



**Πανεπιστήμιο Πειραιώς,
Τμήμα Οικονομικής Επιστήμης, Τμήμα Βιολογίας**

Διδρυματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Βιοοικονομία



**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕΣΩ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΑΝΕΛ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΤΟΥΣ**

Ονοματεπώνυμο : Γκιώνη Σοφία – Αντωνία

Πειραιάς, 10/10/2024

Επιβλέπουσα: Δρ. Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου, Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό (ΕΔΙΠ) - Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. - Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας



**University of Piraeus,
Department of Economics, Department of Biology**

Interdisciplinary Postgraduate Programme in Bioeconomics



**GEOPOLYMER AND HYDROGEN PRODUCTION BY PHOTOVOLTAIC
PANELS AT THE END-OF-LIFE CYCLE**

Name : Gkioni Sofia - Antonia

Piraeus, 10/10/2024

Supervisor: Dr. Konstantina Papadopoulou, Laboratory Teaching Staff – Department of Chemical Engineering – National Technical University of Athens - Laboratory of Organic Chemical Technology



ΤΜΗΜΑ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΒΕΒΑΙΩΣΗ ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

«Δηλώνω υπεύθυνα ότι το έργο που εκπονήθηκε και παρουσιάζεται στην υποβαλλόμενη διπλωματική εργασία, για τη λήψη του μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών, στη «*Βιοοικονομία, Κυκλική Οικονομία και Βιώσιμη Ανάπτυξη*» με τίτλο:

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕΣΩ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΑΝΕΛ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΤΟΥΣ

έχει γραφτεί από εμένα αποκλειστικά στο σύνολό της. Δεν έχει υποβληθεί ούτε εγκριθεί στο πλαίσιο κάποιου άλλου μεταπτυχιακού προγράμματος ή προπτυχιακού τίτλου σπουδών στην Ελλάδα ή στο εξωτερικό, ούτε είναι εργασία ή τμήμα εργασίας ακαδημαϊκού ή επαγγελματικού χαρακτήρα.

Δηλώνω επίσης υπεύθυνα ότι οι πηγές στις οποίες ανέτρεξα για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας αναφέρονται στο σύνολό τους, κάνοντάς πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου.»

Υπογραφή Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Όνοματεπώνυμο

Γκίωνη Σοφία Αντωνία

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Επειδή μια επιστημονική μελέτη δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο από ένα άτομο, αισθάνομαι την ανάγκη να αναφερθώ και να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με τον τρόπο τους να ολοκληρωθεί η διπλωματική μου εργασία και στήριξαν αυτή μου την προσπάθεια.

Ευχαριστώ θερμά την Δρ. Παπαδοπούλου Κωνσταντίνα, η οποία πίστεψε σε εμένα και μου έδωσε τη δυνατότητα να συμμετέχω στην παρούσα έρευνα, ανοίγοντάς μου τους μαθησιακούς ορίζοντες.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω την Δρ. Ολγιάνα Πανίτσα και τον υποψήφιο διδάκτορα Χάρη Παυλόπουλο, οι οποίοι ήταν στο πλευρό μου όλη την διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων αλλά και των αποτελεσμάτων, χωρίς την καθοδήγησή τους δεν θα μπορούσε να είχε πραγματοποιηθεί η παρούσα μελέτη.

Επιπλέον, να ευχαριστήσω τον Επίκουρο καθηγητή Δημήτριο Κιούπη, ο οποίος με βοήθησε ιδιαίτερα σε οποιαδήποτε απορία μου σχετικά με τα γεωπολυμερή υλικά αλλά και την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων των πειραματικών διαδικασιών.

Τέλος, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, οι οποίοι με στήριξαν στην προσπάθειά μου να φέρω εις πέρας τις ακαδημαϊκές μου υποχρεώσεις.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους αξιοποίησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι η χρήση των φωτοβολταϊκών πάνελ, τα οποία όταν ολοκληρώσουν τον κύκλο ζωής τους είναι αναγκαίο να ανακυκλωθούν ή να αξιοποιηθούν με εναλλακτικές μεθόδους στα πλαίσια της βιώσιμης ανάπτυξης. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η ανάκτηση ενός μέρους του φωτοβολταϊκού πάνελ, για την παρασκευή γεωπολυμερούς υλικού με ταυτόχρονη παραγωγή Υδρογόνου. Διερευνάται, η εναλλακτική χρήση του ανακτημένου μέρους του φωτοβολταϊκού στην αλκαλική αντίδραση με NaOH για την παραγωγή αέριου υδρογόνου και η αξιοποίηση του διαλύματος ενεργοποίησης στον γεωπολυμερισμό ιπτάμενης τέφρας και αποβλήτου τούβλου.

Για την ανάκτηση του πυριτίου και του γυαλιού από τα πάνελ πραγματοποιήθηκε επεξεργασία άλεσης δύο σταδίων ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη κοκκομετρία της πρώτης ύλης, δηλαδή μικρότερη από 90 μm. Το πρώτο στάδιο του πειράματος ήταν η αναγνώριση των πρώτων υλών με βάση την χημική σύσταση, την κοκκομετρία και την ορυκτολογική σύσταση. Κατόπιν, ακολουθήθηκε μία πειραματική διαδικασία παρασκευής διαλυμάτων όπου εξετάστηκαν οι παράμετροι των αλκαλίων NaOH και KOH, ο λόγος [Si]/R₂O για τιμές 0,8 1 και 1,2 και τέλος ο χρόνος διαλυτοποίησης. Οπότε δημιουργήθηκε μία σειρά από 3 πειράματα για κάθε λόγο [Si]/R₂O από δύο φορές για κάθε αλκάλιο, ενώ ταυτόχρονα μετρήθηκε και η παραγωγή του Υδρογόνου σε σχέση με τον χρόνο.

Σύμφωνα με την παραπάνω παράγραφο, σε κάθε περίπτωση διεξαγωγής πειράματος ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Σύμφωνα με τους λόγους στερεού/υγρού, χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένες ποσότητες πρώτης ύλης (PV) – νερού και Αλκαλίου. Το διάλυμα αναδεύτηκε για 24 ώρες σε διάταξη μέτρησης Υδρογόνου στους 80° C. Μετέπειτα, έγινε ο διαχωρισμός υγρού στερεού μέσω διάταξης διήθησης υπό κενό. Οπότε το ίζημα παρέμεινε σε φούρνο στους 70° C για 24 ώρες ώστε να μην υπάρχει υγρασία στα δείγματα. Τέλος, ακολούθησε μέθοδος αναγνώρισης πρώτων υλών μέσω XRF για το ίζημα και ατομική απορρόφηση για το διήθημα (μόνο σε τρία από τα 6 δείγματα). Το επόμενο στάδιο ήταν η διεξαγωγή και διασταύρωση των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τα θεωρητικά αποτελέσματα.

Αφού εξετάστηκαν και επεξεργάστηκαν όλα τα αποτελέσματα των πειραμάτων το βέλτιστο αποτέλεσμα χρησιμοποιήθηκε για την τελική παρασκευή διαλύματος ενεργοποίησης με εμπορικά προϊόντα ώστε να χρησιμοποιηθεί στον γεωπολυμερισμό της Ιπτάμενης τέφρας και

του αποβλήτου τούβλου. Τα δύο τελικά δείγματα συμμετείχαν σε θλιπτικές αντοχές ώστε να εξετασθεί και το τελευταίο σκέλος του πειραματικού σταδίου.

SUMMARY

One of the most widespread methods of utilization of Renewable Energy Sources is the use of photovoltaic panels, which when they complete their life cycle it is necessary to recycle or utilize them with alternative methods in the context of sustainable development. In this paper, the recovery of a part of the photovoltaic panel is considered for the preparation of geopolymer material with simultaneous production of Hydrogen. It is investigated, the alternative use of the recovered part of the photovoltaic panel in alkaline reaction with NaOH to produce hydrogen gas and the utilization of the activation solution in the geopolymerization of fly ash and brick waste.

For the recovery of silica and glass from the panels, a two-stage milling treatment was carried out to achieve the appropriate particle size distribution of the raw material, i.e. less than 90 μm . The first stage of the experiment was to identify the raw materials based on chemical composition, particle size distribution and mineralogical composition. Then, an experimental solution preparation procedure was followed where the parameters of NaOH and KOH alkalis, the [Si]/R₂O ratio for values of 0.8 1 and 1.2 and finally the solubilization time were investigated. So a series of 3 experiments was set up for each [Si]/R₂O ratio twice for each alkali, while at the same time the production of Hydrogen versus time was measured.

According to the above paragraph, the following procedure was followed in each case of conducting experiments: according to the solid/liquid ratios, specific amounts of raw material (PV) - water and Alkali were used. The solution was stirred for 24 hours in a Hydrogen measuring device at 80 °C. Subsequently, liquid-solid separation was performed by means of a vacuum filtration device. The precipitate was left in an oven at 70 °C for 24 hours to ensure that there was no moisture in the samples. Finally, a method of raw material identification by XRF was followed for the precipitate and atomic absorption for the filtrate (only in three of the six samples). The next step was to conduct and cross-check the experimental results against the theoretical results.

After all the experimental results were reviewed and processed, the optimum result was used for the final preparation of activation solution with commercial products to be used in the

geopolymerization of fly ash and brick waste. The two final samples were subjected to compressive strength tests in order to test the final part of the experimental stage.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	1
1.1.1	Εισαγωγή στην Βιοοικονομία, Κυκλική Οικονομία και Βιώσιμη Ανάπτυξη	2
1.1.2	Βιοοικονομία, Κυκλική Οικονομία και Φ/Β συστήματα.....	5
1.1.3	Ιστορική ανασκόπηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου και των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	7
1.1.4	Η διεθνής αγορά των Φ/Β πάνελ.....	8
1.1.5	Αγορά Φ/Β πάνελ στην Ελλάδα για το 2023.....	10
1.1.6	Προβληματισμός για το μέλλον σε σχέση με τα απόβλητα του Φ/Β πάνελ.....	11
1.2	Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	12
1.2.1	Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	12
1.2.2	Διαχωρισμός Φ/Β Συστημάτων με βάση την τεχνολογία τους	14
1.2.3	Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών πάνελ με βάση την συνδεσμολογία τους	17
1.2.4	Δομή Φωτοβολταϊκών πάνελ	18
1.2.5	Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκών πάνελ	20
1.3	Φωτοβολταϊκά Απόβλητα.....	23
1.3.1	Επιπτώσεις στο τέλος κύκλου ζωής των ΦΒ.....	23
1.3.2	Αναμενόμενα Απόβλητα.....	28
1.3.3	Συμπεράσματα σχετικά με τα Φ/Β απόβλητα	31
1.4	Γεωπολυμερή υλικά.....	32
1.4.1	Ορισμός και γενικές πληροφορίες.....	32
1.4.2	Δομή Γεωπολυμερών υλικών	33
1.4.3	Σύνθεση Γεωπολυμερών υλικών	35
1.4.4	Ιδιότητες Γεωπολυμερών υλικών	35
1.4.5	Εφαρμογές Γεωπολυμερών	37
1.4.6	Πρώτες ύλες γεωπολυμερών	39
1.5	Υδρογόνο (H ₂).....	45
1.5.1	Ιδιότητες Υδρογόνου	46
1.5.2	Ενέργεια από Υδρογόνο.....	47
1.5.3	Κωδικοποίηση του υδρογόνου ανάλογα με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατά τον κύκλο ζωής του.....	48

1.5.4	Παραγωγή Υδρογόνου.....	49
1.6	Παραγωγή Γεωπολυμερούς και Υδρογόνου.....	55
2	ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	56
2.1	Σχεδιασμός Πειραμάτων.....	56
2.2	Κωδικοποίηση δειγμάτων.....	57
2.3	Πρώτες Ύλες και χαρακτηρισμός τους.....	58
2.3.1	Ιπτάμενη Τέφρα (FA).....	58
2.3.2	Απόβλητο Τούβλου (CDW).....	60
2.3.3	Φωτοβολταϊκό Πάνελ.....	61
2.4	Παραγωγή Διαλύματος ενεργοποίησης.....	64
2.5	Παραγωγή Υδρογόνου.....	65
2.6	Σύνθεση Γεωπολυμερούς υλικού με διάλυμα ενεργοποίησης.....	66
2.6.1	Αριστοποίηση συνθηκών σύνθεσης διμερών γεωπολυμερών.....	66
2.6.2	Παραγωγή διμερών γεωπολυμερών.....	67
2.7	Μέθοδοι Χαρακτηρισμού.....	69
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	70
3.1	Τρόπος επεξεργασίας φωτοβολταϊκού πάνελ.....	70
3.2	Παραγωγή Υδρογόνου.....	72
3.3	Επιλογή Διαλύματος Ενεργοποίησης.....	77
3.4	Σύνθεση Γεωπολυμερούς υλικού και θλιπτικές αντοχές.....	78
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	79
4.1	Διάλυμα ενεργοποίησης και Γεωπολυμερισμός.....	79
4.2	Παραγωγή Υδρογόνου.....	81
4.3	Μελλοντική Έρευνα.....	82
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	83

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1 Ανάλυση συντομεύσεων των πειραματικών δειγμάτων	57
Πίνακας 2-2 Χημική σύσταση Ιπτάμενης Τέφρας (FA) % κ.β.	58
Πίνακας 2-3 Χημική σύσταση Αποβλήτου τούβλου (BW % κ.β).	61
Πίνακας 2-4 Αναλυτικός πίνακας από ανάλυση XRF του μη επεξεργασμένου – αλεσμένου φωτοβολταϊκού. (%W/W)	61
Πίνακας 3-1 Συνθέσεις πειραματικών διαλυμάτων	70
Πίνακας 3-2 Αναλυτικός πίνακας από ανάλυση XRF της σύνθεσης PV 0.8 Na, PV 1 Na, PV 1.2 Na και PV1 K. (%W/W)	72
Πίνακας 3-3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων παραγωγής υδρογόνου.....	73
Πίνακας 3-4 Τελική επιλογή διαλύματος για τη σύνθεση του γεωπολυμερισμού με βάση τις παραμέτρους.....	77
Πίνακας 3-5 Αποτελέσματα παραμέτρων και θλιπτικών αντοχών των γεωπολυμερών συνθέσεων	78

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας μέσω ηλιακής ενέργειας για το έτος 2022 – Μετράται σε ποσοστό της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας. (Data, 2023) (Energy, 2023).....	9
Εικόνα 2 Διάγραμμα ποσοστού παραγωγής ηλιακής ενέργειας ανά χώρα για τα έτη 1985-2022. (Data, 2023) (Energy, 2023).....	9
Εικόνα 3 Πίνακας διασυνδεδεμένων συστημάτων για το έτος 2023. (HELAPCO, 2024).....	10
Εικόνα 4 Αγορά των φωτοβολταϊκών για τα έτη 2010-2023. (HELAPCO, 2024).....	10
Εικόνα 5 εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων αυτοκατανάλωσης μέχρι το έτος 2023. (HELAPCO, 2024).....	11
Εικόνα 6 Βασική λειτουργία μιας Φ/Β κυψέλης. (Asdrubali & Desideri, 2019).....	13
Εικόνα 7 Οι Γενιές των φωτοβολταϊκών πάνελ. (Lameirinhas & al, 2022)	17
Εικόνα 8 Τα διαφορετικά επίπεδα από όπου αποτελείται ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. (Hattaraki, Dixit, & Patil, 2021).....	18
Εικόνα 9 Ποσοστό συμμετοχής των μερών του φωτοβολταϊκού πάνελ % (Athanaïlidis V. Pias, 2018).....	19
Εικόνα 10 Τρέχουσα τάση (IV) του ηλιακού κυτάρρου. (Yoon, 2019)	20
Εικόνα 11 Επίδραση της μρτσβολής της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. (Ma, Yang, Lu, & Peng, 2015)	22
Εικόνα 12 Εκτιμώμενη αξία (bil. USD) των ανακυκλώσιμων υλικών ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. (RystadEnergy, 2022)	26
Εικόνα 13 Πίνακας εκτίμησης των συμβατικών πόρων ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. (Intelligence, 2011) (Martin & Henrichs, 2010)	28
Εικόνα 14 Πίνακας εκτίμησης των σπάνιων μετάλλων ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. (Intelligence, 2011)	28
Εικόνα 15 Εκτίμηση σε mw για κάθε γενιά φωτοβολταϊκού. (Larsen, 2009) (Chowdhury, και συν., 2020).....	30
Εικόνα 16 Εκτίμηση των φωτοβολταϊκών απορριμάτων ανά κατηγορία φωτοβολταϊκού εως το 2050. (Sander, 2007).....	31
Εικόνα 17 Απεικόνιση πλέγματος Si-O-Al. (Davidovits J. , Geopolymers of the first generation: siliface-process, geopolymer, 1988).....	33
Εικόνα 18 Κατηγορίες polysialates. (Davidovits J. , Geopolymer Chemistry and Properties, 1988).....	34
Εικόνα 19 Συγκριτικός Πίνακας συρρίκνωσης γεωπολυμερούς σε σχέση με τσιμέντο Portland. (Davidovits J. , Geopolymer Chemistry and Properties, 1988)	36
Εικόνα 20 Διαλυτοποίηση σε 5% διάλυμα οξέων (% βάρος της μήτρας) . (Davidovits, Comrie, Paterson, & Ritcey, 1990) (Davidovits J. , Properties of geopolymer cements, 1994)	36
Εικόνα 21 Τιμές διαπερατότητας (cm/s). (Davidovits J. , Properties of geopolymer cements, 1994).....	37
Εικόνα 22 Συγκέντρωση σε ppm κατιόντων σε εκχυλίσματα μεταλλευτικών αποβλήτων και ιλύων βιομηχανίας παραγωγής χρωμάτων, πριν και μετά τη σύνθεση γεωπολυμερών. (Jaarsveld, J.S.J., & Lorenzen, 1997).....	37

Εικόνα 23 Χημική σύσταση του τσιμέντου Portland και των Ιπτάμενων Τεφρών της Μεγαλόπολης και Πτολεμαΐδας. (Αλιάδης Δημήτριος & Λίντας Δημήτριος, 2018)	41
Εικόνα 24 Χημικές και φυσικές ιδιότητες του Υδρογόνου. (Science, 2017)	47
Εικόνα 25 Χρωματική διαφοροποίηση σε σχέση με την διαφορετική πηγή παραγωγής Υδρογόνου. (Kousi, 2021).....	49
Εικόνα 26 Σχηματικό στοιχείο φωτοηλεκτρόλυσης βάσης ημιαγωγού τύπου n. (Hejazi, 2020)	53
Εικόνα 27 Κοκκομετρική κατανομή της Ιπτάμενης Τέφρας.....	59
Εικόνα 28 Κοκκομετρική κατανομή του αποβλήτου τούβλου	60
Εικόνα 29 Μηχάνημα δόνησης αλεστικού μύλου του ΕΜΠ Μεταλλειολόγων Μηχανικών ...	62
Εικόνα 30 Φωτογραφία μετά την πρώτη άλεση από το μηχάνημα δόνησης	63
Εικόνα 31 Μηχάνημα pulverisette της εταιρείας Fritsch του ΕΜΠ τμήμα Χημικών Μηχανικών	63
Εικόνα 32 Πούδρα Φωτοβολταϊκού πάνελ μετά από την άλεση.	64
Εικόνα 33 Διάταξη AMPTS II (Automatic Methane Potential Test System)	66
Εικόνα 34 Αριστερή φωτογραφία: Μηχάνημα γεωπολυμερισμού υλικών και Δεξιά φωτογραφία μήτρα των γεωπολυμερών.	68
Εικόνα 35 Αριστερά: Γεωπολυμερή υλικά με σύνθεση αποβλήτου τούβλου – διάλυμα ενεργοποίησης από το PV1 ΝΑΟΗ, Δεξιά: Γεωπολυμερή υλικά με σύνθεση Ιπτάμενης τέφρας – διάλυμα ενεργοποίησης από το PV1 ΝΑΟΗ.	68

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 Ορυκτολογική σύσταση Ιπτάμενης τέφρας μέσω XRD.....	59
Διάγραμμα 2 Ορυκτολογική σύσταση Αποβλήτου τούβλου μέσω XRD	61
Διάγραμμα 3 Κοκκομετρική κατανομή του φωτοβολταϊκού πάνελ	64
Διάγραμμα 4 Ρυθμός παραγωγής Υδρογόνου κατά την ανάδευση του διαλύματος PV 0.8 NAOH	74
Διάγραμμα 5 Ρυθμός παραγωγής Υδρογόνου κατά την ανάδευση του διαλύματος PV 1 NAOH	74
Διάγραμμα 6 Ρυθμός παραγωγής Υδρογόνου κατά την ανάδευση του διαλύματος PV 1.2 NAOH	75
Διάγραμμα 7 Ρυθμός παραγωγής Υδρογόνου κατά την ανάδευση του διαλύματος PV 0.8 KOH	75
Διάγραμμα 8 Ρυθμός παραγωγής Υδρογόνου κατά την ανάδευση του διαλύματος PV 1 KOH	76
Διάγραμμα 9 Ρυθμός παραγωγής Υδρογόνου κατά την ανάδευση του διαλύματος PV 1.2 KOH	76

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας θα παρουσιαστούν βιβλιογραφικά στοιχεία σχετικά με τις Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την συμβολή τους στην Βιοοικονομία και βιώσιμη ανάπτυξη. Ειδικότερα, το αντικείμενο που θα μελετηθεί είναι το φωτοβολταϊκό πάνελ σε μία ιστορική ανασκόπηση, τη διεθνή αγορά στο παρόν αλλά και τον προβληματισμό που έχει τεθεί σε σχέση με τα απόβλητα που δημιουργούνται από τα πάνελ.

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) μπορούν να αναπληρώσουν την αποθηκευμένη ενέργεια σε σύντομο χρονικό διάστημα και αποτελούν υπάρχουσες μορφές ενέργειας που υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Η πράσινη ενέργεια είναι διαθέσιμη ενέργεια που υπάρχει σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Παράγεται από διάφορες φυσικές διεργασίες όπως ο άνεμος, η γεωθερμία και οι κύκλοι του νερού και ήταν η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποιούσαν οι άνθρωποι πριν αρχίσουν να χρησιμοποιούν τα ορυκτά καύσιμα.

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θεωρούνται η ηλιακή ενέργεια, η αιολική, η γεωθερμική, η υδροθερμική και ενέργεια των ωκεανών καθώς και η ενέργεια από βιομάζα Επίσης, είναι η ενέργεια από βιοαέριο, από εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια και από τα αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων

Βασικά, οι ήπιες μορφές ενέργειας βασίζονται στην ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση τη γεωθερμική ενέργεια, η οποία είναι η ροή ενέργειας από το εσωτερικό του φλοιού της γης, και την παλιρροϊκή ενέργεια, η οποία βασίζεται στη βαρύτητα. Η γεωθερμική ενέργεια είναι η ροή ενέργειας από το εσωτερικό του φλοιού της γης, ενώ η παλιρροϊκή ενέργεια βασίζεται στη βαρύτητα. Οι ήπιες πηγές ενέργειας που βασίζονται στην ηλιακή ακτινοβολία είναι ανανεώσιμες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν θα εξαντληθούν για αρκετά δεκατομμύρια χρόνια όσο υπάρχει ο ήλιος. Πρόκειται ουσιαστικά για ηλιακή ενέργεια που έχει παγιδευτεί με κάποιο τρόπο: Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιεί τον άνεμο που προέρχεται από τον ήλιο. Η

βιομάζα είναι η ηλιακή ενέργεια που δεσμεύεται σε φυτικό ιστό μέσω της φωτοσύνθεσης- η αιολική ενέργεια χρησιμοποιεί τον άνεμο από τον ήλιο.

Οι ήπιες μορφές ενέργειας είτε χρησιμοποιούνται άμεσα (κυρίως για θέρμανση) είτε μετατρέπονται σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρική ή μηχανική ενέργεια).

