



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ -
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΚΑΤΣΟΥΛΑΡΗ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

ΑΕΜ: 6015

**Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και
τα κοιτάσματά τους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2023





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ -
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



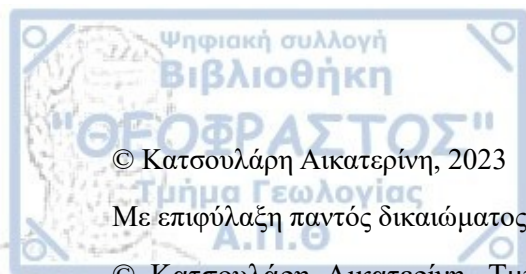
ΚΑΤΣΟΥΛΑΡΗ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

ΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων καθηγητής

Βασίλειος Μέλφος, Καθηγητής



© Κατσουλάρη Αικατερίνη, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

© Κατσουλάρη Αικατερίνη, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Τα μέταλλα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα κοιτάσματά τους – *Διπλωματική Εργασία*

© Katsoulari Aikaterini, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2023

All rights reserved.

The metals in renewable energy sources and their deposits – *Bachelor Thesis*

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: <https://www.onmed.gr>





ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα μέταλλα στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και τα κοιτάσματά τους

Κατσουλάρη Αικατερίνη

Καθώς ο κόσμος σήμερα αντιμετωπίζει την επείγουσα ανάγκη για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και τη μείωση της εξάρτησης από τα πεπερασμένα ορυκτά καύσιμα, η εξερεύνηση και η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν αποκτήσει πρωτοφανή δυναμική. Κεντρικό στοιχείο αυτής της πράσινης ενεργειακής επανάστασης είναι τα μέταλλα που είναι απαραίτητα συστατικά των συστημάτων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτή η διπλωματική εργασία, λοιπόν, στοχεύει στη διερεύνηση της εις βάθος αλληλεπίδρασης μεταξύ των μετάλλων και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ρίχνοντας φως στους κεντρικούς τους ρόλους, τις εφαρμογές και τις προκλήσεις τους.

Ως εκ τούτου, αυτό το έργο χρησιμεύει ως ένας περιεκτικός οδηγός, καλώντας τους αναγνώστες να αναλογιστούν την περίπλοκη συνέργεια μεταξύ των μετάλλων και του τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εμπνέοντας τελικά μια βαθύτερη εκτίμηση για τον κεντρικό ρόλο των μετάλλων στη διαμόρφωση ενός πιο πράσινου και πιο βιώσιμου ενεργειακού τοπίου.

Λέξεις – Κλειδιά: *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Μέταλλα, Κοιτάσματα.*



ABSTRACT

The metals in renewable energy sources and their deposits

Katsoulari Aikaterini

As the world today faces the urgent need to combat climate change and reduce its dependence on finite fossil fuels, the exploration and utilization of renewable energy sources have gained unprecedented momentum. Central to this green energy revolution are metals - often concealed within the intricate components of renewable energy systems. This dissertation, therefore, aims to delve into the in-depth interaction between metals and renewable energy sources, shedding light on their central roles, applications, and challenges. As a result, this work serves as a comprehensive guide, inviting readers to contemplate the intricate synergy between metals and the renewable energy sector, ultimately inspiring a deeper appreciation for the pivotal role of metals in shaping a greener and more sustainable energy landscape.

Keywords: *Renewable Energy Sources, Metals, Deposits.*



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το θέμα της παρούσας πτυχιακής διπλωματικής εργασίας μου ανατέθηκε από τον Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, κ. Βασίλειο Μέλφο τον Νοέμβριο του 2022. Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονείται με στόχο τη μελέτη των μετάλλων που χρησιμοποιούνται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα κοιτάσματα τους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Β. Μέλφο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του και την επιμονή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας.



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	- 6 -
ABSTRACT	- 7 -
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	- 8 -
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	- 10 -
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	- 10 -
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 11 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	- 13 -
ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	- 13 -
1.1.1 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	- 14 -
1.1.2 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	- 16 -
1.1.3 ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	- 18 -
1.1.4 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	- 20 -
1.2 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	- 22 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	- 26 -
ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ & ΜΕΤΑΛΛΑ	- 26 -
2.1 ΠΥΡΙΤΙΟ	- 31 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	- 35 -
ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ & ΜΕΤΑΛΛΑ	- 35 -
3.1 ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ.....	- 39 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	- 42 -
ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ & ΜΕΤΑΛΛΑ.....	- 42 -
4.1 ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ.....	- 46 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	- 49 -
ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ & ΜΕΤΑΛΛΑ	- 49 -
5.1 ΧΑΛΥΒΑΣ	- 53 -
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 55 -

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Μορφές Ενέργειας (Τσαουσίδης, 2021).	- 13 -
Εικόνα 2: Υποδειγματικά μέταλλα για κάθε χρήση (Buckert et al., 2009).	- 14 -
Εικόνα 3: Τρόποι αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας (Τσαουσίδης, 2021).	- 14 -
Εικόνα 4: Αιολική Ενέργεια.	- 16 -
Εικόνα 5: Μέταλλα σπανίων γαιών και ανεμογεννήτρια (Kumari et al., 2018).	- 17 -
Εικόνα 6: Ανεμογεννήτρια & Μέταλλα.	- 18 -
Εικόνα 7: Υδροηλεκτρικός σταθμός (Morgado et al., 2020).	- 20 -
Εικόνα 8: Γεωθερμική Ενέργεια (BGS, 2023).	- 21 -
Εικόνα 9: Παγκόσμια Κατανάλωση Ενέργειας (Μπότσα, 2020).	- 25 -
Εικόνα 10: Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (Κατσέπα, 2017).	- 28 -
Εικόνα 11: Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (Κατσέπα, 2017).	- 28 -
Εικόνα 12: Λειτουργία ηλιακού κυττάρου.	- 29 -
Εικόνα 13: Πυρίτιο.	- 31 -
Εικόνα 14: Τεχνική Czochralski.	- 33 -
Εικόνα 15: Ανεμογεννήτρια & Μέταλλα (BGR, 2016).	- 39 -
Εικόνα 16: Μέταλλα σπανίων γαιών.	- 39 -
Εικόνα 17: Σύστημα υδροηλεκτρικής ενέργειας (Βασίλας, 2020).	- 42 -
Εικόνα 18: Τα κυριότερα κοιτάσματα βωξίτη της Ελλάδας (Μέλφος & Βουδούρης, 2022).	- 48 -
Εικόνα 19: Επισκόπηση προβλεπόμενης εγκατάστασης γεωθερμικής ενέργειας.	- 53 -

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

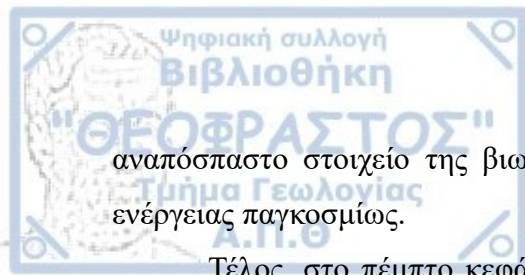
Πίνακας 1: Πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών.	- 29 -
---	--------

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε μια εποχή που χαρακτηρίζεται από αυξημένη ανησυχία για την κλιματική αλλαγή και την εξάντληση των πεπερασμένων αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων, η αναζήτηση βιώσιμων και φιλικών προς το περιβάλλον πηγών ενέργειας έχει αποκτήσει πρωτοφανή δυναμική. Ανάμεσα στις πολυάριθμες λύσεις στο τοπίο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, λοιπόν, τα μέταλλα αναδεικνύονται ως αφανείς ήρωες, οδηγώντας σιωπηλά τη μετάβαση προς την καθαρότερη και πιο βιώσιμη παραγωγή ενέργειας. Κατ' επέκταση, αυτά, τα μέταλλα, συχνά κρυμμένα μέσα στα περίπλοκα συστατικά των συστημάτων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι απαραίτητοι καταλύτες της επανάστασης της πράσινης ενέργειας (Maradin, 2021).

Ως εκ τούτου, η παρούσα εργασία ξεκινάει μια ολοκληρωμένη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μετάλλων και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εμβαθύνοντας στους πολύπλευρους ρόλους, τις εφαρμογές και τις επιπτώσεις τους. Ειδικότερα, η εν λόγω εργασία ξεκινάει με μια πανοραμική άποψη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύνολό τους, αναδεικνύοντας τη βασική τους σημασία για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και τη μείωση της εξάρτησης από τα πεπερασμένα ορυκτά καύσιμα. Έπειτα, το δεύτερο κεφάλαιο εστιάζει στον τομέα της ηλιακής ενέργειας, όπου επισημαίνεται ο κρίσιμος ρόλος των μετάλλων όπως το πυρίτιο, ο χαλκός και τα στοιχεία σπανίων γαιών στην κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελών και ηλιακών συλλεκτών. Καθώς η αποδοτικότητα των ηλιακών συλλεκτών προχωράει σταθερά, ο περίπλοκος ρόλος, αυτών, των μετάλλων γίνεται όλο και πιο αναπόσπαστος στην αξιοποίηση του απεριόριστου δυναμικού του ηλιακού φωτός.

Συνεχίζοντας, το τρίτο κεφάλαιο παραπέμπει στη δυναμική της αιολικής ενέργειας, όπου οι πανύψηλες ανεμογεννήτριες αξιοποιούν την κινητική ενέργεια του αέρα. Εδώ, διερευνάται η σημασία υλικών όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο και οι μαγνήτες σπανίων γαιών στην κατασκευή πτερυγίων ανεμογεννητριών, πύργων και γεννητριών. Καθώς η αιολική ενεργειακή ικανότητα συνεχίζει την ανοδική της τροχιά, το ίδιο συμβαίνει και με τη ζήτηση για, αυτά, τα μέταλλα, ωθώντας τα στο προσκήνιο της βιώσιμης παραγωγής ενέργειας. Το τέταρτο κεφάλαιο οδηγεί τον αναγνώστη στην υδροηλεκτρική ενέργεια, όπου η αδιάκοπη ροή των ποταμών και η δύναμη των φραγμάτων μεταφράζονται στη συγκεκριμένη μορφή ενέργειας. Τα μέταλλα αποτελούν το θεμέλιο της υδροηλεκτρικής υποδομής, από τα θεμέλια από χάλυβα των φραγμάτων μέχρι τους χάλκινους αγωγούς που μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια με απaráμιλλη απόδοση. Η αξιόπιστη διαθεσιμότητα, αυτών, των μετάλλων είναι



αναπόσπαστο στοιχείο της βιωσιμότητας και της αξιοπιστίας των έργων υδροηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο επιχειρείται η εξερεύνηση της γεωθερμικής ενέργειας, μιας συχνά παραμελημένης, αλλά σταθερή πηγή ενέργειας. Εδώ, αποκαλύπτεται ο ρόλος των μετάλλων στα συστήματα γεώτρησης και σωληνώσεων που εξάγουν την εσωτερική θερμότητα της Γης, επιτρέποντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη θέρμανση των κτιρίων. Η επιλογή των κατάλληλων μετάλλων σε, αυτό, το πλαίσιο είναι ζωτικής σημασίας για την αντοχή στις ακραίες συνθήκες κάτω από την επιφάνεια της Γης. Ως εκ τούτου, αναμένεται να αναδειχθεί η κατανόηση μιας πραγματικότητας, όπου τα μέταλλα δεν είναι απλώς παθητικά υλικά, αλλά ενεργοί βοηθοί της μετάβασης του κόσμου σε ένα πιο βιώσιμο και πιο πράσινο μέλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

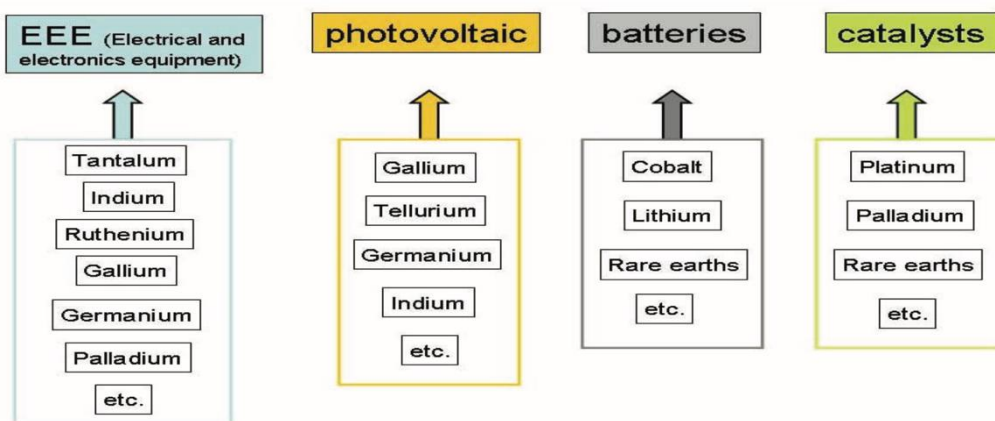
ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σε μια εποχή, χαρακτηριζόμενη από τον αυξανόμενο ανησυχητικό ρυθμό της κλιματικής αλλαγής και τη συνεχή εξάντληση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων, παρατηρείται μια αξιοσημείωτη ανάπτυξη και έρευνα στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Εικόνα 1). Ως εκ τούτου, το εν λόγω, κεφάλαιο χρησιμεύει ως ένας εισαγωγικός οδηγός στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, προσφέροντας μια επισκόπηση διαφόρων μορφών όπως είναι για παράδειγμα η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική και η γεωθερμική ενέργεια, ενώ εστιάζει, επίσης, στον κεντρικό ρόλο που διαδραματίζουν τα μέταλλα στην αξιοποίηση της ενέργειας από αυτές τις πηγές, τονίζοντας τη σημασία τους αναφορικά με τη μείωση των εκπομπών άνθρακα και την αντιμετώπιση της παγκόσμιας πρόκλησης της κλιματικής αλλαγής (Εικόνα 2) (Ang et al., 2022).



Εικόνα 1: Μορφές Ενέργειας (Τσαουσίδης, 2021).



Εικόνα 2: Υποδειγματικά μέταλλα για κάθε χρήση (Buckert et al., 2009).

1.1.1 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



Εικόνα 3: Τρόποι αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας (Τσαουσίδης, 2021).

Η ηλιακή ενέργεια που αξιοποιείται από την ακτινοβολία του ήλιου, αποτελεί έναν από τους πιο άφθονους και προσβάσιμους ανανεώσιμους πόρους της ανθρωπότητας, καθώς χρησιμοποιείται με πολυάριθμους τρόπους όπως διαφαίνεται και στην Εικόνα 3. Η μελέτη για την αξιοποίηση, αυτής, της απεριόριστης πηγής ενέργειας οδήγησε στην ανάπτυξη φωτοβολταϊκών (PV) κυψελών, οι οποίες έχουν αναδειχθεί ως μια επαναστατική τεχνολογία στο πεδίο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ειδικότερα, ο ήλιος, μια ουσιαστικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, προσφέρει στη Γη ένα αδιάκοπο ρεύμα φωτονίων, επιφέροντας έναν ενεργειακό πόρο που επισκιάζει όλες τις τρέχουσες και μελλοντικές ανάγκες της ανθρωπότητας. Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία είναι πεπερασμένα και εξαντλούνται, η ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται ως «αιώνια» και διαθέσιμη σε σχεδόν ολόκληρο τον πλανήτη, καθιστώντας την έναν κρίσιμο παράγοντα στη μετάβαση προς ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον (Guney, 2016).

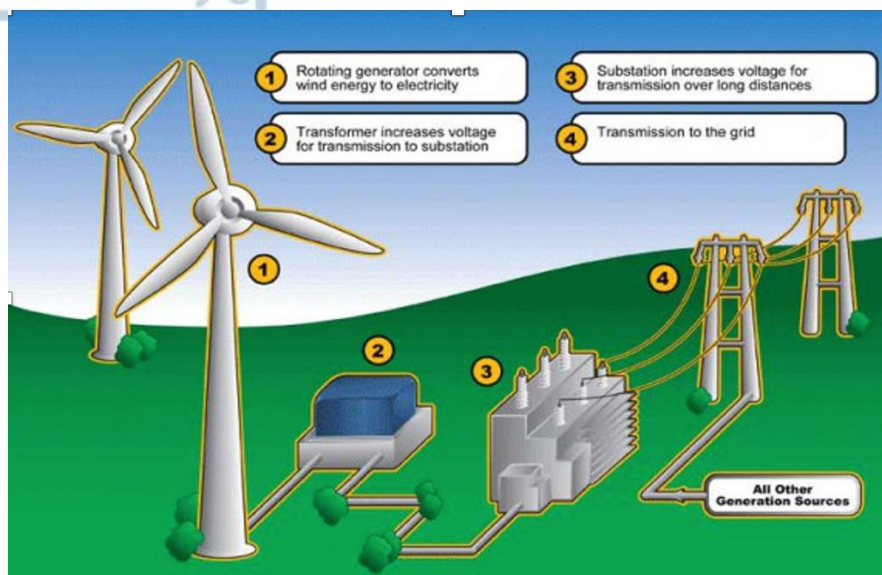
Συνεχίζοντας, η κεντρική τεχνολογία στην οποία βασίζεται η δέσμευση της ηλιακής ενέργειας είναι το φωτοβολταϊκό στοιχείο, κοινώς γνωστό ως ηλιακό στοιχείο. Αυτά τα

κύτταρα διαθέτουν την αξιοσημείωτη ικανότητα να μετατρέπουν απευθείας το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια, διευκολύνοντας έτσι την παραγωγή καθαρής και βιώσιμης ενέργειας. Στο επίκεντρο, αυτής, της ευφυούς διαδικασίας βρίσκεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των φωτονίων από τον ήλιο και των υλικών ημιαγωγών εντός του ηλιακού κυττάρου. Κατ' επέκταση, τα μέταλλα διαδραματίζουν αναπόσπαστο ρόλο στην κατασκευή των φωτοβολταϊκών κυψελών, χρησιμεύοντας ως θεμελιώδη δομικά στοιχεία που επιτρέπουν την αποτελεσματική μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια (Sampaio & Gonzalez 2016).

Το *πυρίτιο*, ειδικότερα, αναφέρεται ως ο ακρογωνιαίος λίθος της τεχνολογίας των ηλιακών κυττάρων, καθώς ως ημιαγωγό υλικό, διαθέτει ιδιότητες που το καθιστούν μοναδικά κατάλληλο για αυτόν τον σκοπό. Η κρυσταλλική του δομή, επιτρέπει την αποτελεσματική απορρόφηση των φωτονίων, ξεκινώντας κατ' αυτόν τον τρόπο την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στο κύτταρο (Goetzberger et al., 2014). Το *αλουμίνιο*, από την άλλη, αποτελεί πρόσθετο μέταλλο που κατέχει, επίσης, εξέχουσα θέση στην κατασκευή των φωτοβολταϊκών κυψελών, καθώς χρησιμοποιείται συνήθως στις δομές στήριξης των ηλιακών συλλεκτών, εφόσον οι ελαφριές και ανθεκτικές στη διάβρωση ιδιότητές του, το καθιστούν ως μια ιδανική επιλογή όσον αφορά το θέμα της αντοχής στην ακαμψία της έκθεσης σε εξωτερικούς χώρους (Sakhrieh & Al-Ghandoor, 2013).

