



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Διπλωματική εργασία

ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ & ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΙ ΤΡΟΠΟΙ
ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



Νικόλαος Γλύπτης 01104675
Επιβλέπων: Νικόλαος Μαμάσης, Καθηγητής ΕΜΠ

Μάρτιος 2023

Στα πλαίσια της ολοκλήρωσης της διπλωματικής μου εργασίας και συνεπώς της ολοκλήρωσης των σπουδών μου θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή και Άνθρωπο κ. Νικόλαο Μαμάση που δέχτηκε να επιβλέψει την εργασία αυτή αλλά και για την σωστή καθοδήγηση κατά τη διάρκεια εκπόνησης της.

Επίσης νιώθω την ανάγκη να αφιερώσω αυτή την εργασία στη Μητέρα μου η οποία υπήρξε πάντα η κινητήριος δύναμη.

Περίληψη

Η συνεχής αύξηση των ενεργειακών αναγκών σε παγκόσμιο επίπεδο οδηγεί αναπόφευκτα την ανθρωπότητα στην εύρεση νέων εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Η ανάγκη για πηγές ενέργειας πιο φιλικές για το περιβάλλον, οι οποίες θα συμβάλουν και στην κυκλική οικονομία μας οδηγεί αναπόφευκτα στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Αυτές κερδίζουν συνεχώς έδαφος από τις παραδοσιακές πηγές Ενέργειας με σκοπό μακροπρόθεσμα να τις αντικαταστήσουν πλήρως. Η αύξηση σε ΑΠΕ σημαίνει ότι μελλοντικά, στο τέλος δηλαδή του κύκλου ζωής τους, θα έχουμε να διαχειριστούμε τα απόβλητα τα οποία θα προκύψουν από αυτές. Σύμμαχος μας στην πρόβλεψη των ποσοτήτων των αποβλήτων που θα προκύψουν αλλά και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις ΑΠΕ είναι η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής τους, η οποία αποτελεί επιστημονικό εργαλείο για εκτίμηση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος τόσο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας όσο και στο τέλος της ζωής του εκάστοτε προϊόντος που αναλύεται. Σε αυτή την εργασία θα δούμε τα συστήματα και τα υλικά από τα οποία αποτελούνται δύο από τις πολλές ΑΠΕ και πιο συγκεκριμένα τα φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες. Κατόπιν θα αναλυθούν οι τρόποι ανακύκλωσης των υλικών αυτών, ενώ ειδική μνεία θα γίνει στα πτερύγια των ανεμογεννητριών τα οποία αποτελούνται από σύνθετα υλικά και παρουσιάζουν δυσκολία στον τρόπο ανακύκλωσης τους.

Abstract

The continuous increase in energy needs globally inevitably leads humanity to explore alternative energy sources. Renewable Energy Sources, which will also contribute to the circular economy, are constantly gaining ground from traditional Energy sources with the aim of replacing them completely in the long term. The increase in Renewables means that in the future, at the end of their life cycle, we will have to manage the deviations that will arise from them. Ally in predicting the amounts of waste, that will be generated, and the environmental impacts from RES is their Life Cycle Analysis, which is a scientific tool for assessing the burden on the environment so during operation as at the end of lifetime of the product. In this paper we will analyze the systems and materials that make up two of the many Renewables, photovoltaics and wind turbines. Then we will analyze the ways of recycling these materials, while a special mention will be made of the blades of the wind turbines, which are made of composite materials and present difficulty in the way of recycling them.

Κατάλογος περιεχομένων

Ευρετήριο Σχημάτων σελ. 7

Ευρετήριο Εικόνων σελ. 8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΟ

1.1. Εισαγωγή σελ. 9

1.2. Σκοπός της εργασίας σελ. 13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

2.1. Είδη φωτοβολταϊκών πάνελ σελ. 16

2.2. Υλικά από τα οποία αποτελούνται τα φωτοβολταϊκά συστήματα σελ. 20

2.3. Ανάλυση μεγεθών φωτοβολταϊκών πάνελ σελ. 22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ & ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΟΥΣ

3.1. Ανακύκλωση κρυσταλλικών πάνελ σελ. 29

3.2. Ανακύκλωση πάνελ λεπτού φιλμ σελ. 30

3.3. Επαναχρησιμοποίηση πάνελ σελ.32

3.4. Ανακύκλωση αλουμινίου σελ. 32

3.5. Ανακύκλωση γυαλιού σελ. 34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

4.1. Είδη ανεμογεννητριών	σελ. 38
4.2. Βασικά μέρη ανεμογεννητριών	σελ. 43
4.3. Υλικά κατασκευής ανεμογεννητριών	σελ. 49
4.3.1. Υλικά κατασκευής πτερυγίων ανεμογεννητριών	σελ. 51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

5.1. Ανακύκλωση σκυροδέματος θεμελίωσης	σελ. 63
5.2. Ανακύκλωση μετάλλων ανεμογεννητριών	σελ. 64
5.3. Ανακύκλωση σύνθετων υλικών πτερυγίων	σελ. 66
5.3.1. Επιτυχημένα παραδείγματα ανακύκλωσης πτερυγίων ανεμογεννητριών	σελ. 71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ σελ. 71 |

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ σελ. 79 |

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Αύξηση του ποσοστού ενέργειας από ΑΠΕ σε Ευρωπαϊκές χώρες από το 2000 έως το 2020	σελ. 11
Σχήμα 2.1 Λόγος βάρους (t) - ισχύος (MW) στην πορεία του χρόνου	σελ. 20
Σχήμα 2.2 Ποσοστά υλικών ανάλογα με την τεχνολογία του Φ/Β πάνελ	σελ. 22
Σχήμα 2.3 Παραγωγή ενέργειας (TWh) από φωτοβολταϊκά ανά έτος στην Ελλάδα. σελ. 23	
Σχήμα 2.4 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πάνελ	σελ. 25
Σχήμα 5.1 Παραγωγή ενέργειας (TWh) από ανεμογεννήτριες ανά έτος στην Ελλάδα.....	σελ. 58
Σχήμα 5.2 Εγκατεστημένη ισχύς ανεμογεννητριών στην Ελλάδα από 2017 – 2021 ανάλογα με τον κατασκευαστή	σελ. 59
Σχήμα 5.3 Βασικά χαρακτηριστικά και υλικά ανεμογεννητριών	σελ. 60

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1 Τυπικό σύστημα ηλιακής ενέργειας	σελ. 15
Εικόνα 2.2 Βασικές διαφορές κρυσταλλικών πάνελ και PERC	σελ. 18
Εικόνα 3.1 Ανακύκλωση ΦΒ πάνελ κρυσταλλικής βάσης & λεπτού φιλμ	σελ. 31
Εικόνα 4.1 Χερσαίο αιολικό πάρκο στην Πύλο Μεσσηνίας	σελ. 41
Εικόνα 4.2 Υπεράκτιο αιολικό πάρκο στο Yorkshire - Αγγλία	σελ. 43
Εικόνα 4.3 Διάφοροι τύποι θεμελίωσης ανεμογεννήτριας	σελ. 45
Εικόνα 4.4 Εσωτερική άποψη πυλώνα ανεμογεννήτριας	σελ. 46
Εικόνα 4.5 Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας	σελ. 49
Εικόνα 5.1 Ταφή πτερυγίων ανεμογεννητριών	σελ. 72
Εικόνα 5.2 Παιδική χαρά Wikado, Ρότερνταμ, Ολλανδία	σελ. 73
Εικόνα 5.3 Πεζογέφυρα Blade Bridge, Κορκ, Ιρλανδία	σελ. 74
Εικόνα 5.4 Στέγαστρο ποδηλάτων, Άαλμποργκ, Δανία	σελ. 75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΟ

1.1 Εισαγωγή

Η παγκόσμια ζήτηση σε ενέργεια, λόγω της μεγάλης αύξησης του πληθυσμού, αλλά και της αλματώδους ανάπτυξης της τεχνολογίας έχει εκτοξευτεί τα τελευταία χρόνια σε ιστορικά υψηλά. Τον τελευταίο αιώνα ο πληθυσμός της Γης τετραπλασιάστηκε και η ενέργεια η οποία καταναλώθηκε ήταν μεγαλύτερη σε αυτά τα 100 χρόνια από ότι τα προηγούμενα 1000 μαζί. Από την άλλη η δράση για νέες και πιο καθαρές μορφές ενέργειας βρίσκεται σταδιακά στις υψηλότερες θέσεις της πολιτικής ατζέντας σχεδόν όλων των κυβερνήσεων. Ειδικότερα στην Ευρώπη, όπου ισχύει η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, στόχος είναι έως το 2050, να είναι η πρώτη ήπειρος στον κόσμο η οποία θα είναι ουδέτερη κλιματικά, έχοντας μάλιστα ως ενδιάμεσο στόχο το 2030 όπου οι καθαρές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου να μειωθούν κατά τουλάχιστον 55%.

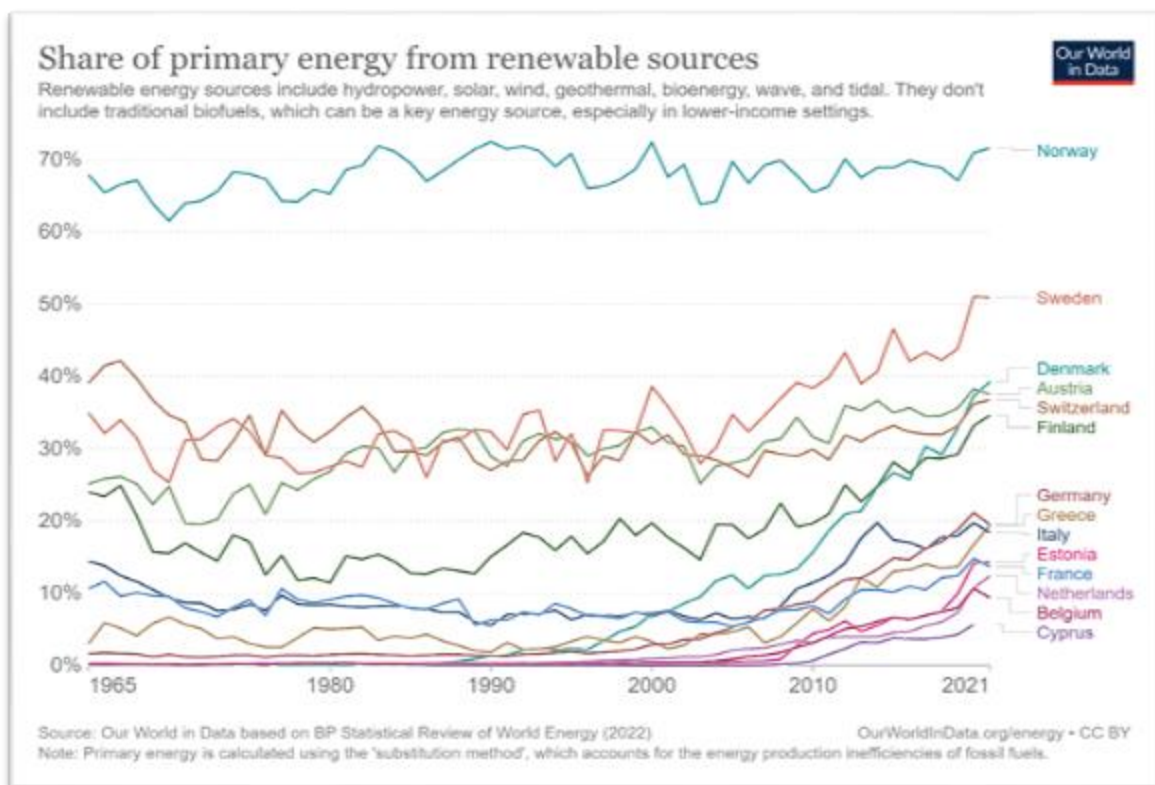
Η πλέον ανερχόμενη τάση σε παγκόσμιο επίπεδο είναι η εναλλαγή από τις παραδοσιακές μορφές ενέργειας στην πράσινη ενέργεια αλλά και η συνεχής αναζήτηση τρόπων ώστε να είναι περισσότερο βιώσιμες. *Η βιώσιμη αειφόρος ανάπτυξη ορίζεται ως η ικανότητα της κοινωνίας να καλύπτει τις ανάγκες του παρόντος, χωρίς να επιβαρύνει τις επόμενες γενιές να καλύψουν τις ανάγκες του μέλλοντος,* και οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι αυτές που μας παρέχουν αυτή τη δυνατότητα.

Σαν ορισμό μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι οι πηγές που μας τροφοδοτούν με ενέργεια σε μεγάλο βάθος χρόνου.* Πέρα από τις πιο διαδεδομένες που είναι αιολική και ηλιακή ενέργεια, υπάρχουν και άλλες πολλές όπως η κυματική ενέργεια, η υδραυλική ενέργεια, η ενέργεια που εκλύεται από το βιοαέριο στους χώρους υγειονομικής ταφής, η παλιρροϊκή ενέργεια κ.α. Οι ΑΠΕ είναι φιλικές προς το περιβάλλον, λόγω του ότι δεν είναι προϊόντα εξόρυξης ή καύσης που είναι οι παραδοσιακές μορφές ενέργειας, δεν εκλύουν CO₂ ή υδρογονάνθρακες, ούτε παράγουν τοξικά ή ραδιενεργά απόβλητα.

Τα πλεονεκτήματά που παρουσιάζουν οι ΑΠΕ συγκριτικά με τις παραδοσιακές μορφές ενέργειας είναι ότι συμμετέχουν σημαντικά στη μείωση (έως και μηδενισμό) της εξάρτησης από αυτές, συμβάλουν στην ενεργειακή ανεξαρτησία της κάθε χώρας παραγωγού καθώς μπορούν και καταναλώνονται στη χώρα που παράγονται, λειτουργούν με σχετικά χαμηλό κόστος καθώς δεν είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τιμές συμβατικών καυσίμων και τέλος και πολύ σημαντικό είναι πρακτικά ανεξάντλητες. (*weenergy.gr*)

Σύμφωνα με στοιχεία της EUROSTAT τα κράτη μέλη της Ε.Ε. βαδίζουν προς αυτή την κατεύθυνση με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) να κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος έναντι των παραδοσιακών ως τώρα μεθόδων. Ενδεικτικά η Ε.Ε. στο σύνολο των κρατών μελών της αύξησε την διανομή της ενέργειας από ΑΠΕ από 8.5% επί του συνόλου το έτος 2004 στο 18% το έτος 2018. Παράδειγμα προς μίμηση αποτελεί η Σουηδία όπου το ποσοστό παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ για το 2020 έφτασε το 48.35%.

Στο Σχήμα 1.1 βλέπουμε την αύξηση του ποσοστού ενέργειας από ΑΠΕ σε κάποιες από τις χώρες της Ευρώπης όπως αυτό διαμορφώνεται από το 2000 έως το 2021.



Σχήμα 1.1 Αύξηση του ποσοστού ενέργειας από ΑΠΕ σε χώρες της Ευρώπης Πηγή: www.ourworldindata.org

Το 2018, συμφωνήθηκε από τους ηγέτες της Ε.Ε. ο στόχος έως το 2030 ένα μερίδιο 32% της κατανάλωσης ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Τον Ιούλιο του 2021, ενόψει των νέων φιλοδοξιών της ΕΕ για το κλίμα, προτάθηκε στους συν-νομοθέτες η αναθεώρηση του στόχου του 40% έως το 2030. Το μελλοντικό πλαίσιο πολιτικής για την περίοδο μετά το 2030 βρίσκεται υπό συζήτηση.

Εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς ότι η μεγάλη αύξηση του ποσοστού της ενέργειας που προέρχεται από ΑΠΕ, δημιουργεί την ανάγκη λήψης μέτρων για τη διαχείριση του τεράστιου όγκου των αποβλήτων που προκύπτουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

Το μεγαλύτερο ποσοστό του ηλεκτρισμού που προέρχεται από ΑΠΕ, οφείλεται στην αιολική ενέργεια (36% για την Ε.Ε. το 2021) ενώ η ηλιακή ενέργεια έχει τη μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση (14% για την Ε.Ε. το 2021 αντί μόλις 1% το 2008).

Η μετατροπή της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται με τη χρήση ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών πάνελ αντίστοιχα.

Σε αυτή την εργασία θα αναλυθούν τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα παραπάνω , η ποσοτική εκτίμηση τους, οι διαθέσιμοι και αποδεκτοί τρόποι ανακύκλωσης ή και επαναχρησιμοποίησης τους καθώς και η εκτίμηση των οικονομικών μεγεθών τους.

Σημαντικό ρόλο για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις ΑΠΕ τόσο κατά τη λειτουργία τους όσο και στο τέλος της ζωής τους παίζει η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής. Αυτή, με λίγα λόγια, αποτελεί ένα επιστημονικό εργαλείο που ποσοτικοποιεί και προσδιορίζει τα υλικά και την ενέργεια που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενός προϊόντος και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, αλλά και τα απόβλητα που πιθανόν να απελευθερωθούν στο περιβάλλον. Η ανάλυση αφορά ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, δηλαδή από την εξόρυξη και επεξεργασία των πρώτων υλών, την κατασκευή του, τη μεταφορά και διανομή του στο χώρο χρήσης, τη λειτουργία του, τη συντήρηση του, έως και την ανακύκλωση ή την τελική απόρριψη του. Η ΑΚΖ ως εργαλείο έχει αναπτυχθεί κυρίως τα τελευταία χρόνια. Στην Ευρώπη αναπτύχθηκε κυρίως λόγω του κανονισμού της ΕΟΚ 880/92 ενώ σε διεθνές επίπεδο λόγω της προσθήκης της στα πρότυπα πιστοποίησης ποιότητας ISO 14040 (Αυγερινόπουλος 2008).

1.2 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να διερευνηθούν οι τρόποι ανακύκλωσης των ΑΠΕ και των υλικών από τα οποία αποτελούνται, και πιο συγκεκριμένα τα υλικά από φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες. Θα ασχοληθούμε κυρίως με το μεγάλο ποσοστό των υλικών και όχι με τα υλικά που αποτελούν τα ηλεκτρικά κυκλώματα. Κυρίως δηλαδή με το αλουμίνιο, τον χάλυβα, το γυαλί, τα αδρανή καθώς και τα συνθετικά υλικά των λεπίδων των ανεμογεννητριών. Στα τελευταία, και λόγω της ιδιαιτερότητας της σύνθεσής τους αλλά και της δυσκολίας ανακύκλωσης τους θα δώσουμε λίγο παραπάνω έμφαση και θα δούμε τρόπους επιτυχημένης ανακύκλωσης των λεπίδων χωρίς την ανάγκη αποσύνθεσής τους και πως αυτό θα μπορούσε να μας εμπνεύσει μελλοντικά.

Για να καταλήξουμε στην αναφορά των μεγεθών των υλικών προς ανακύκλωση, θα δούμε τις δομές του εκάστοτε συστήματος αλλά και τα συμβατικά μεγέθη τους. Μετά το τέλος της εργασίας θα είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε τι βάρος μπορεί να έχει ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πάνελ, από τι υλικά αποτελείται και σε τι ποσοστό, ποια είναι τα βασικά τμήματα μιας ανεμογεννήτριας, ποιες είναι οι διαστάσεις της και πόσα KW αποδίδει. Επίσης θα γνωρίζουμε και θα μπορούμε να περιγράψουμε τις κυριότερες και επικρατούσες μεθόδους ανακύκλωσης των υλικών αυτών.

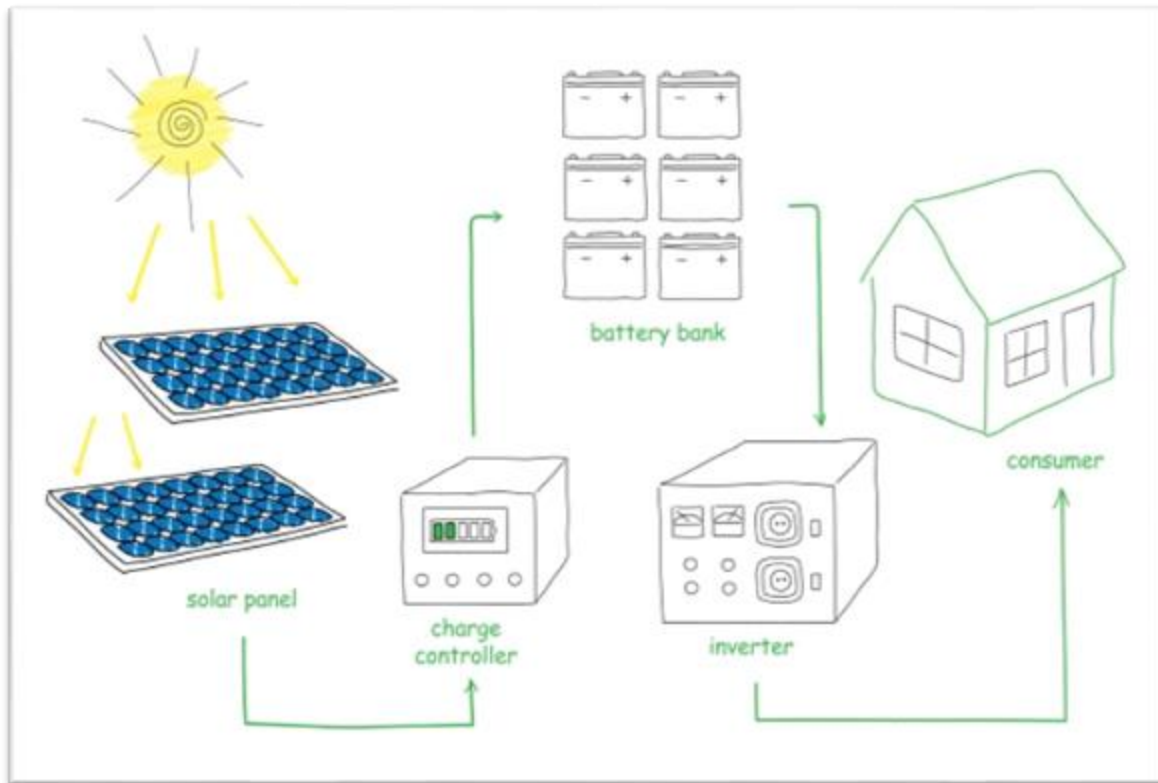
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Ο όρος “φωτοβολταϊκό” προέρχεται από την λέξη ‘φῶς’ και τη λέξη ‘volt’ η οποία είναι η μονάδα μέτρησης της ηλεκτρικής τάσης και πήρε το όνομα της από τον Alessandro Volta (1745 – 1827) Ιταλό φυσικό ο οποίος έμεινε γνωστός στην ιστορία κυρίως για την ανακάλυψη της ηλεκτρικής μπαταρίας.

Ως φωτοβολταϊκό φαινόμενο ορίζεται η άμεση μετατροπή ποσοστού της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, με τη χρήση των φωτοβολταϊκών κυψελών οι οποίες είναι τεχνητοί ημιαγωγοί ενωμένοι σε σειρά και δημιουργούν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα.

Ένα τυπικό σύστημα ηλιακής ενέργειας αποτελείται τα φωτοβολταϊκά πάνελ, μία ή και περισσότερες μπαταρίες και τον ηλιακό ελεγκτή. Στην περίπτωση όπου η παραγόμενη ισχύς είναι 220 V ή 110 V απαιτείται επιπλέον και ένας μετατροπέας. Ο ελεγκτής έχει σκοπό να προστατεύει αυτόματα από υπερφόρτωση του δικτύου, ενώ ο μετατροπέας να μετασχηματίζει το ρεύμα από συνεχές σε εναλλασσόμενο. Σε κάποιες περιπτώσεις απαιτείται και εγκατάσταση υποσταθμού για τη σύνδεση στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, συνήθως όταν το πάρκο έχει ισχύ μεγαλύτερη από 100 kW (Αδαλής 2019).