Όσον αφορά τον τεχνικοοικονομικό τομέα, το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό από την ήπια ενέργεια εκτιμάται ότι είναι αρκετές φορές υψηλότερο από τη συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας. Εκτιμάται ότι είναι αρκετές φορές υψηλότερο από την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, μέχρι πρόσφατα, η υψηλή τιμή των εφαρμογών νέας ενέργειας, τα τεχνικά προβλήματα εφαρμογής και η πολιτική και πολιτικοοικονομική κατάσταση καθιστούν δύσκολη τη βιωσιμότητα της νέας ενέργειας. Οι οικονομικές ανησυχίες απέτρεψαν την αξιοποίηση έστω και ενός κλάσματος αυτού του δυναμικού.

Η χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών ενέργειας είναι ακόμη αρκετά περιορισμένη σε παγκόσμια κλίμακα, αλλά αυξάνεται. Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν αναλυθεί ως λύση για την αναμενόμενη εξάντληση των αποθεμάτων (μη ανανεώσιμων) ορυκτών καυσίμων. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πηγές ενέργειας σε μεγαλύτερη κλίμακα. Συνεπώς, αποτελούν τη βάση του μοντέλου οικονομικής ανάπτυξης της λεγόμενης πράσινης οικονομίας και είναι το κύριο αντικείμενο της σχολής των οικολογικών οικονομικών. (Μαματάς, 2016)

1.1.1 Εισαγωγή στην Βιοοικονομία, Κυκλική Οικονομία και Βιώσιμη Ανάπτυξη

Σήμερα, η κυκλική οικονομία θεωρείται βασικό μοντέλο για πολλές ευρωπαϊκές χώρες, με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή να την εισάγει ως σχέδιο δράσης για την οικονομία το 2015, γίνοντας έτσι μια κορυφαία πρωτοβουλία (Aviles-Palacios & Rodriguez - Olalla, 2021). Παρόλα αυτά, η έννοια της κυκλικής οικονομίας χρονολογείται από το 1966 (Adami & Schiavon, 2021) (Blomsma & Brennan, 2017). Αυτό το μοντέλο ανταποκρίνεται στην πρόκληση της βιώσιμης ανάπτυξης, επιδιώκοντας την αποδοτικότητα των πόρων, την ενίσχυση της παγκόσμιας ανταγωνιστικότητας της Ευρώπης μέσω της οικολογικής καινοτομίας, και τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας (Blomsma & Brennan, 2017) (Korhonen, Honkasalo, & Seppala, 2017). Ένας

τομέας όπου δημιουργούνται θέσεις εργασίας είναι η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση υλικών.

Η έννοια της κυκλικής οικονομίας βασίζεται σε νέες προσεγγίσεις για την κατασκευή και τη χρήση αγαθών. Στην παραδοσιακή γραμμική οικονομία, εφαρμόζονται τα στάδια ανάπτυξης, κατανάλωσης και διάθεσης των υλικών/προϊόντων (Dumée, 2021) (Wuster, 2021). Στην κυκλική προσέγγιση, η γραμμική σκέψη μετατρέπεται σε βρόχους, με την επαναχρησιμοποίηση και ανάκτηση υλικών και προϊόντων να αποτελούν καίριο παράγοντα. Αυτό συνεπάγεται τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για να επιτευχθεί αυτό, προστίθενται πρόσθετα βήματα όπως η πρόληψη και η διαχείριση των αποβλήτων (COMMISSION, 2015). Η μετατροπή του γραμμικού μοντέλου σε κυκλικές προσεγγίσεις συμβάλλει στην παγκόσμια βιωσιμότητα και στην ελαχιστοποίηση της πίεσης στους φυσικούς πόρους (Aviles-Palacios & Rodriguez - Olalla, 2021) (Wuster, 2021). Επιπλέον, συμβάλλει στη δημιουργία πράσινης ανάπτυξης μέσω συμπληρωματικών δραστηριοτήτων, συμπεριλαμβανομένης της οικολογικής καινοτομίας και της αποδοτικότητας των πόρων (Aviles-Palacios & Rodriguez - Olalla, 2021) (Das, et al., 2019).

Απαιτείται η μετάβαση προς μια κυκλική οικονομία που προωθεί την εξάλειψη των αποβλήτων και τη συνεχή ασφαλή χρήση των φυσικών πόρων. Η αποδοτικότητα των υλικών αποτελεί θεμέλιο πυλώνα της κυκλικής οικονομίας για την αντιμετώπιση των προκλήσεων της μείωσης των επιπτώσεων στο περιβάλλον και της έλλειψης πόρων (Aviles-Palacios & Rodriguez - Olalla, 2021) (Walker, Coleman, Hodgson, Collins, & Brimacombe, 2018). Η βελτίωση της κυκλικότητας των υλικών αποτελεί βασική αρχή για την κυκλική οικονομία. Κρίσιμο στοιχείο εδώ είναι ο επανασχεδιασμός των υλικών κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου ζωής του προϊόντος (Dumée, 2021) (Krauklis, Karl, Gagani, & Jorgensen, 2021) (Wuster, 2021). Τα προϊόντα πρέπει να σχεδιάζονται με στόχο τη δημιουργία ενός κλειστού κύκλου διαδικασιών και τη μείωση της χρήσης πόρων. Παράλληλα, πρέπει να προωθείται η συνεχής χρήση των πόρων μέσω της ανακύκλωσης και της επαναχρησιμοποίησης αντί της απόθεσης σε χώρους υγειονομικής ταφής (Alhazmi & Syeed Adnan, 2021) (Dumée, 2021) (Krauklis, Karl, Gagani, & Jorgensen, 2021).

Επί του παρόντος, η παραγωγή απορριμμάτων αντιμετωπίζει σοβαρά ζητήματα (Aviles-Palacios & Rodriguez - Olalla, 2021). Η διαχείριση των απορριμμάτων έχει εξελιχθεί σε μια σειρά παγκόσμιων προκλήσεων, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης των εκπομπών άνθρακα

και της άντλησης άνθρακα (Alhazmi & Syyed Adnan, 2021). Συνδέεται επίσης άμεσα με τη ρύπανση του εδάφους, του νερού και του αέρα (Das, και συν., 2019) (Aviles-Palacios & Rodriguez - Olalla, 2021). Η μεγάλη ποσότητα απορριμμάτων οφείλεται κυρίως στην αυξημένη κατανάλωση, η οποία, αντίστοιχα, συνδέεται με την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και το γραμμικό σύστημα βιομηχανικοποίησης που χαρακτηρίζεται από χαμηλό επίπεδο υλικής αποδοτικότητας (Alhazmi & Syyed Adnan, 2021). Η παγκόσμια οικονομία βρίσκεται ακόμα υπό μετασχηματισμό προς έναν κυκλικό σύστημα. Για να επιταχυνθεί αυτή η διαδικασία, απαιτούνται εξελίξεις τεχνολογίας καθώς και εκπαιδευτικές δραστηριότητες. Ένα σημαντικό στοιχείο κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης είναι να τονίζεται ότι τα οφέλη από αυτές τις αλλαγές δεν αφορούν μόνο το περιβάλλον, αλλά επίσης και την οικονομία και την κοινωνία (Alhazmi & Syyed Adnan, 2021) (Korhonen, Honkasalo, & Seppala, 2017). Ένας από τους σημαντικότερους στόχους είναι η μείωση της κατανάλωσης φυσικών πόρων (Alhazmi & Syyed Adnan, 2021) (Hattaf, και συν., 2021).

Σχετικά με το οικονομικό όφελος, αυτό συνδέεται στενά με τη μείωση του κόστους των πρωτογενών υλικών και τη μείωση του κόστους ενέργειας. Εξαιτίας της ανάκτησης υλικών, οι πόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν επανειλημμένα, δημιουργώντας νέες βιομηχανίες που επιφέρουν επίσης οικονομικά οφέλη στην κοινωνία. Επιπλέον, τα χαμηλότερα κόστη προκύπτουν από την ύπαρξη περιβαλλοντικής νομοθεσίας, φόρων και ασφαλειών (Korhonen, Honkasalo, & Seppala, 2017). Η διαδικασία αυτή συμβάλλει επίσης στη δημιουργία τοπικών κοινοτήτων. Σημειώνεται ότι αυτά τα οφέλη είναι συνήθως πιο εμφανή σε χώρες που υπόκεινται σε γρήγορη βιομηχανικοποίηση και έχουν ανεπαρκή περιβαλλοντική νομοθεσία (Das, και συν., 2019) (Geng & Doberstein, 2008).

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί πως δεν υποστηρίζουν όλοι οι συγγραφείς τη θετική σχέση μεταξύ οικονομικής ανάπτυξης και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας (Adami & Schiavon, 2021) (Skene, 2017) (Kiser, 2016). Για παράδειγμα, ο Kiser επισημαίνει ότι στην κυκλική οικονομία υπάρχει μια παράδοξη σχέση που συνδέεται με τον στόχο της αύξησης των πωλήσεων υλικών (οικονομική ανάπτυξη) και την χρήση λιγότερων πόρων (Kiser, 2016), ενώ ο Skene (Skene, 2017) υποστηρίζει ότι η οικονομική ανάπτυξη οδηγεί αναπόφευκτα σε περιβαλλοντική υποβάθμιση, διότι οι κύκλοι δεν μπορούν ποτέ να παράγουν ανάπτυξη, εκτός αν αντιληφθούμε τους κύκλους ως σπείρες (Skene, 2017).

1.1.2 Βιοοικονομία, Κυκλική Οικονομία και Φ/Β συστήματα.

Η διασφάλιση της βιώσιμης παραγωγής ενέργειας αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο κόσμος καθ' όλη τη διάρκεια της συνεχούς βιομηχανικής επανάστασης, ιδίως με την εκθετική αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και τη ζήτηση ενέργειας από την κατανάλωση και τη χρήση των αναπτυγμένων τεχνολογιών (Rabaia, Semeraro, & Olabi, 2022) (Bonsu, 2020).

Σύμφωνα με τις εκθέσεις World Energy Outlook του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας για τα έτη 2010, 2020 και 2021, καθώς και τα καταγεγραμμένα σύνολα δεδομένων (AGENCY I. E., 2022), οι παραδοσιακές πηγές ενέργειας, όπως άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο, αντιστοιχούσαν για πάνω από το 85% της παγκόσμιας προσφοράς ενέργειας τη δεκαετία του 1980 και περίπου 80% από το 2008. Η αργή πρόοδος αυτή οφείλεται σε οικονομικούς, πολιτικούς, τεχνικούς και μετεωρολογικούς περιορισμούς, εν μέρει λόγω της αυξημένης παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης και των ήδη εγκατεστημένων συμβατικών μονάδων παραγωγής ενέργειας.

Πέρα από αυτούς τους περιορισμούς, οι ανησυχίες προκύπτουν λόγω του υψηλού κόστους κεφαλαίου και της μηχανικής πολυπλοκότητας των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σύμφωνα με τη στατιστική έκθεση για την ανανεώσιμη δυναμικότητα του 2021 και τα δεδομένα του Διεθνούς Οργανισμού Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (AGENCY I. R., 2021) παρατηρείται εκθετική αύξηση στις ετήσιες εγκαταστάσεις τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά τη διάρκεια του 2020. Αντίστοιχα, οι μη ανανεώσιμες τεχνολογίες έχουν παρουσιάσει μειούμενες τάσεις ετήσιας δυναμικότητας ισχύος τα τελευταία δέκα έτη, υποδηλώνοντας την αυξανόμενη προτίμηση για επενδύσεις στην ανανεώσιμη ενέργεια.

Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) διεξήγαγε μια μελέτη σχετικά με τις προοπτικές ενέργειας μέχρι το 2050, εξετάζοντας τρία διαφορετικά σενάρια για την προσφορά και τη ζήτηση ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη ότι η παγκόσμια ζήτηση θα διπλασιαστεί περίπου έως το 2050 (AGENCY I. E., 2022). Συγκρίθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια μείωσης εκπομπών CO₂: το σενάριο καθορισμένων πολιτικών (STEPS) που αντιπροσωπεύει τις υφιστάμενες πολιτικές, το σενάριο ανακοινωμένων δεσμεύσεων (APS) που περιλαμβάνει πρόσφατους

στόχους και το σενάριο καθαρών μηδενικών εκπομπών έως το 2050 (NZE), που αντιπροσωπεύει την εφικτή πορεία του IEA. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, τα STEPS, APS και NZE αναμένεται να μειώσουν τις εκπομπές CO₂ κατά 10%, 40% και 100% αντίστοιχα έως το 2050 (AGENCY I. E., 2022).

Ωστόσο, υπάρχει σύγχυση σχετικά με τις έννοιες της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και των μηδενικών εκπομπών, καθώς συχνά συγχέονται με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Azarpour & Suardi, 2013) (Islam & al., 2021). Οι περισσότεροι άνθρωποι αγνοούν ότι τα σημερινά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν είναι απαραίτητα 100% περιβαλλοντικά βιώσιμα και ότι η κατασκευή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν είναι ουτοπική πορεία για τη διάσωση του περιβάλλοντος (Azarpour & Suardi, 2013). Παρά το γεγονός ότι πολλά από αυτά τα συστήματα λειτουργούν με μηδενικές εκπομπές, παράγουν εκπομπές κατά τη διάρκεια των φάσεων κατασκευής και λήξης τους, ενώ αντιμετωπίζουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τεχνικές προκλήσεις καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους, όπως έχει εξεταστεί σε προηγούμενες εργασίες (Rabaia, Semeraro, & Olabi, 2022) (Alami & al, 2023). Επομένως, ο πραγματικός στόχος είναι η βελτιστοποίηση της βιωσιμότητας, της αποδοτικότητας και της οικονομικής σκοπιμότητας των υπό εξέταση τεχνολογιών, προκειμένου να προσελκύσουν επενδύσεις παγκοσμίως και να προωθηθεί η προσέγγιση προς την πορεία των μηδενικών εκπομπών το συντομότερο δυνατό, εξασφαλίζοντας ένα βιώσιμο μέλλον για τις επόμενες γενιές.

Από το όνομά του, αυτό το μοντέλο προσπαθεί να ενσωματώσει την έννοια της κυκλικότητας στο σημερινό μονόδρομο, είτε είναι γραμμικό είτε μη κυκλικό το οικονομικό μοντέλο, προσβλέποντας συγχρόνως στη βελτίωση της συνολικής βιωσιμότητας. Η κυκλική πτυχή επικεντρώνεται στους πόρους και την κυκλοφορία τους εντός του συστήματος, επικεντρώνοντας περισσότερο στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αντίθετα, οι πτυχές της αειφορίας καλύπτουν όλες τις αποφάσεις, την επιλογή υλικών, τις ποσότητες χρησιμοποιούμενων υλικών, τη σπανιότητα και την τοξικότητα των υλικών, το κόστος επεξεργασίας, τις τεχνολογίες φωτοβολταϊκών που επιλέγονται, τις τεχνικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν αυτές οι τεχνολογίες, τις διαδικασίες κατασκευής, τους πόρους που χρειάζονται για αυτές τις διαδικασίες, το κόστος κατασκευής, την εφοδιαστική αλυσίδα, τα θέματα και το κόστος της εφοδιαστικής αλυσίδας, την επικοινωνία κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων της εφοδιαστικής αλυσίδας, τις διαδικασίες εγκατάστασης, τα συστήματα ενέργειας, τα βοηθητικά συστήματα, το κόστος εγκατάστασης, την τοποθεσία, τα μετεωρολογικά δεδομένα, τις

διαδικασίες λειτουργίας, τα μέτρα συντήρησης, τους πόρους που απαιτούνται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου κ.ά. Ο κατάλογος επεκτείνεται συνεχώς μέχρι τα τελικά στάδια, τα οποία αφορούν το τέλος του κύκλου ζωής των έργων (μετά από 25-30 χρόνια). Παρά τη μεγάλη διάρκεια ζωής, ορισμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια ενδέχεται να καταστραφούν από δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας ή κακές διαδικασίες κατασκευής. Αυτό σημαίνει ότι ενδέχεται να θεωρηθούν ηλεκτρικά απόβλητα πριν από το τέλος της διάρκειας ζωής τους και θα πρέπει να αντικατασταθούν άμεσα για να αποφευχθούν διακοπές στην ηλεκτροδότηση και άλλες τεχνικές προκλήσεις. Οι πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας επικεντρώνονται στα αντικαταστάσιμα φωτοβολταϊκά πάνελ, παράλληλα με αυτά που θα παραμείνουν και θα λειτουργούν για περισσότερα από 25-30 χρόνια. (Lameirinhas & al, 2022)

1.1.3 Ιστορική ανασκόπηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου και των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Στις 17 Μαρτίου 1958, η NASA εκτόξευσε έναν δορυφόρο που ονομάζεται Vanguard-I. Το Vanguard-I φέρει δύο πομπούς, ο ένας μια κυψέλη υδραργύρου και ο άλλος ένα ηλιακό σύστημα που αποτελείται από έξι ηλιακά κύτταρα πυριτίου. Αυτή είναι μια εντυπωσιακή βελτίωση λαμβάνοντας υπόψη την 20ετή διάρκεια ζωής των συμβατικών συστημάτων που κινούνται με υδράργυρο (McEvoy, Markvart, & Castaner, 2012) 2]. Η NASA αρχικά δεν είχε πειστεί για τα οφέλη και τις μελλοντικές ανάγκες της ηλιακής ενέργειας στα διαστημικά προϊόντα. Ωστόσο, αυτή η υπηρεσία είναι μια ευκαιρία για την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών, καθώς αρκετές εργασίες έχουν πετύχει με αυτή τη μέθοδο παραγωγής ενέργειας. Μόλις δύο μήνες αργότερα, το ρωσικό διαστημικό πρόγραμμα εκτόξευσε τον δορυφόρο Sputnik 3. Από τότε, η φωτοβολταϊκή ενέργεια έχει γίνει ένα σημαντικό σύστημα στο διαστημικό πρόγραμμα (McEvoy, Markvart, & Castaner, 2012) (Bernardes & al, 2021) (Lameirinhas & al, 2022).

Είναι αυτονόητο ότι ο «πόλεμος» της εξερεύνησης του διαστήματος ήταν πάντα μια από τις κύριες κινητήριες δυνάμεις για την ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας (McEvoy, Markvart, & Castaner, 2012) (Lameirinhas & al, 2022) (Bernardes & al, 2021), αλλά η έλλειψη

βελτιστοποιημένων διαδικασιών παραγωγής και το επακόλουθο υψηλό κόστος πωλήσεων ήταν πάντα εμπόδιο στην ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

Στη δεκαετία του 1970, ο υπάλληλος της Comsat, Joseph Lindmeyer, ανέπτυξε μια διαδικασία που αύξησε την απόδοση των ηλιακών κυψελών πυριτίου κατά 50%. Ο Lindmeyer εγκατέλειψε την εταιρεία και ίδρυσε τη Solarex με τον Peter Varadi το 1973 για την ανάπτυξη ηλιακών κυψελών για δημόσιες εφαρμογές. Αν και το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για τη διαδικασία κατείχε η Comsat και όχι η Lindmeyer ή η Solarex, μέχρι το 1980 η Solarex κατείχε περίπου το 50% της αγοράς στη βιομηχανία φωτοβολταϊκών. Αυτή η αγορά ήταν μικρή αλλά άρχισε να αναπτύσσεται λόγω της πετρελαϊκής κρίσης το 1973 (λίγους μήνες μετά την ίδρυση της Solarex) (Bernardes & al, 2021) (Lameirinhas & al, 2022). Ως αποτέλεσμα αυτής της κρίσης, το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για τα φωτοβολταϊκά έχει αυξηθεί και νέες τεχνολογίες έχουν εμφανιστεί χρησιμοποιώντας διαφορετικά νέα υλικά, με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος κατασκευής. Το Mono-Si (μονοκρυσταλλικό πυρίτιο) χρησιμοποιήθηκε μέχρι το 1973, αλλά στη συνέχεια το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (πολυκρυσταλλικό πυρίτιο) και το a-Si (άμορφο πυρίτιο) κυριάρχησαν στην αγορά επειδή οι διαδικασίες τους ήταν φθηνότερες και λιγότερο απαιτητικές (McEvoy, Markvart, & Castaner, 2012) (NREL, 2021)

1.1.4 Η διεθνής αγορά των Φ/Β πάνελ

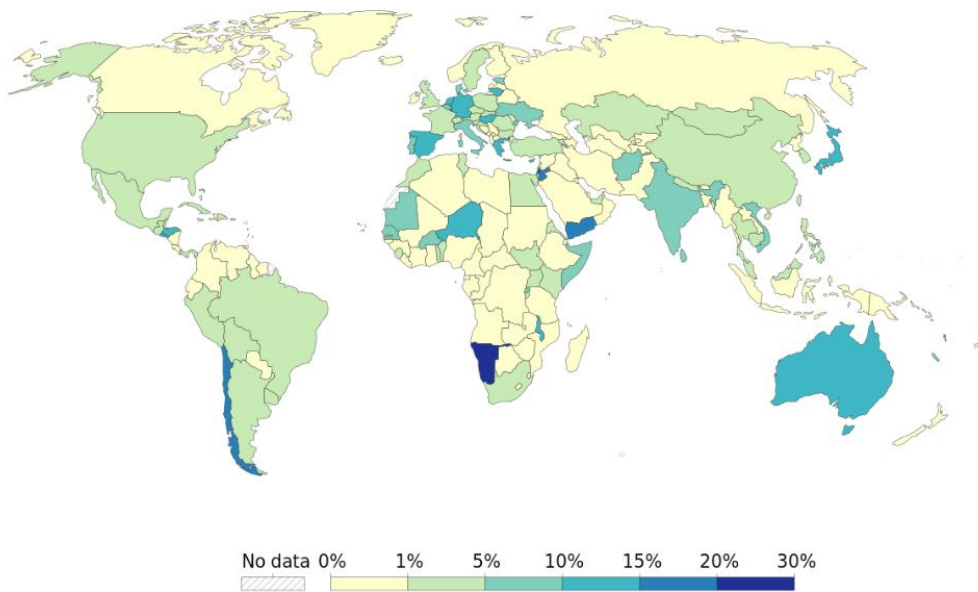
Η παγκόσμια ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών είναι εξαιρετικά δυναμική και διαφέρει σημαντικά από χώρα σε χώρα: Τον Απρίλιο του 2022, η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς έφθασε το 1 TW (AGENCY I. E., 2022) (Statista, 2023). Το 2022, η κορυφαία φωτοβολταϊκή χώρα είναι η Κίνα με περίπου 390 GW [(Statista, 2023)4][5], που είναι σχεδόν τα δύο πέμπτα της συνολικής παγκόσμιας εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος. Το 2022, περισσότερες από 40 χώρες παγκοσμίως θα έχουν σωρευτική φωτοβολταϊκή ισχύ που θα υπερβαίνει το 1 γιγαβάτ, συμπεριλαμβανομένων του Καναδά, της Νότιας Αφρικής, της Χιλής, του Ηνωμένου Βασιλείου, της Νότιας Κορέας, της Αυστρίας, της Αργεντινής, των Φιλιππίνων και του Ηνωμένου Βασιλείου. (Hanley, 2020)

Στις κορυφαίες χώρες όσον αφορά την εγκατεστημένη δυναμικότητα το 2022 περιλαμβάνονται η Κίνα, οι ΗΠΑ και η Ινδία (Wesoff, 2017) (AGENCY I. E., 2022), με την Ιαπωνία, τη Βραζιλία, τις Κάτω Χώρες, τη Γαλλία, το Μεξικό και τη Γερμανία να

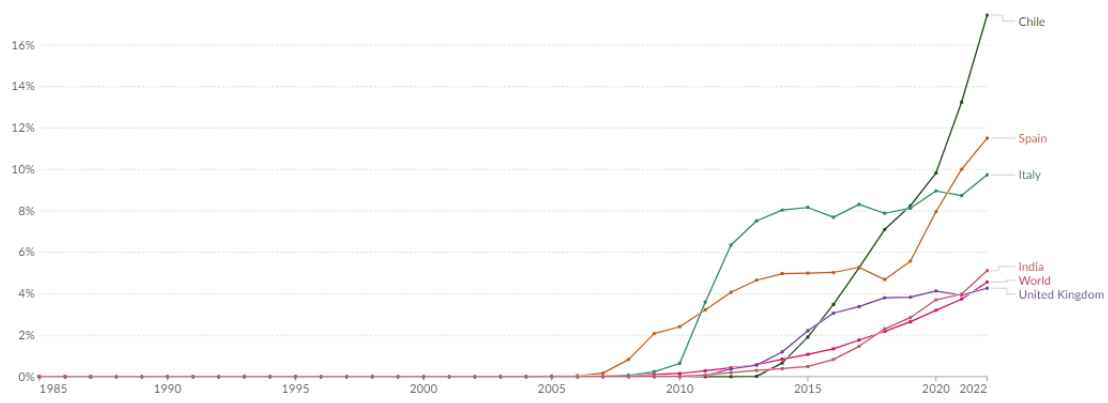
κατατάσσονται επίσης σε υψηλές θέσεις. Στην Αυστραλία, η υπάρχουσα ηλιακή φωτοβολταϊκή ισχύς είναι σήμερα επαρκής για να παρέχει πάνω από το 15% της ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, ενώ η Ονδούρα, η Ιταλία, η Ισπανία, η Γερμανία και η Ελλάδα μπορούν να παράγουν μεταξύ 9 και 14% της εθνικής ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας (Schafer & Watson, 2019) (Masson, Brunisholz, & Orlandi, 2015).