Όπως κατανοεί κανείς, λοιπόν, η απόδοση ενός ηλιακού πάνελ αναφέρεται στην ικανότητά του να μετατρέπει το εισερχόμενο ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των ηλιακών κυψελών έχουν επιτευχθεί με διάφορα μέσα, όπως η βελτιωμένη ποιότητα των υλικών, οι βελτιωμένες διαδικασίες κατασκευής και τα καινοτόμα σχέδια. Αυτές οι εξελίξεις έχουν κορυφωθεί με τη δημιουργία ηλιακών συλλεκτών που μπορούν να μετατρέψουν μεγαλύτερο ποσοστό του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός σε χρησιμοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να συλλεχθεί περισσότερη ενέργεια από την ίδια επιφάνεια, καθιστώντας τις ηλιακές εγκαταστάσεις πιο οικονομικές και αποδοτικές. Τέλος, εκτός από τις βελτιώσεις στην απόδοσή της, η ηλιακή ενέργεια φημίζεται και για τη βιωσιμότητά της, αλλά και τα πολυάριθμα περιβαλλοντικά της οφέλη, καθώς οι ηλιακοί συλλέκτες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να εκπέμπουν επιβλαβή αέρια θερμοκηπίου ή ατμοσφαιρικούς ρύπους, μετριάζοντας τις αρνητικές επιπτώσεις της παραδοσιακής παραγωγής ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα (Guney, 2016).

1.1.2 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



Εικόνα 4: Αιολική Ενέργεια¹.

Στην επιδίωξη βιώσιμων ενεργειακών λύσεων, και η αιολική ενέργεια (Εικόνα 4) έχει αναδειχθεί ως μια ακόμη ιδιαίτερα καθοριστική λύση, καθώς αξιοποιώντας την κινητική ενέργεια του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες αποτελούν εμβληματικά σύμβολα της μετάβασης προς καθαρότερες και πιο φιλικές προς το περιβάλλον πηγές ενέργειας. Συγκεκριμένα, ο άνεμος - μια φυσική δύναμη που προκύπτει από την κίνηση των μαζών αέρα στη Γη - διαθέτει κινητική ενέργεια που μπορεί να συλληφθεί και να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Κατ' επέκταση, η τεχνολογία της αιολικής ενέργειας έχει εξελιχθεί για να αξιοποιήσει, αυτόν, τον ανανεώσιμο πόρο, προσφέροντας μια ανεξάντλητη εναλλακτική λύση στην παραγωγή ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα. Οι ανεμογεννήτριες, λοιπόν, είναι οι κινητήριες δυνάμεις αυτού του μετασχηματισμού, ικανές να εξάγουν ενέργεια από τον άνεμο και να τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια για διάφορες εφαρμογές (Wang, 2010).

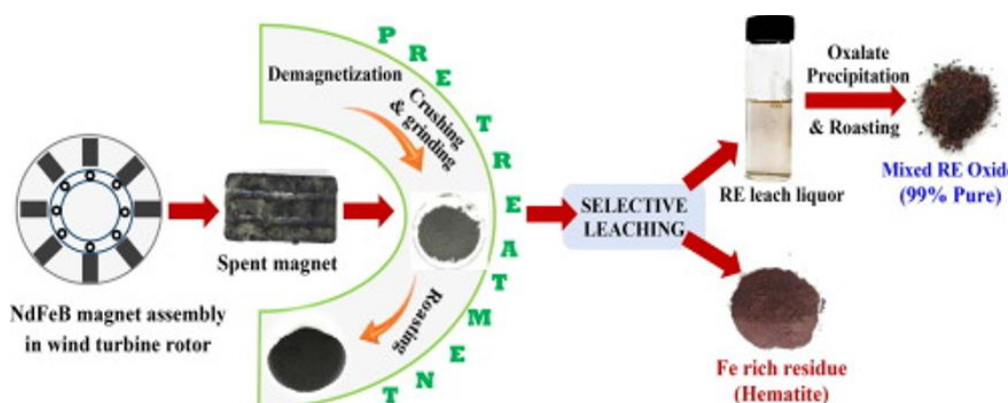
Εν προκειμένω, η κατασκευή των ανεμογεννητριών βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη χρήση μετάλλων, τα οποία παρέχουν τη δομική ακεραιότητα που απαιτείται για να αντέξουν τις ακαμψίες της παραγωγής της αιολικής ενέργειας. Αυτά τα μέταλλα χρησιμοποιούνται στρατηγικά σε διάφορα εξαρτήματα μιας ανεμογεννήτριας, συμπεριλαμβανομένου του πύργου, των πτερυγίων και της γεννήτριας, κάθε ένα από τα οποία κατέχει καθοριστικό ρόλο

¹ https://bottishamvc.org/wp-content/uploads/2021/09/Product_Design_All_year_21.pdf

στην εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Ειδικότερα, ο πύργος μιας ανεμογεννήτριας χρησιμεύει ως τη δομική της βάση, υποστηρίζοντας το βάρος ολόκληρης της κατασκευής και διασφαλίζοντας τη σταθερότητά της σε συνθήκες ανέμου.

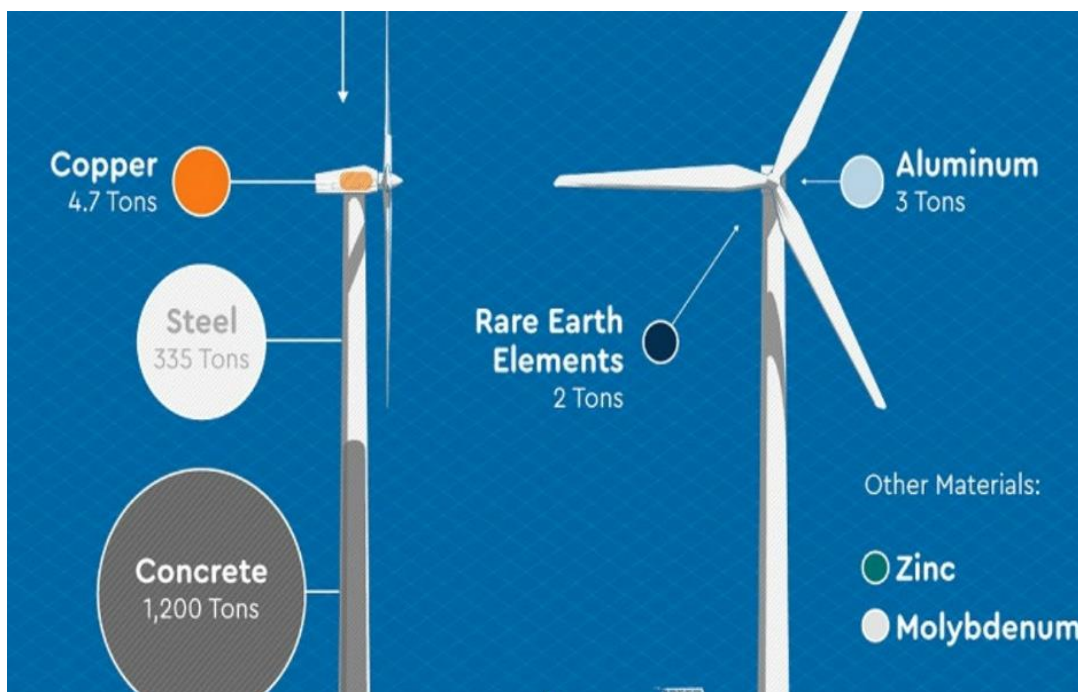
Κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά ενισχυμένα με μέταλλα όπως το *αλουμίνιο*, τα πτερύγια είναι αεροδυναμικά σχεδιασμένα για να μετατρέπουν αποτελεσματικά την αιολική ενέργεια σε περιστροφική κίνηση. Το αλουμίνιο επιλέγεται για τις ελαφριές του ιδιότητες, μειώνοντας το συνολικό βάρος των λεπίδων και διατηρώντας παράλληλα τη δομική αντοχή. Ακόμη, ο συνδυασμός του σύνθετου μετάλλου εξασφαλίζει την ανθεκτικότητα και την ευελιξία που απαιτούνται για την αντοχή στις δυναμικές δυνάμεις που ασκούνται από ριπές ανέμου και αναταράξεις. Τα μέταλλα, επομένως, κατέχουν κεντρικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία.

Ο *χαλκός*, γνωστός για την εξαιρετική ηλεκτρική του αγωγιμότητα, χρησιμοποιείται εκτενώς στα πηνία περιέλιξης της γεννήτριας για να διευκολύνει την αποτελεσματική μετατροπή ενέργειας. Κατ' επέκταση, ελαχιστοποιεί τις απώλειες ενέργειας κατά τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια, με αποτέλεσμα την υψηλότερη συνολική απόδοση του στροβίλου. Επιπροσθέτως, τα στοιχεία *σπανίων γαιών (REEs)*, όπως διαφαίνεται και από την Εικόνα 5, αποτελούν μια άλλη κρίσιμη ομάδα μετάλλων στην τεχνολογία της αιολικής ενέργειας. Το *νεοδύμιο*, το *δυσπρόσιο* και το *πρασεοδύμιο* είναι μερικά από τα στοιχεία σπανίων γαιών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ισχυρών μόνιμων μαγνητών. Αυτοί οι μαγνήτες αποτελούν βασικό συστατικό της γεννήτριας, όπου δημιουργούν το μαγνητικό πεδίο που είναι απαραίτητο για την επαγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων (Davidsson et al., 2012).



Εικόνα 5: Μέταλλα σπανίων γαιών και ανεμογεννήτρια (Kumari et al., 2018).

Καθώς, λοιπόν, η παγκόσμια ικανότητα της αιολικής ενέργειας συνεχίζει να επεκτείνεται με αυξανόμενους ρυθμούς, το ίδιο συμβαίνει και με τη ζήτηση για τα μέταλλα που στηρίζουν, αυτόν, τον τομέα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η κατασκευή ανεμογεννητριών (Εικόνα 6), αιολικών πάρκων και συναφών υποδομών απαιτεί σημαντικές ποσότητες χάλυβα, αλουμινίου και χαλκού. Επιπλέον, η παραγωγή μαγνητών σπανίων γαιών ασκεί πρόσθετη πίεση στην παροχή στοιχείων. Κατανοεί κανείς, επομένως, ότι η αιολική ενέργεια προσφέρει μια σειρά από περιβαλλοντικά οφέλη, εφόσον παράγει ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να εκπέμπει αέρια θερμοκηπίου ή ατμοσφαιρικούς ρύπους, συμβάλλοντας σημαντικά στις προσπάθειες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα (Wang, 2010).



Εικόνα 6: Ανεμογεννήτρια & Μέταλλα².

1.1.3 ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η υδροηλεκτρική ενέργεια, που προέρχεται από την κινητική ενέργεια του κινούμενου νερού, αποτελεί μια από τις παλαιότερες και πιο αξιόπιστες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας. Αξιοποιώντας τη δύναμη των ποταμών και των υδάτινων σωμάτων, η υδροηλεκτρική ενέργεια έχει τροφοδοτήσει πολιτισμούς επί αιώνες, ενώ συνεχίζει να αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο της βιώσιμης παραγωγής ενέργειας. Ειδικότερα, η

² <https://min-eng.blogspot.com/2019/08/just-how-energy-efficient-are-wind.html>

υδροηλεκτρική ενέργεια δραστηριοποιείται στη φυσική κίνηση του νερού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαδικασία ξεκινάει με την ελεγχόμενη απελευθέρωση νερού από μια δεξαμενή ή φράγμα, επιτρέποντάς του να ρέει κατηφορικά υπό τη δύναμη της βαρύτητας. Καθώς το νερό κινείται, περνάει μέσα από τουρμπίνες, αναγκάζοντάς τους να περιστρέφονται και να παράγουν μηχανική ενέργεια. Κάτι το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της λειτουργίας των γεννητριών, όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 7 (Letcher, 2014).

Εν προκειμένω, τα μέταλλα χρησιμεύουν ως θεμελιώδη στοιχεία στην κατασκευή και λειτουργία της υδροηλεκτρικής υποδομής, καθώς η αξιοπιστία και η αποδοτικότητα της παραγωγής της εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση μετάλλων σε διάφορα εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένων των φραγμάτων, των στροβίλων και των γραμμών μεταφοράς. Τα φράγματα, λοιπόν, διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στα έργα της υδροηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμεύοντας ως το πρωταρχικό μέσο ελέγχου και ρύθμισης της ροής του νερού. Αυτές οι ογκώδεις κατασκευές, οι οποίες κατακρατούν νερό σε δεξαμενές, κατασκευάζονται συχνά με συνδυασμό *χάλυβα* και *σκυροδέματος*. Ο οπλισμός *χάλυβα* παρέχει αντοχή σε εφελκυσμό, επιτρέποντας στα φράγματα να αντέχουν την τεράστια πίεση που ασκείται από το αποθηκευμένο νερό. Το σκυρόδεμα, από την άλλη, προσφέρει ανθεκτικότητα και σταθερότητα, διασφαλίζοντας τη δομική ακεραιότητα του φράγματος με την πάροδο του χρόνου (Killingveit, 2014).

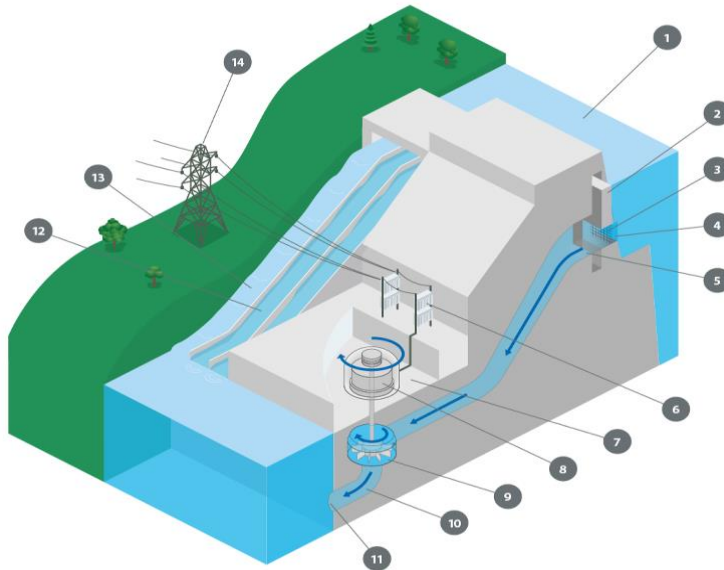
Έπειτα, οι στρόβιλοι αποτελούν βασικά στοιχεία του υδροηλεκτρικού συστήματος, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας του κινούμενου νερού σε περιστροφική κίνηση. Τα μέταλλα, επομένως, είναι ζωτικής σημασίας για την κατασκευή στροβίλων, οι οποίοι πρέπει να λειτουργούν αποτελεσματικά και να αντέχουν τη συνεχή ροή του νερού. Τα πτερύγια του στροβίλου, συνήθως κατασκευασμένα από *χάλυβα* ή *ανοξείδωτο χάλυβα*, είναι σχεδιασμένα για ανθεκτικότητα και αντοχή στη διάβρωση (Letcher, 2014).

Επιπλέον, η γεννήτρια, η οποία λειτουργεί παράλληλα με τον στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, βασίζεται σε μέταλλα όπως ο *χαλκός* για τα πηνία περιέλιξης, διασφαλίζοντας την αποτελεσματική μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Μόλις παράγεται ηλεκτρική ενέργεια, πρέπει να μεταφέρεται αποτελεσματικά από την εγκατάσταση της υδροηλεκτρικής ενέργειας σε σπίτια και επιχειρήσεις. Ο *χαλκός*, που εκτιμάται για την εξαιρετική ηλεκτρική του αγωγιμότητα, κατέχει, επομένως, θεμελιώδη ρόλο στη μετάδοση της ισχύος. Τα *χάλκινα καλώδια* διευκολύνουν την αποτελεσματική και χαμηλής απώλειας μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε

μεγάλες αποστάσεις, ελαχιστοποιώντας τη σπατάλη ενέργειας κατά τη μετάδοση (Letcher, 2014).

Key:

1. Reservoir
2. Control Gate
3. Trash Rack
4. Intake
5. Penstock
6. Transformer
7. Powerhouse
8. Generator
9. Turbine
10. Draft tube
11. Outflow
12. Spillway
13. Fish ladder
14. Transmission



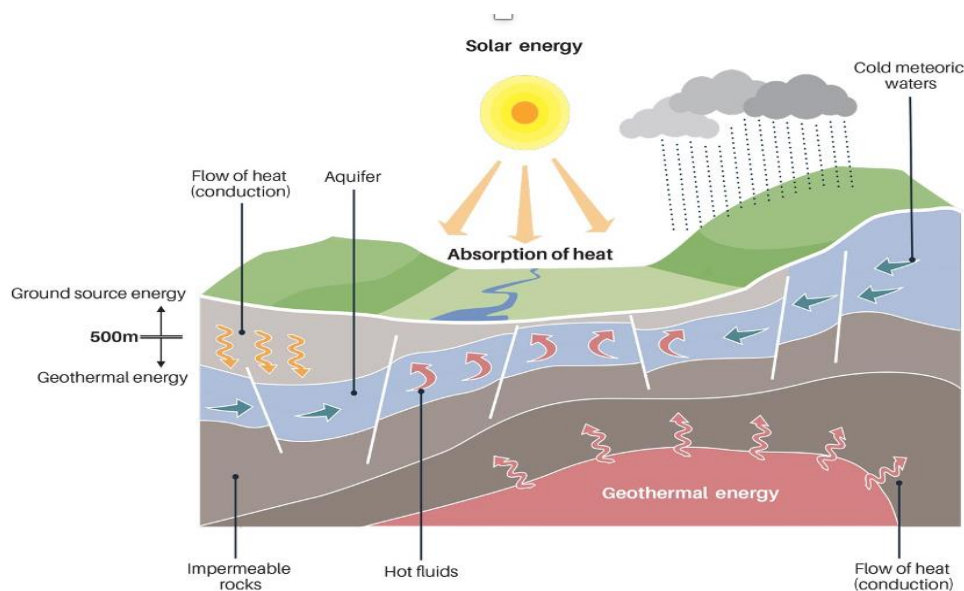
Εικόνα 7: Υδροηλεκτρικός σταθμός (Morgado et al., 2020).

Εν κατακλείδι, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι σχετικά χαμηλό σε σύγκριση με τις πηγές ενέργειας που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Παράγει ελάχιστες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά τη λειτουργία της, συμβάλλοντας στις προσπάθειες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, ενώ επιπλέον, τα έργα υδροηλεκτρικής ενέργειας συχνά χρησιμοποιούν υπάρχοντα υδάτινα σώματα και τοπία, μειώνοντας την ανάγκη για πρόσθετη χρήση γης και ελαχιστοποιώντας τη διαταραχή των οικοτόπων (Yah et al., 2017).