Στην Εικόνα 2.1 βλέπουμε ένα τυπικό σύστημα ηλιακής ενέργειας, το οποίο περιλαμβάνει τα πάνελ, τις μπαταρίες, τον ελεγκτή και τον μετατροπέα.



Εικόνα 2.1 Τυπικό σύστημα ηλιακής ενέργειας

Πηγή: www.makermodes.com

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως: (Μαμάσης, 2020)

- Το είδος του φωτοβολταϊκού στοιχείου
- Την ημερήσια διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας, λόγω εποχής και ώρας
- Την τοποθεσία. Για παράδειγμα όσο αυξάνει το γεωγραφικό πλάτος τόσο μειώνεται η παραγωγή ενέργειας.
- Η κλίση με την οποία είναι τοποθετημένο το φωτοβολταϊκό πάνελ.
- Η σκίαση του πάνελ, εάν δηλαδή υπάρχουν γειτονικά κτίρια ή άλλα φυσικά και τεχνητά εμπόδια τα οποία κάποια ώρα της ημέρας ή κάποια εποχή του χρόνου μειώνουν την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στα πάνελ. τα οποία υπάρχουν φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, γειτονικά κτίρια ή αρχιτεκτονικά στοιχεία της ίδιας κατασκευής)

- Εάν υπάρχει απόκλιση από το νότιο προσανατολισμό. Απόκλιση έως και 20° σημαίνει μείωση της απόδοσης έως και 95% της μέγιστης δυνατής.
- Ο κατάλληλος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός και η σωστή καλωδίωση και γείωση του συστήματος.
- Η υδατοστεγανότητα του συστήματος καθώς και η ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες.
- Ο επαρκής αερισμός της πίσω πλευράς των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η αύξηση της θερμοκρασίας τους είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόδοσής τους, καθώς για κάθε 1°C άνω των 25°C η απόδοσή τους μειώνεται κατά περίπου 0,5%.

2.1 Είδη φωτοβολταϊκών πάνελ

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών πάνελ (μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά, PERC και λεπτού φιλμ) οι οποίοι παρουσιάζονται στη συνέχεια :

(www.aurorasolar.com)

- Μονοκρυσταλλικά πάνελ:

Αποτελούνται από μεμονωμένους κρυστάλλους καθαρού Πυριτίου (Si). Δεδομένου ότι είναι κατασκευασμένα από καθαρό πυρίτιο, μπορούν εύκολα να αναγνωριστούν από το σκούρο μαύρο χρώμα τους. Η χρήση καθαρού πυριτίου καθιστά επίσης τα μονοκρυσταλλικά πάνελ τα πιο αποδοτικά συγκριτικά με το χώρο που καταλαμβάνουν και με τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μεταξύ και των τριών τύπων ηλιακών πάνελ. Ωστόσο, αυτό έχει και ένα μειονέκτημα καθώς πολύ Πυρίτιο (Si) πάει χαμένο (μερικές φορές ακόμα και πάνω από 50%) για να παραχθεί ένα μονοκρυσταλλικό στοιχείο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος κατασκευής τους.

- Πολυκρυσταλλικά πάνελ:

Αυτά όπως υποδηλώνει και το όνομα, προέρχονται από διαφορετικούς κρυστάλλους πυριτίου αντί για έναν. Τα θραύσματα Πυριτίου (Si) τήκονται και χύνονται σε ένα τετράγωνο καλούπι. Αυτό κάνει τις πολυκρυσταλλικές κυψέλες πολύ πιο προσιτές από άποψη κόστους, καθώς δεν υπάρχει σχεδόν καμία σπατάλη υλικού, και τους δίνει αυτό το χαρακτηριστικό τετράγωνο σχήμα. Ωστόσο, αυτό τα καθιστά λιγότερο αποδοτικά από ενεργειακής άποψης συγκριτικά με το χώρο που καταλαμβάνουν, καθώς η καθαρότητα τους σε Πυρίτιο (Si) είναι χαμηλότερη από τα μονοκρυσταλλικά πάνελ. Έχουν επίσης χαμηλότερη ανοχή στη θερμότητα, πράγμα που σημαίνει ότι είναι λιγότερο αποδοτικά σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας.

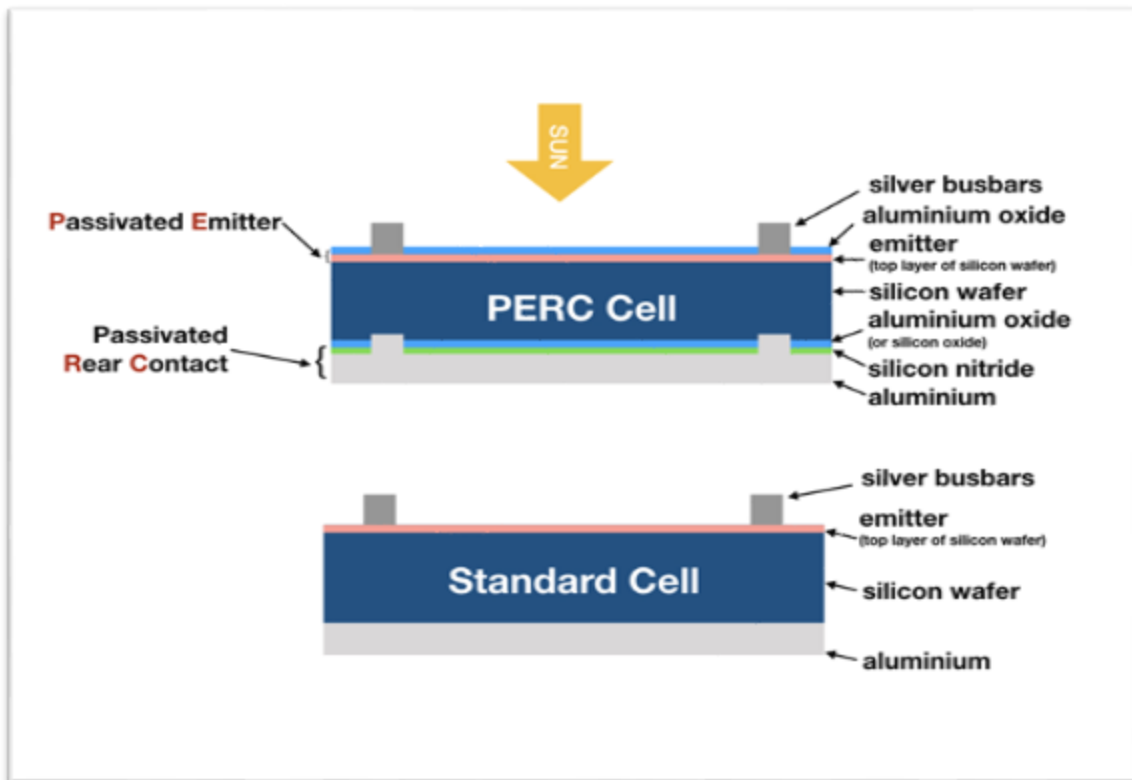
- PERC:

Είναι μια βελτίωση και πιο αποδοτική εκδοχή των κρυσταλλικών πάνελ. Σε ελεύθερη μετάφραση θα μπορούσαμε να τα ονομάσουμε ως πάνελ παθητικοποιημένης εκπομπής και οπίσθιας κυψέλης. Αυτή η σχετικά νέα τεχνολογία προσθέτει ένα στρώμα στην πίσω επιφάνεια της κυψέλης που ενισχύει την απόδοση με διάφορους τρόπους: Αντανακλά το φως πίσω στην κυψέλη, αυξάνοντας την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται. Έτσι μειώνει τη φυσική τάση των ηλεκτρονίων να ανασυνδυάζονται και να αναστέλλουν τη ροή τους στο σύστημα και επιτρέπει την ανάκλαση μεγαλύτερων μηκών κύματος φωτός. Στα απλά κρυσταλλικά πάνελ τα μήκη κύματος φωτός άνω των 1.180 nm δεν μπορούν να απορροφηθούν από τις κυψέλες και απλώς περνούν και έτσι καταλήγουν να θερμαίνουν το πίσω μεταλλικό φύλλο της κυψέλης και να μειώνουν την απόδοσή του. Στα PERC το στρώμα της πίσω επιφάνειας αντανακλά αυτά τα μεγαλύτερα μήκη κύματος και τα εμποδίζει να θερμάνουν το πίσω φύλλο.

Τα πάνελ PERC επιτρέπουν μεγαλύτερη συλλογή ηλιακής ενέργειας σε μικρότερο φυσικό αποτύπωμα, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για περιορισμένους χώρους. Είναι ελαφρώς πιο ακριβά στην παραγωγή τους από τα παραδοσιακά πάνελ, λόγω των πρόσθετων υλικών που χρειάζονται, αλλά μπορούν να κατασκευαστούν με τον ίδιο εξοπλισμό και μπορεί τελικά

να καταλήξουν να έχουν χαμηλότερο μέσο κόστος ανά Watt λόγω της αποτελεσματικότητάς τους.

Στην Εικόνα 2.2 μπορούμε να διακρίνουμε τις βασικές διαφορές των PERC από τα κρυσταλλικά πάνελ και πως το πίσω στρώμα της κυψέλης βοηθά στην αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας μεγιστοποιώντας την απόδοσή τους.



Εικόνα 2.2 Βασικές διαφορές κρυσταλλικών πάνελ και PERC.

Πηγή: www.solarquotes.com

- Πάνελ λεπτού φιλμ (Thin film):

Χαρακτηρίζονται από στρώματα που είναι αρκετά λεπτά ώστε να είναι εύκαμπτα. Αυτού του τύπου τα πάνελ δεν απαιτούν περιμετρικό πλαίσιο, καθιστώντας τα ελαφρύτερα και ευκολότερα στην εγκατάσταση. Σε αντίθεση με τα πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου που διατίθενται σε τυποποιημένα μεγέθη 60, 72 και 96 κυψελών, τα πάνελ λεπτού φιλμ μπορούν να διατίθενται σε διαφορετικά μεγέθη για να ταιριάζουν σε συγκεκριμένες ανάγκες. Ωστόσο, είναι λιγότερο αποδοτικά από τα τυπικά ηλιακά πάνελ πυριτίου.

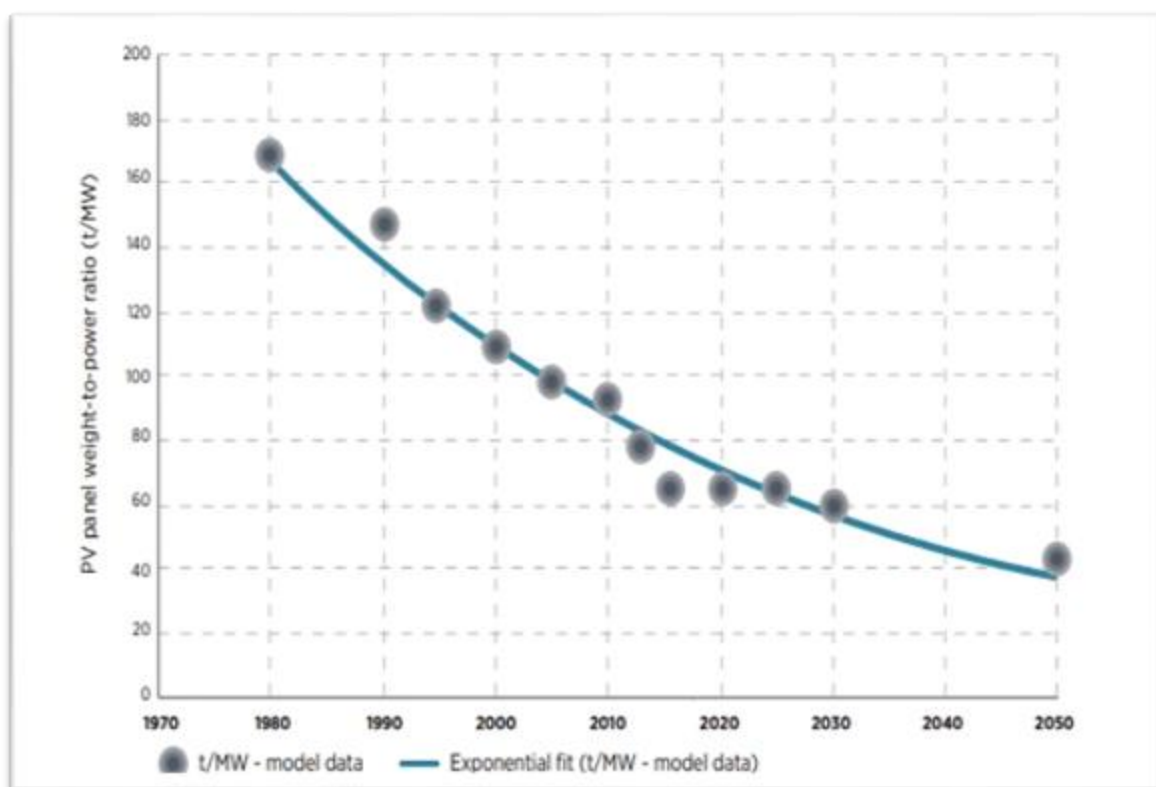
Σε αντίθεση με τα κρυσταλλικά πάνελ πυριτίου, τα πάνελ λεπτής μεμβράνης φτιάχνονται από διαφορετικά υλικά όπως:

- Τελουρίου-Καδμίου (CdTe). Το CdTe έχει το ίδιο πλεονέκτημα χαμηλού κόστους με τις πολυκρυσταλλικές κυψέλες, ενώ διαθέτει το χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα, απαιτήσεις σε νερό και χρόνο απόσβεσης ενέργειας από όλους τους τύπους ηλιακών συλλεκτών. Ωστόσο, η τοξική φύση του Καδμίου (Cd) καθιστά την ανακύκλωση πιο ακριβή από άλλα υλικά.
- Άμορφου πυριτίου (A-Si). Τα πάνελ άμορφου πυριτίου (Si) έλκουν το όνομά τους από την άμορφη φύση τους. Σε αντίθεση με τα μονοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα, το πυρίτιο δεν είναι δομημένο σε μοριακό επίπεδο. Κατά μέσο όρο, ένα κύτταρο A-Si απαιτεί μόνο ένα κλάσμα του πυριτίου που απαιτείται για την παραγωγή τυπικών κυψελών Πυριτίου (Si). Αυτό τους επιτρέπει να έχουν το χαμηλότερο κόστος παραγωγής, σε βάρος όμως της αποτελεσματικότητάς τους. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα πάνελ a-Si είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν πολύ λίγη ισχύ, όπως π.χ. οι αριθμομηχανές τσέπης.
- Χαλκού Ινδίου Σεληνίου Γαλλίου (CIGS). Τα πάνελ CIGS χρησιμοποιούν ένα λεπτό στρώμα Χαλκού (Cu), Ινδίου (In), γαλλίου (Ga) και Σεληνίου (Se) που εναποτίθεται σε γυάλινο ή πλαστικό υπόστρωμα. Ο συνδυασμός αυτών των στοιχείων έχει ως αποτέλεσμα την υψηλότερη απόδοση μεταξύ των τύπων λεπτού πάνελ, αν και εξακολουθεί να μην είναι τόσο αποτελεσματική όσο τα πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου.

2.2 Υλικά από τα οποία αποτελούνται τα φωτοβολταϊκά πάνελ

Οι έρευνες που γίνονται για τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα φωτοβολταϊκά οδηγούν ολοένα και περισσότερο στην μείωση των χρησιμοποιούμενων υλικών καθώς και στη μείωση της χρήσης των δυνητικά επικίνδυνων ουσιών (Marini 2014), ενώ οι νέες τεχνολογίες στοχεύουν και στη μείωση των διαστάσεων και της μάζας τους.

Στο Σχήμα 2.1 βλέπουμε τη μείωση του λόγου βάρους (t) – ισχύος (MW), με το πέρασμα των χρόνων αλλά και τις μελλοντικές προσδοκίες.



Σχήμα 2.1 Εξέλιξη του λόγου βάρους (t) - ισχύος (MW) στην πορεία του χρόνου.

Πηγή : IRENA

- Κρυσταλλικά πάνελ:

Το πρώτο, και σε μεγαλύτερο ποσοστό μάζας, υλικό από το οποίο αποτελούνται τα κρυσταλλικά πάνελ είναι το γυαλί (76%) το οποίο βρίσκεται σε όλη την πρόσθια επιφάνεια, ακολουθούν διάφορα πολυμερή σε ποσοστό 10% τα οποία βρίσκονται κυρίως στο πίσω μέρος του αλλά και σε διάφορα σημεία ενσωματωμένο, Αλουμίνιο (Al) σε ποσοστό 8% το οποίο αποτελεί το πλαίσιο κυρίως, 5% Πυρίτιο (Si) το οποίο βρίσκεται στις κυψέλες, 1% Χαλκός (Cu) σε καλώδια και επαφές και 0,1% Αργυρος (Ag) και άλλα μέταλλα. Στόχος μελλοντικά είναι να αυξηθεί το ποσοστό του γυαλιού κατά περίπου 4% μειώνοντας έτσι το ποσοστό του Πυριτίου (Si) κατά 3% και του Αλουμινίου (Al) κατά 1%.

- Πάνελ λεπτού φιλμ:

Σε αντίθεση με όσα ισχύουν για τα κρυσταλλικά, στα πάνελ λεπτού φιλμ υπάρχει η τάση να μειωθεί το ποσοστό του γυαλιού οδηγώντας έτσι στην αύξηση ποσοστού ημιαγωγών και άλλων μετάλλων.

Τα πάνελ CIGS αποτελούνται κυρίως από 89% γυαλί, 7% Αλουμίνιο (Al) και 4% πολυμερή, και ένα πολύ μικρό συνολικά ποσοστό από Χαλκό (Cu), Ινδιο (In), Γάλλιο (Ga) και Σελήνιο (Se).

Τα CdTe πάνελ αποτελούνται αντίστοιχα από 96% Γυαλί και 4% Πολυμερή .

Τα a-Si πάνελ αποτελούνται από 86% Γυαλί , 12% Αλουμίνιο (Al) και 2 % Πολυμερή.

(IRENA,2016)

Στο Σχήμα 2.2 βλέπουμε τον πίνακα με τα ποσοστά των υλικών που περιγράφηκαν παραπάνω σε σχέση με τον τύπο του πάνελ.

ΤΥΠΟΣ/ΥΛΙΚΟ	Γυαλί	Αλουμίνιο	Πυρίτιο	Πολυμερή	Χαλκός κ.α.
Κρυσταλλικά πάνελ	76%	8%	5%	10%	1%
Πάνελ λεπτού φιλμ					
CIGS	89%	7%	-	4%	-
Cd Te	96%	-	-	4%	-
A - Si	86%	12%	-	2%	-

Σχήμα 2.2 Ποσοστά υλικών ανάλογα με την τεχνολογία του φωτοβολταϊκού πάνελ.

- Βάσεις στήριξης φωτοβολταϊκών:

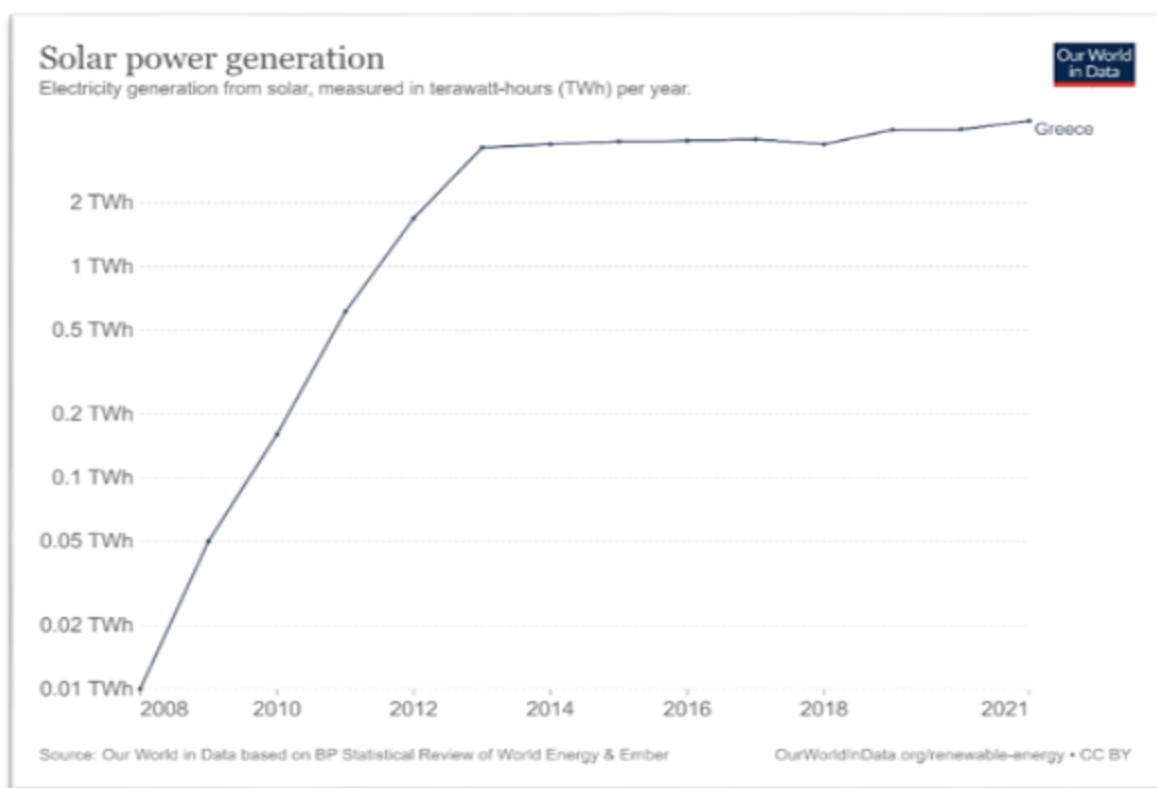
συνήθως κατασκευάζονται από κράμα αλουμινίου ή γαλβανισμένο χάλυβα ή συνδυασμό και των δύο. Στα μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα που συνήθως φτιάχνονται σε οικόπεδα ή αγροτεμάχια είναι πολλές φορές απαραίτητο να κατασκευαστούν και βάσεις από σκυρόδεμα. Μετά το τέλος ζωής των πάνελ, οι βάσεις μπορούν να παραμείνουν ώστε να υποδεχθούν τα νέα πάνελ με κάποιες τροποποιήσεις ή επισκευές.

2.3 Ανάλυση μεγεθών φωτοβολταϊκών πάνελ

Το 2022 ήταν για την αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων μια πολύ καλή χρονιά καθώς εγκαταστάθηκαν συνολικά περίπου 1300 MWp, νούμερο αρκετά μεγάλο αν συγκριθεί και με τις προηγούμενες χρονιές, ειδικά μεταξύ 2014 με 2019 όπου τα MWp που εγκαταστάθηκαν ήταν διψήφια ή οριακά τριψήφια για την κάθε χρονιά.

Σύμφωνα με εκτιμήσεις του συνδέσμου εταιριών φωτοβολταϊκών (HELAPCO) στην Ελλάδα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών ως και το τέλος 2022 είναι περίπου 5500 MWp και η πορεία είναι συνεχώς ανοδική (www.helapco.gr).

