

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΛΑΡΙΣΑΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΩΝ»

ΕΞΕΛΙΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ: **ΚΡΟΜΜΥΔΑ ΗΛΙΑΝΑ**
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: **ΔΡ. ΝΤΑΦΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

ΛΑΡΙΣΑ 2021

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΖΗΤΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	5
1.1. Γενικά στοιχεία για την ενέργεια	5
1.2. Στοιχεία για την αύξηση της ζήτησης και της χρήσης ενέργειας παγκοσμίως ...	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	20
1.1. Εισαγωγικές παρατηρήσεις	20
1.2. Βασικές μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας: συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	29
3.1. Η ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας γενικά	29
3.2. Τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	31
3.2.1. Αντλησιοταμίευση (Pump-Hydro Storage, PHS)	32
3.2.2. Αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα.....	38
3.2.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αντλησιοταμίευσης	40
3.2.3. Μέθοδος Αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες (συσσωρευτές)	43
3.2.4. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με θερμικά μέσα.....	48
3.2.5. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με χημικά μέσα (μέσω υδρογόνου H ₂ και συνθετικού φυσικού αερίου SNG)	55
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	59
Βιβλιογραφικές αναφορές	62

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αποθήκευση της ενέργειας (energy storage) αποτελεί μια διεργασία η οποία στοχεύει στην ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών του ανθρώπου. Η παρούσα διπλωματικής εργασίας αναλύει τις βασικές εξελιγμένες τεχνολογίες αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας προσφέρουν σήμερα αναμφίβολα, πολλαπλά οφέλη. Τα δίκτυα ηλεκτροδότησης, δεν έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα ότι παράγεται, να πρέπει να καταναλώνεται άμεσα. Η παρακολούθηση και ο έλεγχος του φορτίου των δικτύων ηλεκτροδότησης γίνεται κατά περίπτωση με πρόσθεση ή αντίστοιχα αφαίρεση μονάδων παραγωγής. Ωστόσο, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις περισσότερες περιπτώσεις έχουν μεγάλο χρόνο απόκρισης, ενώ η χρήση μονάδων που μπορούν να ανταποκρίνονται γρήγορα στις διακυμάνσεις ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας, έχει μεγαλύτερο κόστος και είναι περιορισμένη. Πολύ πριν την ύπαρξη των φωτοβολταϊκών και αιολικών συστημάτων, υπήρχαν και άλλοι λόγοι που συνέτειναν στην δημιουργία μοντέλων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Μεταξύ των λόγων αυτών ήταν οι περιορισμοί των δικτύων μεταφοράς, η ασφάλεια παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, η ανάγκη ύπαρξης υβριδικών συστημάτων κυρίως σε περιοχές μακριά από το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας κλπ. Τα δεδομένα αυτά οδήγησαν σταδιακά στην ανάπτυξη μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, οι κυριότερες εκ των οποίων εξετάζονται στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ABSTRACT

Energy storage is a process that aims to meet human energy needs. The object of this dissertation is the presentation and analysis of the basic advanced technological technologies of electricity storage. Electricity storage technologies today offer undoubtedly multiple benefits. The power grids do not have the ability to store electricity, with the result that what is generated must be consumed immediately. The monitoring and control of the load of the power supply networks is done on a case by case basis by adding or removing units of production. However, power plants in most cases have a long response time, and the use of units that can respond quickly to fluctuations in electricity demand is more costly and limited. Long before the existence of photovoltaic and wind systems, there were other reasons that contributed to the creation of electricity storage models. Among these reasons were the limitations of the transmission networks, the security of electricity supply, the need for hybrid systems mainly in areas far from the electricity distribution network, etc. These data gradually led to the development of electricity storage methods, the main ones considered in the context of this dissertation.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΖΗΤΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1.Γενικά στοιχεία για την ενέργεια

Στη φυσική, η ενέργεια είναι η ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να παραγάγει έργο με δεδομένο ότι κάθε φυσικό σύστημα περιέχει (ή εναλλακτικά αποθηκεύει) μία ποσότητα που ονομάζεται ενέργεια. Οποιαδήποτε μορφή ανθρώπινης δράσης, από το μαγείρεμα των τροφών μέχρι τη γραμμή παραγωγής σε ένα εργοστάσιο προϋποθέτει κατανάλωση ενέργειας. Η ενέργεια είναι μια διατηρημένη ποσότητα. Αρχή διατήρησης της ενέργειας είναι ότι το αλγεβρικό άθροισμα όλων των μορφών ενέργειας που εμφανίζονται σε ένα (απομονωμένο) σύστημα διατηρείται σταθερό με την πάροδο του χρόνου. Σύμφωνα με την αρχή της διατήρησης της ενέργειας η ενέργεια μπορεί να μετατραπεί όσον αφορά τη μορφή της, αλλά δεν μπορεί να δημιουργηθεί από το μηδέν, ούτε μπορεί να χαθεί ή να καταστραφεί.

Οι κοινές μορφές ενέργειας περιλαμβάνουν, την κινητική ενέργεια που έχει ένα σώμα λόγω της ταχύτητας του, την ενέργεια που μεταφέρεται από το φως, την ηχητική ενέργεια που μεταφέρει ο ήχος, την πυρηνική ενεργεία που περικλείεται στον πυρήνα των ατόμων και ελευθερώνεται με τη διάσπαση του, την θερμική ενέργεια που σχετίζεται με τη θερμοκρασία του σώματος, την δυναμική ενέργεια που αποθηκεύεται από τη θέση ενός αντικειμένου σε ένα πεδίο δύναμης (βαρυτική, ηλεκτρική ή μαγνητική), την ελαστική ενέργεια που

αποθηκεύεται με τέντωμα στερεών αντικειμένων και τη χημική ενέργεια που απελευθερώνεται όταν καίγεται ένα καύσιμο.

Η ενέργεια, αποτελεί αναμφίβολα ένα θεμελιώδες συστατικό της σύγχρονης κοινωνίας και ο εφοδιασμός της επηρεάζει άμεσα την κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη των κρατών. Η οικονομική ανάπτυξη και η κατανάλωση ενέργειας πηγαίνουν χέρι με χέρι. Η ανάπτυξη και η ποιότητα της ζωής μας και της δουλειάς μας εξαρτώνται απόλυτα από την αδιάκοπη, επαρκή και οικονομική παροχή ενέργειας. Αυτή η πραγματικότητα αντιμετωπίζει ωστόσο προκλήσεις παγκοσμίως καθώς οι βασικοί ενεργειακοί πόροι γίνονται λιγότεροι και όλο και πιο δαπανηροί. Ενώ ο άνθρακας παραμένει σε σχετική αφθονία πόρων, η προμήθεια πετρελαίου και φυσικού αερίου αντιμετωπίζουν περιορισμούς, με αποτέλεσμα να προκύπτουν ανησυχίες λόγω της μείωσης των αποθεμάτων, μακροπρόθεσμα.

Αυτή η εξάρτηση από την ενέργεια για την οικονομική ανάπτυξη έχει ιστορικά υπονοήσει την εξάρτηση από τρίτα μέρη για τον ενεργειακό εφοδιασμό, με γεωπολιτικές προεκτάσεις για τα κράτη. Καθώς οι ενεργειακοί πόροι δεν βρίσκονται γενικά σε μέρη όπου έχει αναπτυχθεί υψηλή κατανάλωση, η Ενέργεια έχει μετατραπεί σε μια νέα μορφή διεθνούς πολιτικής δύναμης, που χρησιμοποιείται από τους κατόχους των ενεργειακών πόρων (κυρίως πετρελαίου και φυσικού αερίου).

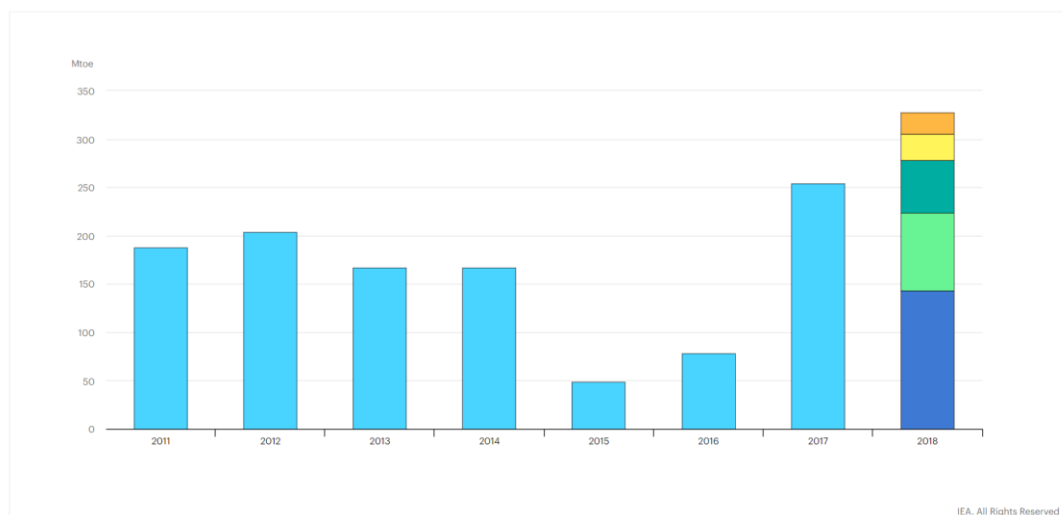
1.2. Στοιχεία για την αύξηση της ζήτησης και της χρήσης ενέργειας παγκοσμίως

Ο πολλαπλασιασμός και η πολυπλοκότητα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, είναι προφανές ότι έχουν συμβάλει στην αύξηση της ζήτησης ενέργειας. Η ενεργειακή ζήτηση είναι ο όρος που περιγράφει την

κατανάλωση ενέργειας από τον άνθρωπο. Οδηγεί ολόκληρο το ενεργειακό σύστημα, επηρεάζοντας τη συνολική ποσότητα ενέργειας που χρησιμοποιείται, τη θέση και τους τύπους καυσίμων που χρησιμοποιούνται στο σύστημα παροχής ενέργειας, καθώς και τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών τελικής χρήσης που καταναλώνουν ενέργεια. (Arent et al., 2014) Ζήτηση ενέργειας, σημαίνει: ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, ζήτηση καυσίμων μεταφοράς, ζήτηση καυσίμων για θέρμανση και βιομηχανικές διεργασίες κλπ.

Το τρέχον ενεργειακό μας σύστημα βρίσκεται στην αρχή μιας περιόδου μαζικών αλλαγών. Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας, παρουσιάζει μια εκθετική αύξηση, κυρίως ως αποτέλεσμα της ανθρώπινης ανάπτυξης (Schaeffer et al., 2018). (Arent et al., 2014). Η καλή κατανόηση της ενεργειακής ζήτησης σε διαφορετικούς τομείς, αποτελεί σε κάθε περίπτωση σημαντικό στοιχείο για τον ενεργειακό σχεδιασμό και την πολιτική μιας χώρας (Considine, 2017).

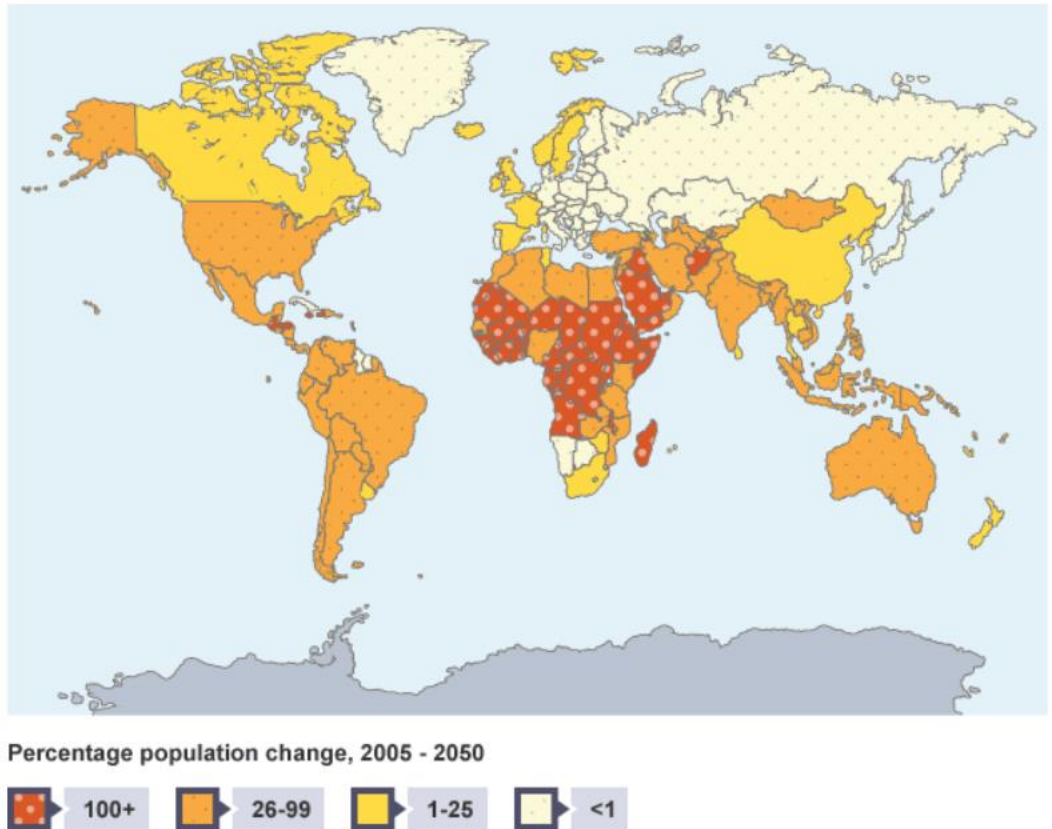
Θα πρέπει παράλληλα να επισημανθεί, ότι η ζήτηση ενέργειας εξαρτάται από διαφορετικούς κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες όπως ο πληθυσμός, η αστικοποίηση, η εκβιομηχάνιση, το καθαρό εισόδημα κεφαλαίου, η ανάπτυξη τεχνολογιών κ.λπ. ενώ πριν από την πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης ενέργειας, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής χρειάζονται πλήρη γνώση σχετικά με την ανάπτυξη και το μοτίβο της ενεργειακής ζήτησης διαφορετικών τομέων (Wilbanks & Fernandez, 2013). Τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία της Διεθνούς Οργάνωσης Ενέργειας (IEA, 2019) είναι ενδεικτικά του πως αυξήθηκε η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας από το 2011 μέχρι το 2018:



Πίνακας 1 Ετήσια αλλαγή στην παγκόσμια ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας, 2011-2018

Πηγή IEA

Οι λόγοι για την αύξηση της ζήτησης και χρήσης ενέργειας παγκοσμίως είναι ποικίλλοι. Ο ποιος σημαντικός λόγος για την αύξηση της ζήτησης και χρήσης ενέργειας είναι η ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού. Ο παγκόσμιος πληθυσμός το 2016, ύψους 7,4 δισεκατομμυρίων, αναμένεται να αυξηθεί κατά 1 δισεκατομμύριο τα επόμενα 10 χρόνια και να φθάσει τα 9,6 δισεκατομμύρια έως το 2050, σύμφωνα με έκθεση του ΟΗΕ του 2013. Η αύξηση του πληθυσμού επικεντρώνεται κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες, με πάνω από 50 τοις εκατό στην Αφρική. Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού και το ανεβασμένο βιοτικό επιπέδο για πολλούς ανθρώπους στις αναπτυσσόμενες χώρες θα απαιτήσει ακόμη μεγαλύτερη ζήτηση για ενεργειακούς πόρους. Η επόμενη εικόνα, περιγράφει την προβλεπόμενη αλλαγή πληθυσμού μεταξύ 2003 και 2050.