1.1.4 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η γεωθερμική ενέργεια αναδεικνύεται ως μια ιδιαίτερα αξιόπιστη επιλογή, αντλώντας ενέργεια από τις εσωτερικές δεξαμενές θερμότητας της Γης. Συγκεκριμένα, κάτω από την επιφάνεια της Γης, οι θερμοκρασίες αυξάνονται με το βάθος, λόγω της εσωτερικής παραγωγής θερμότητας του πλανήτη. Αυτή η θερμική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί για διάφορους σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της άμεσης θέρμανσης. Οι

σταθμοί και τα συστήματα γεωθερμίας έχουν σχεδιαστεί για να αξιοποιούν, αυτή, τη θερμότητα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και να παρέχουν βιώσιμες λύσεις θέρμανσης (Εικόνα 8). Τα μέταλλα, λοιπόν, διαδραματίζουν κρίσιμο και συχνά παρασκηνιακό ρόλο στην ανάπτυξη και λειτουργία έργων γεωθερμικής ενέργειας (Fridleifsson, 2001).



Εικόνα 8: Γεωθερμική Ενέργεια (BGS, 2023³).

Ένα από τα αρχικά και κρίσιμα βήματα για την ανάπτυξη ενός γεωθερμικού πόρου, λοιπόν, είναι η γεώτρηση στον φλοιό της Γης προκειμένου να επιτυγχάνεται η πρόσβαση στις δεξαμενές ζεστού νερού ή ατμού. Τα συστήματα διάτρησης, ιδιαίτερα τα τρυπάνια και τα περιβλήματα, εκτίθενται σε σκληρές υπόγειες συνθήκες. Για αυτά τα εξαρτήματα επιλέγονται μέταλλα όπως ο *χάλυβας* και τα κράματα με αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Η στιβαρότητα και η αντοχή τους στη διάβρωση διασφαλίζουν ότι οι εργασίες γεώτρησης μπορούν να αντέξουν τα δύσκολα περιβάλλοντα κάτω από την επιφάνεια της Γης (Barbier, 2022).

Μόλις επιτευχθεί, λοιπόν, η πρόσβαση στα γεωθερμικά ρευστά, πρέπει να μεταφερθούν στην επιφάνεια για περαιτέρω επεξεργασία. Τα συστήματα σωληνώσεων είναι υπεύθυνα για αυτό το κρίσιμο έργο. Η επιλογή των υλικών είναι πρωταρχικής σημασίας σε αυτά τα συστήματα, καθώς πρέπει να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες, πίεση και πιθανά διαβρωτικά στοιχεία που υπάρχουν στο γεωθερμικό ρευστό. Ο ανοξείδωτος χάλυβας και τα

³ <https://www.bgs.ac.uk/geology-projects/geothermal-energy/>

ανθεκτικά στη διάβρωση κράματα χρησιμοποιούνται συχνά για γεωθερμικούς αγωγούς, εξασφαλίζοντας μακροπρόθεσμη αξιοπιστία και ασφάλεια. Επιπροσθέτως, τα γεωθερμικά ρευστά, πλούσια σε θερμική ενέργεια, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οδηγώντας στροβίλους σε γεωθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Οι εναλλάκτες θερμότητας, οι οποίοι μεταφέρουν θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό σε ένα λειτουργικό ρευστό που διαστέλλεται και κινεί τους στροβίλους, αποτελούν αναπόσπαστα συστατικά αυτής της διαδικασίας. Μέταλλα όπως ο χαλκός, ο χάλυβας και τα κράματα με εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα ευνοούνται για την κατασκευή αυτών των εναλλακτών θερμότητας, καθώς διευκολύνουν αποτελεσματικά τη μεταφορά θερμότητας, συμβάλλοντας τελικά στην αποδοτικότητα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Barbier, 2022).

Κλείνοντας, η επιλογή των κατάλληλων μετάλλων για γεωθερμικές εφαρμογές είναι πρωταρχικής σημασίας λόγω των ακραίων συνθηκών που συναντώνται υπόγεια. Οι υψηλές θερμοκρασίες, τα διαβρωτικά στοιχεία και οι διακυμάνσεις της πίεσης προκαλούν τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα γεωθερμικά συστήματα. Ακόμη, δεν θα πρέπει να παραλειφθεί ότι η γεωθερμική ενέργεια έχει πολυάριθμα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, αφού παράγει ελάχιστες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά τη λειτουργία της, συμβάλλοντας στη μείωση των αποτυπωμάτων άνθρακα στην παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, οι γεωθερμικοί σταθμοί καταλαμβάνουν σχετικά μικρές χερσαίες εκτάσεις και έχουν ελάχιστη οπτική επίδραση σε σύγκριση με ορισμένες άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθιστώντας τους μια ελκυστική επιλογή για περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές (Fridleifsson, 2001).

1.2 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.2.1 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

Με υπόβαθρο όσα προαναφέρθηκαν, κατανοεί κανείς πως η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελεί μιας κομβικής και επείγουσας μορφής απάντηση στην απειλή της κλιματικής αλλαγής. Για αιώνες, τα ορυκτά καύσιμα ήταν η κύρια μηχανή που τροφοδοτούσε τον ανθρώπινο πολιτισμό, αλλά η καύση τους είχε σοβαρό κόστος για τον πλανήτη (Lohman, 2009).

Κατ' επέκταση, η απελευθέρωση αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα από την καύση ορυκτών καυσίμων έχει επιταχύνει την υπερθέρμανση του πλανήτη, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας, το λιώσιμο των πάγων, την συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, και γενικότερα την εκδήλωση πολυάριθμων περιβαλλοντικών κρίσεων. Επομένως, η κλιματική κρίση, που τροφοδοτείται από ανθρώπινες δραστηριότητες,

αποτελεί μια από τις πιο επείγουσες προκλήσεις της σημερινής εποχής. Η καύση ορυκτών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του άνθρακα, του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, έχει απελευθερώσει τεράστιες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και άλλων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα καθώς η παγκόσμια χρήση τους κυμαίνεται σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα (Εικόνα 9). Αυτά τα αέρια παγιδεύουν τη θερμότητα από τον ήλιο, δημιουργώντας το «φαινόμενο του θερμοκηπίου» που θερμαίνει τον πλανήτη. Οι συνέπειες επομένως, αυτής, της θέρμανσης είναι εκτεταμένες και πολυδιάστατες. Οι παγετώνες και οι πολικοί πάγοι λιώνουν με ανησυχητικούς ρυθμούς, οδηγώντας σε άνοδο τη στάθμη της θάλασσας που απειλεί τις παράκτιες κοινότητες σε όλο τον κόσμο. Τα ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως οι τυφώνες, οι ξηρασίες και οι πυρκαγιές, γίνονται όλο και πιο συχνές και σοβαρές, ενώ τα οικοσυστήματα διαταράσσονται και τα είδη ωθούνται στην εξαφάνιση. Η ανθρώπινη υγεία, η επισιτιστική ασφάλεια και οι πόροι γλυκού νερού κινδυνεύουν όλο και περισσότερο (Lohman, 2009).

Άρα, τα ορυκτά καύσιμα αποτέλεσαν το υπόβαθρο της εκβιομηχάνισης, παρέχοντας την ενέργεια που απαιτείται για την τροφοδοσία των οικονομιών και τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου. Ωστόσο, τα οφέλη έχουν ένα μεγάλο κόστος. Όταν ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο καίγονται για ενέργεια, απελευθερώνουν όχι μόνο CO_2 αλλά και μεθάνιο και οξείδιο του αζώτου, δηλαδή, ισχυρά αέρια θερμοκηπίου που εντείνουν το φαινόμενο της παγίδευσης θερμότητας. Αυτές οι εκπομπές έχουν οδηγήσει σε ταχεία αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας. Από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, η μέση θερμοκρασία της Γης έχει αυξηθεί κατά περίπου 1,2 βαθμούς Κελσίου (2,2 βαθμούς Φαρενάιτ), με πιο έντονη θέρμανση που παρατηρείται σε πολλές περιοχές. Αυτή η τάση θέρμανσης αποδίδεται κυρίως στις ανθρώπινες δραστηριότητες, με κυρίαρχη κινητήρια δύναμη την καύση ορυκτών καυσίμων (Lohman, 2009).

Ως εκ τούτου, η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντιπροσωπεύει μια επιτακτική και απαραίτητη λύση για την κλιματική κρίση. Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αξιοποιούν την ενέργεια από πηγές που είναι άφθονες, διαρκείς και παράγουν ελάχιστες έως καθόλου άμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τη λειτουργία τους. Τα ηλιακά πάνελ συλλαμβάνουν το φως του ήλιου και το μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια, προσφέροντας μια καθαρή και άφθονη πηγή ενέργειας. Τα συστήματα ηλιακής ενέργειας μπορούν να αναπτυχθούν σε στέγες, σε ηλιακά αγροκτήματα ή ακόμη και να ενσωματωθούν σε δομικά υλικά. Η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών βελτιώνεται σταθερά, καθιστώντας την ηλιακή ενέργεια όλο και πιο οικονομική και προσβάσιμη. Οι ανεμογεννήτριες αξιοποιούν την κινητική ενέργεια του

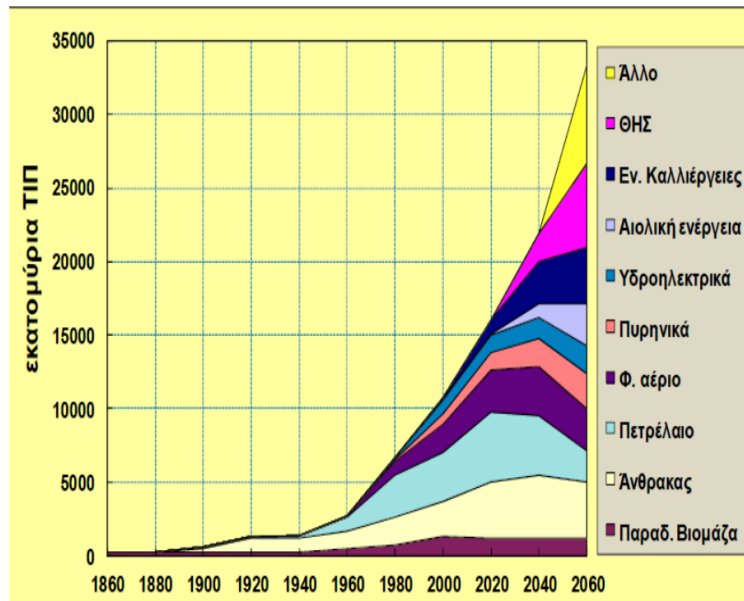
ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έπειτα, η αιολική ενέργεια είναι καθαρή και επεκτάσιμη, με τα χερσαία και υπεράκτια αιολικά πάρκα να παράγουν σημαντικές ποσότητες ενέργειας. Οι εξελίξεις στον σχεδιασμό και την τεχνολογία των στροβίλων έχουν αυξήσει την απόδοση και την αξιοπιστία της, ενώ τα υδροηλεκτρικά συστήματα αξιοποιούν την κίνηση του νερού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Είτε από φράγματα, ποτάμια ή παλιρροιακά ρεύματα, η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι μια σταθερή και βιώσιμη πηγή ενέργειας (Ang et al., 2022).

Με τη μετάβαση από τα ορυκτά καύσιμα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μπορούν, λοιπόν, να μειωθούν ουσιαστικά οι εκπομπές άνθρακα. Τα ηλιακά, αιολικά και υδροηλεκτρικά συστήματα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να εκπέμπουν CO₂ ή άλλα αέρια θερμοκηπίου κατά τη λειτουργία τους. Αυτή η αλλαγή στην παραγωγή ενέργειας μειώνει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και μετριάξει τον κύριο παράγοντα της υπερθέρμανσης του πλανήτη (Olabi & Abdelkareem, 2022).

Επιπλέον, οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εξελίσσονται συνεχώς, καθιστώντας τις πιο αποτελεσματικές και οικονομικά αποδοτικές. Αυτό, τις καθιστά ολοένα και πιο ανταγωνιστικές με τα ορυκτά καύσιμα από άποψη τιμής και απόδοσης, δίνοντας περαιτέρω κίνητρα για τη μετάβαση στην καθαρή ενέργεια. Η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής μέσω της υιοθέτησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν είναι καθήκον κανενός έθνους ή τομέα μόνο. Είναι μια παγκόσμια επιταγή. Η διεθνής συνεργασία και οι δεσμεύσεις, όπως η *Συμφωνία του Παρισιού*⁴, επιδιώκουν να περιορίσουν την υπερθέρμανση του πλανήτη κάτω από τους 2 βαθμούς Κελσίου σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα.

Η επίτευξη, αυτού, του στόχου απαιτεί συλλογική προσπάθεια για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα και την προώθηση βιώσιμων ενεργειακών πρακτικών. Συμπερασματικά, η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελεί ένα ιδιαίτερα κρίσιμο βήμα για την αντιμετώπιση της επείγουσας πρόκλησης της κλιματικής αλλαγής. Τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία έχουν τροφοδοτήσει την ανθρώπινη πρόοδο για γενιές, έχουν επίσης συμβάλει σημαντικά στην κλιματική κρίση. Υιοθετώντας την ηλιακή, την αιολική και την υδροηλεκτρική ενέργεια και άλλες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μπορεί να μειωθούν οι εκπομπές άνθρακα, να μετριαστούν οι αρνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και να ανοίξει ο δρόμος για ένα πιο βιώσιμο και ανθεκτικό μέλλον για τον πλανήτη, αλλά και τις επόμενες γενιές (Olabi & Abdelkareem, 2022).

⁴ https://www.europarl.europa.eu/news/el/headlines/society/20191115STO66603/ee-kai-sumfonia-tou-parisiou-gia-to-klima-stochos-i-klimatiki-oudeterotita?at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=DSA&at_goal=TR_G&at_audience=&at_topic=Climate_policies&gclid=Cj0KCQjw06-oBhC6ARIsAGuzdw3xEEMRY14HpIz7NU87TzGLoHEw_ugL-qkQsk_HEvfUP0bk5D5SBLqEaAtijEALw_wcB



Εικόνα 9: Παγκόσμια Κατανάλωση Ενέργειας (Μπότσα, 2020).

ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ & ΜΕΤΑΛΛΑ

Καθώς η εν λόγω εργασία εμβαθύνει στον κόσμο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, γίνεται προφανές ότι τα μέταλλα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της επιτυχίας και της βιωσιμότητας αυτών των τεχνολογιών. Σε αυτό το κεφάλαιο, λοιπόν, θα διερευνηθεί ο κρίσιμος ρόλος των μετάλλων στην ηλιακή ενέργεια, και ιδιαίτερα στα φωτοβολταϊκά κύτταρα και τους ηλιακούς συλλέκτες. Θα αναφερθούν τα βασικά μέταλλα όπως το πυρίτιο, ο χαλκός και διάφορα στοιχεία σπανίων γαιών, ενώ ταυτόχρονα θα επισημανθεί και η διαδικασία κατασκευής των ηλιακών κυψελών. Επιπλέον, θα αναλυθεί η γεωγραφική κατανομή των μετάλλων που απαιτούνται για την παραγωγή της ηλιακής ενέργειας, αναδεικνύοντας, ωστόσο, και τις παγκόσμιες επιπτώσεις, αυτής, της μετασχηματιστικής τεχνολογίας.

Ξεκινώντας αξίζει να αναφερθεί ότι το *πυρίτιο* χαρακτηρίζεται ως το θεμελιώδες μεταλλοειδές στα φωτοβολταϊκά κύτταρα, χρησιμεύοντας ως το θεμέλιο της τεχνολογίας της ηλιακής ενέργειας. Συγκεκριμένα, είναι ένα ημιαγωγό υλικό με ιδιότητες που το καθιστούν ιδανικό για τη μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ τα ηλιακά κύτταρα με βάση το πυρίτιο κυριαρχούν στην αγορά λόγω της αξιοπιστίας, της αποτελεσματικότητας και της ευρείας διαθεσιμότητάς τους. Παρακάτω, παρατίθενται τα βασικά βήματα αναφορικά με την κατασκευή των ηλιακών κυψελών πυριτίου:

Βήμα 1 → Σχηματισμός πλινθίων πυριτίου. Το ακατέργαστο πυρίτιο, συνήθως με τη μορφή πυριτίου μεταλλουργικής ποιότητας, υφίσταται μια διαδικασία καθαρισμού για την απομάκρυνση των ακαθαρσιών. Αυτό το καθαρισμένο πυρίτιο στη συνέχεια τήκεται και κρυσταλλώνεται για να σχηματίσει πλινθώματα πυριτίου, τα οποία κόβονται σε λεπτές γκοφρέτες (wafers).

Βήμα 2 → Επεξεργασία γκοφρέτας. Οι γκοφρέτες πυριτίου υποβάλλονται σε μια σειρά επεξεργασιών για τη δημιουργία των απαραίτητων ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Αυτό περιλαμβάνει την προσθήκη προσμείξεων για τη δημιουργία των συνδέσεων P-N που είναι απαραίτητες για τη ροή ηλεκτρονίων και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Βήμα 3 → Συναρμολόγηση ηλιακών κυττάρων. Οι γκοφρέτες πυριτίου συναρμολογούνται σε ηλιακές κυψέλες. Οι μεταλλικές επαφές, συνήθως κατασκευασμένες από ασήμι ή αλουμίνιο, εκτυπώνονται στην επιφάνεια του στοιχείου για τη συλλογή του παραγόμενου

ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτές οι μεταλλικές επαφές εξασφαλίζουν αποτελεσματική συλλογή και φόρτιση.

Βήμα 4 → Συναρμολόγηση μονάδας. Οι μεμονωμένες ηλιακές κυψέλες συνδέονται με σειρά ή παράλληλα και εγκλωβίζονται σε ένα προστατευτικό κάλυμμα για να δημιουργήσουν ένα ηλιακό πάνελ ή μονάδα. Αυτό το συγκρότημα ενσωματώνει πλαίσια αλουμινίου ή ανοξείδωτου χάλυβα για να παρέχει δομική στήριξη (Peng & Lee, 2010).

Έπειτα και ενώ το πυρίτιο αποτελεί το πρωταρχικό υλικό των ηλιακών κυψελών, ο χαλκός κατέχει, επίσης, καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση της απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών. Συγκεκριμένα, ο χαλκός είναι γνωστός για την εξαιρετική ηλεκτρική του αγωγιμότητα, καθιστώντας τον ιδανική επιλογή για τις διασυνδέσεις και την καλωδίωση εντός των ηλιακών συλλεκτών. Η χαμηλή αντίσταση του μετάλλου εξασφαλίζει ελάχιστη απώλεια ενέργειας κατά τη μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας από τα ηλιακά στοιχεία στους μετατροπείς και τελικά στο δίκτυο. Στα σύγχρονα ηλιακά πάνελ, χάλκινες κορδέλες και ζυγοί συνδέουν τις ηλιακές κυψέλες, σχηματίζοντας ένα δίκτυο που μεταφέρει αποτελεσματικά το ηλεκτρικό ρεύμα. Η αγωγιμότητα του χαλκού μειώνει τις απώλειες αντίστασης, βελτιστοποιώντας τη συνολική απόδοση του ηλιακού πάνελ (Guney, 2016).

