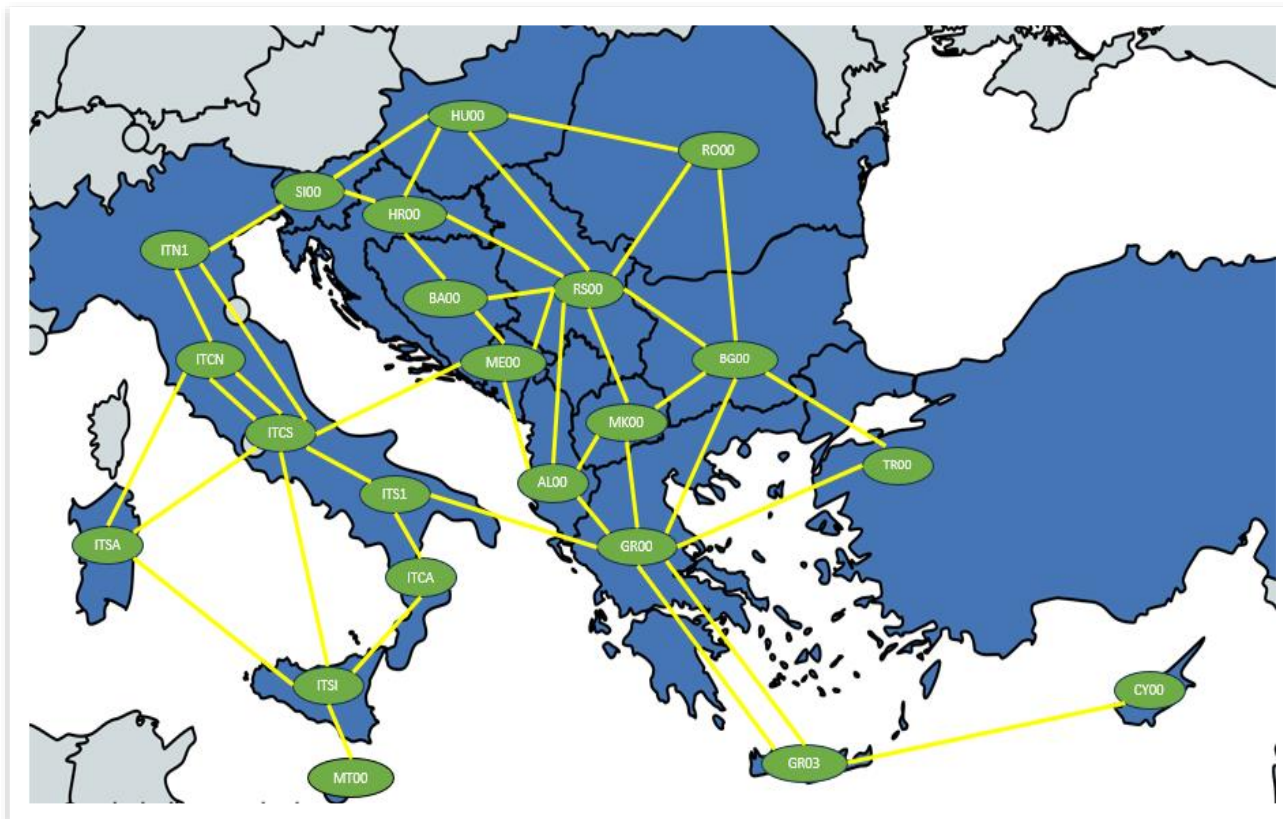
Σχήμα 14 : Περιοχή Μελέτης

Τέλος, οι διασυνδέσεις ενισχύουν την ενεργειακή ενοποίηση και την οικονομική συνεργασία μεταξύ των κρατών μελών, προάγοντας την αειφόρο ανάπτυξη και την κοινωνική ευημερία.

Στο μοντέλο το σύστημα χωρών αναπαρίσταται ως γράφος 22 κόμβων (περιοχών) και 42 αμφίδρομων βελών (διασυνδέσεις). Οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους με ακμές των οποίων τα χαρακτηριστικά εκφράζουν την συνολική ικανότητα μεταφοράς μεταξύ των ζωνών και σχηματοποιούν και αυτό τον τρόπο το ΣΗΕ.

Στο σύστημα μελέτης οι χώρες αναπαρίστανται με ένα κόμβο με εξαίρεση την Ελλάδα (2 κόμβοι) και την Ιταλία (7 κόμβοι). Οι ζώνες-κόμβοι που αναπαρίστανται αντλήθηκαν

από τη μελέτη ERAA 2023 του ENTSO-E για το έτος 2030. Περιλαμβάνονται όλες οι διασυνδέσεις (υφιστάμενες και νέες) που θα βρίσκονται σε λειτουργία το έτος 2030.



Σχήμα 15 : Η περιοχή μελέτης ανά ζώνη-κόμβο

Στο παρακάτω πίνακα επίσης φαίνονται αναλυτικά οι ονομασίες των κόμβων, οι περιγραφές τους όσον αφορά το ποια περιοχή περιλαμβάνουν καθώς και τις διασυνδέσεις τους με άλλους κόμβους της περιοχής. Η Σερβία και η Ελλάδα παρατηρούμε ότι είναι οι χώρες με τις περισσότερες διασυνδετικές γραμμές με γειτονικές χώρες. Ισχυρές διασυνδέσεις εμφανίζονται επίσης ανάμεσα στους κόμβους της Ιταλίας και ειδικά στον ITCS. Η μεγάλη διασυνδεσιμότητα καθιστά εφικτή τη ανταλλαγή ισχύος για την καλύτερη διαχείριση των ενεργειακών πόρων όλης της περιοχής. Σημειώνεται ότι δύο κόμβοι της περιοχής μελέτης, η Κύπρος και η Μάλτα, ενώνονται με μόνο μια διασύνδεση με το υπόλοιπο σύστημα που σημαίνει ότι σε περιπτώσεις βλάβης της οι κόμβοι αυτοί καλούνται να λειτουργήσουν ως νησιδοποιημένοι κόμβοι.

	Κόμβοι	Ζώνες	Διασυνδέσεις
1	AL00	Αλβανία	GR00, ME00, MK00, RS00
2	BA00	Βοσνία	HR00,ITN1,SI00
3	BG00	Βουλγαρία	GR00.MK00, RO00, RS00, TR00
4	CY00	Κύπρος	GR03
5	GR00	Ηπειρωτική Ελλάδα	AL00, BG00, GR03, ITS1, MK00, TR00
6	GR03	Κρήτη	GR00, CY00
7	HR00	Κροατία	BA00, HU00, RS00, SI00
8	HU00	Ουγγαρία	HR00,RO00,RS00,SI00
9	ITCA	Καλαβρία, Ιταλία	ITS1,ITSI
10	ITCN	Κεντρική/Βόρεια Ιταλία	ITCS,ITCS,ITN1,ITSA
11	ITCS	Κεντρική/Νότια Ιταλία	ITCN, ITN1, ITS1, ITSA, ITSI, ME00
12	ITN1	Βόρεια Ιταλία	ITCN,ITCS,SI00
13	ITS1	Νότια Ιταλία	GR00,ITCA,ITCS
14	ITSA	Σαρδηνία	ITCN,ITCS,ITSI
15	ITSI	Σικελία	ITCA,ITCS,ITSA,MT00
16	ME00	Μαυροβούνιο	AL00, BA00, ITCS ,RS00
17	MK00	Βόρεια Μακεδονία	AL00, BG00, GR00, RS00
18	MT00	Μάλτα	ITSI
19	RO00	Ρουμανία	BG00,HU00,RS00
20	RS00	Σερβία	AL00, BA00, BG00, HR00, HU00, ME00, MK00, RO00
21	SI00	Σλοβενία	HR00,HU00,ITN1
22	TR00	Τουρκία	BG00,GR00

Πίνακας 3 : Αναλυτική παράθεση κόμβων και διασυνδέσεων

5.4 Δεδομένα εισόδου

5.4.1 Εγκατεστημένη ισχύς

Στο παρακάτω πίνακα παρατίθενται αναλυτικά τα δεδομένα για την εγκατεστημένη ισχύ σε κάθε χώρα της προσομοιωμένης περιοχής.

Country	Thermal [MW]	Solar [MW]	Onshore Wind [MW]	Offshore Wind [MW]	Other RES [MW]	Hydropower stations [MW]
AL	300	600	280	-	-	2600
BA	1748	454	786	-	-	2500
BG	6400	3458	948	-	300	2352
CY	1600	852	197	-	12	-
GR	8095	13800	7100	2700	431	3700
HR	2200	720	1441	-	198	2600
HU	7907	9917	334	-	223	64
IT	51200	74600	18104	8500	4494	19800
ME	450	31	254	-	49	1137
MK	759	630	410	-	31	939
MT	701	281	-	-	-	-
R0	7343	8300	6000	1000	137	5900
RS	5400	794	4812	-	131	2566
SI	1901	2750	122	-	61.2	1202
TR	49313	16000	17500	-	2300	39956

Πίνακας 4 : Εγκατεστημένη ισχύς παραγωγής ανά τεχνολογία

5.4.2 Δείκτες αξιοπιστίας ανά τεχνολογία και ανά περιοχή

Στο Πίνακας 5 έχουμε τα δεδομένα που αφορούν τον ρυθμό εμφάνισης τυχαίων βλαβών FOR που μοντελοποιήθηκε ανά κόμβο και ανά τεχνολογία με την μέθοδο Monte Carlo.

FORCED OUTAGE RATE-FOR						
	Nuclear	Natural Gas	Lignite	Coal	Oil	Other RES
AL00	-	6%	-	-	-	-
BA00	-	-	9.6%	-	-	-
BG00	5%	6.3%	-	10%	-	-
CY00	-	5.6%	-	-	-	8.3%
GR00	-	6.7%	-	-	-	-
GR03	-	-	-	-	8.4%	-
HR00	-	6.9%	-	7.5%	10%	10%
HU00	5%	6.4%	-	-	8%	8%
ITCA	-	5.8%	-	-	-	-
ITCN	-	6%	-	-	-	8%
ITCS	-	5.8%	-	-	-	8.7%
ITN1	-	5.6%	-	-	-	8%
ITS1	-	5.5%	-	-	-	8%
ITSA	-	-	-	-	-	9.3%
ITSI	-	6%	-	-	-	8.5%
ME00	-	-	8.8%	-	-	-

MK00	-	6%	-	-	-	-
MT00	-	7.8%	-	-	8%	-
RO00	3%	5.4%	-	3%	-	-
RS00	-	2.4%	4.5%	-	-	-
SI00	0.5%	5.5%	1.5%	1.5%	-	0.05%
TR00	5%	6.4%	9.5%	9.5%	10%	10%

Πίνακας 5 : Δείκτες αξιοπιστίας θερμικών τεχνολογιών ανά ζώνη

5.4.3 Κόστος λειτουργία θερμικών μονάδων και κόστη καυσίμων και δικαιωμάτων εκπομπών CO₂

Για το καθορισμό του κόστους παραγωγής θεωρήθηκαν 3 παράγοντες: το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος του καυσίμου και το κόστος εκπομπών άνθρακα. Οι τιμές που παρουσιάζονται στο Πίνακας 6 **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** αντλήθηκαν από την μελέτη ERAA 2023 του Entso-e και αντανακλά τις προβλέψεις του διαχειριστή για τα διάφορα κόστη κατά το έτος 2030. Φθηνότερη θερμική τεχνολογία είναι με τεράστια διαφορά η πυρηνική ενέργεια που συναντάται σε χώρες όπως :BG00,TR00,SI00,HU00. Αμέσως φθηνότερη είναι το φυσικό αέριο που είναι η κυρίαρχη θερμική τεχνολογία στην περιοχή όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ.

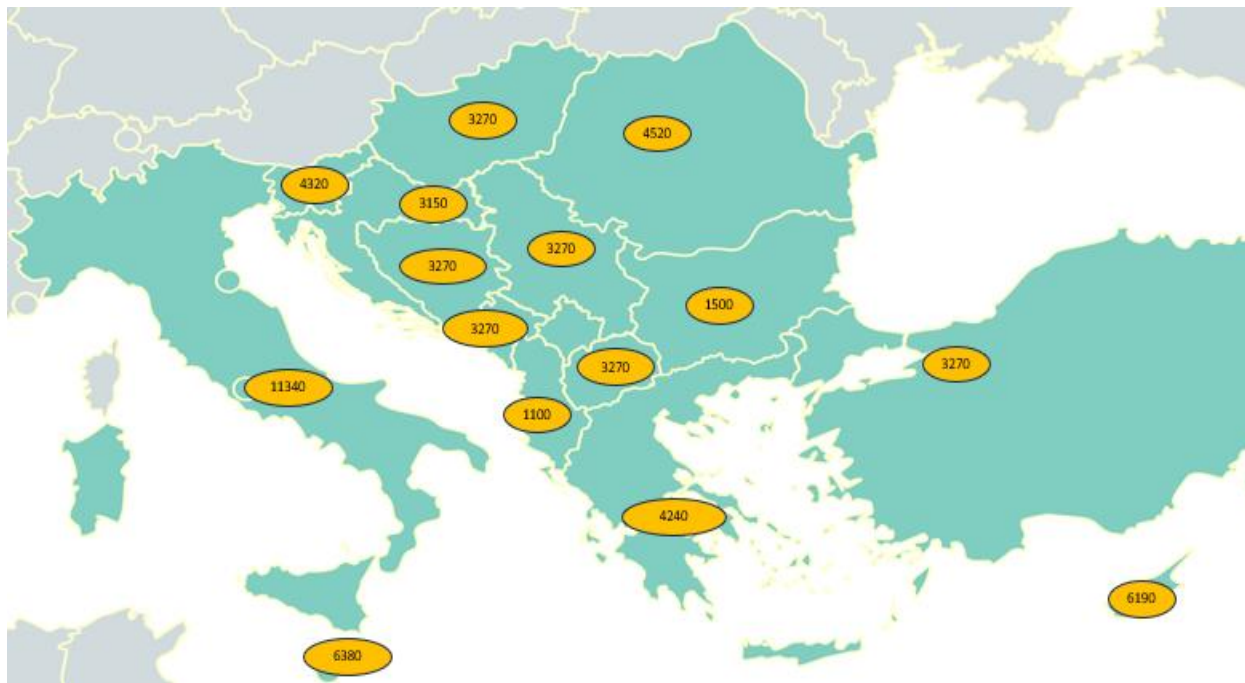
Technology	Zones	O &M	Fuel	CO₂	Sum
Hard coal	ALL	3.3	16.0	95.6	114.9
Gas	ALL	1.6	53.6	46.4	101.5
Light oil	ALL	1.1	120.8	90.7	212.5
Heavy oil	ALL	3.3	93.7	85.8	182.8
Oil shale	ALL	3.3	19.1	116.2	138.7
Lignite	BG00, MK00	3.3	12.6	102.7	118.6
Lignite	RS00, ME00, BA00	3.3	16.2	102.7	122.2
Lignite	HU00, RO00, SI00	3.3	21.3	102.7	127.4
Lignite	TR00	3.3	27.9	102.7	133.9
Nuclear	ALL	9.0	18.3	0.0	27.3

Πίνακας 6 : Μεταβλητό κόστος παραγωγής ανά τεχνολογίας(€/MWh)

5.4.4 Κόστος απώλειας φορτίου

Οι τιμές για το κόστος απώλειας φορτίου (Value of Loss Load-VoLL) κάθε χώρας βασίστηκαν στη μελέτη [12] του ACER. Για την Αλβανία η τιμή βασίστηκε στη μελέτη[42] Για τους κόμβους που δεν συμπεριλαμβάνονται στη μελέτη, καθώς δεν ανήκουν στην Ε.Ε.,

έγινε θεώρηση για μέση τιμή των VoLL των χωρών των Βαλκανίων. Μια απεικόνιση των τιμών VoLL που χρησιμοποιηθήκαν ανά χώρα φαίνεται στο Σχήμα 16.



Σχήμα 16 : Τιμές VoLL ανά χώρα

5.4.5 Επιλογή κλιματικών δεδομένων ΑΠΕ και ζήτησης

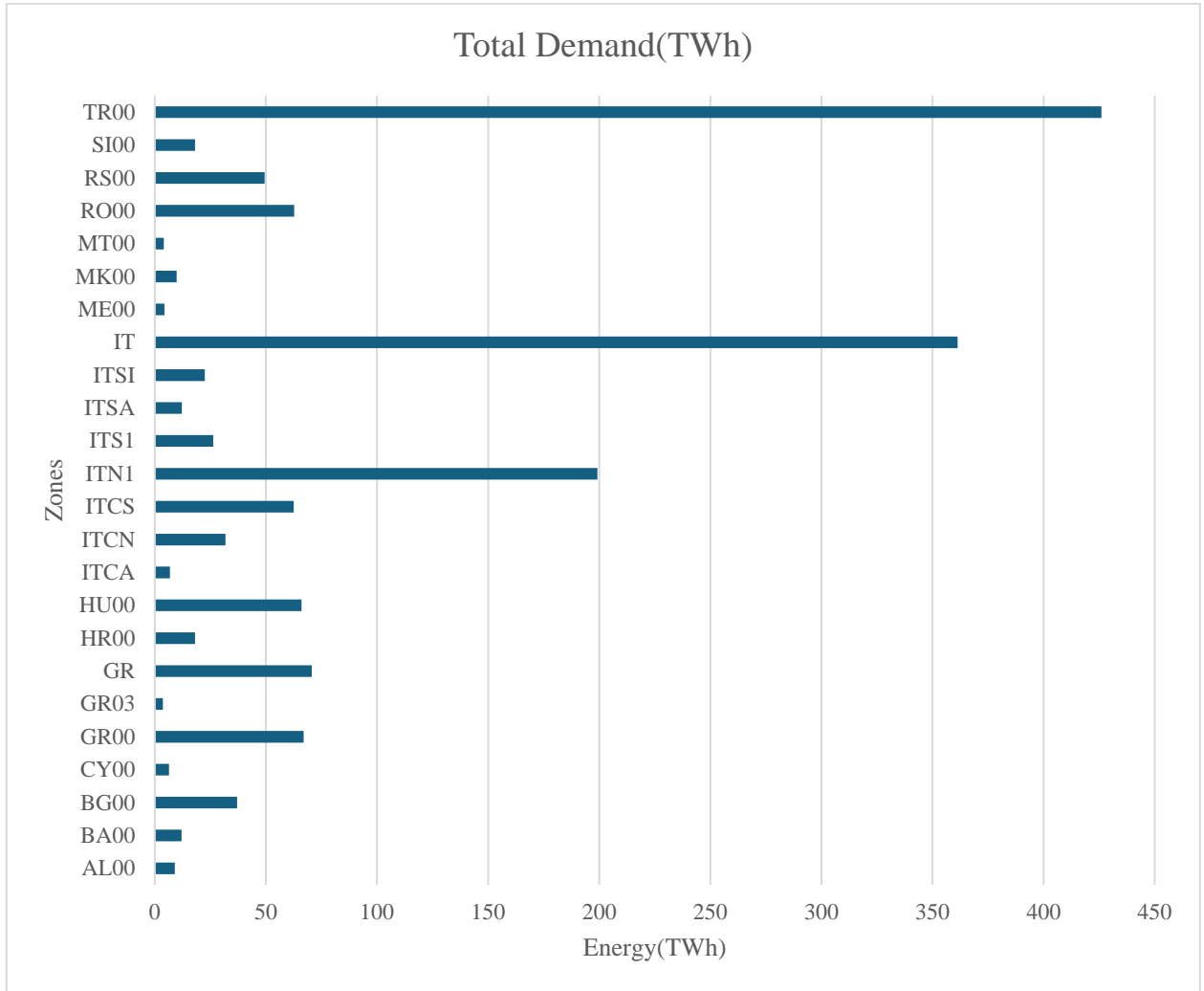
Η παραγωγή από ΑΠΕ είναι άμεσα εξαρτώμενη από τις κλιματικές συνθήκες. Τα δεδομένα που παρέχονται από τον ENTSO-e στα πλαίσια της μελέτης του ERAA 2023 περιλαμβάνουν 35 διαφορετικά κλιματικά έτη (1982-2016) με διαφορετικές ωριαίες χρονοσειρές για τη τελική παραγόμενη ενέργεια από καθαρές πηγές ενέργειας. Αντίστοιχα για τη ζήτηση του 2030, υπάρχουν ωριαίες χρονοσειρές για τα 35 κλιματικά έτη που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Η προσομοίωση και των 35 κλιματικών ετών-σεναρίων θα μας έδινε την πληρέστατη εικόνα για την επάρκεια του συστήματος κάτω από διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες. Από την άλλη, θα ήταν μια υπολογιστικά δύσκολη διαδικασία λόγω του μεγάλου πλήθους δεδομένων που δημιουργεί η προσομοίωση MC.