Παρατηρώντας το Σχήμα 2.3 διαπιστώνουμε ότι η μεγάλη αύξηση στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα έγινε από το 2009 και μετά, με μια μικρή κάμψη τις χρονιές που αναφέρθηκαν παραπάνω, κυρίως λόγω των πολύ ελκυστικών τιμών στις οποίες μπορούσαν οι παραγωγοί να πωλούν το παραγόμενο από τα ηλιακά πάρκα ρεύμα.



Σχήμα 2.3 Παραγωγή ενέργειας (TWh) από φωτοβολταϊκά ανα έτος στην Ελλάδα

Πηγή: www.ourworldindata.org

Έχοντας ήδη διανύσει την πρώτη δεκαετία με εγκατεστημένη ισχύ άνω των 2000 MWp και λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι ο αποδοτικός χρόνος ζωής ενός φωτοβολταϊκού πάνελ (σύμφωνα και με τις προδιαγραφές των κατασκευαστών πάνελ) είναι περίπου 25 χρόνια, σε λίγα χρόνια θα έχουμε να διαχειριστούμε έναν πολύ μεγάλο όγκο υλικών ο οποίος θα

αυξάνεται συνεχώς. Επίσης πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι κάποιο ποσοστό πάνελ θα πρέπει να αντικατασταθεί νωρίτερα από το τέλος του κύκλου ζωής τους καθώς έχουν παρατηρηθεί αστοχίες οι οποίες έχουν να κάνουν είτε με κακή εγκατάσταση, είτε λόγω της συνεχούς έκθεσης στα καιρικά φαινόμενα, είτε λόγω αστοχίας των υλικών, είτε λόγω διολοφθορών (Αδαλής 2019) .

Η εξειδικευμένη εταιρία ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών PV CYCLE, που εδρεύει στις Βρυξέλες, από το 2010 που άρχισε να δραστηριοποιείται έως και το 2021 έχει ανακυκλώσει 62.217 t φωτοβολταϊκών. Έχει αξία να αναφερθεί ότι το 2020 ανακύκλωσε 7.983 t αποβλήτων από ηλιακά συστήματα ενώ το 2021 17.145 t, ποσό δηλαδή υπερδιπλάσιο. Αξιοσημείωτο είναι ότι το 96% των πάνελ που ανακύκλωσε το 2021 αυτών ήταν πυριτικής βάσης (www.pncycle.org).

Οι εκτιμήσεις με βάση τον λόγο βάρους συστατικού ανά ισχύ στηρίζεται σε κάποιες κοινές παραδοχές. Αυτές είναι ότι για την τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου ο λόγος είναι 0,102 kg/W, για τα πάνελ με τεχνολογία άμορφου πυριτίου 0,29 kg/W, για πάνελ CdTe είναι 0,20 kg/W και τέλος για πάνελ τεχνολογίας CIGS 0,20 kg/W.

Κατόπιν συμφωνίας ομάδας ερευνητών και ειδικών στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών προέκυψε ο συντελεστής ÖkoRI ο οποίος δεν βασίζεται στην στις αναλογίες βάρους - ισχύος που είδαμε παραπάνω αλλά θεσπίζει ένα ενιαίο συντελεστή ο οποίος αναφέρει ότι για κάθε 1 MW φωτοβολταϊκών πλαισίων προκύπτουν 75 t ανακυκλώσιμων υλικών (Bio Intelligence Service, 2011).

Στο Σχήμα 2.4 φαίνονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πάνελ των μεγαλύτερων κατασκευαστών παγκοσμίως.

Εταιρία κατασκευής	Μοντέλο	Ονομαστική ισχύς (W)	Τεχνολογία	Διαστάσεις (mm)	Βάρος (kg)
PANASONIC	EVERVOLT Solar Module PK Black Series	370 / 360	PERC	1755 X 1040 X 30	19
PANASONIC	EVERVOLT Solar Module Series	370 / 380	Monocrystalline	1721 X 1016 X 30	19.5
LG	NeON 2	370 / 365 / 360	Monocrystalline	1700 X 1016 X 40	18
LG	NeON R	380 / 375 / 375 / 365	Monocrystalline	1700 X 1016 X 40	17.5
SUNPOWER	XSERIES X22	370 / 360	Monocrystalline	1558 X 1046 X 30	19.5

Σχήμα 2.4 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πάνελ

Πηγές : na.panasonic.com, us.sunpower.com, www.lg.com

Θα μπορούσαμε με βάση τον παραπάνω πίνακα να κάνουμε μια εκτίμηση ότι ένα πάνελ των 360 W, έχει βάρος περίπου 18 kg και επιφάνεια 1,6 m². Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι εφόσον έχουμε εγκατεστημένα 5500 MWp, αν κάναμε μια παραδοχή ότι είναι όλα πάνελ των 360 W, έχουμε εγκατεστημένα περίπου 15.230.000 πάνελ, δηλαδή 274.000 t.

Πιο συγκεκριμένα και σύμφωνα με τα στοιχεία που είδαμε παραπάνω για τα κρυσταλλικά πάνελ, από μια απλή ανάλυση προκύπτει ότι από τους 274.000 t πάνελ θα προκύψουν περίπου 208.000 t γυαλιού, 27.400 t πολυμερή, 22.000 t αλουμίνιο, 13.700 t πυρίτιο και 2.700 t χαλκός και άλλα μέταλλα, και όλα αυτά μόνο για την Ελλάδα.

Αντίστοιχα αν κάναμε μια εκτίμηση με το συντελεστή ÖkoRII θα προέκυπτε ποσοστό πολλαπλάσιο δηλαδή 5500 MW εγκατεστημένων πάνελ X 75 t σημαίνει 412.500 t υλικών προς ανακύκλωση.

Φυσικά τα παραπάνω νούμερα αποτελούν μια χονδροειδή εκτίμηση, καθώς δεν λαμβάνεται υπόψη ακριβώς ούτε ο τύπος των πάνελ, ούτε η απόδοση, ούτε από ποιές εταιρίες είναι τα πάνελ που έχουν εγκαταστήσει οι παραγωγοί. Παρόλα αυτά όμως αποτελεί μια ένδειξη του τεράστιου όγκου υλικών που θα έχουμε να διαχειριστούμε μελλοντικά, όταν τα πάνελ θα φτάνουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Ακόμη θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι εφόσον η εγκατεστημένη ισχύς συνεχώς αυξάνεται θα αυξάνεται και ο όγκος αυτός.

Εύκολα μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι πέρα από το περιβαλλοντικό όφελος το οποίο προκύπτει από την ανακύκλωση υπάρχει και οικονομικό όφελος καθώς τα ανακυκλωμένα υλικά έχουν συνήθως μικρότερο κόστος από τα αντίστοιχα πρωτογενή.

Πάλι στο πλαίσιο μιας χονδροειδούς εκτίμησης, και κάνοντας μια απλή αναζήτηση στο διαδίκτυο για τις τιμές ανακυκλωμένου γυαλιού και του scrap των μετάλλων, θα δούμε ότι το κόστος για 1 t γυαλιού είναι περίπου 80 €, για 1 t αλουμίνιο 1000 € και για 1 t χαλκό 6000 €. Κάνοντας τον πολλαπλασιασμό θα δούμε ότι μόνο για τα τρία υλικά που αναφέρθηκαν παραπάνω ο τζίρος της ανακύκλωσης θα έφτανε περίπου τα 55.000.000 €, νούμερο κάθε άλλο παρά ασήμαντο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° : ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ & ΤΩΝ

ΥΛΙΚΩΝ ΤΟΥΣ

Η ορθολογική διαχείριση των πάνελ, μετά το τέλος του κύκλου ζωής κρίνεται απαραίτητη , λαμβάνοντας υπόψη τον τεράστιο όγκο αποβλήτων που θα προκύψουν. Οι μέχρι πρόσφατα πρακτικές απόρριψης των ΦΒ πάνελ σε ΧΥΤΑ ίσως ήταν πιο οικονομική σε σχέση με την ανακύκλωση, σίγουρα όμως δεν αποτελεί την ιδανική λύση αφού τα τοξικά στοιχεία που περιέχονται στα πάνελ έχουν πολλές πιθανότητες να συσσωρευτούν στα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα θέτοντας έτσι σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία (Τοκατλίδης 2019).

Η νομοθεσία σχετικά με την συλλογή, επεξεργασία και ανακύκλωση των φθαρμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων, τόσο κατά τη φάση μεταφοράς και εγκατάστασης όσο και κατά τη φάση παραγωγικής λειτουργίας άλλαξε τα τελευταία χρόνια στη χώρα μας, αφού έως πρόσφατα δεν προβλεπόταν. Κατά την ενσωμάτωση όμως στο εθνικό μας δίκαιο των ειδικών διατάξεων της οδηγίας 2012/19/ΕΚ του ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και του συμβουλίου της 4ης Ιουλίου 2012, αλλά και με την υπουργική απόφαση 23615/651/Ε.103 (ΦΕΚ Β' 1184/9-5-2014) θεσπίστηκαν πλέον στη χώρα μας κανόνες, μέτρα και διαδικασίες για την οργάνωση της εναλλακτικής διαχείρισης των αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Με σκοπό την πρόληψη παραγωγής αποβλήτων ηλεκτρονικού και ηλεκτρικού εξοπλισμού, η ελληνική νομοθεσία συμμορφώνεται με την ευρωπαϊκή. Με το βλέμμα στην αειφόρο παραγωγή και κατανάλωση, γίνεται επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση, μειώνεται η ποσότητα των αποβλήτων προς διάθεση και ενισχύεται η αποδοτική χρήση των πόρων και η ανάκτηση πολύτιμων δευτερογενών πρώτων υλών, ενώ όσον αφορά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις , επιδιώκεται η μείωση σε όλους τους φορείς οι οποίοι λαμβάνουν μέρος στον κύκλο ζωής ηλεκτρονικού και ηλεκτρικού εξοπλισμού, ενώ προκειμένου να επιτευχθεί με αποδοτικότερο τρόπο η προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας εφαρμόζεται και η αρχή της διευρυμένης ευθύνης του εκάστοτε παραγωγού. Ο Ελληνικός Οργανισμός Ανακύκλωσης (ΕΟΑΝ), ο οποίος υπάγεται στην εποπτεία και στον έλεγχο του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, είναι η αρμόδια

αρχή για την εφαρμογή της ανωτέρω αναφερόμενης υπουργικής απόφασης αλλά και γενικότερα για την έγκριση εθνικών συστημάτων εναλλακτικής διαχείρισης ανά προϊόν.

Επιπρόσθετα, από πλευράς λογιστικής, είναι σημαντικό να λάβουμε υπόψη ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λογίζονται ως ενσώματα πάγια περιουσιακά στοιχεία και ως εκ τούτου με το τέλος του κύκλου ζωής τους θα πρέπει να διαγράφονται από το μητρώο παγίων της επιχείρησης. Συνεπώς η ανακύκλωση κρίνεται επιβεβλημένη, ώστε οι εταιρείες με δραστηριότητα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών πλαισίων, να έχουν ορθή και πλήρη αποτύπωση των παγίων στοιχείων στον ισολογισμό τους (renewables.messaritis.gr).

Όπως προκύπτει τελικά, και λόγω της μεγάλης αξίας αλλά και λόγω της ιδιαίτερα αυξημένης ζήτησης των πλακιδίων πυριτίου, σε όλους τους τομείς πλέον, είναι πιο αποδοτική οικονομικά η ανακύκλωση, ανάκτηση και επαναχρησιμοποίησή τους.

Οι βασικές διεργασίες με τις οποίες πραγματοποιείται η ανακύκλωση των πάνελ που έχουν συμπληρώσει τον κύκλο ζωής τους είναι με χρονική σειρά η αποκόλληση, ο διαχωρισμός και η εξαγωγή / διύλιση.

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω έχουν προκύψει διάφορες τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούνται είτε ανεξάρτητα είτε συνδυαστικά ώστε να πετύχουμε το σκοπό μας.

Επιγραμματικά οι διεργασίες αυτές είναι οι εξής:

- **Θερμική:** κύρια μέθοδος αυτής της διεργασίας είναι η πυρόλυση και πολλές φορές εφαρμόζεται σαν προεργασία για το διαχωρισμό των υλικών.
- **Μηχανική:** εφαρμόζεται με ειδικά μηχανήματα (συνήθως σπαστήρες) για τη θραύση και τη μείωση του μεγέθους των υλικών αλλά και στη διαλογή σε αυτοματοποιημένες διαδικασίες ανακύκλωσης.
- **Χημική:** είναι διεργασία με συνήθως υψηλό κόστος, πολλές φορές όμως αποτελεί μονόδρομο στο διαχωρισμό των υλικών.

Αναλόγως με το είδος τους τα πάνελ ανακυκλώνονται και με διαφορετικό τρόπο.

3.1 Ανακύκλωση κρυσταλλικών πάνελ

Τα κρυσταλλικά πάνελ, αφού ολοκληρωθεί ο κύκλος ζωής τους, αποσυναρμολογούνται από τις βάσεις και φορτώνονται με προσοχή ώστε να μεταφερθούν στο εργοστάσιο ανακύκλωσης. Εκεί η πρώτη φάση περιλαμβάνει την αφαίρεση του αλουμινένιου πλαισίου και του γυαλιού τα οποία μπορούν με μεταφερθούν όπως είναι στις αντίστοιχες εγκαταστάσεις για την ανακύκλωση τους, η οποία αναλύεται παρακάτω.

Από την παραπάνω διαδικασία συλλέγουμε τις ηλιακές κυψέλες και τις μεταφέρουμε σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης θερμοκρασίας 450 - 500°C , όπου μέσω της πυρόλυσης διαχωρίζονται από τα υπόλοιπα στοιχεία. Ο αντιδραστήρας περιέχει πολύ λεπτή άμμο με μικρή κοκκομετρική διαβάθμιση, η οποία βρίσκεται σε κατάσταση βρασμού, και λόγω αυτού παίρνει τις φυσικές ιδιότητες του υγρού. Μέσα σε αυτή την ρευστοποιημένη άμμο βυθίζουμε τα ειδικά καλάθια στα οποία έχουμε τοποθετήσει τις κυψέλες. Σκοπός αυτής της φάσης είναι η αεριοποίηση της μεμβράνης EVA (αιθυλ-οξικού-βινυλίου) και της ρητίνης τα οποία περικλείουν τις κυψέλες. Τα αέρια που εκλύονται περνούν από μια “ασπίδα” φλόγας η οποία λειτουργεί ως πηγή θερμότητας για τον αντιδραστήρα αλλά και ως μετάκαυση. Περίπου το 80% των κυψελών που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία είναι μηχανικά αkéραια και συνεπώς διαθέσιμα για περαιτέρω επεξεργασία.

Στο επόμενο στάδιο, οι κυψέλες που έχουν ανακτηθεί, περνούν από μηχανική επεξεργασία, που στόχο έχει το διαχωρισμό των κυψελών από τα λεπτά κομμάτια ημιαγωγών, τα οποία έπειτα από αυτό το στάδιο είναι έτοιμα για κρυσταλλοποίηση.

Από την άλλη οι κυψέλες θα πρέπει να περάσουν μια ακόμα διεργασία, αυτή τη φορά χημική ώστε να αφαιρεθεί το περιτύλιγμα τους. Αυτή η διεργασία, γνωστή και ως etching, επαναλαμβάνεται τόσες φορές, όσες απαιτείται για την πλήρη απομάκρυνση των περιτυλιγμάτων. Το τελικό προϊόν που προκύπτει είναι καθαρό πυρίτιο έτοιμο και αυτό για κρυσταλλοποίηση.

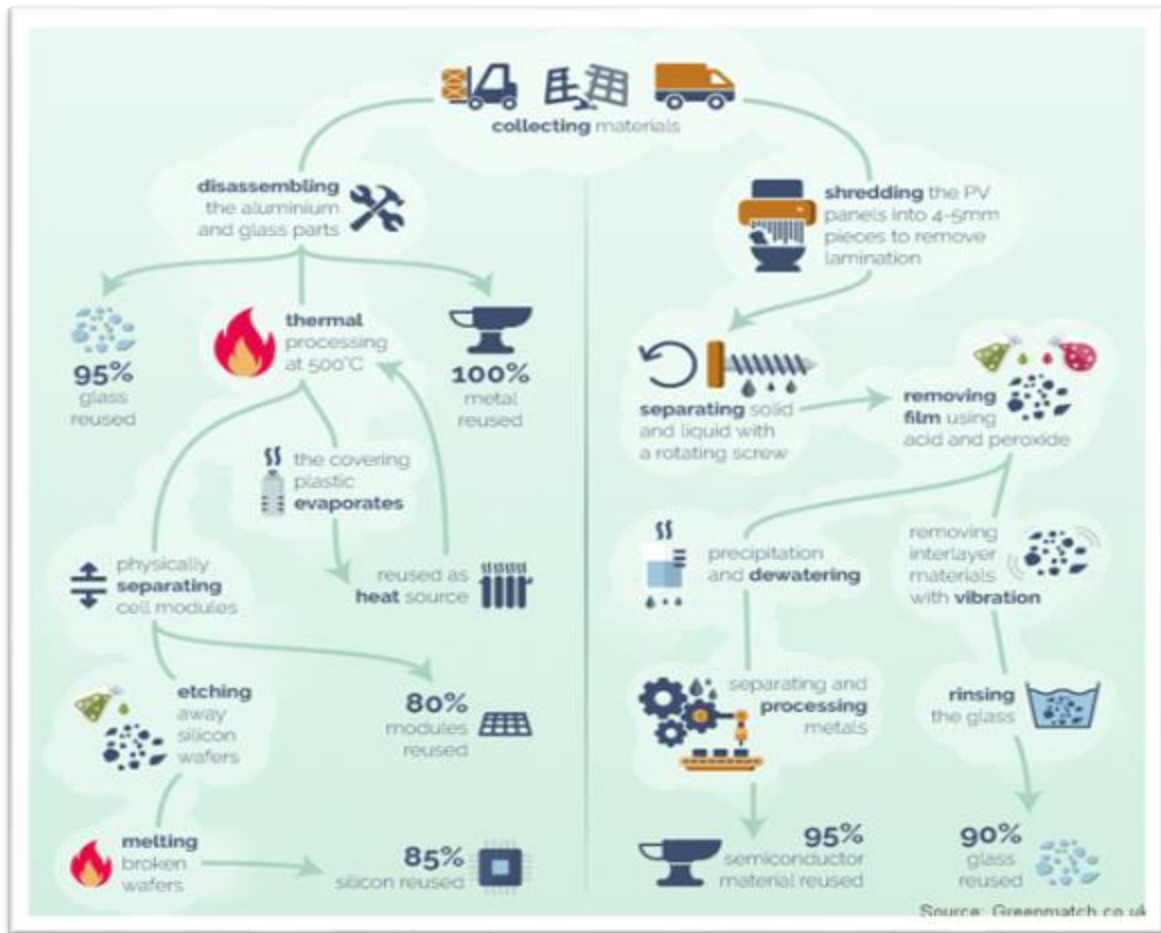
Για την κρυσταλλοποίηση, τοποθετούνται τα παραπάνω παράγωγα (κομμάτια ημιαγωγών και καθαρό πυρίτιο) σε ειδικό δοχείο υψηλών θερμοκρασιών και τα εκθέτουμε σε πολύ

υψηλή θερμοκρασία έως ότου επιτευχθεί η τήξη τους. Αφού έχουν ρευστοποιηθεί τοποθετείται στο κέντρο της επιφάνειας ένας κρύσταλλος πυριτίου πάνω στη δομή του οποίου κολλάει το λιωμένο πυρίτιο δημιουργώντας έτσι ουσιαστικά μια ράβδο καθαρού πυριτίου. Το ποσοστό ανάκτησης αυτής της μεθόδου φτάνει μέχρι και το 85% (Τοκατλίδης, 2019).

3.2 Ανακύκλωση πάνελ λεπτού φιλμ

Τα πάνελ λεπτού φιλμ, παρόλο που αποτελούνται από διάφορες κατηγορίες, όπως είδαμε και παραπάνω, λόγω της παρόμοιας δομής που έχουν, μοιράζονται και τον ίδιο τρόπο ανακύκλωσης. Παρακάτω αναλύεται ο τρόπος ανακύκλωσης πάνελ CdTe (Τελουριούχου Καδμίου). Όπως και στα κρυσταλλικά πάνελ, με το τέλος του κύκλου ζωής τους, αποσυναρμολογούνται από τις βάσεις και φορτώνονται με προσοχή ώστε να μεταφερθούν στο εργοστάσιο ανακύκλωσης. Εκεί τα πάνελ τοποθετούνται σε έναν καταστροφέα (shredder) ο οποίος τα τεμαχίζει σε μικρότερα κομμάτια, τα οποία με τη σειρά τους τοποθετούνται σε έναν σφυρόμυλο ο οποίος τα συνθλίβει σε μικρά κομμάτια διαμέτρου 4-5 mm. Μετά από αυτή τη διεργασία τα μικρά κομμάτια που έχουν προκύψει τοποθετούνται σε ένα περιστρεφόμενο ανοξειδωτο τύμπανο όπου με τη χημική επίδραση οξέων και υπεροξειδίων ρευστοποιείται το Τελουριούχο Κάδμιο. Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει το διαχωρισμό των περιεχομένων του τυμπάνου σε ειδικό διαχωριστή, όπου χωρίζονται τα στερεά που δεν ρευστοποιήθηκαν (γυαλί και πλαστικό) από τα υγρά. Τα υγρά, περνούν από μια μονάδα καθίζησης τριών σταδίων, με αύξηση του PH και συγκεντρώνονται σε δεξαμενή. Τα στερεά υλικά μπαίνουν σε άλλον διαχωριστή με δονητικό κόσκινο όπου χωρίζεται το γυαλί από το πλαστικό, το γυαλί πλένεται για την απομάκρυνση τυχόν υπολειμμάτων και είναι προϊόν έτοιμο προς ανακύκλωση. Η παραπάνω διαδικασία έχει πολύ υψηλό ποσοστό ανάκτησης των ημιαγωγών (95%) αλλά και του γυαλιού (90%) (Τοκατλίδης, 2019).

Στην Εικόνα 3.1 βλέπουμε τις παραπάνω περιγραφόμενες διαδικασίες.



Εικόνα 3.1. Ανακύκλωση ΦΒ πάνελ κρυσταλλικής βάσης & λεπτού φιλμ

Πηγή: www.solwave-pv.com

3.3 Επαναχρησιμοποίηση φωτοβολταϊκών πάνελ

Ένας άλλος εναλλακτικός τρόπος ανακύκλωσης, με την ευρύτερη έννοια της λέξης, των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι η επαναχρησιμοποίηση. Βέβαια αποτελεί μία προσωρινή λύση δίνοντας απλά μια παράταση στο χρόνο ζωής τους. Συνήθως αυτό που γίνεται είναι επισκευή των πάνελ, το οποίο μπορεί να έχει εφαρμογή μόνο σε πάνελ που βρίσκονται σε καλή κατάσταση. Η διαδικασία της επισκευής περιλαμβάνει την κατασκευή νέου πλαισίου από αλουμίνιο και την αντικατάσταση του κουτιού σύνδεσης. Με τον τρόπο αυτό παρατείνεται η διάρκεια ζωής του πάνελ για περίπου δεκαπέντε επιπλέον χρόνια. Αυτό που πρέπει να λάβουμε όμως υπόψη, είναι ότι τα επισκευασμένα πάνελ λειτουργούν με χαμηλότερη απόδοση 1 - 2% από ότι τα καινούρια (Lunardi, 2016).