Share of electricity production from solar, 2022

Our World
in Data



Εικόνα 1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας μέσω ηλιακής ενέργειας για το έτος 2022 – Μετράται σε ποσοστό της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας. (Data, 2023) (Energy, 2023)



Εικόνα 2 Διάγραμμα ποσοστού παραγωγής ηλιακής ενέργειας ανά χώρα για τα έτη 1985-2022. (Data, 2023) (Energy, 2023)

1.1.5 Αγορά Φ/Β πάνελ στην Ελλάδα για το 2023

Το 2023, η ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών εγκατέστησε περισσότερα μεγαβάτ (MWp) από οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία. Συγκεκριμένα, τα φωτοβολταϊκά αντιπροσωπεύουν το 74% της συνολικής νέας εγκατεστημένης ισχύος που εγκαταστάθηκε από ΑΠΕ φέτος. (HELAPCO, 2024)

Το ποσοστό αυτό διαμορφώνεται ως εξής:

ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	MW
ΝΕΑ ΙΣΧΥΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΤΟ 2023	1574,7
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΩΣ ΚΑΙ ΤΟ 2023	7087,5

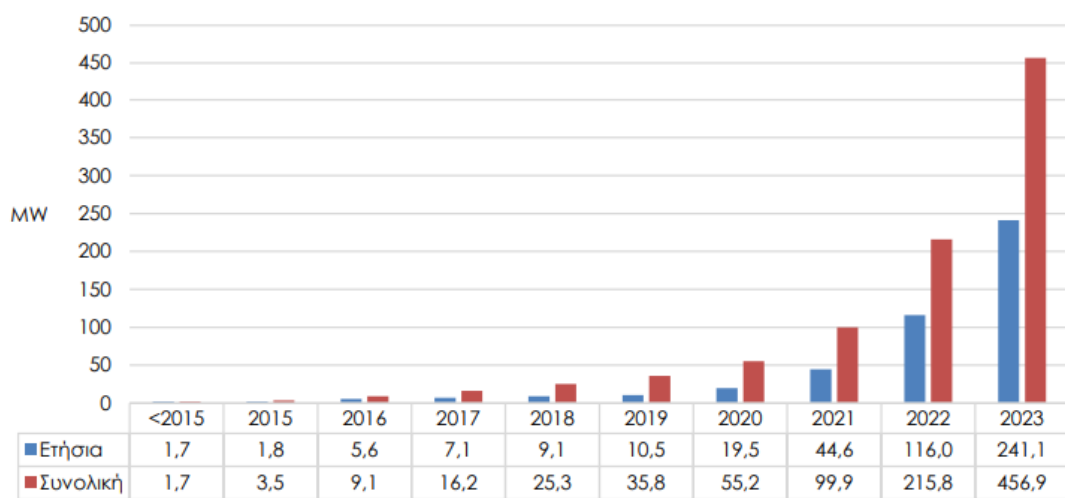
Εικόνα 3 Πίνακας διασυνδεδεμένων συστημάτων για το έτος 2023. (HELAPCO, 2024)



Εικόνα 4 Αγορά των φωτοβολταϊκών για τα έτη 2010-2023. (HELAPCO, 2024)

Το 2023, η αγορά των συστημάτων αυτοκατανάλωσης διπλασιάστηκε σε σχέση με το προηγούμενο έτος. (HELAPCO, 2024)

Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων αυτοκατανάλωσης



Εικόνα 5 εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων αυτοκατανάλωσης μέχρι το έτος 2023. (HELAPCO, 2024)

Εντός του 2023 διασυνδέθηκαν, μεταξύ άλλων, και 1.795 μικρά συστήματα με μπαταρία (12,66 MWh) στο πλαίσιο του προγράμματος "Φωτοβολταϊκά στη Στέγη", ενώ είναι η πρώτη χώρα στην Ευρώπη σε ότι αφορά το ποσοστό της εγχώριας ηλεκτροπαραγωγής που παράγεται από φωτοβολταϊκά, με ποσοστό υπερδιπλάσιο από το μέσο ευρωπαϊκό όρο (8,6%) και υπερτριπλάσιο από τον παγκόσμιο μέσο όρο (5,4%). (HELAPCO, 2024)

1.1.6 Προβληματισμός για το μέλλον σε σχέση με τα απόβλητα του Φ/Β πάνελ

Τα τελευταία χρόνια, η παραγωγή φωτοβολταϊκών έχει διπλασιαστεί για να καλύψει τις ανάγκες της κοινωνίας σε πράσινη ενέργεια. Ταυτόχρονα, η μείωση του κόστους παραγωγής έχει οδηγήσει στην αντικατάσταση των φωτοβολταϊκών πάνελ σε συντομότερο χρονικό διάστημα από τη διάρκεια ζωής τους. Τα Φ/Β εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής των αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) σύμφωνα με την οδηγία 232/323 ΑΗΗΕ. Μέχρι το 2050, τα φωτοβολταϊκά απόβλητα αναμένεται να ξεπεράσουν το 10% του παγκόσμιου μητρώου ηλεκτρονικών αποβλήτων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια «μετατροπής» των φωτοβολταϊκών πάνελ στο τέλος κύκλου ζωής τους (μετά από 25 με 30 χρόνια), σε γεωπολυμερή υλικά αλλά και ταυτόχρονη παραγωγή Υδρογόνου, έτσι ώστε να εξετασθεί αν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί με αυτό τον τρόπο να ευθυγραμμιστεί στις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Οπότε, στα επόμενα υποκεφάλαια του κεφαλαίου 1 θα εξετασθούν κάποιιοι ορισμοί και λειτουργίες των γεωπολυμερών, των φωτοβολταϊκών συστημάτων και του υδρογόνου, έτσι ώστε να αναλυθεί αργότερα το πειραματικό μέρος.

1.2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η λειτουργία του. Είναι σημαντικό να τεκμηριωθεί και να στηριχθεί επιστημονικά η έννοια του πάνελ αλλά και η δομή του, ο διαχωρισμός του και τα κύρια χαρακτηριστικά αυτού ώστε να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί ως απόβλητο.

1.2.1 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Η κύρια λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία κατά την πτώση της. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στην ικανότητα των ημιαγωγών να μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια όταν αυτό προσπίπτει στην επιφάνειά τους.

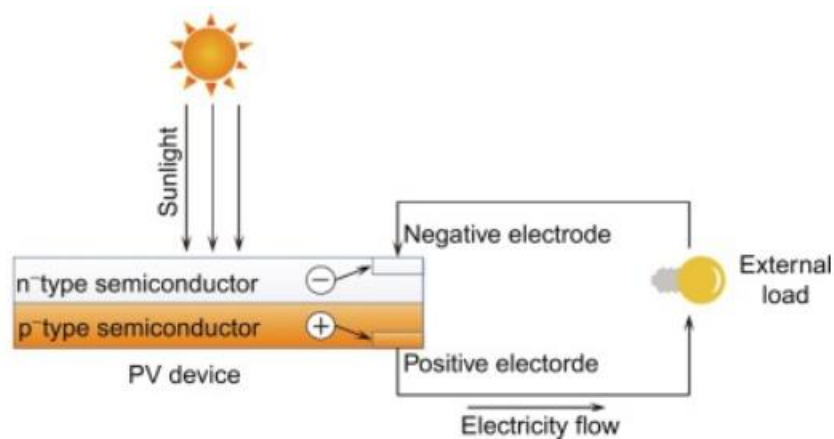
Οι ηλιακές κυψέλες είναι τεχνητοί ημιαγωγοί στους οποίους τα άτομα είναι διατεταγμένα σε μια περιοδικά συμμετρική δομή, δηλαδή μια τετραεδρική κρυσταλλική δομή. Συνήθως αποτελούνται από τουλάχιστον δύο ημιαγωγικές πλάκες (δίοδοι p-n) από πυρίτιο. Το υλικό αυτό είναι ιδανικό επειδή υπάρχει σε αφθονία στη φύση και έχει τέλεια κρυσταλλική δομή. Διαμορφώνεται εύκολα σε ικανοποιητική καθαρότητα και λειτουργεί ικανοποιητικά σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. (Asdrubali & Desideri, 2019)

Η επάνω πλάκα ονομάζεται ημιαγωγός τύπου n (αρνητικό, μείον φορτίο) που μεταφέρει επιπλέον ηλεκτρόνια, ενώ η κάτω πλάκα ονομάζεται ημιαγωγός τύπου p (θετικό, συν φορτίο)

που μεταφέρει λιγότερα ηλεκτρόνια. Οι ημιαγωγοί τύπου p και n που είναι τοποθετημένοι σε επαφή ονομάζονται δίοδοι επαφής. (Asdrubali & Desideri, 2019)

Στη βασική τους κατάσταση, είναι ηλεκτρικά μη αγώγιμοι, επειδή δεν υπάρχουν αζευγάρωτοι φορείς που μεταφέρουν ρεύμα. Οι ημιαγωγοί συνδέονται σε κλειστό ηλεκτρικό κύκλωμα και η κινητικότητά τους παρατηρείται όταν απορροφούν ενέργεια. Στην ηλιακή ακτινοβολία υψηλής ενέργειας, φωτόνια με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του αγωγού απορροφώνται από χημικούς δεσμούς και ενεργοποιείται ίσος αριθμός ηλεκτρονίων. Ως αποτέλεσμα, παράγεται περίσσεια ελεύθερων ζευγών ηλεκτρονίων-οπών από την ακτινοβολία. (Asdrubali & Desideri, 2019)

Τα πλεονάζοντα ηλεκτρόνια στην πλάκα (τύπου n) εγκαταλείπουν την αρχική τους θέση και περνούν στη ζώνη αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο πλακών. Με αυτόν τον τρόπο, το ηλεκτρικό πεδίο στην ένωση των δύο πλακών προκαλεί ροή ηλεκτρονίων και δημιουργείται συνεχές ρεύμα. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ορίζεται ως η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ημιαγωγών, η οποία αντιστοιχεί στην πόλωση του φορτίου όσο συνεχίζεται η ηλιακή ακτινοβολία. Η πρακτική αξιοποίηση αυτού του φαινομένου αποτελεί τη βάση για την αποτελεσματική λειτουργία των ηλιακών κυψελών για την παραγωγή ενέργειας. (Asdrubali & Desideri, 2019)



Εικόνα 6 Βασική λειτουργία μιας Φ/Β κυψέλης. (Asdrubali & Desideri, 2019)

1.2.2 Διαχωρισμός Φ/Β Συστημάτων με βάση την τεχνολογία τους

Τα ηλιακά κύτταρα ταξινομούνται συνήθως σε γενιές, όπως φαίνεται στην εικόνα 7. Η ταξινόμηση αυτή οφείλεται στα υλικά και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή (Hussain, 2018). Η πρώτη γενιά βασίζεται στην κατασκευή πλακιδίων και ο πυρήνας της τεχνολογίας κατασκευής βασίζεται στην τεχνολογία που χρησιμοποιούνταν για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων εκείνη την εποχή, επιτρέποντας τη χρήση ανώτερης τεχνολογίας στον τομέα της κατασκευής πλακιδίων πυριτίου (Hussain, 2018) (Lameirinhas & al, 2022). Στον κόσμο των φωτοβολταϊκών, αυτή η πρώτη γενιά εξακολουθεί να είναι η πιο διαδεδομένη, αντιπροσωπεύοντας το 95% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το 2020 (Fraunhofer, 2023). Η δεύτερη γενιά κυψελών αναπτύχθηκε για να μειώσει το κόστος και να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά της προηγούμενης γενιάς. Η γενιά αυτή βασίζεται στην τεχνολογία λεπτών υμενίων και χαρακτηρίζονται από τη λεπτότητα του στρώματος απορρόφησης. Είναι της τάξης των μερικών μικρομέτρων αντί των 100-200 μικρομέτρων της προηγούμενης γενιάς. Η τρίτη γενιά ηλιακών κυψελών βασίστηκε στην τεχνολογία λεπτών υμενίων, αλλά σε αντίθεση με τους προκατόχους της, δεν βασίζονταν πλέον στις τυπικές επαφές pn (Hussain, 2018). Μια άλλη σημαντική εξέλιξη που επιτεύχθηκε σε αυτή τη γενιά ήταν η δυνατότητα ρύθμισης της ενέργειας του χάσματος ζώνης με την αλλαγή της σύνθεσης, ένας σημαντικός παράγοντας για την παραγωγή κυψελών πολλαπλών διακλαδώσεων.

1.2.2.1 Πρώτη Γενιά (Crystalline Silicon, Si)

Φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου - Πρώτης Γενιάς (Crystalline Silicon, Si)

- Μονοκρυσταλλικά στοιχεία Πυριτίου (sc-Si)
- Πολυκρυσταλλικά στοιχεία Πυριτίου (mc-Si)
- Ταινία Πυριτίου (Ribbon-Si)

Από ιστορικές αναφορές, είναι σαφές ότι ηλιακές κυψέλες πυριτίου υπάρχουν εδώ και αρκετό καιρό. Ακόμη και σήμερα, όταν έχουν αναπτυχθεί διάφορες εναλλακτικές λύσεις για τα ηλιακά κύτταρα πυριτίου, τις ηλιακές κυψέλες πυριτίου παραμένουν η πιο διαδεδομένη τεχνολογία ηλιακών κυψελών (Fraunhofer, 2023). Το πυρίτιο είναι ένα από τα κύρια υλικά που

χρησιμοποιούνται στις ηλιακές κυψέλες πρώτης γενιάς. Δύο σημαντικοί παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτό το πλεονέκτημα είναι το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου 1,17 eV και η αφθονία υλικών υψηλής ποιότητας λόγω της ήδη κλιμακούμενης παραγωγής ημιαγωγών με βάση το πυρίτιο για μικροτσιπ (Goetzberger & al., 2003).

Επί του παρόντος, τα κρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου αντιπροσωπεύουν το 95% των φωτοβολταϊκών στον κόσμο και η κυριαρχία τους είναι σαφής. Ωστόσο, το ποσοστό αυτό αναμένεται να αλλάξει καθώς τα ηλιακά κύτταρα λεπτών υμενίων αποδεικνύονται πιο αποδοτικά και πλησιάζουν περισσότερο το c-Si με το πλεονέκτημα του μειωμένου κόστους των ημιαγωγών (Fraunhofer, 2023). Επιπλέον, οι σύνθετες αρχιτεκτονικές που βασίζονται σε ετεροσύνδεση έχουν ήδη ξεπεράσει το ρεκόρ επιδόσεων των ομοσυνδέσεων c-Si και θα μπορούσαν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον των φωτοβολταϊκών, με την προϋπόθεση ότι η πρόοδος στην τεχνολογία και τις σχετικές διαδικασίες θα μειώσουν το κόστος κατασκευής. (Lameirinhas & al, 2022)

1.2.2.2 Δεύτερη Γενιά

Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτού υμενίου (Thin Film) – Δεύτερης Γενιάς

– Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CIS, CIGS)

Προκειμένου να είναι ανταγωνιστικές με τις υπάρχουσες τεχνολογίες, πρέπει να δοθεί έμφαση στις πτυχές του κόστους της παραγωγής μονάδων Si που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Μια σημαντική πτυχή που πρέπει να βελτιωθεί είναι η μείωση του συνολικού συμβιβασμού μεταξύ της μεγάλης εξάρτησης από τα υλικά ημιαγωγών και του συνολικού κόστους του συστήματος. Αυτή είναι η κινητήρια δύναμη που οδηγεί στην εμφάνιση των φωτοβολταϊκών δεύτερης γενιάς με τη χρήση λεπτών υμενίων που περιέχουν CIGS (Isaabela, 2021) (Santos & al, 2021).

– Αμορφο Πυρίτιο (a-Si)

– Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Το τελλουριούχο κάδμιο, ο απορροφητής των ηλιακών κυψελών CdTe, έχει ενεργειακή τιμή 1,5 eV και έχει ιδανικές ιδιότητες για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας. Το πρώτο πρωτότυπο ηλιακής κυψέλης CdTe δημοσιεύθηκε το 1972, αφού οι Bonnet και Rabenhorst

επέδειξαν μια διάταξη που λειτουργούσε με απόδοση 6% (McEvoy, McEvoy's Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications, 2018). Έκτοτε, η απόδοση αυτή έχει αυξηθεί σημαντικά και το σημερινό ρεκόρ ερευνητικής απόδοσης της First Solar το 2015 είναι 22,1% (NREL, 2021). Η αύξηση της παραγωγικότητας δεν ήταν συνεπής με την πάροδο των ετών, πιθανώς λόγω διαφόρων καινοτομιών στην παραγωγή, και εν τω μεταξύ έχει μείνει σημαντικά στάσιμη. Ωστόσο, η τεχνολογία παραμένει ελκυστική, ιδίως στις μονάδες λεπτού υμενίου, όπου κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο, και η παγκόσμια παραγωγή έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια (Fraunhofer, 2023).

– Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

1.2.2.3 Τρίτη Γενιά

Άλλες τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών υλικών – Τρίτης Γενιάς

Τέλος, τα φωτοβολταϊκά συστήματα τρίτης γενιάς χρησιμοποιούν οργανικά μόρια και πολυμερή ως πρώτες ύλες. Τα υλικά αυτά έχουν μεγάλες δυνατότητες για μελλοντική ανάπτυξη ώστε να αντικαταστήσουν τα συμβατικά φωτοβολταϊκά συστήματα. Συστήματα πρώτης γενιάς. Βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό επίπεδο και ορισμένα από αυτά είναι πλέον διαθέσιμα στο εμπόριο. Είναι πλέον διαθέσιμα στο εμπόριο. Προς το παρόν το κόστος τους είναι ακόμη υψηλό, αλλά οι νέες εναλλακτικές πρώτες ύλες θα τα καταστήσουν πιο αποδοτικά. (Lameirinhas & al, 2022)

Διαθέτουν επίσης σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η ευελιξία και η ελαφρότητα. Το κύριο μειονέκτημα είναι η σχετικά χαμηλή απόδοση των οργανικών υλικών σε σύγκριση με τα ανόργανα υλικά.

Η απόδοση είναι χαμηλότερη και η διάρκεια ζωής μικρότερη από εκείνη των ανόργανων φωτοβολταϊκών. Η κατηγορία αυτή μπορεί να επιτρέψει την αποτελεσματικότερη χρήση της ηλιακής ενέργειας στο μέλλον, μειώνοντας παράλληλα το κόστος κατασκευής του εξοπλισμού. (Lameirinhas & al, 2022)

– Υβριδικό φωτοβολταϊκό (HIT)

– Τύποι Νανοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων



Εικόνα 7 Οι Γενιές των φωτοβολταϊκών πάνελ. (Lameirinhas & al, 2022)

1.2.3 Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών πάνελ με βάση την συνδεσμολογία τους

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι συσκευές που χρησιμοποιούν το φαινόμενο της ακτινοβολίας του ηλιακού φωτός για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κύριες κατηγορίες φωτοβολταϊκών και ηλιακών πάνελ που υπάρχουν στην αγορά είναι οι εξής:

- Διασυνδεδεμένα Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Grid Connected PV modules)

Τα συστήματα αυτά διοχετεύουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια απευθείας στο δίκτυο και δεν αποθηκεύουν ενέργεια για μελλοντική χρήση.

- Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά συστήματα (Autonomous Systems)

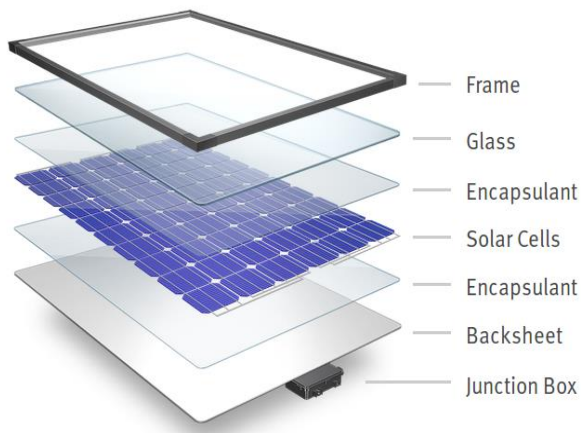
Η παραγόμενη ενέργεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες και μπορεί να καταναλωθεί επιτόπου. Επομένως, μπορεί να ηλεκτροδοτηθεί χωρίς να συνδεθεί με το δίκτυο.

- Φωτοβολταϊκά Πάνελ σε συστήματα ενσωματωμένα στην δομή κτιρίων (BIPV Building-integrated photovoltaics)

Αυτά τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία ως εφεδρική πηγή ενέργειας, με αποτέλεσμα να μειώνει την κατανάλωση ενέργειας από το δίκτυο.

1.2.4 Δομή Φωτοβολταϊκών πάνελ

Τα Φωτοβολταϊκά Panels αποτελούνται από:



Εικόνα 8 Τα διαφορετικά επίπεδα από όπου αποτελείται ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. (Hattaraki, Dixit, & Patil, 2021)

1. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία

Οι ηλιακοί συλλέκτες προκύπτουν από τη σύνδεση μεμονωμένων ηλιακών κυψελών με χάλκινες επαφές. Οι συνδέσεις πραγματοποιούνται μέσω επαφών. Ένας ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από 60 κυψέλες με μέγεθος 156 x 156 mm². Οι ηλιακές κυψέλες υλοποιούν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Αποτελεί το 3 % του συνολικού όγκου του φωτοβολταϊκού πάνελ.

2. Υλικό EVA για την ενθυλάκωση των ΦΒ στοιχείων

Για την προστασία από εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες (χιόνι, βροχή, χαλάζι), γίνονται τα εξής: Κάλυψη και των δύο πλευρών της ηλιακής κυψέλης με μεμβράνη πολυμερούς EVA και ταυτόχρονα λειτουργεί επίσης ως συγκολλητικό υλικό μεταξύ του γυαλιού και της κυψέλης. Αποτελεί το 7% της σύνθεσης του πάνελ.

3. Το ειδικό γυαλί στο εμπρόσθιο μέρος

Η χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο του γυαλιού επιτρέπει επαρκή διάχυση του φωτός, με αποτέλεσμα υψηλή διαπερατότητα και χαμηλή ανακλαστικότητα. Το γυαλί περιλαμβάνει το 74 % του φωτοβολταϊκού πάνελ.

