



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών  
Σπουδών (ΔΠΜΣ) του ΕΛΕΜΠΑ:  
«Οργάνωση και Διοίκηση για Μηχανικούς»

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Φοιτήτρια: ΒΑΒΑΔΑΚΗ ΚΑΤΕΡΙΝΑ, Α.Μ. mto 214

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. ΡΟΜΠΟΓΙΑΝΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ



ΗΡΑΚΛΕΙΟ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2023

## *Ευχαριστίες*

*Ευχαριστώ ειλικρινά τον καθηγητή μου Δρ. Ιωάννη Ρομπογιαννάκη, για την καθοδήγηση, την κατανόηση και την υπομονή του. Επιπλέον, ευχαριστώ το σύνολο των καθηγητών του μεταπτυχιακού προγράμματος για την άριστη συνεργασία μας και την συμβολή τους στην ολοκλήρωση των σπουδών μου. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη, την συμπαράσταση και την υπομονή τους.*

*Την εργασία αυτή καθώς και όλη μου την προσπάθεια κατά την διάρκεια αυτού του μεταπτυχιακού, την αφιερώνω στην μνήμη της αδερφής μου της Μαρίας, που αν και έφυγε νωρίς, θα είναι για πάντα μαζί μου.*

## Περίληψη

Η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης με τελικό στόχο την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας ως το 2050. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής αιολικής και φωτοβολταϊκής ενέργειας, δηλαδή τα φωτοβολταϊκά και τα αιολικά πάρκα, αυξάνονται ραγδαία και κατά συνέπεια αυξάνονται αναλόγως τα απόβλητα που προέρχονται από αυτές. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος, έως το 2030, αναμένεται να παραχθούν 1,5 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων από φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις και 4,75 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων από αιολικές εγκαταστάσεις, αναδεικνύοντας την πρόκληση της βιώσιμης διαχείρισης τους. Με τις εφαρμοζόμενες μεθόδους διαχείρισης και επεξεργασίας των αποβλήτων αυτών σήμερα, καθίσταται δυνατή η ανακύκλωση του 90% της μάζας των ανεμογεννητριών και του 85% της μάζας των φωτοβολταϊκών πάνελ. Τα πιο δύσκολα στην διαχείριση απόβλητα είναι αυτά που προκύπτουν από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες, εξαιτίας της δυσκολίας στην αποσυναρμολόγηση τους, και τα σύνθετα πλαστικά από τα πτερύγια των ανεμογεννητριών. Οι διαθέσιμες τεχνολογίες για την ανακύκλωση και την ανάκτηση των αποβλήτων αυτών, είτε δεν έχουν ακόμα το επίπεδο ωριμότητας για να εφαρμοστούν, είτε δεν είναι ανταγωνιστικές ώστε να εδραιωθούν στην αγορά. Με σκοπό οι αιολικές και φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις να αποτελέσουν μια αειφορική λύση για την παραγωγή ενέργειας, με μειωμένες επιπτώσεις για το περιβάλλον, χρειάζεται να εφαρμοστεί μια ολοκληρωμένη και βιώσιμη πολιτική για την διαχείριση των αποβλήτων τους, βασισμένη στο μοντέλο της κυκλικής οικονομίας.

## **Abstract**

The energy production from renewable energy sources is one of the most important targets of the European Union for achieving climate neutrality by 2050. Wind and solar power generation installations, i.e. solar and wind farms, are increasing rapidly. Consequently the waste produced by them, is increasing accordingly. According to the European Environment Agency, by 2030, 1.5 million tons of waste from photovoltaic power installations and 4.75 million tons of waste from wind power installations are expected to be produced, highlighting the challenge for their sustainable management. Current treatment methods manage to recycle up to 90% of the mass of wind turbines and up to 85% of the mass of photovoltaic panels. The most difficult wastes to manage, are those from photovoltaic cells due to the difficulty in disassembly and the composite plastics from wind turbine blades. The available technologies for recycling and recovery of these wastes are neither at the proper maturity level to be implemented, nor competitive enough to establish themselves in the market. In order for wind and photovoltaic power plants to be a viable solution for energy production, with reduced environmental impacts, an integrated and sustainable policy for managing their waste, based on a circular economy model, needs to be implemented.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	4
<b>1.1</b> Ενεργειακό ζήτημα και Κλιματική Αλλαγή.....	4
<b>1.2</b> Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας - Τάσεις και ρυθμοί Ανάπτυξης.....	6
<b>1.3</b> Αιολική και Ηλιακή Φωτοβολταϊκή Ενέργεια .....	9
<b>1.4</b> Διαχείριση Αποβλήτων από Αιολικούς και Φωτοβολταϊκούς Σταθμούς Παραγωγής Ενέργειας .....	11
<b>1.5</b> Πολιτική και Νομοθεσία .....	12
<b>2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</b> .....	16
<b>2.1</b> Φωτοβολταϊκά συστήματα – Περιγραφή Λειτουργίας.....	16
<b>2.2</b> Περιγραφή Δομής φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	17
<b>2.2.1</b> Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Κρυσταλλικού Πυριτίου.....	17
<b>2.2.2</b> Φωτοβολταϊκά στοιχεία Λεπτών επιστρώσεων .....	18
<b>2.2.3</b> Νέες Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών Στοιχείων .....	19
<b>2.3</b> Δομή Φωτοβολταϊκού Πλαισίου.....	21
<b>2.4</b> Υλικά κατασκευής φωτοβολταϊκών πάνελ.....	22
<b>2.5</b> Απόβλητα Φωτοβολταϊκών συστημάτων - Προβλέψεις .....	23
<b>3. ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</b> .....	26
<b>3.1</b> Περιγραφή Λειτουργίας Αιολικών Συστημάτων.....	26
<b>3.2.</b> Γενική αρχή λειτουργίας ανεμογεννητριών.....	27
<b>3.3</b> Περιγραφή Τύπων και Δομής Ανεμογεννητριών .....	28
<b>3.4</b> Υλικά κατασκευής ανεμογεννήτριας.....	31
<b>3.5</b> Απόβλητα Ανεμογεννήτριας – Προβλέψεις.....	35
<b>4. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ</b> .....	40
<b>4. 1</b> Πολιτική Διαχείρισης Φωτοβολταϊκών Αποβλήτων στην Ε.Ε. ....	40
<b>4. 2</b> Διαχείριση Αποβλήτων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων στην Ε.Ε....	41
<b>4. 3</b> Τεχνολογίες Ανακύκλωσης Φ/Β Πλαισίων.....	44
<b>4.3.1</b> Μέθοδοι αφαίρεσης πολυστρωματικής δομής Φ/Β πλαισίων .....	44
<b>4.3.2</b> Τεχνολογίες ανακύκλωσης Υψηλής αξίας για Απόβλητα Φ/Β Πυριτίου .....	48
<b>4.3.3.</b> Μέθοδοι επεξεργασίας για Φ/Β πλαίσια λεπτών επιστρώσεων ...	48

<b>4.4 Ερευνητικές Μέθοδοι Επεξεργασίας Φ/Β Πλαισίων.....</b>	<b>49</b>
<b>4. 5 Συγκριτική Ανάλυση Τεχνολογιών Ανακύκλωσης Φ/Β πλαισίων ..</b>	<b>50</b>
<b>4.5 Το μέλλον στην Ανακύκλωση των Φ/Β αποβλήτων .....</b>	<b>54</b>
<b>5. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>57</b>
<b>5.1. Απόβλητα Αιολικών Συστημάτων και Ευρωπαϊκή Πολιτική Διαχείρισης.....</b>	<b>57</b>
<b>5.2. Μέθοδοι ανακύκλωσης σύνθετων υλικών ανεμογεννητριών ..</b>	<b>59</b>
<b>5.2.1 Συν-επεξεργασία στην βιομηχανία τσιμέντου .....</b>	<b>59</b>
<b>5.2.2 Μηχανική επεξεργασία .....</b>	<b>60</b>
<b>5.2.3 Θερμική Επεξεργασία (Πυρόλυση, Πυρόλυση μικροκυμάτων και Πυρόλυση ρευστοποιημένης κλίνης).....</b>	<b>61</b>
<b>5.2.4 Χημική Επεξεργασία.....</b>	<b>62</b>
<b>5.2.5 Ηλεκτρομηχανική διαδικασία .....</b>	<b>62</b>
<b>5.3. Συγκριτική επεξεργασία των μεθόδων ανακύκλωσης.....</b>	<b>63</b>
<b>5.4 Το μέλλον στην Ανακύκλωση των Σύνθετων Υλικών Πτερυγίων Ανεμογεννητριών .....</b>	<b>65</b>
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>68</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>73</b>

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3. 1: Ποσοστό υλικών στις ανεμογεννήτριες Vestas..... 35

Πίνακας 5. 1: Σύγκριση μεθόδων ανακύκλωσης υλικών πτερυγίων ανεμογεννητριών . 63

## ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ/ ΕΙΚΟΝΩΝ

Σχήμα 1. 1: Παγκόσμια Ενεργειακή Κατανάλωση..... 7

Σχήμα 1. 3: Μερίδιο ορυκτών καυσίμων στην Ε.Ε..... 8

Σχήμα 1. 4: Μερίδιο Ανανεώσιμων πηγών Ενέργειας στην Ε.Ε. για το 2021..... 8

Σχήμα 1. 5: Ποσοστό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Ηλεκτροπαραγωγή στην Ε.Ε. (2004-2021) ..... 9

Σχήμα 1. 6: Μερίδιο Ανανεώσιμων Πηγών στην Ηλεκτροπαραγωγή της ΕΕ ..... 10

Σχήμα 1. 7: Αναμενόμενη αύξηση φωτοβολταϊκών και αιολικών αποβλήτων στην Ε.Ε έως το 2030..... 11

Σχήμα 1. 8: Ιεραρχία στην διαχείριση Αποβλήτων στην Ε.Ε..... 13

Σχήμα 2. 2: Παραγωγική Διαδικασία Φωτοβολταϊκού στοιχείου πολυκρυσταλλικού πυριτίου ..... 18

Σχήμα 2. 3: Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου κρυσταλλικού πυριτίου ..... 21

Σχήμα 2. 4: Αναλογία υλικών για c-Si και CdTe φωτοβολταϊκά πλαίσια ..... 23

Σχήμα 2. 5: Εκτιμώμενοι ετήσιοι όγκοι αποβλήτων (kton) φωτοβολταϊκών πάνελ ΤΚΖ στην ΕΕ..... 25

Σχήμα 3. 1: Μερίδιο αγοράς ανεμογεννητριών παγκοσμίως..... 35

Σχήμα 3. 2: Ανάλυση υλικών σε αιολικό πάρκο ισχύος 50 MW..... 36

Σχήμα 3. 3: Ανάλυση υλικών σε αιολικό πάρκο ισχύος 100 MW..... 37

Σχήμα 3. 4: Ηλικία ανεμογεννητριών στην ΕΕ..... 38

Εικόνα 3. 1: Ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα..... 29

Εικόνα 3. 2: Δομή Ανεμογεννήτριας οριζόντιου Άξονα ..... 31

Εικόνα 3. 3: Υλικά κατασκευής ανεμογεννήτριας. .... 34

Εικόνα 4.1 Ανεξέλεγκτη Διάθεση Φωτοβολταϊκών πλαισίων ..... 40

Σχήμα 5.1: Εκτιμώμενα κόστη και αξίες των ανακτώμενων υλικών από τις υπάρχουσες τεχνολογίες ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών πτερυγίων. .... 65

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Ενεργειακό ζήτημα και Κλιματική Αλλαγή

Βρισκόμαστε σε μια χρονική στιγμή, όπου σύμφωνα με την επιστημονική κοινότητα, είναι δυνατόν να αναστρέψουμε τις κλιματικές και περιβαλλοντικές αλλαγές που συντελούνται παγκοσμίως τις τελευταίες δεκαετίες. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να περιορίσουμε την έκλυση υπέρμετρων ποσοτήτων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας, αλλά και από άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες (γεωργία, κτηνοτροφία, μεταφορές, βιομηχανία κτίρια). Το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) είναι το αέριο του θερμοκηπίου που παράγεται συχνότερα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Παγκοσμίως, το 2020 οι ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα άγγιξαν τα 36.0 Gt. Οι φυσικοί συλλέκτες (δάση, ωκεανοί, χώμα) μπορούν να απορροφήσουν μεταξύ 9,5 και 11 Gt διοξειδίου του άνθρακα το χρόνο (Επίσημη ιστοσελίδα Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου). Αυτά τα επιπλέον αέρια που δεν απορροφούνται, ενισχύουν το «φαινόμενο του θερμοκηπίου» στην ατμόσφαιρα του πλανήτη μας προκαλώντας την αύξηση της θερμοκρασίας της Γης με εκπληκτικό ρυθμό και με αποτέλεσμα σημαντικές αλλαγές στο κλίμα, όπως το λιώσιμο των παγετώνων, οι αλλαγές στα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων και του χιονιού και η αύξηση της στάθμης της θάλασσας.

Η αύξηση του πληθυσμού της γης και η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας οδηγούν σε αύξηση ενεργειακής ζήτησης, με αποτέλεσμα την υπερκατανάλωση ορυκτών πόρων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, γαιάνθρακες) τα οποία αποτελούν την βασική πηγή παραγωγής ενέργειας παγκοσμίως. Το 2019, περίπου το 34% των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου παγκοσμίως προήλθε από τον τομέα του ενεργειακού εφοδιασμού, το 24% από τη βιομηχανία, το 22% από τη γεωργία, τη δασοκομία και άλλα χρήση γης, 15% από τις μεταφορές και 6% από κτίρια (Έκθεση του IPCC για την Κλιματική Αλλαγή, 2022). Δηλαδή, πάνω από τα τρία τέταρτα των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου προέρχονται από την καύση για παραγωγή ενέργειας (Gielen D., 2019).

Σύμφωνα με την Ειδική Έκθεση 18/2019, του Ευρωπαϊκού Ελεγκτικού Συνεδρίου, η Ευρωπαϊκή Ένωση είναι τρίτη σε παραγωγή αερίων θερμοκηπίου παγκοσμίως μετά την Κίνα και τις Ηνωμένες Πολιτείες ενώ ακολουθεί η Ινδία και η Ρωσία. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση για το έτος 2021, τα ορυκτά καύσιμα αποτελούσαν το 70% της ακαθάριστης διαθέσιμης ενέργειας, ενώ στην Ελλάδα το μερίδιο των ορυκτών καυσίμων ήταν 82%



(Eurostat 2021). Εξαιτίας της ενεργειακής της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα, η ΕΕ προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες των πολιτών της σε ενέργεια, αναγκάζεται να εισάγει ορυκτά καύσιμα και αν προσθέσουμε και την πρόσφατη εισβολή της Ρωσίας στην Ουκρανία με την εκτόξευση των τιμών ενέργειας στα ύψη, η εξάρτησή της αυτή σε ορυκτά καύσιμα (50% σήμερα, 65% το 2030) θέτει σε κίνδυνο και την ασφάλεια εφοδιασμού.

Η επάρκεια των ενεργειακών πόρων, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την χρήση ορυκτών πόρων και γενικότερα το ενεργειακό ζήτημα, έχει τεθεί σαν προβληματισμός εδώ και δεκαετίες τόσο στην ΕΕ όσο και στις χώρες των Ηνωμένων Εθνών. Επιπλέον, η πολιτική αστάθεια, η εθνική ασφάλεια και οι αναταραχές που σχετίζονται με την παραγωγή πετρελαίου οδηγούν τις κυβερνήσεις πολλών χωρών να αλλάξουν ενεργειακή πολιτική και να στραφούν σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας πιο συμφέρουσες από οικονομική και πολιτική σκοπιά. Τέτοιες ενεργειακές πηγές είναι και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση με τη Συνθήκη της Λισαβόνας τον Δεκέμβριο του 2007 και τη δράση που παρουσίασε με τίτλο «An energy policy for Europe», έθεσε ένα κοινό μακροπρόθεσμο όραμα με κεντρική ιδέα μια ενεργειακή ένωση. Η παγκόσμια συμφωνία του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή τον Δεκέμβριο του 2015, ενεργοποιεί τον πλανήτη με συγκεκριμένο σχέδιο δράσης για τη μείωση της θερμοκρασίας κάτω των 2ο C.

Το Δεκέμβριο του 2019, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (COM (2019) 640 final), έναν χάρτη πορείας για την μετάβαση σε μια κλιματικά ουδέτερη Ευρώπη έως το 2050. Στην Συνέχεια η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε τον Κανονισμό 2021/1119 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 30ής Ιουνίου 2021 «για τη θέσπιση πλαισίου με στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας και για την τροποποίηση των κανονισμών (ΕΚ) αριθ. 401/2009 και (ΕΕ) 2018/1999» («ευρωπαϊκό νομοθέτημα για το κλίμα»)» (L 243), με τον οποίο θεσπίζεται ο ευρωπαϊκός ενδιάμεσος στόχος μείωσης των ανθρωπογενών εκπομπών κατά πενήντα πέντε τοις εκατό (55%) έως το 2030, σε σχέση με το 1990, με τελικό στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας της Ε.Ε. ως το 2050. Με τον όρο κλιματική ουδετερότητα εννοείται η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα τόσο, ώστε να αντισταθμιστούν οι εκπομπές και η απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα από τη φύση.

Ο στόχος αυτός απαιτεί ριζικές αλλαγές στον τρόπο παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Για να επιτευχθεί αυτό, στην ΕΕ έχει θεσπιστεί ένα ανώτατο όριο για τις ποσότητες CO<sub>2</sub> που μπορούν να εκπέμπουν η βιομηχανία και οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω του Συστήματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΣΕΔΕ) και επιπλέον θεσπίστηκαν επιμέρους εθνικοί στόχοι για τα μέλη της Ένωσης, για τις εκπομπές σε τομείς που δεν καλύπτονται από το ΣΕΔΕ.

## 1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας - Τάσεις και ρυθμοί Ανάπτυξης

Στο πλαίσιο λοιπόν των προσπαθειών των χωρών για την μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και για την απεξάρτηση τους από τους ορυκτούς πόρους, η παραγωγή ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους στόχους στρατηγικής σημασίας. Εξάλλου, η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί βασική συνιστώσα για στην επίτευξη της Αειφόρου Ανάπτυξης. Σύμφωνα με τον ορισμό που δίνεται στην Αναφορά της Παγκόσμιας Επιτροπής για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη το 1987 με τίτλο "Our common Future", "Αειφόρος ή βιώσιμη ανάπτυξη ορίζεται η ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να διακυβεύει την ικανότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιήσουν τις δικές τους ανάγκες." Με άλλα λόγια, η αειφόρος ανάπτυξη, βάζοντας τον άνθρωπο στο κέντρο, βασίζεται στην αποτελεσματική και περιβαλλοντικά υπεύθυνη χρήση όλων των πόρων της κοινωνίας, φυσικών, ανθρωπίνων και οικονομικών. Η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αποτελεί μέρος της ορθολογικής διαχείρισης των φυσικών πόρων με στόχο την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών τόσο στο παρόν όσο και στο μέλλον, ικανοποιώντας ολοένα και περισσότερο τους τρεις βασικούς παράγοντες της Αειφόρου Ανάπτυξης (περιβάλλον, οικονομία και κοινωνική ευημερία).

Οι ΑΠΕ είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που βασίζονται σε ανεξάντλητα φυσικά φαινόμενα όπως η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος, τα κύματα, η γεωθερμία κ.α., και η αξιοποίηση τους έχει μικρές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Σύμφωνα με την Διεθνή Οργάνωση Ενέργειας (International Energy Association ή IEA) οι ΑΠΕ ταξινομούνται ως εξής:

- 1) Ηλιακή ενέργεια
- 2) Υδροηλεκτρική ενέργεια
- 3) Αιολική ενέργεια
- 4) Καύσιμες ανανεώσιμες πηγές και απορρίμματα ή βιομάζα
- 5) Γεωθερμία (και οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας)
- 6) Ενέργεια από τα κύματα (Παλιρροϊκή, κυματική, Θερμότητα από τους ωκεανούς)

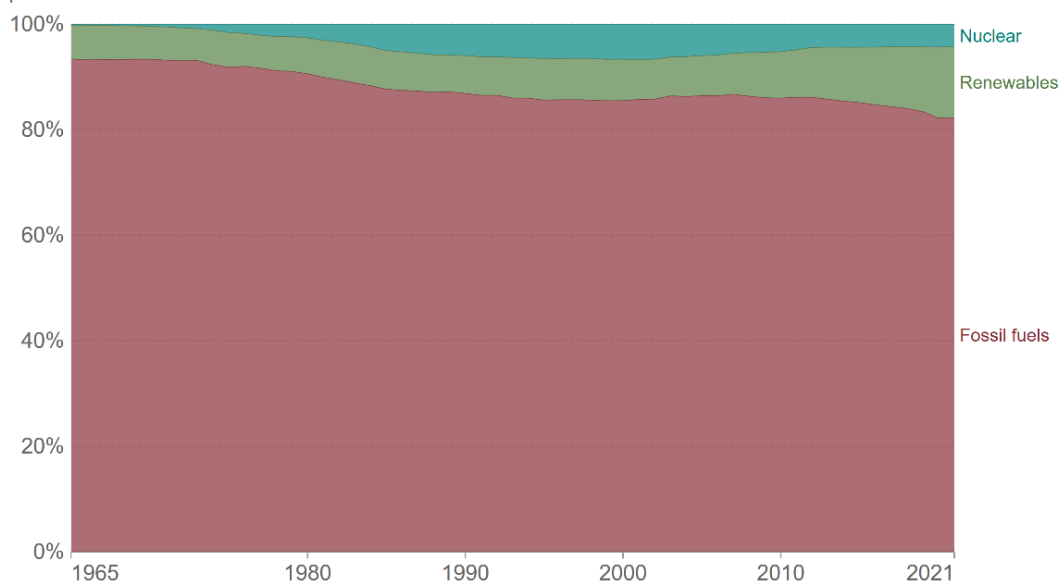
Με εξαίρεση τη γεωθερμία και την παλιρροϊκή ενέργεια όλες οι ΑΠΕ αποτελούν έμμεση ηλιακή ενέργεια, μιας και η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στη γη οφείλεται για τον κύκλο του νερού, τη δύναμη του ανέμου και την ανάπτυξη των φυτών. Ως ανανεώσιμη μορφή ενέργειας μπορεί να θεωρηθεί και η Εξοικονόμηση Ενέργειας, δηλαδή η ορθολογική χρήση της ενέργειας και η αύξηση της απόδοσης των συσκευών και των διεργασιών. Θα πρέπει, βεβαίως, να τονιστεί ότι καμία μορφή ενέργειας, όσο ανανεώσιμη και «καθαρή» και αν είναι, δεν έχει μηδενικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Οι ΑΠΕ έχουν ακόμα αρκετό δρόμο να διανύσουν και πολλά προβλήματα να ξεπεράσουν για να κυριαρχήσουν στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα, καθώς για 2019 το 84,3% της ενέργειας παγκοσμίως προήλθε από τα ορυκτά καύσιμα. Το υπόλοιπο 15,7% παράχθηκε από πυρηνική ενέργεια και από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, σε ποσοστό 4,3% και 11,4% αντίστοιχα (<https://ourworldindata.org/>). Η παγκόσμια ενεργειακή εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα αποτυπώνεται στο παρακάτω Σχήμα 1.1 αλλά και η μεγάλη αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ τα τελευταία 30 χρόνια. Το 2022 το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που προήλθε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παγκοσμίως, ήταν 29% (<https://ourworldindata.org/>).

### Primary energy consumption from fossil fuels, nuclear and renewables, World

Our World in Data

The breakdown of primary energy is shown based on the 'substitution' method which takes account of inefficiencies in energy production from fossil fuels.



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy (2022)

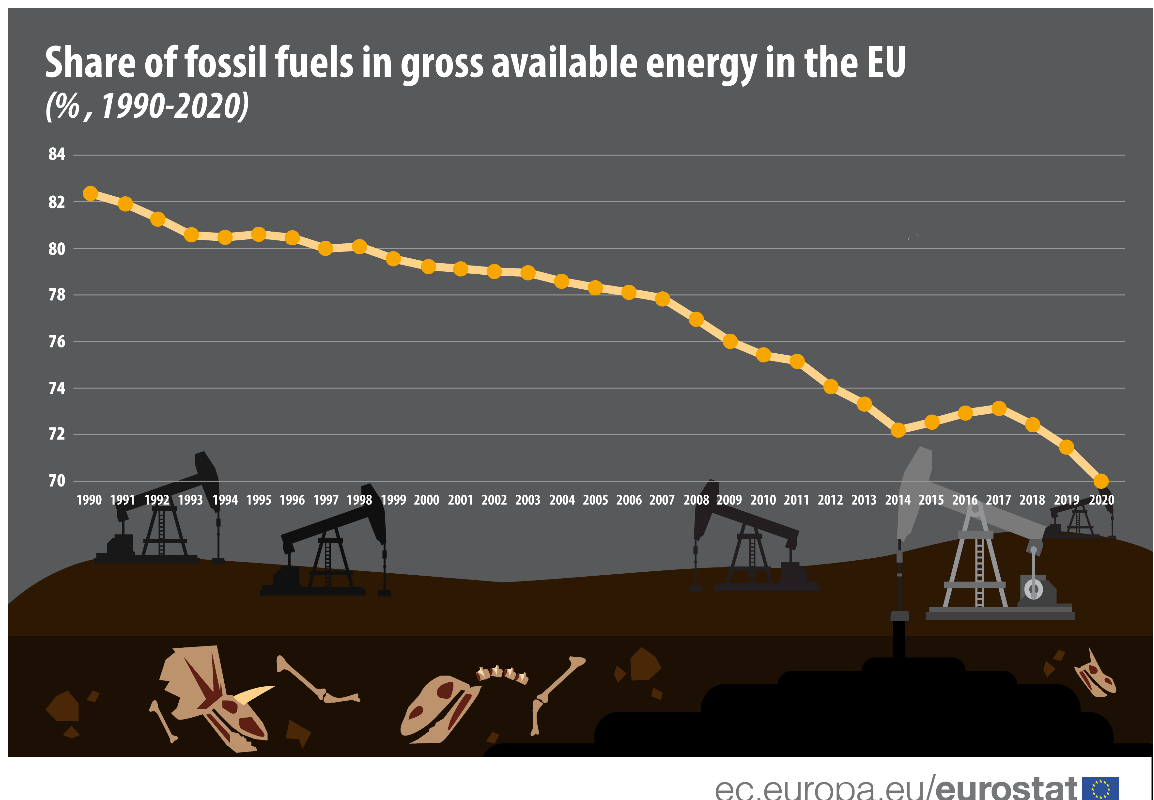
OurWorldInData.org/energy • CC BY

Note: Renewables includes hydropower, solar, wind, geothermal, wave and tidal and bioenergy. It does not include traditional biofuels.

### Σχήμα 1. 1: Παγκόσμια Ενεργειακή Κατανάλωση

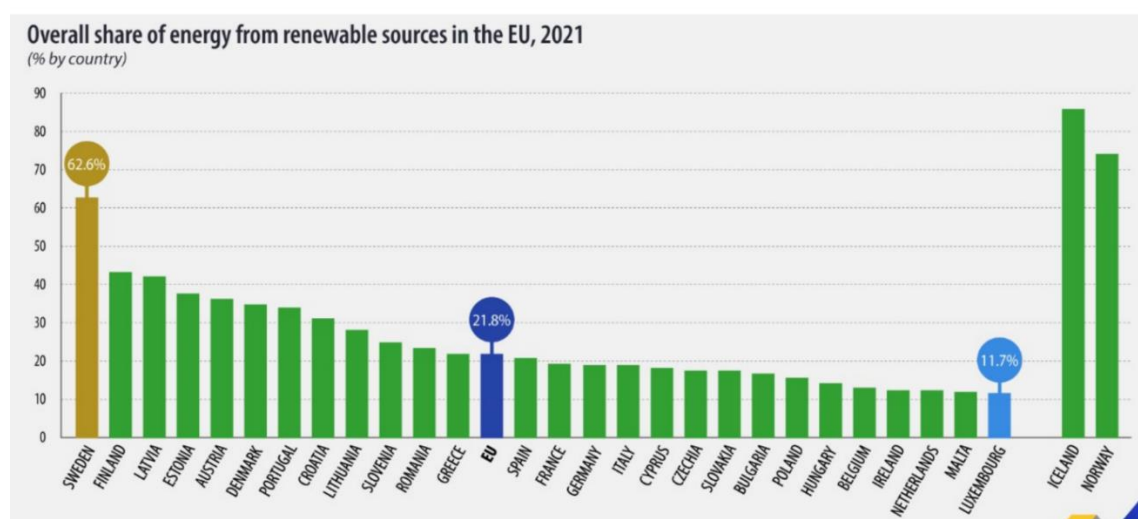
Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το ενεργειακό μείγμα, για το 2020, δηλαδή το φάσμα των διαθέσιμων πηγών ενέργειας, αποτελούνταν κυρίως από πέντε διαφορετικές πηγές: προϊόντα πετρελαίου (συμπεριλαμβανομένου του αργού πετρελαίου) (35 %), φυσικό αέριο (24 %), ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (17 %), πυρηνική ενέργεια (13 %) και στερεά ορυκτά καύσιμα (12 %) (Eurostat 2021).

Στην Ε.Ε τις τελευταίες δεκαετίες το ποσοστό παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα έχει μειωθεί κατά 13% από το 1990 γεγονός που οφείλεται στην αύξηση των ΑΠΕ (βλέπε Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1. 2: Μερίδιο ορυκτών καυσίμων στην Ε.Ε.

Τα τελευταία 15 έτη η νομοθεσία της ΕΕ για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζει σημαντική εξέλιξη. Το 2009, ορίστηκε στόχος από την ΕΕ ένα μερίδιο 20% έως το 2020 για την παροχή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Ο στόχος αυτός ξεπεράστηκε αφού το 2021 το 21,8% της ενέργειας που καταναλώνεται στην ΕΕ προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.



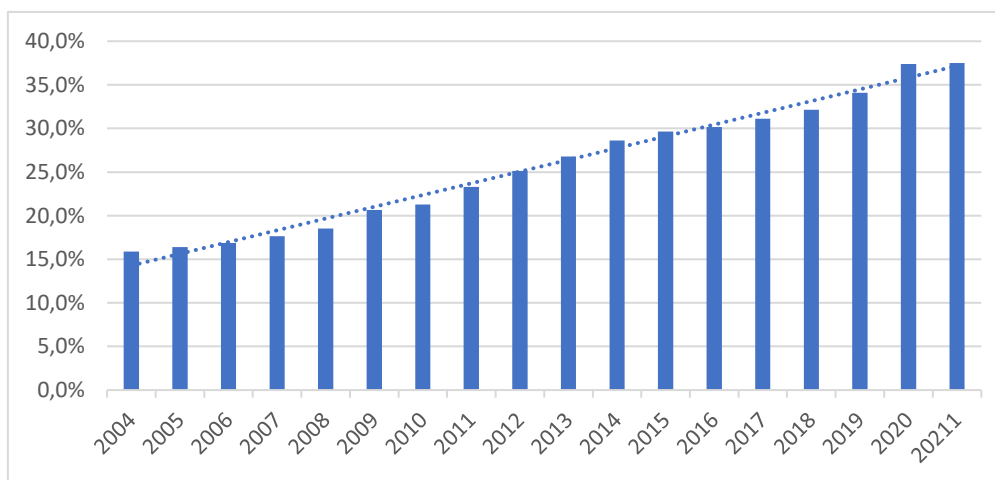
Σχήμα 1. 3: Μερίδιο Ανανεώσιμων πηγών Ενέργειας στην Ε.Ε. για το 2021

Ο τρέχων στόχος της ΕΕ για παράγωγη ενέργειας από ΑΠΕ είναι 32% για το 2030 (Οδηγία (ΕΕ) 2018/2001) και θεσπίστηκε με Εθνικά Σχέδια σε κάθε κράτος - μέλος. Στην Ελλάδα οι στόχοι της ΕΕ αποτυπώνονται στο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΔΕΚ).

Τον Ιούλιο του 2021, προτάθηκε στους η αναθεώρηση του στόχου του 40 % έως το 2030, ενώ τον Σεπτέμβριο του 2022 το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο ζήτησε την αύξηση του στόχου στο 45% έως το 2030. Ο στόχος αυτός στηρίζεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και στα πλαίσιο του σχεδίου REPowerEU, που παρουσιάστηκε τον Μάιο του 2022 τονίζοντας την ανάγκη επιτάχυνσης της ενεργειακής μετάβασης και απεξάρτησης από τις εισαγωγές ενέργειας από τη Ρωσία.

### 1.3 Αιολική και Ηλιακή Φωτοβολταϊκή Ενέργεια

Σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat για το 2021, η αιολική ενέργεια αντιπροσώπευε το 37% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας που παράχθηκε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ε.Ε. και η υδροηλεκτρική ενέργεια το 32%. Το υπόλοιπο προερχόταν από την ηλιακή ενέργεια (15%), στερεά βιοκαύσιμα (7%) και άλλες ανανεώσιμες πηγές (8%). Αξίζει να σημειωθεί ότι η ηλιακή ενέργεια είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη πηγή ενέργειας καθώς το 2008 αντιπροσώπευε μόνο το 1% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώθηκε στην Ε.Ε. και το 2021 αυξήθηκε στο 15%.