3.4 Ανακύκλωση αλουμίνιου

Το αλουμίνιο θεωρείται ως ένα από τα πιο ανακυκλώσιμα υλικά παγκοσμίως. Οι σημαντικές ιδιότητες του αλουμινίου σε συνδυασμό με τις εφαρμογές του στη σύγχρονη κοινωνία το έχουν αναδείξει σε «πράσινο» μέταλλο. Η ανακύκλωση του αλουμινίου, είναι μια πρακτική ιδιαίτερα σημαντική και απαραίτητη για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη, καθώς συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων και ενέργειας. (www.elval.com)

Για την ανακύκλωση του αλουμινίου και των προϊόντων του, ακολουθείται η διαδικασία περισυλλογής, το λεγόμενο scrap. Όλα τα προϊόντα του αλουμινίου μετά το τέλος της χρήσης τους θεωρούνται scrap. Εκτός από την ιδιαίτερα μεγάλη διάρκεια ζωής που έχουν τα προϊόντα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές, μετά το τέλος της ζωής τους μπορούν είτε να επαναχρησιμοποιηθούν είτε να ανακυκλωθούν, χωρίς να χάσουν κανένα από τα ιδιαίτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους. Η χρήση ανακυκλωμένου αλουμινίου, προσφέρει επίσης σημαντικά ενεργειακά οφέλη.

Η παραγωγή αλουμινίου από ανακύκλωση απαιτεί 5% μόνο της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή του πρωτογενούς μετάλλου. Έτσι, το αλουμίνιο, αντί να συμβάλλει στην δημιουργία απορριμμάτων, μπορεί να επαναχυτευθεί και να παραχθούν και πάλι νέα προϊόντα για τις κατασκευές. (www.atem-oe.gr)

Η ανακύκλωση του αλουμινίου αποτελεί μια σχετικά απλή διαδικασία. Αρχικά γίνεται διαχωρισμός από ξένα σώματα και καθαρισμός χειροκίνητα, με τη χρήση μαγνητών με τη χρήση αέρα ή και με χημικά μέσα.

Έπειτα το scrap αλουμινίου τροφοδοτείται σε κλιβάνους θερμοκρασίας $750^{\circ}\text{C} \pm 100^{\circ}\text{C}$, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και της πολύ χαμηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο, οι οργανικές επιστρώσεις πυρολύονται και οδηγούνται με ανεμιστήρες ανακυκλοφορίας στον θάλαμο τήξης. Το αλουμίνιο, απαλλαγμένο πλέον από οργανικές ενώσεις, ωθείται στο ρευστό μπάνιο αλουμινίου προς τήξη. Τα πυρολυμένα αέρια οδηγούνται στον κύριο θάλαμο τήξης και μέσω καυστήρων γίνεται μεταφορά θερμότητας προς το αλουμίνιο έτσι ώστε αυτό να παραμένει στη ρευστή μορφή. Με τον τρόπο αυτό αξιοποιείται η θερμογόνος ικανότητα των πυρολυμένων ενώσεων για τη μεταφορά θερμότητας στο αλουμίνιο με αντίστοιχη εξοικονόμηση ενέργειας. Μετά την ομογενοποίηση του αλουμινίου λαμβάνει χώρα μηχανικός καθαρισμός του τήγματος από τα ξαφρίσματα αλουμινίου, πριν το ρευστό αλουμίνιο οδηγηθεί στον φούρνο αναμονής. Το υγρό αλουμίνιο θα μεταφέρεται με λούκια από τους φούρνους τήξης στον φούρνο αναμονής όπου γίνεται η τελική κραματοποίηση του τήγματος. Στο φούρνο αναμονής γίνεται έγχυση συλλιπάσματος ή αερίου μείγματος αζώτου/χλωρίου (N_2 & Cl_2) μέσω συστήματος περιστροφικής έγχυσης αερίου/συλλιπάσματος. Σημειώνεται ότι σε ορισμένες περιπτώσεις, όταν η περιεκτικότητα αλκαλίων στο τηγμένο αλουμίνιο είναι πάνω από τα επιτρεπτά όρια συγκέντρωσης, ενδέχεται να απαιτηθεί η χρήση σωλήνων για έγχυση του μείγματος αερίων αζώτου/χλωρίου. Στη συνέχεια και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας χύτευσης, το υγρό αλουμίνιο οδηγείται σε θερμαινόμενη μονάδα απαέρωσης (Degassing) με σκοπό την περαιτέρω αφυδρογόνωση του μετάλλου με έγχυση αερίου αργού. Στη συνέχεια το υγρό μέταλλο διέρχεται από φίλτρα (συνήθως κεραμικά) για την ολική κατακράτηση των ανεπιθύμητων οξειδίων και οδηγείται στη μηχανή χύτευσης. Η στερεοποίηση του αλουμινίου επιτυγχάνεται με ψύξη, συνήθως μέσα κάποιο ψυχόμενο καλούπι και στη

συνέχεια με άμεση ψύξη στρώματος νερού στις σχηματισθείσες στερεές επιφάνειες. Ο αυτοματισμός συνήθως αφορά στην εκτέλεση μιας «συνταγής» χύτευσης, η οποία είναι προκαθορισμένη και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το κράμα, τις διαστάσεις πλακών, κ.α. (Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων ΕΛΒΑΛ Α.Ε,2017).

3.5 Ανακύκλωση γυαλιού

Το γυαλί είναι ένα πλήρως ανακυκλώσιμο υλικό, το οποίο είναι κατασκευασμένο από άφθονη φυσική πρώτη ύλη, όπως άμμο και απορρίμματα γυαλιού, και μπορεί να ανακυκλωθεί ξανά και ξανά χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα του. Χάρη στην ανακύκλωση γυαλιού, εξοικονομούνται σημαντικές ποσότητες πρώτων υλών και διατηρούνται οι φυσικοί πόροι. Η ανακύκλωση γυαλιού βοηθά επίσης στην εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς τα θρύμματα γυαλιού λιώνουν σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τις πρώτες ύλες. Κατά συνέπεια, απαιτείται λιγότερη ενέργεια για τη διαδικασία τήξης. Σήμερα καταβάλλονται σημαντικές προσπάθειες για την ανακύκλωση γυαλιού μετά τη χρήση, παρόλο που κάθε τομέας έχει τις δικές του ιδιαιτερότητες και απαιτήσεις ποιότητας. Η ποσότητα των στερεών αποβλήτων που παράγονται από τις βιομηχανίες γυαλιού κατά τη διάρκεια της κατασκευής είναι εξαιρετικά χαμηλή, καθώς σχεδόν όλα τα κατάλοιπα γυαλιού ανακυκλώνονται αμέσως και επανατοποθετούνται σε φούρνους για να χρησιμεύσουν ως πρώτη ύλη.

Η διαδικασία ανακύκλωσης του γυαλιού είναι παρόμοια με τη διαδικασία ανακύκλωσης του αλουμινίου. Η πρώτη φάση επεξεργασίας κατά την άφιξη των γυαλιού στη μονάδα ανακύκλωσης είναι ο οπτική έλεγχος. Αυτός γίνεται από έμπειρο προσωπικό με τεχνογνωσία καθώς ορισμένες φορές το προς ανακύκλωση φορτίο μπορεί να είναι αρκετά επιμολυσμένο με ξένα σώματα ή άλλους παράγοντες και να κριθεί ασύμφορο για ανακύκλωση, οπότε και απορρίπτεται χωρίς επεξεργασία. Εάν ο οπτικός έλεγχος καταλήξει σε αποδοχή, το υλικό συνθλίβεται, μειώνοντας το μέγεθος σε κατάλληλα τεμάχια για περαιτέρω ταξινόμηση και καθαρισμό.

Στη συνέχεια τα ξένα σώματα αφαιρούνται με μαγνητικούς διαχωριστές για την απομάκρυνση των διαφόρων μετάλλων, αλλά και με τη χρήση αέρα για απομάκρυνση χαρτιών και πλαστικών, ενώ όποιες οργανικές ενώσεις αφαιρούνται με πλύσιμο και το υλικό οδηγείται στα κόσκινα για θραύση σε μικρότερα κομμάτια. Τα υλικά μπορεί να περάσουν πολλές φορές από τα κόσκινα αλλά και τους διαχωριστές μέχρι να γίνουν αρκετά καθαρό για να περάσουν μια οπτική ταξινόμηση. Ο χειροκίνητος καθαρισμός μπορεί επίσης να είναι μέρος των βημάτων ταξινόμησης, αφαιρώντας με το χέρι, μεγάλα κομμάτια ξένων υλικών όπως πλαστικά, χαρτί, υφάσματα ή κεραμικά, πέτρες κλπ. Τα μικρά κομμάτια γυαλιού (cullet) έπειτα αναμειγνύονται με άλλες πρώτες ύλες αναλόγως με τη δομή και την ποιότητα του γυαλιού που θέλουμε να παραχθεί και στη συνέχεια το μείγμα λιώνει σε κλιβάνους με θερμοκρασίες μεταξύ 1.400- 1.600°C

Η ανάμειξη των θρυμμάτων γυαλιού (cullet) με άλλα υλικά μειώνει την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την κατασκευή του γυαλιού λόγω του ότι λιώνει σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τα άλλα πρωτογενή συστατικά του (Rodriguez,2011).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Η ανεμογεννήτρια είναι μια “αιολική μηχανή”, ένα σύστημα δηλαδή που εκμεταλλεύεται την αιολική ενέργεια για να παράγει έργο. Ιστορικά η πρώτη χρήση αιολικής ενέργειας έγινε στη ναυσιπλοΐα, ενώ οι πρώτοι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για άλεσμα δημητριακών και άντληση νερού. Στην Ελλάδα (ειδικότερα στο Αιγαίο) η χρήση ανεμόμυλων χρονολογείται από τον 13ο αιώνα. Το 1960 υπήρχαν περίπου 13.000 ανεμόμυλοι στο Οροπέδιο Λασιθίου, 2.500 στην υπόλοιπη Κρήτη, και 600 στη Ρόδο.

Ο πρώτος «ανεμόμυλος» για παραγωγή ηλεκτρισμού κατασκευάστηκε το 1888 στο Cleveland του Ohio, από τον Charles Brush, είχε διάμετρο πτερωτής 17 m και ισχύ 12 kW. Πριν 30 χρόνια, μια τυπική ανεμογεννήτρια είχε ισχύ της τάξης των 25 kW. Σήμερα, κατασκευάζονται ανεμογεννήτριες τάξεις μεγέθους μεγαλύτερης ισχύος.

Το ρεκόρ της μεγαλύτερης ανεμογεννήτριας έως σήμερα κατείχε σύμφωνα με την Vestas, το πρωτότυπο της υπεράκτιας V236-15 MW με ύψος 280 μέτρα και παραγωγή 80 GWh ετησίως, αρκετά για να τροφοδοτήσει περίπου 20.000 νοικοκυριά, ενώ η Κίνα πρόσφατα παρουσίασε μια ακόμη μεγαλύτερη σπάζοντας αυτό το ρεκόρ με ισχύ 13,6 MW και διάμετρο ρότορα 252 m.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη από τα οποία αποτελείται μια ανεμογεννήτρια, (Μαμάσης 2020) είναι:

- Η ονομαστική ισχύς της, η μέγιστη δηλαδή ισχύς που μπορεί να παράξει η ανεμογεννήτρια.
- Η διάμετρος της πτερωτής, η οποία εΐθισται να αναφέρεται στην εμπορική ονομασία της ανεμογεννήτριας. Μια τυπική ανεμογεννήτρια ισχύος 1 MW έχει διάμετρο πτερωτής 55 m, γενικά όμως τείνουμε στην αύξηση των διαμέτρων, συνεπώς και της ισχύος.
- Το ύψος του πυλώνα. Υπάρχει ένας γενικός κανόνας ο οποίος βασίζεται στο λόγο $1 < H/D < 2$.
- Το πλήθος των πτερυγίων. Ως επι το πλείστο έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες με τρία πτερύγια, καθώς με λιγότερα πτερύγια απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα

περιστροφής για να παραχθεί το ίδιο ενεργειακό αποτέλεσμα, το οποίο σημαίνει περισσότερο θόρυβο και μεγαλύτερες φθορές, με μοναδικό πλεονέκτημα το μικρότερο κόστος. Από την άλλη πλευρά, περισσότερα από τρία πτερύγια σε μια ανεμογεννήτρια δίνουν λίγο μεγαλύτερη απόδοση, δυσανάλογη όμως με το αυξημένο κόστος κατασκευής

- Το είδος των πτερυγίων: Οι πολύ συμπαγείς πτερωτές έχουν το πλεονέκτημα ότι ξεκινούν να λειτουργούν από μικρές ταχύτητες ανέμου, ωστόσο όμως το μειονέκτημα τους είναι ότι θα πρέπει να τίθενται εκτός λειτουργίας όταν φτάσουν σε υψηλές ταχύτητες.
- Η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής, η οποία συνδέεται με παράγοντες όπως η συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου αλλά και η αντοχή των πτερυγίων σε φυγόκεντρες τάσεις.
- Η καμπύλη ισχύος, η οποία δεν είναι άλλο από τη γραφική απεικόνιση της σχέσης της ταχύτητας του ανέμου σε συνάρτηση με την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ.
- Ο συντελεστής ισχύος, ο οποίος υπολογίζεται ως το πηλίκο της μέσης ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την μέση ετήσια εισερχόμενη αιολική ενέργεια. (Μαμάσης, 2020).

Συνήθως οι ανεμογεννήτριες δεν εγκαθίστανται μεμονωμένα αλλά πολλές μαζί σε ανεμώδη σημεία δημιουργώντας έτσι τα λεγόμενα αιολικά πάρκα. Για την επιλογή της θέσης των αιολικών πάρκων λαμβάνονται υπόψη κάποια βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Αυτά είναι κατασκευαστικά κριτήρια όπως οι συνθήκες θεμελίωσης, η σεισμικότητα της περιοχής, η απόσταση από διάφορα φυσικά εμπόδια, η απόσταση από υποδομές όπως το οδικό και ηλεκτρικό δίκτυο, η προσβασιμότητα στο σημείο και τέλος και σημαντικότερο ίσως όλων το αιολικό δυναμικό, η στατιστική δηλαδή ανάλυση ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου για το εξεταζόμενο σημείο.

Επιπλέον με βάση την ελληνική νομοθεσία υπάρχουν κάποιες περιοχές αποκλεισμού. (Μαμάσης, 2020). Αυτές είναι οι εξής:

- *Περιοχές διατηρητέων μνημείων, αρχαιολογικών ζωνών προστασίας Α*
- *Περιοχές απολύτου προστασίας της φύσης και προστασίας της φύσης, πυρήνες εθνικών δρυμών, κηρυγμένα μνημεία της φύσης, αισθητικά δάση, περιοχές Ραμσάρ*
- *Μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις και μόνιμες καλλιέργειες*
- *Υγρότοποι, ποταμοί, λίμνες*
- *Ακτές κολύμβησης*
- *Οικιστικές περιοχές & παραδοσιακοί οικισμοί, τουριστικές και οικιστικές περιοχές εκτός σχεδίου, περιοχές οργανωμένης ανάπτυξης παραγωγικών δραστηριοτήτων*
- *Εγκαταστάσεις αεροπλοΐας*
- *Τμήματα λατομικών περιοχών και μεταλλευτικών και εξορυκτικών ζωνών που λειτουργούν επιφανειακά.*

4.1 Είδη Ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες αναλόγως ως προς τι τις εξετάζουμε. Για παράδειγμα υπάρχουν δύο βασικά είδη ανεμογεννητριών σύμφωνα με τον άξονα περιστροφής τους ως προς το επίπεδο του εδάφους και ως προς τη ροή του ανέμου:

- Οι καθέτου άξονα:

έχουν τοποθετημένο το ρότορα κάθετα στο έδαφος. Είναι αυτές που συναντάμε σπανιότερα λόγω και της μειωμένης απόδοσης τους συγκριτικά με τις οριζοντίου άξονα. Παρόλα αυτά έχουν κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα το μειωμένο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης καθώς το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια βρίσκονται τοποθετημένα κοντά στο έδαφος, κάνοντάς τα πιο εύκολα προσβάσιμα. Επιπλέον εκμεταλλεύονται τον άνεμο ασχέτως με τη διεύθυνση και έχουν. Αυτό έχει μεγάλη

χρησιμότητα σε μέρη που η διεύθυνση του ανέμου είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη. Οι ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα έχουν δυο δημοφιλείς τύπους που έλκουν το όνομα τους από τους μηχανικούς που τις εφηύραν. Οι τύπου Darrieus και οι τύπου Savonius.

Οι πρώτες διαθέτουν κάθετα προσανατολισμένες λεπίδες και συνδυάζουν υψηλή ταχύτητα με χαμηλή μηχανική ροπή. Οι δεύτερες έχουν πολλαπλά πτερύγια με κοίλες επιφάνειες και κύριο χαρακτηριστικό τους σε αντίθεση με τις άλλες ανεμογεννήτριες είναι ότι χρησιμοποιούν τη δύναμη της αντίστασης και όχι τη δύναμη της άνωσης, με αποτέλεσμα να μην μπορεί η ταχύτητα περιστροφής να ξεπεράσει την ταχύτητα του ανέμου (Μπίρδας 2012).

- Οι οριζοντίου άξονα:

οι οποίες αποτελούν και το μεγαλύτερο ποσοστό εγκατεστημένης ισχύος παγκοσμίως, έχουν τοποθετημένους το ρότορα του άξονα και την ηλεκτρική γεννήτρια στην κορυφή ενός πύργου, στραμμένους προς την κατεύθυνση του ανέμου, ενώ οι μεγάλες ανεμογεννήτριες διαθέτουν και έναν σερβοκινητήρα για να στρέφονται προς την κατεύθυνση του ανέμου. Επιπλέον για να υπάρχει ικανή ταχύτητα περιστροφής για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος συνήθως χρησιμοποιούν και ένα κιβώτιο ταχυτήτων. Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται συνήθως στα αιολικά πάρκα είναι τριών πτερυγίων τα οποία είναι λευκό χρώμα για να είναι ορατά από τα αεροπλάνα και το μήκος τους κυμαίνεται από 20 m έως 80 m. Γενικά υπάρχει η τάση με το πέρασμα το χρόνου το μέγεθος των ανεμογεννητριών να αυξάνεται.

Εάν τις εξετάζαμε ως προς το μέγεθος μπορούσαν να χωριστούν σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες, ως προς τα πτερύγια σε μονοπτέρυγες ή πολυπτέρυγες και ως προς την ταχύτητα περιστροφής, αργόστροφες και πολύστροφες (Μπίρδας 2012).

Επιπλέον τα αιολικά πάρκα χωρίζονται σε 2 βασικές κατηγορίες ως προς την τοποθεσία εγκατάστασης τους:

- Τα χερσαία αιολικά πάρκα:

κατασκευάζονται ως επί το πλείστο σε κορυφογραμμές μεγάλου υψομέτρου ώστε να υπάρχει πλήρης εκμετάλλευση της ταχύτητας του ανέμου, και συνήθως απέχουν τουλάχιστον τρία χιλιόμετρα από την πλησιέστερη ακτογραμμή. Το κύριο πρόβλημα στην κατασκευή των χερσαίων αιολικών πάρκων είναι η μεταφορά του εξοπλισμού και των μηχανημάτων στα σημεία αυτά, λόγω του μεγάλου όγκου αλλά και της δυσκολίας να φτάσουμε στις δύσβατες αυτές περιοχές. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι μπορεί να απαιτηθεί να κατασκευαστούν επιπλέον υποδομές, όπως για παράδειγμα η διάνοιξη δρόμων για τη διέλευση των μηχανημάτων, αυξάνοντας έτσι το κόστος κατασκευής σημαντικά. Επιπλέον πολλές φορές υπάρχουν έντονες αντιδράσεις από οικολογικές οργανώσεις και ντόπιους ως προς τη θέση κατασκευής των χερσαίων αιολικών πάρκων και κατά πόσον αυτά επηρεάζουν τη χλωρίδα και πανίδα της περιοχής.

Στην Εικόνα 4.1 βλέπουμε ένα χερσαίο Αιολικό πάρκο ισχύος 6,8 MW στον Αγ. Αθανάσιο, Πύλου Μεσσηνίας, αποτελούμενο από 8 ανεμογεννήτριες τύπου G52-850 της εταιρείας GAMESA ισχύος 850 kW η καθεμία.



Εικόνα 4.1 Χερσαίο αιολικό πάρκο στην Πύλο Μεσσηνίας.

Πηγή: www.elperes.gr

- Τα παράκτια αιολικά πάρκα:

κατασκευάζονται στη θάλασσα, συνήθως σε απόσταση μικρότερη από τρία χιλιόμετρα από την ακτογραμμή, και εκμεταλλεύονται τους ισχυρούς ανέμους που προκύπτουν λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ ξηράς και θάλασσας. Εδώ φυσικά τα προβλήματα μεταφορών που αντιμετωπίζουμε στα χερσαία αιολικά πάρκα είναι σχεδόν ανύπαρκτα, υπάρχει όμως σημαντική τεχνική δυσκολία στον τρόπο θεμελίωσης των ανεμογεννητριών. Επιπλέον λόγω της μεγάλης αξίας της γης στα παραθαλάσσια μέρη η αξία της γης κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα, αυξάνοντας έτσι το κόστος της επένδυσης. Ένα άλλο πρόβλημα είναι η πιθανή τουριστική υποβάθμιση της περιοχής, η παρεμπόδιση της αλιείας αλλά και της ναυσιπλοΐας.

- Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα:

είναι συνήθως κατασκευασμένα μέσα στη θάλασσα και σε απόσταση μεταξύ τριών και δέκα χιλιομέτρων από την πλησιέστερη ακτογραμμή. Στην περίπτωση των υπεράκτιων πάρκων όπως και στα παράκτια πάρκα τα κυρίως προβλήματα εντοπίζονται στη θεμελίωση καθώς και στην επιλογή σημείου καθώς η μορφολογία του πυθμένα πρέπει να έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα θα πρέπει να μην έχει πολύ μεγάλο βάθος και να μην υπάρχουν απότομες κλίσεις. Επίσης ένα άλλο πρόβλημα που καλούνται να λύσουν οι μηχανικοί που κατασκευάζουν τα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι η διασύνδεση με τα χερσαία συστήματα ή οποία πολλές φορές κοστίζει αρκετά. Φυσικά τα προτερήματα των υπεράκτιων πάρκων είναι πολλά, αφού εφόσον είναι σε σημαντική απόσταση από την ξηρά περιορίζεται αισθητά η επίδραση τους στον άνθρωπο και το παράκτιο περιβάλλον. Επίσης υπάρχει “αφθονία” χώρου, σε αντίθεση με τις χερσαίες περιοχές. Επίσης σημαντικό πλεονέκτημα είναι η μικρή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας της θάλασσας και αέρα, απαλλάσσοντας έτσι τον άνεμο από φαινόμενα τύρβης και περιορίζοντας σημαντικά την καταπόνηση των ανεμογεννητριών (Σιμιδάλας Σταμόπουλος 2018).

Στην Εικόνα 4.2 βλέπουμε ένα από τα μεγαλύτερα υπεράκτια αιολικά πάρκα παγκοσμίως, στο Yorkshire της Μεγάλης Βρετανίας.