Αυτή η συνθήκη, οδήγησε στην επιλογή ενός μέσου κλιματικού έτους όσον αφορά τη ζήτηση αλλά και την παραγωγή ΑΠΕ με σύγκριση των δεδομένων του ENTSO-e. Ως κλιματικό έτος επιλέχθηκε το έτος 1982.

5.4.6 Ζήτηση

Στο Σχήμα 17 παρουσιάζεται η ενέργεια του ετήσιου φορτίου ανά κόμβο ενδιαφέροντος και ανά χώρα (Ελλάδα και Ιταλία) που προσομοιώνεται και αφορά το κλιματικό έτος 1982.

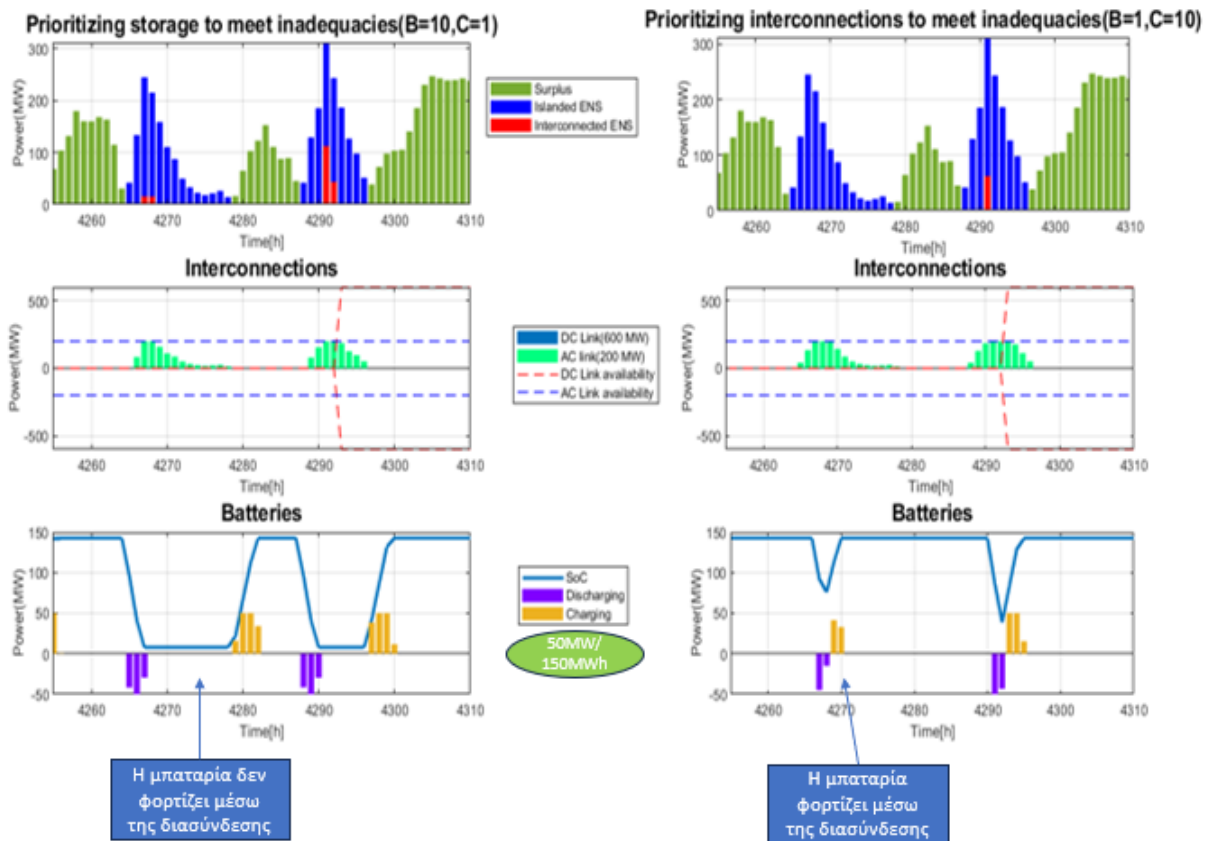


Σχήμα 17 : Συνολική ζήτηση ανά ζώνη και ανά χώρα

6. Αποτελέσματα

6.1 Λειτουργία του μοντέλου με την απλοποιημένη μέθοδο

Ως παράδειγμα ενδεικτικής λειτουργίας, επιλέχθηκε να παρουσιαστεί ο νησιωτικός κόμβος της Κρήτης (GR03) που παρουσιάζει αξιοσημείωτη συμπεριφορά. Το χρονικό διάστημα που φαίνεται στο Σχήμα 18, η διασύνδεση με τη Κύπρο βρίσκεται σε βλάβη οπότε παρουσιάζεται μόνο η λειτουργία των δυο διασυνδέσεων με το ηπειρωτικό σύστημα της Ελλάδας (GR00). Για το έτος μελέτης 2030, θεωρείται ότι η Κρήτη διασυνδέεται με το ηπειρωτικό σύστημα μέσω μίας διασύνδεσης AC που έχει ήδη κατασκευαστεί και μιας DC που αναμένεται να είναι έτοιμη έως το 2025.

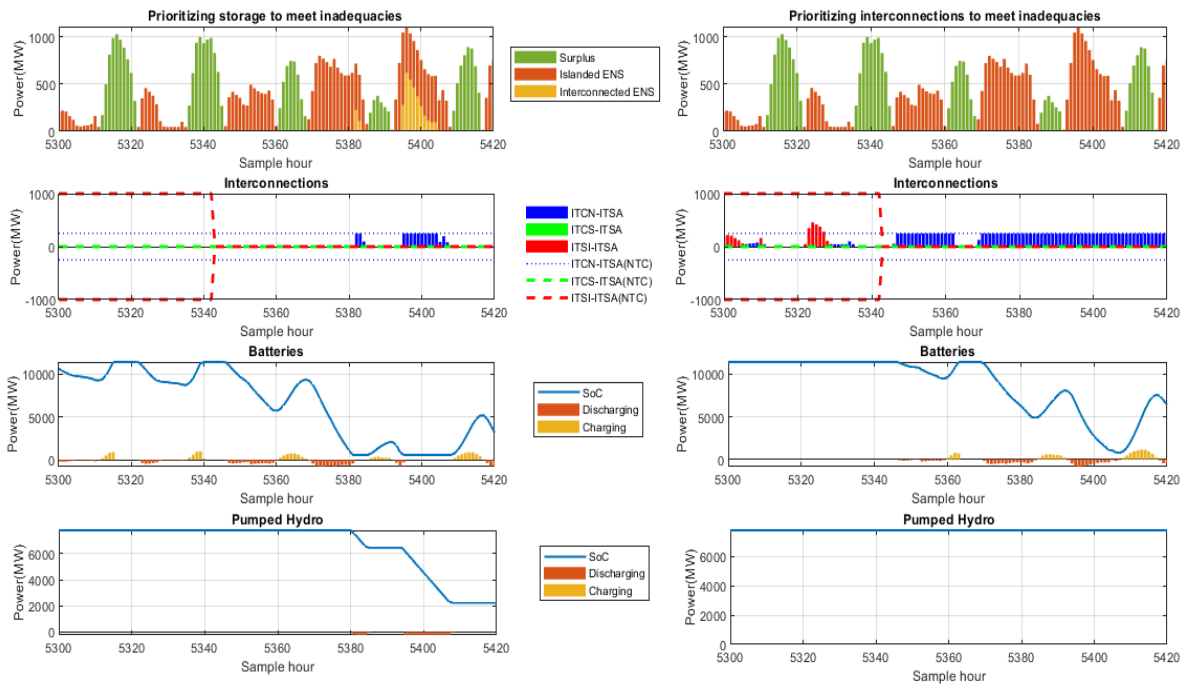


Σχήμα 18 : Λειτουργία του νησιωτικού κόμβου Κρήτη με την απλοποιημένη μέθοδο

Στην αριστερά στήλη παρουσιάζεται η στρατηγική της απλοποιημένης μεθόδου που προτεραιοποιεί τους αποθηκευτικούς σταθμούς για τη κάλυψη των ελλειμμάτων, ενώ στη δεξιά προτεραιοποιούνται οι διασυνδετικές γραμμές. Όπως παρουσιάζεται στην αριστερά στήλη (Storage prioritized) το αρχικό έλλειμμα καλύπτεται πρώτα από την τοπική

διαθεσιμότητα των μπαταριών και αφού εξαντλήσουν το ενεργειακό τους απόθεμα, συνδράμει και η διασύνδεση. Από την άλλη στη δεξιά στήλη (Interconnections prioritized) πρώτα αξιοποιείται η διασυνδυκτική ικανότητα του ηπειρωτικού συστήματος της Ελλάδας (GR00) και οι αποθηκευτικοί σταθμοί παραμένουν ως τελευταία λύση. Επίσης, στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο φαίνεται και η διαφορά των δυο στρατηγικών στην ικανότητα των αποθηκευτικών σταθμών να φορτίζουν από τις διασυνδέσεις.

Επιπλέον παρουσιάζεται ακόμη ένα παράδειγμα ενδεικτικής λειτουργίας που αφορά τον νησιώτικο κόμβο της Σαρδηνίας (ITSA) που διαθέτει διασυνδέσεις με την ITCN, την ITCS και την ITSI. Στο Σχήμα 19, επομένως, παρουσιάζεται η λειτουργία των διασυνδέσεων όσο και των αποθηκών με τις δυο στρατηγικές προτεραιότητας της απλοποιημένης μεθόδου σε ένα διάστημα 5 ημερών. Η πρώτη γραμμή εκφράζει το πλεόνασμα (Surplus) και το έλλειμμα (Islanded ENS) του κόμβου πριν τη βελτιστοποίηση και το έλλειμμα που παραμένει μετά την βελτιστοποίηση (Interconnected ENS). Η δεύτερη γραμμή απεικονίζει τη διαθεσιμότητα των διασυνδέσεων και τις ροές ενέργειας προς την ITSA. Τέλος, οι δυο τελευταίες γραμμές απεικονίζουν την διαθέσιμη ενέργεια της κάθε τεχνολογίας αποθήκευσης αλλά και την ενέργεια φόρτισης-εκφόρτισης.



Σχήμα 19 : Λειτουργία του μοντέλου με την απλοποιημένη μέθοδο για την Σαρδηνία (ITSA)

Η στρατηγική της αριστερής στήλης δίνει προτεραιότητα στη κάλυψη του υπολειπόμενου φορτίου από την διαθέσιμη ενέργεια των μπαταριών και των σταθμών αντλησιοταμίευσης του κόμβου και εφόσον εξαντληθεί η ικανότητα αυτών, τότε αξιοποιούνται οι διασυνδέσεις για τη εισαγωγή της αναγκαίας ποσότητας ενέργειας. Αντίθετα, στη δεξιά στήλη οι διασυνδέσεις προτεραιοποιούνται έναντι των αποθηκών για τη κάλυψη του ελλείμματος και οι αποθήκες παραμένουν σε «εφεδρεία» ώστε να συνδράμουν σε περίπτωση μη διαθέσιμης ενέργειας από τους γειτονικούς κόμβους ή πιθανών βλαβών στις διασυνδετικές γραμμές. Οι λειτουργίες επιβεβαιώνονται από τις μεγαλύτερες φορτίσεις-εκφορτίσεις στη 1^η στήλη και από τις μεγαλύτερες εισαγωγές ενέργειας στη 2^η στήλη. Το διάστημα που επιλέχθηκε τονίζει και τις διαφορές στην επάρκεια των δυο στρατηγικών. Η στρατηγική της 1^{ης} στήλης είναι από επαρκειακής σκοπιάς υποδεέστερη από την 2^η αφού προκύπτουν ελλείμματα στο διάστημα μεταξύ των ωρών 5380 και 5410. Η μείωση της στάθμης των αποθηκών σε χαμηλό επίπεδο στη 1^η στρατηγική εκείνες τις ώρες και σε συνδυασμό με την βλάβη των 2 από των 3 διασυνδέσεων οδηγεί το κόμβο σε ανεπάρκεια ισχύος. Αντίθετα με τη 2^η στρατηγική, η αξιοποίηση των διασυνδέσεων με προτεραιότητα, διατηρεί την στάθμη των αποθηκών σε υψηλότερη τιμή γύρω από τις ώρες 5380-5410 και με τη συνδρομή μπαταριών και αντλησιοταμίευσης καλύπτεται το έλλειμμα ισχύος

6.2 Λειτουργία του μοντέλου με την αναλυτική μέθοδο

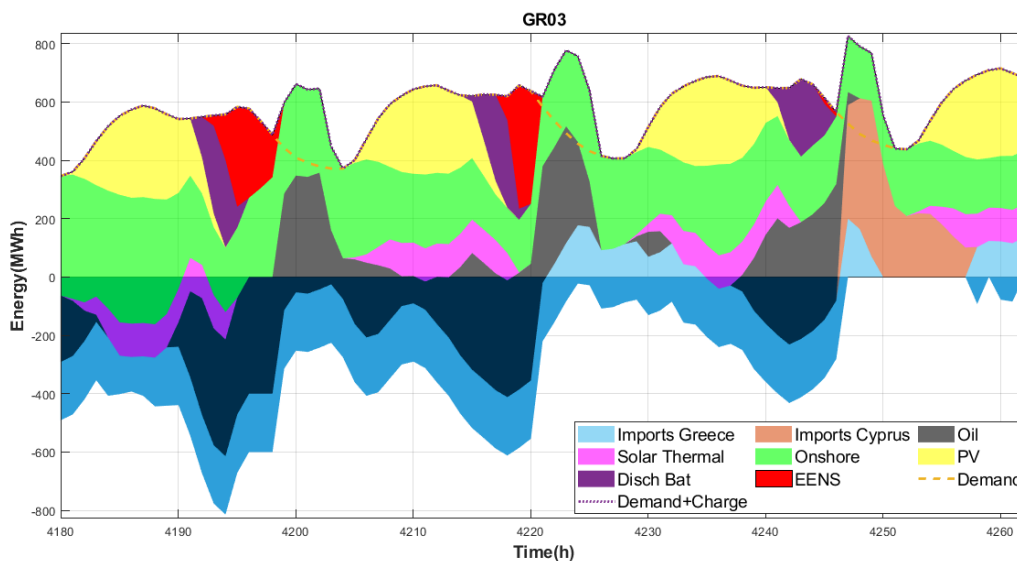
Με τη αναλυτική μέθοδο, σε κάθε τεχνολογία θερμικής παραγωγής εισάγεται και η έννοια του κόστους και ο αλγόριθμος επιδιώκει στην κάλυψη της ζήτησης ελαχιστοποιώντας το κόστος. Έτσι, δίνεται προτεραιότητα στις φθηνότερες θερμικές μονάδες. Με την μέθοδο αυτή, αναπτυχθήκαν δυο στρατηγικές διαχείρισης των αποθηκών.

Με την Adequacy Oriented στρατηγική, η αποθήκη προσφέρει ενέργεια μόνο όταν δεν υπάρχει άλλη διαθέσιμη θερμική ισχύς και αντίστοιχα η αποθήκη παίρνει ενέργεια τόσο από ΑΠΕ όσο και από θερμική τεχνολογία.

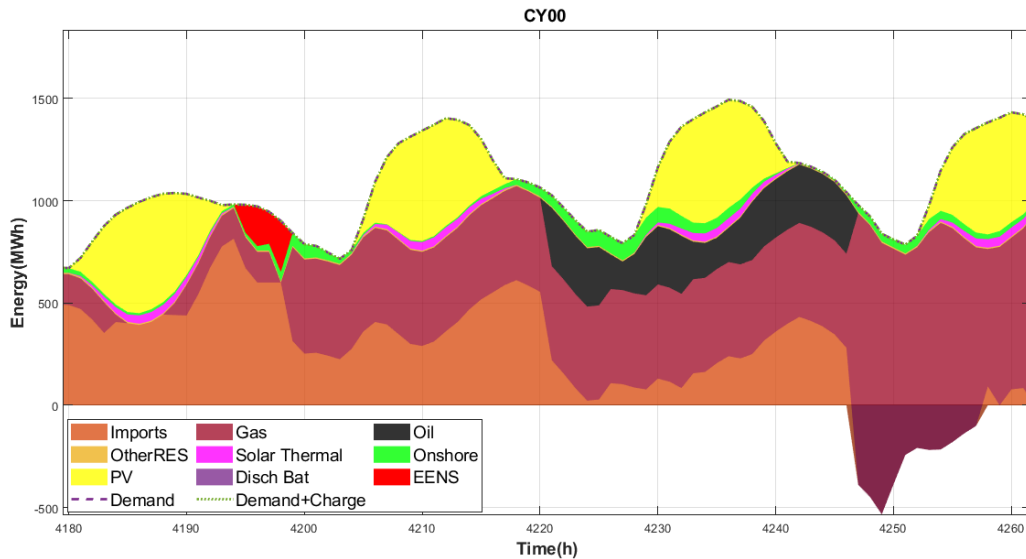
Με την Market Oriented στρατηγική, η αποθήκη προσφέρει την ενέργεια της αμέσως μετά τις ΑΠΕ και πριν την πιο φθηνή θερμική τεχνολογία. Αντίστροφα, η αποθήκευση φορτίζεται μόνο με ενέργεια από σταθμού ΑΠΕ. Η εν λόγω στρατηγική οδηγεί σε μεγαλύτερη αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ.

