



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

# Διαχείριση Συμφόρησης Στις Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

του/της

**Παπανικολάου Παρασκευής**

**Επιβλέπων:** Μπουχουράς Άγγελος

Σεπτέμβριος 2023



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

## ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο

\_\_\_\_\_” καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ.

\_\_\_\_\_ αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. 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 μόνο.

Copyright (C) Ονοματεπώνυμο Φοιτητή & Επιβλέποντα, Έτος, Πόλη

Copyright (C) \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_,

Υπογραφή Φοιτητή: \_\_\_\_\_

## **Περίληψη**

Η ενέργεια σε οποιαδήποτε μορφή της (υπεδάφη, ορυκτή ή ανανεώσιμη) είναι πλέον ο μεγαλύτερος παράγοντας που καθορίζει την παγκόσμια οικονομία. Τα γεγονότα τα οποία χάραξαν ήδη το 2022 είναι αδιαμφισβήτητα παραδείγματα ότι η ενεργειακή κρίση έχει ήδη ξεκινήσει και τα γεωπολιτικά συμφέροντα των κρατών σμιλεύουν τόσο την οικονομική εξέλιξη της εκάστοτε χώρας όσο και της ζωτικής σημασίας που είναι η ανάγκη να βρεθούν λύσεις για την καταπολέμηση της. Έχει υποστηριχθεί ότι ένα από τα πιο εξέχοντα κοινωνικά προβλήματα του 21ου αιώνα είναι η εξασφάλιση αειφορίας και τρόπων εξοικονόμησης ενέργειας και ορθολογικής και βέλτιστης διαχείρισης της, καθώς και των συστημάτων διανομής της. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες που κάνουν χρήση διαφορετικών προσεγγίσεων για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης διαχείρισης ως προς το μέγεθος και κατανομή των γεννητριών σε ένα δίκτυο διανομής (ΔΔ). Η διαχείριση συμφόρησης σε αυτά τα δίκτυα αποκτά μεγαλύτερη σημασία ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης διείσδυσης διακοπτόμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με αποτέλεσμα οι φορτίσεις των γραμμών να υπερβαίνουν τα όρια τους. Τα παραπάνω υπόκεινται στον έλεγχο των διαχειριστών συστημάτων μεταφοράς (ΔΣΜ) και των διαχειριστών συστημάτων διανομής (ΔΣΔ) σε περίπτωση συμφόρησης στο δίκτυο διανομής (DN). Προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτούνται κατάλληλοι πόροι για την αποφυγή υπερφόρτισης των γραμμών μεταφοράς. Προηγουμένως, μόνο οι συμβατικές μονάδες ισχύος παρείχαν αυτήν την ικανότητα. Ωστόσο, η εισαγωγή ευέλικτων πόρων, όπως συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και ηλεκτρικά οχήματα, επιτρέπουν την κάλυψη των αυξημένων αναγκών, παρέχοντας αυξημένη ευελιξία στους ΔΣΜ και τους ΔΣΔ. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση και η αποτίμηση των μέσων αυτών βελτιστοποίησης στη διαχείριση των δικτύων παροχής και μεταφοράς ενέργειας.

Λέξεις κλειδιά: Διαχειριστές Συστημάτων Ενέργειας, Αγορές Ενέργειας, Αγορά Επόμενης Ημέρας, Συμφόρηση σε Δίκτυα Διανομής και Μεταφοράς, Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας, Μπαταρίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας

## ***Abstract***

Energy in any form (land, mineral or renewable) is now the largest determinant of the global economy. The events which have already marked 2022 are indisputable examples that the energy crisis has already begun and the geopolitical interests of states are shaping both the economic development of each country and the vital importance of finding solutions to combat it. It has been argued that one of the most prominent social problems of the 21st century is to ensure sustainability and ways to save and rationally and optimally manage energy, as well as its distribution systems. In recent years, significant efforts have been made using different approaches to solve the problem of optimal sizing and distribution of generators in a distribution network (DN). Congestion management in these networks is becoming more important as a result of the increasing penetration of intermittent renewables, causing line loads to exceed their limits. All the above are being subject to the control of transmission system operators (TSOs) and distribution system operators (DSOs) in the event of congestion in the distribution network (DN). In order to ensure the reliable operation of the electricity system, they require adequate resources to avoid overloading the transmission lines. Previously, only conventional power units provided this ability. However, the introduction of flexible resources such as energy storage systems, electric vehicles and demand-responsive loads allows them to participate in the coverage of this service, providing this increased flexibility available to TSOs and TSOs. The purpose of this work is the presentation and evaluation of these optimization methods in the management of energy supply and transmission networks.

Key words: Transmission System Operators, Energy Markets, Day Ahead Market, Congestion in Distribution and Transmission Networks, Energy Storage Technologies, Energy Storage Batteries

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<i>Περίληψη</i> .....	i
<i>Abstract</i> .....	i
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	iii
<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή</b>	
<i>Ενεργειακή Κρίση και Το Αντίκτυπο της σε Παγκόσμιο Επίπεδο</i> .....	1
<i>1.1 Ενεργειακή Κρίση σε ανεπτυγμένες χώρες (Το παράδειγμα της California)</i> .....	2
<i>1.2 Τα αποτελέσματα της ενεργειακής εξάρτησης μίας χώρας κατά την έλευση μίας οικονομικής κρίσης (το παράδειγμα της Ισπανίας)</i> .....	4
<i>1.3 Ευρωπαϊκή Ενεργειακή Ασφάλεια</i> .....	8
<b>Κεφάλαιο 2-Αειφορία, Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας και Σύγχρονες Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας</b> .....	11
<i>2.1 Αειφορία και Βιώσιμη Ανάπτυξη</i> .....	11
<i>2.2 Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας</i> .....	12
<i>2.3 Σύγχρονες Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας</i> .....	14
<i>2.4 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες</i> .....	25
<b>Κεφάλαιο 3</b>	
<i>Η Αγορά της Ηλεκτρικής Ενέργειας</i> .....	27
<i>3.1 Γενικά</i> .....	27
<i>3.2 Χαρακτηριστικά της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας</i> .....	29
<i>3.3 Η Παραδοσιακή Αγορά</i> .....	30
<i>3.4 Χονδρική Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας</i> .....	31
<i>3.5 Εκκαθάριση Αγοράς</i> .....	32
<i>3.6 Κεντρικές και Αποκεντρωμένες Αγορές</i> .....	33
<i>3.6.1 Κεντρική Αγορά</i> .....	35
<i>3.6.2 Αγορά με Βάση το Κόστος</i> .....	36
<i>3.6.3 Αποκεντρωμένη Αγορά</i> .....	37
<i>3.7 Διαχείριση κινδύνου</i> .....	38
<b>Κεφάλαιο 4</b>	
<i>Αγορά της Επόμενης Ημέρας</i> .....	40
<i>4.1 Γενικά</i> .....	40
<i>4.2 Προβλήματα της Αγοράς</i> .....	45
<i>4.2.1 Κεντρικές ή Αποκεντρωμένες Αγορές</i> .....	45
<i>4.2.2 Δημοπρασίες ενιαίας τιμής (uniform price) ή πληρωμής ως προσφοράς (pay-as-bid)</i> .....	49

<i>4.3 Τα οφέλη της αγοράς της επόμενης ημέρας</i> .....	51
<i>4.3.1 Αξιοπιστία</i> .....	51
<i>4.3.2 Συμμετοχή από πλευράς ζήτησης</i> .....	52
<i>4.3.3 Δέσμευση Μονάδας</i> .....	52
<i>4.3.4 Αβεβαιότητα Τιμών</i> .....	53
<i>4.3.5 Παίγνιο</i> .....	54
<i>4.4 Μεθοδολογία Τιμολόγησης στις Αγορές Επόμενης Ημέρας</i> .....	55
<b>Κεφάλαιο 5</b>	
<i>Παρακολούθηση και Έλεγχος Συστημάτων</i> .....	57
<i>5.1 Πτώση Τάσης και Απώλειες Ισχύος σε Συστήματα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας</i> .....	57
<b>Κεφάλαιο 6</b> .....	59
6.1 Γενικά.....	59
6.2 Μεθοδολογία.....	62
6.3 Μελέτη Περίπτωσης στο PowerFactory 2023.....	64
6.4 Συμπεράσματα-Σύνοψη.....	72
Βιβλιογραφία.....	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Optimal Power Flow για Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα και Μπαταρίες.....	64
Διάγραμμα 2 Optimal Power Flow για Υδροηλεκτρική Ενέργεια .....	65
Διάγραμμα 3 Optimal Power Flow για Φυσικό Αέριο .....	65
Διάγραμμα 4 Optimal Power Flow με ελαχιστοποίηση κόστους για Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα και Μπαταρίες .....	66
Διάγραμμα 5 Optimal Power Flow με ελαχιστοποίηση κόστους για Υδροηλεκτρική Ενέργεια .....	67
Διάγραμμα 6 Optimal Power Flow με ελαχιστοποίηση κόστους για Φυσικό Αέριο ..	67
Διάγραμμα 7 Απώλειες Συστήματος Μεταφοράς.....	68
Διάγραμμα 8 Μέγιστη Φόρτιση Γραμμών Συστήματος Μεταφοράς .....	68

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Οι τιμές κόστους για τις μονάδες αερίου και της λιγνιτικής.....	65
Πίνακας 2 Οι τιμές για τα υδροηλεκτρικά.....	65

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Οι 17 Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης.....	12
Εικόνα 2 Οι 4 τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που θεωρούνται οι πιο βασικές για τις προσπάθειες για την κλιματική αλλαγή.....	14
Εικόνα 3 Αναπαράσταση συστήματος LAES και ροές υλικών/ενέργειας.....	17
Εικόνα 4 Σύγκριση εφαρμογών για διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας με την προσθήκη τεχνολογίας PTES και LAES για εμπορική εφαρμογή.....	17
Εικόνα 5 Διαμόρφωση συστήματος PTES με κύρια εξαρτήματα.....	18
Εικόνα 6 Διάφορες Κατηγορίες Αποθήκευσης Ενέργειας με ενδείξεις σχετικά με το χρόνο αποθήκευσης (μακροπρόθεσμη, μεσοπρόθεσμη και βραχυπρόθεσμη αποθήκευση) .....	19
Εικόνα 7 Κυψέλες καυσίμου με πρόσθετα εξαρτήματα.....	22
Εικόνα 8 Τιμές Αγορών Επόμενης Ημέρας σε Ευρωπαϊκό Επίπεδο.....	39
Εικόνα 9 Σύγκριση της αγοράς επόμενης ημέρας με διάφορες συνεδρίες (sessions) αγοράς εντός της ημέρας.....	43
Εικόνα 10α Γεωμετρικά Σχήματα Περιοχής Εξυπηρέτησης Φορτίου Υ/Σ Διανομής σε Τετραγωνική και Εξαγωνική Μορφή Αντίστοιχα .....	57
Εικόνα 10β Γεωμετρικά Σχήματα Περιοχής Εξυπηρέτησης Φορτίου Υ/Σ Διανομής σε Τετραγωνική και Εξαγωνική Μορφή Αντίστοιχα .....	58
Εικόνα 11 Το Σύστημα 118 ζυγών IEEE τροποποιημένο για την προσομοίωση του ελληνικού δικτύου μεταφοράς.....	61





## ***Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή***

-

### ***Ενεργειακή Κρίση και Το Αντίκτυπο της σε Παγκόσμιο Επίπεδο***

Η ενέργεια στις διάφορες μορφές της είναι πλέον στον 21ο αιώνα ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες και πυλώνες οικονομικής ανάπτυξης και πολιτικής. Έχει υποστηριχθεί ότι ένα από τα πιο εξέχοντα κοινωνικά προβλήματα του 21ου αιώνα είναι η ενεργειακή φτώχεια, η οποία έχει αναγνωριστεί ως διακριτή μορφή ανισότητας και απαράδεκτο χαρακτηριστικό αυτή τη στιγμή (Santamouris & al., 2013) [1]. Τα γεγονότα τα οποία χάραξαν ήδη το 2022 είναι αδιαμφισβήτητα παραδείγματα ότι η ενεργειακή κρίση έχει ήδη ξεκινήσει και τα γεωπολιτικά συμφέροντα των κρατών σμιλεύουν την οικονομική εξέλιξη της εκάστοτε χώρας, καθιστώντας έτσι ζωτικής σημασίας την ανάγκη εξεύρεσης λύσεων για την καταπολέμηση της.

Η εκτίναξη της τιμής φυσικού αερίου, πετρελαίου και της ηλεκτρικής ενέργειας οφείλεται κατά μεγάλο βαθμό στα γεωπολιτικά και οικονομικά συμφέροντα των χωρών των οποίων παράγουν ορυκτά καύσιμα. Σύμφωνα με μελέτες, μέχρι και το 2020 η Κίνα έχει τη μεγαλύτερη παραγωγή άνθρακα κατά 22,475 TWh και ακολουθεί η Ινδία με 3,523 TWh. Οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (ΗΠΑ) έχουν τη μεγαλύτερη παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου κατά 8.289 TWh και 9,146 TWh αντίστοιχα, ενώ, τη μεγαλύτερη κατανάλωση ορυκτών πόρων την κατέχει η ΗΠΑ κατά 19.916 TWh και με σημαντική διαφορά τη δεύτερη μεγαλύτερη κατανάλωση ορυκτών πόρων την κατέχει η Ινδία κατά 7.973 TWh (Ritchie & Roser, 2020) [2].

Δεδομένης τόσο της αποδεδειγμένης θέσης στην αγορά των ορυκτών καυσίμων στον παγκόσμιο εφοδιασμό ενέργειας όσο και των δυσκολιών που σχετίζονται με τη συνεχιζόμενη ή αυξανόμενη ζήτηση και χρήση άνθρακα, πετρελαίου και φυσικό αέριο, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην τρέχουσα χρονική περίοδο αλλά και μελλοντικά κρίνονται απαραίτητες στο ενεργειακό μείγμα. Μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που μπορούν να βοηθήσουν τόσο τις κοινωνίες των υπερκατοικημένων περιοχών όσο και τη βελτιστοποίηση της παγκόσμιας κατανάλωσης γενικά είναι η χερσαία και

θαλάσσια αιολική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια, υδροηλεκτρική ενέργεια, κυματική και παλιρροϊκή ενέργεια, και γεωθερμική ενέργεια.

### **1.1 Ενεργειακή Κρίση σε ανεπτυγμένες χώρες (Το παράδειγμα της California)**

Κρίση (οποιοδήποτε είδους) έχουμε όταν καλλιεργούνται συνθήκες όπως οι ακόλουθες :

- Όταν ένα βασικό εμπόρευμα καθίσταται μη διαθέσιμο για μεγάλες χρονικές περιόδους.
- Όταν οι τιμές (χονδρικής) κυμαίνονται σε επίπεδα που είναι αρκετές φορές μεγαλύτερα από το μέσο όρο.
- Όταν ορισμένοι από τους βασικούς προμηθευτές βρίσκονται στα πρόθυρα της χρεοκοπίας.

Κάποιες από τις παραπάνω συνθήκες έλαβαν χώρα στην Πολιτεία της California το 2000. Ακολουθώντας το παράδειγμα του Ηνωμένου Βασιλείου, η Πολιτεία της California αποφάσισε να απελευθερώσει εν μέρει τη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας. Η αλυσίδα αξίας ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χωριστεί σε τρία διαφορετικά στάδια: παραγωγή, μεταφορά και διανομή. Ενώ οι λόγοι για το φυσικό μονοπώλιο μπορεί να σχετίζονται με τη μεταφορά και τη διανομή, δεν ισχύει το ίδιο για την παραγωγή. Ως εκ τούτου, αποφασίστηκε η απελευθέρωση της παραγωγής, διατηρώντας παράλληλα τη μεταφορά και τη διανομή σε ένα σύστημα παρόμοιο με το προϋπάρχον (ρύθμιση ποσοστού επιστροφής).

Δύο σημαντικά πρόσθετα μέτρα ήταν: (α) να μην επιτραπούν μακροπρόθεσμες συμβάσεις μεταξύ των εταιρειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και των επιχειρήσεων κοινής ωφελείας (δηλαδή εκείνων που είναι αρμόδιες για τη μεταφορά και τη ρύθμιση) και (β) να παγώσουν τα επιτόκια των καταναλωτών μέχρι την άνοιξη του 2002. Η ιδέα πίσω από το πρώτο μέτρο είναι ότι τα μακροπρόθεσμα συμβόλαια μπορεί να μην είναι ανταγωνιστικά (δηλαδή μπορεί να αποτρέψουν την είσοδο νέων εταιρειών). Η ιδέα πίσω από το δεύτερο μέτρο είναι η προστασία των καταναλωτών κατά τη μεταβατική περίοδο, επιτρέποντας παράλληλα στις επιχειρήσεις κοινής

ωφέλειας να ανακτήσουν το «λανθάνον» επενδυτικό κόστος, με την υπόθεση ότι ο ανταγωνισμός σε επίπεδο παραγωγής θα οδηγούσε σε χαμηλότερες τιμές χονδρικής και καλύτερα περιθώρια λιανικής.

Δυστυχώς, τα πράγματα δεν εξελίχθηκαν όπως αναμενόταν. Αντί να πέσουν, οι τιμές χονδρικής αυξήθηκαν δραματικά, ξεκινώντας την άνοιξη του 2000. Στην παρούσα κατάσταση, οι τιμές χονδρικής δεν ήταν μόνο υψηλές, αλλά και εξαιρετικά ασταθείς. Φυσικά, αυτό άσκησε μεγάλη πίεση στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας: η πώληση κάτω του κόστους γενικά δεν είναι καλή επιχειρηματική πολιτική. Απαντώντας σε αυτό, οι ρυθμιστικές αρχές απέσυραν την απαγόρευση των μακροπρόθεσμων συμβολαίων και επέτρεψαν στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να αυξήσουν τα επιτόκια, κάτι το οποίο δεν ήταν αρκετό για να αναχαιτίσει την ολοένα μεταβαλλόμενη κατάσταση. Οι αυξανόμενες απώλειες οδήγησαν τελικά τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας σε σημαντική οικονομική δυσπραγία. Λίγο καιρό αργότερα η PG&E (Pacific Gas and Electric Company) υπέβαλε αίτηση για προστασία από πιστωτές (πτώχευσης).

Η οικονομική δυσπραγία των επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας, με τη σειρά της, οδήγησε σε πρόσθετα προβλήματα εφοδιασμού: κανένας λογικός επιχειρηματίας δε θέλει να πουλήσει με πίστωση σε μια σχεδόν χρεοκοπημένη εταιρεία. Το αποτέλεσμα είναι ένα κλασικό παράδειγμα από το Econ 1: εάν η ζήτηση υπερβαίνει την προσφορά και η τιμή είναι σταθερή, τότε πρέπει να πραγματοποιηθεί κάποια μορφή δελτίου. Στις 17 Ιανουαρίου 2001, διατάχθηκαν μια σειρά από κυλιόμενες διακοπές ρεύματος σε όλη την πολιτεία, μια κατάσταση που συνέχισε να επηρεάζει την οικονομία της Καλιφόρνια για αρκετά έτη μετά το συμβάν.

Εκτός από την οικονομική βιωσιμότητα των επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας, υπάρχει και το βασικό πρόβλημα της προσφοράς και της ζήτησης. Η άνθηση της οικονομίας της Καλιφόρνια και τα σχεδόν παγωμένα επιτόκια λιανικής υπονοούσαν ότι η ζήτηση αυξήθηκε ταχύτερα από την προσφορά. Η ενεργειακή κρίση της Καλιφόρνια είναι ένα πρόβλημα αναντιστοιχίας προσφοράς και ζήτησης. Ένα σημαντικό μέρος της λύσης είναι η αύξηση της προσφοράς, τόσο σε επίπεδο παραγωγής όσο και σε επίπεδο μεταφοράς και διανομής.

Οι ανανεώσιμοι φυσικοί πόροι και η γεωγραφία μιας χώρας είναι εξαιρετικά σημαντικές. Τα ηλιακά, υδροηλεκτρικά και αιολικά πάρκα έχουν μεγάλη αξία ως έργο

υποδομής για έναν θεσμικό επενδυτή λόγω του μικρού χρονικού διαστήματος που αφορά την κατασκευή και τη διαδικασία σχεδιασμού (Steffen, 2017) [3]. Το ενδιαφέρον για τέτοια έργα στις αναπτυσσόμενες χώρες είναι ακόμη μεγαλύτερο λόγω των «ευέλικτων» κανονισμών και πολιτικών. Σύμφωνα με την Παγκόσμια Τράπεζα (2017), 26 από τα 33 έργα που έλαβαν θεσμική υποστήριξη αφορούσαν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι αναδυόμενες αγορές όπως η Βραζιλία και η Νότια Αφρική ήταν η κύρια εστίαση για τα ηλιακά και αιολικά πάρκα, λόγω της φύσης της χώρας.

### ***1.2 Τα αποτελέσματα της ενεργειακής εξάρτησης μίας χώρας κατά την έλευση μίας οικονομικής κρίσης (το παράδειγμα της Ισπανίας)***

Κατά τη διάρκεια της οικονομικής κρίσης του 2008, πολλές χώρες υπέφεραν από υψηλά επίπεδα μακροχρόνιας ανεργίας μαζί με μεγάλες πτώσεις της οικονομικής δραστηριότητας. Ταυτόχρονα, οι τιμές του πετρελαίου κατέγραψαν μεγάλες διακυμάνσεις κατά την περίοδο 2008-2014, μετά από σταθερή αύξηση καθ' όλη τη διάρκεια της κρίσης.

Η Ισπανία είναι μια ενδιαφέρουσα μελέτη περίπτωσης μεταξύ των χωρών εισαγωγής πετρελαίου. Πρώτον, παρουσιάζει ιστορικά υψηλά και επίμονα ποσοστά ανεργίας. Ακόμη και στην κορύφωση της οικονομικής έκρηξης το 2007, το ποσοστό ανεργίας ήταν λίγο κάτω από το 8%. Η ανεργία στη συνέχεια εκτοξεύτηκε στο 26% το 2013, και έκτοτε παραμένει σταθερά υψηλή. Δεύτερον, η Ισπανία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από εισαγωγές ενέργειας από το εξωτερικό. Σύμφωνα με την Eurostat, σχεδόν όλο το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο που καταναλώνεται στην Ισπανία είναι εισαγόμενο. Το 2016, το ποσοστό ενεργειακής εξάρτησης της Ισπανίας ήταν 73%, περίπου 20 ποσοστιαίες μονάδες πάνω από τον μέσο όρο της Ενωμένης Ευρώπης των 28.

Φαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της περιόδου οικονομικής έκρηξης που τελείωσε το 2007 υπήρχε αρνητική σχέση μεταξύ αυτών των δύο μεταβλητών (ποσοστού απασχόλησης και ενεργειακών εισαγωγών), που μπορεί να εξηγηθεί από κρίσεις οφειλόμενες στη ζήτηση.

Αντίθετα, η σχέση φαίνεται να είναι θετική μετά την αρχή της μεγάλης ύφεσης του 2008, που μπορεί να οφείλεται στη διακοπή παραγωγής πετρελαίου από τις χώρες παραγωγούς σε μια προσπάθεια να διατηρηθούν οι τιμές σε προ της ύφεσης επίπεδα. Η μεγάλη πτώση τιμών το 2008-2009 μπορεί να εξηγείται από την πτώση της παγκόσμιας ζήτησης μετά την Lehman Brothers χρεοκοπία και το ξέσπασμα της οικονομικής κρίσης.

Η σχέση μεταξύ των τιμών του πετρελαίου και της οικονομικής δραστηριότητας είναι καλά διατυπωμένη σε έρευνες. Από τη μία πλευρά, οι κρίσεις στην τιμή πετρελαίου μπορεί να ενεργούν ως σοκ της συνολικής προσφοράς, έχοντας έτσι επιζήμια επίδραση στην ισορροπία ποσοστού ανεργίας και δυνητικού ΑΕΠ. Σύμφωνα με τον Hamilton οι απότομες αλλαγές/διακυμάνσεις στις τιμές βασικών ειδών (όπως η ενέργεια) είναι η σημαντικότερη πηγή στη διακύμανση της επιχειρηματικής δραστηριότητας. Ο Kilian προτείνει ότι οι εκτιμήσεις που δείχνουν αρνητική αντίδραση της οικονομικής δραστηριότητας στην άνοδο της τιμής του πετρελαίου είναι παραπλανητικές σε περιπτώσεις όπου η αύξηση στην τιμή του πετρελαίου αντανακλά κυρίως θετικά σοκ στη ροή της ζήτησης για πετρέλαιο. Ο λόγος είναι απλός: ένα σοκ ζήτησης πετρελαίου θα είναι το αποτέλεσμα απροσδόκητης παγκόσμιας οικονομικής ευρωστίας και η επακόλουθη βελτίωση της οικονομικής δραστηριότητα μπορεί να εξουδετερώσει τις αρνητικές επιπτώσεις από την αύξηση της τιμής του πετρελαίου.

Από την άλλη η τιμή του πετρελαίου μπορεί να επηρεάσει την αντιληπτή αξία του πλούτου μέσω του πληθωρισμού, του αποτελέσματος των τιμών περιουσιακών στοιχείων όπως η στέγαση και την αύξηση της αποταμίευσης ως προληπτικό μέτρο τόνωσης των επενδύσεων. Αβεβαιότητα για τα ελλείμματα της αναμενόμενης προσφοράς σε σχέση με την αναμενόμενη ζήτηση μειώνουν το πραγματικό ΑΕΠ και αυξάνουν τις τιμές στους καταναλωτές.

Οι κρίσεις των τιμών του πετρελαίου μπορούν να επηρεάσουν την πραγματική δραστηριότητα μέσω άμεσων και έμμεσων καναλιών. Με άμεσες επιπτώσεις, η αύξηση της τιμής του πετρελαίου έχει επιζήμια επίδραση στην οικονομική δραστηριότητα με τη μείωση της αγοραστικής δύναμης των οικιακών νοικοκυριών και αύξηση του κόστους εγχώριας παραγωγής. Αυτές οι άμεσες επιπτώσεις είναι συμμετρικές για την αύξηση και τη μείωση της τιμής του πετρελαίου. Αντίθετα, ένας σημαντικός αριθμός

ερευνητών προτείνει ότι η τιμή του πετρελαίου είναι ασύμμετρη ως προς τη μετάδοση της, εννοώντας ότι η θετική αύξηση της τιμής του πετρελαίου μπορεί να πυροδοτήσει ύφεση, ενώ αρνητικό σοκ της τιμής πετρελαίου έχει περιορισμένες επιπτώσεις στην οικονομία. Για παράδειγμα, οι Cunado και Perez de Gracia διαπιστώνουν ότι οι κρίσεις στην τιμή του πετρελαίου έχουν προσωρινές αν και ασύμμετρες, επιδράσεις στην αύξηση της παραγωγής.

Οι έμμεσες επιπτώσεις των διαταραχών της τιμής του πετρελαίου μπορούν να εξηγήσουν αυτή την ασύμμετρη συμπεριφορά. Η θεωρητική βιβλιογραφία έχει προτείνει τρία τέτοια κανάλια: την επίδραση ανακατανομής, την επίδραση της αβεβαιότητας και την επίδραση της συστηματική νομισματικής πολιτικής.

Πρώτον, τα αποτελέσματα της ανακατανομής βασίζονται στην ιδέα οι κρίσεις στον κλάδο του πετρελαίου μπορούν να θεωρηθούν ως κατανεμητικές διαταραχές που προκαλούν τομεακές μετατοπίσεις σε ολόκληρη την οικονομία. Τα ασύμμετρα φαινόμενα εμφανίζονται λόγω των διαφορών της βιομηχανίας ή των επιχειρήσεων στα επίπεδα έντασης κεφαλαίου και ενέργειας, την ηλικία των παραγωγικών εγκαταστάσεων, το μέγεθος του εργατικού δυναμικού ή την ανθεκτικότητα του τελικού προϊόντος.

Δεύτερον, ο Bernanke προτείνει ότι, στον βαθμό που οι ταμειακές ροές από μια μη αναστρέψιμη επένδυση ενός project εξαρτάται από την τιμή του πετρελαίου, αυξημένη αβεβαιότητα για την τιμή του πετρελαίου θα αναγκάσει τις επιχειρήσεις να καθυστερήσουν τις επενδύσεις τους.

Τρίτον, μια συστηματική απάντηση νομισματικής πολιτικής που συνεπάγεται αύξηση των επιτοκίων για να ανταποκριθεί σε πρώιμες ή πραγματικές πληθωριστικές πιέσεις θα ενισχύσει την οικονομική συρρίκνωση. Σε αντίθεση με τη βιβλιογραφία για τις ασύμμετρες επιπτώσεις των πετρελαϊκών σοκ, οι Kilian και Vigfusson (Kilian & Vigfusson, 2011) [4] επισημαίνουν ότι δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική ένδειξη ασύμμετρης απόκρισης της πραγματικής παραγωγής σε πετρελαϊκά σοκ. Αυτοί οι συγγραφείς συμπεραίνουν ότι το ασύμμετρο αποτέλεσμα είναι ωστόσο στατιστικά σημαντικό, όταν η γενικότερη οικονομική κρίση λαμβάνεται υπόψιν κατά την έρευνα.

Εστιάζοντας στην περίπτωση της Ισπανίας, οι κρίσεις τιμών στο πετρέλαιο έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην ισπανική οικονομία, ενώ οι αναλύσεις των περιόδων

1986(1<sup>ο</sup>Τρίμηνο)-2013(1<sup>ο</sup>Τρίμηνο) διαπιστώνουν ότι θετικά σοκ στις τιμές πετρελαίου έχουν θετικό αποτέλεσμα στο ΑΕΠ και αρνητικό στην απασχόληση (Ordonez, et al., 2019) [5]. Ωστόσο, οι παραπάνω ερευνητές αξιολογούν μόνο το αποτέλεσμα του σοκ της τιμής του πετρελαίου στην ισπανική οικονομία πριν από το ξέσπασμα της χρηματοπιστωτικής κρίση το 2008. Δεδομένου ότι οι διαδικασίες παραγωγής δεδομένων ενδέχεται να έχουν υποστεί διαρθρωτικές αλλαγές το 2008, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ των τιμών του πετρελαίου και της ανεργίας τόσο πριν όσο και κατά τη διάρκεια της κρίσης.

Όντως σε μία πρόσφατη έρευνα που διεξήχθη το 2019 (Ordonez, et al., 2019) [5], διαπιστώνουμε ότι η σχέση μεταξύ ανεργίας και σοκ τιμών πετρελαίου στην Ισπανία είναι πολύ διαφορετική προ-κρίσης 2008 και μετά το 1ο τρίμηνο του 2008. Στην πρώτη περίπτωση, σοκ στις τιμές πετρελαίου προκαλεί μείωση της ανεργίας ενώ στη δεύτερη η ανεργία ανεβαίνει. Η αύξηση τιμής του πετρελαίου συνέβαλε αρνητικά στην εξέλιξη της απασχόλησης στην Ισπανία μετά το ξέσπασμα της κρίσης, ενώ τυχόν μειώσεις τιμών δεν επέφεραν ορατά αποτελέσματα ως προς την ανάκαμψη του ποσοστού απασχόλησης. Υπογραμμίζεται λοιπόν η ανάγκη για προσοχή στον σχεδιασμό διαρθρωτικών μέτρων με στόχο την αύξηση της απασχόλησης. Από τη μία πρέπει να εφαρμοστούν πολιτικές για την προστασία της απασχόλησης, έτσι ώστε μία ενδεχομένη αύξηση της τιμής του πετρελαίου να μην οδηγήσει σε αύξηση της ανεργίας. Από την άλλη, οι πολιτικές πρέπει να σχεδιαστούν έτσι ώστε να επιτρέπουν όταν υπάρχει πτώση στην τιμή του πετρελαίου να μεταφραστεί σε βελτιωμένο ποσοστό απασχόλησης.

