



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Μελέτη των τεχνολογιών  
αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και  
εκτίμηση των μελλοντικών εξελίξεων**

**Γενετζάκης Γιώργος**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος (Επιβλέπων)**

**Αναπλ. Καθηγητής Κανέλλος Φώτιος**

**Αναπλ. Καθηγητής Κουτρούλης Ευύχιος**

**Χανιά Σεπτέμβριος 2020**

# Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2019 - 2020 και κατά την ολοκλήρωση της, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο του οποίου η συμβολή ήταν πολύτιμη και απαραίτητη. Ακόμη, είμαι ευγνώμων για την ευκαιρία που μου δόθηκε να ασχοληθώ με ένα τόσο επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα το οποίο αφορά άμεσα το νησί της Κρήτης.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την μητέρα μου η οποία με στηρίζει σε όλες τις καταστάσεις της ζωής μου και δίχως αυτή δεν θα είχα φτάσει ως εδώ.

# Περίληψη

Ο σύγχρονος άνθρωπος καταναλώνει όλο και περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια σε σχέση με πιο παλιά και συναρτήσει με τον αυξανόμενο παγκόσμιο πληθυσμό, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα είναι μεγάλο. Τα συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μολύνουν αρκετά το περιβάλλον. Αυτό το πρόβλημα ήρθαν να λύσουν οι μονάδες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) οι οποίες κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν μολύνουν το περιβάλλον. Οι ΑΠΕ όμως δεν είναι και τόσο αποδοτικές από μόνες τους και πρέπει να συνδυαστούν με κάποιους άλλους τρόπους όπως η διασύνδεση των χωρών σε ένα ενιαίο δίκτυο με σκοπό την μεγαλύτερη διείσδυση τους καθώς και την ασφάλεια που προσφέρει ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα ασχοληθούμε με το μη διασυνδεδεμένο σύστημα της Κρήτης και την αξιοποίηση του δυναμικού της σε ΑΠΕ, με σκοπό την μείωση του κόστους παραγωγής και της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα. Προσομοιώνοντας την διασύνδεση του συστήματος της Κρήτης με αυτό της Ηπειρωτικής Ελλάδος, μπορούμε μέσω του περιβάλλοντος της MATLAB να συμπεράνουμε τα οικονομικά οφέλη που μπορεί να έχει αυτή η διασύνδεση. Για τα σενάρια χρησιμοποιήθηκε η πλήρης διείσδυση των ήδη εγκατεστημένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Κρήτη όπως και η AC ροή ισχύος, DC ροή ισχύος αλλά και ο συνδυασμός τους.

Η διπλωματική αυτή στοχεύει στην διασφάλιση της τροφοδοσίας του νησιού σε ηλεκτρική ενέργεια, στην βελτίωση του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής των κατοίκων, στην σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας καθώς και στην περαιτέρω εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πόρων του νησιού.

# Abstract

The contemporary individual consumes more and more electrical power than in the past and as the world population grows, the ecological impact is great. Conventional power plant units pollute the environment considerably. This problem was solved by the Renewable Energy Source (RES) units which during the production of electricity they do not pollute the environment. Notwithstanding, RES are not so efficient on their own and must be combined with some other ways such as the interconnection of countries in a single network in order to increase their penetration and the security offered by an interconnected network.

The context of this thesis will be the unconnected system of Crete and the utilization of its potential in renewable energy sources in order to reduce production costs and carbon dioxide emissions. By simulating the interconnection of Crete with the mainland of Greece by using MATLAB, we will conclude with the economic benefits that this interconnection will provide. For the cases, the 100% penetration of the already installed renewable energy sources in Crete was used, as well as the AC power flow, DC power flow and their combination.

This thesis aims to ensure the supply the energy demands of the island of Crete, the improvement of the environment and the quality of life of the inhabitants, the significant reduction of energy production cost and also the further exploitation of its renewable resources.

# Περιεχόμενα

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>10</b>
1.1 Εισαγωγή.....	10
1.2 Στόχος της παρούσας εργασίας.....	10
1.3 Διάρθρωση της εργασίας .....	11
<b>2. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....</b>	<b>13</b>
2.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	13
2.2 Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί.....	13
2.3 Συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	14
2.3.1 Υδροηλεκτρικά συστήματα .....	14
2.3.2 Αιολικά συστήματα.....	15
2.3.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	17
2.3.4 Ηλιοθερμικά συστήματα ενέργειας (CSP).....	18
2.3.5 Ωκεάνια συστήματα.....	18
2.3.6 Γεωθερμικά συστήματα ενέργειας .....	20
2.4 Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	21
2.5 Νομοθετικό πλαίσιο ΑΠΕ στην Ελλάδα.....	25
<b>3. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....</b>	<b>27</b>
3.1 Διοξείδιο του άνθρακα.....	27
3.1.1 Επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα .....	27
3.1.2 Επιπτώσεις στην θάλασσα.....	29
3.1.3 Επιπτώσεις στην ξηρά .....	30
3.2 Όξινη βροχή.....	31
<b>4. ΑΝΑΓΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....</b>	<b>32</b>
4.1 Εισαγωγή.....	32
4.2 Διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης.....	34
4.3 Διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης.....	35
4.4 Μορφές αποθήκευσης ενέργειας .....	35
<b>5. ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....</b>	<b>37</b>
5.1 Υδροηλεκτρικά συστήματα αντλησιοταμίευσης .....	37
5.1.1 Συνδυασμός με άλλες ΑΠΕ .....	38

5.1.2	Υδροστρόβιλοι .....	38
5.1.3	Μειονεκτήματα .....	42
5.2	Συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα .....	42
5.2.1	Τρόπος λειτουργίας.....	43
5.2.2	Μειονεκτήματα .....	43
5.3	Συστήματα αποθήκευσης με σφόνδυλο .....	43
5.3.1	Τρόπος λειτουργίας.....	44
5.4	Συστήματα αποθήκευσης με μπαταρίες.....	45
5.4.1	Διάφορες μορφές μπαταριών .....	45
5.5	Συστήματα αποθήκευσης με υπερπυκνωτές και υπεραγωγίμα πηνία .....	46
5.6	Συστήματα αποθήκευσης με κυψέλες καυσίμου .....	46
<b>6.</b>	<b>ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>48</b>
6.1	Εισαγωγή .....	48
6.2	HVAC συστήματα μεταφοράς .....	49
6.3	HVDC συστήματα μεταφοράς .....	49
6.3.1	Πλεονεκτήματα.....	50
6.3.2	Τύποι HVDC καλωδίων.....	51
6.4	Διασύνδεση ηλεκτρικής ενέργειας Ισραήλ – Κύπρου – Ελλάδας EuroAsia .....	54
6.4.1	Τεχνική ανάλυση.....	55
6.4.2	Οφέλη .....	57
6.5	Διασύνδεση της Κρήτης με την υπόλοιπη Ελλάδα .....	58
6.5.1	Φάση 1 .....	59
6.5.2	Φάση 2 .....	59
<b>7.</b>	<b>ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΩΝ .....</b>	<b>61</b>
7.1	Εισαγωγή .....	61
7.2	Το Σενάριο BAU.....	61
7.2.1	Απορριπτόμενη ενέργεια.....	62
7.2.2	Σκοπός .....	62
7.2.3	Έτος αναφοράς.....	62
7.2.4	Μέση τιμή φορτίου .....	63
7.2.5	Η παράμετρος R .....	63
7.2.6	Ο δείκτης Fct.....	64
7.2.7	Οικονομική ανάλυση BAU .....	65
7.2.8	Κόστος παραγωγής ενέργειας έτους 2025 .....	66
7.3	Σενάριο Green Crete.....	67

7.3.1	Απώλειες λόγω διασύνδεσης .....	67
7.3.2	Οικονομικά αποτελέσματα .....	68
7.4	Συμπεράσματα.....	70
7.5	Μελλοντικές προεκτάσεις – βελτιώσεις. ....	71
<b>8.</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>72</b>

## Κατάλογος Συμβόλων

$E$	ενέργεια ( $kWh$ ) ή ( $Joule$ )
$\rho$	πυκνότητα νερού ( $kg / m^3$ )
$A$	επιφάνεια ( $m^2$ )
$g$	επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m / s^2$ )
$\Delta h$	επιτρεπόμενη μεταβολή ύψους νερού ( $m$ )
$H$	υψομετρική διαφορά δύο δεξαμενών ( $m$ )
$J$	ροπή αδράνειας συνολικής μάζας κινητού μέρους ( $kg \cdot m^2$ )
$\omega$	γωνιακή ταχύτητα ( $rad / sec$ )
$\overline{Ld}$	μέση καταναλισκόμενη ενέργεια ( $Watt$ )
$Ld_i$	φορτίο ημέρας $i$ ( $kWh$ )
$d$	συνολικές ώρες ( $h$ )
$N_{wind}$	ισχύς αιολικών ( $MW$ )
$C_E$	κόστος ενέργειας (€)
$E_{W\_loss}$	απορριπτόμενη ενέργεια από αιολικά ( $kWh$ )
$C_i$	κόστος παραγωγής ενέργειας συμβατικού σταθμού $i$ (€ / $MWh$ )
$\rho_i$	ποσοστό συμμετοχής συμβατικού σταθμού $i$
$C_{WT}$	κόστος ενέργειας αιολικών (€ / $MWh$ )
$C_{gain}$	κέρδος εξοικονόμησης (€)
$C_{renew}$	κόστος παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (€)
$C_{fossil}$	κόστος παραγωγής ενέργειας από συμβατικούς σταθμούς (€)
$C_{load\_2025}$	συνολικό κόστος φορτίου Κρήτης για το έτος 2025 (€)
$P_{l\_loss}$	απώλειες γραμμής μεταφοράς ( $Watt$ )
$P_{ces\_loss}$	απώλειες σταθμών μετατροπής ( $Watt$ )
$P_{DC\_loss}$	συνολικές απώλειες διασύνδεσης DC ( $Watt$ )
$P_{t\_loss}$	απώλειες μετασχηματιστών ( $Watt$ )
$P_{AC\_loss}$	συνολικές απώλειες διασύνδεσης AC ( $Watt$ )
$C_{load\_2025\_2}$	κόστος παραγωγής ενέργειας αποκλειστικής διασύνδεσης 2 έτους 2025 (€)



$C_{load\_2025\_1\&2}$  κόστος παραγωγής ενέργειας συνδυασμού διασυνδέσεων 1&2 έτους 2025 (€)

---

# 1.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### 1.1 Εισαγωγή

Στην σύγχρονη κοινωνία δεν μπορούμε να φανταστούμε τον εαυτό μας να μπορεί να ζήσει χωρίς ηλεκτρική ενέργεια. Η κοινωνία αναπτύσσεται διαρκώς και μαζί της, οι ανάγκες του ανθρώπου όλο και πληθαίνουν. Ανάγκες όπως το διαδίκτυο, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, ο κλιματισμός, η θέρμανση, η συντήρηση και το μαγείρεμα όπως και πολλές άλλες, χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια για την λειτουργία τους. Σε μία εποχή όπου η πολυπλοκότητα αυξάνεται, οι βασικές ανάγκες θεωρούνται δεδομένες για τους περισσότερους.

Ηλεκτρικό ρεύμα ορίζεται ως η προσανατολισμένη κίνηση ηλεκτρικών φορτίων ή φορέων ηλεκτρικού φορτίου, κατά μήκος ενός ηλεκτροφόρου αγωγού. Οι κύριοι λόγοι που χρησιμοποιούμε την ηλεκτρική ενέργεια είναι.

- Άμεση διαθεσιμότητα.
- Αποδοτική και εύκολη μεταφορά.

Ακόμη, υπάρχει ιεραρχία στις μορφές ενέργειας, δηλαδή κάποιες μορφές ενέργειας είναι πιο ποιοτικές από κάποιες άλλες σε σχέση με το έργο που μπορούμε να παράγουμε με 1 Joule ενέργειας. Η ηλεκτρική με την μηχανική είναι οι πιο αποδοτικές. Ακολουθεί η χημική και ως λιγότερο αποδοτική η θερμική, με την θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας να είναι πιο αποδοτική από αυτή της χαμηλής [2].

### 1.2 Στόχος της παρούσας εργασίας

Η Ελλάδα είναι μια χώρα η οποία αποτελείται από αρκετά κατοικήσιμα νησιά. Τα περισσότερα από αυτά διαθέτουν αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από θερμοηλεκτρικές μονάδες καθώς και από σταθμούς Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Παρόλο που ενδείκνυται η χρήση των ΑΠΕ, η χρήση τους σε τέτοια μικρά συστήματα είναι περιορισμένη και μερικές φορές αδύνατη. Από την άλλη, οι θερμοηλεκτρικές μονάδες οι οποίες βρίσκονται εγκατεστημένες

σε απομονωμένα μικρά δίκτυα έχουν υψηλά κόστη λειτουργίας, εξαιτίας των συμβατικών καυσίμων που χρησιμοποιούν, ενώ παράλληλα επιβαρύνουν το περιβάλλον.

Τα τελευταία χρόνια έχει οξυνθεί η μόλυνση του περιβάλλοντος με πληθώρα αρνητικών συνεπειών. Αποφασίστηκε γι' αυτό τον λόγο, μία παγκόσμια συμφωνία στο πλαίσιο των μελών των Ηνωμένων Εθνών, με σκοπό την μείωση των περιβαλλοντικών ρύπων. Η Ελλάδα, η οποία ανήκει σε αυτά τα μέλη, έχει θέσει μεγάλους στόχους για την λύση αυτού του προβλήματος, τους οποίους μέχρι στιγμής έχει επιτύχει. Για την περαιτέρω επίτευξη αυτών των στόχων, η Ελλάδα θα πρέπει να ακολουθήσει πρωτοποριακές στρατηγικές όσον αφορά την χρήση ΑΠΕ και να εξασφαλίσει την επιπλέον εγκατάσταση τους.

Στην παρούσα διατριβή, αναλύεται η εκμετάλλευση του δυναμικού των ΑΠΕ στα νησιά της Ελλάδος. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η χρήση ΑΠΕ σε Μη Διασυνδεδεμένα Δίκτυα (ΜΔΔ) είναι αρκετά περιορισμένη και γι' αυτό, η χρήση μεθόδων που θα το κάνει αυτό εφικτό είναι απαραίτητη. Λόγω του Μεσογειακού κλίματος οι συνθήκες για εγκατάσταση αιολικών και φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ιδανικές αλλά λόγω του χαμηλού φορτίου και της μικρής διείσδυσης ΑΠΕ στο δίκτυο, η ενέργεια αυτή απορρίπτεται. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να προσεγγιστεί αυτό το πρόβλημα όπως η δημιουργία μονάδων αποθήκευσης με σκοπό την χρήση της σε περιπτώσεις αιχμής [4].

Επειδή τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας δεν παρουσιάζουν ακόμη μεγάλο βαθμό απόδοσης, σύμφωνα με την βιβλιογραφία [3], η προσέγγιση που προτείνεται για την λύση αυτού το προβλήματος στην παρούσα εργασία, είναι η χρήση υποβρύχιων αγωγών με σκοπό την διασύνδεση του ΜΔΔ της Κρήτης με αυτό της ηπειρωτικής Ελλάδας. Με αφορμή το υπό κατασκευή έργο EuroAsia [22], αναλύονται διάφορα σενάρια. Τα σενάρια αυτά υπολογίζουν τα οικονομικά οφέλη των διασυνδέσεων με σκοπό η παρατήρηση της βιωσιμότητας του συγκεκριμένου έργου όσον αφορά την Ελλάδα. Τα οικονομικά αποτελέσματα υπολογίστηκαν με την χρήση αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον MATLAB με παραμέτρους τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου έργου. Ο αλγόριθμος που προτείνεται, μπορεί να παραμετροποιηθεί σε περίπτωση αλλαγής του εξοπλισμού, αλλαγή στο μήκος των αγωγών καθώς και στο ποσοστό απωλειών των επιμέρους εξαρτημάτων. Επιπλέον, αν θεωρηθεί ανταγωνιστική η προτεινόμενη μέθοδος, μπορεί να αποτελέσει την λύση για την εγκατάσταση περεταίρω μονάδων ΑΠΕ στα ΜΔΔ των υπόλοιπων νησιών της Ελλάδας.

### 1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Περιγράφεται παρακάτω το περιεχόμενο των κεφαλαίων της παρούσας διατριβής.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στην έννοια της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και που αποσκοπεί η παρούσα εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενη από συμβατικούς σταθμούς αλλά και από διάφορες μορφές ΑΠΕ. Επιπλέον παρατίθενται δεδομένα από τον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης με σκοπό την σύγκριση τους ανάμεσα στις διαφορετικές χώρες μέλη του. Ακόμα γίνεται ανασκόπηση στο νομοθετικό πλαίσιο των ΑΠΕ και των προκλήσεων της Ελληνικής ενεργειακής.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται οι επιπτώσεις που έχουν οι ρύποι στο περιβάλλον (ατμόσφαιρα, θάλασσα, ξηρά, βροχή) και για ποιόν λόγο είναι απαραίτητη η μείωση τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται για ποιους λόγους η αποθήκευση της ενέργειας είναι απαραίτητη. Επίσης, παρουσιάζονται διάφορες διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας καθώς και τον τύπο ενέργειας που αποθηκεύουν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται οι πιο σημαντικές μορφές αποθήκευσης ενέργειας και γίνεται ανασκόπηση στην βιβλιογραφία.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συστήματα διασύνδεσης ηλεκτρικών συστημάτων με χρήση HVDC και HVDC τεχνολογιών. Επιπλέον αναλύεται το έργο EuroAsia δίνοντας έμφαση στην διασύνδεση μεταξύ της Κρήτης με την ηπειρωτική Ελλάδα.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναπτύσσεται ο τρόπος διαμόρφωσης των σεναρίων που χρησιμοποιήθηκαν για την οικονομική μελέτη όπως και η αναπαράσταση των αλγόριθμων με την χρήση διαγραμμάτων ροής. Έπειτα παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των σεναρίων καταλήγοντας σε συμπεράσματα σχετικά με το έργο. Τέλος αναφέρονται περαιτέρω προεκτάσεις και βελτιώσεις όσον αναφορά την συγκεκριμένη διατριβή.

---

# 2.

## ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

---

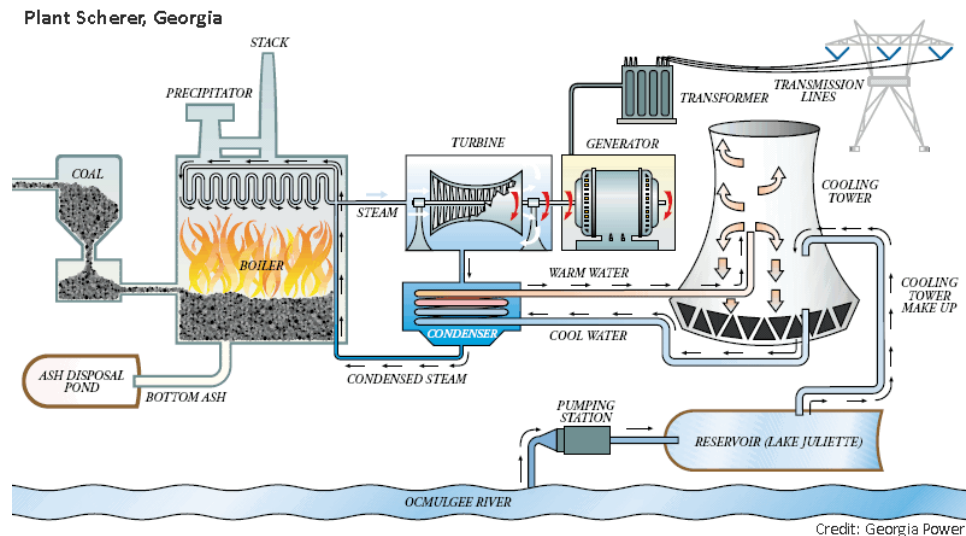
### 2.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Τα πρώτα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) εμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1870 από τον G. Lane-Fox και τον Thomas Edison και χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για φωτισμό, καθώς οι πρώτοι σταθμοί παραγωγής λειτούργησαν το 1882. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται η μετατροπή μιας πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική. Για τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας χρειάζεται κυρίως η μετατροπή κάποιας άλλης μορφής ενέργειας αρχικά σε μηχανική και έπειτα σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με την καύση ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο), από υδροηλεκτρικούς σταθμούς με την ροή ή την πτώση των υδάτων, από πυρηνικούς σταθμούς με την πυρηνική σχάση (ουράνιο, θόριο, πλουτώνιο) και τους σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

### 2.2 Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν καύση ορυκτών καυσίμων, γεωθερμικά ρευστά και βιομάζα ονομάζονται θερμοηλεκτρικοί σταθμοί. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί που χρησιμοποιούν τον ατμό ως μέσο για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας, μέσω ατμοστροβίλων, η οποία με την χρήση των

γεννητριών μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Οι πυρηνικοί σταθμοί θεωρούνται επίσης ατμοηλεκτρικοί σταθμοί, όπου ο λέβητας έχει αντικατασταθεί από τον πυρηνικό αντιδραστήρα. Από την άλλη, υπάρχουν οι σταθμοί τύπου ντίζελ και οι σταθμοί τύπου αεριοστρόβιλου που χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής ή εξωτερικής καύσης για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας, όπου πάλι μέσω των γεννητριών μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Ακόμα υπάρχουν και οι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου όπου γίνεται συνδυασμός αεριοστρόβιλου και ατμοστρόβιλου. Σε αυτούς τα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου χρησιμοποιούνται στο ατμοηλεκτρικό μέρος του σταθμού και από την ίδια πηγή ενέργειας έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πρώτα στον αεριοστρόβιλο και στην συνέχεια στον ατμοστρόβιλο.



Εικόνα 2.1 Διάγραμμα ενός θερμοηλεκτρικού εργοστασίου στην Γεωργία που χρησιμοποιεί άνθρακα.

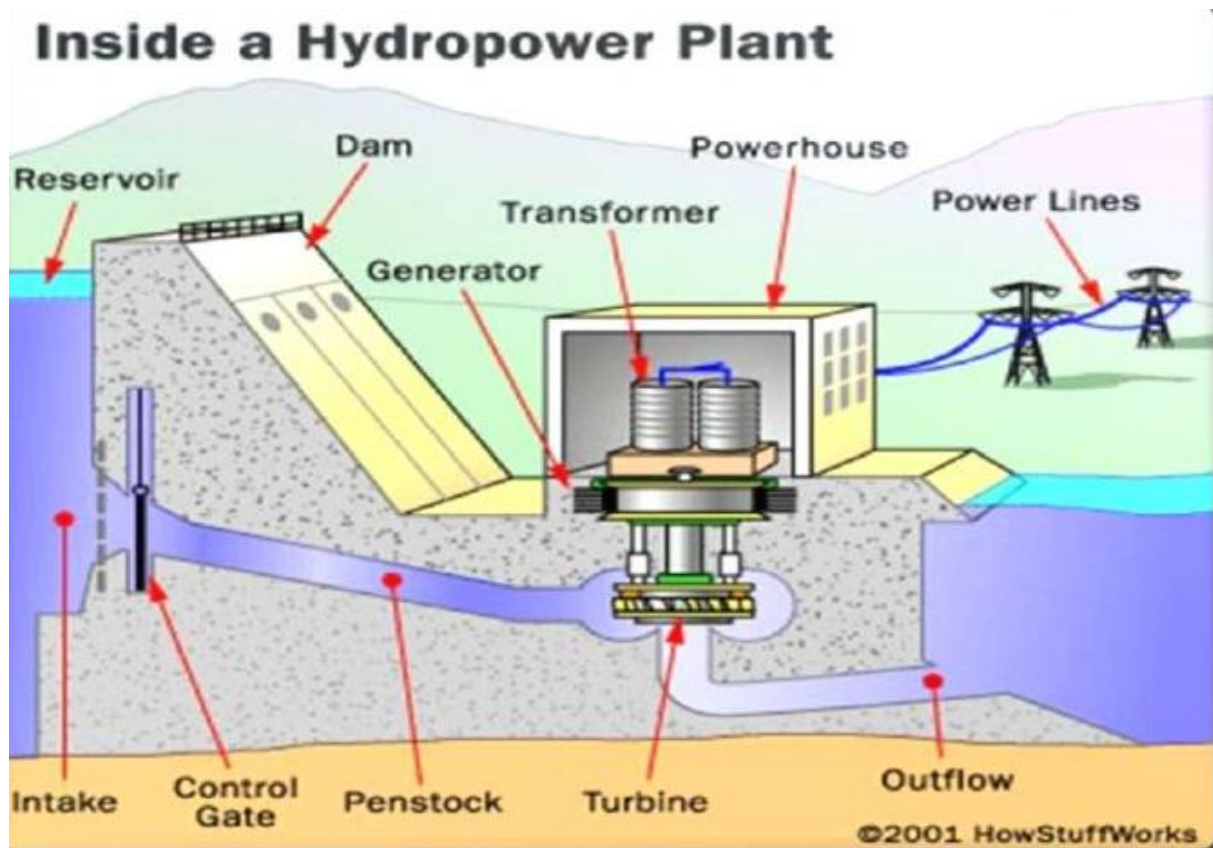
## 2.3 Συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Ως συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ονομάζουμε τα συστήματα που κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οι πόροι που χρησιμοποιούνται προέρχονται από φυσικές διαδικασίες και (πρακτικά) δεν εξαντλούνται. Επίσης είναι φιλικά ως προς το περιβάλλον και έχουν μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα. Ο λόγος όμως που τα συστήματα αυτά δεν έχουν αντικαταστήσει πλήρως τα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια είναι ο χαμηλός βαθμός απόδοσης των σταθμών ΑΠΕ, τάξεως του 30% [1]. Αυτό συμβαίνει επειδή εξαρτώνται πλήρως από τα φυσικά φαινόμενα όπως τον ήλιο, τον άνεμο, την θάλασσα αλλά και το κλίμα, τα οποία δεν είναι σταθερά ή διαθέσιμα πάντα.

### 2.3.1 Υδροηλεκτρικά συστήματα

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν την κινητική και την δυναμική ενέργεια του νερού, με την χρήση των υδροστροβίλων, όπου με την χρήση γεννητριών μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Διακρίνονται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς: (α) φυσικής ροής, όπου γίνεται εκμετάλλευση της ενέργειας ενός φυσικού ποταμιού συνήθως και (β) ρυθμιζόμενης ροής όπου χρησιμοποιούνται τεχνητά φράγματα. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί θεωρούνται από τις πλέον ώριμες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα, μέσω της αντλησιοταμίευσης, η οποία μπορεί να γίνει διαθέσιμη άμεσα και έχει

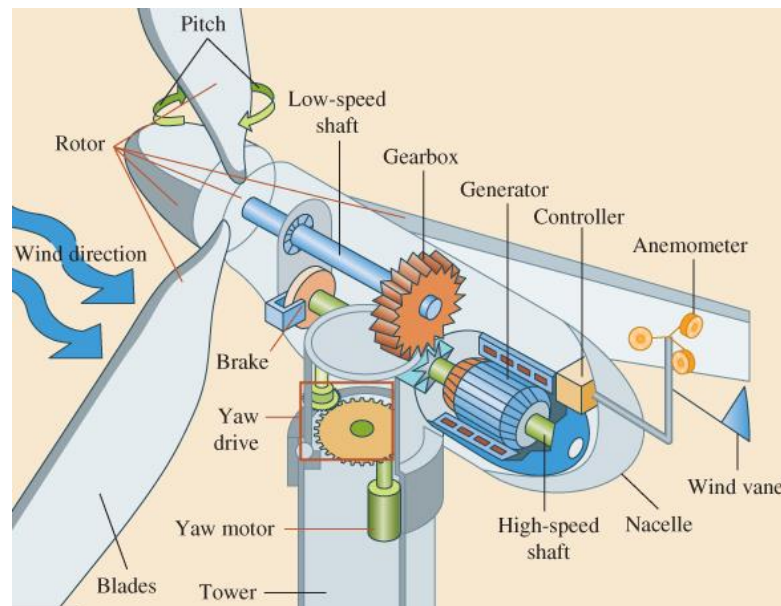
μικρό κόστος. Οι δύο μεγαλύτεροι υδροηλεκτρικοί σταθμοί βρίσκονται στην Κίνα και στην Βραζιλία. Στην Κίνα το Three Gorges έχει ονομαστική ισχύ  $22.4\text{ GW}$ , ενώ στην Βραζιλία το Itaipu  $14\text{ GW}$ .