6.2.1 Adequacy-oriented στρατηγική

Ως ενδεικτικό παράδειγμα λειτουργίας επιλέχθηκε η λειτουργία του κόμβου της Κρήτης (GR03) όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 20 και της Κύπρου (CY00) στο Σχήμα 21. Παρατηρείται ότι το μείγμα στη Κρήτη αποτελείται κυρίως από ΑΠΕ ενώ υπάρχει και ένα σημαντικό διάστημα όπου το σύστημα εισάγει ενέργεια από τη Κύπρο. Αρχικά, παρατηρούμε ότι εμφανίζεται έλλειμμα στην Κρήτη κατά το εξεταζόμενο διάστημα ενώ παράλληλα το σύστημα εξάγει ενέργεια προς τη Κύπρο. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγαλύτερης τιμής VoLL της Κύπρου που στα αντίστοιχα διαστήματα εμφανίζει και αυτή έλλειμμα. Ο αλγόριθμος λοιπόν προτεραιοποιεί την αντιμετώπιση του ελλείμματος της Κύπρου όπως φαίνεται και στα σχήματα 20 και 21.



Σχήμα 20 : Λειτουργία του μοντέλου με την 1^η στρατηγική της αναλυτικής μεθόδου για την Κρήτη (GR03)

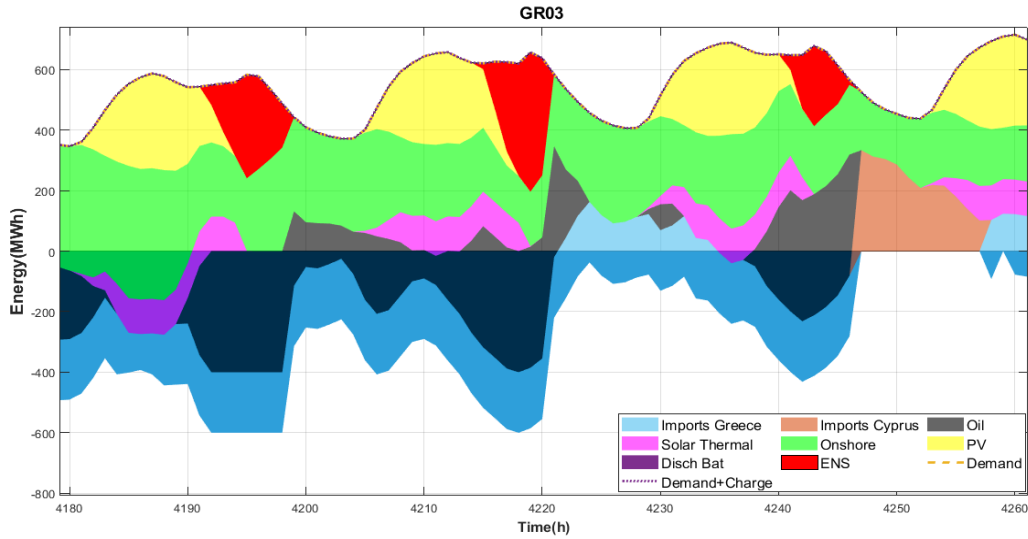


Σχήμα 21 : Λειτουργία του μοντέλου με την 1^η στρατηγική της αναλυτικής μεθόδου για την Κύπρο (CY00)

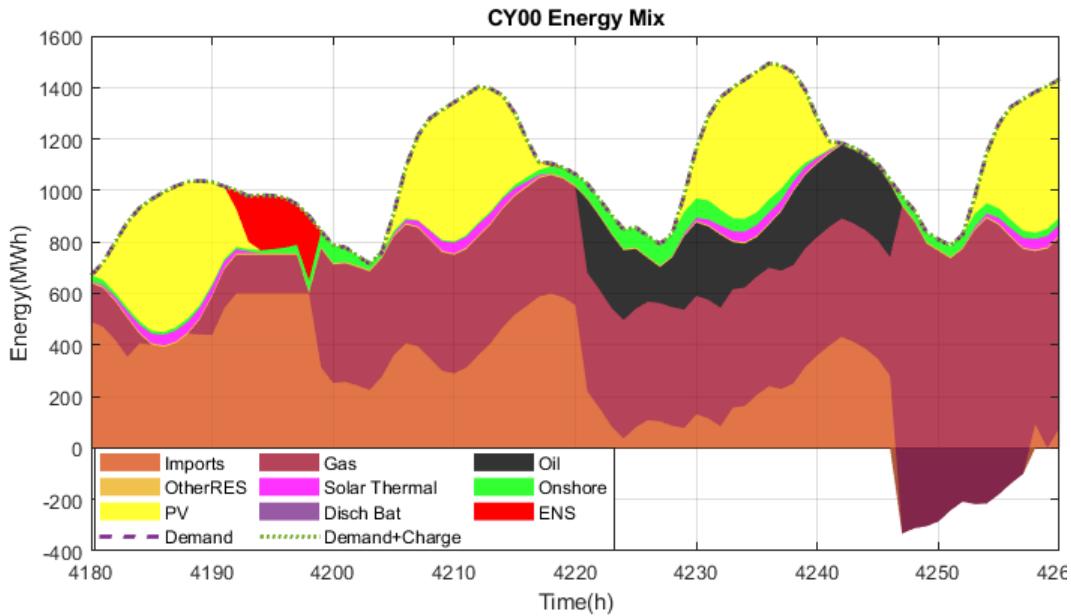
Παρατηρείται επίσης ένα διάστημα στο οποίο οι δύο κόμβοι μελέτης εμφανίζουν ταυτόχρονα έλλειμμα. Αξιοσημείωτη είναι και η συμβολή της αποθήκευσης στην επάρκεια στο συγκεκριμένο διάστημα. Βλέπουμε ότι στη Κρήτη οι μπαταρίες εκφορτίζουν στις περιόδους εμφάνισης ελλείμματος και αφού έχουν αξιοποιηθεί όλες οι διαθέσιμες τεχνολογίες παραγωγής για να μειώσουν την ανεπάρκεια. Αντίστοιχα, φορτίζουν στη πρώτη διαθέσιμη στιγμή από το πλεόνασμα ΑΠΕ ή και θερμικής ώστε να είναι διαθέσιμες ξανά σε περιόδους ανεπαρκειών. Από την άλλη το μίγμα της Κύπρου εξαρτάται περισσότερο από το φυσικό αέριο με μια σημαντική παρουσία ΦΒ παραγωγής το μεσημέρι. Οι εξαγωγές της Κύπρου προς την Κρήτη οφείλονται στην κοινή τιμή των μονάδων αερίου της Ελλάδας και της Κύπρου. Ως αποτέλεσμα η Ελλάδα εξάγει το αέριο της προς το βορρά των Βαλκανίων και η Κρήτη παίρνει ενέργεια από την Κύπρο.

6.2.2 Market oriented στρατηγική

Στο Σχήμα 22 και στο Σχήμα 23 παρουσιάζεται η λειτουργία κατά το ίδιο χρονικό διάστημα με την Market-oriented στρατηγική.



Σχήμα 22 : Λειτουργία του μοντέλου με την 2η στρατηγική της αναλυτικής μεθόδου για την Κρήτη (GR03)

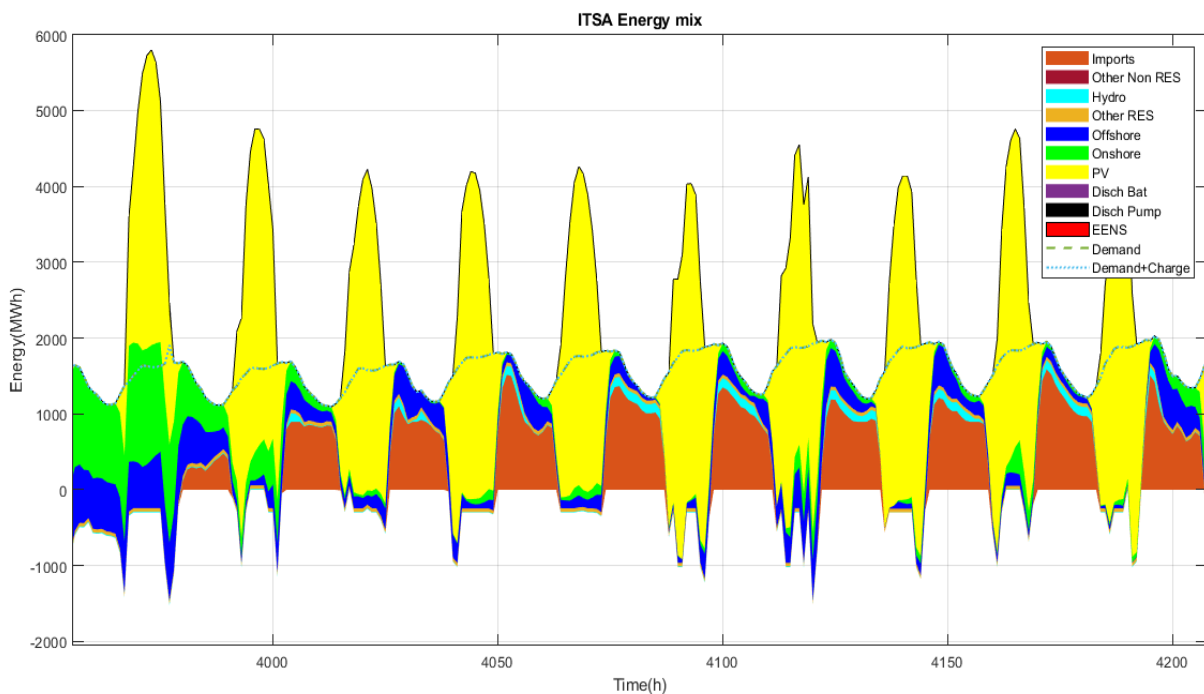


Σχήμα 23 : Λειτουργία του μοντέλου με την 2η στρατηγική της αναλυτικής μεθόδου για την Κύπρο (CY00)

Αρχικά παρατηρείται η εμφάνιση μεγαλύτερου ελλείμματος στην Κρήτη ως αποτέλεσμα της διαφορετικής λειτουργίας των μπαταριών της. Ελλείπει πλεονάσματος ΑΠΕ, οι μπαταρίες δε έχουν ενέργεια για να φορτίσουν οπότε δεν μπορούν να συμβάλλουν και στο περιορισμό της μη εξυπηρετούμενης ενέργειας. Κατά τα άλλα, παρατηρείται και εδώ η προτεραιοποίηση του ελλείμματος της Κύπρου έναντι της Κρήτης λόγω της διαφοράς της τιμής του VoLL.

6.2.3 Λειτουργία αποθηκών

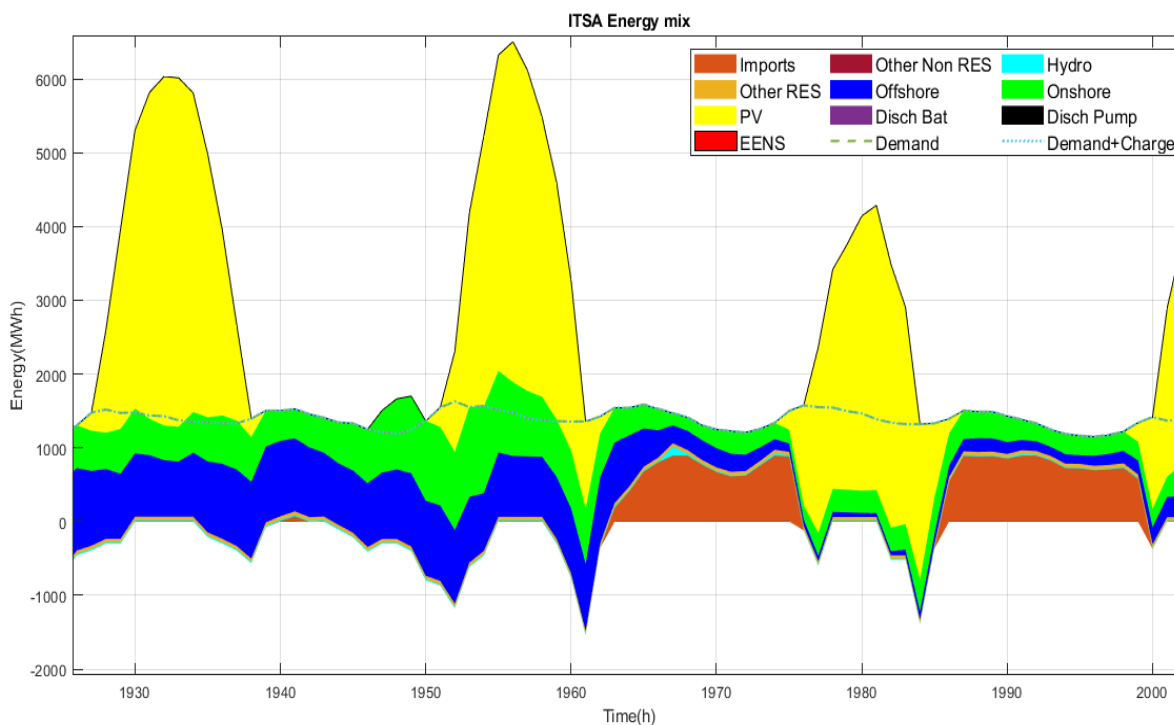
Επιλέχθηκε η παρουσίαση ενδεικτικών αποτελεσμάτων για την Σαρδηνία μιας και είναι νησιωτικός κόμβος που έχει μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ καθώς και δυο τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες και αντλησιοταμίευση). Οι δυο στρατηγικές αναμένεται να οδηγήσουν σε διαφορετική συχνότητα φόρτισης και εκφόρτισης των αποθηκευτικών σταθμών. Συγκεκριμένα στη 1^η στρατηγική (Adequacy Oriented) οι αποθήκες μένουν συνέχεια σε κατάσταση αναμονής και η ζήτηση καλύπτεται από τις ΑΠΕ, τη θερμική παραγωγή και τις εισαγωγές. Υπό αυτή τη στρατηγική το σύστημα εμφανίζει σημαντικές περικοπές ενέργειας ΑΠΕ (πάνω από τη διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα) τις μεσημβρινές ώρες, όταν η παραγωγή ΑΠΕ υπερβαίνει τη ζήτηση. Χαρακτηριστικά, στο διάστημα που έχει επιλεγθεί εμφανίζονται απορρίψεις της τάξεως των 2000-4000 MWh ανά ώρα.



Σχήμα 24 : Λειτουργία ITSA με τη στρατηγική adequacy-oriented

Με τη 2^η στρατηγική, παρατηρούμε ότι οι αποθήκες εμφανίζουν μια πιο ενεργή συμμετοχή στο σύστημα. Αυτό συμβαίνει γιατί οι αποθήκες έχουν προτεραιοποιηθεί πλέον έναντι των θερμικών μονάδων και έτσι έχουμε συχνές φορτίσεις-εκφορτίσεις που οδηγούν σε μικρότερες τελικές περικοπές ενέργειας όπως φαίνεται ξεκάθαρα και στο παρακάτω σχήμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μπαταρίες εκφορτίζουν πρώτες από την

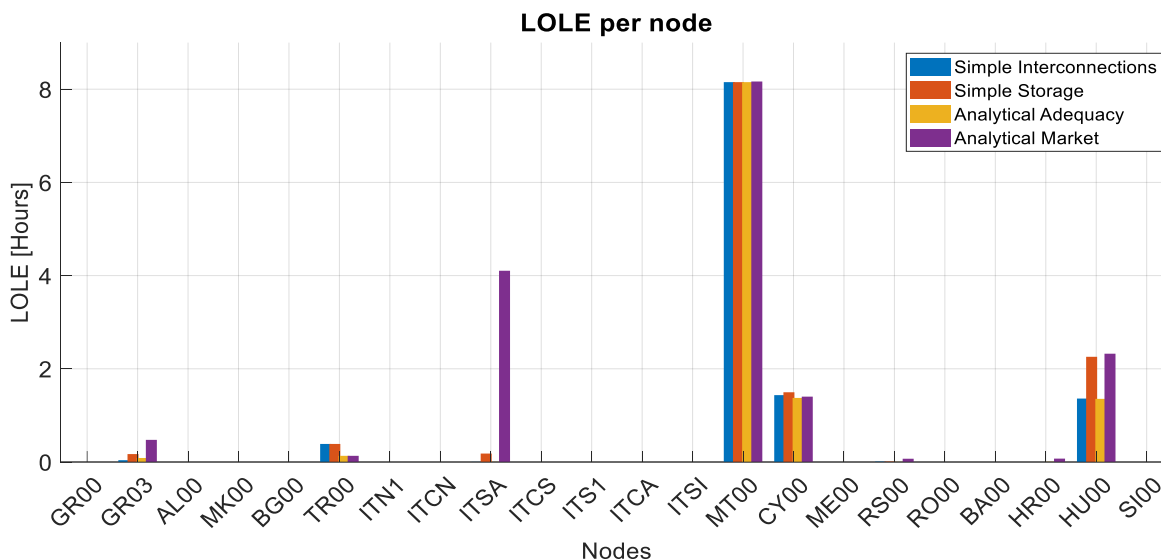
αντλησιοταμίευση με κριτήριο τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης των σταθμών μπαταριών και τις μικρότερες επομένως απώλειες ενέργειας. Μια ακόμη ενδιαφέρουσα παρατήρηση αφορά τις εισαγωγές ενέργειας. Παρατηρείται ότι με την adequacy-oriented στρατηγική το σύστημα εξαρτάται περισσότερο από τις διασυνδέσεις για τη κάλυψη του φορτίου, ενώ στη market-oriented στρατηγική αυξάνεται η συνεισφορά των αποθηκών στην εξομάλυνση του φορτίου και σημειώνεται συνακόλουθη μείωση των εισαγωγών ιδιαίτερα τις βραδινές ώρες. Η αξιοποίηση των διασυνδέσεων συνδέεται με την μικρή θερμική ισχύς του νησιού με αποτέλεσμα σε περιόδους χαμηλής παραγωγής ΑΠΕ να είναι αναγκαία η εισαγωγή ενέργειας από τους διασυνδεδεμένους κόμβους.



Σχήμα 25 : Λειτουργία ITSA με τη στρατηγική market-oriented

6.3 Δείκτες Επάρκειας του συστήματος με τις δύο μεθόδους

Μετά την παρουσίαση της λειτουργίας των δυο μεθόδων με τις δύο στρατηγικές της κάθε μίας, στο Σχήμα 26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το LOLE (Loss of Load Expectation) κάθε κόμβου εκφρασμένο σε hours/year μετά τα 800 ετήσια δείγματα προσομοίωσης Monte Carlo.