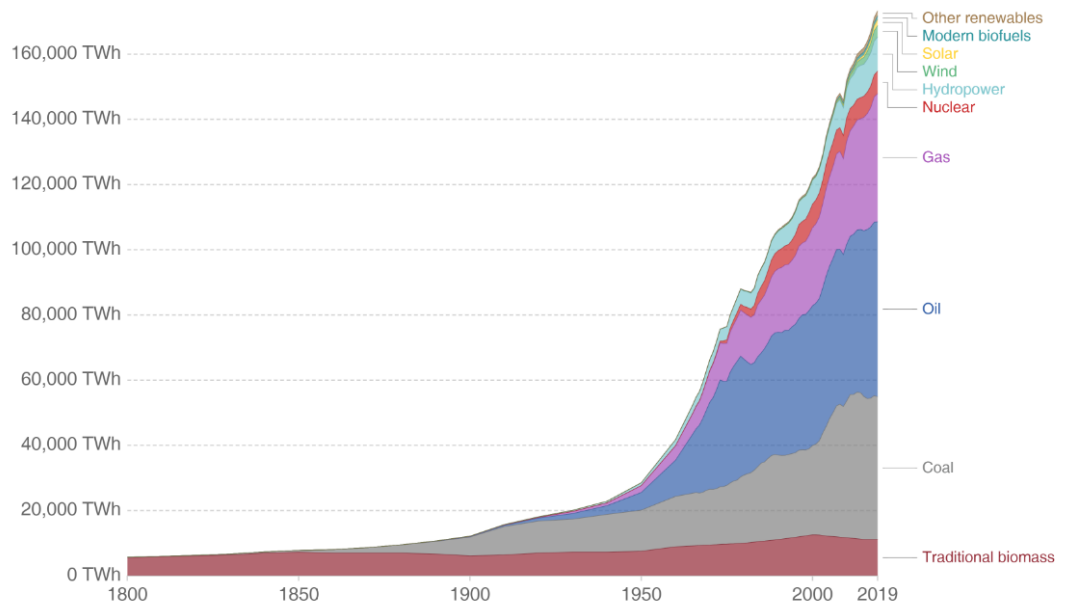
Εικόνα 1 Ποσοστιαία αλλαγή του παγκόσμιου πληθυσμού για το διάστημα 2005-2050

Πάνω από το 70% της αυξημένης ζήτησης ενέργειας προέρχεται από αναπτυσσόμενες χώρες, με επικεφαλής την Κίνα και την Ινδία. Καθώς οι χώρες αναπτύσσονται, οι πληθυσμοί τους θα απαιτήσουν περισσότερη ενέργεια. Καθώς ο πλούτος αυξάνεται τόσο αυξάνεται η ζήτηση για ενέργεια. Παράλληλα, οι εξελίξεις στην τεχνολογία αυξάνουν τη διαθεσιμότητα προϊόντων που απαιτούν ενέργεια. Καθώς παράγεται πλούτος, οι πληθυσμοί

επιθυμούν περισσότερα καταναλωτικά αγαθά. Τα καταναλωτικά αγαθά καταναλώνουν ενέργεια στην διαδικασία κατασκευής τους καθώς και στη χρήση τους.

Ένας ακόμη λόγος για την αύξηση της ζήτησης αλλά και της χρήσης ενέργειας είναι οι κλιματικές αλλαγές καθώς αυξανόμενες θερμοκρασίες του περιβάλλοντος αναμένεται να αυξήσουν τη ζήτηση ψύξης στις ζεστές περιόδους και να μειώσουν αντίστοιχα τη ζήτηση θέρμανσης τον χειμώνα (IEA, 2018). Παράλληλα, η οικονομική ανάπτυξη, οι μετατοπίσεις στην τομεακή σύνθεση των οικονομιών, η συμπεριφορά των ατόμων και των οργανισμών καθώς και ο ρυθμός της τεχνολογικής ανάπτυξης είναι επίσης κρίσιμοι λόγοι οι οποίοι αλληλεπιδρούν για τον προσδιορισμό της ζήτησης διαφορετικών πηγών ενέργειας σε διάφορες περιοχές (Levesque et al., 2018). Τέλος, πρόσθετοι λόγοι που θα μπορούσαν να επιδράσουν στην ζήτηση ενέργειας παγκοσμίως είναι η ένταση των μελλοντικών αλλαγών της θερμοκρασίας - τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο, καθοδηγούμενες από τις παγκόσμιες τροχιές εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (Auffhammer & Mansur, 2014).

Αναμφίβολα, το ενεργειακό σύστημα έχει αλλάξει δραματικά από τη Βιομηχανική Επανάσταση έως σήμερα. Βλέπουμε αυτόν τον μετασχηματισμό του παγκόσμιου ενεργειακού εφοδιασμού στο παρακάτω διάγραμμα το οποίο καταγράφει την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας από το 1800 έως το 2019.



Διάγραμμα 1 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας από το 1800 έως το 2019.

Πηγή: Smil (2017) και BP Statistical Review of World Energy (2020)

Σύμφωνα με τις αναλύσεις διεθνών ενεργειακών οργανισμών, οι ανάγκες για ενέργεια παγκοσμίως αναμένεται να αυξηθούν κατά δύο ή και τρεις φορές ακόμη ενώ χωρίς καμία αμφιβολία η ζήτηση υδρογονανθράκων (πετρελαίου και φυσικού αερίου) θα έχει ανοδική πορεία για τα επόμενα 30 χρόνια (Edwards, 2019). Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας προβλέπεται να αυξηθεί τις επόμενες δεκαετίες.

Ειδικότερα, σύμφωνα με στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας έως το 2010, οι παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες αναμένεται να αυξηθούν, με τα ορυκτά καύσιμα να παραμένουν η κυρίαρχη πηγή. Μεταξύ 2005 και 2030, οι ενεργειακές ανάγκες προβλέπεται να αυξηθούν κατά 55%, με τη ζήτηση να αυξάνεται από 11,4 δισεκατομμύρια τόνους πετρελαίου σε 17,7 δισεκατομμύρια. Μεταξύ 2005 και 2030, η κατανάλωση ενέργειας

αναμένεται να αυξηθεί κατά 50%, με το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης να προέρχεται από αναπτυσσόμενες χώρες. Ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο αποτελούν από κοινού την πλειονότητα της παγκόσμιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας.

Το 2018, η παγκόσμια ακαθάριστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν 3,9% υψηλότερη από το 2017. Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία, η παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται συνεχώς κάθε χρόνο από το 1974, εκτός από το 2008 έως το 2009, όταν η παγκόσμια χρηματοπιστωτική κρίση προκάλεσε σημαντική μείωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και από το 2019 και 2020 λόγω μεταξύ άλλων, της πανδημίας του κορωνοϊού (IEA, 2019a).

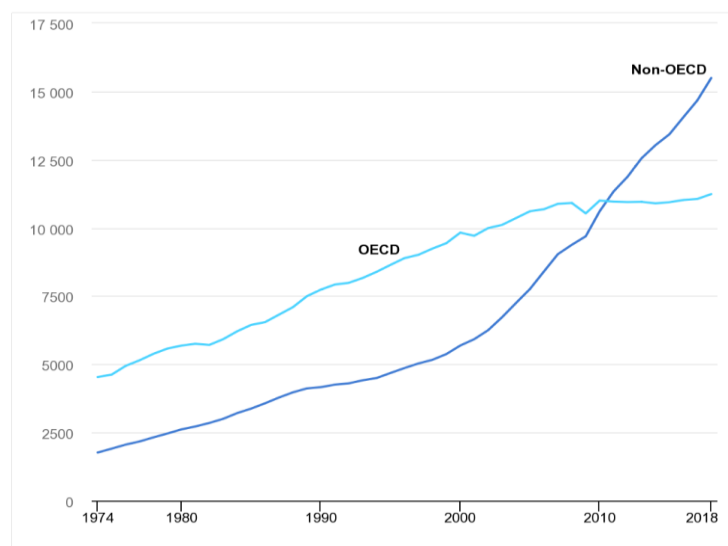
Παράλληλα, σύμφωνα με τα στοιχεία της IEA, η παγκόσμια συνολική κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε επίσης κατά 2,3% το 2018, διπλάσια από τον μέσο όρο των τελευταίων δέκα ετών. Η αύξηση οφείλεται στη σταθερή ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας και στην αυξημένη ζήτηση θέρμανσης και ψύξης σε ορισμένες περιοχές (IEA, 2019b).

Η αυξημένη χρήση ορυκτών καυσίμων κάλυψε το 70% της παγκόσμιας αύξησης της ζήτησης ενέργειας με το φυσικό αέριο να καλύπτει σχεδόν το 45% της συνολικής αύξησης της ζήτησης. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συνέβαλαν περίπου στο ένα τέταρτο της παγκόσμιας αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας ενώ η πυρηνική ενέργεια συνέβαλλε στο 7%. Οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με την ενέργεια αυξήθηκαν κατά 1,7% το 2018 (IEA, 2019b).

Παράλληλα, το ίδιο έτος, η ζήτηση για ηλεκτρισμό αυξήθηκε ταχύτερα από ό, τι για όλες τις άλλες πηγές ενέργειας παρουσιάζοντας αύξηση 4%. Το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας στην παγκόσμια κατανάλωση

ενέργειας έφτασε το 20% το 2018. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συνέβαλαν σχεδόν στο ήμισυ της αύξησης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ακολουθούμενες από τον άνθρακα, το φυσικό αέριο, την πυρηνική ενέργεια και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με πετρέλαιο. Οι εκπομπές CO₂ από τον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκαν κατά 2,5% (IEA, 2019b).

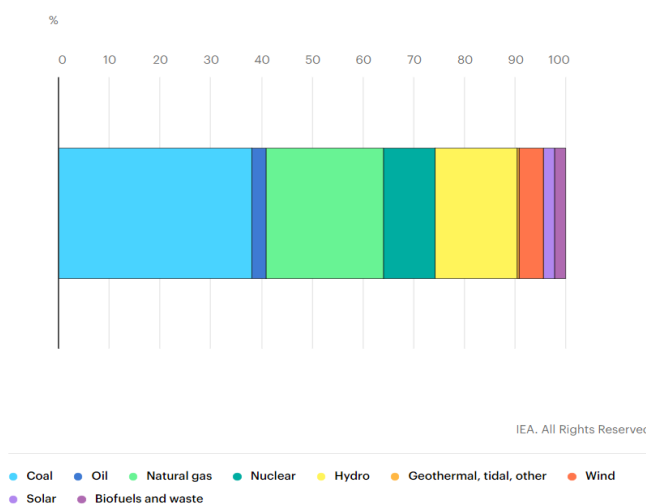
Το 2018, το μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των χωρών εκτός Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) έφτασε το 58,0% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας - περισσότερο από το διπλάσιο του μεριδίου που κατείχαν το 1974. Η ετήσια αύξηση της παραγωγής μεταξύ 2010 και 2018 ήταν κατά μέσο όρο 0,3% στις χώρες του ΟΟΣΑ, σε σύγκριση με 4,8% στις μη Χώρες του ΟΟΣΑ (IEA, 2019a)



Διάγραμμα 2 Συνολική ακαθάριστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, 1974-2018 στις χώρες του ΟΟΣΑ και στις χώρες εκτός ΟΟΣΑ

Πηγή IEA, 2019a

Το 2018, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από καύσιμα που προέρχονται από απορρίμματα αντιπροσώπευε το 66,3% της συνολικής παγκόσμιας ακαθάριστης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα καύσιμα προερχόμενα από απορρίμματα, περιλαμβάνουν προϊόντα άνθρακα, προϊόντα πετρελαίου, φυσικό αέριο, βιοκαύσιμα συμπεριλαμβανομένων στερεών βιομάζας και ζωικών προϊόντων, αέρια / υγρά από βιομάζα, βιομηχανικά απόβλητα και αστικά απόβλητα (IEA, 2019b)



Διάγραμμα 3 Παγκόσμια ακαθάριστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ανά πηγή, 2018

Πηγή: IEA 2019a

Το 2019, η αύξηση της πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας επιβραδύνθηκε στο 1,3%, παρουσιάζοντας λιγότερο από το μισό του ρυθμού ανάπτυξης που είχε το 2018 (2,8%) πολύ κάτω από τον μέσο όρο από το 2010. Αυτή η επιβράδυνση οφείλεται κυρίως στην επιβράδυνση της παγκόσμιας

οικονομικής ανάπτυξης και στις επιπτώσεις του ηπιότερου καιρού στη θέρμανση και την ψύξη. Υπήρξε, ωστόσο, σημαντική διακύμανση μεταξύ των πηγών ενέργειας, με τον άνθρακα να παρουσιάζει απόλυτη πτώση και τις ανανεώσιμες πηγές να σημειώνουν ρεκόρ αύξησης. Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε με τον πιο αργό ρυθμό μετά την οικονομική κρίση. Η ενεργειακή απόδοση συνέχισε να βελτιώνεται, αλλά πολύ λιγότερο από αυτό που απαιτείται για την επίτευξη των στόχων της αειφόρου ανάπτυξης. Οι εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με την ενέργεια παρέμειναν σταθερές καθώς οι εκπομπές από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις προηγμένες οικονομίες μειώθηκαν αισθητά (IEA, 2020).

Όσον αφορά την παγκόσμια ζήτηση ενέργειας, με βάση τα ίδια στοιχεία, αυτή αυξήθηκε το 2019 κατά 0,9%, δηλαδή κατά 120 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (Mtoe)¹, ήτοι 40% του ρυθμού ανάπτυξης που παρατηρήθηκε το 2018. Η βραδύτερη οικονομική ανάπτυξη και οι καιρικές συνθήκες εξηγούν το μεγαλύτερο μέρος της επιβράδυνσης (IEA, 2020).

Η παγκόσμια αύξηση του ΑΕΠ μειώθηκε από 3,6% το 2018 σε 2,9% το 2019, περιορίζοντας την αύξηση της ζήτησης ενέργειας. Η οικονομική επιβράδυνση έγινε αισθητή σε όλες σχεδόν τις οικονομίες. Στις προηγμένες οικονομίες, η μέση οικονομική ανάπτυξη μειώθηκε σχεδόν κατά 25% μεταξύ 2018 και 2019. Η οικονομική επιβράδυνση περιόρισε την αύξηση της ζήτησης ενέργειας ιδιαίτερα στην Ινδία, όπου η οικονομική ανάπτυξη μειώθηκε από 6,8% το 2018 σε 4,8% το 2019, πολύ κάτω από τον μέσο όρο του 7% τα 2010. Στην Κίνα, η οικονομική ανάπτυξη μειώθηκε επίσης από 6,6% το 2018 σε 6,1% το 2019.

¹ Ο τόνος ισοδύναμου πετρελαίου (ton of oil equivalent – toe) είναι μονάδα ενέργειας.

Η ζήτηση ενέργεια μειώθηκε επίσης λόγω του ήπιου χειμώνα παγκοσμίως, το 2019 από ό, τι το 2018, όταν οι ψυχρότεροι από τους μέσους χειμώνες και οι θερμότεροι από τους μέσους καλοκαιρινούς μήνες αύξησαν τη ζήτηση ενέργειας και για τη θέρμανση και για την ψύξη. Ένα ηπιότερο καλοκαίρι στις Ηνωμένες Πολιτείες και τη Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας το 2019 μείωσε επίσης τη ζήτηση ενέργειας για ψύξη. Η μειωμένη ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση και ψύξη χώρου μείωσε παράλληλα τη ζήτηση για όλα τα καύσιμα. Συνολικά, οι καιρικές αλλαγές μείωσαν την παγκόσμια ζήτηση ενέργειας κατά 0,8% μονάδες βάσης μεταξύ 2018 και 2019 (IEA, 2020).

Η μείωση της αύξησης της ζήτησης ενέργειας μεταξύ 2018 και 2019 έγινε αισθητή από τον άνθρακα και το φυσικό αέριο, ενώ η αύξηση για άλλες πηγές ενέργειας μετατράπηκε λίγο. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και το φυσικό αέριο κέρδισαν το μερίδιο αγοράς, με το αέριο να ξεπερνά το 23% και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το 14% (IEA, 2020).

Με βάση τα στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας, συνέχισε την πτωτική τάση και το 2020 κατά 6%, σε σύγκριση με το 2019 (πρόκειται για την μεγαλύτερη μείωση στα τελευταία 70 χρόνια) λόγω της πανδημίας του κορωνοϊού. Ωστόσο δεν επηρεάστηκαν όλα τα καύσιμα με τον ίδιο τρόπο, καθώς τα ορυκτά καύσιμα επηρεάστηκαν περισσότερο από τα μη ορυκτά καύσιμα. Ειδικότερα υπήρξε σημαντική μείωση της ζήτησης άνθρακα λόγω των επιπτώσεων της πανδημίας στις αναπτυσσόμενες οικονομίες και των σχετικά χαμηλών τιμών φυσικού αερίου στις πιο προηγμένες οικονομίες (IEA, 2020).