Ως τελικό συμπέρασμα προκύπτει ότι η επίδραση των υψηλών τιμών του πετρελαίου στην οικονομία συνδέεται με διαρθρωτικούς οικονομικούς παράγοντες όπως η κλαδική σύνθεση, η εξάρτηση σχετικά με την ενέργεια από ορυκτά καύσιμα, η ικανότητα χρήσης μεθόδων εξοικονόμησης ενέργειας, η ηλικία των εγκαταστάσεων παραγωγής ή την ανθεκτικότητα του τελικού προϊόντος. Δημόσιες πολιτικές θα πρέπει να επιδιώξουν τη διευκόλυνση της υποκατάστασης των πετρελαιοειδών και των άλλων εισαγόμενων πηγών ενέργειας και να μειωθεί η εξάρτηση από έναν μόνο τύπο καυσίμου. Αυτοί οι στόχοι πολιτικής συνεπάγονται την ανάπτυξη των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, τη χρήση των αποβλήτων ως δευτερογενή πηγή ενέργειας και την υιοθέτηση πρακτικών εξοικονόμησης ενέργειας σε εθνική κλίμακα. Τα ειδικά μέτρα

ενεργειακής πολιτικής θα πρέπει να περιλαμβάνουν χρηματοδότηση μέσω δανείων και επιχορηγήσεων, έρευνα για τη διατήρηση της ενέργειας και εναλλακτικών καυσίμων καθώς και υιοθέτηση εξοπλισμού εξοικονόμησης ενέργειας, εκπαίδευσή σε τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας και ενέργειας. Οι πολιτικές τιμολόγησης μπορούν επίσης να συμβάλουν στη μείωση της ενεργειακής σπατάλης. Όπως είπαμε και παραπάνω έχουμε ασύμμετρες επιδράσεις από θετικά και αρνητικά σοκ πετρελαϊκών τιμών, το οποίο θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί από τις κυβερνήσεις μέσω πολιτικών τιμολόγησης της ενέργειας που αποσκοπούν στην αποτροπή της καθοδικής ακαμψίας στις τιμές, καθώς και την ενθάρρυνση ανταγωνισμού στην ελεύθερη αγορά και τη διευκόλυνση της εισόδου νέων παικτών στην αγορά ενέργειας.

### ***1.3 Ευρωπαϊκή Ενεργειακή Ασφάλεια***

Η ενέργεια, αποτελεί τον κινητήριο μοχλό προκειμένου να επιλυθούν ζητήματα παγκόσμιας γεωπολιτικής και γεωοικονομικής σημασίας, ερχόμενη όμως πάντα αντιμέτωπη με τη μείωση των φυσικών αποθεμάτων του πλανήτη καθώς και με τις ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις της παγκόσμιας κοινότητας, και δη των αναδυόμενων οικονομιών με τεράστιους πληθυσμούς, όπως η Κίνα, η Ινδία και η Βραζιλία. Η ζήτηση για ενέργεια αναμένεται να αυξηθεί ετησίως κατά 1,4% ως το 2035, με «πρωτοπόρο» την Κίνα να είναι η χώρα με τη μεγαλύτερη ανάγκη για ενέργεια. Αντίστοιχα αναμένεται να αυξηθεί η παραγωγή πετρελαίου, φυσικού αερίου και σχιστολιθικού φυσικού αερίου καθώς και η χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες όμως λόγω αυξημένου κόστους απαιτούν να ενταχθούν σε κοστοβόρα και χρονοβόρα επιχειρηματικά σχέδια (Savvidou, 2018) [6].

Η έννοια της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού μπορεί να προσδιοριστεί βάσει των κατωτέρω τεσσάρων στοιχείων: **α)** τη διαθεσιμότητα/ ύπαρξη φυσικών ενεργειακών πόρων σε μια οικονομία, **β)** την προσβασιμότητα, που συνδέεται με γεωπολιτικές παραμέτρους, **γ)** την οικονομική «προσιτότητα», που αφορά στο κόστος της ενέργειας και **δ)** τον βαθμό αποδοχής, που αναφέρεται στην περιβαλλοντική διάσταση και την ευρύτερη κοινωνική «ανεκτικότητα». Στο πλαίσιο αυτό η ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού μπορεί να οριστεί ως «η ικανοποίηση της ζήτησης από τις ροές του ενεργειακού εφοδιασμού, κατά τέτοιο τρόπο και σε τέτοιο επίπεδο τιμών,



ώστε να μη διακόπτεται η πορεία της οικονομίας, στο πλαίσιο της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας».

Περαιτέρω γίνεται διαχωρισμός σε βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη ασφάλεια. Η πρώτη αφορά σε ξαφνικές και απρόσμενες διακοπές στον εφοδιασμό, ενώ η δεύτερη συνδέεται με το επίπεδο των υποδομών του ενεργειακού συστήματος, στις οποίες, συχνά, άλλωστε εντοπίζονται και τα πραγματικά αίτια για τις διακοπές στον εφοδιασμό και τα προβλήματα στη βραχυπρόθεσμη διάσταση.

Εστιάζοντας στον τομέα του φυσικού αερίου, οι πρώτες σκέψεις για την απελευθέρωση της ευρωπαϊκής αγοράς χρονολογούνται στη δεκαετία του '80. Υπήρχε δε μια τάση χαλάρωσης στην άσκηση ελέγχου εκ μέρους του κράτους στην αγορά και απελευθέρωσης των δυνάμεων του ανταγωνισμού. Παράλληλα, το γεγονός ύπαρξης πλεονάσματος προμηθειών φυσικού αερίου σε συνδυασμό με τη χαμηλή του τιμή εξασφάλιζαν στους αγοραστές πλεονεκτική θέση έναντι των παραγωγών.

Ωστόσο, το σκηνικό στα παγκόσμια ενεργειακά δρώμενα μεταβάλλεται προς όφελος των παραγωγών: Η ζήτηση για ενέργεια σημειώνει ταχύτατη άνοδο, γεγονός που εξηγείται από τους ταχύτερους ρυθμούς ανάπτυξης της Ινδίας και της Κίνας. Η αύξηση στις τιμές ενέργειας είναι δεδομένη, ενώ η ισορροπία δυνάμεων μεταβάλλεται, διεθνώς, υπέρ των παραγωγών, με την ενεργειακή εξάρτηση των κρατών μελών της ΕΕ από τρίτες (Savvidou, 2018) [6] χώρες να γίνεται ολοένα και πιο αισθητή.

Υπάρχει επίσης εντεινόμενη διασύνδεση της πολιτικής με τις ενεργειακές σχέσεις, η οποία καθίσταται σαφής μέσα από τις συνέπειες των συγκρούσεων της Λευκορωσίας με τη ρωσική εταιρία φυσικού αερίου Gazprom (2006) και της Ρωσίας με την Ουκρανία (2006,2008 και 2009), για τον εφοδιασμό με φυσικό αέριο των κρατών μελών της ΕΕ (Savvidou, 2018) [6].

Στο πλαίσιο της ΕΕ υπάρχουν τα εξής δεδομένα: Η Ευρωπαϊκή Ένωση καταναλώνει όλο και περισσότερη ενέργεια και εισάγει όλο και περισσότερα ενεργειακά προϊόντα, η ενωσιακή παραγωγή δεν επαρκεί για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της Ένωσης. Ως εκ τούτου αυξάνεται συνεχώς η ενεργειακή εξάρτηση της από εξωτερικούς ενεργειακούς προμηθευτές και δη από τη Ρωσία. Ως εκ τούτου, η Ευρωπαϊκή Ένωση δε θα κατορθώσει να απαλλαγεί από τη συνεχώς αυξανόμενη ενεργειακή εξάρτηση εφόσον δεν εφαρμόσει μια δυναμική ενεργειακή

πολιτική. Εάν δε ληφθούν μέτρα, έως το 2020-2030 η Ένωση θα καλύπτει τις ενεργειακές της ανάγκες κατά 70% με εισαγόμενους ενεργειακούς πόρους (με τις εισαγωγές φυσικού αερίου, ειδικότερα να αγγίζουν το 2020 το 73-79% και το 2030 το 81-89%), ενώ το 2000 η αντίστοιχη έξωθεν εξάρτηση της ανερχόταν σε 50%.

Όμως απότερος στόχος της ΕΕ η επίτευξη ενεργειακής ανεξάρτησης από τη Ρωσία. Στο πλαίσιο αυτής της προσπάθειας της ακολουθεί και μια συγκεκριμένη στρατηγική, η οποία εκδηλώνεται με τις εξής μορφές: **α)** Ενίσχυση των μηχανισμών έκτακτης ανάγκης/αλληλεγγύης, συμπεριλαμβανομένων του συντονισμού των εκτιμήσεων επικινδυνότητας και των σχεδίων έκτακτης ανάγκης και προστασία των στρατηγικών υποδομών, **β)** Μετριασμός της ζήτησης ενέργειας, **γ)** Δημιουργία εύρυθμα λειτουργούσας και πλήρως ενοποιημένης εσωτερικής αγοράς, **δ)** Αύξηση της παραγωγής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, **ε)** Περαιτέρω ανάπτυξη των ενεργειακών τεχνολογιών – ΑΠΕ και **στ)** Διαφοροποίηση των εξωτερικών πηγών εφοδιασμού και εκσυγχρονισμός της συναφούς υποδομής.

Από όλα τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι τα ενεργειακά αποθέματα συμβάλλουν σημαντικά στην ευημερία και στην επίτευξη μιας επιτυχημένης εξωτερικής πολιτικής, υπό την πολύ βασική προϋπόθεση να στηρίζεται από τη διεθνή κοινότητα.

## **Κεφάλαιο 2**

-

### **Αειφορία, Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας και Σύγχρονες Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας**

#### **2.1 Αειφορία και Βιώσιμη Ανάπτυξη**

Το 2019, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (Commission, 2019) [7], ένα νέο σχέδιο που αποσκοπεί στην εξάλειψη εκπομπών αερίων θερμοκηπίου έως το 2050 και υποστήριξη μιας οικονομίας ανεξάρτητης από πόρους. Οι παγκόσμιες ανησυχίες, όπως η υπερθέρμανση του πλανήτη και η κλιματική αλλαγή, η σύγκρουση Ρωσίας-Ουκρανίας και η πανδημία του κορωνοϊού, δείχνουν την ανάγκη για μια στροφή από τα συστήματα που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, στη βιοενέργεια και τα βιοπροϊόντα προκειμένου να επιτύχουμε στόχους βιώσιμης ανάπτυξης. Μια τέτοια μετατόπιση πρέπει να σχεδιαστεί σχολαστικά, λαμβάνοντας υπόψη το μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των διαφόρων στοιχείων αυτών των συστημάτων.

Στο ίδιο πνεύμα στις 25 Σεπτεμβρίου 2015, οι 193 χώρες της Γενικής Συνέλευσης των Ηνωμένων Εθνών υιοθέτησαν την Αναπτυξιακή Ατζέντα 2030 με τίτλο «Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development». Η εφαρμογή των SDGs (Sustainable Development Goals) ξεκίνησε παγκοσμίως το 2016. Το 2019, ο Αντόνιο Γκουτέρες (Γενικός Γραμματέας των Ηνωμένων Εθνών) εξέδωσε μια παγκόσμια έκκληση για μια δεκαετία δράσης για την επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης έως το 2030. Αυτή η δεκαετία θα διαρκέσει από το 2020 έως το 2030. Το σχέδιο είναι ότι ο γενικός γραμματέας του ΟΗΕ θα συγκαλεί μια ετήσια πλατφόρμα για την καθοδήγηση της Δεκαετίας της Δράσης. Ωστόσο, οι SDGs δεν είναι νομικά δεσμευτικοί και έχουν σχεδιαστεί σκόπιμα για να παρέχουν πολλά περιθώρια ελευθερίας στους φορείς. Επομένως, μπορούν να ερμηνεύσουν τους στόχους διαφορετικά και συχνά ανάλογα με τα ενδιαφέροντα τους.



Εικόνα 1 Οι 17 Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης ένας εκ των οποίων (στόχος 7 : Affordable and Clean Energy) έχει άμεση σχέση με τη διαχείριση της ενέργειας και τουλάχιστον άλλοι 3 στόχοι (συγκεκριμένα οι 6,11 και 13) έμμεση σχέση , Πηγή : UN

## 2.2 Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας

Η παγκόσμια υιοθέτηση εναλλακτικών λύσεων ανανεώσιμης ενέργειας αυξάνεται ραγδαία ως απάντηση στην αυξανόμενη περιβαλλοντική κρίση που προκαλείται από τις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας διαθέτουν τεράστιες δυνατότητες λόγω της ικανότητας τους να παράγουν ενέργεια χωρίς να απελευθερώνουν ρυπογόνες εκπομπές που συμβάλουν στο φαινόμενο θερμοκηπίου.

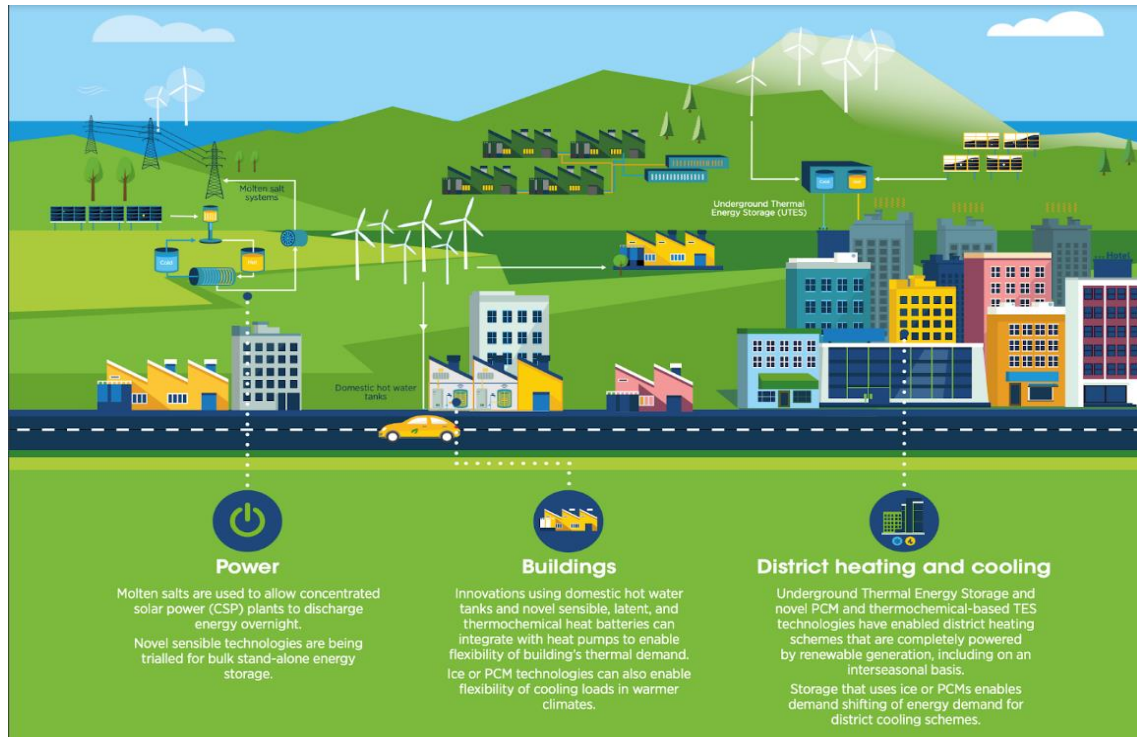
Σύμφωνα με πρόσφατη έρευνα του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA), υπάρχει μια πολλά υποσχόμενη αύξηση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, με προβλεπόμενη αύξηση άνω του 8% και αναμενόμενο επίπεδο παραγωγής 8.300 TWh το 2021. Επιπλέον, για ευθυγράμμιση με τους στόχους της Συμφωνίας του Παρισιού, η οποία στοχεύει να περιορίσει τη μέση αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας κάτω από τους 2°C, ο Διεθνής Οργανισμός Ανανεώσιμων

Πηγών Ενέργειας (IRENA) πρότεινε ότι το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας πρέπει να φθάσει το 57% έως το 2030. Ο τομέας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει ήδη επιτύχει ένα αξιοσημείωτο ορόσημο, αντιπροσωπεύοντας το 30% του μείγματος παραγωγής ενέργειας το 2021, με τις ηλιακές φωτοβολταϊκές και αιολικές πηγές ενέργειας να συμβάλλουν σημαντικά, συμβάλλοντας περίπου στα δύο τρίτα της συνολικής αύξησης της παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εκτιμώμενη αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές κατά περίπου 18% και 17%, αντίστοιχα.

Οι 4 σημαντικότερες τεχνολογίες αποθήκευσης ανανεώσιμης ενέργειας σήμερα είναι:

- Η αντλούμενη υδροηλεκτρική ενέργεια, που περιλαμβάνει την άντληση νερού σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ενέργειας. Το νερό αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή και, σε περιόδους μεγάλης ζήτησης, απελευθερώνεται μέσω στροβίλων για τη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας. Η υδροηλεκτρική ενέργεια συμπεριλαμβανομένης της αντλίας αποθήκευσης αναμένεται να παραμείνει η μεγαλύτερη πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στον κόσμο, σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA). Χρησιμοποιεί την κίνηση του νερού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και διαδραματίζει «κρίσιμο» ρόλο, λέει ο IEA, στην απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι επίσης βασικό για την κάλυψη των κενών στη ζήτηση ενέργειας (World Economic Forum).
- Οι μπαταρίες, που υπάρχουν από το 1800 και μετατρέπουν την αποθηκευμένη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Η πρόοδος στην τεχνολογία και η πτώση των τιμών σημαίνουν ότι οι εγκαταστάσεις μπαταριών κλίμακας δικτύου (grid scale battery facilities) μπορούν να αποθηκεύουν όλο και μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας (World Economic Forum).
- Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας, που χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε κτίρια και βιομηχανικές διεργασίες. Περιλαμβάνει την αποθήκευση περίσσειας ενέργειας – συνήθως πλεονάζουσας ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ή σπατάλη θερμότητας – που θα χρησιμοποιηθεί αργότερα για θέρμανση, ψύξη ή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υγρά όπως το νερό ή στερεά υλικά (άμμος ή βράχοι) μπορούν να αποθηκεύσουν θερμική ενέργεια. Χημικές αντιδράσεις ή αλλαγές στα υλικά

μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση και την απελευθέρωση θερμικής ενέργειας.



Εικόνα 2 Οι τεχνολογίες θερμικής ενέργειας επιτρέπουν την αποθήκευση ανανεώσιμης ενέργειας και τη χρήση της αργότερα για θέρμανση και ψύξη, Πηγή : World Economic Forum

- Η μηχανική αποθήκευση ενέργειας, που αξιοποιεί την κίνηση ή τη βαρύτητα για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, ένας σφόνδυλος είναι μια περιστρεφόμενη μηχανική συσκευή που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση περιστροφικής ενέργειας που μπορεί να κληθεί στιγμιαία. Άλλα μηχανικά συστήματα περιλαμβάνουν την αποθήκευση ενέργειας πεπιεσμένου αέρα, η οποία χρησιμοποιείται από τη δεκαετία του 1870 για την παροχή ενέργειας κατά παραγγελία για πόλεις και βιομηχανίες. Η διαδικασία περιλαμβάνει την αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα ή αερίου και στη συνέχεια τη θέρμανση και την επέκτασή του σε έναν στρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας όταν αυτό χρειάζεται.

### 2.3 Σύγχρονες Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας

Τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εξαρτώνται από φυσικούς πόρους όπως ο ήλιος, ο άνεμος, το νερό και η γεωθερμία, οι οποίοι είναι εγγενώς

απρόβλεπτοι και κυμαίνονται με βάση τα καιρικά πρότυπα, τις εποχές και τα χρόνια. Λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα που χαρακτηρίζει την παραγωγή τους, η ανανεώσιμη ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί με συνεπή και ελεγχόμενο τρόπο, κατά τις απαιτήσεις της εκάστοτε περίπτωσης.

Τον περασμένο αιώνα, πολλοί ερευνητές από όλο τον κόσμο συνέβαλαν σημαντικά στην ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας που είναι αρκετά αποτελεσματικές για να αντιμετωπίσουν την κλιμακούμενη ενεργειακή ζήτηση και τις τεχνολογικές εξελίξεις. Η Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας (EES) έχει θεωρηθεί ότι αλλάζει τα δεδομένα ως προς την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων με μια σειρά από τεχνολογίες που έχουν μεγάλες δυνατότητες. Σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ, η καταλληλότητα μιας τεχνολογίας αποθήκευσης καθορίζεται κυρίως από την ισχύ και την ενεργειακή της χωρητικότητα και τον ρυθμό με τον οποίο μπορούν να αποθηκευτούν και να παραδοθούν. Άλλα χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η αποδοτικότητα μετ' επιστροφής, η διάρκεια ζωής, η ημερολογιακή διάρκεια, η ασφάλεια, η αξιοπιστία, η επίδραση στο περιβάλλον και ο ρυθμός ράμπας (πόσο γρήγορα η τεχνολογία μπορεί να ανταποκριθεί σε μια εντολή).

Το ηλεκτρικό δίκτυο έχει γίνει αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης κοινωνίας. Παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε εκατομμύρια ανθρώπους καθημερινά και τροφοδοτεί διάφορες βιομηχανίες και επιχειρήσεις. Ωστόσο, το δίκτυο αντιμετωπίζει προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένης της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της ανάγκης για αυξημένη ευελιξία και αξιοπιστία. Μια λύση σε αυτές τις προκλήσεις είναι η χρήση ESS στο δίκτυο. Οι Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας (EST) χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για να ενισχύσουν τη σταθερότητα και την αξιοπιστία των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Οι EST μπορούν να βοηθήσουν στον μετριασμό της μεταβλητότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στη βελτίωση της ποιότητας ισχύος και στην παροχή εφεδρικής ισχύος κατά τη διάρκεια διακοπών. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς οι EST μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές όπως ο άνεμος και η ηλιακή ενέργεια. Αυτή η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιόδους χαμηλής παραγωγής, όπως όταν επικρατεί έλλειψη ανέμου ή ήλιου.

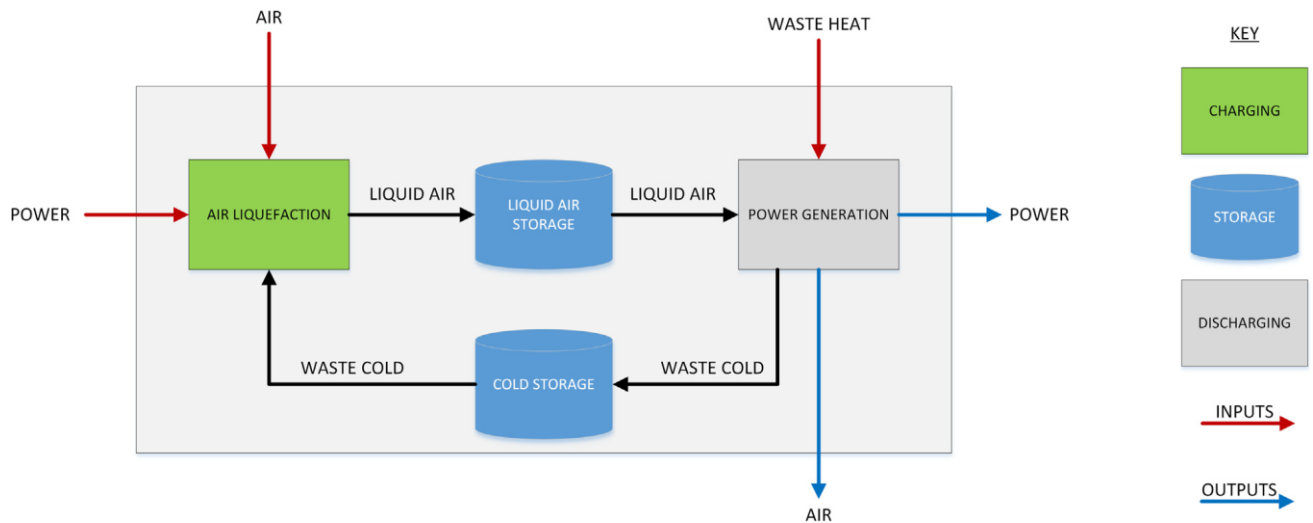
Οι EST μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση της ζήτησης αιχμής στο δίκτυο. Αποθηκεύοντας ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και απελευθερώνοντάς την σε περιόδους υψηλής ζήτησης, τα EST μπορούν να βοηθήσουν στην εξισορρόπηση του δικτύου και στην αποφυγή της ανάγκης για ακριβές μονάδες αιχμής. Οι EST μπορούν να βοηθήσουν στη διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου παρέχοντας υπηρεσίες ρύθμισης συχνότητας. Φορτίζοντας και αποφορτίζοντας τις μπαταρίες όπως απαιτείται, οι EST μπορούν να βοηθήσουν στην εξισορρόπηση της συχνότητας του δικτύου και να αποτρέψουν τις διακοπές ρεύματος. Οι EST μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία μικροδικτύων, τα οποία είναι μικρής κλίμακας ισχύος

Πολλοί συγγραφείς έχουν ερευνήσει τις ESTs στη βιβλιογραφία λόγω του εκτεταμένου φάσματος εφαρμογών και ποικιλίας τους. Ωστόσο, αυτές οι ανασκοπήσεις συχνά παρουσιάζουν περιορισμούς σχετικά με τους τύπους τεχνολογιών που καλύπτονται. Ορισμένες αξιολογήσεις επικεντρώνονται αποκλειστικά στα EESS, ενώ αγνοούν την ύπαρξη συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ή χημικής ενέργειας. Υπάρχουν μόνο μερικές ανασκοπήσεις στη βιβλιογραφία που παρέχουν μια ολοκληρωμένη επισκόπηση όλων των σημαντικών διαθέσιμων ESS. Προηγούμενη έρευνα (Byers & Botterud, 2020; Fan, et al., 2022; Doroudchi, et al., 2022) [8,9,10] παρουσίασε μια επισκόπηση διαφόρων EST, ακολουθούμενη από λεπτομερή σύγκριση με βάση τεχνικά και οικονομικά δεδομένα, ενώ άλλες μελέτες (Khaleel, et al., 2022) [11] πρόσφεραν μια τεχνολογική, οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση μηχανικών, ηλεκτροχημικών και χημικών συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Μελέτες (Gao, et al., 2021; Khaleel, et al., 2023; Gür, 2018) [12,13,14] έχουν δείξει πολλές κατηγοριοποιήσεις EST, συγκρίσεις, εφαρμογές και πρόσφατες εξελίξεις.

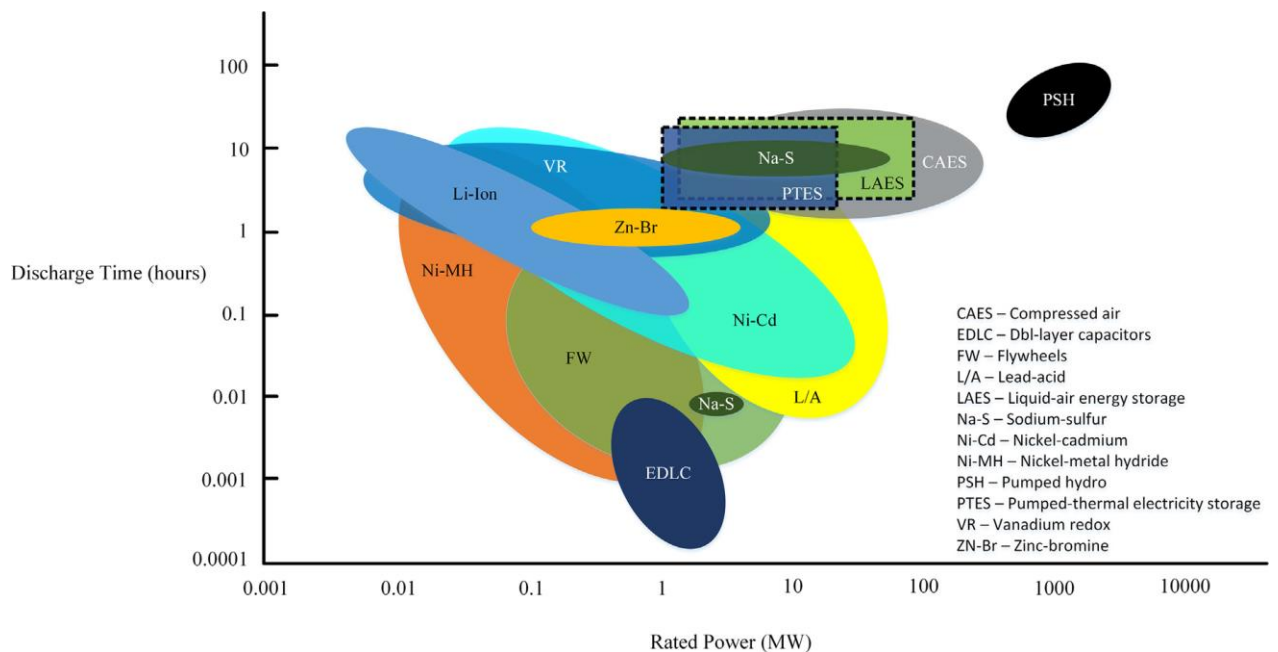
Το σύστημα (LAES), μια τεχνολογία που αναπτύχθηκε από την Highview Power Storage, υγροποιεί τον αέρα στους  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  περίπου με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας και το αποθηκεύει σε σχεδόν ατμοσφαιρική πίεση σε μονωμένα δοχεία αποθήκευσης, επομένως αποθηκεύει αποτελεσματικά ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή ψυχρού υγρού αέρα. Όταν χρειάζεται ηλεκτρική ενέργεια, ο υγρός αέρας υπόκειται σε πίεση, θερμαίνεται από την έκθεση σε θερμότητα περιβάλλοντος ή ακόμη και σε υψηλότερη θερμοκρασία που παρέχεται από την αποβαλλόμενη θερμότητα, και τελικά



επεκτείνεται μέσω ενός στροβίλου για την παραγωγή ενέργειας (Centre for Low Carbon Futures, 2013 May. Report No. 021) [15].