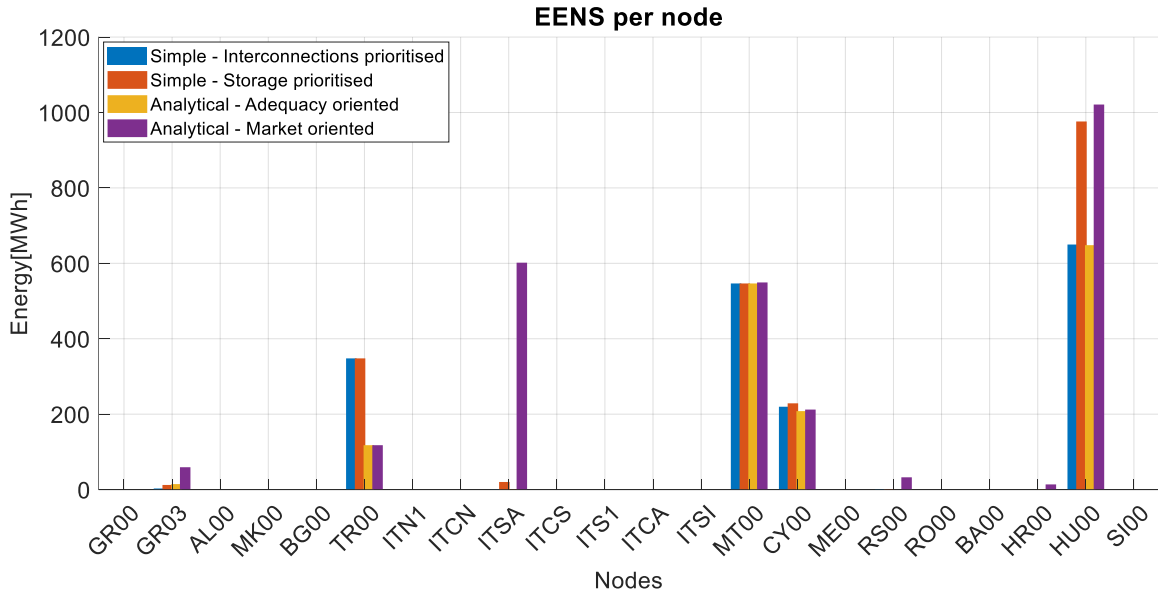


Σχήμα 26 : LOLE ανά κόμβο

Όπως παρατηρείται, οι περισσότεροι κόμβοι εμφανίζουν LOLE < 3h που θεωρείται μια τιμή που χαρακτηρίζει ένα σύστημα επαρκές. Μεταξύ των 4 συνολικά στρατηγικών υπάρχουν διαφορές που οφείλονται στη διαφορετική διαχείριση της θερμικής παραγωγής, των αποθηκών και των διασυνδέσεων. Παρατηρούμε ότι υψηλό LOLE εμφανίζει ο νησιωτικός κόμβος της Μάλτας (MT00) που διαθέτει μόνο μια διασύνδεση με το υπόλοιπο σύστημα μέσω της Σικελίας (ITSI). Επίσης ο δείκτης LOLE του κόμβου της Σαρδηνίας (ITSA) εμφανίζει τιμή υψηλότερη των 3 ωρών κατά τη αναλυτική μέθοδο υπό την market-oriented στρατηγική. Ως κόμβος με ελάχιστη θερμική ισχύ και πολύ υψηλή διεύθυνση ΑΠΕ, η διαχείριση των αποθηκών αλλά και η διαθεσιμότητα των διασυνδέσεων για εισαγωγές παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επάρκεια της περιοχής. Η υψηλή τιμή LOLE κατά τη market-oriented στρατηγική οφείλεται κυρίως στη διαχείριση των αποθηκευτικών σταθμών του νησιού. Συγκεκριμένα η προτεραιοποίηση της εκφόρτισης των αποθηκών έναντι της θερμικής παραγωγής, τόσο της περιοχής αλλά και των γειτονικών, οδηγεί σε συχνή χρήση των αποθηκευτικών σταθμών ανεξάρτητα με τις ανάγκες ισχύος του συστήματος, με αποτέλεσμα σε περίπτωση βλάβης κάποιων από των διασυννοριακών γραμμών ενδεχόμενη ανεπάρκεια ισχύος να μη μπορεί να καλυφθεί από την διαθέσιμη ενέργεια των αποθηκευτικών σταθμών και την τοπική παραγωγή.

Στο Σχήμα 27 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το EENS (Expected Energy Not Served) κάθε κόμβου εκφρασμένο σε MWh/year μετά τα 800 έτη προσομοίωσης Monte

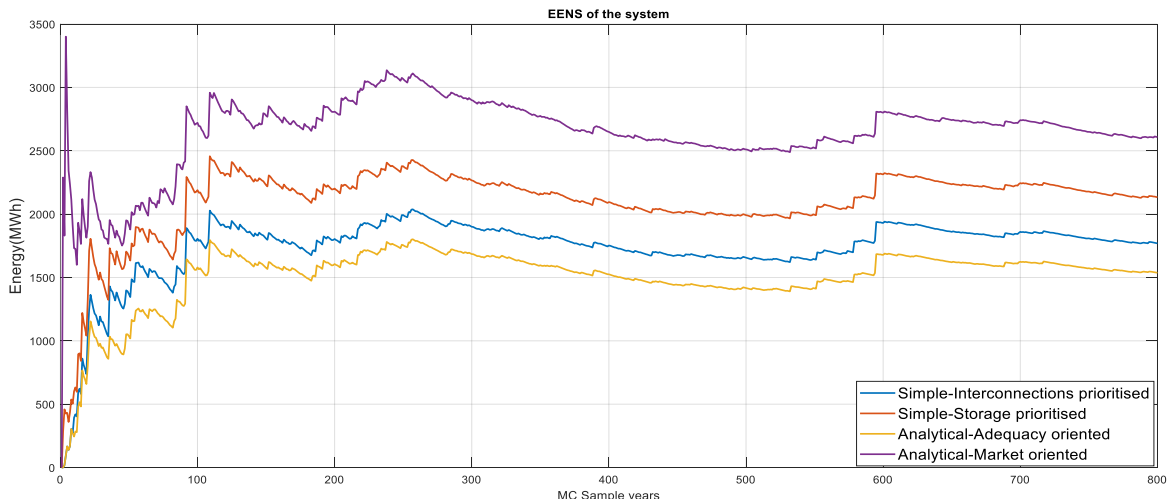
Carlo. Οι σημαντικότερες τιμές εμφανίζονται στους κόμβους της TR00, ITSA, MT00, CY00 και HU00.



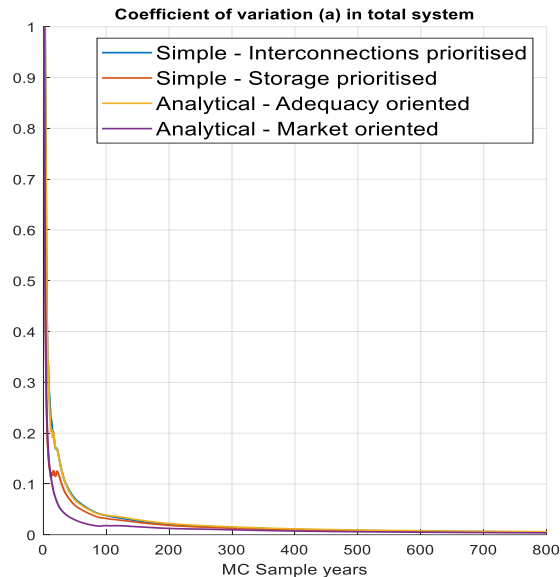
Σχήμα 27 : EENS ανά κόμβο

6.4 Συνολικοί δείκτες επάρκειας για τη περιοχή μελέτης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την μέση εκτιμώμενη απορριπτόμενη ενέργεια ανά έτος (EENS) στο σύνολο της περιοχής μελέτης. Παρατηρούμε ότι και με τις 4 στρατηγικές η τιμή του δείκτη συγκλίνει μετά από 800 δείγματα MC γύρω από μία σταθερή τιμή ενώ σε όλες τις εξεταζόμενες μεθόδους ο συντελεστής διακύμανσης του δείκτη EENS υπολογίστηκε σε κάτω από 1%.



Σχήμα 28 : Συνολικό EENS για τη περιοχή μελέτης



Σχήμα 29 : Συντελεστής διακύμανσης για το EENS

Οι τελικές δείκτες αναμενόμενα είναι μικροί συγκρινόμενοι με την ολική ζήτηση της περιοχής (980 TWh). Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους, στην απλοποιημένη μέθοδο πιο μικρό EENS εμφανίζεται στην στρατηγική προτεραιοποίησης των διασυνδέσεων ενώ στην αναλυτική μέθοδο υψηλότερη επάρκεια εμφανίζει η adequacy-oriented στρατηγική.

6.5 Βαθμός χρησιμοποίησης διασυνδέσεων με την αναλυτική μέθοδο

Στη συνέχεια παρατίθενται κάποια στατιστικά που αφορούν τις διασυνδέσεις και συγκεκριμένα το βαθμό χρησιμοποίησής τους με τις δυο επικρατέστερες στρατηγικές (adequacy- και market- oriented). Παρατηρείται σημαντική διακίνηση ενέργειας μεταξύ ζωνών, αναδεικνύοντας τη σημαντική συνεισφορά των διασυνδέσεων στη επάρκεια τόσο κάθε ζώνης μελέτης αλλά και ολόκληρου του συστήματος.

Χαρακτηριστικές είναι οι δυο διασυνδέσεις της Τουρκίας με το ευρωπαϊκό σύστημα (Ελλάδα και Βουλγαρία) που κινούνται σε ποσοστά αξιοποίησης άνω του 95%. Η Τουρκία ως χώρα που βασίζεται έντονα στο λιγνίτη και στον άνθρακα για την κάλυψη των αναγκών ισχύος της σε συνδυασμό με τη χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ, αξιοποιεί τις διασυνδέσεις για την εισαγωγή φθηνότερης ενέργειας από τους γείτονες της.

Επίσης, ο βόρειος κόμβος της Ιταλίας (ITN1), που αποτελεί τον κόμβο με το μεγαλύτερο φορτίο της Ιταλίας, αξιοποιεί σε μεγάλο βαθμό τις διασυνδέσεις με τους νότιους κόμβους ώστε να εκμεταλλευτεί το πλεόνασμα ΑΠΕ των κόμβων για τη κάλυψη των αναγκών αλλά και για τη διακίνηση ποσοτήτων ενέργειας προς τη SI00 (Σλοβενία).

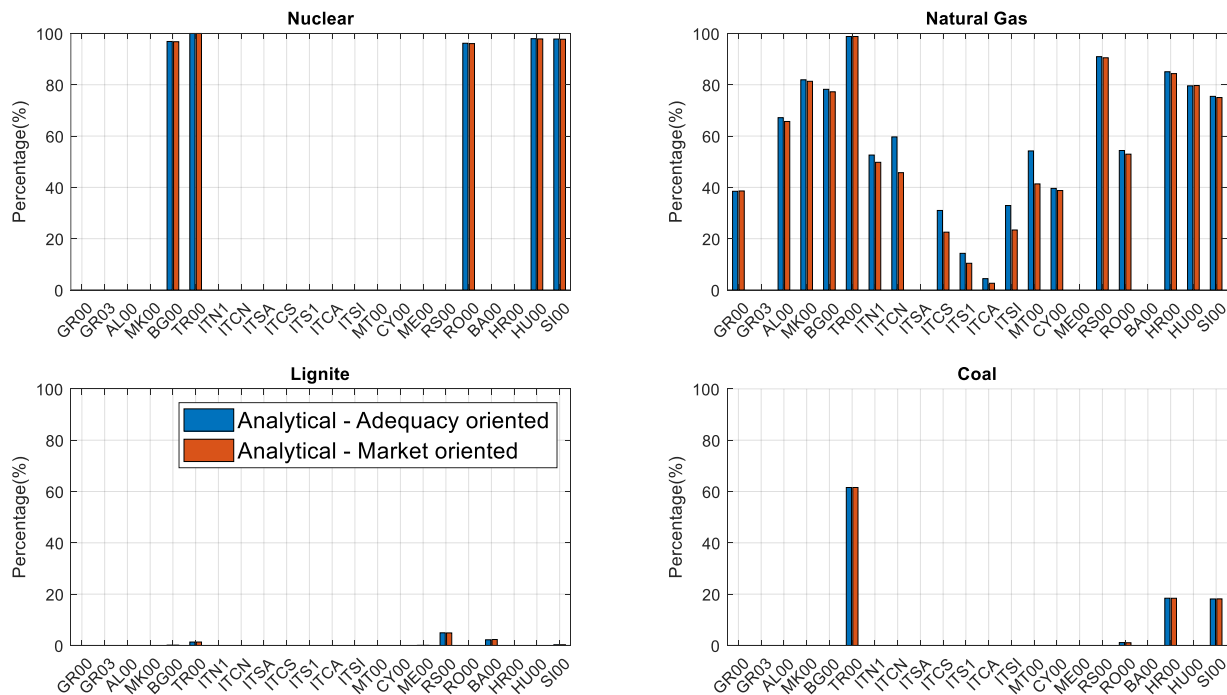
Link	Adequacy oriented	Market oriented	Flow	Link	Adequacy oriented	Market oriented	Flow
GR00-GR03 (DC)	4%	4%	Exports	AL00-ME00	20%	23%	Imports
GR00-GR03 (AC)	24%	25%	Exports	MK00-RS00	47%	48%	Exports
GR00-ITS1	56%	64%	Imports	BG00-RS00	44%	43%	Exports
GR00-AL00	14%	16%	Exports	ITCS-ME00	57%	67%	Exports
GR00-MK00	22%	23%	Exports	BG00-RO00	20%	16%	Imports
GR00-BG00	22%	30%	Exports	RS00-ME00	79%	83%	Imports
GR00-TR00	97%	97%	Exports	RS00-BA00	94%	95%	Imports
AL00-MK00	6%	7%	Exports	RS00-HR00	63%	64%	Imports
MK00-BG00	7%	8%	Exports	RS00-HU00	26%	29%	Imports
BG00-TR00	95%	95%	Exports	RS00-RO00	79%	77%	Imports
ITN1-ITCN	42%	48%	Imports	RS00-AL00	74%	75%	Imports
ITCN-ITSA	50%	65%	Imports	BA00-ME00	37%	33%	Exports
ITCN-ITCS	33%	48%	Imports	BA00-HR00	47%	51%	Exports
ITCS-ITS1	28%	43%	Imports	HU00-RO00	48%	49%	Imports
ITS1-ITCA	4%	10%	Exports	HU00-HR00	26%	28%	Imports
ITCA-ITSI	10%	15%	Exports	HU00-SI00	13%	14%	Imports
ITSA-ITCS	50%	63%	Imports	SI00-HR00	5%	5%	Imports
ITSI-ITCS	17%	38%	Exports	SI00-ITN1	43%	44%	Imports
ITSI-ITSA	18%	29%	Exports	ITCN-ITCS	58%	71%	Imports
ITSI-MT00	41%	54%	Exports	ITS1-ITCS	0%	0%	-
GR03-CY00	19%	20%	Imports	ITN1-ITCS	99%	100%	Imports

Πίνακας 7 : Βαθμός χρησιμοποίησης διασυνδέσεων

6.6 Βαθμός χρησιμοποίησης θερμικής ισχύος ανά τεχνολογία

Στην ενότητα αυτή αποτυπώνονται τα αποτελέσματα σχετικά με το ποσοστό αξιοποίησης της θερμικής ισχύος. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα είναι εκφρασμένα επί τοις εκατό της διαθέσιμης θερμικής παραγωγής λαμβάνοντας υπόψιν τις τυχαίες βλάβες των μονάδων σύμφωνα με τους δείκτες αξιοπιστίας τους. Στο Σχήμα 30 αποτυπώνονται τα αποτελέσματα για τις δύο στρατηγικές (adequacy- και market- oriented) της αναλυτικής

μεθόδου για τις τέσσερις κύριες τεχνολογίες θερμικών σταθμών παραγωγής. Αναμενόμενα, οι σταθμοί πυρηνικής ενέργειας αξιοποιούνται ως μονάδες βάσης του συστήματος μιας και είναι οι μονάδες με το χαμηλότερο μεταβλητό κόστος. Στη συνέχεια, σημαντικοί βαθμοί χρησιμοποίησης εμφανίζουν και οι σταθμοί φυσικού αερίου που είναι η επόμενη φθηνότερη τεχνολογία, καθώς και η τεχνολογία με την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ. Επιπλέον παρατηρούνται κόμβοι με σχεδόν μηδενικούς βαθμούς χρησιμοποίησης των θερμικών σταθμών τους γεγονός που οφείλεται στη υψηλή διείσδυση ΑΠΕ των κόμβων αυτών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα οι κόμβοι GR03, ME00, ITSA, ITS1, ITSI που αξιοποιούν τις τοπικές ΑΠΕ αλλά και τις διασυνδέσεις για την κάλυψη της ζήτησης. Επίσης στη περίπτωση των μονάδων φυσικού αερίου παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις δυο στρατηγικές. Η adequacy-oriented στρατηγική επιτρέπει μεγαλύτερη χρήση των θερμικών μονάδων μιας και οι αποθήκες εκφορτίζουν μόνο σε περίπτωση ανεπάρκειας ισχύος που δεν δύναται να καλυφθεί πλήρως από τους υπόλοιπους πόρους του συστήματος με αποτέλεσμα οι βαθμοί χρησιμοποίησης να είναι μεγαλύτεροι σε σχέση με τη market-oriented στρατηγική που επιτρέπει πιο ενεργή συναλλαγή ενέργειας από τους αποθηκευτικούς σταθμούς.