Εικόνα 4.2 Υπεράκτιο αιολικό πάρκο στο Yorkshire - Αγγλία

Πηγή: www.energypress.gr

4.2 Βασικά μέρη ανεμογεννητριών

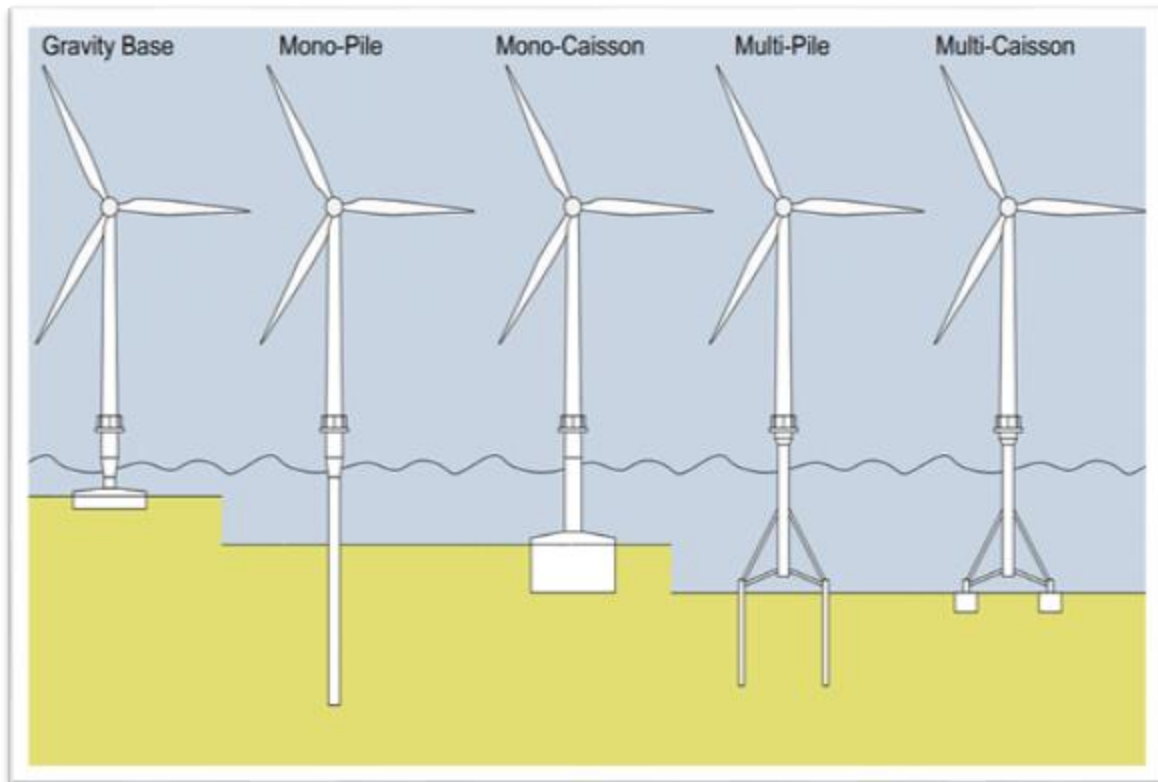
Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μια ανεμογεννήτρια είναι τα εξής:

- η βάση (θεμελίωση):

αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό μάζας της ανεμογεννήτριας, σε ποσοστό περίπου 80%, και αποτελείται από σκυρόδεμα και χάλυβα. Πολλές φορές μετά το τέλος ζωής της ανεμογεννήτριας επιλέγεται να μείνει στο αιολικό πάρκο καθώς από περιβαλλοντικής απόψεως είναι μεγάλες οι επιπτώσεις που έχει η εκσκαφή, το σπάσιμο και η μεταφορά της.

Ο τρόπος θεμελίωσης ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες και την τοποθεσία. Στις χερσαίες ανεμογεννήτριες συνήθως κατασκευάζεται ένα κυκλικό θεμέλιο σκυροδέματος με αναμονές στο κέντρο του για αγκύρωση του πύργου. Στις παράκτιες και υπεράκτιες ανεμογεννήτριες το θέμα της θεμελίωσης αποκτά πιο πολύπλοκη διάσταση καθώς ο μηχανικός καλείτε να λάβει υπόψη πολλαπλούς παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν, όπως για παράδειγμα το έδαφος του πυθμένα, τα θαλάσσια ρεύματα, ο κυματισμός και το βάθος θεμελίωσης. Το τελευταίο μάλιστα παίζει αρκετά σημαντικό ρόλο καθώς για βάθη έως και τριάντα μέτρα συνήθως επιλέγεται μονοπυλώνας ο οποίος πρακτικά αποτελεί μία επέκταση του πύργου, ενώ για μεγαλύτερα βάθη επιλέγονται πιο σύνθετες κατασκευές με πολλαπλούς πυλώνες και διευρυμένες βάσεις. Σίγουρα πάντως το κόστος θεμελίωσης στις θαλάσσιες ανεμογεννήτριες είναι σημαντικά μεγαλύτερο από ότι στις χερσαίες και αυξάνεται όσο αυξάνεται και το βάθος θεμελίωσης. Τα τελευταία χρόνια έχει εξελιχθεί αρκετά και η λύση των πλωτών ανεμογεννητριών, οι οποίες αν και έχουν δυσκολίες στο σχεδιασμό, μας δίνουν πρόσβαση για εκμετάλλευση μεγάλης ποσότητας αιολικών πόρων ειδικά στην Ελλάδα.

Στην Εικόνα 4.3 βλέπουμε διάφορους τύπους θεμελίωσης των ανεμογεννητριών.



Εικόνα 4.3 Διάφοροι τύποι θεμελίωσης ανεμογεννήτριας

Πηγή: www.researchgate.net

- ο πυλώνας:

αποτελεί, μετά το θεμέλιο, το μεγαλύτερο κομμάτι από άποψη μάζας της ανεμογεννήτριας σε ποσοστό περίπου 60 - 70%. Συνήθως αποτελείται από χαλύβδινες κυλινδρικές - κωνικές διατομές με πάχος ελασμάτων έως 40 mm, οι οποίες βιδώνονται στο εργοτάξιο ή μια πάνω στην άλλη. Εξετάζεται ακόμη η χρήση και άλλων υλικών για λόγους ευκολίας της κατασκευής όπως το σκυρόδεμα αλλά και σύνθετων και ελαφρύτερων υλικών.

Σημαντικό ρόλο στην απόδοση της ανεμογεννήτριας παίζει και το ύψος του πυλώνα καθώς όσο ψηλότερος είναι ο τόσο μεγαλύτερη είναι η πρόσβαση σε υψηλότερες ταχύτητες

ανέμων. Έτσι επικρατεί η τάση για σχεδιασμό όλο και ψηλότερων ανεμογεννητριών, σε αναλογία βέβαια και με τη χρήση μεγαλύτερων πτερυγίων.

Στους πυλώνες των θαλάσσιων ανεμογεννητριών πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν και οι επιπλέον φορτίσεις από τον κυματισμό, αλλά και η αντιδιαβρωτική προστασία ενώ γενικά οι πύργοι πρέπει να μπορούν να προσφέρουν στο προσωπικό εύκολη και ασφαλή πρόσβαση στην άτρακτο αλλά και προστασία από τις καιρικές συνθήκες.

Η Εικόνα 4.4 είναι μια καλλιτεχνική λήψη του εσωτερικού πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 4.4 Εσωτερική άποψη πυλώνα ανεμογεννήτριας.

Πηγή: www.wikiwand.com

- η άτρακτος:

είναι η μηχανολογική καρδιά της ανεμογεννήτριας. Βρίσκεται στην κορυφή του πύργου και περιέχει όλα τα απαιτούμενα μηχανικά μέρη για την μετατροπή της περιστροφικής ενέργειας των πτερυγίων σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα βασικότερα μέρη τα οποία περιέχει είναι η γεννήτρια, το κιβώτιο ταχυτήτων και το σύστημα προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας. Η άτρακτος γενικά είναι κατασκευασμένη από GRP (Glass Reinforced Plastics) υποστηριζόμενο από μεταλλικό πλαίσιο.

Η γεννήτρια μπορεί να είναι είτε γεννήτρια επαγωγής η οποία λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα και κιβώτιο ταχυτήτων, το οποίο μετατρέπει την αργή ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων σε κατάλληλη ταχύτητα για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, είτε γεννήτρια άμεσης κίνησης η οποία συνδέεται άμεσα με τα πτερύγια και δε χρειάζεται κιβώτιο ταχυτήτων. Η τελευταία είναι συνήθως βαρύτερη και περιέχει σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες χαλκού. Η χρήση κιβωτίου ταχυτήτων είναι πιο συχνή σε μικρότερες γεννήτριες και επιτρέπει την άμεση σύνδεση με το δίκτυο.

Το μειονέκτημα είναι ότι λόγω των πολλών κινούμενων μερών και των ισχυρών δυνάμεων που δέχεται το κιβώτιο ταχυτήτων χρειάζεται συχνά συντήρηση η και αντικατάσταση πριν το προβλεπόμενο τέλος ζωής του. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα αποτελούν οι γεννήτριες μόνιμων μαγνητών, ο οποίες χρησιμοποιούν μαγνήτες από σπάνιες γαίες, οι οποίες όμως δεν είναι βέβαιο ότι μελλοντικά θα μπορούν να καλύψουν την συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση. Μια υπό εξέταση λύση είναι η χρήση υπεραγώγιμων πηνίων τα οποία παρέχουν σημαντικά αυξημένα μαγνητικά πεδία, χρειάζονται όμως ένα καλό σύστημα ψύξης.

Τα κυριότερα υλικά που υπάρχουν στην άτρακτο είναι χαλκός, στον μηχανολογικό εξοπλισμό, χάλυβας, αλουμίνιο, GRP και όπως είδαμε παραπάνω σπάνιες γαίες. Σε μικρές ποσότητες υπάρχει ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός, λιπαντικά κλπ (Τζουνάκος 2021).

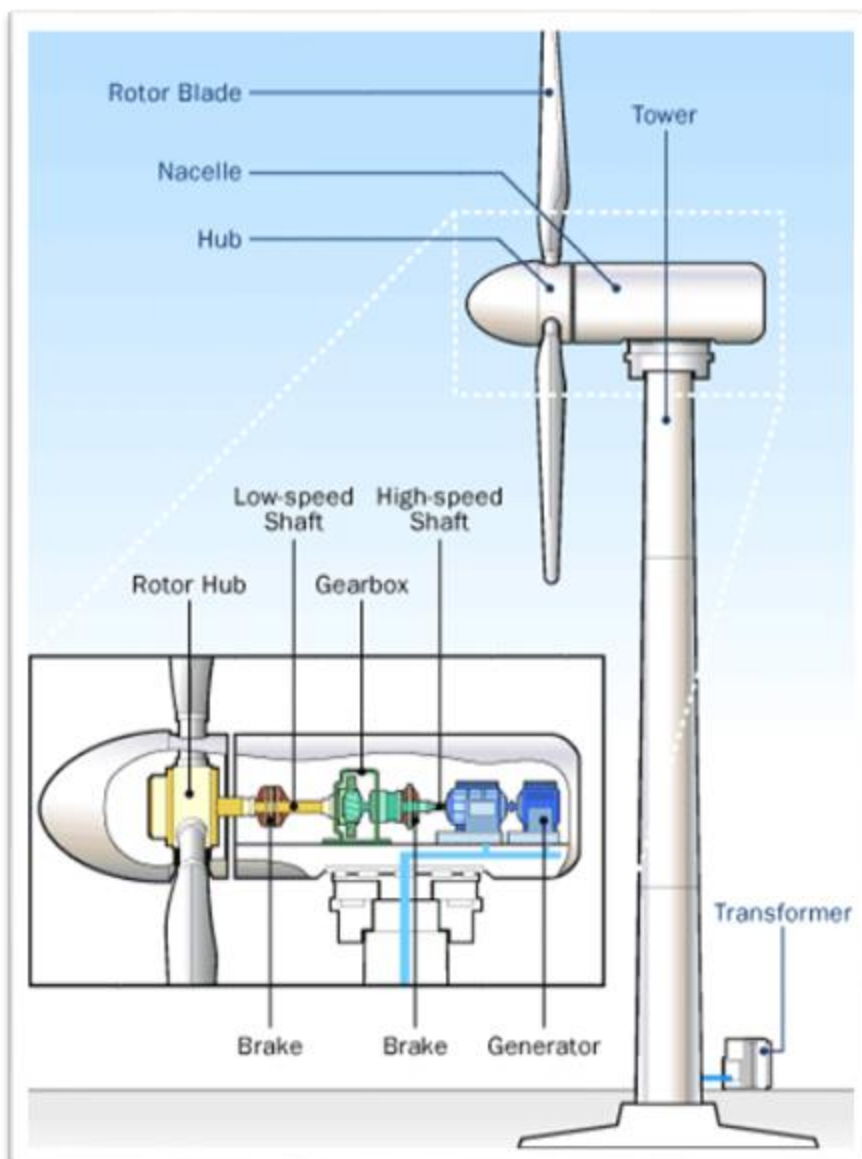
- ο δρομέας και τα πτερύγια:

είναι το τμήμα της ανεμογεννήτριας που έχει σχεδιαστεί για να μετατρέπει την κινητική αιολική ενέργεια σε περιστροφική ενέργεια. Σε μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα αυτό επιτυγχάνεται όταν ο άνεμος χτυπά τα πτερύγια υπό γωνία τέτοια ώστε να τα κινεί. Είναι η ίδια αρχή που χρησιμοποιείται σε ένα φτερό αεροπλάνου μόνο ότι αντί να χρησιμοποιείται η ανυψωτική δύναμη για να ακυρώσει τις βαρυτικές δυνάμεις χρησιμοποιείται για την περιστροφή των πτερυγίων. Ταυτόχρονα, τα πτερύγια πρέπει να είναι ανθεκτικά και να διατηρούν το σχήμα τους ενώ αντέχουν ισχυρές δυνάμεις, πράγμα που σημαίνει ότι το χρησιμοποιούμενο υλικό πρέπει να είναι ανθεκτικό, άκαμπτο και ελαφρύ. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό στα πτερύγια των στροβίλων είναι το GRP αφού έχει όλες τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω ταυτόχρονα και είναι σχετικά φθηνό. Μια αντίστοιχη κατασκευή από χάλυβα ή αλουμίνιο θα ήταν αρκετά πιο ισχυρή αλλά ταυτόχρονα και πολύ πιο βαριά. Το CRP (Carbon Reinforced Plastic) είναι μια εναλλακτική λύση στο GRP που έχει μεγαλύτερη αντοχή είναι πιο ελαφριά, αλλά είναι και πιο ακριβή. Καθώς υπάρχει η τάση είναι η διάμετρος των πτερυγίων να αυξάνεται, το CRP θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί συχνότερα, καθώς χαμηλότερο βάρος σημαίνει και μικρότερες πιέσεις στην υπόλοιπη κατασκευή (Andersen 2015).

Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών αποτελούνται από το τμήμα χαμηλής και το τμήμα υψηλής πίεσης, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους και συνθέτουν το κέλυφος. Το κέλυφος των πτερυγίων των ανεμογεννητριών, αποτελείται από τα τρία εξής συστατικά: τις ίνες που αποτελούν συστατικό ενίσχυσης, την μήτρα που είναι το συνδετικό υλικό και τον πυρήνα (Μαυροκωστίδου 2019).

Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών αποτελούν ίσως και τη μεγαλύτερη πρόκληση από σκοπιάς ανακύκλωσης και λόγω της ιδιαιτερότητας των υλικών αλλά και λόγω του πολύ μεγάλου μεγέθους τους.

Στην Εικόνα 4.5 μπορούμε να δούμε τα βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 4.5 Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας

Πηγή: www.the-tech-addict.com

4.3 Υλικά κατασκευής ανεμογεννητριών

Παραπάνω αναφέρθηκαν επιγραμματικά τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένη μια ανεμογεννήτρια. Όμως μία ανεμογεννήτρια μπορεί να έχει βάρος έως και κάποιες εκατοντάδες τόνους και τα υλικά για την κατασκευή της διαφέρουν, ανάλογα φυσικά με την

κατασκευάστρια εταιρία, την ισχύ αλλά και την χρήση της ανεμογεννήτριας. Σε αυτό το κεφάλαιο θα κάνουμε μια εκτενέστερη ανάλυση των υλικών, αλλά και των μεγεθών αυτών που αντιστοιχούν σε μια ανεμογεννήτρια.

- Το σκυρόδεμα: όπως είδαμε και παραπάνω χρησιμοποιείται κυρίως στη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας και ειδικά για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες αποτελεί πολύ μεγάλο ποσοστό της μάζας της όλης κατασκευής. Δεν αποτελεί παρόλα αυτά τμήμα αυτής καθαυτής της ανεμογεννήτριας εκτός από τις περιπτώσεις όπου έχουμε υβριδικούς πυλώνες όπου συνδυάζεται το σκυρόδεμα με το χάλυβα.
- Ο χάλυβας: ήταν ανέκαθεν το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο στις κατασκευές παγκοσμίως και το ίδιο εξακολουθεί να ισχύει και σήμερα. Τον συναντάμε σχεδόν σε όλα τα τμήματα της ανεμογεννήτριας με διαφορετική μορφή. Πιο συγκεκριμένα, στη θεμελίωση στον οπλισμό σε ποσοστό 3 - 6%, στον πυλώνα είναι το κυρίαρχο υλικό με ποσοστό 95 - 100%, και στην άτρακτο όπου ουσιαστικά ο σκελετός είναι κατασκευασμένος από χάλυβα.
- Ο χυτοσίδηρος: το κοινώς επονομαζόμενο μαντέμι, αποτελείται από ένα κράμα σιδήρου με περιεκτικότητα σε άνθρακα μεγαλύτερη 2 - 3,5% κατά βάρος. Στην πραγματικότητα όταν λέμε χυτοσίδηρος αναφερόμαστε σε μία ευρύτερη οικογένεια κραμάτων τα οποία εκτός από άνθρακα, μπορεί να περιέχουν και άλλα στοιχεία όπως πυρίτιο κλπ, ανάλογα με τις μεταλλουργικές απαιτήσεις που υπάρχουν. Ο χυτοσίδηρος, λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας σε άνθρακα είναι γενικά ψαθυρός, ειδικά σε σύγκριση με τον χάλυβα, παρουσιάζει όμως πιο καλή αντίσταση στην τριβή και την διάβρωση. Στις ανεμογεννήτριες χυτοσίδηρος μπορεί να υπάρχει κυρίως στα μηχανολογικά τμήματα όπως το κιβώτιο ταχυτήτων, τα γρανάζια και οι άξονες.

- Άλλα μέταλλα: ο χαλκός και το αλουμίνιο, αποτελούν επίσης σημαντικό ποσοστό του βάρους της ανεμογεννήτριας, ίσως όχι τόσο σαν ποσοστό αλλά σαν απόλυτο νούμερο αν αναλογιστούμε το βάρος μιας ανεμογεννήτριας. Ο χαλκός συναντάται κυρίως στις καλωδιώσεις, την γεννήτρια αλλά και στον υπόλοιπο Η/Μ εξοπλισμό της ανεμογεννήτριας. Το αλουμίνιο βρίσκεται στο μεγαλύτερο μέρος του στην άτρακτο ενώ κάποιες φορές χρησιμοποιείται σε μικρά ποσοστά και στον πυλώνα και στα πτερύγια.
- Οι σπάνιες γαίες: όπως είδαμε και παραπάνω χρησιμεύουν στην κατασκευή μόνιμων μαγνητών οι οποίοι μειώνουν αισθητά το βάρος σε σχέση με τους κλασσικούς ηλεκτρομαγνήτες.
- Σύνθετα υλικά: τα συναντάμε σε διάφορα μέρη της ανεμογεννήτριας (π.χ. στην άτρακτο), όμως τα σύνθετα υλικά επικρατούν στην κατασκευή των πτερυγίων.

4.3.1 Υλικά κατασκευής πτερυγίων ανεμογεννητριών

Τα πτερύγια κατασκευάζονται κυρίως από σύνθετα υλικά τα οποία με τη σειρά τους παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία. Όπως λέει και ο ορισμός (Agarwal–1990): *Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.*

Το ένα, από τα συστατικά, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης (οι ίνες στην περίπτωση μας) και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης (Γεωργίου 2018).

Όσον αφορά τον πυρήνα του πτερυγίου τα υλικά από τα οποία μπορεί να αποτελείται είναι ξύλο (η μπάλα είναι ένα από αυτά) , αφρός πολυβινυλοχλωρίδιου (PVC) και αφρός πολυτερεφθαλικού αιθυλενίου (PET). Επίσης, περιέχουν μεταλλικά μέρη από σίδηρο, κυρίως στο σημείο σύνδεσης των πτερυγίων στην πλήμνη (hub), καθώς επίσης και αγωγούς χαλκού ή σιδήρου για την αντικεραυνική προστασία.

Οι ίνες αποτελούνται από διάφορα υλικά με διαφορετικές ιδιότητες. Η ακαμψία των σύνθετων υλικών καθορίζεται από την ακαμψία των ινών που χρησιμοποιούνται και την περιεκτικότητά κατ' όγκο. Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε όγκο των ινών στα σύνθετα υλικά, τόσο η ακαμψία, η αντοχή σε εφελκυσμό και η αντοχή σε θλίψη αυξάνονται και αυτές. Από την άλλη αν ξεπεράσουμε σε ποσοστό το 65% σε ποσοστό ρητινών θα υπάρχουν περιοχές χωρίς ρητίνες μεταξύ των ινών με αποτέλεσμα η αντοχή σε κόπωση του σύνθετου υλικού να μειωθεί.

Οι πιο γνωστοί τύποι ινών ενίσχυσης είναι ίνες γυαλιού (GFRP, Glass Fiber Reinforced Polymer) και άνθρακα (CFRP, Carbon fiber reinforced polymer), αραμίδια και ίνες βασάλτη, υβριδικά σύνθετα υλικά, φυσικές ίνες.

- Οι ίνες γυαλιού και άνθρακα (GFRP & CFRP):

Συνήθως οι ίνες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πτερυγίων είναι ίνες γυαλιού. Γίνονται όμως πολλές έρευνες για την ανάπτυξη νέων ινών, οι οποίες περιλαμβάνουν ίνες γυαλιού με τροποποιημένες συνθέσεις. Επίσης οι ίνες άνθρακα λόγω της αρκετά μεγαλύτερης ακαμψίας και της χαμηλότερου βάρους θεωρούνται μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική. Αυτό γιατί μας επιτρέπουν την κατασκευή λεπτότερων, σκληρότερων και ελαφρύτερων πτερυγίων συγκριτικά με τα πτερύγια από ίνες γυαλιού. Ωστόσο, έχουν και αυτές μειονεκτήματα όπως μικρή ανοχή σε βλάβες, χαμηλή αντοχή σε θλίψη και κόπωση και πολύ μεγαλύτερο κόστος κατασκευής.