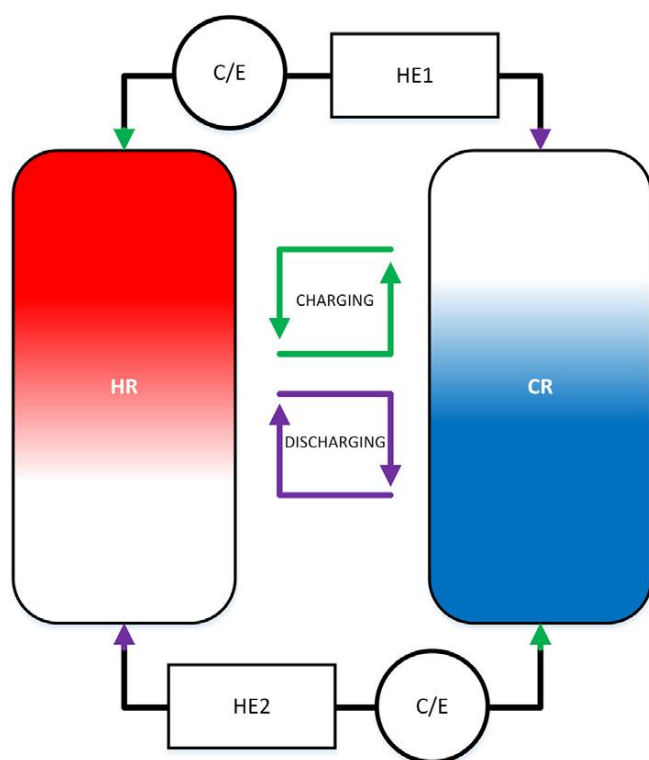
Εικόνα 3 Αναπαράσταση συστήματος LAES και ροές υλικών/ενέργειας. Πηγή : (Morgan, et al., 2015)



Εικόνα 4 Σύγκριση εφαρμογών για διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας με την προσθήκη τεχνολογίας PTES και LAES για εμπορική εφαρμογή, Πηγή : Energy Storage Association (ESA)

Το σύστημα PTES (αναφέρεται επίσης ως «αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με αντλία θερμότητας» ή PHES, στη βιβλιογραφία) είναι μια άλλη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας που προτάθηκε πρόσφατα που αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή αισθητής θερμότητας σε μονωμένα δοχεία αποθήκευσης που περιέχουν κατάλληλο μέσο αποθήκευσης, όπως συσκευασμένο στρώμα από χαλίκι ή βότσαλα

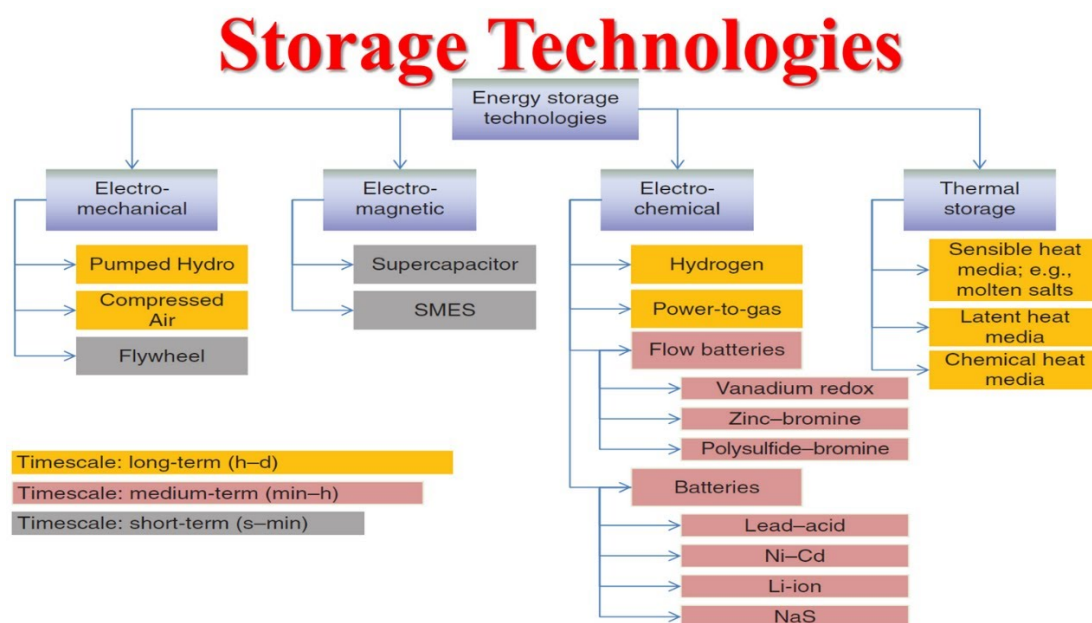
(White, et al., 2013) [16]. Το PTES περιλαμβάνει κυρίως δύο θερμές/κρύες θερμικές δεξαμενές (HR,CR) σε διαφορετικές πιέσεις, δύο συσκευές συμπίεσης/διαστολής (C,E) και δύο εναλλάκτες θερμότητας (HE1, HE2). Εκτελείται ένα σύστημα αντίστροφης και προώθησης Joule-Brayton, για φόρτιση και εκφόρτιση αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια της περιόδου φόρτισης, μια αντλία θερμότητας υψηλής αναλογίας πίεσης λειτουργεί με ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η διαδικασία αφαιρεί τη θερμότητα από το κρύο δοχείο και παρέχει θερμότητα στο θερμό δοχείο. Κατά την περίοδο απόρριψης, η κατεύθυνση ροής του ρευστού εργασίας αντιστρέφεται εντός του συστήματος, και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο δεξαμενών χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση ενός κύκλου θερμικής μηχανής Joule-Brayton προκειμένου να παράγουν έργο και στη συνέχεια ηλεκτρική ενέργεια (White, et al., 2013; Morgan, et al., 2015) [16,17].



Εικόνα 5 Διαμόρφωση συστήματος PTES με κύρια εξαρτήματα. Πηγή : (Sciacovelli, et al., 2017)

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES) έχουν σχεδιαστεί ειδικά για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας μέσω μιας σειράς μεθόδων, όπως ψύξη, θέρμανση, τήξη, συμπύκνωση ή εξάτμιση μιας ουσίας. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα συστήματα TES αποθηκεύονται σε μονωμένο χώρο αποθήκευσης είτε σε υψηλές είτε σε χαμηλές θερμοκρασίες, ανάλογα με το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας (White, 2011; Turton, et al., 2013) [18,19]. Η ενέργεια που ανακτάται από αυτά τα υλικά

χρησιμοποιείται στη συνέχεια για διάφορες οικιακές και βιομηχανικές εφαρμογές, όπως θέρμανση ή ψύξη χώρων, παραγωγή ζεστού νερού ή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ανάλογα με το εύρος θερμοκρασίας. Τα συστήματα TES χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς, όπως βιομηχανική ψύξη κάτω από  $-18^{\circ}\text{C}$ , ψύξη κτιρίων μεταξύ  $0$  και  $12^{\circ}\text{C}$ , θέρμανση κτιρίων μεταξύ  $25$  και  $50^{\circ}\text{C}$  και αποθήκευση βιομηχανικής θερμότητας πάνω από  $175^{\circ}\text{C}$  (Lemmens, 2016; Hewitt & Pugh, 2007) [20,21]. Τα συστήματα TES κατηγοριοποιούνται σε δύο ομάδες με βάση τη θερμοκρασία λειτουργίας του υλικού αποθήκευσης ενέργειας σχετικά με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, συγκεκριμένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας (LTES) και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας υψηλής θερμοκρασίας (HTES).



Εικόνα 6 Διάφορες Κατηγορίες Αποθήκευσης Ενέργειας με ενδείξεις σχετικά με το χρόνο αποθήκευσης (μακροπρόθεσμη, μεσοπρόθεσμη και βραχυπρόθεσμη αποθήκευση), Πηγή : Power System Operation

Η τεχνολογία μηχανικής αποθήκευσης ενέργειας (MES) λειτουργεί μετατρέποντας ενέργεια μεταξύ μηχανικής και ηλεκτρικής μορφής. Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, η ηλεκτρική ενέργεια από την πηγή ενέργειας μετατρέπεται και αποθηκεύεται ως μηχανική ενέργεια με τη μορφή δυναμικής ή κινητικής ενέργειας. Αυτή η αποθηκευμένη μηχανική ενέργεια στη συνέχεια μετατρέπεται ξανά σε ηλεκτρική ενέργεια κατά τις ώρες αιχμής. Τα συστήματα MES μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 4 διαφορετικούς τύπους: το PHES που αναφέρθηκε παραπάνω, αποθήκευση ενέργειας με βαρύτητα (GES), αποθήκευση ενέργειας πεπιεσμένου αέρα

(CAES) και αποθήκευση ενέργειας σφονδύλου<sup>1</sup> (FES). Τα συστήματα PHES, GES και CAES αποθηκεύουν δυναμική ενέργεια, ενώ τα συστήματα FES αποθηκεύουν κινητική ενέργεια. Το βασικό πλεονέκτημα του συστήματος MES είναι η ικανότητα του να μετατρέπει και να απελευθερώνει γρήγορα την αποθηκευμένη μηχανική ενέργεια.

Προηγούμενη μελέτη έδειξε ότι οι πρώτες μονάδες PHES κατασκευάστηκαν στις αλπικές περιοχές της Ελβετίας, της Αυστρίας και της Ιταλίας τη δεκαετία του 1890. Τα πρώτα εργοστάσια PHES χρησιμοποιούσαν ξεχωριστά στροφεία αντλιών και γεννήτριες στροβίλων. Ωστόσο, ένας νέος σχεδιασμός εισήχθη στη δεκαετία του 1950 που ενσωμάτωσε μια ενιαία αναστρέψιμη μονάδα αντλίας-στροβίλου, η οποία στη συνέχεια έγινε ο προτιμώμενος σχεδιασμός για τις εγκαταστάσεις PHES. Η ανάπτυξη του PHES ήταν αρχικά αργή μέχρι τη δεκαετία του 1960, αλλά από τη δεκαετία του 1960 έως τα τέλη της δεκαετίας του 1980, παρατηρήθηκε σημαντική πρόοδος, κυρίως λόγω της ανάπτυξης πυρηνικών σταθμών παραγωγής ενέργειας, οι οποίες συμπληρώθηκαν από την ευελιξία του PHES. Κατά τη δεκαετία του 1990, η παγκόσμια ανάπτυξη του PHES επιβραδύνθηκε σημαντικά, κυρίως λόγω της σπανιότητας και του κορεσμού κατάλληλων και οικονομικά αποδοτικών γεωγραφικών τοποθεσιών, καθώς και της επιβράδυνσης της πυρηνικής ανάπτυξης. Από το 2000, πολυάριθμες μονάδες PHES έχουν κατασκευαστεί σε όλη την Ευρώπη, ιδιαίτερα στη Γερμανία και την Αυστρία. Το PHES αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις που σχετίζονται με τη διακύμανση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε διαφορετικές ώρες της ημέρας, ιδιαίτερα για τους μεγάλους θερμικούς και πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Αρχικά, οι μονάδες PHES κατασκευάστηκαν ως εργαλείο συστήματος για την παροχή ενέργειας κατά τη ζήτηση αιχμής και την υποστήριξη σταθμών ηλεκτροπαραγωγής βασικού φορτίου να λειτουργούν με υψηλή απόδοση σε περιόδους χαμηλής ζήτησης.

Το σύστημα αποθήκευσης PHES είναι το πιο ευρέως εφαρμοσμένο σύστημα MES λόγω της σημαντικής ενεργειακής του χωρητικότητας, της παρατεταμένης περιόδου αποθήκευσης και της υψηλής απόδοσης. Ένα τυπικό σύστημα PHES

---

<sup>1</sup> Ο σφόνδυλος ή βολάν είναι ένας αρκετά βαρύς μεταλλικός δίσκος στο ένα (οπίσθιο) άκρο του στροφαλοφόρου. Αποθηκεύει ενέργεια από τον ωφέλιμο χρόνο της εκτόνωσης και στη συνέχεια την προσφέρει για να πραγματοποιηθούν οι υπόλοιποι τρεις παθητικοί χρόνοι (της εισαγωγής, της συμπίεσης και της εξαγωγής). Επίσης ομαλοποιεί την περιστροφική κίνηση του στροφαλοφόρου αντιστεκόμενος σε κάθε αύξηση ή ελάττωση της ταχύτητας περιστροφής

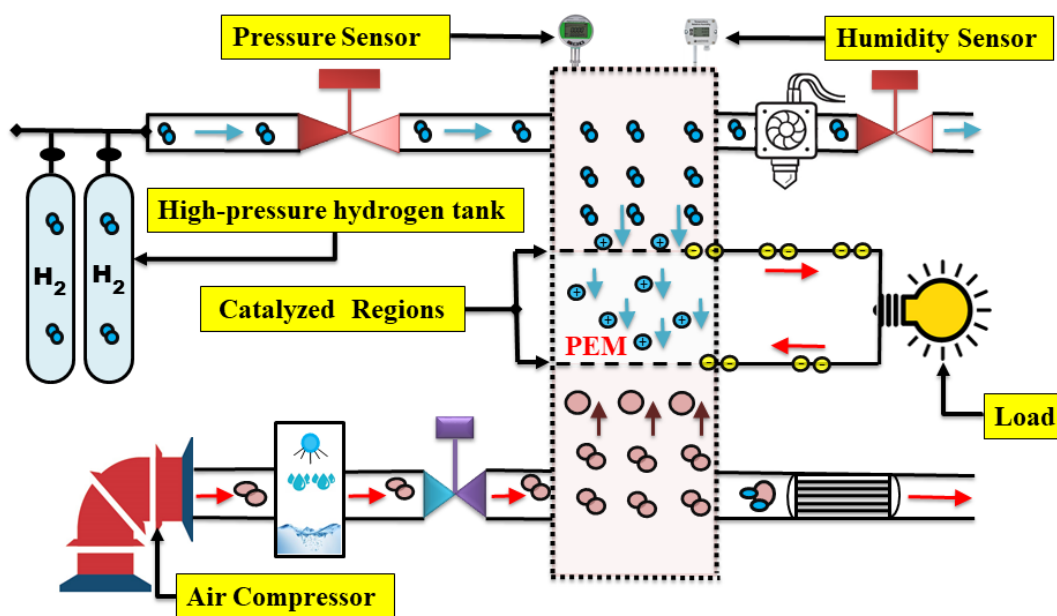
περιλαμβάνει δύο μεγάλες δεξαμενές που βρίσκονται σε διαφορετικά υψόμετρα, μια μονάδα άντλησης νερού που μεταφέρει νερό από την κάτω δεξαμενή στην επάνω δεξαμενή και μια τουρμπίνα που παράγει ηλεκτρική ενέργεια καθώς το νερό ρέει πίσω από την υψηλότερη στην κάτω δεξαμενή. Κατά τις ώρες εκτός αιχμής (διαδικασία φόρτισης), η ηλεκτρική ενέργεια από την πηγή ισχύος μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε δυναμική ενέργεια αντλώντας και αποθηκεύοντας νερό από την κάτω δεξαμενή στην επάνω δεξαμενή μέσω της αντλίας. Κατά τις ώρες αιχμής (διαδικασία εκφόρτισης), το αποθηκευμένο νερό από την άνω δεξαμενή απελευθερώνεται πίσω στην κάτω δεξαμενή, προκαλώντας την περιστροφή των στρόβιλων και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω γεννητριών. Με τη μεταφορά νερού μεταξύ δύο δεξαμενών σε διαφορετικά υψόμετρα, το PHES αποθηκεύει και παράγει ενέργεια με τη μορφή δυναμικής ενέργειας. Η ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται στις δεξαμενές και η υψομετρική διαφορά καθορίζουν την ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας.

Το σύστημα GES έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στην αποθήκευση αντλούμενης υδροενέργειας (PHES) λόγω των γεωλογικών περιορισμών και των απαιτήσεων νερού που σχετίζονται με το τελευταίο. Το σύστημα GES αποθηκεύει ενέργεια σηκώνοντας ένα έμβολο ή οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο με την απαιτούμενη μάζα χρησιμοποιώντας νερό και στη συνέχεια ρίχνοντας το έμβολο για να σπρώξει το νερό πίσω μέσω υδροηλεκτρικών γεννητριών όταν απαιτείται ρεύμα. Αυτή η ιδέα αποθήκευσης, γνωστή ως μονάδα ισχύος βαρύτητας, προτάθηκε από τη δύναμη βαρύτητας, LLC. Το εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας αποτελείται από αντλία, στρόβιλο και κινητήρα/γεννήτρια. Κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης, η ηλεκτρική ενέργεια εκτός αιχμής τροφοδοτεί τον κινητήρα/γεννήτρια, η οποία οδηγεί την αντλία και μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική.

Τα συστήματα αποθήκευσης χημικής ενέργειας (CES) είναι κατάλληλα για τη μακροπρόθεσμη αποθήκευση χημικής ενέργειας, η οποία αποθηκεύεται στους χημικούς δεσμούς μεταξύ ατόμων και μορίων υλικών. Η αποθηκευμένη χημική ενέργεια απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια χημικών αντιδράσεων, οδηγώντας σε αλλαγές στη σύνθεση των υλικών καθώς οι αρχικοί χημικοί δεσμοί σπάνε και δημιουργούνται νέοι. Επί του παρόντος, τα χημικά καύσιμα αποτελούν την πρωταρχική πηγή ενέργειας τόσο για τον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όσο και για

τις μεταφορές παγκοσμίως. Τα κοινά χημικά καύσιμα περιλαμβάνουν άνθρακα, βενζίνη, καύσιμο ντίζελ, φυσικό αέριο, υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG), προπάνιο, βουτάνιο, αιθανόλη και υδρογόνο. Αυτές οι χημικές ουσίες μετατρέπονται πρώτα σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα CES περιλαμβάνουν συνήθως συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου, συνθετικού φυσικού αερίου και ηλιακών καυσίμων.

Σε αυτό το πλαίσιο, το υδρογόνο θεωρείται ένας εξαιρετικός φορέας ενέργειας καθώς είναι ένας καθαρός φορέας χημικής ενέργειας που είναι απαλλαγμένος από εκπομπές άνθρακα. Η παραγωγή του μπορεί να επιτευχθεί με ηλεκτρόλυση νερού ή φωτοκαταλυτική διάσπαση νερού με άμεσο ηλιακό φως. Ένα τυπικό ενεργειακό σύστημα υδρογόνου αποτελείται από τρία κύρια στοιχεία. Αυτά περιλαμβάνουν (i) μια μονάδα παραγωγής υδρογόνου, όπως μια ηλεκτρόλυση, που μετατρέπει την εισροή ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο, (ii) ένα σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου και (iii) μια μονάδα μετατροπής ενέργειας υδρογόνου, όπως μια κυψέλη καυσίμου (FC) ή αναγεννητικό FC, το οποίο μετατρέπει την αποθηκευμένη χημική ενέργεια στο υδρογόνο ξανά σε ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 7 Κυψέλες καυσίμου με πρόσθετα εξαρτήματα , Πηγή : (Khaleel, et al., 2022) [11]

Κατά τη διαδικασία φόρτισης, η υπερβολική ισχύς χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου από το νερό μέσω ηλεκτρόλυσης, το οποίο στη συνέχεια

αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή αποθήκευσης. Όταν η διαθεσιμότητα ισχύος είναι περιορισμένη κατά τις ώρες αιχμής, η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από το αποθηκευμένο υδρογόνο χρησιμοποιώντας κυψέλες καυσίμου κατά τη διάρκεια του κύκλου εκφόρτισης. Η ηλεκτρόλυση, μια διαδικασία που χρησιμοποιεί έναν ηλεκτρόλυτη, χρησιμοποιείται για τη διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο. Στη συνέχεια, το οξυγόνο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, ενώ το υδρογόνο αποθηκεύεται στη δεξαμενή αποθήκευσης. Επιπλέον, μια κυψέλη καυσίμου αποτελείται από τέσσερα κύρια στοιχεία: μια άνοδο, μια κάθοδο, έναν ηλεκτρολύτη και ένα εξωτερικό κύκλωμα. Στην άνοδο, το υδρογόνο οξειδώνεται σε πρωτόνια (θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου) και ηλεκτρόνια για να οδηγήσει την κυψέλη καυσίμου. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου από την άνοδο μεταφέρονται στο ηλεκτρόδιο οξυγόνου μέσω του ηλεκτρολύτη. Η αντίδραση οξυγόνου, ιόντων υδρογόνου και ηλεκτρονίων στην κάθοδο παράγει νερό και θερμότητα. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, τα ηλεκτρόνια ρέουν από την άνοδο προς την κάθοδο μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, με αποτέλεσμα τη ροή ρεύματος και, τελικά, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα συστήματα ηλεκτροχημικής αποθήκευσης ενέργειας (ECES) είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, που λειτουργούν κυρίως μέσω τριών βασικών διεργασιών. Το ECES ταξινομείται κυρίως σε δύο κατηγορίες: (α) συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας (BES), στα οποία το φορτίο αποθηκεύεται μέσα στα ηλεκτρόδια και (β) συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας ροής (FBES), στα οποία το φορτίο αποθηκεύεται πρώτα στο καύσιμο και στη συνέχεια τροφοδοτείται εξωτερικά στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Εκτός από αυτά τα δύο παραδοσιακή αποθήκευση ενέργειας τεχνολογίες, εκτεταμένη έρευνα διεξάγεται στις δυνατότητες ηλεκτροχημικής αποθήκευσης για την αντιμετώπιση της αυξανόμενης ζήτησης για ελαφριές, συμπαγείς και ευέλικτες ηλεκτρονικές συσκευές. Προς αυτή την κατεύθυνση, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας (BES) είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Περιλαμβάνουν πολλαπλά στοιχεία, καθένα από τα οποία περιλαμβάνει τρία θεμελιώδη συστατικά, δηλαδή δύο ηλεκτρόδια - μια άνοδο και μια κάθοδο - και έναν ηλεκτρολύτη. Τα συστήματα BES ταξινομούνται ευρέως σε πρωτεύουσες και δευτερεύουσες μπαταρίες. Ενώ οι πρωτεύουσες μπαταρίες έχουν σχεδιαστεί για μία χρήση και δεν μπορούν να επαναφορτιστούν όταν εξαντληθεί το χημικό, οι

δευτερεύουσες μπαταρίες προορίζονται να είναι επαναφορτιζόμενες. Ανάλογα με το ηλεκτρόδιο και το υλικό του ηλεκτρολύτη, οι δευτερεύουσες μπαταρίες ταξινομούνται ως μπαταρίες μολύβδου-οξέος (LA), ιόντων λιθίου, νικελίου-καδμίου (Ni-Cd), θείου νατρίου (NaS), ιόντων νατρίου (ιόντος Na) και μετάλλου -μπαταρίες αέρα. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος (LA), οι οποίες εφευρέθηκαν το 1859, είναι οι παλαιότερες και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες ηλεκτροχημικές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας. Αυτές οι μπαταρίες αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια, μια μεταλλική άνοδο μολύβδου και μια κάθοδο διοξειδίου του μολύβδου, βυθισμένα σε έναν ηλεκτρολύτη που αποτελείται από 37% θειικό οξύ και 63% νερό. Τα δύο ηλεκτρόδια χωρίζονται από έναν πορώδες διαχωριστή που εμποδίζει την άμεση ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο προς την κάθοδο. Κατά τη διάρκεια του κύκλου εκφόρτισης, και τα δύο ηλεκτρόδια καλύπτονται με θειικό μόλυβδο και ο ηλεκτρολύτης ανάγεται σε νερό. Κατά τη φόρτιση, και τα δύο ηλεκτρόδια επιστρέφουν στην αρχική τους κατάσταση. Οι μπαταρίες LA ταξινομούνται σε δύο τύπους, συγκεκριμένα με πλημμυρισμένο μολύβδο-οξέος (FLA) και ρυθμιζόμενο με βαλβίδα-οξέος μολύβδου (VRLA), που λειτουργούν και οι δύο με την ίδια αρχή. Ωστόσο, οι μπαταρίες VRLA κατασκευάζονται διαφορετικά και είναι γενικά σφραγισμένες με μια βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης για να αποτρέπεται η είσοδος αέρα στις κυψέλες.

Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (EES) αποθηκεύουν ενέργεια σε ένα ηλεκτρικό πεδίο χωρίς να τη μετατρέπουν σε άλλες μορφές ενέργειας. Τα συστήματα EES μπορούν να ταξινομηθούν ευρέως σε δύο κατηγορίες: ηλεκτροστατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και συστήματα μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας. Παραδείγματα συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτροστατικής ενέργειας περιλαμβάνουν πυκνωτές και υπερπυκνωτές, ενώ η αποθήκευση υπεραγωγικής μαγνητικής ενέργειας (SMES) αντιπροσωπεύει έναν τύπο συστήματος αποθήκευσης μαγνητικής ενέργειας. Ένας πυκνωτής, όταν φορτίζεται, αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτροστατικό πεδίο. Αποτελείται από δύο μεταλλικές πλάκες σε κοντινή απόσταση που χωρίζονται από ένα διηλεκτρικό στρώμα κατασκευασμένο από μη αγωγικό υλικό. Κατά τη λειτουργία, όταν εφαρμόζεται μια πηγή τάσης στις μεταλλικές πλάκες, η μία πλάκα φορτίζεται με ηλεκτρισμό, ενώ το αντίθετο πρόσημο προκαλεί την άλλη πλάκα. Η χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας ενός πυκνωτή εξαρτάται από το μέγεθος και την απόσταση μεταξύ των αγωγίμων



πλακών. Λόγω της χαμηλής ενεργειακής τους πυκνότητας, οι πυκνωτές μπορούν να χειριστούν υψηλά ρεύματα μόνο για σύντομες περιόδους.

Οι υπερπυκνωτές, που αναφέρονται επίσης ως ηλεκτρικοί πυκνωτές διπλής στρώσης (EDLC) ή υπερπυκνωτές αποτελούνται από δύο αγώγιμα ηλεκτρόδια, έναν ηλεκτρολύτη και έναν διαχωριστή. Αποθηκεύουν ενέργεια με τη μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου που προκύπτει από μια τάση ρεύματος DC που παρέχεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που χωρίζονται από ένα λεπτό μονωτικό ή διηλεκτρικό υλικό. Τα δύο ηλεκτρόδια, που αποτελούνται από ενεργό άνθρακα, παρέχουν μεγαλύτερη επιφάνεια, με αποτέλεσμα υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα. Μια πορώδης μεμβράνη χωρίζει τα δύο ηλεκτρόδια, επιτρέποντας στα φορτισμένα ιόντα να κινούνται ελεύθερα, αποτρέποντας παράλληλα την ηλεκτρονική επαφή μεταξύ τους. Όταν τα ηλεκτρόδια φορτίζονται από μια εφαρμοζόμενη τάση συνεχούς ρεύματος, τα ιόντα στον ηλεκτρολύτη διαχέονται στους πόρους του ηλεκτροδίου με αντίθετο φορτίο.

#### **2.4 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες**

Η μεταβλητότητα, η διαθεσιμότητα και η αβεβαιότητα του ανέμου, η ταχύτητα και η ηλιακή ακτινοβολία είναι οι κύριες προκλήσεις σήμερα για το ηλεκτρικό δίκτυο. Ορισμένα περιστατικά, όπως το φαινόμενο duck curve, διακυμάνσεις τάσης, προβλήματα στην προστασία του συστήματος με αντίστροφες ροές ισχύος, σταθερότητα συστήματος και αξιοπιστία, είναι μερικές από τις συνέπειες που έχουμε χρησιμοποιώντας ΑΠΕ. Μια σημαντική ανησυχία είναι ο διαλείπων άνεμος, ο οποίος οδηγεί σε μη διαθεσιμότητα σε περιόδους υψηλής ζήτησης ή υψηλή διαθεσιμότητα σε περιόδους χαμηλότερης ζήτησης, αναγκάζοντας την περικοπή παραγωγής ή φορτίου. Στην περίπτωση της ηλιακής ενέργειας, τα σύννεφα μπορούν να καλύψουν τα φωτοβολταϊκά (PV) πάνελ παράγουν παρόμοια προβλήματα. Ως εκ τούτου, η υψηλή συμπερίληψη των ΑΠΕ έχει καταστήσει το ηλεκτρικό δίκτυο σε μεγάλη εξάρτηση από τον καιρό, που εμποδίζει την αφαίρεση συμβατικών μονάδων από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Η αποθήκευση είναι μια φυσική εναλλακτική για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ενέργειας διαθεσιμότητα από ΑΠΕ. Λειτουργώντας ως εφεδρική πηγή, Η αποθήκευση μπορεί να

μειώσει την εξάρτηση από τα συμβατικά μονάδες με την αποθήκευση περίσσειας ενέργειας σε περιόδους πλεονάσματος από ΑΠΕ. Η χρήση της αποθήκευσης με τη βοήθεια μπαταριών, ή όπως αναφέρεται στην ξένη βιβλιογραφία Battery Energy Storage Systems (BESS), που αποτελείται από πολλαπλά κελιά συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα για τη δημιουργία της επιθυμητής τάσης και χωρητικότητας, είναι λοιπόν ύψιστης σημασίας μαζί με όλα τα συστήματα αποθήκευσης που προαναφέρθηκαν. Τα BESS έχουν ως πρόσθετο πλεονέκτημα τη βελτίωση του ηλεκτρικού δικτύου μέσω ελέγχου συχνότητας και τάσης αφού δεν απαιτεί χρόνο εκκίνησης. Εξάλλου, τα BESS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενεργειακό αρμπιτράζ και peak shaving με φόρτιση όταν η ζήτηση είναι χαμηλή και παροχή ενέργειας κατά τις περιόδους αιχμής φορτίου. Επιπλέον, σε κλίμακα χρησιμότητας, το κόστος των μπαταριών ιόντων λιθίου προβλέπεται να μειωθεί μεταξύ 30 και 80% έως το 2050, καθιστώντας τις μπαταρίες μια βιώσιμη εναλλακτική λύση για υπέρβαση πολλών προκλήσεων που σχετίζονται με τη χρήση των ΑΠΕ.

Στις λειτουργίες του συστήματος ισχύος, ο ανεξάρτητος χειριστής συστήματος (ISO) προγραμματίζει το σχέδιο παραγωγής ενέργειας για την επόμενη μέρα. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως εκκαθάριση αγοράς και γίνεται με την επίλυση του προβλήματος δέσμευσης μονάδας (UCP). Το UCP χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του χρονοδιαγράμματος δέσμευσης και σχέδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των μονάδων παραγωγής με ελαχιστοποίηση τεχνικών περιορισμών. Το πρόβλημα είναι γνωστό για την πολυπλοκότητα του, που προκύπτει από τη μη γραμμική αποστολή και τους περιορισμούς κόστους, δέσμευσης και αποστολής. Επιπλέον, το UCP μπορεί να ενσωματώσει και άλλες πτυχές, όπως π.χ. περιορισμούς δικτύου, περιορισμούς ασφάλειας και αβεβαιότητα, δημιουργώντας ένα εξαιρετικά σύνθετο πρόβλημα. Παρ' όλα αυτά, η σημασία των λειτουργιών του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έχει παρακίνησε την ανάπτυξη αλγορίθμων και μεθόδων για την επίλυση των προβλημάτων του UCP σε εύλογο χρόνο.

Με το πρόσφατο ενδιαφέρον των ISO για τη χρήση συστημάτων BESS, τεχνικά χαρακτηριστικά και πτυχές των μπαταριών αρχίζουν να ενσωματώνονται στα μοντέλα αγοράς της επόμενης ημέρας.

## ***Κεφάλαιο 3***

-

### ***Η Αγορά της Ηλεκτρικής Ενέργειας***

#### ***3.1 Γενικά***

Με την ευρεία έννοια, μια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα σύστημα που διευκολύνει την ανταλλαγή αγαθών και υπηρεσιών που σχετίζονται με την ηλεκτρική ενέργεια. Κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας, τα οικονομικά των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας είχαν υποστεί τεράστιες αλλαγές για λόγους που είχαν σχέση με τις τεχνολογικές εξελίξεις στην πλευρά της παραγωγής και της ζήτησης έως την πολιτική και την ιδεολογία. Η αναδιάρθρωση της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας στις αρχές του 21ου αιώνα περιλάμβανε την αντικατάσταση της κάθετα ολοκληρωμένης και αυστηρά ρυθμιζόμενης «παραδοσιακής» αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας με πολλαπλές ανταγωνιστικές αγορές για την παραγωγή, τη μεταφορά, τη διανομή και τη λιανική πώληση ηλεκτρικής ενέργειας (Glachant, et al., 2021) [22]. Οι παραδοσιακές και ανταγωνιστικές προσεγγίσεις της αγοράς αντιστοιχούν χαλαρά σε δύο οράματα της βιομηχανίας: η απορρύθμιση μεταμόρφωσε την ηλεκτρική ενέργεια από δημόσια υπηρεσία (όπως η αποχέτευση) σε εμπορεύσιμο αγαθό (όπως το αργό πετρέλαιο). Από τη δεκαετία του 2020, οι παραδοσιακές αγορές

εξακολουθούν να είναι κοινές σε ορισμένες περιοχές, συμπεριλαμβανομένων μεγάλων τμημάτων των Ηνωμένων Πολιτειών και του Καναδά. (Glachant, et al., 2021) [22].