Σχήμα 30 : Βαθμοί χρησιμοποίησης θερμικής παραγωγής ανά κόμβο

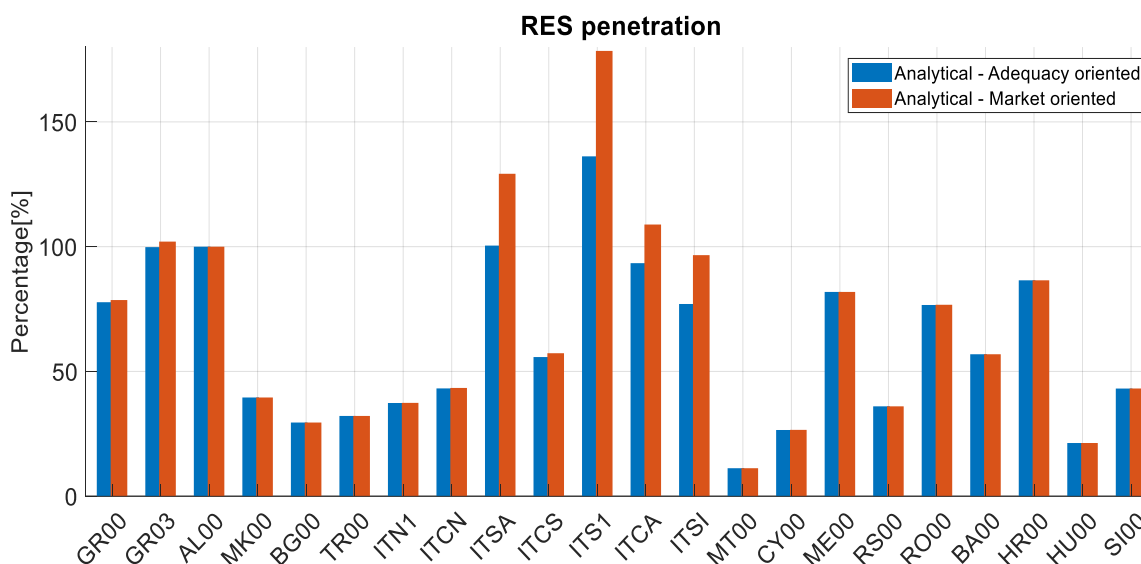
Η χρήση λιγνιτικών μονάδων είναι περιορισμένη και εμφανίζεται μόνο σε περιόδους σημαντικής μη διαθεσιμότητας μονάδων φυσικού αερίου. Όσον αφορά τον άνθρακα, παρατηρείται ότι στην Τουρκία η παραγωγή από μονάδες άνθρακα κυμαίνεται σε ποσοστό άνω του 60% ενώ στην Κροατία (HR00) και τη Σλοβενία (SI00) σε ποσοστά της τάξεως του 20%. Γεγονός που αποδίδεται στο χαμηλότερο κόστος του άνθρακα έναντι του λιγνίτη. Επιπλέον, μέρος της παραγωγής άνθρακα των Κροατία και Σλοβενία εξάγεται προς τη Βοσνία (BA00) που έχει ως κύριο καύσιμο τον ακριβότερο λιγνίτη.

6.7 Περικοπές και διείσδυση ΑΠΕ με την αναλυτική μέθοδο

6.7.1 Διείσδυση ΑΠΕ

Στην συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται τα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ για την κάθε ζώνη της μελέτης με τις δυο στρατηγικές της αναλυτικής μεθόδου. Οι τιμές στο Σχήμα 31 αφορούν το ποσοστό επί της συνολικής ζήτησης του κάθε κόμβου. Οι τιμές διείσδυσεων είναι μικρότερες από τις θεωρητικές διείσδυσεις που παρουσιάστηκαν στα δεδομένα εισόδου λόγω και των εμφανιζόμενων απορρίψεων ενέργειας ΑΠΕ, ειδικά κατά τις μεσημβρινές ώρες. Υψηλές τιμές διείσδυσεων εμφανίζονται στους κόμβους της Ελλάδας, της Ιταλίας και της Ρουμανίας που διαθέτουν μεγάλη εγκατεστημένη παραγωγή ΦΒ και αιολικών. Επίσης οι κόμβοι AL00, ME00, BA00, HR00 έχουν υψηλές τιμές λόγω του υψηλού υδροπαραγωγικού δυναμικού τους. Οι υπόλοιποι κόμβοι των Βαλκανίων εμφανίζουν πιο μικρές τιμές (<50%). Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι διαφοροποιήσεις των τιμών διείσδυσης στους κόμβους με την εφαρμογή διαφορετικής στρατηγικής. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι στους κόμβους της Ιταλίας, κυρίως, και της Ελλάδας η market-oriented στρατηγική οδηγεί σε υψηλότερη τελική διείσδυση ΑΠΕ. Η διαφοροποίηση ανάμεσα στις δυο στρατηγικές οφείλεται σε δυο βασικούς παράγοντες. Πρώτον, η διαφορετική λειτουργία των αποθηκών με τις δυο στρατηγικές επηρεάζει καθοριστικά την πραγματική διείσδυση. Στην market-oriented στρατηγική, οι αποθηκευτικοί σταθμοί προτεραιοποιούνται να δίνουν την ενέργεια τους πριν από τις θερμικές μονάδες με αποτέλεσμα να εκφορτίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα και αντίστοιχα να φορτίζονται σε κάθε περίπτωση που υπάρχει διαθέσιμο πλεόνασμα ΑΠΕ. Η adequacy-oriented στρατηγική οδηγεί σε χαμηλότερα επίπεδα διείσδυσης ΑΠΕ λόγω της επιλογής να μένουν οι αποθηκευτικοί σταθμοί σε κατάσταση αναμονής με υψηλό επίπεδο φόρτισης, δηλαδή να βρίσκονται ήδη πλήρως φορτισμένες όταν προκύπτουν πλεονάσματα

ΑΠΕ που τελικά θα απορριφθούν λόγω αδυναμίας διαχείρισης τους. Δεύτερον, σημαντικό ρόλο παίζει ο ταυτοχρονισμός παραγωγής μεταξύ ζωνών και η δυνατότητα εξαγωγής της πλεονάζουσας ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι κόμβοι της Ιταλίας με τις υψηλότερες διεισδύσεις ΑΠΕ. Το πλεόνασμα ενέργειας που παράγεται και δεν μπορεί να απορροφηθεί τοπικά για τη κάλυψη των αναγκών του φορτίου θα ήταν ωφέλιμο να εξαχθεί. Ωστόσο οι εν λόγω διασυνδεδεμένοι κόμβοι εμφανίζουν παρόμοια κλιματική συμπεριφορά καθώς και ισχυρή εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ και ειδικότερα ΦΒ με αποτέλεσμα τα πλεονάσματα παραγωγής ΑΠΕ να ταυτοχρονίζονται και να είναι ανέφικτη η μεταφορά τους σε γειτονικούς κόμβους. Παρατηρείται ότι οι κόμβοι με χαμηλά επίπεδα διείσδυσης ΑΠΕ και μικρούς ή μη διαθέσιμους αποθηκευτικούς σταθμούς έχουν ίδιες τιμές και με τις δυο στρατηγικές.



Σχήμα 31 : Διεισδύσεις ΑΠΕ ανά ζώνη/κόμβο

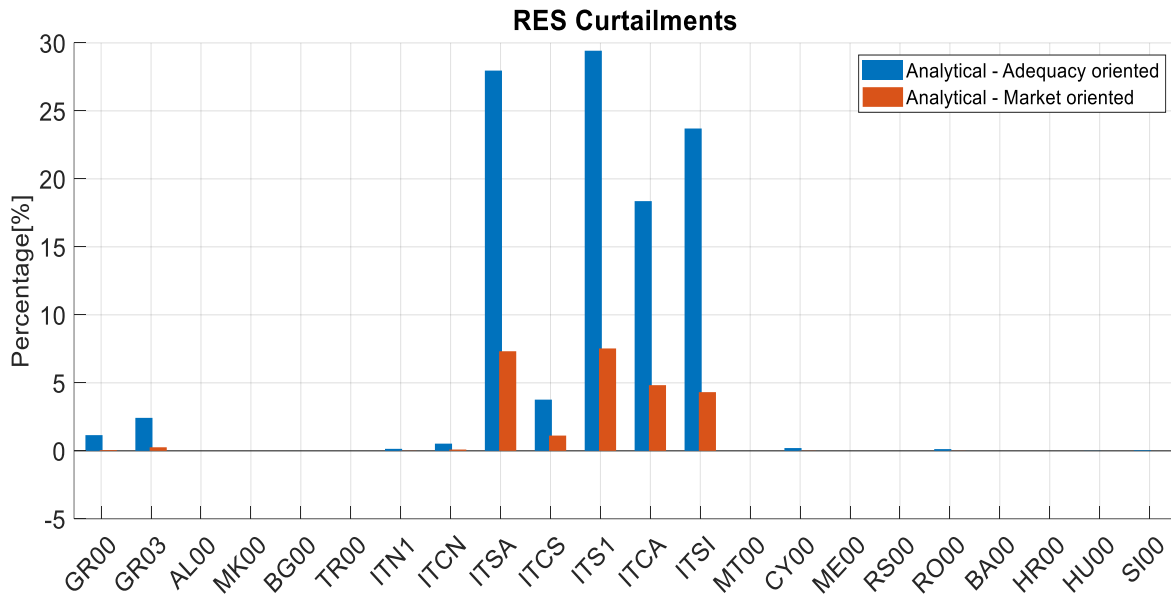
Επίσης παρατίθενται στο Πίνακα 8 και οι διεισδύσεις των 2 χωρών που αποτελούνται από περισσότερους από ένα κόμβους, της Ελλάδας και της Ιταλίας για λόγους πληρότητας. Και σε αυτή τη περίπτωση η ανάλυση δείχνει την διαφορά που προκαλείται με τις δυο στρατηγικές διαχείρισης των αποθηκών και η υψηλότερη διείσδυση επιτυγχάνεται με την Market oriented στρατηγική έναντι της Adequacy oriented.

Region	Adequacy Oriented	Market Oriented
GREECE	78.3%	79.1%
ITALY	55.5%	61.5%

Πίνακας 8 : Διεισδύσεις ΑΠΕ Ελλάδας, Ιταλίας

6.7.2 Περικοπές ΑΠΕ

Παρατηρείται μια υψηλή συσχέτιση ανάμεσα στους κόμβους με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και μεγαλύτερων απορρίψεων ενέργειας. Στους περισσότερους κόμβους της περιοχής εξέτασης οι απορρίψεις ενέργειας ΑΠΕ έχουν μηδενικές τιμές που οφείλονται κατά κύριο λόγο στη μικρή διείσδυση ΑΠΕ με αποτέλεσμα να μην εμφανίζονται χρονικά διαστήματα που η παραγόμενη ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές να υπερβαίνει τη ζήτηση. Από την άλλη πλευρά, κόμβοι με υψηλές διεισδύσεις ΑΠΕ στο μίγμα όπως η Ελλάδα και η Ιταλία εμφανίζουν τις σημαντικότερες περικοπές ανανεώσιμης ενέργειας στη περιοχή. Σημαντικό ρόλο παίζει η κυριαρχία των ΦΒ έναντι των αιολικών σε αυτές τις περιοχές με αποτέλεσμα η συσσώρευση παραγωγής από ΦΒ κατά το μεσημέρι, που η ζήτηση δεν είναι πολύ υψηλή, να οδηγεί σε περικοπές. Οι τελικές απορρίψεις ενέργειας, ασφαλώς, μειώνονται με τη δραστηριοποίηση των αποθηκευτικών σταθμών και της ικανότητας διασυνοριακής μεταφοράς ενέργειας αλλά όπως φαίνεται παρακάτω δεν μηδενίζονται. Σημειώνεται ότι κόμβοι όπως οι AL00, ME00, HR00 παρότι έχουν υψηλή παραγωγή ΑΠΕ εμφανίζουν μηδενικές απορρίψεις. Η συνθήκη αυτή εξηγείται από το γεγονός ότι η κύρια πηγή ΑΠΕ σε αυτές τις περιοχές είναι η υδροηλεκτρική ενέργεια που όπως εξηγήθηκε στο μεθοδολογικό τμήμα της εργασίας εισάγεται στο μοντέλο πριν τη βελτιστοποίηση σε κάθε κόμβο ξεχωριστά με σκοπό την εξομάλυνση του φορτίου. Η παραγωγή από άλλες πηγές (φωτοβολταϊκά, αιολικά) στους εν λόγω κόμβους είναι συγκριτικά χαμηλή ώστε να οδηγήσει σε απορρίψεις ενέργειας μονάδων ΑΠΕ.



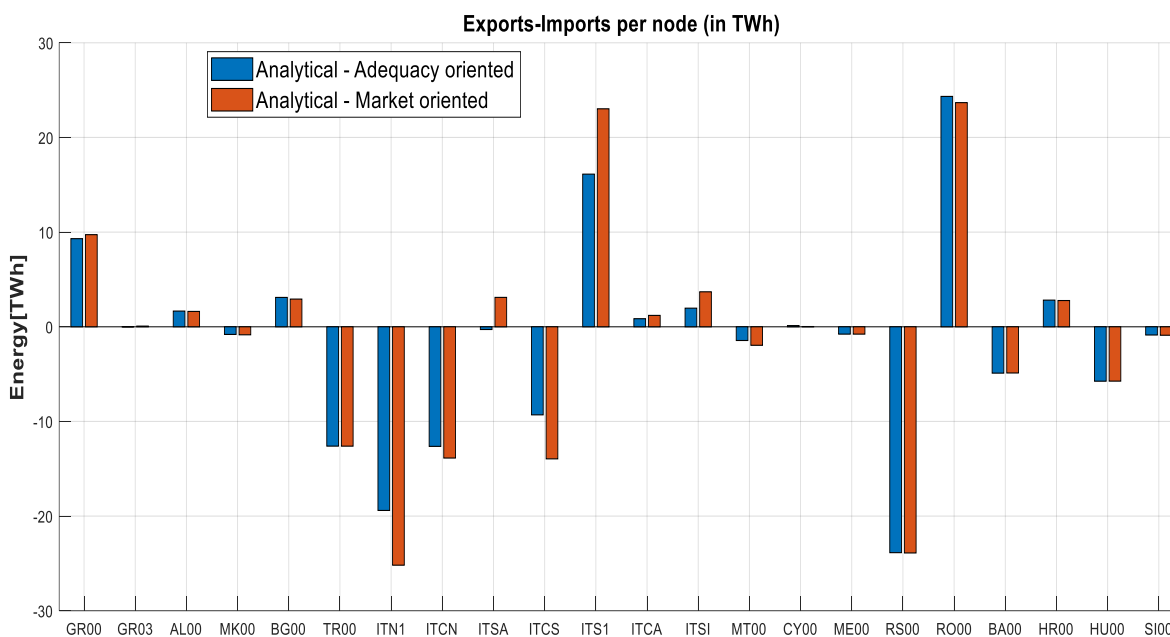
Σχήμα 32 : Περικοπές ΑΠΕ

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η σύγκριση των περικοπών ΑΠΕ των δυο στρατηγικών. Η 1^η στρατηγική (adequacy-oriented) εμφανίζει συγκριτικά υψηλότερες περικοπές ΑΠΕ από ότι η 2^η στρατηγική (market-oriented) όπως φαίνεται από το Σχήμα 32. Κατά την 1^η στρατηγική οι αποθηκευτικοί σταθμοί εκφορτίζονται μόνο εφόσον έχουν εξαντληθεί τα διαθέσιμα θερμικά αποθέματα ενέργειας του κόμβου ή και των γειτονικών κόμβων που μπορούν να καλύψουν το φορτίο. Η επιλογή να μένουν stand-by και σε υψηλά επίπεδα φόρτισης οδηγεί αναμενόμενα σε περισσότερες απορρίψεις ενέργειας. Από την άλλη η 2^η στρατηγική δίνει πιο ενεργό ρόλο στους αποθηκευτικούς σταθμούς όσον αφορά την ανταλλαγή ενέργειας με το δίκτυο. Οι αποθηκευτικοί σταθμοί δίνουν ενέργεια στο δίκτυο πρώτοι για τη κάλυψη ελλειμμάτων πριν από τις θερμικές μονάδες και φορτίζουν από πλεόνασμα ΑΠΕ εφόσον υπάρχει. Λόγω της προτεραιοποίησης αυτής, σε κόμβους με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ μπορούν να μειώνουν την απορριπτόμενη ενέργεια και να την αξιοποιούν σε επόμενη χρονική στιγμή για τη κάλυψη του φορτίου έναντι ακριβότερης τεχνολογίας. Σημειώνεται, τέλος, ότι με τη 2^η στρατηγική οι απορρίψεις ενέργειας κυμαίνονται σε ένα επίπεδο της τάξης 7% σαφώς μικρότερο από αυτές τις 1^{ης} στρατηγικής που φτάνουν έως και το 28%.

6.8 Εισαγωγές-εξαγωγές ενέργειας με την αναλυτική μέθοδο

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η διακίνηση ενέργειας μεταξύ των κόμβων του συστήματος. Στο Σχήμα 33, παρουσιάζεται το τελικό καθαρό ετήσιο ισοζύγιο ενέργειας

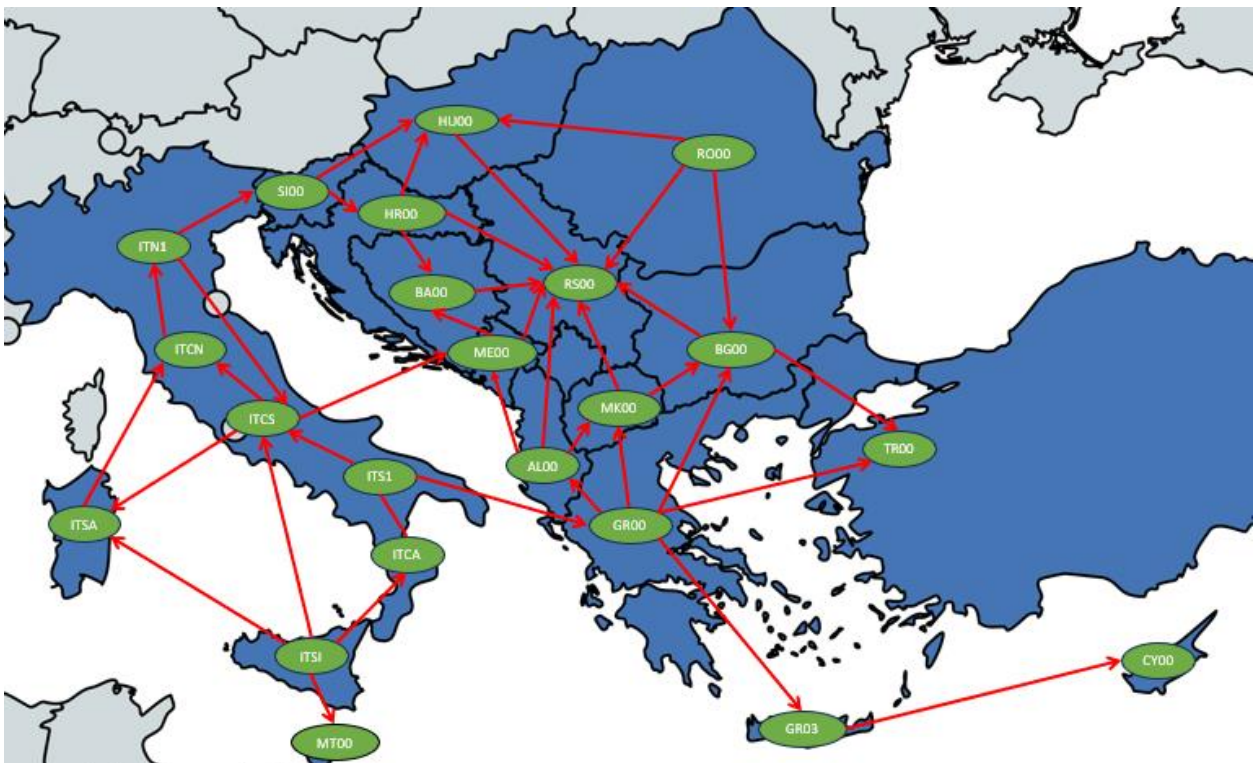
εισαγωγών-εξαγωγών ανά κόμβο/ζώνη μελέτης. Θετικές τιμές δηλώνουν ότι ο κόμβος είναι εξαγωγικός, ενώ αρνητικές τιμές ότι είναι εισαγωγικός. Ένα πρώτο συμπέρασμα είναι ότι οι κόμβοι με εξαίρεση την ITSA, εμφανίζουν παρόμοια τελική ροή ενέργειας (εισαγωγική ή εξαγωγική κατά περίπτωση) και στις δύο στρατηγικές. Ειδικά για την Σαρδηνία, η προτεραιοποίηση της λειτουργίας των αποθηκών μέσω της market oriented στρατηγικής δίνει υψηλότερες εξαγωγικές ροές ισχύος ώστε το πλεόνασμα ΑΠΕ να στέλνεται σε κόμβους με έλλειμμα ή για φόρτιση αποθηκευτικών σταθμών σε γειτονικούς κόμβους.