4. Το οπίσθιο ειδικό φύλλο προστασίας (συνήθως TPT Tedlar)

Ένα πλαστικό πολυμερές tedlar (συνήθως πολυβινυλοφθορίδιο, PVF) και ένα αδιαπέραστο στρώμα φιλμ από πολυβινυλοφθορίδιο (PVF). Αυτό παρέχει πρόσθετη θερμική μόνωση. Επιτυγχάνεται στεγανοποίηση και αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία. Αποτελεί το 4 % της σύνθεσης του πάνελ.

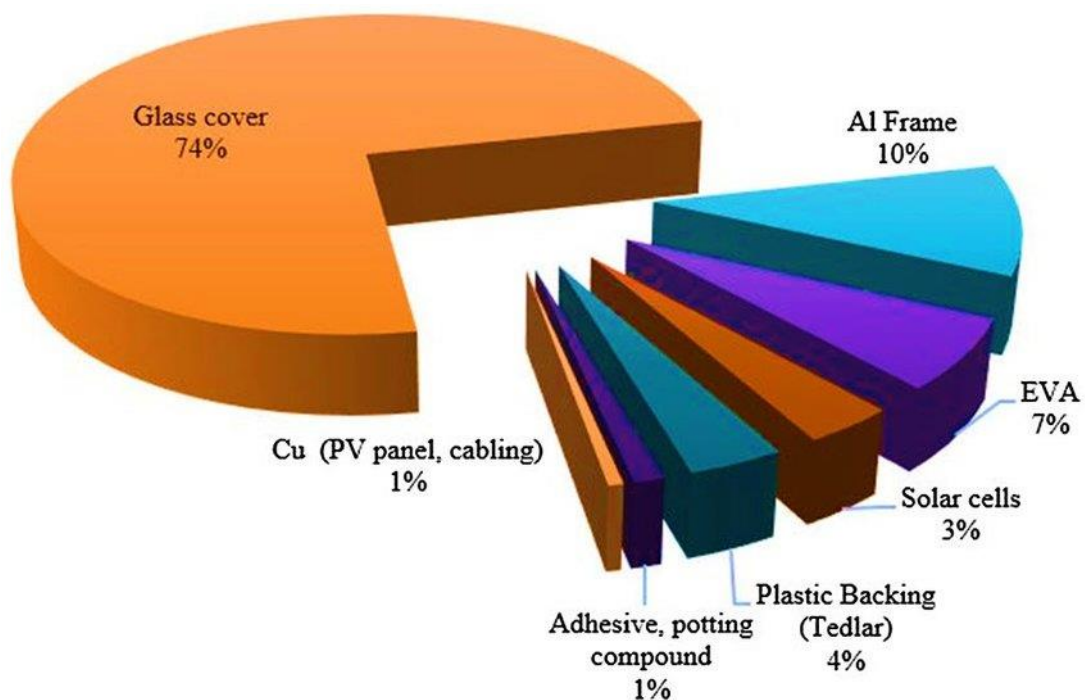
5. Το πλαίσιο αλουμινίου

Περίπου το 10 % του πάνελ καταλαμβάνεται από μια μεταλλική θήκη από ανοδιωμένο αλουμίνιο, η οποία συγκρατεί με ασφάλεια το πλαίσιο στη θέση του. Αυτή η στιβαρή δομή εγγυάται τόσο ακαμψία όσο και εξαιρετική αντοχή στην περιστροφή.

6. Το κουτί σύνδεσης

Στο πίσω μέρος τοποθετείται το κιβώτιο σύνδεσης, στο οποίο περιέχονται τα τερματικά, οι συνδέσεις τους και οι δίοδοι προστασίας. Αποτελεί το 1-2 % της σύνθεσης του πάνελ.

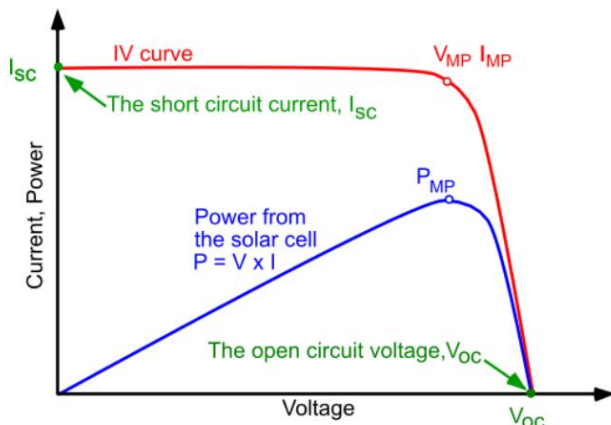
(MaySunSolar, 2023) (Athanailidis V. Ilias, 2018)



Εικόνα 9 Ποσοστό συμμετοχής των μερών του φωτοβολταϊκού πάνελ % (Athanailidis V. Ilias, 2018)

1.2.5 Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκών πάνελ

1.2.5.1 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά



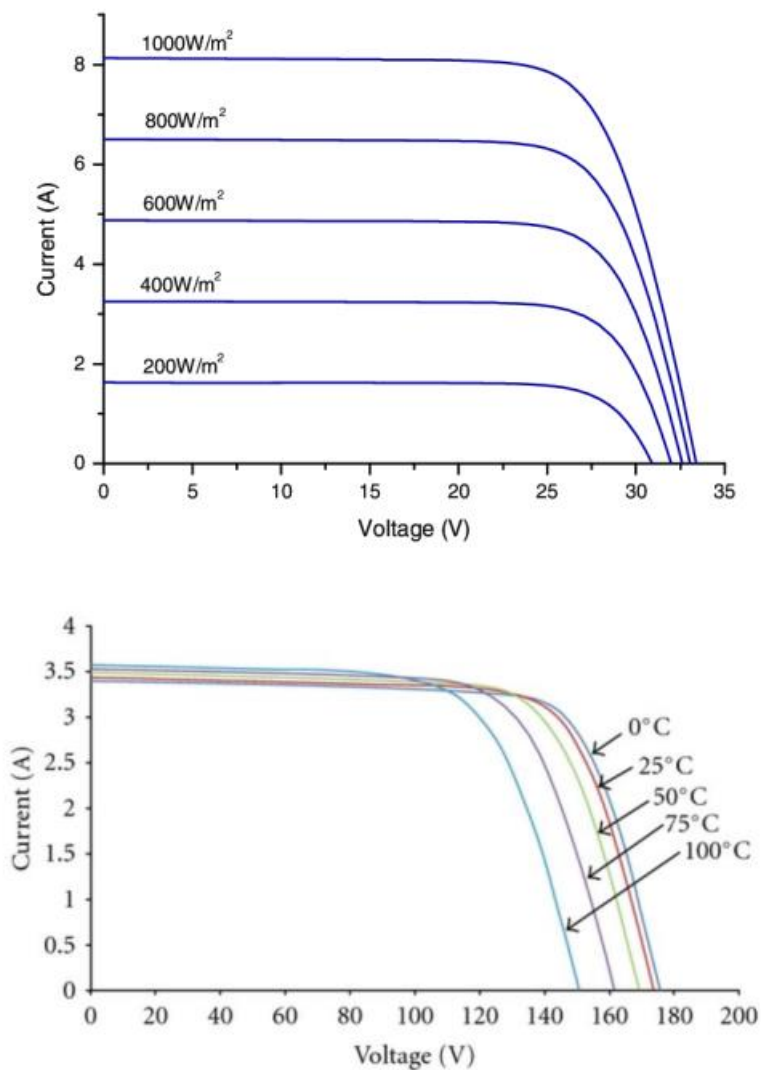
Εικόνα 10 Τρέχουσα τάση (IV) του ηλιακού κυτάρρου. (Yoon, 2019)

Όταν ένα φορτίο (αντίσταση) συνδέεται και στα δύο άκρα ενός Φ/Β, δημιουργείται ηλεκτρικό κύκλωμα από το δυναμικό, δηλαδή την τρέχουσα τάση. Επομένως, κάθε ΦΒ στοιχείο έχει μια χαρακτηριστική τάση – ένταση. **ISc** είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης του ΦΒ στοιχείου και **VOC** είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να παρέχει το ΦΒ στοιχείο και εμφανίζεται όταν η τάση είναι μηδέν ($V=0$), δηλαδή όταν το στοιχείο είναι βραχυκυκλωμένο. Η τάση ανοικτού κυκλώματος λαμβάνεται όταν το ρεύμα είναι μηδέν ($I=0$) και εμφανίζεται όταν δεν είναι συνδεδεμένο φορτίο. Η τιμή της αντίστασης φορτίου (RL) καθορίζει σε ποιο σημείο αυτού του χαρακτηριστικού διαγράμματος λειτουργεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Προφανώς, η παραγόμενη ισχύς υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την τάση σε κάθε σημείο, γεγονός που δίνει τη χαρακτηριστική ισχύος-τάσης (P-V) του ΦΒ στοιχείου. Η τάση και η τάση σε αυτό το σημείο συμβολίζονται με **IMP** και **VMP** αντίστοιχα. Ωστόσο, στις εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών στοιχείων χρησιμοποιείται ένας ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) για τη μεταβολή της αντίστασης φορτίου RL, έτσι ώστε το φωτοβολταϊκό στοιχείο να λειτουργεί συνεχώς στο σημείο μέγιστης ισχύος. Εκτός από τον ιχνηλάτη, το σύστημα περιλαμβάνει έναν αντιστροφέα και ασφάλειες. (Εγγλέζος, 2020)

1.2.5.2 Επίδραση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου

Καθώς αλλάζει η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η χαρακτηριστική πυκνότητα τάσης της φωτοβολταϊκής διάταξης αλλάζει, επειδή οι τιμές ISC και VOC παίρνουν διαφορετικές τιμές. Συγκεκριμένα, καθώς αυξάνεται η ηλιακή ακτινοβολία, η πυκνότητα βραχυκυκλώματος αυξάνεται γραμμικά και η τάση ανοιχτού κυκλώματος αυξάνεται λογαριθμικά (με μικρότερη αύξηση). Η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου επηρεάζεται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, την ηλιακή ακτινοβολία, την ταχύτητα του ανέμου και τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου (π.χ. υλικό). Επομένως, η αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ανεπιθύμητη σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, καθώς θα οδηγήσει τελικά σε μείωση της παραγόμενης ισχύος. Υπάρχουν διάφορες δυνατότητες μείωσης της αύξησης της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για παράδειγμα, η χρήση αγωγών πίσω από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορεί να μειώσει τη χρήση νερού και την αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων ταυτόχρονα. (Εγγλέζος, 2020)

Μείωση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Τέτοια συστήματα είναι λιγότερο διαδεδομένα λόγω του αυξημένου κόστους που οδηγεί σε μικρή μόνο αύξηση της παραγωγής ενέργειας. (Εγγλέζος, 2020)



Εικόνα 11 Επίδραση της μεταβολής της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. (Ma, Yang, Lu, & Peng, 2015)

1.2.5.3 Τεχνικά στοιχεία των ΦΒ

Οι κατασκευαστές φωτοβολταϊκών πλαισίων υποχρεούνται να προσδιορίζουν τις διαστάσεις, τον αριθμό των φωτοβολταϊκών στοιχείων, το βάρος και ορισμένες ηλεκτρικές ιδιότητες του πλαισίου σύμφωνα με τον κανονισμό. (Εγγλέζος, 2020)

Υποχρεούνται να προσδιορίζουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες. Αυτές είναι οι εξής:

- Ονομαστική ισχύ αιχμής PMP δηλαδή ισχύς στο σημείο μέγιστης απόδοσης μαζί με την τάση VMP και ένταση IMP στο σημείο αυτό.

- Τάση ανοικτού κυκλώματος VOC
- Τάση βραχυκυκλώματος ISC
- Απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου
- Συντελεστής θερμοκρασία ανοικτού βραχυκυκλώματος και συντελεστής ισχύος, δηλαδή α , β και γ αντίστοιχα
- Κανονική θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου (Normal Operating Cell Temperature). (Εγγλέζος, 2020)

Τα ανωτέρω δεδομένα βασίζονται σε SRC (κανονικές ονομαστικές συνθήκες) με ηλιακή ακτινοβολία 1000 W/m² και θερμοκρασία κυψέλης 20°C. (Εγγλέζος, 2020)

Ωστόσο, η NOCT βασίζεται σε 800 W/m² ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία κυψέλης 25°C. Η τυπική θερμοκρασία λειτουργίας είναι 42-46°C. Για τον προσδιορισμό αυτών των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών, τα φωτοβολταϊκά υποβάλλονται σε διάφορες δοκιμές στο εργοστάσιο πριν διατεθούν στην αγορά. (Εγγλέζος, 2020)

Πραγματοποιούνται δοκιμές. Σε αυτές τις δοκιμές, τα φωτοβολταϊκά υποβάλλονται σε ορισμένες μηχανικές, θερμικές δοκιμές και δοκιμές καταπόνησης, ώστε να επιτευχθεί διάρκεια ζωής περίπου 20 ετών. (Εγγλέζος, 2020)

1.3 Φωτοβολταϊκά Απόβλητα

Η ανακύκλωση των ηλιακών συλλεκτών περιπλέκεται περαιτέρω από τα μεγάλα χρονικά διαστήματα μεταξύ της εγκατάστασης και της αποσυναρμολόγησης των συλλεκτών χαμηλής τάσης. Επιπλέον, τα πολύτιμα υλικά είναι συγκεντρωμένα και γεωγραφικά διασκορπισμένα. Η διαδικασία επεξεργασίας των ηλιακών συλλεκτών είναι παρόμοια με τη διαδικασία ανακύκλωσης οθονών LCD, οθονών, καθρεφτών, παρμπρίζ, πλαστικοποιημένου γυαλιού και λαμπτήρων αερίου.

1.3.1 Επιπτώσεις στο τέλος κύκλου ζωής των ΦΒ

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής και απορρίπτονται στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους. Ταυτόχρονα, πολλά από αυτά απορρίπτονται πρόωρα για διάφορους

λόγους. Υπάρχουν σημαντικές ανησυχίες σχετικά με τις οικονομικές πτυχές της εν λόγω διάθεσης και αποτέφρωσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο έδαφος λόγω των συστατικών και των υλικών τους. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ περιέχουν μικρές ποσότητες καδμίου και μολύβδου, ουσίες επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Αν και από τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να απελευθερωθούν και άλλες ουσίες, το κάδμιο και ο μολύβδος αντιπροσωπεύουν τους μεγαλύτερους κινδύνους για το περιβάλλον και την υγεία.

Τα πρώτα φωτοβολταϊκά πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου περιείχαν μολύβδο (Pb) σε ποσότητες που ανιχνεύθηκαν στην πηγή τους. Οι συγκεντρώσεις μολύβδου σε αυτά τα κράματα είναι περίπου 40 %. Επομένως, τα πάνελ αυτά μπορεί να περιέχουν έως και 300 g/KWp μολύβδου. Μόνο τα τελευταία χρόνια ορισμένες εταιρείες υιοθέτησαν τη συγκόλληση χωρίς μολύβδο για τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Τα πάνελ λεπτών υμενίων τελλουριδίου του καδμίου (CdTe) περιέχουν 170 g/KWp και 900 mg/kg (Schulte, 2017) καδμίου ως μη τοξικές ενώσεις υπό κανονικές συνθήκες. Σε περίπτωση πυρκαγιάς, τα τοξικά αέρια μπορούν να απελευθερωθούν στον αέρα- τα στοιχεία CdTe είναι ενθυλακωμένα σε EVA, αλλά αποτελούν επικίνδυνα απόβλητα για διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής, καθώς δοκιμές σε κατεστραμμένα πάνελ δείχνουν ότι τα επίπεδα καδμίου που διαρρέονται από τη βροχή και εισέρχονται στα υπόγεια ύδατα υπερβαίνουν τα αποδεκτά όρια για το πόσιμο νερό (Yin & al, 2015).

Οι κύριες ανησυχίες σχετικά με τον παροπλισμό και τα κατεστραμμένα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι:

- 1) Η έκπλυση μολύβδου στο έδαφος
- 2) Έκπλυση καδμίου στο έδαφος
- 3) Σημαντική απώλεια πολύτιμων πόρων, όπως το γυαλί και το αλουμίνιο, με την πάροδο του χρόνου, εάν τα φωτοβολταϊκά πάνελ δεν επαναχρησιμοποιηθούν ή ανακυκλωθούν.
- 4) Σπάνια μέταλλα όπως το ίνδιο και το γάλλιο χρησιμοποιούνται επίσης στα φωτοβολταϊκά πάνελ και μπορεί να εξαντληθούν μόνιμα στη φύση, εάν δεν ανακτηθούν στο τέλος της ζωής τους.

1.3.1.1 Μόλυνση του αέρα και του εδάφους

Τα πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου εμπεριέχουν κατά μέσο όρο 576 mg/kg μολύβδου, όπου συνδέονται με την έκπλυση μολύβδου στο έδαφος. Εφόσον δεν μεταβάλλεται το pH του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκονται τα πλαίσια, η έκπλυση είναι αμελητέα, αλλά η έκθεση σε χαμηλό pH (π.χ. όξινη βροχή) ή ακόμη και η βλάβη μπορεί να προκαλέσει έκπλυση 13% (pH 6-7) έως 90% (pH 3-4) της περιεκτικότητας του πλαισίου σε μολύβδο [20]. (Zapf-Gottwick, Koch, Fischer, & Schwerdt, 2015)

Η έκπλυση καδμίου στο έδαφος σχετίζεται κυρίως με τα πάνελ λεπτών υμενίων CdTe και η μέση περιεκτικότητα σε Cd στα πάνελ είναι 383 mg/kg. Η έκπλυση σε πλαίσια CdTe ανέρχεται κατά μέσο όρο στο 7% της περιεκτικότητας σε Cd στο πλαίσιο, ακόμη και όταν δεν υπάρχει καμία αλλαγή στο pH του μέσου του πλαισίου. Η έκπλυση αυξάνεται καθώς μειώνεται το pH. Η έκπλυση αυξάνεται από 29% (pH 6-7) σε 40% (pH 3-4) με τη μείωση του pH [20]. (Zapf-Gottwick, Koch, Fischer, & Schwerdt, 2015)

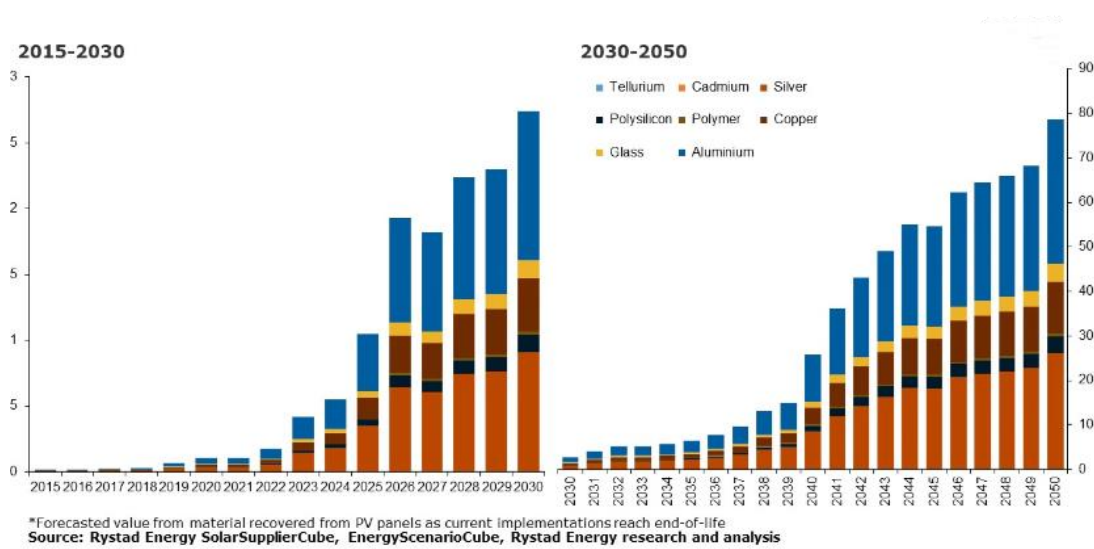
Ο μολύβδος είναι ένα βαρύ μέταλλο που συνδέεται τόσο με την επιβάρυνση του περιβάλλοντος αλλά και της ανθρώπινης υγείας. Στον άνθρωπο μπορεί να προκαλέσει καρδιαγγειακά προβλήματα, οστεοπόρωση, θέματα στο νευρικό σύστημα. (Goedkoop & Spriensma, 2001)

Το κάδμιο είναι γνωστό καρκινογόνο και αναγνωρίζεται ως "εξαιρετικά τοξικό" από την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (EPA) και την Ευρωπαϊκή Ένωση Ασφάλειας και Υγείας στην Εργασία (OSHA) και τους ευρωπαϊκούς οργανισμούς. Οι επιπτώσεις στην υγεία περιλαμβάνουν βλάβες στα νεφρά, το συκώτι, τα οστά και το αίμα από την κατάποση, και καρκίνο των πνευμόνων. (Μαματάς, 2016)

1.3.1.2 Απώλεια πόρων και η αξίας τους

Το αλουμίνιο και το γυαλί αποτελούν την πλειονότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Εάν δεν επαναχρησιμοποιηθούν ή ανακυκλωθούν, η απώλεια αυτών των δυνητικά ανανεώσιμων υλικών και η αναμενόμενη εξάντληση των φυσικών πόρων θα έχει σημαντικό αντίκτυπο όχι μόνο στην αγορά φωτοβολταϊκών αλλά και σε άλλες αγορές.

Επιπλέον, η αδυναμία ανάκτησης σπάνιων υλικών όπως ο άργυρος, το ίνδιο, το γάλλιο και το γερμάνιο σε ορισμένους ηλιακούς συλλέκτες έχει οικονομικές και περιβαλλοντικές συνέπειες. Τα υλικά αυτά αντιπροσωπεύουν μόνο το 1% της μάζας του πάνελ, αλλά η σπανιότητά τους τα καθιστά ιδιαίτερα πολύτιμα και οι τιμές τους αυξομειώνονται καθώς τα φυσικά τους αποθέματα εξαντλούνται όλο και περισσότερο, συνεπώς, οι τιμές αυξομειώνονται.



Εικόνα 12 Εκτιμώμενη αξία (bil. USD) των ανακυκλώσιμων υλικών ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. (RystadEnergy, 2022)

Η ζήτηση για την ανακύκλωση εξαρτημάτων φωτοβολταϊκών πλαισίων θα αυξηθεί τα επόμενα χρόνια, καθώς ο αριθμός των εγκαταστάσεων αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς και αναδύεται η απειλή της συμφόρησης του εφοδιασμού. Σύμφωνα με ανάλυση της Listad Energy, η αξία των ανακυκλωμένων εξαρτημάτων φωτοβολταϊκών πλαισίων στο τέλος του κύκλου ζωής τους θα αυξηθεί από 170 εκατομμύρια δολάρια φέτος σε πάνω από 2,7 δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2030. Η τάση αυτή αναμένεται να επιταχυνθεί τις επόμενες δεκαετίες, με την αξία των ανακυκλώσιμων υλικών να προσεγγίζει τα 80 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ έως το 2050.