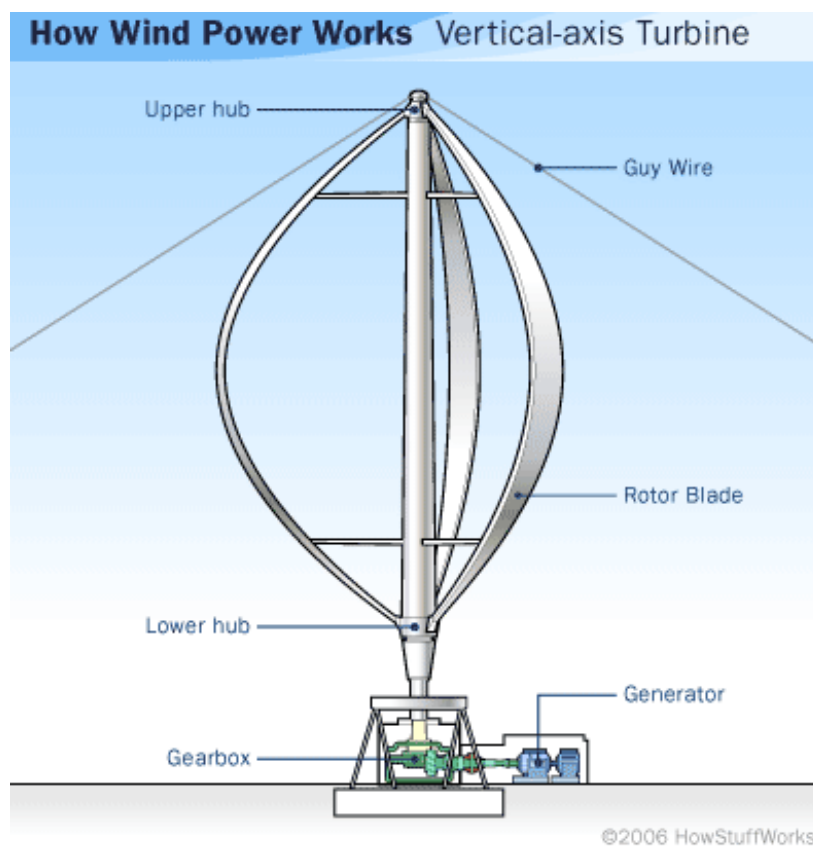
Εικόνα 2.2 Διάγραμμα ενός υδροηλεκτρικού φράγματος.

### 2.3.2 Αιολικά συστήματα

Τα αιολικά πάρκα, αποτελούνται από ανεμογεννήτριες οι οποίες χρησιμοποιούν την κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέποντας την σε μηχανική μέσω ενός αεροκινητήρα και μέσω των γεννητριών σε ηλεκτρική. Αιολικά πάρκα συνήθως εγκαθίστανται σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό, όπως βουνοπλαγιές. Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου και οριζόντιου άξονα. Στις αρχές του αιώνα οι περισσότερες ανεμογεννήτριες είχαν ονομαστική ισχύ  $1\text{--}2\text{ MW}$ , ύψος πύργου  $50\text{--}80\text{ m}$  και διάμετρο πτερυγίων  $80\text{--}100\text{ m}$ . Σήμερα υπάρχουν ανεμογεννήτριες οι οποίες έχουν ονομαστική ισχύ έως και  $7\text{ MW}$ , ύψος πύργου  $120\text{--}150\text{ m}$  και διάμετρο πτερυγίων πάνω από  $150\text{ m}$  [3].



Εικόνα 2.3 Διάγραμμα ανεμογεννήτριας οριζόντιου τύπου.

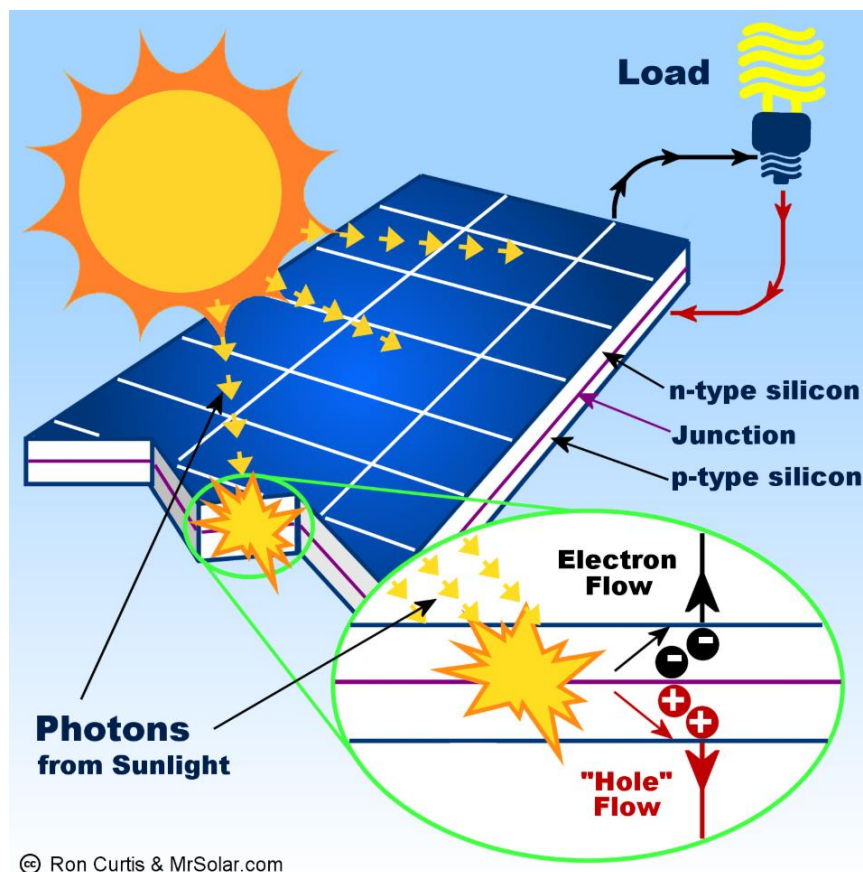


Εικόνα 2.4 Διάγραμμα ανεμογεννήτριας κατακόρυφου τύπου



### 2.3.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα

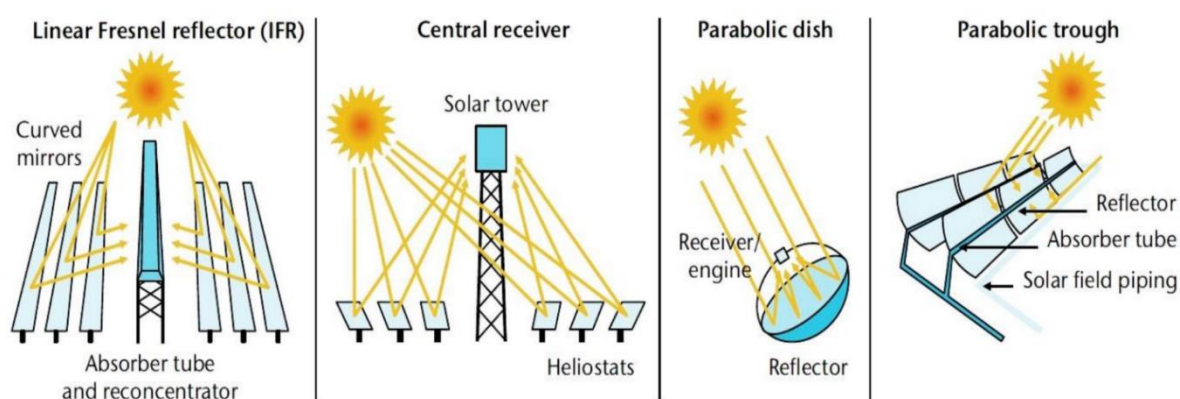
Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί μετατρέπουν τα φωτόνια σε ηλεκτρισμό με την χρήση των ηλιακών κυψελών. Σύμφωνα με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, όταν σε μία επιφάνεια μετάλλου προσπέσει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (στην περίπτωση αυτή ο ήλιος) με συχνότητα τέτοια ώστε τα ηλεκτρόνια να αποκτήσουν ενέργεια ικανή ώστε να υπερπηδήσουν το φράγμα δυναμικής ενέργειας που τα συγκρατεί στην επιφάνεια αυτή, τότε τα ηλεκτρόνια αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Επειδή η διάρκεια ζωής και ο βαθμός απόδοσης των κυψελών αυτών αυξάνεται ενώ το κόστος κατασκευής μειώνεται, οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί είναι ευρέως εμπορικά διαδεδομένοι ακόμα και σε ιδιώτες. Ένα τυπικό Φ/Β σύστημα για οικιακή χρήση μιας οικογένειας μπορεί να παράγει από 1-10 kW. Για χρήση σε εμπορικά κτίρια τα Φ/Β συστήματα μπορούν να παράγουν από 10 kW μέχρι και 1-2 MW [3].



Εικόνα 2.5 Διάγραμμα φωτοβολταϊκού αποτελούμενο από ηλιακές κυψέλες. Κατά την πρόσπτωση του φωτός στις κυψέλες, τα ηλεκτρόνια τίθενται προς κίνηση υπερπηδώντας το ενεργειακό φράγμα του υλικού με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

### 2.3.4 Ηλιοθερμικά συστήματα ενέργειας (CSP)

Τα συστήματα αυτά παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με τον ίδιο τρόπο που παράγει ένα θερμοηλεκτρικό εργοστάσιο χρησιμοποιώντας ατμό. Η διαφορά είναι ότι αντί για την καύση ορυκτών ή πυρηνικών καυσίμων, εδώ χρησιμοποιείται η θερμότητα από τον ήλιο. Η βασική ιδέα είναι η χρήση αρκετών καθρεπτών για την ανάκλαση του ήλιου σε μια δεξαμενή που περιέχει νερό, το οποίο στην συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού μεγάλης θερμοκρασίας και πίεσης. Έπειτα, ο ατμός απελευθερώνεται μέσω μιας στροβιλομηχανής που περιστρέφει μια γεννήτρια και παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Τα συστήματα CSP μπορούν να διατηρήσουν το νερό ζεστό, με την χρήση κατάλληλων αλάτων, για αρκετές ώρες και έτσι υπάρχει διαθεσιμότητα ηλεκτρικής ενέργειας άμεσα ακόμα και αν έχει συννεφιά. Τα αρνητικά είναι ότι ένα τέτοιο σύστημα χρειάζεται πολύ ηλιόλουστες περιοχές και πάρα πολλούς καθρέφτες, που συνεπάγεται μεγάλη έκταση. Υπάρχουν 4 βασικοί τύποι ηλιακών θερμικών συστημάτων όπως φαίνονται στην Εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6 **Αριστερά στην πρώτη εικόνα** φαίνεται ένα σύστημα Γραμμικών Ανακλαστήρων Fresnel (LFR) με τυπική ισχύς 10-200 MW έχοντας μέγιστη απόδοση 18%. **Στην δεύτερη εικόνα** φαίνεται το σύστημα Κεντρικού Δέκτη με τυπική ισχύς 10-200 MW και μέγιστη απόδοση 23%. **Στην Τρίτη εικόνα** φαίνεται το σύστημα Dish Stirling με τυπική ισχύς 0.01-0.025 MW και μέγιστη απόδοση 30%. **Στην Δεξιά εικόνα** φαίνεται το σύστημα παραβολικού κοίλου κατόπτρου με τυπική ισχύς 10-300 MW και μέγιστη απόδοση 14-20 % [3].

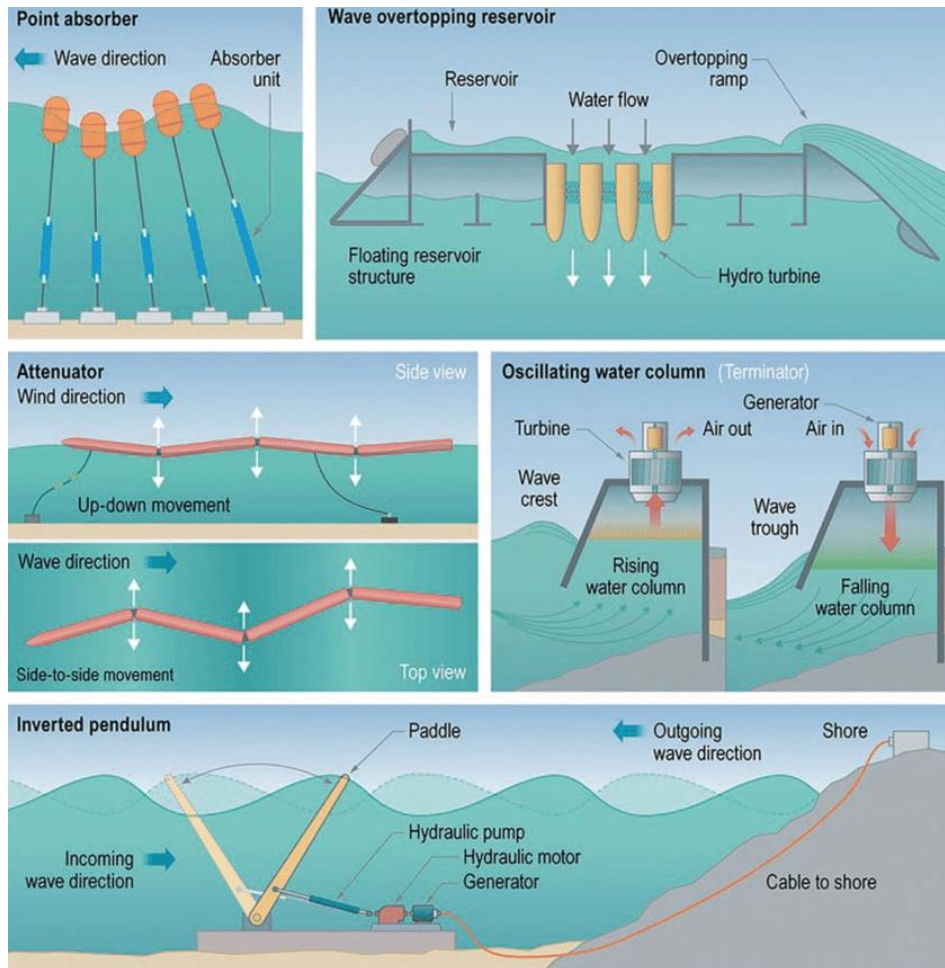
### 2.3.5 Ωκεάνια συστήματα

Οι ωκεανοί αποτελούν μια τεράστια πηγή ενέργειας και έχει γίνει προσπάθεια εκμετάλλευσης τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από τις διάφορες προσπάθειες, αυτές που έχουν προοπτικές είναι η κυματική και η ενέργεια από τα ωκεάνια ρεύματα.

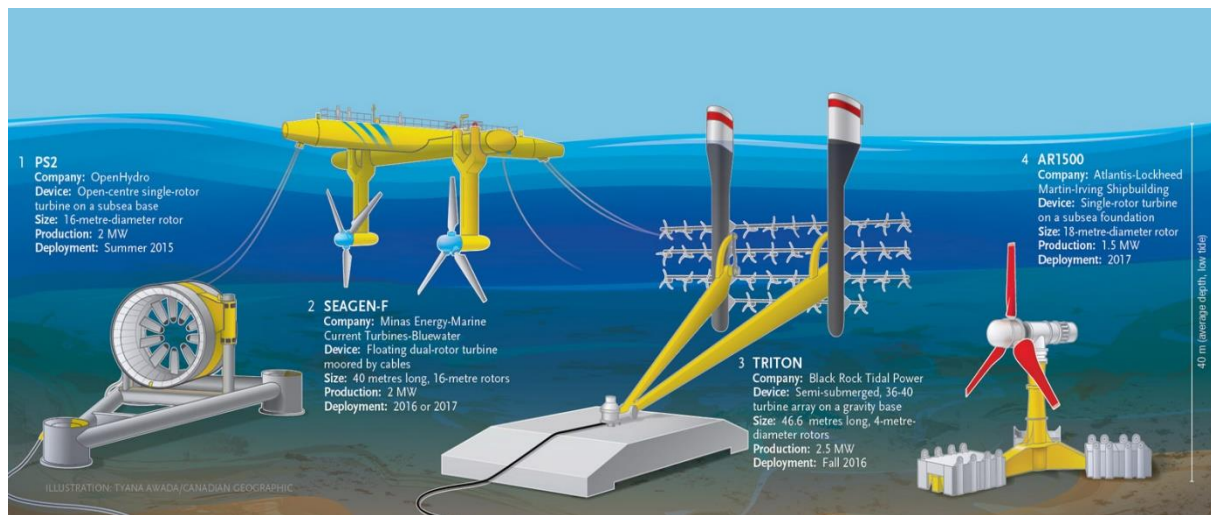
Η κυματική ενέργεια βασίζεται στις κυματομορφές των κυμάτων στην θάλασσα για μετατροπή από μηχανική σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα κύματα εξαρτώνται από την θερμοκρασία και τους ανέμους στην Γη, επομένως η ενέργεια που παράγεται δεν είναι σταθερή και χρειάζονται συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές για να αποδώσει. Επίσης με τις τρέχουσες τεχνολογίες δεν είναι ικανή για να στηρίξει ένα ηλεκτρικό σύστημα.

Ο τρόπος εκμετάλλευσης της παλιρροϊκής ενέργειας είναι παρόμοιος με τον τρόπο εκμετάλλευσης της αιολικής. Βυθίζοντας ένα στρόβιλο σε φυσικά περάσματα παλιρροϊκών ρευμάτων μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την ισχύ του νερού. Το πρώτο μεγάλο σύστημα παλιρροϊκής ενέργειας έγινε στην Γαλλία στον ποταμό La Rance με ονομαστική ισχύ

240 MW . Υπάρχουν κι άλλα, όπως στην Ν. Κορέα με ισχύ 254 MW και προτείνονται και σε άλλα μέρη. Παρόλα αυτά, οι τοποθεσίες που μπορεί να γίνει κάτι τέτοιο εφικτό είναι περιορισμένες και το κόστος καθώς και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις το καθιστούν ακόμα πιο δύσκολο.



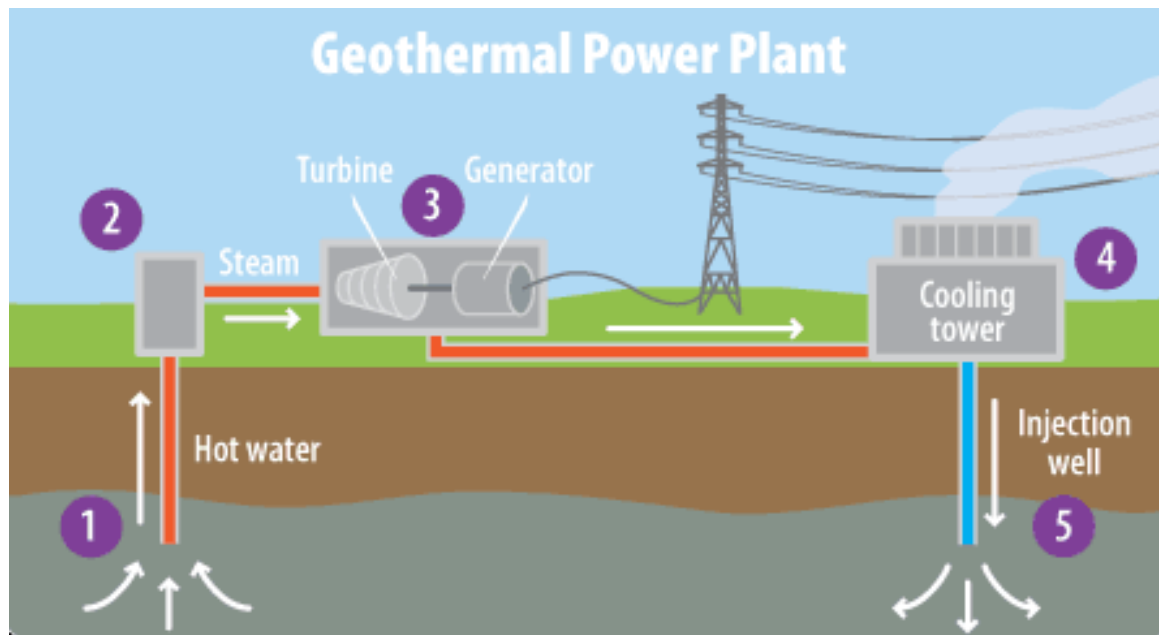
Εικόνα 2.7 Διάφορες τεχνολογίες κυματικής ενέργειας (WEC) **Αριστερά πάνω** Απορροφητές σημείου. **Πάνω δεξιά** Συσκευές υπερπήδησης. **Κέντρο αριστερά** Εξασθενητής Pellamis. **Κέντρο δεξιά** Τερματιστής OWC. **Κάτω** Ανεστραμμένου εκκρεμούς.



Εικόνα 2.8 Διάφορες τεχνολογίες παλιρροϊκής ενέργειας στις οποίες αναγράφονται τα χαρακτηριστικά τους.

### 2.3.6 Γεωθερμικά συστήματα ενέργειας

Η γεωθερμική είναι η ενέργεια που προέρχεται από την θερμοκρασία στον φλοιό της γης. Είναι διάσπαρτη αλλά δεν ποικίλλει με τον χρόνο και γι' αυτόν τον λόγο είναι σταθερή. Όταν είναι διαθέσιμη μπορεί να παράγει ενέργεια βασικού φορτίου με υψηλούς συντελεστές χωρητικότητας. Η ενεργειακή ροή της είναι χαμηλότερη σε σχέση με την ηλιακή, την αιολική, την παλιρροϊκή και τη κυματική. Ο ρυθμός εξαγωγής μερικές φορές μπορεί να υπερβεί τον ρυθμό αναπαραγωγής της, με αποτέλεσμα να μειωθεί η τοπική πηγή θερμότητας, δημιουργώντας έτσι το ερώτημα κατά πόσο, είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Αποδοτικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία, έχουν αποδειχθεί αξιόπιστα και οικονομικά με κόστος παραγωγής 5-10 \$/MWh. Σύμφωνα με μελέτη του International Energy Agency (IEA) ως το 2050 η παραγωγή ηλεκτρισμού από γεωθερμία θα παρέχει περίπου 1400 TWh/ year [6].

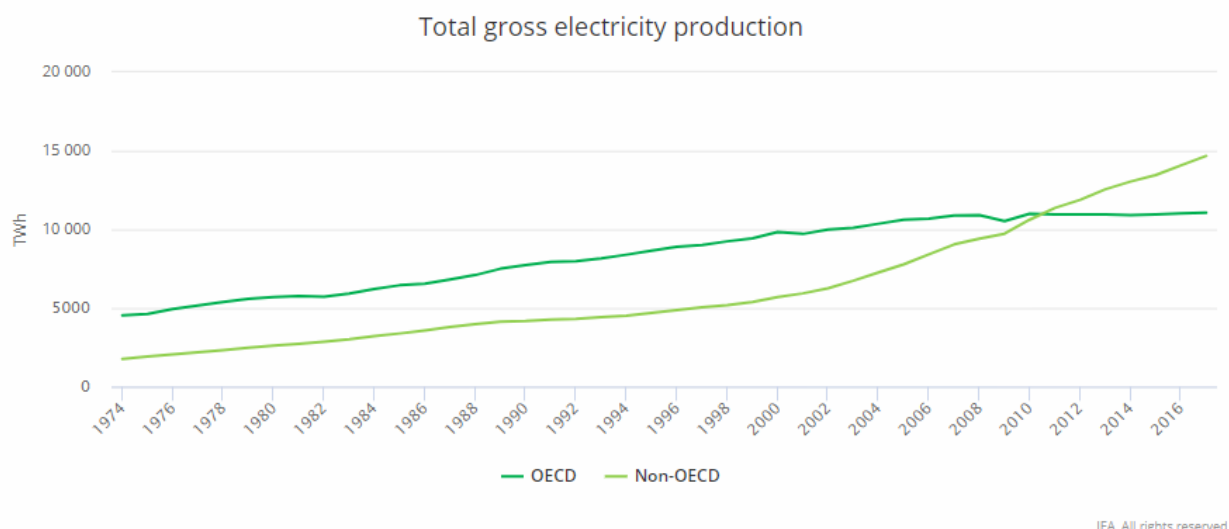


Εικόνα 2.9 Απλό διάγραμμα λειτουργίας ενός γεωθερμικού εργοστασίου.

## 2.4 Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 2.10 για τα έτη 1974 έως 2017. Παρατηρείται ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τα χρόνια αυξάνεται, εκτός από το διάστημα 2008 με 2009, οπότε η παγκόσμια χρηματοπιστωτική κρίση προκάλεσε αισθητή μείωση της παραγωγής. Το 2017 η παγκόσμια παραγωγή αυξήθηκε κατά 2.5% σε σχέση με το 2016. Οι χώρες που ανήκουν στον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) από το 2010 έχουν σταθερή παραγωγή ενέργειας 11.000 TWh ενώ οι non-OECD χώρες έχουν αυξήσει την παραγωγή τους κατά 57% από το διάστημα 1974 μέχρι το 2017.