Η αρχική ιδέα μιας απλής αναδιάρθρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας χονδρικής («μόνο για ενέργεια», αντικατάσταση της ρυθμιζόμενης τιμής ηλεκτρικής ενέργειας με την καθορισμένη από την αγορά τιμή) δε λειτούργησε, επομένως η ανταγωνιστική δομή της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας χονδρικής είναι αρκετά περίπλοκη (Schmalensee, 2021) [23] και τυπικά περιλαμβάνει (πέρα από χονδρική και λιανική) :

- αγορές βοηθητικών υπηρεσιών για τις υπηρεσίες που δε σχετίζονται άμεσα με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και συνεπώς δεν παρέχουν εισόδημα, αλλά είναι απαραίτητες για τη συνολική λειτουργία του συστήματος (αγορά ελέγχου συχνότητας, έλεγχος τάσης και διαχείριση άεργου ισχύος κ.λπ.). (Schmalensee, 2021) [23]
- αγορά δυναμικότητας ή κάποιος άλλος μηχανισμός που παρέχει μια ροή εισοδήματος απαραίτητη για την κατασκευή και τη διατήρηση πρόσθετων μονάδων παραγωγής («αποθεματικά») για το χειρότερο σενάριο (Schmalensee, 2021) [23]. Σε μια τυπική μέρα, αυτές οι μονάδες δεν χρησιμοποιούνται ποτέ (δεν "αποστέλλονται") και επομένως δεν παράγουν έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας.
- αγορά βασισμένη στο κόστος με ελεγχόμενο κόστος που αντικαθιστά τις προσφορές των παραγωγών σε μέρη όπου η ισχύς στην τοπική αγορά προκαλεί ανησυχία (π.χ. σε ορισμένα μέρη των ΗΠΑ και ολόκληρες χώρες της Λατινικής Αμερικής πλούσιες σε υδροηλεκτρική ενέργεια). (Munoz, et al., 2017) [24]

Οι ανταγωνιστικές λιανικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας μπόρεσαν να διατηρήσουν την απλή δομή τους (Schmalensee, 2021) [23]. Επιπλέον, για τους περισσότερους μεγάλους φορείς εκμετάλλευσης, υπάρχουν αγορές για δικαιώματα μεταφοράς και παράγωγα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως συμβόλαια μελλοντικής εκπλήρωσης και δικαιώματα προαίρεσης ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία διαπραγματεύονται ενεργά.

### 3.2 Χαρακτηριστικά της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζεται από μοναδικά χαρακτηριστικά που απουσιάζουν σε μια τυπική αγορά εμπορευμάτων ή αγαθών κατανάλωσης. Αυτές οι ιδιαιτερότητες καθιστούν την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας ουσιαστικά ελλιπή. (Kovacevic, 2018) [25].

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι από τη φύση της δύσκολο να αποθηκευτεί και πρέπει να είναι διαθέσιμη κατά παραγγελία (Ahlqvist, et al., 2022) [26]. Κατά συνέπεια, σε αντίθεση με άλλα προϊόντα, δεν είναι δυνατό, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, να διατηρηθεί σε απόθεμα, μέριμνα ή να βρεθεί τρόπος οι πελάτες να περιμένουν στην ουρά γι' αυτή, επομένως η προσφορά δεν διαφοροποιείται τόσο πολύ με τη ζήτηση σε δεδομένη χρονική στιγμή, παρά τις συνεχείς διακυμάνσεις και των δύο (η λεγόμενη εξισορρόπηση πλέγματος). Συχνά, τα μόνα περιθώρια ασφαλείας είναι αυτά που παρέχονται από την κινητική ενέργεια των φυσικώς περιστρεφόμενων μηχανημάτων (σύγχρονες γεννήτριες και τουρμπίνες). Εάν υπάρχει αναντιστοιχία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, οι γεννήτριες απορροφούν επιπλέον ενέργεια επιταχύνοντας ή παράγουν περισσότερη ισχύ επιβραδύνοντας προκαλώντας αύξηση ή μείωση της συχνότητας χρήσης (είτε 50 είτε 60 Hertz). Ωστόσο, η συχνότητα δεν μπορεί να αποκλίνει πάρα πολύ από τον στόχο: πολλές μονάδες του ηλεκτρικού εξοπλισμού μπορούν να καταστραφούν από την εκτός ορίων συχνότητα και έτσι θα αποσυνδεθούν αυτόματα από το δίκτυο για να προστατευθούν, προκαλώντας πιθανώς μπλακ άουτ (Ahlqvist, et al., 2022) [26].

Υπάρχουν πολλοί άλλοι φυσικοί και οικονομικοί περιορισμοί που επηρεάζουν το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και την αγορά, με ορισμένους να δημιουργούν μη κυρτότητα:

1. Ένας τυπικός καταναλωτής δε γνωρίζει την τρέχουσα συχνότητα του συστήματος και πληρώνει μία σταθερή τιμή για μία μονάδα ενέργειας που δεν εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, και επομένως μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει ξαφνικά την κατανάλωση.
2. Οι μεταβλητές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι διακοπτόμενες λόγω της εξάρτησης από τις καιρικές συνθήκες και μπορούν να ανεβαίνουν ή να πέφτουν κυριολεκτικά από το ένα λεπτό στο άλλο.

3. Τα ορυκτά καύσιμα και τα πυρηνικά εργοστάσια έχουν περιορισμούς στην ταχύτητα ανύψωσης: από 5–30 λεπτά στα εργοστάσια που λειτουργούν με αέριο έως ώρες στην παραγωγή με καύση άνθρακα και ακόμη περισσότερο για τα πυρηνικά.
4. Λόγω του υψηλού κόστους της εκκίνησης, το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενδέχεται να διαφέρει από το οριακό κόστος σε ορισμένα χρονικά διαστήματα, αναγκάζοντας έτσι τους παρόχους να υποβάλλουν προσφορές πάνω από το οριακό κόστος.

Ο σχεδιασμός του δικτύου μεταφοράς περιορίζει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να μεταδοθεί από μια σφιχτά συνδεδεμένη περιοχή ("κόμβος") σε μια άλλη, έτσι μια γεννήτρια σε έναν κόμβο μπορεί να μην είναι σε θέση να εξυπηρετήσει ένα φορτίο σε άλλο κόμβο (λόγω "συμφόρησης μετάδοσης"), δημιουργώντας δυνητικά θραύσματα της αγοράς που πρέπει να εξυπηρετηθούν με τοπική παραγωγή ("load rockets").

### ***3.3 Η Παραδοσιακή Αγορά***

Μετά τα πρώτα χρόνια της, η βιομηχανία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας ρυθμιζόταν από τα διάφορα επίπεδα διακυβέρνησης. Μέχρι τη δεκαετία του 1950, μια μεγάλη ποικιλία ρυθμίσεων είχε εξελιχθεί με ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των χωρών και ακόμη και σε περιφερειακό επίπεδο.

Η Γαλλία, η Ιταλία, η Δημοκρατία της Ιρλανδίας και η Ελλάδα είχαν κάθετα ολοκληρωμένη εταιρεία κρατικής ιδιοκτησίας σε εθνικό επίπεδο. Το Ηνωμένο Βασίλειο διέθετε μια κρατική εταιρεία παραγωγής και μεταφοράς (Central Electricity Generating Board), αλλά η διανομή ήταν αποκεντρωμένη σε 14 πίνακες ηλεκτρικής ενέργειας. Η Γερμανία συνδύασε μικρό αριθμό περιφερειακών ολοκληρωμένων εταιρειών παραγωγής και μεταφοράς με δημοτική διανομή. Η Ιαπωνία είχε 10 περιφερειακά κάθετα ολοκληρωμένα μονοπώλια. Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας της Νορβηγίας ήταν κυρίως σε επίπεδο δήμων.

Στις ΗΠΑ, αναπτύχθηκε ένας πολύπλοκος συνδυασμός εταιρειών, που ανήκαν είτε σε ιδιώτες είτε σε διαφορετικά επίπεδα διακυβέρνησης, ενώ ο κανονισμός ευνόησε

την ιδιοκτησία σε δημοτικό επίπεδο και συνεταιρισμό. Για παράδειγμα, η Χαβάη είχε μόνο ιδιωτικές επιχειρήσεις κοινής ωφελείας, η Νεμπράσκα μόνο δημόσια, η Tennessee Valley Authority (η μεγαλύτερη εταιρεία παραγωγής) ανήκει σε ομοσπονδιακή ιδιοκτησία και το Τμήμα Ύδρευσης και Ηλεκτρισμού του Λος Άντζελες ανήκει στην πόλη.

Αυτές οι διαφορετικές δομές είχαν μερικά ενοποιητικά χαρακτηριστικά: πολύ μικρή εξάρτηση από ανταγωνιστικές αγορές, χωρίς επίσημες αγορές χονδρικής και πελάτες που δεν μπορούσαν να επιλέξουν τους προμηθευτές τους. Η ποικιλομορφία και το τεράστιο μέγεθος της αγοράς των ΗΠΑ έκαναν τα πιθανά εμπορικά κέρδη αρκετά μεγάλα ώστε να δικαιολογούν ορισμένες συναλλαγές χονδρικής: μεγάλες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας παρείχαν ηλεκτρική ενέργεια σε μικρότερες (δημοτικές ή συνεταιριστικές) βάσει διμερών συμβάσεων απαιτήσεων. Πραγματοποιήθηκαν πωλήσεις συντονισμού μεταξύ των κάθετα ολοκληρωμένων εταιρειών για τη μείωση του κόστους, μερικές φορές μέσω Pools ενέργειας (Schmalensee, 2021).

Από την πλευρά του λιανικού εμπορίου, οι πελάτες χρεώθηκαν σταθερές ρυθμιζόμενες τιμές που δεν άλλαζαν με το οριακό κόστος, τα τιμολόγια λιανικής βασίζονταν σχεδόν εξ ολοκλήρου στην ογκομετρική τιμολόγηση (με βάση τις ενδείξεις του μετρητή που καταγράφονται μηνιαίως) και η ανάκτηση σταθερού κόστους συμπεριλήφθηκε στην τιμή ανά kWh.

Η παραδοσιακή ρύθμιση αγοράς σχεδιάστηκε για την κατάσταση της κοινής προαναδιάρθρωσης της ηλεκτρικής βιομηχανίας (και εξακολουθεί να είναι κοινή σε ορισμένες περιοχές, συμπεριλαμβανομένων μεγάλων τμημάτων των ΗΠΑ και του Καναδά (Glachant, et al., 2021) [22].

### ***3.4 Χονδρική Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας***

Η χονδρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί σύστημα που επιτρέπει την ανταλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω προσφορών. Οι προσφορές για αγορά και πώληση χρησιμοποιούν τις αρχές της προσφοράς και της ζήτησης για τον καθορισμό της τιμής. Οι μακροπρόθεσμες συμβάσεις είναι παρόμοιες με τις συμφωνίες αγοράς

ηλεκτρικής ενέργειας και γενικά θεωρούνται ιδιωτικές διμερείς συναλλαγές μεταξύ αντισυμβαλλομένων.

Υπάρχει μια χονδρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας όταν ανταγωνιστικοί παραγωγοί προσφέρουν την ηλεκτρική τους παραγωγή σε λιανοπωλητές. Στη συνέχεια, οι έμποροι λιανικής ανατιμολογούν την ηλεκτρική ενέργεια και τη μεταφέρουν στην αγορά. Ενώ η τιμολόγηση χονδρικής ήταν ο αποκλειστικός τομέας μεγάλων προμηθευτών λιανικής, όλο και περισσότερες αγορές αρχίζουν να ανοίγονται στους τελικούς χρήστες. Οι μεγάλοι τελικοί χρήστες που επιδιώκουν να μειώσουν τα περιττά γενικά έξοδα στο ενεργειακό τους κόστος αρχίζουν να αναγνωρίζουν τα πλεονεκτήματα που ενυπάρχουν σε μια τέτοια κίνηση αγορών. Οι καταναλωτές που αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια απευθείας από γεννήτριες είναι ένα σχετικά πρόσφατο φαινόμενο.

Η χονδρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι χωρίς μειονεκτήματα (αβεβαιότητα της αγοράς, κόστος μέλους, αμοιβές εγκατάστασης, επενδύσεις εξασφαλίσεων και κόστος οργάνωσης, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει να αγοράζεται σε καθημερινή βάση), ωστόσο, όσο μεγαλύτερο είναι το ηλεκτρικό φορτίο του τελικού χρήστη, τόσο μεγαλύτερο όφελος και κίνητρο.

Για να ανθίσει μια οικονομικά αποδοτική αγορά χονδρικής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι απαραίτητο να πληρούνται ορισμένα κριτήρια, συγκεκριμένα η ύπαρξη μιας συντονισμένης άμεσης αγοράς που έχει μία "οικονομική αποστολή με κομβικές τιμές, βασισμένη στην προσφορά, περιορισμένη στην ασφάλεια". Αυτά τα κριτήρια έχουν υιοθετηθεί σε μεγάλο βαθμό στις ΗΠΑ, την Αυστραλία, τη Νέα Ζηλανδία και τη Σιγκαπούρη.

### **3.5 Εκκαθάριση Αγοράς**

Οι συναλλαγές χονδρικής (προσφορές αγοράς και ζήτησης) στην ηλεκτρική ενέργεια συνήθως εκκαθαρίζονται και διακανονίζονται από τον διαχειριστή της αγοράς ή από μια ανεξάρτητη οντότητα ειδικού σκοπού που επιφορτίζεται αποκλειστικά με αυτήν τη λειτουργία. Οι φορείς της αγοράς δεν εκκαθαρίζουν συναλλαγές, αλλά συχνά απαιτούν γνώση του εμπορίου προκειμένου να διατηρήσουν το ισοζύγιο παραγωγής



και φορτίου. Η τιμή εκκαθάρισης ορίζεται από την τομή των καμπυλών προσφοράς και ζήτησης για κάθε χρονικό διάστημα.

Η εκκαθάριση μπορεί να χρησιμοποιήσει δύο ρυθμίσεις:

- pay-as-clear (PAC) όπου η τιμή καθορίζεται από την υψηλότερη επιτυχημένη προσφορά (τιμή εκκαθάρισης). Αυτό το σύστημα οριακής τιμής (MPS) είναι που χρησιμοποιείται συνήθως από τις περισσότερες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας.
- pay-as-bid (PAB) όπου κάθε επιτυχημένος πλειοδότης λαμβάνει μόνο την τιμή που αναφέρεται στην προσφορά. Αυτή η συμφωνία δεν είναι συνηθισμένη, ενώ αξιολογούμενες περιπτώσεις περιλαμβάνουν το Ηνωμένο Βασίλειο και την ενδοημερήσια αγορά του Nord Pool (Houmøller, 2010) [27].

Γενικά, θεωρείται ότι με το MPS, ελλείπει συμπαιγνίας, οι παραγωγοί θα υποβάλουν προσφορές κοντά στο βραχυπρόθεσμο οριακό κόστος τους. Το MPS είναι επίσης πιο διαφανές, καθώς ο νέος πλειοδότης γνωρίζει ήδη την τιμή αγοράς και μπορεί να εκτιμήσει την κερδοφορία με το οριακό του κόστος. Λόγω των υψηλότερων κινδύνων του PAB, δίνει ένα επιπλέον πλεονέκτημα στους μεγάλους παίκτες που είναι καλύτερα εξοπλισμένοι να εκτιμήσουν την αγορά και να αναλάβουν το ρίσκο (για παράδειγμα, παίζοντας τζόγο με υψηλή προσφορά για ορισμένες από τις μονάδες τους). Ωστόσο, οι υψηλές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας πυροδοτούν τις εκκλήσεις στην πολιτική για μετάβαση στο PAB προκειμένου οι καταναλωτές να μην πληρώνουν υπερβολικά τον παραγωγό με χαμηλότερο κόστος, με το αντεπιχείρημα να είναι πως κατά αυτόν τον τρόπο οι παραγωγοί χαμηλότερου κόστους παρακινούνται να υποβάλουν υψηλότερες προσφορές.

### **3.6 Κεντρικές και Αποκεντρωμένες Αγορές**

Για να χειριστεί όλους τους περιορισμούς διατηρώντας παράλληλα το σύστημα σε ισορροπία, μια κεντρική υπηρεσία που ονομάζεται διαχειριστής συστήματος μεταφοράς (ΔΣΜ), απαιτείται να συντονίζει τη δέσμευση της μονάδας και την αποστολή. Εάν η συχνότητα πέσει εκτός ενός προκαθορισμένου εύρους, ο διαχειριστής

του συστήματος θα ενεργήσει για να προσθέσει ή να αφαιρέσει είτε παραγωγή είτε φορτίο.

Σε αντίθεση με τις αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο που είναι αναγκαστικά κεντρικές, η ίδια η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι συγκεντρωτική ή αποκεντρωμένη. Στην κεντρική αγορά, ο ΔΣΜ αποφασίζει ποιο εργοστάσιο θα λειτουργήσει και πόση ποσότητα υποτίθεται ότι θα παράγει πριν από την παράδοση (κατά τη φάση της «spot market» ή τη λειτουργία της επόμενης ημέρας). Σε μια αποκεντρωμένη αγορά, ο παραγωγός δεσμεύεται μόνο για την παράδοση ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά τα μέσα για να το κάνει αυτό αφήνονται στον ίδιο τον παραγωγό (για παράδειγμα, μπορεί να συνάψει συμφωνία με άλλον παραγωγό για την παροχή της πραγματικής ενέργειας). Οι συγκεντρωτικές αγορές διευκολύνουν την υποδοχή μη κυρτών<sup>2</sup>, ενώ οι αποκεντρωμένες αγορές επιτρέπουν τις ενδοημερήσιες συναλλαγές να διορθώνουν τις πιθανώς μη βέλτιστες αποφάσεις που ελήφθησαν, για παράδειγμα, λαμβάνοντας υπόψη βελτιωμένες καιρικές προβλέψεις για τις ανανεώσιμες πηγές. Λόγω της διαφοράς στην κατασκευή του δικτύου (οι ΗΠΑ είχαν ασθενέστερα δίκτυα μεταφοράς), ο σχεδιασμός των αγορών χονδρικής στις ΗΠΑ και την Ευρώπη είχε αποκλίνει, παρόλο που αρχικά οι ΗΠΑ ακολουθούσαν το ευρωπαϊκό (αποκεντρωμένο) παράδειγμα.

Για να καλύψουν τους περιορισμούς του δικτύου μεταφοράς, οι κεντρικές αγορές χρησιμοποιούν συνήθως την τοπική οριακή τιμολόγηση (LMP) όπου κάθε κόμβος έχει τη δική του τοπική τιμή αγοράς (άρα ένα άλλο όνομα για την πρακτική, κομβική τιμολόγηση). Πολιτικές εκτιμήσεις μερικές φορές καθιστούν δυσάρεστο να αναγκάζονται οι καταναλωτές στην ίδια περιοχή, να πληρώνουν διαφορετικές τιμές για την ηλεκτρική ενέργεια, επομένως χρησιμοποιείται ένα τροποποιημένο μοντέλο κομβικής τιμολόγησης γεννήτριας (GNP): οι γεννήτριες εξακολουθούν να πληρώνονται με τις κομβικές τιμές, ενώ οι οντότητες εξυπηρέτησης φορτίου χρεώνουν στους τελικούς χρήστες τιμές που υπολογίζονται κατά μέσο όρο στην επικράτεια. Πολλές αποκεντρωμένες αγορές δεν χρησιμοποιούν το LMP και έχουν μια τιμή καθορισμένη σε μια γεωγραφική περιοχή («ζώνη», επομένως το όνομα ζώνης

---

<sup>2</sup> Στα οικονομικά, η μη κυρτότητα αναφέρεται σε παραβιάσεις των υποθέσεων κυρτότητας της στοιχειώδους οικονομίας. Τα βιβλία βασικών οικονομικών επικεντρώνονται σε καταναλωτές με κυρτές προτιμήσεις (που δεν προτιμούν τις ακραίες τιμές από τις ενδιάμεσες τιμές) και κυρτά σύνολα προϋπολογισμού και σε παραγωγούς με κυρτά σύνολα παραγωγής.

τιμολόγησης) ή μια «περιοχή» (περιφερειακή τιμολόγηση, ο όρος χρησιμοποιείται κυρίως για πολύ μεγάλες ζώνες της Εθνικής Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας της Αυστραλίας, όπου πέντε περιοχές καλύπτουν ολόκληρη την ήπειρο).

Στις αρχές της δεκαετίας του 2020 δεν υπήρχε σαφής προτίμηση για κανένα από τα δύο σχέδια αγοράς, για παράδειγμα, οι αγορές της Βόρειας Αμερικής πέρασαν από συγκεντρωτισμό, ενώ οι ευρωπαϊκές κινήθηκαν προς την αντίθετη κατεύθυνση.

### **3.6.1 Κεντρική Αγορά**

Ένας διαχειριστής συστήματος μεταφοράς σε μια κεντρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνει τις πληροφορίες κόστους (συνήθως τρεις συνιστώσες: κόστος εκκίνησης, κόστος χωρίς φορτίο, οριακό κόστος παραγωγής) για κάθε μονάδα παραγωγής («προσφορά βάσει μονάδας») και κάνει όλες οι αποφάσεις στις αγορές της επόμενης ημέρας και σε πραγματικό χρόνο (ανακατανομή συστήματος). Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στον χειριστή να λάβει υπόψη τις λεπτομέρειες της διαμόρφωσης του συστήματος μεταφοράς. Η κεντρική αγορά χρησιμοποιεί συνήθως το LMP και ο στόχος αποστολής είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους σε κάθε κόμβο (που σε ένα μεγάλο δίκτυο σημαίνει εκατοντάδες ή και χιλιάδες). Οι κεντρικές αγορές χρησιμοποιούν ορισμένες διαδικασίες που μοιάζουν με τις κάθετα ολοκληρωμένες επιχειρήσεις κοινής ωφελείας του παρελθόντος, επομένως οι κεντρικές αγορές ονομάζονται επίσης ολοκληρωμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας.

Υπάρχουν μειονεκτήματα στην κεντρική αγορά με LMP (Ahlqvist, et al., 2022) [26]:

- Πολιτικά, αποδείχθηκε δύσκολο να δικαιολογηθούν υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας για τους πελάτες σε ορισμένες τοποθεσίες.
- Η απλοποιημένη υποβολή προσφορών δεν επιτρέπει την ορθή αποτύπωση της δομής κόστους πιο περίπλοκων εγκαταστάσεων, όπως ένας αεριοστρόβιλος συνδυασμένου κύκλου ή ένας καταρράκτης υδροηλεκτρικής ενέργειας.
- Οι εταιρείες παραγωγής έχουν κίνητρο να υπερεκτιμούν το κόστος εκκίνησης τους (προκειμένου να συλλέξουν περισσότερες πληρωμές ολοκλήρωσης).

- Η απουσία ενδοημερήσιας αγοράς δυσχεραίνει την ενοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Οι ολοκληρωμένες αγορές απαιτούν υψηλή υπολογιστική ένταση, αυτή η πολυπλοκότητα τις καθιστά αδιαφανείς για τους εμπόρους και δύσκολο να κλιμακωθούν.
- Η ανεξέλεγκτη ισχύς του διαχειριστή συστήματος μεταφοράς καθιστά δυσκολότερο τον χειρισμό του ρυθμιστή.
- Η τιμή μιας μονάδας ηλεκτρικής ενέργειας με LMP βασίζεται στο οριακό κόστος, επομένως δεν περιλαμβάνονται το κόστος εκκίνησης και μη φορτίου. Ως εκ τούτου, οι κεντρικές αγορές καταβάλλουν συνήθως μια αποζημίωση για αυτό το κόστος στον παραγωγό (οι λεγόμενες πληρωμές ολοκλήρωσης ή αύξησης), που χρηματοδοτούνται κατά κάποιο τρόπο από τους συμμετέχοντες στην αγορά (και τελικά τους καταναλωτές).

### **3.6.2 Αγορά με Βάση το Κόστος**

Ο υψηλότερος βαθμός συγκέντρωσης της αγοράς περιλαμβάνει τους άμεσους υπολογισμούς του κόστους από τον φορέα εκμετάλλευσης της αγοράς (οι παραγωγοί δεν υποβάλλουν πλέον προσφορές). Παρά το προφανές πρόβλημα με τις εταιρείες παραγωγής που έχουν κίνητρα να διογκώσουν το κόστος τους (αυτό μπορεί να κρυφτεί μέσω συναλλαγών με συνδεδεμένες εταιρείες), η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το κόστος εξαλείφει την ισχύ των παρόχων στην αγορά και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου είναι δυνατή η κατάχρηση ισχύος στην αγορά (π.χ. η Χιλή με την υπεροχή της υδροηλεκτρικής ενέργειας και στις ΗΠΑ σε περιόδους όπου η ισχύς της τοπικής αγοράς είναι αρκετά υψηλή). Ένα λιγότερο προφανές ζήτημα είναι η τάση των συμμετεχόντων στην αγορά υπό αυτές τις συνθήκες να επικεντρώνονται σε επενδύσεις στις μονάδες αιχμής εις βάρος της ισχύος βασικού φορτίου. Ένα από τα πλεονεκτήματα της αγοράς που βασίζεται στο κόστος είναι το σχετικά χαμηλό κόστος εγκατάστασης. Η προσέγγιση που βασίζεται στο κόστος είναι δημοφιλής στη Λατινική Αμερική. Εκτός από τη Χιλή που προαναφέραμε, χρησιμοποιείται στη Βολιβία, στο Περού, στη Βραζιλία και σε χώρες της Κεντρικής Αμερικής.

Ένας διαχειριστής συστήματος διενεργεί έλεγχο των παραμέτρων κάθε μονάδας γεννήτριας (συμπεριλαμβανομένου του ρυθμού θερμότητας, του ελάχιστου

φορτίου, της ταχύτητας καμπής κ.λπ.) και εκτιμά το άμεσο οριακό κόστος της λειτουργίας της. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, τίθεται σε εφαρμογή ένα χρονοδιάγραμμα αποστολής ώρα προς ώρα για να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό άμεσο κόστος. Στη διαδικασία, λαμβάνονται οι ωριαίες σκιώδεις τιμές (shadow prices) για κάθε κόμβο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον διακανονισμό των πωλήσεων στην αγορά.

### **3.6.3 Αποκεντρωμένη Αγορά**

Οι αποκεντρωμένες αγορές επιτρέπουν στις εταιρείες παραγωγής να επιλέξουν τον δικό τους τρόπο παροχής ενέργειας για την προσφορά τους για την επόμενη ημέρα (που καθορίζει την τιμή και την τοποθεσία). Ο πάροχος μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε μονάδα έχει στη διάθεσή του (λεγόμενη "προσφορά βάσει χαρτοφυλακίου") ή ακόμη και να πληρώσει άλλη εταιρεία για την παράδοση της ενέργειας. Η αγορά εξακολουθεί να έχει τον κεντρικό χειριστή που ελέγχει αποκλειστικά το σύστημα σε πραγματικό χρόνο, αλλά με σημαντικά μειωμένες εξουσίες παρέμβασης πριν από την παράδοση (συντά μόνο τη δυνατότητα προγραμματισμού του δικτύου μεταφοράς για λειτουργία την επόμενη μέρα). Αυτή η ρύθμιση καθιστά μικρότερο πρόβλημα την ιδιοκτησία του φορέα εκμετάλλευσης της δυναμικότητας μεταφοράς και οι ευρωπαϊκές χώρες, με εξαίρεση το Ηνωμένο Βασίλειο, το επιτρέπουν (σύμφωνα με τον ανεξάρτητο διαχειριστή συστήματος μεταφοράς ή το μοντέλο ITSO).

Ενώ ορισμένοι φορείς στην Ευρώπη συμμετέχουν στη διάρθρωση των αγορών της επόμενης ημέρας και των αγορών εντός της ημέρας, αρκετοί δεν το κάνουν. Για παράδειγμα, η αγορά του Ηνωμένου Βασιλείου μετά τους Νέους Διακανονισμούς Εμπορίας Ηλεκτρικής Ενέργειας στο Ηνωμένο Βασίλειο και η αγορά στη Νέα Ζηλανδία επέτρεψαν στις αγορές να διευθετήσουν και να εξομαλύνουν όλες τις τριβές πριν από τον πραγματικό χρόνο. Αυτή η εξάρτηση από χρηματοπιστωτικά μέσα οδηγεί σε πρόσθετες ονομασίες για τις αποκεντρωμένες αγορές: exchange-based, unbundled, bilateral.

### 3.7 Διαχείριση κινδύνου

Η διαχείριση χρηματοοικονομικού κινδύνου αποτελεί συχνά υψηλή προτεραιότητα για τους συμμετέχοντες σε απελευθερωμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας λόγω των σημαντικών κινδύνων τιμής και όγκου που μπορούν να εμφανίσουν οι αγορές. Συνέπεια της πολυπλοκότητας μιας χονδρικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι η εξαιρετικά υψηλή αστάθεια των τιμών σε περιόδους αιχμής, έλλειψης ζήτησης και προσφοράς. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτού του κινδύνου τιμής εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα φυσικά θεμελιώδη μεγέθη της αγοράς, όπως ο συνδυασμός τύπων εγκαταστάσεων παραγωγής και η σχέση μεταξύ ζήτησης και καιρικών προτύπων. Ο κίνδυνος τιμής μπορεί να εκδηλωθεί με «αιχμές» τιμών που είναι δύσκολο να προβλεφθούν και «άλματα» της τιμής όταν η υποκείμενη θέση του καυσίμου ή της μονάδας αλλάζει για μεγάλες περιόδους.

Ο κίνδυνος όγκου χρησιμοποιείται συχνά για να υποδηλώσει το φαινόμενο κατά το οποίο οι συμμετέχοντες στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αβέβαιους όγκους ή ποσότητες κατανάλωσης ή παραγωγής. Για παράδειγμα, ένας έμπορος λιανικής δεν είναι σε θέση να προβλέψει με ακρίβεια τη ζήτηση των καταναλωτών για μια συγκεκριμένη ώρα περισσότερο από μερικές ημέρες στο μέλλον και ένας παραγωγός δεν είναι σε θέση να προβλέψει τον ακριβή χρόνο που θα έχει διακοπή της εγκατάστασης ή έλλειψη καυσίμων. Ένας σύνθετος παράγοντας είναι επίσης η κοινή συσχέτιση μεταξύ ακραίων γεγονότων τιμής και όγκου. Για παράδειγμα, οι αυξήσεις των τιμών συμβαίνουν συχνά όταν ορισμένοι παραγωγοί έχουν διακοπές στα εργοστάσια ή όταν ορισμένοι καταναλωτές βρίσκονται σε περίοδο αιχμής κατανάλωσης. Η εισαγωγή σημαντικών ποσοτήτων διακοπτόμενων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική ενέργεια, μπορεί να επηρεάσει τις τιμές της αγοράς.

Οι έμποροι λιανικής ηλεκτρικής ενέργειας, που συνολικά αγοράζουν από τη χονδρική αγορά, και οι παραγωγοί που πωλούν συνολικά στη χονδρική αγορά, εκτίθενται σε αυτές τις επιπτώσεις της τιμής και του όγκου και για να προστατευθούν από την αστάθεια, θα συνάψουν «συμβάσεις αντιστάθμισης κινδύνου» μεταξύ τους. Η δομή αυτών των συμβάσεων ποικίλλει ανά περιφερειακή αγορά λόγω διαφορετικών συμβάσεων και δομών της αγοράς. Ωστόσο, οι δύο απλούστερες και πιο κοινές μορφές είναι απλές προθεσμιακές συμβάσεις σταθερής τιμής για φυσική παράδοση και

συμβάσεις για διαφορές όπου τα μέρη συμφωνούν μια τιμή εξάσκησης για καθορισμένες χρονικές περιόδους. Στην περίπτωση σύμβασης για διαφορά, εάν ένας προκύπτων δείκτης τιμών χονδρικής (όπως αναφέρεται στη σύμβαση) σε οποιαδήποτε χρονική περίοδο είναι υψηλότερος από τη τιμή "απεργίας", ο παραγωγός θα επιστρέψει τη διαφορά μεταξύ της τιμής "απεργίας" και της πραγματικής τιμή για εκείνη την περίοδο. Ομοίως, ένας έμπορος λιανικής θα επιστρέψει τη διαφορά στη γεννήτρια όταν η πραγματική τιμή είναι μικρότερη από την "τιμή απεργίας". Ο πραγματικός δείκτης τιμών αναφέρεται μερικές φορές ως τιμή "spot" ή "pool", ανάλογα με την αγορά.