- Αραμίδια και ίνες βασάλτη:

Μια εναλλακτική λύση αποτελεί η χρήση ινών από αραμίδιο ή βασάλτη. Οι ίνες αραμιδίου είναι το γενικό όνομα μιας ομάδας συνθετικών ινών, οι οποίες προσφέρουν ένα σύνολο ιδιοτήτων που τις καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμες σε ένα ευρύ φάσμα άλλων εφαρμογών. Μια από τις πιο αναγνωρισμένες εμπορικές ονομασίες είναι το Kevlar™, αλλά υπάρχουν και άλλα. Η υψηλή αντοχή τους σε σχέση με το χαμηλό βάρος τους καθιστά ελκυστικούς για χρήση ως ενισχυτικά (για παράδειγμα σε σύνθετα υλικά, ιδιαίτερα όπου η ανοχή κάμψης είναι σημαντική, όπως φτερά αεροσκαφών και ανεμογεννητριών), ενώ είναι ανθεκτικά και σε βλάβες. Ωστόσο παρουσιάζουν χαμηλή αντοχή σε θλίψη, δυσκολία πρόσφυσης με τις πολυμερείς ρητίνες, επηρεάζονται από την υπεριώδη ακτινοβολία και απορροφούν υγρασία. Οι ίνες από βασάλτη παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες, είναι αρκετά πιο ισχυρές, πιο σκληρές και πιο ελαφριές από τις ίνες γυαλιού.

- Υβριδικά σύνθετα υλικά:

Λόγω της αναγκαιότητας για όλο και πιο ελαφριά πτερύγια γίνονται εκτενείς έρευνες στα υβριδικά σύνθετα υλικά. Αναλύσεις που έχουν γίνει σε εφαρμογές υβριδικών σύνθετων από γυαλί και άνθρακα σε πτερύγια ανεμογεννητριών έχουν καταλήξει ότι το υβριδικό υλικό παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά σε φορτία εφελκυσμού και σε κόπωση σε σχέση με τις ίνες από καθαρό άνθρακα ή γυαλί. Ωστόσο αν και τα υβριδικά σύνθετα φαίνεται αποτελούν μια ομάδα υλικών με πολλές προοπτικές, ειδικά για στον τομέα των ανεμογεννητριών, χρειάζονται περαιτέρω εξέλιξη ώστε να καταλήξουμε στη βέλτιστη σύνθεση των υλικών.

- Φυσικές ίνες:

Οι φυσικές ίνες αποτελούν μια καλή λύση καθώς έχουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως είναι το χαμηλό κόστος, οι αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες, η υψηλή, η αντοχή στη διάβρωση και η αυξημένη διαθεσιμότητα. Επιπλέον, οι φυσικές ίνες είναι φιλικές προς το περιβάλλον

αφού είναι βιοδιασπώμενες και δεν χρειάζεται να μας απασχολεί ο τρόπος ανακύκλωσης τους. Τα μειονεκτήματα είναι οι πιθανές μεταβολές της ποιότητας και η εύκολη προσβολή από υγρασία. Υπάρχουν διάφοροι τύποι φυσικών ινών που εξάγονται από φυτά, ζώα και ορυκτά. Κάποιες από αυτές είναι το σιζάλ (*Agave sisalana*), το λινάρι (*Linum usitatissimum*) η κάνναβη (*Cannabis*), το μπαμπού (*Bambusoideae*), ο κοκοφοίνικας (*Cocos nucifera*) και η γιούτα (*Corchorus olitorius*). Το μπαμπού είναι το ένα υλικό με τις μεγαλύτερες προοπτικές καθώς αποτελείται από 60% κυτταρίνη στην οποία οφείλονται οι καλές του μηχανικές ιδιότητες. Έρευνες έχουν δείξει ότι η ενίσχυση με ίνες από μπαμπού έχει ισοδυναμεί με ενίσχυση ινών γυαλιού, ενώ οι βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες επιτυγχάνονται όταν το μπαμπού αποτελεί το 30% του σύνθετου υλικού. Επιπλέον σε αντίθεση με τις άλλες φυσικές ίνες, το μπαμπού έχει μικρότερη απορρόφηση νερού. Οι ίνες κοκοφοίνικα και λινού έχουν σχετικά καλές μηχανικές ιδιότητες, ειδικά οι ίνες λινού έχουν πολύ υψηλή αντοχή, αλλά παρουσιάζουν άλλα μειονεκτήματα όπως μείωση των ιδιοτήτων με το χρόνο και μεγάλη απορρόφηση υγρασίας. Το τελευταίο αποτελεί ίσως και το σοβαρότερο μειονέκτημα στις φυσικές ίνες και ξεπερνιέται με ειδική επιφανειακή επεξεργασία η οποία βελτιώνει την απορροφητικότητα των υλικών και βοηθάει στην καλή σύνδεση με τα πολυμερή ώστε να γίνεται η μεταφορά των τάσεων μεταξύ τους με επιτυχία.

Όσον αφορά στις μήτρες, οι κυριότεροι τύποι μήτρας που χρησιμοποιούνται στη πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι οι θερμοσκληρυνόμενες, οι θερμοπλαστικές, τα πολυμερή και νανοσύνθετα υλικά, οι πολυεστέρες, οι βινυλεστέρες και οι πολυουρεθάνες.

- Θερμοσκληρυνόμενες:

Το μεγαλύτερο ποσοστό των σύνθετων υλικών στην αγορά βασίζονται σε θερμοσκληρυντές. Αυτό γιατί οι θερμοσκληρυντές παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως είναι η υψηλή αντοχή, η ακαμψία και η ευκολία στην κατεργασία. Επίσης η δυνατότητα για κατεργασία σε χαμηλές θερμοκρασίες αλλά και το χαμηλό ιξώδες διευκολύνει την έγχυση και επιτρέπει μεγάλη ταχύτητα κατά την επεξεργασία. Τα μειονεκτήματα τους είναι κυρίως περιβαλλοντολογικά καθώς εκπέμπουν στυρένιο κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας τους και δεν μπορούν να ανακυκλωθούν. Αρχικά είχαν προτιμηθεί οι πολυεστερικές ρητίνες,

όμως με την αύξηση όλο και περισσότερου του μεγέθους των ανεμογεννητριών, οι εποξειδικές ρητίνες αντικατέστησαν σε μεγάλο βαθμό τον πολυεστέρα και τώρα τις συναντάμε πιο συχνά ως μήτρες για τα σύνθετα υλικά των πτερυγίων. Πρόσφατες έρευνες όμως οδηγούν και πάλι στην επιστροφή σε ακόρεστες πολυεστερικές ρητίνες, καθώς παρουσιάζουν πλεονεκτήματα μεταξύ των οποίων είναι οι ταχύτεροι χρόνοι παραγωγής αλλά και η βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση, και επιπλέον πληρούν όλες τις απαιτήσεις αντοχής και ανθεκτικότητας για μεγάλες ανεμογεννήτριες.

- **Θερμοπλαστικές:**

Μια άλλη εκδοχή για τις μήτρες είναι τα θερμοπλαστικά, τα οποία έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως την μεγαλύτερη επιμήκυνση κατά τη θραύση, την δυνατότητα αυτόματης επεξεργασίας και την απεριόριστη διάρκεια ζωής των πρώτων υλών. Επίσης σε αντίθεση με τα θερμοσκληρυνόμενα είναι ανακυκλώσιμα. Από την άλλη παρουσιάζουν και αυτά κάποια σοβαρά μειονεκτήματα όπως είναι η απαίτηση για υψηλές θερμοκρασίες επεξεργασίας (προκαλώντας την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και ενδεχομένως επηρεάζοντας τις ιδιότητες των ινών) και οι δυσκολίες, λόγω του υψηλού ιξώδους, στην κατασκευή μεγάλων τεμαχίων. Ενδεικτικά το ιξώδες των θερμοπλαστικών μητρών είναι περίπου 100 φορές παραπάνω από εκείνο για των θερμοσκληρυνόμενων. Επιπλέον ενώ παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή σε θραύση σε σχέση με τον κύριο ανταγωνιστή τους που είναι τα θερμοσκληρυνόμενα, στην συμπεριφορά τους σε κόπωση χάνουν έδαφος είτε χρησιμοποιούν ως ενισχυτικό υλικό ίνες άνθρακα είτε ίνες γυαλιού.

- **Πολυμερή και νανοσύνθετα υλικά:**

Αν και το πεδίο της νανοτεχνολογίας μόλις πρόσφατα άρχισε να αναπτύσσεται ουσιαστικά (τα απαραίτητα εργαλεία για την προσέγγιση της νανοκλίμακας αναπτύχθηκαν τα τελευταία μόλις 30-40 χρόνια), οι δυνατότητες της είχαν αρχίσει να γίνονται εμφανείς τα τελευταία χρόνια. Έρευνες οι οποίες δείχνουν ότι με την χρήση νανοτεχνολογίας στη μήτρα των σύνθετων υλικών επιτυγχάνουμε τη βελτίωση των ιδιοτήτων. Αυτό γίνεται με προσθήκες

μικρών ποσοτήτων νανομηχανικών υλικών όπως είναι οι νανοσωλήνες άνθρακα και νανοπηλός στο πολυμερές πλέγμα των σύνθετων υλικών, στην επιφανειακή επεξεργασία των ινών ή και μεταξύ των στρώσεων του σύνθετου υλικού. Αυτές οι μικρές προσθήκες της τάξης του 0,5% μπορούν να επιτρέψουν την αύξηση της αντοχής σε κόπωση και σε θραύση των σύνθετων υλικών κατά 30-80%.

Επίσης πτερύγια ανεμογεννήτριας από πολυουρεθάνη ενισχυμένη με νανοσωλήνες άνθρακα που έχουν κατασκευαστεί και δοκιμαστεί, δείχνουν καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τα συμβατικά πτερύγια ανεμογεννητριών.

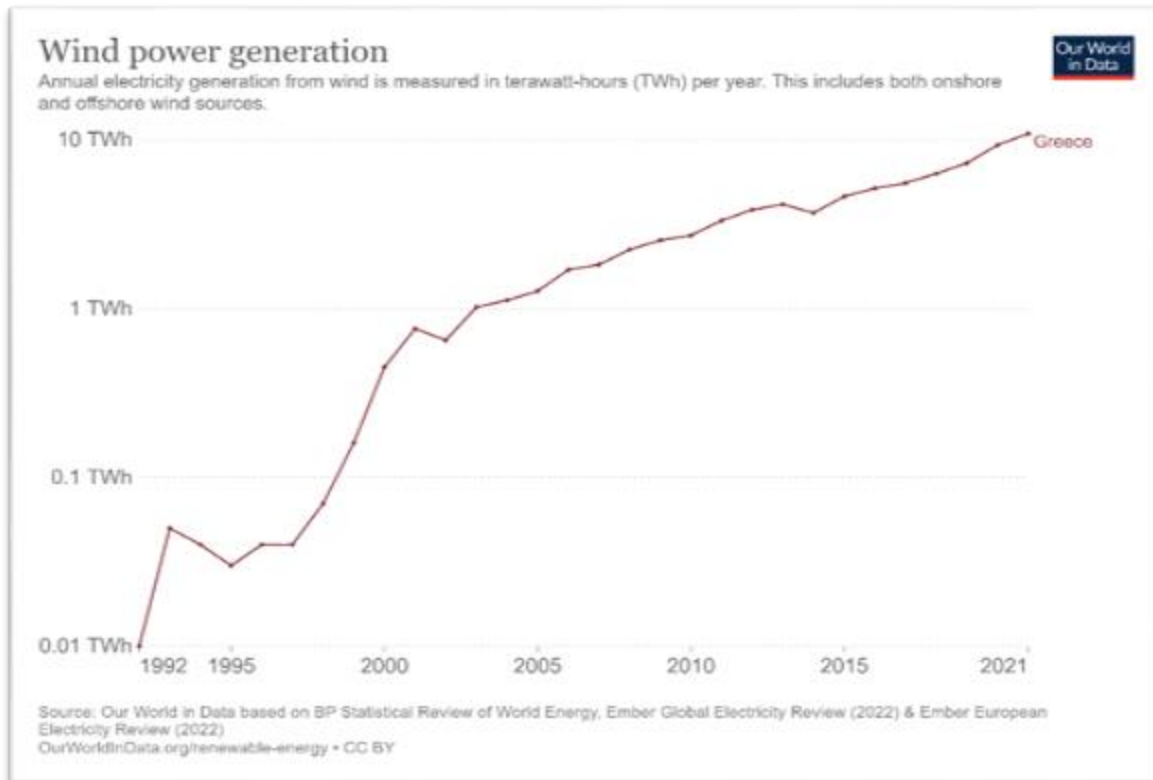
Εν κατακλείδι μπορούμε να πούμε ότι αν και τα πολυμερή-νανοσύνθετα ως υλικά μήτρας έχουν αρκετά βελτιωμένες ιδιότητες, υπάρχουν ακόμη προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν χαμηλότερες τιμές ιδιοτήτων σε άλλες περιοχές που περιορίζουν τη δυνατότητα επεξεργασίας ή την εφαρμογή τους. Η εμπειρία έχει δείξει ότι τα κέρδη κατά τη διάρκεια ζωής των σύνθετων υλικών δικαιολογούν πρόσθετες επενδύσεις για την παραγωγή πτερυγίων ανεμογεννητριών από υβριδικά και νανοσυνθετικά υλικά (Τζουνάκος 2021).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°: ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια σταθερά ανοδική πορεία στα εγκατεστημένα MW από αιολική ενέργεια τόσο στην Ελλάδα, όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο.

Σύμφωνα μάλιστα με στοιχεία της Ελληνικής Επιστημονικής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας, η συνολική αιολική ισχύς στην Ελλάδα έφτασε τα 4.534 MW τον Ιούνιο του 2022, καθώς το 2021 συνδέθηκαν στο δίκτυο 128 νέες ανεμογεννήτριες ισχύος 338,3 MW, το οποίο σημαίνει αύξηση 8,2% σε σχέση με το τέλος του 2020, ενώ το πρώτο εξάμηνο του 2022 συνδέθηκαν στο δίκτυο 28 νέες ανεμογεννήτριες συνολικής αποδιδόμενης ισχύος 83,1 MW. Επίσης φαίνεται πως το 2023 θα είναι χρονιά ορόσημο για την αιολική ενέργεια καθώς κατά το τέλος Ιουνίου του 2022 ήταν υπό κατασκευή πάνω από 650 MW νέων αιολικών πάρκων, η μεγάλη πλειονότητα των οποίων αναμένεται να συνδεθεί στο δίκτυο εντός των επόμενων 12 μηνών.

Στο Σχήμα 5.1 βλέπουμε αυτή τη σταθερά αυξανόμενη τάση στην εγκατάσταση νέων ανεμογεννητριών. Ενώ παρατηρούμε ότι τα προηγούμενα χρόνια είχαμε αυξήσεις της τάξης των 100 – 200 MW (με εξαίρεση το 2011 που ήταν μια καλή χρονιά για την αιολική ενέργεια με αύξηση 315 MW εν μέσω οικονομικής κρίσης), για το 2019 και 2020 βλέπουμε πολύ υπερδιπλάσιες αυξήσεις, και πιο συγκεκριμένα 756 MW και 517 MW αντίστοιχα.



Σχήμα 5.1 Παραγωγή ενέργειας (TWh) από ανεμογεννήτριες ανά έτος στην Ελλάδα

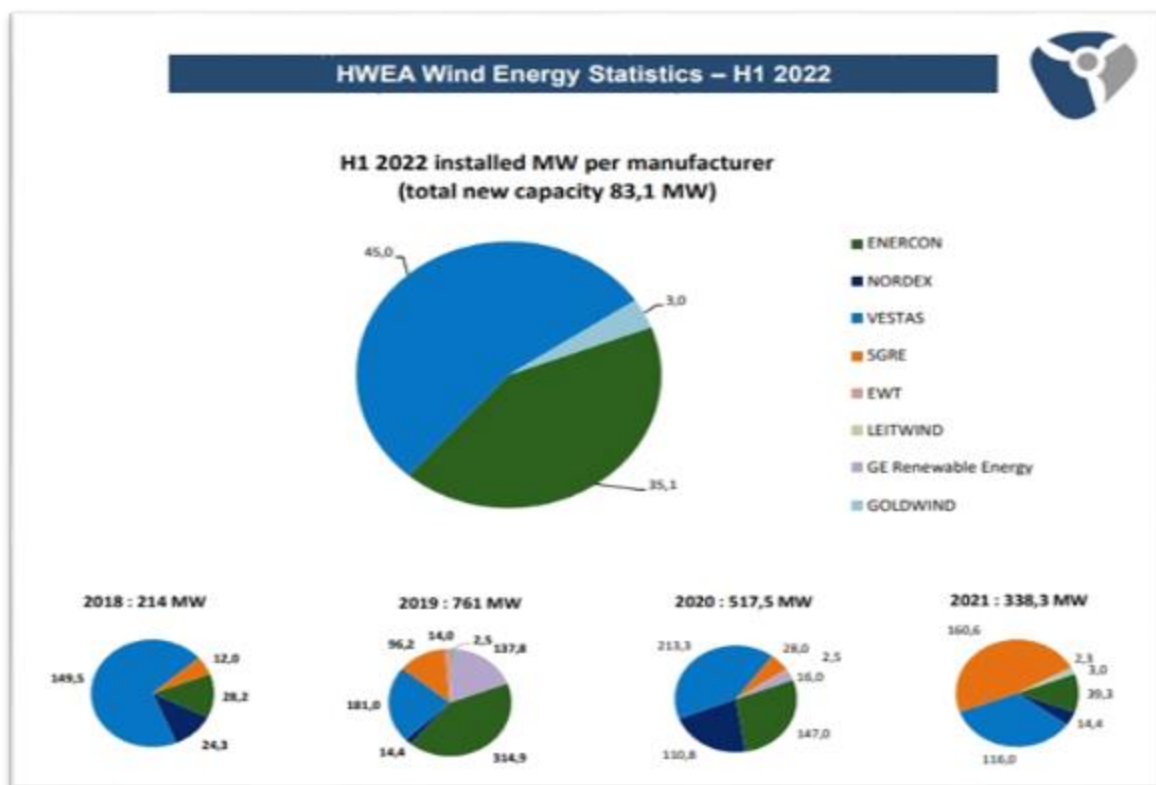
Πηγή: www.ourworldindata.org

Το πρώτο αιολικό πάρκο που δημιουργήθηκε στην Ευρώπη είναι το Αιολικό πάρκο Κύθνου το οποίο βρίσκεται κοντά στην πρωτεύουσα του νησιού και έχει εγκατεστημένες 5 ανεμογεννήτριες τύπου MAN των 20 kW η κάθε μία. Το Αιολικό πάρκο της Κύθνου κατασκευάστηκε το 1982. Το 1989 οι ανεμογεννήτριες αντικαταστάθηκαν με νέες ισχύος 33 kW η κάθε μία ενώ το 1998 εγκαταστάθηκε και μια ανεμογεννήτρια Vestas ισχύος 500 kW. Τώρα όμως, 40 χρόνια μετά την εγκατάστασή του, για το Αιολικό πάρκο Κύθνου έχει παρέλθει ο χρόνος λειτουργίας και καλής απόδοσης, έχει εγκαταλειφθεί κάθε σοβαρή προσπάθεια και καλύπτει ένα ελάχιστο ποσοστό σε παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (www.wisegrid.eu).

Καταλαβαίνουμε από το παραπάνω παράδειγμα ότι ο τρόπος ανακύκλωσης ανεμογεννητριών θα πρέπει να μας απασχολήσει περισσότερο αφού σταδιακά θα συσσωρεύεται τεράστιος όγκος μη λειτουργικών ανεμογεννητριών οι οποίες θα πρέπει να οδηγηθούν εκεί.

Στη χώρα μας, όσον αφορά τους κατασκευαστές ανεμογεννητριών, η Vestas έχει προμηθεύσει το 44,8% της συνολικής αποδιδόμενης αιολικής ισχύος στην Ελλάδα. Ακολουθούν η Enercon με 25,4%, η Siemens Gamesa με 18,2%, η Nordex με 6,9% και η GE Renewable Energy με 3,4%.

Στην Εικόνα 5.2 βλέπουμε τα MW που έχει εγκαταστήσει η κάθε κατασκευάστρια εταιρία ανεμογεννητριών στην Ελλάδα, τα πέντε τελευταία έτη.



Σχήμα 5.2 Εγκατεστημένη ισχύς ανεμογεννητριών στην Ελλάδα από 2018 – 2022 ανάλογα με τον κατασκευαστή

Πηγή: www.eletaen.gr

Στον Σχήμα 5.3 βλέπουμε μια ανάλυση των υλικών από διάφορα εμπορικά μοντέλα ανεμογεννητριών που κατασκευάζουν οι μεγάλες εταιρίες παγκοσμίως.

ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ							
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ	MICON	NORDEX	MICON	VESTAS	VESTAS	VESTAS	VESTAS
ΜΟΝΤΕΛΟ	NM52	N62	NM72	V82-1.65	V90-2.0	V100-2.0	V110-2.0
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	0,90	1,30	1,50	1,65	2,00	2,00	2,00
ΥΨΟΣ (m)	60,70	69,00	80,00	78,00	80,00	80,00	80,00
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (m)	52,20	62,00	72,00	82,00	90,00	100,00	110,00
ΒΑΡΟΣ ΥΛΙΚΩΝ (Kg ανα KW)							
ΧΑΛΥΒΑΣ	111,20	104,50	110,10	96,30	82,20	83,90	92,20
ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	18,80	23,80	20,90	18,20	16,00	14,10	14,20
ΣΙΔΗΡΟΣ/ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ	7,20	17,30	8,70	17,80	20,50	13,30	13,30
ΧΑΛΚΟΣ	1,60	1,50	1,20	1,80	0,90	0,60	0,70
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	Δ.Π.	Δ.Π.	Δ.Π.	1,90	2,10	1,70	1,90
ΣΥΝΟΛΟ	139,90	148,20	141,70	138,90	124,00	115,00	124,00
ΠΟΣΟΣΤΟ % ΥΛΙΚΩΝ ΕΠΙ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΑΖΑΣ							
ΧΑΛΥΒΑΣ	79,49	70,51	77,70	69,33	66,29	72,96	74,35
ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	13,44	16,06	14,75	13,10	12,90	12,26	11,45
ΣΙΔΗΡΟΣ/ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ	5,15	11,67	6,14	12,81	16,53	11,57	10,73
ΧΑΛΚΟΣ	1,14	1,01	0,85	1,30	0,73	0,52	0,56
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	Δ.Π.	Δ.Π.	Δ.Π.	1,37	1,69	1,48	1,53
ΣΥΝΟΛΟ	99,2	99,3	99,4	97,9	98,1	98,8	98,6

Σχήμα 5.3 Βασικά χαρακτηριστικά και υλικά ανεμογεννητριών

Πηγή: National Renewable Energy Laboratoty

Για να έχουμε μια εικόνα της τάξης μεγέθους των υλικών που θα προκύψουν προς διαχείριση - ανακύκλωση τα επόμενα χρόνια, αν υποθέσουμε ότι το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύς στην Ελλάδα ήταν από τη γεννήτρια της Vestas V100 2.0, αυτό θα σήμαινε ότι έχουμε εγκατεστημένες περίπου 2.750 ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου δηλαδή περίπου 316.250 t. Με μια απλή ανάλυση των μεγεθών του πίνακα αυτό θα σημαίνει πρακτικά ότι θα προκύψουν περίπου 230.860 t χάλυβα, 36.600 t σιδήρου/χυτοσιδήρου, 4.680 t αλουμίνιο, 1.650 t χαλκός και 38.800 t συνθετικών υλικών. Φυσικά η παραπάνω εκτίμηση είναι χονδροειδής, καθώς δεν λαμβάνει υπόψιν στατιστικά στοιχεία εγκατεστημένων ανεμογεννητριών και στηρίζεται σε μια απλή παραδοχή, αποτελεί όμως μια ένδειξη του

μεγάλου όγκου υλικών που θα προκύψουν μελλοντικά προς ανακύκλωση. Αξιοσημείωτο είναι ότι στα παραπάνω μεγέθη δεν λαμβάνονται υπόψιν τα υλικά που θα προκύψουν από τις αποξηλώσεις των θεμελιώσεων και τις καλωδιώσεις για τη σύνδεση με το δίκτυο.