Στην περίπτωση του φυσικού αερίου, ο αντίκτυπος ήταν κάπως πιο μετριοπαθής, με την παγκόσμια ζήτηση για καύσιμα να πέφτει στο 4% το 2020, ωστόσο σύμφωνα με προβλέψεις αναμένεται μια σχετική ανάκαμψη το

2021. Αυτό συμβαίνει επειδή το φυσικό αέριο απομακρύνει τις επιχειρήσεις από τον άνθρακα στον τομέα της ενέργειας εν μέσω χαμηλών τιμών. Επίσης παρατηρήθηκε μείωση κατά 8% στη ζήτηση πετρελαίου το 2020 σε σχέση με το 2019, αλλά μικρή μείωση της ζήτησης πυρηνικής ενέργειας, ενώ οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρέμειναν σχετικά ανεπηρέαστες. Τέλος, όσον αφορά την παγκόσμια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας τονίζει ότι υπήρξε σημαντική μείωση κατά 5% το 2020, λόγω της πανδημίας, η οποία είναι η μεγαλύτερη μείωση μετά τη Μεγάλη Ύφεση των ΗΠΑ τη δεκαετία του 1930 (IEA, 2020).

Η ανάγκη για ενέργεια προέκυψε μόλις τα ανθρώπινα όντα έμαθαν να μαγειρεύουν φαγητό, αν και οι άνθρωποι επωφελήθηκαν από την ηλιακή ενέργεια για να προστατεύσουν το σώμα τους από το κρύο, να στεγνώσουν τα ρούχα τους στον ήλιο κ.λπ. Με την σταδιακή συνειδητοποίηση της δυνατότητας που προσφέρει η φύση για την εκμετάλλευση της ενέργειας, εντοπίστηκαν διάφορες πηγές ενέργειας και χρησιμοποιήθηκαν για ευέλικτες χρήσεις. Οι άνθρωποι γνώριζαν επίσης να αλλάζουν μορφές ενέργειας και να την αποθηκεύουν για τις χρονικές εκείνες περιόδους κατά τις οποίες δεν υπήρχαν διαθέσιμες πηγές, για παράδειγμα, η ηλιακή ενέργεια τη νύχτα, αν και οι τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας ήταν πολύ βασικοί, όπως η αποθήκευση ξύλου κάτω από καταφύγια και σε άλλα ασφαλή μέρη.

Η αύξηση του πληθυσμού και η ευελιξία στη χρήση ενέργειας πρόσθεσαν κι άλλες πηγές ενέργειας εκτός από την ηλιακή, όπως άνθρακας, ατμός, νερό, άνεμος και πετρέλαιο. Η εφεύρεση της ηλεκτρικής ενέργειας άλλαξε ολόκληρο το σενάριο της ενέργειας. Οι παλιές πηγές ενέργειας αντικαταστάθηκαν εν μέρει από την παραγωγή και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Ορισμένες σύγχρονες πηγές ενέργειας, όπως οι

πυρηνικοί και οι ανανεώσιμοι πόροι ενέργειας, παρουσίασαν εκθετική αύξηση, στον εικοστό αιώνα. Έτσι, επί του παρόντος, επικρατεί και χρησιμοποιείται σε διάφορα μέρη του πλανήτη ένα ενεργειακό μείγμα. Οι απαιτήσεις για ενέργεια, αυξάνονται ραγδαία λόγω της πληθυσμιακής αύξησης, της ανάπτυξης στην οικονομία των αναπτυσσόμενων χωρών, της αύξησης της κατά κεφαλήν κατανάλωσης, της αλλαγής στον τρόπο ζωής και της προσφοράς ενέργειας σε πιο απομακρυσμένα μέρη ως αποθηκευμένη ενέργεια.

Είναι χαρακτηριστικό ότι η παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ήταν 149.634 και 157.064 Terawatt-ώρες (TWh) το 2015 και το 2018 αντίστοιχα (Ritchie and Roser, 2019). Η ώρα terawatt είναι μια μονάδα ενέργειας ίση με την παραγωγή ενός τρισεκατομμυρίου βατ για μία ώρα. Είναι ίση με $3,6 \times 10^{15}$ Joules. Αυτή η τιμή είναι αρκετά μεγάλη για να εκφράσει την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για ολόκληρες χώρες και χρησιμοποιείται συχνά όταν περιγράφει σημαντική παραγωγή ενέργειας ή κατανάλωση.

Σύμφωνα με την εκτίμηση των Ritchie and Roser, (2019) οι περιφερειακές καταναλώσεις ήταν 69.615, 32.936, 23.859, 10.822, 10.494, 8164 και 5367 TWh για την Ασία-Ειρηνικό, τη Βόρεια Αμερική, την Ευρώπη, την Ρωσία, τη Μέση Ανατολή, τη Νότια και Κεντρική Αμερική και την Αφρική αντίστοιχα. Έτσι, οι μεγαλύτεροι καταναλωτές ενέργειας ήταν η Ασία-Ειρηνικός και η Βόρεια Αμερική, ενώ η Αφρική χρησιμοποίησε τη λιγότερη ποσότητα ενέργειας το 2018. Τα Αραβικά κράτη του κόλπου, είναι αν και χαμηλά σε πληθυσμιακό επίπεδο, υψηλοί καταναλωτές ενέργειας, ακόμη και σε σύγκριση με ορισμένες από τις ανεπτυγμένες χώρες (Al-Badi και AlMubarak, 2019).

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή των Αραβικών Κρατών του Κόλπου αυξήθηκε από μόλις 51 TWh το 1990 σε σχεδόν 536 TWh το 2015, ενώ η κατά κεφαλήν χρήση έχει καταγραφεί ως ένα από τα υψηλότερα ποσοστά. Εκτιμάται ότι οι χώρες αυτές θα καταναλώνουν 1094 TWh έως το 2025 (Almulla, 2014). Ένα τέτοιο πρότυπο οφείλεται κυρίως στην ταχεία οικονομική ανάπτυξη και τη σημαντική αλλαγή στον τρόπο ζωής.

Τα ηλεκτρικά συστήματα απαιτούν απαραίτητως ομαλή, ισορροπημένη, αξιόπιστη και ποιοτική παροχή (διατηρώντας σταθερή τάση και συχνότητα) στους πελάτες χωρίς διακοπή και πιθανή ζημιά σε ηλεκτρικές συσκευές. Οι έντονες διακυμάνσεις υπάρχουν πάντα στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε διαφορετικούς χρόνους. Κατά συνέπεια, θα μπορούσαν να υπάρχουν ορισμένες στιγμές που η παραγωγή ενέργειας θα είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση και το αντίστροφο. Για παράδειγμα, η μέγιστη ζήτηση των χωρών του Συμβουλίου Συνεργασίας για τα Αραβικά Κράτη του Κόλπου το καλοκαίρι είναι διπλάσια λόγω της λειτουργίας των κλιματιστικών και είναι τρεις φορές μεγαλύτερη επίσης τις ώρες αιχμής του χειμώνα (Al-Badi & AlMubarak, 2019).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1. Εισαγωγικές παρατηρήσεις

Η ηλεκτρική ενέργεια έχει γίνει μια πολύ σημαντική μορφή χρήσης ενέργειας για τους καταναλωτές σε σχέση με άλλες ενεργειακές πηγές όπως άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ουράνιο κλπ. Με την ευελιξία και τη δυνατότητα ελέγχου και την άμεση διαθεσιμότητα, η ηλεκτρική ενέργεια έχει καταστεί απαραίτητη, συγκριτικά με τη χρήση άλλων μορφών ενέργειας. Η οικιακή χρήση εκτείνεται πλέον πολύ πέρα από τον αρχικό σκοπό, και έχει γίνει σχεδόν αναντικατάστατη για την λειτουργία ψυγείων, φούρνων και αναρίθμητων άλλων συσκευών οικιακής χρήσης όπως για κλιματισμό, ραδιόφωνο, τηλεόραση, υπολογιστές κλπ.

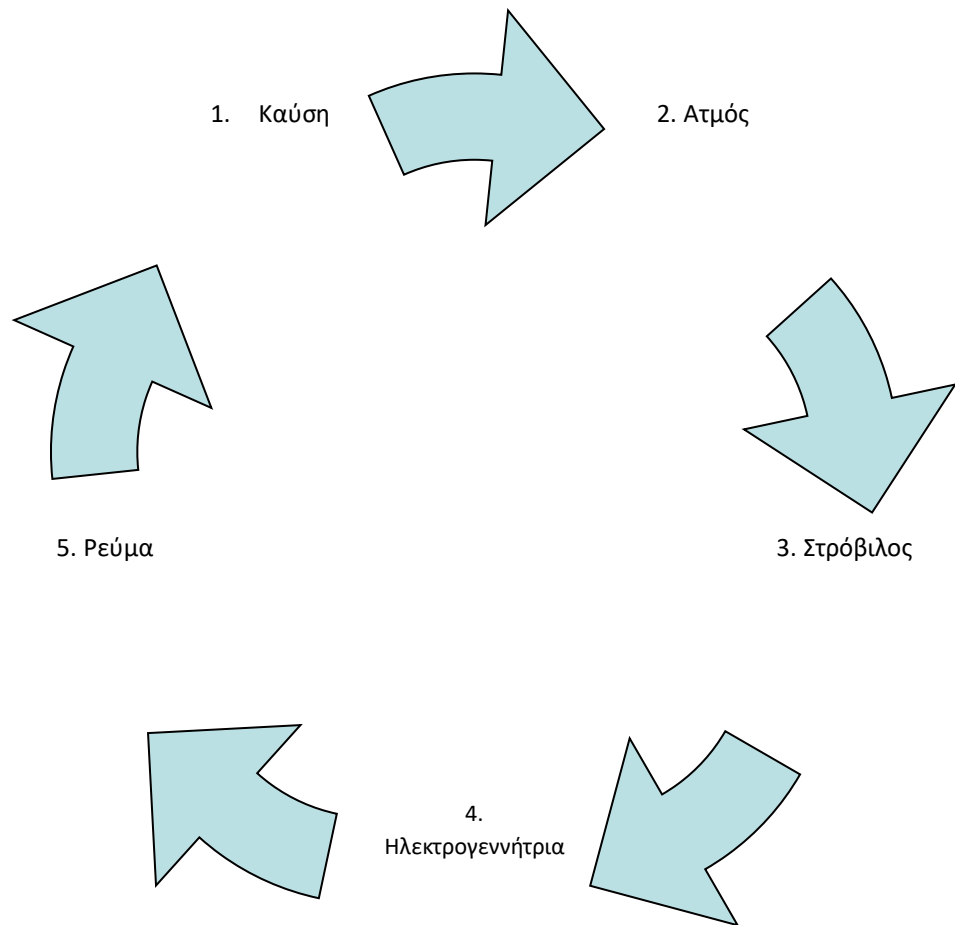
Αλλά η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι ακόμη ευρύτερη στον εμπορικό και βιομηχανικό τομέα: εκτός από την παροχή ισχύος για φωτισμό και κλιματισμό, οδηγεί κινητήρες με πλήθος εφαρμογών: ανελκυστήρες, γερανοί μύλοι, αντλίες, συμπιεστές, τόρνοι ή άλλα μηχανοκίνητα εργαλεία κλπ. Είναι σχεδόν αδύνατο να φανταστεί κανείς μια βιομηχανική δραστηριότητα που δεν χρησιμοποιεί κάποιο είδος ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, οι σύγχρονες κοινωνίες εξαρτώνται πλήρως από την άφθονη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να γίνει μετατροπή άλλης μορφής ενέργειας στην αρχή σε μηχανική μέσω κινητήριων μηχανών (π.χ. στροβίλων) και στην συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω γεννητριών.

1.2. Βασικές μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας: συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν σχέση κατά κύριο λόγο, με ποιες πρωτογενείς μορφές ενέργειας είναι διαθέσιμες. Υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι συμβατικές και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι συμβατικές μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασίζονται στα ορυκτά στερεά καύσιμα, όπως οι γαιάνθρακες (λιθάνθρακας, λιγνίτης), στα υγρά καύσιμα (πετρέλαιο) ή στα αέρια καύσιμα (φυσικό αέριο, πυρηνική ενέργεια). Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανεξάντλητες πηγές, όπως ο άνεμος, ο ήλιος ή το νερό ή ανανεώσιμα καύσιμα υλικά (π.χ. βιομάζα).

Όσον αφορά την διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω συμβατικών μεθόδων, αρχικά η πρώτη ύλη καίγεται σε έναν καυστήρα. Από την καύση στο εσωτερικό του καυστήρα παράγεται θερμότητα η οποία ζεσταίνει δεξαμενές νερού (λέβητες). Στη συνέχεια το νερό που ζεσταίνεται στους λέβητες παράγει ατμό, ο οποίος με μεγάλη πίεση φεύγει από τον λέβητα και καταλήγει στον στρόβιλο ο οποίος διαθέτει πτερύγια τα οποία υπό την πίεση του ατμού, γυρνάνε με μεγάλη ταχύτητα. Ακολούθως τα πτερύγια του

στροβίλου, μεταδίδουν τη κίνηση σε ένα μαγνήτη, ο οποίος αποτελεί μέρος της μηχανής που αποκαλείται ηλεκτρογεννήτρια κι έτσι παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τις φάσεις παραγωγής του ηλεκτρικού ρεύματος στις συμβατικές μεθόδους παραγωγής.



Οι φάσεις από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας έως και την εμπορική χρήση της είναι οι ακόλουθες:

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: η ηλεκτρική ενέργεια δημιουργείται σε εγκαταστάσεις ικανές να παράγουν ηλεκτρισμό από πρωτογενείς ενέργειες. Οι λεγόμενες ανανεώσιμες πρωτογενείς ενέργειες είναι ο άνεμος, η ηλιακή ακτινοβολία, οι παλίρροιες και οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ο άνθρακας, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο. Οι εταιρείες κατασκευάζουν εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και διαθέτουν (εν όλω ή εν μέρει) τους λεγόμενους σταθμούς παραγωγής ενέργειας και υποδομή. Ακολουθώντας πωλούν την ενέργεια που παράγεται στις εταιρείες που τις εμπορεύονται (προμηθευτές).

Μετάδοση ενέργειας: μόλις ληφθεί η ενέργεια και αφού μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια, μεταδίδεται από εναέριες γραμμές ισχύος ή υπόγεια, από τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας στους υποσταθμούς. Υπάρχουν και άλλα στοιχεία εκεί, που ονομάζονται μετασχηματιστές, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εξασφάλιση επαρκούς ηλεκτρικής τάσης. Οι υποσταθμοί είναι απαραίτητοι για την επεξεργασία του ηλεκτρικού ρεύματος και τη διατήρηση της σωστής τάσης και συνήθως βρίσκονται σε εξωτερικούς χώρους κοντά σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής ή / και στην περιφέρεια των πόλεων.

Διανομή ισχύος: η ηλεκτρική ενέργεια αποστέλλεται σε νοικοκυριά στην πλησιέστερη περιοχή από τους υποσταθμούς. Η εταιρεία διανομής είναι υπεύθυνη για τη διασφάλιση ότι ο ηλεκτρισμός φτάνει σωστά στο σπίτι ή την επιχείρησή τους και φροντίζει για ενδεχόμενες βλάβες. Είναι επίσης ο ιδιοκτήτης του μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας και στέλνει τις μετρήσεις του στον προμηθευτή του καταναλωτή (που είναι αυτός που τελικά χρεώνει).

Εμπορία ενέργειας: ο προμηθευτής είναι αυτός που μπορεί πάντα να επιλέξει ο καταναλωτής και είναι αυτός που εκδίδει τους λογαριασμούς χρέωσης, καθώς είναι αυτός που αγοράζει την ενέργεια από τις εταιρείες

παραγωγής και την πωλεί στους τελικούς καταναλωτές. Οι προμηθευτές προσφέρουν στους καταναλωτές διαφορετικά τιμολόγια και προσφορές, στο πλαίσιο μιας ελεύθερης αγοράς όπου ο καταναλωτής πληρώνει σύμφωνα με τους όρους της σύμβασής του, όπως σε οποιοδήποτε άλλο τιμολόγιο υπηρεσιών (κινητό, Wi-Fi κ.λπ.) ενώ υπάρχουν και κάποιες χώρες όπου λειτουργούν στο πλαίσιο της ρυθμιζόμενης αγοράς (ο καταναλωτής πληρώνει αυτό που καθιερώνεται από ένα σύστημα σχεδιασμένο από την κυβέρνηση).