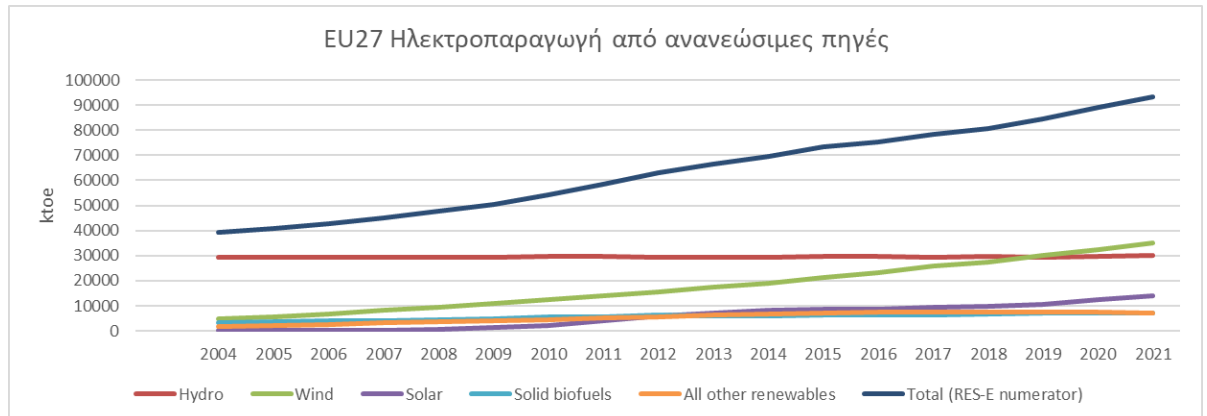


Σχήμα 1. 4. Ποσοστό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Ηλεκτροπαραγωγή στην Ε.Ε. (2004-2021)

Σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat, τα κράτη-μέλη με τα υψηλότερα ποσοστά ακαθάριστης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για το 2021, ήταν η Αυστρία και η Σουηδία με 76,2% και 75,7% κυρίως από υδροηλεκτρική ενέργεια και αιολική ενέργεια. Ακολουθούν η Δανία (62,6%), η Πορτογαλία (58,4%), και

η Κροατία (53,5%) κυρίως από υδροηλεκτρική ενέργεια. Στην Ελλάδα το μερίδιο ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές το 2021 ήταν 35,9%, λίγο χαμηλότερο από το μέσο όρο στην ΕΕ.

Παρόλο που η υδροηλεκτρική ενέργεια παραμένει η πρώτη σε ποσότητα ανανεώσιμη πηγή ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή, τα τελευταία χρόνια η αιολική και ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια αναπτύσσονται ραγδαία (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1. 5: Μερίδιο Ανανεώσιμων Πηγών στην Ηλεκτροπαραγωγή της ΕΕ (Πηγή: Στοιχεία από Eurostat 2022 (<https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/shares>))

Η ραγδαία ανάπτυξη αυτή, οφείλεται και στο γεγονός ότι πλέον, το κόστος ηλεκτροπαραγωγής από αιολική και ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια είναι συγκρίσιμο με το αντίστοιχο από τα ορυκτά καύσιμα (Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο 2019, Ειδική έκθεση αριθ. 08/2019). Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (International Renewable Energy Agency – IRENA), το 2017 το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας που παράχθηκε με τη χρήση ΑΠΕ ήταν εντός του εύρους κόστους των ορυκτών καυσίμων. Το 2021, το κόστος παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές δείχνει ότι σχεδόν τα δύο τρίτα (ή 163 GW) της νέας ανανεώσιμης ενέργειας που εγκαταστάθηκε το 2021 είχαν χαμηλότερο κόστος από τη φθηνότερη επιλογή ορυκτού καυσίμου στον κόσμο (IRENA, 2022). Το 2021, το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από χερσαία αιολική ενέργεια μειώθηκε κατά 15%, από υπεράκτια αιολική ενέργεια κατά 13% και από ηλιακά κατά 13% σε σύγκριση με το 2020 (IRENA, 2022).

Η αυξανόμενη ανταγωνιστικότητα των δύο αυτών τεχνολογιών σε συνδυασμό με την ανάγκη απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και την επίτευξη των στόχων για την κλιματική ουδετερότητα του 2050, οδηγεί στην ραγδαία ανάπτυξη της αιολικής και της ηλιακής φωτοβολταϊκής ενέργειας.

Αυτή η ραγδαία ανάπτυξη συνεπάγεται και αύξηση των αποβλήτων που προέρχονται από τις δύο αυτές τεχνολογίες στο μέλλον. Με σκοπό οι τεχνολογίες αυτές να αποτελέσουν μια αειφορική λύση για την παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας, με μειωμένες

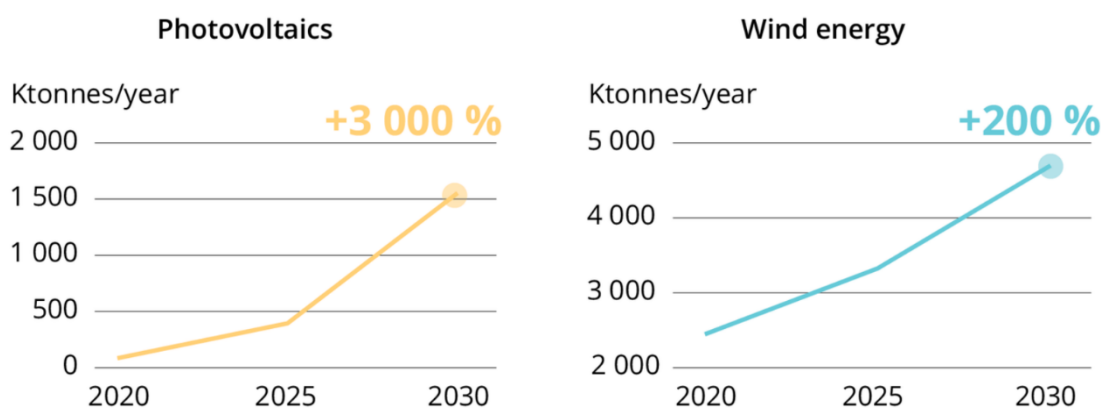
επιπτώσεις για το περιβάλλον, χρειάζεται να εφαρμοστεί μια ολοκληρωμένη και βιώσιμη πολιτική για την διαχείριση των αποβλήτων τους.

#### 1.4 Διαχείριση Αποβλήτων από Αιολικούς και Φωτοβολταϊκούς Σταθμούς Παραγωγής Ενέργειας

Τα παραγόμενα απόβλητα από αιολικές και φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σήμερα βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα, καθώς οι εγκαταστάσεις είναι σχετικά νέες και δεν έχουν εξαντλήσει ακόμη την διάρκεια ζωής τους. Το σκηνικό αυτό όμως, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως πρόκειται να αλλάξει θεαματικά με την ραγδαία αύξηση των αυτών των τεχνολογιών.

Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (European Environment Agency, ΕΕΑ, 2021), έως το 2030 θα πρέπει να διαχειριστούμε 1,5 εκατομμύρια τόνους αποβλήτων από φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις και 4,75 εκατομμύρια τόνους από αιολικές. Σε παγκόσμιο επίπεδο, ο Διεθνής Οργανισμός για την Ανανεώσιμη Ενέργεια (IRENA και IEA-PVPS, 2016) εκτιμά ότι μέχρι το 2050, θα παράγονται παγκοσμίως μεταξύ 60 και 78 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων φωτοβολταϊκών πάνελ ενώ το πανεπιστήμιο του Cambridge εκτιμάει ότι η παραγωγή αποβλήτων αιολικών συστημάτων μέχρι το 2050 θα φτάσει τα 43 εκατομμύρια τόνους.

Στην Ε.Ε, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος εκτιμάει ότι τα απόβλητα φωτοβολταϊκών μεταξύ 2020-2030 θα αυξηθούν 3.000% δηλαδή από μερικούς τόνους το 2020 σε περίπου 1,5 εκατομμύριο τόνους τον χρόνο το 2030 και των ανεμογεννητριών κατά 200% δηλαδή από σχεδόν 2,5 σε 4,750 εκατομμύρια τόνους/έτος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.6.



Σχήμα 1. 6: Αναμενόμενη αύξηση φωτοβολταϊκών και αιολικών αποβλήτων στην Ε.Ε έως το 2030 (Πηγή: <https://www.eea.europa.eu/publications/emerging-waste-streams-opportunities-and>.)

Η δραματική αυτή αύξηση στην παραγωγή αποβλήτων από τις τεχνολογίες αυτές στο άμεσο μέλλον απαιτεί άμεση προσοχή από τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής,

προκειμένου οι τεχνολογίες αυτές να καθιστούν φιλικές προς το περιβάλλον. Η διαχείριση των αποβλήτων αυτών αποτελεί πρόκληση καθώς υπάρχουν και ισχυρά πιθανά οφέλη, καθώς πολλά από τα απόβλητα που προκύπτουν ανήκουν είτε σε καθιερωμένα συστήματα ανακύκλωσης (π.χ. χάλυβας, γυαλί, αλουμίνιο) ή αποτελούν κρίσιμες πρώτες ύλες υψηλής αξίας. Τα πιο δύσκολα στην διαχείριση απόβλητα είναι αυτά που προκύπτουν από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (δυσκολία στην αποσυναρμολόγηση) και από τα πτερύγια των ανεμογεννητριών (σύνθετα πλαστικά) καθώς οι διαθέσιμες τεχνολογίες για την ανακύκλωση και την ανάκτηση των αποβλήτων αυτών, είτε δεν έχουν ακόμα το επίπεδο ωριμότητας για να εφαρμοστούν, είτε δεν είναι ανταγωνιστικές ώστε να εδραιωθούν στην αγορά. Με στόχο την διαχείριση των επερχόμενων τόνων αποβλήτων, σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο, υπάρχει επιτακτική ανάγκη να ενταθούν οι προσπάθειες ανάπτυξης των τεχνολογιών ανακύκλωσης και ανάκτησης αυτών των αποβλήτων λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε λύσης. Η εξεύρεση βιώσιμων περιβαλλοντικά τεχνολογιών και λύσεων αποτελεί καθήκον όλων των εμπλεκόμενων φορέων στην αλυσίδα αξίας, όπως τα ερευνητικά ιδρύματα, ο κατασκευαστικός κλάδος και οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής.

## **1.5 Πολιτική και Νομοθεσία**

Σήμερα στην Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο, δεν υπάρχει ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης για την ανακύκλωση των αποβλήτων από τα αιοικά και φωτοβολταϊκά συστήματα. Κάθε χώρα αντιμετωπίζει τα συγκεκριμένα απόβλητα σύμφωνα με την εθνική της νομοθεσία, η οποία δεν ευθυγραμμίζεται απαραίτητα σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο. Γενικά, κάθε κράτος-μέλος χρησιμοποιεί διαφορετικά ρυθμιστικά μέτρα και κίνητρα για την επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση και ανάκτηση των συγκεκριμένων αποβλήτων, τα οποία περιλαμβάνουν νομοθετικά δεσμευτικούς στόχους, απαγόρευση της υγιεινής ταφής και/ή οικονομική επιβάρυνση/πρόστιμα που απορρέουν από την Διευρυμένη Ευθύνη του Παραγωγού (Extended Producer Responsibility).

**Η Διευρυμένη Ευθύνη Παραγωγού (Extended Producer Responsibility)** είναι μια προσέγγιση πολιτικής που έχει χρησιμοποιηθεί σε άλλους τομείς για την προώθηση της αλλαγής στις βιομηχανικές πρακτικές. Οι παραγωγοί έχουν σημαντική ευθύνη για τη διαχείριση ή διάθεση προϊόντων μετά την κατανάλωση.

**Η ευρωπαϊκή οδηγία πλαίσιο για τα απόβλητα (2008/98/ΕΚ)** ορίζει βασικές έννοιες που σχετίζονται με τη διαχείριση των αποβλήτων και θέτει στόχους που τα κράτη μέλη της Ε.Ε πρέπει να επιτύχουν. Τα κράτη μέλη πρέπει στη συνέχεια να δημιουργήσουν τα



δικά τους νομοθετήματα για να συμμορφωθούν με την κατευθυντήρια οδηγία. Η οδηγία 2008/98/ΕΚ, τονίζει την ανάγκη για την αύξησή της ανακύκλωσης και την μειωμένη διαθεσιμότητα των χωματερών. Επίσης καθιερώνει την ιεραρχία διαχείρισης αποβλήτων (βλέπε σχήμα 1.7) που ευνοεί την πρόληψη, την επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και την ανάκτηση των αποβλήτων αφήνοντας την διάθεση τελευταία λύση.



Σχήμα 1. 7: Ιεραρχία στην διαχείριση Αποβλήτων στην Ε.Ε. (Πηγή: Οδηγία Πλαίσιο 2008/98/ΕΚ).

Η πρόληψη μπορεί να επιτευχθεί κατά τη φάση σχεδιασμού και ανάπτυξης του προϊόντος για την μείωση της μελλοντικής ποσότητας αποβλήτων και των πιθανών επιπτώσεων που σχετίζονται με αυτά. Επόμενο στην ιεραρχία είναι η επαναχρησιμοποίηση κατά την οποία τα απόβλητα θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν για όσο το δυνατόν περισσότερο, προτού χρειαστεί επεξεργασία των αποβλήτων. Επόμενη επιλογή στην πυραμίδα είναι η επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων για διαφορετικές εφαρμογές διατηρώντας σημαντικό μέρος της αξίας τους. Όπου δεν είναι δυνατή η επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση και η ανάκτηση είναι οι επόμενες επιλογές. Ανακύκλωση σημαίνει ότι το απόβλητο γίνεται ένα νέο προϊόν ή υλικό με την ίδια ή διαφορετική λειτουργική χρήση. Ανάκτηση σημαίνει μετατροπή των απορριμμάτων σε καύσιμο ή θερμική ενέργεια μετά την αφαίρεση όλων των μεμονωμένων συστατικών που μπορεί να χρησιμοποιηθούν ξανά.

Νομοθετήματα που σχετίζονται με τα απόβλητα στην Ε.Ε είναι η απόφαση 2000/532/ΕΚ της Επιτροπής για τη θέσπιση του Ευρωπαϊκού Καταλόγου Αποβλήτων, της οδηγίας για την αποτέφρωση αποβλήτων (2000/76/ΕΚ) και της οδηγίας για τους ΧΥΤΑ (1999/31/ΕΚ).

**Ο Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων** αποτελεί βασικό έγγραφο για την ενιαία ταξινόμηση των αποβλήτων στην Ε.Ε. Τα απόβλητα έχουν εξαψήφιο αριθμό ανάλογα με

τον τρόπο παραγωγής τους και διαχωρίζονται σε επικίνδυνα και μη επικίνδυνα. Για απόβλητα από πολλαπλά υλικά όπως το σύνθετο πολυμερές με ενίσχυση ινών γυαλιού και άνθρακα (βασικό δομικό υλικό των πτερυγίων των ανεμογεννητριών), η ταξινόμηση γίνεται δυσκολότερη, καθώς η μήτρα του πολυμερούς είναι οργανικό υλικό ενώ το υλικό από ίνες ανόργανο και μπορεί να προκύψει διαφορετική κατάταξη των εν λόγω αποβλήτων ακόμα και εντός της ίδιας χώρας.

Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων (ΕΚΑ), τα σύνθετα απόβλητα των αιολικών πτερυγίων των ανεμογεννητριών συνήθως κατηγοριοποιούνται ως πλαστικά απόβλητα από κατασκευές και καθαιρέσεις με τον κωδικό 170203. Οι παρακάτω κωδικοί χρησιμοποιούνται επίσης:

- 07 02 13 απόβλητα πλαστικά από οργανικές χημικές διεργασίες
- 10 11 03 απόβλητα από ινώδη υλικά με βάση ύαλο από θερμικές επεξεργασίες
- 10 11 12 απόβλητα υάλου εκτός των επικινδύνων που περιλαμβάνονται στο σημείο 10 11 11 από θερμικές επεξεργασίες
- 10 11 99 απόβλητα μη προδιαγραφόμενα άλλως από θερμικές επεξεργασίες
- 12 01 05 αποξέσματα και προϊόντα τόννευσης πλαστικών από τη μορφοποίηση και τη φυσική και μηχανική επιφανειακή επεξεργασία μετάλλων και πλαστικών.

Οι εθνικές αρχές πρέπει να διασφαλίσουν τη σωστή και κατάλληλη επιλογή κωδικού ΕΚΑ για τα απόβλητα των πτερυγίων ώστε να εξασφαλίζουν την αποτελεσματική συλλογή και ταξινόμηση και τον εντοπισμό κατάλληλων εγκεκριμένων επιλογών επεξεργασίας αποβλήτων. Ωστόσο, υπάρχει η ανάγκη για ένα ειδικό κωδικό για τα σύνθετα απόβλητα των πτερυγίων, ώστε να μην ταξινομούνται ως πλαστικά και να αποφευχθεί η ανάμιξη τους με άλλους τύπους πλαστικών. Αυτό θα δώσει και ώθηση στην δημιουργία μιας πανευρωπαϊκής αγοράς για τα ανακυκλωμένα σύνθετα υλικά.

Μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν πολλές νομοθετικές απαιτήσεις για τα σύνθετα απόβλητα. Παρόλα αυτά, υπάρχει μια ξεκάθαρη κατεύθυνση προς περισσότερη κυκλικότητα γενικά στο ευρωπαϊκό επίπεδο, όπως φαίνεται από το Σχέδιο Δράσης της Ε.Ε. για την κυκλική οικονομία (Ευρωπαϊκή Επιτροπή 2020). Η Ευρωπαϊκή Στρατηγική για τα Πλαστικά σε μια Κυκλική Οικονομία (Ευρωπαϊκή Επιτροπή 2018) εξάλλου, τονίζει ότι οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι η χαμηλή επαναχρησιμοποίηση και ποσοστά ανακύκλωσης (λιγότερο από 30%) των πλαστικών στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Εκθέτει το όραμα για τα «κυκλικά» πλαστικά με συγκεκριμένες δράσεις σε επίπεδο Ε.Ε., εφιστώντας την προσοχή στην κινητοποίηση του ιδιωτικού τομέα και των εθνικών, περιφερειακών και δημοτικών αρχών για την εκπλήρωση αυτού του οράματος εμπλέκοντας ενεργά και τους πολίτες. Μέχρι στιγμής το επίκεντρο αυτής της στρατηγικής βρίσκεται στα πλαστικά μιας χρήσης, μικροπλαστικά, οξοπλαστικά και πλαστικές συσκευασίες και όχι στα σύνθετα απόβλητα.

Σε εθνικό επίπεδο, τέσσερις χώρες έχουν σαφή αναφορά για τα σύνθετα απόβλητα στη νομοθεσία τους: Γερμανία, Αυστρία, Ολλανδία και Φινλανδία. Αυτές οι χώρες απαγορεύουν την υγειονομική ταφή ή την αποτέφρωση των σύνθετων υλικών. Ανεξάρτητα από τη νομοθεσία που επηρεάζει τα σύνθετα απόβλητα, η υγειονομική ταφή των πτερυγίων θα πρέπει να αποφεύγεται και σύμφωνα με την ιεραρχία των αποβλήτων της Ε.Ε. να αναζητά εναλλακτικές λύσεις ανακύκλωσης. Ο φορέας που εκπροσωπεί την αιολική βιομηχανία στην Ευρώπη, η WindEurope, το 2020 πρότεινε την πανευρωπαϊκή απαγόρευση της υγειονομικής ταφής των πτερυγίων έως το 2025, με την δέσμευση ότι η αιολική βιομηχανία θα διαχειρίζεται το 100% των παροπλισμένων πτερυγίων με επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση ή ανάκτηση.

**Η οδηγία 2000/76/ΕΚ** για την αποτέφρωση αποβλήτων στοχεύει στην πρόληψη ή στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλεί η αποτέφρωση, με την εφαρμογή ειδικών συνθηκών λειτουργίας και την επίτευξη οριακών τιμών εκπομπών για παράδειγμα σκόνη, οξειδίων του αζώτου ή βαρέων μετάλλων.

Τα ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά μέρη των ανεμογεννητριών διαχειρίζονται σύμφωνα με την Οδηγία για τη διαχείριση των **Ηλεκτρικών και Ηλεκτρονικών Αποβλήτων (2012/19/EU)**.

Τα απόβλητα των φωτοβολταϊκών πάνελ, στην Ε.Ε. διαχειρίζονται σύμφωνα με την Οδηγία 1012/19/ΕΕ η οποία ορίζει ότι πρέπει να θεωρούνται απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους. Η Ευρωπαϊκή Ένωση στην Οδηγία αυτή, καθορίζει κανόνες σχετικά με τα φωτοβολταϊκά πάνελ και το τέλος του κύκλου ζωής τους και υποχρεώνει τους παραγωγούς φωτοβολταϊκών πλαισίων να χρηματοδοτούν το κόστος διαχείρισης των αποβλήτων που προέρχονται από αυτά. Προωθείται η χρήση των δευτερογενών πρώτων υλών με σκοπό την αποτελεσματικότερη χρήση των φυσικών πόρων που σχετίζονται με την παραγωγή φωτοβολταϊκών και καθορίζει, από το 2018, ποσοστά και προθεσμίες για την ανακύκλωση και την ανάκτηση (έως 80 και 85%, αντίστοιχα) με βάση το βάρος ανά πλαίσιο. Δεδομένου όμως, ότι η ανάκτηση γυαλιού αποτελεί ήδη περίπου το 75-86% του συνολικού βάρους των φωτοβολταϊκών πλαισίων, η οδηγία αυτή, δεν εγγυάται την ανάκτηση πολύτιμων ή κρίσιμων μετάλλων που περιέχονται σε αυτά. Επιπλέον, στην Οδηγία αυτή, ορίζεται λεπτομερέστερα και η Διευρυμένη Ευθύνη Παραγωγού.

Εκτός από το νομοθετικό πλαίσιο, δημιουργείται η ανάγκη για ανάπτυξη τεχνολογιών ανακύκλωσης και ανάκτησης που θα συμμορφώνονται με τις αυξανόμενες απαιτήσεις των αποβλήτων των φωτοβολταϊκών πάνελ δίνοντας μεγάλη προσοχή στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την βιωσιμότητά τους.

## 2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

### 2.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα – Περιγραφή Λειτουργίας

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι μια μέθοδος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά στοιχεία για τη μετατροπή της ενέργειας από τον ήλιο με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα φωτοβολταϊκά στοιχεία βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο κατά το οποίο η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, που απορροφάται στο εσωτερικό μιας διάταξης υλικών σε επαφή, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα υλικά αυτά συνήθως είναι ημιαγωγοί, οι οποίοι έχουν την ιδιότητα όταν βρίσκονται σε επαφή και προσπίπτει πάνω τους ηλιακή ακτινοβολία, να μετατρέπουν την ενέργεια των φωτονίων σε ηλεκτρική ενέργεια. Ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατασκευή φωτοβολταϊκών, είναι το κρυσταλλικό πυρίτιο, το άμορφο πυρίτιο, ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός και το τελλουριούχο κάδμιο. Η ποσότητα ρεύματος που παράγει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι ανάλογη της ποσότητας ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω σε αυτό. Γι' αυτό το λόγο, το ρεύμα αυξάνεται με την επιφάνεια του στοιχείου καθώς και με την ένταση της ακτινοβολίας. Η τάση από την άλλη, εξαρτάται από το υλικό που χρησιμοποιείται. Συνήθως χρησιμοποιούνται στοιχεία πυριτίου που παράγουν περίπου 0.5Volt ανεξάρτητα από την επιφάνεια.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους σε σειρές, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα σχηματίζοντας τα φωτοβολταϊκά πάνελ (PV module) και στη συνέχεια εγκαθίστανται στο έδαφος και στις στέγες ή επιπλέουν σε φράγματα ή λίμνες. Σε περιπτώσεις που περισσότερα από δύο φωτοβολταϊκά πάνελ συνδέονται μεταξύ τους δημιουργείται μία φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array).

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών χρησιμοποιείται ευρύτερα παγκοσμίως καθώς έχει αναμφισβήτητο το υψηλότερο δυναμικό από όλες τις τεχνολογίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων (Bazilian, 2012). Κάθε χρόνο, από τα φωτοβολταϊκά πάρκα παράγεται το μεγαλύτερο μέρος του ενεργειακού μείγματος της ΕΕ. Για το έτος 2021, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά αντιπροσώπευε στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 5,5% της ακαθάριστης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Ε.Ε (Επίσημη ιστοσελίδα της Ε.Ε./Solar Energy/Photovoltaics).

Η κύρια παραγωγός χώρα των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η Κίνα, ενώ το 95% της παραγωγής εξάγεται κυρίως στη Γερμανία, η οποία και αποτελεί την πρωτοπόρο χώρα της Ευρώπης στη χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων.

## **2.2 Περιγραφή Δομής φωτοβολταϊκών στοιχείων**

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατηγοριοποιούνται με βάση το υλικό και τον τρόπο παραγωγής τους με αντίστοιχες διαφορές στο κόστος και την απόδοση. Το συχνότερα χρησιμοποιούμενο υλικό για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι το πυρίτιο (Si), το οποίο είναι η βάση για το 90% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής στοιχείων. Το πυρίτιο αποτελεί το δεύτερο στοιχείο, μετά το οξυγόνο, που συναντάται συχνότερα στο φλοιό της γης με τη μορφή διάφορων ενώσεων. Το διοξειδίου του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>) αποτελεί το κύριο συστατικό της άμμου από το οποίο προκύπτει πυρίτιο υψηλής καθαρότητας (99,99999%) με εξειδικευμένες και διαδοχικές εργασίες καθαρισμού. Αλλά υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ο δισεληνοϊδιούχος Χαλκός, το τελλουριούχο κάδμιο, αρσενικούχο Γάλλιο, κ.α.

Παρακάτω δίνεται μια συνοπτική περιγραφή των διαφόρων τύπων φωτοβολταϊκών στοιχείων που χρησιμοποιούνται για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (Φραγκιαδάκης Ι, 2004).

### **2.2.1 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Κρυσταλλικού Πυριτίου**

#### **Φωτοβολταϊκά Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (Single-crystal Silicon, sc-Si)**

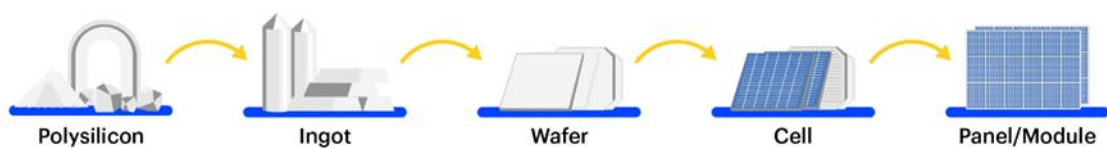
Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου, το βασικό υλικό είναι μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (wafer~300μm), απαιτούν την υψηλότερη καθαρότητα του πυριτίου και έχουν την πιο πολύπλοκη διαδικασία κατασκευής, γνωστή ως διαδικασία "Czochralski". Η απόδοσή τους, με τη μορφή κυψελίδας κυμαίνεται από ~21% έως ~24%, ενώ με τη μορφή φωτοβολταϊκού πλαισίου μεταξύ 15-18%. Χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας, έχουν όμως υψηλό κόστος κατασκευής. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται σε σχήμα κύκλου, ή σχεδόν κύκλου καθώς και τετράγωνα ενώ το χρώμα τους είναι συνήθως σκούρο μπλε.

#### **Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (Multicrystalline Silicon mc-Si)**

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από δίσκους ή πλάκες ή γκοφρέτες (wafers) πυριτίου που κόβονται από τετραγωνισμένους ράβδους πυριτίου. Αποτελούνται από λεπτά επιστρώματα, πάχους 1 έως 50 μm. Στην επιφάνεια της κυψελίδας, διακρίνονται οι διαφορετικές μονοκρυσταλλικές περιοχές, οι οποίες όσο

μεγαλύτερες είναι, τόσο μεγαλύτερη και η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Σε εργαστηριακή μορφή κυψελίδας, το πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει απόδοση 17 -20 % και σε βιομηχανική μορφή από 10-16. Η μέθοδος κατασκευής τους απαιτεί πολύ μικρότερη ακρίβεια και κόστος σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Οι βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση"), και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC. Κατασκευάζονται συνήθως σε τετράγωνο σχήμα (βλέπε σχήμα 2.2), χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλή χρονική σταθερότητα και το χρώμα του είναι γαλάζιο.

#### Key stages in the main manufacturing process for solar PV



IEA. All rights reserved.

Σχήμα 2. 1: Παραγωγική Διαδικασία Φωτοβολταϊκού στοιχείου πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Πηγή IEA, 2022)

### 2.2.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία Λεπτών επιστρώσεων

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που χρησιμοποιούν αυτού του είδους τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, κατασκευάζονται συνήθως τοποθετώντας λεπτές στρώσεις ημιαγωγικού υλικού πάνω σε διάφορες επιφάνειες (συνήθως γυαλί). Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε με στόχο τη χρήση μικρότερων ποσοτήτων ημιαγωγικού υλικού. Η απόδοση αυτών των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι αρκετά μικρή (5-7%) αλλά με μικρό κόστος κατασκευής. Έτσι, για να επιτευχθεί η ίδια παραγωγική ικανότητα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, απαιτούνται περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια και κατά συνέπεια μεγαλύτερη διαθέσιμη επιφάνεια.

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει κυρίως τους παρακάτω τύπους φωτοβολταϊκών στοιχείων.

#### Δισεληνοϊνδιούχου Χαλκού ( $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ )

Ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός έχει υψηλή απορρόφηση σε λεπτό στρώμα στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Έχει χαμηλό κόστος κατασκευής και σταθερότητα ισοδύναμη του c-Si. Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18,8% η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γαλλίου(Ga) η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο αλλά παρόλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 8%-11% (φωτοβολταϊκό πλαίσιο).

### **Τελουριούχου καδμίου (CdTe)**

Το Τελουριούχο Κάδμιο έχει ιδανικό ενεργειακό διάκενο περίπου 1eV, το οποίο καθώς είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα, του δίνει την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η εργαστηριακή του απόδοση έχει φτάσει το 16% ενώ η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι 6-8%. Έχει χαμηλό κόστος κατασκευής και την καλύτερη και αποδοτικότερη συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες και σε συνθήκες χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας (συννεφιά). Μειονεκτήματα θεωρούνται η χρήση το τελλουρίου, που είναι σπάνιο μέταλλο καθώς και η δυσκολία για τη δημιουργία των μεταλλικών επαφών. Επιπλέον, η χρήση του καδμίου επιβάλλει την αναγκαστική ανακύκλωση του μετά το πέρας της ζωής του.

### **Αρσενικούχου Γαλλίου (GaAs)**

Το αρσενικούχο γάλλιο είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς το ενεργειακό του διάκενο είναι 1,43 eV. Στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) έχει την υψηλότερη απόδοση που έχει επιτευχθεί γύρω στο 29%. Στα φωτοβολταϊκά πλαίσια η απόδοση φτάνει το 22% και καθώς είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων αλλά και σε διαστημικές εφαρμογές. Μειονέκτημα θεωρείται το υψηλό κόστος κατασκευής.

### **Άμορφου πυριτίου (Amorphous Silicon, a-Si)**

Τεχνολογία χαμηλού κόστους εξαιτίας της μικρής χρησιμοποιούμενης μάζας υλικού η χρήση της οποίας είναι διαδεδομένη καθώς χρησιμοποιείται σε ηλεκτρονικά προϊόντα ευρείας κατανάλωσης (π.χ. αριθμομηχανές τσέπης, αξεσουάρ αυτοκινήτου, κ.α.). Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του a-Si είναι ότι είναι πολύ πιο ομοιόμορφο σε μεγάλες επιφάνειες και μπορεί να καταλαμβάνει λιγότερο από 1% του πάχους ενός κρυσταλλικού στοιχείου. Επιπλέον, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής εύκαμπτων φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ωστόσο, η ικανότητά τους στην μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι η λιγότερο αποτελεσματική. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου κυμαίνονται για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο από 6 έως 8% ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

### **2.2.3 Νέες Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών Στοιχείων**

Ερευνητές και βιομηχανίες επιδιώκουν την εισαγωγή στην παραγωγή νέων τεχνολογιών με σκοπό τη δημιουργία καλύτερων επιλογών στα φωτοβολταϊκά στοιχεία όσο αφορά

στην απόδοση, στην κατανάλωση ενέργειας και πόρων αλλά και την βελτίωση της ανακύκλωση τους μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους. Οι περισσότερες από αυτές τις τεχνολογίες είναι οι εξής:

### **Συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά στοιχεία (CPV)**

Τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά (CPV) χρησιμοποιούν φακούς που συγκεντρώνουν τις ακτίνες φωτός πάνω σε λιγοστά φωτοβολταϊκά στοιχεία μεγάλης απόδοσης. Τα CPV στοιχεία μπορούν να είναι από πυρίτιο ή III-V ενώσεις (κυρίως γάλλιο, αρσενικό ή GaA). Έτσι μειώνεται δραστικά η επιφάνεια των πάνελ και κατά συνέπεια μειώνεται το κόστος παραγωγής. Επίσης, τα συστήματα αυτά έχουν πολύ υψηλή απόδοση επειδή χρησιμοποιούν αυτοματισμούς ώστε να παρακολουθούν με ακρίβεια την πορεία του ήλιου προκειμένου να υπάρχει βέλτιστη εστίαση του ηλιακού φωτός κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι αυτοματισμοί αυτοί όμως, αυξάνουν το κόστος και της πολυπλοκότητα του συστήματος και συνεπώς την ανάγκη συντήρησης κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Τέλος μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι τα πάνελ λειτουργούν μόνο όταν ακτινοβολούνται με άμεσο ηλιακό φως, ενώ με διάχυτη ακτινοβολία η παραγωγή ενέργειας μηδενίζεται.