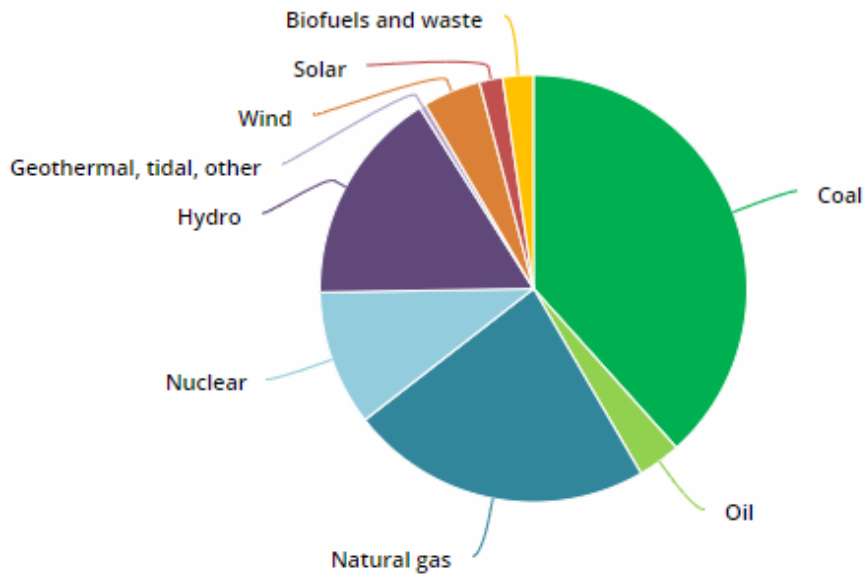




*Εικόνα 2.10 Διάγραμμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε TWh ανά τα χρόνια ανάμεσα στις χώρες μέλη του OECD και των non-OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). Η Ελλάδα είναι μέλος των 36 χωρών που ανήκουν σε αυτή την οργάνωση όπως και η Αυστραλία, ο Καναδάς, η Νότια Κορέα, η Γαλλία, η Γερμανία, η Ιαπωνία, το Μεξικό, η Τουρκία, η Ελβετία, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Αμερική. Οι μεγαλύτερες χώρες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που δεν ανήκουν σε αυτήν την οργάνωση είναι η Κίνα, η Ινδία, η Ρωσία και η Βραζιλία.*

Στο διάγραμμα της Εικόνας 2.11 παρατηρούνται οι κύριες πηγές παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2017. Το 66.8% της παραγωγής αποτελείται από καύσιμα όπως ο άνθρακας και τα προϊόντα άνθρακα, πετρέλαιο και προϊόντα πετρελαίου, φυσικό αέριο, βιοκαύσιμα, συμπεριλαμβανομένης της στερεής βιομάζας και ζωικών προϊόντων, αερίων και υγρών από βιομάζα, καθώς και απόβλητα αστικά ή βιομηχανικά. Ενδιαφέρον όμως δείχνει το διάγραμμα της Εικόνας 2.8 όπου φαίνεται το ποσοστό παραγωγής ενέργειας των OECD χωρών βάσει του τύπου της πηγής. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν αρχίσει να γίνονται πιο ανταγωνιστικές με το πέρασμα του χρόνου και μαζί με αυτές η ανάγκη αποθήκευσης της περίσσιας ηλεκτρικής ενέργειας καθίσταται αναγκαία. Σημαντική μείωση παρατηρείται στην παραγωγή από γαιάνθρακες και πετρέλαιο και αύξηση από φυσικό αέριο.

## World gross electricity production, by source, 2017

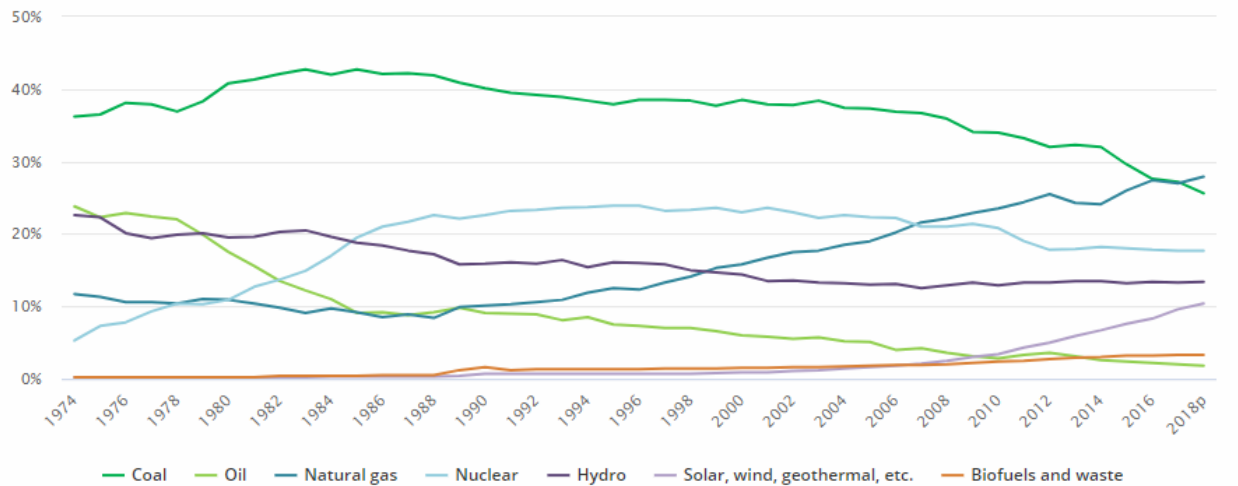


IEA. All rights reserved.

*Εικόνα 2.11 Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το έτος 2017, βάση πηγής. Το 38.3% της παραγωγής προέρχεται από γαιάνθρακες, το 3.3% από πετρέλαιο, το 22.9% από φυσικό αέριο, το 10.2% από πυρηνικούς σταθμούς, το 16.3% από υδροηλεκτρικούς σταθμούς, το 2.3% από βιομάζα, 1.8% από φωτοβολταϊκά, 4.4% από ανεμογεννήτριες και 0.5% από γεωθερμία, κυματική κ.α. πηγές.*

Συνοψίζοντας, στο διάγραμμα της Εικόνας 2.12 απεικονίζονται οι χώρες που καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια στον κόσμο. Για την βιομηχανία, το 2017 χρησιμοποιήθηκαν 8.945 TWh, για οικιακή χρήση 5.775 TWh, για εμπορικές και δημόσιες υπηρεσίες 4.637 TWh, για τις συγκοινωνίες 364 TWh και 1651 TWh για άλλες χρήσεις [6].

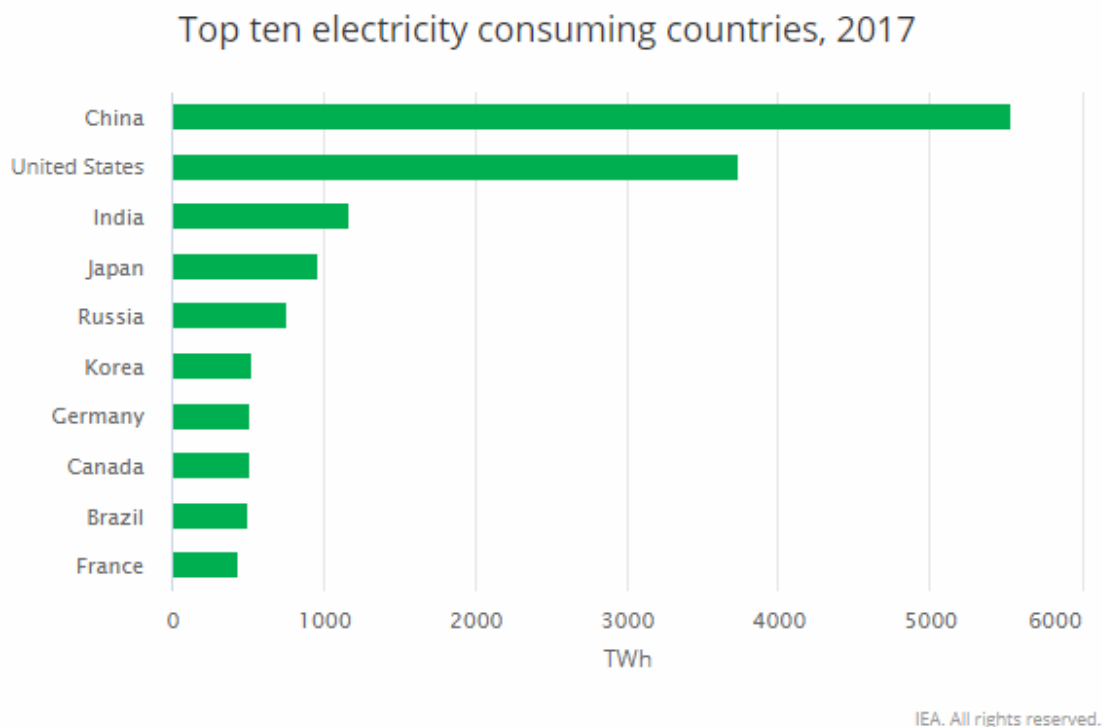
OECD gross electricity production by source, 1974-2018 provisional



IEA. All rights reserved.

Εικόνα 2.12 Από το διάστημα 2017-2018 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γαιάνθρακες έχει μειωθεί κατά 140 TWh και από πετρέλαιο κατά 20 TWh. Από την άλλη η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία, κυματική και άλλες πηγές έχει αυξηθεί κατά 2 TWh, από βιομάζα και απόβλητα κατά 3 TWh, από πυρηνικούς σταθμούς κατά 21TWh, από υδροηλεκτρικά κατά 24 TWh, από υδροηλεκτρικά κατά 49 TWh, από φωτοβολταϊκά κατά 54 TWh και από το φυσικό αέριο κατά 130 TWh.





*Εικόνα 2.13 Οι 10 χώρες βάσει της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η Κίνα και η Αμερική είναι πρώτες, με μεγάλη διαφορά από τις επόμενες λόγω των ισχυρών βιομηχανιών που διαθέτουν και του πληθυσμού τους.*

## 2.5 Νομοθετικό πλαίσιο ΑΠΕ στην Ελλάδα

Ο πρώτος νόμος σχετικά με τα ΑΠΕ στην Ελλάδα ήταν ο **N. 1559/1985** «Ρύθμιση θεμάτων εναλλακτικών μορφών ενέργειας και ειδικών θεμάτων ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα και άλλες διατάξεις» (ΦΕΚ Α 135) στα πλαίσια του οποίου η ΔΕΗ πρωτοπορούσα εγκατέστησε 24 MW, ενώ οι Οργανισμοί Τοπικής Αυτοδιοίκησης περιορίστηκαν στο ελάχιστο επίπεδο των 3 MW μέχρι το 1995.

Ο **N. 2244/1994** «Ρύθμιση θεμάτων ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και από συμβατικά καύσιμα και άλλες διατάξεις» (ΦΕΚ Α 168), στα ίχνη του τότε ισχύοντος γερμανικού Νόμου (Stromeinspeisungsgesetz), αποτέλεσε την απαρχή για την ουσιαστική ανάπτυξη των ΑΠΕ.

Συνεχίζεται με την ίδρυση του ΚΑΠΕ (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας), με σκοπό τη προώθηση και την υποστήριξη δραστηριοτήτων ΑΠΕ και Ε.Ε. Σκοπός του Κέντρου είναι η προώθηση των ΑΠΕ, της εξοικονόμησης και της ορθολογικής χρήσης της ενέργειας, καθώς και η κάθε είδους υποστήριξη δραστηριοτήτων στους εν λόγω τομείς. Περαιτέρω, με το άρθρο 11 του **N. 2702/1999** «Διάφορες ρυθμίσεις θεμάτων αρμοδιότητας Υπουργείου Ανάπτυξης και άλλες διατάξεις» (ΦΕΚ Α' 70) το ΚΑΠΕ λειτουργεί ως εθνικό συντονιστικό κέντρο των εν λόγω δραστηριοτήτων.

Ο **N.2773/9999** για την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθιερώνει την άδεια παραγωγής. Με την ΥΑ 2000/2002 η άδεια παραγωγής αποτελεί προϋπόθεση για την έναρξη της αδειοδοτικής διαδικασίας. Με το άρθρο 4 του **N. 2773/1999** ιδρύθηκε η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας ως ανεξάρτητη διοικητική αρχή επιφορτισμένη με την

παρακολούθηση και έλεγχο της λειτουργίας της αγοράς ενέργειας και τη διατύπωση εισηγήσεων για την τήρηση των κανόνων του ανταγωνισμού και την προστασία των καταναλωτών.

Ο Ν. **2941/2001** «Απλοποίηση διαδικασιών ίδρυσης εταιρειών, αδειοδότηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ρύθμιση θεμάτων της Α.Ε. 'ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΝΑΥΠΗΓΕΙΑ' και άλλες διατάξεις» (ΦΕΚ Α' 201) αντιμετώπισε αποτελεσματικά το θέμα εγκατάστασης ΑΠΕ σε δάση και δασικές εκτάσεις, με διατάξεις που έγιναν αποδεκτές και κρίθηκαν συνταγματικές από το Συμβούλιο της Επικρατείας.

Με το Ν. **3017/2002** «Κύρωση του Πρωτοκόλλου του Κιότο στη Σύμβαση-πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την αλλαγή του κλίματος» (ΦΕΚ Α' 117) η Ελληνική Βουλή επισημοποίησε τη δέσμευση της χώρας για δράσεις αντιστρατευόμενες την τάση επιδείνωσης του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Ο Ν. **3175/2003** καθιέρωσε για πρώτη φορά συνεκτικό σύνολο κανόνων για την ορθολογική χρήση της γεωθερμικής ενέργειας. Το νέο πλαίσιο είναι συμβατό με το κοινοτικό δίκαιο που θεωρεί ότι η γεωθερμία αποτελεί μορφή ανανεώσιμης ενέργειας που συνεισφέρει στη βιώσιμη ανάπτυξη.

Με την **ΚΥΑ 1726/2003** καταβλήθηκε προσπάθεια αντιμετώπισης κυρίως του φαινομένου της χρονικής καθυστέρησης στην περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων ΑΠΕ.

Ο Ν. **3468/2006** «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης και λοιπές διατάξεις» (Παράρτημα Ι), ο οποίος κατήργησε κάποια άρθρα των νόμων 3175/2003, 2773/1999 και 2244/1994, αφενός αποσαφήνισε τον ορισμό των υβριδικών συστημάτων (βλ. Παράγραφο 2.4), αφετέρου καθόρισε την διαδικασία αδειοδότησης για εγκατάσταση και λειτουργία, καθώς και την τιμολόγηση της διαθεσιμότητας της ισχύος Υβριδικών Σταθμών.

Το 2008 εκδόθηκε η **ΚΥΑ 49828 ΦΕΚ 2464/Β/3.12.2008** «Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας» με σκοπό:

- Τη διαμόρφωση πολιτικών χωροθέτησης έργων ΑΠΕ, ανά κατηγορία δραστηριότητας και κατηγορία χώρου, βάσει των διαθέσιμων σε εθνικό επίπεδο στοιχείων.
- Την καθιέρωση κανόνων και κριτηρίων χωροθέτησης που θα επιτρέπουν αφενός την δημιουργία βιώσιμων εγκαταστάσεων ΑΠΕ και αφετέρου την αρμονική ένταξή τους στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον.

Ο Ν. **3851/2010** για τις Α.Π.Ε. «Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής» ψηφίστηκε στη Βουλή την 25 Μαΐου 2010 [6].

---

# 3.

## ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

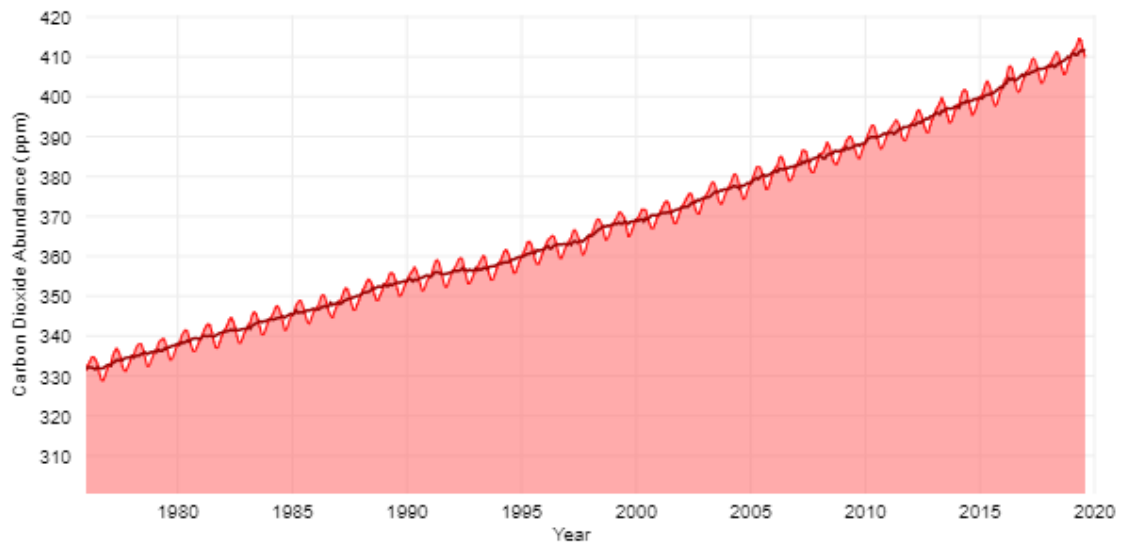
---

### 3.1 Διοξείδιο του άνθρακα

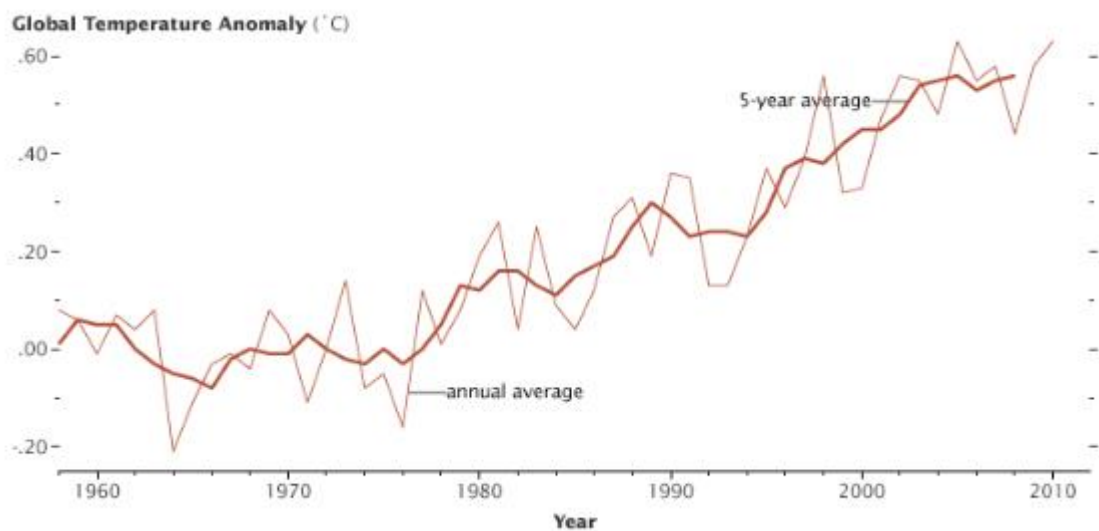
Κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί, εκτός από τους πυρηνικούς, παράγουν και διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) ως καυσαέριο. Το  $\text{CO}_2$  που παράγεται δεν εξαφανίζεται σταδιακά. Σύμφωνα με άρθρο της Εθνικής Υπηρεσίας Αεροναυτικής και Διαστήματος (National Aeronautics and Space Administration, NASA) το 2011, το 55% του παραπανίσιου  $\text{CO}_2$  απορροφήθηκε από την θάλασσα και τα φυτά ενώ το υπόλοιπο 45% παρέμεινε στην ατμόσφαιρα. Τελικά ένα ποσοστό 20% θα παραμείνει στην ατμόσφαιρα για πολλές χιλιάδες χρόνια. Οι επιπτώσεις του όμως, φέρουν αρνητικά αποτελέσματα στην ατμόσφαιρα, στους ωκεανούς αλλά και στην ξηρά [11].

#### 3.1.1 Επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα

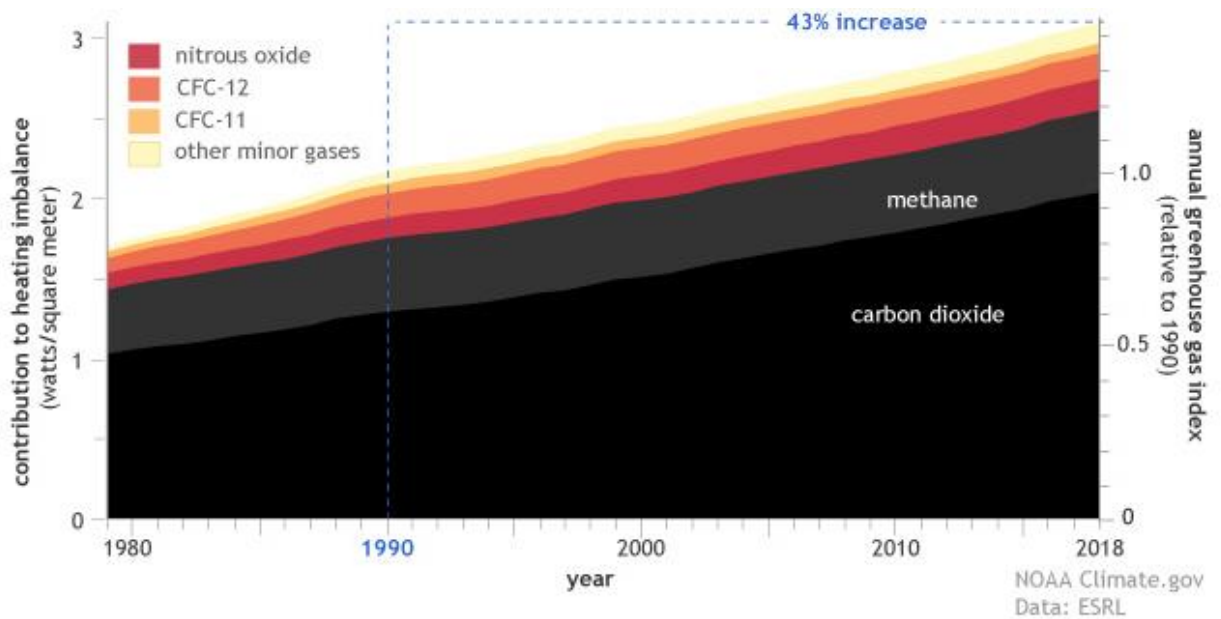
Γενικά, το  $\text{CO}_2$  έχει την ιδιότητα να απορροφάει ενέργεια και μετά να την εκπέμπει εκ νέου, συμβάλλοντας έτσι στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, με ποσοστό 20%. Το φαινόμενο αυτό ελέγχει την θερμοκρασία του πλανήτη όπως και την ποσότητα νερού που εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα. Χωρίς τέτοιου είδους αέρια η γη θα είχε θερμοκρασία  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Από το 1880 μέχρι το 2011 έχει παρατηρηθεί μια αύξηση κατά  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , όπως και φαίνεται στην Εικόνα 3.3.



*Εικόνα 3.1 Ποσοστά συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα από το NOAA's Mauna Loa Observatory στην Hawaί'i σε κομμάτια ανά εκατομμύριο (ppm).*



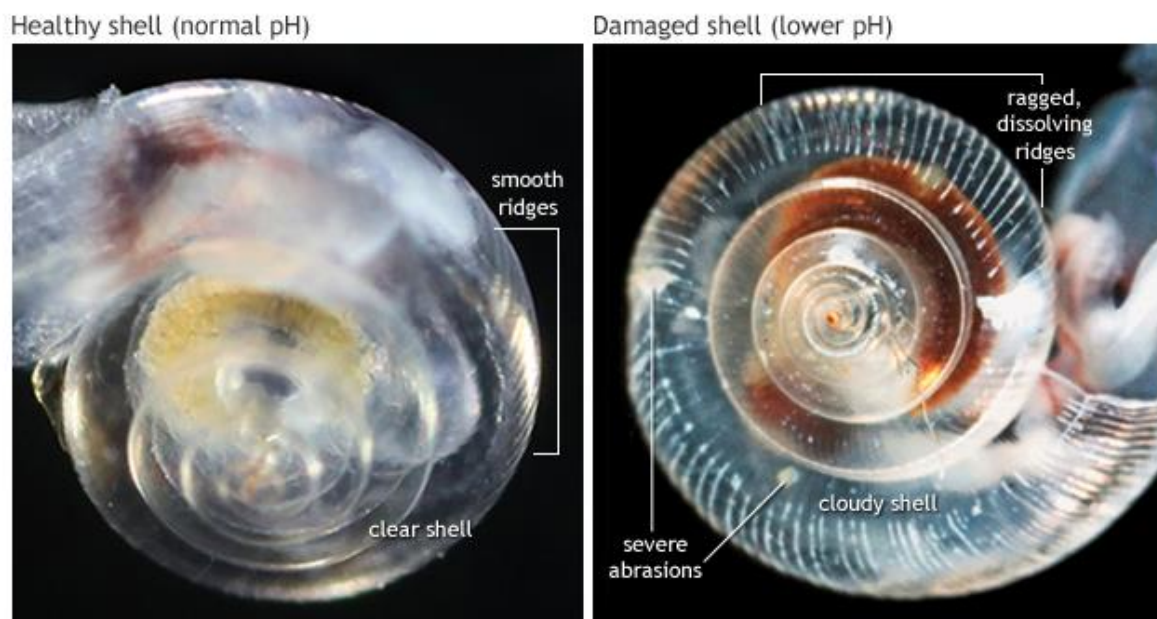
*Εικόνα 3.2 Παγκόσμια αύξηση μέσης θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου, πηγή από Goddard Institute for Space Studies.*



Εικόνα 3.3 **Αριστερά** η ανισορροπία θερμότητας σε Watt ανά τετραγωνικό μέτρο από τα αέρια του θερμοκηπίου που παράχθηκαν από τον άνθρωπο. Η σημερινή ατμόσφαιρα απορροφάει 3 παραπάνω watt ηλιακής ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο της επιφάνειας της γης σύμφωνα με NOAA's Annual Greenhouse Gas. **Δεξιά** παρατηρούμε την συνδυασμένη επίδραση όλων των κύριων αερίων θερμοκηπίου που έχει αυξηθεί κατά 43% από το 1990. Το γράφημα βασίζεται σε στοιχεία από το NOAA ESRL[12].

### 3.1.2 Επιπτώσεις στην θάλασσα

Ένα ποσοστό κοντά στο 30% του CO<sub>2</sub> απορροφάται από τους ωκεανούς, το οποίο μέσω διαφόρων χημικών διαδικασιών μετατρέπεται σε H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (ανθρακικό οξύ) το οποίο αυξάνει την οξύτητα του νερού, δηλαδή μειώνει το *pH* της θάλασσας. Από το 1750 το *pH* των ωκεανών έχει μειωθεί κατά 0.1. Ένα αποτέλεσμα της μείωσης του pH είναι ότι οργανισμοί που διαθέτουν κέλυφος, όπως τα κοράλλια, δυσκολεύονται να τα χτίσουν με αποτέλεσμα να είναι πιο αδύναμα και πιο ευάλωτα δημιουργώντας έτσι πρόβλημα στην τροφική αλυσίδα των θαλάσσιων ειδών. Από την άλλη αν οι ωκεανοί γίνουν πιο όξινοι, θα μπορούν να απορροφήσουν περισσότερο CO<sub>2</sub>, αυξάνοντας το προαναφερθέν πρόβλημα, αλλά κυρίως θα αυξηθεί η θερμοκρασία της θάλασσας με αποτέλεσμα να μειωθεί το φυτοπλανκτόν, το οποίο ευδοκιμεί σε κρύα και υγιή νερά.