Πολλές άλλες ρυθμίσεις αντιστάθμισης κινδύνου, όπως συμβόλαια, εικονική υποβολή προσφορών, δικαιώματα αγοράς και δικαιώματα πώλησης διαπραγματεύονται σε εξελιγμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Γενικά έχουν σχεδιαστεί για μεταφορά οικονομικών κινδύνων μεταξύ των συμμετεχόντων.

## ***Κεφάλαιο 4***

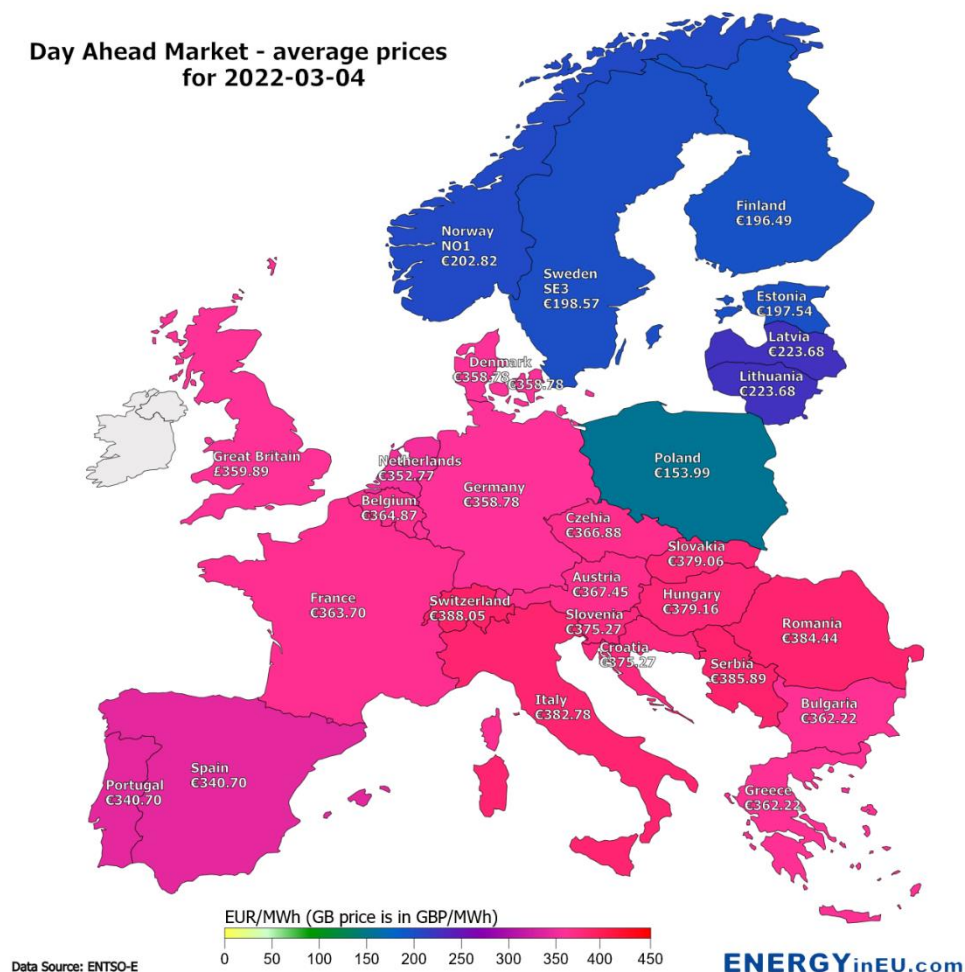
-

### ***Αγορά της Επόμενης Ημέρας***

#### ***4.1 Γενικά***



### Day Ahead Market - average prices for 2022-03-04



Εικόνα 8 Τιμές Αγορών Επόμενης Ημέρας σε Ευρωπαϊκό Επίπεδο , Πηγή : ENERGYinEU.COM

Μια αγορά για την επόμενη μέρα, όπως υποδηλώνει το όνομά της, είναι μια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργεί μια ημέρα πριν από την πραγματική ημέρα λειτουργίας. Για παράδειγμα, η αγορά της επόμενης ημέρας που λειτουργεί στη Νέα Υόρκη απαιτεί υποβολές στην αγορά έως τις 5 π.μ. της ημέρας πριν από την ημέρα λειτουργίας. Η αγορά της επόμενης ημέρας διαφέρει από την αγορά σε πραγματικό χρόνο, η οποία συνήθως λειτουργεί σε περιόδους διαπραγμάτευσης μισής ή μίας ώρας την πραγματική ημέρα λειτουργίας. Μια αγορά της επόμενης ημέρας θα ταιριάζει με καθεμία από αυτές τις περιόδους διαπραγμάτευσης, έτσι ώστε για κάθε περίοδο διαπραγμάτευσης της ημέρας λειτουργίας θα λειτουργεί τόσο η αγορά της επόμενης ημέρας όσο και η αγορά σε πραγματικό χρόνο. Οι αγορές της επόμενης ημέρας είναι ένας τύπος προθεσμιακής αγοράς, που επιτρέπει στην αγορά να είναι ταυτόχρονα μια «χρηματοοικονομική» και μια «φυσική» αγορά. Μια χρηματοπιστωτική αγορά επιτρέπει στους συμμετέχοντες να αγοράσουν ή να πουλήσουν ισχύ στην αγορά, χωρίς

πραγματική υποχρέωση να παραδώσουν την ισχύ. Οποιαδήποτε ισχύς που δεν παραδίδεται θα καλυφθεί με οικονομική μεταφορά. Αντίθετα, μια φυσική αγορά απαιτεί κάθε συναλλαγή να αντιστοιχεί σε πραγματική μεταφορά ισχύος. Η αγορά της επόμενης ημέρας επιτρέπει τόσο την οικονομική όσο και τη φυσική συμμετοχή, ενώ η αγορά σε πραγματικό χρόνο είναι μια καθαρά φυσική αγορά, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια που μεταφέρεται στιγμιαία είναι το μοναδικό αντικείμενο της συναλλαγής.

Οι αγορές της επόμενης ημέρας και οι αγορές σε πραγματικό χρόνο είναι εννοιολογικά διακριτές και στην πράξη θα πρέπει να παραμείνουν ως δύο ξεχωριστές αγορές. Ο Cramton (Cramton, 2003) [28] εξηγεί πώς η απουσία σαφούς διάκρισης μπορεί να δώσει στους συμμετέχοντες ένα κίνητρο για παιχνίδι. Ένας συμμετέχων στην αγορά μπορεί να αλλάξει το χρονοδιάγραμμα της επόμενης ημέρας κοντά σε πραγματικό χρόνο, προκειμένου να χειραγωγήσει την τιμή σε πραγματικό χρόνο προς όφελός του. Η λύση είναι ο ξεκάθαρος διαχωρισμός των δύο αγορών. Οι τιμές<sup>3</sup> και οι ποσότητες που προσδιορίζονται στην αγορά της επόμενης ημέρας είναι οικονομικά δεσμευτικές και δεν συνδέονται με τις τιμές και τις ποσότητες που προσδιορίζονται στην αγορά σε πραγματικό χρόνο. Η σαφής διάκριση μεταξύ των αγορών της επόμενης ημέρας και των αγορών σε πραγματικό χρόνο είναι γνωστή ως σύστημα δύο διακανονισμών (μερικές φορές αναφέρεται επίσης ως σύστημα πολλαπλών διακανονισμών εάν υπάρχουν άλλες προθεσμιακές αγορές, όπως μια αγορά μιας ώρας μπροστά).

Σε ένα σύστημα δύο διακανονισμών, οι περισσότερες συναλλαγές θα γίνονται στην αγορά της επόμενης ημέρας και η αγορά σε πραγματικό χρόνο θα χρησιμοποιείται μόνο για αποκλίσεις από τις συναλλαγές στην αγορά της επόμενης ημέρας. Αυτό το αποτέλεσμα είναι παρά την πιθανότητα όλης της ηλεκτρικής ενέργειας να αποστέλλεται στην αγορά πραγματικού χρόνου. Οι παραγωγοί και οι αγοραστές μπορούν να υποβάλλουν προσφορές και προσφορές στην αγορά σε πραγματικό χρόνο, αλλά αυτές χρησιμοποιούνται μόνο για τον διακανονισμό τυχόν αποκλίσεων από τη δεσμευμένη παραγωγή της επόμενης ημέρας. Το σύστημα δύο διακανονισμών επιτρέπει την πραγματοποίηση χρηματοοικονομικών μεταφορών για τον διακανονισμό τυχόν αποκλίσεων. Για παράδειγμα, αν υποθέσουμε ότι μια γεννήτρια προσφέρει να

---

<sup>3</sup> Μπορεί να καθορίζονται πολλαπλές τιμές εάν η αγορά διεξάγεται ως δημοπρασία πληρωμής ως προσφορά ή μόνο μια ενιαία τιμή εκκαθάρισης αγοράς εάν πρόκειται για δημοπρασία ενιαίας τιμής.

πουλήσει 20 MW ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά της επόμενης ημέρας στα 10 \$/MW. Ας υποθέσουμε επίσης ότι το εκτιμώμενο φορτίο της επόμενης ημέρας είναι επίσης 20 MW. Η προσφορά της γεννήτριας για παραγωγή 20 MW ηλεκτρικής ενέργειας στα 10 \$/MW θα γίνει αποδεκτή και αυτή η προσφορά είναι πλέον οικονομικά δεσμευτική. Τώρα, στην αγορά σε πραγματικό χρόνο, ο παραγωγός μπορεί να προσαρμόσει την προσφορά του προς τα κάτω, σε (για παράδειγμα) 20 MW στα 9 \$/MW. Επίσης, το πραγματικό φορτίο μπορεί να είναι μόνο 15 MW, χαμηλότερο από το προβλεπόμενο στην αγορά της επόμενης ημέρας. Η γεννήτρια εξακολουθεί να πληρώνεται για ολόκληρη τη γενιά της επόμενης ημέρας στην τιμή στην οποία έχουν ήδη εγκατασταθεί (δηλαδή λαμβάνουν 200 \$). Ωστόσο, θα αγοράσουν επίσης τα επιπλέον 5 MW πλεονάζουσας παραγωγής στην τιμή σε πραγματικό χρόνο των 9 \$/MW (δηλαδή πληρώνουν 45 \$ για να αγοράσουν ξανά αυτήν την ηλεκτρική ενέργεια). Τυχόν αποκλίσεις από την παραγωγή της επόμενης ημέρας διευθετούνται πάντα στην τρέχουσα τιμή σε πραγματικό χρόνο. Ομοίως, οι αγοραστές ηλεκτρικής ενέργειας θα διευθετήσουν τυχόν αποκλίσεις μεταξύ των δεσμευμένων αγορών τους την επόμενη μέρα και των πραγματικών αγορών τους σε πραγματικό χρόνο στην τιμή πραγματικού χρόνου. Είναι χρήσιμο να γίνει πιο σαφής η συναλλαγή. Ας υποθέσουμε ότι οι μονάδες  $q_{da}$  αγοράζονται (πωλούνται) στην αγορά της επόμενης ημέρας σε τιμή  $p_{da}$ , τότε εάν ο συμμετέχων αποκτήσει  $q_{rt}$  σε πραγματικό χρόνο το συνολικό του κόστος (έσοδα) θα είναι :

$$p_{da}q_{da} + p_{rt}(q_{rt} - q_{da}) = (p_{da} - p_{rt})q_{da} + p_{rt}q_{rt}$$

Όπου  $q_{rt}$  είναι η τιμή σε πραγματικό χρόνο.

Έτσι, το ποσό που καταβλήθηκε (εισπράχθηκε) για την πραγματική απορρόφηση μπορεί να θεωρηθεί είτε ως το κόστος της επόμενης ημέρας (έσοδο) προσαρμοσμένο για τη διαφορά μεταξύ των ποσοτήτων της επόμενης ημέρας και του πραγματικού χρόνου είτε ως το κόστος (έσοδο) σε πραγματικό χρόνο προσαρμοσμένο για η διαφορά μεταξύ των τιμών στις δύο αγορές.

Επιτρέποντας τη διευθέτηση των αποκλίσεων από την παραγωγή και το φορτίο της επόμενης ημέρας στην αγορά σε πραγματικό χρόνο, το σύστημα δύο διακανονισμών είναι «συμβατό με κίνητρα» (Irastorza & Fraser, 2002) [29] καθώς οι

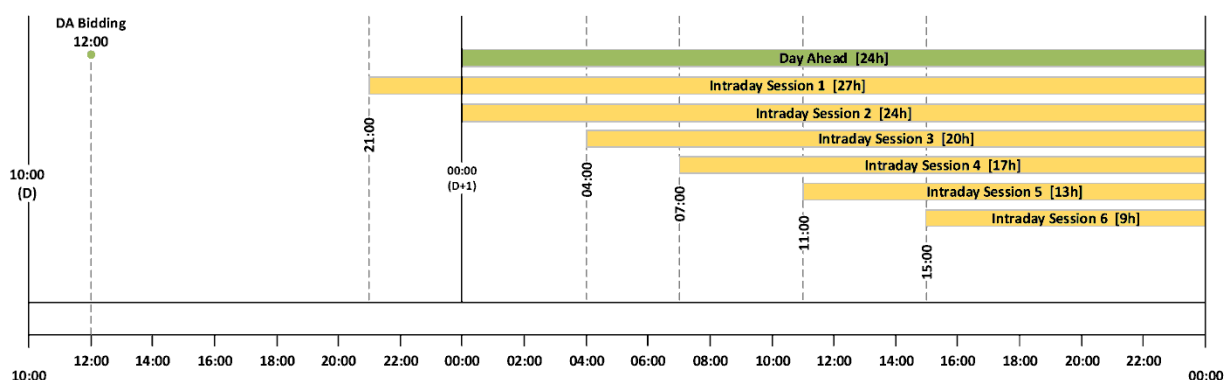
παραγωγοί και οι αγοραστές έχουν τα ίδια κίνητρα σε πραγματικό χρόνο σαν να διαπραγματεύονταν όλη τους την ηλεκτρική ενέργεια στην αγορά πραγματικού χρόνου και η αγορά της επόμενης ημέρας δεν υπήρχε. Αυτό συμβαίνει επειδή ένας παραγωγός ή αγοραστής ηλεκτρικής ενέργειας θα πληρώσει ή θα πληρωθεί για τυχόν αποκλίσεις από την ηλεκτρική ενέργεια που διαπράττονται στην αγορά της επόμενης ημέρας. Ως εκ τούτου, έχουν ένα κίνητρο να προσφέρουν ή να προσφέρουν ολόκληρη την επιθυμητή παραγωγή ή φόρτωσή τους στην αγορά σε πραγματικό χρόνο με το καθαρό αποτέλεσμα να είναι ότι η διαδικασία των δύο διακανονισμών διαχειρίζεται τις αποκλίσεις. Το κρίσιμο πλεονέκτημα αυτού είναι ότι ανεξάρτητα από το τι έχει συμβεί στην αγορά της επόμενης ημέρας (ή ποια λάθη μπορεί να έχουν γίνει), οι συμμετέχοντες στην αγορά θα ακολουθήσουν τη βέλτιστη στρατηγική στην αγορά σε πραγματικό χρόνο (Stoft, 2002) [30].

Οι αγορές της επόμενης ημέρας είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες στη λειτουργία των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας στις Η.Π.Α. Για παράδειγμα, η PJM λειτουργεί τόσο μια αγορά την επόμενη μέρα όσο και μια αγορά εξισορρόπησης σε πραγματικό χρόνο. Οι προσφορές (bids and offers) υποβάλλονται στην αγορά της επόμενης ημέρας και υπολογίζονται οι τιμές εκκαθάρισης της αγοράς για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας<sup>4</sup>. Η αγορά σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τη διαχείριση των αποκλίσεων στην παραγωγή (προσφορά) και στο φορτίο (ζήτηση), οι τιμές εκκαθάρισης της αγοράς υπολογίζονται κάθε πέντε λεπτά και ενσωματώνονται σε κάθε ώρα. Στη Νέα Υόρκη, ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Συστήματος της Νέας Υόρκης (NYISO) διαχειρίζεται μια αγορά παρόμοια στη δομή με την αγορά PJM. Μαζί με μια αγορά σε πραγματικό χρόνο και την επόμενη μέρα, το NYISO λειτουργεί επίσης μια αγορά μιας ώρας μπροστά. Στη Νέα Αγγλία, ο ISO εισήγαγε από τη 1η Μαρτίου 2003 μια αγορά για την επόμενη μέρα για να συμπληρώσει την υπάρχουσα αγορά σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η τότε νέα αγορά, μαζί με μια σειρά άλλων αλλαγών στον τρόπο λειτουργίας του συστήματος της αγοράς, είναι σύμφωνες με ένα πρότυπο σχέδιο αγοράς που εφαρμόστηκε από την Ομοσπονδιακή Ρυθμιστική Επιτροπή Ενέργειας (FERC). Ένα από τα βασικά στοιχεία του τυποποιημένου σχεδιασμού της αγοράς της FERC, το οποίο καθιερώνει ένα τυπικό πλαίσιο για τη λειτουργία των αγορών χονδρικής ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ, είναι η ύπαρξη αγοράς τόσο της επόμενης

---

<sup>4</sup> Το PJM έχει ωριαίες περιόδους συναλλαγών ενώ το NZEM χρησιμοποιεί περιόδους μισής ώρας.

ημέρας όσο και σε πραγματικό χρόνο για την υποστήριξη διμερών συμβάσεων αντιστάθμισης κινδύνου μεταξύ εμπόρων ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 9 Σύγκριση της αγοράς επόμενης ημέρας με διάφορες συνεδρίες (sessions) αγοράς εντός της ημέρας.

## 4.2 Προβλήματα της Αγοράς

### 4.2.1 Κεντρικές ή Αποκεντρωμένες Αγορές

Ο σχεδιασμός της αγοράς των μελλοντικών αγορών σε πραγματικό χρόνο και μακροπρόθεσμα είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία και τα αποτελέσματα της συνολικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα βασικό ζήτημα που ανακύπτει στον σχεδιασμό της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι εάν μια συγκεκριμένη αγορά πρέπει να είναι αποκεντρωμένη ή συγκεντρωτική<sup>5</sup>. Ένας αποκεντρωμένος μηχανισμός αγοράς είναι μια αγορά χωρίς εξειδικευμένη θεσμική εμπορική ρύθμιση όπου οι παραγωγοί και οι αγοραστές ηλεκτρικής ενέργειας συναλλάσσονται απευθείας μεταξύ τους μέσω συμβάσεων. Αντίθετα, μια κεντρική αγορά περιλαμβάνει μια ειδική θεσμική διαπραγματεύση με τον διαχειριστή του συστήματος να συντονίζει τις προσφορές των παραγωγών και των αγοραστών για να καθορίσει την αγοραία τιμή και την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που διακινείται. Η επιθυμητή επιλογή αποκεντρωμένης ή κεντρικής συμφωνίας συναλλαγών ποικίλλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της αγοράς. Η επιθυμητή επιλογή αποκεντρωμένης ή κεντρικής συμφωνίας συναλλαγών ποικίλλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της αγοράς. Για την ηλεκτρική ενέργεια,

<sup>5</sup> Δεν πρέπει να συγχέεται με την αποκεντρωμένη λήψη αποφάσεων από τους συμμετέχοντες. Τόσο οι κεντρικοί όσο και οι αποκεντρωμένοι μηχανισμοί αγοράς, όπως τους ορίζουμε, επιτρέπουν στους συμμετέχοντες να ενεργούν ανεξάρτητα.

όπως σημειώνει ο Stoft (Stoft, 2002) [30]: «είναι γενικά αποδεκτό ότι η λειτουργία (σε πραγματικό χρόνο) θα πρέπει να είναι συγκεντρωτική και οι προθεσμιακές αγορές πέραν της εβδομάδας θα πρέπει να είναι διμερείς και αποκεντρωμένες».

Γιατί μπορεί να συμβαίνει αυτό; Αντλώντας και επεκτείνοντας τις ιδέες των (Evans & Mellor, 2003) [31], υπάρχουν δύο πτυχές που είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη στη συζήτηση για τις κεντρικές ή αποκεντρωμένες αγορές.

Το πρώτο από αυτά είναι το επίπεδο του κόστους συναλλαγής. Ο κεντρικός συντονισμός αγοραστών και πωλητών είναι δύσκολος όταν συνεπάγεται σχετικά υψηλό κόστος συναλλαγής. Για παράδειγμα, εάν υπάρχει μεγάλος αριθμός αγοραστών και πωλητών που είναι γεωγραφικά διάσπαρτοι, και με περιορισμένα μέσα επικοινωνίας σε μαζική κλίμακα<sup>6</sup> και ετερογενή προϊόντα διαφορετικής ποιότητας, το κόστος λειτουργίας μιας κεντρικής αγοράς μπορεί να είναι υψηλό. Σε αυτήν την περίπτωση, μια αποκεντρωμένη αγορά όπου οι αγοραστές και οι πωλητές υποκινούν διμερείς συναλλαγές μεταξύ τους είναι πιθανό να είναι πιο αποδοτική ως προς το κόστος. Σε μια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, το κόστος συναλλαγής μειώνεται λόγω της ομοιογένειας του προϊόντος, αλλά στις προθεσμιακές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας τα προϊόντα όπως τα μακροπρόθεσμα συμβόλαια αντιστάθμισης δε θα είναι ομοιογενή, καθώς θα προσδιορίζονται για διαφορετικά μήκη και τοποθεσίες. Εάν, για παράδειγμα, υποθέταμε ότι υπάρχει μια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας για έξι μήνες πριν, είναι απίθανο να υπάρχουν αρκετοί παραγωγοί ή αγοραστές που θα απαιτούν ακριβώς εξάμηνες συμβάσεις για να δικαιολογήσουν μια κεντρική αγορά. Ως εκ τούτου, η εξοικονόμηση κόστους συναλλαγής από τη συγκέντρωση μιας τέτοιας αγοράς είναι απίθανο να αντισταθμίσει το κόστος. Σε αυτήν την περίπτωση, το κόστος από τη λειτουργία μιας αποκεντρωμένης αγοράς μπορεί να είναι χαμηλότερο, οπότε θα ήταν προτιμότερο να αφεθούν οι παραγωγοί και οι αγοραστές να υποκινούν συναλλαγές μεταξύ τους για την επιθυμητή διάρκεια της σύμβασης.

Καθώς οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας πλησιάζουν σε πραγματικό χρόνο, το προϊόν γίνεται πιο ομοιογενές καθώς θα προσελκύνονται περισσότεροι συμμετέχοντες σε αυτό και το κόστος συναλλαγής της λειτουργίας μιας κεντρικής αγοράς μειώνεται. Σε μια αγορά της επόμενης ημέρας, για παράδειγμα, το προϊόν είναι το ίδιο για όλους

---

<sup>6</sup> Οι δυνατότητες ηλεκτρονικής επικοινωνίας έχουν μειώσει αυτό το κόστος.

τους συμμετέχοντες στην αγορά: ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται ή καταναλώνεται την επόμενη μέρα, και σχεδόν όλοι οι συμμετέχοντες θα έχουν ενδιαφέρον για αυτό. Θα υπάρξει μεγαλύτερη ζήτηση για μια κεντρικά συντονισμένη αγορά της επόμενης ημέρας από (ας πούμε) μια αγορά έξι μηνών πριν, καθώς σχετικά περισσότεροι προμηθευτές και αιτούντες θα ενδιαφέρονται για συμμετοχή. Όπως αναφέρθηκε, η ζήτηση για μακροπρόθεσμα συμβόλαια θα ποικίλλει ως προς τη χρονική αντιστοίχιση με τα προφίλ κινδύνου και τη διάθεση έκθεσης σε κίνδυνο των διαφόρων συμμετεχόντων στον κλάδο. Εν ολίγοις, μια κεντρική αγορά μπορεί να μειώσει το κόστος των συναλλαγών και να είναι πιο αποδοτική ως προς το κόστος από μια αποκεντρωμένη αγορά για τη λειτουργία των αγορών της επόμενης ημέρας και σε πραγματικό χρόνο.

Η άλλη πτυχή που υποστηρίζουν οι Evans και Mellsop είναι ότι η ανταλλαγή πληροφοριών σε μια αγορά μπορεί να ενισχύσει την ευημερία. Προτείνεται ότι οι κεντρικές αγορές θα προωθήσουν περισσότερη ανταλλαγή πληροφοριών από τις αποκεντρωμένες. Το επιχείρημα αντλείται από τη θεωρία του πλειστηριασμού. Οι δημοπρασίες χρησιμοποιούνται επειδή ένας πωλητής (ή αγοραστής στην περίπτωση της ηλεκτρικής ενέργειας) αντιμετωπίζει αβεβαιότητα ως προς την αξία που αποδίδει κάθε αγοραστής (πωλητής) στο αντικείμενο. Οι τιμές μπορεί να είναι ιδιωτικές ή κοινές ή κάποιος συνδυασμός των δύο. Ιδιωτικές αξίες είναι όταν ο πλειοδότης γνωρίζει μόνο την προσωπική του αξία του αντικειμένου (π.χ. το οριακό κόστος παραγωγής ή την αξία της ζήτησης), ενώ με τις κοινές αξίες (την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας) η αξία προκύπτει από τις χρήσεις του αντικειμένου που επηρεάζουν όλων των πιθανών συμμετεχόντων στην αγορά και επομένως είναι σχετική με όλους τους πλειοδότες. Με κοινές αξίες, ωστόσο, κάθε πλειοδότης θα έχει τη δική του, ιδιωτική, εκτίμηση της κοινής αξίας και αυτές μπορεί να διαφέρουν. Στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, η κοινή αξία είναι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που επηρεάζει όλους τους συμμετέχοντες. Επιπλέον, οι παραγωγοί και οι αγοραστές έχουν ατελείς πληροφορίες σχετικά με το ποια μπορεί να είναι αυτή η τιμή. Οι ιδιωτικές τους απόψεις για την κοινή αξία εκφράζονται στις προσφορές και τις προσφορές τους στην αγορά σε πραγματικό χρόνο και την προθυμία τους να πληρώσουν τις τιμές των μακροπρόθεσμων συμβολαίων.

Οι δημοπρασίες με στοιχεία κοινών αξιών υπόκεινται στην έννοια της κατάρας του νικητή, στην οποία ο νικητής αναμένει, δικαιολογημένα, ότι έχει υπερεκτιμήσει

(εάν είναι αγοραστής) την τελική τιμή. Σε μια δημοπρασία ηλεκτρικής ενέργειας pay-as-bid, η κατάρα του νικητή αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι για να προγραμματιστεί μια γεννήτρια για αποστολή, είναι πιθανό να έχει υποτιμήσει την τιμή εκκαθάρισης της αγοράς. Ως εκ τούτου, η εν λόγω γεννήτρια είναι πιθανό να πληρωθεί λιγότερο για την ηλεκτρική ενέργεια από ό,τι θα μπορούσε να παράγει. Η γνώση για την κατάρα του νικητή παρακινεί τους παραγωγούς να υποβάλουν υψηλότερες προσφορές για να αποφύγουν την υποτίμηση της ηλεκτρικής ενέργειας και να αποκομίσουν λιγότερα κέρδη. Η κατάρα του νικητή δεν προκύπτει σε δημοπρασίες ενιαίας τιμής του είδους που χρησιμοποιείται στις περισσότερες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας<sup>7</sup>.

Η αξία μιας προθεσμιακής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι αποκαλύπτει πληροφορίες που βοηθούν στην επίλυση αυτού του προβλήματος. Οι συμμετέχοντες στην αγορά βασίζονται στις προσφορές τους και τις αποφάσεις τους σε μια προθεσμιακή αγορά στις τρέχουσες αξίες και τις προσδοκίες τους για το μέλλον. Όπως δείχνουν οι Evans και Mellsor, αυτές οι επιπλέον πληροφορίες παρέχουν στους συμμετέχοντες της αγοράς περισσότερη γνώση σχετικά με τις κοινές αξίες, γεγονός που αποδυναμώνει την κατάρα του νικητή και οδηγεί σε πιο επιθετικές (δηλαδή χαμηλότερες) προσφορές. Επιπλέον, μια κεντρική προθεσμιακή αγορά θα αποκαλύψει περισσότερες πληροφορίες από μια αποκεντρωμένη, καθώς αποκαλύπτει τα αποτελέσματα των προσφορών και των προσφορών σε όλους τους συμμετέχοντες σε αντίθεση μόνο με αυτούς που συμμετέχουν σε κάθε διμερές εμπόριο. Ως εκ τούτου, μια κεντρική αγορά μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική στον μετριασμό των κατάρων του νικητή παρά μια αποκεντρωμένη αγορά.

Συνοπτικά, αγορές όπως οι αγορές της επόμενης ημέρας που είναι κοντά σε πραγματικό χρόνο θα έχουν ομοιογενές προϊόν και υψηλότερη ζήτηση από άλλες μελλοντικές αγορές. Ως εκ τούτου, το όφελος από το χαμηλότερο κόστος συναλλαγής σε κεντρικές αγορές είναι πιθανό να είναι σχετικά σημαντικό. Οι αγορές της ημέρας αποκαλύπτουν επίσης πληροφορίες, οι οποίες αποδυναμώνουν το πρόβλημα της κατάρων του νικητή. Οι κεντρικές αγορές θα συμβιβάσουν τις πληροφορίες ενός ευρύτερου φάσματος συμμετεχόντων σε σχέση με αποκεντρωμένες αγορές. Αυτά τα επιχειρήματα βοηθούν να διαφωτιστεί το παραπάνω απόσπασμα του Stoft και θα

---

<sup>7</sup> Η κατάρα του νικητή είναι πιθανό να είναι πιο διαδεδομένη σε μακροπρόθεσμες συναλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας που είναι σπάνιες από ό,τι σε επαναλαμβανόμενες συναλλαγές υψηλής συχνότητας.



μπορούσαν να υποδείξουν γιατί οι κεντρικές αγορές είναι πιο διαδεδομένες από τις αποκεντρωμένες αγορές σε αγορές ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργούν την επόμενη μέρα και σε πραγματικό χρόνο σε όλο τον κόσμο.

#### **4.2.2 Δημοπρασίες ενιαίας τιμής (*uniform price*) ή πληρωμής ως προσφοράς (*pay-as-bid*)**

Το άλλο κύριο ζήτημα σχεδιασμού, ιδιαίτερα σχετικό με το σύστημα δύο διακανονισμών, είναι η μορφή δημοπρασίας που χρησιμοποιείται σε μια κεντρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν ουσιαστικά ως δημοπρασίες, με τους παραγωγούς και τους αγοραστές να μπορούν να υποβάλλουν προσφορές και προσφορές για πόση ηλεκτρική ενέργεια επιθυμούν να πουλήσουν ή να αγοράσουν και σε ποια τιμή. Οι δύο κοινές μορφές δημοπρασίας είναι οι δημοπρασίες ενιαίας τιμής και πληρωμής ως προσφοράς (Counsell, 2003) [32]. Σε μια δημοπρασία ενιαίας τιμής, η τιμή εκκαθάρισης της αγοράς καθορίζεται και οι συμμετέχοντες στην αγορά θα πληρωθούν (ή θα πληρώσουν) την ίδια τιμή εκκαθάρισης για ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται (ή αγοράζεται). Αντίθετα, σε μια δημοπρασία *pay-as-bid* κάθε συμμετέχων θα πληρωθεί (ή θα πληρώσει) την πραγματική τιμή που προσφέρει (προσφορά) για οποιαδήποτε ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται (ή αγοράζεται). Οι δημοπρασίες ενιαίας τιμής είναι πιο συνηθισμένες στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιούνται τόσο σε αγορές της επόμενης ημέρας όσο και σε αγορές σε πραγματικό χρόνο στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας των ΗΠΑ και σε αγορές σε πραγματικό χρόνο όπως η NZEM<sup>8</sup>. Οι δημοπρασίες ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο με πληρωμή ως προσφορά είναι σπάνιες, αν και οι Νέοι Διακανονισμοί Εμπορίας Ηλεκτρικής Ενέργειας που εφαρμόστηκαν στις αρχές του 2000 στο Ηνωμένο Βασίλειο επιχείρησαν μια αγορά εξισορρόπησης πληρωμής ως προσφοράς σε πραγματικό χρόνο.