### **Οργανικά Φωτοβολταϊκά στοιχεία**

Όπως προσδίδει το όνομα τους, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική πραγματοποιείται σε οργανικά συστήματα. Πρόκειται για βιοδιασπώμενα υλικά όπως οργανικά πολυμερή ή οργανικά μόρια όμως υπάρχει το ρίσκο διάσπασης και αστάθειας του υλικού. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι το εξαιρετικά μικρό κόστος γεγονός που καθιστά δυνατή την αξιοποίηση τους ακόμα και με το μειονέκτημα του πολύ μικρού χρόνου ζωή τους σε σχέση με τα συμβατικά Φωτοβολταϊκά στοιχεία.

### **Φωτοευαίσθητα Φωτοβολταϊκά στοιχεία (DSSC)**

Φασματικώς φωτοευαίσθητοποιημένα Φωτοβολταϊκά στοιχεία, χαμηλού κόστους, τα οποία απελευθερώνουν ηλεκτρόνια π.χ. διοξείδιο του τιτανίου σε επαφή με φωτόαπορροφητική χρωστική ουσία. Στα πλεονεκτήματα των στοιχείων DSSC ανήκει η ευκαμψία, το μικρό βάρος τους και το χαμηλό κόστος των υλικών και κατασκευής. Μειονεκτήματα τους είναι η υποβάθμιση της απόδοσης τους με τον χρόνο λόγω της έκθεσης τους στην ακτινοβολία και την θερμότητα καθώς και η αλληλεπίδραση των δομικών του στοιχείων.

### **Φωτοβολταϊκά στοιχεία περοβσκίτη (PSC)**

Ένα στοιχείο περοβσκίτη περιλαμβάνει ως ημιαγώγιμο υλικό ένα επίπεδο περοβσκίτη. Με τον όρο περοβσκίτης αναφερόμαστε στην κρυσταλλική δομή του τιτανικού ασβεστίου (CaTiO<sub>3</sub>). Η απόδοση των πάνελ κυμαίνεται στο 23% περίπου και είναι εντυπωσιακό καθώς συναγωνίζεται αυτές του κρυσταλλικού πυριτίου. Είναι μια τεχνολογία συνεχώς αναπτυσσόμενη με χαμηλού κόστους πρώτες ύλες που όμως έχουν



ως μειονεκτήματα την αστάθεια της απόδοσης και την υστέρηση της τάσης του ρεύματος.

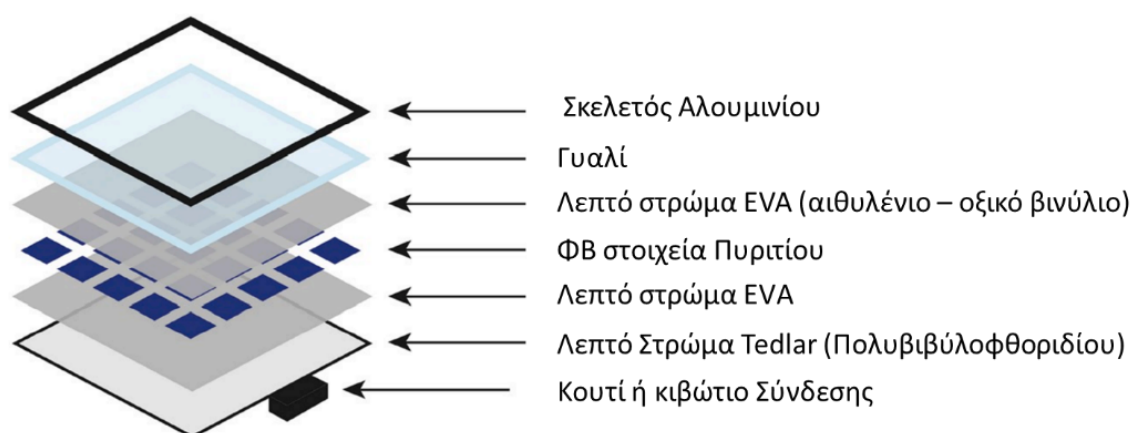
### Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Υβριδικά στοιχεία που περιλαμβάνουν τον συνδυασμό όλων των πρόσφατων τεχνολογιών της αγοράς και συνδυασμό οργανικών και ανόργανων ημιαγωγών.

## 2.3 Δομή Φωτοβολταϊκού Πλαισίου

Ένα πλαίσιο κρυσταλλικού πυριτίου αποτελείται από πολλά Φωτοβολταϊκά στοιχεία (κυψέλες) τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Το πυρίτιο αφού υποστεί ειδική επεξεργασία κόβεται σε λεπτές πλάκες (wafers) οι οποίες ενώνονται μεταξύ τους ηλεκτρικά για να σχηματίσουν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Οι πλάκες πυριτίου έχουν συνήθως πάχους 200–500 mm με τις ακόλουθες διαστάσεις: 100 100 mm<sup>2</sup> , 125 125 mm<sup>2</sup> ή 150 150 mm<sup>2</sup> . Το πρώτο βήμα στην κατασκευή τους είναι η δημιουργία της σύνδεσης n-p στο μπροστινό μέρος της επιφάνειας αυτών των πλακών με την ατομική διάχυση του φωσφόρου, μέσα στην οποία εφαρμόζεται αντιανακλαστική επίστρωση (AR coating). Το επόμενο βήμα είναι ο δημιουργία δύο ηλεκτροδίων από πάστα αλουμινίου και/ή ασημιού τόσο στο μπροστινό μέρος όσο και πίσω πλευρές της πλάκας και στην συνέχεια οι πλάκες αυτές πλαστικοποιούνται και τοποθετούνται σε πλαίσιο αλουμινίου (Klugmann- Radziemska E, Ostrowski P., 2010). Τα στρώματα που τελικά συνθέτουν ένα πλαίσιο κρυσταλλικού πυριτίου φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί και είναι κατά σειρά μάζας: γυαλί, εξωτερικός σκελετός αλουμινίου, δύο στρώσεις αιθυλενίου- οξικού βινύλιου (EVA) πάνω και κάτω από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου που τα ενθυλακώνει, ένα κουτί σύνδεσης και το πίσω φύλλο του φωτοβολταϊκού (συνήθως Tedlar) στο πίσω μέρος της μονάδας.



Σχήμα 2. 2: Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου κρυσταλλικού πυριτίου

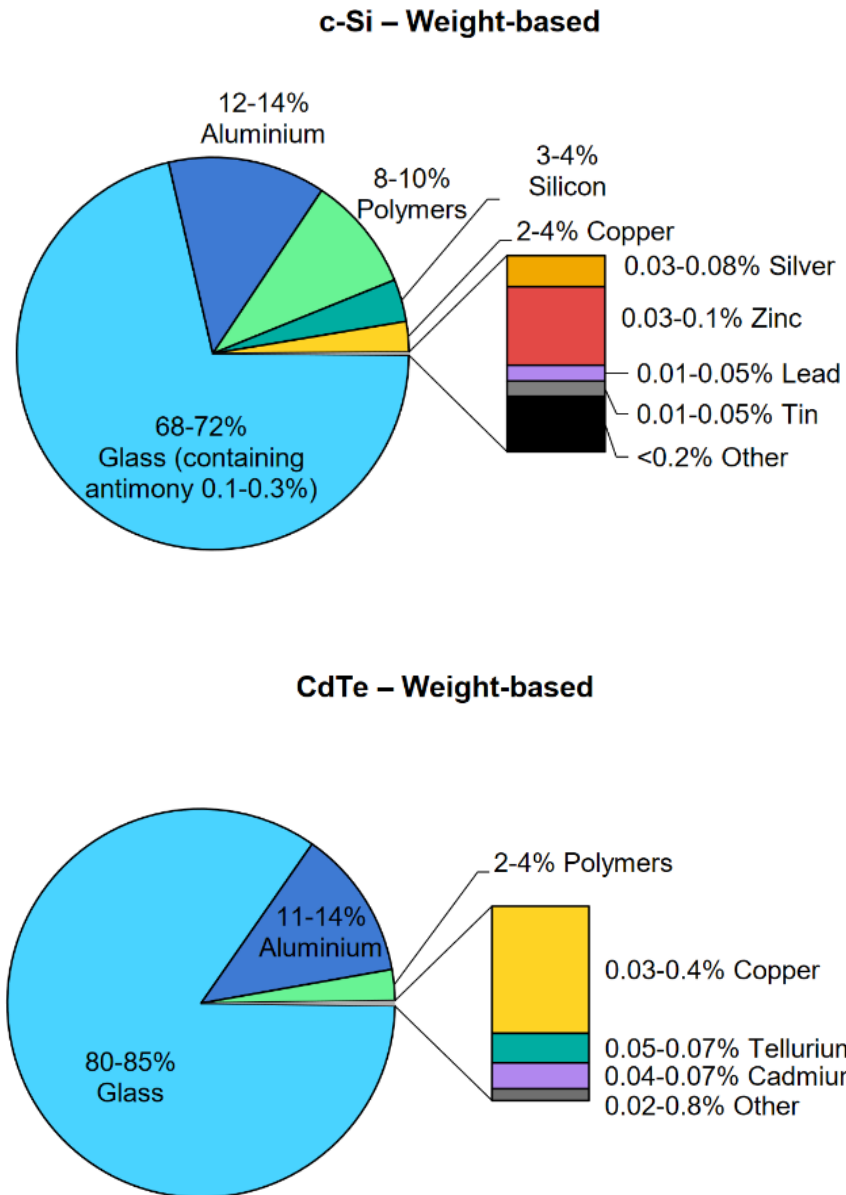
## 2.4 Υλικά κατασκευής φωτοβολταϊκών πάνελ

Για να επιτευχθεί η βέλτιστη διαχείριση των αποβλήτων από τους διαφορετικούς τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ, τόσο σε τεχνολογικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η σύνθεση τους. Οι διαφορετικοί τύποι τεχνολογίας διαφέρουν όσο αφορά στα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους και μπορεί να περιέχουν διάφορα επίπεδα επικίνδυνων ουσιών που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το χειρισμό και την επεξεργασία τους. Οι οικονομίες κλίμακας του κύριου υλικού, του πυριτίου, κάνει το κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) πιο προσιτό και πολύ αποδοτικό σε σύγκριση με άλλα υλικά. Τα πάνελ έχουν βελτιωθεί όσον αφορά την αποτελεσματικότητα και την ισχύ τους κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Η μέση απόδοση τα τελευταία δέκα χρόνια για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου αυξήθηκε από 15% σε 20 % ενώ την ίδια στιγμή για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια CdTe αυξήθηκε από 9% σε 19%. Σε εργαστηριακό επίπεδο την καλύτερη απόδοση την έχουν τα πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου που φτάνουν το 24,4%. (Photovoltaics Report, Fraunhofer ISE, 2023). Η ισχυρή ανταγωνιστική θέση των φωτοβολταϊκών πλαισίων c-Si στην αγορά, χάρη στην υψηλή απόδοση και στο συνεχώς μειούμενο κόστος τους, τα έχει καταστήσει κυρίαρχα στην αγορά και δύσκολο για τις άλλες τεχνολογίες να τα ανταγωνιστούν. Το 2021, η παραγωγή πλαισίων με βάση το κρυσταλλικό πυρίτιο αντιπροσώπευε το 95% του όγκου παραγωγής φωτοβολταϊκών μονάδων παγκοσμίως, με τα πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου να καταλαμβάνουν το 85% αυτού του μεριδίου, (IEA 2022) και (Fraunhofer ISE, 2023). Το 4% του μεριδίου της αγοράς των φωτοβολταϊκών πάνελ, καταλαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά τεχνολογίας λεπτών επιστρώσεων και κυρίως Cdte και CIGS. Το υπόλοιπο 1% αντιστοιχεί σε αυτά που κατασκευάζονται από άλλα υλικά (ευαίσθητοποιημένα σε βαφές, CPV, οργανικά υβρίδια και άλλες τεχνολογίες.

Σε αυτήν την εργασία η βασική εστίαση γίνεται στις τεχνολογίες μονοκρυσταλλικού πυριτίου c-Si εξαιτίας του υψηλού μεριδίου αγοράς τους και της αναμενόμενης κυριαρχίας τους έως το 2030.

Αν και οι μονοκρυσταλλικές και πολυκρυσταλλικές φωτοβολταϊκές μονάδες θεωρούνται ως δύο ξεχωριστοί τύποι φωτοβολταϊκών μονάδων, η κατασκευαστική διαδικασία είναι η ίδια και η μόνη τους διαφορά έγκειται στο υπόστρωμα πυριτίου που αποτελεί τη πλάκα. Κατά βάρος, τα τυπικά κρυσταλλικά πάνελ c-Si σήμερα, περιέχουν 68-72% γυαλί (επιφάνεια πάνελ), 12-14% αλουμίνιο (κυρίως το πλαίσιο), 8-10% πολυμερές (ενθυλάκωση και φύλλο πλάτης), 3-4% πυρίτιο (φωτοβολταϊκά στοιχεία), 2-4% χαλκός (διασυνδέσεις) και λιγότερο από 0,1% ασήμι (γραμμές επαφής) και άλλα μέταλλα (κυρίως κασσίτερο και μόλυβδο), (IEA 2022).

Τα πάνελ λεπτής μεμβράνης είναι τεχνολογικά πιο περίπλοκα από τα πάνελ με βάση το πυρίτιο. Η περιεκτικότητα σε γυαλί για τα c-Si πάνελ είναι πιθανό να αυξηθεί έως το 2030 ενώ αντίθετα, είναι πιθανό να μειωθεί για τα πάνελ λεπτής μεμβράνης. Στο σχήμα 2.2 φαίνεται η αναλογία αυτών των υλικών για c-Si και CdTe φωτοβολταϊκά πλαίσια.



Σχήμα 2. 3: Αναλογία υλικών για c-Si και CdTe φωτοβολταϊκά πλαίσια (Πηγή: Special Report on Solar PV Global Supply Chains, IEA 2022)

## 2.5 Απόβλητα Φωτοβολταϊκών συστημάτων - Προβλέψεις

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα πάνελ που κατασκευάζονται με τη χρήση της τεχνολογίας c-Si καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς, ενώ η τεχνολογία

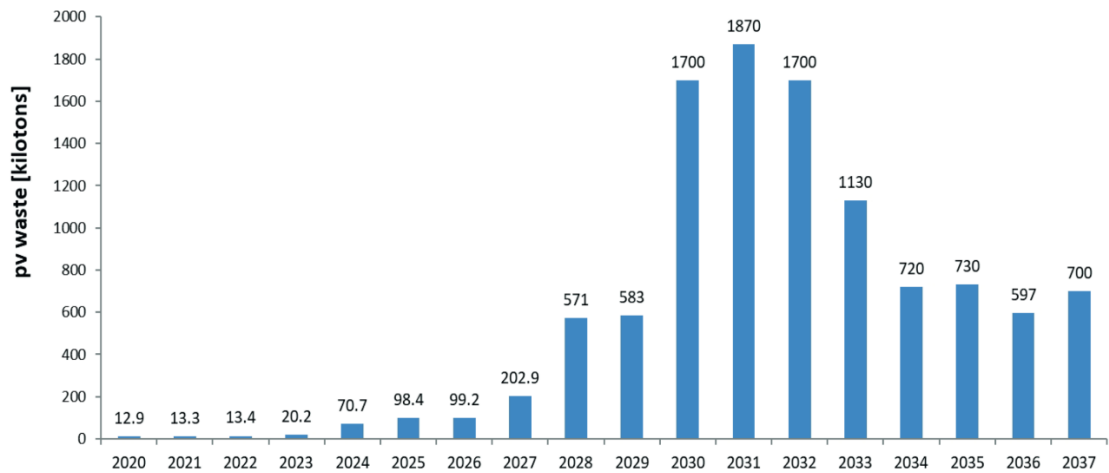
λεπτής μεμβράνης χρησιμοποιώντας είτε την τεχνολογία CdTe είτε την τεχνολογία CIGS, αποτελεί τον δεύτερο μεγαλύτερο κλάδο της αγοράς.

Στα c-Si πάνελ, συνήθως, περισσότερο από 90% της μάζας τους αποτελείται από γυαλί, πολυμερές και αλουμίνιο, τα οποία μπορούν να ταξινομηθούν ως μη επικίνδυνα απόβλητα. Ωστόσο, τα μικρότερα συστατικά των πάνελ c-Si παρουσιάζουν δυσκολίες ανακύκλωσης, καθώς περιέχουν πυρίτιο, ασήμι και ίχνη στοιχείων όπως ο κασσίτερος και ο μόλυβδος (μαζί αντιπροσωπεύουν περίπου το 4% της μάζας). Τα πάνελ λεπτής μεμβράνης (4% της παγκόσμιας ετήσιας παραγωγής) αποτελούνται από περισσότερο από 98% γυαλί, πολυμερές και αλουμίνιο (μη επικίνδυνα απόβλητα) αλλά και μέτριες ποσότητες χαλκού και ψευδάργυρο (μαζί αντιπροσωπεύουν περίπου το 2% της μάζας), που είναι δυνητικά επικίνδυνα απόβλητα για το περιβάλλον. Περιέχουν επίσης, ημιαγωγούς ή επικίνδυνα υλικά όπως π.χ. ίνδιο, γάλλιο, σελήνιο, κάδμιο, τελλούριο και μόλυβδο. Τα επικίνδυνα υλικά χρειάζονται ιδιαίτερη επεξεργασία και εάν δεν διαχειριστούν σωστά υπάρχει κίνδυνος να απελευθερωθούν στο περιβάλλον τοξικές και καρκινογόνες ουσίες. Στον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων συνήθως ταξινομούνται με τους κωδικούς 160213\* (απορριπτόμενος εξοπλισμός που περιέχει επικίνδυνα συστατικά στοιχεία) και 200135\* (απορριπτόμενος ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός που περιέχει επικίνδυνα συστατικά στοιχεία).

Η διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών μονάδων έχει υπολογιστεί για 25 έως 30 χρόνια και ως εκ τούτου, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η εγκατεστημένη ισχύς (MW) των φωτοβολταϊκών πάνελ γίνεται απόβλητο μετά από αυτή την περίοδο. Παγκοσμίως έχουν εγκατασταθεί εκατομμύρια φωτοβολταϊκά πάνελ τις τελευταίες τρεις δεκαετίες και λαμβάνοντας υπόψη την εκτιμώμενη διάρκεια ζωής, περισσότερα από 2 εκατομμύρια τόνοι φωτοβολταϊκών πάνελ στο τέλος του κύκλου ζωής τους (TKZ) αναμένεται να συλλέγονται τα επόμενα 15 χρόνια.

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA) τα απόβλητα φωτοβολταϊκών μονάδων παγκοσμίως θα ανέλθουν σε 1,7–8,0 εκατομμύρια τόνους σωρευτικά έως το 2030 και σε 60-78 εκατομμύρια τόνους σωρευτικά έως το 2050 (κεφάλαιο 1.4) και η μεγάλη αυτή αύξηση αναμένεται να γίνει ορατή κυρίως από το έτος 2025 και μετά.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η αναμενόμενη αύξηση των φωτοβολταϊκών έως το 2030 θα είναι της τάξης το 3000% (σχήμα 1.6) το οποίο σημαίνει και ανάλογη αύξηση στους όγκους αποβλήτων TKZ. Στο Σχήμα 2.5 δίνεται μια εκτίμηση του ετήσιου αναμενόμενου όγκου των φωτοβολταϊκών αποβλήτων TKZ, από το 2020 έως το 2037 για την ΕΕ.



Σχήμα 2. 4: Εκτιμώμενοι ετήσιοι όγκοι αποβλήτων (κton) φωτοβολταϊκών πάνελ ΤΚΖ στην ΕΕ. (πηγή: Pietrogiovanni C., 2021).

Αυτή η τεράστια ποσότητα αποβλήτων ΤΚΖ φωτοβολταϊκών πάνελ απαιτεί την εφαρμογή μιας ολοκληρωμένης διαχείρισης σε όλα τα στάδια της αλυσίδας αξίας ώστε να εξασφαλιστεί η ασφαλής προμήθεια πρώτων υλών και να περιοριστεί διάθεση σε ΧΥΤΑ (Choi & Fthenakis, 2010). Το πυρίτιο θεωρείται κρίσιμη πρώτη ύλη για στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή από το 2014 (εξαιτίας του κόστους παραγωγής του) και, ως εκ τούτου, θα ήταν ζωτικής σημασίας η ανάκτηση του από τα πάνελ στο ΤΚΖ τους. Επιπλέον, η παραγωγή πυριτίου χρειάζεται υψηλή κατανάλωση ενέργειας που μπορεί να μειωθεί με την ανάκτησή του (Müller, Wambach, & Alsema, 2006), καθιστώντας έτσι την ανακύκλωσή του επωφελή για το περιβάλλον.

## 3. ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

### 3.1 Περιγραφή Λειτουργίας Αιολικών Συστημάτων

Αιολικό πάρκο ή Αιολικός Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΣΠΗΕ) ονομάζεται η εγκατάσταση όπου σε μία χερσαία ή παράκτια έκταση, έχει εγκατασταθεί μια ομάδα ανεμογεννητριών, οι οποίες εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες ενός αιολικού πάρκου, τροφοδοτούν με ενέργεια το ηλεκτρικό δίκτυο. Η αιτία πρόκλησης του ανέμου είναι οι διαφορές στην ατμοσφαιρική θερμοκρασία και πίεση, οι οποίες προκαλούνται από την ηλιακή ακτινοβολία. Οι ανεμογεννήτριες για την λειτουργία τους δεν απαιτούν τη μεταφορά ή την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, παράγουν μηδενικούς αέριους ρύπους και έχουν μηδενικά απόβλητα κατά την λειτουργία τους.

Η αιολική ενέργεια είναι η ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με τη μεγαλύτερη ανάπτυξη και την πιο ευρεία εφαρμογή στον κόσμο (Liu & Barlow, 2017) (Liu et al, 2019). Για το 2020 είχαν εγκατασταθεί αιολικές εγκαταστάσεις ισχύος 850 GW παγκοσμίως από τα οποία τα 190 GW στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Global Wind Report, GWEC, 2022). Στους οδικούς χάρτες του Διεθνούς Οργανισμού Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA, 2018) και του Διεθνή Οργανισμού Ενέργειας (IEA, 2021), η αιολική ενέργεια γίνεται κεντρικός πυλώνας του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος έως το 2050, με την λειτουργία περισσότερων από 8.000 GW αιολικών πάρκων, το οποίο σημαίνει ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική ενέργεια θα ξεπεράσει οποιαδήποτε άλλη ενεργειακή πηγή.

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι αποδοτικές, αξιόπιστες και παράγουν ηλεκτρική ισχύ σε λογικό κόστος. Τρεις μεταβλητές καθορίζουν πόση ενέργεια μπορεί να παράγει μια ανεμογεννήτρια. Αυτές είναι η ταχύτητα του ανέμου (δυνατότερος αέρα υψηλότερες ανεμογεννήτριες), το μήκος πτερυγίων (όσο μεγαλύτερη επιφάνεια σάρωσης του αέρα, τόσο μεγαλύτερη η παραγωγή ενέργειας) και η πυκνότητα του αέρα (εξαρτάται από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία και την πίεση του αέρα).

Η βιομηχανία της αιολικής ενέργειας αναπτύσσεται πολύ γρήγορα και η τάση στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών είναι η αύξηση της ικανότητας παραγωγής ισχύος, τα μεγαλύτερα πτερύγια και νέες λύσεις για το σύστημα μετάδοσης κίνησης (Hvidtfeldt & Petersen, 2014).

Υπάρχουν οι μικρές και οι μεγάλες ανεμογεννήτριες ανάλογα με το αν αξιοποιούνται για τη διαμόρφωση αυτόνομων συστημάτων (μικρή ενεργειακή κάλυψη: σπίτι, αγρόκτημα κ.λπ.) ή συνδέονται στο δημόσιο δίκτυο (αιολικά πάρκα) για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών περισσότερων καταναλωτών. Οι μεγάλες ανεμογεννήτριες που

χρησιμοποιούνται σήμερα για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις χερσαίες (onshore) και τις παράκτιες (offshore). Τις χερσαίες τις συναντάμε σε λόφους και σε πεδιάδες ενώ τις παράκτιες θεμελιωμένες στον πυθμένα της θάλασσας (πακτωμένες) ή πλωτές στην θάλασσα. Παρόλο που η ονομαστική ισχύς των θαλάσσιων ανεμογεννητριών υπερέρχει των χερσαίων, οι χερσαίες παραμένουν ακόμα η πιο διαδεδομένες εξαιτίας τις μεγάλης διαφοράς κόστους επένδυσης, σε σχέση με τις παράκτιες. Αυτό οφείλεται τόσο μεγαλύτερο μέγεθος των θαλάσσιων ανεμογεννητριών, όσο και στα αυξημένα κόστη λειτουργίας και συντήρησης τους, αλλά και στην μεγαλύτερη αρχική επένδυση που προϋποθέτουν κυρίως λόγω της θεμελίωσης αλλά και των αυξημένων κοστών για καλωδίωση, μεταφορά και εγκατάσταση. Παρόλα αυτά βλέπουμε ότι συνεχώς πραγματοποιούνται νέες παράκτιες εγκαταστάσεις και μάλιστα αναμένεται να αυξηθούν λόγω των καλύτερων αέριων συνθηκών, του περισσότερου διαθέσιμου χώρου και των λιγότερων περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Hvidtfeldt & Petersen, 2014). Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, για το 2021, στην Ε.Ε., η εγκατεστημένη υπεράκτια αιολική δυναμικότητα ήταν 14,6 GW και αναμένεται να αυξηθεί κατά τουλάχιστον 25 φορές έως το 2030, χρησιμοποιώντας το τεράστιο δυναμικό των 5 θαλάσσιων λεκανών της ΕΕ (Επίσημη Ιστοσελίδα Ε.Ε.).

### **3.2. Γενική αρχή λειτουργίας ανεμογεννητριών**

Η βασική αρχή λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας είναι απλή. Ο άνεμος περιστρέφει τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι συνδεδεμένα με ένα περιστρεφόμενο άξονα. Ο άξονας περνάει μέσα από ένα κιβώτιο μετάδοσης της κίνησης όπου αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής. Το κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα μεγάλης ταχύτητας περιστροφής ο οποίος κινεί μία γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε έναν πύργο στήριξης με στόχο την βελτιστοποίηση της παραγωγής τους.

Ο πύργος στήριξης έχει ένα ύψος που ξεκινάει από τα 30 μέτρα και φτάνει αρκετά μέτρα πάνω από το έδαφος εξασφαλίζοντας τη χρήση ομαλότερου και ταχύτερου ανέμου. Πρόσφατα, η δανική εταιρεία Vestas ανακοίνωσε ότι εγκαινιάζει έναν χερσαίο πύργο ανεμογεννήτριας, με ύψος πύργου 199 μέτρων, παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο ο κλάδος στρέφεται όλο και πιο πολύ σε μεγάλες κατασκευές (Jensen & Skelton, 2018). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν περιοχές στις οποίες ανά 10 μέτρα ύψος μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου κατά 20%, αντιστοιχώντας σε μια μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας της τάξεως του 34%. Σήμερα οι ανεμογεννήτριες είναι δυνατόν να παράγουν ενέργεια που κυμαίνεται από μερικά δεκάδες ή εκατοντάδες W (μικρές ανεμογεννήτριες) μέχρι μερικά MW (μεγάλες ανεμογεννήτριες). Ορισμένοι παράμετροι

επηρεάζουν την παραγωγή ισχύος μιας ανεμογεννήτριας, όπως η ταχύτητα του ανέμου, η καμπύλη ισχύος της μηχανής, η διαθεσιμότητα της μηχανής, οι απώλειες μεταφοράς και ο βαθμός απόδοσης. Για μια τυπική ανεμογεννήτρια 500 kW, οι τυπικές διαστάσεις είναι: Διάμετρος δρομέα, 40 μέτρα και ύψος πύργου 40-50 μέτρα, ενώ αυτής των 3 MW οι διαστάσεις είναι 80 και 80–100 μέτρα αντίστοιχα (επίσημη ιστοσελίδα Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας - ΚΑΠΕ).

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα τροφοδοτώντας απευθείας την κατανάλωση ή να συνδέονται και να διοχετεύουν την ηλεκτρική ενέργεια σε υπάρχον δίκτυο. Στην πρώτη περίπτωση (μικρές εγκαταστάσεις) επειδή ο άνεμος δεν είναι συνεχώς διαθέσιμος, είναι δυνατόν να γίνεται χρήση μιας ή περισσοτέρων νηξελογεννητριών οι οποίες λειτουργούν παράλληλα με τις ανεμογεννήτριες. Η δεύτερη περίπτωση αφορά τη μαζική εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας όπου συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών (αιολικό πάρκο) εγκαθίσταται και λειτουργεί σε μια συγκεκριμένη θέση, διοχετεύοντας το σύνολο της παραγωγής στο ηλεκτρικό σύστημα.

Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από το αιολικό δυναμικό της περιοχής όπου αυτή εγκαθίσταται ενώ το μέγεθός της είναι συνάρτηση των αναγκών που καλείται να εξυπηρετήσει. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών οι οποίες εξασφαλίζουν σταθερή έξοδο μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος. Έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης και ειδικές ηλεκτρογεννήτριες με πολλούς πόλους που συνδέονται απευθείας στο δρομέα χωρίς την ανάγκη πολλαπλασιαστή στροφών.

Οι τοποθεσίες που επιλέγονται για την εγκατάσταση αιολικών ιδανικά έχουν μια σχεδόν σταθερή ροή ανέμου, χωρίς αναταράξεις ή διακοπές με ελάχιστη πιθανότητα ξαφνικών ισχυρών εκρήξεων ανέμου κατά τη διάρκεια του έτους. Για τις χερσαίες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών επιλέγονται συνήθως οι κορυφογραμμές σε λοφώδεις ή ορεινές με σκοπό να εκμεταλλευτούν την τοπογραφική επιτάχυνση, καθώς όταν ο άνεμος επιταχύνεται σε μια κορυφογραμμή, η ενέργεια που παράγεται αυξάνεται καθώς περνά περισσότερη αιολική ενέργεια μέσα από τις ανεμογεννήτριες. Τα Παράκτια Αιολικά Πάρκα είναι εγκατεστημένα σε θαλάσσιες περιοχές σε απόσταση μεγαλύτερη των δέκα χιλιομέτρων από την ακτή. Έχουν μεγαλύτερο συντελεστή εκμετάλλευσης από τα χερσαία αιολικά πάρκα επειδή η επιφάνεια του νερού είναι ομαλότερη από αυτήν του εδάφους και η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλότερη από την ξηρά.

### **3.3 Περιγραφή Τύπων και Δομής Ανεμογεννητριών**

Εκτός από τον διαχωρισμό σε μεγάλες και μικρές οι ανεμογεννήτριες, μια άλλη κατηγοριοποίηση μπορεί να γίνει με βάση τον άξονα περιστροφής τους. Με βάση αυτόν τον διαχωρισμό οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες:



1. Οριζόντιου άξονα, των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους (εικόνα 3.1)

2. Κατακόρυφου άξονα, των οποίων ο δρομέας παραμένει σταθερός και κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους (εικόνα 3.1).

Σήμερα στην παγκόσμια αγορά έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, με 3 πτερύγια σε ποσοστό πάνω από 95% και βασίζονται στην τεχνολογία των αεροπορικών ελίκων.