Ωστόσο, και ενώ το πυρίτιο και ο χαλκός είναι τα κύρια μέταλλα στην ηλιακή τεχνολογία, τα στοιχεία *σπανίων γαιών* είναι επίσης ζωτικής σημασίας, αν και σε μικρότερες ποσότητες. Τα REE, ιδιαίτερα το *νεοδύμιο*, το *δυσπρόσιο* και το *πρασεοδύμιο*, είναι σημαντικά για την παραγωγή ισχυρών μαγνητών που χρησιμοποιούνται στις γεννήτριες ορισμένων τύπων ηλιακών συλλεκτών, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται σε συστήματα συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας. Αυτοί οι μαγνήτες, γνωστοί ως μαγνήτες νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου (NdFeB), δημιουργούν το μαγνητικό πεδίο που είναι απαραίτητο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα συστήματα CSP. Η υψηλή μαγνητική ισχύς των μαγνητών NdFeB επιτρέπει τη συμπαγή σχεδίαση γεννητριών, ενισχύοντας την απόδοση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Stegen, 2015). Έπειτα, αξίζει να αναφερθεί ότι τα πρώιμα ηλιακά κύτταρα πυριτίου εμφανίζουν σχετικά χαμηλή απόδοση μετατροπής, συνήθως περίπου 6-8%. Ωστόσο, οι συνεχιζόμενες προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης έχουν αποφέρει ουσιαστικές βελτιώσεις. Ειδικότερα:

Μονοκρυσταλλικό και πολυκρυσταλλικό πυρίτιο: Οι μονοκρυσταλλικές κυψέλες πυριτίου (Εικόνα 10), που αποτελούνται από μονοκρυσταλλικές δομές, τείνουν να είναι πιο αποτελεσματικές, αλλά είναι πιο δαπανηρές στην παραγωγή. Τα κύτταρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Εικόνα 11), κατασκευασμένα από πολλαπλές κρυσταλλικές δομές, είναι πιο

οικονομικά, αλλά ελαφρώς λιγότερο αποδοτικά. Και οι δύο τύποι έχουν επωφεληθεί από τις βελτιώσεις στην επεξεργασία γκοφρέτας πυρίτιου και στην ποιότητα του υλικού.



Εικόνα 10: Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (Κατσέπα, 2017).



Εικόνα 11: Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (Κατσέπα, 2017).

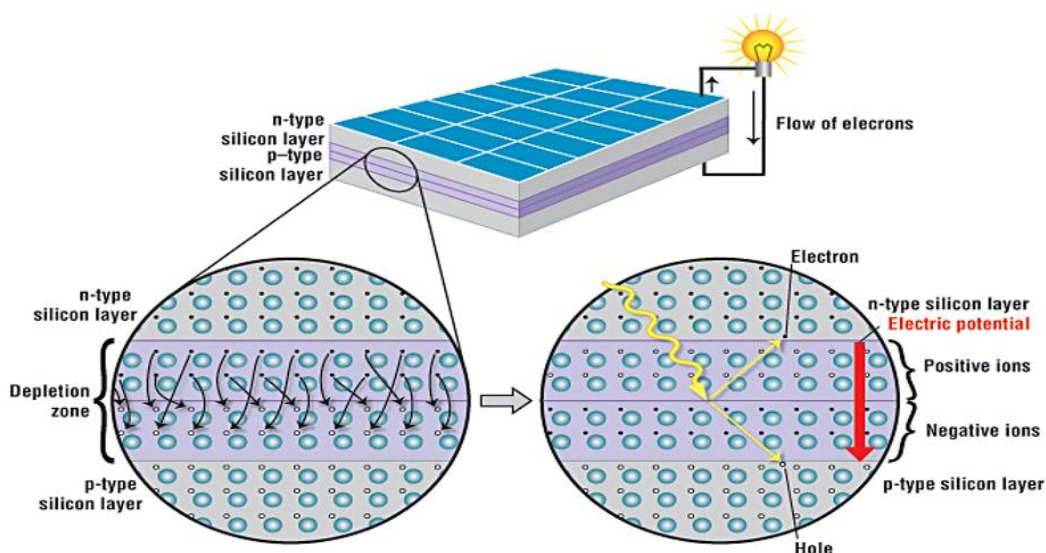
Ηλιακά κύτταρα λεπτής μεμβράνης: Οι ηλιακές κυψέλες λεπτής μεμβράνης, όπως οι κυψέλες τελλουρίου καδμίου (CdTe) και σεληνιούχου γαλλίου χαλκού (CIGS), προσφέρουν πλεονεκτήματα κόστους και ευελιξίας, αλλά ιστορικά υστερούν σε σχέση με το πυρίτιο όσον αφορά την απόδοση. Ωστόσο, οι ερευνητικές προσπάθειες έχουν ενισχύσει την αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών λεπτής μεμβράνης, καθιστώντας τις ανταγωνιστικές.

Διαδοχικά ηλιακά κύτταρα: Τα ηλιακά κύτταρα διπλής σύνδεσης ή πολλαπλών συνδέσεων, τα οποία στοιβάζουν πολλαπλά στρώματα ημιαγωγών υλικών, έχουν επιτύχει εντυπωσιακά κέρδη απόδοσης. Με τη σύλληψη ενός ευρύτερου φάσματος ηλιακού φωτός, αυτά τα κύτταρα (Εικόνα 12), μπορούν να φτάσουν σε απόδοση άνω του 40% (Grandell & Hook, 2015). Ακόμη, όμως, αξίζει να επισημανθεί ότι η παγκόσμια βιβλιογραφία αναφέρει ότι η έρευνα σε υλικά επόμενης γενιάς ωθεί τα όρια της απόδοσης των ηλιακών κυττάρων. Οι

αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως τα ηλιακά κύτταρα περοβσκήτη, τα οργανικά ηλιακά κύτταρα και τα ηλιακά κύτταρα κβαντικής κουκκίδας, προσφέρουν συναρπαστικές προοπτικές για περαιτέρω βελτιώσεις. Αυτά τα υλικά προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως ευελιξία, χαμηλότερο κόστος παραγωγής και δυνατότητα επίτευξης υψηλότερης απόδοσης από τα παραδοσιακά κύτταρα με βάση το πυρίτιο (Fang et al., 2018).

Πίνακας 1: Πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών⁵.

Τύπος	Λεπτού Υμενίου	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά
Απόδοση ανά Μονάδα Επιφάνειας	a-Si: 4.5-6.5% μ-Si: 8-9% CIS-CIGS: 6-12% CdTe: 6-11%	11-16%	11-19%
Επιφάνεια ανά kWp	9-25 m ²	7-9 m ²	5.5-9 m ²



Εικόνα 12: Λειτουργία ηλιακού κυττάρου⁶.

Κλείνοντας, εκτός από το πυρίτιο και τον χαλκό, πολλά άλλα μέταλλα και κοιτάσματα αποτελούν κρίσιμα συστατικά των τεχνολογιών ηλιακής ενέργειας. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται σε διάφορα μέρη φωτοβολταϊκών κυψελών, ηλιακών συλλεκτών και άλλων συστημάτων ηλιακής ενέργειας. Εδώ είναι μερικά από τα βασικά μέταλλα και μέταλλα που βρίσκονται στην ηλιακή ενέργεια:

⁵ https://helapco.gr/pdf/PV_Guide_Aug_2013.pdf

⁶ https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-structure-of-solar-cells-showing-all-the-layers-including_fig3_350769066

→ **Ασήμι (Ag):** Το ασήμι χρησιμοποιείται ως αγωγίμο υλικό στις μπροστινές και πίσω επαφές πολλών ηλιακών κυψελών κρυσταλλικού πυριτίου, ενώ έχει εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα, επιτρέποντας την αποτελεσματική συλλογή και μετάδοση φορτίου.

→ **Αλουμίνιο (Al):** Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται συνήθως για πλαισίωση και δομικά στοιχεία σε ηλιακούς συλλέκτες. Είναι ελαφρύ και ανθεκτικό στη διάβρωση, καθιστώντας το ιδανική επιλογή για την υποστήριξη και προστασία των φωτοβολταϊκών μονάδων.

→ **Τελλουρίδιο του καδμίου (CdTe):** Το τελλουρίδιο του καδμίου είναι ένα ημιαγωγικό υλικό λεπτής μεμβράνης που χρησιμοποιείται σε ηλιακά κύτταρα λεπτής μεμβράνης. Τα ηλιακά πάνελ CdTe είναι γνωστά για την οικονομική τους αποδοτικότητα και χρησιμοποιούνται συχνά σε μεγάλης κλίμακας ηλιακά έργα.

→ **Σελενίδιο του γαλλίου χαλκού ινδίου (CIGS):** Το CIGS είναι ένα άλλο ημιαγωγό λεπτής μεμβράνης που χρησιμοποιείται σε ηλιακά κύτταρα λεπτής μεμβράνης. Προσφέρει ευελιξία και αποτελεσματικότητα και είναι μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά ηλιακά κύτταρα με βάση το πυρίτιο.

→ **Γάλλιο (Ga):** Το γάλλιο χρησιμοποιείται στην κατασκευή ηλιακών κυψελών πολλαπλών συνδέσεων υψηλής απόδοσης, τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά σε συγκεντρωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα.

→ **Ινδίο (In):** Το ινδίο χρησιμοποιείται στις ηλιακές κυψέλες τεχνολογίας λεπτής μεμβράνης CIGS (Copper Indium Gallium Selenide), συμβάλλοντας στην αποτελεσματικότητα και την απόδοσή τους.

→ **Τελλούριο (Te):** Το τελλούριο είναι βασικό συστατικό των ηλιακών κυψελών του τελλουρίου καδμίου (CdTe), το οποίο βοηθάει στην απορρόφηση του ηλιακού φωτός και τη μετατροπή του σε ηλεκτρική ενέργεια.

→ **Στοιχεία σπανίων γαιών (REEs):** Ορισμένες ηλιακές τεχνολογίες, όπως τα συγκεντρωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα, βασίζονται σε στοιχεία σπανίων γαιών όπως το νεοδύμιο, το δυσπρόσιο και το πρασεοδύμιο για την παραγωγή ισχυρών μαγνητών που χρησιμοποιούνται σε γεννήτριες.

→ **Ψευδάργυρος (Zn):** Ο ψευδάργυρος χρησιμοποιείται σε ορισμένους τύπους ηλιακών κυψελών λεπτής μεμβράνης και ιδιαίτερα σε, αυτούς, που βασίζονται σε θειούχο κασσίτερο ψευδάργυρου χαλκού (CZTS), ένα αναδυόμενο φωτοβολταϊκό υλικό.

→ **Σελήνιο (Se):** Το σελήνιο χρησιμοποιείται στην κατασκευή ηλιακών κυψελών χαλκού ινδίου σεληνιούχου γαλλίου (CIGS) ως μέρος του υλικού ημιαγωγών.

→ **Γυαλί και διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂):** Το γυαλί, συχνά επικαλυμμένο με διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂), χρησιμοποιείται ως προστατευτικό κάλυμμα στους ηλιακούς συλλέκτες. Επιτρέπει στο φως του ήλιου να περάσει, ενώ προστατεύει τα ηλιακά κύτταρα από περιβαλλοντικούς παράγοντες.

→ **Φώσφορος (P) και Βόριο (B):** Αυτά τα στοιχεία χρησιμοποιούνται σε γκοφρέτες πυριτίου για τη δημιουργία των απαραίτητων ηλεκτρικών ιδιοτήτων στα ηλιακά κύτταρα (Eliasson, 2001).

2.1 ΠΥΡΙΤΙΟ



Εικόνα 13: Πυρίτιο⁷.

Το πυρίτιο (Si) (Εικόνα 13), αποτελεί τη βάση για περίπου το 90% της παγκόσμιας παραγωγής φωτοβολταϊκών, μια κυριαρχία που βασίζεται στην τεράστια επιστημονική και τεχνική υποδομή που αναπτύχθηκε από τη δεκαετία του 1960. Άλλωστε, διενεργήθηκαν σημαντικές κρατικές και βιομηχανικές επενδύσεις σε προγράμματα διερεύνησης των χημικών και ηλεκτρονικών ιδιοτήτων του Si, ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία του απαραίτητου εξοπλισμού αναφορικά με την επίτευξη της απαιτούμενης καθαρότητας του υλικού και της κρυσταλλικής δομής του κατά την επεξεργασία. Η εκτεταμένη γνώση που αποκτήθηκε σχετικά με το πυρίτιο, τα χαρακτηριστικά του και η αφθονία του στη Γη, το

⁷ https://www.ehow.com/how-does_4899802_how-silicon-obtained.html

κατέστησε βιώσιμο και οικονομικά αποδοτικό μέσο για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας (Luque & Hegedus, 2003).

Ωστόσο, λόγω της ευθραυστότητάς του, το πυρίτιο απαιτεί το σχηματισμό σχετικά παχύρρευστων στοιχείων. Αυτό σημαίνει ότι ορισμένα από τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται κατά την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας πρέπει να διανύσουν σημαντικές αποστάσεις για να ενώσουν τη ροή του ρεύματος και να συμβάλουν στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Κατά συνέπεια, το υλικό πρέπει να παρουσιάζει υψηλή καθαρότητα και δομική τελειότητα για να αποτρέψει τη μετατροπή της ενέργειας των ηλεκτρονίων σε θερμότητα. Ενώ η παραγωγή θερμότητας είναι επιθυμητή σε ηλιακά θερμικά πάνελ, όπου αυτή η θερμότητα μεταφέρεται σε ένα ρευστό, είναι ανεπιθύμητη στα φωτοβολταϊκά πάνελ, όπου η ηλιακή ενέργεια πρέπει να μετατραπεί σε ηλεκτρική. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι το πυρίτιο παρουσιάζει χαμηλή απόδοση στο φάσμα της απορρόφησης του φωτός (Luque & Hegedus, 2003).

Συνεχίζοντας, άξιο αναφοράς είναι ότι το πυρίτιο, στην κρυσταλλική του μορφή, έχει χαρακτηριστικές ιδιότητες. Το άτομο πυριτίου αποτελείται από 14 ηλεκτρόνια, κατανομημένα σε τρία ενεργειακά επίπεδα. Τα δύο πρώτα επίπεδα, πιο κοντά στον πυρήνα, είναι γεμάτα, ενώ το πιο εξωτερικό επίπεδο περιέχει μόνο 4 ηλεκτρόνια. Το άτομο πυριτίου επιδιώκει συνεχώς να ολοκληρώσει το πιο εξωτερικό του επίπεδο σχηματίζοντας ομοιοπολικούς δεσμούς με τέσσερα γειτονικά άτομα πυριτίου παρόμοιου φορτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία της κρυσταλλικής δομής. Για την παραγωγή της υψηλής ποιότητας του εν λόγω υλικού ακολουθούνται τα εξής δύο βασικά στάδια:

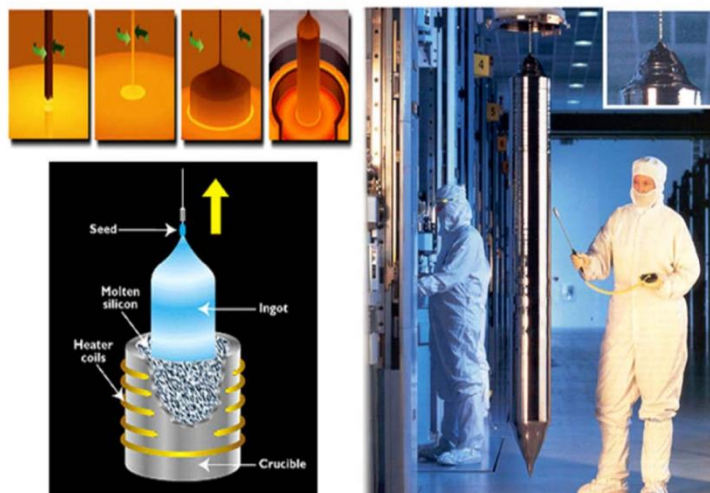
1. Αναβάθμιση του Χαλαζίτη σε Ηλεκτρονική Ποιότητα Πυριτίου (EGS): Ο χαλαζίτης, ένα είδος άμμου, λειτουργεί ως αρχική πρώτη ύλη και αναβαθμίζεται μέσω μιας πολυσταδιακής διαδικασίας για να αποκτηθεί πολυκρυσταλλικό πυρίτιο υψηλής καθαρότητας, γνωστό ως *Ηλεκτρονικής Ποιότητας Πυρίτιο (EGS)*. Αυτή η μετάβαση περιλαμβάνει αρκετά βήματα που στοχεύουν στην επίτευξη της απαιτούμενης καθαρότητας του υλικού και της κρυσταλλικής δομής.

2. Ανάπτυξη Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου: Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο παράγεται από το EGS χρησιμοποιώντας δύο εναλλακτικές τεχνικές: την μέθοδο Czochralski (CZ) και τη μέθοδο Float Zone (FZ). Η τεχνική Czochralski, όπως διαφαίνεται στην Εικόνα 14, σχετίζεται με την αποστείρωση σε μια επιφάνεια που αποτελείται από άτομα προερχόμενα από μια υγρή φάση. Η ταχύτητα ανάπτυξης εξαρτάται από τον αριθμό των διαθέσιμων θέσεων στην επιφάνεια του μητρικού κρυστάλλου και από τον τρόπο μετάδοσης της

θερμότητας στην επιφάνεια. Ενδεικτικά, τα βήματα που περιλαμβάνονται στην τεχνική CZ είναι τα εξής:

- Ένα τήγμα λήψης, που περιέχει πολυκρυσταλλικό πυρίτιο υψηλής καθαρότητας, τοποθετείται σε μια θάλαμο τήξης, μαζί με την κατάλληλη ποσότητα αραιού κράματος πυριτίου.
- Ο θάλαμος τήξης αδειάζει από τα υπάρχοντα αέρια.
- Στον θάλαμο ανάπτυξης διοχετεύεται αδρανές αέριο για να αποτραπεί η είσοδος ατμοσφαιρικών αερίων κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης.
- Το πυρίτιο τήκεται (σημείο τήξης πυριτίου 1421°C).
- Ένας πυρήνας κρυστάλλωσης (γνωστός ως μητρικός κρύσταλλος) διατίθεται στο λιωμένο πυρίτιο. Αυτός ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από κρυσταλλικό πυρίτιο με διάμετρο περίπου 5mm και μήκος μεταξύ 100 και 300mm. Είναι σημαντικό να προσανατολίζεται σωστά ο πυρήνας κρυστάλλωσης.
- Ο πυρήνας κρυστάλλωσης απομακρύνεται με έναν ελεγχόμενο ρυθμό. Κατά την απομάκρυνση, τόσο ο πυρήνας κρυστάλλωσης, όσο και η χοάνη τήξης περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις (Luque & Hegedus, 2003).