Αν και η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών βρίσκεται ακόμη σε νηπιακό στάδιο, θεωρείται αναπόσπαστο μέρος της ενεργειακής μετάβασης και τα απόβλητα φωτοβολταϊκών εκτιμάται ότι θα αυξηθούν σε 27 εκατομμύρια τόνους ετησίως έως το 2040. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις μας, τα υλικά που ανακτώνται από απόβλητα πάνελ, τα οποία σήμερα αντιπροσωπεύουν μόνο το 0,08%, θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν το 6% των επενδύσεων σε φωτοβολταϊκά έως το 2040. Οι τρέχουσες τιμές μεταπώλησης των ανακυκλωμένων φωτοβολταϊκών υλικών δεν

αντισταθμίζουν το κόστος μεταφοράς, διαλογής και επεξεργασίας, καθιστώντας τη διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής εύκολη και φθηνή επιλογή. Ωστόσο, αυτό μπορεί να αλλάξει, καθώς αναπτύσσονται με ταχείς ρυθμούς μεγάλες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας στον τομέα των φωτοβολταϊκών. Αναμένονται συμφορήσεις στην πλευρά της προσφοράς υλικών καθώς αυξάνεται η ζήτηση για ορυκτά και η ανακύκλωση μπορεί να διευκολύνει την προσφορά καθώς τα πάνελ φτάνουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

Η ενεργειακή μετάβαση είναι πιθανό να αυξήσει τη ζήτηση για υλικά και ορυκτά που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά και να οδηγήσει σε υψηλότερες τιμές. Το σενάριο του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (ΔΟΕ) για καθαρές μηδενικές εκπομπές στοχεύει στο 40% της παγκόσμιας ενέργειας να προέρχεται από την ηλιακή ενέργεια το 2050, που αντιστοιχεί σε 19 τεραβάτ (TW). Ωστόσο, στο σενάριο των 1,6 βαθμών Κελσίου (°C), το 53% προβλέπεται να προέρχεται από φωτοβολταϊκά, και η τάση αυτή αντικατοπτρίζεται στον αριθμό και την κλίμακα των εγκαταστάσεων.

Υποθέτοντας 15ετή διάρκεια ζωής για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και αναλύοντας τις εγκαταστάσεις το 2022, μπορεί κανείς να προβλέψει τις περιοχές και τις χώρες που θα επωφεληθούν περισσότερο από την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών το 2037. Η Κίνα αντιπροσωπεύει περίπου το 40% των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων για το έτος 2022, ενώ τα πάνελ θα ωριμάσουν σε 15 – 20 χρόνια, η αξία της ανακύκλωσης εκτιμάται ότι θα είναι 3,8 δισεκατομμύρια δολάρια από ένα παγκόσμιο σύνολο 9,6 δισεκατομμυρίων δολαρίων. Η Ινδία, ένας άλλος ασιατικός γίγαντας της ηλιακής ενέργειας, κατατάσσεται στη δεύτερη θέση με 800 εκατ. δολάρια, ακολουθούμενη από την Ιαπωνία με 200 εκατ. δολάρια. Μετά την Ασία, η συνολική αξία των ανακυκλώσιμων υλικών στη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη αναμένεται να φθάσει τα 1,5 δισ. δολάρια ΗΠΑ και 1,4 δισ. δολάρια ΗΠΑ αντίστοιχα μέχρι το 2037.

Συμβατικός πόρος	Εκτίμηση μελλοντικής ζήτησης	Μεταβλητότητα τιμής	Ποσοστό ανακύκλωσης σήμερα	Συντελεστής αύξησης τιμής ανά 10ετία από 2011-2050
Αλουμίνιο	Ισχυρή ανοδική τάση	Μεσαία	41% με 95%	15%
Γυαλί	Ελαφρά ανοδική τάση	Χαμηλή	64 %	10%

Εικόνα 13 Πίνακας εκτίμησης των συμβατικών πόρων ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. (Intelligence, 2011) (Martin & Henrichs, 2010)

Σπάνια μέταλλα	Σημερινά φυσικά αποθέματα	Πιθανότητα για συνέχιση της παραγωγής με το σημερινό ρυθμό	Εκτίμηση μελλοντικής ζήτησης	Μεταβλητότητα τιμής	Ποσοστό ανακύκλωσης σήμερα	Συντελεστής αύξησης τιμής ανά 10ετία από 2011-2050
Ασήμι (Ag)	Πολύ Περιορισμένα	13 χρόνια (από το 2008)	Ισχυρή ανοδική τάση	Υψηλή	30% με 50%	20%
Ίνδιο (In)	Αρκετά περιορισμένα	19,3 χρόνια (από το 2007)	Ελαφρά ανοδική τάση	Μεσαία	Περιορισμένο αλλά σε άνοδο	15%
Γάλλιο (Ga)	Σχεδόν απεριόριστα	9000 χρόνια	Ισχυρή ανοδική τάση	Μεσαία	20%	10%
Γερμάνιο (Ge)	Ελαφρώς περιορισμένα	Δεν γνωρίζουμε ακριβώς	Ελαφρά ανοδική τάση	Χαμηλή	30%	5%

Εικόνα 14 Πίνακας εκτίμησης των σπάνιων μετάλλων ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. (Intelligence, 2011)

1.3.2 Αναμενόμενα Απόβλητα

Τα απόβλητα φωτοβολταϊκών διαφέρουν από άλλους τύπους βιομηχανικών απορριμμάτων επειδή χρειάζονται πολύ χρόνο για να αποσυρθούν. Είναι δύσκολο να γνωρίζουμε ακριβώς πόσα απόβλητα παράγονται λόγω διαφόρων παραγόντων. Μέχρι στιγμής, η τεχνολογία φωτοβολταϊκών έχει δημιουργήσει πολύ λίγα απόβλητα λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής των ηλιακών συλλεκτών. Αλλά μετά το 2025, θα υπάρξει τεράστια αύξηση στα αποσυρθέντα φωτοβολταϊκά και θα δημιουργηθούν πολύ περισσότερα απόβλητα. Αυτήν τη στιγμή, το

μεγαλύτερο μέρος των αποσυρθέντων φωτοβολταϊκών είναι κρυσταλλικό πυρίτιο, με ένα μικρότερο ποσοστό να είναι πάνελ λεπτής μεμβράνης. Στο μέλλον, οι νέες τεχνολογίες θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν διαφορετικά υλικά υποστρώματος ή οργανικά κύτταρα. Μέχρι το 2030 περίπου, τα ποσοστά των διαφορετικών τεχνολογιών μπορεί να είναι παρόμοια.

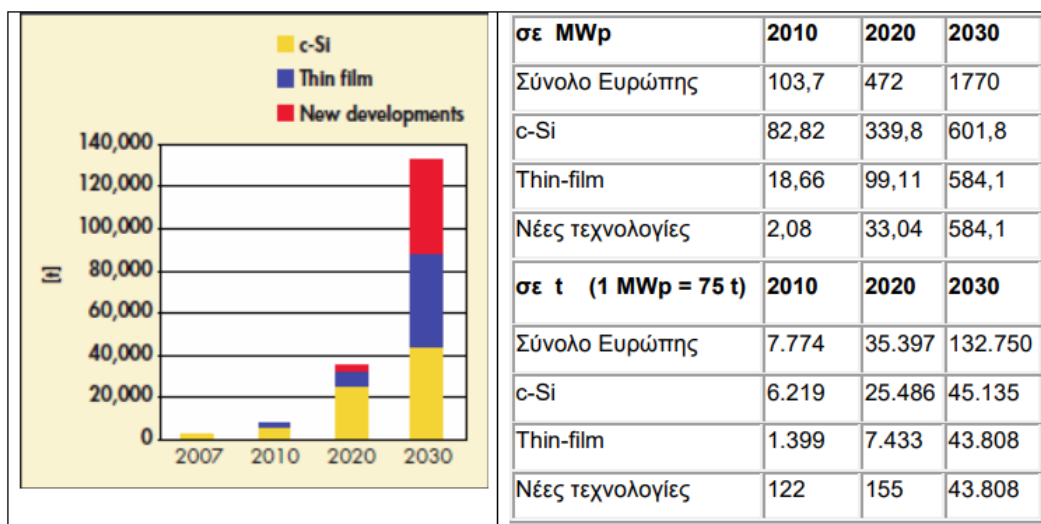
Το 2016, υπήρχαν συνολικά 41,8 εκατομμύρια τόνοι ηλεκτρονικών απορριμμάτων στον κόσμο. Μόνο το 0,6% αυτού προήλθε από φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία χρησιμοποιούνται σε ηλιακούς συλλέκτες. Ωστόσο, η ποσότητα των απορριμμάτων από ηλιακούς συλλέκτες αναμένεται να αυξηθεί στο μέλλον. Οι ειδικοί έχουν κάνει προβλέψεις σχετικά με το πόσα απόβλητα θα δημιουργηθούν από τα ηλιακά πάνελ μέχρι το έτος 2050. Εξετάζουν διαφορετικά σενάρια, όπως όταν ένα ηλιακό πάνελ πρέπει να αντικατασταθεί λόγω βλάβης. Άλλα ζητήματα, όπως η μείωση της ισχύος εξόδου ή ο αποχρωματισμός, δεν λαμβάνονται υπόψη. (Μαματάς, 2016)

Σε μια κανονική κατάσταση, δεν σκεφτόμαστε τις απώλειες που συμβαίνουν στην αρχή της χρήσης ηλιακών συλλεκτών. Αλλά αν λάβουμε υπόψη αυτές τις απώλειες, βλέπουμε ότι δημιουργούνται πολύ περισσότερα απόβλητα. Μέχρι το έτος 2030, θα μπορούσαν να υπάρχουν 1,7 εκατομμύρια τόνοι απορριμμάτων από ηλιακούς συλλέκτες και μέχρι το 2050, θα μπορούσαν να φτάσουν τους 60 εκατομμύρια τόνους. Εάν συνυπολογίσουμε τις πρώιμες απώλειες, παράγονται ακόμη περισσότερα απόβλητα. Το 2030, θα μπορούσαν να υπάρχουν 8 εκατομμύρια τόνοι απορριμμάτων και έως το 2050, θα μπορούσαν να φτάσουν τους 78 εκατομμύρια τόνους. Αυτό συμβαίνει επειδή περισσότερα ηλιακά πάνελ ενδέχεται να μην λειτουργούν σωστά στο σενάριο πρώιμης απώλειας. Έτσι, στο μέλλον, η ποσότητα των απορριμμάτων από τα ηλιακά πάνελ θα μπορούσε να είναι κάπου ανάμεσα σε αυτά τα δύο σενάρια. (Μαματάς, 2016)

1.3.2.1 Σενάριο Φ/Β αποβλήτων μέχρι το 2030.

Στο μέλλον, θα υπάρχουν πολλά απόβλητα από ηλιακούς συλλέκτες. Οι χώρες που θα παράγουν τα περισσότερα απόβλητα είναι η Ασία, η Ευρώπη και η Βόρεια Αμερική. Στην Ασία, η Κίνα θα παράγει τα περισσότερα απόβλητα, ακολουθούμενη από την Ιαπωνία και την Ινδία. Στην Ευρώπη, η Γερμανία θα παράγει τα περισσότερα απόβλητα και άλλες χώρες όπως η Ιταλία και η Γαλλία θα συνεισφέρουν επίσης. Στη Βόρεια Αμερική, οι Ηνωμένες Πολιτείες θα

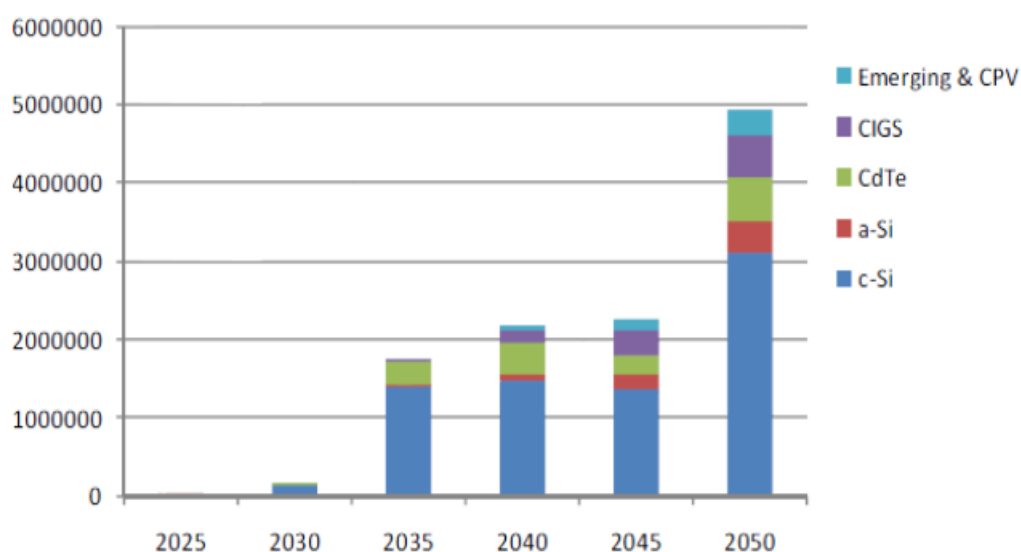
παράγουν τα περισσότερα απόβλητα και ο Καναδάς και το Μεξικό θα συνεισφέρουν επίσης. Η Αφρική και η Λατινική Αμερική θα παράγουν επίσης περισσότερα απόβλητα. Η Νότια Αφρική και η Βραζιλία θα είναι οι κύριοι συνεισφέροντας σε αυτές τις περιοχές. Άλλες χώρες όπως η Νότια Κορέα και η Αυστραλία θα παράγουν επίσης σημαντική ποσότητα απορριμμάτων. (Sharma, Pandey, & Kolhe, 2019)



Εικόνα 15 Εκτίμηση σε MW για κάθε γενιά φωτοβολταϊκού. (Larsen, 2009) (Chowdhury, και συν., 2020)

1.3.2.2 Σενάριο Φ/Β αποβλήτων 2030 - 2050.

Η Κίνα αναμένεται να ηγηθεί του πακέτου με 13,5-20 εκατομμύρια τόνους απορριμμάτων έως το 2050, ακολουθούμενη από Ιαπωνία και μετά Ινδία και Γερμανία. Αυτό παρουσιάζει μια τεράστια ευκαιρία για νέες βιομηχανίες ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών να αναδυθούν παγκοσμίως. Ορισμένες εταιρείες, όπως η Veolia στη Γαλλία και η Geltz Umwelt-Technologies στη Γερμανία, πρωτοστατούν ήδη με προηγμένες τεχνολογίες ανακύκλωσης. (Κωβαίος, 2011). Με την προβλεπόμενη αύξηση των απορριμμάτων φωτοβολταϊκών, είναι σαφές ότι θα χρειαστεί να δημιουργηθούν περισσότερες βιομηχανίες ανακύκλωσης για να χειριστούν την αυξανόμενη ποσότητα απορριμμάτων. (Sharma, Pandey, & Kolhe, 2019)



Εικόνα 16 Εκτίμηση των φωτοβολταϊκών απορριμάτων ανά κατηγορία φωτοβολταϊκού έως το 2050. (Sander, 2007)

1.3.3 Συμπεράσματα σχετικά με τα Φ/Β απόβλητα

Συμπερασματικά, τα Φ/Β πάνελ είναι μία τεχνολογία όπου ο όγκος της αυξάνεται, λόγω ζήτησης εναλλακτικών μορφών ενέργειας. Πράγματι τα Φ/Β πάνελ παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, καταναλώνοντας λιγότερους πόρους. Όμως, η μελλοντική ανάκτηση των πολύτιμων μετάλλων όπως ο χρυσός, αργυρός, πλατίνα σε συγκέντρωση < 1 % αλλά και σπάνιων γαιών όπως ίνδιο, γάλλιο και γερμάνιο καθίσταται αναγκαία για υψηλό οικονομικό και περιβαλλοντικό κέρδος. Το ίδιο ισχύει και για το πυρίτιο, καθώς η ποσότητα του διαθέσιμου πυριτίου για ηλιακή χρήση στη φύση μειώνεται, γίνεται πιο ακριβή η απόρριψη των παλαιών ηλιακών συλλεκτών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πλειονότητα των φωτοβολταϊκών κυψελών που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος είναι κατασκευασμένα από πυρίτιο, ειδικά από κρυσταλλικές πλάκες πυριτίου. Στην πραγματικότητα, περίπου το 90% των απορριπτόμενων κυττάρων είναι κατασκευασμένα από αυτό το υλικό. Ωστόσο, οι ερευνητές έχουν αναπτύξει μεθόδους ανακύκλωσης για την ανανέωση παλαιών γκοφρετών πυριτίου σε νέα κύτταρα με παρόμοια απόδοση, γεγονός που καθιστά την ανάκτησή τους οικονομικά ελκυστική.

Στα παρακάτω κεφάλαια θα αναλυθεί ένας τρόπος επαναχρησιμοποίησης του κρυσταλλικού πυριτίου του Φωτοβολταϊκού πάνελ στο τέλος κύκλου ζωής του, μέσω μίας διαδικασίας

παραγωγής γεωπολυμερών υλικών, όπου θα αναφερθεί στο κεφάλαιο τέσσερα 4 της παρούσας μελέτης.

1.4 Γεωπολυμερή υλικά

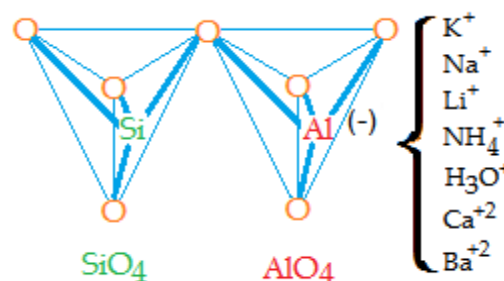
Τα τελευταία δέκα χρόνια, ο γεωπολυμερισμός έχει κερδίσει την προσοχή ως τεχνολογία που θα μπορούσε να βοηθήσει στη σταθεροποίηση και την εξουδετέρωση των επιβλαβών ουσιών που βρίσκονται στα ορυχεία και τα μεταλλουργικά απόβλητα. Ο γεωπολυμερισμός περιλαμβάνει τη δημιουργία υλικών με συγκεκριμένες ιδιότητες, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν περιορισμένες διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με την κινητική της αντίδρασης, τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των τελικών προϊόντων και τη δυνατότητα χρήσης διαφορετικών τύπων αποβλήτων.

1.4.1 Ορισμός και γενικές πληροφορίες

Ο όρος "γεωπολυμερές" επινοήθηκε από τον Joseph Davidovits το 1978, περιγράφοντας τη διαδικασία κατασκευής τεχνητών πετρωμάτων σε χαμηλές θερμοκρασίες για την επίτευξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών όπως η ανθεκτικότητα και η μακροζωία. Τα γεωπολυμερή είναι ουσιαστικά ανόργανα πολυμερή που σχηματίζονται μέσω γεωχημείας ή γεωσύνθεσης, με άμορφη δομή που αποτελείται από πυρίτιο, οξυγόνο και αλουμίνιο. Κατιόντα όπως κάλιο, νάτριο, ασβέστιο και άλλα προστίθενται για να διατηρηθεί η ηλεκτρική ουδετερότητα μέσα στο υλικό. Τα γεωπολυμερή είναι παρόμοια σε σύσταση με τους συνθετικούς ζεόλιθους αλλά δεν διαθέτουν κρυσταλλική δομή λόγω της ταχείας διαδικασίας σχηματισμού τους. Αντίθετα, έχουν μια μικροκρυσταλλική, άμορφη ή ημικρυσταλλική δομή ανάλογα με τις συγκεκριμένες συνθήκες αντίδρασης. (Κατσαρού, 2006)

1.4.2 Δομή Γεωπολυμερών υλικών

Σύμφωνα με τον Davidovits, όταν ορισμένα υλικά εκτίθενται σε χαμηλή πίεση και θερμοκρασία, μεταβάλλονται σε ένα ειδικό είδος δομής που αποτελείται από άτομα πυριτίου, οξυγόνου και αλουμινίου. Αυτά τα άτομα είναι διατεταγμένα σε ένα σχέδιο που μοιάζει με πλέγμα. Αυτό το πλέγμα αποτελείται από μικρά σχήματα που ονομάζονται τετράεδρα. Τα άτομα πυριτίου και αλουμινίου μοιράζονται άτομα οξυγόνου και συνδέονται μεταξύ τους με συγκεκριμένο τρόπο. Για να βεβαιωθείτε ότι η δομή είναι ισορροπημένη, θετικά ιόντα όπως το νάτριο, το κάλιο και το ασβέστιο αποτελούν επίσης μέρος του πλέγματος. (Davidovits J. , Geopolymer Chemistry and Properties, 1988)



Εικόνα 17 Απεικόνιση πλέγματος Si-O-Al. (Davidovits J. , Geopolymers of the first generation: siliface-process, geopolymer, 1988)

Τα πολυσιαλικά είναι ειδικές ενώσεις από πυρίτιο και αλουμίνιο. Έχουν τρισδιάστατο σχήμα και αποτελούνται από μικρά κομμάτια που ονομάζονται ιόντα πυριτίου και αλουμινίου. Αυτά τα ιόντα είναι διατεταγμένα με έναν ειδικό τρόπο που ονομάζεται τετραεδρικό σύμπλεγμα. Τα πολυσιαλικά μπορεί να έχουν διαφορετικά σχήματα όπως αλυσίδες ή δαχτυλίδια. Τα ιόντα πυριτίου και αλουμινίου συνδέονται με άτομα οξυγόνου. Η δομή των πολυσιαλικών μπορεί να είναι είτε λεία είτε κάπως ανώμαλη. Το υλικό είναι ισορροπημένο λόγω ορισμένων ειδικών θετικά φορτισμένων ενώσεων στο εσωτερικό του.

Ο εμπειρικός τύπος των polysialates ορίζεται ως : (Davidovits J. , Geopolymer Chemistry and Properties, 1988)



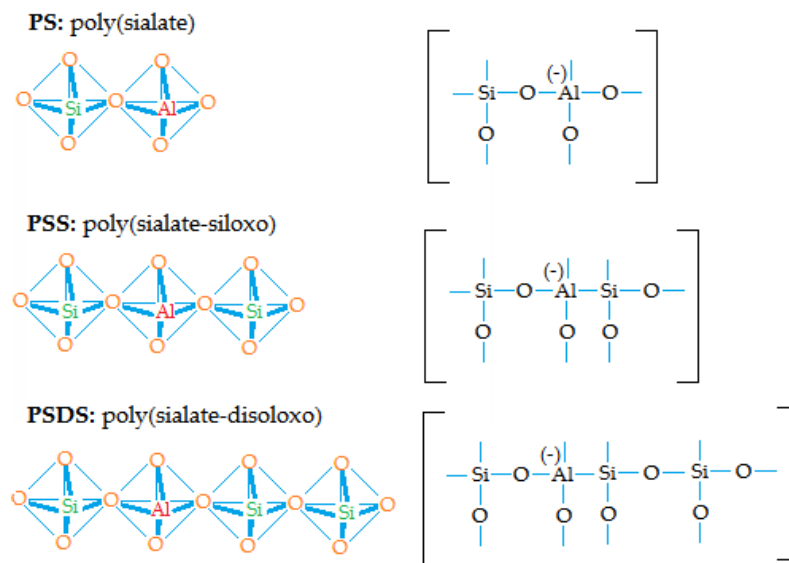
όπου:

M: ένα μονοσθενές κατιόν, όπως Na⁺ ή K⁺

z: ο λόγος Si/Al στη βασική μονάδα του polysialate και λαμβάνει τις τιμές 1, 2 ή 3, και

n: ο βαθμός πολυσυμπύκνωσης του polysialate

Πολυσιαλίτες μπορεί να έχουν διαφορετικές ποσότητες πυριτίου και αλουμινίου, γεγονός που καθορίζει την ταξινόμησή τους. Τα πολυσιαλικά μπορεί επίσης να έχουν διαφορετικούς βαθμούς σύνδεσης μεταξύ τους, η οποία ονομάζεται πολυσυμπύκνωση. Η ταξινόμηση των πολυσιαλικών με βάση την αναλογία πυριτίου προς αλουμίνιο φαίνεται σε μια εικόνα.