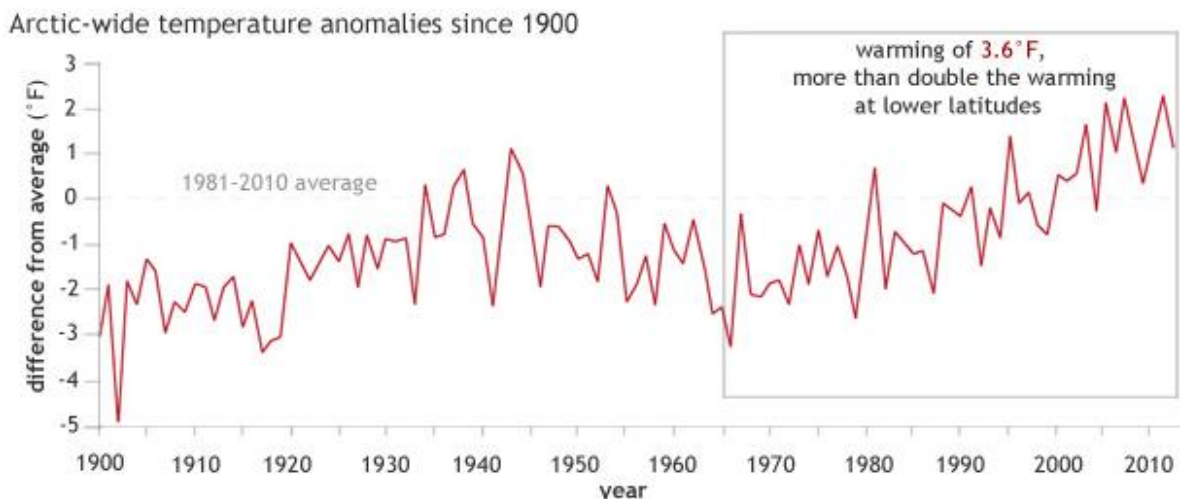


Εικόνα 3.4 **Αριστερά** ένα υγιές σαλιγκάρι, σε κανονικά επίπεδα pH, με διαφανές κέλυφος και ομαλά διαμορφωμένες κορυφογραμμές. **Δεξιά** ένα σαλιγκάρι, σε πιο όξινο pH, με πιο θαμπό και χτυπημένο κέλυφος, με εκδορές και ατελείς κορυφογραμμές. Nina Bednarsek, NOAA PMEL.

### 3.1.3 Επιπτώσεις στην ξηρά

Τα φυτά της ξηράς, υπολογίζεται ότι απορροφούν το 25% του παραπανίσιου CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Με τα χρόνια τα φυτά έχουν εξελιχθεί και μπορούν και απορροφούν περισσότερο CO<sub>2</sub>. Δρώντας ως λίπασμα, βοηθώντας στην φωτοσύνθεση, το CO<sub>2</sub> βοηθάει τα φυτά να μεγαλώσουν περισσότερο. Παρόλο που ακούγεται θετικό, τα φυτά χρειάζονται επίσης νερό, ηλιακό φως και θρεπτικά συστατικά, ιδιαίτερα το άζωτο. Εάν ένα φυτό δεν έχει ένα από αυτά τα στοιχεία, δεν θα αυξηθεί, ανεξάρτητα από το πόσο άφθονες είναι οι άλλες ανάγκες. Υπάρχει ένα όριο για το πόσο άνθρακα μπορούν να πάρουν από την ατμόσφαιρα, και αυτό το όριο ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή. Μέχρι στιγμής φαίνεται, ότι η υπερτροφοδότηση με διοξείδιο του άνθρακα αυξάνει την ανάπτυξη των φυτών έως ότου η μονάδα φθάσει σε ένα όριο στην ποσότητα νερού ή αζώτου. Στην φύση όμως για να μεγαλώσει περαιτέρω ένα φυτό θα χρειαστεί και περισσότερο νερό, αλλά λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας θα έχει εξατμιστεί περισσότερο νερό απ' ό,τι πρέπει και το φυτό θα μείνει ξερό, καθιστώντας το πιο ευαίσθητο σε φωτιές ή σε έντομα.

Το γεγονός αυτό προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία στις παγωμένες περιοχές όπου το χώμα έχει αρχίσει και αποψύχεται. Το χώμα στις παγωμένες περιοχές περιέχει πλούσιες εναποθέσεις άνθρακα από φυτική ύλη που έχει συσσωρευτεί για χιλιάδες χρόνια, επειδή οι χαμηλές θερμοκρασίες επιβραδύνουν την αποσύνθεση. Όταν το έδαφος θα αρχίσει να θερμαίνεται, οι οργανικές ύλες οι οποίες περιέχουν CH<sub>4</sub> (μεθάνιο) και CO<sub>2</sub> θα απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με έρευνες [11], στο βόρειο ημισφαίριο υπάρχουν 1.672 δισεκατομμύρια τόνοι οργανικού άνθρακα. Μόνο το 10% αυτής της ποσότητας είναι ικανό να αυξήσει την ατμοσφαιρική θερμοκρασία κατά 0.7 °C έως το 2100.



Εικόνα 3.5 Διαφορά από την μέση θερμοκρασία για τις περιοχές γύρω από την Αρκτική. Αρχικά στοιχεία από την Μονάδα Έρευνας για το Κλίμα του Πανεπιστημίου East Anglia το 2013.

## 3.2 Όξινη βροχή

Εκτός από το διοξείδιο του άνθρακα, κατά την καύση απελευθερώνονται επίσης διοξείδιο του θείου και οξείδια του αζώτου. Σε συνδυασμό με το νερό της ατμόσφαιρας, σχηματίζεται θειικό και νιτρικό οξύ με αποτέλεσμα οι βροχές να είναι όξινες. Η όξινη βροχή επηρεάζει αρνητικά τα φυτά και συνεπώς τα δάση. Επίσης συμβάλει στην διάβρωση μεταλλικών αντικειμένων. Τα παράγωγα αυτά προέρχονται κυρίως από την καύση άνθρακα μαζί με το πετρέλαιο και μπορούν να μειωθούν αισθητά από την χρήση φυσικού αερίου. Επιπλέον αποτελέσματα της όξινης βροχής είναι τα οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) τα οποία απελευθερώνονται κατά τις διαδικασίες καύσης υψηλής θερμοκρασίας όπως και κατά την οξείδωση του αζώτου στον αέρα. Τα οξείδια του αζώτου παράγονται σε μεγαλύτερες ποσότητες από τις μηχανές των οχημάτων παρά από τους σταθμούς παραγωγής.

---

# 4.

## ΑΝΑΓΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

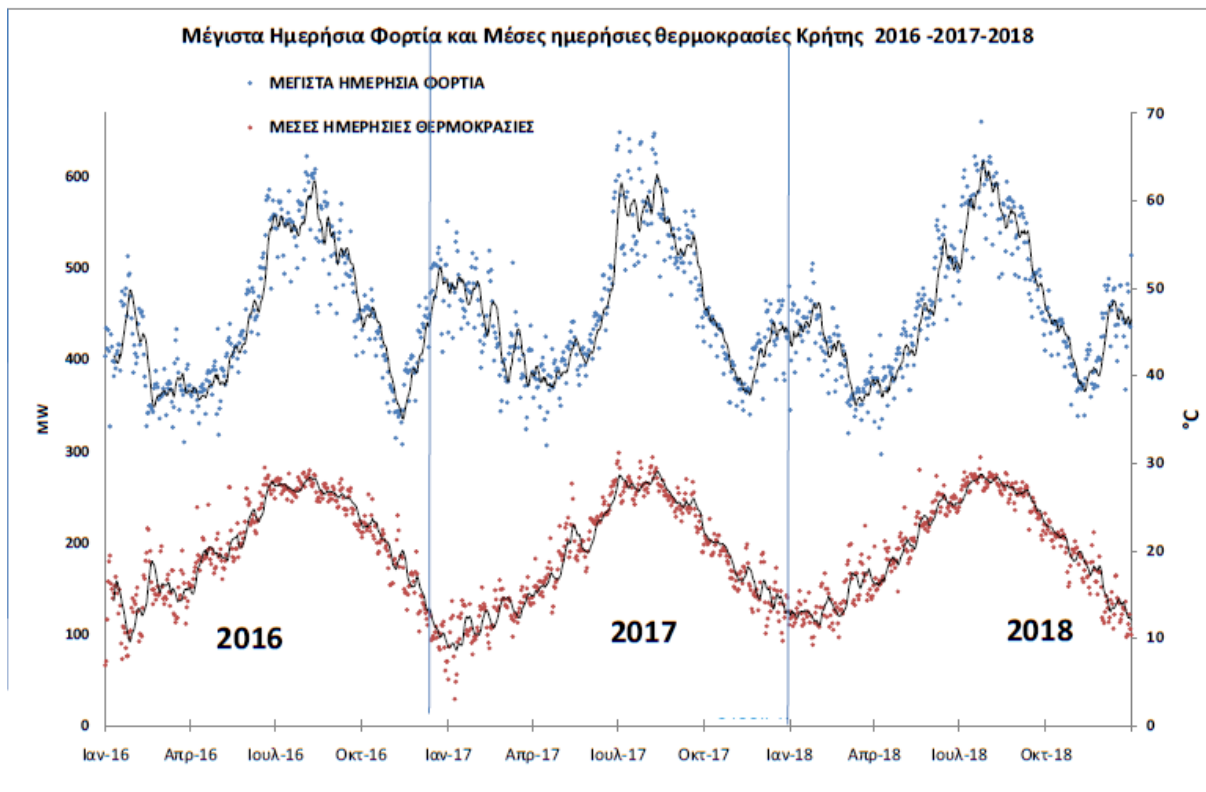
---

### 4.1 Εισαγωγή

Για την μείωση των εκπομπών ρύπων ως προς το περιβάλλον, προκύπτει ως αναγκαία η αύξηση των ΑΠΕ αλλά και διαφόρων άλλων προσεγγίσεων όπως η εναλλαγή των αυτοκινήτων σε ηλεκτρικά, η αλλαγή λαμπτήρων σε LED κ.ο.κ. Η εγκατάσταση ΑΠΕ όμως δεν συνεπάγεται και ανεξαρτησία από τα ορυκτά καύσιμα, τουλάχιστον όχι ακόμα. Ο λόγος που ισχύει κάτι τέτοιο είναι επειδή τα περισσότερα συστήματα ΑΠΕ δεν παρέχουν σταθερό ρεύμα καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας αλλά για συγκεκριμένες περιόδους, όπως όταν υπάρχει π.χ. ηλιοφάνεια, αέρας, κύμα. Υπάρχουν και φορές που η παραγωγή των ΑΠΕ ξεπερνάει την ζήτηση και παρόλο που τα συστήματα αυτά είναι ικανά να παράγουν ρεύμα αναγκαστικά αποσυνδέονται. Η περίσσεια ενέργεια όμως θα μπορούσε να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί αργότερα. Με αυτό τον τρόπο, περίσσεια ενέργεια τις μεσημεριανές ώρες από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί το βράδυ μειώνοντας έτσι τις αιχμές ζήτησης ενέργειας και γεμίζοντας τις κοιλάδες. Τα πλεονεκτήματα της ενεργειακής αποθήκευσης είναι τα ακόλουθα:

- Αύξηση της παραγωγής από ΑΠΕ.
- Μείωση των λειτουργικών εξόδων και του κεφαλαίου εγκατάστασης νέων συμβατικών μονάδων παραγωγής.





Εικόνα 4.1 Το ηλεκτρικό φορτίο που ζητήθηκε το 2016, 2017 και 2018 στην Κρήτη μαζί με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες. Στοιχεία ΔΕΔΔΗΕ “Ετήσια έκθεση Κρήτης 2018” [13].

- Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον.
- Βελτίωση της ευεξίας και της αξιοπιστίας του συστήματος, με την εξασφάλιση εφεδρείας ηλεκτρικής ισχύος.
- Βελτιστοποίηση της χρήσης του υπάρχοντος δικτύου μεταφοράς και διανομής και ελαχιστοποίηση των εξόδων για την ενίσχυση του.
- Λειτουργία σε αυτόνομες εφαρμογές, όπως ως συσκευές αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS).

Η ενεργειακή αποθήκευση παρέχει επίσης ευεξία στο δίκτυο παροχής ηλεκτρισμού όσον αφορά την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παραγωγική πηγή, επιφέροντας έτσι εξοικονόμηση στις λειτουργικές δαπάνες και στις επενδύσεις κεφαλαίων, όπως η στρεφόμενη εφεδρεία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσωρινή υποστήριξη της παραγωγής, ρύθμιση της συχνότητας για αυτόνομες μονάδες και αναβολή εγκατάστασης νέων μονάδων παραγωγής. Επιπρόσθετα, η αποθήκευση της ενέργειας μπορεί να συνεισφέρει στη μείωση του ρεύματος στις μεμονωμένες γραμμές μεταφοράς που είναι κοντά στη μέγιστη ονομαστική τιμή, με την μείωση του φορτίου αιχμής του υποσταθμού. Παρακάτω φαίνεται το σύνολο των εφαρμογών των αποθηκευτικών διατάξεων σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας:

- **Load Leveling:** Είναι η αποθήκευση φθηνής πλεονάζουσας ενέργειας που παράγεται από τις μονάδες βάσης κατά τις περιόδους εκτός αιχμής και η χρησιμοποίησή της σε περιόδους αιχμής φορτίου, αντί της χρήσης των ακριβών μονάδων. Η εφαρμογή αυτή αφορά το στάδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

- **Transmission Voltage Regulation:** Είναι η διατήρηση της τιμής της τάσης μέσα σε συγκεκριμένα προκαθορισμένα όρια διακύμανσης, τόσο κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας όσο και στα σημεία του φορτίου. Αφορά το στάδιο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Power Quality Improvement:** Διακρίνεται σε μικρής διάρκειας βελτίωση ποιότητας ισχύος η οποία σχετίζεται με την εξομάλυνση απότομων βυθίσεων και αιχμών τάσης, για χρονικό διάστημα από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι μερικά λεπτά για απαιτήσεις ισχύος  $< 1\text{ MW}$ , και σε μεγάλης διάρκειας βελτίωση ποιότητας η οποία σχετίζεται με ότι και η προηγούμενη, αλλά για απαιτήσεις ισχύος  $> 1\text{ MW}$  για χρονική διάρκεια 1 - 2 ώρες.
- **Spinning Reserve:** Ονομάζεται και στρεφόμενη εφεδρεία. Είναι η διατήρηση μέρους της παραγωγής ισχύος από τις μονάδες και η παροχή της σε έκτακτες χρονικές στιγμές (π.χ. λόγω βλάβης μιας γεννήτριας), προκειμένου να συνεχιστεί η αδιάλειπτη παροχή ισχύος στους πελάτες μιας ηλεκτρικής εταιρίας. Η εφαρμογή αυτή απαιτεί αποθήκευση ισχύος της τάξης των 10 - 100 MW για χρονικό διάστημα  $< 30$  λεπτών.
- **Black - start:** Είναι η ικανότητα ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να τεθεί σε λειτουργία μετά από την πλήρη αποκοπή του από το δίκτυο λόγω κάποιου σφάλματος. Μερικές μονάδες παραγωγής (όπως για παράδειγμα οι πυρηνικές μονάδες) απαιτούν μια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας για να επανεκκινηθούν μετά από ένα σφάλμα. Η απαιτούμενη αυτή ενέργεια για την επανεκκίνηση της μπορεί να δίνεται πλέον από την αποθηκευμένη.
- **Transmission & Distribution System Stability:** Αφορά τη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος μεταφοράς και διανομής και την αποτροπή της κατάρρευσης του. Για την εφαρμογή αυτή απαιτείται ισχύς  $> 100\text{ MW}$  για χρονική διάρκεια μερικών δευτερολέπτων.
- **Frequency Control:** Είναι ο έλεγχος για τη διατήρηση της συχνότητας στην ονομαστική της τιμή.
- **Generation Capacity Deferral:** Είναι η αναβολή της αύξησης της συνολικά εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων παραγωγής, με την τροφοδότηση της αιχμής του φορτίου από διατάξεις αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η εφαρμογή αυτή απαιτεί 10 – 100 MW για 2 - 4 ώρες.
- **Transmission & Distribution Facility Deferral:** Είναι η αναβολή της εγκατάστασης νέων γραμμών μεταφοράς και διανομής, τροφοδοτώντας την αιχμή φορτίου μέσω μη υπερφορτωμένων γραμμών από αποθηκευτικές διατάξεις ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Renewable Energy Management:** Χρήση αποθηκευμένης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για κάλυψη της ζήτησης.
- Απόσβεση ταλαντώσεων στις σύγχρονες γεννήτριες μετά από σφάλμα.
- Εξομάλυνση της μεταβλητότητας της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος από τα αιολικά πάρκα.

## 4.2 Διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν διατάξεις οι οποίες είναι κυρίως βοηθητικές για το δίκτυο, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μικρά χρονικά διαστήματα. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την βελτίωση ποιότητας ισχύος στα ηλεκτρικά συστήματα και

συγκεκριμένα για την σταθεροποίηση της τάσης σε περιπτώσεις βυθίσεων ή κυματισμών που διαρκούν από δευτερόλεπτα έως λίγα λεπτά. Τέτοια συστήματα είναι:

- Στρεφόμενοι σφόνδυλοι (flywheels)
- Υπερπυκνωτές (supercapacitors)
- Υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης (SMES)

### **4.3 Διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης**

Σε αντίθεση με την παραπάνω κατηγορία, τα συστήματα αυτά μπορούν να αποθηκεύσουν και να αποδώσουν ενέργεια για μεγάλες χρονικές περιόδους, ώρες αλλά και ημέρες. Χρησιμοποιούνται για την διαχείριση της ενέργειας, την ρύθμιση της συχνότητας και της αποσυμφόρησης του δικτύου. Τέτοια συστήματα είναι:

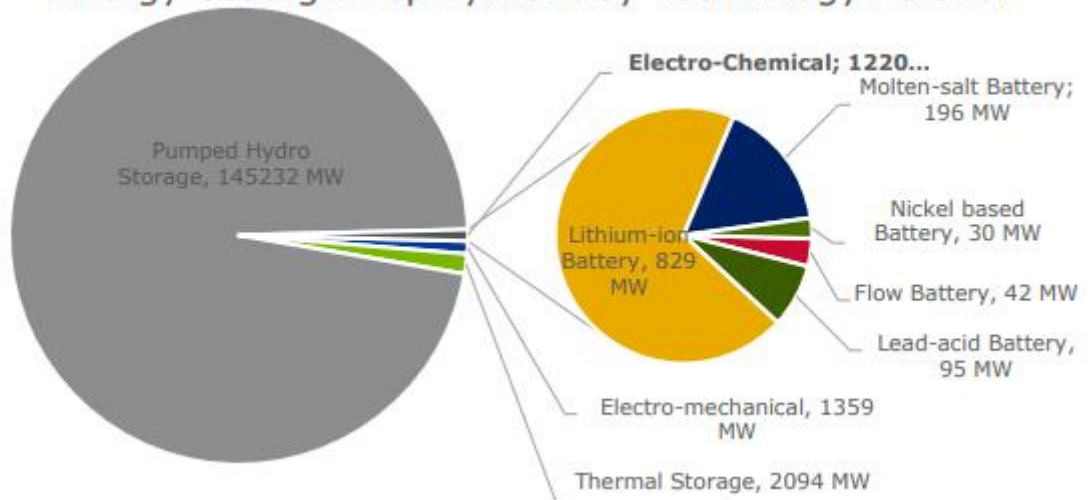
- Μπαταρίες
- Θερμικά συστήματα αποθήκευσης
- Αντλησιοταμίευση
- Συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (CAES)
- Τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης υδρογόνου

### **4.4 Μορφές αποθήκευσης ενέργειας**

Η ενέργεια που αποθηκεύεται δεν είναι απαραίτητο να είναι πάντα ηλεκτρική. Σε πολλές εφαρμογές η διατιθέμενη ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική την στιγμή που απαιτείται η χρήση της, επειδή είναι πιο ακριβό και λιγότερο αποδοτικό να μετατραπεί αμέσως σε ηλεκτρική και να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον. Τέτοιες μορφές είναι:

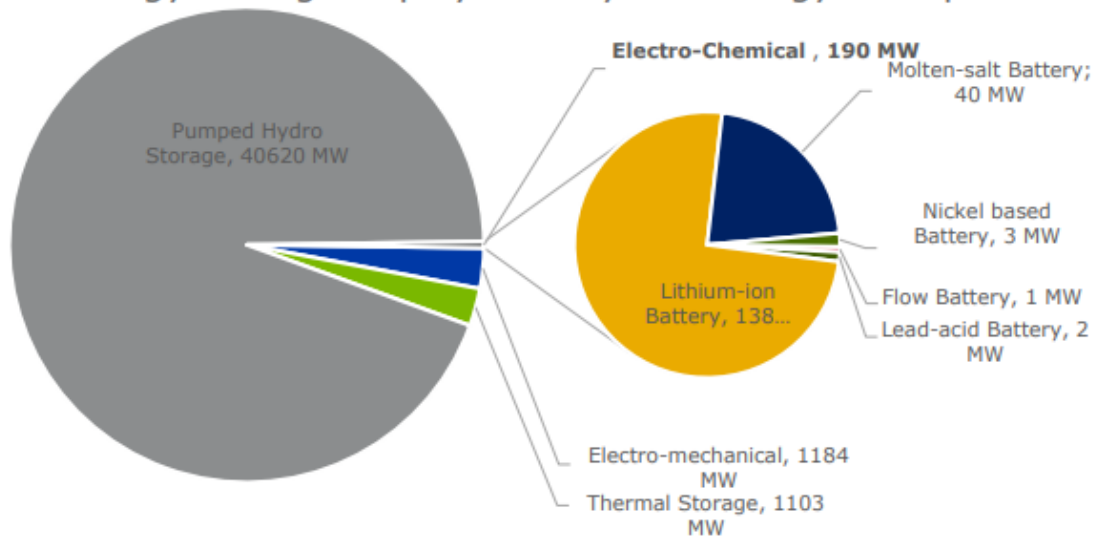
- Ηλεκτροχημική
- Ηλεκτρομηχανική
- Αντλησιοταμίευσης
- Θερμική

### Energy Storage Deployment by Technology: Global



Εικόνα 4.2 Παγκόσμια αποθηκευτική ικανότητα.

### Energy Storage Deployment by Technology: Europe



Εικόνα 4.3 Ευρωπαϊκή αποθηκευτική ικανότητα.

---

# 5.

## ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

---

### 5.1 Υδροηλεκτρικά συστήματα αντλησιοταμίευσης

Η τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας σε αντλούμενο νερό είναι πλέον η πιο ώριμη και διαδεδομένη τεχνική αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Όπως φαίνεται στις εικόνες 4.2 και 4.3 υπάρχουν παγκοσμίως 145 GW (40 GW μόνο στην Ευρώπη) μονάδες αντλησιοταμίευσης και αποτελούν τον κύριο τρόπο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε όλη την γη.

Το υδροηλεκτρικό σύστημα αποτελείται από δύο μεγάλες δεξαμενές οι οποίες έχουν μια υψομετρική διαφορά μεταξύ τους και συνδέονται μέσω μιας διάταξης με διάφορες αντλίες και υδροστροβίλους. Κατά την περίοδο χαμηλής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, γίνεται άντληση νερού από την χαμηλή δεξαμενή στην υψηλή. Όταν γεμίσει η πάνω δεξαμενή, σταματάει η άντληση και το νερό αποθηκεύεται μέχρι να χρειαστεί. Σε περιόδους υψηλής ζήτησης το αποθηκευμένο νερό στην πάνω δεξαμενή απελευθερώνεται και ο υδροστροβίλος περιστρέφει έναν κινητήρα/γεννήτρια με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Με αυτό τον τρόπο χρησιμοποιείται ο ίδιος εξοπλισμός για άντληση και παραγωγή ισχύος.

Η κυκλική αυτή διαδρομή έχει απόδοση της τάξεως του 70-80%. Οι επιπτώσεις που υφίστανται αυτά τα συστήματα, λόγω απωλειών στις σωληνώσεις ή του βαθμού απόδοσης αντλίας/στροβίλου, αντισταθμίζονται εύκολα από τα οικονομικά οφέλη που έχει η πώληση της ενέργειας κατά την διάρκεια των περιόδων ζήτησης αιχμής.

Η διαθέσιμη ενέργεια στην άνω δεξαμενή, σε σχέση με την χαμηλότερη, δίδεται από:

$$E = \frac{\rho \cdot A \cdot g \cdot \Delta h \cdot H}{3.6 \cdot 10^6} \quad (5.1)$$

Όπου:

$E$  είναι η ενέργεια ( $kWh$ )

$\rho$  είναι η πυκνότητα του νερού ( $1000 \text{ kg} / \text{m}^3$ )

$A$  είναι η επιφάνεια στην πάνω δεξαμενή ( $\text{m}^2$ )

$g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9.81 \text{ m} / \text{sec}^2$ )

$\Delta h$  είναι η επιτρεπόμενη μεταβολή στο ύψος του νερού ( $m$ )

$H$  η υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο δεξαμενών ( $m$ ) και

ο συντελεστής  $3.6 \cdot 10^6$  μετατρέπει τις μονάδες από *Joule* σε *kWh*.

Τα συστήματα αυτά έχουν πολύ γρήγορη ανταπόκριση αφού μπορούν να ξεκινήσουν και να σταματήσουν την λειτουργία τους σε λίγα λεπτά και συνεπώς μπορούν να μεταβούν από λειτουργία αντλίας σε λειτουργία γεννήτριας σε λιγότερο από μισή ώρα. Κάτι τέτοιο τα καθιστά ιδανικά για την παρακολούθηση των φορτίων, την σταθεροποίηση του δικτύου καθώς επίσης και παροχή μη ρυπογόνων στρεφόμενων εφεδρειών. Ο χρόνος απόκρισης είναι συνήθως 10 λεπτά (black-start) και αν το σύστημα είναι σε κατάσταση αναμονής μπορεί να μπει στο δίκτυο μέσα σε 10-30 sec. . Ακόμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γεωργικούς σκοπούς όπως η άρδευση καλλιεργειών [3].

### 5.1.1 Συνδυασμός με άλλες ΑΠΕ

Ένας άλλος τρόπος αξιοποίησης των μικρών μονάδων ΑΠΕ, όπως ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά θα ήταν ο συνδυασμός τους με συστήματα αντλησιοταμίευσης. Κατά την περίοδο χαμηλής κατανάλωσης τα Φ/Β και οι ανεμογεννήτριες θα πρέπει να σταματήσουν να διοχετεύουν με ρεύμα το δίκτυο. Εκτός από αποθήκευση, η ενέργεια αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την άντληση του νερού στην άνω δεξαμενή. Με αυτό τον τρόπο το σύστημα γίνεται πιο αποδοτικό και αρκετά πιο οικονομικό, αφού δεν γίνεται αγορά ρεύματος από δίκτυο, που είναι πιο ακριβό από το πλεονάζον ρεύμα που παρέχουν εκείνη την στιγμή οι ΑΠΕ. Παράλληλα, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς καταναλώνεται άμεσα και αποφεύγονται οι απώλειες από τα διάφορα μέσα αποθήκευσης και το κόστος επένδυσης.