Ως εκ τούτου, η προαναφερθείσα, αυτή, διαδικασία επιτρέπει την ανάπτυξη μονοκρυσταλλικού πυριτίου με υψηλή καθαρότητα και κρυσταλλική τελειότητα, το οποίο είναι απαραίτητο για την κατασκευή αποτελεσματικών ηλιακών κυττάρων (Smil, 2013).



Εικόνα 14: Τεχνική Czochralski⁸.

⁸ <https://indico.bnl.gov/event/6284/contributions/29056/attachments/23774/34557/SiliconDetectors.pdf>

Εν κατακλείδι, το πυρίτιο, αποτελεί ένα χημικό στοιχείο (με το σύμβολο Si και τον ατομικό αριθμό 14), το οποίο αποσαφηνίζεται ως ένα ιδιαίτερα σημαντικό υλικό από γεωλογική άποψη. Είναι το δεύτερο πιο άφθονο στοιχείο στον φλοιό της Γης, αποτελώντας περίπου το 27,7% του φλοιού της κατά μάζα. Το πυρίτιο βρίσκεται κυρίως με τη μορφή διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2), το οποίο είναι γνωστό ως πυρίτιο ή χαλαζίας, και διάφορα πυριτικά ορυκτά. Ακολουθεί μια γεωλογική προοπτική για το πυρίτιο:

Αφθονία: Το πυρίτιο είναι άφθονο στον φλοιό της Γης και βρίσκεται σε ένα ευρύ φάσμα ορυκτών. Η αφθονία του πυριτίου είναι αποτέλεσμα της συγγένειάς του με το οξυγόνο, σχηματίζοντας ισχυρούς χημικούς δεσμούς με άτομα οξυγόνου για τη δημιουργία πυριτικών ορυκτών.

Πυριτικά ορυκτά: Η πλειοψηφία του πυριτίου στον φλοιό της Γης είναι κλειδωμένη μέσα σε πυριτικά ορυκτά. Αυτά τα ορυκτά είναι τα δομικά στοιχεία των πετρωμάτων και κατέχουν θεμελιώδη ρόλο στη γεωλογία της Γης. Παραδείγματα πυριτικών ορυκτών περιλαμβάνουν το άστρο, την ολιβίνη και το αμφίβολο.

Χαλαζίας: Ο χαλαζίας είναι μια από τις πιο γνωστές μορφές διοξειδίου του πυριτίου και εμφανίζεται σε διάφορα γεωλογικά περιβάλλοντα. Μπορεί να βρεθεί σε πυριγενή, ιζηματογενή και μεταμορφωμένα πετρώματα. Οι κρύσταλλοι χαλαζία μπορεί να είναι αρκετά μεγάλοι και εκτιμώνται ιδιαίτερα στη βιομηχανία πολύτιμων λίθων.

Γεωλογικές διεργασίες: Το πυρίτιο εμπλέκεται σε διάφορες γεωλογικές διεργασίες. Για παράδειγμα, η διάβρωση των πυριτικών ορυκτών συμβάλλει στο σχηματισμό εδαφών.

Βιομηχανική σημασία: Το πυρίτιο που εξάγεται από χαλαζία και άλλα πυριτικά ορυκτά έχει τεράστια βιομηχανική σημασία. Χρησιμοποιείται ως κρίσιμο συστατικό στην παραγωγή ημιαγωγών, ηλιακών κυψελών και διαφόρων κραμάτων, καθιστώντας το ζωτικής σημασίας για τη σύγχρονη τεχνολογία και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Smil, 2013).

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ & ΜΕΤΑΛΛΑ

Ξεκινώντας, αξίζει να επισημανθεί ότι η αγορά των ανεμογεννητριών αναμένεται να αντιπροσωπεύει περίπου το 30% της παγκόσμιας ανάπτυξης στη χρήση μαγνητών σπανίων γαιών από το 2015 έως το 2025⁹. Άλλωστε, η απόδοση, η ανθεκτικότητα και η βιωσιμότητα τους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση συγκεκριμένων μετάλλων και υλικών. Σε αυτό το κεφάλαιο, λοιπόν, θα επισημανθεί ο κρίσιμος ρόλος των μετάλλων στην αιολική ενέργεια, εστιάζοντας στην κατασκευή των ανεμογεννητριών με υλικά όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο και οι μαγνήτες σπανίων γαιών, αλλά και στις προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα και βιωσιμότητα των μετάλλων (Olabi et al., 2021).

Αρχικά, λοιπόν, ο *χάλυβας* αποτελεί ένα από τα κύρια μέταλλα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ανεμογεννητριών. Χρησιμοποιείται στην κατασκευή πύργων ανεμογεννητριών, παρέχοντας την απαραίτητη αντοχή και τη δομική ακεραιότητα για την υποστήριξη ολόκληρου του συγκροτήματος. Ο πύργος χρησιμεύει ως το θεμέλιο στο οποίο τοποθετούνται ο ρότορας και η άτρακτος. Ειδικότερα, η διαδικασία κατασκευής των πύργων ανεμογεννητριών περιλαμβάνει διάφορα στάδια:

Βήμα 1 → Παραγωγή χάλυβα. Το ακατέργαστο σιδηρομετάλλευμα υποβάλλεται σε διαδικασία τήξης για την παραγωγή χάλυβα. Εξειδικευμένα κράματα χάλυβα με υψηλή αντοχή στη διάβρωση χρησιμοποιούνται συχνά για πύργους ανεμογεννητριών.

Βήμα 2 → Κατασκευή πύργου. Ο χάλυβας στη συνέχεια διαμορφώνεται και συγκολλάται σε τμήματα που σχηματίζουν τον πύργο. Αυτά τα τμήματα συναρμολογούνται επί τόπου για να επιτευχθεί το επιθυμητό ύψος, το οποίο μπορεί να κυμαίνεται από δεκάδες έως εκατοντάδες μέτρα, ανάλογα με τη χωρητικότητα και τη θέση του στροβίλου.

Βήμα 3 → Επικάλυψη και προστασία. Για την προστασία από τη διάβρωση και τη διασφάλιση της μακροζωίας του πύργου, εφαρμόζονται αντιδιαβρωτικές επικαλύψεις. Αυτές οι επικαλύψεις μπορεί να περιλαμβάνουν βαφή, εποξειδικό ή γαλβανισμό εν θερμώ (Blanco, 2009).

Από την άλλη και το *αλουμίνιο* χρησιμοποιείται συχνά στην κατασκευή περυγίων ανεμογεννητριών. Οι ελαφριές ιδιότητές του είναι πλεονεκτικές επειδή μειώνουν το συνολικό βάρος των λεπίδων, επιτρέποντάς τους να συλλαμβάνουν την αιολική ενέργεια πιο

⁹ <https://lynasrareearths.com/products/how-are-rare-earths-used/wind-turbines/>

αποτελεσματικά. Η κατασκευή πτερυγίων ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1 → Παραγωγή αλουμινίου. Τα φύλλα αλουμινίου παράγονται από μέταλλευμα αλουμινίου μέσω διεργασιών τήξης και διύλισης. Αυτά τα φύλλα στη συνέχεια κόβονται και διαμορφώνονται για να σχηματίσουν τα δομικά στοιχεία της λεπίδας.

Βήμα 2 → Σχεδιασμός και κατασκευή λεπίδων. Οι λεπίδες είναι σχολαστικά σχεδιασμένες για αεροδυναμική απόδοση. Τα εξαρτήματα αλουμινίου συναρμολογούνται για να δημιουργήσουν τη δομή της λεπίδας και εφαρμόζεται ένας συνδυασμός σύνθετων υλικών και επιστρώσεων για αντοχή, ανθεκτικότητα και προστασία από περιβαλλοντικούς παράγοντες (Herbet et al., 2007).

Ακόμη, οι *μαγνήτες σπανίων γαιών*, ιδιαίτερα οι μαγνήτες νεοδυμίου-σιδήρου-βόριου (NdFeB), κατέχουν καθοριστικό ρόλο στις γεννήτριες ορισμένων τύπων ανεμογεννητριών. Αυτοί οι μαγνήτες είναι γνωστοί για την υψηλή μαγνητική τους ισχύ, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργία των μαγνητών σπανίων γαιών σε ανεμογεννήτριες μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

Βήμα 1 → Παραγωγή μαγνήτη. Το νεοδύμιο και άλλα στοιχεία σπανίων γαιών επεξεργάζονται και συνδυάζονται με σίδηρο και βόριο για να δημιουργήσουν ισχυρούς μόνιμους μαγνήτες. Αυτοί οι μαγνήτες είναι ενσωματωμένοι στο συγκρότημα ρότορα της γεννήτριας.

Βήμα 2 → Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας. Καθώς ο ρότορας περιστρέφεται μέσα στον στάτορα της γεννήτριας, παράγει ηλεκτρισμό μέσω της αλληλεπίδρασης των μαγνητικών πεδίων που παράγονται από τους μαγνήτες σπανίων γαιών. Αυτή η ηλεκτρική ενέργεια στη συνέχεια μετατρέπεται σε χρησιμοποιήσιμη ισχύ (Kumari et al., 2018).

Όπως κατανοεί κανείς, επομένως, η επιλογή υλικών στην κατασκευή ανεμογεννητριών, όπως διαφαίνεται στην Εικόνα 15, είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της ανθεκτικότητας και της αποτελεσματικότητας, αυτών, των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες εκτίθενται σε μια σειρά περιβαλλοντικών συνθηκών, συμπεριλαμβανομένων των ισχυρών ανέμων, των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και της υγρασίας, που μπορεί να οδηγήσουν σε διάβρωση και δομική φθορά. Η επιλογή υλικών, όπως ο χάλυβας υψηλής αντοχής και οι ανθεκτικές στη διάβρωση επιστρώσεις, συμβάλλουν στην άμβλυνση αυτών των προκλήσεων (Lohman, 2009).

Ωστόσο, η χρήση στοιχείων σπανίων γαιών σε γεννήτριες ανεμογεννητριών, ιδιαίτερα νεοδυμίου, εγείρει ανησυχίες σχετικά με τη διαθεσιμότητά τους και την ασφάλεια της

εφοδιαστικής αλυσίδας. Η πλειονότητα των στοιχείων σπανίων γαιών προέρχεται από περιορισμένο αριθμό χωρών, δημιουργώντας πιθανές ευπάθειες στην εφοδιαστική αλυσίδα. Ακόμη, η εξόρυξη μετάλλων για εξαρτήματα ανεμογεννητριών μπορεί να έχει περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις, ιδιαίτερα όταν δεν διεξάγεται με βιώσιμες πρακτικές. Οι υπεύθυνες μέθοδοι εξόρυξης, λοιπόν, καθώς και οι προσπάθειες για την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των εργασιών εξόρυξης, είναι απαραίτητες για τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα της αιολικής ενέργειας (Lohman, 2009).

Σε αυτό το σημείο, ωστόσο, αξίζει να επισημανθούν και μερικά άλλα από τα βασικά μέταλλα και κοιτάσματα που χρησιμοποιούνται στην αιολική ενέργεια:

→ **Χαλκός (Cu):** Ο χαλκός χρησιμοποιείται εκτενώς σε ανεμογεννήτριες για ηλεκτρικές καλωδιώσεις, αγωγίμα εξαρτήματα και γεννήτριες. Η εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα του εξασφαλίζει αποτελεσματική μετάδοση και μετατροπή ισχύος.

→ **Σίδηρος (Fe):** Ο σίδηρος είναι ένα θεμελιώδες συστατικό του χάλυβα, το οποίο χρησιμοποιείται σε πύργους ανεμογεννητριών, θεμέλια και διάφορα δομικά μέρη.

→ **Νεοδύμιο (Nd):** Το νεοδύμιο αποτελεί ένα από τα στοιχεία σπανίων γαιών που χρησιμοποιείται στην παραγωγή ισχυρών μόνιμων μαγνητών (μαγνήτες νεοδύμιου-σιδήρου-βορίου) για ορισμένα συστήματα γεννητριών ανεμογεννητριών.

→ **Δυσπρόσιο (Dy):** Το δυσπρόσιο είναι ένα άλλο στοιχείο σπανίων γαιών που μπορεί να προστεθεί σε μαγνήτες νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου για να ενισχύσει τη σταθερότητα στη θερμοκρασία και τις μαγνητικές τους ιδιότητες.

→ **Πρασεοδύμιο (Pr):** Το πρασεοδύμιο χρησιμοποιείται σε μαγνήτες σπανίων γαιών, συμβάλλοντας στην απόδοση των γεννητριών σε ορισμένες ανεμογεννήτριες.

→ **Κράματα:** Διάφορα κράματα μετάλλων χρησιμοποιούνται στην κατασκευή εξαρτημάτων ανεμογεννητριών για την ενίσχυση συγκεκριμένων ιδιοτήτων, όπως είναι η αντοχή στη διάβρωση και η ανθεκτικότητα.

→ **Νικέλιο (Ni):** Το νικέλιο χρησιμοποιείται σε ορισμένες συνθέσεις κραμάτων για συγκεκριμένα εξαρτήματα ανεμογεννητριών, όπως πτερύγια και γρανάζια τουρμπίνας.

Τιτάνιο (Ti): Το τιτάνιο χρησιμοποιείται σε ορισμένα εξαρτήματα ανεμογεννητριών λόγω της υψηλής αναλογίας αντοχής προς βάρος και της αντοχής του στη διάβρωση.

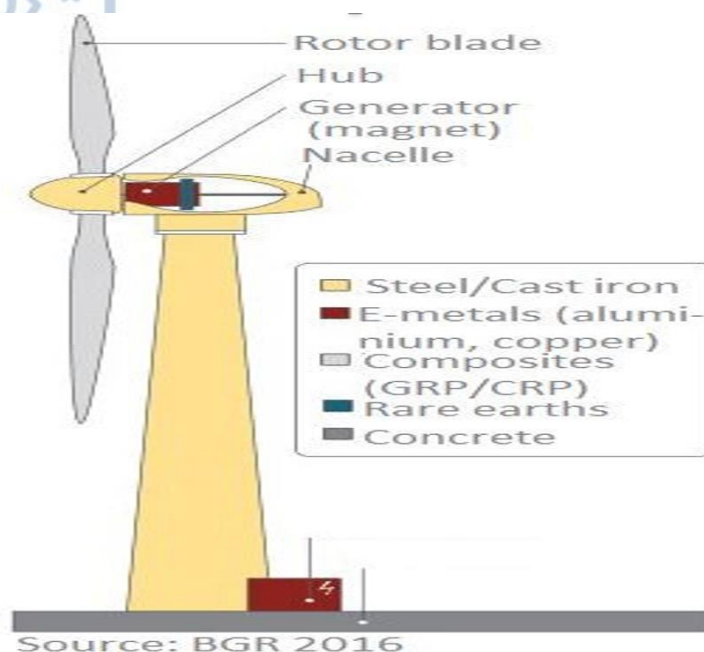
→ **Ανθρακονήματα:** Αν και δεν είναι μέταλλο, τα σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται στην κατασκευή πτερυγίων ανεμογεννητριών για την ενίσχυση της αντοχής τους και τη μείωση του βάρους.

→ **Fiberglass:** Τα σύνθετα υλικά από υαλοβάμβακα χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλα υλικά στην κατασκευή πτερυγίων ανεμογεννητριών, παρέχοντας δομική υποστήριξη και αεροδυναμικές ιδιότητες.

→ **Εποξειδικές ρητίνες:** Οι εποξειδικές ρητίνες χρησιμοποιούνται ως συγκολλητικά μέσα και επιστρώσεις στην κατασκευή πτερυγίων ανεμογεννητριών για ενίσχυση της αντοχής και προστασία από περιβαλλοντικούς παράγοντες.

→ **Στοιχεία σπανίων γαιών:** Εκτός από το νεοδύμιο, το δυσπρόσιο και το πρασεοδύμιο, άλλα στοιχεία σπανίων γαιών όπως το τέρβιο, το σαμάριο και το ευρώπιο μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή μαγνητών για γεννήτριες ανεμογεννητριών (Ang et al., 2022).

Συμπερασματικά, τα μέταλλα αποτελούν τη βάση της αιολικής ενέργειας και χρησιμεύουν ως βασικά συστατικά στην κατασκευή και την λειτουργία των ανεμογεννητριών. Ο χάλυβας παρέχει τη δομική ακεραιότητα για τους πύργους, το αλουμίνιο μειώνει το βάρος των λεπίδων και οι μαγνήτες σπανίων γαιών επιτρέπουν την αποτελεσματική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, οι προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα, τη βιωσιμότητα και την ανακύκλωση μετάλλων πρέπει να αντιμετωπιστούν για να διασφαλιστεί η συνεχής ανάπτυξη και τα περιβαλλοντικά οφέλη της αιολικής ενέργειας. Οι καινοτόμες προσεγγίσεις για την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση υλικών ανεμογεννητριών υπόσχονται την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, αυτής, της ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, αλλά και την προώθηση ενός πιο βιώσιμου μέλλοντος (Olabi et al., 2021).



Εικόνα 15: Ανεμογεννήτρια & Μέταλλα (BGR, 2016)¹⁰.

3.1 ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ

1																	2	
H																	He	
3	4																	10
Li	Be																	Ne
11	12																	18
Na	Mg																	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110									
Fr	Ra	Ac	Unq	Unp	Unh	Uns	Uo	Une	Unn									

Lanthanides

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Light Rare Earths

Heavy Rare Earths

Εικόνα 16: Μέταλλα σπανίων γαιών¹¹.

¹⁰ https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Energie/Produkte/energy_study_2016_summary_en.html

¹¹ <https://smallcaps.com.au/rare-earth-stocks-asx-ultimate-guide/>

Τα μέταλλα σπανίων γαιών ή στοιχεία σπανίων γαιών (REEs), είναι μια ομάδα 17 χημικών στοιχείων στον περιοδικό πίνακα, όπως διαφαίνεται στην Εικόνα 16, συμπεριλαμβανομένων 15 λανθανίδων, καθώς και σκανδίου και υτρίου. Παρά το όνομά τους, δεν είναι πραγματικά σπάνιοι όσον αφορά την αφθονία στον φλοιό της Γης. Ωστόσο, συχνά διασπείρονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις, καθιστώντας την εκχύλιση και τον διαχωρισμό τους δύσκολη. Γεωλογικά, τα μέταλλα σπανίων γαιών έχουν ξεχωριστά χαρακτηριστικά και συνήθως συνδέονται με συγκεκριμένους τύπους κοιτασμάτων. Παρακάτω, επιχειρείται μια εμβάθυνση στα μέταλλα σπανίων γαιών από γεωλογική άποψη:

Εμφάνιση: Τα μέταλλα σπανίων γαιών βρίσκονται κυρίως σε ορυκτά γνωστά ως ορυκτά σπανίων γαιών. Αυτά τα ορυκτά συνήθως συνδέονται με αλκαλικά πυριγενή πετρώματα, ανθρακίτες και ορισμένους τύπους ιζηματογενών κοιτασμάτων. Τα πιο κοινά ορυκτά σπανίων γαιών περιλαμβάνουν τον μπαστονσίτη, τον μοναζίτη και την ξενοτίμη. Αυτά τα ορυκτά συχνά περιέχουν ποικίλες αναλογίες διαφορετικών στοιχείων σπανίων γαιών.