Σχήμα 33 : Εξαγωγές-Εισαγωγές ανά κόμβο

Παρατηρείται ότι ειδικά στους κόμβους της Ιταλίας και της Ελλάδας οι απόλυτες τιμές των ροών ισχύων είναι μεγαλύτερες με την market oriented στρατηγική. Αυτό συμβαίνει καθώς προτεραιοποιείται η λειτουργία των αποθηκών ώστε να εκφορτίζονται αλλά και να φορτίζονται από ΑΠΕ. Ειδικά σε αυτή τη περίπτωση, αν το πλεόνασμα ΑΠΕ δεν μπορεί να καταλήξει όλο στην τοπική μονάδα αποθήκευσης μπορεί να αξιοποιηθεί για τη φόρτιση αποθηκευτικών σταθμών γειτονικού κόμβου. Η Σερβία είναι χώρα που εισάγει σημαντικές ποσότητες ενέργειας (23TWh). Η κύρια πηγή θερμικής παραγωγής της Σερβίας είναι λιγνιτικές μονάδες με αποτέλεσμα στο πλαίσιο της οικονομικής λειτουργίας να είναι προτιμότερο να εισάγει ενέργεια από κόμβους με πλεόνασμα ΑΠΕ ή συνηθέστερα με παραγωγή φυσικού αερίου ή πυρηνικής ενέργειας. Επίσης, η Ρουμανία ως κόμβος με

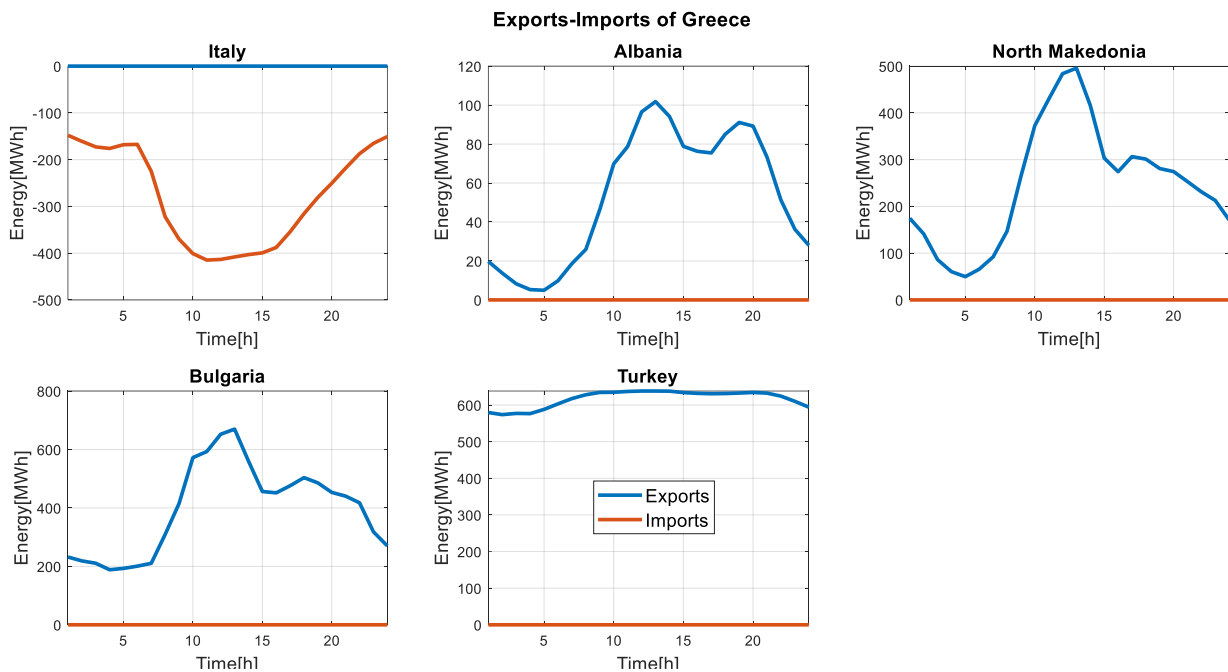
υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και σημαντική εγκατεστημένη ισχύ φυσικού αερίου εξάγει ενέργεια στις γειτονικές χώρες που διαθέτουν ακριβότερες τεχνολογίες καυσίμου. Μια εποπτική ματιά για τη ροή ισχύος μεταξύ των διασυνδέσεων με την αναλυτική μέθοδο παρέχεται στο Σχήμα 34. Παρατηρείται η χαρακτηριστική ροή ισχύος από το νότο του συστήματος και τις δύο χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή ΑΠΕ (Ελλάδα και Ιταλία) προς το βορρά που βρίσκονται οι χώρες με τις χαμηλότερες διεισδύσεις ΑΠΕ. Σε αυτή τη θεώρηση θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι η συγκεκριμένη ροή ισχύος δεν οφείλεται μόνο στις ΑΠΕ του νότου αλλά και στα χαρακτηριστικά των θερμικών τεχνολογιών στα Βαλκάνια. Αρκετές από τις χώρες της περιοχής που δεν ανήκουν στην Ε.Ε. και δεν εναρμονίζονται με τις οδηγίες απανθρακοποίησης έως το 2030 έχουν σημαντικές ποσότητες μονάδων λιγνίτη. Ως αποτέλεσμα της οικονομικής λειτουργίας του μοντέλου, η ζήτηση τους ικανοποιείται από τη παραγωγή φθηνότερων μονάδων φυσικού αερίου από την Ελλάδα, την Ρουμανία ή την Ιταλία, κατά κύριο λόγο, και οι κόμβοι αυτοί είναι έντονα εισαγωγικοί. Χαρακτηριστικότερα παραδείγματα του φαινομένου αυτού είναι η Βοσνία και η Σερβία. Στην Ιταλία η ροή ισχύος είναι από το Νότο προς το Βορρά ,δηλαδή από την υψηλότερη παραγωγή ΑΠΕ (ITSA, ITSI, ITS1) προς το κόμβο με τη μεγαλύτερη ζήτηση (ITN1).



Σχήμα 34 : Ροές ισχύος μεταξύ των κόμβων

Όπως φαίνεται τόσο από το Σχήμα 34 και το Σχήμα 35 η Ελλάδα είναι μια έντονα εξαγωγική χώρα προς Αλβανία (1 TWh), Βόρεια Μακεδονία (2.5 TWh), Βουλγαρία (3.4 TWh) και Τουρκία (5.4 TWh). Η υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και η μεγάλη εγκατεστημένη ισχύ φυσικού αερίου σε συνδυασμό με την χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ και παλαιάς τεχνολογίας μονάδων των γειτόνων καθιστούν λογικό το αποτέλεσμα. Στο Σχήμα 35 παρουσιάζεται το ημερήσιο προφίλ λειτουργίας των διασυνδέσεων με τις πέντε γειτονικές χώρες του κόμβου της ηπειρωτικής Ελλάδας (GR00), δηλαδή η μέση ημερήσια ανταλλαγή ισχύος ανά ώρα για τα 800 χρόνια της προσομοίωσης. Παρατηρούνται τα εξής ανά διασύνδεση:

- **Ελλάδα-Ιταλία:** Η διασύνδεση με την Ιταλία λειτουργεί εισαγωγικά για την Ελλάδα. Οι νότιοι κόμβοι της γειτονικής χώρας παρουσιάζουν σημαντικό πλεόνασμα ΑΠΕ τις μεσημεριανές ώρες που συχνά εξάγεται στην Ελλάδα με στόχο την μεταφορά του προς τις βαλκανικές χώρες.
- **Ελλάδα-Αλβανία:** Η διασύνδεση με την Αλβανία είναι εξαγωγική και αξιοποιείται για τη μεταφορά ενέργειας προς τις βαλκανικές χώρες που βρίσκονται βόρεια της Αλβανίας. Το παραπάνω συμπέρασμα εξάγεται διότι το σύνολο της ζήτησης καλύπτεται από ΥΗΣ και ΑΠΕ συνεπώς η εισαγόμενη ενέργεια στην Αλβανία αξιοποιείται για εξαγωγικούς σκοπούς.
- **Ελλάδα-Βόρεια Μακεδονία:** Η διασύνδεση εμφανίζει εξαγωγική συμπεριφορά με τις μεγαλύτερες τιμές να παρουσιάζονται κατά μέσο όρο το μεσημέρι όπου λόγω της φωτοβολταϊκής παραγωγής.
- **Ελλάδα-Βουλγαρία:** Η διασύνδεση με τη Βουλγαρία εμφανίζει εξαγωγική συμπεριφορά με την αιχμή των εξαγωγών να εμφανίζεται αναμενόμενα το μεσημέρι που η παραγωγή ΑΠΕ είναι υψηλή. Η ενέργεια αξιοποιείται τόσο για την τοπική ζήτηση όσο και για την εξαγωγή της στους βορειότερους γείτονες αλλά και τη Τουρκία.
- **Ελλάδα-Τουρκία:** Η διασύνδεση παρουσιάζει σταθερά εξαγωγική δραστηριότητα στα όρια της ικανότητας μεταφοράς. Αυτό οφείλεται στην εξάρτηση της Τουρκίας από τα ορυκτά καύσιμα και ειδικά από το λιγνίτη και τον άνθρακα που είναι ακριβότερες τεχνολογίες από το ΦΑ. Έτσι η Τουρκία αξιοποιεί τις διασυνδέσεις για να εισάγει φθηνότερη ενέργεια (ΑΠΕ ή ΦΑ) για να καλύψει τις ενεργειακές της ανάγκες.



Σχήμα 35 : Μέσο προφίλ λειτουργίας διασυνδέσεων στη διάρκεια μιας ημέρας

6.9 Αναλύσεις ευαισθησίας

Σκοπός των διερευνήσεων είναι η εξέταση της επάρκειας υπό συνθήκες μικρότερης θερμικής παραγωγής από τις αρχικές προβλέψεις και ανάδειξης του χαρακτήρα του δείκτη VoLL στην προτεραιοποίηση χωρών για κάλυψη ελλειμμάτων.

6.9.1 Βηματική μείωση θερμικής παραγωγής με την αναλυτική μέθοδο

Σε αυτή την ενότητα, διερευνάται η επάρκεια των κόμβων του συστήματος μελέτης υπό την συνθήκη σταδιακής μείωσης της θερμικής παραγωγής τους. Συγκεκριμένα εξετάζονται δύο σενάρια:

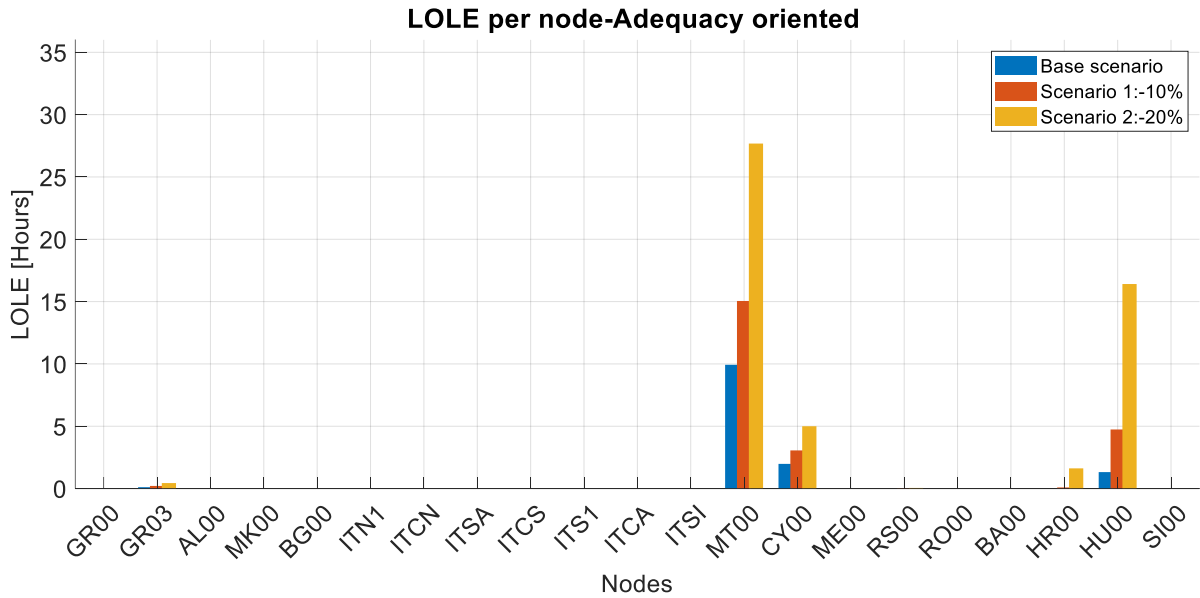
- Σενάριο 1:Μείωση 10% της θερμικής παραγωγής
- Σενάριο 2:Μείωση 20% της θερμικής παραγωγής

Η διερεύνηση αυτή αφορά την αναλυτική μέθοδο που λαμβάνει υπόψιν και την οικονομικότητα των τεχνολογιών με σκοπό να αναδειχθεί η διαφορετική λειτουργία των δύο στρατηγικών λειτουργίας των αποθηκών (adequacy- και market-oriented) στην μελέτη επάρκειας. Η εγκατεστημένη θερμική ισχύς όλων των τεχνολογιών και όλων των κόμβων μελέτης μειώνεται κατά το ίδιο ποσοστό με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση της απόσυρσης συμβατικών μονάδων στην επάρκεια ισχύος των επιμέρους κόμβων.

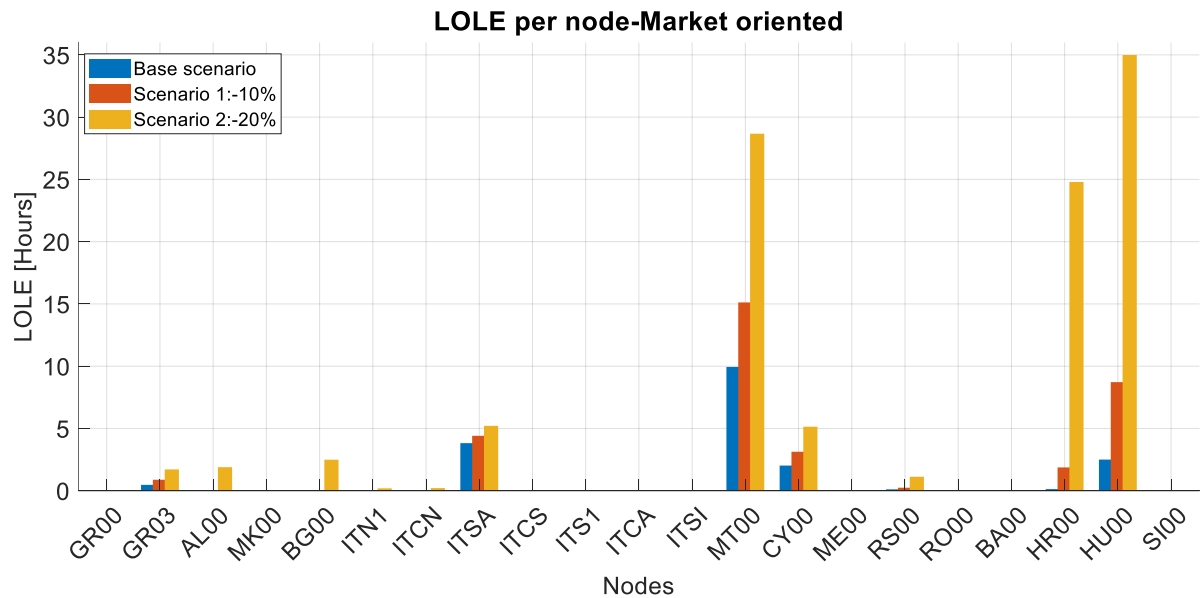
Στο Σχήμα 36 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τους δείκτες LOLE με μείωση 10% της θερμικής παραγωγής και στο Σχήμα 37 με το 20% .