Όπως είδαμε και παραπάνω, στο πλαίσιο μιας εκτίμησης και κάνοντας μια απλή αναζήτηση στο διαδίκτυο για τις τιμές του scrap των μετάλλων, θα δούμε ότι το κόστος για 1 t χάλυβα είναι περίπου 160 €, για 1 t αλουμίνιο 1000 € και για 1 t χαλκό 6000 €. Κάνοντας τον πολλαπλασιασμό θα δούμε ότι μόνο για τα τρία υλικά που αναφέρθηκαν παραπάνω ο τζίρος της ανακύκλωσης θα έφτανε περίπου τα 50.000.000 €. Συνεπώς και πάλι εκτός από το περιβαλλοντικό όφελος είναι μεγάλο και το οικονομικό όφελος.

Στην εθνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία υπάρχει σαφές πλαίσιο όσον αφορά στις υποχρεώσεις των επιχειρήσεων σχετικά με την αποκατάσταση του χώρου όπου εγκαθίστανται, αλλά και τη διαχείριση των υλικών που απομένουν μετά τη λειτουργία των ανεμογεννητριών. Επιπλέον, υπάρχουν πρόσθετες διατάξεις, από την ειδική ενεργειακή νομοθεσία και το χωροταξικό πλαίσιο για τις ΑΠΕ, για τη διασφάλιση των παραπάνω υποχρεώσεων, το περιεχόμενο των οποίων ενσωματώνεται και στους όρους της περιβαλλοντικής άδειας των αιολικών πάρκων.

Πιο συγκεκριμένα, όταν ένα αιολικό πάρκο φτάσει στο τέλος του κύκλου ζωής του, πρέπει να γίνει αποξήλωση όλου του εξοπλισμού, για τον οποίο θα γίνει η κατάλληλη διαχείριση και ο χώρος να αποκατασταθεί. Συνήθως, στον ίδιο χώρο γίνεται εγκατάσταση νέων ανεμογεννητριών, πιο εξελιγμένων και παραγωγικών, ώστε να να μπορέσουν να αξιοποιηθούν οι υφιστάμενες υποδομές (π.χ. δίκτυο).

Τα υλικά τα οποία προκύπτουν από τις αποξηλώσεις των παλαιών ανεμογεννητριών, οδηγούνται προς ανακύκλωση - διαχείριση από εταιρείες οι οποίες φέρουν διαπίστευση για αυτό το σκοπό σύμφωνα με την ισχύον νομικό πλαίσιο. Στα υλικά αυτά περιλαμβάνονται ο πυλώνας, τα υπόλοιπα συστήματα των ανεμογεννητριών, τα πτερύγια αλλά και τα υλικά των θεμελιών. Παράλληλα, με την καταστροφή των θεμελιών το έδαφος πρέπει να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση.

Η επιβολή των παραπάνω όρων προβλέπεται και στο άρθρο 26 του Ειδικού Χωροταξικού Πλαισίου για τις Α.Π.Ε. (ΚΥΑ 49828/2008) το οποίο ορίζει ότι: «Οι κάτοχοι αδειών λειτουργίας εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. υποχρεούνται, πριν από την καθ' οιονδήποτε τρόπο παύση λειτουργίας της εγκατάστασης, να αποκαθιστούν, με δικές τους δαπάνες και σύμφωνα με τους εγκεκριμένους περιβαλλοντικούς όρους, τους σχετικούς χώρους, μεριμνώντας ιδίως για την αποξήλωση και ασφαλή απομάκρυνση των εγκαταστάσεων, την αποκατάσταση της αυτόχθονης βλάστησης και την εν γένει επαναφορά των πραγμάτων στην προτέρα κατάσταση εφόσον αυτό είναι τεχνικά εφικτό» (www.eletaen.gr).

Η διαδικασία απεγκατάστασης των ανεμογεννητριών είναι σχεδόν ίδια με τη διαδικασία εγκατάστασης της ακολουθώντας όμως την ανάποδη σειρά. Αρχικά απομακρύνονται όλες οι ουσίες οι οποίες είναι δυνητικά επιβλαβείς για το περιβάλλον όπως π.χ. τα λιπαντικά και αποσυνδέεται η γεννήτρια από το δίκτυο με ταυτόχρονη απομάκρυνση των καλωδίων. Στο επόμενο στάδιο αφαιρούνται τα πτερύγια, ο δρομέας, η άτρακτος και ο πυλώνας με τη χρονική σειρά που περιγράφηκε. Στην περίπτωση των υπεράκτιων και παράκτιων ανεμογεννητριών η διαδικασία είναι η ίδια, μόνο που προστίθεται και το επιπλέον κόστος της μεταφοράς των τμημάτων στη στεριά (Μαυροκωστίδου 2019).

Παρακάτω γίνεται μια σχετικά σύντομη αναφορά στους τρόπους ανακύκλωσης των διαφόρων υλικών από τα οποία αποτελούνται οι ανεμογεννήτριες, που είναι γνωστοί και εμπορικά δοκιμασμένοι όσον αφορά στα μέταλλα και το σκυρόδεμα και μια πιο εκτενής αναφορά στους τρόπους ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών των όπου παρουσιάζεται και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

5.1 Ανακύκλωση σκυροδέματος

Το ποσοστό ανακύκλωσης ή και επαναχρησιμοποίησης των αποβλήτων σκυροδέματος μπορεί να φτάσει μέσα από τις κατάλληλες διεργασίες και το 100%. Οι βασικοί τρόποι αξιοποίησης του σκυροδέματος προς ανακύκλωση είναι δύο. Στον ένα υφίσταται θραύση με μηχανικό τρόπο και επαναχρησιμοποιείται ως αδρανές, στην κατασκευή δρόμων ως ασφαλικός τάπητας, γύρω από τσιμεντοσωλήνες για όμβρια, σε έργα βιολογικού καθαρισμού λυμάτων, ως υλικό επιχρωματώσεων, κλπ ενώ στον άλλο ανακυκλώνεται για να παραχθούν άλλα υλικά όπως π.χ πρόσθετα ή υποκατάστατα τσιμέντου (Καμελίδης 2020).

Οι μονάδες ανακύκλωσης σκυροδέματος χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις κινητές αυτοφερόμενες μονάδες οι οποίες εγκαθίστανται στο εργοτάξιο και σε μόνιμα συγκροτήματα μόνιμα ανακύκλωσης σκυροδέματος τα οποία φυσικά έχουν και αρτιότερο τεχνολογικό εξοπλισμό.

- Τα αυτοφερόμενα συγκροτήματα εγκαθίστανται επί τόπου στο έργο και έχουν δυναμική επεξεργασία από 100 m³ έως 400 m³ αδρανών ανά ώρα ανάλογα με το μέγεθός τους. Αποτελούνται από ένα κύριο θραυστήρα, έναν ταινιόδρομο των απορριφθέντων υλικών, ένα δεύτερο θραυστήρα για τα μικρότερα τεμάχια που προέκυψαν από την πρώτη θραύση, συγκρότημα κοσκίνισματος και τέλος ιμάντα μεταφοράς των μεγάλων τεμαχίων που προκύπτουν, τα οποία επανατροφοδοτούνται στον κύριο θραυστήρα. Τα σημαντικότερο πλεονέκτημα των αυτοφερόμενων συγκροτημάτων είναι ότι μειώνουν το κόστος των μεταφορικών κατά πολύ και δεν επιβαρύνουν ιδιαίτερα την κυκλοφορία στους γύρω δρόμους με μεγάλα φορτηγά.
- Τα μόνιμα συγκροτήματα ανακύκλωσης σκυροδέματος είναι ολοκληρωμένα κέντρα με τεχνολογικά εξελιγμένα μηχανήματα θραύσεως, μηχανήματα διαλογής και διαχωρισμού με μαγνήτες ή και μηχανικά, μεγάλη διαβάθμιση κοσκίνων, και μηχανήματα πλύσης των λεπτόκοκκων υλικών. Τα παραγόμενα προϊόντα από τα εργοστάσια ανακύκλωσης είναι ποιοτικά ισάξια ή και ανώτερα από τα πρωτογενή (Ιωάννου 2012).

5.2 Ανακύκλωση μετάλλων ανεμογεννητριών

- Ανακύκλωση χάλυβα:

Όπως είδαμε και παραπάνω ο χάλυβας είναι το υλικό που συναντάμε περισσότερο σε μια ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε όλα σχεδόν τα τμήματα της. Ο χάλυβας είναι ένα κράμα σιδήρου και άνθρακα, το οποίο αναλόγως με την ποιότητα και με την χρήση για την οποία κατασκευάζεται μπορεί να περιέχει και άλλα πρόσμικτα όπως μαγγάνιο, πυρίτιο, φωσφόρο και θείο. Τα χημικά του χαρακτηριστικά επιτρέπουν την συνεχή ανακύκλωσή του χωρίς ιδιαίτερες συνέπειες στην αντοχή την ολκιμότητα και εν γένει στις ιδιότητες του.

Οι δύο πιο γνωστές μέθοδοι ανακύκλωσης του χάλυβα είναι αυτές της καμίνου οξυγόνου (BOF, Basic Oxygen Furnace) και του κλίβανου ηλεκτρικού τόξου (EAF, Electric Arc Furnace). Το βασικό πρόβλημα που προκύπτει κατά την ανακύκλωση του είναι το γεγονός ότι λόγω της ποικιλίας στις ποιότητες του χάλυβα, οι οποίες παρουσιάζουν διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες που σχετίζονται με την περιεκτικότητα του χάλυβα σε άλλα μέταλλα, προκύπτει η δυσκολία στον διαχωρισμό του στην εκάστοτε κατηγορία.

Κατά την ανακύκλωση του χάλυβα με την μέθοδο EAF απομακρύνονται πολλά από τα πρόσθετα στοιχεία στη διαδικασία της τήξης με αποτέλεσμα το κράμα που προκύπτει να μην έχει πάντοτε την επιθυμητή σύσταση και να περιορίζονται οι χρήσεις του σε εφαρμογές με μικρότερες απαιτήσεις. Η μέθοδος BOF έχει πιο λίγες δυνατότητες απομάκρυνσης των ανεπιθύμητων στοιχείων. Λόγω του ότι η αφαίρεση των επιπλέον στοιχείων σαν διαδικασία δεν είναι καθόλου οικονομική προτιμάται η ανάμιξη του scrap με χυτοσίδηρο ώστε να έχουμε καλύτερη χημική σύσταση στο τελικό προϊόν.

- Ανακύκλωση χυτοσιδήρου:

Ο χυτοσίδηρος είναι και πάλι κράμα σιδήρου με άνθρακα, μόνο που σε αντίθεση με τον χάλυβα ο άνθρακας εδώ έχει ποσοστό μεγαλύτερο από 2,1% κ.ο.. Στις ανεμογεννήτριες τον βρίσκουμε στους άξονες, στη γεννήτρια και κάποιες φορές, αναλόγως με τον κατασκευαστή, στον δρομέα και στο κιβώτιο ταχυτήτων. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι η μεγάλη αντοχή στην οξείδωση και στη φθορά, ωστόσο είναι πολύ πιο ψαθυρό συγκριτικά με τον χάλυβα. Ο τρόπος ανακύκλωσης του είναι παρόμοιος με αυτόν του χάλυβα ενώ έχει και αυτός το προτέρημα της συνεχούς ανακύκλωσης.

- Ανακύκλωση χαλκού:

Ο χαλκός είναι το πρώτο από τα μέταλλα που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος για την κατασκευή σκευών, εργαλείων και όπλων και έχει το μεγάλο πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί καμία μεταλλουργική διαδικασία για την παρασκευή του σε καθαρή μορφή. Ο χαλκός είναι ένα μαλακό, εύπλαστο και όλκιμο μέταλλο με πολύ υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Στις ανεμογεννήτριες τον βρίσκουμε κυρίως στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό της όπως πηνία, καλώδια, γεννήτρια κλπ. Το scrap χαλκού που προέρχεται από τις ανεμογεννήτριες είναι συνήθως υψηλής καθαρότητας.

Η διαδικασία ανακύκλωσης scrap χαλκού υψηλής καθαρότητας είναι μια σχετικά εύκολη διαδικασία που περιλαμβάνει αρχικά την τήξη σε κλίβανο ανόδου και στη συνέχεια την χύτευση σε πλίνθους (Μαυροκωστίδου 2019).

- Ανακύκλωση αλουμινίου:

Η ανακύκλωση του αλουμινίου έχει αναλυθεί ήδη παραπάνω στο κεφάλαιο 3.4. Στις ανεμογεννήτριες το αλουμίνιο βρίσκεται στο μεγαλύτερο μέρος του στην άτρακτο ενώ κάποιες φορές χρησιμοποιείται σε μικρά ποσοστά και στον πυλώνα και στα πτερύγια.

- Ανακύκλωση σπάνιων γαιών:

Οι σπάνιες γαίες έχουν τεράστια σημασία για τις νέες τεχνολογίες της εποχής μας καθώς χρησιμοποιούνται σχεδόν σε κάθε σύγχρονο τεχνολογικό προϊόν. Μεγάλη πρόκληση στον τομέα της ανακύκλωσης των σπανίων γαιών αποτελεί η ανακύκλωση από μόνιμους μαγνήτες, τους οποίους συναντάμε στις ανεμογεννήτριες, καθώς το στάδιο της επανάκτησής τους είναι μια διαδικασία η οποία βρίσκεται σε δοκιμαστική φάση. Ωστόσο μελέτες στην Κίνα ανέφεραν ότι η ανάκτηση των σπανίων γαιών από θραύσματα μαγνητών Νεοδυμίου μπορεί να φτάσει σε ποσοστό ακόμη και 99%. Η ανάκτηση από ανακύκλωση των σπανίων γαιών αποτελεί επιτακτική ανάγκη καθώς η αύξηση των τιμών τους είναι συνεχής και αναγκάζει τις εταιρείες όλο και πιο κοντά στην εύρεση νέων καινοτομιών για την ανακύκλωση τους. Προς το παρόν από διάφορες μελέτες που βρίσκονται σε εξέλιξη προβλέπεται ότι η ανακύκλωση των σπάνιων γαιών μελλοντικά θα είναι πιο εφικτή οικονομικά από την εκμετάλλευση νέων κοιτασμάτων (Λισάντερ 2021).

5.3 Ανακύκλωση σύνθετων υλικών πτερυγίων

Η ανακύκλωση των σύνθετων υλικών είναι η μεγαλύτερη πρόκληση στην ανακύκλωση μιας ανεμογεννήτριας καθώς είναι αρκετά πιο σύνθετη και αχαρτογράφητη διαδικασία σε σχέση με την ανακύκλωση των υπολοίπων υλικών της. Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα τμήματα μίας ανεμογεννήτριας που είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά είναι κυρίως τα πτερύγια και σε μικρότερο ποσοστό η άτρακτος και ο δρομέας.

Σε πρώτη φάση όπως αναφέρθηκε και παραπάνω γίνεται η απεγκατάσταση των τμημάτων προς ανακύκλωση από την υπόλοιπη ανεμογεννήτρια, και κατόπιν ο τεμαχισμός τους σε μικρότερα τμήματα. Ο τεμαχισμός γίνεται με διάφορους τρόπους όπως:

- Υδροκοπή:

Αποτελεί μέθοδο κοπής η οποία γίνεται με την εκτόξευση, από ακροφύσιο, μιας πολύ λεπτής δέσμης νερού με πολύ υψηλή πίεση. Έχει πολύ ευρεία εφαρμογή σε διάφορα υλικά, συμπεριλαμβανομένων και των μετάλλων, υψηλή ακρίβεια και είναι φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία, τουλάχιστον όσον αφορά τις εκπομπές σκόνης, θορύβου και θερμότητας. Το βασικό μειονέκτημα είναι ότι έχει σχετικά υψηλή κατανάλωση νερού συγκριτικά με άλλες μεθόδους.

- Συρματοκοπή:

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα χαλύβδινο αδαμαντοφόρο σύρμα, το οποίο τυλίγεται περιμετρικά των λεπίδων της ανεμογεννήτριας. Το σύρμα έχει τη δυνατότητα να κόψει τα διαφορετικά υλικά από τα οποία αποτελούνται οι λεπίδες, συμπεριλαμβανομένων του ξύλου και των μετάλλων, ενώ δεν έχει περιορισμό στις διαστάσεις των λεπίδων. Επίσης αποτελεί φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία, όσον αφορά τις εκπομπές σκόνης και θορύβου ενώ το νερό που χρησιμοποιείται, κυρίως για λόγους ψύξης, από το μηχάνημα τύλιξης έχει τη δυνατότητα να ανακυκλώνεται και να επαναχρησιμοποιείται. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι είναι χρονοβόρα.

- Δισκοπρίονο:

Διαφορετικοί τύποι και μεγέθη οδοντωτών δίσκων (δισκοπρίονα), χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διαδικασία τεμαχισμού, ο οποίος μπορεί να είναι από φορητοί έως και λεπίδες των 2 m. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί ανεξάρτητες κοπές προς όλες τις κατευθύνσεις, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα εξαγωγής επιλεγμένων υλικών, ενώ το σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι παράγει σκόνη και θόρυβο.

- Υδραυλικός κόφτης:

Η πιο κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον τεμαχισμό των λεπίδων των ανεμογεννητριών είναι αυτή του κόφτη. Λέγεται υδραυλικός λόγω της ταυτόχρονης χρήσης νερού, με μορφή ψεκασμού, στο σημείο τομής ώστε να αποφευχθεί η εξάπλωση της σκόνης και των ινών που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Παρόλα αυτά ο γενικότερος καθαρισμός της περιοχής είναι απαραίτητος στο πέρας της διαδικασίας.

Αναλόγως με τους κινδύνους που προκαλεί στο περιβάλλον και τους κανόνες ασφάλειας και υγιεινής, η εκάστοτε διαδικασία κοπής πρέπει να αξιολογείται και κατόπιν να επιλέγεται. Τα σύνθετα υλικά αφού ολοκληρωθεί η κοπή και διαχωριστούν από τον μεταλλικό σκελετό τους, ο οποίος οδηγείται σε μονάδες ανακύκλωσης μετάλλων, διακινούνται για επεξεργασία σε εξειδικευμένες εγκαταστάσεις. Η επεξεργασία αυτή εξαρτάται από παράγοντες όπως η τελική χρήση για την οποία προορίζονται αλλά και η αρχική τους σύνθεση. Παγκοσμίως υπάρχουν πολλές εταιρείες ανακύκλωσης σύνθετων υλικών , ορισμένες από τις μεγαλύτερες είναι οι εξής:

- *ELG Carbon Fibre, Ηνωμένο Βασίλειο (www.elgcf.com)*
- *Eco-Wolf, Η.Π.Α. (www.ecowolfinc.com)*
- *CFK Valley Stade Recycling, Γερμανία (www.cfk-recycling.de)*
- *Neocomp, Γερμανία (www.neocomp.eu)*
- *TRC, Ισπανία (www.trcsl.com)*
- *Procotex, Βέλγιο (en.procotex.com)*

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες και πιο διαδεδομένες διαδικασίες ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών είναι η μηχανική επεξεργασία, η πυρόλυση και η παραγωγή τσιμέντου.

- Μηχανική επεξεργασία:

Κατά τη μηχανική επεξεργασία των σύνθετων υλικών, προηγείται ο τεμαχισμός σε μικρότερα κομμάτια, μεγέθους ανάλογου με την χωρητικότητα που έχουν τα μηχανήματα της εκάστοτε εταιρίας ανακύκλωσης. Έπειτα τα υλικά τοποθετούνται σε σφυρόμυλο όπου θρυμματίζονται και στην συνέχεια αλέθονται. Τέλος τα αλεσμένα υλικά περνούν από κόσκινα με τελικό σκοπό να χωριστεί σε ίνες και ρητίνες. Το μειονέκτημα της παραπάνω μεθόδου είναι ότι καταστρέφει τις ίνες, οι οποίες δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για την παραγωγή σύνθετων υλικών, ωστόσο τα ανακτώμενα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά πλήρωσης ή ενίσχυσης. Παρόλα αυτά η χρήση αυτών των υλικών ως υλικά πλήρωσης, δεν είναι εμπορικά βιώσιμη λόγω του πολύ χαμηλού κόστους άλλων εναλλακτικών υλικών πληρώσεως. Μία άλλη, πιο επιτυχημένη χρήση των ανακτώμενων υλικών είναι ως καύσιμο, καθώς αποτελούνται από υψηλό ποσοστό οργανικής ρητίνης (Job, 2010).

- Θερμική επεξεργασία:

Η πιο διαδεδομένη θερμική επεξεργασία η οποία χρησιμοποιείται για την ανακύκλωση των σύνθετων υλικών είναι η πυρόλυση. Η διαδικασία αυτή, έχει υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας της τάξης των 450 - 600°C, αναλόγως πάντα με το υλικό της μήτρας και τις επικρατούσες συνθήκες πίεσης. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες εφαρμόζονται όταν η μήτρα είναι από πολυεστέρα ενώ οι υψηλότερες στην περίπτωση που έχουμε εποξική ή θερμοπλαστική μήτρας. Από την πυρόλυση, τα υλικά τα οποία ανακτώνται, είναι κυρίως αέρια και έλαια, τα οποία χρησιμοποιούνται ως καύσιμα για την παραγωγή ενέργειας, καθώς και στερεά προϊόντα όπως ίνες και τέφρα. Στην ειδική περίπτωση που η μήτρα είναι κατασκευασμένη από θερμοπλαστικό υλικό, μπορεί να γίνει ανακύκλωση του υλικού (Mishnaevsky 2017). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μηχανικές ιδιότητες των ινών που προκύπτουν από την πυρόλυση είναι συνάρτηση των συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης

κατά την διάρκεια της διαδικασίας. Έχει παρατηρηθεί ότι το μέγεθος των ινών, και ιδιαιτέρως του γυαλιού, μειώνονται πολύ από τις χημικές και θερμικές διαδικασίες, κάτι το οποίο καθιστά την πυρόλυση όχι και τόσο καλή μέθοδο για την ανακύκλωση του γυαλιού καθώς μείωση του μεγέθους σημαίνει και μείωση της αντοχής. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ο το κόστος ανάκτησης των ινών γυαλιού αυξάνεται κατά πολύ και προς το παρόν κρίνεται ότι η μέθοδος αυτή είναι οικονομικά ασύμφορη. Υπάρχουν βέβαια περιπτώσεις όπου η μέθοδος της πυρόλυσης είναι αποτελεσματική και αυτό συμβαίνει κυρίως όταν έχουμε να ανακυκλώσουμε σύνθετα υλικά με μήτρα θερμοπλαστικής ρητίνης, όπου τα υλικά ανακτώνται σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες και έτσι και οι ίνες που προκύπτουν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άλλες εφαρμογές.