Βράχοι υποδοχής: Τα μέταλλα σπανίων γαιών μπορούν να φιλοξενηθούν σε διάφορους τύπους πετρωμάτων, αλλά συνήθως συνδέονται με αλκαλικά και υπεραλκαλικά πυριγενή πετρώματα όπως ανθρακίτες και αλκαλικές εισβολές. Αυτά τα πετρώματα έχουν υψηλή συγκέντρωση ασυμβίβαστων στοιχείων, συμπεριλαμβανομένων των σπανίων γαιών.

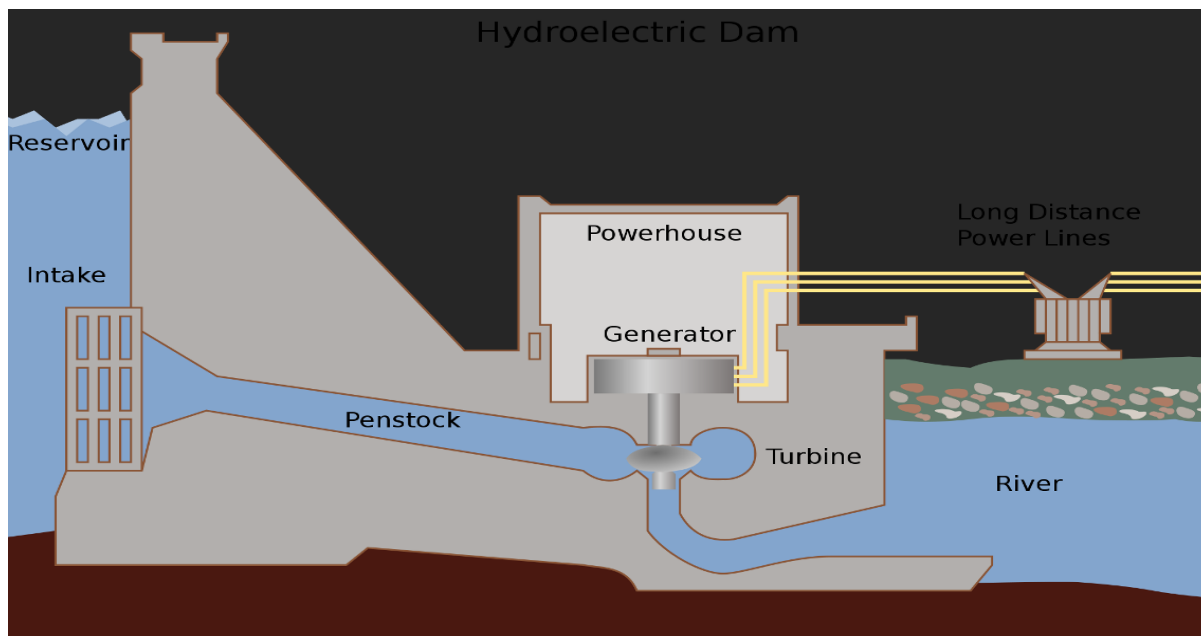
Μεταλλοποίηση: Οι γεωλογικές διεργασίες που οδηγούν στο σχηματισμό κοιτασμάτων σπανίων γαιών είναι πολύπλοκες. Συχνά περιλαμβάνει την εισχώρηση αλκαλικών μάγματος στον φλοιό της Γης, η οποία μπορεί να οδηγήσει στην κρυστάλλωση ορυκτών που περιέχουν στοιχεία σπανίων γαιών. Με την πάροδο του γεωλογικού χρόνου, οι καιρικές συνθήκες και η διάβρωση μπορούν να απελευθερώσουν αυτά τα ορυκτά από τα πετρώματα ξενιστή και να τα συγκεντρώσουν σε οικονομικά βιώσιμα κοιτάσματα.

Γεωχημική συμπεριφορά: Τα στοιχεία σπανίων γαιών μοιράζονται παρόμοιες χημικές ιδιότητες, γεγονός που μπορεί να κάνει τον διαχωρισμό και την εξαγωγή τους δύσκολη. Συχνά αναφέρονται ως «ελαφριές» και «βαριές» σπάνιες γαίες με βάση τον ατομικό τους αριθμό. Οι ελαφριές σπάνιες γαίες περιλαμβάνουν στοιχεία όπως το λανθάνιο και το δημήτριο, ενώ οι βαριές σπάνιες γαίες περιλαμβάνουν στοιχεία όπως το ευρώπιο και το γαδολίνιο. Η κατανόηση της γεωχημικής συμπεριφοράς αυτών των στοιχείων είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική εξερεύνηση και εξόρυξη.

Παγκόσμια κατανομή: Ενώ τα στοιχεία σπανίων γαιών είναι σχετικά άφθονα παγκοσμίως, η κατανομή των οικονομικά βιώσιμων κοιτασμάτων δεν είναι ομοιόμορφη. Η Κίνα ήταν

ιστορικά ο κυρίαρχος παραγωγός, αλλά σημαντικά κοιτάσματα βρίσκονται επίσης σε χώρες όπως η Αυστραλία, οι Ηνωμένες Πολιτείες και ο Καναδάς. Συνεχίζονται οι προσπάθειες για τη διαφοροποίηση της παγκόσμιας αλυσίδας εφοδιασμού και τη μείωση της εξάρτησης από μία μόνο πηγή.

Περιβαλλοντικά ζητήματα: Η εξόρυξη και η επεξεργασία σπανίων γαιών μπορεί να έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένης της απελευθέρωσης ραδιενεργών στοιχείων και της χρήσης επικίνδυνων χημικών ουσιών. Οι βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον πρακτικές εξόρυξης είναι απαραίτητες για τον μετριασμό αυτών των ζητημάτων (Dushyantha et al., 2020).



Εικόνα 17: Σύστημα υδροηλεκτρικής ενέργειας (Βασίλας, 2020).

Η υδροηλεκτρική ενέργεια, που παράγεται από την κίνηση του νερού (Εικόνα 17), αποτελεί, όπως ήδη έχει προαναφερθεί, μια από τις παλαιότερες και πιο αξιόπιστες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας. Τα βασικά στοιχεία των υδροηλεκτρικών σταθμών, όπως τα φράγματα, οι τουρμπίνες και οι γραμμές μεταφοράς, βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στη χρήση μετάλλων. Σε αυτό το κεφάλαιο, επομένως, διερευνάται ο ζωτικός ρόλος των μετάλλων στην παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Πρωτίστως, ο χάλυβας αποτελεί ένα θεμελιώδες μέταλλο στην κατασκευή φραγμάτων, τα οποία χρησιμεύουν ως κεντρικά συστατικά των υδροηλεκτρικών σταθμών και τα οποία είναι υπεύθυνα για την αποθήκευση νερού και τη δημιουργία δεξαμενών, επιτρέποντας την ελεγχόμενη απελευθέρωση για την κίνηση των στροβίλων και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Kaygusuz, 2002). Η κατασκευή φραγμάτων, λοιπόν, περιλαμβάνει τη χρήση χάλυβα με πολλούς βασικούς τρόπους, κάποιοι από τους οποίους είναι οι εξής:

Βήμα 1 → Θεμέλιο και Δομή. Το οπλισμένο με χάλυβα σκυρόδεμα χρησιμοποιείται συχνά για τη θεμελίωση και τη δομή φραγμάτων. Ο οπλισμός χάλυβα παρέχει την απαραίτητη αντοχή εφελκυσμού για να αντέχει την πίεση του νερού και τα δομικά φορτία.

Βήμα 2 → Πύλες Στροβίλου και Κατασκευή Penstock. Ο χάλυβας χρησιμοποιείται στην κατασκευή πυλών τουρμπίνας και πυλώνων, που ελέγχουν τη ροή του νερού προς τους στροβίλους. Η αντοχή του χάλυβα στη διάβρωση είναι απαραίτητα για τη μακροπρόθεσμη λειτουργικότητα, αυτών, των εξαρτημάτων.

Βήμα 3 → Εργασίες υπερχειλίσσης και εξόδου. Ο χάλυβας χρησιμοποιείται σε υπερχειλίσσεις και εργασίες εξόδου για τη διαχείριση της περίσσειας νερού και τον έλεγχο της ροής του νερού σε συνθήκες πλημμύρας. Αυτά τα εξαρτήματα πρέπει να αντέχουν την υψηλή ταχύτητα νερού και τη διάβρωση (Killingveit, 2014).

Από την άλλη και ο χαλκός κατέχει καθοριστικό ρόλο στην παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμεύοντας ως ένα εξαιρετικά αγωγίμο υλικό για τη μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς η καλωδίωση και οι αγωγοί χαλκού είναι απαραίτητα για τη σύνδεση των στροβίλων με τις γεννήτριες και τη διευκόλυνση της αποτελεσματικής ροής ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, η χρήση του χαλκού σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς περιλαμβάνει:

Βήμα 1 → Περιελίξεις γεννήτριας. Οι χάλκινες περιελίξεις βρίσκονται στις γεννήτριες των υδροηλεκτρικών σταθμών, όπου και δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικά πεδία όταν περιστρέφονται μέσα στη γεννήτρια, προκαλώντας τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος.

Βήμα 2 → Ηλεκτρική καλωδίωση. Η χάλκινη καλωδίωση χρησιμοποιείται για τις διασυνδέσεις εντός του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, αλλά και για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στους υποσταθμούς και στο δίκτυο (Kaygusuz, 2002).

Ακόμη, δεν θα πρέπει να παραλειφθεί από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας ότι και το αλουμίνιο επιλέγεται συχνά για τα δομικά στοιχεία στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, λόγω των ελαφρών ιδιοτήτων του και της αντοχής του στη διάβρωση. Ενώ ο χάλυβας χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευή φραγμάτων, το αλουμίνιο προτιμάται για άλλες κατασκευές στήριξης. Οι εφαρμογές του αλουμινίου σε υδροηλεκτρικές υποδομές περιλαμβάνουν:

Βήμα 1 → Δομές Στήριξης Στροβίλου. Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται για την κατασκευή των δομών στήριξης γύρω από τις τουρμπίνες, οι οποίες πρέπει να είναι ανθεκτικές αλλά και ελαφριές.

Βήμα 2 → Πύργοι Γραμμών Μεταφοράς. Οι πύργοι αλουμινίου χρησιμοποιούνται συχνά για την υποστήριξη των γραμμών μεταφοράς που μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια από το εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας στους υποσταθμούς (Kaygusuz, 2002).

Ως εκ τούτου και όπως κατανοεί κανείς από όλα όσα προαναφέρθηκαν, η παραγωγή χάλυβα βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην εξόρυξη σιδηρομεταλλεύματος, αλλά και στις μεταλλουργικές διεργασίες. Οι βιώσιμες πρακτικές εξόρυξης, η διαθεσιμότητα των πόρων και οι πρωτοβουλίες ανακύκλωσης είναι βασικοί παράγοντες για τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας του χάλυβα στην παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, ο χαλκός αντιμετωπίζει τις προκλήσεις που σχετίζονται με τη βιωσιμότητα της εξόρυξης και την ασφάλεια της εφοδιαστικής αλυσίδας, ενώ η ανακύκλωση του είναι μια σημαντική στρατηγική για τη μείωση της εξάρτησης από την πρωτογενή εξόρυξη και τον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ακόμη, η βιωσιμότητα του αλουμινίου που χρησιμοποιείται στις υδροηλεκτρικές υποδομές εξαρτάται από τις υπεύθυνες πρακτικές εξόρυξης, την αποδοτική χρήση ενέργειας στην τήξη του αλουμινίου και τις προσπάθειες ανακύκλωσης. Η ανακύκλωση του αλουμινίου, δηλαδή, καταναλώνει σημαντικά λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με την πρωτογενή παραγωγή, καθιστώντας την μια φιλική προς το περιβάλλον επιλογή (Killingveit, 2014).

Ωστόσο, εκτός από τον χάλυβα, τον χαλκό και το αλουμίνιο, πολυάριθμα άλλα μέταλλα και υλικά χρησιμοποιούνται σε διάφορα εξαρτήματα υδροηλεκτρικών σταθμών και συστημάτων. Παρακάτω παρατίθενται μερικά από τα βασικά μέταλλα, κοιτάσματα και υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως στην παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας:

→ **Σκυρόδεμα και τσιμέντο:** Αν και δεν είναι μέταλλα, το σκυρόδεμα και το τσιμέντο είναι απαραίτητα οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή φραγμάτων, καθώς αποτελούν τα δομικά θεμέλια των φραγμάτων και των εργοστασίων παραγωγής ενέργειας.

→ **Ορείχαλκος και Μπρούτζος:** Αυτά τα κράματα χαλκού χρησιμοποιούνται σε διάφορα εξαρτήματα, όπως στις βαλβίδες, στα εξαρτήματα και στα ρουλεμάν, όπου η αντοχή στη διάβρωση και η αντοχή στη φθορά είναι απαραίτητες.

→ **Ανοξείδωτος χάλυβας:** Ο ανοξείδωτος χάλυβας χρησιμοποιείται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς για τα εξαρτήματα που απαιτούν αντοχή στη διάβρωση, όπως συνδετήρες, σωλήνες και εξαρτήματα.

→ **Μόλυβδος (Pb):** Ο μόλυβδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές στεγανοποίησης.

→ **Κράματα νικελίου:** Τα κράματα νικελίου, όπως το Monel και το Inconel, χρησιμοποιούνται σε εξαρτήματα που απαιτούν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και διάβρωση, όπως στα πτερύγια της τουρμπίνας και στα εξαρτήματα των βαλβίδων.

→ **Ψευδάργυρος (Zn):** Οι επικαλύψεις ψευδαργύρου εφαρμόζονται σε ορισμένα εξαρτήματα χάλυβα για να παρέχουν αντιδιαβρωτική προστασία, ιδιαίτερα σε μέρη της υδροηλεκτρικής υποδομής που έρχονται σε επαφή με το νερό.

→ **Τιτάνιο (Ti):** Το τιτάνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ορισμένα εξαρτήματα που απαιτούν υψηλή αντοχή στη διάβρωση και ελαφριές ιδιότητες.

→ **Καουτσούκ και ελαστομερή:** Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται για παρεμβύσματα, στεγανοποιήσεις και επενδύσεις σε υδραυλικά συστήματα για την πρόληψη διαρροών, αλλά και για τη μείωση της τριβής.

→ **Μαγγάνιο (Mn):** Ο χάλυβας μαγγανίου χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή στην κρούση.

→ **Χυτοσίδηρος:** Ο χυτοσίδηρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εξαρτήματα όπως περιβλήματα τουρμπίνας και πύλες λόγω της αντοχής του.

→ **Κοβάλτιο (Co):** Το κοβάλτιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ορισμένα εξειδικευμένα κράματα για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες.

→ **Μολυβδαίνιο (Mo):** Τα κράματα μολυβδαινίου χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένα μέρη που απαιτούν αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία.

→ **Βολφράμιο (W):** Το βολφράμιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εξαρτήματα που χρειάζονται εξαιρετική αντοχή στη φθορά.

→ **Στοιχεία σπανίων γαιών (REEs):** Ορισμένα συστήματα υδροηλεκτρικής ενέργειας ενδέχεται να χρησιμοποιούν στοιχεία σπανίων γαιών σε εξειδικευμένα εξαρτήματα, όπως στους μαγνήτες γεννήτριας, για τη βελτίωση της απόδοσης (Kaygusuz, 2002).

Εν κατακλείδι, τα μέταλλα διαδραματίζουν θεμελιώδη ρόλο στην παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, υποστηρίζοντας την κατασκευή και λειτουργία φραγμάτων, στροβίλων και ηλεκτρικής υποδομής. Η διαθεσιμότητα και η βιωσιμότητα των μετάλλων στην υδροηλεκτρική ενέργεια είναι σημαντικά ζητήματα, τα οποία απαιτούν υπεύθυνες πρακτικές εξόρυξης, προσπάθειες ανακύκλωσης, αλλά και την εξερεύνηση καινοτόμων υλικών και επιστρώσεων. Επομένως και καθώς η υδροηλεκτρική ενέργεια εξακολουθεί να αποτελεί μια αξιόπιστη και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, συμπεραίνει κανείς ότι η υπεύθυνη χρήση μετάλλων θα συμβάλει στη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητά της, αλλά και στην περιβαλλοντική διαχείριση (Killingveit, 2014).

4.1 ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

Το αλουμίνιο, που συμβολίζεται ως Al και είναι γνωστό για τον ατομικό του αριθμό 13 (Εικόνα 18), είναι ένα ελαφρύ, ασημί-λευκό μέταλλο με ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Είναι το τρίτο πιο άφθονο στοιχείο στον φλοιό της Γης, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο, που αποτελούν περίπου το 8% της στερεάς επιφάνειας της Γης. Το αλουμίνιο εκτιμάται ιδιαίτερα για τον εξαιρετικό συνδυασμό ιδιοτήτων του, όπως η χαμηλή πυκνότητα, η υψηλή αντοχή στη διάβρωση και η εξαιρετική αγωγιμότητα. Αυτά τα χαρακτηριστικά το καθιστούν απαραίτητο σε διάφορους κλάδους, από την αεροδιαστημική έως τις κατασκευές. Ειδικότερα, το αλουμίνιο βρίσκεται κυρίως στον φλοιό της Γης με τη μορφή βωξίτη, που είναι ένα ορυκτό πλούσιο σε αλουμίνιο. Ο βωξίτης είναι η κύρια πηγή μεταλλεύματος αλουμινίου και βρίσκεται συνήθως σε τροπικές ή υποτροπικές περιοχές. Γεωλογικά, τα κοιτάσματα αλουμινίου μπορούν να εξηγηθούν ως εξής:

Σχηματισμός βωξίτη: Ο σχηματισμός του βωξίτη λαμβάνει χώρα κατά το στάδιο της λατεριτίωσης, υπό συνθήκες τροπικού κλίματος σε όξινο pH, και συγκεκριμένα κατά τη διάσπαση των πλούσιων σε αργιλοπυριτικά ορυκτά πετρωμάτων όπου απομακρύνονται τα αλκάλια και το Si, με αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό σε Al και Fe. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο σχηματισμός κολλοειδών υδροξειδίων του Al, από τα οποία, έπειτα, επέρχεται η δημιουργία των ορυκτών του βωξίτη και συγκεκριμένα ο *βοημίτης*, ο *γκιψίτης* και το *διάσπορο*. Δηλαδή τα *αυτόχθονα* ή *πρωτογενή βωξιτικά κοιτάσματα*. Ωστόσο, σημαντικό να επισημανθούν είναι και τα *αλλόχθονα δευτερογενή κοιτάσματα βωξίτη*, τα οποία σχηματίζονται από τη διαδικασία της διάβρωσης, της μεταφοράς και της ιζηματογένεσης του αυτόχθονου βωξίτη (Μέλφος & Βουδούρης, 2022).