Σχήμα 36 : Δείκτες LOLE ανά κόμβο με 10% μείωση της θερμικής παραγωγής



Σχήμα 38 : LOLE ανά κόμβο με βηματική μείωση της θερμικής παραγωγής με την Adequacy στρατηγική



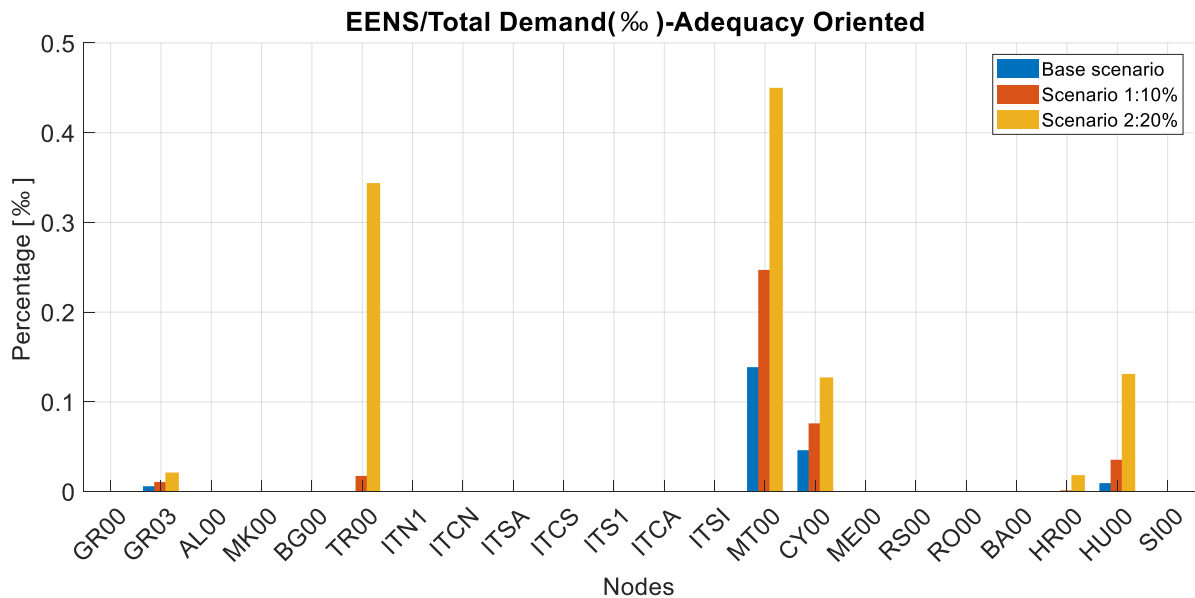
Σχήμα 39 : LOLE ανά κόμβο με βηματική μείωση της θερμικής παραγωγής με την Market στρατηγική

Παρατηρούμε ότι στην adequacy-oriented στρατηγική, με τη σταδιακή αφαίρεση θερμικής παραγωγής αυξάνεται το LOLE κυρίως στους κόμβους που είχαν ανεπάρκεια και στο το βασικό σενάριο. Με την market-oriented στρατηγική, ομοίως οι κόμβοι με έλλειμμα από το βασικό σενάριο εμφανίζουν όλο και μεγαλύτερες ελλείμματος. Οι αποθήκες σε αυτές τις χώρες μένουν αδρανείς καθώς δεν υπάρχει πλεόνασμα ΑΠΕ λόγω

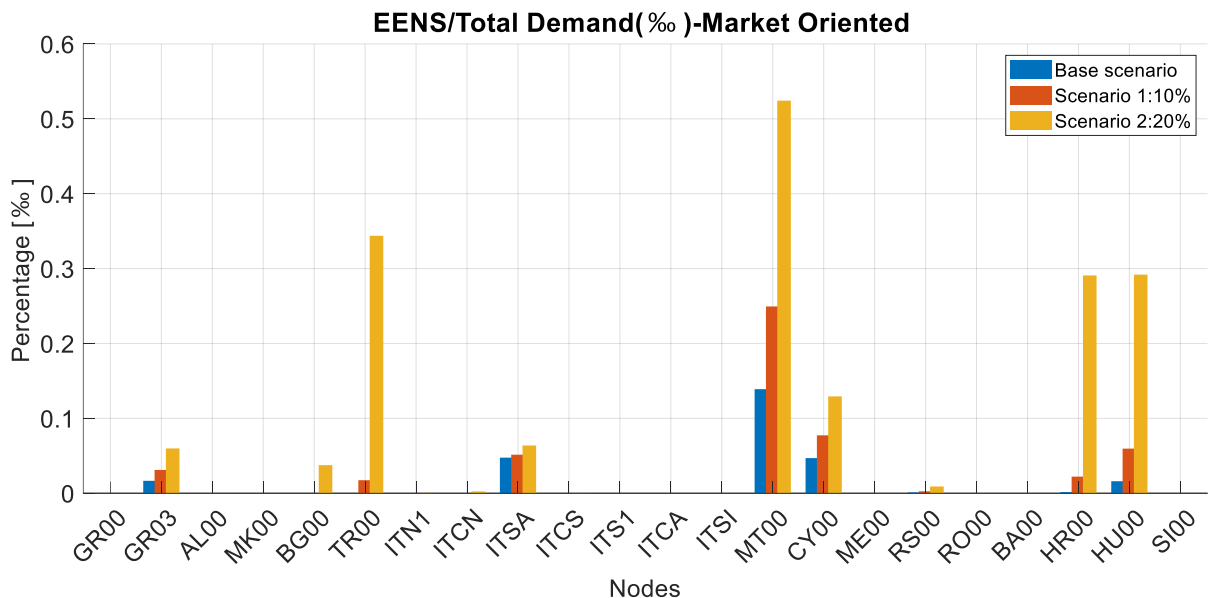
χαμηλής εγκατεστημένης ισχύος ΦΒ και αιολικών. Έτσι δεν μπορούν να εκφορτίσουν για να συνδράμουν στην επάρκεια.

Για λόγους πληρότητας, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δείκτη αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας - EENS. Για να γίνει μια σύγκριση των ανεπαρκειών, οι τιμές του EENS παρουσιάζονται ως ποσοστό της ετήσιας ζήτησης ενέργειας του κάθε κόμβου επί τοις χιλίοις(%). Στο Σχήμα 40 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με την adequacy-oriented στρατηγική ενώ στο Σχήμα 41 με την market-oriented στρατηγική.

Στην adequacy-oriented, οι σημαντικότερες τιμές ανεπάρκειες ταυτίζονται με τις μεγαλύτερες τιμές LOLE που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Με την market-oriented στρατηγική, οι μεγαλύτερες τιμές αφορούν τους κόμβους TR00, MT00, HR00 και HU00 και κυρίως με 20% μείωση της θερμικής παραγωγής.



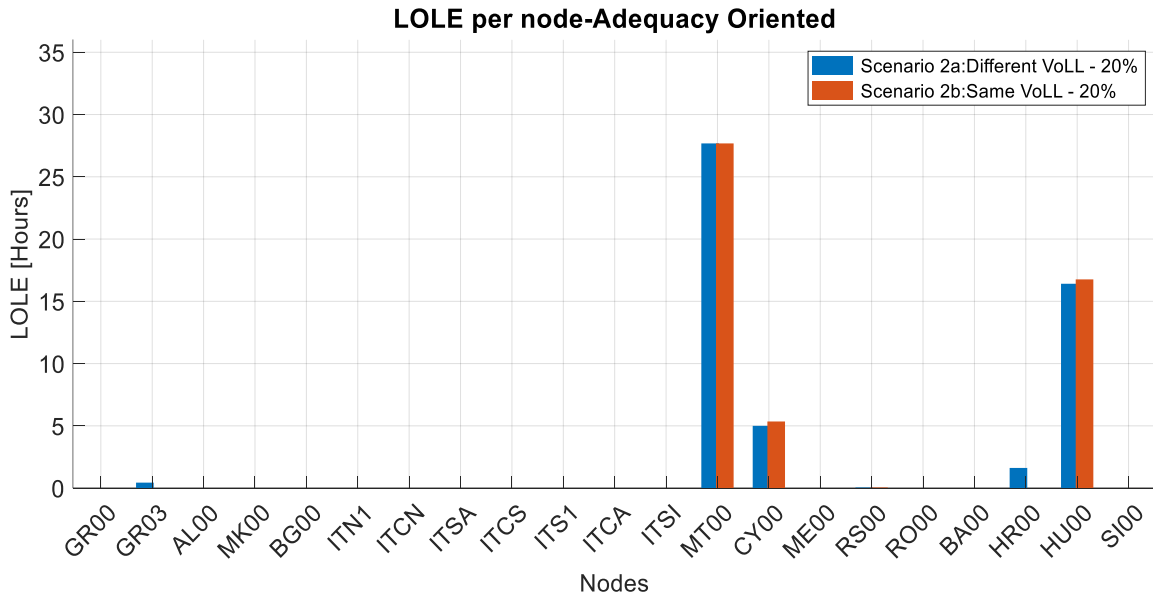
Σχήμα 40 : EENS ως ποσοστό της ζήτησης (%) ανά κόμβο με βηματική μείωση της θερμικής παραγωγής με την Adequacy στρατηγική



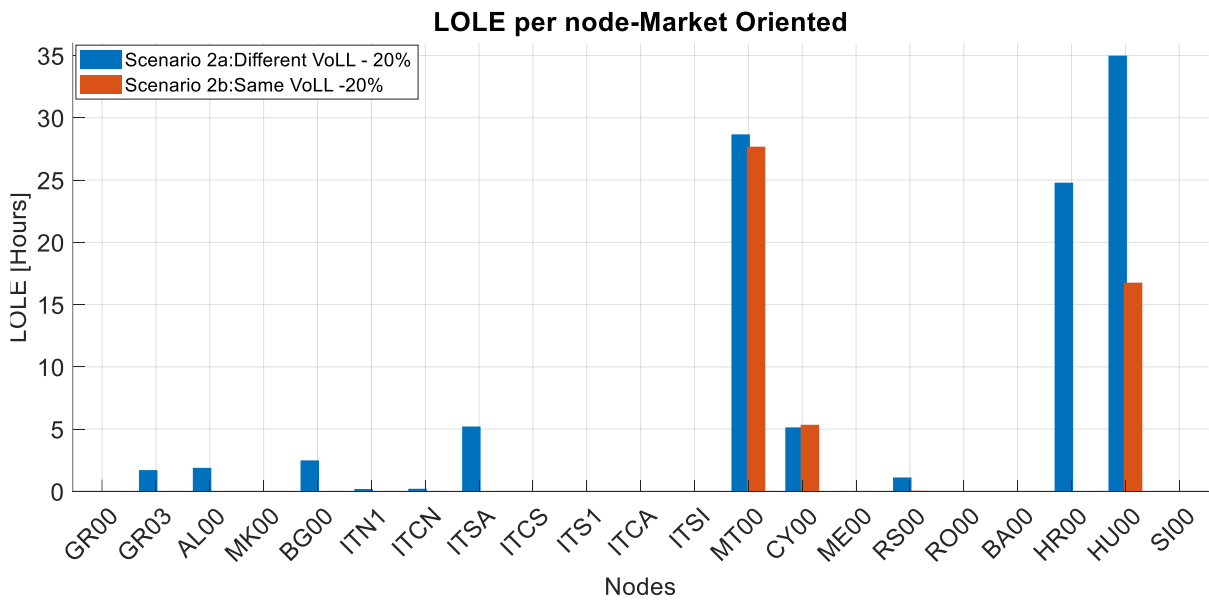
Σχήμα 41 : EENS ως ποσοστό της ζήτησης (‰) ανά κόμβο με βηματική μείωση της θερμικής παραγωγής με την Market στρατηγική

6.9.2 Προσομοίωση συστήματος με κοινό VoLL

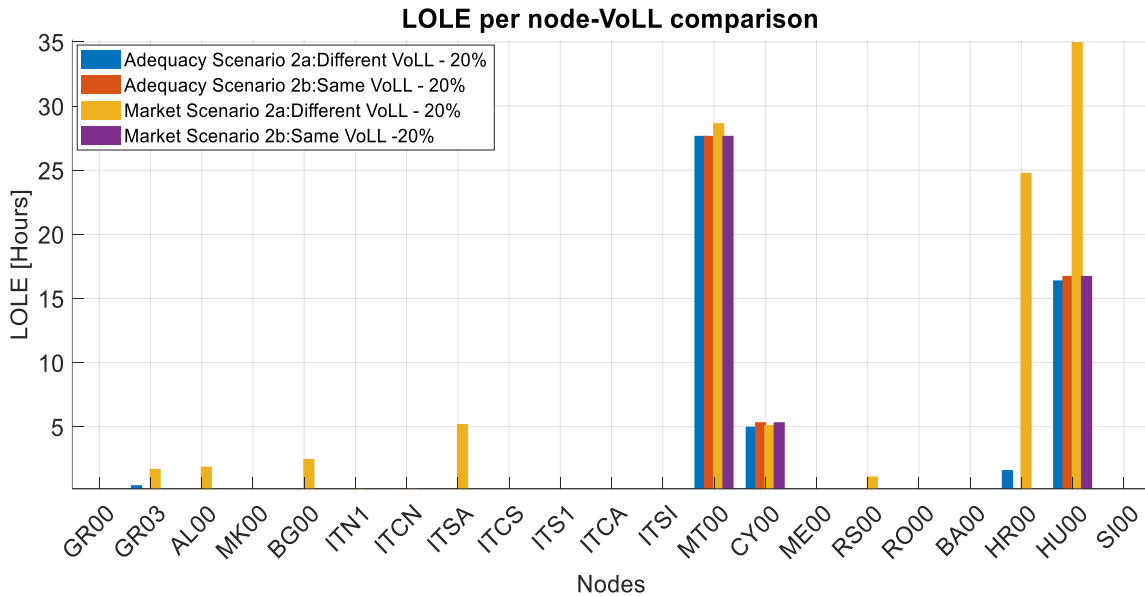
Η ύπαρξη διαφορετικών VoLL ανάμεσα στους κόμβους επηρεάζει σημαντικά την ροή ισχύος εντός του συστήματος μελέτης. Ειδικά σε περιπτώσεις μεγάλων ανεπαρκειών, οδηγεί τους κόμβους με μικρότερες τιμές VoLL σε μεγάλα ελλείμματα. Με άλλα λόγια, κόμβοι με έλλειμμα πριν τη εισαγωγή της θερμικής παραγωγής και μικρό VoLL συγκριτικά με των γειτονικών κόμβων, θα επιδιώξουν να στηρίξουν τους κόμβους που έχουν έλλειμμα και μεγαλύτερο VoLL. Από την άλλη η ύπαρξη μιας σταθερής τιμής VoLL για όλους τους κόμβους θα δημιουργούσε μια στρατηγική «no loss load» όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Κάθε κόμβος, επομένως, εξάγει ενέργεια μόνο αφού έχει καλύψει τις δικές του ανάγκες. Για τις προσομοιώσεις αυτής της ενότητας θεωρήθηκε μια κοινή τιμή VoLL για όλους τους κόμβους και ίση με 4000€/MWh. Οι διερευνήσεις περιλάμβαναν την διαφοροποίηση στους δείκτες LOLE και EENS με μείωση 20% της θερμικής παραγωγής. Τα αποτελέσματα για το LOLE παρουσιάζονται στο Σχήμα 42 και στο Σχήμα 43 με τις δυο στρατηγικές. Τέλος, στο Σχήμα 44 παρουσιάζονται συγκριτικά όλα τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης διερεύνησης.



Σχήμα 42 : Δείκτης LOLE με την στρατηγική Adequacy Oriented με την διερεύνηση για το VoLL



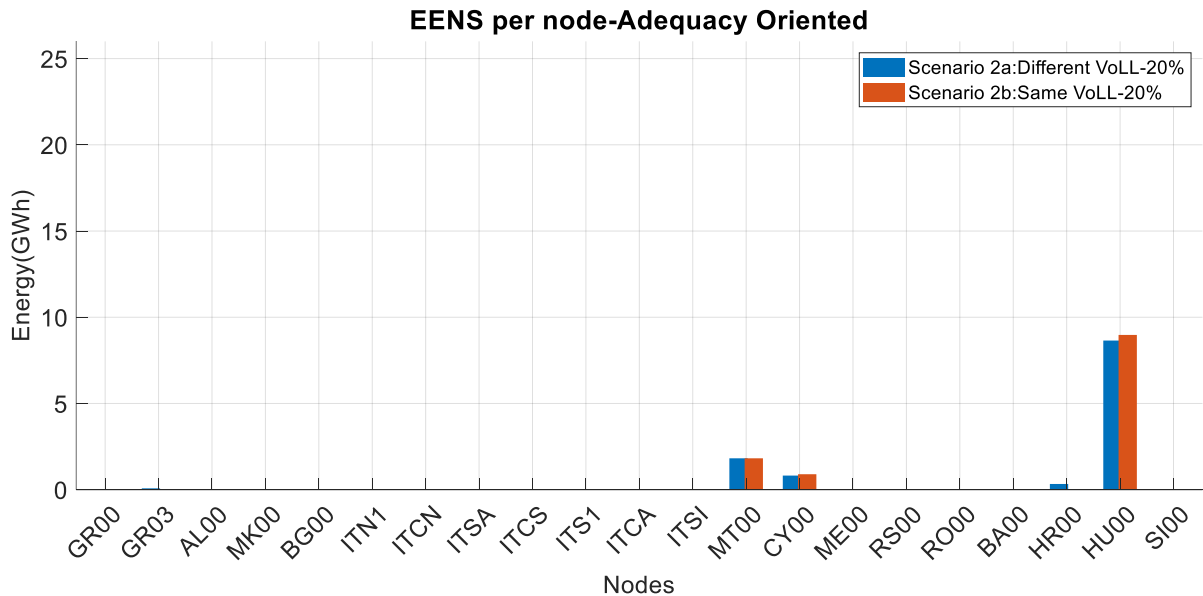
Σχήμα 43 : Δείκτης LOLE με την στρατηγική Market Oriented με την διερεύνηση για το VoLL



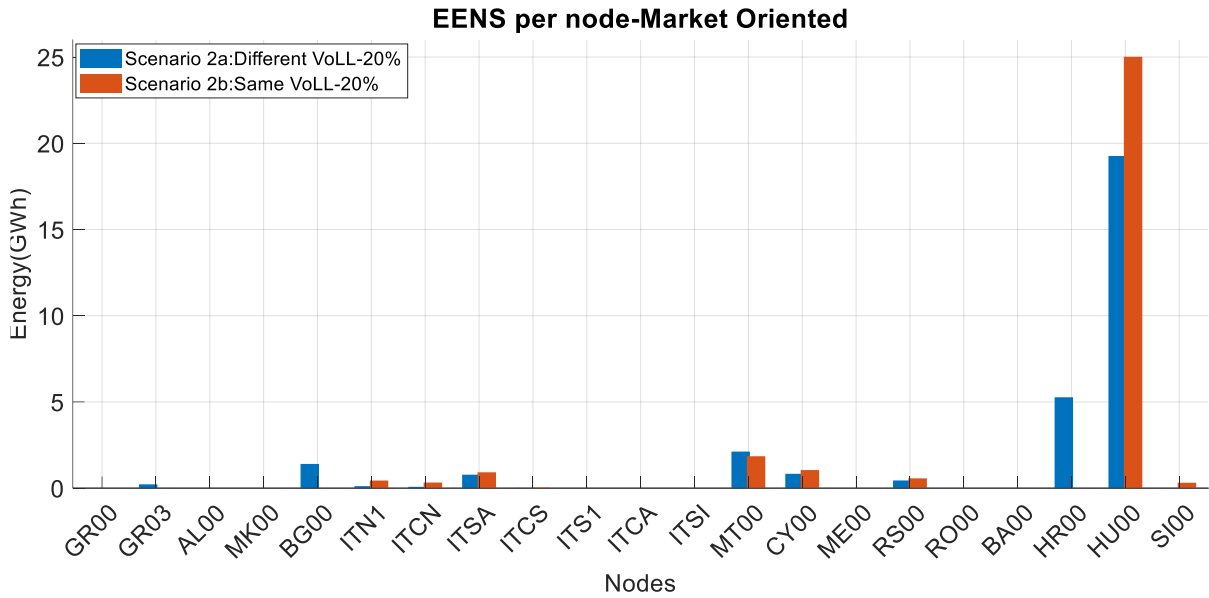
Σχήμα 44 : Συγκριτικά αποτελέσματα LOLE για κοινό και διαφορετικό VoLL με μείωση 20% της θερμικής παραγωγής

Είναι φανερό ότι με την ύπαρξη κοινού VoLL, οι κόμβοι που εμφανίζουν έλλειμμα με την market-oriented στρατηγική μειώνονται σε σύγκριση με το σενάριο διαφορετικών τιμών του VoLL ανά κόμβο. Στην περίπτωση της μείωσης κατά 20% της θερμικής παραγωγής, οι διαφοροποιήσεις με τη στρατηγική adequacy-oriented περιορίζονται ανάμεσα σε GR03-CY00 και HR00-HU00. Το χαρακτηριστικό αυτών των κόμβων είναι ότι είναι γειτονικοί και ότι η τιμή VoLL επηρεάζει τη συμπεριφορά τους. Πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι HR00 και HU00 λόγω μεγαλύτερων τιμών LOLE. Στην αρχική θεώρηση, ο κόμβος HR00 έχει μικρότερο VoLL από τον HU00, με αποτέλεσμα σε περίπτωση κοινού ελλείμματος να προτεραιοποιείται το έλλειμμα της HU00. Από την άλλη στη θεώρηση ίδιας τιμής VoLL, η HR00 καλύπτει πρώτα τις δικές της ανεπάρκειες και μετά συνδράμει γειτονικούς κόμβους. Αναμένουμε επομένως μικρότερο δείκτη LOLE με κοινό VoLL από ότι με διαφορετικό. Ο λόγος που οι ώρες εμφάνισης ανεπαρκειών αυξάνονται με διαφορετικό VoLL έγκειται στο ότι οι κόμβοι με έλλειμμα υποχρεώνονται να εξάγουν ενέργεια προς κόμβους με μεγαλύτερη τιμή VoLL αν εμφανίζουν ταυτόχρονα έλλειμμα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι AL00, BG00, RS00 που εμφανίζουν ελλείμματα λόγω ότι η HU00 έχει μεγαλύτερη τιμή VoLL και συχνά δεν επαρκεί η παραγωγή της για να καλύψει τη δική της ζήτηση.