Εικόνα 3. 1: Ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. (Πηγή: <https://global-energy.eu>)

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα παρουσιάζουν σημαντικό πρόβλημα κατά την εκκίνηση λόγω της εγγενούς συμμετρίας που εμφανίζουν γύρω από τον κατακόρυφο άξονα περιστροφής τους, όποτε απαιτείται εξωτερική βοήθεια κατά την εκκίνηση, μειονέκτημα που δεν εμφανίζεται στις μηχανές οριζοντίου άξονα. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα για τη χρήση των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα. Αρχικά, το μεταβλητό μέγεθος των πτερυγίων της επιτρέπει να συλλέγει τη μέγιστη ποσότητα ενέργειας από τον άνεμο. Επίσης έχει την υψηλότερη απόδοση καθώς έχει πτερύγια κάθετα προς την κατεύθυνση του ανέμου που προσδίδουν μεγαλύτερη ισχύ για περιστροφή και τέλος, επιτρέπουν την εύκολη εγκατάσταση και συντήρηση (επίσημη ιστοσελίδα ΚΑΠΕ). Ως αποτέλεσμα, σήμερα στην παγκόσμια αγορά έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, με 3 πτερύγια σε ποσοστό πάνω από 95%.

Μια ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα αποτελείται από τα εξής μέρη (εικόνα 3.2):

1. **Την βάση (θεμελίωση)**, η λειτουργία της οποίας είναι να στηρίζει ολόκληρη την ανεμογεννήτρια και αποτελεί το πιο βαρύ τμήμα της συνολικής κατασκευής. Η μάζα του κυμαίνεται από 60% έως 90% της συνολικής μάζας στις χερσαίες ανεμογεννήτριες, ανάλογα τον τύπο και τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας.

2. **Τον πύργο (πυλώνα)**, ο οποίος κατασκευάζεται συνήθως από χάλυβα (σωληνωτός ή δικτυωτός) και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα και στηρίζει όλη την ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση.

3. **Την άτρακτο (κουβούκλιο ή νασέλα)** η οποία στηρίζεται πάνω στον πύργο περιβάλλει και προστατεύει τα μηχανικά μέρη. Πρέπει να είναι ευρύχωρη για να γίνεται εφικτή η εποπτεία και ενδεχομένως η συντήρηση των εξαρτημάτων και να αερίζεται επαρκώς για να ψύχεται σωστά η γεννήτρια (μερικές μεγάλες ανεμογεννήτριες έχουν σύστημα κλιματισμού). Μέσα στη νασέλα υπάρχουν:

- Το σύστημα μετάδοσης κίνησης, το οποίο αποτελείται από τον κύριο άξονα, τα έδρανά του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής.

- Η ηλεκτρική γεννήτρια, σύγχρονη ή επαγωγική ηλεκτρική γεννήτρια και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και συνήθως βρίσκεται πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Υπάρχει και το σύστημα πέδης το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.

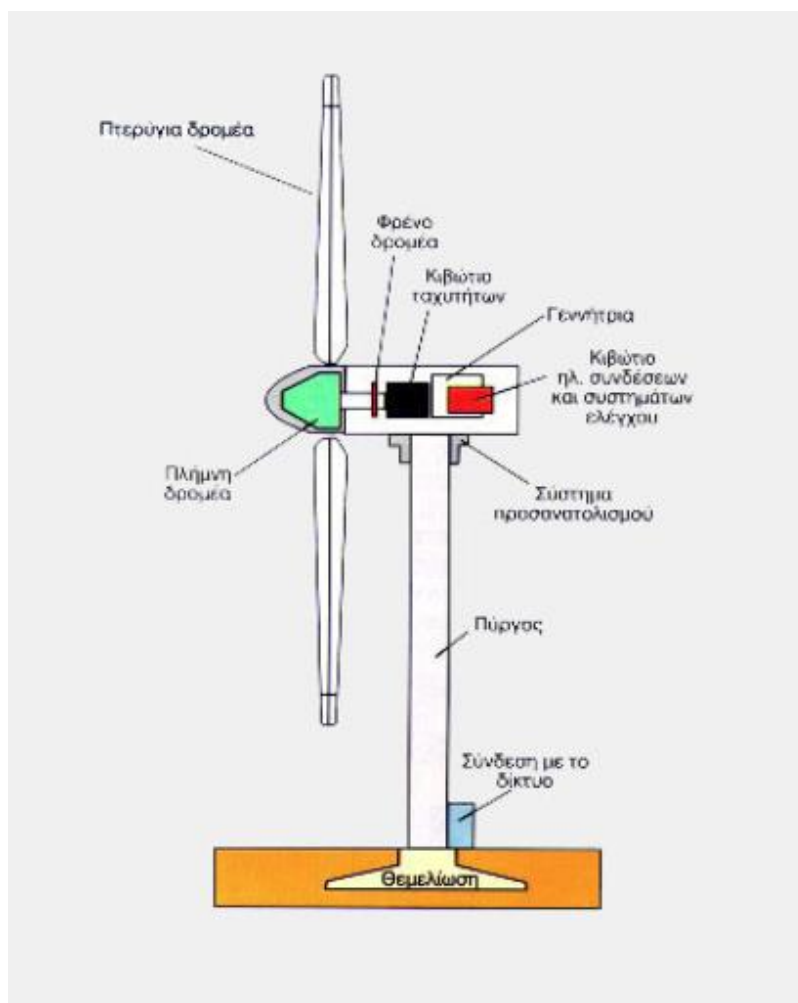
- Το σύστημα προσανεμισμού, που αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.

4. **Τον ρότορα** (δρομέα) που αποτελείται από τον διακλαδωτή, το σύστημα ελέγχου των πτερυγίων και από 2 ή συνήθως 3 πτερύγια. Όταν φυσάει άνεμος ο ρότορας περιστρέφεται γύρω από τον κεντρικό άξονα και τροφοδοτεί την γεννήτρια η οποία παράγει ενέργεια. Η μεγιστοποίηση της απόδοσης προϋποθέτει ρυθμιζόμενα και μεγαλύτερα πτερύγια ρότορα, αεροδυναμικό σχεδιασμό, ανθεκτικότητα των πτερυγίων και σταθερό σχήμα (Andersen N., 2015).

5. Τον ηλεκτρολογικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.

6. Το μετασχηματιστή μετατροπής της χαμηλής τάσης της ανεμογεννήτριας σε μέση τάση προκειμένου να μεταφερθεί η ηλεκτρική ενέργεια προς το δίκτυο της Δ.Ε.Η. Ο μετασχηματιστής είναι συνήθως εγκατεστημένος δίπλα στην ανεμογεννήτρια και δεν

διαφέρει κατασκευαστικά από τους μετασχηματιστές που είναι εγκατεστημένοι πάνω στους πυλώνες της Δ.Ε.Η.. Βέβαια σε πολλές ανεμογεννήτριες ο μετασχηματιστής βρίσκεται πάνω στον πύργο.



**Εικόνα 3. 2:** Δομή Ανεμογεννήτριας οριζόντιου Άξονα (Πηγή: ΚΑΠΕ, [http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis\\_windmill.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_windmill.htm))

### 3.4 Υλικά κατασκευής ανεμογεννήτριας

Το βάρος της ανεμογεννήτριας καθώς και των επιμέρους υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της εξαρτάται από την κατασκευαστική εταιρεία, τον τύπο και την ισχύ της. Τα υλικά κατασκευής των μερών της ανεμογεννήτριας φαίνονται στο σχήμα 3.3 και περιγράφονται παρακάτω:

**Υλικά κατασκευής βάσης:** Τα υλικά κατασκευής της βάσης είναι 3%-6% χάλυβας και 94%-97% σκυρόδεμα.

**Υλικά κατασκευής πύργου:** Τα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι ο χάλυβας, σε ποσοστό 95 έως 100%, το αλουμίνιο σε ποσοστό 0 έως 2%, ο χαλκός σε ποσοστό 0 έως 1% και

το πολυμερές ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (GFRP) σε ποσοστό 0 έως 4% (Andersen, 2015).

**Υλικά κατασκευής ατράκτου:** Ο σκελετός της ατράκτου είναι μεταλλικός και το υλικό κατασκευής της ατράκτου είναι ένα συνθετικό, πλαστικό υλικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού ή άνθρακα (GFRP/CFRP). Τα εξαρτήματα και οι μηχανισμοί που βρίσκονται στο εσωτερικό της ατράκτου (γεννήτρια, συστήματα μετάδοσης κίνησης, προσανεμισμού, κ.α.) εξαρτώνται από τον κατασκευαστή και το σχεδιασμό. Τα υλικά που βρίσκονται στην άτρακτο και στα εξαρτήματα της είναι τα συνθετικά υλικά GFRP και CFRP (περίβλημα) και άλλα απόβλητα ηλεκτρονικού και ηλεκτρικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) δηλαδή χάλυβας, χαλκός (γεννήτρια), αλουμίνιο, σίδηρος καθώς και μικρότερες ποσότητες ηλεκτρονικών ειδών και λιπαντικών ελαίων. Επίσης, σε ορισμένους τύπους γεννητριών χρησιμοποιούνται μόνιμοι μαγνήτες (αντί για ηλεκτρομαγνήτες) με στόχο τη μείωση του βάρους της γεννήτριας. Για την κατασκευή των μόνιμων μαγνητών, χρησιμοποιούνται σπάνιες γαίες (Andersen N., 2015). Οι περισσότερες τουρμπίνες άμεσης μετάδοσης κίνησης, είναι εξοπλισμένες με γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη, οι οποίες συνήθως περιέχουν νεοδύμιο και μικρότερες ποσότητες δυσπρόσιο. Κατά μέσο όρο, ένας μόνιμος μαγνήτης περιέχει 28,5% νεοδύμιο, 4,4% δυσπρόσιο, 1% βόριο και 66% σίδηρο και ζυγίζει έως 4 τόνους (18). Υπάρχει επίσης μικρή χρήση στοιχείων σπάνιων γαιών στους μαγνήτες εντός του πύργου για τη στερέωση εσωτερικών εξαρτημάτων (Vestas, 2018a).

**Υλικά κατασκευής ρότορα:** Τα πτερύγια, ο διακλαδωτής και το σύστημα ελέγχου των πτερυγίων συνθέτουν τον ρότορα της ανεμογεννήτριας. Ο διακλαδωτής και το σύστημα ελέγχου είναι γενικά κατασκευασμένα από χυτοσίδηρο και σε ορισμένες περιπτώσεις περιέχεται και χάλυβας.

Όσον αφορά στα **πτερύγια**, προκειμένου να έχουν τον πιο αποτελεσματικό αεροδυναμικό σχεδιασμό, το υλικό κατασκευής των πτερυγίων πρέπει να είναι ελαφρύ, ανθεκτικό και σκληρό τα πτερύγια αποτελούνται από δύο τμήματα (τμήμα χαμηλής και υψηλής πίεσης), τα οποία ενώνονται μεταξύ τους και συνθέτουν το κέλυφος του πτερυγίου. Το κέλυφος των πτερυγίων είναι κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά και ο σκελετός από μέταλλα. Σύνθετα ονομάζονται τα υλικά τα οποία αποτελούνται από περισσότερα από δύο διακριτά μέρη. Συγκεκριμένα το κέλυφος των πτερυγίων των ανεμογεννητριών, αποτελείται από τρία συστατικά, τις ίνες που αποτελούν συστατικό ενίσχυσης, την μήτρα και τον πυρήνα. Αν και το υλικό και οι συνθέσεις ποικίλλουν μεταξύ των τύπων και των κατασκευαστών των πτερυγίων, γενικά αποτελούνται από τα ακόλουθα: (Jensena & Skeltona, 2018).

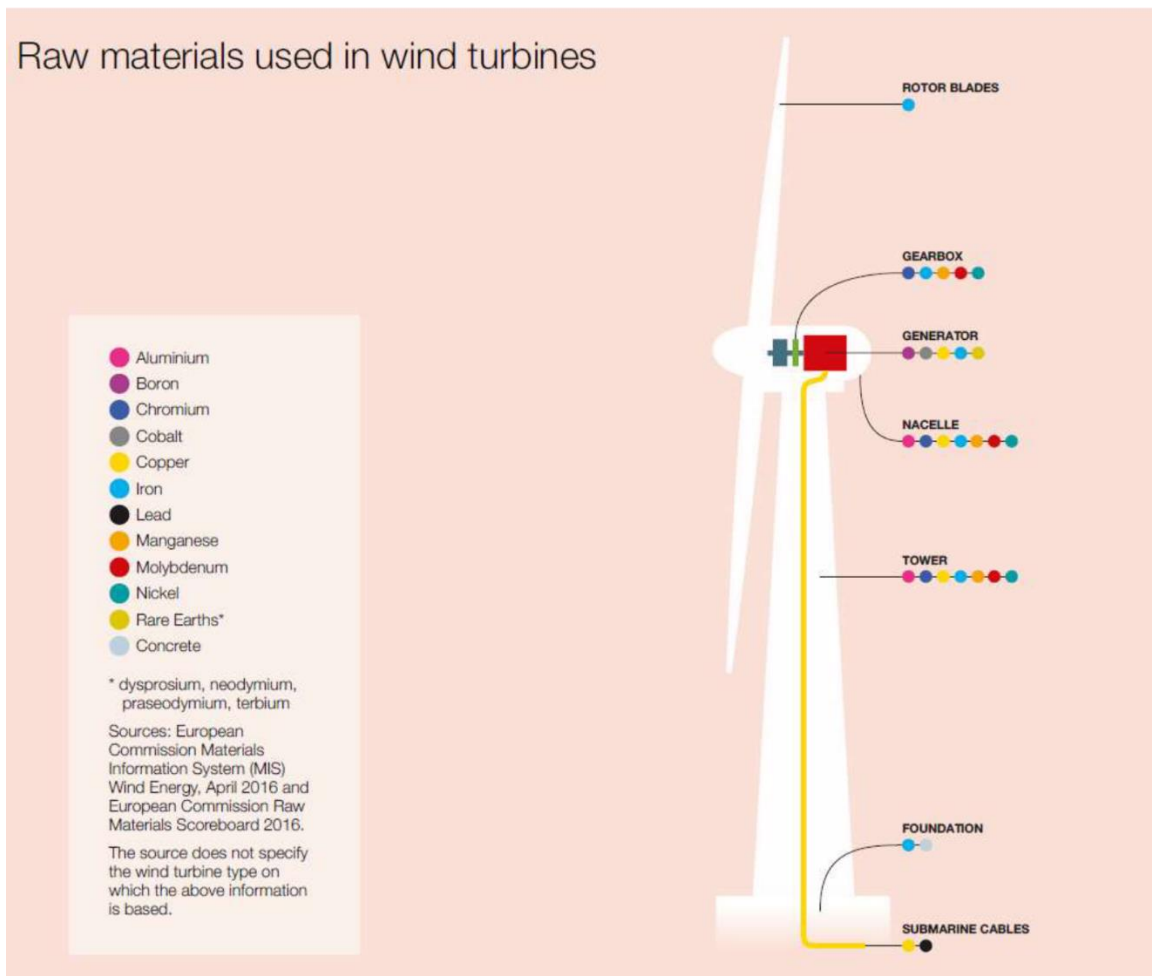
- Πολυμέρη ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRP, Glass Fiber Reinforced Polymer) και άνθρακα (CFRP, Carbon fiber reinforced polymer).
- Μήτρα από πολυμερή υλικά π.χ. θερμοπλαστικοί, νανομηχανικά πολυμερή και σύνθετα υλικά, εποξικοί, πολυεστέρες, βινυλεστέρες, πολυουρεθανικοί.
  - Πυρήνας π.χ. ξύλο, αφρός πολυβινυλοχλωρίδιου (PVC), αφρός πολυτερεφθαλικού αιθυλενίου
  - Επιστρώσεις π.χ. πολυαιθυλένιο (PE) ή πολυουρεθάνη (PUR)
  - Μέταλλα π.χ. καλωδιώσεις χαλκού, χαλύβδινες βίδες.

Τα σύνθετα υλικά πολυμερών ενισχυμένων με ίνες, Fiber Reinforced Polymer (FRP), αντιπροσωπεύουν την πλειοψηφία της σύνθεσης του υλικού των πτερυγίων (60-70% ενισχυτικές ίνες και 30-40% ρητίνη κατά βάρος). Έχουν πολλά πλεονεκτήματα καθώς συνδυάζουν ιδιότητες υψηλής αντοχής στο μηχανικό φορτίο, έχουν βέλτιστη αεροδυναμική απόδοση και επιτρέπουν την αποδοτική κατασκευή μακρύτερων και ελαφρύτερων πτερυγίων που απαιτούνται για την αύξηση της απόδοσης της ανεμογεννήτριας. Το CFRP μπορεί να συμβάλει στη δημιουργία ελαφρύτερων πτερυγίων καθώς παρουσιάζει ανθεκτικότητα, αλλά καθώς έχει μεγαλύτερο κόστος, τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRP) είναι δημοφιλέστερα στον κατασκευαστικό κλάδο των πτερυγίων κυρίως για την καλή σχέση απόδοσης τιμής (Skelton K., 2017). Ωστόσο, όταν τα θερμοσκληρυνόμενα σύνθετα υλικά FRP σκληρυνθούν, τα πολυμερή διασταυρώνονται και υφίστανται μη αναστρέψιμη διαδικασία που δυσχεραίνει την ανακύκλωση (Skelton K., 2017).

Τα πιο διαδεδομένα υλικά πτερυγίων είναι: GFRP (80%-95%), CFRP (0%-10%), πλαστικό (0%-15%), χάλυβας (2%-9%) και αλουμίνιο (0% -1%) (Skelton, 2017). Η ενδεικτική μάζα ενός ρότορα σε μία ανεμογεννήτρια ισχύος 5MW είναι 110tn με διάμετρο 126m ενώ σε μία ανεμογεννήτρια ισχύος 10MW είναι 229tn με διάμετρο περίπου 178m.

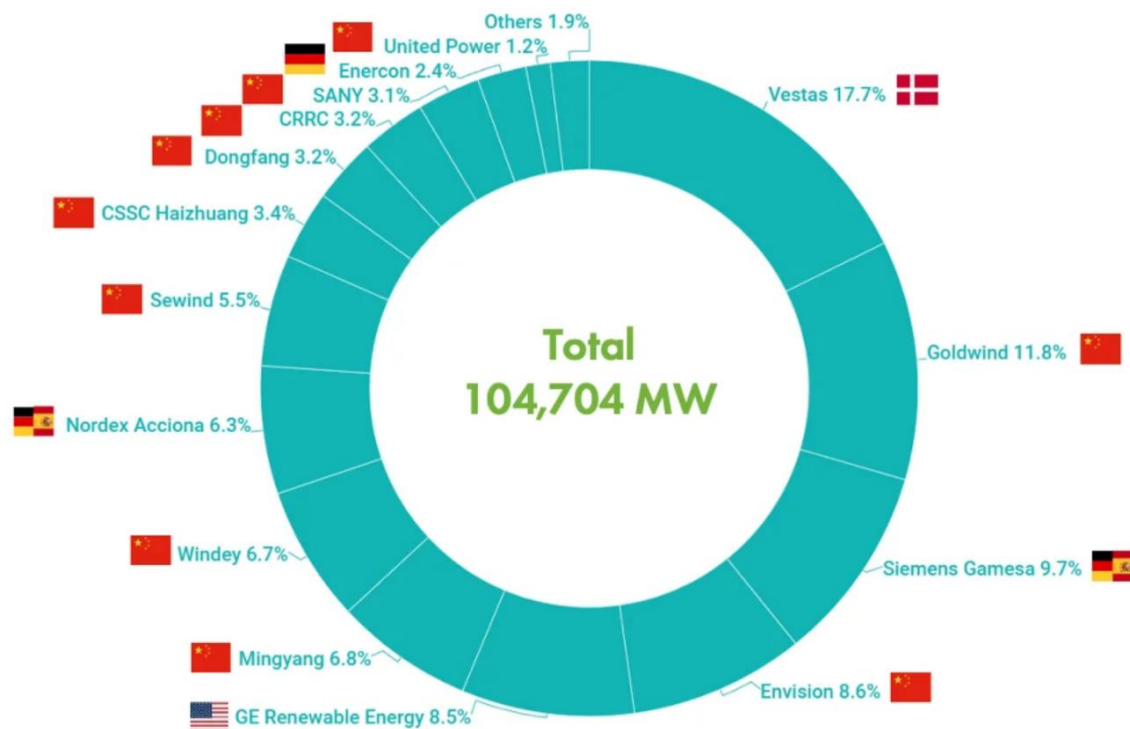
Η κατασκευή των πτερυγίων των θαλάσσιων ανεμογεννητριών δε διαφέρει από αυτήν των χερσαίων. Οι βασικές διαφορές τους έγκειται στο μέγεθος καθώς οι θαλάσσιες ανεμογεννήτριες και τα πτερύγια τους είναι συνήθως μεγαλύτερες από τις χερσαίες, και στον τρόπο επεξεργασίας της επιφάνειάς τους καθώς τα πτερύγια των θαλάσσιων ανεμογεννητριών απαιτούν μεγαλύτερη προστασία από τη διάβρωση που προκαλούν τα αερολύματα αλατιού του αέρα.

Οι προκλήσεις σχετικά με το υλικό των πτερυγίων σχετίζονται με τη βελτιστοποίηση του βάρους, της ακαμψίας, της διάρκειας ζωής, των μεθόδων πρόβλεψης ζημιών και την ανακυκλωσιμότητα τους.



Εικόνα 3. 3: Υλικά κατασκευής ανεμογεννήτριας. (Πηγή: Carrara et al, 2020)

Σύμφωνα με το Παγκόσμιο Συμβούλιο Αιολικής Ενέργειας το Global Wind Energy Council (GWEC) το 2021, εγκαταστάθηκαν παγκοσμίως 29.234 ανεμογεννήτριες από 30 κατασκευαστές ανεμογεννητριών το 2021 εκ των οποίων οι 18 είναι από την Ασία-Ειρηνικό και οι 9 από την Ευρώπη. Πρώτη στον κλάδο παραμένει η δανέζικη εταιρεία Vestas η οποία πραγματοποίησε το 17,7% των νέων εγκαταστάσεων. Στη δεύτερη θέση βρίσκεται η κινεζική Goldwind με 11,8%, διατηρώντας τη θέση της από το 2020, ενώ η Siemens Gamesa είχε επίσης έτος ρεκόρ με μερίδιο παγκόσμιας αγοράς 9,7%, ανεβάζοντάς στην τρίτη θέση για το 2021. Μια άλλη κινεζική εταιρεία, η Envision, είναι τέταρτη με 8,65% της αγοράς του 2021. Η GE Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας ολοκληρώνει την πρώτη πεντάδα με 8,55% της αγοράς. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται το μερίδιο αγοράς των ανεμογεννητριών παγκοσμίως.



Σχήμα 3. 1: Μερίδιο αγοράς ανεμογεννητριών παγκοσμίως (πηγή: World Wind Energy Council 2020, <https://qwec.net/wind-turbine-suppliers-see-record-year-for-deliveries-despite-supply-chain-and-market-pressures/>).

### 3.5 Απόβλητα Ανεμογεννήτριες – Προβλέψεις

Από τα υλικά κατασκευής των ανεμογεννητριών και των αιολικών πάρκων, προκύπτουν τα είδη των παραγόμενων αποβλήτων και διαγράφεται το οικολογικό αποτύπωμα της αιολικής βιομηχανίας. Από την εκτίμηση για το τέλος κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών από την εταιρείας Vestas για το έτος 2017 (Vestas, 2017), οι οποίες κυριαρχούν στον κατασκευαστικό τομέα στην Ευρώπη, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας για τη μέση ποσοστιαία τιμή των υλικών που περιέχονται στις ανεμογεννήτριες:

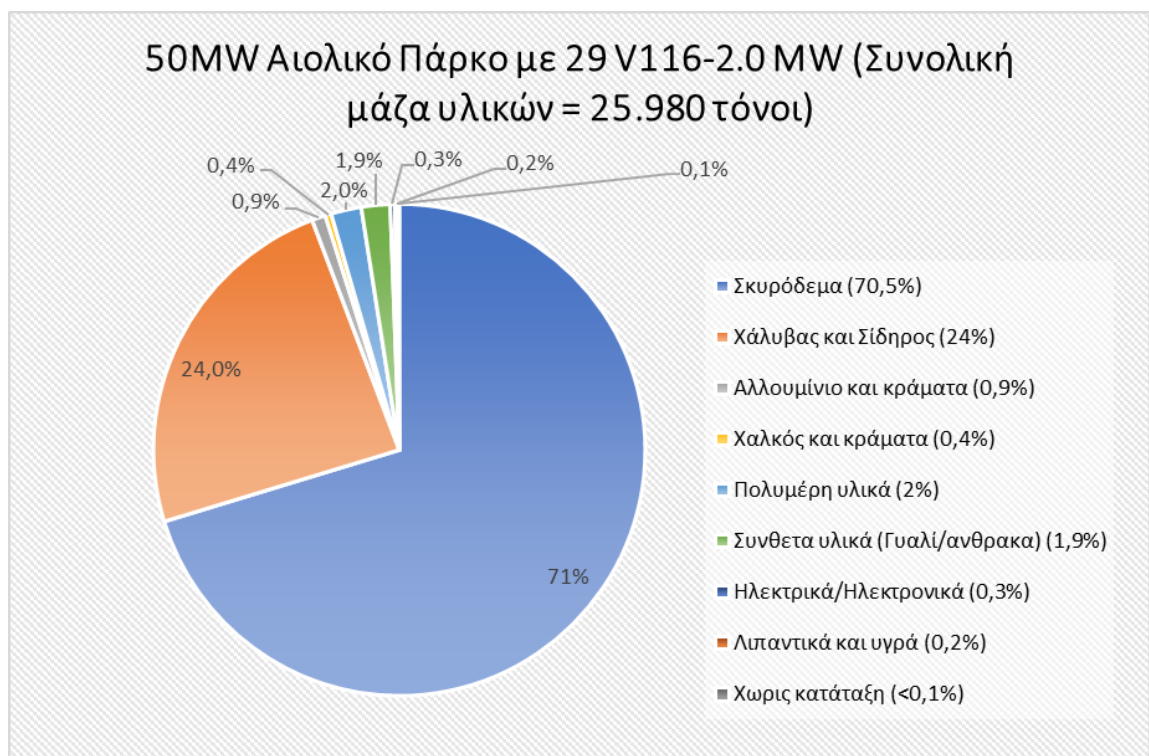
Πίνακας 3. 1: Ποσοστό υλικών στις ανεμογεννήτριες Vestas

Υλικά Κατασκευής Τουρμπίνας Ανεμογεννήτριας / Τύπος Τουρμπίνας Vestas	V172- 7.2 MW	V150- 6.0 MW	V163- 4.5 MW	V112- 3.45 MW	V100- 2.0 MW	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ
Χάλυβας και Σίδηρος	87,6%	89,70%	83,5%	87,1%	84,30%	<b>86,4%</b>
Αλουμίνιο και κράματα	1,10%	1,40%	1,0%	1,0%	1,5%	<b>1,2%</b>

Χαλκός και κράματα	0,60%	0,50%	0,6%	0,7%	0,5%	<b>0,6%</b>
Πολυμερή υλικά	4,20%	1,90%	6,0%	2,8%	3,4%	<b>3,7%</b>
Σύνθετα υλικά (Γυαλί/άνθρακα)	5,70%	5,40%	8,0%	7,1%	8,7%	<b>7,0%</b>
Ηλεκτρικά/Ηλεκτρονικά	0,50%	0,50%	0,5%	0,8%	0,9%	<b>0,6%</b>
Λιπαντικά και υγρά	0,30%	0,60%	0,3%	0,4%	0,3%	<b>0,4%</b>
Χωρίς κατάταξη	0,10%	0,00%	0,1%	0,0%	0,2%	<b>0,1%</b>
Συνολική μάζα (τόνοι)	928	949	513	438	230	<b>612</b>

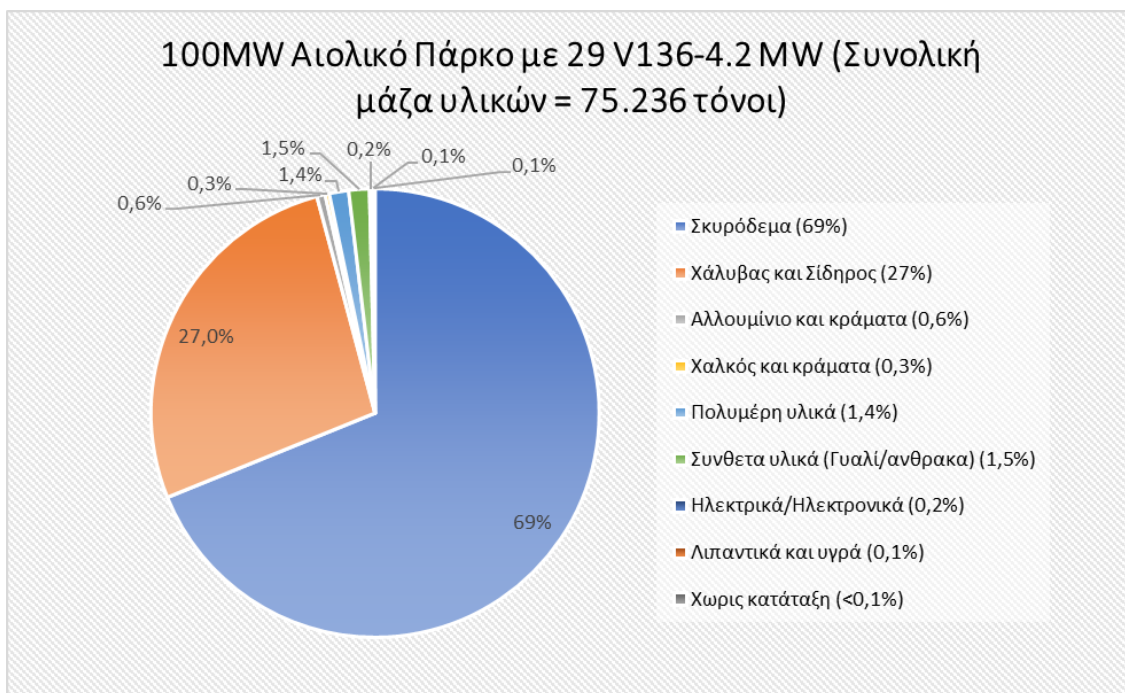
(Πηγή: Vestas, 2017)

Σύμφωνα με την εκτίμηση για το τέλος κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών από την εταιρείας Vestas για τα έτη 2017 και 2018 (Vestas, 2017 – 2018a) ένα αιολικό πάρκο εγκατεστημένης ισχύος 50 MW με 25 χερσαίες ανεμογεννήτριες τύπου Vestas V116-2MW ζυγίζει 25.980 τόνους ενώ ένα αιολικό πάρκο εγκατεστημένης ισχύος 100 MW με 24 ανεμογεννήτριες Vestas V136-3.45MW ζυγίζει 75 236 τόνους. Η ανάλυση των επιμέρους υλικών των συγκεκριμένων αιολικών πάρκων δίνεται στα Σχήματα 3.2 και 3.3.



Σχήμα 3. 2: Ανάλυση υλικών σε αιολικό πάρκο ισχύος 50 MW, (Πηγή: Vestas, 2017 – 2018a)





Σχήμα 3. 3: Ανάλυση υλικών σε αιολικό πάρκο ισχύος 100 MW, (Πηγή: Vestas 2017, 2018a)

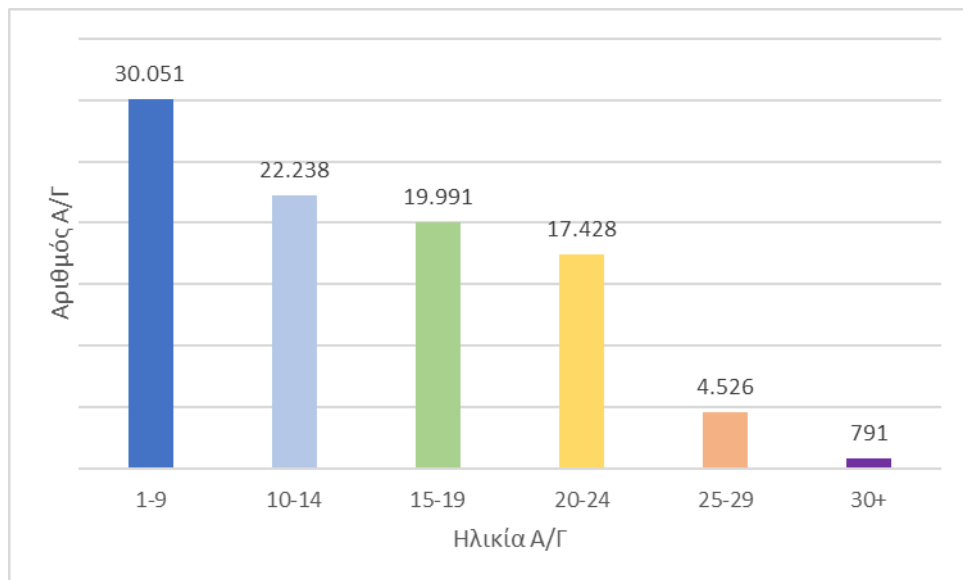
Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1, στην ΕΕ αλλά και παγκοσμίως έχουν εδραιωθεί στόχοι και αναμένονται σημαντικές αυξήσεις στην συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ιδιαιτέρως της αιολικής ενέργειας, στο ενεργειακό μείγμα. Ωστόσο, όσο περισσότερα αιολικά πάρκα κατασκευάζονται, ο όγκος των αποβλήτων και των σύνθετων υλικών αυξάνονται επίσης, μεγεθύνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την κατασκευή και την χρήση τους.