Εικόνα 18 Κατηγορίες polysialates. (Davidovits J., Geopolymer Chemistry and Properties, 1988)

Εξαρτάται από τη μέθοδο σύνθεσης και τη σύνθεση της πρώτης ύλης εάν είναι δυνατή η αντικατάσταση του Al στη θεμελιώδη δομή των πολυσιαλικών. Ωστόσο, οι βέλτιστες δομές για PS, PSS και PSDS κυμαίνονται από άμορφο έως ημι-κρυσταλλικό, δηλαδή κρυσταλλοποιούνται ελάχιστα. Ωστόσο, κατά τη σύνθεση των γεωπολυμερών, οι συνθήκες στερεοποίησης καθορίζουν το βαθμό κρυστάλλωσης του τελικού προϊόντος. Τα προϊόντα που στερεοποιούνται κάτω από τους 100°C είναι πάντα άμορφα, οδηγώντας στο σχηματισμό των τυπικών δομών PS, PSS και PSDS. Αντίθετα, όταν τα γεωπολυμερή στερεοποιούνται υπό υδροθερμικές συνθήκες, όπως το e, τα καλά κρυσταλλωμένα ζεολιθικά προϊόντα είναι ορατά μέσα στις άμορφες δομές που σχηματίζονται. G. σε 5–10 MPa πίεσης και 150–180 βαθμούς Κελσίου (Davidovits J., Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials, 1991).

1.4.3 Σύνθεση Γεωπολυμερών υλικών

Οι πρώτες ύλες, τα πληρωτικά υλικά και τα διαλύματα ενεργοποίησης είναι οι τρεις πηγές που χρησιμοποιούνται στη σύνθεση των γεωπολυμερών. Τα διαλύματα ενεργοποίησης συνδυάζονται με τα πληρωτικά υλικά αφού έχουν συνδυαστεί οι πρώτες ύλες. Ως πρώτες ύλες, χρησιμοποιούνται είτε φυσικώς απαντώμενα αργιλοπυριτικά ορυκτά όπως ποζολάνες και μετακαολινίτης είτε τεχνητά υποπροϊόντα εξόρυξης και μεταλλουργικών αποβλήτων όπως η κόκκινη λάσπη και η σκωρία υψικαμίνου (Elimbi, Tchakoute, & Njorwouo, 2011).

Το μείγμα γεωπολυμερών λαμβάνει κατιόντα αλουμινίου από τα πληρωτικά και δεσμεύεται μεταξύ τους από το διάλυμα ενεργοποίησης, το οποίο απαιτείται για τη διάλυση των πρώτων υλών. Το τελευταίο αποτελείται από κάλιο ή πυριτικό νάτριο και το υδροξείδιο ενός αλκαλίου, το οποίο είναι τυπικά κάλιο ή νάτριο. Εάν είναι δυνατόν, αντικαταστήστε το πυριτικό κάλιο με το πυριτικό νάτριο επειδή έχει χαμηλότερο ιξώδες και έτσι βελτιώνει τη μηχανική αντοχή του γεωπολυμερούς (Davidovits J. , Geopolymer Chemistry and Applications, 2016).

1.4.4 Ιδιότητες Γεωπολυμερών υλικών

Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των τελικών προϊόντων καθορίζονται από την προέλευση και τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται, καθώς και από τις συνθήκες σύνθεσης του μείγματος γεωπολυμερών (Komnitsas, Perdikatsis, & Zaharaki, 2007). Οι αναλογίες $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ και SiO_2/CaO παίζουν επίσης ρόλο στις μηχανικές ιδιότητες των γεωπολυμερών. (Komnitsas, Zaharaki, Vlachou, Bartzas, & Galetakis, 2015) (Zaharaki, Galetakis, & Komnitsas, 2016) (Davidovits J. , False Values on CO₂ Emission for Geopolymer Cement/Concrete published in Scientific Papers, 2015)

Η θερμοκρασία που απαιτείται για τη δημιουργία γεωπολυμερών κυμαίνεται τυπικά στην περιοχή από 25 έως 80 βαθμούς Κελσίου. Αυτά τα υλικά μπορούν να επιτύχουν την επιθυμητή δομική τους ακεραιότητα και τη μέγιστη αντοχή σε θλίψη σε λίγες μόνο ώρες, επιδεικνύοντας ταχύτερο χρόνο πήξης σε σύγκριση με το παραδοσιακό τσιμέντο Portland. Επιπλέον, τα γεωπολυμερή παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερη συρρίκνωση κατά τη διαδικασία σχηματισμού τους σε σύγκριση με το τσιμέντο Portland (Βελωνίας, 2018). Η εικόνα 18, όπως

παρουσιάστηκε από τον Davidovits το 1988, απεικονίζει το ποσοστό συρρίκνωσης που παρατηρήθηκε στα γεωπολυμερή έναντι του τσιμέντου Portland μετά από 7 και 28 ημέρες.

Μίγμα	7 ημέρες	28 ημέρες
Τσιμέντο Portland τύπου 1*	1.0	3.3
Τσιμέντο Portland τύπου 3**	1.5	4.6
Γεωπολυμερές	0.2	0.5

Εικόνα 19 Συγκριτικός Πίνακας συρρίκνωσης γεωπολυμερούς σε σχέση με τσιμέντο Portland. (Davidovits J. , *Geopolymer Chemistry and Properties*, 1988)

Επιπλέον, τα γεωπολυμερή που δημιουργούνται παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή στην όξινη διάβρωση, ξεπερνώντας ακόμη και αυτή του παραδοσιακού τσιμέντου Portland όπως φαίνεται στην εικόνα 18 (Davidovits J. , 1998) (Davidovits, Comrie, Paterson, & Ritcey, 1990). Επιπλέον, όπως υποδεικνύεται στην εικόνα 21 (Davidovits J. , *Properties of geopolymer cements*, 1994), αυτά τα γεωπολυμερή έχουν ελάχιστη διαπερατότητα (περίπου 10⁻⁹ cm/s), καθιστώντας τα ιδανικά για τον περιορισμό και την εξουδετέρωση επικίνδυνων ουσιών.

Μήτρα	H₂SO₄	HCl
Τσιμέντο Portland	95	78
Τσιμέντο Portland / μίγμα σκωρίας	96	15
Ca-Al τσιμέντο	30	50
Γεωπολυμερή	7	6

Εικόνα 20 Διαλυτοποίηση σε 5% διάλυμα οξέων (% βάρος της μήτρας) . (Davidovits, Comrie, Paterson, & Ritcey, 1990) (Davidovits J. , *Properties of geopolymer cements*, 1994)

Υλικό	Διαπερατότητα (cm/s)
Άμμος	$10^{-1} - 10^{-3}$
Αργίλος	10^{-7}
Γρανίτης	10^{-10}
Τσιμέντο από ιπτάμενη τέφρα	10^{-6}
Τσιμέντο Portland	10^{-10}
Γεωπολυμερή	10^{-9}

Εικόνα 21 Τιμές διαπερατότητας (cm/s). (Davidovits J. , *Properties of geopolymer cements*, 1994)

Ταυτόχρονα, παρουσιάζουν χαρακτηριστικά αντοχής στη φωτιά και έχουν υψηλή ικανότητα να αντέχουν στους επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης και θέρμανσης. Επιπλέον, τα βαρέα μέταλλα που είναι ενσωματωμένα στη δομή τους εμφανίζουν ελάχιστη κίνηση. Μια σύγκριση της συγκέντρωσης μερών ανά εκατομμύριο (ppm) ορισμένων κατιόντων που βρίσκονται σε εκχυλίσματα αποβλήτων εξόρυξης και λάσπης βιομηχανίας χρωμάτων παρέχεται στην εικόνα 21, τόσο πριν όσο και μετά τη διαδικασία σύνθεσης γεωπολυμερών όπως τεκμηριώνεται από τους Van Jaarsveld et al. το 1997 (Jaarsveld, J.S.J., & Lorenzen, 1997).

	As	Fe	Zn	Cu	Ni	Ti	
Ως έχουν απόβλητα	42	9726	1858	510	5	20	
Απόβλητα μετά το γεωπολυμερισμό	2	123	1115	4	3	7	
	Mg	Cr	Zn	Mn	Co	Ti	V
Ως έχει ιλύς	1024	55	384	64	84	6	9
Ιλύς μετά το γεωπολυμερισμό	512	7	7	6	9	3	1

Εικόνα 22 Συγκέντρωση σε ppm κατιόντων σε εκχυλίσματα μεταλλευτικών αποβλήτων και ιλύων βιομηχανίας παραγωγής χρωμάτων, πριν και μετά τη σύνθεση γεωπολυμερών. (Jaarsveld, J.S.J., & Lorenzen, 1997)

1.4.5 Εφαρμογές Γεωπολυμερών

Τα τελευταία χρόνια, έχει σημειωθεί αξιοσημείωτη πρόοδος στον τομέα των γεωπολυμερικών εφαρμογών, χάρη στη σημαντική τεχνολογική πρόοδο. Τα υλικά αιχμής που δημιουργούνται μέσω των αντιδράσεων γεωπολυμερισμού φέρνουν επανάσταση σε διάφορες βιομηχανίες

εισάγοντας καινοτόμες εφαρμογές και διαδικασίες. Αυτή η πρόοδος αμφισβητεί τις παραδοσιακές έννοιες στην ανόργανη χημεία και την ορυκτολογία, ωθεί τα όρια και πυροδοτεί νέες ιδέες (Davidovits, 1998) (Davidovits J. , 2005) (Davidovits J. , False Values on CO₂ Emission for Geopolymer Cement/Concrete published in Scientific Papers, 2015).

Είναι ευρέως γνωστό ότι οι ειδικές ιδιότητες που απαιτούνται από ένα υλικό καθορίζονται από τις συγκεκριμένες εφαρμογές στις οποίες θα χρησιμοποιηθεί. Τα γεωπολυμερή προσφέρουν ένα μοναδικό πλεονέκτημα από αυτή την άποψη, καθώς η σύνθεσή τους μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να παράγει προϊόντα με επιθυμητές ιδιότητες για μια ποικιλία άκρων χρήσεις. Προσαρμόζοντας τη σύνθεση ώστε να ταιριάζει στην επιδιωκόμενη εφαρμογή, τα γεωπολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά σε μια σειρά πεδίων. Η έρευνα δείχνει ότι τα γεωπολυμερή μπορούν να εφαρμοστούν σε τομείς όπως νέα κεραμικά, τσιμέντο για κατασκευές, πυρίμαχα υλικά, αδιάβροχα επιχρίσματα, καθώς και για δέσμευση επικίνδυνων αποβλήτων και βαρέων μετάλλων (Santoro, 2008) (Rickard W. , Williams, Temuujin, & Riessen, 2011). Οι εντυπωσιακές φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες τα καθιστούν βιώσιμη εναλλακτική λύση σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά όπως το τσιμέντο και τα πλαστικά.

Ο λόγος Si/Al στις πολυσιαλικές δομές είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει τις ιδιότητες και τις πιθανές χρήσεις των γεωπολυμερών. Το σχήμα 2.4 δείχνει ότι μια αναλογία Si/Al που κυμαίνεται από 1:1 έως 3:1 οδηγεί στο σχηματισμό ενός άκαμπτου τρισδιάστατου πλέγματος, κατάλληλου για εφαρμογές σε βιομηχανίες χαμηλής τεχνολογίας όπως η παραγωγή τούβλων, τα πυρίμαχα και τα κεραμικά. Τα γεωπολυμερή με αυτή την αναλογία μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στη φιλική προς το περιβάλλον παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος, καθώς και στη σταθεροποίηση επικίνδυνων αποβλήτων. Είναι επίσης πολύτιμα στα χυτήρια, την επεξεργασία τιτανίου, την κατασκευή συνθετικών ινών γυαλιού και χρησιμεύουν ως θερμομονωτικά υλικά για υψηλές θερμοκρασίες μεταξύ 200-1000 °C. Από την άλλη, όταν η αναλογία Si/Al υπερβαίνει το 3:1, το γεωπολυμερές αποκτά πιο πολυμερή φύση και σχηματίζει ένα δισδιάστατο πλέγμα. Τα γεωπολυμερή με αυτήν την υψηλότερη αναλογία είναι ιδανικά για προηγμένες εφαρμογές σε τομείς όπως η αεροδιαστημική, τα βιομηχανικά σφραγιστικά για θερμοκρασίες μεταξύ 200-600 °C και η παραγωγή πυρίμαχων συνθετικών ινών. (Davidovits J. , 2015).

1.4.6 Πρώτες ύλες γεωπολυμερών

1.4.6.1 Ιπτάμενη Τέφρα (FA ή IT)

Η ιπτάμενη τέφρα άνθρακα (FA), έχει σημαντική σημασία στην αγορά σκυροδέματος και τσιμέντου λόγω της οικονομικής προσιτότητας και της ικανότητάς του να συμμετέχει στην ποζολανική αντίδραση. Κατά συνέπεια, έχει κερδίσει την προσοχή ως πιθανή πρώτη ύλη για γεωπολυμερή. (Bernal, Rodríguez, Kirchheim, & Provis, 2016) (Παπαϊωάννου, 2019)

Τα κύρια συστατικά της ιπτάμενης τέφρας άνθρακα είναι το SiO_2 και το Al_2O_3 , με δευτερεύοντα συστατικά που περιλαμβάνουν CaO , Fe_2O_3 , MgO και άλλα. Η αργιλοπυριτική του σύνθεση, η χαμηλή απαίτηση σε νερό, η υψηλή εργασιμότητα και η αφθονία του το καθιστούν ελκυστική επιλογή για σύνθεση γεωπολυμερών. 27 (Mucsi & Ambrus, 2017) (Παπαϊωάννου, 2019)

Ο άνθρακας είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο ορυκτό καύσιμο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Προσφέρει σχετικά χαμηλό κόστος και υψηλές αποδόσεις ενέργειας. Σε παγκόσμια κλίμακα, περίπου 7,1 δισεκατομμύρια τόνοι άνθρακα καταναλώνονται κάθε χρόνο. Όταν ο άνθρακας καίγεται, παράγει διάφορα απόβλητα, όπως ιπτάμενη τέφρα, προϊόντα αποθείωσης καυσαερίων και σκωρία λέβητα. Αυτά τα απόβλητα συχνά επαναχρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό κλάδο για την παραγωγή κλίνκερ ή χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα σε τσιμέντο και σκυρόδεμα. Ωστόσο, μεγάλο μέρος αυτών των υλικών καταλήγει τελικά σε χωματερές. (Βλάχου, 2015) (Bernal, Rodríguez, Kirchheim, & Provis, 2016)

Τα τελευταία χρόνια, έχει γίνει εκτεταμένη έρευνα για την παραγωγή γεωπολυμερών από εξορυκτικά και μεταλλουργικά απόβλητα όπως ιπτάμενη τέφρα και σκωρία, για να διερευνηθεί το δυναμικό τους για γεωπολυμερισμό και να διερευνηθεί η επίδραση διαφόρων παραγόντων στη διαδικασία. Η χρήση ιπτάμενης τέφρας για γεωπολυμερή είναι γνωστή σε χώρες όπως η Αυστραλία (Rickard, Williams, Temuujin, & Riessen, 2011) (Rickard, Temuujin, & Riessen,

Thermal Analysis of Geopolymer Pastes Synthesised From Five Fly Ashes of Variable Composition, 2012) και η Ταϊλάνδη (Sata, Chindaprasirt, & Sathonsaowaphak, 2012) (Sukmak, Horpibulsuk, & Shen, Strength development in clay-fly ash geopolymer, 2013) (Sukmak, Horpibulsuk, Shen, Chindaprasirt, & Suksiripattanapong, Factors influencing strength development in clay-fly ash geopolymer, 2013) (Sukmak, Silva, Horpibulsuk, & Chindaprasirt, 2015). Οι Van Jaarsveld et al. (1998) και οι Mohapatra και Rao (2001) έχουν επισημάνει την πιθανή βιομηχανική χρήση της ιπτάμενης τέφρας που παράγεται από την καύση του λιγνίτη σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, καθώς παράγεται σε μεγάλες ποσότητες παγκοσμίως. Οι Palomo et al. (1999a) πραγματοποίησαν μια μελέτη για τα γεωπολυμερή ιπτάμενης τέφρας και διαπίστωσαν ότι με συγκέντρωση NaOH 8-12 M και θέρμανση στους 85°C για 24 ώρες, επιτεύχθηκαν αντοχές 35-40 MPa, οι οποίες αυξήθηκαν στα 90 MPa με την προσθήκη Διάλυμα Na₂SiO₃. Xies και Yunping (2001) και Phetchuay et al. (2014) έχουν σημειώσει ότι η στερεοποίηση των γεωπολυμερών ιπτάμενης τέφρας οφείλεται κυρίως στην παρουσία Na₂SiO₃ ως συγκολλητικό υλικό.

Η σύνθεση της ιπτάμενης τέφρας είναι γνωστό ότι παρουσιάζει σημαντική μεταβλητότητα, που απαιτεί προσεκτική εξέταση. Επιπλέον, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η χαμηλή αντιδραστικότητα της ιπτάμενης τέφρας, η οποία επηρεάζεται από την κατανομή μεγέθους των μορίων της και την παρουσία ενεργών μορίων όπως το SiO₂ και το Al₂O₃. (LORENA, 2018)

Στο πλαίσιο της Ελλάδας, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ιπτάμενη τέφρα μπορεί να ταξινομηθεί ευρέως με βάση τη χημική της σύνθεση και συγκεκριμένα την αναλογία CaO/SiO₂. Αυτή η αναλογία χρησιμεύει ως θεμελιώδης διάκριση, διαιρώντας την ΙΤ σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

A) Βασικές ή στάχτες υψηλής ασβέστης (HA) και B) όξινη ή χαμηλής ασβέστης στάχτες (LA), επίσης γνωστές ως πυριτική ιπτάμενη τέφρα.. Οι βασικές στάχτες χαρακτηρίζονται από συντελεστή CaO/SiO₂ ίσο ή μεγαλύτερο από 1, ενώ η όξινη τέφρα έχει αναλογία CaO/SiO₂ κάτω από 0,3. Στη χώρα μας οι ενεργειακοί σταθμοί της Δυτικής Μακεδονίας παράγουν κυρίως βασική τέφρα, με αναλογίες CaO/SiO₂ να κυμαίνονται από 0,86 έως 1,40. Από την άλλη πλευρά, οι σταθμοί της Μεγαλόπολης παράγουν όξινη τέφρα, με αναλογίες CaO/SiO₂ μεταξύ 0,25 και 0,38. (Στιβανάκης, 2003)

Για την απεικόνιση της χημικής σύστασης του τσιμέντου Portland και των Ιπτάμενων Τεφρών, ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τα δεδομένα για τις στάχτες από τη Μεγαλόπολη και την Πτολεμαΐδα

<i>Οξείδια</i>	<i>Κλίνκερ Τσιμέντου Portland (%)</i>	<i>Ιπτάμενη Τέφρα Μεγαλόπολης (%)</i>	<i>Ιπτάμενη Τέφρα Πτολεμαΐδας (%)</i>
<i>SiO₂</i>	22,5	40 – 45	25 – 35
<i>Al₂O₃</i>	5,5	15 – 20	15 – 20
<i>Fe₂O₃</i>	2,5	7 – 8	5 – 7
<i>CaO</i>	66	12 – 15 (ελευθ. 0)	30 – 35 (ελ.10 –15)
<i>MgO</i>	1,35	≅ 2	≅ 3
<i>SO₃</i>	0,6	1,5 – 2,5	4 – 8
<i>K₂O</i>	0,75	1,5 – 2,0	1,0
<i>Na₂O</i>	0,40	≅ 0,5	0,6 – 0,8
<i>TiO₂</i>	≅ 0,25	≅ 0,8	≅ 0,5
<i>Απώλεια πύρωσης</i>	0,15	2	5
<i>Αδιαλ. υπόλειμμα</i>	0,10	45	20

Εικόνα 23 Χημική σύσταση του τσιμέντου Portland και των Ιπτάμενων Τεφρών της Μεγαλόπολης και Πτολεμαΐδας. (Αλιάδης Δημήτριος & Λίντας Δημήτριος, 2018)

Οι κύριες εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται η ιπτάμενη τέφρα είναι: (Κούκουζας & Παπανικολάου, 2006)

- παραγωγή τσιμέντου, προϊόντα τσιμέντου και σκυρόδεμα
- Κατασκευή κεραμικών δομικών στοιχείων
- Στην οδοποιία, ως υλικό βάσης ή υπόβασης ή ως πρόσθετο σε ασφαλτικά οδοστρώματα.
- Μεταλλουργία για ανάκτηση μετάλλων.
- Αποκατάσταση βιομηχανικών αποβλήτων
- Αποκατάσταση εδαφών
- Παραγωγή συνθετικού ζεόλιθου.

Η δραστηριότητα επικεντρώθηκε στην πιλοτική παραγωγή προϊόντων τσιμέντου με χρήση ιπτάμενης τέφρας και τελικά προχώρησε στην πιλοτική παραγωγή προϊόντων τσιμέντου με χρήση ιπτάμενης τέφρας. (Κοντομηνά, 2017)

- Δεν υπάρχουν εταιρείες παραγωγής ζεόλιθου στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας.
- Η παραγωγή οδοποιίας με χρήση ιπτάμενης τέφρας είναι σημαντικά ακριβότερη.

Εκτιμάται ότι η οδοποιία με χρήση ιπτάμενης τέφρας είναι αρκετά δαπανηρή στην παραγωγή και δεν μπορεί να καλυφθεί από το μέτρο αυτό. Τέλος, άλλες χρήσεις της ιπτάμενης τέφρας στην Ελλάδα βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο. (Κοντομηνά, 2017)

1.4.6.2 Χρήση Αποβλήτων

Η απουσία διακριτού θεσμικού πλαισίου και σαφών στόχων σε ευρωπαϊκό επίπεδο μέχρι το 2008 είχε ως αποτέλεσμα σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των κρατών μελών της ΕΕ. Ορισμένες χώρες, όπως η Ελλάδα, μόλις πρόσφατα ξεκίνησαν τις προσπάθειές τους για ανακύκλωση και δεν έχουν ακόμη ξεπεράσει το ποσοστό ανακύκλωσης του 10%. Από την άλλη πλευρά, χώρες όπως η Δανία έχουν επιτύχει με επιτυχία ένα αξιοσημείωτο ποσοστό ανακύκλωσης άνω του 90% . (Κουρμούσης, 2013)

Από την άλλη πλευρά, ορισμένες ανεπτυγμένες χώρες εντός της ΕΕ έχουν ήδη θεσπίσει πλαίσια για την υποστήριξη και προώθηση της στρατηγικής διαχείρισης απορριμμάτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΕΚΚ) μέσω διαφόρων εργαλείων και πρακτικών. Αυτές οι χώρες ενθαρρύνουν εθελοντικές συμφωνίες, παρέχουν κίνητρα για την πρόληψη και ελαχιστοποίηση των αποβλήτων, εφαρμόζουν ειδικές διαδικασίες για τη διαχείριση των αποβλήτων, καθιερώνουν απαιτήσεις αναφοράς και καταχωρίσεις και χρησιμοποιούν φορολογικά εργαλεία για να υποστηρίξουν αυτές τις προσπάθειες. Σε αυτές τις προοδευτικές χώρες, έχει δημιουργηθεί μια αγορά για δευτερογενή υλικά, η οποία οδηγεί στη βιώσιμη ανάπτυξη των οικονομιών τους. Για πάνω από μια δεκαετία λειτουργούν μονάδες διαχείρισης της ΑΕΚΚ, παραλαμβάνουν τα απόβλητα, τα επεξεργάζονται και τα αξιοποιούν για την παραγωγή δευτερογενών υλικών. Έρευνες έχουν δείξει ότι αυτά τα υλικά μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε διάφορες βιομηχανίες, όπως η παραγωγή τσιμέντου, η ασφαλτος, η άμμος, το σκυρόδεμα και άλλα οικοδομικά υλικά. (Κουρμούσης, 2013)

Είναι απαραίτητο σε κάθε σενάριο να υπάρχει ένα ολοκληρωμένο σχέδιο για την αξιοποίηση των ΑΕΚΚ, το οποίο να περιλαμβάνει συγκεκριμένες πολιτικές, μέτρα, προϋποθέσεις, προδιαγραφές και ανάλυση κόστους-οφέλους. Επιπλέον, είναι ζωτικής σημασίας να υπάρχει ένα σύστημα επεξεργασίας που να διασφαλίζει την απομάκρυνση τυχόν επικίνδυνων αποβλήτων που υπάρχουν σε αυτά τα ΑΕΚΚ. Διενεργείται εκτεταμένη διεθνής έρευνα για την ελαχιστοποίηση της επικίνδυνης φύσης των ΑΕΚΚ πριν από την τελική απόρριψή τους.