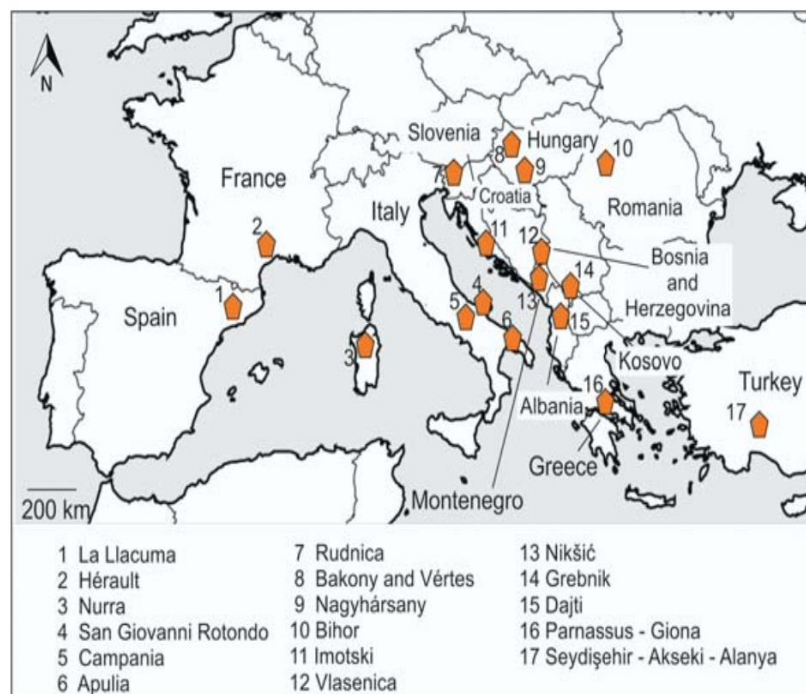
Τροπικές και υποτροπικές τοποθεσίες: Κοιτάσματα βωξίτη βρίσκονται συνήθως σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές, όπου ο συνδυασμός υψηλών θερμοκρασιών και έντονων βροχοπτώσεων επιταχύνει τη διαδικασία της λατεριτίωσης. Οι εξέχουσες χώρες εξόρυξης βωξίτη περιλαμβάνουν την Αυστραλία, τη Γουινέα, τη Βραζιλία, την Κίνα και την Ινδία, ενώ και η Ελλάδα είναι μία σημαντική χώρα παραγωγής αλουμινίου από βωξίτη.

Εξόρυξη και επεξεργασία: Η εξόρυξη αλουμινίου από βωξίτη περιλαμβάνει μια σειρά βημάτων, όπως εξόρυξη, διύλιση και τήξη. Το μέταλλευμα βωξίτη εξορύσσεται πρώτα από ανοιχτά ορυχεία ή υπόγειες στοές. Στη συνέχεια συνθλίβεται, διυλίζεται σε αλουμίνα (οξείδιο του αλουμινίου) και τέλος ηλεκτρολύεται για να παραχθεί καθαρό μέταλλο αλουμινίου.

Ανακύκλωση: Το αλουμίνιο είναι εξαιρετικά ανακυκλώσιμο και τα ποσοστά ανακύκλωσης για προϊόντα αλουμινίου είναι συνήθως υψηλά. Η ανακύκλωση αλουμινίου απαιτεί

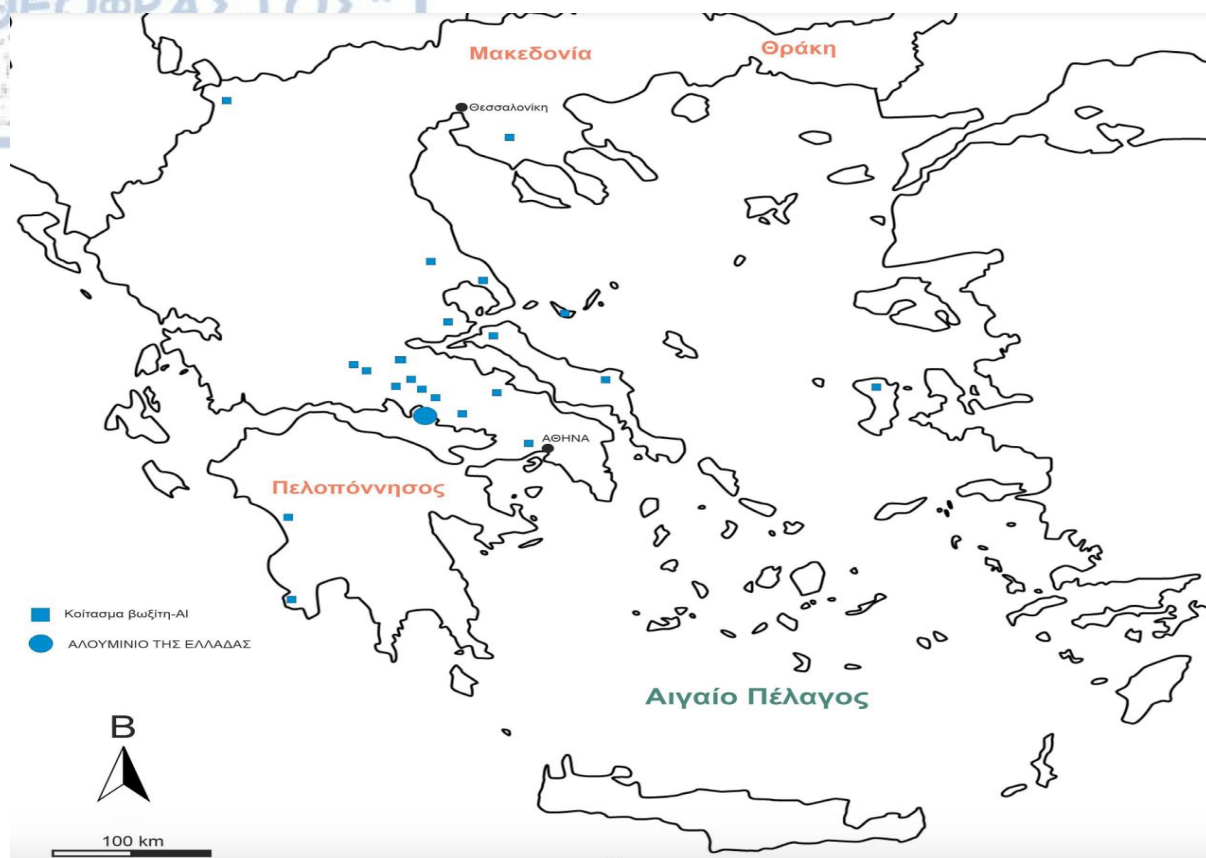
σημαντικά λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με την παραγωγή πρωτογενούς αλουμινίου, καθιστώντας την μια περιβαλλοντικά βιώσιμη επιλογή.

Παγκόσμια παραγωγή: Η Κίνα είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός αλουμινίου, ακολουθούμενη από τη Ρωσία, τον Καναδά, τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα και την Αυστραλία. Η παγκόσμια βιομηχανία αλουμινίου είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστική, με χώρες να διεκδικούν μερίδιο αγοράς λόγω της ευρείας χρήσης του μετάλλου σε διάφορες βιομηχανίες (Lumley, 2010). Ενδεικτικά, παρακάτω, στην Εικόνα 18 διαφαίνονται τα ευρωπαϊκά κοιτάσματα και ορυχεία καρστικού βωξίτη στην περιοχή της Μεσογείου, αλλά και τα κυριότερα κοιτάσματα βωξίτη στην Ελλάδα στην Εικόνα 19.



Εικόνα 18: Ευρωπαϊκά κοιτάσματα και ορυχεία καρστικού βωξίτη στην περιοχή της Μεσογείου¹².

¹² <https://hal.science/hal-03154324/document>



Εικόνα 18: Τα κυριότερα κοιτάσματα βωξίτη της Ελλάδας (Μέλφος & Βουδούρης, 2022).

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ & ΜΕΤΑΛΛΑ

Η γεωθερμική ενέργεια, μια λιγότερο γνωστή, αλλά εξαιρετικά βιώσιμη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας, αξιοποιεί την εσωτερική θερμότητα της Γης για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και να παρέχει θέρμανση στα κτίρια (Εικόνα 19). Αυτή η μορφή παραγωγής ενέργειας βασίζεται στη χρήση διαφόρων μετάλλων προκειμένου να εξασφαλίσει την αποτελεσματική εξαγωγή της θερμότητας και της παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το κεφάλαιο, λοιπόν, θα διερευνηθεί ο σημαντικός ρόλος που κατέχουν τα μέταλλα στα συστήματα γεωθερμικής ενέργειας, ενώ θα διερευνηθούν, διεξοδικά, οι τύπους μετάλλων που χρησιμοποιούνται, οι εφαρμογές τους, οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν σε ακραίες γεωθερμικές συνθήκες, αλλά και η σημασία της υπεύθυνης επιλογής υλικών για τη βιώσιμη γεωθερμική παραγωγή ενέργειας (Kaya & Hoshan, 2005).

Ο χάλυβας, λοιπόν, αποτελεί ένα θεμελιώδες μέταλλο στην κατασκευή γεωθερμικών γεωτρήσεων και συστημάτων γεώτρησης, καθώς η χρήση του διασφαλίζει την ακεραιότητα και την ασφάλεια των φρεατίων. Συγκεκριμένα, ο ρόλος του χάλυβα στη γεωθερμική υποδομή περιλαμβάνει:

Βήμα 1 → Περίβλημα πηγαδιού. Το χαλύβδινο περίβλημα χρησιμοποιείται για την επένδυση της γεώτρησης, προστατεύοντάς την από γεωλογικούς σχηματισμούς και παρέχοντας δομική υποστήριξη προκειμένου να αποφευχθεί η εκάστοτε κατάρρευση. Τα ανθεκτικά στη διάβρωση κράματα χρησιμοποιούνται συχνά λόγω της επιθετικής χημικής σύνθεσης των γεωθερμικών ρευστών.

Βήμα 2 → Συστήματα σωληνώσεων. Οι χαλύβδινοι σωλήνες μεταφέρουν γεωθερμικά ρευστά από την κεφαλή του φρέατος στην επιφάνεια έτσι ώστε να εξαχθεί η θερμότητα. Αυτοί οι σωλήνες πρέπει να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες και στη διάβρωση, καθιστώντας την επιλογή των κατάλληλων κραμάτων χάλυβα καθοριστική.

Βήμα 3 → Ενίσχυση και υποστήριξη. Οι χαλύβδινες δομές οπλισμού και στήριξης είναι απαραίτητες για τον εξοπλισμό κεφαλής φρέατος και τις επιφανειακές εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται σε σταθμούς γεωθερμίας. Αυτές οι δομές παρέχουν σταθερότητα και υποστήριξη για εναλλάκτες θερμότητας, τουρμπίνες και γεννήτριες (Barbier, 2022).

Συνεχίζοντας, αξίζει να αναφερθεί ότι σε γεωθερμικά πηγάδια και συστήματα ανταλλαγής θερμότητας, οι θερμοκρασίες μπορούν να φτάσουν σε επίπεδα που προκαλούν

τα συμβατικά υλικά. Τα κράματα υψηλής θερμοκρασίας, όπως τα κράματα με βάση το νικέλιο (Inconel και το Hastelloy), χρησιμοποιούνται για την αντίσταση στη διάβρωση και τη διατήρηση της δομικής ακεραιότητας κάτω από ακραίες γεωθερμικές συνθήκες. Αυτά τα κράματα διασφαλίζουν ότι τα κρίσιμα εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένων του εναλλάκτη θερμότητας και των σωλήνων, μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά και με ασφάλεια. Ακόμη, το γεωθερμικό περιβάλλον παρουσιάζει μια μοναδική πρόκληση λόγω της διαβρωτικής φύσης των γεωθερμικών ρευστών. Αυτά τα υγρά περιέχουν επιθετικές χημικές ουσίες, συμπεριλαμβανομένων των σουλφιδίων, των χλωριδίων και άλλων διαβρωτικών στοιχείων, τα οποία μπορούν να επιταχύνουν τη διάβρωση των μετάλλων. Η επιλογή των ανθεκτικών στη διάβρωση επιστρώσεων και υλικών, λοιπόν, είναι κρίσιμη για την πρόληψη της πρόωρης βλάβης του εξοπλισμού (Bourcier et al., 2005).

Επιπροσθέτως, οι υψηλές θερμοκρασίες, σε συνδυασμό με τη διαβρωτική φύση των γεωθερμικών ρευστών, μπορούν να οδηγήσουν σε ρωγμές λόγω διάβρωσης λόγω καταπόνησης (SCC) των μετάλλων, ιδιαίτερα σε περιβλήματα φρεατίων και σωληνώσεις. Άλλωστε, το SCC αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική ανησυχία για τα συστήματα γεωθερμικής ενέργειας, που απαιτεί προσεκτική επιλογή υλικών και συστηματική παρακολούθηση για την αποφυγή καταστροφικών βλαβών. Ωστόσο, και η απολέπιση, αλλά και οι εναποθέσεις ορυκτών μπορούν να συσσωρευτούν σε εναλλάκτες θερμότητας, εσωτερικά περιβλήματα φρεατίων και επιφάνειες σωληνώσεων με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση της μεταφοράς της θερμότητας και να οδηγεί σε μπλοκάρισμα του συστήματος. Η επιλογή των υλικών και η εφαρμογή μέτρων κατά των αλάτων είναι απαραίτητα για την καταπολέμηση των προβλημάτων απολέπισης (Lo et al., 2014).

Έπειτα, η ευθραυστότητα του υδρογόνου αποτελεί μια ακόμη πιθανή ανησυχία για τα εξαρτήματα του χάλυβα που υπόκεινται σε γεωθερμικές συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης. Το υδρογόνο μπορεί να διαπεράσει τις μεταλλικές κατασκευές, οδηγώντας σε μειωμένη ολκιμότητα και αυξημένη ευαισθησία σε ρωγμές. Η προσεκτική επιλογή υλικού, λοιπόν, αλλά και οι στρατηγικές μετριασμού του υδρογόνου είναι ζωτικής σημασίας για την πρόληψη της ευθραυστότητας. Ως εκ τούτου, υφίστανται καινοτόμες επιστρώσεις και επενδύσεις, όπως είναι για παράδειγμα οι εποξειδικές επικαλύψεις και οι κεραμικές επιστρώσεις, οι οποίες αναπτύσσονται για την προστασία των μεταλλικών επιφανειών από τη διάβρωση και την απολέπιση εντός γεωθερμικών περιβαλλόντων. Αυτές οι τεχνολογίες παρατείνουν τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων και βελτιώνουν την απόδοση του συστήματος (Lo et al., 2014).

Στη συνέχεια, άξιο να αναφερθεί σε αυτό το σημείο της εργασίας είναι και το γεγονός ότι η έρευνα για τα προηγμένα σύνθετα υλικά βρίσκεται σε εξέλιξη για τη δημιουργία εναλλακτικών λύσεων στα παραδοσιακά μέταλλα αναφορικά με ορισμένες γεωθερμικές εφαρμογές. Τα σύνθετα υλικά προσφέρουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση, αλλά και την ικανότητα να αντέχουν σε ακραίες θερμοκρασίες, ενώ μειώνουν το βάρος και τις απαιτήσεις συντήρησης. Γίνεται κατανοητό, λοιπόν, ότι τα προγράμματα συνεχούς δοκιμών και παρακολούθησης υλικών είναι απαραίτητα στους σταθμούς γεωθερμίας, καθώς οι μη καταστρεπτικές τεχνικές δοκιμών, η παρακολούθηση της διάβρωσης και τα πρωτόκολλα επιθεώρησης βοηθούν στην ανίχνευση και τον μετριασμό πιθανών ζητημάτων υλικού, πριν θέσουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα του συστήματος (Barbier, 2022).

Πριν ολοκληρωθεί, όμως, το εν λόγω κεφάλαιο κρίνεται σημαντικό να επισημανθούν μερικά ακόμα από τα βασικά μέταλλα και κοιτάσματα που χρησιμοποιούνται συνήθως στη γεωθερμική ενέργεια:

→ **Χαλκός (Cu):** Ο χαλκός χρησιμοποιείται σε σταθμούς γεωθερμίας για ηλεκτρικές καλωδιώσεις, αγωγίμα εξαρτήματα και σωλήνες εναλλάκτη θερμότητας. Η εξαιρετική του θερμική αγωγιμότητα το καθιστά κατάλληλο για τη μεταφορά θερμότητας από τα γεωθερμικά ρευστά, σε ρευστά εργασίας.

→ **Αλουμίνιο (Al):** Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται σε ορισμένα εξαρτήματα εναλλάκτη θερμότητας και δομικά μέρη, λόγω των ελαφριών ιδιοτήτων του και της αντοχής του στη διάβρωση.

→ **Τιτάνιο (Ti):** Το τιτάνιο χρησιμοποιείται σε ορισμένους εναλλάκτες θερμότητας, αλλά και σε σωλήνες λόγω της εξαιρετικής του αντοχής στη διάβρωση και την ικανότητά του να αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες.

→ **Κράματα με βάση το νικέλιο (π.χ. Inconel, Hastelloy):** Αυτά τα κράματα χρησιμοποιούνται σε εξαρτήματα που υπόκεινται σε υψηλές θερμοκρασίες και διαβρωτικές γεωθερμικές συνθήκες, όπως είναι οι εναλλάκτες θερμότητας, τα περιβλήματα των φρεατίων και οι σωλήνες.

→ **Ταντάλιο (Ta):** Το ταντάλιο έχει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση και χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες εφαρμογές εντός των γεωθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, ιδιαίτερα σε εναλλάκτες θερμότητας και άλλες περιοχές υψηλής διάβρωσης.

→ **Ζιρκόνιο (Zr):** Το ζιρκόνιο χρησιμοποιείται για την αντοχή του στη διάβρωση σε ορισμένες εφαρμογές εναλλάκτη θερμότητας, ιδιαίτερα όπου συναντώνται υψηλές θερμοκρασίες και διαβρωτικά υγρά.