Σε μια κεντρική αγορά σε πραγματικό χρόνο, μια δημοπρασία ενιαίας τιμής μπορεί να επιτρέψει την καλύτερη ανακάλυψη τιμής από την πληρωμή ως προσφορά. Σε μια δημοπρασία *pay-as-bid*, οι παραγωγοί στοχεύουν να αξιοποιήσουν στο έπακρο

---

<sup>8</sup> New Zealand electricity market

την αγορά εκτιμώντας την τιμή εκκαθάρισης της αγοράς και προσφέροντας σε αυτήν την τιμή. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγουν να υποφέρουν επειδή πληρώνονται για μια προσφορά χαμηλότερη από την τιμή εκκαθάρισης, όταν θα μπορούσαν να έχουν κάνει προσφορές υψηλότερες ή κοντά στην τιμή εκκαθάρισης και εξακολουθούν να έχουν προγραμματιστεί για αποστολή. Το πρόβλημα είναι ότι εάν όλοι οι παραγωγοί προσφέρουν σε αυτό που πιστεύουν ότι θα είναι η τιμή εκκαθάρισης της αγοράς, ο διαχειριστής του συστήματος δεν έχει τις διαθέσιμες πληροφορίες για να προγραμματίσει την πιο αποτελεσματική γεννήτρια. Αντίθετα, σε μια ανταγωνιστική δημοπρασία ενιαίας τιμής, οι παραγωγοί έχουν κίνητρο να υποβάλλουν προσφορές με το οριακό τους κόστος. Έτσι, με τη λειτουργία μιας δημοπρασίας ενιαίας τιμής σε πραγματικό χρόνο, ο διαχειριστής του συστήματος έχει τις σχετικές πληροφορίες για να αποκτήσει τη μικρότερη παραγωγή κόστους για να καλύψει τυχόν αποκλίσεις από την παραγωγή και το φορτίο της επόμενης ημέρας και λαμβάνει παραγγελία για αποστολή. Εν ολίγοις, η δημοπρασία ενιαίας τιμής ανακαλύπτει το χρονοδιάγραμμα και την τιμή προσφοράς με το χαμηλότερο κόστος, αλλά η δημοπρασία πληρωμής ως προσφορά ανακαλύπτει μόνο την τιμή.

Ωστόσο, μια δημοπρασία ενιαίας τιμής μπορεί να επηρεαστεί από τυχερά παιχνίδια από γεννήτριες που κατέχουν επαρκή ισχύ στην αγορά. Σε μη ανταγωνιστικές καταστάσεις, ένας παραγωγός μπορεί να αυξήσει την τιμή μιας προσφοράς που γνωρίζει ότι θα καθορίσει την τιμή εκκαθάρισης της αγοράς, προκειμένου να επιτύχει υψηλότερα κέρδη σε μονάδες που δεν ορίζουν την τιμή εκκαθάρισης αγοράς σε χαμηλότερες προσφορές. Μια δημοπρασία pay-as-bid μπορεί να περιορίσει αυτό το κίνητρο για έναν παραγωγό να ασκήσει ισχύ στην αγορά, αν και οι μεγαλύτερες παραγωγοί μπορούν να έχουν πλεονέκτημα σε μια δημοπρασία πληρωμής ως προσφορά, καθώς μπορεί να έχουν περισσότερους διαθέσιμους πόρους για την πρόβλεψη της τιμής εκκαθάρισης της αγοράς από τους μικρότερους πλειοδότες.

Αν και μια αγορά πληρωμής ως προσφοράς για την επόμενη ημέρα δε βρίσκει το χρονοδιάγραμμα αποστολής με το χαμηλότερο κόστος, αυτό δεν έχει σημασία για τη λειτουργία μιας αγοράς την επόμενη μέρα. Ο διαχειριστής συστήματος απαιτεί μόνο ένα χρονοδιάγραμμα αποστολής με το ελάχιστο κόστος όταν πραγματοποιείται φυσική αποστολή, το οποίο είναι σε πραγματικό χρόνο. Μια δημοπρασία ενιαίας τιμής στην αγορά σε πραγματικό χρόνο θα επιτρέψει να βρεθεί. Ως εκ τούτου, είναι πιθανό ότι

ένας συνδυασμός μιας αγοράς πληρωμής ως προσφοράς την επόμενη μέρα και μιας αγοράς ενιαίας τιμής σε πραγματικό χρόνο μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ανακάλυψη τιμών.

### **4.3 Τα οφέλη της αγοράς της επόμενης ημέρας**

Αν και οι αγορές για την επόμενη μέρα δεν είναι απαραίτητες για τη λειτουργία μιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχουν ορισμένα οφέλη στους παραγωγούς και τους αγοραστές ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Irastorza και Fraser (Irastorza & Fraser, 2002) [29] ταξινομήσαν τα κύρια πιθανά οφέλη από τις αγορές της επόμενης ημέρας σε πέντε κατηγορίες :

- I. Αξιοπιστία
- II. Συμμετοχή από πλευράς ζήτησης
- III. Δέσμευση Μονάδας
- IV. Αβεβαιότητα Τιμών
- V. Παίγνιο

#### **4.3.1 Αξιοπιστία**

Το πρώτο από αυτά τα οφέλη είναι η αύξηση της αξιοπιστίας. Οι αγορές για την επόμενη μέρα επιτρέπουν στις γεννήτριες να κλειδώνουν την παραγωγή μια μέρα πριν αυτό απαιτηθεί. Αυτό διασφαλίζει ότι η παραγωγή είναι διαθέσιμη εκ των προτέρων για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της ημέρας και παρέχει βεβαιότητα για τους παραγωγούς. Οι γεννήτριες θα γνωρίζουν εκ των προτέρων εάν μια συγκεκριμένη μονάδα θα λειτουργήσει και πόσο καιρό αναμένεται να λειτουργήσει. Επιπλέον, οι αγορές της επόμενης ημέρας προστατεύουν την πλευρά της ζήτησης όσον αφορά τη διασφάλιση της αξιοπιστίας της προσφοράς και τη βοήθεια στη διαχείριση φορτίου. Μια αγορά της επόμενης ημέρας θα παρέχει μεγαλύτερη βεβαιότητα στον προγραμματισμό του διακοπτόμενου φορτίου (δηλαδή του φορτίου που μπορεί να αποσυνδεθεί για να παρέχει στιγμιαία εφεδρεία όταν το φορτίο υπερβαίνει την παραγωγή).

### **4.3.2 Συμμετοχή από πλευράς ζήτησης**

Το δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι μια αγορά για την επόμενη μέρα είναι πιθανό να προωθήσει την αυξημένη συμμετοχή από την πλευρά της ζήτησης από τους αγοραστές ηλεκτρικής ενέργειας. Η έλλειψη ενεργούς συμμετοχής από την πλευρά της ζήτησης έχει κατηγορηθεί ως η ρίζα πολλών προβλημάτων που υπάρχουν στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας (Fraser, 2001) [33]. Πρόσφατη έρευνα δείχνει ότι η βελτίωση της συμμετοχής από την πλευρά της ζήτησης στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας θα προσφέρει σημαντικά οφέλη. Για παράδειγμα, η Peak Load Management Alliance (2002) στις ΗΠΑ ταξινομεί τα οφέλη σε επτά κατηγορίες: βελτιωμένη αξιοπιστία συστήματος, μείωση κόστους, βελτιωμένη αποδοτικότητα της αγοράς, καλύτερη διαχείριση κινδύνων, περιβαλλοντικά οφέλη, βελτιώσεις εξυπηρέτησης πελατών και μετριασμός ισχύος στην αγορά. Δίνοντας στην πλευρά της ζήτησης ένα κίνητρο να κλειδώσει τις τιμές και τις ποσότητες μπροστά σε πραγματικό χρόνο και να μειώσει την έκθεση σε ασταθείς τιμές σε πραγματικό χρόνο, οι αγοραστές θα είναι πιο πρόθυμοι να συμμετάσχουν στην αγορά. Μια αγορά για την επόμενη μέρα δημιουργεί ένα τέτοιο κίνητρο. Οι αγοραστές σε μια αγορά της επόμενης ημέρας γνωρίζουν εκ των προτέρων την τιμή που θα πληρώσουν για την ηλεκτρική τους ενέργεια. Αυτό τους επιτρέπει επίσης να αλλάξουν την κατανάλωσή τους και να αγοράσουν ξανά ή να πουλήσουν ενέργεια στην αγορά σε πραγματικό χρόνο, εάν είναι προς το συμφέρον τους να το κάνουν.

### **4.3.3 Δέσμευση Μονάδας**

Οι αγορές της επόμενης ημέρας βοηθούν στην επίλυση του προβλήματος της δέσμευσης μονάδων. Αυτό είναι το πρόβλημα του αν θα δεσμευτεί μια μονάδα σε γενιά όταν αυτή η μονάδα χρειάζεται πολύ χρόνο για να ξεκινήσει. Αυτό είναι πιο διαδεδομένο με μονάδες θερμικής παραγωγής (όπως οι ατμοστρόβιλοι που καίνε άνθρακα), οι οποίες συνήθως χρειάζονται πολύ χρόνο για να ξεκινήσουν<sup>9</sup>, ενώ οι

---

<sup>9</sup> Δεν αργούν να ξεκινήσουν όλες οι μονάδες παραγωγής θερμότητας. Για παράδειγμα, οι αεριοστρόβιλοι έχουν συνήθως πολύ γρήγορους χρόνους εκκίνησης.

μονάδες υδροηλεκτρικής παραγωγής μπορούν να ξεκινήσουν αρκετά γρήγορα. Το πρόβλημα προκύπτει για τις γεννήτριες που μπορεί να είναι αβέβαιοι εάν θα δεσμεύσουν μια συγκεκριμένη μονάδα στην παραγωγή, καθώς μπορεί να μην είναι οικονομικά αποδοτικό να το κάνουν. Δημιουργώντας μια αγορά για την επόμενη μέρα, υπάρχει επαρκής χρόνος για τη δέσμευση παραγωγής και εκκίνησης μονάδων αργής εκκίνησης. Οι παραγωγοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα σήματα τιμών που παρέχονται από την αγορά της επόμενης ημέρας για να δεσμεύσουν μονάδες γνωρίζοντας ότι θα είναι οικονομικά αποδοτικό να το κάνουν.

#### **4.3.4 Αβεβαιότητα Τιμών**

Το τέταρτο όφελος που εντόπισαν οι Irastorza και Fraser από τη λειτουργία μιας αγοράς για την επόμενη μέρα είναι ότι μειώνεται ο αντίκτυπος της αβεβαιότητας στις τιμές της αγοράς σε πραγματικό χρόνο. Οι συμμετέχοντες σε μια αγορά της επόμενης ημέρας συνάπτουν ουσιαστικά συμβόλαιο αντιστάθμισης μιας ημέρας έναντι των ασταθών τιμών στην αγορά σε πραγματικό χρόνο. Με το σύστημα δύο διακανονισμών μεταξύ των αγορών της επόμενης ημέρας και των αγορών σε πραγματικό χρόνο, οι παραγωγοί και οι αγοραστές γνωρίζουν με βεβαιότητα ότι οποιαδήποτε ποσότητα που συναλλάσσεται στην αγορά της επόμενης ημέρας δε θα υπόκειται σε τιμές σε πραγματικό χρόνο. Τέτοιες τιμές χρεώνονται μόνο όταν υπάρχουν αποκλίσεις από το προγραμματισμένο φορτίο ή παραγωγή της επόμενης ημέρας.

Στοιχεία από αγορές ηλεκτρικής ενέργειας όπως η Καλιφόρνια και η Νέα Υόρκη υποδηλώνουν ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας διαπραγματεύεται πραγματικά στην αγορά πραγματικού χρόνου (Irastorza & Fraser, 2002) [29]. Το μεγαλύτερο μέρος διαπραγματεύεται μέσω μιας αγοράς για την επόμενη ημέρα ή μέσω προθεσμιακών διμερών συμβάσεων αντιστάθμισης κινδύνου. Ελλείψει αγοράς της επόμενης ημέρας, μια εταιρεία παραγωγής μπορεί να αντισταθμίσει (ας πούμε) το 80 τοις εκατό της παραγωγής της σε προθεσμιακές συμβάσεις, αφήνοντας το 20 τοις εκατό της παραγωγής της ως «σε κίνδυνο», η οποία είναι εκτεθειμένη σε ασταθείς τιμές σε πραγματικό χρόνο. Λόγω των μεταβαλλόμενων συνθηκών προσφοράς και ζήτησης (για παράδειγμα, αλλαγή των καιρικών συνθηκών σε ένα σύστημα υδροπαραγωγής), μια γεννήτρια προφανώς δεν μπορεί να αντισταθμίσει το

100 τοις εκατό της παραγωγής της σε προθεσμιακές συμβάσεις ή διατρέχει σημαντικό κίνδυνο να υπερβεί ή να προμηθεύσει τους αντισταθμιστές της στην αγορά σε πραγματικό χρόνο. Ωστόσο, μια αγορά την επόμενη μέρα μειώνει το περιθώριο παραγωγής σε κίνδυνο, αφήνοντας πολύ λιγότερο από το 20 τοις εκατό να υπόκειται σε ασταθείς τιμές σε πραγματικό χρόνο.

Ομοίως, ένας αγοραστής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να έχει μεγάλο ποσοστό των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας σε μακροπρόθεσμα συμβόλαια αντιστάθμισης κινδύνου, αλλά αυτό εξακολουθεί να αφήνει ένα μικρό ποσό σε κίνδυνο για ασταθείς τιμές σε πραγματικό χρόνο. Και πάλι, μια αγορά για την επόμενη μέρα μειώνει αυτόν τον όγκο παραγωγής σε κίνδυνο. Αν και το επίπεδο των τιμών της επόμενης ημέρας είναι πιθανό να είναι παρόμοιο με το επίπεδο των τιμών σε πραγματικό χρόνο<sup>10</sup>, και πάντα θα υπάρχουν αποκλίσεις που πρέπει να διαχειρίζονται από μια αγορά σε πραγματικό χρόνο, ο συνδυασμός προθεσμιακών διμερών συμβάσεων αντιστάθμισης και μια αγορά την επόμενη μέρα θα μειώσει σημαντικά τον αντίκτυπο των ασταθών τιμών σε πραγματικό χρόνο στους συμμετέχοντες στην αγορά.

#### **4.3.5 Παίγνιο**

Όπως αναφέρθηκε ήδη, μια μορφή δημοπρασίας pay-as-bid μπορεί να μειώσει τυχόν ευκαιρίες παιχνιδιού που μπορεί να προκύψουν σε μια δημοπρασία ενιαίας τιμής. Επιπλέον, μια αγορά για την επόμενη μέρα από μόνη της, ανεξάρτητα από τη μορφή της, μπορεί να μετριάσει τα κίνητρα για συμμετοχή στην αγορά σε πραγματικό χρόνο. Σε μια αγορά πραγματικού χρόνου ενιαίας τιμής, μια γεννήτρια μπορεί να επιχειρήσει να παίξει την αγορά παρακρατώντας την παραγωγή κοντά σε πραγματικό χρόνο. Η απόκτηση εναλλακτικής παραγωγής είναι πιθανό να αυξήσει την τιμή εκκαθάρισης της αγοράς που λαμβάνει ένας παραγωγός σε άλλες μονάδες ηλεκτρικής ενέργειας που έχει προγραμματιστεί να παράγει. Σε μια αγορά της επόμενης ημέρας, οι τιμές των παραγωγών είναι κλειδωμένες στην τιμή της επόμενης ημέρας, επομένως δε θα κερδίσουν επιδιώκοντας να επηρεάσουν την τιμή σε πραγματικό χρόνο και επομένως

---

<sup>10</sup> Οι Irastorza και Fraser (2002, σ. 31) δείχνουν ότι οι μέσες τιμές για τις αγορές της επόμενης ημέρας και τις αγορές πραγματικού χρόνου στη Νέα Υόρκη είναι πολύ παρόμοιες. Ωστόσο, η τυπική απόκλιση των τιμών είναι σημαντικά υψηλότερη στην αγορά πραγματικού χρόνου.

δεν έχουν κίνητρο να το κάνουν. Η αγορά σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιείται μόνο για τη διαχείριση αποκλίσεων από το φορτίο και την παραγωγή της επόμενης ημέρας. Ως εκ τούτου, οι γεννήτριες δεν είναι σε θέση να επωφεληθούν από τις υψηλές τιμές στην αγορά σε πραγματικό χρόνο, επειδή οι τιμές έχουν ήδη καθοριστεί στην αγορά της επόμενης ημέρας. Αυτό είναι ουσιαστικά ό,τι κάνουν και τα προθεσμιακά διμερή συμβόλαια αντιστάθμισης οποιασδήποτε διάρκειας. Με το κλείδωμα μιας συμφωνημένης τιμής μεταξύ παραγωγού και αγοραστή πολύ πριν από την πραγματική περίοδο συναλλαγών, οι παραγωγοί και οι αγοραστές δεν έχουν κανένα κίνητρο να χειραγωγήσουν την τιμή σε πραγματικό χρόνο.

Ο Michaels (Michaels, 2003) [34] έχει υποστηρίξει ότι η ισχύς στην αγορά μπορεί να εφαρμοστεί με τις συναλλαγές τόσο στην αγορά πραγματικού χρόνου όσο και στην αγορά της επόμενης ημέρας. Υποστηρίζει ότι οι αγοραστές εκμεταλλεύτηκαν την ισχύ της αγοράς στην αγορά της Καλιφόρνια, οδηγώντας στην κρίση σε αυτήν την αγορά. Ωστόσο, το επιχείρημά του βασίζεται στο γεγονός ότι η Καλιφόρνια χρησιμοποίησε μια δημοπρασία ενιαίας τιμής για την αγορά της επόμενης ημέρας και η εικονική προσφορά απαγορεύτηκε.

#### ***4.4 Μεθοδολογία Τιμολόγησης στις Αγορές Επόμενης Ημέρας***

Οι αγορές της επόμενης ημέρας ακολουθούν δύο κύριες μεθοδολογίες, την κεντρική κομβική και τη διμερή μέθοδο τιμολόγησης. Η τιμή καθορίζεται εξετάζοντας όλες τις προσφορές προσφοράς και ζήτησης και στη συνέχεια η προσφορά επιλέγεται από την υψηλότερη προσφορά και η ζήτηση επιλέγεται ως η χαμηλότερη προσφορά ζήτησης για συναλλαγές στην αγορά. Ο προσδιορισμός της τιμής λαμβάνει υπόψη το οριακό πλεόνασμα, το οποίο είναι η διακύμανση του συνολικού πλεονάσματος όταν αυξάνεται μια μονάδα χωρίς κόστος προσφοράς (Asija & Viral, 2021) [35].

Οι απεριόριστες αγορές έχουν ορισμένα εμφανή χαρακτηριστικά, όπως η διαθεσιμότητα μονάδων προσφοράς χωρίς κόστος, οι οποίες θα μετακινούσαν ολόκληρη την καμπύλη προσφοράς προς τα αριστερά, καθώς οι ποσότητες της παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας παραμένουν αναλλοίωτες. Έτσι, εάν το οριακό πλεόνασμα είναι  $P$ , τότε η τελική εξοικονόμηση κόστους παραγωγής θα ήταν

$P \cdot 1 \text{ kW}$ . Πρέπει να περιορίσουμε την κατανάλωση ρεύματος εάν η προσβάσιμη γεννήτρια έχει υψηλό κόστος. Αλλά με τη διαθεσιμότητα μιας επιπλέον μονάδας  $1 \text{ kW}$ , η κατανάλωση θα μπορούσε να αυξηθεί. Το κόστος παραγωγής δε μεταβάλλεται σε αυτή την περίπτωση, αλλά παραμένει σταθερό. Μόνο η κατανάλωση θα αυξηθεί σε  $P \cdot 1 \text{ kW}$ , αυξάνοντας έτσι περαιτέρω το συνολικό πλεόνασμα κατά την ισοδύναμη τιμή. Και για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις, το οριακό πλεόνασμα είναι ισοδύναμο με την τιμή (Asija & Viral, 2021) [35].

Τα χαρακτηριστικά των περιορισμένων αγορών είναι εντελώς διαφορετικά. Σε αυτή τη δομή της αγοράς, και οι δύο παράγοντες της αγοράς, ο προμηθευτής και ο καταναλωτής, βρίσκονται σε αντίθετες πλευρές της πλατφόρμας της αγοράς. Οι προμηθευτές βρίσκονται στην πλευρά των περιορισμών μετάδοσης, ενώ οι αγοραστές είναι από την άλλη. Η δωρεάν παροχή  $\text{kW}$  μπορεί να εισαχθεί και στις δύο πλευρές της πλατφόρμας. Το οριακό πλεόνασμα εξαρτάται από την πλευρά του καταναλωτή και του προμηθευτή για την κατανάλωση και τη διαθεσιμότητα ενέργειας. Μια αύξηση  $\text{kW}$  από την πλευρά του καταναλωτή θα αύξανε τη ζήτηση ισχύος, ενώ μια αύξηση  $\text{kW}$  στο άκρο της προσφοράς θα μείωνε το συνολικό κόστος προσφοράς. Λόγω μεταβολών των τιμών ανά τύπο αγοράς, ο διαχειριστής του συστήματος δεσμεύει ένα μέρος του συνολικού πλεονάσματος, το οποίο ισοδυναμεί περαιτέρω με το ακαθάριστο οριακό πλεόνασμα. Τώρα σε αυτό το σημείο μπορούμε να πούμε ότι η ανταγωνιστική τιμή αγοράς καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη μόνο το οριακό πλεόνασμα, προκαλώντας έτσι την πραγματική απόδοση. Γίνεται εκκαθάριση αγοράς και η συναλλαγή διεξάγεται σε αυτές τις διαθέσιμες τιμές.



## ***Κεφάλαιο 5***

-

### ***Παρακολούθηση και Έλεγχος Συστημάτων***

#### ***5.1 Πτώση Τάσης και Απώλειες Ισχύος σε Συστήματα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας***

Το φορτίο των καταναλωτών ακόμα και στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας δεν είναι σταθερό, αλλά υφίσταται αργές μεταβολές. Εκτός από τις αργές μεταβολές του φορτίου, υπάρχουν και οι έντονες μεταβολές, οι οποίες έχουν μικρή χρονική διάρκεια και οφείλονται κυρίως σε μεταβατικές και σε διακοπτόμενες καταστάσεις συσκευών μεγάλης ισχύος (κινητήρες κλπ.). Αποτέλεσμα των μεταβολών του φορτίου είναι η μη σταθερότητα του μεγέθους της τάσης τροφοδοσίας στους ακροδέκτες των καταναλωτών και η οποία ποικίλλει ανάλογα με την απόστασή τους από την αρχή της τροφοδοσίας της κύριας γραμμής πρωτεύουσας διανομής, όπου και συνήθως η τάση ρυθμίζεται. Οι αργές μεταβολές του φορτίου αντιμετωπίζονται με την κατάλληλη σχεδίαση και ανάπτυξη του συστήματος διανομής (γραμμές διανομής, μέσα ελέγχου και ρύθμισης της τάσης), ενώ οι απότομες μεταβολές μέσα από τους περιορισμούς που θέτουν οι ηλεκτρικές επιχειρήσεις στους καταναλωτές με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς.

Το μέγεθος των αποκλίσεων των τάσεων τροφοδοσίας των καταναλωτών από τις αντίστοιχες ονομαστικές τιμές, καθώς επίσης και η αντίστοιχη χρονική διάρκεια εμφάνισής τους, επηρεάζουν σημαντικά όχι μόνο τη διάρκεια της ζωής τους, αλλά και

την ποιότητα και την απόδοση της λειτουργίας τους. Αποτελεί λοιπόν βασικό στόχο της κάθε ηλεκτρικής επιχείρησης ο όσο το δυνατόν μεγαλύτερος περιορισμός των φαινομένων αυτών.

Η επιλογή της θέσης και του μεγέθους ενός κύριου υποσταθμού διανομής ΥΤ/ΜΤ, αποτελεί ένα σύνθετο τεχνικό και οικονομικό πρόβλημα. Οι θεμελιώδεις βασικοί κανόνες που θα πρέπει να ισχύουν είναι οι εξής :

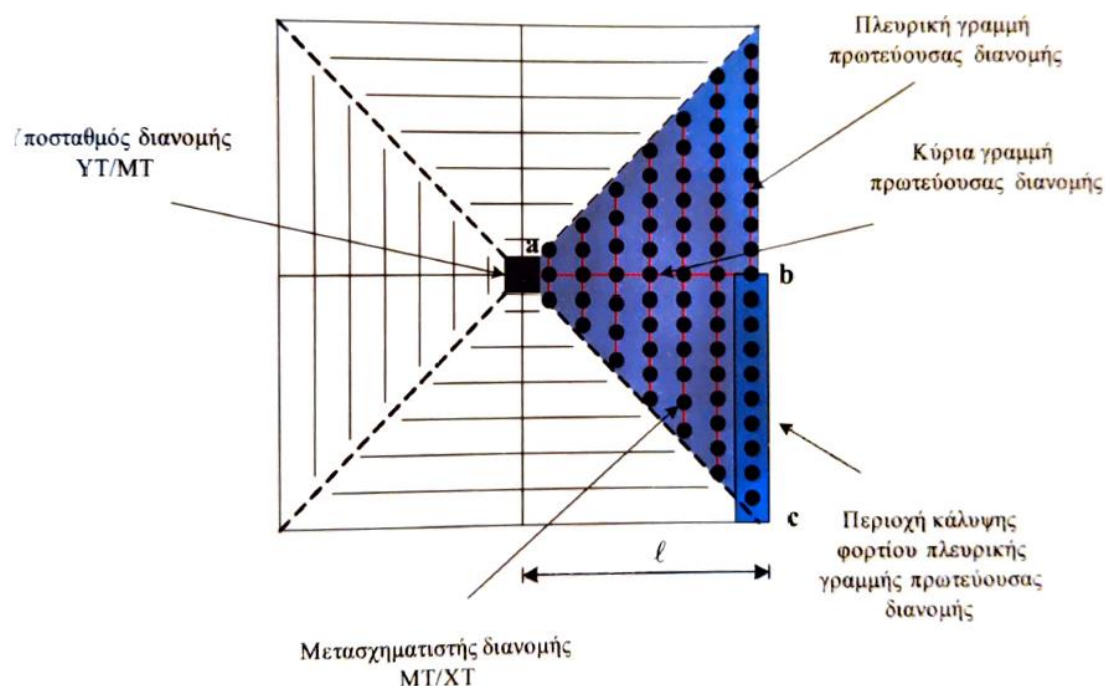
- Η θέση του Υ/Σ Θα πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο κέντρο βάρους της γεωγραφικής κατανομής της περιοχής εξυπηρέτησης φόρτου (service area), έτσι ώστε οι αποστάσεις των κύριων και των παράπλευρων γραμμών πρωτεύουσας διανομής να είναι οι ελάχιστες δυνατές, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο αφενός την απαιτούμενη ρύθμιση της τάσης με τα πιο οικονομικά μέσα και αφετέρου τον περιορισμό των απωλειών ισχύος των γραμμών.
- Θα πρέπει να διατίθεται επάρκεια χώρου για την ασφαλή όδευση των γραμμών εισόδου μεταφοράς της Υ/Τ και των γραμμών εξόδου πρωτεύουσας διανομής, καθώς επίσης και για τις μελλοντικές ανάγκες επέκτασης της ισχύος του Υ/Σ, με στόχο την κάλυψη των απαιτήσεων της κατανάλωσης σε ένα προκαθορισμένο βάθος χρόνου.

Η αύξηση του φορτίου της κατανάλωσης πρακτικά αντιμετωπίζεται με δύο πρακτικές. Η πρώτη πρακτική είναι η περιοχή εξυπηρέτησης φορτίου του υποσταθμού να παραμείνει σταθερή και αυτό μεταφράζεται στο ότι η κάλυψη της αύξησης του φορτίου θα πρέπει να εξασφαλιστεί με την επαύξηση της ισχύος του Υ/Σ. Η δεύτερη πρακτική είναι η ισχύς του Υ/Σ να παραμείνει σταθερή και να μειωθούν τα όρια της περιοχής εξυπηρέτησης φορτίου με τη δημιουργία νέων Υ/Σ.

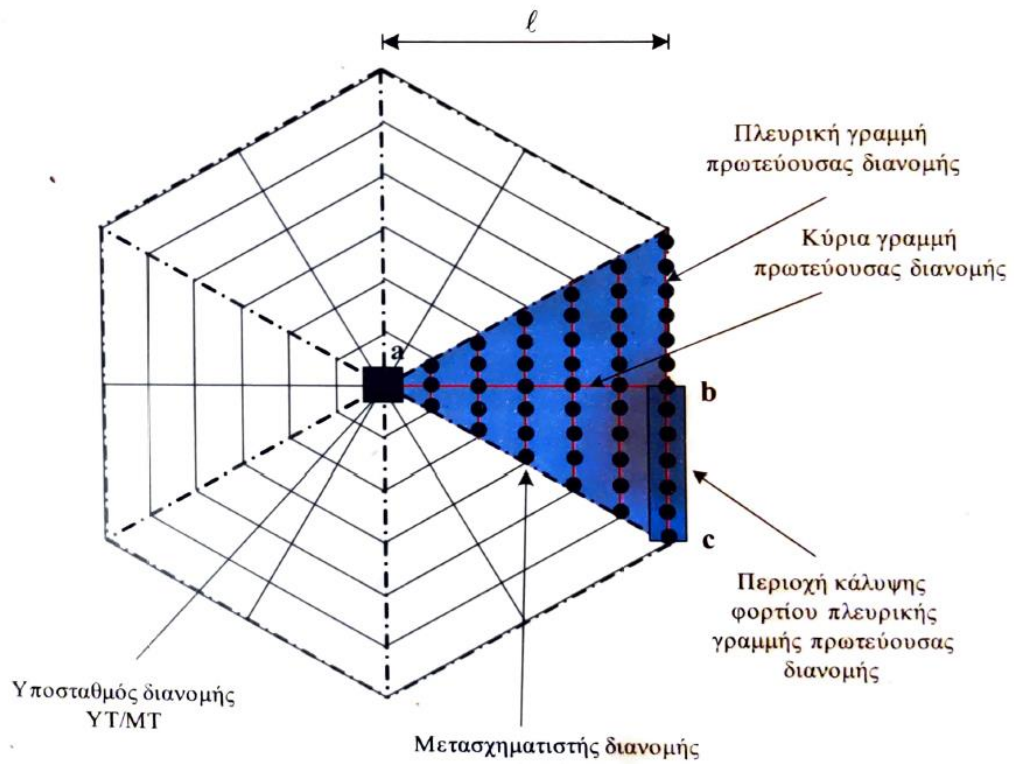
Για τη σύγκριση των διαφόρων εναλλακτικών μεθόδων σχεδίασης και ανάπτυξης των Υ/Σ διανομής ΥΤ/ΜΤ, καθώς επίσης και της τοπολογίας των κυρίων δικτύων της πρωτεύουσας διανομής, συνηθίζεται η παράσταση της περιοχής εξυπηρέτησης του Υ/Σ μέσα από κατάλληλα γεωμετρικά σχήματα. Η γεωμετρική αυτή απεικόνιση της περιοχής εξυπηρέτησης φορτίου (εικόνες 10α και 10β) απλοποιεί κατά πολύ τη σύγκριση μεταξύ εναλλακτικών μορφών σχεδίασης των υποσταθμών διανομής ΥΤ/ΜΤ, όσον αφορά κυρίως στο μέγεθος της απαιτούμενης ισχύος και στη γενικότερη

ανάπτυξη των δικτύων πρωτεύουσας διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας (κύριες και παράπλευρες γραμμές τροφοδότησης). Βέβαια, η ομοιόμορφη πυκνότητα φορτίου σε μια περιοχή δε συναντάται στην πράξη, αλλά απλοποιεί πολύ την ανάλυση και κάνει δυνατή τη διατύπωση απλών γενικών κανόνων.