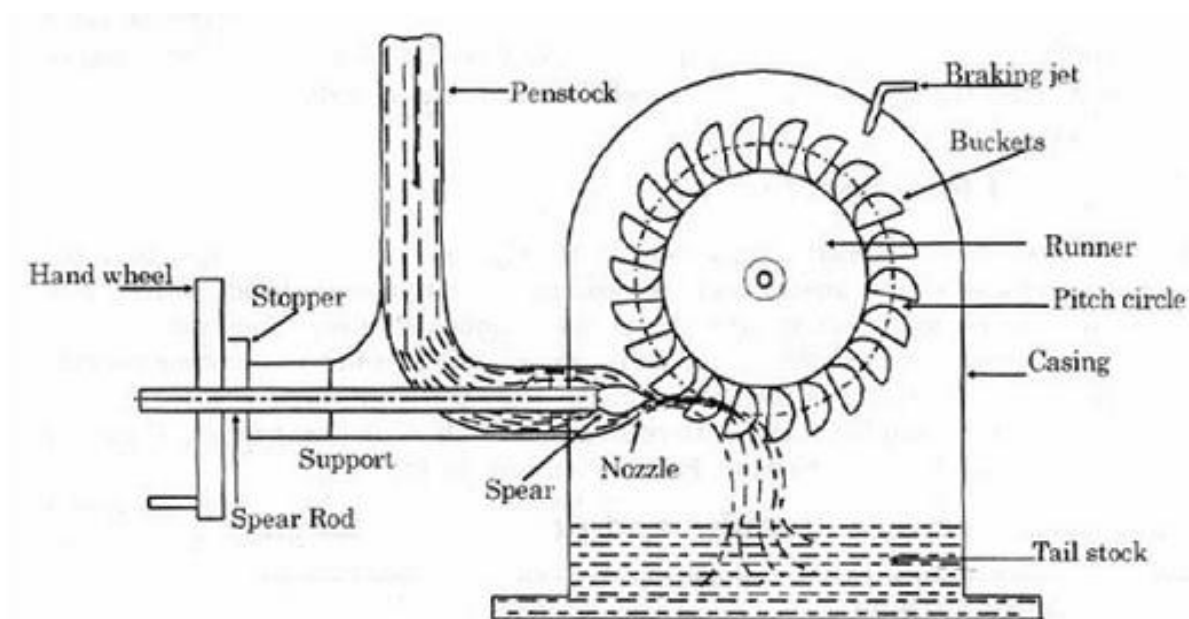
### 5.1.2 Υδροστρόβιλοι

Ο υδροστρόβιλος είναι ένας ρότορας που μετατρέπει την δυναμική και κινητική ενέργεια του νερού σε μηχανική και μεταδίδει αυτή την κίνηση σε ηλεκτρογεννήτρια η οποία παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Η ονομαστική τους ισχύς, μπορεί να ξεκινά από 10 *kW* και να φτάνει μέχρι και μερικές εκατοντάδες *MW* . Σχεδιάζονται ανάλογα το υδραυλικό ύψος, μικρό <50 *m* , μεσαίο 5 *m* - 500 *m* , μεγάλο >500 *m* , την παροχή και τον τρόπο που μεταφέρεται η ενέργεια σε αυτούς, κατηγοριοποιώντας τους σε δύο κατηγορίες. Στους υδροστρόβιλους δράσης και αντίδρασης.

Οι υδροστρόβιλοι δράσης μετατρέπουν την δυναμική ενέργεια του νερού σε κινητική ενέργεια, μιας δέσμης νερού που εκρέει με ορμή από υψηλής πίεσης ακροφύσια πάνω σε σκαφίδια ή στα πτερύγια του δρομέα. Τα σκαφίδια είναι ειδικά σχεδιασμένα για να εκμεταλλεύονται όσο το δυνατόν περισσότερη τη κινητική ενέργεια του νερού. Αυτοί οι υδροστρόβιλοι έχουν τυπικά αποδόσεις εύρους 70 - 90%. Οι πιο διάσημοι υδροστρόβιλοι

δράσης είναι ο στρόβιλος Pelton που φαίνεται και στην Εικόνα 5.1 και χρησιμοποιείται για μεγάλα ύψη και μικρές παροχές νερού.

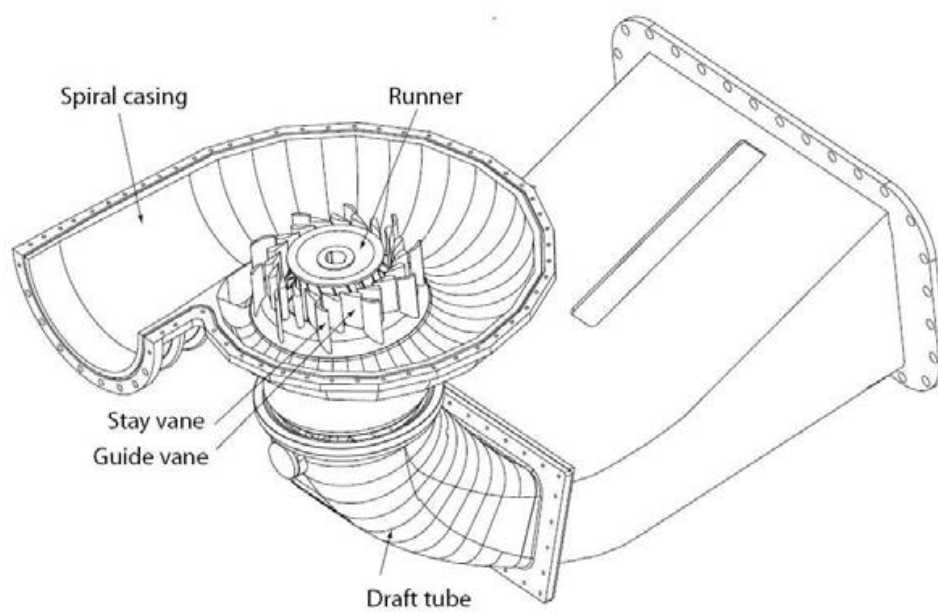
Οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης, σε αντίθεση με τους παραπάνω, δεν βασίζονται στην ταχύτητα του νερού αλλά στην διαφορά πίεσης κατά μήκος του δρομέα η οποία δημιουργεί την επιθυμητή ροπή σε αυτούς. Το νερό εισάγεται ολοκληρωτικά στην περιφέρεια του ρότορα και αυτός παραμένει βυθισμένος στο νερό καθ' όλη την διάρκεια της ηλεκτροπαραγωγής, παράγοντας την ισχύ από την μάζα του νερού που κινείται μέσα από αυτούς. Χρησιμοποιούνται για εγκαταστάσεις χαμηλού ύψους με μεγάλες παροχές. Για μεσαίες τιμές υδραυλικής πτώσης, οι επικρατέστεροι είναι οι υδροστρόβιλοι Francis, που φαίνεται στην Εικόνα 5.3, ενώ για μικρές τιμές οι Kaplan, Εικόνα 5.4 [5].



Εικόνα 5.1 Διάγραμμα μηχανής Pelton με τα διάφορα μέρη της.

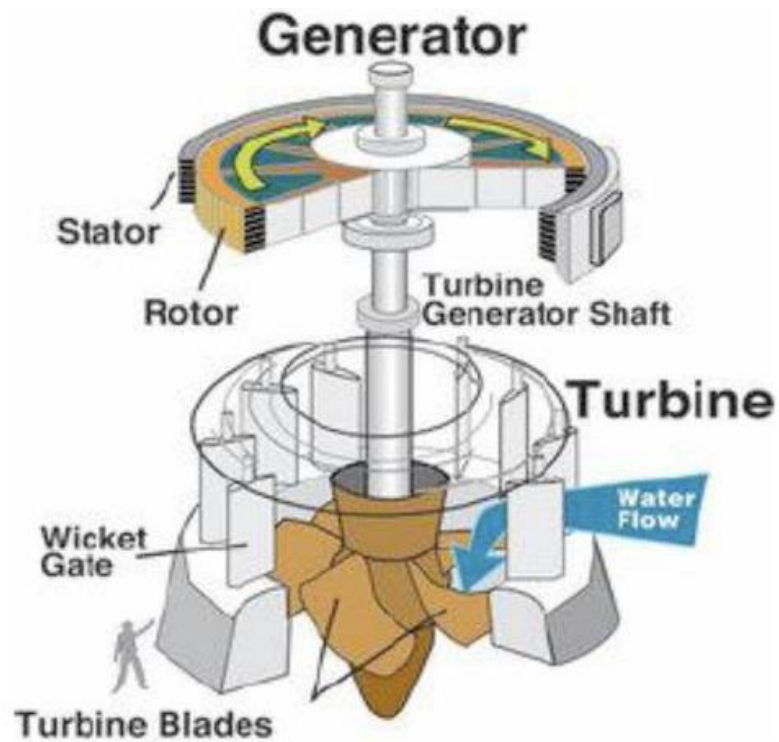


*Εικόνα 5.2 Μηχανή Pelton.*

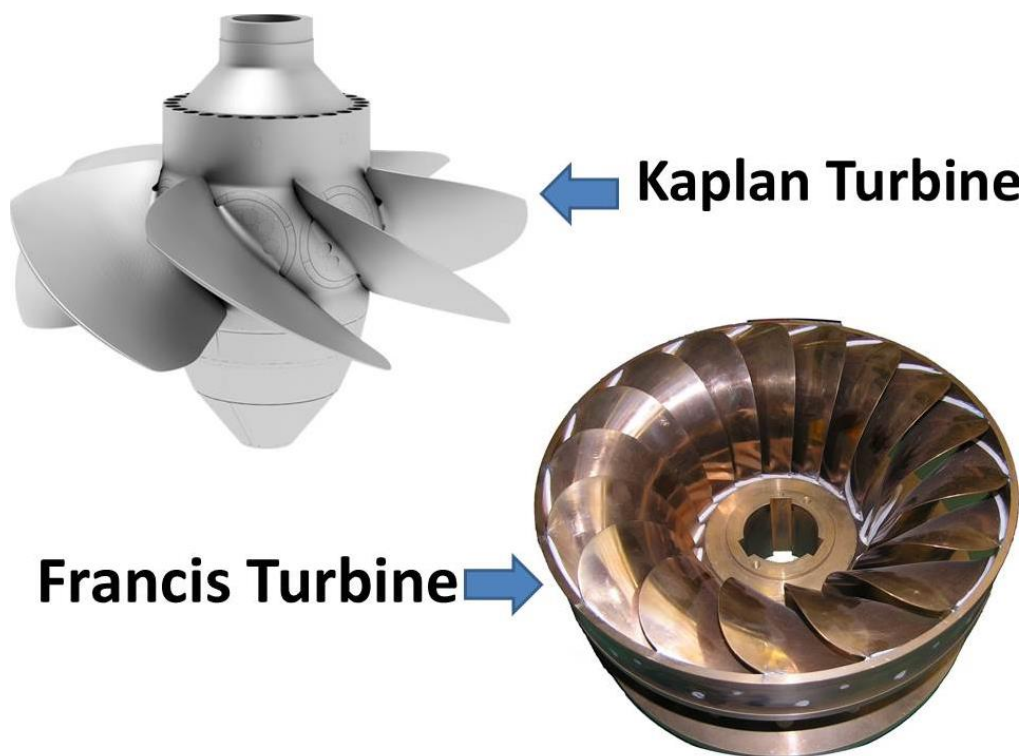


*Εικόνα 5.3 Διάγραμμα μηχανής Francis.*

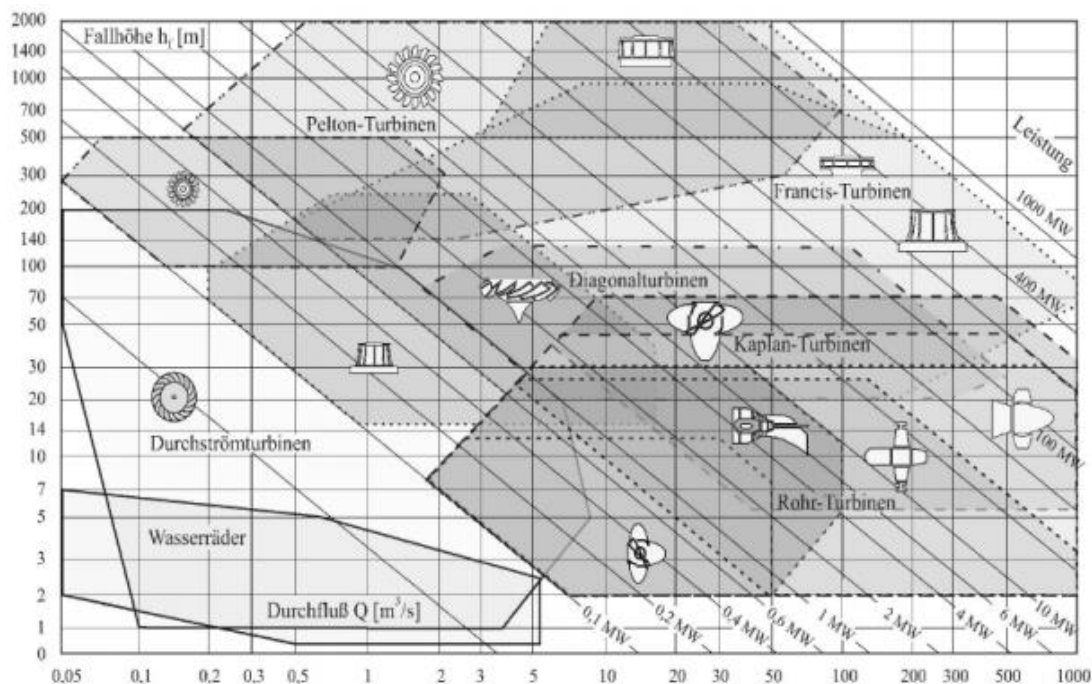




*Εικόνα 5.4 Διάγραμμα μηχανής Kaplan.*



*Εικόνα 5.5 Μηχανές Kaplan και Francis.*



Εικόνα 5.6 Πίνακας εφαρμογής κατάλληλου στροβίλου ανάλογα το ύψος και τον όγκο ύδατος.

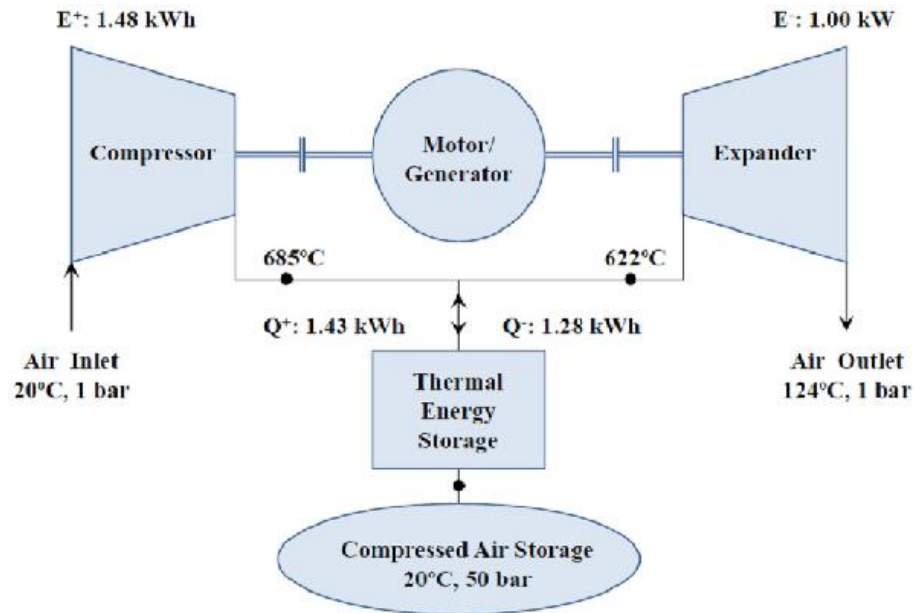
### 5.1.3 Μειονεκτήματα

Παρόλο που η αντλησιοταμίευση είναι ο καλύτερος τρόπος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, δεν είναι πάντα εφικτή. Ως κύρια μειονεκτήματα χαρακτηρίζονται οι γεωγραφικές και τοπολογικές δυσκολίες αφού χρειάζονται μεγάλες υψομετρικές διαφορές σε σχετικά μικρή απόσταση, γύρω στα 300 m, καθώς και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την κατασκευή του φράγματος, όπως η αποψίλωση δασικών περιοχών το οποίο έχει συνέπειες στην πανίδα και στην χλωρίδα. Άλλο μειονέκτημα επίσης είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου που οφείλεται κυρίως στην κατασκευή των δύο ταμιευτήρων. Γι' αυτό για την κατασκευή ενός τέτοιου έργου χρειάζεται προσεκτική μελέτη και έμπειρους μηχανικούς για την αποφυγή των προβλημάτων αυτών. Η αύξηση των αντλησιοταμιευτήρων σε τελική ανάλυση βελτιώνει την ζωή του ανθρώπου αφού μειώνει το κόστος ανά  $kW$  και την χρήση των συμβατικών τρόπων παραγωγής ενέργειας, μειώνοντας έτσι τα αρνητικά που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3. Το φράγμα The Three Gorges στην Κίνα, για παράδειγμα, μπορεί να εκτόπισε πάνω από ένα εκατομμύριο ανθρώπους αλλά συμβάλει στην παραγωγή σημαντικής ενέργειας για όλη την χώρα.

## 5.2 Συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα

Τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, ή αλλιώς CAES (Compressed Air Energy Storage) είναι ένας ακόμα τρόπος αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για μεγάλη διάρκεια. Ο τρόπος λειτουργίας περιλαμβάνει την συμπίεση αέρα σε υπόγειο αεροστεγή ταμιευτήρα με πιέσεις τάξεως 40-90 bar. Σε περιόδους αιχμής, ο αέρας αυτός αποσυμπιέζεται και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο τρόπος αυτός θεωρείται ανταγωνιστικός αφού έχει απόδοση έως και 80% και ικανότητα παροχής ενέργειας μέχρι και 220-250 MWh. Πιο συγκεκριμένα, τα βασικά συστατικά ενός τέτοιου συστήματος είναι ο

συμπιεστής, η γεννήτρια, ο αποσυμπιεστής και ο θάλαμος αποθήκευσης του αέρα, τα οποία φαίνονται και στην Εικόνα 5.7 [3].



Εικόνα 5.7 Διάγραμμα συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα.

### 5.2.1 Τρόπος λειτουργίας

Κατά την συμπίεση του αέρα η θερμοκρασία του αυξάνεται. Όταν όμως βρίσκεται μέσα στους ταμιευτήρες τότε σταδιακά η θερμοκρασία επανέρχεται λόγω των απωλειών στις φυσιολογικές του τιμές, ενώ η πίεση παραμένει υψηλή. Κατά την αποσυμπίεση του, αναλογικά μειώνεται πάλι η θερμοκρασία του και χρειάζεται να θερμανθεί, αλλιώς θα βλάψει τον στρόβιλο. Ο τρόπος που θερμαίνεται γίνεται με την καύση φυσικού αερίου. Όταν έρθει το μίγμα στην επιθυμητή θερμοκρασία τότε οδηγείται στον στρόβιλο ο οποίος είναι συνδεδεμένος με μια γεννήτρια με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επειδή ο τρόπος αυτός καθιστά αναγκαία την καύση φυσικού αερίου δεν θεωρείται 100% ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

### 5.2.2 Μειονεκτήματα

Οι γεωλογικές απαιτήσεις ενός τέτοιου έργου το καθιστούν μη συμβατό με όλες τις περιοχές αφού χρειάζεται το έδαφος να μην είναι πορώδες, επειδή ο αέρας θα διαχέεται μέσα από αυτό με αποτέλεσμα να χάνεται κάνοντας έτσι το έργο λιγότερο αποδοτικό. Επιπρόσθετα, η κατασκευή ενός υπόγειου ταμιευτήρα προϋποθέτει τη διάθεση σημαντικού αρχικού κεφαλαίου που σε πολλές περιπτώσεις καθιστά την πραγματοποίηση ανάλογων σχεδίων ασύμφορη.

## 5.3 Συστήματα αποθήκευσης με σφόνδυλο

Οι σφόνδυλοι (flywheels) είναι ένας διαφορετικός τρόπος αποθήκευσης ενέργειας από τις προαναφερθείσες αφού η ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει διαρκεί για λίγη ώρα. Είναι από τους αρχαιότερους τρόπους αποθήκευσης ενέργειας αφού οι κεραμοποιοί το χρησιμοποιούσαν για να πλάσουν αγγεία. Σήμερα έχει εκσυγχρονιστεί και αποτελείται από

μια περιστρεφόμενη μάζα γύρω από έναν άξονα και μια ηλεκτρική συσκευή η οποία λειτουργεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια. Η συσκευή αυτή λειτουργεί αρχικά ως κινητήρας για να περιστρέψει τον σφόνδυλο, μεταφέροντας μηχανική ενέργεια σε αυτόν. Μόλις ο σφόνδυλος αρχίσει να περιστρέφεται, τότε αποτελεί ουσιαστικά μια μηχανική μπαταρία η οποία εμπεριέχει ένα ποσό ενέργειας το οποίο αποθηκεύει ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής και την ροπή αδράνειας του. Η ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας στο σφόνδυλο εξαρτάται τόσο από την ταχύτητα με την οποία αυτός περιστρέφεται, όσο και από τη μάζα του περιστρεφόμενου κυλίνδρου και την κατανομή της γύρω από τον άξονα. Η εξίσωση που δείχνει αυτό το μέγεθος είναι:

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (5.2)$$

Όπου:

$E$  είναι η ενέργεια (*Joule*)

$J$  η ροπή αδράνειας της συνολικής μάζας του κινητού μέρους ( $kg \cdot m^2$ ) και

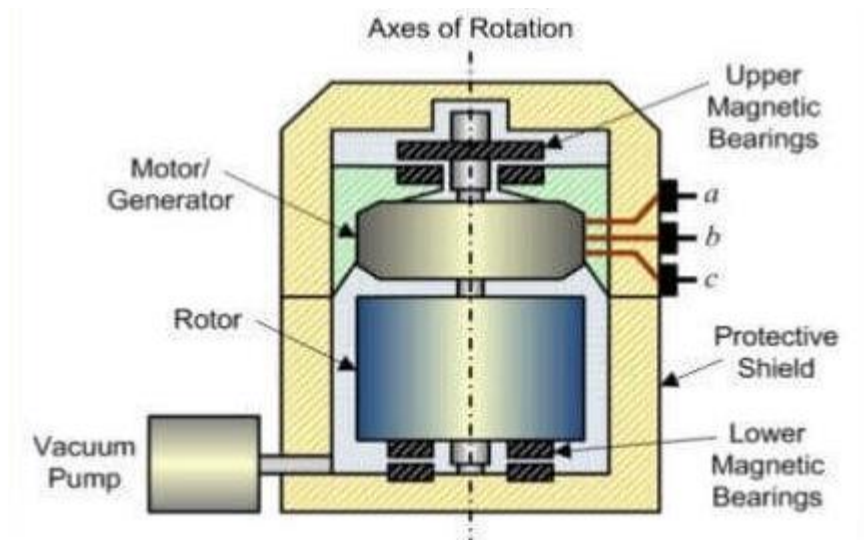
$\omega$  η γωνιακή ταχύτητα ( $rad / sec$ ).

### 5.3.1 Τρόπος λειτουργίας

Για να ανακτήσουμε την ενέργεια αυτή, πρέπει να επιβραδύνουμε τον σφόνδυλο με αποτέλεσμα να επιστρέψει η κινητική ενέργεια στην ηλεκτρική μηχανή. Με αυτό τον τρόπο η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια παράγοντας ηλεκτρική ισχύ.

Οι σύγχρονοι σφόνδυλοι υψηλής ταχύτητας λειτουργούν με χαμηλότερες απώλειες, λόγω του ότι βρίσκονται μέσα σε κενό αέρος, το οποίο ελαχιστοποιεί τις τριβές, το υπ' αριθμόν ένα πρόβλημα αυτής της τεχνολογίας. Οι σφόνδυλοι υψηλής ταχύτητας συνήθως προτιμώνται, αφού μπορούν με πολύ λιγότερη μάζα, άρα και κόστος υλικού, να αποθηκεύσουν την ίδια ποσότητα ενέργειας. Ακόμη, η μικρότερη μάζα καθιστά ευκολότερο, για τα μαγνητικά ρουλεμάν που πια έχουν αντικαταστήσει τα μηχανικά, να στηρίξουν το σφόνδυλο.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά του συστήματος αποθήκευσης με σφόνδυλο είναι η υψηλή παραγόμενη ισχύς, οι σχετικά μικρές ανάγκες συντήρησης, η φιλικότητα του συστήματος ως προς το περιβάλλον, η συμβολή του συστήματος στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας (γρήγορη και άμεση ηλεκτροπαραγωγή) και η υψηλή συνολική απόδοση (85%). Πάραυτα, τα συστήματα αυτά δεν ενδείκνυται για ισχύες πάνω από κάποιες εκατοντάδες  $kW$  και η βασική περίοδος λειτουργίας φτάνει σε διάστημα κάποιων ωρών. Για αυτούς τους λόγους, το σύστημα αποθήκευσης με σφόνδυλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για πολύ μικρές εγκαταστάσεις, όπως τα πολύ μικρά νησιά, για σταθεροποίηση δικτύου ή ως σύστημα άμεσης εφεδρείας [4].



Εικόνα 5.8 Διάγραμμα ενός σύγχρονου συστήματος στρεφόμενου σφονδύλου.

## 5.4 Συστήματα αποθήκευσης με μπαταρίες

Οι μπαταρίες ή συσσωρευτές αποτελούν το αντικείμενο μελέτης πολλών επιστημόνων αφού τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές όπως σε έξυπνα σπίτια, αυτοκίνητα, ηλεκτρικές συσκευές κ.α., των οποίων η χωρητικότητα, η απόδοση και η διάρκεια ζωής τους ποικίλλει σημαντικά, ανάλογα με την τεχνολογία τους. Λειτουργούν μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική κατά την φόρτιση και την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική κατά την εκφόρτιση. Δεν είναι δυνατό όλων των τύπων οι μπαταρίες να επαναφορτιστούν. Μπορούν να συνδεθούν πολλές μπαταρίες μεταξύ τους και η συνδεσμολογία τους ποικίλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος που συνδέονται.

Αποτελούνται από δύο πλάκες, οι οποίες είναι φτιαγμένες από διαφορετικά αγωγία μέταλλα, τα οποία ονομάζονται ηλεκτρόδια και είναι βυθισμένα σε ένα αγωγίμο υγρό που ονομάζεται ηλεκτρολύτης. Όταν συνδεθεί σε κύκλωμα, ξεκινάει μια χημική αντίδραση μεταξύ των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα την μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο.

Αυτός ο τρόπος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται ώριμος και ενδείκνυται για την αποθήκευση μικρών ποσοτήτων ενέργειας. Για αποθήκευση ενέργειας μεγάλων ποσοτήτων θεωρείται αρκετά ακριβή επένδυση αφού απαιτούν συντήρηση και διάφορα ηλεκτρικά μέσα για την ανόρθωση, την μετατροπή συχνοτήτων και την σταθεροποίηση της τάσης και της συχνότητας.

### 5.4.1 Διάφορες μορφές μπαταριών

Υπάρχουν πολλές μορφές μπαταριών με ποικίλα χαρακτηριστικά για διάφορες εφαρμογές και λειτουργίες. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι :

- Μπαταρίες ιόντων-λιθίου (Li-Ion), οι οποίες είναι σύγχρονες και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές και διάφορα άλλα ηλεκτρονικά. Έχουν υψηλή απόδοση, μεγάλη πυκνότητα ενέργειας και έχουν την δυνατότητα επαναφόρτισης.

- Μπαταρίες μολύβδου-οξέος (Lead-Acid), οι οποίες έχουν μικρό κόστος αγοράς αλλά και μικρή διάρκεια ζωής. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως τα συμβατικά αυτοκίνητα και έχουν επίσης την δυνατότητα επαναφόρτισης.
- Μπαταρίες νατρίου-θείου (NaS), οι οποίες έχουν πολύ καλή απόδοση, οριακά μηδενική αυτοεκφόρτιση, ικανοποιητική διάρκεια ζωής και το κόστος τους κυμαίνεται σε λογικά πλαίσια. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για αποθήκευση μεγάλης ποσότητας ενέργειας. Έχουν επίσης την δυνατότητα επαναφόρτισης αλλά το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν, πρέπει να υπερβαίνει την θερμοκρασία των 300 °C [15].