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Οι ΑΠΕ είναι οι πηγές ενέργειας, υπάρχουν σε μικρότερες ή μεγαλύτερες ποσότητες στο φυσικό περιβάλλον. Αυτές τις μορφές ενέργειας χρησιμοποίησε ο άνθρωπος πριν στραφεί έντονα στη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Οι ΑΠΕ πρακτικά δεν εξαντλούνται, η χρήση τους δεν επιβαρύνει το περιβάλλον ενώ αξιοποιούνται μόνον από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που θα έχουν σαν σκοπό την δέσμευση του δυναμικού τους. Ο ήλιος, ο άνεμος, το νερό της γεωθερμίας και της βιομάζας, αποτελούν πηγές ενέργειας φιλικές προς το περιβάλλον, και μπορούν και πρέπει να τις εκμεταλευτούμε οικονομικά εφόσον είναι ανανεώσιμες και ρυπαίνουν ελάχιστα ή καθόλου. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Ηλιακή ενέργεια

Οι άνθρωποι εκμεταλλεύονται την ενέργεια από τον ήλιο για χιλιάδες χρόνια - για να καλλιεργήσουν, να ζεσταθούν ή να στεγνώνουν τις τροφές τους. Σήμερα, χρησιμοποιούμε τις ακτίνες του ήλιου με πολλούς τρόπους - για τη θέρμανση σπιτιών και επιχειρήσεων, για ζεστό νερό ή συσκευές ηλεκτρικής ενέργειας. Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ήλιου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται κυρίως με τη χρήση των ηλιακών

φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία μετατρέπουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά π.χ. το πυρίτιο είναι το πιο διαδεδομένο. Με την πρόσπτωση του ηλιακού φωτός στο φωτοβολταϊκό κύτταρο, διεγείρονται ηλεκτρόνια τα οποία μπορούν να κινούνται σχετικά ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Μέσω της εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίου, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται προς συγκεκριμένη κατεύθυνση, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Παράλληλα, οι πλωτές φωτοβολταϊκές εκμεταλλεύσεις - ή "floatovoltaics" - μπορούν να αποτελέσουν αποτελεσματική χρήση εγκαταστάσεων λυμάτων και υδάτινων σωμάτων που δεν είναι οικολογικά ευαίσθητα. Τα συστήματα ηλιακής δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον, ενώ τα περισσότερα φωτοβολταϊκά πέρα από τη διαδικασία κατασκευής έχουν και αυτά ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Αιολική Ενέργεια: Η αιολική ενέργεια δημιουργείται από την ακτινοβολία του ήλιου. Ειδικότερα η θέρμανση της επιφάνειας της γης, η οποία δεν είναι ομοιόμορφη, προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων αέριων μαζών από τη μια περιοχή στην άλλη, κι έτσι δημιουργούνται οι άνεμοι. Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν λεπίδες για να συλλέξουν την κινητική ενέργεια του ανέμου. Ο άνεμος περνάει πάνω από τα πτερύγια δημιουργώντας ανύψωση (παρόμοιο με το φαινόμενο στα φτερά του αεροπλάνου), και αυτό αναγκάζει τις λεπίδες να γυρίσουν. Οι λεπίδες συνδέονται με έναν άξονα μετάδοσης κίνησης που περιστρέφει μια ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία παράγει ηλεκτρισμό.

Γεωθερμική Ενέργεια: Γεωθερμική ενέργεια είναι η ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης, μεταφέρεται στην επιφάνεια με αγωγή θερμότητας. Προκύπτει με την είσοδο στο φλοιό της γης, λειωμένου μάγματος από τα βαθύτερα στρώματά της. Γίνεται αντιληπτή με τη μορφή θερμού νερού ή ατμού. Ο πυρήνας της γης είναι το ίδιο ζεστός όσο η επιφάνεια του ήλιου, λόγω της αργής αποσύνθεσης των ραδιενεργών σωματιδίων σε βράχους στο κέντρο του πλανήτη. Η γεώτρηση βαθιών πηγαδιών τροφοδοτεί πολύ ζεστό υπόγειο νερό στην επιφάνεια της γης ως υδροθερμικό πόρο, ο οποίος στη συνέχεια μέσω στροβίλου αντλείται κι έτσι δημιουργείται η ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν τρόποι δημιουργίας γεωθερμικών εγκαταστάσεων όπου δεν υπάρχουν υπόγειες δεξαμενές, αλλά υπάρχουν ανησυχίες ότι ενδέχεται να αυξήσουν τον κίνδυνο σεισμού σε περιοχές που έχουν ήδη θεωρηθεί γεωλογικά θερμά σημεία.

Υδροηλεκτρική Ενέργεια:

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι από τις μεγαλύτερες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα παγκοσμίως, αν και η αιολική ενέργεια αναμένεται σύντομα να αναλάβει το προβάδισμα. Η υδροηλεκτρική ενέργεια βασίζεται στο νερό - συνήθως γρήγορα κινούμενο νερό σε ένα μεγάλο ποτάμι ή νερό που κατακρημνίζεται με δύναμη από ένα υψηλό σημείο (υδατοπτώσεις)- και μετατρέπει τη δύναμη αυτού του νερού σε ηλεκτρισμό περιστρέφοντας τις λεπίδες της τουρμπίνας μιας γεννήτριας. Ειδικότερα η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, προκύπτει από την μετατροπή της ενέργειας των υδατοπτώσεων με τη βοήθεια υδροηλεκτρικών έργων (πχ υδροστρόβιλοι, ηλεκτρογεννήτριες κλπ).

Ενέργεια Βιομάζας:

Η βιομάζα είναι οργανικό υλικό που προέρχεται από φυτά και ζώα και περιλαμβάνει καλλιέργειες, απόβλητα ξύλα και δέντρα εξαιρώντας τα ορυκτά καύσιμα. Πρόκειται ειδικότερα για οποιοδήποτε υλικό το οποίο προέρχεται είτε άμεσα είτε έμμεσα από φυτικές και ζωικές ύλες, όπως φυτικές ύλες από φυσικά οικοσυστήματα ή από ενεργειακές καλλιέργειες, καθώς και τα υπολείμματα της εκμετάλλευσής τους, τα υποπροϊόντα της γεωργικής, κτηνοτροφικής, δασικής και αλιευτικής παραγωγής, αλλά και το βιολογικής προέλευσης από τα λύματα και τα απορρίμματα. Η ενέργεια βιομάζας προκύπτει από τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε χημική μέσω της φωτοσύνθεσης και αποθηκεύεται στις οργανικές δομές των ιστών των οργανισμών. Όταν καίγεται η βιομάζα, η χημική ενέργεια απελευθερώνεται ως θερμότητα και μπορεί να παράγει ηλεκτρισμό με ατμοστρόβιλο.

Η βιομάζα περιγράφεται συχνά ως καθαρό, ανανεώσιμο καύσιμο και πιο πράσινη εναλλακτική λύση έναντι του άνθρακα και άλλων ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, διάφορες έρευνες έχουν δείξει ότι πολλές μορφές βιομάζας - ειδικά από δάση - παράγουν υψηλότερες εκπομπές άνθρακα από τα ορυκτά καύσιμα. Υπάρχουν επίσης αρνητικές συνέπειες για τη βιοποικιλότητα. Ωστόσο, ορισμένες μορφές ενέργειας από βιομάζα θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν ως επιλογή χαμηλού άνθρακα υπό τις κατάλληλες συνθήκες (πχ το πριονίδι).

Ωκεανοί

Η παλιρροιακή και η κυματική ενέργεια εξακολουθούν να βρίσκονται σε αναπτυξιακή φάση, ωστόσο αποτελούν ελκυστική επιλογή για την παραγωγή ενέργειας και ειδικότερα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παλιρροιακή ενέργεια δημιουργείται με την αξιοποίηση της κίνησης της παλίρροιας και των ωκεανών, όπου η ένταση του νερού από την άνοδο και την πτώση της παλίρροιας είναι μια μορφή κινητικής ενέργειας. Η παλιρροιακή ενέργεια δημιουργεί τη βαρυτική υδροηλεκτρική ενέργεια, η οποία χρησιμοποιεί την κίνηση του νερού για να ωθήσει έναν στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, ορισμένες προσεγγίσεις παλιρροιακής ενέργειας μπορεί να βλάψουν την άγρια φύση, όπως παλιρροιακά φράγματα, που βρίσκονται σε έναν ωκεανό, σε έναν κόλπο ή σε μια λιμνοθάλασσα.

Όπως και η παλιρροιακή ενέργεια, η κυματική ενέργεια βασίζεται σε δομές τύπου φράγματος ή σε αγκυρωμένες συσκευές ωκεανού πάνω ή ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του νερού. Σύμφωνα με στοιχεία του Παγκοσμίου Συμβουλίου για το Κλίμα (IPCC), η κυματική ενέργεια μπορεί να καλύψει μελλοντικά το 30 % της παγκόσμιας ζήτησης, σήμερα ωστόσο, βρίσκεται ακόμα σε εμβρυακό στάδιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1. Η ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας γενικά

Για την εξισορρόπηση και την αντιστοίχιση της ζήτησης και της προσφοράς, η αποθήκευση ενέργειας είναι απαραίτητη. Οι τρέχουσες τάσεις δείχνουν ότι η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας θα αυξηθεί υπό το καθεστώς της υψηλής παραγωγής και ζήτησης, απαιτώντας αποθήκευση ενέργειας για πολλές ημέρες ή εβδομάδες ή ακόμα και μήνες στο μέλλον. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, οι απαιτήσεις για την αποθήκευση ενέργειας θα τριπλασιαστούν από τις ισχύουσες τιμές έως το 2030 (IRENA, 2017).

Η ηλεκτρική ενέργεια όταν παράγεται σε περιόδους υπερβολικής ζήτησης πρέπει να αποθηκεύεται αλλιώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα και το κόστος παραγωγής για αυτό το μέρος θα χαθεί. Έτσι, θα αυξήσει το κόστος ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη βοήθεια των ΑΠΕ όπως για παράδειγμα η ηλιακή και αιολική ενέργεια, και η αποθήκευση της είναι εξαιρετικά απαραίτητη επειδή η ηλιακή ενέργεια τη νύχτα και η αιολική ενέργεια δεν θα είναι διαθέσιμες σε συγκεκριμένες ώρες. Σίγουρα, η παραγωγή μπορεί να ξεπεράσει τη συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις ώρες εκτός αιχμής και να δημιουργήσει επείγουσα ανάγκη για αποθήκευση της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας.

Η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών EPA (2019) επισήμανε ότι η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να

διατηρήσει την ισορροπία μεταξύ προσφοράς (παραγωγής) και ζήτησης (χρήση καταναλωτή), την αποφυγή ηλεκτρικών διακυμάνσεων, την μείωση της απώλειας κατά τη διάρκεια της αιχμής, την μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης καθώς και την αύξηση της απόδοσης ηλεκτρικού δικτύου.

Με την βοήθεια της αποθήκευσης ενέργειας σταθεροποιείται η ισχύς του δικτύου. Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένας βασικός μηχανισμός για την αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, την αύξηση της ασφάλειας και την οικονομική αξία και τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Mathew, 2012; Revankar, 2019).

Η ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι εύκολη στην αποθήκευση και απαιτούνται ειδικές συσκευές και μηχανισμοί για το σκοπό αυτό οι οποίοι βελτιώνονται και καινοτομούνται από ερευνητές και τεχνολόγους, συνεχώς. Κατά συνέπεια, η σημερινή παγκόσμια ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας αυξάνεται συνεχώς και με ραγδαίους ρυθμούς (Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας, 2019). Για παράδειγμα, σύμφωνα με εκτιμήσεις της Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών EPA (2019) σημειώθηκε αύξηση 100% της χωρητικότητας αποθήκευσης το 2018σε σύγκριση με το έτος 2017.

Έτσι οι ανάγκες για συσκευές αποθήκευσης και συστήματα αποθήκευσης, αυξάνεται ανάλογα. Επίσης η πλεονασματική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί επίσης να ανταλλαχθεί με γειτονικές ζώνες δικτύου μέσω αυξημένης ικανότητας διασύνδεσης. Έτσι, η περίσσεια παραγωγής ενός πλέγματος μπορεί να μοιραστεί με άλλα πλέγματα όπου αυξάνεται η ζήτηση (Metz, 2016). Ωστόσο, λόγω των σχεδόν ίδιων ωρών αιχμής και εκτός αιχμής στις γειτονικές περιοχές, η χρησιμότητα αυτής της επιλογής είναι περιορισμένη.

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μέσω μπαταριών χρησιμοποιείται για την παροχή ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές. Αυτή η μορφή ενέργειας έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται σε οχήματα, πολλά από τα οποία λειτουργούν τώρα με αποθηκευμένο ηλεκτρισμό (Whittingham, 2012). Τα ορυκτά καύσιμα επηρεάζουν ιδιαίτερα το παγκόσμιο περιβάλλον αναφορικά με τις εκπομπές CO₂. Ως εκ τούτου, υπάρχει μεγάλη έμφαση χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Κατά συνέπεια, η ανάγκη για αύξηση της χωρητικότητας αποθήκευσης ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί μελλοντικά σε σημαντικό βαθμό λόγω της διαλείπουσας προσφοράς από ανανεώσιμες πηγές. Επομένως, οι ανανεώσιμες εγκαταστάσεις πρέπει να συνδυάζονται με συσκευές και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας στο προσεχές μέλλον (Wilson, 2018; IRENA, 2017).

Η αποθήκευση ενέργειας είναι επίσης ζωτικής σημασίας για το πεδίο της υψηλής τεχνολογίας, όπου υπάρχει αναγκαιότητα για αδιάλειπτες πηγές ισχύος με σταθερή συχνότητα. (Fletcher, 2011). Η αποθήκευση ενέργειας είναι επίσης ζωτικής σημασίας για βασικούς παρόχους υπηρεσιών όπως η τηλεφωνική βιομηχανία και ο τομέας της υγειονομικής περίθαλψης που βασίζονται κυρίως στην αποθήκευση ενέργειας (με τη μορφή μεγάλων μπαταριών για δημιουργία αντιγράφων ασφαλείας σε περίπτωση διακοπής ρεύματος).

3.2. Τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Όσον αφορά τις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, έμφαση δίνεται στις δύο κυρίαρχες τεχνολογίες αποθήκευσης σήμερα, την αντλησιοταμίευση και τους συσσωρευτές (μπαταρίες) αλλά και σε αναδύομενες τεχνολογίες, αυτές της θερμικής αποθήκευσης μέσω μετατροπής μονάδων καύσης λιγνίτη και λιθάνθρακα, καθώς και των τεχνολογιών υδρογόνου, οι οποίες αναμένεται να αποκτήσουν μεγαλύτερα μερίδια στο μέλλον.

3.2.1. Αντλησιοταμίευση (Pump-Hydro Storage, PHS)

Η τεχνολογία της αντλησιοταμίευσης εμφανίστηκε για πρώτη φορά στην Ελβετία το 1907 στο εργοστάσιο Engeweiher κοντά στο Schaffhausen της Ελβετίας. Το 1930 ακολούθησε η ανάπτυξη των πρώτων αναστρέψιμων υδροστρόβιλων, οι οποίοι μπορούν να λειτουργούν τόσο ως στρόβιλοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όσο και ως αντλίες για την αποθήκευσή της. Ο υδροστρόβιλος, μετατρέπει την ενέργεια του υγρού (νερού) σε μηχανική ενέργεια μέσω συνεχούς ροής του υγρού και σταθερής περιστροφικής κίνησης. Οι αναστρέψιμοι υδροστρόβιλοι συνέβαλαν καθοριστικά στην περαιτέρω εξάπλωση της τεχνολογίας των αντλησιοταμιευτήρων κυρίως στις ΗΠΑ και την Ιαπωνία. Σ' αυτές τις χώρες υπάρχει αυξημένη ανάγκη για διαχείριση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικούς σταθμούς (Molina, 2010).

Σήμερα, η αντλησιοταμίευση αποτελεί την πιο βασική και αποτελεσματική τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Βέβαια θα πρέπει να επισημανθεί ότι περισσότερα από τα τρία τέταρτα της παγκόσμιας αντλησιοταμιευτικής ισχύος είναι σήμερα εγκατεστημένα σε δέκα χώρες παγκοσμίως ενώ τρεις μόνο εξ'αυτών κατέχουν την μισή του συνόλου της

ισχύος. Έτσι η Κίνα διαθέτει σήμερα 31,4 GW αντλησιοταμιευτικής ισχύος, Ιαπωνία 27,4 GW και οι ΗΠΑ 22,6 GW (Shafiqur Rehman et al., 2019).

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η χωρητικότητα συστημάτων αντλησιοταμίευσης ανά χώρα. Οι τρεις πρώτες χώρες η Ιαπωνία, η Κίνα και οι ΗΠΑ συγκεντρώνουν το 50% της παγκόσμιας χωρητικότητας.