Η περιοχή εξυπηρέτησης φορτίου του υποσταθμού παρουσιάζει τετραγωνική μορφή. Το φορτίο, το οποίο αντικατοπτρίζεται μέσω των μετασχηματιστών διανομής MT/XT, θεωρείται ότι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο (σταθερή επιφανειακή πυκνότητα φορτίου,  $KVA/m^2$ ). Ο υποσταθμός, διανομής βρίσκεται στο κέντρο του τετραγώνου. Από τον υποσταθμό διανομής ξεκινούν 4 κύριες τριφασικές γραμμές τροφοδότησης πρωτεύουσας διανομής. Κάθε μία, μέσω των επίσης τριφασικών πλευρικών γραμμών πρωτεύουσας διανομής και των συνδεδεμένων σε αυτές μετασχηματιστών διανομής, καλύπτει το  $\frac{1}{4}$  της συνολικής περιοχής εξυπηρέτησης φορτίου. (Μαλατέστας, 2015) [36]



Εικόνα 2α Γεωμετρικά Σχήματα Περιοχής Εξυπηρέτησης Φορτίου Υ/Σ Διανομής σε Τετραγωνική και Εξαγωνική Μορφή Αντίστοιχα , πηγή : (Μαλατέστας, 2015)



Εικόνα 38 Γεωμετρικά Σχήματα Περιοχής Εξυπηρέτησης Φορτίου Υ/Σ Διανομής σε Τετραγωνική και Εξαγωνική Μορφή Αντίστοιχα , πηγή : (Μαλατέστας, 2015)

## **Κεφάλαιο 6**

### **6.1 Γενικά**

Η διαχείριση συμφόρησης αποκτά μεγαλύτερη σημασία ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης διείσδυσης διακοπτόμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με αποτέλεσμα οι φορτώσεις των γραμμών να υπερβαίνουν τα όριά τους. Συγκεκριμένα η απρόβλεπτη, μη ελεγχόμενη παραγωγή αυτών των μονάδων δυσκολεύει την εξισορρόπηση μεταξύ της παραγομένης και ζητούμενης ισχύς θέτοντας προκλήσεις στους διαχειριστές των συστημάτων τόσο της μεταφοράς όσο και της διανομής για τη διατήρηση του επιπέδου φόρτισης των γραμμών εντός των ορίων τους. Προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτούν τη διαχείριση κατάλληλων πόρων για την αποφυγή υπερφόρτωσης των γραμμών μεταφοράς (Sgouras, et al., 2017) [37]. Προηγουμένως, μόνο οι συμβατικές μονάδες ισχύος παρείχαν αυτήν την υπηρεσία (Pena, et al., 2017) [38]. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε προηγουμένως η εισαγωγή ευέλικτων πόρων, όπως συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ηλεκτρικά οχήματα και φορτία που ανταποκρίνονται στη ζήτηση, τους επιτρέπει να συμμετέχουν στην κάλυψη αυτής της υπηρεσίας, παρέχοντας αυτή την αυξημένη διαθέσιμη ευελιξία στους ΔΣΜ και τους ΔΣΔ (Kelepouris, et al., 2020) [39].

Μια συνοπτική ανασκόπηση των προσεγγίσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την αντιμετώπιση της συμφόρησης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζεται παρακάτω. Ο (Singh, et al., 2011) [40] παρουσίασε μια προσέγγιση βελτιστοποίησης για την αντιμετώπιση της στρατηγικής διαχείρισης συμφόρησης μιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζεται σε δεξαμενές μέσω της ανακατανομής μονάδων παραγωγής υδροηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Μια παρόμοια μέθοδος έχει διατυπωθεί (Verma & Sharma, 2015) [41] για ένα υβριδικό (ομαδικό + διμερές) σύστημα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Για τον ίδιο σχεδιασμό της υβριδικής αγοράς, οι (Esmaili, et al., 2013) [42] ανέπτυξε μια μέθοδο δύο σταδίων χρησιμοποιώντας μια τροποποιημένη τεχνική αποσύνθεσης Benders για τη διαχείριση της συμφόρησης. (Poplavskaya, et al., 2020) [43] πρότεινε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της διαχείρισης συμφόρησης σε μια αγορά ζωνών με στόχο την επέκταση της ικανότητας διασυνοριακής μεταφοράς με την εισαγωγή προληπτικών

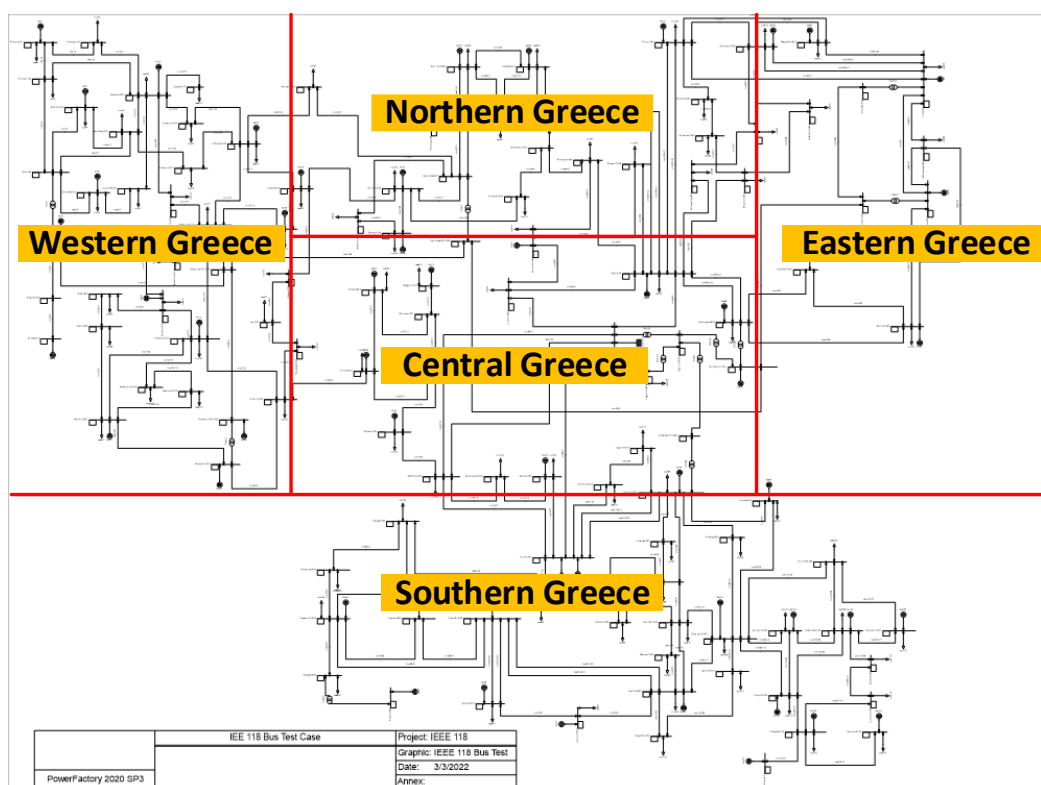
μέτρων ανακατανομής στην αγορά της επόμενης ημέρας. Οι (Namilakonda & Guduri, 2021) [44] ανέπτυξαν μια μεθοδολογία διαχείρισης συμφόρησης επαναπρογραμματίζοντας τις γεννήτριες σε πολλαπλά στάδια και βέλτιστο προγραμματισμό των πόρων απόκρισης στη ζήτηση. Ο (Pantoš, 2020) [45] παρουσίασε μια μέθοδο για τη διαχείριση της συμφόρησης βάσει της αγοράς, λαμβάνοντας υπόψη τους συσσωρευτές διάσπαρτων μικρής κλίμακας καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας, παραγωγών και αγοραστών.

## 6.2 Μεθοδολογία

Ο προγραμματισμός της επόμενης ημέρας αναπτύσσεται βασικά ως χρονοδιάγραμμα οικονομικής αποστολής περιορισμένης ασφάλειας με περιορισμένη, αν όχι καθόλου, εστίαση και εξέταση σχετικά με τις τεχνικές λειτουργικές πτυχές του δικτύου. Ως αποτέλεσμα είναι πιθανό να προκύψει πρόβλημα συμφόρησης στο δίκτυο μεταφοράς λόγω του προγραμματισμού της αγοράς για την επόμενη μέρα σχετικά με την παραγωγή ενέργειας για την κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης. Το πρόβλημα είναι πιο έντονο υπό υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς, η αναντιστοιχία μεταξύ της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ και της ζήτησης ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων θα μπορούσε να προκαλέσει υπερφόρτωση γραμμής και διακυμάνσεις τάσης και με τη σειρά του να επηρεάσει την ποιότητα ισχύος του δικτύου και τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων του. Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων προτείνεται η εφαρμογή βέλτιστης ανάλυσης ροής φορτίου με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Συγκεκριμένα, Εάν εντοπιστούν προβλήματα συμφόρησης μετά την ανάλυση ροής ισχύος του δικτύου, τότε εφαρμόζουμε ανάλυση OPF (Optimal Power Flow) με στόχο την ελαχιστοποίηση της απώλειας ισχύος. Για αυτή τη νέα ανάλυση λαμβάνουμε υπόψη τα ανώτερα και κατώτερα όρια για την παραγωγή ενέργειας όλων των συμβατικών και υδροηλεκτρικών μονάδων μαζί με τη μείωση/αύξηση του ρυθμού φόρτισης/εκφόρτισης των BESS και EVs (Kelepouris, et al., 2020) [39].

Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι να καθοριστούν τα απαιτούμενα αποθέματα ισχύος από όλα τα περιουσιακά στοιχεία του δικτύου που θα μπορούσαν να συμμετέχουν στον μετριασμό και στην αντιμετώπιση της συμφόρησης σε πραγματικό

χρόνο. Προς αυτή την κατεύθυνση, η λύση που προέκυψε από την ανάλυση OPF θα μπορούσε να λειτουργήσει ως αξιόπιστη κατευθυντήρια γραμμή, καθώς ο στόχος ελαχιστοποίησης απώλειας ισχύος συνεπάγεται ομαλότερη κατανομή ισχύος κατά μήκος της ζώνης, η οποία αντίστοιχα αποδίδει ομαλότερη φόρτιση για τις γραμμές του δικτύου και μετριασμό της συμφόρησης. Για τον σκοπό αυτό εξετάζουμε αυτή τη μεθοδολογία στο τροποποιημένο σύστημα συγκριτικής αξιολόγησης 118 bus (Εικόνα 11) προκειμένου να προσομοιώσουμε τη λειτουργία του ελληνικού δικτύου μεταφοράς για χρονικό διάστημα μίας ημέρας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η υπερφόρτωση συγκεκριμένων τμημάτων του δικτύου ανακουφίζεται με την αξιοποίηση των αποθεμάτων ισχύος που επισημαίνονται από την ανάλυση OPF. Το δυναμικό που προκύπτει είναι σημαντικό δεδομένου ότι θα μπορούσε να δημιουργήσει μια νέα αγορά σχετικά με τις βοηθητικές υπηρεσίες για τη διαχείριση της συμφόρησης που θα μπορούσε να επιτρέψει τη συμμετοχή πολλών συμμετεχόντων τόσο στο επίπεδο μεταφοράς όσο και στο επίπεδο διανομής των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 11 Το Σύστημα 118 ζυγών IEEE τροποποιημένο για την προσομοίωση του ελληνικού δικτύου μεταφοράς

### 6.3 Μελέτη Περίπτωσης στο PowerFactory 2023

Η μελέτη υλοποιήθηκε στο PowerFactory 2023 και βασίζεται στην ανάλυση του Συστήματος Μεταφοράς της χώρας όπως εκτιμάται ότι θα είναι το 2030. Αυτό που επιδιώκεται είναι να πραγματοποιηθεί η σύγκριση της βέλτιστης ροής ισχύος με βάση την ελαχιστοποίηση των απωλειών και του κόστους, εντός ενός εικοσιτετράωρου, και κατά πόσο επηρεάζεται το σύστημα από τη στιγμή που εισάγονται τιμές κόστους για όλες τις μονάδες.

Μελετάμε το Σύστημα Μεταφοράς, το οποίο βασίζεται στο κύκλωμα των 118 ζυγών της IEEE. Στο σύστημα υπάρχουν μονάδες αερίου, υδροηλεκτρικές, μια λιγνιτική, φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, ηλεκτρικά αυτοκίνητα και μπαταρίες.

Έπειτα από την ολοκλήρωση του δικτύου, σειρά έχει η τοποθέτηση των τιμών κόστους για κάθε μονάδα ξεχωριστά. Οι τιμές κόστους σε ευρώ ανά μεγαβατώρα δόθηκαν με βάση πιθανές προσφορές που γίνονται στο χρηματιστήριο ενέργειας (Enexgroup).

Τα φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες φαίνονται ως στατικές γεννήτριες, δηλαδή η ενεργή (P) και άεργη ισχύς (Q) είναι σταθερά. Το κόστος τους δε συμμετέχει στη βελτιστοποίηση, λόγω του ότι εισάγονται στο δίκτυο ανεξαρτήτως τιμής. Παρόλα αυτά η τιμή που δόθηκε είναι τα 38 €/MWh για τα φωτοβολταϊκά και τα 40 €/MWh για τις ανεμογεννήτριες. Ο λόγος που η τιμή κόστους τους είναι χαμηλή είναι γιατί σε περίπτωση που συμμετάσχουν στη βελτιστοποίηση, θέλουμε να είναι σίγουρα από τις μονάδες που θα περιλαμβάνονται στην παροχή ενέργειας. Χαμηλή είναι και η τιμή τους όσον αφορά το χρηματιστήριο, αφού πρόσφατα έχουν κάνει εκεί την εισαγωγή τους και φυσικά είναι απαραίτητο να συμπεριλαμβάνονται. Οι μπαταρίες ορίστηκαν στα 60 €/MWh λόγω του ότι αποτελεί πρώτον μια μέση, και σχετικά χαμηλή, τιμή και δεύτερον διότι ακόμα δεν έχουν κάνει την εισαγωγή τους στο κομμάτι του χρηματιστηρίου.

Για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα θέσαμε τη μέση τιμή κόστους που ανακοίνωσε το Bloomberg για την Ευρώπη, διότι η τιμή κόστους είναι διαφορετική για κάθε εταιρεία αυτοκινήτου. Ωστόσο, στη χώρα μας, και αυτά δεν έχουν εισαχθεί ακόμα στο κομμάτι του χρηματιστηρίου ενέργειας. Έτσι, η τιμή που θεσπίστηκε και θέσαμε είναι τα 104 €/MWh.



Οι τιμές κόστους που δόθηκαν για τις μονάδες αερίου και της λιγνιτικής από την ελάχιστη τιμή MW έως τη μέγιστη παρουσιάζονται στον Πίνακα 1:

NG	MW	€/MWh	MW	€/MWh	MW	€/MWh	MW	€/MWh
NR1	182	97,8	210	98,1	300	99,3	417	101,5
GEN 65	100	94,5	220	95,3	380	97,7	550	101,2
GEN 66	220	98,4	255	98,9	310	99,6	378	100,4
GEN 55	130	92,4	195	93,1	305	95,7	476	98,9
GEN 92	170	94,2	295	95,1	568	99,7	811	102,1
GEN 38	0	75,3	1000	99,9	5000	115,8	9999	132
GEN 47	0	78,5	1000	112,3	5000	132,5	9999	147
GEN 44	0	77,3	1000	110,1	5100	129,2	9999	143,2
GEN 50	220	94,3	298	94,9	358	95,7	400,2	96,1
GEN 99	210	93,3	310	93,8	365	94,2	410	94,7
GEN 103	130	91,2	195	91,7	247	92,4	334	93,1
GEN 89	160	98,5	217	100,7	335	108,1	432,7	111,1
GEN 100	182	101,5	235	103,6	304	106,7	433,4	108,1
GEN 85	216	100,5	350	103,75	550	106,85	800	108,9
GEN 104	216	99,5	340	102,3	470	104,5	600	105
LG	MW	€/MWh	MW	€/MWh	MW	€/MWh	MW	€/MWh
GEN 30	220	125,7	335	128,6	458	134,7	600	135,9

Πίνακας 1 Οι τιμές κόστους για τις μονάδες αερίου και της λιγνιτικής

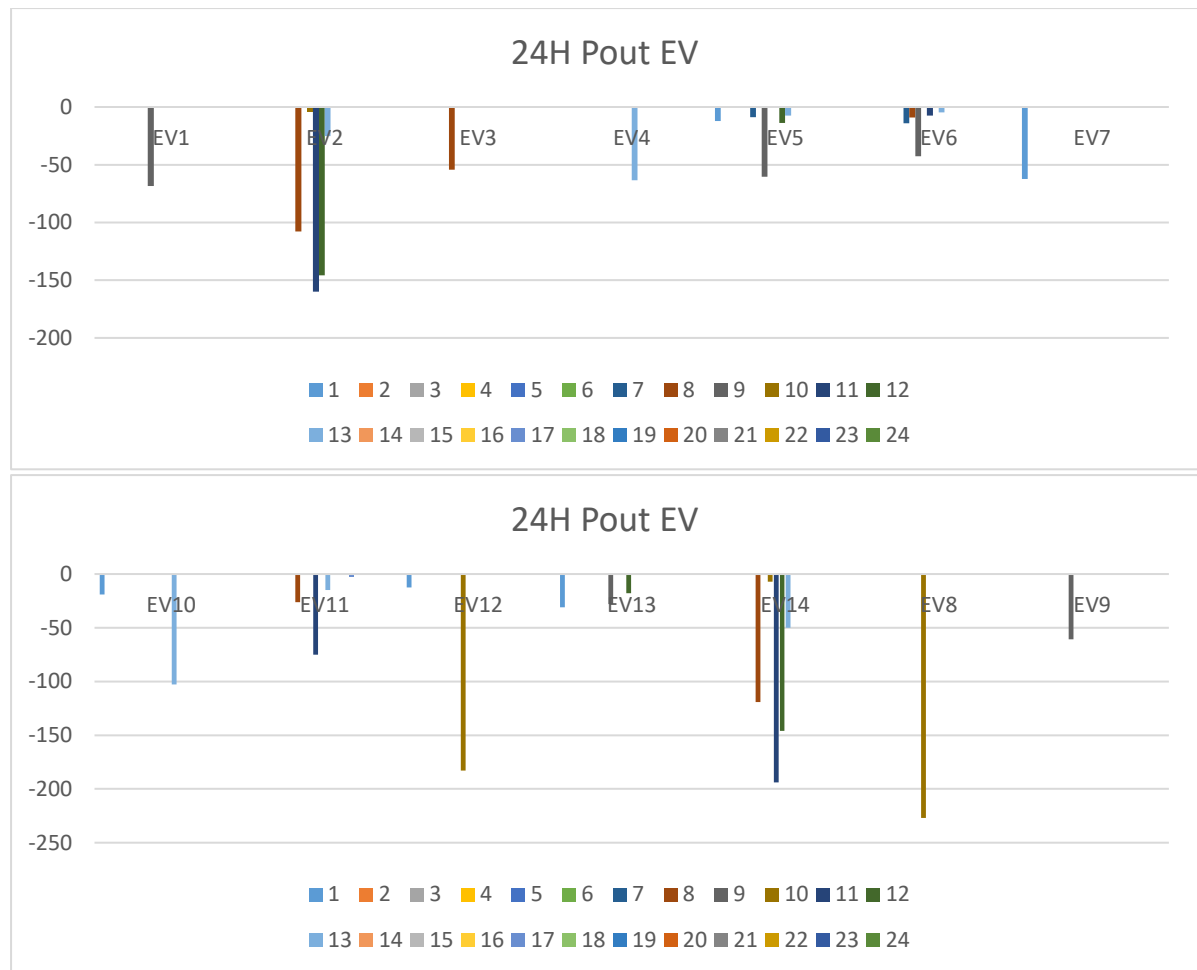
Οι τιμές που ορίστηκαν για τα υδροηλεκτρικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 2:

HD	MW	€/MWh	MW	€/MWh	MW	€/MWh
GEN 113	20	25	208	55,6	437,2	66,7
GEN 27	15	22,8	156	48,9	320	59,2
GEN 32	45	62	95	63,5	150	64
GEN 6	38	65	100	67,9	158	69,5
GEN 25	25	60	195	64,5	375	71
GEN 18	80	58,5	220	62,6	315	67,5
GEN 1	35	45,7	67	46,1	108	47,2
GEN 36	0	51,3	85	62,3	128	66,3
GEN 34	0	51,5	85	60,5	128	65,4
GEN 42	0	35	20	42,5	128	59,9
GEN 116	0	40,5	25	42,5	116	50,8
GEN 13	50	42,7	185	65,3	300	68,7
GEN 4	8	22,5	16,5	23,2	33,6	24,6
GEN 23	25	34,8	132	62,5	210	67
GEN 111	15	23,5	45	24	70	24,7
GEN 73	15	55,7	95	58,9	129,9	62,5
GEN 40	1	25	10	30	19	35
GEN 46	1	25	22	27,6	50	30

Πίνακας 2 Οι τιμές για τα υδροηλεκτρικά

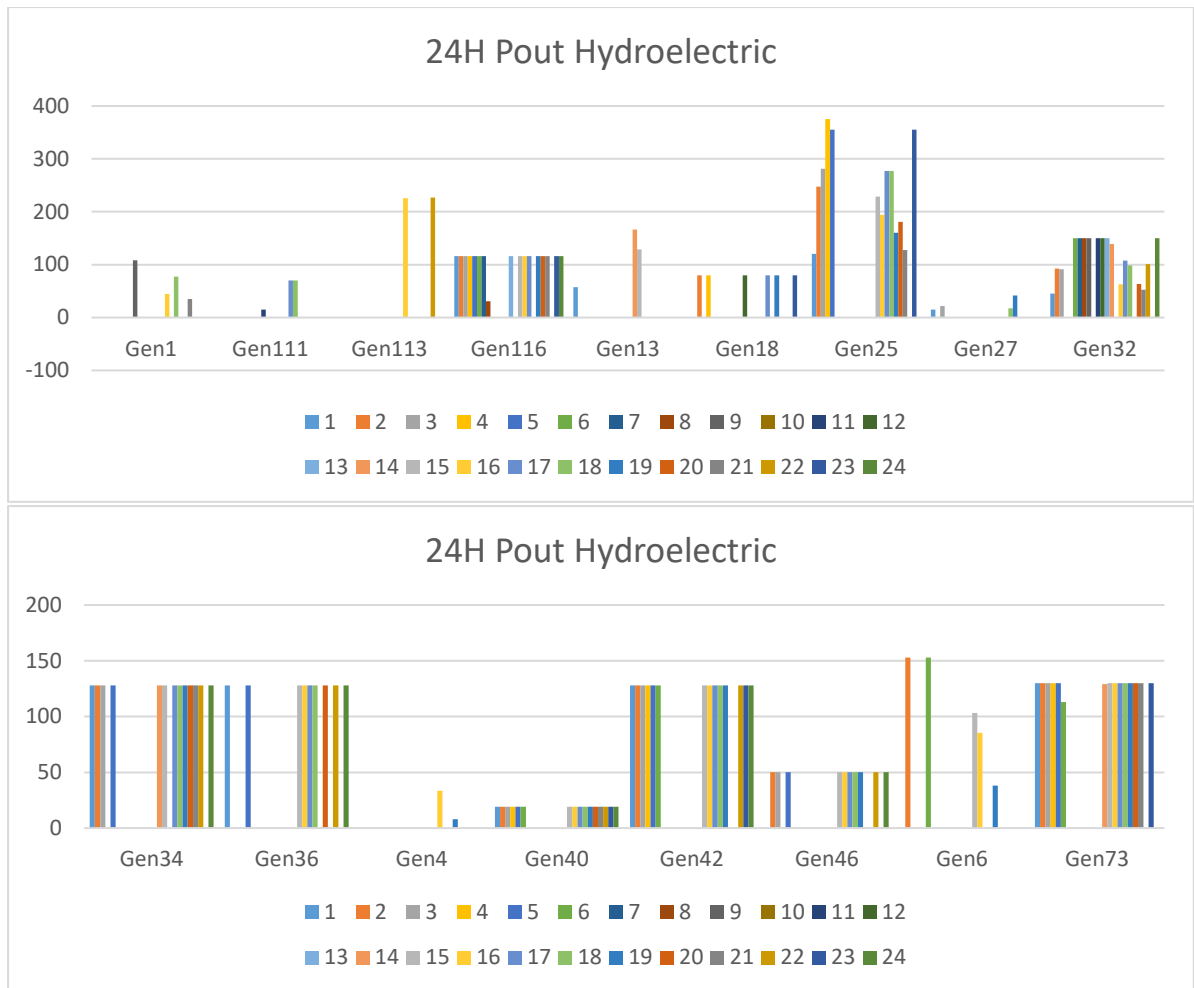
Η ευελιξία που ορίζεται από την ύπαρξη των ηλεκτρικών οχημάτων ορίζεται ως 50% αύξηση της ζήτησης και 50% μείωση αυτής. Εκτελώντας το optimal power flow

με ελαχιστοποίηση των απωλειών τα αποτελέσματα που λάβαμε για την εξερχόμενη ισχύ στο σύστημα εντός ενός 24ώρου για κάθε κατηγορία γεννητριών είναι παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



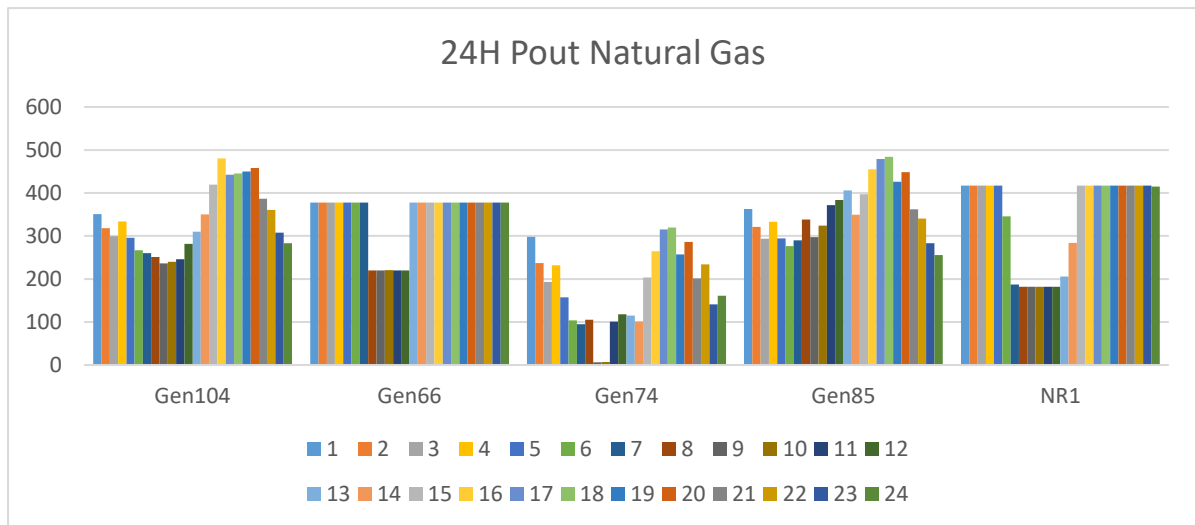
Διάγραμμα 1 Optimal Power Flow: Ισχύς λειτουργίας 24ώρου για Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αποτελούν καταναλωτές του δικτύου, δηλαδή αντλούν ισχύ, γι' αυτό και η τιμή τους είναι αρνητική. Εντός του 24ώρου διακρίνουμε ότι οι καταναλώσεις τους είναι διαφορετικές, και στην παρούσα περίπτωση αυτό που έχει την μικρότερη κατανάλωση είναι το EV3.



Διάγραμμα 2 Optimal Power Flow: Ισχύς λειτουργίας 24ώρου για Υδροηλεκτρική Ενέργεια.

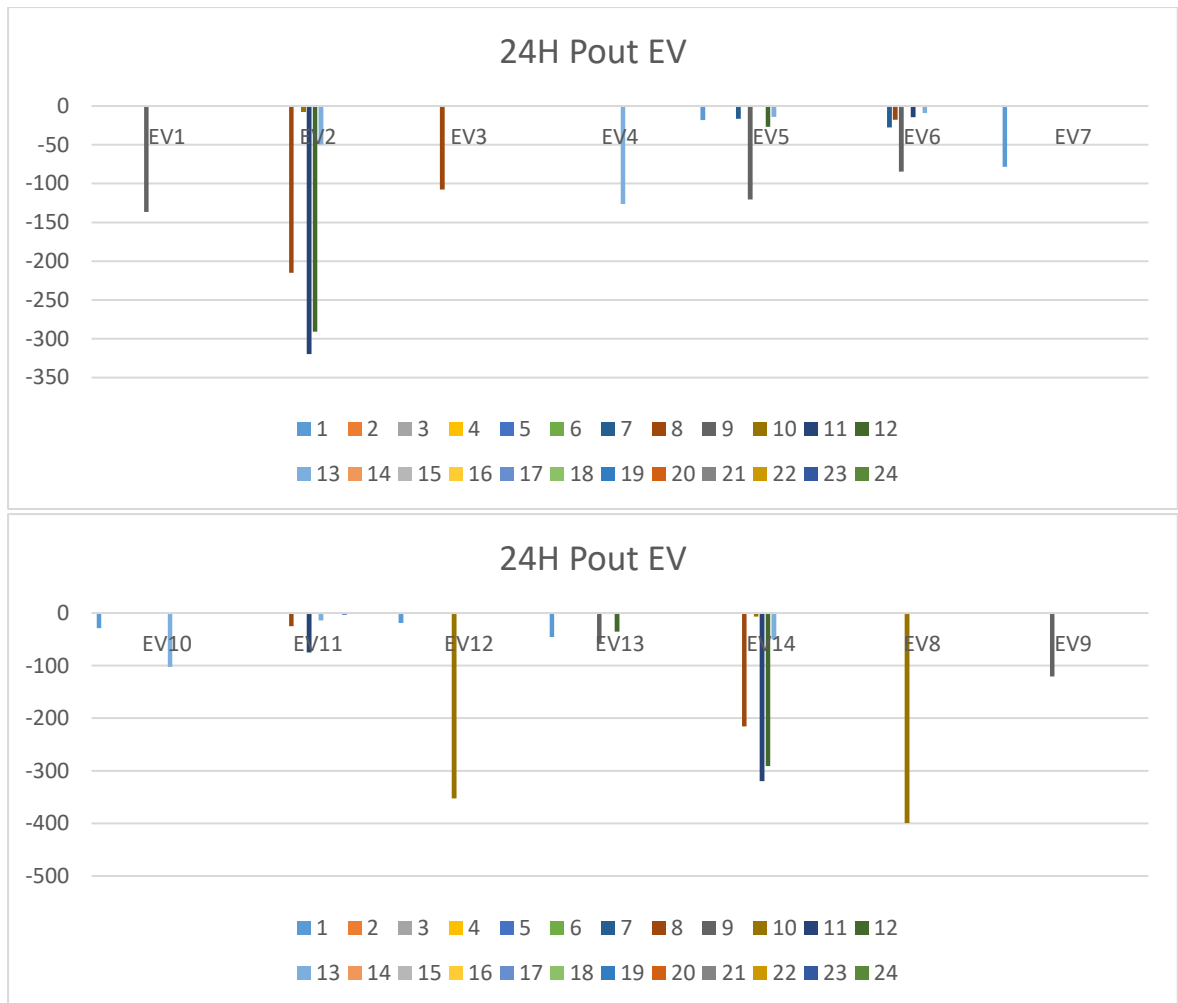
Κάθε τιμή (Gen) αποτελεί μια υδροηλεκτρική μονάδα καταγράφοντας την ποσότητα ισχύος που περιέχει για κάθε ώρα της ημέρας στην οποία λειτουργεί. Η κάθε ώρα να αναπαριστάται με διαφορετικό χρώμα ώστε να είναι πιο κατανοητή η διακύμανση της ισχύς εντός 24ώρου. Σε αυτή την περίπτωση χαμηλότερη ποσότητα ισχύος παράγει η Gen4.