## 5.5 Συστήματα αποθήκευσης με υπερπυκνωτές και υπεραγωγίμα πηνία

Οι υπερπυκνωτές (supercapacitors) είναι στην ουσία πυκνωτές αλλά με χωρητικότητα και ενεργειακή πυκνότητα αρκετά μεγαλύτερη από τους κοινούς. Ο κύριος τρόπος χρήσης τους είναι για την βελτίωση του συντελεστή ισχύος αλλά και την ρύθμιση ενεργής και άεργης ισχύος στο κύκλωμα που είναι συνδεδεμένοι. Μπορούν να διαθέσουν άμεσα την ενέργεια τους, με χρόνους από 0.1 sec μέχρι 60 sec, με παροχή ισχύος της τάξης των 100 kW και απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ 85% και 95%.

Τα υπεραγωγίμα πηνία (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) έχουν την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας μέσω του μαγνητικού τους πεδίου που δημιουργείται με την είσοδο ανορθωμένου DC ρεύματος στα πηνία, μέσω υπεραγωγίων καλωδίων οριακής μηδενικής αντίστασης. Μπορούν να διαθέσουν στιγμιαία την ισχύ τους, τάξης από 2 MW μέχρι 10 MW και είναι πολύ αποδοτικά, αφού ο βαθμός απόδοσης τους φτάνει μέχρι και το 97%. Ακόμα, η διάρκεια ζωής τους δεν επηρεάζεται από τον αριθμό φορτίσεων και εκφορτίσεων.

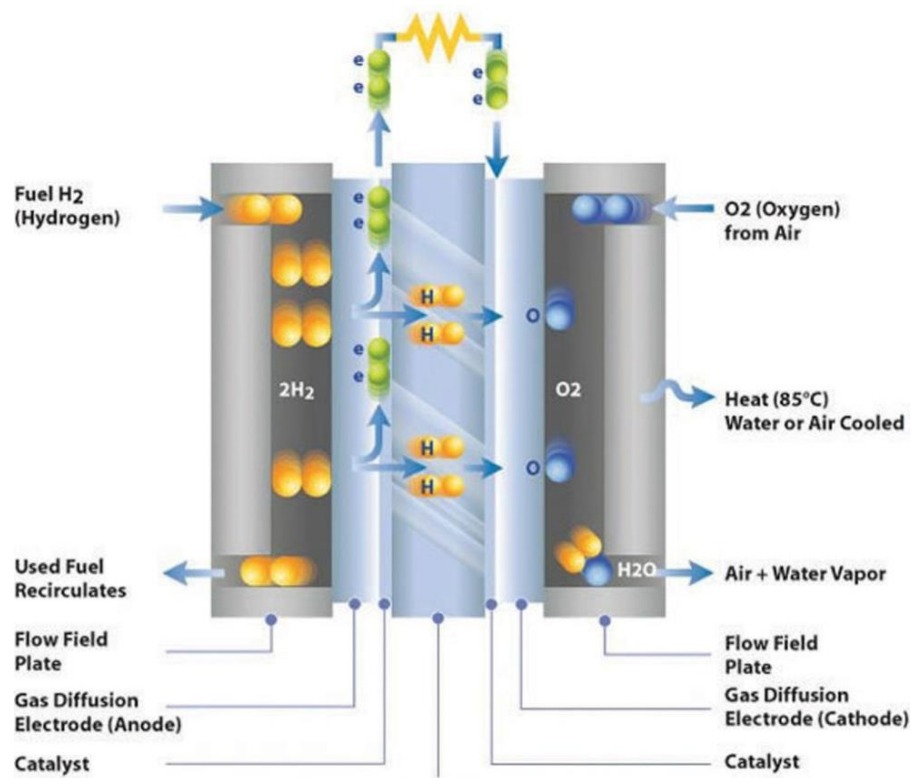
Παρόλο τον μεγάλο τους βαθμό απόδοσης, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας είναι αρκετά υψηλό, καθώς λόγω των ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούν, χρειάζονται ισχυρή ψύξη [3].

## 5.6 Συστήματα αποθήκευσης με κυψέλες καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου (fuel cells) μετατρέπουν την χημική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική. Αποτελείται από μια διάταξη με δύο ηλεκτρόδια τα οποία περιβάλλονται από έναν ηλεκτρολύτη. Από το ένα ηλεκτρόδιο διοχετεύεται το υδρογόνο και από το άλλο το οξυγόνο και μέσω της ηλεκτρόλυσης του υδρογόνου από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο, δημιουργείται ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα, με μοναδικό απόβλητο το νερό. Γενικά, λειτουργεί με παρόμοια τρόπο με μια μπαταρία, χωρίς όμως να χρειάζεται επαναφόρτιση.

Η ενέργεια, που παράγει μια κυψέλη καυσίμου, εξαρτάται από τον τύπο της κυψέλης, την θερμοκρασία λειτουργίας του και τους καταλύτες που χρησιμοποιούνται για την βελτίωση της απόδοσης της χημικής αντίδρασης. Διαφοροποιημένα είναι μεταξύ τους τα στάδια παραγωγής και αποθήκευσης της ενέργειας.

Σημαντικό μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας θεωρείται η χαμηλή συνολική απόδοση, η οποία κυμαίνεται μεταξύ του 30% και 40% για έναν πλήρη κύκλο. Οι κύριες απώλειες εντοπίζονται στην ηλεκτρόλυση του νερού για παραγωγή υδρογόνου, στην αποθήκευση και στην παραγωγή μέσω της κυψέλης καυσίμου. Παρόλη την χαμηλή απόδοση, οι κυψέλες καυσίμου θεωρείται ότι θα συμβάλουν ουσιαστικά στην κάλυψη ενεργειακών αναγκών [3].



Εικόνα 5.9 Διάγραμμα λειτουργίας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου.

---

# 6.

## ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

---

### 6.1 Εισαγωγή

Τον Δεκέμβριο του 2015 έγινε μια συμφωνία ανάμεσα σε όλες τις χώρες του πλανήτη να προβούν σε ενέργειες με σκοπό την μείωση των αερίων που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η συμφωνία αυτή ονομάστηκε «Συμφωνία των Παρισίων» με σκοπό, μέχρι το έτος 2050 να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 80% με αποτέλεσμα να αντιμετωπιστεί η κλιματική αλλαγή και να επανέλθει η θερμοκρασία του πλανήτη σε φυσιολογικά επίπεδα [17]. Για να αντιμετωπίσει αυτή την πρόκληση η Ελλάδα πρέπει να εκμεταλλευτεί τους φυσικούς της πόρους ώστε να αυξηθεί η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και να μειωθεί αυτή που προέρχεται από τις περισσότερες ρυπογόνες θερμικές μονάδες. Τοποθεσίες όπως το νησί της Κρήτης αποτελούν ιδανικές τοποθεσίες για εκμετάλλευσή αιολικού και ηλιακού δυναμικού, αλλά για λόγους ευστάθειας του συστήματος, η διείσδυση παραπάνω από των ήδη εγκατεστημένων μονάδων είναι αδύνατη. Ένας τρόπος να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα είναι η εγκατάσταση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας όπως αυτές που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Η επένδυση σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, τις περισσότερες φορές, απαιτεί μεγάλο επενδυτικό κεφάλαιο και παρουσιάζει μακροχρόνια απόσβεση, γεγονός που δεν προσελκύει επενδυτές. Την λύση ήρθε να δώσει η διασύνδεση του δικτύου της Κρήτης με το δίκτυο της υπόλοιπης Ελλάδας με εμποτισμένους αγωγούς. Με αυτό τον τρόπο θα είναι δυνατή η αξιοποίηση του δυναμικού της Κρήτης σε ΑΠΕ στο έπακρο εξασφαλίζοντας ένα ευσταθές δίκτυο, χωρίς να



επηρεάζεται η συχνότητα του. Τέτοιου τύπου διασυνδέσεις μπορούν να είναι τύπου HVAC ή HVDC.

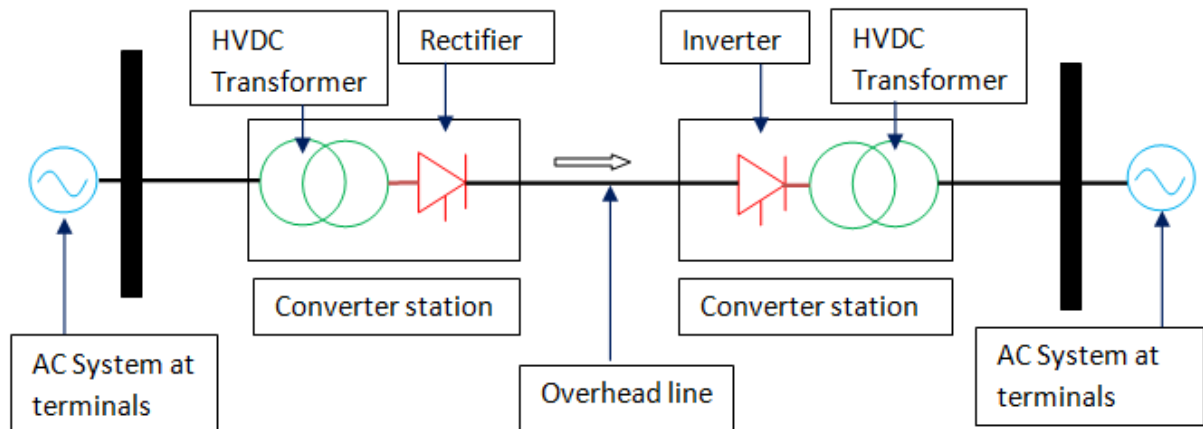
## **6.2 HVAC συστήματα μεταφοράς**

Τα συστήματα μεταφοράς HVAC (High Voltage Alternating Current), υψηλής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος, έχουν την ικανότητα μεταφοράς υψηλής τάσης σε μακρινές αποστάσεις. Οι απαιτήσεις ενός τέτοιου συστήματος είναι η κοινή συχνότητα των διασυνδεδεμένων δικτύων και η κοινή τάση. Οι διακυμάνσεις στην τάση λόγω εισαγωγής ή απώλειας ενός μεγάλου φορτίου ελέγχονται κυρίως από τις ροές άεργου ισχύος. Για λιγότερες απώλειες ενέργειας, στα άκρα του καλωδίου μεταφοράς υπάρχει από έναν μετασχηματιστή για την ανύψωση και την μείωση της τάσης. Τέλος, ο προγραμματισμός της λειτουργίας των μονάδων παραγωγής ενέργειας πραγματοποιείται από τους διαχειριστές του συστήματος ώστε η συχνότητα να παραμένει σε σταθερά επίπεδα.

## **6.3 HVDC συστήματα μεταφοράς**

Τα συστήματα μεταφοράς HVDC (High Voltage Direct Current), υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος, αποτελούν ένα ανταγωνιστικό τρόπο μεταφοράς ενέργειας σε μακρινές αποστάσεις, χωρίς να εξαρτώνται από την συχνότητα όπως τα συστήματα HVAC. Διαθέτουν από ένα μετατροπέα σε κάθε άκρο για την εναλλαγή του ρεύματος από AC σε DC και το αντίθετο. Αυτό γίνεται επειδή το ρεύμα από το δίκτυο είναι σε μορφή AC. Παρόλο που οι απώλειες ενέργειας καθ' όλη την μεταφορά είναι μικρές, τα συστήματα HVDC έχουν μεγάλα κόστη εγκατάστασης αφού η δημιουργία τέτοιων σταθμών μετατροπής απαιτεί υψηλό αρχικό κεφάλαιο [18].

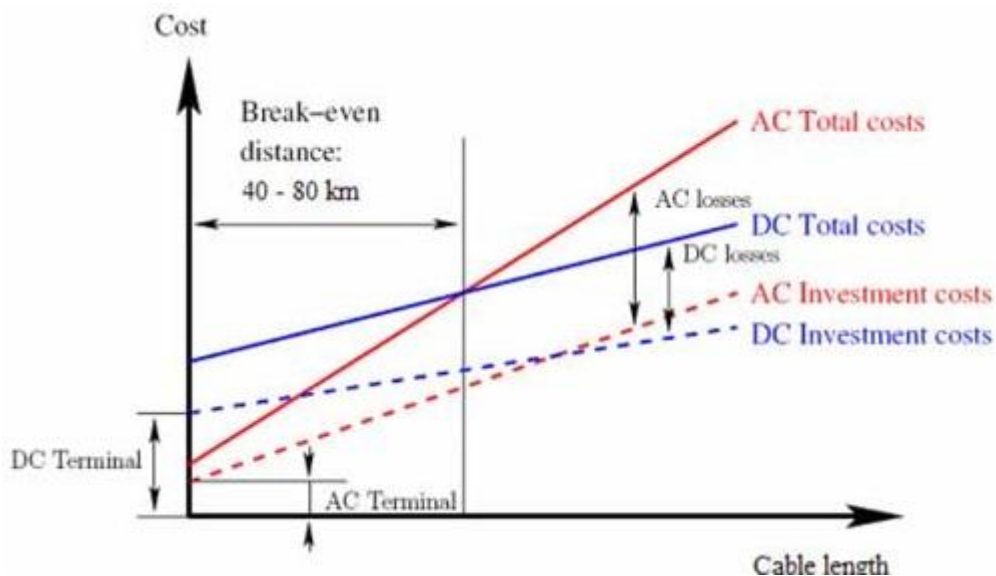
Τα συστήματα HVDC μπορούν να έχουν 2 διαμορφώσεις: Τις μονοπολικές και τις διπολικές. Παρακάτω φαίνεται στην Εικόνα 6.1 ένα απλό διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος. Οι διαμορφώσεις αυτές, έχουν ως διαφορά ότι οι μονοπολικές μπορούν να στέλνουν ή να λαμβάνουν ενέργεια, ενώ οι διπολικές μπορούν να στέλνουν και να λαμβάνουν ταυτόχρονα.



Εικόνα 6.1 Αναπαράσταση συστήματος HVDC. Αριστερά, ζυγός AC συστήματος που ακολουθεί μετασχηματιστής για να φθάσει η τάση στα επιθυμητά επίπεδα και μετατροπéας τάσης AC σε DC. Μετά ο αγωγός μεταφέρει ενέργεια με τάση DC και όταν φτάσει στον τελικό σταθμό, μετατρέπεται ξανά σε AC και με τον κατάλληλο μετασχηματιστή μετατρέπεται στην επιθυμητή τάση του ζυγού στα δεξιά.

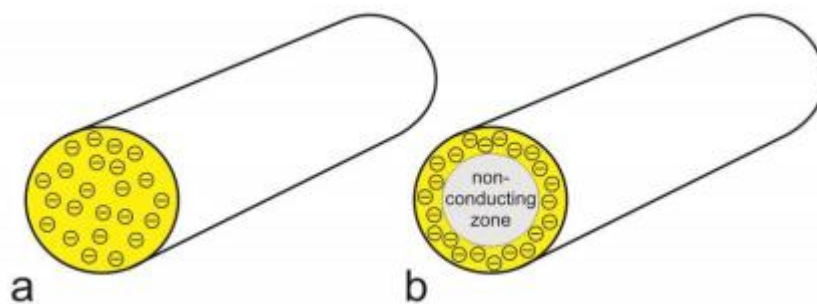
### 6.3.1 Πλεονεκτήματα

- Τα συστήματα μεταφοράς HVDC για μεγάλες αποστάσεις είναι πιο οικονομικά αφού η γραμμή μεταφοράς απαιτεί δύο αγωγούς ενώ τα HVAC συστήματα τρεις. Έτσι το κόστος κατασκευής της γραμμής αντισταθμίζει αυτό των σταθμών μετατροπής. Επίσης μειώνονται οι απαιτήσεις γης, γεγονός που παρουσιάζει πλεονέκτημα ως προς την λήψη άδειας κατασκευής τους.



Εικόνα 6.2 Κόστος HVDC vs HVAC συστημάτων μεταφοράς.

- Για την μεταφορά εναλλασσόμενου ρεύματος σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, απαιτείται η εγκατάσταση σταθμών άεργης αντιστάθμισης σε σημεία ενδιάμεσα των αγωγών, το οποίο αυξάνει το κόστος κατασκευής, ενώ οι γραμμές HVDC δεν χρειάζονται τέτοιο εξοπλισμό.
- Απαλλαγμένα από την συχνότητα, τα συστήματα HVDC μπορούν να ανταλλάξουν ενέργεια με γειτονικές χώρες που έχουν διαφορετική συχνότητα και τάση.
- Λόγω του επιδερμικού φαινομένου στις τεχνολογίες AC, η ενέργεια που μεταφέρεται είναι μικρότερη από τις τεχνολογίες DC για έναν ίδιας διατομής αγωγό.



Εικόνα 6.3 **a:** Αγωγός DC **b:** αγωγός AC.

- Οι τεχνολογίες DC συμβάλουν θετικά σε πολλές λειτουργίες όπως στην ευστάθεια του συστήματος αφού εμποδίζει τις σειριακές διαταραχές από το ένα δίκτυο, στο άλλο. Επιπλέον, παραμένουν αμετάβλητα σε απότομες μεταβολές φορτίων, ενώ τα συστήματα AC θα είχαν αποσυγχρονιστεί.
- Τα συστήματα HVDC συμβάλουν στην εκμετάλλευσή δυναμικού ΑΠΕ σε απομονωμένα δίκτυα, όπως της Κρήτης και άλλων νησιών, που λόγω μικρής διείσδυσης δεν θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν.

### 6.3.2 Τύποι HVDC καλωδίων

Για την κατασκευή υποβρύχιων καλωδίων υπάρχουν κάποια πρότυπα που πρέπει να ακολουθηθούν όπως:

- Μεγάλα συνεχή μήκη
- Υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας με πρακτική απουσία αναμενόμενων βλαβών
- Μεγάλη αντοχή στην τριβή και στη διάβρωση
- Μηχανική αντίσταση ώστε να αντέχει στις πιέσεις τοποθέτησης και ενσωμάτωσης
- Ελαχιστοποίηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- Ελαχιστοποίηση διείσδυσης νερού σε περίπτωση βλάβης του καλωδίου

Η κατασκευή υποβρύχιων καλωδίων μεγάλου μήκους και μεγάλης χωρητικότητας είναι μια αρκετά εξειδικευμένη διαδικασία και λίγες εταιρίες στον κόσμο έχουν εμπειρία στην κατασκευή τους, οι περισσότερες από τις οποίες έχουν έδρα στην Ευρώπη.

Η δομή των καλωδίων πρέπει να εξασφαλίζει μεγάλη αγωγιμότητα στην μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, καλή μόνωση, καλή μαγνητική προστασία και καλή μηχανική αντοχή. Συνήθως χρησιμοποιούνται διάφορα στρώματα γύρω από τον αγωγό για να εξασφαλισθούν τα παραπάνω και τα στρώματα αυτά είναι κυρίως από χαλκό.

Υπάρχουν κυρίως τρεις κύριες λύσεις για μόνωση:

- Self-contained fluid-filled cables – Καλώδια εμποτισμένα με υγρά.
  - SCFF/SCOF (self-contained fluid-filled / self-contained oil-filled)
  - HPFF/HPOF (high-pressure fluid-filled / high-pressure oil-filled)
  - HPGF (high-pressure gas filled) and GC (gas compression)

Τα καλώδια εμποτισμένα με υγρά, χρησιμοποιούνται για τάσεις μέχρι και 500 kV και είναι ιδανικά για μικρές αποστάσεις χωρίς υδραυλικούς περιορισμούς. Συνηθισμένα χαρακτηριστικά: διάμετρος μεταξύ 110 και 160 mm, βάρος μεταξύ 40 και 80 kg / m καθώς το μέγεθος του αγωγού είναι συνήθως 3000 mm<sup>2</sup> [18].

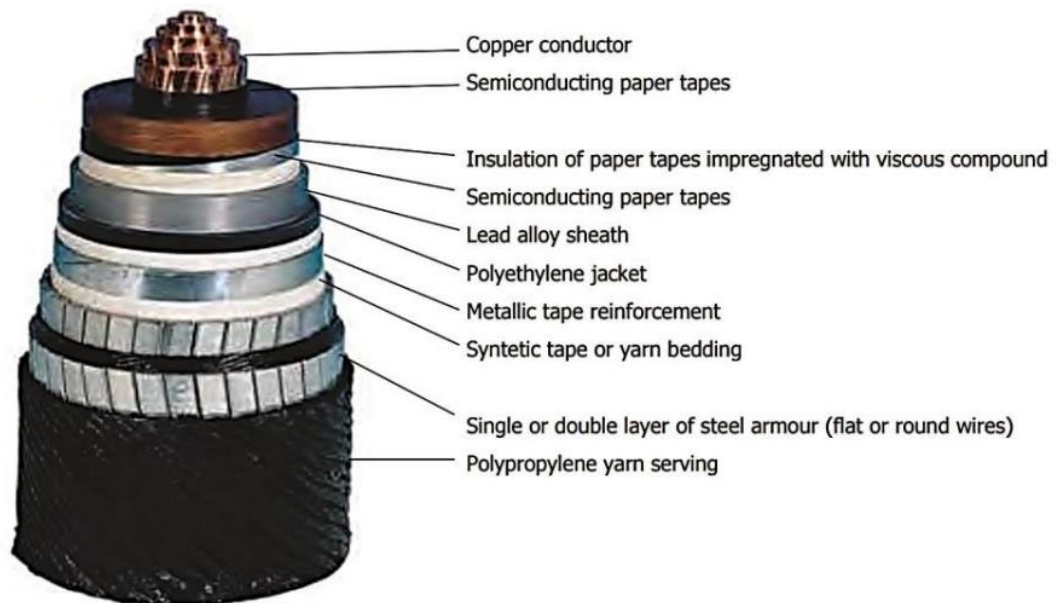


Εικόνα 6.4 Η δομή ενός self-contained fluid-filled καλωδίου.

- Paper insulated (lapped insulated) cables, μονωμένα με χαρτί καλώδια
  - MI (mass-impregnated) or PILC (paper-insulated lead-covered) αποτελείται από πυκνό χαρτί, με μόνωση υψηλού ιξώδους
  - PPL (paper polypropylene laminate)

Τα καλώδια εμποτισμένα με μόνωση υψηλού ιξώδους είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα καθώς παρέχουν μεγάλη αξιοπιστία για πάνω από 40 χρόνια.

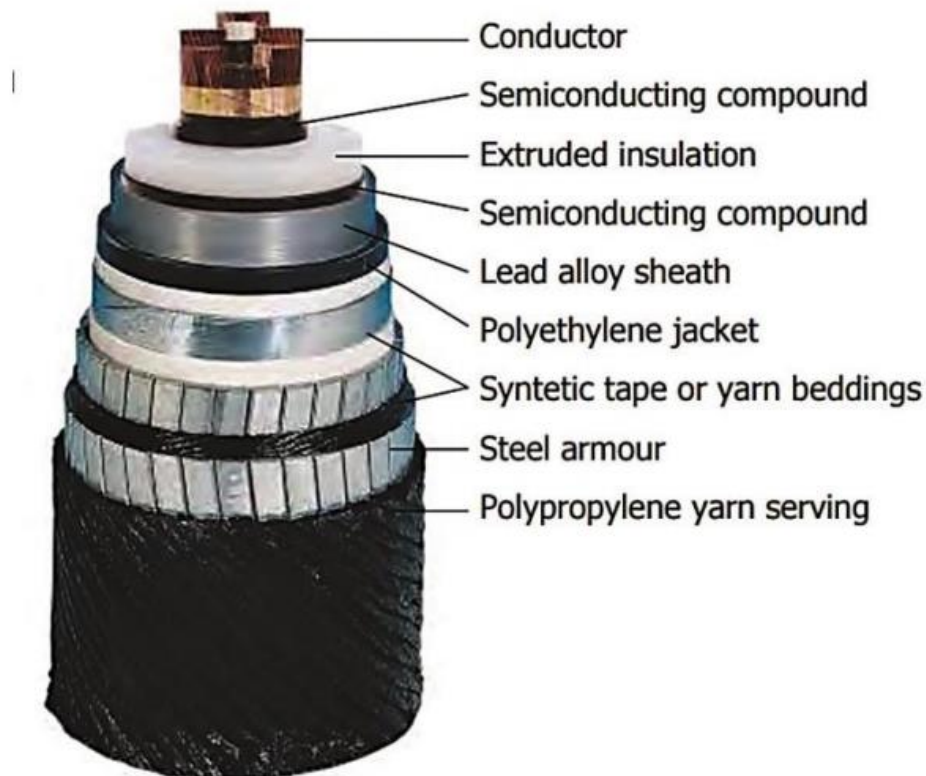
Χρησιμοποιούνται για τάσεις μέχρι και  $500\text{ kV}$  και λειτουργούν σε θερμοκρασίες μέχρι  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Με μόνωση PPL, το καλώδιο μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες μέχρι και  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  και τάση μέχρι και  $600\text{ kV}$ . Συνηθισμένα χαρακτηριστικά: εξωτερική διάμετρος μεταξύ  $110$  και  $140\text{ mm}$ , βάρος μεταξύ  $30$  και  $60\text{ kg/m}$  καθώς το μέγεθος του αγωγού είναι συνήθως  $2500\text{ mm}^2$  [18].



Εικόνα 6.5 Η δομή ενός *mass-impregnated* καλωδίου.

- Extruded cables, εξωθημένου τύπου
  - EPR (ethylene propylene rubber)
  - PE (polyethylene)
  - XLPE (cross-linked polyethylene) καλώδια ισχύος με μόνωση από δικτυωμένο πολυαιθυλένιο

Αυτού του τύπου τα καλώδια χρησιμοποιούνται για τάσεις μέχρι  $300\text{ kV}$  με την τεχνολογία τους συνεχώς να αναβαθμίζεται. Τα συγκεκριμένα καλώδια χρησιμοποιούνται μόνο σε εφαρμογές με χρήση τεχνολογίας μετατροπών πηγής τάσης (VSC-Voltage Source Converters) και έχουν την ικανότητα να αντιστρέφουν την ροή ισχύος χωρίς την αντιστροφή της πολικότητας. Έχει παρατηρηθεί ότι μπορούν να μεταφέρουν μέχρι και  $800\text{ MW}$  με μειονεκτήματα στην άνιση κατανομή των φορτίων εντός του μονωτή ο οποίος, σε περίπτωση ταχείας αντιστροφής πολικότητας, μπορεί να υποστεί υψηλές καταπονήσεις τοπικά με αποτέλεσμα την επιταχυνόμενη γήρανση του. Συνηθισμένα χαρακτηριστικά: διάμετρος μεταξύ  $90$  και  $120\text{ mm}$  και βάρος μεταξύ  $20$  και  $35\text{ kg/m}$  [18].