Όσον αφορά την ανακύκλωση των ινών άνθρακα, η επικρατούσα μέθοδος που προτιμούν οι εταιρίες ανακύκλωσης αυτό το χρονικό διάστημα περιλαμβάνει την θέρμανση σε κλίβανο με των σύνθετων υλικών διατηρώντας σταθερή πίεση και θερμοκρασία. Αυτή η μέθοδος είναι αρκετά αποτελεσματική όσον αφορά την ποιότητα του τελικού προϊόντος καθώς οι ίνες άνθρακα που προκύπτουν διατηρούν υψηλό ποσοστό των μηχανικών τους ιδιοτήτων, περίπου 90%. Οι ίνες άνθρακα που θα ανακτηθούν από την παραπάνω διαδικασία, οδηγούνται σε επιπλέον επεξεργασία έτσι ώστε να καταλήξουν ως τελικό προϊόν πέλλετ, υφάσματα, σκόνη και μικρά κομμάτια. Με τη σειρά τους αυτά τα προϊόντα θα βρουν διάφορες χρήσεις στη βιομηχανία. Πιο συγκεκριμένα η σκόνη που προκύπτει χρησιμοποιείται στα εποξικά υλικά ως επένδυση και ως ενισχυτικό των θερμοπλαστικών ρητινών. Τα υφάσματα από ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σύνθετων υλικών και έχουν ευρεία χρήση σε νέες τεχνολογίες στατικών ενισχύσεων λόγω της υψηλής ανθεκτικότητάς του και της μεγάλης του ευκαμψίας. Τα πέλλετ αλλά και τα μικρά κομμάτια από ίνες άνθρακα που προκύπτουν από την παραπάνω περιγραφόμενη διαδικασία είναι ιδανικό ενισχυτικό θερμοπλαστικών και θερμοσκληρυνόμενων ρητινών με διάφορες εφαρμογές όπως για παράδειγμα στην κατασκευή αθλητικού εξοπλισμού.

- Παραγωγή τσιμέντου:

Η ένωση ευρωπαϊκών βιομηχανιών σύνθετων υλικών (EuCIA, European Composites Industry Assosiation) έχει προτείνει μια νέα εφαρμογή για τα σύνθετα υλικά τα οποία περιέχουν ίνες γυαλιού. Αυτή είναι να καίγονται τα υλικά της μήτρας μαζί με άλλα καύσιμα σε κλίβανους και οι απομένουσες ίνες γυαλιού να προωθούνται ως συστατικό για την παραγωγή τσιμέντου. Αυτή η διαδικασία είναι προτιμότερη από την αποτέφρωση, καθώς τα υλικά που παράγονται από την καύση των ινών γυαλιού είναι ανακυκλώσιμα ενώ στην αποτέφρωση απομένουν ως άχρηστο υλικό (Μαυροκωστίδου 2019).

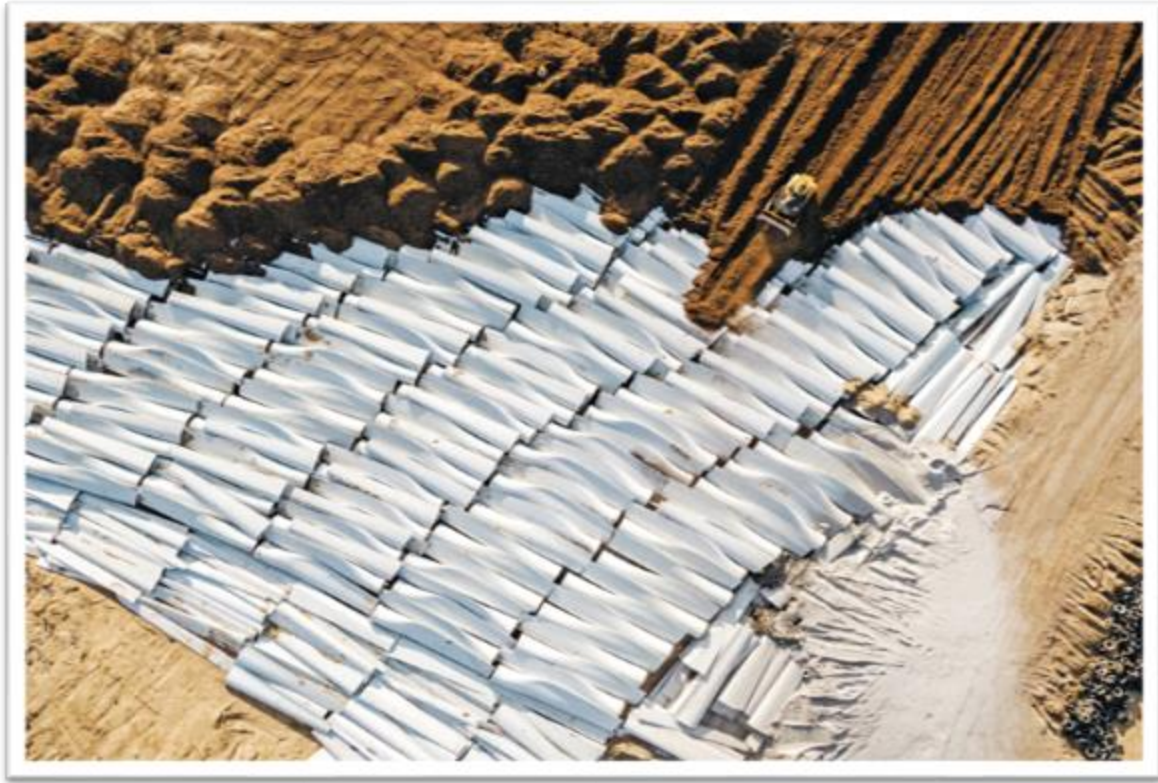
- Plasma:

Μια νέα και ανερχόμενη μέθοδος επεξεργασίας για την ανακύκλωση των πτερυγίων είναι η χρήση συσκευών Plasma. Η τεχνολογία αυτή αποδεικνύεται ότι έχει την ικανότητα ανακύκλωσης πτερυγίων ανεμογεννητριών και ανάκτησης προϊόντων, όπως ίνες και 'σκόνη' γυαλιού, τα οποία φαίνεται να βρίσκουν εφαρμογή κατάλληλων για κατασκευαστικές και μονωτικές εφαρμογές, χωρίς να επιβαρύνουν το περιβάλλον καθώς τα τελικά προϊόντα δεν περιέχουν πρόσθετα ή ακαθαρσίες. Η διαδικασία πραγματοποιείται με τη χρήση μιας συγκεκριμένης χημικής σύστασης με έναν αντιδραστήρα ρεύματος και έναν γραμμικό κόφτη Plasma συνεχούς ρεύματος με ισχύ έως και 100 KW. Αποδείχθηκε ότι η δομή των τελικών προϊόντων εξαρτάται από το υψηλό ιξώδες της λιωμένης μάζας (Casares 2022).

5.3.1 Επιτυχημένα παραδείγματα ανακύκλωσης πτερυγίων ανεμογεννητριών

Λόγω του μεγάλου μεγέθους τους αλλά και της σύνθεσης των υλικών τους, τα πτερύγια των ανεμογεννητριών και η διαχείριση τους στο τέλος του κύκλου ζωής τους, εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση. Παρόλο που υπάρχουν οι μέθοδοι που αναφέρθηκαν παραπάνω, κάποιες φορές τα πτερύγια των ανεμογεννητριών καταλήγουν σε γιγάντιες χωματερές, όπως

φαίνεται και στην Εικόνα 5.1, με ότι επακόλουθα μπορεί να έχει αυτή η ενέργεια για το περιβάλλον.



Εικόνα 5.1 Ταφή πτερυγίων ανεμογεννητριών

Πηγή: cen.acs.org

Σε αρκετές ευρωπαϊκές χώρες, υπάρχει η τάση να επαναχρησιμοποιούνται τα απεγκατεστημένα πτερύγια σε διάφορους τομείς, γεγονός το οποίο παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Για παράδειγμα στην Ολλανδία, και πιο συγκεκριμένα στο Ρότερνταμ, η αρχιτεκτονική ομάδα Superuse Studios σχεδίασε την ανακαίνιση μια παιδικής χαράς, με τη χρήση πέντε πτερυγίων ανεμογεννητριών που είχαν απορριφθεί. Η πρότυπη παιδική χαρά, η οποία φαίνεται και στην Εικόνα 5.2, που ονομάζεται Wikado και έχει επιφάνεια 1200 m², και τα κομμάτια των πτερυγίων έχουν χρησιμοποιηθεί για να κατασκευαστεί λαβύρινθος και ιδιαίτεροι πύργοι, τσουλήθρες παγκάκια και άλλα.



Εικόνα 5.2 Παιδική χαρά Wikado, Ρότερνταμ, Ολλανδία.

Πηγή: www.archello.com

Στο Κορκ της Ιρλανδίας εγκαταστάθηκε το 2021, από την εταιρία ανακύκλωσης Anmet σε συνεργασία με την εταιρία GP Renewables Group, η πρώτη πεζογέφυρα και γέφυρα ποδηλάτων η οποία είναι κατασκευασμένη από πτερύγια ανεμογεννήτριας. Τρία πτερύγια ανεμογεννητριών χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της πεζογέφυρας η οποία πήρε την ονομασία «Blade Bridge». Αυτά τα πτερύγια μήκους 14 m βγήκαν από μια παροπλισμένη ανεμογεννήτρια τύπου Nordex 250 kW που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1994. Το πρώτο πτερύγιο χρησιμοποιήθηκε ως δοκίμιο για να γίνουν οι απαραίτητες δοκιμές αντοχής, τα άλλα δύο αντικατέστησαν τις χαλύβδινες δοκούς που θα τοποθετούνταν σε κάθε πλευρά μιας μικρής γέφυρας τυπικής κατασκευής. Η γέφυρα είναι αποτέλεσμα τριετούς έρευνας και εργασίας, και η δομή της πεζογέφυρας έχει κατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας με στόχο την εμπορική διάθεση. Στην εικόνα που ακολουθεί βλέπουμε μια άποψη της εν λόγω γέφυρας.



Εικόνα 5.3 Πεζογέφυρα Blade Bridge, Κορκ, Ιρλανδία

Πηγή: <https://rte.ie>

Επί μακρόν υποστηρικτής της αιολικής ενέργειας, η Δανία είναι άξια προσοχής για την πρωτοβουλία που ανέθεσε στον κατασκευαστή ανεμογεννητριών Siemens Gamesa να ανακυκλώσει πτερύγια. Το αποτέλεσμα ήταν η εταιρία να μετατρέψει το μακρύ τμήμα του πτερυγίου σε ένα υπαίθριο στέγαστρο - χώρο στάθμευσης ποδηλάτων στο λιμάνι του Aalborg, ώστε να προστατεύονται από τις καιρικές συνθήκες. Αν και η Siemens Gamesa δεν σκοπεύει να ξεκινήσει μια μεγαλύτερης κλίμακας πρωτοβουλία για την εγκατάσταση παρόμοιων σχεδίων, είναι πολύ ενθαρρυντικό νέο ότι κυκλοφόρησε πρόσφατα νέες πλήρως ανακυκλώσιμες λεπίδες που μπορούν να μετατραπούν σε σκάφη, αμαξώματα οχημάτων αναψυχής και άλλα έργα στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Στην Εικόνα 5.4 βλέπουμε το στέγαστρο σε χρήση.



Εικόνα 5.4 Στέγαστρο ποδηλάτων, Ααλμποργκ, Δανία

Πηγή: www.designboom.com

Σε αυτή την κατεύθυνση κινείται η ομάδα σχεδιασμού Re-Wind Network η οποία παρουσιάζει σχέδια και λεπτομέρειες δομών και προϊόντων που κατασκευάζονται από πτερύγια ανεμογεννητριών που έχουν επαναχρησιμοποιηθεί στο τέλος της ζωής τους, και τα οποία είναι διαθέσιμα από το δίκτυο Re-Wind. Μάλιστα στον δεύτερο κατάλογο της ομάδας ο οποίος εκδόθηκε το φθινόπωρο του 2022, υπάρχει μια ενότητα για τις Θαλάσσιες Κατασκευές όπως πλωτές πλατφόρμες φωτοβολταϊκών, προβλήτες και σηματοδότες, καθώς και νέες σελίδες για τις γέφυρες όπως η BladeBridge στο Κορκ της Ιρλανδίας που αναφέρθηκε παραπάνω και άλλες παρόμοιες κατασκευές. Το Re-Wind Network είναι ένα δίκτυο καθηγητών, προσωπικού και φοιτητών σε πέντε ακαδημαϊκά ιδρύματα : Georgia Institute of Technology, University College Cork, Queen's University Belfast, City University of New York και Munster Technological University - και θυγατρικών αυτών.

Τα μοντέλα των πτερυγίων που χρησιμοποιούνται στα σχέδια κατασκευάστηκαν στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Τζόρτζια χρησιμοποιώντας εσωτερικό λογισμικό από σαρώσεις LiDAR και τα γραφικά παράγονται σε λογισμικό Rhinoceros® και Enscape™.

Τα πτερύγια που χρησιμοποιούνται στα σχέδια παρατίθενται παρακάτω και αντιπροσωπεύουν τυπικά μεγέθη και μήκη που υπάρχουν αυτή τη στιγμή σε λειτουργία σε όλο τον κόσμο (www.re-wind.info). Πιο συγκεκριμένα:

1. Πτερύγιο LM 13,4 m από τουρμπίνα Nordex N29 250 kW.
2. Πτερύγιο 21 m από τουρμπίνα Vestas V44 600 kW.
3. Πτερύγιο 37 m από τουρμπίνα General Electric GE 1,5-77 1,5 MW.
4. Πτερύγιο 46,7 m από τουρμπίνα Liberty Clipper C96 2,5 MW.
5. Πτερύγιο 45 m από τουρμπίνα Siemens Gamesa SWT-2.3-93

Αν και αυτής της κλίμακας οι κατασκευές, σίγουρα δεν θα μπορούσαν να δώσουν οριστική λύση στο πρόβλημα της ανακύκλωσης των πτερυγίων των ανεμογεννητριών, σίγουρα είναι αισιόδοξο ότι υπάρχουν διάφορες σκέψεις και λύσεις οι οποίες μελλοντικά μπορούν έστω και σε κάποιο ποσοστό να λύσουν το πρόβλημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεράστια αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης σε ενέργεια, λόγω της αύξησης του πληθυσμού της Γης αλλά των μεγάλων απαιτήσεων σε ενέργεια των νέων τεχνολογιών, αναπόφευκτα μας οδηγεί και στην μεγάλη αύξηση παραγωγής ενέργειας. Οι παραδοσιακές μορφές ενέργειας αν και ακόμη κατέχουν μεγάλο μερίδιο από την παγκόσμια διανομή τείνουν να αντικατασταθούν από τις, πιο φιλικές στο περιβάλλον και ανεξάρτητες από γεωπολιτικά παιχνίδια και συμφέροντα, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Ερευνητικές ομάδες και εταιρίες από όλα τα μήκη και πλάτη της Γης κάνουν αγώνα δρόμου προς αυτή την κατεύθυνση με σκοπό σε λίγα χρόνια το μεγαλύτερο ποσοστό της παγκόσμιας καταναλισκόμενης ενέργειας να προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Η μεγάλη πρόκληση με τις ΑΠΕ, είναι η ανάλυση του κύκλου ζωής τους και η διαχείριση τους στο τέλος αυτής. Όπως αναλύθηκε παραπάνω, σύμφωνα με την εγκατεστημένη ισχύ σήμερα, θα προκύψουν από φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες μαζί απόβλητα βάρους περίπου 600.000 t και αξίας άνω των 100.000.000 €, μόνο για τη χώρα μας. Από αυτά το μεγαλύτερο ποσοστό, είναι γυαλί και χάλυβας, από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες αντίστοιχα, τα οποία είναι υλικά σχεδόν πλήρως ανακυκλώσιμα. Από την άλλη θα προκύψουν και απόβλητα της τάξης των 40.000 t σύνθετων υλικών, από τα πτερύγια των ανεμογεννητριών, των οποίων η ανακύκλωση αποτελεί μεγάλη πρόκληση. Γνώμονας φυσικά είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αλλά και οι απαιτήσεις της κυκλικής οικονομίας. Η περίοδος που διανύουμε αποτελεί κρίσιμη καμπή καθώς τώρα αρχίζουν οι πρώτες εγκατεστημένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να φτάνουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Καθώς η εγκατεστημένη ισχύς αυξάνεται διαρκώς και με μεγάλη ένταση, είναι σίγουρο ότι μελλοντικά θα πρέπει να είμαστε σε ετοιμότητα, ώστε να διαχειριστούμε το πολύ μεγάλο ποσοστό αποβλήτων που θα προκύψουν από τις ΑΠΕ. Και αυτό γιατί αν δεν διαχειριστούμε σωστά τα απόβλητα αυτά, δεν θα αποτελούν οι ΑΠΕ μορφές πράσινης ενέργειας και ο σκοπός τους θα έχει επιτευχθεί κατά το ήμισυ. Θα έχουν μεν καλύψει τις αυξημένες ανάγκες μας για ενέργεια, θα αποτελούν όμως παράγοντες μόλυνσης και ρύπανσης του περιβάλλοντος. Για να μην φτάσουμε στο σημείο αυτό, οι κατευθύνσεις που πρέπει να ακολουθήσουν όλοι οι παράγοντες που εμπλέκονται με τις ΑΠΕ είναι δύο.

Πρώτον θα πρέπει να εξελιχθούν οι υφιστάμενες μέθοδοι οι οποίες υπάρχουν για την ανακύκλωση όλων των υλικών που είδαμε παραπάνω και χρησιμοποιούνται στις ΑΠΕ, κάποια από τα οποία είναι δυνητικά επικίνδυνα για το περιβάλλον, να αναπτυχθούν νέες μέθοδοι περισσότερο αποδοτικές και φυσικά όλοι οι εμπλεκόμενοι να τηρούν την ισχύουσα νομοθεσία περί εγκατάστασης, διαχείρισης και ανακύκλωσης.

δεύτερο και πολύ σημαντικό είναι η εξέλιξη των ίδιων των ΑΠΕ, να μας οδηγήσει στην κατασκευή τους με τη χρήση λιγότερων υλικών, πιο εύκολα προσβάσιμων, πιο φιλικών προς το περιβάλλον και πλήρως ανακυκλώσιμων, σε αντικατάσταση αυτών τα οποία χρησιμοποιούνται έως σήμερα και δεν πληρούν τις παραπάνω προδιαγραφές.

Είναι σχεδόν βέβαιο ότι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εάν τηρηθούν τα παραπάνω, θα συμβάλλουν σημαντικά στη βιώσιμη αειφόρο ανάπτυξη, ενώ θα αποτελέσουν στο μέλλον την κύρια πηγή ενέργειας η οποία θα τροφοδοτεί τον πλανήτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Δημοσιεύσεις - Μελέτες

Αδαλής, Γεώργιος, Διαχείριση και αξιοποίηση αποβλήτων έργων κατασκευής και συντήρησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας φωτοβολταϊκών πάρκων, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2019.

Γεωργίου, Ιάσωνας, Μελέτη εξαρτημάτων από σύνθετα υλικά για χρήση σε ιστία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2018.

ΕΛΒΑΛ Α.Ε., Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για την τροποποίηση της Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων της Μονάδας Παραγωγής Προϊόντων Έλασης Αλουμινίου της εταιρίας ΕΛΒΑΛ Α.Ε., TERRANOVA Ε.Π.Ε., 2017.

Ιωάννου, Χρυσούλα, Ανακύκλωση Σκυροδέματος, Ενεργειακό Ισοζύγιο και Αποτύπωμα Άνθρακα, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2012.

Καμελίδης, Ανδρέας Φραντζέσκος, Ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων : Ποιοτική σύσταση, χαρακτηριστικά, στατιστικά στοιχεία και μέθοδοι και προοπτικές επαναχρησιμοποίηση, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2020.

Λαζάρης, Λισάντερ, Σπάνιες Γαίες : Προοπτικές και προβλήματα αξιοποίησης, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2021.

Μαμάσης, Νικόλαος, Σημειώσεις από το μάθημα Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2020.

Μαυροκωστίδου, Καλλιόπη, Ανακύκλωση Υλικών που χρησιμοποιούνται σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2019.

Μπίρδας, Μιχαήλ, Βέλτιστος Δομικός Σχεδιασμός Ανεμογεννητριών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012.

Σιμιδάλας, Γεώργιος, Σταμόπουλος, Κωνσταντίνος, Ανεμογεννήτριες και Αιολικά πάρκα, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε., Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, 2018.

Τζουνάκος, Βασίλειος, Ανάλυση κύκλου ζωής τεχνολογιών αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα με έμφαση στη διαχείριση του τέλους ζωής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2021.

Τοκατλίδης, Ζαχαρίας, Ανακύκλωση Υλικών φωτοβολταϊκών Διατάξεων στον Ελλαδικό Χώρο, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2019.

Andersen, Niklas, Wind turbine: Characterisation of waste material, Department of Building, Energy and Environmental Engineering, Univeristy of Ghavle, 2015.

Bio intelligence Service, Study on Photovoltaic Panels supplementing the impact assessment for a recast of the weee directive, Final Report, European Commission DG ENV, 2011

Camille Marini, Isabelle Blanc, Parikhith Sinha, Andreas Wade, A Prospective Mapping Of Environmental Impacts Of Large Scale Photovoltaic Ground Mounted Systems, 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2014.

Casares-Long, J.J., Lega, M., Rada, E., Waste Management and Environmental Impact XI, WITpress Publications, 2022.

J. F Manwell, J.F.M, Mc Gowan, J.G., Rogers, A.L., Wind Energy Explained, Theory Design and Application, Second Edition, WILEY Publications, 2019.

Job, Stella, Composite Recycling : Summary of recent research and development, Composites Sector Group of the Materials KTN, Technology Strategy Board, 2010.

Lunardi, Marina, Alvarez-Gaitan J.P., Bilbao, J.I., Corkish, Richard, Comparative Life Cycle Assessment of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules, The Australian Centre for Advanced Photovoltaics, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, MDPI, 2016.

Mishnaevsky, Leon, Branner, Kim, Nørgaard, Helga, Petersen, Beauson, Justine, McGugan, Malcolm, Sørensen, Bent, Materials for wind turbine blades: An overview, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2017.

Mone, Christopher, Hand, Maureen, Bolinger, Mark, Rand, Joseph, Heimiller, Donna, Ho, Jonathan, Cost of Wind Energy Review, National Renewable Energy Laboratory, 2015.

Rodriguez-Vieitez, Elena, Eder, Peter, Villanueva, Alejandro, Saveyn, Hans, End-of-Waste Criteria for Glass Cullet : Technical Proposals, Institute for Prospective Technological Studies, European Commission, 2011.

Weckend, Stephane, Wade, Andreas, Heath, Garvin, End of life management, Solar Photovoltaic Panels, IRENA - IEA PVPS, 2016.

Ιστοσελίδες

<https://www.weeenergy.com>

<https://ourworldindata.org/>

<https://aurorasolar.com/>

<https://www.solarquotes.com.au>

<https://www.wikipedia.org>

<https://na.panasonic.com>

<https://www.lg.com>

<https://www.elval.com>

<https://www.eib.org>

<https://www.energypress.gr>

<https://www.wikiwand.com>

<https://mech.ntua.gr>

<https://www.eletaen.gr>

<https://www.archello.com>

<https://www.designboom.com>

<https://ec.europa.eu/eurostat>

www.makermolecules.com/

<https://www.helapco.gr/>

<https://www.pvcycle.org>

<https://renewables.messaritis.gr>

<https://us.sunpower.com>

<http://www.solwave-pv.com>

<https://www.atem-oe.gr>

<https://www/elperes.gr>

<https://www.researchgate.net>

<https://www.the-tech-addict.com>

<https://www.wisegrid.eu>

<https://cen.acs.org/>

<https://www.rte.ie>

<https://www.re-wind.info>