Σύμφωνα με την Eurostat, για το 2021 η Αιολική Ενέργεια καλύπτει σήμερα το 15% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρώπης και σε πολλές χώρες πολύ περισσότερο: Δανία 44%, Ιρλανδία 31%, Πορτογαλία 26%, Ισπανία 24%, Γερμανία 23% και Ελλάδα 17,5%. Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) αναμένει ότι η αιολική ενέργεια θα είναι πρώτη στην παραγωγή ενέργειας έως το 2027, ενώ η Ευρωπαϊκή Επιτροπή θεωρεί ότι η αιολική ενέργεια θα προσφέρει το ήμισυ της ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρώπης έως το 2050, με την ισχύ αιολικής ενέργειας να αυξάνεται από 190 GW που είναι σήμερα, σε 1.300 GW.

Σύμφωνα με αναφορά του 2017 του WindEurope, περιγράφονται τρία πιθανά σενάρια για τις αιολικές εγκαταστάσεις έως το 2030. Το Κεντρικό Σενάριο προβλέπει ότι έως το 2030, θα εγκατασταθούν στην ΕΕ αιολικά πάρκα ισχύος 323 GW, 253 GW χερσαία και 70 GW υπεράκτια. Με αυτή την δυναμικότητα, η αιολική ενέργεια θα παράγει 888 TWh ηλεκτρικής ενέργειας, που αντιστοιχεί στο 30% της ζήτησης ενέργειας της ΕΕ. Το ισχυρότερο σενάριο προβλέπει εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας ισχύος 397 GW και το ήπιο σενάριο 256 GW έως το 2030.

Η μεγάλη αύξηση αυτή θα γίνει με την εγκατάσταση δεκάδων νέων αιολικών πάρκων σε καινούργιες τοποθεσίες, αλλά και με την ανανέωση (repowering) και την παράταση ζωής των υφιστάμενων. Αναμένεται ότι σχεδόν τα μισά από τα υπάρχοντα αιολικά πάρκα της Ευρώπης θα φτάσουν στο τέλος της κανονικής ζωής τους έως το 2030.

Η μέση διάρκεια ζωής μιας ανεμογεννήτριας υπολογίζεται ότι είναι περίπου 20-25 χρόνια με μέγιστη διάρκεια ζωής τα 35 χρόνια (Martinez-Mendoza et al, 2022) και ο ρυθμός γήρανσης των ανεμογεννητριών είναι παρόμοιος για τα διαφορετικά μοντέλα (Staffell & Green 2014). Την τελευταία δεκαετία, η πρώτη γενιά χερσαίων ανεμογεννητριών στην Ευρώπη έφτασε στο τέλος της ζωής τους ενώ για τις υπεράκτιες, ο παροπλισμός τους άρχισε πριν μερικά χρόνια (Torham et al, 2019). Το 2020, αποσυναρμολογήθηκαν 388 MW αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη, εκ των οποίων το 57% πραγματοποιήθηκε στη Γερμανία (Wind Europe, 2021). Στο Σχήμα 3.4 δίνεται η ηλικία των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών στην ΕΕ σήμερα.



Σχήμα 3. 4: Ηλικία ανεμογεννητριών στην ΕΕ (Πηγή: Στοιχεία από την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας)

Μέχρι το 2050 θα υπάρχουν 43 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων πτερυγίων παγκοσμίως με την Κίνα να κατέχει το 40% των αποβλήτων, την Ευρώπη το 25%, τις Ηνωμένες Πολιτείες το 16% και ο υπόλοιπος κόσμος το 19% (Liu P. & Barlow C.Y., 2017). Με βάση το προβλεπόμενο σενάριο μέτριας ανάπτυξης για τις μελλοντικές εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας από το Global Wind Energy Council (GWEC) συνολικά 16,8 εκατομμύρια τόνοι θα πρέπει να παλαιωθούν παγκοσμίως μέχρι το 2030 και 39,8 εκατομμύρια τόνοι μέχρι 2050 (Bank L. et al, 2018). Από αυτά, το 85-95% είναι ανακυκλώσιμο (σκυρόδεμα, χάλυβας, αλουμίνιο, χαλκός) αλλά η περιβαλλοντική πρόκληση για την διαχείριση παραμένει για τα 50 έως και 150 εκ. τόνων αποβλήτων, κυρίως από τα σύνθετα και

πολυμερή υλικά των πτερυγίων και της ατράκτου. Σε αυτά τα απόβλητα, πρέπει να προστεθούν κι εκείνα που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των πτερυγίων, δηλαδή κατά την κατασκευή, μεταφορά, εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρησή τους (Liu & Barlow 2017 & Wind Europe 2020).

Η φύση των σύνθετων υλικών δημιουργεί περαιτέρω δυσκολίες στην ανακύκλωση τους λαμβάνοντας υπόψη τις περιορισμένες υφιστάμενες μεθόδους. Δημιουργείται λοιπόν αναμφισβήτητη η ανάγκη για βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων που δημιουργούνται μετά το Τέλος Κύκλου Ζωής των ανεμογεννητριών, με τις ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ο κύριος στόχος της ΕΕ είναι να δημιουργήσει αποδοτικότητα των πόρων μέσω της ανακατεύθυνσης των αποβλήτων σε πρώτες ύλες.

## 4. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

### 4. 1 Πολιτική Διαχείρισης Φωτοβολταϊκών Αποβλήτων στην Ε.Ε.

Επί του παρόντος στην αγορά των φωτοβολταϊκών τα απόβλητα των φωτοβολταϊκών πάνελ συχνά απορρίπτονται ανεπεξέργαστα σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) σε όλο τον κόσμο (Εικόνα 4.1). Ωστόσο, κατά τη διαδικασία της αποσύνθεσης στους ΧΥΤΑ, επιβλαβείς χημικές ουσίες μπορεί να διεισδύσουν στο έδαφος και να μολύνουν το υπόγεια ύδατα και το περιβάλλον (D'Adamo et al, 2017). Γίνεται πλέον σαφές, ότι με τον ρυθμό ανάπτυξης των Φ/Β εγκαταστάσεων, η ορθή διαχείριση των αποβλήτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους, γίνεται όλο και πιο επείγουσα και επιτακτική προκειμένου τα Φ/Β να αποτελέσουν μια πραγματικά βιώσιμη λύση στον τομέα της ενέργειας.



Εικόνα 4 1 : Ανεξέλεγκτη Διάθεση Φωτοβολταϊκών πλαισίων

Οι περισσότερες χώρες σε όλο τον κόσμο δεν έχουν αναπτύξει επαρκείς στρατηγικές διαχείρισης, ούτε συγκεκριμένη νομοθεσία για την διαχείριση των αποβλήτων Φ/Β πλαισίων στο ΤΚΖ τους. Ταξινομούν τα απόβλητα των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ως γενικά ή βιομηχανικά απόβλητα και τα διαχειρίζονται χωρίς διαχωρισμό, κάτω από τα γενικά πλαίσια των στερεών ή επικίνδυνων αποβλήτων. Μόνο η Ε.Ε, με την Οδηγία 2012/19/ΕΕ, συμπεριλαμβάνει τα απόβλητα των φωτοβολταϊκών πάνελ στο ΤΚΖ, στα ΑΗΗΕ, υιοθετώντας ένα ενιαίο κανονιστικό πλαίσιο και αποδίδοντας την ευθύνη της διαχείρισης των Φ/Β αποβλήτων στους παραγωγούς αυτών (αξιοποιώντας την Εκτεταμένη Ευθύνη του Παραγωγού). Η οδηγία έχει παγκόσμιο αντίκτυπο, αφού οι παραγωγοί Φ/Β πλαισίων που θέλουν να διαθέσουν τα προϊόντα τους στην αγορά της

Ε.Ε., ευθύνονται για τη διαχείριση των αποβλήτων τους (κόστος συλλογής και επεξεργασίας), ανεξάρτητα από το πού βρίσκονται οι εγκαταστάσεις παραγωγής τους. Οι παραγωγοί, πέρα από το κόστος συλλογής και ανακύκλωσης έχουν την ευθύνη, να συντάσσουν αναφορές με ποσοτικά στοιχεία (πώλησης/ανακύκλωσης), να συνεισφέρουν οικονομικά στην κατασκευή δημόσιων κέντρων συλλογής και διαχωρισμού των Φ/Β πλαισίων και να ενημερώνουν τους πελάτες τους για την ανάγκη διαχείρισης των συγκεκριμένων αποβλήτων. Οι παραγωγοί έχουν επίσης την ευθύνη να αναπτύξουν εσωτερικά προγράμματα συμμόρφωσης με την οδηγία ΑΗΗΕ ή να συμμετέχουν σε συλλογικά προγράμματα συμμόρφωσης, όπως του PV-CYCLE. Ο οργανισμός PV-CYCLE, είναι στην ουσία ο συνδετικός κρίκος μεταξύ των κατασκευαστών και του κανονιστικού πλαισίου που επιβάλλει η οδηγία. Πρόκειται για μια βιομηχανική κοινοπραξία που συμβάλει στην οργάνωση, συλλέγοντας και αναλαμβάνοντας την ανακύκλωση των Φ/Β αποβλήτων, αποτελώντας ένα εργαλείο για τους παραγωγούς για την συμμόρφωση τους με την οδηγία ΑΗΗΕ. Για την ομαλή προσαρμογή των παραγωγών στις υποχρεώσεις της οδηγίας, τίθενται (μέσω των αναθεωρήσεων της οδηγίας) στόχοι που αυξάνονται σταδιακά από το 2012, την έναρξη δηλαδή εφαρμογής της οδηγίας. Μετά από το 2018, η οδηγία ορίζει, ότι πρέπει να συλλέγεται ανά έτος το 65% των προϊόντων που διατέθηκαν στο εμπόριο ή το 85% των παραγόμενων αποβλήτων Φ/Β πλαισίων και η επίτευξη ανάκτησης/ανακύκλωσης ανά έτος πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο 85/80% και για τα 28 κράτη μέλη της Ε.Ε.. Αναμένεται η αναθεώρηση της οδηγίας, όπου πιο αυστηροί όροι θα τεθούν, ώστε να διασφαλιστεί η συλλογή και η ανακύκλωση όλων των ΑΗΗΕ συμπεριλαμβανομένων και των Φ/Β πλαισίων με ιδιαίτερη έμφαση στην μεγιστοποίηση της ανάκτησης υλικών και ιδίως των κρίσιμων πρώτων υλών (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2023/0025(COD)).

#### **4. 2 Διαχείριση Αποβλήτων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων στην Ε.Ε.**

Η πυραμίδα ιεράρχησης της διαχείρισης των αποβλήτων στην Ε.Ε (κεφάλαιο 1, σχήμα 1.7) και το πλαίσιο μιας κυκλικής οικονομίας μπορεί να εφαρμοστεί και στα απόβλητα των Φ/Β πάνελ. Σύμφωνα με αυτά, προτεραιότητα στην διαχείριση των αποβλήτων αποτελεί η πρόληψη / μείωση παραγωγής αποβλήτων και ακολουθεί η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση/ανάκτηση των αποβλήτων αφήνοντας ως τελευταία λύση την διάθεση σε ΧΥΤΑ.

Η πρώτη επιλογή είναι η **αποφυγή** δημιουργίας αποβλήτων. Η ισχυρή ανάπτυξη της αγοράς, η σπανιότητα των πρώτων υλών και η προς τα κάτω πίεση στις τιμές των φωτοβολταϊκών πλαισίων, οδηγούν στην δημιουργία μιας περισσότερο αποτελεσματικής αγοράς μαζικής παραγωγής, με νέες τεχνολογίες υψηλής απόδοσης, μειωμένη χρήση

πρώτων υλών και αυξημένη χρήση υποκατάστατων υλικών. Ο συνδυασμός των δομικών υλικών των Φ/Β πλαισίων δεν έχει αλλάξει σημαντικά μέχρι σήμερα. Ωστόσο, έχει επιτευχθεί εξοικονόμηση υλικών λόγω της εφαρμογής της αρχής της αποδοτικότητας των πόρων και των υλικών. Η αποδοτικότητα των πόρων είναι η χρήση των περιορισμένων πόρων του κόσμου με βιώσιμο τρόπο, ελαχιστοποιώντας τις επιπτώσεις στο περιβάλλον. Για παράδειγμα, εξοικονόμηση πόρων έγινε στο παρελθόν και συνεχίζεται να ερευνάται, για τον μόλυβδο, το κάδμιο και το σελήνιο ώστε η ποσότητα των επικίνδυνων υλικών να μειωθεί (IEA, IRENA, 2014). Για τα άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές τεχνολογίες Φ/Β πλαισίων, η έρευνα εστιάζει κυρίως στις ελαχιστοποίηση των ποσοτήτων των υλικών ανά πλαίσιο για εξοικονόμηση κόστους. Καθώς όμως οι ποσότητες αποβλήτων θα αυξάνονται, η περιορισμένη διαθεσιμότητα των υλικών και η αύξηση των τιμών θα οδηγήσουν σε προσπάθειες μείωσης και υποκατάστασης των υλικών. Η έρευνα για τα Φ/Β σήμερα, έχει θέσει προτεραιότητα την μείωση κάποιων βασικών υλικών των Φ/Β πλαισίων όπως γυαλί, πολυμερή, αλουμίνιο, κ.α. και στην αντικατάσταση κάποιων υλικών όπως γυαλί, πολυμερή, ίνδιο, ασήμι, πυρίτιο στα Φ/Β με νέα υλικά (IEA, IRENA, 2014).

Ακολουθεί η επιλογή **επαναχρησιμοποίησης** που περιλαμβάνει επισκευές των Φ/Β και τρόπους επαναχρησιμοποίησης τους. Εκτιμάται, ότι σήμερα έως και το 80% της ροής των αποβλήτων Φ/Β πλαισίων, αποτελείται από ελαττωματικά προϊόντα κατά την παραγωγή ή τη μεταφορά και από αστοχίες των Φ/Β πλαισίων κατά τα πρώτα 4 έτη λειτουργίας τους, αντί για απόβλητα από το ΤΚΖ τους. Εκτιμάται ότι περίπου το 45%-65% αυτών των Φ/Β μονάδων μπορεί να επισκευαστεί ή να ανακαινιστεί (Tsanakas J.A., et all, 2020). Δηλαδή, σχεδόν το 50% των αποβλήτων Φ/Β πλαισίων μπορεί να μην καταλήγει σε ανακύκλωση ή διάθεση. Στην πράξη, το ποσοστό μπορεί να είναι ακόμα μεγαλύτερο καθώς σήμερα, τα παροπλισμένα, αν και λειτουργικά, φωτοβολταϊκά πλαίσια οδηγούνται για ανακύκλωση/διάθεση. Δυστυχώς όμως η επαναχρησιμοποίηση, η επισκευή ή/και η ανακαίνιση των Φ/Β πλαισίων παραμένει ακόμα άτυπη και μη συστηματοποιημένη στην συνολική αλυσίδα αξίας των φωτοβολταϊκών. Η δημιουργία μιας τυποποιημένης διαδικασίας για την επισκευή, ανακαίνιση και επαναχρησιμοποίηση τέτοιων Φ/Β πλαισίων θα επιτρέψει την εφαρμογή ενός επιχειρηματικού μοντέλου κυκλικής οικονομίας, όπου τα Φ/Β πλαίσια θα σχεδιάζονται και θα κατασκευάζονται τόσο για ανακυκλωσιμότητα όσο και για κυκλικότητα, (Tsanakas J.A., et all, 2020).

Επόμενες επιλογές στην ιεραρχία διαχείρισης αποβλήτων της Ε.Ε., αποτελούν η **ανακύκλωση και η ανάκτηση** των υλικών των Φ/Β πλαισίων στο ΤΚΖ και λαμβάνοντας υπόψη τις τεράστιες μάζες αποβλήτων που αναμένονται, θα πρέπει να αποτελέσουν προτεραιότητα των εμπλεκόμενων στην αλυσίδα αξίας των φωτοβολταϊκών. Τα Φ/Β πλαίσια θεωρούνται σε μεγάλο βαθμό ανακυκλώσιμα, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό

των υλικών που αποτελούνται μπορεί να ανακτηθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί (γυαλί, αλουμίνιο). Διάφορες διαδικασίες ανακύκλωσης έχουν αναπτυχθεί για τα Φ/Β πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου και οι πιο κοινές βασίζονται σε μηχανικές, χημικές και θερμικές διεργασίες, οι οποίες περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο. Παρότι τα πλαίσια cSi κυριαρχούν επί του παρόντος στην αγορά, τα πλαίσια λεπτών επιστρώσεων, περιέχουν σπάνια και τοξικά υλικά όπως τελλούριο (Te) κάδμιο (Cd) και Ίνδιο (In) και η ανακύκλωση τους κρίνεται απαραίτητη λαμβάνοντας υπόψη και την διείσδυση τους στην αγορά των φωτοβολταϊκών πλαισίων τα επόμενα χρόνια.

Σύμφωνα με την οδηγία ΑΗΗΕ, εγκαταστάσεις ανακύκλωσης γυαλιού και μετάλλων ανά την Ευρώπη χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των αποβλήτων των φωτοβολταϊκών για τον διαχωρισμό και την ασφαλή διάθεσή τους. Ειδικές εγκαταστάσεις για την ανακύκλωση φωτοβολταϊκών c-Si έχουν επίσης δημιουργηθεί σε ορισμένες από τις χώρες μέλη της Ε.Ε. Πρωτοπόρος σε αυτήν την πρωτοβουλία υπήρξε η Γαλλία ανοίγοντας το 2017 την πρώτη στον κόσμο εγκατάσταση ανακύκλωσης, αποκλειστικά για c-Si, στο Rousset (Tsanakas J., 2019).

Οι τεχνικές ανακύκλωσης μπορούν να χωριστούν σε χαμηλής και υψηλής αξίας ανάλογα με την ποιότητα των ανακτώμενων προϊόντων. Η ανακύκλωση θεωρείται χαμηλής αξίας όταν τα ανακτώμενα προϊόντα που προκύπτουν είναι χαμηλής καθαρότητας (περιέχουν προσμίξεις με άλλα υλικά) και συνεπώς η επαναχρησιμοποίησή τους έχει χαμηλή αξία. Υψηλής αξίας ανακύκλωση θεωρείται όταν τα προϊόντα που προκύπτουν είναι υψηλής καθαρότητας και ποιότητας και η επαναχρησιμοποίησή τους έχει υψηλή αξία (Rong D., et al, 2019).

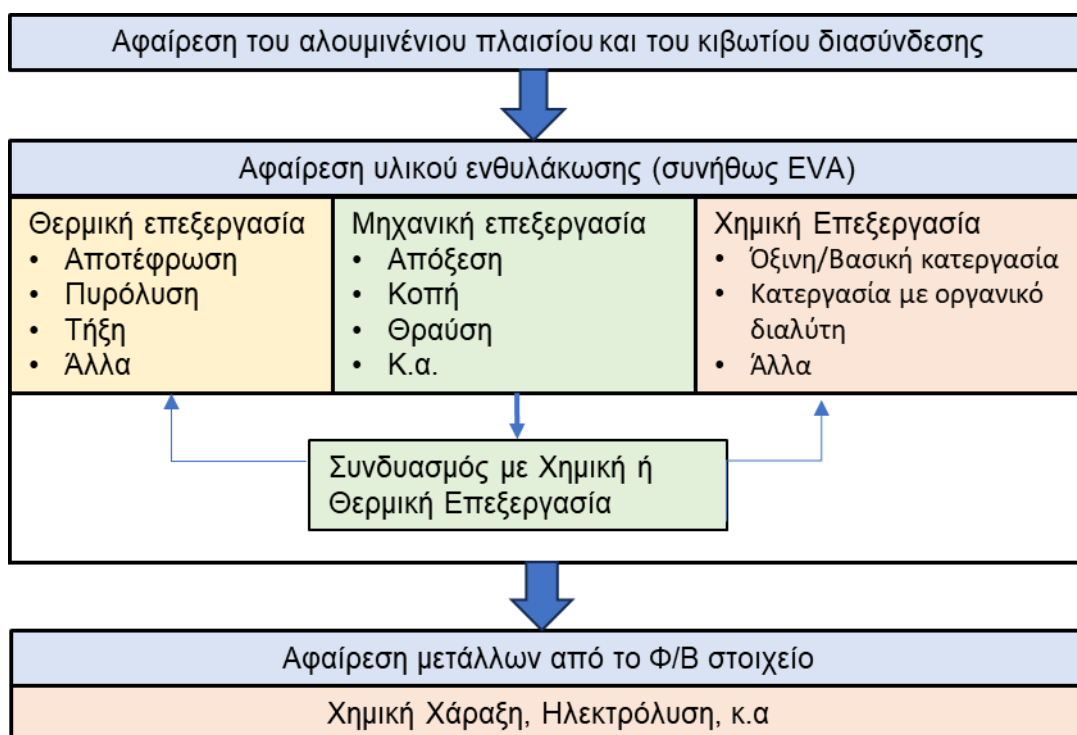
Η ανακύκλωση υψηλής αξίας διατηρεί επίσης πολύτιμα και σπάνια μέταλλα όπως π.χ ασήμι (Ag), γάλλιο (Ga), ίνδιο (In), γερμάνιο (Ge) κάδμιο (Cd), και τελλούριο (Te), αλλά και πιο συμβατικούς πόρους όπως το αλουμίνιο (Al), ο χαλκός (Cu), το γυαλί καθώς και το ενεργοβόρο υλικό υψηλής καθαρότητας, το στοιχείο (wafer) πυριτίου (Si). Τα ανακτημένα αυτά πολύτιμα υλικά μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν στην κατασκευή νέων Φ/Β στοιχείων. Η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών μονάδων συμβάλλει επιπλέον και στην βιωσιμότητα του κατασκευαστικού κλάδου.

Όμως, παρά τα περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη, η ανακύκλωση είναι δύσκολο να γίνει ευρέως αποδεκτή χωρίς οικονομικά κίνητρα και δυστυχώς, πολλές μελέτες (D'Alamo, 2017 και Cucchiella F. 2015) έχουν δείξει ότι η ανακύκλωση φωτοβολταϊκών μονάδων πυριτίου στερείται οικονομικής βιωσιμότητας στην εποχή μας. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή αξία των ανακτώμενων υλικών, στο υψηλό κόστος των διεργασιών της ανακύκλωσης, στον χαμηλό (σήμερα) όγκο αποβλήτων και, το σημαντικότερο, στην έλλειψη βασικής υποδομής ανακύκλωσης ειδικά για τα Φ/Β πλαίσια. Έτσι η διάθεση τους στους χώρους υγειονομικής ταφής παραμένει η κυρίαρχη λύση.



### 4. 3 Τεχνολογίες Ανακύκλωσης Φ/Β Πλαισίων

Οι διαδικασίες για την ανακύκλωση Φ/Β πλαισίων σήμερα περιλαμβάνουν τρία βασικά στάδια: 1) αποσυναρμολόγηση του πλαισίου, 2) αφαίρεση του υλικού ενθυλάκωσης (EVA) ώστε να απομονωθεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο και 3) ανάκτηση των μετάλλων και των υλικών. Το πρώτο στάδιο είναι κοινό σε όλες τις διαδικασίες ανακύκλωσης και περιλαμβάνει την αποσυναρμολόγηση και αφαίρεση των κουτιών διασύνδεσης, των χάλκινων καλωδίων και του αλουμινένιου πλαισίου. Το αλουμίνιο και ο χαλκός από τα καλώδια στέλνονται στην καλά εδραιωμένη αγορά ανακύκλωσης αλουμινίου και χαλκού. Οι προκλήσεις των περισσότερων ερευνών και τεχνολογιών επικεντρώνονται στην αφαίρεση του υλικού ενθυλάκωσης, που συνήθως είναι EVA και στην ανάκτηση των μετάλλων και των πολύτιμων υλικών από το Φ/Β στοιχείο. Σε αυτά τα στάδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν φυσικές, χημικές ή θερμικές μεθόδους επεξεργασίας. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται το διάγραμμα ροής των διεργασιών και οι μέθοδοι επεξεργασίας για την ανακύκλωση ενός Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 4 1: Ροής διεργασιών της Ανακύκλωσης των Φ/Β πλαισίων

#### 4.3.1 Μέθοδοι αφαίρεσης πολυστρωματικής δομής Φ/Β πλαισίων

Μετά την αφαίρεση του κουτιού διασύνδεσης και του αλουμινένιου πλαισίου, το επόμενο βήμα είναι η αποσυναρμολόγηση του γυαλιού από τα υλικά ενθυλάκωσης και η απομόνωση των στοιχείων του πυριτίου, το οποίο αποτελεί και την βασική τεχνική δυσκολία. Από τις μεθόδους επεξεργασίας που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία είκοσι



χρόνια που όπως αναφέρθηκε είναι μηχανικές, θερμικές, χημικές ή συνδυασμός αυτών, μόνο ορισμένες χρησιμοποιούνται εμπορικά, ενώ οι περισσότερες βρίσκονται ακόμα στο ερευνητικό στάδιο. Στις μέρες μας, η μηχανική προσέγγιση είναι ο κύριος τρόπος επεξεργασίας που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των πολυστρωματικών δομών των φωτοβολταϊκών μονάδων c-Si.

Με την **μηχανική επεξεργασία**, γίνεται θραύση και απόξεση του γυαλιού και κοπή του στρώματος ενθυλάκωσης. Για την αφαίρεση των ακαθαρσιών όπως υπολείμματα κόλλας ή βιδών από τον υαλοπίνακα, χρησιμοποιούνται μαγνήτες, θραυστήρες, κόσκινα, συσκευές διαλογής με δινορρέυματα και συστήματα εξάτμισης. Το θρυματισμένο γυαλί, που προκύπτει από την μηχανική επεξεργασία, περιέχει συνήθως προσμίξεις με άλλα υλικά όπως το πυρίτιο, πολυμερή και μέταλλα και συνήθως στέλνεται για ανακύκλωση από κοινού με άλλο ανακυκλωμένο γυαλί σε βιομηχανίες για την παραγωγή θερμομονωτικών δομικών υλικών (αφρού ή υαλοβάμβακα) (IRENA and IEA-PVPS,2016). Με αυτή την μέθοδο επιτυγχάνεται υψηλό ποσοστό ανακύκλωσης και ανάκτησης του συνόλου της μάζας των Φ/Β πλαισίων (80-85%) και έτσι επιτυγχάνεται ο στόχος της οδηγίας για τα ΑΗΗΕ, όμως τα υλικά υψηλής αξίας δεν ανακτώνται πλήρως και η ανακύκλωση θεωρείται χαμηλής αξίας. Η υπόλοιπη μάζα συχνά αποτεφρώνεται ή διατίθεται σε ΧΥΤΑ, παρότι περιέχει στοιχεία όπως ασήμι, χαλκό και πυρίτιο, που μαζί αντιπροσωπεύουν τα δύο τρίτα της χρηματικής αξίας ενός πάνελ πυριτίου. Με τη μέθοδο αυτή αποφεύγεται η υγειονομική ταφή μεγάλης μάζας αποβλήτων, απαιτεί σχετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και έχει χαμηλό κόστος.

Ωστόσο και λαμβάνοντας υπόψη τις μεγάλες ποσότητες Φ/Β αποβλήτων που αναμένονται, αυτή η επιλογή ανακύκλωσης ενδέχεται να κορεστεί στο μέλλον, καθώς οι βιομηχανίες κατασκευής θερμομονωτικών μπορούν να απορροφήσουν μια συγκεκριμένη ποσότητα ανακτημένου γυαλιού από Φ/Β πλαίσια και συνεπώς νέες τεχνολογίες ανακύκλωσης πρέπει να αναζητηθούν.

**Θερμική Επεξεργασία:** Ήδη από τις πρώτες έρευνες για την ανακύκλωση των Φ/Β πλαισίων, επιβεβαιώθηκαν τα πλεονεκτήματα των θερμικών διεργασιών. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής, είναι η δυνατότητα ανάκτησης άθικτων των κυψελών πυριτίου και γυαλιού. Κατά τη θερμική επεξεργασία όπως η αποκόλληση, απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες ώστε να γίνει τροποποίηση των χαρακτηριστικών των Φ/Β πλαισίων και αποσύνθεση του υλικού ενθυλάκωσης (συνήθως EVA) είτε με πυρόλυση σε περιβάλλον αδρανούς αερίου είτε με καύση σε περιβάλλον οξυγόνου. (Rong D. et al, 2019) Στη συνέχεια το γυαλί, το πυρίτιο και τα μέταλλα διαχωρίζονται μηχανικά και στην συνέχεια εφαρμόζονται άλλες διαδικασίες για την ανάκτηση των μετάλλων από διαχωρισμένα υλικά. Τέτοιου είδους επεξεργασίες χαρακτηρίζονται από μεγάλη αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση του EVA, οδηγώντας στην ανακύκλωση

έως και του 90% των συστατικών των φωτοβολταϊκών πάνελ. Ωστόσο, ένα βασικό μειονέκτημα των θερμικών διεργασιών είναι η υψηλή κατανάλωση ενέργειας κατά την εφαρμογή τους (Padoan F., et al, 2019).

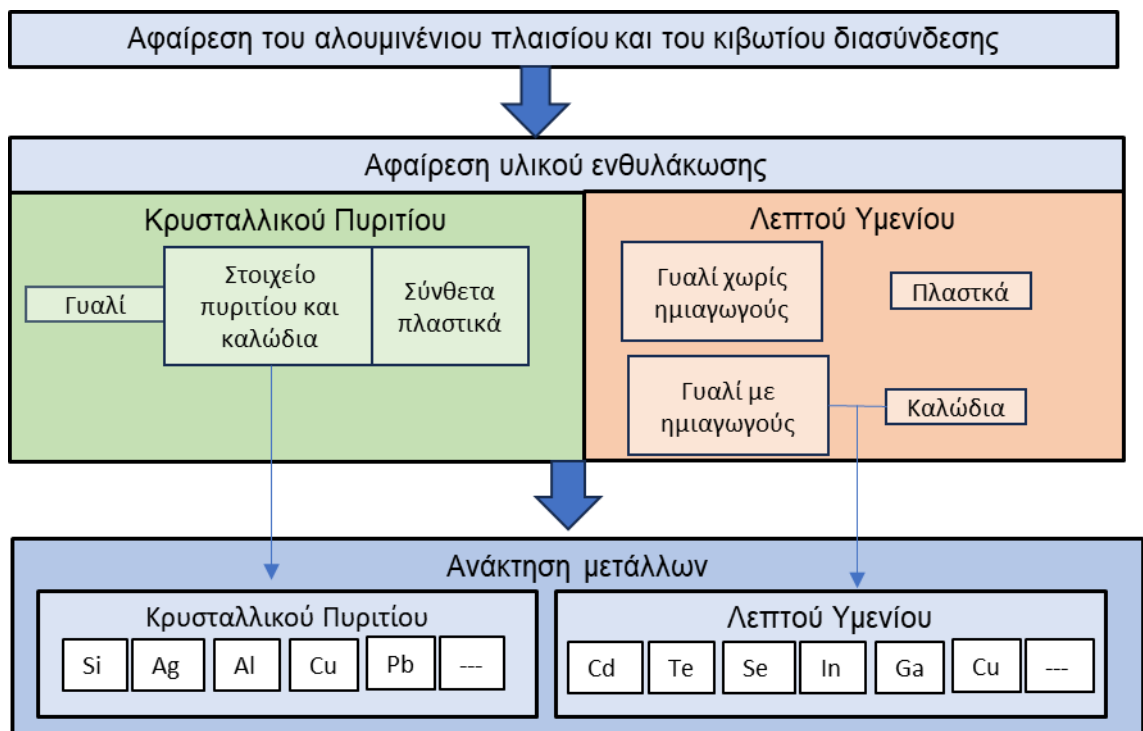
Ο οργανισμός PV Cycle ήταν ο πρώτος που καθιέρωσε μια διαδικασία ανακύκλωσης με υλικοτεχνική υποστήριξη Φ/Β πλαισίων σε ολόκληρη την ΕΕ. Το 2016 η διαδικασία ανακύκλωσης ΦΒ πέτυχε ποσοστό ρεκόρ ανακύκλωσης 96% για φωτοβολταϊκά στοιχεία c-Si (Lunardi M. M., et al, 2018), το οποίο ξεπερνά τα σημερινά όρια της οδηγίας ΑΗΗΕ. Σε αυτήν την διαδικασία, μετά την αφαίρεση των καλωδίων και του κουτιού διακλάδωσης αποσυναρμολογείται το αλουμινένιο πλαίσιο και η εμπρόσθια γυάλινη επιφάνεια. Τα ποσοστά ανάκτησης σ' αυτό το στάδιο είναι 100% για το αλουμίνιο και 95% για το γυαλί. Μετά γίνεται θερμική επεξεργασία του υπολείμματος στους 500 °C, για να εξατμιστεί το υλικό ενθυλάκωσης (EVA) και μέρος της παραγόμενης ενέργειας επαναχρησιμοποιείται. Με αυτήν τη διαδικασία γίνεται φυσικός διαχωρισμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων από το υλικό ενθυλάκωσης. Από αυτά, το 80% των στοιχείων μπορεί να επαχρησιμοποιηθεί ενώ το υπόλοιπο 20% πρέπει να υποστεί επιπλέον χημική και θερμική επεξεργασία για να ανακτηθεί το περιεχόμενο πυρίτιο σε ποσοστό 85%. Ο διαχωρισμός των υλικών επιτρέπει την αποστολή τους σε συγκεκριμένες ροές ανακύκλωσης κάθε υλικού.