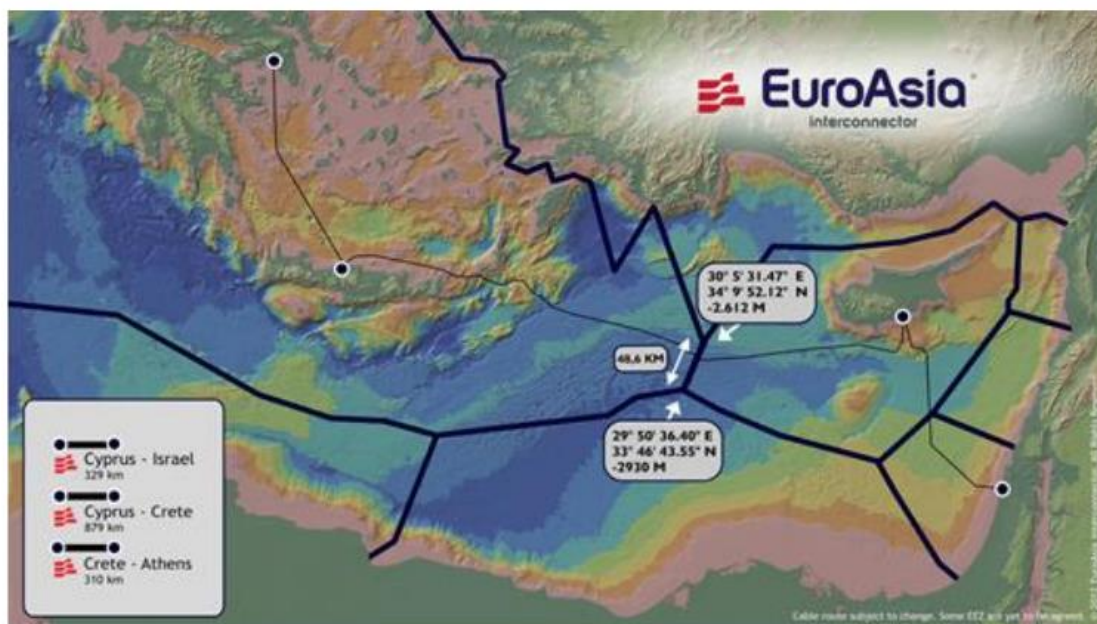


*Εικόνα 6.6 Η δομή ενός extruded cable.*

#### **6.4 Διασύνδεση ηλεκτρικής ενέργειας Ισραήλ – Κύπρου – Ελλάδας EuroAsia**

Το project EuroAsia Interconnector αποτελείται από ένα υποθαλάσσιο ηλεκτρικό καλώδιο  $500\text{ kV DC}$  και τον απαραίτητο εξοπλισμό για την υποστήριξη της διασύνδεσης των ηλεκτρικών δικτύων μεταξύ του Ισραήλ, της Κύπρου και της Ελλάδας. Στο τελικό στάδιο, οι τρεις αυτές χώρες θα έχουν τα ηλεκτρικά τους δίκτυα σε σύνδεση μεταξύ τους και την αμφίδρομη ικανότητα μεταφοράς  $2000\text{ MW}$  ηλεκτρικής ενέργειας. Το καλώδιο έχει μήκος περίπου 820 ναυτικά μίλια, δηλαδή περίπου  $1520\text{ km}$  ( $330\text{ km}$  μεταξύ Κύπρου και Ισραήλ,  $880\text{ km}$  μεταξύ Κύπρου και Κρήτης και  $310\text{ km}$  μεταξύ Κρήτης και Αττικής). Το βάθος που αναμένεται να βρίσκεται το υποβρύχιο καλώδιο μεταξύ Κύπρου και Ισραήλ είναι  $2200\text{ m}$  και ανάμεσα στην Κύπρο και την Κρήτη  $3000\text{ m}$  [21].



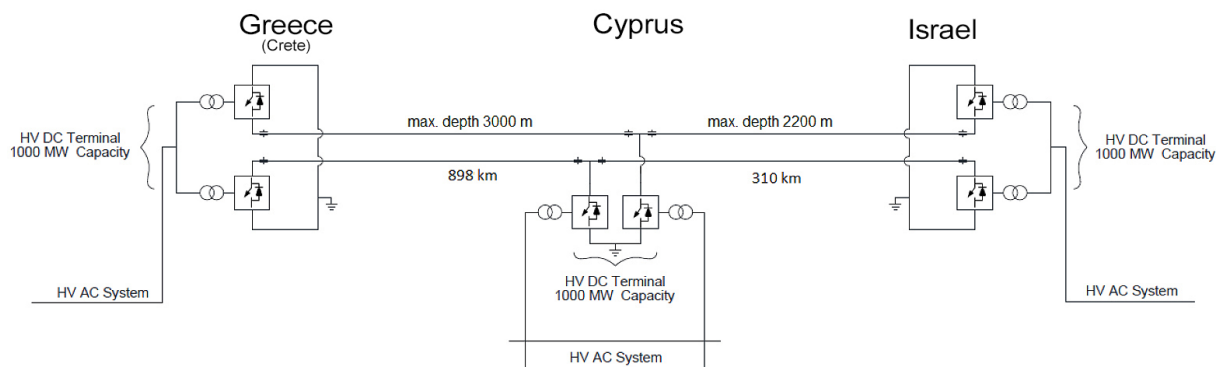


Εικόνα 6.7 Το project EuroAsia ανάμεσα σε Ισραήλ, Κύπρο και Ελλάδα.

### 6.4.1 Τεχνική ανάλυση

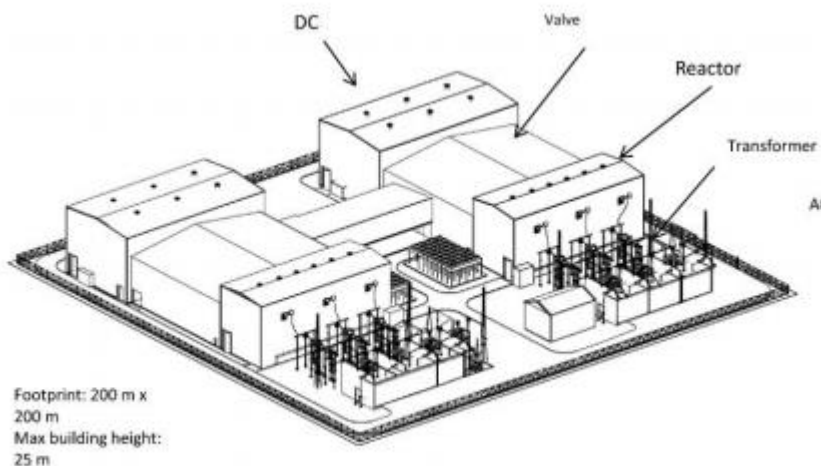
Το έργο αυτό θα χωριστεί σε δύο στάδια. Μετά την ολοκλήρωσή του, το έργο θα έχει συνολική χωρητικότητα ύψους 2000 MW ενώ κατά την ολοκλήρωση του πρώτου σταδίου η συνολική χωρητικότητα θα ανέρχεται σε 1000 MW [23].

- **Stage 1**
  - **Step 1:** Η εγκατάσταση 2 σταθμών HVDC μετατροπής των 1000 MW στην Κύπρο και στο Ισραήλ συνδεδεμένοι μεταξύ τους με διπολικό καλώδιο μήκους 330 km, τάσης  $\pm 500$  kV με χωρητικότητα 1000 MW.
  - **Step 2:** Η εγκατάσταση 2 σταθμών HVDC μετατροπής των 1000 MW στην Αττική και στην Κρήτη συνδεδεμένοι μεταξύ τους με διπολικό καλώδιο μήκους 310 km, τάσης  $\pm 500$  kV με χωρητικότητα 1000 MW.
  - **Step 3:** Σύνδεση μεταξύ Κύπρου και Κρήτης με διπολικό καλώδιο μήκους 880 km, τάσης  $\pm 500$  kV και 1000 MW χωρητικότητα.
- **Stage 2:** Η εγκατάσταση επιπλέον σταθμών HVDC μετατροπής των 1000 MW στην Αττική και στο Ισραήλ και ακόμα ένα διπολικό καλώδιο των 1000 MW ανάμεσα σε Ισραήλ, Κύπρο, Κρήτη και Αττική, γεγονός που θα αυξήσει την χωρική ικανότητα του συστήματος σε 2000 MW [21].



Εικόνα 6.8 Διάγραμμα project EuroAsia Interconnector (stage 1).

Η φάση 1 αποτελείται τελικά από τέσσερις VSC (Voltage Source Converter) σταθμούς μετατροπής σε διπολική διάταξη συνδεδεμένων μέσω διπλών συνδέσεων καλωδίων DC, μετατρέποντας την DC ισχύ σε AC, διοχετεύοντας την στο δίκτυο κάθε χώρας και αντίστροφα. Επιπλέον θα χρησιμοποιηθούν και θαλάσσια ηλεκτρόδια όπως και MVDC (Medium Voltage Direct Current) καλώδια που θα χρησιμοποιηθούν στους σταθμούς μετατροπής.



Εικόνα 6.9 Διάγραμμα τυπικού VSC διπολικού σταθμού μετατροπής  $\pm 500 \text{ kV}$ , 1000 MW.

Τα καλώδια που θα χρησιμοποιηθούν υποθαλάσσια θα είναι 500 kV HVDC single core extruded type (XLPE). Θεωρούνται ιδανικά επειδή αντέχουν σε μεγάλα βάθη (3000 m) και για λόγους οικονομίας θα χρησιμοποιηθεί ένας τύπος καλωδίου.

Τα χερσαία καλώδια που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι 500 kV HVDC single core extruded type (XLPE) με διαφοροποιήσεις από τα παραπάνω κάνοντας τα ιδανικά για χερσαίο περιβάλλον.



Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται τα μήκη των καλωδίων που θα εγκατασταθούν σε κάθε περιοχή.[22]

Πίνακας 6-1: Μήκος χερσαίων καλωδίων	
Περιοχή	Μήκος (km)
Αττική	36
Κρήτη	~1.5
Κύπρος	11
Ισραήλ	2

Πίνακας 6-2: Βάθος HVDC υποθαλάσσιων καλωδίων									
		Βάθος (m)							Σύνολο km
		<300	300-500	500-1000	1000-1500	1500-2000	2000-2400	>2400	
Βάθος σε km	Ισραήλ – Κύπρος	33.6	13.1	44.3	43.2	98.8	81.1	0.0	314.1
	Κρήτη – Κύπρος	25.6	87.5	139.0	81.5	20.08	29.3	510.3	893.9
	Κρήτη - Αττική	95.7	17.2	179.3	40.6	0.0	0.0	0.0	332.8
	<b>Συνολικά km ανά βάθος</b>	154.9	117.9	362.6	165.3	119.6	110.4	510.3	

## 6.4.2 Οφέλη

Το έργο αυτό είναι μέρος της Ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής και φέρει θετικές αξιολογήσεις καθώς συνεισφέρει στους ενεργειακούς στόχους που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση. Αυτοί οι στόχοι παρουσιάζονται παρακάτω:

- Βάζει τέλος στην ενεργειακή απομόνωση της Κύπρου. Ως το τελευταίο μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης που δεν έχει ηλεκτρικές ή διασυνδέσεις αερίου, η διασύνδεση του με αυτή τη γραμμή είναι προτεραιότητα. Παρομοίως, τελειώνει η απομόνωση της Κρήτης με αποτέλεσμα να αναβαθμιστεί η ενεργειακή αγορά στην Ευρώπη.
- Με τις νέες ανακαλύψεις για φυσικό αέριο στην Μεσόγειο, η διασύνδεση αυτή θα παίξει στρατηγικό ρόλο στην ενεργειακή συνεισφορά στην Ευρώπη αφού μετατρέποντας το φυσικό αέριο σε ηλεκτρική ενέργεια θα είναι εύκολη η μεταφορά του σε άλλη χώρα. Επίσης θα επωφεληθεί και το Ισραήλ.
- Η διασύνδεση αυτή θα εξασφαλίσει μια ενεργειακή ασφάλεια ανάμεσα στην Ελλάδα, Κύπρο και Ισραήλ, αλλά και στο ευρύτερο σύστημα της Ευρωπαϊκής Ένωσης αφού θα μπορεί να προμηθεύει τις χώρες αυτές με συνεχή και αμφίδρομη ηλεκτρική ενέργεια.

- Βοηθάει στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και στην μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.
- Προσφέρει σημαντικά οικονομικά και γεωπολιτικά οφέλη στις τρεις εμπλεκόμενες χώρες.
- Συνεισφέρει στον στόχο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για 10% διασύνδεση ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των μελών της.
- Προσφέρει σημαντικά κοινωνικοοικονομικά οφέλη.

## 6.5 Διασύνδεση της Κρήτης με την υπόλοιπη Ελλάδα

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη είναι αρκετά ακριβή σε σχέση με αυτή της υπόλοιπης Ελλάδας με αποτέλεσμα να συμβάλει στο συνολικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η Κρήτη είναι ένα αρκετά μεγάλο σύστημα, ως απομονωμένο, και τα καύσιμα που χρησιμοποιούν τα εργοστάσια της είναι ακριβά επειδή είναι εισαγόμενα και η μεταφορά τους καθίσταται ακριβή. Με την διασύνδεση, το κόστος ενέργειας θα μειωθεί σημαντικά. Η διασύνδεση της Κρήτης με την υπόλοιπη Ελλάδα θα ολοκληρωθεί σε δύο φάσεις, με την πρώτη να ενώνει το ηλεκτρικό δίκτυο των Χανίων Κρήτης με την Πελοπόννησο (το τμήμα αυτό έχει ήδη αρχίσει να υλοποιείται) και την δεύτερη το Ηράκλειο Κρήτης με την Αττική. Θα χρειαστεί να κατασκευαστούν σταθμοί μετατροπής από DC σε AC, υπόγειες οδεύσεις για τα καλώδια καθώς και κατάλληλες υποβρύχιες διαδρομές για αυτά. Επίσης στους σταθμούς μετατροπής θα εγκατασταθούν καλώδια μέσης τάσης συνεχούς ρεύματος (MVDC) για την σύνδεση του σταθμού μετατροπής με το θαλάσσιο ηλεκτρόδιο. Στον Πίνακα 6.3 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο φάσεων του έργου [21].



Εικόνα 6.10 Υπόμνημα διασύνδεσης Κρήτης με υπόλοιπη Ελλάδα.

<b>Πίνακας 6-3: Τεχνικά χαρακτηριστικά διασύνδεσης Κρήτης με υπόλοιπη Ελλάδα</b>		
	Φάση 1 (Πελοπόννησος - Χανιά)	Φάση 2 (Αττική - Ηράκλειο)
<b>Τεχνολογία</b>	HVAC	HVDC
<b>Μήκος</b>	2x135 km υποθαλάσσια (180 km σύνολο)	2x328 km υποθαλάσσια (340 km σύνολο)
<b>Μεταφορική ικανότητα</b>	2x200 MVA	2x500 MW
<b>Τάση</b>	150 kV	500 kV
<b>Τύπος καλωδίου</b>	XLPE	MIND/XLPE
<b>Μέγιστο βάθος</b>	980 m	1250 m

### 6.5.1 Φάση 1

Η πρώτη φάση, στην οποία χρησιμοποιείται εναλλασσόμενο ρεύμα, θα ξεκινήσει από την Πελοπόννησο στην χερσόνησο Μαλέα και θα φτάσει μέχρι τα Νωπήγεια Κισσάμου στα Χανιά. Πρόκειται για τη μεγαλύτερη διασύνδεση HVAC στον κόσμο αφού το υποθαλάσσιο μήκος θα φτάνει τα 132 km [23]. Τα στάδια που θα ακολουθηθούν για την κατασκευή του έργου είναι:

- Δύο υποθαλάσσια καλώδια τριών αγωγών μήκους 132 km το κάθε ένα.
- Αναβάθμιση και κατασκευή νέων εναέριων γραμμών μεταφοράς.
- Κατασκευή υποσταθμών καθώς και υπογείων καλωδίων στην Πελοπόννησο αλλά και στην Κρήτη για την υποστήριξη του συστήματος.
- Σύστημα ελεγχόμενης σύγχρονης αντιστάθμισης άεργου ισχύος στην Κρήτη (STATCOM).

### 6.5.2 Φάση 2

Η δεύτερη φάση αποτελείται από το υποθαλάσσιο καλώδιο μεταφοράς συνεχούς ρεύματος από την περιοχή Δαμάστα στο Ηράκλειο Κρήτης στην περιοχή Πάχη Μεγάρων στην Αττική. Από τα σημεία προσαιγιάλωσης, θα κατασκευαστούν υπόγειες διαδρομές και θα εγκατασταθούν εκεί καλώδια ξηράς τύπου HVDC τα οποία θα ενώνουν τα υποθαλάσσια καλώδια με τους σταθμούς μετατροπής [21]. Τα στοιχεία για την κατασκευή του έργου είναι:

- Κατασκευή υποσταθμού μετατροπής στην Κρήτη, στην περιοχή Δαμάστα με επιφάνεια 100 στρεμμάτων και συνολικής ονομαστικής ισχύος 1000 MW (2x500 MW) με συμμετρική διπολική λειτουργία.
- Κατασκευή υποσταθμού μετατροπής στην Αττική πλησίον του υποσταθμού εναλλασσόμενου ρεύματος Κουμουνδούρου έκτασης 40.000 m<sup>2</sup> και συνολικής ονομαστικής ισχύος 1000 MW (2x500 MW) με συμμετρική διπολική λειτουργία.
- Εγκατάσταση 2 υπογείων HVDC καλωδίων από την προσαιγιάλωση στην παραλία του Ηρακλείου Κορακιάς μέχρι τον τερματικό σταθμό Κορακιάς μήκους 250 m χωρητικότητας 1000 MW.

- Εγκατάσταση 2 υπογείων HVDC καλωδίων από την προσαιγιάλωση στην παραλία των Μεγάρων μέχρι τον τερματικό σταθμό Αττικής μήκους 32 km χωρητικότητας 1000 MW .
- Ένα υπόγειο – υποθαλάσσιο καλώδιο MVDC από τον σταθμό Αττικής μέχρι την παραλία Μεγάρων και ένα υποθαλάσσιο καλώδιο από την παραλία Μεγάρων μέχρι τον σταθμό ηλεκτροδίων στο νησί Σταχτορρόη.
- Εγκατάσταση 2 υποθαλάσσιων καλωδίων HVDC από την παραλία Μεγάρων μέχρι την παραλία Κορακιάς μήκους 328 km χωρητικότητας 1000 MW με διπολική λειτουργία.
- Κατασκευή σταθμού ηλεκτροδίων στο νησί Σταχτορρόη.
- Κατασκευή σταθμού ηλεκτροδίων στην Κορακιά.
- Κατασκευή τερματικού σταθμού στην Κορακιά για μετατροπή της υπόγειας γραμμής DC σε εναέρια γραμμή μεταφοράς DC.
- Κατασκευή νέου υποσταθμού ζεύξης 150 kV (GIS) μετά τον σταθμό μετατροπής για την σύνδεση με το δίκτυο AC της Κρήτης
- Αναβάθμιση γραμμών μεταφοράς 150 kV στην Κρήτη.

---

# 7.

## ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΩΝ

---

### 7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για το μη διασυνδεδεμένο νησί της Κρήτης. Για τον σκοπό αυτό γίνεται χρήση διαφόρων οικονομικών σεναρίων και αξιοποιούμε τις δυνατότητές της σε ΑΠΕ στο έπακρο. Υπολογίζεται ότι κατά το έτος 2025 η διασύνδεση της Κρήτης με την υπόλοιπη Ελλάδα θα έχει ολοκληρωθεί. Ως εκ τούτου, τα δεδομένα μεταφράζονται για το έτος 2025 με την βοήθεια αλγορίθμου που έχει γραφεί σε περιβάλλον MATLAB οπότε θα υπολογιστεί το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας για το πλέον διασυνδεδεμένο νησί της Κρήτης.

### 7.2 Το Σενάριο BAU

Το σενάριο αυτό, (Business As Usual) βασίζεται στην σημερινή διάταξη του δικτύου της Κρήτης και έχει ως σκοπό την σύγκριση του, με τα σενάρια που πρόκειται να εξεταστούν στην παρούσα εργασία. Το δίκτυο της Κρήτης περιλαμβάνεται στα μη διασυνδεδεμένα δίκτυα με την ηπειρωτική Ελλάδα, έχει ισχυρό και ανεκμετάλλευτο δυναμικό ΑΠΕ, το οποίο περιορίζεται από τον διαχειριστή του συστήματος, εξαιτίας της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας των ΑΠΕ. Ως θετικό χαρακτηριστικό του στοιχείο έχει το μηδενικό επενδυτικό κόστος και ως αρνητικό τα μεγάλα και ασύμφορα λειτουργικά έξοδα.

### 7.2.1 Απορριπτόμενη ενέργεια

Η μέγιστη επιτρεπόμενη ωριαία διείσδυση των μη ελεγχόμενων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά συστήματα στην Κρήτη, εκτιμάται ότι δεν ξεπερνά το 30% του φορτίου. Σε περίπτωση εκδήλωσης ασταθών ή ακραίων συνθηκών, το ποσοστό αυτό μειώνεται ενώ μερικές φορές μηδενίζεται. Σε μικρά δίκτυα όπως αυτό της Κρήτης, κάθε μονάδα παραγωγής ενέργειας επηρεάζει άμεσα την συχνότητα και την τάση. Ειδικότερα, η εκτός ορίων μεταβολή συχνότητας ( $\pm 0.25\%$ ) μπορεί να επιφέρει ανεπανόρθωτες βλάβες στο δίκτυο της Κρήτης και στους συνδεδεμένους σε αυτό εξοπλισμούς. Πλέον τούτων ο διαχειριστής του συστήματος της Κρήτης, σε περιπτώσεις υψηλού αιολικού δυναμικού και χαμηλού φορτίου, Περικόπτει μερικώς ή ολικώς την αιολική παραγωγή. Το Σχήμα 7.1 απεικονίζει την απορριπτόμενη ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από αιολικά συστήματα του έτους 2015 [26]. Τα στοιχεία γι' αυτό το διάγραμμα παραχωρήθηκε από το εργαστήριο υδροδυναμικών μηχανών (ΕΥΜ) της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Ως εμφανίζεται στο διάγραμμα αυτό, η συνολική απορριπτόμενη αιολική ενέργεια για το έτος 2015 ήταν 184,888 MWh η οποία συγκρινόμενη με την ισχύ των 569,079 MWh της συνολικής παραγωγής, αποτελεί το 24.5% αυτής.



Σχήμα 7-1. Απορριπτόμενη αιολική ενέργεια Κρήτης έτους 2015.

### 7.2.2 Σκοπός

Το συγκεκριμένο πλάνο ορίζει, ότι η οριστική διασύνδεση της Κρήτης με την ηπειρωτική Ελλάδα θα έχει ολοκληρωθεί το έτος 2025. Ως εκ τούτου για το έτος αυτό (2025), ακολουθείται μια διαδικασία που σκοπό έχει τον υπολογισμό της απορριπτόμενης ηλεκτρικής ενέργειας τω αιολικών πάρκων της Κρήτης, Έτσι ώστε τα αποτελέσματα της οικονομικής ανάλυσης να είναι πιο αξιόπιστα. Στην συνέχεια, υπολογίζεται το οικονομικό αντίκτυπο από την αξιοποίηση αυτής της ενέργειας, έναντι της ενέργειας από συμβατικούς σταθμούς.

### 7.2.3 Έτος αναφοράς

Ως έτος αναφοράς ορίζεται το έτος για το οποίο διαθέτουμε στοιχεία αναφορικά με το φορτίο του, οπότε για το λόγο αυτό η παρούσα εργασία επιλέγει το έτος 2015. Σύμφωνα με

τα δεδομένα μελέτης της ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ το συνολικό φορτίο του έτους 2015 ήταν 3,333,112 *MWh*. Σύμφωνα δε με δεδομένα που εκτιμήθηκαν από την ΔΕΗ Α.Ε. το προβλεπόμενο φορτίο για το εξεταζόμενο έτος 2025 θα είναι 4,003,320 *MWh* [8]. Το έτος αναφοράς (2015) είχε συνολικά 8760 ώρες, όπως ανάλογες ώρες θα έχει και το 2025.

#### 7.2.4 Μέση τιμή φορτίου

Ως μέση τιμή φορτίου σύμφωνα με την βιβλιογραφία [1], θεωρείται η μέση καταναλισκόμενη ενέργεια ανά ώρα και ορίζεται από τον τύπο:

$$\overline{Ld} = \frac{\sum_{i=1}^{365} Ld_i}{d} \quad (7.1)$$

όπου:

$Ld_i$  είναι το φορτίο της μέρας  $i$ , (*kWh*) και

$d$  είναι οι συνολικές ώρες του χρόνου ( $h$ )

Άρα για το έτος αναφοράς, το μέσο φορτίο είναι:

$$\overline{Ld} = \frac{3333112}{8760} = 380.5 MW \quad (7.2)$$

Ενώ για το εξεταζόμενο έτος, είναι:

$$\overline{Ld} = \frac{4003320}{8760} = 457 MW \quad (7.3)$$

Πίνακας 7-1: Συνολικό φορτίο και μέσο φορτίο ετών 2015 και 2025.		
Έτος	Συνολικό φορτίο (MWh)	Μέση τιμή φορτίου (MW)
2015	3,333,112	380.5
2025	4,003,320	457

#### 7.2.5 Η παράμετρος R

Το έτος 2015 υπήρχε εγκατεστημένη ισχύς αιολικών 194 *MW* ενώ το έτος 2025 προβλέπεται ότι θα υπάρχει 215 *MW* εγκατεστημένη ισχύς. Γνωρίζοντας αυτά τα δεδομένα, ορίζεται η παράμετρος  $R$  ως το ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος αιολικών προς το μέσο φορτίο του έτους,  $R = \frac{N_{wind}}{\overline{Ld}}$ . Το  $R$  είναι αδιάστατο.

$$R_{2015} = \frac{194}{380.5} = 0.51 \quad (7.4)$$

$$R_{2025} = \frac{215}{457} = 0.47 \quad (7.5)$$

**Πίνακας 7-2: Εγκατεστημένη ισχύς αιολικών, μέσο φορτίο και παράμετρος R ετών 2015 και 2025**

Έτος	Εγκατεστημένη ισχύς αιολικών (MW)	Μέσο φορτίο έτους (MW)	Παράμετρος R
2015	194	380.5	0.51
2025	215	457	0.47

### 7.2.6 Ο δείκτης $F_{ct}$

Ο δείκτης  $F_{ct}$  ορίζεται ως η μέση τιμή του έτους αναφοράς επί την παράμετρο R που υπολογίστηκε παραπάνω, διαιρούμενη με την εγκατεστημένη ισχύ αιολικών του έτους αναφοράς (2015).