Japan	27 438
China	21 545
United States	20 858
Italy	7 071
Spain	6 889
Germany	6 388
France	5 894
India	5 072
Austria	4 808
Korea, South	4 700
United Kingdom	2 828
Switzerland	2 687
Taiwan	2 608
Australia	2 542
Poland	1 745
Portugal	1 592
South Africa	1 580
Thailand	1 391
Belgium	1 307
Russia	1 246
Czech Republic	1 145
Luxembourg	1 096
Bulgaria	1 052
Iran	1 040
Slovakia	1 017
Argentina	974
Norway	967
Ukraine	905
Lithuania	900
Philippines	709
Greece	699
Serbia	614
Morocco	465
Ireland	292
Croatia	282
Slovenia	185
Canada	174
Romania	53
Chile	31
Brazil	20

Εικόνα 2 Χωρητικότητα συστημάτων αντλησιοταμίευσης ανά χώρα

Πηγή: Letcher, 2016

Σε επίπεδο δε, Ευρωπαϊκής Ένωσης, η Ισπανία διαθέτει την μεγαλύτερη αντλησιοταμιευτική ισχύ ενώ είναι και τέταρτη κατά σειρά στην παγκόσμια κατάταξη με 8 GW αντλησιοταμιευτικής ισχύος ακολουθούμενη από την Ιταλία με 7,1GW αντλησιοταμιευτικής ισχύος και τη Γερμανία με 6,5GW αντλησιοταμιευτικής ισχύος (Nadeem et al., 2019).

Όσον αφορά την λειτουργία του, ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης περιλαμβάνει τα εξής μέρη: (Koochi-Fayegh & Rosen, 2020:167):

Αντλία ή ένα σύστημα αντλιών.

Δύο δεξαμενές νερού, οι οποίες βρίσκονται σε διαφορετικό υψόμετρο μεταξύ τους.

Υδροστροβίλο ή ένα σύστημα υδροστροβίλων.

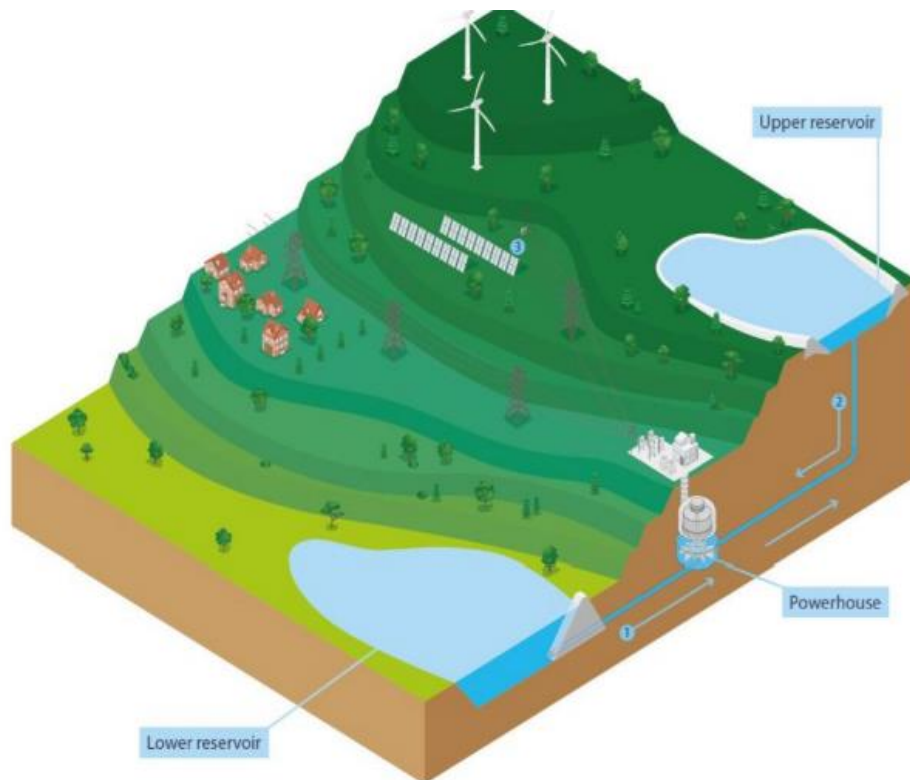
Σωληνώσεις για την άντληση νερού από την δεξαμενή που βρίσκεται σε χαμηλό υψόμετρο προς την δεξαμενή που βρίσκεται σε υψηλότερου υψόμετρο.

Μια ηλεκτρική μηχανή που λειτουργεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια σε κοινή άτρακτο με την αντλία και τον υδροστροβίλο.

Ένα σύνολο σωληνώσεων για την προσαγωγή νερού από την άνω δεξαμενή προς την κάτω μέσω του υδροστροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ουσιαστικά δηλαδή, το σύστημα της αντλησιοταμίευσης, αποτελεί μια επαναφορτιζόμενη «φυσική μπαταρία, δεδομένου ότι συνίσταται από δύο ταμιευτήρες νερού (φυσικούς ή τεχνητούς), οι οποίοι έχουν διαφορετικό υψόμετρο και οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω αγωγού με μια αντλία.

Στην περίπτωση που περισσεύει η ηλεκτρική ενέργεια και παράλληλα υπάρχει χαμηλή ζήτηση σε κατανάλωση η αντλία χρησιμοποιεί την ηλεκτρική ενέργεια που περισσεύει για να στείλει το νερό από τον κάτω στον πάνω ταμιευτήρα. Ενώ στις περιόδους υψηλής ζήτησης και αντίστοιχα χαμηλής προσφοράς σε ηλεκτρική ενέργεια, το νερό πέφτει από ψηλά και να περνάει μέσα από μια γεννήτρια όπου δημιουργεί ηλεκτρική ενέργεια (Stocks et al., 2021).



Εικόνα 3 Αρχή λειτουργίας της αντλιοσταμείωσης

Όπως φαίνεται από την εικόνα 3 στην αντλιοσταμείωση, μία αντλία ανεβάζει το νερό σε έναν άλλο ταμιευτήρα, ο οποίος βρίσκεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο από τον πρώτο ταμιευτήρα. Η αντλία λειτουργεί χρησιμοποιώντας συνήθως την ενέργεια η οποία παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ή ένα αιολικό πάρκο, όταν φυσάει ή όταν έχει ήλιο, ενώ, ταυτόχρονα, υπάρχει χαμηλή ζήτηση καθώς οι ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος έχουν καλυφθεί. Χωρίς την χρήση της αντλιοσταμείωσης, η παραγόμενη συνεπώς ανανεώσιμη ενέργεια θα πήγαινε χαμένη (Blakers et al., 2019).

Ακολούθως όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την προσφορά σε περιόδους αιχμής, το νερό ελευθερώνεται, παράγοντας την ηλεκτρική ενέργεια

που χρειάζεται και στη συνέχεια καταλήγει στον κάτω ταμιευτήρα, περιμένοντας να αντληθεί ξανά. Οι αντλίες δηλαδή του συστήματος, τροφοδοτούνται με σχετικά φθινό ηλεκτρικό ρεύμα από το δίκτυο μέσα στην ημέρα ή σε περιόδους που οι απαιτήσεις του δικτύου είναι χαμηλές για να μεταφέρουν και να αποθηκεύσουν το νερό από την δεξαμενή με χαμηλό υψόμετρο στην δεξαμενή με μεγαλύτερο υψόμετρο. Αντίστοιχα, σε περιόδους μεγάλης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας δηλαδή σε ώρες αιχμής που το ρεύμα κοστίζει πιο πολύ, το νερό απελευθερώνεται από τον άνω ταμιευτήρα προς τον υδροστρόβιλο που βρίσκεται στον κάτω ταμιευτήρα, κι έτσι παράγεται ενέργεια σε υψηλότερη τιμή. Ουσιαστικά το σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελεί μια «φυσική» επαναφορτιζόμενη μπαταρία (Van Meerwijk et al., 2016).

3.2.2. Αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα

Το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα είναι μια επιπλέον κατηγορία συστήματος αντλησιοταμίευσης. Πρόκειται ειδικότερα για μια εγκατάσταση η οποία έχει εξοπλισθεί με αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή, η οποία αποκαλείται στροβιλοαντλία, και η οποία μπορεί να λειτουργεί είτε ως αντλία στη φάση αποθήκευσης, είτε ως στρόβιλος στη φάση παραγωγής, αντιστρέφοντας τη φορά περιστροφής της πτερωτής καθώς και της φοράς της ροής (Ashok, 2007).

Αναφορικά δε με την λειτουργία του, στο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα, ενσωματώνεται ένα σύστημα διανομής, στο οποίο όταν η παροχή νερού από την δεξαμενή με χαμηλότερο υψόμετρο προς την δεξαμενή με

μεγαλύτερο εξ' αιτίας της άντλησης, είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη παροχή για τη λειτουργία του στροβίλου, ένα μεγάλο μέρος του νερού οδηγείται στον στρόβιλο και το υπόλοιπο στην δεξαμενή με μεγαλύτερο υψόμετρο. Αυτό σημαίνει ότι στο εν λόγω σύστημα η υφιστάμενη σωλήνωση λειτουργεί για την μεταφορά του νερού προς τα πάνω (Ramli et al., 2018).

Στην περίπτωση που η παροχή της εγκατάστασης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη παροχή του στροβίλου, το νερό της άντλησης στο σύνολό του φθάνει στο στρόβιλο ενώ επιπλέον χρησιμοποιείται νερό από την άνω δεξαμενή προκειμένου να μην υπάρχει έλλειμα στην απαιτούμενη παροχή στροβίλου. Έτσι στην περίπτωση αυτή μέσω της σωλήνωσης μεταφέρεται νερό από την δεξαμενή με μεγαλύτερο υψόμετρο στην δεξαμενή με χαμηλότερο υψόμετρο (Nema et al., 2009).

Το κυριότερο πλεονέκτημα του τυπικού συστήματος αντλησιοταμίευσης είναι ότι κάθε μηχανή η οποία αποτελείται από τον υδροστρόβιλο και την αντλία, λειτουργεί στο αντίστοιχο κανονικό σημείο λειτουργίας της ενώ στο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα γίνεται συμβιβασμός στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της στροβιλοαντλίας (Paska et al., 2009).

Θα πρέπει ωστόσο να επισημανθεί ότι τα τελευταία χρόνια το συγκεκριμένο πρόβλημα έχει επιλυθεί επειδή δημιουργήθηκαν αναστρέψιμες υδροδυναμικές μηχανές με δύο περωτές οι οποίες λειτουργούν με μια κοινή άτρακτο. Η μια λειτουργεί ως περωτή αντλίας και η άλλη λειτουργεί ως δρομέας στροβίλου. Μ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνουμε τη καλύτερη δυνατή λειτουργία και στις δύο περιπτώσεις (Schmidt et al., 2017).

Το βασικό πλεονέκτημα του τυπικού συστήματος αντλησιοταμίευσης σε σχέση με το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα, είναι ότι ή η αντλία ή ο

υδροστρόβιλος επιλέγονται να λειτουργού σε αντίστοιχο κανονικό σημείο λειτουργίας τους. Αντίθετα στο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα είναι απαραίτητο να γίνεται συμβιβασμός στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της στροβιλοαντλίας. (Paska et al., 2009).

Παρόλα αυτά ένα τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης έχει σημαντικό κόστος όσον αφορά την προμήθεια και εγκατάσταση ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, καθώς είναι εξοπλισμένο από δύο υδροδυναμικές μηχανές και έναν συμπλέκτη, ενώ το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα διαθέτει μόνο μια αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή, γεγονός που μειώνει το κόστος. Παράλληλα στην περίπτωση της τυπικής αντλησιοταμίευσης, κάθε μονάδα καταλαμβάνει μεγαλύτερο χώρο συγκριτικά με το μοντέλο της αναστρέψιμης υδροδυναμικής μηχανής (Canales & Beluco, 2014).

Τέλος στις περιπτώσεις εκείνες όπου η προβλεπόμενη συχνότητα εναλλαγής της λειτουργίας στροβίλου – αντλίας είναι υψηλή, ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα σε σχέση με το τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο ότι στο αναστρέψιμο μοντέλο, πρώτα να σταματούν να λειτουργούν οι αναστρέψιμες μονάδες και στη συνέχεια αρχίζουν να περιστρέφονται αντίστροφα. Το γεγονός αυτό όπως είναι προφανές είναι μία διαδικασία που διαρκεί πολύ. Άρα, το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα έχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με το τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης. Έτσι σήμερα αποτελεί μια ιδιαίτερος δημοφιλή μέθοδο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες (Katsaprakakis et al., 2013).

3.2.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αντλησιοταμίευσης

Η αντλησιοταμίευση η οποία είναι η πιο παλιά αλλά και μια από τις επικρατέστερες μεθόδους αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας έχει ένα σύνολο πλεονεκτημάτων. Τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι καταρχάς επιτρέπει την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα, παρέχοντας την δυνατότητα για πολύ μεγάλα μεγέθη ισχύος και μεγάλο εύρος αποθηκευμένης ενέργειας (Carravetta et al., 2018).

Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα των συστημάτων αντλησιοταμίευσης είναι η πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής τους. Όσον αφορά τα οικονομικά οφέλη, οι αντλησιοταμιευτικοί σταθμοί μειώνουν το συνολικό κόστος του ηλεκτρικού συστήματος καθώς ένα μεγάλο ποσοστό της τάξης του 80% της εν λόγω εξοικονόμησης του συστήματος προέρχεται από το κόστος επένδυσης σε τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλού άνθρακα, οι οποίες διαφορετικά θα ήταν απαραίτητες για να επιτευχθούν οι στόχοι της απανθρακοποίησης και της ασφάλειας εφοδιασμού (Bilal et al., 2010).

Ένα επίσης κρίσιμο πλεονέκτημα των συστημάτων αντλησιοταμίευσης, είναι ότι μέσω της αποθηκευμένης ενέργειας, οι εγκαταστάσεις προστατεύουν το δίκτυο. Αυτό γίνεται λόγω των εξελιγμένων συστημάτων ισχύος που διαθέτουν, διευκολύνουν την ελαχιστοποίηση των μεγάλων διακυμάνσεων στις τιμές των τάσεων και άρα προστατεύουν το δίκτυο. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία έχουν ιδιαίτερος υψηλό κόστος, η αντλησιοταμίευση παράγει φθινό ρεύμα σε περιόδους αιχμής (Luo et al., 2017).

Παράλληλα τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, παράγουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας (φθάνουν και έως 3 GW) ενώ έχουν σχετικά χαμηλά λειτουργικά κόστη και κόστη συντήρησης. Ειδικότερα το απαιτούμενο κόστος για την άντληση του νερού και την αποθήκευσή του στην

υψηλότερη σε ύψος δεξαμενή είναι ιδιαιτέρως χαμηλό, με αποτέλεσμα το παραγόμενο από την μονάδα αντλησιοταμίευσης ρεύμα να αποκτά ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε οικονομικό επίπεδο. Τέλος παρά το γεγονός ότι οι εγκαταστάσεις αυτές είναι μεγάλες σε μέγεθος, παρουσιάζουν ταχεία απόκριση και δυνατότητα παρακολούθησης των μεταβολών του φορτίου ώστε να μπορούν να υπερκαλύπτονται αποτελεσματικά οι απαιτήσεις ενέργειας το συντομότερο δυνατό. (Carravetta et al., 2018).

Αντίστοιχα έχουν επισημανθεί στη σχετική βιβλιογραφία κάποια μειονεκτήματα της αντλησιοταμίευσης. Ειδικότερα ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι η εύρεση κατάλληλης τοπογραφίας για την εγκατάσταση του συστήματος αντλησιοταμίευσης στην προτεινόμενη θέση εγκατάστασης καθώς επίσης κι η εξασφάλιση της παροχής νερού. Έτσι υπάρχει δυσκολία εξεύρεσης των τοποθεσιών που έχουν τις κατάλληλες προϋποθέσεις για την δημιουργία των εγκαταστάσεων αντλησιοταμίευσης. (Carravetta et al., 2018).

Ειδικότερα, όπως προαναφέρθηκε, απαιτείται σημαντική διαφορά ύψους μεταξύ των δυο ταμιευτήρων νερού καθώς επίσης και η εξασφάλιση μεγάλων ποσοτήτων νερού. Μια τυπική εγκατάσταση αντλησιοταμίευσης θα πρέπει να έχει διαφορά υψομέτρου μεταξύ των δυο ταμιευτήρων νερού, μεγαλύτερη των τριακοσίων μέτρων σε κάθετη διάταξη καθώς επίσης και μεγάλες δεξαμενές νερού της τάξης των $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Chen et al., 2019).