Διάγραμμα 3 Optimal Power Flow: Ισχύς λειτουργίας 24ώρου για Φυσικό Αέριο.

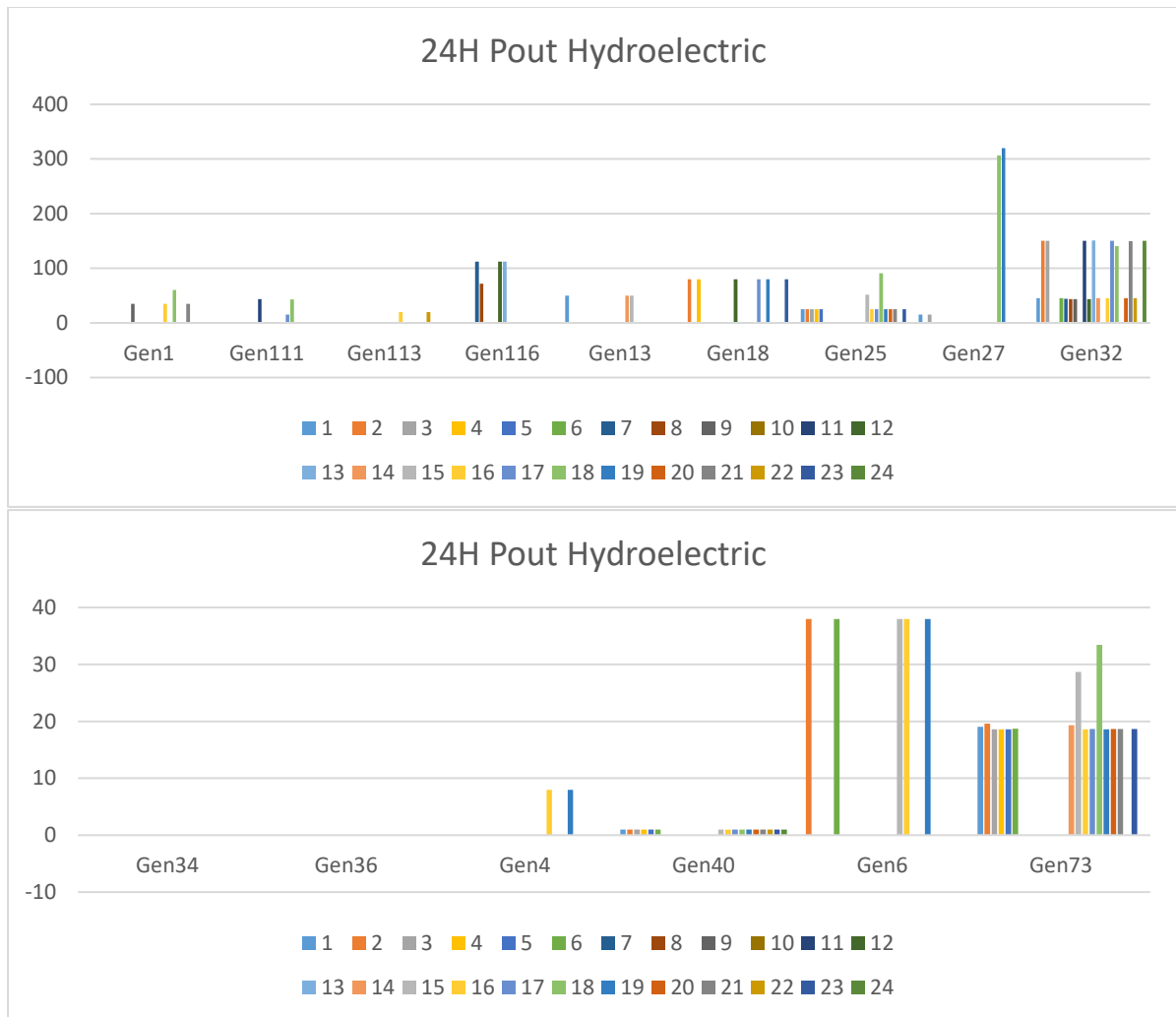
Κάθε τιμή (Gen) αποτελεί μια μονάδα φυσικού αερίου αποτυπώνοντας την ποσότητα ισχύος που αποδίδει στο δίκτυο για κάθε ώρα της ημέρας στην οποία λειτουργεί. Η κάθε ώρα να αναπαριστάται με διαφορετικό χρώμα ώστε να είναι πιο κατανοητή η διακύμανση της ισχύος εντός 24ώρου. Διακρίνουμε ότι από όλες τις μονάδες φυσικού αερίου μόνο οι 5 χρειάζονται για την τροφοδότηση του δικτύου, από τις οποίες η Gen74 έχει την χαμηλότερη παραγωγή ισχύος.

Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα με διεξαγωγή της διαδικασίας ως προς την ελαχιστοποίηση του κόστους είναι:



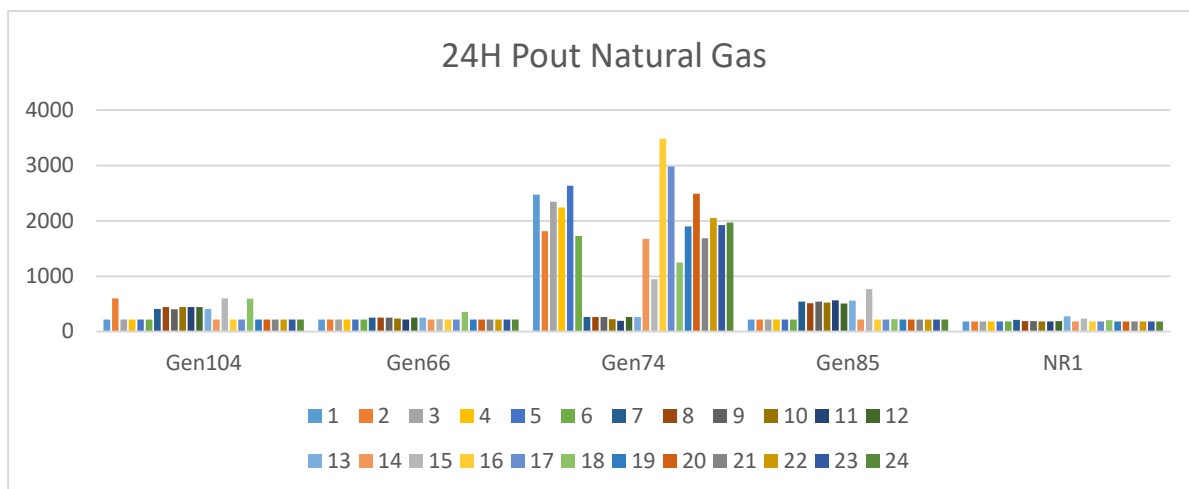
Διάγραμμα 4 Optimal Power Flow με ελαχιστοποίηση κόστους: Ισχύς λειτουργίας 24ώρου για Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα.

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αποτελούν καταναλωτές του δικτύου, δηλαδή αντλούν ισχύ, γι' αυτό και η τιμή τους είναι αρνητική. Εντός του 24ώρου διακρίνουμε ότι οι καταναλώσεις τους είναι διαφορετικές. Στην παρούσα περίπτωση αυτό που έχει την μικρότερη κατανάλωση είναι το EV10.



Διάγραμμα 5 Optimal Power Flow με ελαχιστοποίηση κόστους: Ισχύς λειτουργίας 24ώρου για Υδροηλεκτρική Ενέργεια.

Κάθε τιμή (Gen) αποτελεί μια υδροηλεκτρική μονάδα καταγράφοντας την ποσότητα ισχύος που περιέχει για κάθε ώρα της ημέρας στην οποία λειτουργεί. Η κάθε ώρα να αναπαριστάται με διαφορετικό χρώμα ώστε να είναι πιο κατανοητή η διακύμανση της ισχύς εντός 24ώρου. Σε αυτή την περίπτωση χαμηλότερη ποσότητα ισχύος παράγει η Gen113, ενώ παρατηρούμε ότι 2 μονάδες δεν αποδίδουν καθόλου (Gen34 και Gen36).

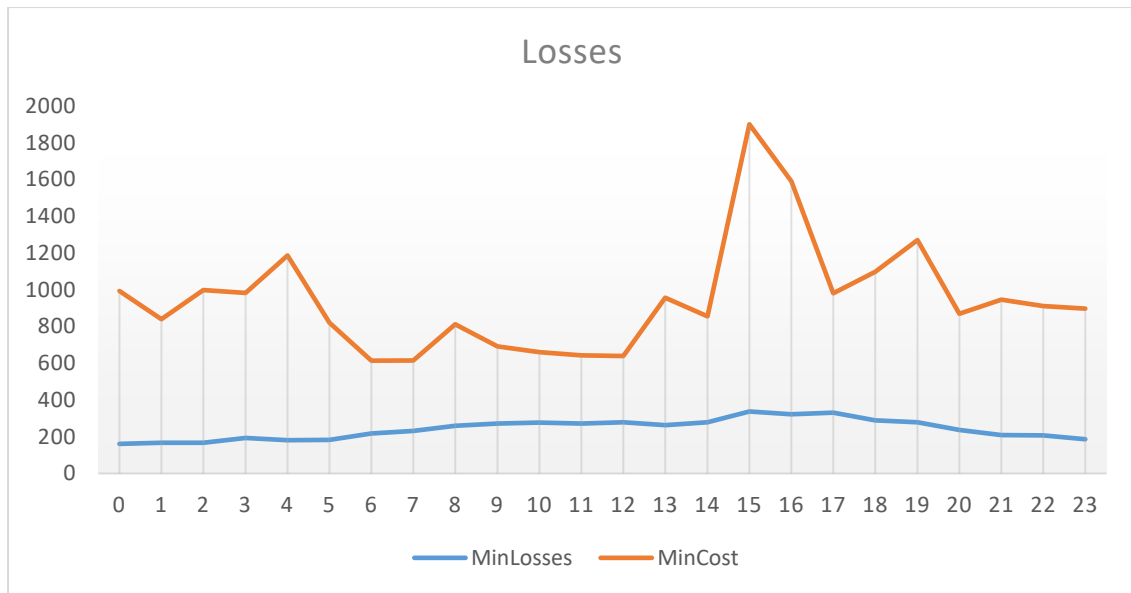


Διάγραμμα 6 Optimal Power Flow με ελαχιστοποίηση κόστους: Ισχύς λειτουργίας 24ώρου για Φυσικό Αέριο.

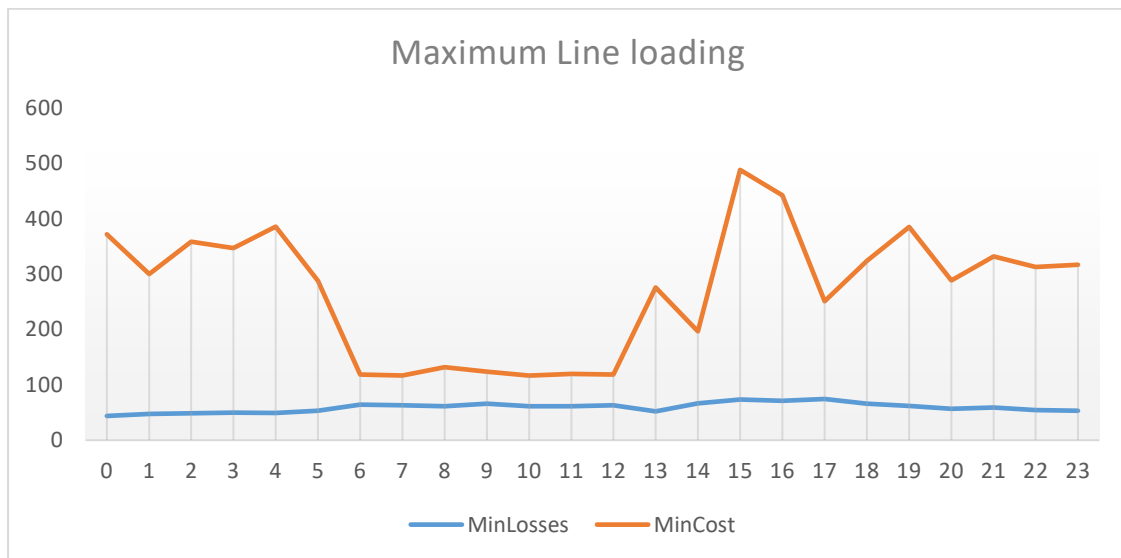
Κάθε τιμή (Gen) αποτελεί μια μονάδα φυσικού αερίου αποτυπώνοντας την ποσότητα ισχύος που αποδίδει στο δίκτυο για κάθε ώρα της ημέρας στην οποία λειτουργεί. Η κάθε ώρα να αναπαριστάται με διαφορετικό χρώμα ώστε να είναι πιο κατανοητή η διακύμανση της ισχύς εντός 24ώρου. Διακρίνουμε ότι από όλες τις μονάδες φυσικού αερίου μόνο οι 5 χρειάζονται για την τροφοδότηση του δικτύου, από τις οποίες η Gen74 έχει την μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος, καλύπτοντας το υψηλότερο ποσοστό τροφοδότησης του δικτύου.

Η λιγνιτική μονάδα δε συμμετέχει στην προσφορά ενέργειας στο δίκτυο σε καμία από τις δύο περιπτώσεις. Ο λόγος είναι διότι η τιμή κόστους της είναι αρκετά υψηλότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες μονάδες του δικτύου, κυρίως εξαιτίας των περιβαλλοντικών ρύπων. Αυτή είναι και η αιτία που έως το 2030 θα έχει ολοκληρωθεί η απολιγνιτοποίηση της χώρας. Μηδενική, ωστόσο, είναι και η χρήση των μπαταριών στο δίκτυο και στις δύο περιπτώσεις. Το δίκτυο στην προσομοίωση έχει προγραμματιστεί έτσι ώστε όση θα είναι η ζήτηση σε MW τόση θα είναι και η παραγωγή των μονάδων που θα συμμετέχουν. Από την στιγμή λοιπόν που δεν υπάρχει περίσσεια ισχύος, και οι μπαταρίες έχουν τοποθετηθεί αφόρτιστες, δεν μπορούν να φορτίσουν και να αποδώσουν αργότερα μέσα στη μέρα.

Συνδυαστικά, το σύνολο των απωλειών που εντοπίζονται και στις δύο περιπτώσεις, καθώς και η μέγιστη φόρτιση γραμμών που παρατηρείται φαίνονται στα παρακάτω γραφήματα:



Διάγραμμα 7 Απώλειες Ισχύος Συστήματος Μεταφοράς, οι δύο καμπύλες αναπαριστούν τις ελάχιστες απώλειες (μπλε καμπύλη) και ελάχιστο κόστος (πορτοκαλί καμπύλη) σε 24 ώρες



Διάγραμμα 8 Μέγιστη Φόρτιση Γραμμών Συστήματος Μεταφοράς, οι δύο καμπύλες αναπαριστούν τις ελάχιστες απώλειες (μπλε καμπύλη) και ελάχιστο κόστος (πορτοκαλί καμπύλη) σε 24 ώρες

Εκτελώντας το OPF για τους διαφορετικούς στόχους παρατηρούμε ότι οι γεννήτριες που συμμετέχουν στο ενεργειακό μείγμα παρουσιάζουν προσαρμογές στην λειτουργία τους καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό είναι και το αναμενόμενο, αφού το σύστημα μας στην πρώτη περίπτωση επιδιώκει την ελαχιστοποίηση των απωλειών στο δίκτυο καθιστώντας το καλύτερο όσον αφορά την ποιότητα ισχύος, ενώ στην δεύτερη περίπτωση όσο πιο οικονομικά λειτουργικό. Αυτό ωστόσο, όπως βλέπουμε από τα διαγράμματα 7 και 8 δεν εξυπηρετεί την λειτουργία του δικτύου μας



αφού οι προσφορές στο χρηματιστήριο πραγματοποιούνται επιδιώκοντας το κέρδος, προβλέποντας τη συνολική ανάγκη MW που θα ζητηθεί από το δίκτυο, χωρίς να λαμβάνει υπόψιν τα τεχνικά ζητήματα που υπάρχουν ή θα προκύψουν κατά την διάρκεια της ημέρας. Με άλλα λόγια, οι μονάδες που προωθούνται για την παραγωγή ισχύος είναι αυτές που είναι οικονομικότερες, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν αν η απόσταση από τη ζήτηση είναι μεγάλη ή όχι. Έτσι, στην περίπτωση βελτιστοποίησης κόστους παρατηρούνται μεγαλύτερες απώλειες κατά την μεταφορά ισχύος στο δίκτυο καθώς και υπερφορτίσεις στις γραμμές του δικτύου λόγω της συμφόρησης που δημιουργείται εξαιτίας των μεγάλων αποστάσεων που αναγκάζεται να διανύσει η ισχύς από τον παραγωγό στον καταναλωτή. Να σημειωθεί ότι στο διάγραμμα φαίνεται η μέγιστη τιμή ποσοστού (%) που εντοπίζεται στη φόρτιση των γραμμών κατά τη διάρκεια μιας μέρας.

#### **6.4 Συμπεράσματα - Σύνοψη**

Γενικά, συνοψίζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα σημαντικό είναι να πούμε ότι αποτελούν μία προσομοίωση και πρόβλεψη της εικόνας που αναμένεται να έχουμε στο σύστημα μεταφοράς της χώρας το 2030, και το οποίο περιλαμβάνει μονάδες αερίου, υδροηλεκτρικές, μια λιγνιτική, φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, ηλεκτρικά αυτοκίνητα και μπαταρίες. Από τα παραπάνω στοιχεία του δικτύου σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι τα φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες ως στατικές, το κόστος τους δε συμμετέχει στη βελτιστοποίηση και οι τιμές ισχύος (ενεργής και άεργης) είναι σταθερές. Επιπλέον έχουν κάνει πρόσφατα την εμφάνιση τους στο χρηματιστήριο και έτσι η τιμή τους είναι χαμηλή. Επίσης, χαμηλή τιμή έχουν και οι μπαταρίες, οι οποίες ακόμα δεν έχουν εισαχθεί στο χρηματιστήριο. Τέλος, για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, η τιμή κόστους διαφέρει από εταιρεία σε εταιρεία, ως εκ τούτου μία μέση τιμή θα ήταν δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια. Γενικά για τις παραπάνω πηγές είναι δύσκολο να προβλεφθεί η μελλοντική εξέλιξη τους στη χώρα μας.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι ο μετριασμός της συμφόρησης, όσον αφορά τη μειωμένη φόρτωση των γραμμών, θα μπορούσε να προκύψει από στοχευμένο επαναπρογραμματισμό αποστολής. Ο κύριος στόχος είναι τελικώς να κατευθυνθούν οι σωστές και στοχευμένες αλλαγές στην έξοδο ισχύος ως ένα σχέδιο

για την επόμενη μέρα που στοχεύει στην αντιμετώπιση προβλημάτων συμφόρησης σε πραγματικό χρόνο. Η τελευταία αναμένεται να εφαρμοστεί με τη μορφή βοηθητικής υπηρεσίας από μια νέα αγορά που θα βασίζεται σε κατάλληλα σήματα προς τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας για να προσαρμόσουν την παραγωγή ενέργειας τους στις παρεχόμενες κατευθυντήριες γραμμές. Αυτές οι στοχευμένες προσαρμογές ισχύος εξόδου προκύπτουν με την εφαρμογή μιας ανάλυσης OPF στο δίκτυο για την αποστολή της εξόδου των μονάδων ισχύος υπό την αντικειμενική συνάρτηση της ελαχιστοποίησης της απώλειας ισχύος. Ακόμη πιο μεγάλη σημασία έχει η διαχείριση συμφόρησης σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα μας σε σχέση με άλλες χώρες της ηπειρωτικής Ευρώπης, αν αναλογιστούμε το χαρακτηριστικό της πολυνησιωτικότητας που χαρακτηρίζει τη χώρα. Η ελληνική επικράτεια περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό νησιών που δε διασυνδέονται με το κύριο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά τα αυτόνομα νησιά τροφοδοτούνται από σταθμούς παραγωγής ενέργειας με πετρέλαιο και παρουσιάζουν σημαντικό αιολικό δυναμικό. Ωστόσο, σε τέτοια συστήματα η διείσδυση του ανέμου πρέπει να είναι περιορισμένη λόγω τεχνικών περιορισμών. Η κατάσταση αυτή μπορεί να βελτιωθεί δραστικά με τη λειτουργία υβριδικών σταθμών παραγωγής ενέργειας, οι οποίοι συνδυάζουν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με τις συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής και αποθήκευσης.

Η διαχείριση συμφόρησης είναι μια υπηρεσία που είναι αποκτά όλο και μεγαλύτερη σημασία για λόγους όπως το αυξανόμενο μερίδιο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που είναι πηγές με απρόβλεπτη φύση και πιο αργή υλοποίηση νέων επενδύσεων σε μονοπάτια μετάδοσης λόγω περιβαλλοντικών περιορισμών και γενικής μη αποδοχής. Στο παρελθόν αυτή η υπηρεσία παρέχονταν αποκλειστικά από εταιρείες παραγωγής, και ήταν μόνο αργότερα όταν μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές προσδιορίστηκαν στο πλαίσιο της διαχείρισης από την πλευρά της ζήτησης.

Αναμένεται ότι το μελλοντικό πλέγμα διαχείρισης θα είναι ακόμη περισσότερο κατανομημένο. Παρατηρείται αξιοσημείωτη απορρόφηση σε επίπεδο κατοικίας όπου οι καταναλωτές, οι εικονικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής και οι καταναλωτές αυξάνουν τις εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ευέλικτη ζήτηση και συστήματα αποθήκευσης (μπαταρίες και ηλεκτρικά οχήματα). Αυτές οι εφαρμογές μπορούν να παρέχουν διαφορετικές υπηρεσίες για τους ιδιοκτήτες τους, π.χ. εφεδρική

παροχή, μετατόπιση φορτίου, βελτιστοποίηση ενέργειας προμήθειες, μεγιστοποίηση της ιδιοκατανάλωσης κ.λπ. Από τεχνικής άποψης δεν υπάρχουν εμπόδια για την επίτευξη αυτού του στόχου αφού υπάρχουν πολυάριθμες λύσεις στον τομέα της πληροφορικής, της τεχνολογίας επικοινωνιών και ελέγχου που είναι διαθέσιμες για εφαρμογή.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Santamouris, M. & al., e., 2013. Financial crisis and energy consumption: A household survey. *Energy and Buildings*, Volume 65, p. 477–487.
- [2] Ritchie, H. & Roser, M., 2020. *Energy—Our World in Data*.
- [3] Steffen, B., 2017. The importance of project finance for renewable energy projects. *Energy Economics*, Volume 69, pp. 280-294.
- [4] Kilian, I. & Vigfusson, R. J., 2011. Nonlinearities in the Oil Price-Output Relationship. *Macroeconomic Dynamics*, 15(3), pp. 337-363.
- [5] Ordonez, J., Monfort, M. & Cuestas, J. C., 2019. Oil prices, unemployment and the financial crisis in oil-importing countries: The case of Spain. *Energy*, Volume 181, pp. 625-634.
- [6] Savvidou, S., 2018. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ «ΡΩΣΙΑ ΚΑΙ Η ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑ: ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΕΣ». Komotini: s.n.
- [7] Commision, E., 2019. *The European Green Deal*. Brussels, s.n.
- [8] Byers, C. & Botterud, A., 2020. Additional capacity value from synergy of variable renewable energy and energy storage. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(2), p. 1106–1109.
- [9] Fan, F., Kockar, I., Xu, H. & Li, J., 2022. Dynamic optimal power flow based scheduling framework for battery energy storage system. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 8(1), p. 271–280.
- [10] Doroudchi, E., Khajeh, H. & Laaksonen, H., 2022. Increasing self-sufficiency of energy community by common thermal energy storage. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, Volume 10, p. 85106–85113.
- [11] Khaleel, M. M., Alsharif, A. & Imbayah, I. I. K., 2022. Renewable energy technologies: Recent advances and future predictions. *African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences (AJAPAS)*, 1(3), pp. 58-64.
- [12] Gao, T. et al., 2021. Field exploration and analysis of power grid side battery energy storage system. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, Volume 9, p. 63213–63218.
- [13] Khaleel, M. M., Ahmed, A. A. & Alsharif, A., 2023. Energy Management System Strategies in Microgrids: A Review. *The North African Journal of Scientific Publishing (NAJSP)*, 1(1), p. 1–8.
- [14] Gür, T., 2018. Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage. *Energy Environment Science*, Volume 10, p. 2696–2767.
- [15] Centre for Low Carbon Futures, 2013 May. Report No. 021. Centre for Low Carbon Futures, *Liquid air in the energy and transport systems: opportunities for industry and innovation in the UK*, York, UK: Centre for Low Carbon Futures.

- [16] White, A., Parks, G. & Markides, C. N., 2013. Thermodynamic analysis of pumped thermal electricity storage. *Applied Thermal Engineering*, 53(2), pp. 291-298.
- [17] Morgan, R., Nelmes, S., Gibson, E. & Brett, G., 2015. Liquid air energy storage – Analysis and first results from a pilot scale demonstration plant. *Applied Energy*, Volume 137, pp. 845-853.
- [18] White, A., 2011. Loss analysis of thermal reservoirs for electrical energy storage schemes. *Applied Energy*, 88(11), pp. 4150-4159.
- [19] Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B. & Shaeiwitz, J. A., 2013. Analysis, synthesis and design of chemical processes. 4th ed. London (UK): Pearson Education International.
- [20] Lemmens, S., 2016. Cost Engineering Techniques and Their Applicability for Cost Estimation of Organic Rankine Cycle Systems. *Energies*, 9(7), p. 485.
- [21] Hewitt, G. & Pugh, S., 2007. Approximate Design and Costing Methods for Heat Exchangers. *Heat Transfer Engineering*, 28(2), pp. 76-86.
- [22] Glachant, J. M., Joskow, P. L. & Pollitt, M. G., 2021. Introduction to the Handbook on Electricity Markets. In: *Handbook on Electricity Markets*. s.l.:Edward Elgar Publishing.
- [23] Schmalensee, R., 2021. Strengths and weaknesses of traditional arrangements for electricity supply. In: *Handbook on Electricity Markets*. s.l.:Edward Elgar Publishing.
- [24] Munoz, F. D., Wogrin, S., Shmuel, S. O. & Hobbs, B. F., 2017. Economic Inefficiencies of Cost-Based Electricity Market Designs. *SSRN Electronic Journal*.
- [25] Kovacevic, R. M., 2018. Valuation and pricing of electricity delivery contracts: the producer's view. *Annals of Operations Research*, 275(2), p. 423.
- [26] Ahlqvist, V., Holmberg, P. & Tangeras, T., 2022. A survey comparing centralized and decentralized electricity markets. *Energy Strategy Reviews*, Volume 40, p. 100.
- [27] Houmøller, A. P., 2010. *The Nordic Model for a Liberalised Electricity Market*, s.l.: s.n.
- [28] Cramton, P., 2003. "Electricity Market Design: The Good, the Bad, and the Ugly",. Hawaii, Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, January 2003.
- [29] Irastorza, V. & Fraser, H., 2002. Are ITP-Run Day-Ahead Markets Needed?. *The Electricity Journal*, 15(9), pp. 25-33.
- [30] Stoft, S., 2002. *Power System Economics: Designing Markets for Electricity*. New York: IEEE – Wiley Press.
- [31] Evans, L. & Mellso, J., 2003. Exchanging Price Information can be Efficient: per se offences should be legislated very sparingly. NZ Institute for the Study of Competition and Regulation.
- [32] Counsell, K., 2003. Uniform vs Pay-As-Bid Pricing in Multi-Unit Auctions. NZ Institute for the Study of Competition and Regulation.
- [33] Fraser, H., 2001. The Importance of an Active Demand Side in the Electricity Industry. *The Electricity Journal*, 14(9), pp. 52-73.

- [34] Michaels, R., 2003. Watching the Watchers: Can RTO market monitors really be independent?. *Public Utilities Fortnightly*, Volume July 15, pp. 35-38.
- [35] Asija, D. & Viral, R., 2021. Renewable energy integration in modern deregulated power system: challenges, driving forces, and lessons for future road map. In: *Advances in Smart Grid Power System*. s.l.:s.n., pp. 365-384.
- [36] Μαλατέστας, Π. Β., 2015. Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας. Θεσ/νικη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- [37] Sgouras, I. K. et al., 2017. Impact of reverse power flow on the optimal distributed generation placement problem. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(18), p. 4626–4632.
- [38] Pena, I., Brancucci, C. & Hodge, B. M., 2017. An Extended IEEE 118-bus Test System with High Renewable Penetration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(1), pp. 281-289.
- [39] Kelepouris, N. et al., 2020. DAY-AHEAD DISPATCH RESCHEDULE FOR CONGESTION MITIGATION UNDER OPTIMAL POWER FLOW GUEDELINE. s.l.:s.n.
- [40] Singh, K., Padhy, N. P. & Sharma, J., 2011. Congestion management considering hydro-thermal combined operation in a pool based electricity market. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(8), pp. 1513-1519.
- [41] Verma, Y. P. & Sharma, A. K., 2015. Congestion management solution under secure bilateral transactions in hybrid electricity market for hydro-thermal combination. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 64, pp. 398-407.
- [42] Esmaili, M., Ebadi, F., Shayanfar, H. A. & Jadid, S., 2013. Congestion management in hybrid power markets using modified Benders decomposition. *Applied Energy*, Volume 102, pp. 1004-1012.
- [43] Poplavskaya, K. et al., 2020. Integration of day-ahead market and redispatch to increase cross-border exchanges in the European electricity market. *Applied Energy*, Volume 278, pp. 115-669.
- [44] Namilakonda, S. & Guduri, Y., 2021. Chaotic darwinian particle swarm optimization for real-time hierarchical congestion management of power system integrated with renewable energy sources. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 128, pp. 106-632.
- [45] Pantoš, M., 2020. Market-based congestion management in electric power systems with exploitation of aggregators. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 121, pp. 101-106.
- [46] Sciacovelli, A., Vecchi, A. & Ding, Y., 2017. Liquid air energy storage (LAES) with packed bed cold thermal storage – from component to system level performance through dynamic modelling. *Applied Energy*, Volume 190, pp. 84-98.

## **ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ - ΑΡΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ**

KWh	Κιλοβατώρα
TWh	Τεραβατώρα
PG&E	Pacific Gas and Electric Company
IRENA	International Renewable Energy Agency
EES	Electrical Energy Storage
ESS	Energy Storage Systems
EST	Energy Storage Technologies
EESS	Electrical Energy Storage Systems
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LAES	Liquid Air Energy Storage
PTES	Pumped Thermal Electricity Storage
TES	Thermal Energy Storage
LTES	Low Temperature Energy Storage
HTES	High Temperature Energy Storage
MES	Mechanical Energy Storage
PHES	Pumped Hydro Energy Storage
GES	Gravity Energy Storage
CAES	Compressed-air Energy Storage
FC	Fuel Cell
ECES	Electro-Chemical Energy Storage
BES	Battery Energy Storage
FBES	Flow Battery Energy Storage
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
PV	Photovoltaic
ISO συστημάτων Ισχύος)	Independent System Operator (στη διαχείριση
UCP	Unit Commitment Problem
CEGB	Central Electricity Generating Board

PAC	Pay-as-clear (στις αγορές ενέργειας)
PAB	Pay-as-bid (στις αγορές ενέργειας)
LMP	Locational Marginal Pricing
NYISO	New York Independent System Operator
FERC	Federal Energy Regulatory Commission
NZEM	New Zealand Electricity Market
DN	Distribution Network
OPF	Optimal Power Flow