Επί του παρόντος, η μοναδική βιομηχανοποιημένη διαδικασία με θερμική επεξεργασία, για την ανάκτηση των Φ/Β υλικών πέρα από το αλουμίνιο, το γυαλί και τον χαλκό, αναπτύχθηκε από την γερμανική εταιρεία Deutsche Solar. Αρχικά γίνεται χειροκίνητη αποσυναρμολόγηση των μονάδων πυριτίου και στη συνέχεια εφαρμόζεται συνδυασμός θερμικής και χημικής επεξεργασίας. Πρώτα το πολυμερές υλικό ενθυλάκωσης (EVA) καίγεται στους 600 C για να διευκολυνθεί ο διαχωρισμός των υλικών και να ανακτηθούν τα κύτταρα πυριτίου, στη συνέχεια με χημική χάραξη αφαιρούνται από την επιφάνεια των κυττάρων η επιμετάλλωση, η αντιανακλαστική επίστρωση και η σύνδεση p/n, για την αναγέννηση κρυσταλλικού πυριτίου (Wambach K., 2003). Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα. Ο χαμηλός βαθμός αυτοματισμού και η αναγκαιότητα διαχείρισης των σημαντικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων κάνει αυτή τη διαδικασία πολύ δαπανηρή (Fiandra V. et al, 2019).

**Χημική Επεξεργασία:** Οι χημικές διεργασίες, έχουν ως στόχο την ανάκτηση του κλάσματος μετάλλου από το πάνελ, ενώ συγκριτικά με τις προηγούμενες εμφανίζουν μεγαλύτερο κόστος. Στην περίπτωση ανάκτησης υλικών υψηλής αξίας, χαρακτηρίζονται ως οικονομικά εφικτές. Γενικά, η χημική διεργασία εφαρμόζεται αφού πρώτα πραγματοποιηθεί φυσική ή θερμική επεξεργασία στο πάνελ, χρησιμοποιώντας επιβλαβή αντιδραστήρια. Επίσης, με την χρήση των αντιδραστηρίων παράγεται μεγάλος όγκος υγρών αποβλήτων, γεγονός που οδηγεί στη μείωση της περιβαλλοντικής και οικονομικής

βιωσιμότητας της διεργασίας αυτής, σε σχέση και με τις δύο προηγούμενες διεργασίες (Padoan F. et al, 2019).

Η διαδικασία ανακύκλωσης των αποβλήτων Φ/Β πλαισίων σε σχέση με τα ανακτώμενα προϊόντα σε κάθε στάδιο, αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.2. Η ανακύκλωση υψηλής αξίας στοχεύει στην ανακύκλωση όχι μόνο του γυαλιού και του αλουμινίου αλλά και των πιο πολύτιμων συστατικών που βρίσκονται στις Φ/Β κυψέλες όπως Ag, Si, Al και Cu αλλά και τα σπάνια υλικά όπως ασήμι, ίνδιο, κ.α., στο τρίτο στάδιο, μέσω πιο πολύπλοκων διαδικασιών. Κατά το τρίτο στάδιο επεξεργασίας, τα μέταλλα και το πυρίτιο μπορούν να ανακυκλωθούν ώστε να διατηρήσουν υψηλή αξία και να ελαχιστοποιηθεί το υπόλειμμα των επικίνδυνων αποβλήτων που απομένουν για διάθεση. Οι ημιαγωγοί αποσυντίθενται, διαχωρίζονται και καθαρίζονται. Τα πολύτιμα μέταλλα ανακτώνται μέσω χημικής διάλυσης, χάραξης, διεργασίες επίπλευσης ή έκπλυσης. Λόγω διαφορών στις δομές και στα συστατικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων, υπάρχουν ξεχωριστές διεργασίες για πλαίσια c-Si και πλαίσια λεπτών επιστρώσεων.



Σχήμα 4 2 Διαδικασία διαχωρισμού συστατικών Φ/Β πλαισίων (πηγή: Komoto K. et al, 2018)

#### 4.3.2 Τεχνολογίες ανακύκλωσης υψηλής αξίας για απόβλητα Φ/Β στοιχείων Πυριτίου

Η **SolarWorld** έχει μια καλά εδραιωμένη διαδικασία ανακύκλωσης. Η διεργασία τους βασίζεται σε μια θερμική επεξεργασία η οποία ξεκινάει με την πυρόλυση των πλαισίων. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, τα πλαστικά εξαρτήματα καίγονται στους 600°C και στην συνέχεια τα Φ/Β στοιχεία, το γυαλί και τα μέταλλα διαχωρίζονται χειροκίνητα. Το γυαλί και ορισμένα μέταλλα στέλνονται για ανακύκλωση και τα Φ/Β στοιχεία μπορούν να μετατραπούν ξανά σε γκοφρέτες πυριτίου. Με αυτήν την διαδικασία επιτυγχάνεται η ανάκτηση περισσότερο από το 84% του βάρους της μονάδας, δηλαδή το 90% του γυαλιού και το 95% των υλικών των ημιαγωγών (επίσημη ιστοσελίδα Solar World).

Ο Οργανισμός Ανάπτυξης Νέας Ενέργειας και Βιομηχανικής Τεχνολογίας (**NEDO**) της Ιαπωνίας ανέπτυξε ένα πιλοτικό έργο και η διαδικασία ανακύκλωσης για τεχνολογίες Si ή CIS βασίζεται στην πυρόλυση των πολυμερών σε έναν κλίβανο. Η διαδικασία ξεκινά με την αφαίρεση των πλαισίων και του πίσω φύλλου πριν ξεκινήσει η θερμική διαδικασία. Μετά, για το CIS, η ρητίνη EVA καίγεται και το στρώμα CIS τρίβεται. Για τις μονάδες c-Si, το γυαλί και τα υλικά των ημιαγωγών ανακτώνται (Komoto K. et al, 2018).

Η **NPC Inc.** αναπτύσσει μια μέθοδο διαχωρισμού του υλικού ενθυλάκωσης από το γυαλί, με μια μέθοδο κοπής που ονομάζεται «hot knife». Το Φ/Β στοιχείο τοποθετείται ανάμεσα σε δύο κυλίνδρους, οι οποίοι το κρατούν σταθερό και το μετακινούν να πέσει πάνω σε μια ασφάλινη λεπίδα μήκους 1 μέτρου («hot knife») που θερμαίνεται στους 180–200°C και γίνεται μια τομή στο συνδετικό επίπεδο μεταξύ του γυαλιού και του υλικού ενθυλάκωσης αποφεύγοντας τις ζημιές στο γυαλί. Το γυαλί που ανακτάται ανακυκλώνεται ως υαλόθραυσμα και το υλικό ενθυλάκωσης με τα περιεχόμενα του μπορεί να δεχτεί χημική επεξεργασία ή μεταλλευτική επεξεργασία για την ανάκτηση μεταλλεύματος (Komoto K. et al, 2018).

#### 4.3.3. Μέθοδοι επεξεργασίας για Φ/Β πλαίσια Λεπτών Επιστρώσεων

Τα **Φ/Β πλαίσια CdTe** λεπτών επιστρώσεων παρότι χρησιμοποιούνται πολύ λιγότερο από αυτά του πυριτίου, περιέχουν τοξικά υλικά (Cd και Te) που είναι μικρής διαθεσιμότητας. Επί του παρόντος, μπορούν να ανακυκλωθούν χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό μηχανικών και χημικών διεργασιών. Η διαδικασία ανακύκλωσης για τα Φ/Β στοιχεία CdTe, που λειτουργεί από την εταιρεία First Solar, μπορεί να επιτύχει ποσοστό ανάκτησης σχεδόν 90% για το γυαλί και περίπου 95% για τα υλικά ημιαγωγών κατά μάζα. Η διαδικασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα: 1) τεμαχισμός και σύνθλιψη σε σωματίδια μεγέθους 5 mm για σπάσιμο των δεσμών της πλαστικοποίησης, συλλογή της σκόνης σε σύστημα αναρρόφησης εξοπλισμένο με φίλτρο υψηλής απόδοσης. 2) Χάραξη του στρώματος ημιαγωγού με ένα μείγμα θειικού οξέος και υπεροξειδίου του υδρογόνου,

που διαχωρίζει το γυαλί και μεγαλύτερα κομμάτια EVA, έκπλυση με νερό και διήθηση σε φίλτρο και 3) Εξαγωγή από τα υγρά διήθησης των μετάλλων μέσω ανταλλαγής ιόντων ή με καθίζηση και στη συνέχεια περαιτέρω καθαρισμός του καδμίου και του τελλουρίου, με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση (First Solar.org).

Επίσης, για τα Φ/Β πλαίσια CdTe, η ANTEC Solar GmbH έχει σχεδιάσει μια πιλοτική μονάδα παρόμοια τεχνολογία με αυτήν της First Solar. Μετά τον μηχανικό τεμαχισμών των κυψελών, τα μικρά σωματίδια εκτίθενται σε μια ατμόσφαιρα που περιέχει οξυγόνο στους 300°C το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αποκόλληση του EVA. Στη συνέχεια, τα σωματίδια μεταφέρονται σε ατμόσφαιρα 400°C που περιέχει αέριο χλώριο προκαλώντας μια διαδικασία χάραξης (etching process). Σε αυτή τη φάση της διαδικασίας δημιουργούνται μόρια CdCl<sub>2</sub> και TeCl<sub>4</sub> τα οποία στην συνέχεια συμπυκνώνονται και κατακρημνίζονται (Lunardi M.M., et al, 2018).

Εκτός από το Φ/Β στοιχείο CdTe, η ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πλαισίων λεπτών επιστρώσεων βρίσκεται ακόμα στα αρχικά της στάδια. Ωστόσο, αναμένεται βελτίωση των διαδικασιών επεξεργασίας των αποβλήτων τους, με την αναμενόμενη αύξηση των ποσοτήτων των αποβλήτων και την αύξηση της έρευνας.

#### **4.4 Ερευνητικές Μέθοδοι Επεξεργασίας Φ/Β Πλαισίων**

Τα τελευταία 20 χρόνια ερευνώνται διάφορες τεχνολογίες ανακύκλωσης Φ/Β πλαισίων και τα αποτελέσματα τους αποτελούν τα θεμέλια για την δημιουργία εξειδικευμένων εργοστασίων ανακύκλωσης, όταν οι συνθήκες θα επιτρέψουν την οικονομική βιωσιμότητα τους (επαρκείς ποσότητες αποβλήτων).

Οι Komoto και Lee, 2018, Στην μελέτη τους με τίτλο «Διαχείριση στο τέλος του κύκλου ζωής των φωτοβολταϊκών πάνελ: Τάσεις στις τεχνολογίες ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών μονάδων» παρουσιάζουν μία ανάλυση των υπάρχουσών ευρεσιτεχνιών για την ανακύκλωση Φ/Β μονάδων (πυριτίου και λεπτών επιστρώσεων) αντλώντας στοιχεία από τη βάση δεδομένων διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας WIPS από το 1976 έως το 2016. Η μελέτη έδειξε ότι από τα 172 διπλώματα ευρεσιτεχνίας τα 128 σχετίζονται με την ανακύκλωση των Φ/Β πλαισίων πυριτίου. Αυτός ο αριθμός αντανάκλα προφανώς την, μέχρι και σήμερα, κυρίαρχη τάση της αγοράς για εγκατάσταση Φ/Β πλαισίων πυριτίου. Προκύπτει ακόμα ότι το 45% των ευρεσιτεχνιών επικεντρώνονται σε μεθόδους διαχωρισμού του EVA από τα υπόλοιπα υλικά του Φ/Β πλαισίου. Τέλος αξίζει να αναφερθεί, ότι η κατάθεση ευρεσιτεχνιών αυξάνεται από το 2011 και ιδιαίτερα από την Κίνα από όπου προέρχονται το 48% από το σύνολο των 128 ευρεσιτεχνιών.

Εμπεριστατωμένες έρευνες έχουν διεξαχθεί και από τον τομέα του κατασκευαστικού κλάδου των φωτοβολταϊκών όπως οι AEG, BP Solar, First Solar, Pilkington, Sharp Solar,

Siemens Solar, Solar International και άλλες. Επιπροσθέτως, Ερευνητικά και Ακαδημαϊκά Κέντρα μελετούν διαφορετικές επιλογές ανακύκλωσης για τα απόβλητα των Φ/Β πλαισίων, όπως το Διαπανεπιστημιακό Κέντρο ΜικροΗλεκτρονικής στο Βέλγιο, το Ενεργειακό Ερευνητικό Κέντρο στην Ολλανδία Brookhaven National, το Εθνικό Ινστιτούτο της Προηγμένη Βιομηχανική Επιστήμη και Τεχνολογία στην Ιαπωνία, αλλά και Ερευνητικά κέντρα στις ΗΠΑ, στην Αμερική και άλλα. Τα βασικά σημεία που λαμβάνονται υπόψη κατά των σχεδιασμό των μεθόδων ανακύκλωσης, ανεξάρτητα από την τεχνολογία κατασκευής του Φ/Β πλαισίου, αφορούν στα υψηλά ποσοστά ανάκτησης ακόμα και υλικών που υπάρχουν σε μικρές ποσότητες αλλά και στην υψηλή ποιότητα των ανακτώμενων προϊόντων ώστε να μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν.

Η **Losier Chemie** συγκεντρώνει διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών πλαισίων (c-Si, CdTe, CIGS και GaAs) από διάφορα σημεία συλλογής. Η εταιρεία έχει αναπτύξει και κατοχυρώσει με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας καινοτόμες διαδικασίες που χρησιμοποιούν μηχανική και χημική επεξεργασία για την ανακύκλωση Φ/Β πλαισίων (Lunardi M. M., et al, 2018). Αρχικά γίνεται μηχανική σύνθλιψη και διαχωρισμός των υλικών. Στο επόμενο στάδιο, χρησιμοποιείται χημική επεξεργασία για την ανάκτηση των υλικών των ημιαγωγών. Μετά από αυτό, η επιμετάλλωση του αλουμινίου ανακτάται επίσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή χημικών ουσιών επεξεργασίας λυμάτων ως οξειδίο του αλουμινίου.

Η **Reclaim PV** συνεργάζεται με κορυφαίους κατασκευαστές του κλάδου για την ανάπτυξη μιας διαδικασίας ανάκτησης αποδοτικών Φ/Β κυψελών από απόβλητα Φ/Β πλαισίων προκειμένου να αναπτύξει νέα πράσινα προϊόντα ή να επανεισαχθεί στη βιομηχανία φωτοβολταϊκών ως νέα Φ/Β πλαίσια (Lunardi M. M. et al, 2018).

#### **4. 5 Συγκριτική Ανάλυση Τεχνολογιών Ανακύκλωσης Φ/Β πλαισίων**

Στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοψισμένες οι δυνατότητες για ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων πυριτίου, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε διαδικασίας καθώς και σε τι κατάσταση που συγκέντρωσαν οι Lunardi, Alvarez-Gaitan, Corkish, Bilbao το 2018 σε μελέτη που έκαναν στο περιοδικό “Solar Panels and Photovoltaic Materials”.

Πίνακας 4. 1: Μέθοδοι επεξεργασίας Φ/Β πλαισίων πυριτίου

Διαδικασία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Κατάσταση
Διάλυση με χρήση οργανικού διαλύτη	Εύκολη πρόσβαση στο υλικό EVA	Ο χρόνος αποκόλλησης εξαρτάται από την επιφάνεια	Έρευνα
	Μικρή βλάβη στην κυψέλη πυριτίου	Επιβλαβείς αέριες εκπομπές και αλλά επικίνδυνα απόβλητα	
	Ανάκτηση γυαλιού		
Χρήση οργανικού διαλύτη και ακτινοβόλεια με υπερήχους	Εύκολη πρόσβαση στο υλικό EVA	Ο χρόνος αποκόλλησης εξαρτάται από την επιφάνεια	Έρευνα
	Μικρή βλάβη στην κυψέλη πυριτίου	Επιβλαβείς αέριες εκπομπές και αλλά επικίνδυνα απόβλητα	
	Ανάκτηση γυαλιού		
Ηλεκτρο-θερμική θέρμανση	Εύκολη αφαίρεση γυαλιού	Αργή διαδικασία	Έρευνα
Μηχανικός διαχωρισμός με κοπή θερμής λεπίδας (Hot-knife)	Μικρή βλάβη στην κυψέλη πυριτίου	Άλλες διαδικασίες διαχωρισμού απαιτούνται για την πλήρη αφαίρεση του EVA	Έρευνα
Πυρόλυση (κλίβανος με μεταφορική ταινία και αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης)	Πλήρης αφαίρεση του υλικού EVA και της μεταλλικής επίστρωσης στη γκοφρέτα πυριτίου	Μπορεί να προκαλέσει ελαττώματα στην κυψέλη λόγω του ανόργανου οξέος	Έρευνα
	Είναι δυνατή η ανάκτηση ανέπαφων κυψελών πυριτίου	Δημιουργεί επιβλαβείς αέριες εκπομπές και άλλα απόβλητα	
Μηχανική επεξεργασία	Ικανή να διαχειρίζεται τα απόβλητα	Επιπλέον διαδικασίες διαχωρισμού απαιτούνται για την πλήρη αφαίρεση του υλικού EVA	Εμπορική
		Σκόνες που περιέχουν βαρέα μέταλλα	
		Σπάσιμο κυψελών πυριτίου	
		Διάβρωση εξοπλισμού	
Ξηρή και Υγρή μηχανική Επεξεργασία	Δεν απαιτούνται χημικά	Δεν γίνεται αφαίρεση των διαλυμένων στερεών	Εμπορική
	Εξοπλισμός ευρέως διαθέσιμος		
	Χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις		
Θερμική επεξεργασία (Θέρμανση δύο βημάτων)	Πλήρης αφαίρεση του υλικού EVA	Επιβλαβείς εκπομπές	Εμπορική
	Πιθανή ανάκτηση άθικτου του κυττάρου πυριτίου	Υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις	
	Οικονομικά εφικτή διαδικασία	Ελαττώματα κυψελών και αποικοδόμηση λόγω υψηλών θερμοκρασιών	
Χημική Απόξεση	Ανακτίηση υλικών υψηλής καθαρότητας	Χρήση Χημικών	Εμπορική
	Απλή και αποτελεσματική διαδικασία		

(Πηγή: Επεξεργασία από M. M. Lunardi, et al, 2018)

Πρόκληση για τους ερευνητές είναι το επίπεδο καθαρότητας (προσμίξεις με άλλα υλικά) των ανακτημένων υλικών που προκύπτουν κατά τη διάρκεια των διαδικασιών ανακύκλωσης. Για παράδειγμα, με τις θερμικές διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας και τις μηχανικές διεργασίες συνήθως τα υλικά που ανακτώνται έχουν χαμηλά επίπεδα καθαρότητας. Επίσης, διαδικασίες χαμηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται με συγκεκριμένα μηχανικά ή χημικά βήματα μπορούν επίσης να δημιουργήσουν μη 'καθαρά' υλικά. Το ιδανικό αποτέλεσμα μπορεί να επιτευχθεί μόνο με συνδυασμό

θερμικών, χημικών ή μεταλλουργικών βημάτων (Latunussa C., et al, 2016). Όταν τα υλικά μπορούν να ανακτηθούν χωρίς προσμίξεις, τότε θα έχουν υψηλότερη εμπορική αξία, το οποίο αποτελεί ένα από τα κύρια εμπόδια στην ανάπτυξη της βιομηχανίας ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών με τις τρέχουσες μεθόδους επεξεργασίας.

Στον Πίνακα 4.2 συνοψίζονται οι μέθοδοι επεξεργασίας για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτών επιστρώσεων, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε διαδικασίας καθώς και το επίπεδο ωριμότητας τους.

Πίνακας 4. 2: Μέθοδοι επεξεργασίας Φ/Β πλαισίων λεπτών επιστρώσεων



Διαδικασία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Κατάσταση
Διάλυση με χρήση οργανικού διαλύτη	Εύκολη πρόσβαση στο υλικό EVA	Ο χρόνος αποκόλλησης εξαρτάται από την επιφάνεια	Έρευνα
	Μικρή βλάβη στην κυψέλη πυριτίου	Επιβλαβείς αέριες εκπομπές και αλλά επικίνδυνα απόβλητα	
	Ανάκτηση γυαλιού		
Ακτινοβολία με λέιζερ	Εύκολη πρόσβαση στο υλικό ενθυλάκωσης	Αργή διαδικασία Ακριβός Εξοπλισμός	Έρευνα
Μηχανικός διαχωρισμός με κοπή θερμής λεπίδας (Hot-knife)	Μικρή βλάβη στην κυψέλη πυριτίου	Επιπλέον διαδικασίες διαχωρισμού απαιτούνται για την πλήρη αφαίρεση του EVA	Έρευνα
	Ανάκτηση γυαλιού		
Διαδικασία Αμμοβολής Κλειστού Βρόγχου (Vacum blast)	Αφαίρεση ημιαγωγών χωρίς χρήση χημικών	Σχετικά αργή διαδικασία	Έρευνα (πιλοτικά)
	Ανάκτηση γυαλιού χωρίς προσμίξεις	Εκπομπή μετάλλων	
		Περαιτέρω χημικές/μηχανικές επεξεργασίες	
Τριβή	Δεν απαιτούνται χημικά	Περαιτέρω χημικές/μηχανικές επεξεργασίες	Έρευνα (πιλοτικά)
	Ανάκτηση γυαλιού χωρίς προσμίξεις		
Ξηρή και Υγρή μηχανική Επεξεργασία	Δεν απαιτούνται χημικά	Δεν γίνεται αφαίρεση των διαλυμένων στερεών	Έρευνα (πιλοτικά)
	Εξοπλισμός ευρέως διαθέσιμος		
	Χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις		
Επίπλευση		Απώλεια πολύτιμων υλικών κατά τη διαδικασία ξεβγάλματος και κοσκίνισματος	Έρευνα (πιλοτικά)
	Σχετικά απλή διαδικασία Χαμηλή Χρήση χημικών	Απαιτείται διαδικασία επίπλευσης	
Ξηρή Χάραξη	Απλή διαδικασία	Υψηλή απαίτηση ενέργειας	Εμπορική
		Απαιτείται μεγάλη προσπάθεια για καθαρότητα	
Μηχανική επεξεργασία	Ίκανη να διαχειρίζεται τα απόβλητα	Επιπλέον διαδικασίες διαχωρισμού απαιτούνται για την πλήρη αφαίρεση του υλικού ενθυλάκωσης	Εμπορική
		Σκόνες που περιέχουν βαρέα μέταλλα	
		Σπάσιμο κυψελών πυριτίου Διάβρωση εξοπλισμού	
Ξηρή και Υγρή μηχανική Επεξεργασία	Δεν απαιτούνται χημικά	Δεν γίνεται αφαίρεση των διαλυμένων στερεών	Εμπορική
	Εξοπλισμός ευρέως διαθέσιμος		
	Χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις		
Χημική Απόξεση	Ανακτήση υλικών υψηλής καθαρότητας	Χρήση Χημικών	Εμπορική
	Απλή και αποτελεσματική διαδικασία		
Θερμική Επεξεργασία	Πλήρης αφαίρεση του ενθυλακωτικού	Επιβλαβείς εκπομπές	Εμπορική
	Ανάκτηση άθικτου κυτάρου	Υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις	
	Απλό και οικονομικό	Κυτταρικά ελαττώματα και αποικοδ	
Έκπλυση	Πλήρης αφαίρεση μετάλλων	Υψηλή χρήση χημικών	Εμπορική
		Δημιουργία όξινων αναθυμιάσεων Σύνθετος έλεγχος χημικών	

(Πηγή: Επεξεργασία από M. M. Lunardi, et al, 2018)

Χρειάζεται αρκετός χρόνος ακόμα για να επιτευχθεί η ανακύκλωση σε μεγάλη κλίμακα των Φ/Β πλαισίων λεπτών επιστρώσεων και όπως και για τα Φ/Β πλαίσια πυριτίου, επί

του παρόντος, επεξεργάζονται και ανακυκλώνονται χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό μηχανικών και χημικών επεξεργασιών για να επιτευχθούν ουσιαστικά αποτελέσματα.

#### 4.5 Το μέλλον στην Ανακύκλωση των Φ/Β αποβλήτων

Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος με σκοπό την ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών μονάδων, συμπεριλαμβανομένων των μηχανικών, θερμικών και χημικών διεργασιών. Ωστόσο, όπως είδαμε προηγουμένως, κάθε διαδικασία έχει πλεονεκτήματα και περιορισμούς και ένας συνδυασμός διαφορετικών διαδικασιών μπορεί να είναι απαραίτητος για αποτελεσματική και αποδοτική ανακύκλωση. Επιπλέον, η αποδοτικότητα και η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών μονάδων μπορεί επίσης να βελτιωθεί. Η έλλειψη επιπλέον δοκιμασμένων και εφαρμοσμένων τεχνολογιών σε μεγάλη κλίμακα για τη ανακύκλωση των διαφόρων τύπων Φ/Β πλαισίων στο ΤΚΖ τους και η ανάκτηση των πολύτιμων υλικών τους, αποτελούν εμπόδιο για την υλοποίηση μιας ολοκληρωμένης βιώσιμης διαχείρισης στην αλυσίδα αξίας των Φ/Β πλαισίων (Fiandra V. et al, 2019).

Είναι απαραίτητο να συνεχιστεί η έρευνα και η ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα ώστε να διασφαλιστεί ότι ο αυξανόμενος αριθμός αποβλήτων φωτοβολταϊκών μονάδων δεν θα αποτελέσει σημαντική περιβαλλοντική πρόκληση στο μέλλον.

Υπάρχουν ακόμη κρίσιμες προκλήσεις προς ανάπτυξη, όσο αφορά στις τεχνολογίες ανακύκλωσης των αποβλήτων των Φ/Β πλαισίων. Οι πιο σημαντικές είναι η μείωση εκπομπής αερίων και οι υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διαδικασία αποκόλλησης του υλικού ενθυλάκωσης, η μείωση στη χρήση χημικών ουσιών και στην παραγωγή χημικών αποβλήτων καθώς και η επίτευξη υψηλής αξίας ανακτώμενων υλικών. Οι τεχνολογίες που αναπτύσσονται σήμερα, εν αναμονή του αναμενόμενου τεράστιου όγκου των Φ/Β αποβλήτων, επικεντρώνονται στην εύρεση οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμων διεργασιών με αυξημένα ποσοστά ανάκτησης και ανακύκλωσης και με βελτιωμένη ποιότητα των ανακτώμενων υλικών. Οι στόχοι της έρευνας και ανάπτυξης τεχνολογιών ανακύκλωσης, συνοψίζονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4. 3: Στόχοι Έρευνας και Ανάπτυξης για την Ανακύκλωση των Φ/Β αποβλήτων

Στόχοι Έρευνας και Καινοτομίας	
<b>Υψηλότερα ποσοστά ανακύκλωσης/ανάκτησης:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Ο τρέχων στόχος που έχει τεθεί από την οδηγία WEEE θα πρέπει να αποτελεί το ελάχιστο επίπεδο.</li><li>➤ Ποσοστά ανάκτησης της τάξεως του 90%-95% είναι ήδη εφικτά. Ο στόχος πρέπει να είναι κοντά στο 100% της μάζας του Φ/Β πλαισίου</li></ul>

<b>Πιο βιώσιμες διεργασίες οικονομικά και περιβαλλοντικά</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Προσεκτική εκτίμηση ανακτώμενων υλικών.</li> <li>➤ Προτεραιότητα στην εμπορευματοποίηση τεχνολογιών που σε εργαστηριακή κλίμακα έχει αποδειχτεί ότι βελτιώνουν την περιβαλλοντική απόδοση της ανακύκλωσης Φ/Β με χαμηλό κόστος.</li> </ul>
<b>Υψηλότερη αξία και ποιότητα των ανακτώμενων υλικών</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Προτεραιότητα στις μεθόδους που εξασφαλίζουν την ανάκτηση άθικτων στοιχείων πυριτίου και υψηλής καθαρότητας γυαλιού.</li> <li>➤ Τα ανακτώμενα υλικά να αποκτούν αξία και ποιότητα ίσης η μεγαλύτερης των αρχικών υλικών.</li> </ul>
<b>Επαναχρησιμοποίηση ανακτώμενων υλικών σε Φ/Β πλαίσια</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Επαναχρησιμοποίηση των ανακτώμενων προϊόντων, κατά το δυνατό, σε Φ/Β πλαίσια (προαγωγή της κυκλικής οικονομίας).</li> </ul>
<b>Επιχειρήσεις ανακύκλωσης Φ/Β</b>	
<b>Κλιμάκωση σε πιλοτική και εμπορική εφαρμογή των ερευνητικών μεθόδων.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ελάχιστα προγράμματα έρευνας βρίσκονται σε δοκιμαστική ή πιλοτική κλίμακα.</li> <li>➤ Περισσότερες τεχνικές απαιτήσεις λόγω κλιμάκωσης</li> </ul>
<b>Δημιουργία κατάλληλων επιχειρηματικών μοντέλων, περιλαμβανομένης της μαζικής επεξεργασίας και on-site επεξεργασίας</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Εγκαταστάσεις με μεγάλη δυναμικότητα συνεισφέρουν στην αποτελεσματική και οικονομική λειτουργία.</li> <li>➤ on-site τεχνολογίες ανακύκλωσης, μικρότερης κλίμακας υπόσχονται βιώσιμη ανακύκλωση για μεγάλες Φ/Β εγκαταστάσεις.</li> </ul>
<b>Λειτουργικές πτυχές των τεχνολογιών ανακύκλωσης</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Η αναμενόμενη αύξηση των αποβλήτων Φ/Β είναι κρίσιμη για την οικονομική βιωσιμότητα της επιχείρησης</li> <li>➤ Ανάπτυξη δικτύου διαλογής και επιδίωξη συνεργασίας με επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν τα ανακυκλωμένα υλικά.</li> </ul>

(Πηγή: Επεξεργασία από Komoto & Lee, 2018).

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, για να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις που προκύπτουν από τις μεθόδους ανακύκλωσης που υπάρχουν σήμερα για τα απόβλητα των Φ/Β, η έρευνα και η καινοτομία πρέπει να αποτελέσει μια συλλογική προσπάθεια όλων των παραγόντων της αλυσίδας αξίας του τομέα της φωτοβολταϊκής ενέργειας. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής της Ε.Ε. χρειάζεται να θέσουν στόχους ανακύκλωσης και ανάκτησης που θα πλησιάζουν στο 100% της μάζας των Φ/Β πλαισίων, εξελίσσοντάς περαιτέρω την οδηγία για τα ΑΗΗΕ ή θεσπίζοντας νέα εξειδικευμένα νομοθετικά πλαίσια. Επίσης, θα πρέπει να διαμορφώσουν ένα ολοκληρωμένο κανονιστικό πλαίσιο, που θα ενισχύει την επαναχρησιμοποίηση των ανακτώμενων υλικών που προκύπτουν από την ανακύκλωση. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει να εστιάσουν το δυνατόν περισσότερο στα περιβαλλοντικά οφέλη, λαμβάνοντας υπόψη ότι η οικονομική βιωσιμότητα θα επιτευχθεί με την αναμενόμενη μεγάλη αύξηση των αποβλήτων τα επόμενα χρόνια. Ο κατασκευαστικός και ο ερευνητικός τομέας, πρέπει να προχωρήσουν σε κλιμάκωση των

υπαρχουσών μεθόδων υψηλής αξίας, σε επαναχρησιμοποίηση των ανακτώμενων υλικών, κατά το δυνατό σε Φ/Β πλαίσια και στην εμπορευματοποίηση τεχνολογιών χαμηλού κόστους και υψηλού περιβαλλοντικού οφέλους.