Η εξάτμιση του νερού ιδίως σε ξηροθερμικά κλίμακα αποτελεί επίσης ένα μειονέκτημα καθώς αυξάνει το κόστος για την αποφυγή τους δηλαδή την δημιουργία εγκαταστάσεων στη βάση μελετών που λαμβάνουν υπόψη τρεις βασικούς παράγοντες: τη θερμοκρασία του αέρα, το εμβαδόν της επιφάνειας της δεξαμενής και τον άνεμο. Επίσης μειονέκτημα αποτελεί το κόστος μελετών για προβλέψεις μελλοντικής μεσομακροπρόθεσμης εξέλιξης των

κατακρημνισμάτων στη θέση των εγκαταστάσεων αλλά και εναλλακτικές λύσεις σε ενδεχόμενη λειψυδρία για την αντιστάθμιση των αντίστοιχων μελλοντικά αυξημένων εξατμίσεων και της ενδεχόμενης επίσης αυξημένης απορρόφησης νερού από τα φυτά. (Bilal et al., 2010).

Τέλος αν και τα συστήματα αντλησιοταμίευσης αποτελούν έργα με ιδιαίτερος χαμηλά ποσοστά ρύπων και επιβάρυνσης του περιβάλλοντος, κάποιες εγκαταστάσεις έχουν αντιμετωπίσει προβλήματα με το νομικό πλαίσιο και την σχετική έκδοση άδειας, καθώς έχει αποδειχθεί μετά από την εκπόνηση των σχετικών περιβαλλοντικών μελετών, ότι η δημιουργία του έργου έχει ενδεχομένως σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον και ειδικά σε περιπτώσεις όπου είναι επιτακτική η δημιουργία φράγματος για την δημιουργία τεχνητής λίμνης. (Carravetta et al., 2018).

Ειδικότερα, σε τέτοιες περιπτώσεις ο φόβος είναι ότι η εγκατάσταση του έργου σε μια περιοχή είναι πιθανόν να διαταράξει το υδάτινο οικοσύστημα. Έτσι όλο και περισσότερο σήμερα δημιουργούνται συστήματα αντλησιοταμίευσης με χρήση θαλασσινού νερού τα οποία ελαχιστοποιούν τους παραπάνω περιβαλλοντικούς προβληματισμούς. Τα εν λόγω θαλάσσια συστήματα αντλησιοταμίευσης δεν απαιτούν δύο ταμιευτήρες - δεξαμενές αλλά μόνο έναν ο οποίος να βρίσκεται κοντά στην θάλασσα. Έτσι μειώνεται πολύτο κόστος και δεν υπάρχει σημαντική περιβαλλοντική επίπτωση. Πάντως το συγκεκριμένο μοντέλο παρουσιάζει άλλα μειονεκτήματα καθώς υφίστανται μεγάλα προβλήματα διάβρωσης λόγω του θαλασσινού αλατιού, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το κόστος συντήρησης των σχετικών εγκαταστάσεων. (Bilal et al., 2010).

3.2.3. Μέθοδος Αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες (συσσωρευτές)

Η πρώτη μπαταρία (συσσωρευτής) στον κόσμο ήταν το δοχείο Leyden ή Λουγδουνική Λάγηνος (Leyden jar) που αποθήκευε ηλεκτρικό φορτίο υψηλής τάσης από μια εξωτερική πηγή μεταξύ ηλεκτρικών αγωγών στο εσωτερικό και το εξωτερικό ενός γυάλινου δοχείου. Η συσκευή αυτή που βασίστηκε στην αρχή λειτουργίας του πυκνωτή επινοήθηκε το 1745 από τον Γερμανό κληρικό Ewald Georg von Kleist και τον Ολλανδό επιστήμονα Pieter van Musschenbroek, μεταξύ 1745 και 1746. Στη συνέχεια, το 1800, κατασκευάστηκε η πρώτη ηλεκτροχημική μπαταρία από τον Ιταλό φυσικό, Αλεσάντρο Βόλτα. Επρόκειτο για μια συσκευή που περιείχε μια στοίβα δίσκων χαλκού και ψευδαργύρου που χωρίζονταν από δίσκους χαρτιού εμποτισμένους σε άλμη, και είχαν την δυνατότητα να παράξουν ρεύμα για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Η πρώτη ωστόσο μπαταρία ευρείας χρήσης, ήταν το κελί Daniell το οποίο ανακαλύφθηκε το 1836 από τον Βρετανό χημικό John Frederic Daniell. Από τότε η τεχνολογία στο πεδίο των μπαταριών, γνώρισε ραγδαία ανάπτυξη και ευρεία χρήση σε ποικίλες εφαρμογές (Bivino et al., 2016).

Τις τελευταίες δεκαετίες οι εξελίξεις στην τεχνολογία αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας αφορούν και στις διατάξεις αποθήκευσης μπαταριών. Η μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με μπαταρίες είναι ιδιαίτερα σημαντική, παραμένοντας ο βασικός φορέας ενεργειακής αποθήκευσης για το ένα τρίτο του πληθυσμού της γης που δεν είναι συνδεδεμένο με ένα δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μπαταρίες είναι μια εκ των πλέον οικονομικών και παλιών τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργία τους βασίζεται στην αποθήκευση της ενέργειας με ηλεκτροχημικό τρόπο. Οι μπαταρίες φορτίζονται στην περίπτωση που υφίστανται μια εξωτερική χημική αντίδραση υπό την επίδραση μιας διαφοράς δυναμικού στους ακροδέκτες τους. Αντίστοιχα όταν η χημική αυτή αντίδραση

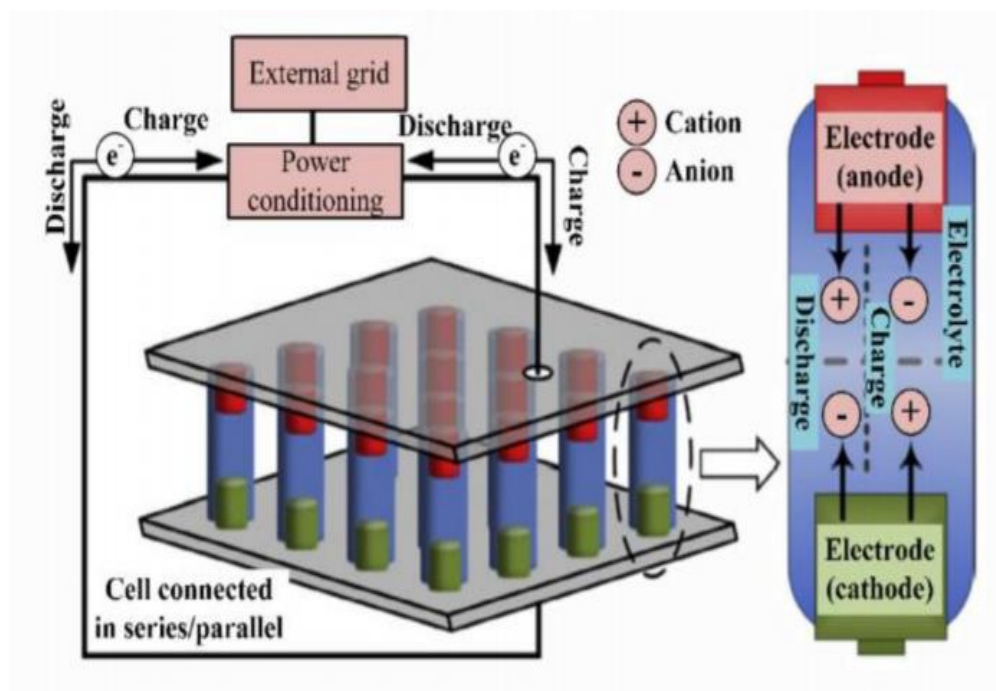
αντιστραφεί, οι μπαταρίες αποδίδουν πίσω την αποθηκευμένη ενέργεια, δηλαδή εκφορτίζονται (Stanojevic et al., 2016).

Μια μπαταρία (ή αλλιώς συσσωρευτής) είναι μια χημική πηγή ρεύματος, που μπορεί να αποθηκεύσει ηλεκτρική ενέργεια αφού πρώτα την μετατρέψει σε χημική. Ακολούθως όταν χρειαστεί η μπαταρία μπορεί να αποδώσει την αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια σε εξωτερικό κύκλωμα. Αποτελείται από ένα ή περισσότερα ηλεκτροχημικά στοιχεία τα οποία μετατρέπουν τη χημική ενέργεια που περιέχεται στα υλικά της μπαταρίας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω οξειδο-αναγωγικών αντιδράσεων. Ειδικότερα ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες, αποτελείται από ένα σετ χαμηλής τάσης- ισχύος κυττάρων τα οποία συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα ή και τα δύο, ανάλογα με την επιθυμητή παραγόμενη τάση για να πετύχουν τα επιθυμητά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (Brivio et al., 2016).

Το ηλεκτρικό στοιχείο στην μπαταρία, αποτελείται από δύο πλάκες, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από διάφορα μέταλλα και είναι βυθισμένες σε ένα δοχείο που περιέχει υγρό. Οι συγκεκριμένες αγώγιμες πλάκες, αποκαλούνται ηλεκτρόδια, ενώ το υγρό στο οποίο είναι βυθισμένες και το οποίο είναι ομοίως αγώγιμο ονομάζεται ηλεκτρολύτης. Τα ηλεκτρόδια αντιδρούν με τον ηλεκτρολύτη χημικά, ενώ η προκληθείσα αντίδραση περιλαμβάνει την μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο μέσω ενός διαθέσιμου στην μπαταρία εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος. Με τον τρόπο αυτό, η σύνδεση των ηλεκτροδίων στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα της μπαταρίας, προκαλεί σε αυτό διέλευση ρεύματος την λεγόμενη εκφόρτιση της ηλεκτρικής μπαταρίας. (Stanojevic et al., 2016).

Ακολούθως ή ηλεκτρική μπαταρία που έχει εκφορτιστεί, φορτίζεται εκ νέου όταν περάσει από αυτήν συνεχές ρεύμα από εξωτερική πηγή, ενώ

ταυτόχρονα αντίστροφες χημικές διεργασίες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική. (Stanojevic et al., 2016).



Εικόνα 4 Αρχή λειτουργίας συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας

Η αποθήκευση ηλεκτρικού ρεύματος με τη μέθοδο των μπαταριών είναι μία αποτελεσματική μέθοδος αποθήκευσης η οποία ωστόσο ενδείκνυται κατά κύριο λόγο για την αποθήκευση μικρών ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας δεδομένου ότι αποτελούν ένα απλουστευμένο σύστημα αποθήκευσης (Haiseng et al., 2019).

Το μειονέκτημα της χρήσης μπαταριών για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα υψηλό κόστος για την προμήθεια μπαταριών μεγάλου

μεγέθους καθώς επίσης και ότι χρειάζονται εντατική συντήρηση. (Νικολαου et al., 2020).

Σήμερα έχουν εξελιχθεί και χρησιμοποιούνται ένα σύνολο τεχνολογιών για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε μπαταρίες. Ειδικότερα οι βασικότερες τεχνολογίες είναι οι μπαταρίες εμβάπτισης μολύβδου –οξέος και οι VRLA (ρυθμιζόμενες με βαλβίδα μολύβδου –οξέος), καθώς επίσης και μερικές αλκαλικές μπαταρίες (NiCd, NMH). Παράλληλα την τελευταία δεκαετία έχουν αναπτυχθεί εξελιγμένοι τύποι μπαταριών οι οποίες είναι οι μπαταρίες ψευδαργύρου/βρωμιδίου, οι μπαταρίες λιθίου, οι μπαταρίες νατρίου-θείου (NaS) και οι μετάλλου-αέρα (Haiseng et al., 2019).

Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία από το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α, σήμερα υπάρχουν 802 συστήματα μπαταριών μεγάλης κλίμακας σε λειτουργία παγκοσμίως για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, με συνολική αποθηκευτική ισχύ 1,85 GW. Με τον τρόπο αυτό η μέθοδος των συσσωρευτών κατατάσσεται ως τεχνολογία στην τρίτη θέση μεταξύ των τεχνολογιών αποθήκευσης μετά την αντλησιοταμίευση (169 GW) και τη θερμική αποθήκευση (2,48 GW). (Haiseng et al., 2019).

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι μία κατηγορία συσσωρευτών από τις πιο γρήγορα αναπτυσσόμενες κατέχοντας ένα πολύ υψηλό μερίδιο στην αγορά συσσωρευτών, το οποίο σταδιακά αυξάνεται. Ήδη από το 2000 οι εν λόγω μπαταρίες χρησιμοποιούνται σε συσκευές, όπως κινητά τηλέφωνα και laptop κ.α. με αποτέλεσμα λόγω της εκτεταμένης χρήσης τους να ακολουθήσει σημαντική έρευνα για τον συγκεκριμένο τύπο μπαταριών (Pellow et al., 2015).

Ειδικότερα οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (Lithium ion) έχουν την πρώτη θέση ανάμεσα στις επιμέρους τεχνολογίες μπαταριών αποθήκευσης

ηλεκτρικού ρεύματος, με ποσοστό 76%, ενώ στη δεύτερη θέση κατάταξης με πολύ μεγάλη μάλιστα διαφορά από την τεχνολογία μπαταριών ιόντων λιθίου, βρίσκονται οι μπαταρίες με βάση το νάτριο (sodium based) με 9,1%. Σήμερα, το μεγαλύτερο σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με μπαταρίες στον κόσμο είναι ο σταθμός Hornsdale Power Reserve στην Αυστραλία το οποίο είναι ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας 150MW / 194MWh συνδεδεμένο με το δίκτυο που βρίσκεται σε συνδυασμό με το Hornsdale Wind Farm στην περιοχή Mid North της Νότιας Αυστραλίας (Zhuk et al., 2020).

Το σύστημα δημιουργήθηκε το 2017 από την Tesla και έως σήμερα, αποτελεί την μεγαλύτερη μπαταρία ιόντων λιθίου στον κόσμο στα με αποθηκευτική ικανότητα 129 MWh και συνολική ισχύ 100 MW. Το σύστημα έχει συμβάλει στην αποφυγή διακοπών ρεύματος λόγω υπερφόρτωσης του δικτύου (load-shedding blackouts), παρέχοντας παράλληλα σταθερότητα στο δίκτυο σε περίπτωση απότομης πτώσης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το αιολικό πάρκο ή από άλλα προβλήματα δικτύου (Zhuk et al., 2020).

3.2.4. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με θερμικά μέσα

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή θερμότητας δηλαδή η θερμική αποθήκευση, κατατάσσονται σήμερα στη δεύτερη θέση στο σύνολο των τεχνολογιών αποθήκευσης μετά την τεχνολογία

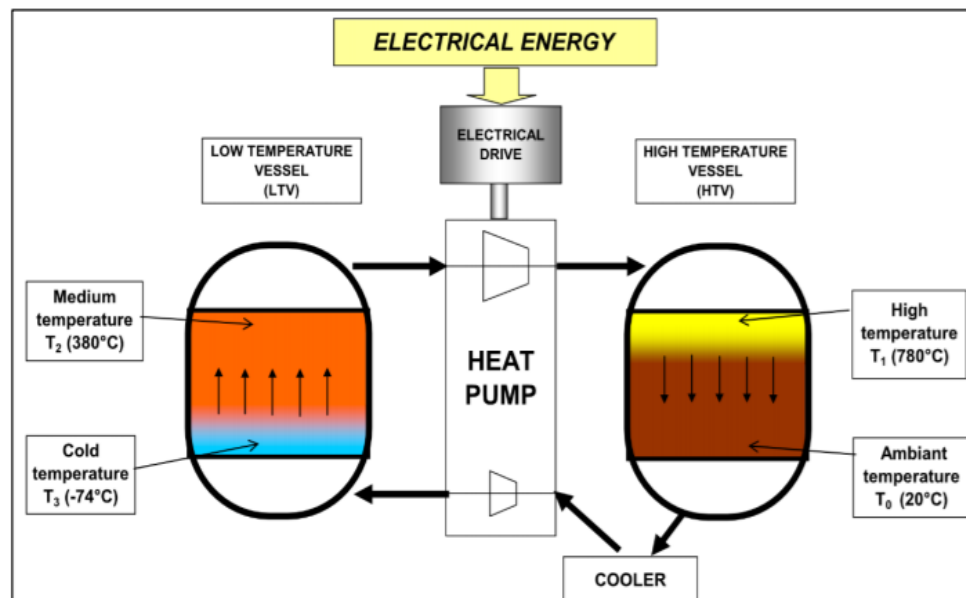
της αντλησιοταμίευσης. Είναι χαρακτηριστικό ότι τα διαθέσιμα σημεία θερμικής αποθήκευσης παγκοσμίως έχουν συνολική ισχύ 2,6 GW παγκοσμίως και ειδικότερα η τεχνολογία molten salts (τεχνολογία τηγμένων αλάτων) κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο με 84,7%. (Ugo Pelay et al., 2017).