Σε μια μελέτη που διεξήχθη από τους Reig et al. (2013), στόχος ήταν η βελτιστοποίηση της αντοχής των γεωπολυμερών που κατασκευάζονται από τούβλα. Παράγοντες όπως το είδος και η συγκέντρωση του αλκαλικού διαλύματος διερευνήθηκαν για να προσδιοριστεί η επίδρασή τους στη μηχανική αντοχή και τη μικροδομή των τελικών προϊόντων. Διαπιστώθηκε ότι οι υψηλότερες αντοχές επιτεύχθηκαν όταν τα τούβλα ενεργοποιήθηκαν με διάλυμα NaOH 5 M και παλαίωσαν για 7 ημέρες. Η προκύπτουσα αντοχή ήταν περίπου 30 MPa, η οποία αυξήθηκε στα 50 MPa μετά τη βελτιστοποίηση των αναλογιών υγρού/στερεού και στερεού/άμμου, καθώς και της μοριακής αναλογίας SiO₂/Na₂O. Στην έρευνά τους, οι Allahverdi και Kani (2009) διεξήγαγαν μια μελέτη για τη διερεύνηση της πιθανής χρήσης τούβλων και σκυροδέματος σε διάφορες αναλογίες για την παραγωγή τσιμέντου γεωπολυμερούς. Τα ευρήματά τους έδειξαν ότι τα τούβλα ήταν πιο κατάλληλα για την παραγωγή γεωπολυμερών. Rapazote et al. (2011) διαπίστωσε ότι όταν τα ΑΕΚΚ ενεργοποιήθηκαν με αλκαλικό διάλυμα γεωπολυμερούς αποτελούμενο από πυριτικό νάτριο και υδροξείδιο του νατρίου, τα προκύπτοντα γεωπολυμερή εμφάνισαν αντοχές σε θλίψη έως και 40 MPa περίπου. Αυτά τα γεωπολυμερή επέδειξαν επίσης ικανοποιητική σκληρότητα και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Sun et al. (2013) διεξήγαγε μια μελέτη χρησιμοποιώντας πλακίδια ως πρώτη ύλη για τη σύνθεση γεωπολυμερών. Η έρευνα έδειξε επιτυχημένο γεωπολυμερισμό των πλακιδίων, με τη θλιπτική αντοχή των τελικών προϊόντων να φτάνει τα 70 MPa. Επιπλέον, η μελέτη διαπίστωσε ότι θα μπορούσαν να επιτευχθούν υψηλές αντοχές έως και 60 MPa όταν βελτιστοποιούνταν συγκεκριμένες παράμετροι.

1.4.6.3 Διάλυμα ενεργοποίησης

Οι αλκαλικοί ενεργοποιητές διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στη σύνθεση του αλκαλικού ενεργοποιημένου σκυροδέματος, που συνήθως αποτελείται από καυστικά αλκάλια ή αλκαλικά

άλατα. Οι (Glukhovskiy, 1980) (Aziz, και συν., 2017) ταξινομήσε αυτούς τους ενεργοποιητές σε έξι ομάδες με βάση τη χημική τους σύνθεση. Μεταξύ αυτών, οι πιο ευρέως διαθέσιμες και οικονομικά αποδοτικές επιλογές είναι τα NaOH, Na₂CO₃, Na₂O, NSiO₂ και Na₂SO₄.

Όταν πρόκειται για τη σύνθεση γεωπολυμερών, τα υδροξείδια νατρίου και/ή καλίου χρησιμοποιούνται συνήθως ως ενεργοποιητές, επιλέγονται με βάση συγκεκριμένα κριτήρια όπως οι πρώτες ύλες και οι προβλεπόμενες εφαρμογές (van Jaarsveld, 2000). Το υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) ευνοείται ιδιαίτερα λόγω της προσιτότητας, της εύκολης πρόσβασης και του χαμηλού ιξώδους του. Η χρήση του στη σύνθεση γεωπολυμερών, είτε με ιπτάμενη τέφρα είτε με πρόδρομο postcolin, είναι καθιερωμένη και ευρέως διαδεδομένη. Το NaOH έχει βρεθεί ότι συμβάλλει στο σχηματισμό διακριτών ζεολιθικών δομών (Provis, Deventer, & Lukey, 2005), ειδικά μετά από παρατεταμένες περιόδους σταθεροποίησης σε σχετική υγρασία ή υψηλή θερμοκρασία. Ωστόσο, η επίδραση αυτού του φαινομένου στην ανθεκτικότητα των τελικών προϊόντων παραμένει αβέβαιη. Ο σχηματισμός κρυσταλλικών φάσεων, που αναστέλλει την επίτευξη υψηλής αντοχής, συνήθως σχετίζεται με την παρουσία ασβεστικών αλάτων που αναδύονται καθώς η υγρασία και η συρρίκνωση εξαλείφονται, με αποτέλεσμα μειωμένη συνοχή. Από την άλλη πλευρά, ο σχηματισμός κολλοειδών φάσεων ενυδάτωσης οδηγεί σε ικανοποιητική αντοχή. Οι ζεολιθικές δομές μπορούν επίσης να σχηματιστούν όταν το KOH χρησιμοποιείται ως αλκαλικός ενεργοποιητής σε γεωπολυμερή. Ωστόσο, η κρυστάλλωση είναι πιο αργή σε ένα μετακαολινικό αλκαλικό διάλυμα σε σύγκριση με το NaOH (Duxson, Provis, Fernández-Jiménez, & Lukey, 2007) και ακόμη πιο περιορισμένη στα γεωπολυμερή που χρησιμοποιούν διάλυμα KOH σε σύγκριση με το NaOH (Fernández-Jiménez, M., & Palomo, 2006).

Η εμφάνιση εξάνθισης (σχηματισμός λευκού ανθρακικού ή διτανθρακικού νατρίου) είναι ένα άλλο κοινό ζήτημα στα γεωπολυμερή που ενεργοποιούνται με διαλύματα υδροξειδίου υψηλής συγκέντρωσης, όπου η περίσσεια αλκαλίου αντιδρά με το ατμοσφαιρικό CO₂. Αν και αυτό το φαινόμενο είναι αντιαισθητικό, δεν διακυβεύει πάντα τη δομική ακεραιότητα του υλικού. Επιπλέον, το φαινόμενο του σχηματισμού ατμοσφαιρικής κοιλότητας σε γεωπολυμερή που χρησιμοποιούν KOH είναι ένα σημαντικό θέμα που δεν έχει διερευνηθεί πλήρως (Fernández-Jiménez, M., & Palomo, 2006). Οι περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται στη συγκέντρωση και τον τύπο του αλκαλικού διαλύματος ως τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή του γεωπολυμερούς.

Ορισμένοι υποστηρίζουν ότι η αυξημένη συγκέντρωση ενισχύει την αντίσταση των γεωπολυμερών (Hardjito & Rangan, 2005) (Hanjitsuwan & Sitchai Hunpratub, 2014) (Criado, Fernández-Jiménez, b, Aranda, & Palomo, 2007), ενώ άλλοι ισχυρίζονται ότι οι υπερβολικά υψηλές συγκεντρώσεις έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένη αντοχή του προϊόντος (Somna, Jaturapitakkul, Kajitvichyanukul, & Chindaprasirt, 2011) (Rajamma & Ferreira, 2012) (Mijarsh & Johari, 2014). Είναι γενικά αποδεκτό ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις NaOH επιταχύνουν σημαντικά τη διάλυση του πυριτίου και του αλουμινίου από την επιφάνεια των αρχικών στερεών σωματιδίων, προάγοντας τον σχηματισμό μονοπυρηνικού πυριτίου και υδροξυσυμπλόκων αλουμινίου. Η συγκέντρωση αυτών των υδροξυσυμπλόκων είναι μια κρίσιμη παράμετρος στο σύστημα γεωπολυμερών, καθώς επηρεάζει την ανάπτυξη πολύπλοκων γεωπολυμερικών δομών και τον σχηματισμό συμπαγών συμπαγών υλικών (2008).

Οι (Wang H., 2005) μελέτησαν την επίδραση της συγκέντρωσης αλκαλικού διαλύματος στην αντοχή των γεωπολυμερών με βάση τον καολινίτη και διαπίστωσαν ότι η αύξηση της συγκέντρωσης NaOH εντός της περιοχής 4-12 M είχε ως αποτέλεσμα βελτιωμένη αντοχή, φαινομενική πυκνότητα και παρουσία άμορφων φάσεων. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ενισχυμένη διάλυση των σωματιδίων μετακοιλινίτη και στην ταχύτερη συμπίκνωση των μονομερών παρουσία υψηλότερων συγκεντρώσεων NaOH. Επομένως, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η αύξηση της περιεκτικότητας σε NaOH έχει θετικό αντίκτυπο στη μηχανική αντοχή των γεωπολυμερών.

1.5 Υδρογόνο (H₂)

Το υδρογόνο αποτελεί το πιο αξιοσημείωτο καύσιμο, χωρίς καμία επιβλαβή επίδραση στο περιβάλλον. Είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωρίσουμε ότι η σημερινή εποχή, σε αντίθεση με τον προηγούμενο αιώνα που σηματοδεύτηκε από την έλευση των ορυκτών καυσίμων, ανήκει στο υδρογόνο, ένα καύσιμο που δεν εκπέμπει επιβλαβείς ουσίες. Αυτός ο αιώνας σηματοδοτεί μια κομβική στιγμή κατά την οποία σταδιακά διακόπτουμε την εξάρτησή μας από τα ορυκτά καύσιμα και αντιμετωπίζουμε το πλήθος περιβαλλοντικών ζητημάτων που έχουν συσσωρευτεί με την πάροδο του χρόνου.

1.5.1 Ιδιότητες Υδρογόνου

Το υδρογόνο είναι ένα αέριο που δεν μπορεί να φανεί, να μυριστεί ή να γευτεί, καθιστώντας το τόσο άχρωμο όσο και άοσμο. Επιπλέον, δεν είναι επιβλαβές για τους ζωντανούς οργανισμούς. Ωστόσο, παρά την απλότητά του, κατέχει τον τίτλο του πιο άφθονου στοιχείου σε ολόκληρο το σύμπαν. Στην πραγματικότητα, αντιπροσωπεύει πάνω από το 90% όλων των ατόμων που υπάρχουν και συνεισφέρει περίπου στο 75% της συνολικής μάζας. Αν και μπορεί να αποτελεί έκπληξη, το υδρογόνο είναι στην πραγματικότητα το τρίτο πιο διαδεδομένο στοιχείο στη Γη, παρόλο που είναι το ελαφρύτερο. Βρίσκεται κυρίως με τη μορφή νερού, το οποίο αποτελείται από υδρογόνο και οξυγόνο. Επιπλέον, το υδρογόνο μπορεί επίσης να βρεθεί σε υδρογονάνθρακες που ακολουθούν τον γενικό τύπο C_xH_y , (Science, 2017) οι οποίοι υπάρχουν σε αφθονία σε διάφορα φυτά και βιομάζα.

Το υδρογόνο, ως καθαρό στοιχείο, υπάρχει μόνο σε πολύ μικρές ποσότητες (0,00001%) στην ατμόσφαιρα επειδή η ελαφρότητά του το αναγκάζει να ανεβαίνει γρήγορα και να διαφεύγει στο διάστημα. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή του πυκνότητα των 0,0899 g/l, που είναι 14,4 φορές μικρότερη από αυτή του αέρα, και στο σημείο βρασμού του $-252,77^{\circ}$. (Science, 2017) Σε υγρή μορφή, το υδρογόνο έχει πυκνότητα 70,99 g/l. (Science, 2017). Αυτά τα μοναδικά χαρακτηριστικά δίνουν στο υδρογόνο την υψηλότερη αναλογία ενέργειας προς βάρος από οποιοδήποτε καύσιμο, με 1 κιλό υδρογόνου να παράγει 119.972 kJ όταν καίγεται. Συγκριτικά, 1 κιλό υδρογόνου περιέχει την ίδια ποσότητα ενέργειας με 2,1 κιλά φυσικού αερίου ή 2,8 κιλά βενζίνης και μόνο νερό παράγεται ως υποπροϊόν κατά την καύση. (Science, 2017)

Ταυτότητα		Φυσικά χαρακτηριστικά	
Όνομα	Υδρογόνο	Κρυσταλλικό σύστημα	Εξαγωνικό
Σύμβολο	H	Σημείο τήξης	-259,14(°C)
Ατομικός αριθμός (Z)	1	Σημείο βρασμού	-252,87 °C
Κατηγορία	Αμέταλλα	Πυκνότητα	0,08988 kg/m ³
Θέση στον Περιοδικό Πίνακα	1 ^η ομάδα, 1 ^η περίοδος, τομέας s	Ενθαλπία τήξης	0,117 kJ/mol
Σχετική ατομική μάζα (Ar)	1,00794	Ταχύτητα του ήχου	1310 m/s

Εικόνα 24 Χημικές και φυσικές ιδιότητες του Υδρογόνου. (Science, 2017)

1.5.2 Ενέργεια από Υδρογόνο

Παρά την πρόοδο, η Ευρωπαϊκή Ένωση εξακολουθεί να αντιμετωπίζει προκλήσεις, καθώς ο ενεργειακός της τομέας εξακολουθεί να συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και η περιοχή εξακολουθεί να εξαρτάται από τις εισαγωγές πετρελαίου και φυσικού αερίου. Ως απάντηση σε αυτές τις προκλήσεις, η Επιτροπή εισήγαγε μια στρατηγική υδρογόνου τον Ιούλιο του 2020 για να προωθήσει την ανάπτυξη καθαρής ενέργειας υδρογόνου και τον κεντρικό ρόλο της στην επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050. Η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η δημιουργία ενός διασυνδεδεμένου ενεργειακού συστήματος παίζει κρίσιμο ρόλο στην υλοποίηση μιας Ευρώπης ουδέτερης από άνθρακα και ενός πιο υγιούς πλανήτη, όπως περιγράφεται στην Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία. Είναι σημαντικό να διευκολυνθεί η πρόσβαση σε καθαρή, οικονομικά προσιτή και αξιόπιστη ενέργεια για τις επιχειρήσεις και τους καταναλωτές, προκειμένου να υποστηριχθεί ο πράσινος μετασχηματισμός της ευρωπαϊκής οικονομίας. Σε μια έκθεση που εγκρίθηκε τον Μάιο του 2021, τα μέλη του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου τόνισαν ότι μόνο το πράσινο υδρογόνο, που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, μπορεί να συμβάλει αποτελεσματικά στους μακροπρόθεσμους στόχους για την κλιματική ουδετερότητα.

1.5.3 Κωδικοποίηση του υδρογόνου ανάλογα με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατά τον κύκλο ζωής του.

Η βιβλιογραφία περιγράφει το επίπεδο καθαρότητας του υδρογόνου μέσω της χρωματικής κωδικοποίησης, με το πράσινο, το μπλε και το γκρι να είναι οι κύριες κατηγορίες (Osman & al, 2021). Το χρώμα που αποδίδεται στο υδρογόνο καθορίζεται αποκλειστικά από τη μέθοδο παραγωγής. Για παράδειγμα, το υδρογόνο με γκρι κωδικοποίηση παράγεται χρησιμοποιώντας ορυκτά καύσιμα όπως το φυσικό αέριο, το οποίο έχει αρνητικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο καθώς έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή 10 τόνων διοξειδίου του άνθρακα για κάθε τόνο υδρογόνου (Dvoynikov & al, 2021).

Από την άλλη πλευρά, το υδρογόνο με μπλε κωδικοποίηση μπορεί επίσης να παραχθεί από ορυκτά καύσιμα, αλλά λαμβάνονται μέτρα για τον μετριασμό και την αποθήκευση των εκπομπών άνθρακα. Το υδρογόνο με πράσινη κωδικοποίηση, από την άλλη πλευρά, παράγεται χρησιμοποιώντας 100% ανανεώσιμες πηγές όπως η αιολική ή η ηλιακή ενέργεια, με αποτέλεσμα περιορισμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.


Επιπλέον, υπάρχουν και άλλοι χρωματικοί κωδικοί όπως το «καφέ» υδρογόνο, το οποίο παράγεται μέσω της αεριοποίησης καυσίμου με βάση τον άνθρακα και το «τιρκουάζ» υδρογόνο, το οποίο παράγεται μέσω της θερμικής αποσύνθεσης του φυσικού αερίου. Ωστόσο, το σύστημα χρωματικής κωδικοποίησης έχει και τις αδυναμίες του. Για παράδειγμα, συχνά θεωρείται ότι το πράσινο υδρογόνο έχει πάντα χαμηλότερες εκπομπές άνθρακα σε σύγκριση με το μπλε ή το γκρι υδρογόνο, αλλά αυτό δεν συμβαίνει πάντα.

Η βιομάζα που χρησιμοποιείται ως πρώτες ύλες βιοενέργειας μπορεί να εκπέμπει αέρια θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης ή των θερμοχημικών μετασχηματισμών. Αντίθετα, η τεχνική δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα που χρησιμοποιείται στην παραγωγή μπλε υδρογόνου μειώνει σημαντικά τις εκπομπές αερίων.

Η κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ, μια τεχνολογία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμβάλλει επίσης στο αποτύπωμα άνθρακα και δημιουργεί διάφορα είδη αποβλήτων. Επιπλέον, τα ηλιακά πάνελ έχουν διάρκεια ζωής 30 ετών και απαιτούν σωστή διαχείριση των απορριμμάτων στο τέλος της ζωής τους. Είναι σημαντικό να καταγράφονται με ακρίβεια οι εκπομπές σε όλες τις διεργασίες παραγωγής υδρογόνου και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της βέλτιστης διαδικασίας παραγωγής και χρήσης του υδρογόνου.

Οι Al-Qahtani et al. (26) συνέκρινε τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αναμόρφωσης μεθανίου με ατμό με την ηλεκτρόλυση του νερού χρησιμοποιώντας διαφορετικές πηγές ενέργειας όπως αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική ενέργεια, ηλιακή θερμική αεριοποίηση και αεριοποίηση βιομάζας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ηλεκτρόλυση με φωτοβολταϊκά (ηλιακή ενέργεια) είχε τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, κυρίως λόγω του αυξημένου περιβαλλοντικού αποτυπώματος κατά την παραγωγή και της σχετικά χαμηλής απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ως εκ τούτου, είναι προφανές ότι απαιτούνται βελτιώσεις στο σύστημα χρωματικής κωδικοποίησης για να ενισχυθεί η αξιοπιστία του.

Μία πρόταση για βελτίωση, που προτάθηκε από τους Han et al. (Al-Qahtani & al, 2021), είναι να συνοδεύει τη χρωματική κωδικοποίηση με αριθμούς, όπως 80 πράσινο-4. Αυτή η κωδικοποίηση υποδεικνύει ότι το 80% της παραγωγής είναι "πράσινο", ενώ ο αριθμός 4 αντιπροσωπεύει τις αέριες εκπομπές σε ισοδύναμο CO₂. Η μονάδα ισοδύναμου CO₂ μετρά τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο ενός τόνου αερίων θερμοκηπίου σε σύγκριση με τον αντίκτυπο ενός τόνου CO₂, με βάση το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP).



Grey	Natural Gas	CO ₂	++
Blue	Natural Gas	CO ₂	+++
Green	Water	-	++++
Brown	Lignite	CO ₂	+
Black	Coal	CO ₂	+
Turquoise	Natural Gas	Solid C	+++
Pink	Water	-	++++
Yellow	Water	-	++++

Εικόνα 25 Χρωματική διαφοροποίηση σε σχέση με την διαφορετική πηγή παραγωγής Υδρογόνου. (Kousi, 2021)

1.5.4 Παραγωγή Υδρογόνου

Παρακάτω θα αναφερθούν μερικές βασικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν:

- την παραγωγή υδρογόνου από φυσικό αέριο ή υδρογονάνθρακες,

- αεριοποίηση άνθρακα,
- ηλεκτρολυτικές διεργασίες,
- φωτοκαταλυτικές προσεγγίσεις και
- την παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

(Φραντζής, 2022)

1.5.4.1 Παραγωγή Υδρογόνου από φυσικό αέριο / υδρογονάνθρακες

Υπάρχουν πολλές κύριες τεχνικές για την παραγωγή υδρογόνου από φυσικό αέριο ή υδρογονάνθρακες, συμπεριλαμβανομένης της αναμόρφωσης με ατμό (που περιλαμβάνει την αναμόρφωση μεθανίου με ατμό), της μερικής οξείδωσης και της αυτοθερμικής αναμόρφωσης.

1.5.4.2 Παραγωγή Υδρογόνου από αεριοποίηση άνθρακα

Η αεριοποίηση άνθρακα είναι μια μέθοδος που περιλαμβάνει μερική οξείδωση άνθρακα, που σημαίνει ότι χρησιμοποιεί λιγότερο οξυγόνο σε σύγκριση με την ποσότητα που απαιτείται για την πλήρη καύση. Ως αποτέλεσμα, η διαδικασία αεριοποίησης παράγει CO, H₂ και μικρότερες ποσότητες H₂O και CO₂. 11 Αν και αυτή η διαδικασία έχει κάποιες εμπορικές χρήσεις, δεν είναι τόσο ανταγωνιστική όσο η αναμόρφωση μεθανίου και συνήθως χρησιμοποιείται μόνο όταν το φυσικό αέριο είναι ακριβό. Επιπλέον, η αεριοποίηση άνθρακα είναι μια πιο περίπλοκη διαδικασία και συχνά απαιτεί περαιτέρω καθαρισμό του υδρογόνου. Το κόστος παραγωγής υδρογόνου μέσω αεριοποίησης είναι υψηλότερο λόγω της ανάγκης για ειδικούς αντιδραστήρες που ονομάζονται αεριοποιητές και της απαίτησης για οξυγόνο. (Μαρνέλλος, 2022)

1.5.4.3 Παραγωγή Υδρογόνου μέσω ηλεκτρολυτικών μεθόδων

Η ηλεκτρόλυση του νερού είναι μια άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου. Αυτή η διαδικασία, η οποία χρονολογείται από το 1890, αντιπροσώπευε μόνο το 4% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου (Kalamaras & Efstathiou, 2013) . Η

ηλεκτρόλυση περιλαμβάνει τη διέλευση ενός συνεχούς ρεύματος μέσω δύο ηλεκτροδίων που βυθίζονται σε ένα υδατικό διάλυμα, προκαλώντας τη διάσπαση των χημικών δεσμών μέσα στα μόρια του νερού και το σχηματισμό υδρογόνου και οξυγόνου (Kalamaras & Efstathiou, 2013). Αυτή η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία δωματίου και συνήθως χρησιμοποιεί θεϊκό οξύ ως ηλεκτρολύτη και ηλεκτρόδια πλατίνας, τα οποία δεν αντιδρούν με το θεϊκό οξύ. Η ηλεκτρόλυση έχει ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς δεν παράγει αέρια θερμοκηπίου και το υποπροϊόν οξυγόνου έχει διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές (Kalamaras & Efstathiou, 2013). Ωστόσο, η ηλεκτρόλυση απαιτεί σημαντική ποσότητα ενέργειας, που οδηγεί σε αυξημένο κόστος (Kalamaras & Efstathiou, 2013) (Μαρνέλλος, 2022). Η ενεργειακή απόδοση της ηλεκτρόλυσης κυμαίνεται τυπικά από 50% έως 70%. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ηλεκτρόλυσης είναι η αλκαλική ηλεκτρόλυση, αλλά υπάρχουν και άλλες τεχνικές όπως η ηλεκτρόλυση με χρήση πολυμερικής μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) και η ηλεκτρόλυση με χρήση κυψελών στερεού οξειδίου (SOEC) (Syngas, n.d.).