## **5. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

### **5.1. Απόβλητα Αιολικών Συστημάτων και Ευρωπαϊκή Πολιτική Διαχείρισης**

Μετά το πέρας του κύκλου ζωής της, η ανεμογεννήτρια αποσυναρμολογείται και γίνεται η διαχείριση των επιμέρους υλικών της. Σήμερα, περίπου το 85 με 90% της συνολικής μάζας των ανεμογεννητριών μπορεί να ανακυκλωθούν (ETIPWind, 2019), (Wind Europe 2020). Τα περισσότερα εξαρτήματα μιας ανεμογεννήτριας η βάση, ο πύργος και τα εξαρτήματα στη νασέλα μπορούν να διαχειριστούν με καθιερωμένες πρακτικές ανακύκλωσης και οι πρώτες ύλες αυτών των συστατικών έχουν αρκετή αξία σε δευτερογενείς αγορές. Για παράδειγμα, ο χάλυβας στους πύργους είναι 100% ανακυκλώσιμος και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί χωρίς απώλεια της ποιότητας του. Το «σκραπ» από χάλυβα θεωρείται πολύτιμη πρώτη ύλη στην παραγωγή χάλυβα, και εξαιτίας της αξίας του έχει εδραιωθεί η σχετική αγορά. Η επεξεργασία των θεμελίων κατά τον παροπλισμό διαφέρει από χώρα σε χώρα. Σε ορισμένες χώρες, τα θεμέλια πρέπει να αφαιρεθούν και μπορούν να ανακυκλωθούν σε αδρανή για οικοδομικά υλικά ή οδοποιία. Σε άλλες χώρες, αφήνονται (εν μέρει ή πλήρως) επιτόπου καθώς κρίνεται ότι η αφαίρεση τους θα οδηγούσε σε δυσμενέστερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Ωστόσο τα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι πιο δύσκολο να ανακυκλωθούν λόγω των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή τους. Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες ανακύκλωσης πτερυγίων και ένας αυξανόμενος αριθμός εταιρειών προσφέρει υπηρεσίες ανακύκλωσης, παρόλα αυτά οι τεχνολογίες αυτές δεν είναι ακόμη ευρέως διαθέσιμες ούτε ανταγωνιστικές ως προς το κόστος. Σήμερα χρησιμοποιούνται 2,5 εκατομμύρια τόνοι σύνθετου υλικού στον τομέα της αιολικής ενέργειας παγκοσμίως (ETIPWind, 2019). Εκτιμάται ότι περίπου 14.000 πτερύγια θα μπορούσαν να παροπλιστούν μέχρι το 2023 (WindEurope 2019, Market outlook to 2023), που ισοδυναμεί μεταξύ 40.000 και 60.000 τόνους. Η ανακύκλωση των παλιών πτερυγίων απαιτεί υλικοτεχνικές και τεχνολογικές λύσεις για αποσυναρμολόγηση, συλλογή, μεταφορά, διαχείριση αποβλήτων και επανένταξη στην αλυσίδα αξίας.

Σήμερα υπάρχουν τρεις κύριες διαδρομές για τον χειρισμό του τέλους ζωής των σύνθετων υλικών: η υγειονομική ταφή, η αποτέφρωση και η ανακύκλωση με θερμικές, μηχανικές ή χημικές μεθόδους (Nagle J., et al, 2022). Η υγειονομική ταφή των πτερυγίων επισημαίνεται ως η λιγότερο προτιμώμενη επιλογή στην ιεραρχία διαχείρισης των αποβλήτων της Ε.Ε. και σε χώρες όπως η Γερμανία έχει απαγορευτεί. Η πιο κοινός

τρόπος διαχείρισης σήμερα είναι η αποτέφρωση. Το μειονέκτημα της αποτέφρωσης είναι ότι έως και 60% μένει πίσω ως τέφρα που είτε θα ταφεί είτε θα χρησιμοποιηθεί σε οικοδομικά υλικά. Το τελευταίο, παρουσιάζει επίσης πρόβλημα καθώς σε μερικές χώρες η νομοθεσία που απαγορεύει τη χρήση απόβλητων ως υλικό πλήρωσης.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1, η πολιτική της ΕΕ για την ορθή διαχείριση των στερεών αποβλήτων ορίζει την ιεραρχία που πρέπει να ακολουθείται με σκοπό την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων: πρόληψη, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, ανάκτηση, διάθεση σε ΧΥΤΑ. Ακολουθώντας την Ευρωπαϊκή πολιτική για την διαχείριση των αποβλήτων το πρώτο βήμα είναι η πρόληψη της δημιουργίας αποβλήτων από τα πτερύγια, μέσω προσπαθειών μείωσης της μάζας τους, μείωσης της αστοχίας των υλικών (μέσω δοκιμών και πιστοποίησης), αλλά και με τον σχεδιασμό πτερυγίων που θα μπορούν να αναβαθμιστούν σε νέα πτερύγια (τμηματοποιημένα/ αρθρωτά πτερύγια).

Επαναχρησιμοποίηση: Τα πτερύγια θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν για όσο το δυνατόν περισσότερο, προτού χρειαστεί επεξεργασία των αποβλήτων. Για να επιτευχθεί η διάρκεια ζωής του σχεδιασμού ενός πτερυγίου, απαιτείται συχνό σέρβις και επισκευή. Επίσης πρέπει να εξετάζεται η παράταση της διάρκειας ζωής των πτερυγίων πριν την αποσυναρμολόγησή τους, μέσω ειδικών μοντέλων σε συνδυασμό με επιτόπιους ελέγχους και επανεξέταση των ενεργειών συντήρησης.

Το επόμενο βήμα είναι εξέταση της πιθανότητας επαναχρησιμοποίησης του πτερυγίου (ολόκληρου ή τμήματος) για διαφορετική εφαρμογή, συνήθως χαμηλότερης αξίας από την αρχική. Για παράδειγμα επαναχρησιμοποίηση των πτερυγίων για έπιπλα δρόμου ή παιδικές χαρές ή κάποιων δομικών μερών του πτερυγίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αστικές κατασκευές (Bank L. et al, 2018), (Nagle J. et al, 2022). Ωστόσο, τα μέχρι σήμερα παραδείγματα επαναχρησιμοποίησης αντιπροσωπεύουν πρακτικές που είναι απίθανο να αποτελέσουν λύση μεγάλης κλίμακας για τους μελλοντικούς αναμενόμενους όγκους αποβλήτων.

Όπου δεν είναι δυνατή η επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση και η ανάκτηση είναι οι επόμενες επιλογές. Ανακύκλωση σημαίνει ότι το πτερύγιο γίνεται ένα νέο προϊόν ή υλικό με την ίδια ή διαφορετική λειτουργική χρήση. Η ανακύκλωση απαιτεί ενέργεια και άλλους πόρους προκειμένου να μετατραπούν τα απόβλητα των πτερυγίων σε κάτι άλλο. Ανάκτηση σημαίνει μετατροπή των απορριμμάτων σε καύσιμο ή θερμική ενέργεια μετά την αφαίρεση όλων των μεμονωμένων συστατικών που μπορεί να χρησιμοποιηθούν ξανά.

Στην επόμενη παράγραφο αναλύονται οι εμπορικές και οι ερευνητικές μέθοδοι ανακύκλωσης και ανάκτησης για τα πτερύγια των ανεμογεννητριών. Σήμερα, η κύρια τεχνολογία για την ανακύκλωση σύνθετων αποβλήτων, όπως τα πτερύγια των ανεμογεννητριών, είναι η συνεπεξεργασία τους στην βιομηχανία τσιμέντου. Τα σύνθετα υλικά μπορούν επίσης να ανακυκλωθούν ή να ανακτηθούν μέσω μηχανικού τεμαχισμού, θερμικής μεθόδου (πυρόλυση, ρευστοποιημένη κλίνη), θερμοχημική (solvolysis), ή ηλεκτρομηχανική (κατακερματισμός παλμών υψηλής τάσης) διαδικασίες ή συνδυασμούς αυτών. Οι τεχνολογίες αυτές είναι διαθέσιμες σε διαφορετικά επίπεδα ωριμότητας και δεν είναι όλα διαθέσιμα σε βιομηχανική κλίμακα.

Τέλος, η διάθεση των πτερυγίων σε ΧΥΤΑ ή αποτέφρωση τους χωρίς ανάκτηση ενέργειας είναι οι λιγότερο επιθυμητές μέθοδοι επεξεργασίας αποβλήτων, καθώς δεν γίνεται ανάκτηση υλικών ή ενέργειας.

## **5.2. Μέθοδοι ανακύκλωσης σύνθετων υλικών ανεμογεννητριών**

Η μεγαλύτερη πρόκληση στην ανακύκλωση των υλικών των ανεμογεννητριών αποτελούν τα σύνθετα υλικά των πτερυγίων και ίσως του διακλαδωτή και της ατράκτου. Τα υλικά αυτά αρχικά τεμαχίζονται με διάφορους μεθόδους όπως υδροκοπή, συρματοκοπή, με δισκοπρίονο ή υδραυλικό κόφτη και στην συνέχεια οδηγούνται για περαιτέρω επεξεργασία.

### **5.2.1 Συν-επεξεργασία στην βιομηχανία τσιμέντου**

Μέχρι σήμερα η μέθοδος αυτή έχει την μεγαλύτερη εφαρμογή στην ανακύκλωση των σύνθετων υλικών των πτερυγίων των ανεμογεννητριών. Στην μέθοδο αυτή τα σύνθετα απόβλητα των πτερυγίων και συγκεκριμένα τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRP), αντιμετωπίζονται ως καύσιμη πρώτη ύλη ή ως πηγή ενέργειας, στις βιομηχανίες παραγωγής τσιμέντου, αντί τους φυσικούς ορυκτούς πόρους και τα ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο). Η συν-επεξεργασία στην βιομηχανία τσιμέντου προϋποθέτει τον τεμαχισμό του υλικού των πτερυγίων σε μικρότερα μέρη και στη συνέχεια ανάμιξη τους με στερεά ανακτημένα καύσιμα (Solid Recovered Fuel-SRF). Τα στερεά ανακτημένα καύσιμα (SRF) παρασκευάζονται με τεμαχισμό και αφυδάτωση στερεών αποβλήτων, που είναι πολύ δύσκολο να διαχωριστούν και που διαφορετικά θα κατέληγαν σε χώρους υγειονομικής ταφής (Nagle J, 2022). Το πολυμερές μέρος των πτερυγίων λειτουργεί ως καύσιμο που ανεβάζει τη θερμοκρασία του κλιβάνου του τσιμέντου πάνω από 850 C, αντικαθιστώντας ένα μέρος των ορυκτών καυσίμων. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία αυξάνεται στους 1450 C (τροφοδοτείται επιπλέον από ορυκτά καύσιμα), οπότε το βοριοπυριτικό αλουμίνιο και το ανθρακικό ασβέστιο από τις ίνες

γυαλιού ασβεστοποιούνται και μετατρέπονται σε αλουμίνιο, πυρίτιο και οξείδιο του ασβεστίου, που είναι όλα τα απαραίτητα συστατικά του τσιμέντου Portland (Nagle J, 2022). Μπορεί η μέθοδος αυτή να βασίζεται στην καύση όπως η αποτέφρωση, γίνεται όμως ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση των ανακτημένων υλικών καθιστώντας το έτσι υψηλότερα στην ιεραρχία της διαχείρισης των αποβλήτων (βλέπε σχήμα 1.7). Το βασικότερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι αξιοποιούνται όλα τα απόβλητα και τίποτα δεν καταλήγει στους ΧΥΤΑ. Επιπλέον, έχει καλή σχέση κόστους - αποδοτικότητας και συνεπώς είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος. Το μειονέκτημα είναι ότι οι ίνες γυαλιού εξαφανίζονται και επομένως δεν μπορεί να γίνει επαναχρησιμοποίηση για άλλες εφαρμογές.

### **5.2.2 Μηχανική επεξεργασία**

Η μηχανική επεξεργασία είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία εξαιτίας της αποτελεσματικότητάς, του χαμηλού κόστους και των χαμηλών απαιτήσεων σε ενέργεια, ωστόσο μειώνει δραστικά την αξία των ανακυκλούμενων υλικών.

Κατά την μηχανική επεξεργασία των σύνθετων υλικών αρχικά τεμαχίζονται σε μικρότερα κομμάτια, το μέγεθος των οποίων καθορίζεται με την ικανότητα χειρισμού που έχουν τα μηχανήματα κάθε εταιρίας ανακύκλωσης. Στην συνέχεια τα υλικά οδηγούνται σε ειδικό μηχάνημα θρυματισμού, αλέθονται και περνιούνται από κόσκινα όπου διαχωρίζονται σε ίνες και σκόνες. Τα ανακτώμενα υλικά δηλαδή οι ίνες και η αλεσμένη μήτρα (σκόνη), μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντίστοιχα ως υλικά ενίσχυσης ή πλήρωσης για την παραγωγή νέων πολυμέρων ή για σκυρόδεμα, ωστόσο το επίπεδο ενσωμάτωσης είναι χαμηλό (λιγότερο από 10%) εξαιτίας της μη σταθερής σύστασης και της παρουσίας σωματιδίων ρητίνης στις ίνες. Το προϊόν αυτό δεν είναι ανταγωνιστικό ως προϊόν ενίσχυσης καθώς, μελέτες έχουν δείξει ότι οι μηχανικές ιδιότητες των νέων σύνθετων υλικών δεν βελτιώνονται σχεδόν καθόλου (Beauson J. et al, 2014), (Beauson J. et al, 2016). Όσο αφορά στις εφαρμογές του ως υλικό πλήρωσης, η εταιρεία Global Fiberglass Solution στις ΗΠΑ, χρησιμοποιεί τεμαχισμένο σύνθετο υλικό από πτερύγια ανεμογεννητριών για την κατασκευή νέων σύνθετων πολυμερών για σιδηροδρομικές ράγες, ράγες μετρό, νησίδες οδοποιίας τυπου jersey, κολώνες, στύλοι κοινής ωφέλειας (Sakellariou N., 2018). Στην Φιλανδία, η εταιρεία Conenor έχει αναπτύξει μια διαδικασία για την κατασκευή σύνθετου υλικού χρησιμοποιώντας τεμαχισμένο σύνθετο υλικό και ίνες ξύλου, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πάνελ και πολυστρωματικές συμπαγείς σανίδες (βλέπε εικόνα 5.1). Στη Δανία επίσης, τα τεμαχισμένα σύνθετα υλικά από μηχανική ανακύκλωση χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ηχομονωτικών πάνελ, κυρίως από δύο εταιρείες, την Miljøskærm και την G-ίνα (Beauson J, 2022).





Lipor Park, Baguim do Monte, Portugal



Warwick University Campus, UK

Εικόνα 5.1: Εφαρμογές Δομικών θερμοπλαστικά στοιχεία από ανακυκλωμένα σύνθετα απόβλητα (GRPF) πτερυγίων ανεμογεννητριών. (πηγή: <http://www.conenor.com/recycling-thermoset-frp-waste/>)

### **5.2.3 Θερμική Επεξεργασία (Πυρόλυση, Πυρόλυση μικροκυμάτων και Πυρόλυση ρευστοποιημένης κλίνης)**

Η θερμική επεξεργασία είναι μια ομάδα διαδικασιών ανακύκλωσης με την οποία διαχωρίζονται οι ίνες από το υλικό της μήτρας. Οι διαδικασίες θερμικής ανακύκλωσης περιλαμβάνουν την πυρόλυση, την πυρόλυση ρευστοποιημένης κλίνης και την πυρόλυση μικροκυμάτων. Η θερμοκρασία της επεξεργασίας ποικίλουν από 400°C έως 700°C ανάλογα με την διαδικασία. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την ανάκτηση ινών, ορισμένων κλασμάτων λαδιού και ανάλογα με τη διαδικασία, ενέργεια από την καύση της μήτρας. Τα ανακτημένα αυτά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν δυνητικά ως υλικά ενίσχυσης ή πλήρωσης. Μέχρι σήμερα, αυτή η τεχνολογία ανακύκλωσης είναι οικονομικά βιώσιμη μόνο για ίνες άνθρακα. Για τις ανακτημένες ίνες γυαλιού δεν υπάρχουν και πολλές εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης καθώς είναι πιο ακριβές και χαμηλότερης ποιότητας από της αυθεντικές και δεν μπορούν να τις ανταγωνιστούν (Beauson, 2022). Επί του παρόντος δεν εφαρμόζεται γενικά κλίμακας δεδομένου ότι οι όγκοι των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ανθρακονήματα είναι χαμηλοί. Με την επόμενη γενιά ανεμογεννητριών, την απαιτούμενη μείωση βάρους και τις νέες μηχανικές ιδιότητες θα ενισχυθεί η χρήση σύνθετων ινών άνθρακα και συνεπώς η σχετική αγορά αναμένεται να αυξηθεί ανάλογα.

Οι εναλλακτικές μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας περιλαμβάνουν την πυρόλυση ρευστοποιημένης κλίνης, κατά την οποία είναι δυνατή η επεξεργασία μικτών υλικών (π.χ. βαμμένες επιφάνειες ή πυρήνες αφρού) καθώς και μολυσμένα GFRP (Pickering, 2006) και πυρόλυση μικροκυμάτων κατά την οποία η πυρόλυση είναι υποβοηθούμενη από μικροκύματα, με αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη θέρμανση και συνεπώς χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις (Liu et al., 2019; Oliveux et al., 2015)

#### **5.2.4 Χημική Επεξεργασία**

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται χημικές ουσίες, θερμότητα και πίεση για τη διάλυση του υλικού της μήτρας. Τα υλικά που ανακτώνται είναι ίνες, ρητίνη ή/και χημικά σε υγρή μορφή. Σε σύγκριση με τις διαδικασίες θερμικής επεξεργασίας, οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες και αποφεύγεται ο σχηματισμός ξυλάνθρακα στις ίνες (Oliveux G. et al, 2016). Όπως και η θερμική επεξεργασία, οι ίνες γυαλιού που ανακτώνται με αυτή τη μέθοδο παρουσιάζουν μειωμένες μηχανικές ιδιότητες, κυρίως αντοχή. Η επαναχρησιμοποίηση του ανακτημένων ινών γυαλιού είναι αβέβαιη, λόγω των κακών ιδιοτήτων τους και του υψηλού κόστους τους σε σχέση με τα παρόμοια πρωτογενή υλικά. Δεν υπάρχουν επίσης πολλά παραδείγματα στην βιβλιογραφία για την επαναχρησιμοποίηση της ανακτημένης ρητίνης (Oliveux G. et al, 2016). Επί του παρόντος δεν υπάρχει εμπορική εφαρμογή με τα υλικά που προκύπτουν από τα σύνθετα πολυμερή υλικά στο τέλος του κύκλου ζωής τους, ενώ η μέθοδος δεν έχει αναβαθμιστεί σε βιομηχανική κλίμακα. Τα πλεονεκτήματα της χημικής επεξεργασίας περιλαμβάνουν τη δυνατότητα ανάκτησης καθαρών ινών γυαλιού/ή άνθρακα και σε κάποιο βαθμό το υλικό μήτρας σε υγρή μορφή.

Μια πρόκληση παραμένει η ποιότητα των υλικών που ανακτώνται. Η Χημική επεξεργασία, απαιτεί επίσης την μείωση του μεγέθους των αποβλήτων για να τροφοδοτήσουν την διαδικασία και χρήση χημικών διαλυτών οι οποίοι μπορεί να είναι υψηλού κόστους και εμπεριέχουν κινδύνους έκθεσης σε τοξικές ουσίες (π.χ. μόλυβδος). Για τους παραπάνω λόγους, η χημική επεξεργασία δεν είναι προς το παρόν οικονομικά βιώσιμη για το σύνθετα πολυμερή υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (Nagle J., 2022).

Μέχρι σήμερα, μόνο οι ίνες άνθρακα ανακυκλώνονται μέσω αυτής της μεθόδου αλλά δεδομένου ότι οι όγκοι των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ανθρακονήματα είναι χαμηλοί, δεν εφαρμόζεται σε ευρεία κλίμακα. Με την επόμενη γενιά μεγατουρμπίνων στις ανεμογεννήτριες ο όγκος των αποβλήτων σύνθετων ινών άνθρακα προβλέπεται να αυξηθεί, το οποίο θα επιφέρει και ανάλογη αύξηση στην σχετική βιομηχανία.

#### **5.2.5 Ηλεκτρομηχανική διαδικασία**

Ο κατακερματισμός με παλμούς υψηλής τάσης είναι μια ηλεκτρομηχανική διαδικασία που διαχωρίζει αποτελεσματικά τις μήτρες από τις ίνες με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, μόνο οι κοντές ίνες μπορούν να ανακτηθούν από τη διαδικασία και για την ανάκτηση ποιοτικών ινών απαιτούνται υψηλά επίπεδα ενέργειας, ένα ζήτημα που θα μπορούσε να ξεπεραστεί λειτουργώντας με υψηλότερους ρυθμούς (Suschem 2018). Σε σύγκριση με τον μηχανικό θρυματισμό, η ποιότητα των ινών που λαμβάνονται είναι πιο ποιοτικές (πιο μακριές και καθαρές).

### **5.3. Συγκριτική επεξεργασία των μεθόδων ανακύκλωσης**

Παρόλο που υπάρχουν αρκετές τεχνολογίες ανακύκλωσης για τα σύνθετα απόβλητα των πτερυγίων των ανεμογεννητριών, δεν επιτρέπουν ακόμα την εξαγωγή υψηλής αξίας από τα ανακτώμενα υλικά (ρητίνες και ίνες) ώστε να είναι ανταγωνιστικά. Επιπλέον κάποιες τεχνολογίες βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο και άλλες δεν είναι ακόμα οικονομικά βιώσιμες για την βιομηχανική κλίμακα. Στον Πίνακα 5.1 γίνεται σύγκριση των υφιστάμενων μεθόδων για ανακύκλωση και ανάκτηση των αποβλήτων των σύνθετων υλικών πτερυγίων, με βάση τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μεθόδων αλλά και το επίπεδο ωριμότητας τους. Στον Πίνακα 5.2 δίνονται τα εκτιμώμενα κόστη και αξίες των ανακτώμενων υλικών από τις υπάρχουσες τεχνολογίες ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών πτερυγίων.

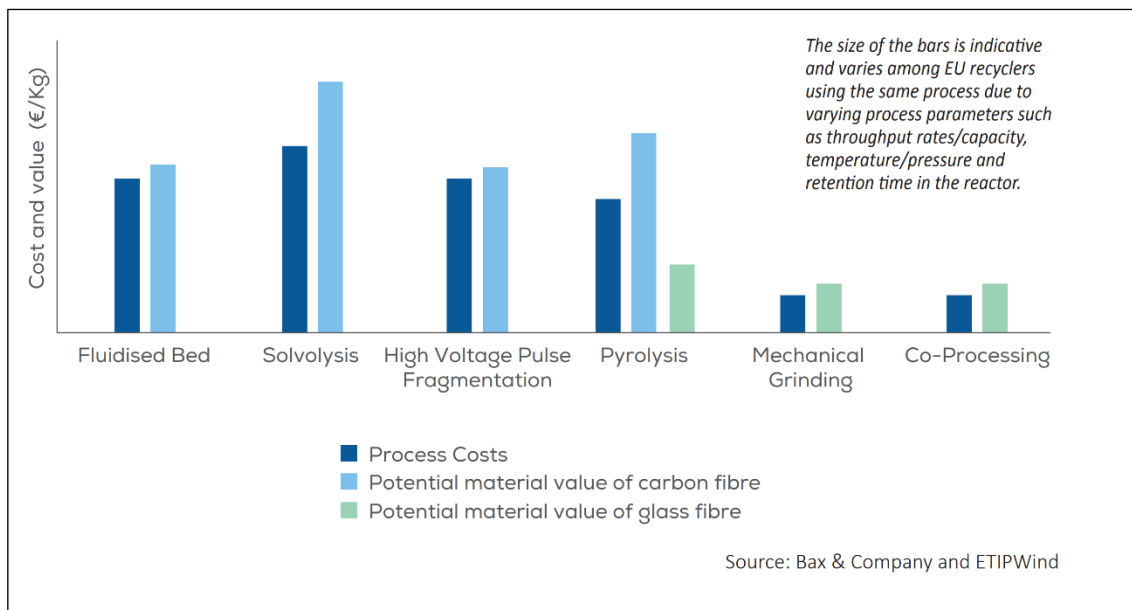
Η μέθοδος της συν-επεξεργασίας στην βιομηχανία τσιμέντου και η μηχανική επεξεργασία έχουν την μεγαλύτερη τεχνολογική ωριμότητα και χαμηλότερο κόστος, ωστόσο έχουν την υψηλότερη απώλεια της αρχικής αξίας των πρώτων υλών και συνεπώς χαμηλό επίπεδο ανάκτησης και ανακύκλωσης. Επιπλέον, οι μέθοδοι αυτές είναι κατάλληλες μόνο για πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRP).

Οι μέθοδοι με υψηλά επίπεδα ανάκτησης (χημική επεξεργασία, πυρόλυση ρευστοποιημένης κλίνης) έχουν πολύ χαμηλό επίπεδο ωριμότητας, υψηλό κόστος κατά τη διαδικασία και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, οι μέθοδοι αυτές είναι κατάλληλες μόνο για πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP).

Πίνακας 5. 1: Σύγκριση μεθόδων ανακύκλωσης υλικών πτερυγίων ανεμογεννητριών

Μέθοδος Επεξεργασίας	Δυνατά Σημεία	Μειονεκτηματα	Επίπεδο Ετοιμότητας (TLR)	Παρατηρήσεις - Επισημάνσεις
<b>Συνεπεξεργασία σε βιομηχανίες τσιμέντου</b>	Υψηλής Αποτελεσματικότητας Ικανότητα επεξεργασίας μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων Δυνατότητα μείωσης των εκπομπών CO2 Αύξηση της ενεργειακής απόδοσης της βιομηχανίας τσιμέντου Δεν αφήνει υπολείμματα τέφρας	Απώλεια του αρχικού σχήματος της ίνας Υψηλή κατανάλωση ενέργειας εξαιτίας των μεγάλων θερμοκρασιών Δεν μπορεί να γίνει επανχρησιμοποίηση των υλικών (ίνες)	9	Μέχρι σήμερα κατάλληλο μόνο για σύνθετα υλικά με γυαλί (GFRP)  Εκπομπές αέριων σωματιδίων και ρύπων
<b>Μηχανική επεξεργασία (Λείανση)</b>	Αποτελεσματική και αποδοτική μέθοδος	Τα ανακτώμενα υλικά δεν είναι ανταγωνιστικά ως υλικά πλήρωσης ή ενίσχυσης. Τα ανακτώμενα υλικά δεν είναι υψηλής ποιότητας, εξαιτίας πρόσμιξης με άλλα υλικά Κατά την επεξεργασία δημιουργούνται απόβλητα Δεν έχουν δημιουργηθεί ακόμα μονάδες για μεγάλο όγκο αποβλήτων Εκπομπές σκόνης	9 (απόβλητα GFRP)  6/7 (απόβλητα CFRP)	Τα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν υλικό πλήρωσης ή ενέργειας μόνο.  Απαιτεί ειδικές εγκαταστάσεις για τον περιορισμό της σκόνης
<b>Χημική Επεξεργασία (Solvolysis)</b>	Ανάκτηση ινών με ολοκληρω το μήκος τους Η ανακτώμενη ρεσίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην βιομηχανία οικοδομικών υλικών Οι χημικοί διαλύτες είναι χαμηλού κινδύνου (αλκοόλες, γλυκόλες, υποκρίσιμο νερό)	Υψηλή κατανάλωση ενέργειας εξαιτίας των μεγάλων θερμοκρασιών και πιέσεων Απαιτούνται μεγάλες ποσότητες διαλυτών αν και οι περισσότεροι ανακτώνται και εντάσσονται στην διαδικασία επεξεργασίας Τα ανακτώμενα υλικά (ίνες) δεν είναι υψηλής ποιότητας	5/6	Κατάλληλο μόνο για σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα (CFRP)
<b>Θερμική Επεξεργασία - Πυρόληση</b>	Τα ανεκτιμώμενα χημικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά ως χημικά ή στην κατασκευή δομικών στοιχείων Χρησιμοποιούνται ήδη για την ανακύκλωση CFRP Ευκολη αναβάθμιση σε βιομηχανική κλίμακα	Οι ανεκτιμώμενες ίνες μπορεί να περιέχουν υπολείμματα οξειδωσης ή άνθρακα. Μειωμένη αντοχή ινών εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών Μειωμένη ποιότητα των ανακτημένων ινών άνθρακα	9	Μέχρι σήμερα η πιο βιώσιμη οικονομικά λύση για την ανακύκλωση των CFRP
<b>Θερμική Επεξεργασία - Πυρόληση μικροκυμάτων</b>	Γρήγορη διαδικασία με μικρή κατανάλωση ενέργειας Μικρότερη καταστροφή των ινών	Μείωση της μάζας των ανακτημένων ινών	4/5	Δεν έχει αποδειχτεί βιώσιμη για βιομηχανική κλίμακα
<b>Θερμική Επεξεργασία - Πυρόληση ρευστοποιημένης Κλίνης</b>	Δεν χρειάζεται καθαρισμός των αποβλήτων Ανάκτηση ενέργειας ή/και πρόδρομων χημικών ουσιών Υψηλή απόδοση στη μεταφορά θερμότητας	Μεγαλύτερη υποβάθμιση των ινών από ότι στην θερμική και χημική επεξεργασία Υψηλή κατανάλωση ενέργειας Αέριες εκπομπές από την διαδικασία	5/6	Δεν έχει αναπτυχθεί η αναβάθμιση του επιπέδου ετοιμότητας
<b>Ηλεκτρομηχανική Επεξεργασία - Κατακερματισμός Υψηλής Τάσης</b>	Ανάκτηση ινών υψηλής αντοχής Χαμηλό Κόστος για το επόμενο στάδιο ετοιμότητας (TLR)	Υπάρχει μόνο σε εργαστηριακή και πιλοτική κλίμακα Χαμηλής Ποιότητα ανακτημένων υλικών Μεγάλη κατανάλωση Ενέργειας	6	Δυνατότητα αναβάθμισης για την επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων

(Πηγές: 1) Wind Europe 2020, 2) Nagle et al. 2022, 3) Benson et al. 2022)



Σχήμα 5.1: Εκτιμώμενα κόστη και αξίες των ανακτώμενων υλικών από τις υπάρχουσες τεχνολογίες ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών πτερυγίων. (Πηγή: Wind Europe 2022).

#### 5.4 Το μέλλον στην Ανακύκλωση των Σύνθετων Υλικών Πτερυγίων Ανεμογεννητριών

Από τα παραπάνω προκύπτει η ανάγκη για περαιτέρω ανάπτυξη και εκβιομηχάνιση των τεχνολογιών ανακύκλωσης αποβλήτων σύνθετων υλικών ώστε να προσφέρει πρόσθετες λύσεις για την διαχείριση των σύνθετων αποβλήτων. Επιπλέον πρέπει να ενισχυθεί η έρευνα νέων, εναλλακτικών τεχνολογιών ανακύκλωσης με σκοπό την παραγωγή υψηλότερης αξίας ανακτώμενων προϊόντων και επαναεισαγωγής τους στους κύκλους παραγωγής, ενεργοποιώντας μια νέα αγορά. Παράλληλα, πρέπει να ενισχυθεί από τους υπευθύνους χάραξης πολιτικής η εφαρμογή μοντέλων κυκλικής οικονομίας, που σήμερα εμποδίζεται καθώς τα οικολογικά και κλιματικά οφέλη από τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών δεν έχουν ακόμη συνυπολογιστεί πλήρως στο κόστος των υλικών. Επομένως, τα παραγόμενα δευτερεύοντα υλικά της ανακύκλωσης, θα πρέπει να ανταγωνίζονται στην τιμή με τα πρωτογενή υλικά που συχνά είναι φθηνότερα. Τέλος, πρέπει να ενισχυθεί η έρευνα προς την κατεύθυνση της δημιουργίας νέων υλικών πτερυγίων και εξοπλισμού των ανεμογεννητριών ώστε να διευκολύνει τις πτυχές του τέλους κύκλου ζωής και της ανακυκλωσιμότητας.

Στο πλαίσιο αυτό, ο κατασκευαστικός κλάδος στον τομέα της αιολικής ενέργειας σε συνεργασία με επιστημονικά και πανεπιστημιακά ιδρύματα, συνεργάζονται για την εύρεση απαντήσεων στο σύνθετο πρόβλημα της ανακύκλωσης των πτερυγίων των ανεμογεννητριών στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

Το ερευνητικό έργο **DecomBlades** που ξεκίνησε στις αρχές του 2021 και επιδιώκει να αποτελέσει τη βάση για την εμπορευματοποίηση τεχνολογιών ανακύκλωσης και είναι επικεντρωμένο στις τρεις πιο ώριμες τεχνολογικά διαδρομές καθώς και στις πιο οικονομικές διαδικασίες: μηχανικός τεμαχισμός, συνεπεξεργασία τσιμέντου και πυρόλυση (ETIP Wind, 2019). Οι εταιρείες του έργου είναι πανεπιστήμια στην Δανία και πολλές εταιρείες του κατασκευαστικού κλάδου όπως η Vesta, η Siemens Gamesa, η LM Wind Power κ.α. Το έργο αφορά κυρίως τρεις συγκεκριμένες διαδικασίες: τον τεμαχισμό των πτερυγίων των ανεμογεννητριών έτσι ώστε το υλικό να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε διαφορετικά προϊόντα και διαδικασίες, τη χρήση των τεμαχισμένων πτερυγίων ως υλικό στην παραγωγή τσιμέντου και, τέλος, την μέθοδο της πυρόλυσης για τον διαχωρισμό του σύνθετου υλικού κάτω από υψηλή θερμοκρασία.