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με θερμικά μέσα χρησιμοποιούνται εδώ και πολλά χρόνια συνδυαστικά με ηλιοθερμικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στα οποία παρέχουν την δυνατότητα να καλύπτουν την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας εκτός των ωρών υψηλού επιπέδου ηλιοφάνειας. Το σύστημα Solana το οποίο βρίσκεται στην Αριζόνα των ΗΠΑ αποτελεί σήμερα το μεγαλύτερο και πλέον εξελιγμένο ηλιοθερμικό σύστημα στον κόσμο το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνολογία των τηγμένων αλάτων - molten salts για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Το εν λόγω σύστημα, το οποίο δημιουργήθηκε το 2013, έχει συνολική ισχύ 285 MW και είναι σχεδιασμένο για την αποθήκευση ενέργειας για επτά ώρες (Dunn et al., 2019).

Στα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με θερμικά μέσα εντάσσονται κατά κύριο λόγο οι παρακάτω τρόποι αποθήκευσης (Whiffen, & Riffat 2013):

- Αποθήκευμένη ενέργεια με άντληση θερμότητας (pumped heat energy storage-PHES)

Στο μοντέλο της αποθήκευσης ενέργειας με άντληση θερμότητας (pumped heat energy storage), χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια προκειμένου να τροφοδοτήσει μια μηχανή αποθήκευσης η οποία συνδέεται με δύο θερμικές δεξαμενές. Προκειμένου να αποθηκεύσουμε ενέργεια η μηχανή αποθήκευσης λειτουργεί ως μια αντλία θερμότητας. Ειδικότερα η μηχανή αποθήκευσης, αντλεί τη θερμότητα από την ψυχρή στη θερμή δεξαμενή. Προκειμένου στη συνέχεια, να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια από την θερμική ενέργεια που αποθηκεύτηκε η μηχανή λειτουργεί ως θερμική μηχανή, δηλαδή παίρνει θερμότητα από τη θερμή δεξαμενή, κινεί το δρομέα μιας γεννήτριας για την παραγωγή ηλεκτρισμού και στη συνέχεια διοχετεύει το περίσσειμα θερμότητας που πλέον δεν χρειάζεται στην ψυχρή δεξαμενή (Gallo et al., 2016).

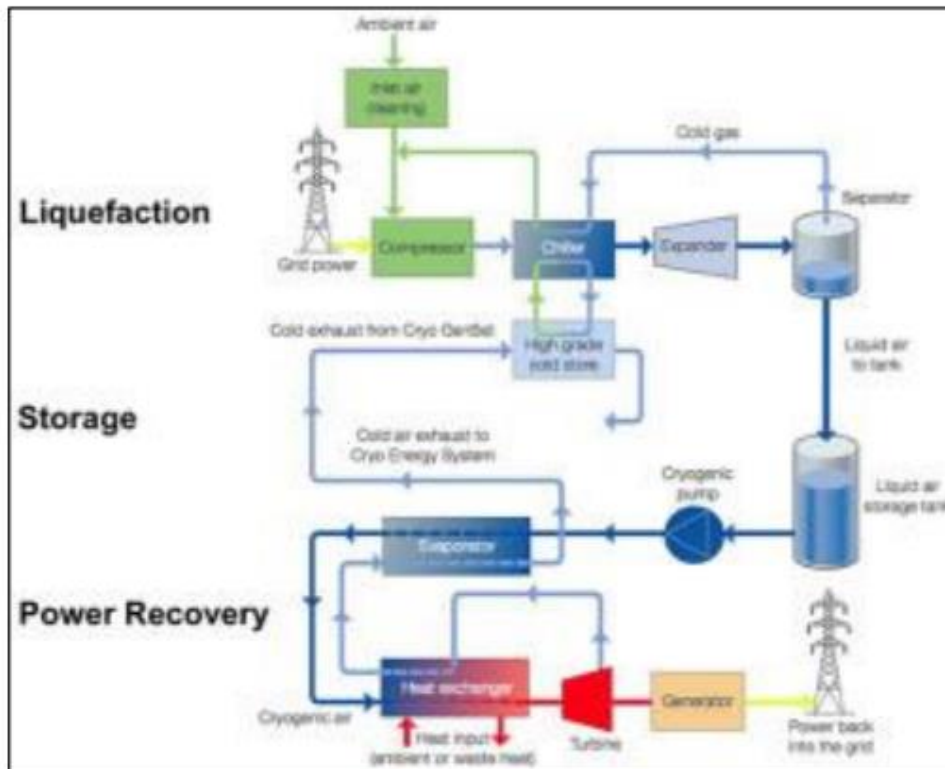


Εικόνα 5 Σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με αποθήκευση θερμότητας

Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο χαμηλός βαθμός απόδοσης που μπορεί να έχει. Παράλληλα, δεδομένης της έλλειψης εμπειρίας στην συγκεκριμένη τεχνολογία μπορεί να αποτελέσει ένα ακόμα μειονέκτημα. (Gallo et al., 2016).

- Αποθήκευση ενέργειας με υγροποίηση αέρα ή κρυογενική αποθήκευση ενέργειας (Liquid Air Energy Storage-LAES)

Στη συγκεκριμένη μέθοδο αποθήκευσης η ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου χρησιμοποιείται προκειμένου να ψυχθεί ο αέρας, μέχρις ότου υγροποιηθεί και στη συνέχεια αποθηκεύεται σε μεγάλες δεξαμενές. Ακολούθως αν προκύψει ανάγκη για παραγωγή ενέργειας, ο ήδη υγροποιημένος αέρας επανέρχεται ξανά στην προτέρα αέρια μορφή του μέσω της χρήσης θέρμανσης και ακολούθως χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση ενός στροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μιας γεννήτριας.



Εικόνα 6 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με υγροποίηση αέρα

Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με υγροποίηση αέρα διαθέτουν σημαντικά προηγμένη πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας, της τάξεως των 100 – 200 kWh/Kg υγροποιημένου αέρα. Το βασικότερο πλεονέκτημα του συστήματος είναι ότι για την αναθέρμανση και την αεριοποίηση του υγροποιημένου αέρα χρησιμοποιείται η θερμότητα από υπάρχουσες βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή/και από εγκαταστάσεις φυσικού αερίου (Tafone et al., 2017).

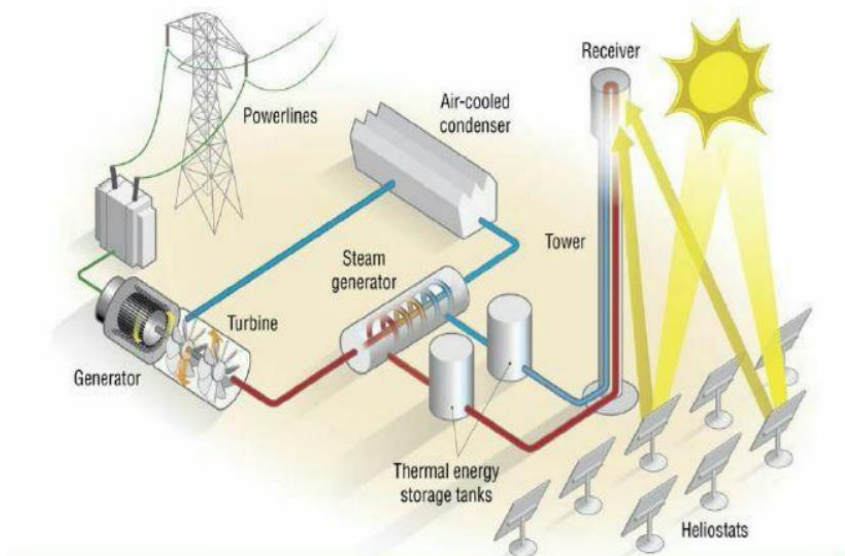
Επίσης δεν υπάρχει το μειονέκτημα της ύπαρξης τοπολογικών περιορισμών για την εγκατάσταση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας με

υγροποίηση αέρα κι επίσης ο χρησιμοποιούμενος στη μέθοδο αυτή εξοπλισμός είναι τεχνολογικά προηγμένος και διαθέτει ικανοποιητική διάρκεια ζωής. Θα πρέπει πάντως να επισημανθεί σήμερα τα σχετικά συστήματα αποθήκευσης με υγροποιημένο αέρα βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό επίπεδο και δεν χρησιμοποιούνται εκτενώς δεδομένης της σημαντικά χαμηλής απόδοσης των πρωτότυπων ερευνητικών συσκευών στις οποίες διεξάγονται τα πειράματα (Vandor, 2011).

- Αποθήκευση ενέργειας από συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (concentrated solar power)

Στα συστήματα συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται προκειμένου να θερμάνει κάποιο υγρό, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε αέριο και χρησιμοποιείται για την κίνηση μιας θερμικής μηχανής και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Romero et al., 2000).

Η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται μέσω κάποιων κάτοπτρων και ζεσταίνει το υγρό μέσο. Ειδικότερα χρησιμοποιούνται κάτοπτρα τα οποία βρίσκονται σε κίνηση, ακολουθώντας την κίνηση του Ήλιου και εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν δέκτη, τον λεγόμενο θερμικό δέκτη, όπου αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες. Η συγκεντρωμένη στον δέκτη θερμότητα χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την παραγωγή ατμού και ακολούθως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Buck et al., 2012).



Εικόνα 7 Αποθήκευση ενέργειας από συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (concentrated solar power)

Οι βασικές σήμερα τεχνολογίες συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας είναι ειδικότερα α) οι Παραβολικοί Καθρέπτες οι οποίοι εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα σωλήνα θερμαίνοντας κάποιο υγρό που περνά από αυτόν τον σωλήνα και β) οι Ηλιοστάτες, που είναι καθρέπτες που εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα κεντρικό δέκτη. Θα πρέπει πάντως να επισημανθεί ότι καθώς οι ηλιοθερμικοί σταθμοί στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας από συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (concentrated solar power) λειτουργούν μέσα στην ημέρα όταν το επίπεδο της ηλιοφάνειας είναι ικανοποιητικό, το γεγονός αυτό, καθιστά αναγκαία την εγκατάσταση κάποιου συστήματος αποθήκευσης

της θερμικής ενέργειας που αυτοί παράγουν για να χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στην περίπτωση αυτή, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι άμεση, αλλά υφίσταται αποθήκευση θερμικής ηλιακής ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού (Bockamp et al., 2003).

Σήμερα η τεχνολογία της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας (concentrated solar power) είναι αρκετά ώριμη καθώς οι σχετικοί σταθμοί που βρίσκονται παγκοσμίως σε λειτουργία ξεπερνούν τους 150. Είναι μάλιστα χαρακτηριστικό ότι περίπου οι μισοί εξ'αυτών, εφαρμόζουν σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Ωστόσο, οι χωρητικότητες αποθήκευσης των σταθμών αυτών είναι ακόμα μικρές επιπέδου περίπου μιας ώρας. Ωστόσο, μελλοντικά προβλέπεται ότι θα μπορούν να τροφοδοτήσουν ένα σύστημα μέσω της αποθηκευμένης ενέργειάς τους για έως και 5 ώρες. Έτσι οι εν λόγω σταθμοί, θα μπορούν να δώσουν στο σύστημα εκτός από ηλεκτρική ενέργεια κάθε φορά που χρειάζεται και άλλες υπηρεσίες όπως για παράδειγμα η σταθερότητα του δικτύου, η ρύθμιση τάσης και συχνότητας κλπ. (Keck et al., 2017).

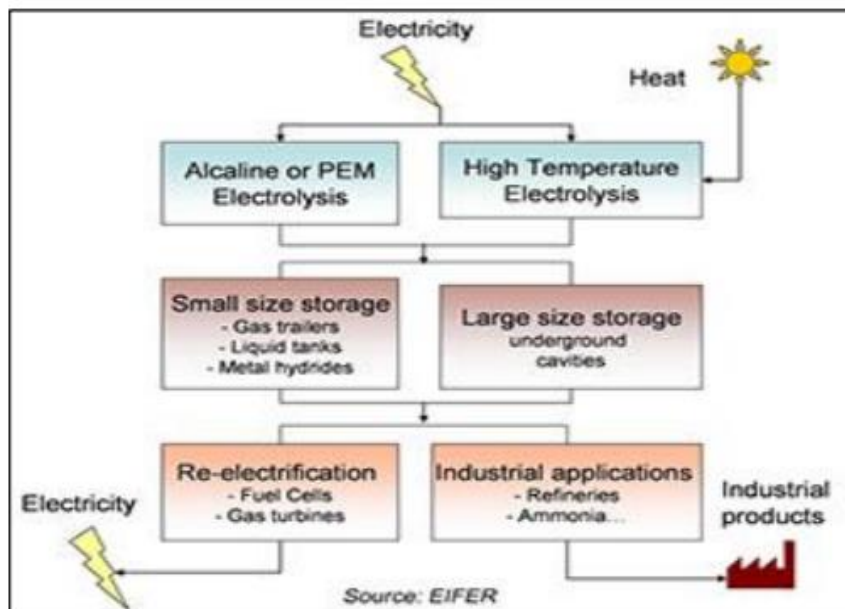
3.2.5. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με χημικά μέσα (μέσω υδρογόνου H₂ και συνθετικού φυσικού αερίου SNG)

Στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με χημικά μέσα εντάσσονται κατά κύριο λόγο η αποθήκευση μέσω υδρογόνου και μέσω συνθετικού φυσικού αερίου. Και στις δυο περιπτώσεις χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια για παραγωγή υδρογόνου με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης νερού η οποία είναι η διαδικασία αποσύνθεσης ενός μορίου νερού υπό την επίδραση ενός

ηλεκτρικού ρεύματος σε υδρογόνο και οξυγόνο, και διαφορετικής επόμενης χρήσης του κάθε φορά (Dave 2015).

Αν και η συγκεκριμένη μετατροπή έχει χαμηλή απόδοση τα μέσα αποθήκευσης που η απόδοση αυτής της μετατροπής είναι πολύ χαμηλή, αυτά τα μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με χημικά μέσα (μέσω υδρογόνου H₂ και συνθετικού φυσικού αερίου SNG) επιτρέπουν την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε πολύ μεγάλο βαθμό, συγκριτικά με άλλες διαθέσιμες μεθόδους αποθήκευσης. Παράλληλα και η αποθηκευμένη ενέργεια των εν λόγω μέσων αποθήκευσης είναι σημαντικά υψηλότερη από τις υπόλοιπες μεθόδους αποθήκευσης (Larcher, 2015).

Σε μια τυπική μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου, υπάρχει ένας ηλεκτρολύτης, μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου, κάποιο μέσο καύσης και μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου. Το μέσο καύσης λειτουργεί ως πηγή θερμότητας. Ο ηλεκτρολύτης με την παρεμβολή της θερμότητας προβαίνει σε διαχωρισμό του νερού μέσω της ηλεκτρόλυσης, σε υδρογόνο και οξυγόνο. Στη συνέχεια το υδρογόνο αποθηκεύεται στη δεξαμενή αποθήκευσης υπό πίεση ενώ το οξυγόνο φεύγει στην ατμόσφαιρα. Για την αντίθετη διαδικασία, δηλαδή για την φάση παραγωγής της ενέργειας, υλοποιείται η ακριβώς αντίστροφη διαδικασία από αυτή της ηλεκτρόλυσης. Ειδικότερα στη φάση αυτή, το υδρογόνο αντιδρά με το οξυγόνο μέσα σε μια κυψέλη καυσίμου ή μέσα σε θερμικές μηχανές και παράγεται ηλεκτρισμός και θερμότητα. Η παραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται προκειμένου να θέσει σε κίνηση έναν στρόβιλο και ακολούθως μέσα από την σχετική διαδικασία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. (Dave 2015).