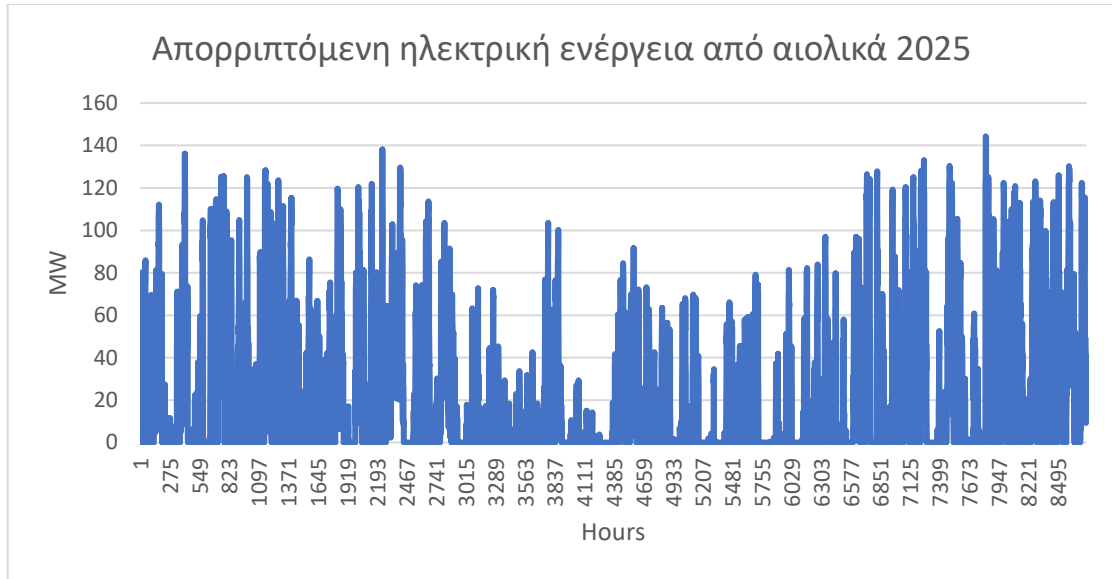
Τέλος, ο δείκτης  $F_{ct}$  είναι εκείνος που πολλαπλασιάζεται με τις τιμές της απορριπτόμενης ισχύος του έτους 2015 και από τον πολλαπλασιασμό αυτό, προκύπτει το μέγεθος της απορριπτόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα αιολικά του έτους 2025.

$$F_{ct} = \frac{R \cdot \overline{Ld_{ref}}}{N_{windref}}$$

$$F_{ct2025} = \frac{R \cdot \overline{Ld_{ref}}}{N_{windref}} = \frac{0.47 \cdot 380.5}{194} = 0.92 \quad (7.6)$$

Πολλαπλασιάζοντας τον δείκτη  $F_{ct2025}$  με τις τιμές της απορριπτόμενης ισχύος του 2015 συμπεραίνουμε ότι το έτος 2025 θα απορριφθούν συνολικά 170,096.822 MWh, ενώ η συνολική παραγωγή ενέργειας από αιολικά θα είναι 630,680.33 MWh. Εκτιμώντας τα ανωτέρω καταλήγουμε στο συμπέρασμα, ότι το ποσοστό της απορριπτόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για το εξεταζόμενο έτος 2025, ανέρχεται σε 27% έναντι του 24.5% του έτους αναφοράς (2015).





Σχήμα 7-2. Απορριπτόμενη αιολική ενέργεια Κρήτης έτους 2025.

### 7.2.7 Οικονομική ανάλυση BAU

Στην παρούσα εργασία και προκειμένου να υπολογιστούν τα οικονομικά στοιχεία του σεναρίου BAU, επιλέχθηκαν οι τρεις κύριες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης και το ποσοστό συμμετοχής κάθε μία απ' αυτές στην κάλυψη του απαιτούμενου φορτίου.

Σύμφωνα με το ετήσιο δελτίο εκμετάλλευσης του συστήματος Κρήτης του ΔΕΔΔΗΕ για το έτος 2018 [13], το κόστος λειτουργίας του ΑΗΣ Αθρινόλακου ανέρχεται σε 176.7 €/MWh με ποσοστό συμμετοχής 44%, το κόστος λειτουργίας του ΑΗΣ Λινοπεραμάτων ανέρχεται σε 230.9 €/MWh με ποσοστό συμμετοχής 34% και για το κόστος λειτουργίας του ΑΗΣ Χανίων ανέρχεται σε 363.2 €/MWh με ποσοστό συμμετοχής 22%. Το κόστος αγοράς της προερχόμενης από τα αιολικά ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται στα 99.45 €/MWh [27].

Δεδομένου ότι για το έτος 2025 οι τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ίδιες με του έτους αναφοράς (2015), το κόστος παραγωγής της απορριπτόμενης ενέργειας από τις συμβατικές παραγωγές θα ανερχόταν σε:

$$C_{E1} = E_{W_{Loss}} \cdot \sum_{i=1}^3 C_i \cdot \rho_i = 40,169,725.29\text{€} \quad (7.7)$$

Όπου,

$C_{E1}$  είναι το κόστος ενέργειας (€),

$E_{W_{Loss}}$  είναι η απορριπτόμενη ενέργεια από τα αιολικά το έτος 2025 (MWh),

$C_i$  είναι το κόστος παραγωγής ενέργειας του εργοστασίου i (€/MWh) και

$\rho_i$  είναι το ποσοστό παραγωγής ενέργειας του εργοστασίου i (αδιάστατο).

Ενώ στην περίπτωση που θα είχαμε 100% διείσδυση των αιολικών στο σύστημα η ενέργεια αυτή θα κόστιζε:

$$C_{E2} = E_{WLoss} \cdot C_{WT} = 16,916,128.95\text{€} \quad (7.8)$$

όπου:

$C_{E2}$  είναι το κόστος ενέργειας (€) και

$C_{WT}$  το κόστος παραγωγής ενέργειας από αιολικά (€/MWh)

Επομένως θα εξοικονομούσαμε :

$$C_{gain} = C_{E1} - C_{E2} = 23,253,596.34\text{€} \quad (7.9)$$

όπου:

$C_{gain}$  είναι το κέρδος που θα εξοικονομούσαμε (€).

## 7.2.8 Κόστος παραγωγής ενέργειας έτους 2025

Με τα δεδομένα που αναπτύχθηκαν έως τώρα, συμπεραίνοντας υπολογίστηκε το κόστος παραγωγής ενέργειας για το έτος 2025 με 100% απορρόφηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα αιολικά, αλλά και των ήδη εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών, των οποίων η παραγόμενη ισχύς ανέρχεται σε 150,000 MWh, και το κόστος αγοράς της είναι 60 €/MWh [27], όπου:

Το κόστος παραγωγής ενέργειας από τις ΑΠΕ διαμορφώνεται σε:

$$C_{renew} = 71,721,158.82 \text{ €}$$

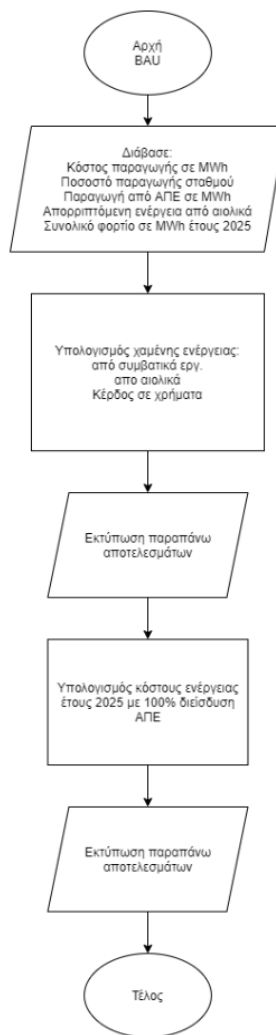
Ενώ το κόστος από συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας, είναι:

$$C_{fossil} = 761,052,139.19 \text{ €}$$

Το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη για το έτος 2025 ανέρχεται σε:

$$C_{load\_2025} = 832,773,298.00 \text{ €}$$

Τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψαν από την χρήση του λογισμικού MATLAB και η δομή του αλγορίθμου εμφανίζεται στο κάτωθι διάγραμμα ροής.



Σχήμα 7-3. Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό των οικονομικών αποτελεσμάτων του παραπάνω σεναρίου.

## 7.3 Σενάριο Green Crete

Η διασύνδεση της Κρήτης με το δίκτυο της ηπειρωτικής Ελλάδας, θα αξιοποιούσε σε ποσοστό 100% την εκμετάλλευση του δυναμικού των αιολικών από το σύστημα. Αυτό το σενάριο εξετάζει, τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια της Κρήτης και την κάλυψη τους αποκλειστικά με ΑΠΕ. Οι περαιτέρω ενεργειακές ανάγκες της Κρήτης θα καλυφθούν από το σύστημα διασύνδεσης και όχι από τις έως τώρα χρησιμοποιούμενες συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρά το γεγονός της ύπαρξης απωλειών κατά την μεταφορά, το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ηπειρωτικής Ελλάδας είναι σημαντικά χαμηλότερο, έναντι του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν οι θερμικές μονάδες της Κρήτης. Αυτό δε οφείλεται στον τύπο καυσίμων, στην μεταφορά αυτών (θαλάσσια μεταφορά) καθώς και στο δυναμικό απόδοσης των μονάδων της Κρήτης.

### 7.3.1 Απώλειες λόγω διασύνδεσης

- Για το HVDC καλώδιο.

Γνωρίζουμε ότι κατά την μεταφορά ενέργειας με το συγκεκριμένο αγωγό υπάρχουν απώλειες (κατά προσέγγιση) της τάξης  $P_{l\_loss} \approx 3.5\%$  που χάνεται στα καλώδια λόγω μικρών αντιστάσεων που υπάρχουν σε αυτά. Ομοίως, στους σταθμούς μετατροπής AC/DC (converters/rectifiers) υπάρχουν απώλειες (κατά προσέγγιση) της τάξης  $P_{ces\_loss} \approx 2\%$  [31]. Συνολικά για την συγκεκριμένη διασύνδεση οι εκτιμώμενες απώλειες (κατά προσέγγιση) είναι της τάξης  $P_{DC\_loss} \approx 15.48\%$ .

$$P_{DC\_loss} = 2 \cdot P_{ces\_loss} + 3.28 \cdot P_{l\_loss}$$

- Για το HVAC καλώδιο.

Για το AC καλώδιο διασύνδεσης γνωρίζουμε ότι, δεν χρειάζεται κεφάλαιο επένδυσης για AC/DC (converters/rectifiers), αλλά κατά την μεταφορά της ισχύος εμφανίζονται απώλειες που οφείλονται τόσο στις μικρές αντιστάσεις, όσο και σε διάφορα φαινόμενα τα οποία δεν εμφανίζονται στις DC τεχνολογίες.

Οι απώλειες αυτές εμφανίζονται στους μετασχηματιστές και εκτιμώνται (κατά προσέγγιση) σε  $P_{t\_loss} \approx 1.5\%$ . Ομοίως, στα καλώδια μεταφοράς υπάρχουν απώλειες (κατά προσέγγιση) της τάξης  $P_{l\_loss} \approx 7\%$  [31]. Συνολικά για την συγκεκριμένη διασύνδεση, οι εκτιμώμενες απώλειες (κατά προσέγγιση) είναι της τάξης  $P_{AC\_loss} \approx 12.45\%$ .

$$P_{AC\_loss} = 2 \cdot P_{t\_loss} + 1.35 \cdot P_{l\_loss}$$

### 7.3.2 Οικονομικά αποτελέσματα

Το υπολειπόμενο φορτίο μπορεί να εξασφαλιστεί ως εξής:

- 100% από την διασύνδεση 1 (Πελοπόννησος - Χανιά)
- 100% από την διασύνδεση 2 (Αθήνα - Ηράκλειο)
- Από τον συνδυασμό των διασυνδέσεων 1 και 2 με 100% χρήση της AC διασύνδεσης και το υπολειπόμενο φορτίο από την DC διασύνδεση.

Για την παρούσα εργασία, θεωρείται ότι, το κόστος της μεταφερόμενης από την ηπειρωτική Ελλάδα ενέργειας, ανέρχεται σε 78 €/MWh και προέρχεται αποκλειστικά από θερμικές μονάδες [32].

Για την εξέταση των σεναρίων που προαναφέρθηκαν, χρειάστηκε να δημιουργηθεί αλγόριθμος σε περιβάλλον MATLAB, με την χρήση του οποίου οδηγηθήκαμε στις εξής διαπιστώσεις:

- Η αποκλειστική χρήση της διασύνδεσης 1 (Πελοπόννησος – Χανιά) δεν είναι εφικτή και τούτο διότι η έως τώρα χωρητικότητα του ποντιζόμενου αγωγού ανέρχεται στα 170 MW, δηλαδή είναι κατά πολύ μικρότερη των ηλεκτρικών αναγκών της Κρήτης (του έτους 2025), οι οποίες θα ανέρχονται σε 414 MW.
- Η αποκλειστική χρήση της διασύνδεσης 2 (Αθήνα – Ηράκλειο) είναι εφικτή και μπορεί να καλύψει τις ηλεκτρικές ανάγκες της Κρήτης και το κόστος αυτής θα ανέλθει σε:

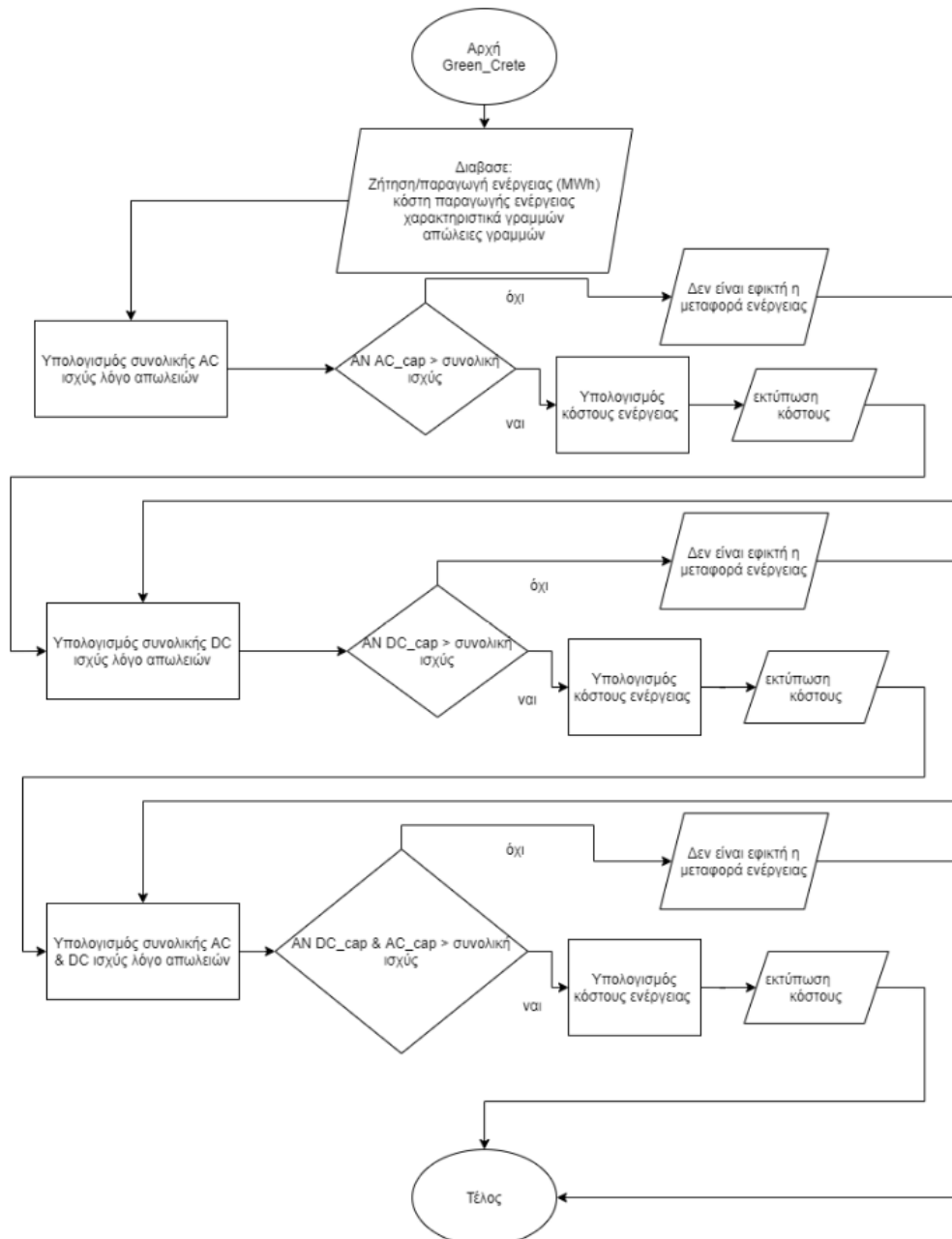
$$C_{load\_2025\_2} = 361,998,493.51 \text{ €}$$

- Εξαιτίας των τρεχουσών τεχνολογιών, οι απώλειες στην DC γραμμή είναι μεγαλύτερες. Για τον λόγο αυτό η μεταφορά ενέργειας από την AC γραμμή είναι συμφερότερη. Για

τον συνδυασμό των διασυνδέσεων 1 και 2, θα χρησιμοποιηθεί το σύνολο της χωρητικότητας της AC γραμμής και για την κάλυψη του υπόλοιπου φορτίου θα χρησιμοποιηθεί η χωρητικότητα της DC. Στην περίπτωση αυτή το κόστος θα ανέλθει σε:

$$C_{load\_2025\_1\&2} = 358,478,918.23 \text{ €}$$

Η δομή του αλγορίθμου για τον οποίο αναφερθήκαμε αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 7-4. Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό των οικονομικών αποτελεσμάτων του παραπάνω σεναρίου.

<b>Πίνακας 7-3. Κόστος διαφόρων σεναρίων διασυνδέσεων.</b>	
	<b>Κόστος (€)</b>
<b>Διασύνδεση 2</b>	361,710,847.01
<b>Συνδυασμός 1&amp;2</b>	358,478,918.23

Το συνολικό κόστος της εγκατάστασης των δύο (2) διασυνδέσεων, ανέρχεται σε ένα δισεκατομμύριο ευρώ (1,000,000,000 €), με εκτιμώμενο κέρδος, για μεν την διασύνδεση της γραμμής 2 τα 471,062,450.99 € (σε σχέση με το σενάριο BAU), για δε τον συνδυασμό των διασυνδέσεων 1 και 2 σε 474,294,379.77 € (σε σχέση με το σενάριο BAU), όπως φαίνεται στον πίνακα 6-4. Ο προσδοκώμενος χρόνος απόσβεσης του έργου αυτού είναι τα περίπου τα δύο (2) έτη, χρόνος απόσβεσης ιδιαίτερα ελκυστικός για τα δεδομένα της χώρας μας.

<b>Πίνακας 7-4 Κέρδος διαφόρων σεναρίων σε σχέση με το σενάριο BAU.</b>	
	<b>Κέρδος (€)</b>
<b>Διασύνδεση 2</b>	471,062,450.99
<b>Συνδυασμός 1&amp;2</b>	474,294,379.77

## 7.4 Συμπεράσματα

Μετά το πέρας της ολοκλήρωσης της διασύνδεσης του συστήματος της Κρήτης με αυτό της ηπειρωτικής Ελλάδας, μπορούν να εφαρμοστούν οι προτεινόμενοι μέθοδοι, όπως αυτοί αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία, τούτο δε διότι η αξιολόγηση τους χαρακτηρίζεται ως θετική. Ειδικότερα, η εφαρμογή του σεναρίου BAU έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη εκμετάλλευση των ΑΠΕ του νησιού και ως εκ τούτου την μείωση των εκπομπών διοξειδίου το άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Για το σενάριο Green Crete διαπιστώνεται, σημαντική μείωση του κόστους ενέργειας, ενέργειας απαραίτητης για την κάλυψη των αναγκών του νησιού. Επίσης επιτυγχάνεται πλήρης εκμετάλλευση των ΑΠΕ του νησιού αλλά και μείωση των τιμών του διοξειδίου του άνθρακα.

Στα οφέλη των προτεινόμενων σεναρίων ενδεικτικά συγκαταλέγονται:

- Η επίτευξη των στόχων που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για την μείωση των περιβαλλοντικών ρύπων. (Συμφωνία των Παρισίων [17])
- Η μείωση του κόστους παροχής ηλεκτρικής ενέργειας για τους κατοίκους της Ελλάδος, δεδομένου ότι το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας εκρέει μέσω συμψηφισμού του κόστους παραγωγής απ' όλη την Ελλάδα.
- Η θετική συμβολή στην ποιότητα του αέρα της Κρήτης, αφού θα μειωθούν οι ρυπογόνοι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά το περιβάλλον.
- Η ποιοτικότερη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, δεδομένου ότι οι θερμικές μονάδες παραγωγής στην Κρήτη θα σταματήσουν την λειτουργία τους.
- Η ενίσχυση της εθνικής οικονομίας, δεδομένου ότι σε σχεδόν δύο (2) έτη θα έχει αποσβεστεί το κόστος εγκατάστασης του έργου.

## 7.5 Μελλοντικές προεκτάσεις – βελτιώσεις.

Αναφορικά με μελλοντικές επεκτάσεις του έργου, προτείνεται:

- Ο υπολογισμός παραγωγής ενέργειας των θερμικών μονάδων με την χρήση της συνάρτησης ωριαίου κόστους λειτουργίας, με σκοπό την παρουσίαση ενός αναλυτικότερου μοντέλου το οποίο θα συμπεριλαμβάνει και το κόστος έναρξης λειτουργίας των μονάδων.
- Η παρακολούθηση της συμπεριφοράς του συστήματος στις ακραίες περιπτώσεις μεγίστων και ελαχίστων φορτίων, δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία εξετάζονται τα μέσα φορτία.
- Αξιολόγηση των οικονομικών και περιβαλλοντικών ωφελειών της επένδυσης, αν εγκατασταθούν περεταίρω αιολικά συστήματα στο νησί της Κρήτης.

---

# 8.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] BOYPNΑΣ Κ., ΚΟΝΤΑΞΗΣ Γ. “Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας”
- [2] Electricity generation “[https://en.wikipedia.org/wiki/Electricity\\_generation](https://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_generation)”
- [3] Gilbert M. Masters “Renewable and efficient Electric Power Systems, Second edition”
- [4] Robert A. Huggins “Energy Storage”
- [5] Bent Sørensen “Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage”
- [6] Electricity Statistics “<https://www.iea.org/statistics/electricity/>”
- [7] Νομοθετικό πλαίσιο ΑΠΕ [http://www.rae.gr/old/SUB2/2\\_4.htm](http://www.rae.gr/old/SUB2/2_4.htm)
- [8] Διπλωματική εργασία Τσαμούδαλη Κωνσταντίνου 2019 “Μοντελοποίηση και Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Συστήματος Άντλησης Ταμίευσης για Αξιοποίηση της Απορριπτόμενης Ενέργειας σε μη Διασυνδεδεμένα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Εφαρμογή στο Φράγμα Ποταμών στο Ρέθυμνο Κρήτης”, Πολυτεχνείο Κρήτης, τμήμα ηλεκτρολόγων μηχανικών και μηχανικών υπολογιστών.
- [9] Διπλωματική εργασία Άννας Κατσανεβάκη 2018 “Συστήματα αντλησιοταμίευσης – εφαρμογή σε υφιστάμενες υποδομές(λίμνη Πλαστήρα)”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος.
- [10] Διπλωματική εργασία Αμαλία Μαυρογιάννη 2019 “Ανάπτυξη και Προσομοίωση Τεχνικών Βελτιστοποίησης και Αποθήκευσης Ενέργειας για τη Μεγιστοποίηση της Διείσδυσης Τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας ΑΠΕ στο Αυτόνομο Νησί της Μήλου”, Πολυτεχνείο Κρήτης, τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.
- [11] Effects of changing the carbon cycle  
“[https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle/page5.php?fbclid=IwAR0eEPSUBJWBUEzEWb1jYKuy11x7RDAojDFkeh0tIEVA6Jl-ajvu5Vp5\\_Mc](https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle/page5.php?fbclid=IwAR0eEPSUBJWBUEzEWb1jYKuy11x7RDAojDFkeh0tIEVA6Jl-ajvu5Vp5_Mc)”



- [12] Climate change: Atmospheric Carbon Dioxide “<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>”
- [13] ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. “Ετήσιο δελτίο εκμετάλλευσης συστήματος Κρήτης έτους 2018”
- [14] Διπλωματική εργασία Αγγελική Χ.Λουκάτου 2013 “Τεχνολογίες αποθήκευσης αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.
- [15] Άρθρο από την Ευρωπαϊκή Ένωση “Support to R&D Strategy for battery based energy storage Costs and benefits for deployment scenarios of battery systems (D7)”
- [16] Διπλωματική εργασία Ευάγγελος Γιαννόπουλος 2014 “Μεθοδολογίες αποθήκευσης περίσσειας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Η Ελληνική διάσταση”, Πολυτεχνείο Κρήτης, τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, τομέας Συστημάτων Παραγωγής.
- [17] Συμφωνία των Παρισίων “<https://www.consilium.europa.eu/el/policies/climate-change/paris-agreement/>”
- [18] HVDC Submarine Power Cables in the World  
“<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC97720/Id-na-27527-en-n.pdf>”
- [19] Διπλωματική εργασία Αγγελική Δ.Χρήστενα 2020 “Προσομοίωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης με και χωρίς διασυνδέσεις”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.
- [20] Ι.Βογιατζάκης, Δημερίδα ΤΕΕ για την ενεργειακή ανάπτυξη της Κρήτης 1989 “Τεχνολογία Υποβρυχίων καλωδίων Σ.Ρ. για μεγάλα βάθη”
- [21] EuroAsia interconnector 2017, Συνοπτική Τεχνική Περιγραφή για την κατασκευή και λειτουργία του έργου «Διασύνδεση ηλεκτρικής ενέργειας Ισραήλ – Κύπρου – Ελλάδας Μεταξύ Κοφίνου Κύπρου, Κορακιάς Κρήτης και Περιφέρειας Αττικής».
- [22] EuroAsia interconnector 2017, “A Trans-European Energy Infrastructure Project”.
- [23] ΑΔΜΗΕ Α.Ε. 2017, “Μελέτη, προμήθεια και εγκατάσταση συστήματος υποβρυχίων και υπογείων καλωδίων 150kV τύπου XLPE Ε. Ρ. δύο κυκλωμάτων για την Διασύνδεση της Κρήτης με το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Πελοπόννησος – Κρήτη)”.
- [24] Διπλωματική εργασία Ηλίας Ρουφαγάλας 2016, “Προσομοίωση Λειτουργίας Αντλησιοταμιευτικής Εγκατάστασης στο μη Διασυνδεδεμένο ΣΗΕ της Κρήτης σε MATLAB”, Πολυτεχνείου Κρήτης τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.
- [25] Διπλωματική Εργασία Άννα Κοντίνη 2016, “Λογισμικό προσομοίωσης λειτουργίας μικρού υδροηλεκτρικού έργου (Μ.Υ.Η.Ε.)”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, τομέας Υδάτινων πόρων και περιβάλλοντος.
- [26] Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο “Απορρίψεις Αιολικών Κρήτης 2015”.
- [27] Ρυθμιστική αρχή ενέργειας “<http://www.rae.gr/site/portal.csp>”
- [28] ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. Στοιχεία μονάδων ΑΗΣ Λινοπεραμάτων.
- [29] ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε Διαφορικό Κόστος Καυσίμου (Μαζούτ – Ντίζελ).

- [30] Διπλωματική Εργασία Μυρτώ Μπαρμπαρήγου 2011, “Οικονομοτεχνική μελέτη αιολικού πάρκου στη δυτική Κρήτη με τη χρήση των λογισμικών WASP και RETSCREEN”, Πολυτεχνείου Κρήτης, τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης.
- [31] Comparative evaluation of power loss in HVAC and HVDC transmission systems “[https://www.researchgate.net/publication/313587347 Comparative evaluation of power loss in HVAC and HVDC transmission systems](https://www.researchgate.net/publication/313587347_Comparative_evaluation_of_power_loss_in_HVAC_and_HVDC_transmission_systems)”
- [32] Τα οικονομικά των Ελληνικών λιγνιτικών μονάδων “[https://thegreentank.gr/wp-content/uploads/2019/09/The-economics-of-Greek-lignite-plants EL.pdf](https://thegreentank.gr/wp-content/uploads/2019/09/The-economics-of-Greek-lignite-plants_EL.pdf)”