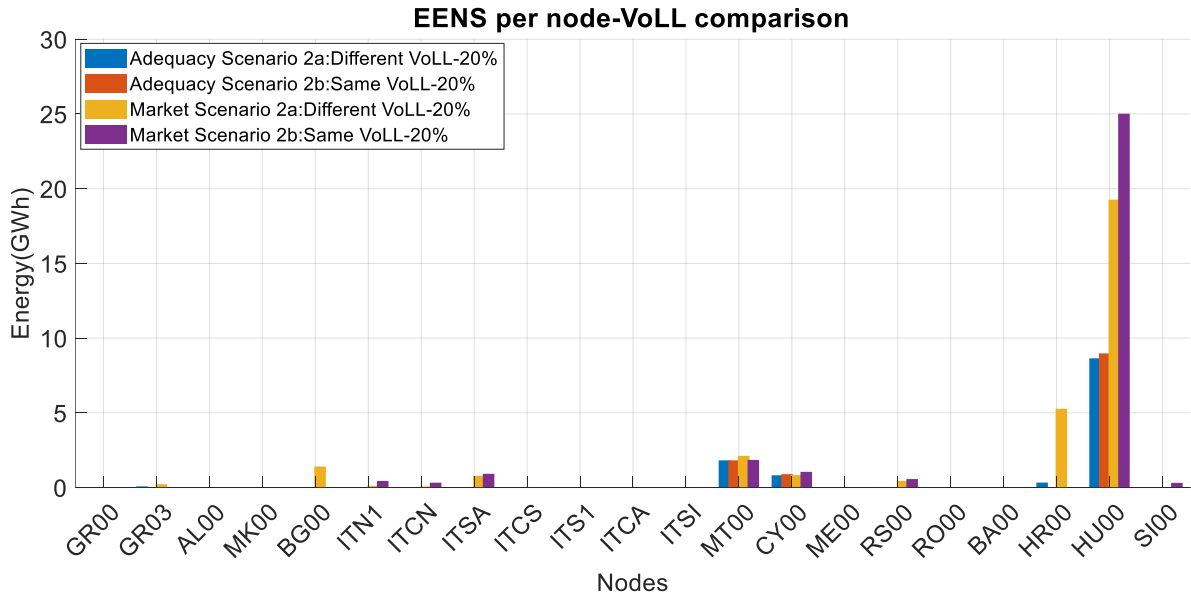
Τέλος, στο Σχήμα 45 και στο Σχήμα 46 **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα για τον δείκτη EENS κάθε κόμβου με το σενάριο 2 (20% μείωση) για τις δυο στρατηγικές . Λόγω της φύσεως της ωριαίας βελτιστοποίησης, το συνολικό ωριαίο έλλειμμα της περιοχής μελέτης είναι το ίδιο και με τα δύο εξεταζόμενα σενάρια. Η διαφοροποίηση των επιμέρους ανεπαρκειών οφείλεται στη προτεραιότητα ή μη που δίνει η τιμή VoLL του κάθε κόμβου. Στην Adequacy στρατηγική η διαφοροποίηση στα ελλείμματα αφορά μόνο τους κόμβους Κροατίας (HR00) και Ουγγαρίας (HU00). Ειδικά στη περίπτωση της Market στρατηγικής που εμφανίζονται και οι μεγαλύτερες ανεπάρκειες ,οι διαφορές είναι πιο έντονες. Χαρακτηριστικά, η Κροατία (HR00) εμφανίζει μικρότερη ανεπάρκεια με την ύπαρξη κοινού VoLL. Αυτό οφείλεται στη μικρή τιμή VoLL της σε σύγκριση με τους γείτονες της και ειδικά της Ουγγαρίας (HU00) ,με αποτέλεσμα σε περίπτωση εμφάνισης ταυτόχρονου ελλείμματος να εξάγει ενέργεια προς κάλυψη ελλειμματικών περιοχών με μεγαλύτερο VoLL.



Σχήμα 45 : Δείκτης EENS με την στρατηγική Adequacy Oriented με την διερεύνηση για το VoLL



Σχήμα 46 : Δείκτης EENS με την στρατηγική Market Oriented με την διερεύνηση για το VoLL
 Για λόγους πληρότητας τα αποτελέσματα των 2 παραπάνω σχημάτων παρουσιάζονται και σε ένα κοινό σχήμα



Σχήμα 47 : Συγκριτικά αποτελέσματα EENS για κοινό και διαφορετικό VoLL με μείωση 20% της θερμικής παραγωγής

7. Επίλογος

7.1 Συμπεράσματα

Η μετάβαση του ενεργειακού συστήματος από την υψηλή εξάρτηση σε θερμικούς σταθμούς σε ένα πιο πράσινο αποτύπωμα με την υψηλή διείσδυση ΑΠΕ επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην επάρκεια ισχύος των ηλεκτρικών συστημάτων. Η στοχαστικότητα που συνοδεύει την παραγωγή των ΦΒ (ηλιοφάνεια) και των αιολικών πάρκων (ένταση και κατεύθυνση ανέμου) μπορούν να δημιουργήσουν προκλήσεις αναφορικά με τη διασφάλιση της εξυπηρέτησης των καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παρούσα διπλωματική εστιάζει στην ανάπτυξη μεθοδολογιών για την εκτίμηση της επάρκειας διασυνδεδεμένων περιοχών στην ΝΑ Ευρώπη παρουσία ΑΠΕ, αποθηκευτικών σταθμών και διασυνδετικών γραμμών με έτος αναφοράς το 2030. Αξιοποιήθηκε η μέθοδος Monte Carlo για την προσομοίωση της διαθεσιμότητας των θερμικών σταθμών και των διασυνδέσεων. Στη συνέχεια καταρτίστηκαν οι μέθοδοι ενσωμάτωσης των θερμικών σταθμών (απλοποιημένη και αναλυτική) και υπολογίστηκαν οι δείκτες επάρκειας LOLE και EENS για το σύνολο των στρατηγικών διαχείρισης των αποθηκευτικών σταθμών. Μέσω της αναλυτικής μεθόδου, που περιλαμβάνει και την αξιολόγηση του κόστους παραγωγής των διάφορων θερμικών μονάδων αξιολογήθηκαν και συγκρίθηκαν επιπλέον δείκτες λειτουργίας του συστήματος, πέραν αυτών της επάρκειας, όπως η διείσδυση και οι περικοπές ΑΠΕ, ο βαθμός χρησιμοποίησης των θερμικών τεχνολογιών, καθώς και οι εξαγωγές-εισαγωγές ανά κόμβο μελέτης. Οι δύο στρατηγικές διαχείρισης των αποθηκευτικών σταθμών υπό την αναλυτική μέθοδο (adequacy- και market- oriented) διαμορφώνουν διαφορετικά προφίλ λειτουργίας τους και οδηγούν σε αντίστοιχες διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα επάρκειας τόσο του κάθε κόμβου όσο και του συνολικού συστήματος. Για την περαιτέρω ανάδειξη της σημασίας της αποθήκευσης στην επάρκεια ισχύος και των διαφορετικών στρατηγικών με τις οποίες η λειτουργία της εισάγεται στις μελέτες επάρκειας διεξήχθησαν επιπλέον διερευνήσεις με μειωμένη εγκατεστημένη θερμική παραγωγή (10%, 20%) στο σύνολο των κόμβων της περιοχής μελέτης. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τον κρίσιμο ρόλο που μπορεί να παίζει η αποθήκευση στην βελτίωση της επάρκειας ισχύος. Τέλος, οι διερευνήσεις αναδεικνύουν τη σημασία της επιλογής του δείκτη VoLL στον τρόπο διαμοιρασμού των ελλειμμάτων μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι η επιλογή ενός κοινού

κόστους μη εξυπηρετούμενου φορτίου για όλους τους κόμβους οδηγεί κάθε κόμβο να καλύπτει πρώτα το δικό του φορτίο και μετά υποστηρίζει τις γειτονικές περιοχές στις οποίες παρατηρείται έλλειμμα. Αντίθετα με διαφορετικές τιμές VoLL, το τελικό έλλειμμα «συσσωρεύεται» στους κόμβους με τη μικρότερη τιμή VoLL.

7.2 Μελλοντικές προεκτάσεις

Η επάρκεια ισχύος της μελετώμενης περιοχής θα μπορούσε να αξιολογηθεί και σε σενάρια υψηλότερης διείσδυσης ΑΠΕ που προσεγγίζουν τις προβλέψεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το 2050. Μια τέτοια αξιολόγηση θα παρείχε πληροφορίες για τις μελλοντικές ανάγκες του συστήματος για ευελιξία μέσω ενίσχυσης των αποθηκευτικών σταθμών και των διασυνδεδετικών γραμμών.

Μελλοντική προέκταση της εργασίας θα μπορούσε να αποτελέσει η υλοποίηση του προβλήματος με χρήση της μεθόδου maxflow που περιεγράφηκε και στην βιβλιογραφική ανασκόπηση για τη σύγκριση της αποδοτικότητας των μεθόδων βελτιστοποίησης γραμμικού προγραμματισμού και ενός αλγορίθμου γράφων τόσο από πλευράς πολυπλοκότητας και υπολογιστικού χρόνου όσο και από πλευράς ευελιξίας στη ενσωμάτωση επιπλέον παραμέτρων.

Τέλος, μια πιο λεπτομερής και ολοκληρωμένη ενσωμάτωση του των οικονομικών μεγεθών παραγωγής των διαφόρων τεχνολογιών θα συμβάλλει και στην καλύτερη αποτύπωση της οικονομικής πλευράς της αξιοπιστίας στο σύστημα.

Βιβλιογραφία

- [1] Roy. Billinton and R. N. (Ronald N. Allan, *Reliability evaluation of power systems*. Plenum Press, 1996.
- [2] R. Billinton and R. N. Allan, “Power-system reliability in perspective.”
- [3] T. Kristian, V. Equinor, T. K. Vrana, and E. Johansson, “Overview of Analytical Power System Reliability Assessment Techniques,” 2011. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/281269920>
- [4] A. Sankarakrishnan and R. Billinton, “SEQUENTIAL MONTE CARLO SIMULATION FOR COMPOSITE POWER SYSTEM RELIABILITY ANALYSIS WITH TIME VARYING LOADS,” 1995.
- [5] R. Billinton and W. Li, *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*. Springer US, 1994. doi: 10.1007/978-1-4899-1346-3.
- [6] H.-Q. M. B. Guertin, P. F. Albrecht, W. D. Masters, C. Electric, I. ; Co, and A. D. Patton, “RELIABILITY INDICES FOR USE IN BULK POWER SUPPLY ADEQUACY EVALUATION A report prepared by the Working Group on Performance Records for Optimizing System Design, Power Systems Engineering Committee.”
- [7] R. Billinton Dange Huang, “9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems BASIC CONCEPTS IN GENERATING CAPACITY ADEQUACY EVALUATION.”
- [8] “The Value of Lost Load (VoLL) for Electricity in Great Britain Final report for OFGEM and DECC Acknowledgements,” 2013. [Online]. Available: www.londecon.co.uk
- [9] M. Ovaere, E. Heylen, S. Proost, G. Deconinck, D. Van Hertem, and D. Van Hertem, “How detailed value of lost load data impact power system reliability decisions: a trade-off between efficiency and equity.”
- [10] Kroes Eric P. and Sheldon Robert J., “Stated Preference Methods,” 1988.
- [11] W. E. Huffman and J. J. McCluskey, “Using Stated preference techniques and experimental auction methods: A review of advantages and disadvantages for each method in examining consumer preferences for new technology,” *International*

- Review of Environmental and Resource Economics*, vol. 10, no. 3–4, pp. 269–297, 2017, doi: 10.1561/101.00000088.
- [12] “Final Report STUDY ON THE ESTIMATION OF THE VALUE OF LOST LOAD OF ELECTRICITY SUPPLY IN EUROPE ACER/OP/DIR/08/2013/LOT 2/RFS 10 AGENCY FOR THE COOPERATION OF ENERGY REGULATORS 06 July 2018 Final Report,” 2018.
- [13] R. Billinton & -Sin Khan, “RELIABILITY EVALUATION,” 1992.
- [14] A. Sankarakrishnan and R. Billinton, “SEQUENTIAL MONTE CARLO SIMULATION FOR COMPOSITE POWER SYSTEM RELIABILITY ANALYSIS WITH TIME VARYING LOADS,” 1995.
- [15] J. Zuo, S. Zhou, Z. Xu, C. Gao, S. Zheng, and P. Chen, “Reliability Evaluation Method of Multi-Voltage Levels Distribution System Considering the Influence of Sense-Control Terminal Faults,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 21, p. 11761, Oct. 2023, doi: 10.3390/app132111761.
- [16] W. L. Dunn and J. K. Shultis, *Exploring Monte Carlo Methods*. Elsevier, 2011. doi: 10.1016/s1369-7021(12)70027-5.
- [17] R. H. M. S. L. M. and K. Y. R. E. Walpole, “Probability and Statistics for Engineers & Scientists,” 2016.
- [18] N. Astier and M. Ovaere, “Reliability standards and generation adequacy assessments for interconnected electricity systems,” *Energy Policy*, vol. 168, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2022.113131.
- [19] EPRI, “Adequacy Standards & Criteria.”
- [20] “Electricity Statement of Opportunities A report for the Wholesale Electricity Market,” 2021.
- [21] R. Lueken, J. Apt, and F. Sowell, “Robust resource adequacy planning in the face of coal retirements,” *Energy Policy*, vol. 88, pp. 371–388, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2015.10.025.
- [22] A. Volkanovski, “Wind generation impact on electricity generation adequacy and nuclear safety,” *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 158, pp. 85–92, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.res.2016.10.003.

- [23] M. Deakin, H. Bloomfield, D. Greenwood, S. Sheehy, S. Walker, and P. C. Taylor, "Impacts of heat decarbonization on system adequacy considering increased meteorological sensitivity," *Appl Energy*, vol. 298, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117261.
- [24] D. , B. A. , C. W. , S. G. , A. A. F. , G. R. , D. C. , S. N. & M. M. Stenclik, "Quantifying Risk in an Uncertain Future: The Evolution of Resource Adequacy," *IEEE Power & Energy Magazine*, 2021.
- [25] A. Keane *et al.*, "Capacity value of wind power," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 564–572, May 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2062543.
- [26] S. A. Mozdawar, A. A. Foroud, and M. Amirahmadi, "Resource adequacy in interdependent electricity markets undergoing heterogeneous expansion in renewable energy," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 13, no. 18, pp. 4061–4072, Sep. 2019, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5289.
- [27] R. Billinton and D. Huang, "Incorporating wind power in generating capacity reliability evaluation using different models," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 2509–2517, Nov. 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2120633.
- [28] P. A. Dratsas, G. N. Psarros, and S. A. Papathanassiou, "Battery energy storage contribution to system adequacy," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 16, Aug. 2021, doi: 10.3390/en14165146.
- [29] S. Borozan, M. P. Evans, G. Strbac, and T. Rodrigues, "Contribution of Energy Storage to System Adequacy and its Value in the Capacity Market; Contribution of Energy Storage to System Adequacy and its Value in the Capacity Market," 2019.
- [30] P. A. Dratsas, G. N. Psarros, and S. A. Papathanassiou, "Capacity Value of Pumped-Hydro Energy Storage," in *SyNERGY MED 2022 - 2nd International Conference on Energy Transition in the Mediterranean Area, Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/SyNERGYMED55767.2022.9941435.
- [31] G. Edwards, S. Sheehy, C. J. Dent, and M. C. M. Troffaes, "Assessing the contribution of nightly rechargeable grid-scale storage to generation capacity

- adequacy,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 12, pp. 69–81, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.segan.2017.09.005.
- [32] P. A. Dratsas, G. N. Psarros, and S. A. Papathanassiou, “A Real-Time Redispatch Method to Evaluate the Contribution of Storage to Capacity Adequacy,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 39, no. 1, pp. 1274–1286, Jan. 2024, doi: 10.1109/TPWRS.2023.3243669.
- [33] P. A. Dratsas, G. N. Psarros, and S. A. Papathanassiou, “Feasibility of Behind-the-Meter Battery Storage in Wind Farms Operating on Small Islands,” *Batteries*, vol. 8, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/batteries8120275.
- [34] P. A. Dratsas, G. N. Psarros, and S. A. Papathanassiou, “Capacity Value of Wind Powered Pumped Hydro Storage Virtual Power Plants,” in *2023 IEEE 2nd Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference, ONCON 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/ONCON60463.2023.10431378.
- [35] S. Awara, C. Murphy, A. Schleifer, G. Stephen, and P. Denholm, “Impacts of hybridization and forecast errors on the probabilistic capacity credit of batteries,” *Next Energy*, vol. 1, no. 2, p. 100021, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.nxener.2023.100021.
- [36] V. M. Cook, C. D. Galloway, and M. J. Steinberg, “Determination of Reserve Requirements of Two Interconnected Systems.”
- [37] S. Hagspiel, A. Knaut, and J. Peter, “Reliability in multi-regional power systems-Capacity adequacy and the role of interconnectors CORRESPONDING AUTHOR Reliability in multi-regional power systems-Capacity adequacy and the role of interconnectors,” 2017, [Online]. Available: www.ewi.uni-koeln.de
- [38] “European Network of Transmission System Operators for Electricity European Resource Adequacy Assessment 2023 Edition ERAA 2023 Edition Annex 1: Input Data and Assumptions.”
- [39] ΑΔΜΗΕ, “Εγχειρίδιο Μηχανισμού Διασφάλισης Επαρκούς Ισχύος,” 2012.
- [40] H.G. Stoll, “Least-Cost Electric Utility Planning,” 1988.
- [41] ΑΔΜΗΕ, “Μελέτη Επάρκειας Ισχύος για την Περίοδο 2017-2027,” 2017
- [42] Abdul. Alhazred and J. Dee, *Necronomicon*.