Εικόνα 8 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με υδρογόνο

Το υδρογόνο αποθηκεύεται είτε σε υγρή μορφή σε περιβάλλον ιδιαίτερος χαμηλής θερμοκρασίας, είτε σε αέρια σε περιβάλλον ιδιαίτερος υψηλής πίεσης. Πάντως σε εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας, το υδρογόνο αποθηκεύεται κυρίως σε υγρή μορφή, ενώ αντίθετα σε πιο μεγάλες εφαρμογές το υδρογόνο αποθηκεύεται σε αέρια μορφή. Συνήθως το υδρογόνο αποθηκεύεται σε αέρια μορφή συνήθως σε υπόγειους φυσικούς χώρους (πχ σπηλιές, εγκαταλελειμμένα κοιτάσματα πετρελαίου κ.λπ.). Συνεπώς, στην περίπτωση μεγάλων εφαρμογών ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι πρέπει

να επιλεγεί η τοποθεσία εγκατάστασης η οποία να πληροί τις προϋποθέσεις καταλληλότητας (Sallane et al., 2016).

Αντίστοιχα όσον αφορά στο συνθετικό φυσικό αέριο (SNG), το οποίο είναι δυνατόν να παράγεται τόσο από ορυκτές όσο και από ανανεώσιμες πηγές, η διαδικασία αποθήκευσης περιλαμβάνει ένα επιπλέον βήμα το οποίο ακολουθεί μετά το στάδιο της ηλεκτρόλυσης του νερού που περιγράφηκε παραπάνω για την περίπτωση του υδρογόνου. Ειδικότερα μετά την παραγωγή υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση, το υδρογόνο αντιδρά με διοξείδιο του άνθρακα και παράγεται μεθάνιο ή συνθετικό φυσικό αέριο SNG. Όπως και το υδρογόνο έτσι και το μεθάνιο ή το συνθετικό φυσικό αέριο SNG μπορούν να αποθηκευτούν με αντίστοιχους τρόπους (Yu et al., 2015).

Πάντως η παραγωγή και αποθήκευση συνθετικού φυσικού αερίου (SNG), έχει μεγαλύτερη απόδοση σε τοποθεσίες όπου υπάρχει άφθονη παραγωγή CO₂. (όπως για παράδειγμα σε βιομηχανικές ή σε χώρους επεξεργασίας αποβλήτων). Το πλεονέκτημα του συνθετικού φυσικού αερίου (SNG), είναι ότι διαθέτει μεγαλύτερη ενέργεια συγκριτικά με το υδρογόνο. (Sallane et al., 2016).

Ωστόσο καθώς το συνθετικό φυσικό αέριο χρειάζεται επιπλέον διεργασίες προκειμένου να παραχθεί και να αποθηκευτεί, η χρήση του καθίσταται εξ'αυτού του γεγονότος λιγότερο αποδοτική, δεδομένου ότι υφίστανται σημαντικές απώλειες ενέργειας στο στάδιο που μεσολαβεί από την δημιουργία του μέχρι την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. (Sallane et al., 2016).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αποθήκευση ενέργειας είναι η δέσμευση ενέργειας που παράγεται ταυτόχρονα για χρήση σε μεταγενέστερο χρόνο για τη μείωση των ανισοροπιών μεταξύ της ζήτησης ενέργειας και της παραγωγής ενέργειας. Η αποθήκευση ενέργειας δικτύου είναι μια συλλογή μεθόδων που

χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα εντός ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Οι διαθέσιμες σήμερα τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας έχουν εξελιχθεί και ωριμάσει σε σημαντικό επίπεδο, ώστε να διευκολύνεται η ένταξή τους στο ηλεκτρικό σύστημα και η παροχή με τη χρήση των κατάλληλων και αναγκαίων υπηρεσιών. Με τις μεθόδους αυτές η ενέργεια μπορεί σήμερα να αποθηκεύεται, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιείται μεταγενέστερα. Επιπλέον η εφαρμογή των μεθόδων αποθήκευσης, μπορεί να παρέχει πρόσθετες υπηρεσίες υποστήριξης δικτύου.

Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί σήμερα ένα πλαίσιο που σχετίζεται εκτός από τα προφανή οφέλη της αποθήκευσης και χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας και στην προστασία του περιβάλλοντος. Το 2015, 195 κράτη τα οποία ευθύνονται για το 99,75 % των παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου υπέγραψαν τη συμφωνία του Παρισιού και δεσμεύθηκαν να διατηρήσουν την άνοδο της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη τον τρέχοντα αιώνα σε επίπεδο σαφώς χαμηλότερο των 2°C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα, με στόχο τον περιορισμό της σε 1,5°C. Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο για την επίτευξη των εν λόγω στόχων. Είναι χαρακτηριστικό ότι προκειμένου να επιτύχει τους στόχους της για το κλίμα για το 2050, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εκτίμησε ότι η ΕΕ ενδέχεται να χρειαστεί να αυξήσει την αποθήκευση ενέργειας έως και κατά έξι φορές.²

Ο κόσμος σήμερα παράγει και χρησιμοποιεί περισσότερη ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια από ποτέ, αλλά σε πολλές περιπτώσεις η ενέργεια αυτή, παράγεται από διαλείπουσες - εξαρτώμενες από τον καιρό - πηγές όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια. Ενώ όμως αυτές οι πηγές ενέργειας είναι

² Ευρωπαϊκή Επιτροπή, COM(2018) 773 final της 28.11.2018

επιτακτικές για ένα μέλλον που είναι προσηλωμένο στην προστασία του περιβάλλοντος και στην μη εξάντληση των φυσικών πηγών ενέργειας, δεν μπορούν να παράγουν ενέργεια συνεχώς και αυτό μπορεί να προκαλέσει κενά στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως προέκυψε από την παραπάνω ανάλυση στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, μια πιθανή λύση για όλες αυτές τις μελλοντικές προκλήσεις είναι η αποθήκευση της ενέργειας. Εάν μπορούμε να αποθηκεύσουμε ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια από διαλείπουσες πηγές όταν είναι σε θέση να παράγουν, τότε η ενέργεια αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε στιγμές που δεν είναι διαθέσιμη.

Ωστόσο, το πρόβλημα είναι η εξεύρεση τεχνολογίας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που να είναι αποτελεσματική σε αρκετά μεγάλη κλίμακα για να τροφοδοτήσει μια πόλη. Ωστόσο αυτή η τεχνολογία δεν υπάρχει ακόμα. Όπως αναλύθηκε παραπάνω, ο αγώνας για την ανάπτυξη της βρίσκεται σε εξέλιξη και αρκετές εταιρείες εργάζονται για την οικοδόμηση ολοένα μεγαλύτερων, πιο αποτελεσματικών μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αναδυόμενες σήμερα τεχνολογίες αποθήκευσης (και ορισμένες ήδη κατεστημένες) έχουν διαμορφώσει και αναμένεται να διαμορφώσουν περαιτέρω το τοπίο της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για το μέλλον. Ένα μέλλον που προβλέπεται γεμάτο προκλήσεις και παράλληλα γεμάτο νέες καινοτόμες ιδέες για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Al-Badi Abdullah, AlMubarak Imtenan Growing energy demand in GCC countries Arab J. Basic Appl. Sci., 26 (1) (2019), pp. 234-276

Almulla Y. Gulf Cooperation Council (GCC) Countries 2040 Energy Scenario for Electricity Generation and Water Desalination. Department of Energy Technology, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden (2014)

- Arent, D. J. et al. in *Climate Change (2014): Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change* (eds. Field, C. B. et al.) 237-265 (Cambridge University Press, 2014).
- Ashok, S. Optimised model for community-based hybrid energy system. *Renew. Energy* 2007, 32, 1155–1164
- Auffhammer, M. & Mansur, E. T. Measuring climatic impacts on energy consumption: A review of the empirical literature. *Energy Econ.* 46, 522–530 (2014).
- Bilal, B.O.; Sambou, V.; Ndiaye, P.; Kébé, C.; Ndong, M. Optimal design of a hybrid solar–wind-battery system using the minimization of the annualized cost system and the minimization of the loss of power supply probability (LPSP). *Renew. Energy* 2010, 35, 2388–2390
- Blakers A, Stocks M, Lu B, Cheng C and Stocks R 2019 Pathway to 100% renewable electricity *IEEE J. Photovoltaics* 9 1828–33
- Bockamp, S., Griestop, T., Fruth, M., Ewert, M., Lerchenmüller, H., Mertins, M., Morin, G., Häberle, A., Dersch, J. (2003) *Solar Thermal Power Generation (Fresnel), PowerGe*
- Brivio C. et al. (2016), Battery energy storage system for primary control reserve and energy arbitrage, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 6, p. 152 – 165
- Buck, R., Bräuning, T., Denk, T., Pfänder, M., Schwarzböezl, P., Tellez, F. (2012) ‘Solar-hybrid gas turbine-based power tower systems (REFOS)’, *J. Solar Energy Engineering*, 124, 2–9
- Canales, F.A.; Beluco, A. Modeling pumped hydro storage with the micropower optimization model (HOMER). *J. Renew. Sustain. Energy* 2014, 6, 43131.

- Carravetta, S.A.; Ramos, H.M.; Houreh, S.D. *Pumps as Turbines, Fundamentals and Applications*; Springer International Publishing: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018.
- Chen H., T. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li and Y. Ding, (2019) "Progress in electrical energy storage system: A critical review", *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, pp. 291-312,
- Considine, T. J. (2017) "The impacts of weather variations on energy demand and carbon emissions." *Resour. Energy Econ.* 22, 295–314
- Dave Levitan (2015), "Can methane act as a storage medium for renewable energy?", *IEEE Spectrum*, Online: <https://spectrum.ieee.org/energywise/energy/renewables/can-methane-act-as-a-storage-medium-for-renewable-energy>
- Dunn Bruce et al. (2019), "Electrical Energy Storage for the Grid: A battery of choices," *Science Magazine*, vol. 334, Issue 6058, pp. 928 – 935
- Edwards D. John, (2019), *Twenty First Century Energy: Transition from Fossil Fuels to Renewable, non-Polluting Energy Sources* (Summit on US Energy Policy, Washington DC, 2019).
- Gallo AB, JR Simões-Moreira, H Costa, MM Santos, E Moutinho dos Santos "Energy storage in the energy transition context: A technology review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65 (2016), pp. 800-822
- Haiseng Chen et al. (2019), "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, Issue 3, p. 291 – 312

- IEA (2018) The Future of Cooling - Opportunities for energy-efficient air conditioning. IEA, Paris <https://www.iea.org/futureofcooling/> (International Energy Agency, 2018).
- IEA (2019a), Annual change in global primary energy demand, 2011-2018, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-change-in-global-primary-energy-demand-2011-2018>
- IEA (2019b), Global Energy & CO2 Status Report 2019 IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>
- IEA (2020), Global Energy Review 2019, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019>
- IRENA H. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets To 2030 International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi (2017)
- Katsaprakakis, D.A.; Christakis, D.G.; Stefanakis, I.; Spanos, P.; Stefanakis, N. Technical details regarding the design, the construction and the operation of seawater pumped storage systems. *Energy* 2013, 55, 619–630.
- Keck, T., Schiel, W., Reinalter, W., Heller, P. (2017) ‘EuroDish – an innovative dish/stirling system’, Proceedings of 11th SolarPACES International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies. Sept. 4–6, Zurich.
- Koohi-Fayegh S and Rosen M A 2020 A review of energy storage types, applications and recent developments *J. Storage Mater.* 27 101047
- Larcher D. and J. M. Tarascon , Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage, *Nat. Chem.*, 2015

- Letcher T., *Storing energy: with special reference to renewable energy sources*. Oxford: Elsevier, 2016.
- Levesque, A. et al. (2018) How much energy will buildings consume in 2100? A global perspective within a scenario framework. *Energy* 148, 514–527
- Luo, W.; Jiang, J.; Liu, H. Frequency-adaptive modified comb-filter-based phase-locked loop for a doubly-fed adjustable-speed pumped-storage hydropower plant under distorted grid conditions. *Energies* 2017, 10, 737.
- Mathew, Loveless, 2012. *Energy Storage: The Key To a Reliable, Clean Electricity Supply. What Is the Potential Impact?* Energy.Gov., Retrieved on 3/2/2021 from <https://www.energy.gov/articles/energy-storage-key-reliableclean-electricity-supply>
- Molina M. G, (2010), *Dynamic modelling and control design of advanced energy storage for power systems applications*, Dynamic Modelling, Intech,
- Nadeem F, Hussain S M S, Tiwari P K, Goswami A K and Ustun T S 2019 Comparative review of energy storage systems, their roles, and impacts on future power systems *IEEE Access* 7 4555–85
- Nema, P.; Nema, R.; Rangnekar, S. A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2009, 13, 2096–2103.
- Nikolaou, T.; Stavrakakis, G.; Tsamoudalis, K. Modeling and optimal dimensioning of a pumped- 2 hydro energy storage system for the exploitation of 3 the rejected wind energy in the non—Interconnected 4 electrical power system of the Crete island, Greece. *Energies* 2020, 13, 2705

- Paska, J.; Biczel, P.; Kłos, M. Hybrid power systems—An effective way of utilising primary energy sources. *Renew. Energy* 2009, 34, 2414–2421.
- Pellow et al. (2015), Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis, *Energy Environ. Sci.* 2015, p. 1938 – 1952
- Ramli, M.A.M.; Bouchekara, H.R.E.H.; Alghamdi, A.S. Optimal sizing of PV/wind/diesel hybrid microgrid system using multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm. *Renew. Energy* 2018, 121, 400–411.
- Revankar, Shripad T., 2019. Chemical Energy Storage in the Book “Storage and Hybridization of Nuclear Energy: Techno-Economic Integration of Renewable and Nuclear Energy”. *Science Direct*, pp. 177–22
- Ritchie Hannah, Roser Max Energy production and changing energy sources (2019) date assessed 1/2/2021 from <https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources>
- Romero, M., Marcos, M.J., Osuna, R., Fernández, V. (2000) ‘Design and implementation of a 10 MW solar tower power plant based on volumetric air technology in Seville (Spain)’, *Proceedings of the Solar 2000, Solar Powers Life–Share the Energy*, June 17–22, Madison, Wisconsin.
- Salanne M., B. Rotenberg , K. Naoi , K. Kaneko , P. L. Taberna , C. P. Grey , B. Dunn and P. Simon , Efficient storage mechanisms for building better supercapacitors, *Nat. Energy*, 2016
- Schaeffer, R. et al. Energy sector vulnerability to climate change: a review. *Energy* 38, 1–12 (2018).
- Schmidt, J.; Kemmetmüller, W.; Kugi, A. Modeling and static optimization of a variable speed pumped storage power plant. *Renew. Energy* 2017, 111, 38–51.

- Shafiqur Rehman et al. (2019), Pumped hydro energy storage system: A technological Review, *Renewable and Sustainable Reviews/Elsevier*, vol. 44, pp. 586-598
- Smil, V. (2020). *Energy and civilization: A history*. The MIT Press
- Stanojevic J. et al. (2016), Influence on battery energy storage system generation adequacy and system sustainability in hybrid micro grids, 4th International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA)
- Stocks M, Stocks R, Bin L, Cheng C and Blakers A 2021 Global atlas of closed-loop pumped hydro energy storage *Joule* 5 270–84
- Tafone, A., Romagnoli, A., Li, Y., Borri, E., Comodi, G., 2017. Techno-economic analysis of a liquid air energy storage (LAES) for cooling application in hot climates. *Energy Procedia* 105, 4450–4457
- Ugo Pelay et al. (2017), Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants, *Renewable and Suitable Energy Reviews*, vol. 79, p. 82 – 100
- Van Meerwijk, A.J.H.; Benders, R.M.J.; Davila-Martinez, A.; Laugs, G.A.H. Swiss pumped hydro storage potential for Germany's electricity system under high penetration of intermittent renewable energy. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 2016, 4, 542–553.
- Vandor, D., 2011. *System and Method For Liquid Air production, Power Storage and Power Release*. Expansion Energy, LLC, Tarrytown, NY (US)
- Whiffen, T.R. and Riffat, S.B. (2013) A Review of PCM Technology for Thermal Energy Storage in the Built Environment: Part II. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 8, 59-164.

Wilbanks, T. & Fernandez, S. (2013) *Climate Change and Infrastructure, Urban Systems, and Vulnerabilities: Technical Report for the U.S. Department of Energy in Support of the National Climate Assessment*. Washington, DC: Island Press

Yu Z., L. Tetard , L. Zhai and J. Thomas , Supercapacitor electrode materials: nanostructures from 0 to 3 dimensions, *Energy Environ. Sci.*, 2015

Zhuk A. et al. (2020), Hybrid energy storage systems based on supercapacitors and Liion batteries, *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 44, Issue 4, pp. 543 – 550