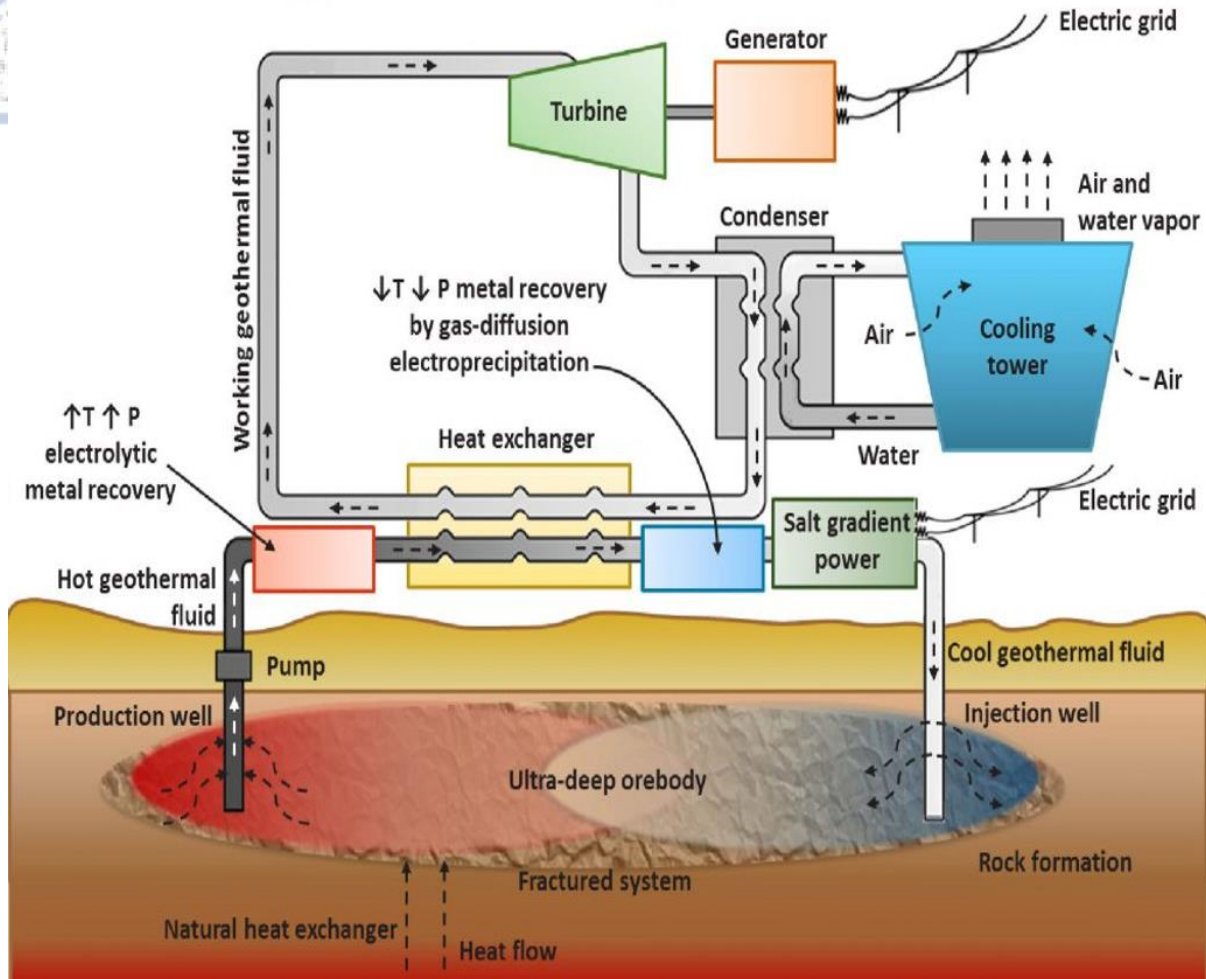
→ **Καουτσούκ και ελαστομερή:** Καουτσούκ και ελαστομερή υλικά χρησιμοποιούνται για στεγανοποιήσεις και παρεμβύσματα σε διάφορα εξαρτήματα για την πρόληψη διαρροών και τη διατήρηση της πίεσης στα γεωθερμικά συστήματα.

→ **Πλαστικά και πολυμερή:** Τα μη μεταλλικά υλικά όπως τα πλαστικά και τα πολυμερή χρησιμοποιούνται για τη μόνωση ηλεκτρικών εξαρτημάτων για την προστασία από τη διάβρωση και την παροχή θερμικής σταθερότητας.

→ **Γεωθερμικά ορυκτά πυριτίου:** Σε ορισμένους γεωθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, τα ορυκτά πυριτίου που υπάρχουν στα γεωθερμικά ρευστά μπορούν να εξαχθούν και να χρησιμοποιηθούν σε υλικά με βάση το πυρίτιο για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες.

→ **Στοιχεία σπανίων γαιών (REEs):** Σε ορισμένα εξειδικευμένα εξαρτήματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοιχεία σπανίων γαιών για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του υλικού, όπως η απόδοση των εναλλάκτη θερμότητας ή οι μαγνητικές ιδιότητες (Nogara & Zarrouk, 2018).

Κλείνοντας, και σε, αυτή, την περίπτωση διαφαίνεται ότι τα μέταλλα χρησιμεύουν ως αφανείς ήρωες της γεωθερμικής ενέργειας, παρέχοντας τη δομική υποστήριξη και τις δυνατότητες μεταφοράς της θερμότητας που απαιτούνται για την αποτελεσματική εξαγωγή της εσωτερικής θερμότητας της Γης. Ενώ τα μέταλλα, λοιπόν, είναι απαραίτητα για την αξιοποίηση αυτής της βιώσιμης πηγής ενέργειας, πρέπει να αντιμετωπίζονται, παράλληλα, οι ακραίες συνθήκες που δημιουργούν οι υψηλές θερμοκρασίες, τα διαβρωτικά υγρά και οι διαφορές πίεσης. Ενόψει αυτών των προκλήσεων, η υπεύθυνη επιλογή υλικών, οι ανθεκτικές στη διάβρωση επιστρώσεις και τα καινοτόμα υλικά είναι απαραίτητα για τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα και αξιοπιστία της γεωθερμικής παραγωγής ενέργειας. Επομένως, η περίπλοκη συνέργεια μεταξύ μετάλλων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας υπογραμμίζει τη μεταμορφωτική δύναμη της υπεύθυνης μηχανικής και της βιώσιμης διαχείρισης των πόρων, αναδεικνύοντας τελικά μια πορεία προς ένα καθαρότερο και πιο βιώσιμο μέλλον (Bakane, 2013).



Εικόνα 19: Επισκόπηση προβλεπόμενης εγκατάστασης γεωθερμικής ενέργειας.

5.1 ΧΑΛΥΒΑΣ

Ο χάλυβας αποτελεί ένα θεμελιώδες κράμα σιδήρου και άνθρακα, που συνήθως περιέχει μικρές ποσότητες άλλων στοιχείων όπως μαγγάνιο, χρώμιο, νικέλιο και μολυβδαίνιο. Είναι γνωστό για την αντοχή, την ανθεκτικότητα και την ευελιξία του, καθιστώντας το ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά σε διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένων των κατασκευών, της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροδιαστημικής και της ενέργειας. Οι γεωλογικές πτυχές του χάλυβα, ωστόσο, σχετίζονται περισσότερο με τα κοιτάσματα σιδηρομεταλλεύματος από τα οποία προέρχεται κυρίως. Ο σίδηρος, το κύριο συστατικό του χάλυβα, είναι άφθονο στον φλοιό της Γης, αποτελώντας περίπου το 5% της συνολικής σύνθεσης του πλανήτη. Υπάρχει κυρίως με τη μορφή μεταλλευμάτων σιδήρου, τα οποία είναι ιζηματογενή, πυριγενή ή μεταμορφωμένα πετρώματα που περιέχουν οικονομικά βιώσιμες συγκεντρώσεις ενώσεων σιδήρου, κυρίως αιματίτη και μαγνητίτη. Συγκεκριμένα για τον χάλυβα, η βιβλιογραφία αναφέρει τα εξής:

Κοιτάσματα ιζηματογενούς σιδήρου: Η πλειοψηφία των κοιτασμάτων σιδηρομεταλλεύματος είναι ιζηματογενούς προέλευσης. Αυτά τα κοιτάσματα σχηματίζονται μέσω της σταδιακής συσσώρευσης ιζημάτων πλούσιων σε σίδηρο σε θάλασσες ή λίμνες. Για εκατομμύρια χρόνια, αυτά τα ιζήματα υφίστανται συμπίεση και χημικές διεργασίες, συγκεντρώνοντας οξείδια του σιδήρου. Το προκύπτον σιδηρομετάλλευμα μπορεί να βρεθεί σε διάφορους σχηματισμούς ιζηματογενών πετρωμάτων, συμπεριλαμβανομένων σχηματισμών σιδήρου με ταινίες (BIFs) και σιδηρόλιθου.

Πυριγενή και μεταμορφικά κοιτάσματα: Αν και λιγότερο συνηθισμένο, το σιδηρομετάλλευμα μπορεί επίσης να εμφανιστεί σε πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα. Ορισμένα κοιτάσματα σιδηρομεταλλεύματος συνδέονται με ηφαιστειακή δραστηριότητα και μπορούν να βρεθούν με τη μορφή διεισδύσεων πλούσιων σε σίδηρο ή κοιτασμάτων skarn. Οι μεταμορφωτικές διεργασίες μπορούν να αλλάξουν τα υπάρχοντα ορυκτά πλούσια σε σίδηρο, δημιουργώντας νέα κοιτάσματα μεταλλευμάτων.

Εξόρυξη και επεξεργασία: Η εξόρυξη σιδηρομεταλλεύματος περιλαμβάνει υπαίθριες ή υπόγειες εργασίες, ανάλογα με το βάθος και τη θέση του κοιτάσματος. Μόλις εξαχθεί, το σιδηρομετάλλευμα υφίσταται διεργασίες εμπλουτισμού για την απομάκρυνση των ακαθαρσιών και την αύξηση της περιεκτικότητας σε σίδηρο. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι περιλαμβάνουν σύνθλιψη, λείανση και μαγνητικό διαχωρισμό. Μετά τον εμπλουτισμό, το σιδηρομετάλλευμα μετατρέπεται σε σφαιρίδια σιδήρου ή πυροσυσσωματώνεται για να προετοιμαστεί για χαλυβουργία.

Παγκόσμια Διανομή: Οι κύριες χώρες παραγωγής σιδηρομεταλλεύματος περιλαμβάνουν την Αυστραλία, τη Βραζιλία, την Κίνα, την Ινδία, τη Ρωσία και τη Νότια Αφρική. Η γεωλογική ποικιλότητα αυτών των περιοχών συμβάλλει στις διακυμάνσεις των τύπων κοιτασμάτων σιδηρομεταλλεύματος. Για παράδειγμα, η Αυστραλία είναι γνωστή για τα εκτεταμένα κοιτάσματα BIF, ενώ η Βραζιλία έχει τεράστια μεταλλεύματα πλούσια σε αιματίτη.

Παραγωγή χάλυβα: Μετά την επεξεργασία του σιδηρομεταλλεύματος σε σίδηρο, υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία σε χαλυβουργεία, όπου προστίθεται άνθρακας για τη δημιουργία χάλυβα. Ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες, εισάγονται στοιχεία κράματος για την επίτευξη συγκεκριμένων χαρακτηριστικών όπως σκληρότητα, αντοχή στη διάβρωση ή αντοχή στη θερμότητα (Necib et al., 2017).

Καθώς ολοκληρώνεται η εξερεύνηση των μετάλλων και των κοιτασμάτων τους στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κατανοεί κανείς ότι είναι επιτακτική η ανάγκη να εξεταστούν εξονυχιστικά οι πολυπλοκότητες και οι προκλήσεις που αποτελούν τη βάση αυτής της περίπλοκης σχέσης. Τα μέταλλα, λοιπόν, από τον χαλκό έως τα στοιχεία σπανίων γαιών, αποτελούν τη βάση των τεχνολογιών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι αγώγιμες ιδιότητες, η ανθεκτικότητα και ο μαγνητισμός τους αξιοποιούνται για τη σύλληψη και τη μετάδοση της καθαρής ενέργειας. Ωστόσο, αυτή η εξάρτηση από συγκεκριμένα μέταλλα δίνει μια δυνητικά επισφαλή εικόνα. Τα μέταλλα θα συνεχίσουν να διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αλλά το μέλλον τους σε αυτό το τοπίο θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από αποτελεσματικότητα, κυκλικότητα και υπεύθυνη προμήθεια.

Επιπλέον, η καινοτομία στα υλικά απαιτείται περισσότερο από ποτέ. Πρέπει να αναζητηθούν νέα υλικά και τεχνολογίες που θα μειώσουν την εξάρτηση από τα σπάνια μέταλλα και να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα των συστημάτων. Συγχρόνως, πρέπει να αναρωτηθεί κανείς πώς αυτή η καινοτομία μπορεί να αποτελέσει μια ευκαιρία για νέες θέσεις εργασίας και για τη δημιουργία βιώσιμων οικονομικών μοντέλων. Εν κατακλείδι, τα μέταλλα θα συνεχίσουν να διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στην προσπάθεια για αειφορία και καθαρή ενέργεια.

- Ang, T., Salem, M., Kamarol, M., Shekhar, H., Nazari, M. & Prabakaran, N. (2022). A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges, and suggestions. *Energy Strategy Reviews*, 43, 1-27.
- Bakane, P. A. (2013). *Overview of extraction of mineral/ metals with the help of geothermal fluid*. Proceedings, 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University.
- Barbier, E. (2022). Geothermal energy technology and status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, (1-2), 3-65.
- Βασίλας, Ε. (2020). *Μελέτη Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων και εφαρμογή στην Τιροθέα Φθιώτιδας (ΜΥΗΕ Βελίτσας, Ρέμα Ξεριές. Διπλωματική Εργασία*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Blanco, M. I. (2009). The economics of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (6-7), 1372-1382.
- Bourcier, W. L., Lin, M. & Nix, g. (2005). *Recovery of Minerals and Metals from Geothermal Fluids*. UCRL – CONF.
- Buckert, M., Schuler, D. & Bleher, D. (2009). *Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential*. Nairobi: UNEP.
- Davidsson, S., Hook, M. & Wall, G. (2012). A review of life cycle assessments on wind energy systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17, 729-742.
- Dushyantha, N., Batapola, B., Ilankoon, I., Rohitha, S., Premasiri, R., Abeysinghe, B., Ratnayake, N. & Dissanayake, K. (2020). The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy, and global production. *Ore Geology Reviews*, 122, 1-22.
- Eliasson, B. J. (2001). *Metal – insulator – metal diodes for solar energy conversation*. USA: UMI.
- Fang, Y., Ma, Y., Zheng, M., Yang, P., Asiri, A. & Wang, X. (2018). Metal-organic frameworks for solar energy conversion by photoredox catalysis. *Coordination Chemistry Reviews*, 373, 83-115.
- Fridleifsson, I. B. (2001). Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5 (3), 299-312.
- Goetzberger, A., Knobloch, J. & Vob, B. (2014). *Crystalline Silicon Solar Cells*. USA: John Wiley & Sons, Ltd.

- Grandell, L. & Hook, M. (2015). Assessing Rare Metal Availability Challenges for Solar Energy Technologies. *Sustainability*, 7 (9), 11818-11837.
- Guney, M. S. (2016). Solar power and application methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 776-785.
- Herbert, G., Iniyar, S., Sreevalsan, S. & Rajapandian, S. (2007). A review of wind energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (6), 1117-1145.
- Κατσέπα, Α. (2017). *Αέναες Πηγές Ενέργειας. Αιολική Ενέργεια – Φωτοβολταϊκά*. Νέα Μηχανιώνα: Α.Ε.Ν. Μακεδονίας.
- Kayan, T. & Hoshan, P. (2005). *Corrosion and Material Selection for Geothermal Systems*. Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey.
- Kaygusuz, K. (2002). Sustainable Development of Hydroelectric Power. *Energy Sources*, 24 (9), 803-815.
- Killingtveit, A. (2014). Hydroelectric Power. In: T. M. Letcher (ed.), *Future Energy* (pp. 453-470). Amsterdam: Elsevier.
- Kumari, A., Sinha, M. K., Pramanik, S. & Sahu, K. (2018). Recovery of rare earths from spent NdFeB magnets of wind turbine: Leaching and kinetic aspects. *Waste Management*, 75, 486-498.
- Letcher, T. M. (2014). *Future Energy*. Amsterdam: Elsevier.
- Lo, Y., Cheng, C., Han, Y.-L., Chen, B.-Y. & Chang, J.-S. (2014). Recovery of high-value metals from geothermal sites by biosorption and bioaccumulation. *Bioresource Technology*, 160, 182-190.
- Lohman, L. (2009). Climate as Investment. *Development and Change*, 40 (6), 1063-1083.
- Lumley, R. (2010). *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications*. UK: Woodhead Publishing.
- Luque, A. & Hegedus, S. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. USA: John Wiley & Sons, Ltd.
- Maradin, D. (2021). Advantages and disadvantages of renewable energy sources utilization. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11 (3), 176-183.
- Μέλφος, Β. & Βουδούρης, Π. (2022). *Κοιτάσματα της Ελλάδας*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.
- Morgado, D., Troja, N., Kadyrzhanova, A. & Samyel, D. (2020). Hydropower Modernization Needs in Asia. *AIIB*, 1, 1-22.
- Μπότσα, Π. Δ. (2020). *Μελέτη του αιολικού δυναμικού της Νάξου*. Διπλωματική Εργασία. Αθήνα: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

- Necib, S., Diomidis, N. & Keech, P. (2017). Corrosion of carbon steel in clay environments relevant to radioactive waste geological disposals. *Swiss J Geosci*, 110, 329-342.
- Nogara, J. & Zarrouk, S. (2018). Corrosion in geothermal environment Part 2: Metals and alloys. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (1), 1347-1363.
- Olabi, A. G. & Abdelkareem, M. A. (2022). Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 1-17.
- Olabi, A. G., Wilberforce, T., Elsaid, K., Salameh, T., Sayed, E. T., Husain, K. S. & Abdelkareem, M. A. (2021). Selection Guidelines for Wind Energy Technologies. *Energies*, 14, 3244
- Peng, K. & Lee, S. (2010). Silicon Nanowires for Photovoltaic Solar Energy Conversion. *Wiley*, 23 (2), 198-215.
- Sampaio, P. G. & Gonzalez, M. O. (2016). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 590-601.
- Sakhrieh, A. & Al-Ghandoor, A. (2013). Experimental investigation of the performance of five types of solar collectors. *Energy Conversion and Management*, 65, 715-720.
- Smil, V. (2013). *Making the Modern World - Materials and Dematerialization*. USA: John Wiley & Sons, Ltd.
- Stegen, K. S. (2015). Heavy rare earths, permanent magnets, and renewable energies: An imminent crisis. *Energy Policy*, 79, 1-8.
- Τσαουσιδης, T. (2021). *Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας*. Διπλωματική Εργασία. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο.
- Wang, Q. (2010). Effective policies for renewable energy - the example of China's wind power - lessons for China's photovoltaic power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (2), 702-712.
- Yah, N. F., Oumer, A. N. & Idris, M. S. (2017). Small scale hydropower as a source of renewable energy in Malaysia: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 228-239.