Ένα άλλο ερευνητικό έργο με εταιρείες εκπρόσωπους της αιολικής βιομηχανίας και αναγνωρισμένα ακαδημαϊκά και ερευνητικά ιδρύματα, είναι το **CETEC** (Circular Economy for Thermosets Epoxy Composites), στο οποίο επιχειρείται η ανάπτυξη μιας νέας τεχνολογίας και προωθείται η κυκλική οικονομία σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας της αιολικής βιομηχανίας. Μέσα σε τρία χρόνια, η CETEC στοχεύει να παρουσιάσει μια ολοκληρωμένη λύση, έτοιμη να υιοθετηθεί από την βιομηχανία, βασισμένη στην εμπορευματοποίηση της κυκλικότητας της νέας τεχνολογίας.

Ένα πρωτοποριακό ερευνητικό έργο είναι το **ZEBRA** (Zero wastE Blade ReseArch) που σκοπό έχει τον σχεδιασμό και την κατασκευή του πρώτου 100% ανακυκλώσιμου πτερυγίου ανεμογεννητριών της αιολικής βιομηχανίας. Η σύμπραξη του έργου ZEBRA είναι μια στρατηγική κοινοπραξία με αντιπροσώπους από την πλήρη αλυσίδα αξίας: από την ανάπτυξη υλικών, την κατασκευή πτερυγίων, τη λειτουργία και τον παροπλισμό ανεμογεννητριών καθώς και την ανακύκλωση του παροπλισμένου υλικού των πτερυγίων. Με την καθοδήγηση του γαλλικού ερευνητικού κέντρου IRT Jules Verne, οι εταιρείες και τα τεχνικά κέντρα έχουν σκοπό να επιδείξουν τις δυνατότητες των θερμοπλαστικών πτερυγίων με μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, από άποψη τεχνική, οικονομική και περιβαλλοντική.

Οι εταιρείες AIMPLAS και ITC συνεργάζονται στο έργο **EROS**, με σκοπό να αναπτύξουν διαδικασίες ανακύκλωσης για την ανάκτηση σύνθετων υλικών προερχόμενων από την αεροναυπηγική και τις ανεμογεννήτριες. Το έργο αυτό, στοχεύει, μέσω της βελτιστοποίησης των μεθόδων μηχανικής και χημικής ανακύκλωσης, το ανακυκλωμένο υλικό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε νέα προϊόντα για τις βιομηχανίες μεταφορών και κεραμικών.

Το Εθνικό Κέντρο Σύνθετων Υλικών στην Μεγάλη Βρετανία, το **SusWIND**, δημιουργήθηκε με σκοπό στην επιτάχυνση βιώσιμων σύνθετων υλικών και τεχνολογίας για πτερυγία ανεμογεννητριών. Ο απώτερος στόχος του είναι ο σχεδιασμός πτερυγίων

με την μέγιστη ανακυκλωσιμότητα ή/και κυκλικότητα. Αναπτύσσουν μοντέλα και αξιολογούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους από το αρχή έως το τέλος κύκλου ζωής των διαφόρων υλικών και της κατασκευής τους, ώστε να επιτύχουν τον καλύτερο τρόπο επαναχρησιμοποίησης, ανακύκλωσης και ανάκτησης των υλικών τους, σε βιομηχανικές εφαρμογές στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας.

Τέλος, η κατασκευαστική εταιρεία ανεμογεννητριών **Siemens Gamesa**, ερευνά την πλήρη ανάκτηση των εξαρτημάτων των πτερυγίων στο τέλος του κύκλου ζωής τους μέσω χημικής επεξεργασίας. Ο διαχωρισμός της ρητίνης, των ινών γυαλιού και του ξύλου, μεταξύ άλλων, επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ήπιου διαλύματος οξέος.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την καύση ορυκτών καυσίμων όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, για την παραγωγή ενέργειας και θερμότητας, παράγεται πάνω από το 75% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και σχεδόν το 90% όλων των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, συμβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή. Για να αποφευχθούν οι χειρότερες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, οι επιστήμονες ξεκαθαρίζουν ότι οι εκπομπές πρέπει να μειωθούν σχεδόν στο μισό έως το 2030 και να φτάσουν στο μηδέν μέχρι το 2050. Το κλειδί για την ενεργειακή αυτή μετάβαση είναι να τερματίσουμε την εξάρτηση μας από τα ορυκτά καύσιμα και να επενδύσουμε σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που είναι καθαρές, απεριόριστες και αξιόπιστες. Σήμερα, τα ορυκτά καύσιμα εξακολουθούν να αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 80% της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας, όμως τα τελευταία 30 χρόνια οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κερδίζουν έδαφος και σήμερα το 29% της παγκόσμιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από αυτές.

Με την ισχύουσα πολιτική της Ε.Ε., η ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές πρέπει να γίνει ο κύριος φορέας ενέργειας μέσα σε μία μόνο δεκαετία, ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της μείωσης κατά 55% των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου έως το 2050. Η αιολική και η φωτοβολταϊκή ενέργεια είναι οι ταχύτερα αναπτυσσόμενες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ε.Ε. παρουσιάζοντας ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία είκοσι χρόνια. Για την κατασκευή των υποδομών της αιολικής και της φωτοβολταϊκής ενέργειας (ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών πάνελ), απαιτούνται σημαντικοί πόροι, συμπεριλαμβανομένων πολλών κρίσιμων και πολύτιμων πρώτων υλών και εξαιτίας της ραγδαίας ανάπτυξης των τεχνολογιών αυτών, σημαντικές ποσότητες νέων ροών αποβλήτων αναμένονται στο μέλλον. Δεδομένου ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ και οι ανεμογεννήτριες, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αποβλήτων που σχετίζονται με τα απόβλητα τους επί του παρόντος είναι σχετικά χαμηλές, καθώς οι εγκαταστάσεις είναι σχετικά νέες και, γενικά, δεν έχουν ακόμη εξαντλήσει την ωφέλιμη διάρκεια ζωής τους. Εκτιμάται όμως, ότι έως το 2030 η Ε.Ε., θα έχει να αντιμετωπίσει 1,5 τόνους/έτος φωτοβολταϊκών αποβλήτων και 4,75 τόνους/έτος αιολικών αποβλήτων. Η διαχείριση της αύξησης αυτής θα είναι δύσκολη, κυρίως ως προς την οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα τους, αν και υπάρχουν ισχυρά πιθανά οφέλη, επειδή πολλά από τα απόβλητα που προκύπτουν ανήκουν είτε σε καθιερωμένα συστήματα ανακύκλωσης (π.χ. χάλυβας, γυαλί, αλουμίνιο) ή είναι κρίσιμες πρώτες ύλες υψηλής αξίας, που αν ανακτηθούν



μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν στον ίδιο κατασκευαστικό κλάδο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή/και σε άλλο βιομηχανικό τομέα.

Η αποτελεσματική διαχείριση των νέων αυτών αποβλήτων, που θα περιλαμβάνει και την ανάκτηση των σπάνιων πρώτων υλών, αποτελεί μια πρόκληση για όλους τους ενδιαφερόμενους στην αλυσίδα αξίας του τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και απαιτεί την άμεση προσοχή των υπεύθυνων χάραξης πολιτικής.

Σήμερα, με τις εφαρμοζόμενες μεθόδους διαχείρισης και επεξεργασίας των αποβλήτων αυτών, καθίσταται δυνατή η ανακύκλωση του 90% της μάζας των ανεμογεννητριών και του 85% της μάζας των φωτοβολταϊκών πάνελ.

Είναι προφανές, από την ανάλυση που έγινε στο κεφάλαιο 4, ότι **οι τεχνολογίες διαχείρισης των Φ/Β αποβλήτων** εξελίσσονται διαρκώς και η έρευνα είναι στραμμένη προς την κατεύθυνση της ανακύκλωσης υψηλής αξίας. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμη κρίσιμες προκλήσεις προς ανάπτυξη για την κλιμάκωση των τρεχουσών τεχνολογιών ανακύκλωσης αποβλήτων Φ/Β, όπως η μείωση των αέριων ρύπων και η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διαδικασία αποκόλλησης του υλικού ενθυλάκωσης, η μείωση της παραγωγής χημικών αποβλήτων με τη ορθή χρήση χημικών ουσιών και τέλος η επίτευξη υψηλής ποιότητας ανακτώμενων υλικών. Για την κλιμάκωση των τεχνολογιών και την επίτευξη της βιωσιμότητας τους και από την οικονομική σκοπιά, απαραίτητός κρίνεται και ο σημαντικός όγκος αποβλήτων Φ/Β που αναμένεται.

Το ποσοστό ανακύκλωσης **των αποβλήτων των ανεμογεννητριών**, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 5, φτάνει ήδη το 85% έως 90%. Τα περισσότερα εξαρτήματα μιας ανεμογεννήτριας - το θεμέλιο, ο πύργος, εξαρτήματα του κιβωτίου ταχυτήτων και της γεννήτριας – είναι ανακυκλώσιμα και αντιμετωπίζονται ως τέτοια. Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένη πρόκληση λόγω της πολύπλοκης φύσης των χρησιμοποιούμενων υλικών για την κατασκευή τους. Σήμερα τα σύνθετα υλικά ανακυκλώνονται στο εμπόριο μέσω της συνεπεξεργασίας τσιμέντου. Περαιτέρω ανάπτυξη και εκβιομηχάνιση εναλλακτικών τεχνολογιών όπως η σολβόλυση και η πυρόλυση θα προσφέρει στην αιολική βιομηχανία επιπλέον λύσεις για το τέλος της ζωής. Γενικότερα, για τα απόβλητα των φωτοβολταϊκών πάνελ και των ανεμογεννητριών, προκύπτει ότι η περαιτέρω ανακύκλωση τους και η ανάκτηση των στοιχείων τους με επαναεισαγωγή τους στους κύκλους παραγωγής, παρουσιάζει προκλήσεις όπως:

- 1) Δυσκολίες επεξεργασίας λόγω ύπαρξης σύνθετων υλικών στον εξοπλισμό (πτερύγια ανεμογεννητριών), παρουσία επικίνδυνων ουσιών ή/και χαμηλές συγκεντρώσεις πολύτιμων στοιχείων (Φ/Β στοιχεία).
- 2) Εξοπλισμός (πτερύγια ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκά στοιχεία), που δεν είναι σχεδιασμένος για να διευκολύνει την ανακύκλωση.

- 3) Μη εξελιγμένες τεχνολογίες ανακύκλωσης υψηλής αξίας ή/και μη βιώσιμες περιβαλλοντικά. Οι περισσότερες τεχνολογίες που αναπτύσσονται σήμερα απαιτούν μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, παράγουν μη διαχειρίσιμα στερεά, υγρά και αέρια απόβλητα και τα ανακτώμενα υλικά δεν είναι ικανά για επαναχρησιμοποίηση.
- 4) Τιμολογιακές πολιτικές που δεν ενσωματώνουν τα περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη στην χρήση δευτερευόντων (ανακυκλωμένων) υλών σε σχέση με τα πρωτογενή υλικά.
- 5) Υλικοτεχνικά ζητήματα (Logistics) λόγω των απομακρυσμένων τοποθεσιών, του μεγέθους και των απαιτήσεων ασφάλειας που σχετίζονται με την ενεργειακή υποδομή.

Η αντιμετώπιση των προκλήσεων και η προώθηση βιώσιμων μοντέλων για την διαχείριση των αποβλήτων αυτών ποικίλει, από νομοθετικά μέτρα που πρέπει να ληφθούν έως εθελοντικές δράσεις που πρέπει να αναληφθούν από τα ενδιαφερόμενα μέρη. Τα κενά πολιτικής και τα εμπόδια της αγοράς πρέπει επίσης να αντιμετωπιστούν για να βελτιστοποιηθεί η επεξεργασία και η διαχείριση αυτών των ροών αποβλήτων.

Η εφαρμογή δράσεων με προσεγγίσεις **κυκλικής οικονομίας** και για τα δυο ενεργειακά συστήματα (αιολικά και φωτοβολταϊκά), είναι το κλειδί για την βελτίωση της αειφορίας και της βιωσιμότητας του τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε περιβαλλοντικό, οικονομικό και κοινωνικό επίπεδο. Η κυκλική οικονομία είναι μια εναλλακτική λύση για τη σημερινή γραμμική οικονομία που βασίζεται στη νοοτροπία της "προμήθειας, παραγωγής, κατανάλωσης και απόρριψης". Πρόκειται για ένα μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης που βασίζεται στις αρχές του σχεδιασμού της αποφυγής των αποβλήτων και της ρύπανσης, της διατήρησης των προϊόντων και των υλικών σε χρήση και της αναγέννησης των φυσικών συστημάτων.

Σχήμα 6. 1: Το Μοντέλο της Κυκλικής Οικονομίας



Πηγή: Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Κοινοβουλευτικής Έρευνας

Η εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας θα μετριάσει τις επιπτώσεις στον τομέα, με τη διατήρηση της ευθύνης του παραγωγού, τον σχεδιασμό των εξαρτημάτων με τέτοιο τρόπο, προς διευκόλυνση της επαναχρησιμοποίησης των εξαρτημάτων και με την υποστήριξη της ανακύκλωσης υψηλής αξίας για τη μεγιστοποίηση της ανάκτησης των υλικών. Εξάλλου, η εφαρμογή της ιεραρχίας στην διαχείριση των αποβλήτων της Ε.Ε., η οποία τοποθετεί σε πυραμίδα τις επιλογές διαχείρισης, αφήνοντας τελευταία λύση την υγειονομική ταφή, καθιστά σαφές ότι η μείωση των αποβλήτων και η επαναχρησιμοποίηση του εξοπλισμού προηγούνται της ανακύκλωσης και της ανάκτηση των υλικών. Η δημιουργία μιας τυποποιημένης διαδικασίας για την επισκευή, ανακαίνιση και επαναχρησιμοποίηση του εξοπλισμού και η ανακύκλωση των υποδομών στο τέλος του κύκλου ζωής τους μπορούν να υποστηρίξουν την βιωσιμότητα αυτής της μετάβασης της Ε.Ε., προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η εφαρμογή καινοτόμων κυκλικών επιχειρηματικών μοντέλων σήμερα, εμποδίζεται επίσης επειδή τα περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών δεν υπολογίζονται ακόμη πλήρως στο κόστος των υλικών. Επομένως, τα κατάλληλα δευτερεύοντα υλικά πρέπει τακτικά να ανταγωνίζονται σε τιμή με τα πρωτογενή υλικά που είναι συχνά φθηνά.

Οι αναδυόμενες ροές αποβλήτων απαιτούν την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής των τεχνολογιών των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών. Οι παράγοντες που θα έκαναν το σύστημα αυτών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας πιο κυκλικό είναι:

**Χρησιμοποιούμενα Υλικά:** Μείωση της εξόρυξης πρώτων υλών, μέσω της αυξημένης χρήσης δευτερογενών (ανακτημένων) πρώτων υλών στην κατασκευή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με νομοθετικά κριτήρια για την ελάχιστη περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένα υλικά στα νέα προϊόντα παραγωγής ενέργειας ή με την προμήθεια ανακτημένων υλικών για χρήση σε άλλους μεταποιητικούς τομείς.

**Οικολογικός Σχεδιασμός:** Εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας στον σχεδιασμό των εξαρτημάτων, για την διευκόλυνση της ανακύκλωσης και της επαναχρησιμοποίησης και βελτίωση της ανθεκτικότητας και των δυνατοτήτων επισκευής και ανακυκλωσιμότητας των μελλοντικών ενεργειακών υποδομών. Επίσης, καθιέρωση ως βασικής αρχής σχεδιασμού των εξαρτημάτων, την δυνατότητα ανακύκλωσης καθώς και την επικινδυνότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται.

**Παραγωγή και Εμπορία:** Εφαρμογή πρακτικών παραγωγής με έμφαση στην αποδοτικότητα των πόρων και βελτιστοποιημένες υλικοτεχνικές προσεγγίσεις (logistics). Χρήση ψηφιακών ταυτοτήτων στον εξοπλισμό για την παροχή πληροφοριών σχετικά με υλικά κατασκευής τονίζοντας τις κρίσιμες πρώτες ύλες.

Εφαρμογή μοντέλων χρηματοδοτικής μίσθωσης και άλλα συμβόλαια που βασίζονται σε υπηρεσίες για να δοθεί προτεραιότητα σε προσεγγίσεις για τη συνολική διάρκεια ζωής λειτουργία και συντήρηση εξοπλισμού.

**Διάρκεια ζωής:** Παράταση της διάρκειας ζωής της υποδομής μέσω προληπτικής συντήρησης, επισκευή ελαττωματικών συστατικών και σταδιακή τεχνολογική αναβάθμιση των εξαρτημάτων.

Ανακατασκευή και επαναχρησιμοποίηση παροπλισμένου εξοπλισμού για εφαρμογές χαμηλότερης βαθμίδας. Να αποφεύγονται πρακτικές εξαγωγής ακατάλληλου εξοπλισμού σε τρίτες χώρες και εξαγωγή εξοπλισμού σε τοποθεσίες όπου οι πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων δεν είναι βέλτιστες.

**Απόβλητα και Ανακύκλωση:** Διασφάλιση αποτελεσματικής διαχείρισης αποβλήτων φωτοβολταϊκών πάνελ και ανεμογεννητριών, μέσω υψηλών ποσοστών συλλογής και κατάλληλων μεθόδων επεξεργασίας. Η ταχεία ανάπτυξη του κλάδου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, υποδηλώνει επιτακτική ανάγκη περαιτέρω εξέλιξης των υπάρχουσών τεχνολογιών καθώς και την ανάπτυξη νέων. Μεγιστοποίηση της ανακύκλωσης των εξαρτημάτων και των υλικών των Φ/Β πάνελ και των ανεμογεννητριών, ώστε να παρέχονται δευτερογενής πρώτες ύλες για χρήση στον ίδιο ή/και σε άλλους μεταποιητικούς κλάδους. Εφαρμογή των ευρωπαϊκών προτύπων για την επεξεργασία των ΑΗΗΕ και άλλων αποβλήτων είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση των ανακυκλωμένων υλικών σταθερής και υψηλής ποιότητας.

Η Ε.Ε. πρέπει να δώσει προτεραιότητα στη χρηματοδότηση έρευνας για την κλιμάκωση των τεχνολογιών ανακύκλωσης. Αυτό είναι ένα κρίσιμο σημείο για την ηγετική τεχνολογικά θέση της Ευρώπης καθώς 'παλεύουμε' για μια παγκόσμια βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση. Παράλληλα, οι εθνικές κυβερνήσεις θα πρέπει να εναρμονίσουν τις δικές τους, με την εφαρμογή των κανονισμών της Ε.Ε. για την επεξεργασία των αποβλήτων που θα συμβάλει στην ανάπτυξη μιας πανευρωπαϊκής αγοράς για ανακυκλωμένα προϊόντα σύνθετα.

Τέλος, όλοι οι εμπλεκόμενοι φορείς στην αλυσίδα αξίας των ΑΠΕ, οφείλουν να εστιάσουν περισσότερο στην περιβαλλοντική και λιγότερο στην οικονομική διάσταση της διαδικασίας διαχείρισης των αποβλήτων, στοχεύοντας στην προοπτική μιας βιώσιμης ενεργειακής μετάβασης.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Andersen, N., 2015. Wind turbine end-of-life: Characterisation of waste material. Student thesis, Master degree, University of Gävle .
- 2) Bank, L.C., Arias, F.R., Yazdanbakhsh, A., Gentry, T.R., Al-Haddad, T., Chen, J.F. & Morrow, R. 2018. Concepts for Reusing Composite Materials from Decommissioned Wind Turbine Blades in Affordable Housing. *Recycling*. 3(1)
- 3) Bazilian M, Onyeji I, Liebreich M, MacGill I, Chase J, Shah J, et al, 2012. Re-considering the economics of photovoltaic power. *Renew Energy* 2013;53:329–38. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.11.029>
- 4) Beauson J, Laurent A , D.P. Rudolph a , J. Pagh Jensen. The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 155 (2022) 111847
- 5) Beauson J, Lilholt H, Brøndsted P. Recycling solid residues recovered from glass fibre-reinforced composites - a review applied to wind turbine blade materials. *J Reinforc Plast Compos* 2014;33(16).
- 6) Beauson J., Madsen B., Toncelli C., Brøndsted P., Ilsted Bech J. 2016, Recycling of shredded composites from wind turbine blades in new thermoset polymer composites. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2016 Nov 1;90:390–9. [92]
- 7) Carrara, S., et al. Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, European Commission, Joint Research Centre (JRC) 2020
- 8) Choi, J., & Fthenakis, V. 2010, Design and optimization of photovoltaics recycling infrastructure. *Environ. Sci. Technol.*, 44, 8678–8683. <https://doi.org/10.1021/es101710g>
- 9) Cucchiella F, D'Adamo I, Rosa P. End-of-Life of used photovoltaic modules: a financial analysis. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;47:552–61. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.076>
- 10) D'Adamo, I., Miliacca, M., Rosa, P., 2017. Economic feasibility for recycling of waste crystalline silicon photovoltaic modules. *Int. J. Photoenergy* 2017, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2017/4184676>
- 11) Environmental European Agency EEA 2021: Emerging waste streams: opportunities and challenges of the clean-energy transition from a circular economy perspective (<https://www.eea.europa.eu/publications/emerging-waste-streams-opportunities-and>)

- 12) ETIPWind 2019, How wind is going circular: blade recycling. Available online at <https://etipwind.eu/files/reports/ETIPWind-How-wind-is-going-circular-blade-recycling.pdf> accessed 21 April 2020]
- 13) Fiandra V, Sannino L, Andreozzi C, Graditi G. End-of-life of silicon PV panels: A sustainable materials recovery process. *Waste Manag.* 2019 Feb 1;84:91-101. doi: 10.1016/j.wasman.2018.11.035. Epub 2018 Nov 26. PMID: 30691917.
- 14) Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, with support of PSE AG Freiburg 2023, Photovoltaics Report.  
<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- 15) Gielen, Dolf & Boshell, Francisco & Saygin, Deger & Bazilian, Morgan & Wagner, Nicholas & Gorini, Ricardo. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews.* 24. 38-50. 10.1016/j.esr.2019.01.006.
- 16) Global Wind Energy Council GWEC 2022. Global Wind Report 2022  
<https://gwec.net/global-wind-report-2022/>
- 17) Hvidtfeldt, H., & Petersen, S. DTU International Energy Report 2014 Wind energy — drivers and barriers for higher.
- 18) International Renewable Energy Agency, IRENA 2018, «Renewable power generation costs in 2017».
- 19) International Renewable Energy Agency, IRENA 2018. Global Energy Transformation, A Roadmap to 2050'
- 20) International Renewable Energy Agency, IRENA 2022, Renewable Energy Highlights 2022. [www.irena.org](http://www.irena.org)
- 21) International Renewable Energy Agency, IRENA 2022, Renewable Power Generation Costs in 2021, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- 22) International Renewable Energy Association, IRENA 2016, "End-of-Life Management of Solar Photovoltaic Panels.
- 23) IRENA and IEA-PVPS (2016), "End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels," International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems
- 24) Jensen, J.P. & Skelton, K. 2018. Wind turbine blade recycling: experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Ren. & Sust. Energy Reviews.* 97: 165–176
- 25) Klugmann-Radziemska E, Ostrowski P. Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules. *Renew Energy* 2010;35:1751–9. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.031>.

- 26) Komoto Keiichi, Lee, Jin-Seok Zhang, Jia Ravikumar, Dwarakanath Sinha, Parikhit Wade Andreas, and Heath Garvin A. End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies. United States: N. p., 2018. Web. doi:10.2172/1561523. <https://doi.org/10.2172/1561523>
- 27) Liu, P., Meng, F., & Barlow, C. Y. (2019). Wind turbine blade end-of-life options: an eco-audit comparison. *Journal of Cleaner Production*, 212, 1268-1281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.043>
- 28) Liu, Pu & Barlow, Claire. (2017). Wind turbine blade waste in 2050.. 10.17863/CAM.9257.
- 29) Lunardi M. M., Alvarez-Gaitan J. P., Bilbao J. I., and Corkish R., 'A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules', *Solar Panels and Photovoltaic Materials*. InTech, Jul. 11, 2018. doi: 10.5772/intechopen.74390.
- 30) Martínez-Mendoza, Eduardo and Fernández-Echeverría, Eduardo and García-Santamaría, Luis Enrique and Ruvalcaba-Sánchez, Loecelia and Fernández Lambert, Gregorio, 2022. Wind Farms Waste: Non-Calculated Environmental Impact?. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4043654> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4043654>
- 31) Muller, A. & Wambach, Karsten & Alsema, E.A.. (2011). Life Cycle Analysis of Solar Module Recycling Process. *MRS Proceedings*. 895. 10.1557/PROC-0895-G03-07.
- 32) Nagle J. A., Mullally G., Leahy P. G., Dunphy N.P., "Life cycle assessment of the use of decommissioned wind blades in second life applications" (2022) 302 *Journal of Environmental Management* 1, page 2.
- 33) Oliveux G, Dandy LO, Leeke GA. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: review of technologies, reuse and resulting properties. *Prog Mater Sci* 2015 Jul 1;72:61–99. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>
- 34) Padoan Flavia C.S.M., Altimari Pietro, Pagnanelli Francesca, Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development, *Solar Energy*, Volume 177, 2019, Pages 746-761, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.003>.
- 35) Pickering S., Recycling technologies for thermoset composite materials – current status. *Compos Part A: Appl Sci Manuf* 2006:1206–15.
- 36) Pietrogiovanni C., et al, Innovative Recycling of end of life Silicon PV Panels RESIELP. *Detritus / Volume 16 - 2021 / pages 41-47* <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2021.15118>
- 37) Rong Deng, Nathan L. Chang, Zi Ouyang, Chee Mun Chong, A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling, *Renewable and Sustainable Energy*

Reviews, Volume 109, 2019, Pages 532-550, ISSN 1364-0321,

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.020>.

38) Sakellariou N., Current and potential decommissioning scenarios for end-of-life composite wind blades. *Energy Syst* [Internet] 2018 Nov 1;9(4):981–1023.

<https://doi.org/10.1007/s12667-017-0245-9> [accessed 2021 Feb 5].

39) Skelton, K. 2017. WindEurope, Discussion paper on managing composite blade waste, [https://windeurope.org/wp-](https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/policy/topics/sustainability/Discussion-paper-on-blade-waste-treatment-20170418.pdf)

[content/uploads/files/policy/topics/sustainability/Discussion-paper-on-blade-waste-treatment-20170418.pdf](https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/policy/topics/sustainability/Discussion-paper-on-blade-waste-treatment-20170418.pdf)

40) Staffell, I., Green, R., 2014. How does wind farm performance decline with age?

*Renew. Energy* 66, 775–786. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.041>

41) Suschem 2018, Polymer Composites Circularity.

<http://www.suschem.org/publications> [accessed 21 April 2020].

42) Topham, E., McMillan, D., Bradley, S., Hart, E., 2019. Recycling offshore wind farms at decommissioning stage. *Energy Policy* 129, 698–709. [https://doi.org/](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.072)

[10.1016/j.enpol.2019.01.072](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.072).

43) Tsanakas J. et al, 2019. Towards a circular supply chain for PV modules: Review of today's challenges in PV recycling, refurbishment and recertification, *Prog Photovolt Res Appl.* 2019;1–11, <http://wileyonlinelibrary.com/journal/pip>

44) Tsanakas, J.A.; van der Heide, A.; Radavičius, T.; Denafas, J.; Lemaire, E.; Wang, K.; Poortmans, J.; Voroshazi, E. Towards a circular supply chain for PV modules: Review of today's challenges in PV recycling, refurbishment and re-certification. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2020, 28, 454–464. DOI: 10.1002/pip.3193

45) Vestas (2017), 'Life cycle assessment of electricity production from an onshore V136-3.45 MW wind plant', Denmark, Vestas Wind Systems A/S.

46) Vestas (2018a), 'Life cycle assessment of electricity production from an onshore V116-2.0 MW wind plant', Denmark, Vestas Wind Systems A/S.

47) Vestas Brochure 2022, Material use in Vestas turbines.

[https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/environment/2023\\_04\\_Material-Use-Brochure\\_Vestas.pdf.coredownload.inline.pdf](https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/environment/2023_04_Material-Use-Brochure_Vestas.pdf.coredownload.inline.pdf)

48) Wambach Karsten, Heath, Garvin A, and Libby, Cara. Life Cycle Inventory of Current Photovoltaic Module Recycling Processes in Europe. United States: N. p., 2018. Web. doi:10.2172/1561522

49) Wind Energy 2017, Wind energy in Europe: Scenarios for 2030,

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755008423000121>



- 50) WindEurope – Cefic – EuCIA 2020, Accelerating Wind Turbine Blade Circularity <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity.pdf>
- 51) WindEurope 2019, Market outlook to 2023, <https://windeurope.org/about-wind/reports/wind-energy-in-europe-outlook-to-2023/>
- 52) WindEurope 2020, How to build a circular economy for wind turbine blades through policy and partnerships, <https://windeurope.org/policy/position-papers/how-to-build-a-circular-economy-for-wind-turbine-blades-through-policy-and-partnerships/>
- 53) Διακυβερνητική Επιτροπή IPCC 2022, Έκθεση για την Κλιματική Αλλαγή 2022 <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>
- 54) Ευρωπαϊκή Επιτροπή 2018, A European Strategy for Plastics in a Circular Economy. <https://www.europarc.org/wp-content/uploads/2018/01/Eu-plastics-strategy-brochure.pdf>
- 55) Ευρωπαϊκή Επιτροπή 2020, Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe, [https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en)
- 56) Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο 2019: Ειδική έκθεση αριθ. 08/2019: Αιολική και ηλιακή ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή (<https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/wind-solar-power-generation-8-2019/el/index.html#chapter11>)
- 57) Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο, 2019: Ειδική έκθεση 18/2019: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στην ΕΕ. <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/greenhouse-gas-emissions-18-2019/el/index.html>
- 58) Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο 2020, Άρθρο 07-09-2022/20190926STO62270 «Τι είναι η ουδετερότητα του άνθρακα και πώς μπορεί να επιτευχθεί έως το 2050;» [https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2019/10/story/20190926STO62270/20190926STO62270\\_el.pdf](https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2019/10/story/20190926STO62270/20190926STO62270_el.pdf)
- 59) International Energy Agency IEA 2021. Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector’.
- 60) International Energy Agency IEA 2022. Solar PV, <https://www.iea.org/reports/solar-pv>
- 61) International Energy Agency IEA 2022. Special Report on Solar PV Global Supply Chains. <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>
- 62) Οδηγία 2000/76/EC του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 4<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 2020 για την αποτέφρωση των αποβλήτων.
- 63) Οδηγία 2008/98/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 19ης Νοεμβρίου 2008 , για τα απόβλητα και την κατάργηση ορισμένων οδηγιών.

64) Οδηγία 2012/19/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 4ης Ιουλίου 2012 , σχετικά με τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ).

65) Οδηγία 2018/2001 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 11ης Δεκεμβρίου 2018, για την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

66) Φραγκιαδάκης Ι., Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Εκδόσεις ΖΗΤΗ 2004  
ISBN139789604565283.

67) Latunussa C, Mancini L, Blengini G, Ardente F, Pennington D. Analysis of material recovery from silicon photovoltaic panels. EUR 27797. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2016. JRC100783

## Ιστοσελίδες

- 1) International Energy Agency, EEA  
<https://www.eea.europa.eu/el/themes/climate/intro>
- 2) Στατιστική Υπηρεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης,  
<https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/shares>
- 3) Our World in Data 2021, based on Vaclav Smil (2017) and BP Statistical Review of World Energy (<https://ourworldindata.org/energy-mix>
- 4) International Renewable Energy Agency, IRENA, [www.irena.org](http://www.irena.org)
- 5) Επίσημη ιστοσελίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, Solar Panels/Photovoltaics  
[https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/solar-energy\\_en#photovoltaics](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/solar-energy_en#photovoltaics)
- 6) Επίσημη ιστοσελίδα Κέντρου Ανανεώσιμων πηγών Ενέργειας ΚΑΠΕ,  
[http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis\\_windmill.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_windmill.htm)
- 7) Επίσημη ιστοσελίδα του έργου Cetec, <https://www.project-cetec.dk/uk/>
- 8) Επίσημη ιστοσελίδα του έργου DECOMBLADES <https://decomblades.dk/>
- 9) Επίσημη ιστοσελίδα του έργου ZEROWASTE <https://irt-jules-verne.fr/en/projets/zero-waste-blade-research-project/>
- 10) Επίσημη ιστοσελίδα του έργου EROS  
<https://www.jecomposites.com/news/aimplas-and-itc-are-developing-the-eros-project/>
- 11) Επίσημη ιστοσελίδα του έργου SUSWIND <https://www.nccuk.com/what-we-do/sustainability/suswind/>
- 12) SolarWorld: <https://www.solarworld.de/en/home/>