1.5.4.4 Παραγωγή Υδρογόνου μέσω φωτοκατάλυσης

Η φωτοηλεκτρόλυση, μια μέθοδος παραγωγής υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, βρίσκεται επί του παρόντος σε πειραματική φάση. Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, θεωρείται ο πιο οικονομικός και αποδοτικός τρόπος παραγωγής υδρογόνου με χρήση ανανεώσιμων πηγών. Σε αυτή τη διαδικασία, ένα φωτοηλεκτρόδιο, το οποίο είναι μια συσκευή ημιαγωγών, απορροφά την ηλιακή ενέργεια και διευκολύνει την αποσύνθεση του νερού σε οξυγόνο και υδρογόνο.

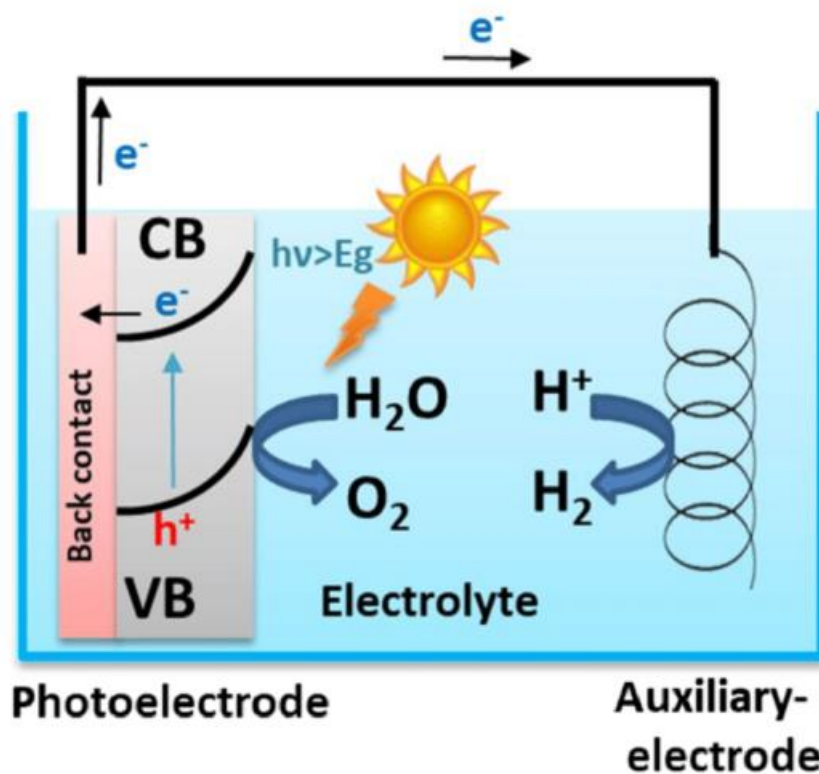
Η φωτοηλεκτρόλυση χρησιμοποιεί ένα φωτοηλεκτροχημικό σύστημα συλλογής φωτός (PEC) για να οδηγήσει την ηλεκτρόλυση του νερού. Όταν ένα ημιαγωγικό φωτοηλεκτρόδιο τοποθετείται σε έναν υδατικό ηλεκτρολύτη και εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία, παράγει αρκετό ηλεκτρισμό για να υποστηρίξει τις αντιδράσεις υδρογόνου και οξυγόνου. Κατά την παραγωγή υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται στον ηλεκτρολύτη, ενώ η παραγωγή οξυγόνου απαιτεί ελεύθερα ηλεκτρόνια.

Η επιτυχία της αντίδρασης εξαρτάται από τον συγκεκριμένο τύπο ημιαγωγού υλικού που χρησιμοποιείται και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (Φραντζής, 2022). Το

φωτοηλεκτρόδιο αποτελείται από πολλά στρώματα, συμπεριλαμβανομένων των φωτοβολταϊκών (ημιαγωγών), των καταλυτών και των προστατευτικών στρωμάτων, καθένα από τα οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στη συνολική απόδοση του συστήματος (Kalamaras & Efstathiou, 2013). Το φωτοβολταϊκό στρώμα περιλαμβάνει ημιαγωγικά υλικά που απορροφούν το φως. Τα καταλυτικά στρώματα του φωτοηλεκτροχημικού στοιχείου επηρεάζουν επίσης την αποτελεσματικότητα της ηλεκτρόλυσης του νερού και απαιτούν κατάλληλους καταλύτες για τη διάσπαση του νερού.

Επιπλέον, ένα προστατευτικό στρώμα είναι απαραίτητο για την πρόληψη της διάβρωσης του ημιαγωγού εντός του υδατικού ηλεκτρολύτη. Για να επιτευχθεί επιτυχής φωτοκαταλυτική διάσπαση νερού, οι φωτοκαταλύτες πρέπει να διαθέτουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως ικανότητα απορρόφησης ορατού φωτός, χημική σταθερότητα υπό συνθήκες οξειδοαναγωγής, χαμηλό κόστος, δυνατότητα ανακύκλωσης, χημική αντοχή και προσαρμοστικότητα για παραγωγή υδρογόνου μεγάλης κλίμακας (Kalamaras & Efstathiou, 2013).

Συνολικά, η παραγωγή υδρογόνου μέσω φωτοηλεκτρόλυσης υπόσχεται πολλά για την παροχή μιας βιώσιμης και αποτελεσματικής μεθόδου αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των διαφόρων στρωμάτων στο φωτοηλεκτρόδιο και για τον εντοπισμό κατάλληλων καταλυτών που πληρούν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για παραγωγή μεγάλης κλίμακας. (Φραντζής, 2022)



Εικόνα 26 Σχηματικό στοιχείο φωτοηλεκτρόλυσης βάσης ημιαγωγού τύπου n. (Hejazi, 2020)

1.5.4.5 Παραγωγή Υδρογόνου από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Υπάρχουν πολλές βασικές τεχνικές για την παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι κυριότερες είναι

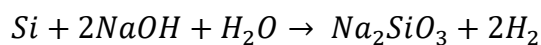
- αεριοποίηση βιομάζας: Αυτή η διαδικασία προέρχεται από τη μερική οξείδωση της πρώτης ύλης, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός συνδυασμού H₂, CH₄, ανώτερων υδρογονανθράκων, CO, CO₂ και N₂. (Μαρνέλλος, 2022)
- Πυρόλυση: Στη συγκεκριμένη διαδικασία, η οργανική ύλη υφίσταται θέρμανση και αεριοποίηση υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Αυτές οι συνθήκες περιλαμβάνουν την υποβολή της οργανικής ύλης σε μια περιοχή πίεσης 0,1–0,5 MPa και μια περιοχή θερμοκρασίας 500–900 °C. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτή η διαδικασία συμβαίνει χωρίς την παρουσία οξυγόνου ή αέρα. Κατά συνέπεια, η πιθανότητα σχηματισμού διοξίνης ελαχιστοποιείται σημαντικά. (Kalamaras & Efstathiou, 2013)

- αναμόρφωση υδατικής φάσης: Η αναμόρφωση υδατικής φάσης (APR) είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που ερευνάται επί του παρόντος για τη μετατροπή οξυγονωμένων υδρογονανθράκων ή υδατανθράκων που προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές βιομάζας σε υδρογόνο. Αυτή η διαδικασία έχει τη δυνατότητα να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή καθαρής και βιώσιμης ενέργειας. (Kalamaras & Efstathiou, 2013)
- σκοτεινή ζύμωση: Η σκοτεινή ζύμωση είναι η διαδικασία με την οποία η αποθηκευμένη βιοχημική ενέργεια που υπάρχει στην οργανική ύλη μετατρέπεται σε διάφορες άλλες μορφές ενέργειας, οι οποίες όλα συμβαίνουν απουσία οποιασδήποτε πηγής φωτός. (Dincer & Acar, 2015)
- Βιοφωτόλυση : Η βιοφωτόλυση περιλαμβάνει την παραγωγή υδρογόνου μέσω της διάσπασης του νερού χρησιμοποιώντας κυανοβακτήρια και γαλαζοπράσινα φύκια, μια διαδικασία γνωστή ως «φωτονική παραγωγή υδρογόνου». (Martino & al, 2021)
- ζύμωση αερίου: Κατά την αέρια ζύμωση, το υδρογόνο παράγεται μέσω της αντίδρασης μονοξειδίου του άνθρακα και νερού από φωτοσυνθετικά βακτήρια σε περιβάλλον χωρίς οξυγόνο. Αυτή η διαδικασία έχει ως τελικό αποτέλεσμα την παραγωγή υδρογόνου. (Martino & al, 2021)
- ζύμωση παρουσία φωτός: Η φωτοζύμωση είναι μια σύνθετη βιοχημική διαδικασία που περιλαμβάνει την παραγωγή αερίου υδρογόνου από οργανικές ενώσεις. Αυτή η αντίδραση διευκολύνεται από ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό ένζυμο που ονομάζεται νιτρογενάση, το οποίο δρα ως καταλύτης. Επιπλέον, αυτή η διαδικασία απαιτεί την παρουσία φωτεινής ενέργειας, η οποία μπορεί να ληφθεί είτε από φωτοσυνθετικά βακτήρια είτε από αναερόβια βακτήρια. Ο συνδυασμός αυτών των παραγόντων επιτρέπει τη μετατροπή οργανικών ενώσεων σε αέριο υδρογόνο μέσω της περίπλοκης διαδικασίας της φωτοζύμωσης. (Martino & al, 2021)

1.5.4.6 Παραγωγή Υδρογόνου από αλκαλική αντίδραση πυριτίου

Για την παραγωγή των γεωπολυμερών υλικών χρησιμοποιείται, όπως αναφέρθηκε στο ανωτέρω υποκεφάλαιο, αλκαλικό διάλυμα υδροξειδίου του Καλίου ή Νατρίου, οπότε υπάρχει

και ταυτόχρονη παραγωγή Υδρογόνου μέσω της αντίδρασης του Πυριτίου (solar cell) και του αλκαλικού διαλύματος. Οπότε στο διάλυμα παίρνει μέρος η παρακάτω αντίδραση:



Αυτή η αντίδραση όχι μόνο παράγει αέριο υδρογόνο αλλά επίσης αποδίδει πυριτικό νάτριο ως υποπροϊόν, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους και μπορεί να αναπαραχθεί σε έναν σταθμό παραγωγής υδρογόνου μικρής κλίμακας χρησιμοποιώντας απόβλητα πυριτίου ως κύριο συστατικό ή μπορεί να είναι μέρος μιας μεγαλύτερης εγκατάστασης παραγωγής πράσινων καυσίμων που περιλαμβάνει κυψέλη καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας υδρογόνο ως αέριο καύσιμο. (Nakayama, Kuwata, & Imai, 2022).

Στην παρούσα εργασία η παραγωγή του υδρογόνου γίνεται μέσω της παραπάνω αντίδρασης από τη συμμετοχή των solar cells του φωτοβολταϊκού πάνελ και περισσότερες λεπτομέρειες θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

1.6 Παραγωγή Γεωπολυμερούς και Υδρογόνου

Ένα σημαντικό πρόβλημα με τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η σημαντική ποσότητα απορριμμάτων που δημιουργούνται από το γυάλινο περίβλημα και τις κυψέλες πυριτίου. Ωστόσο, αυτά τα απόβλητα μπορούν να ανακυκλωθούν αποτελεσματικά με τη χρήση καινοτόμων τεχνολογιών που δίνουν προτεραιότητα στη δημιουργία προϊόντων υψηλής αξίας και τηρούν τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Μεταξύ αυτών των τεχνολογιών, τα γεωπολυμερή ξεχωρίζουν ως μια αξιοσημείωτα βιώσιμη εναλλακτική λύση στα συμβατικά δομικά υλικά όπως το συνηθισμένο τσιμέντο Πόρτλαντ (OPC) (Singh & Middendorf, 2020) (Papadopoulou, et al., 2023). Τα γεωπολυμερή διαπρέπουν στη χρήση μεγάλων ποσοτήτων βιομηχανικών αποβλήτων και παραπροϊόντων για τη δημιουργία τελικών προϊόντων με χαμηλή ενσωματωμένη ενέργεια, απόλυτα σύμφωνα με τους στόχους των κλιματικών στόχων σχεδιασμού που έχουν τεθεί για το έτος 2030. (EUROPEAN, 2020) (Papadopoulou, et al., 2023)

Αυτά τα υλικά δημιουργούνται από αντιδράσεις γεωπολυμερισμού, στις οποίες ενεργοποιείται μία στερεή αργιλιοπυριτική πρώτη ύλη όπως ιπτάμενη τέφρα, απόβλητα

κατασκευών και κατεδάφισης (CDWs) ή σκωρία χρησιμοποιώντας ένα διάλυμα που περιέχει αλκάλια (Cong & Cheng, 2021) (Papadopoulou, et al., 2023). Στην παραδοσιακή μέθοδο, το διάλυμα ενεργοποίησης παρασκευάζεται χρησιμοποιώντας εμπορικά διαθέσιμα αλκαλικά πυριτικά, τα οποία απαιτούν σημαντική ποσότητα ενέργειας. Ωστόσο, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν επεξεργασμένα περιβλήματα γυαλιού και κυψέλες πυριτίου για την παρασκευή του διαλύματος ενεργοποίησης για σύνθεση γεωπολυμερών, καθώς περιέχουν επαρκείς ποσότητες ιόντων πυριτίου και νατρίου. (Κίουρις, Σκαροπούλου, Τσιβίλις, & Κακάλι, 2020) (Papadopoulou, et al., 2023)

Ως εκ τούτου, η δημιουργία μιας λύσης ενεργοποίησης χρησιμοποιώντας απορριπτόμενα ηλιακά πάνελ όχι μόνο θα μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των γεωπολυμερών αλλά και θα βελτιώσει την ικανότητά τους να επαναχρησιμοποιηθούν. Επιπλέον, η αντίδραση πυριτίου-αλκαλίου θα μπορούσε επίσης να δώσει αέριο υδρογόνο ως υποπροϊόν. (Hu, Yan, Liu, Cao, & Li, 2015) (Lai, et al., 2014) (Mussabek, et al., 2020) (Nakayama, Kuwata, & Imai, 2022) (Rao, et al., 2022) (Papadopoulou, et al., 2023)

Σύμφωνα με την παραπάνω βιβλιογραφική έρευνα στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθεί το πειραματικό στάδιο της παραγωγής του γεωπολυμερούς και του Υδρογόνου από φωτοβολταϊκά πάνελ στο τέλος κύκλου ζωής τους αλλά και τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών.

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγράφει όλη η σχεδίαση των πειραμάτων που εκτελέστηκαν, τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν, η ανάλυση των πρώτων υλών αλλά και η σύνθεση των γεωπολυμερών υλικών, παραθέτοντας όλα τα στοιχεία ώστε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα στο επόμενο κεφάλαιο.

2.1 Σχεδιασμός Πειραμάτων

Στη συγκεκριμένη πειραματική διπλωματική εργασία, μελετήθηκε το φωτοβολταϊκό πάνελ στο τέλος κύκλου ζωής του, για την παραγωγή του γεωπολυμερικού υλικού από ιπτάμενη τέφρα

και απόβλητο τούβλου αλλά και η παραγωγή αερίου Υδρογόνου για ενεργειακό σκοπό. Οπότε το πείραμα που θα περιγραφεί παρακάτω χωρίστηκε σε δύο μέρη: 1) στην διερεύνηση των παραμέτρων σύνθεσης του διαλύματος ενεργοποίησης από φωτοβολταϊκό πάνελ και την παραγωγή γεωπολυμερικού στοιχείου 2) ποσοτική μέτρηση παραγωγής αερίου Υδρογόνου κατά την παρασκευή του διαλύματος ενεργοποίησης, από φωτοβολταϊκό πάνελ.

Για τον προσδιορισμό του γεωπολυμερικού δυναμικού της ιπτάμενης τέφρας και του απορριπτόμενου τούβλου που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη διπλωματική, εφαρμόστηκε το πολυπαραγοντικό μοντέλο σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi, και προηγήθηκε από το εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, η αριστοποίηση των συνθηκών διμερούς σύνθεσης με κριτήριο τη βελτιστοποίηση των αντοχών σε θλίψη των τελικών δοκιμίων.

2.2 Κωδικοποίηση δειγμάτων

Οι ονομασίες όλων των δειγμάτων που έχουν εξεταστεί στην παρούσα μελέτη περιέχουν πληροφορίες για τον τύπο του δείγματος, τις πρώτες ύλες που έχουν χρησιμοποιηθεί και τις συνθήκες παρασκευής τους. Στον Πίνακα 2-1 παρατίθενται όλες οι συντομογραφίες και τα ακρωνύμια που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κωδικοποίηση των πρώτων υλών, των δειγμάτων για την παρασκευή διαλύματος ενεργοποίησης από φωτοβολταϊκό πάνελ και των γεωπολυμερών.

Πίνακας 2-1 Ανάλυση συντομεύσεων των πειραματικών δειγμάτων

Συντομεύσεις	Ανάλυση Συντομεύσεων
FA	Ιπτάμενη τέφρα
PV	Φωτοβολταϊκό πάνελ
BW	Απόβλητο τούβλου
PVX_NA	Σύνθεση διαλύματος Φωτοβολταϊκού με Αλκαλικό Νάτριο, όπου χ ο λόγος [Si]/R ₂ O
PVX_K	Σύνθεση διαλύματος Φωτοβολταϊκού με Αλκαλικό Κάλιο, όπου χ ο λόγος [Si]/R ₂ O
G_FA_PVXNA	Σύνθεση γεωπολυμερούς με ιπτάμενη τέφρα και διάλυμα ενεργοποίησης Φωτοβολταϊκού με Αλκαλικό Νάτριο, όπου χ ο λόγος [Si]/R ₂ O

G_BW_PVXNA	Σύνθεση γεωπολυμερούς με απόβλητο τούβλου και διάλυμα ενεργοποίησης Φωτοβολταϊκού με Αλκαλικό Νάτριο, όπου χ ο λόγος [Si]/R2O
------------	--

2.3 Πρώτες Ύλες και χαρακτηρισμός τους

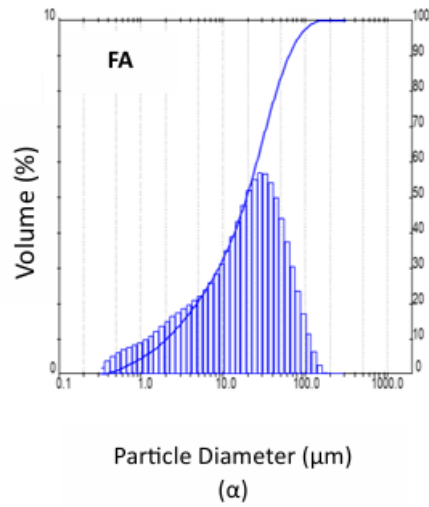
2.3.1 Ιπτάμενη Τέφρα (FA)

Η ιπτάμενη τέφρα FA προήλθε από τον σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Μεγαλόπολη. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ο μετακαολίνης MK από την εταιρεία Imerys Minerals (UK) υπό την ονομασία Metastar 501.

Πίνακας 2-2 Χημική σύσταση Ιπτάμενης Τέφρας (FA) % κ.β.

Πρώτη Ύλη	FA %
SiO ₂	48,1
Al ₂ O ₃	24,4
Fe ₂ O ₃	4,3
CaO	8,4
MgO	1,2
K ₂ O	0,9
SO ₃	0,6

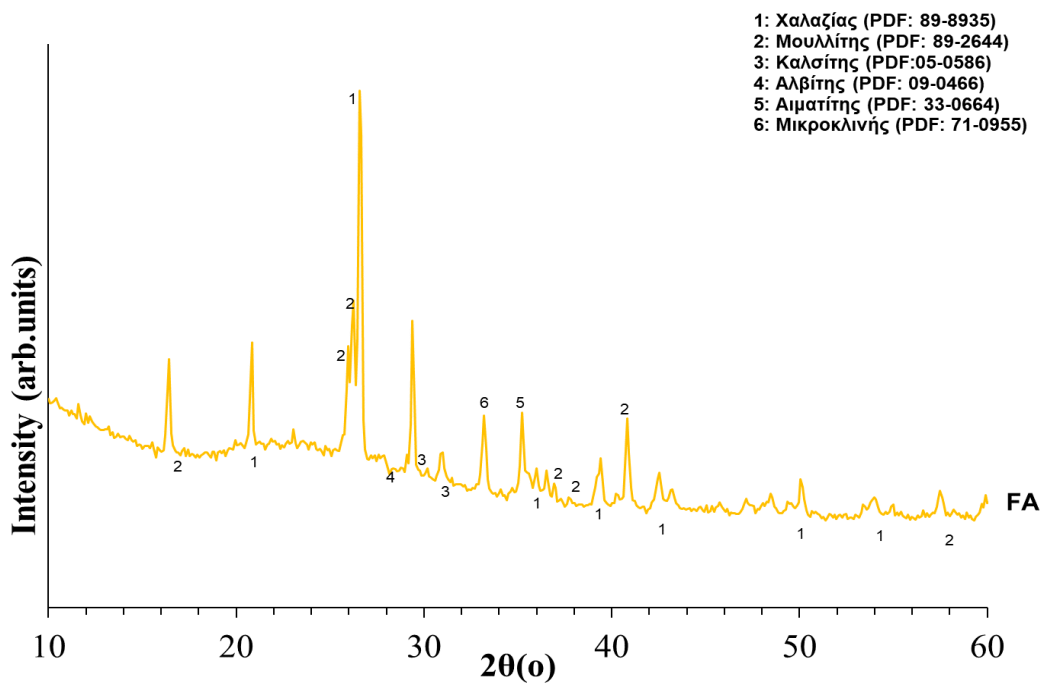
Η κοκκομετρική κατανομή της ιπτάμενης τέφρας φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 26.



Πρώτη ύλη	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)
FA	19.3	67.8

Εικόνα 27 Κοκκομετρική κατανομή της Ιπτάμενης Τέφρας

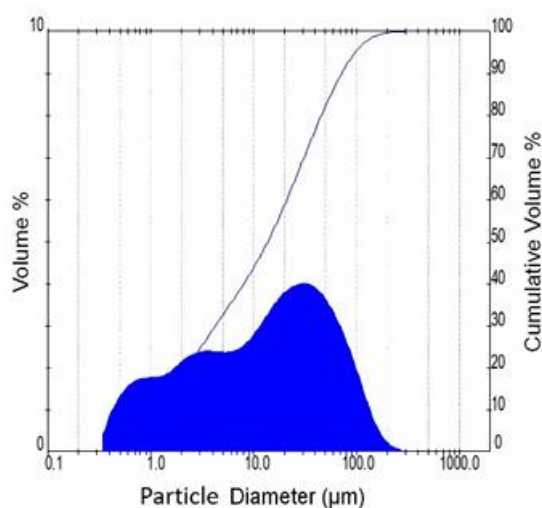
Αντίστοιχα η ορυκτολογική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, η οποία πραγματοποιήθηκε μέσω XRD.



Διάγραμμα 1 Ορυκτολογική σύσταση Ιπτάμενης τέφρας μέσω XRD

2.3.2 Απόβλητο Τούβλου (CDW)

Το πρόδρομο τούβλο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη ελήφθησε από τούβλα που απορρίφθηκαν από βιομηχανικές περιοχές επειδή δεν πληρούσαν τα πρότυπα ποιοτικού ελέγχου της βιομηχανίας. Αυτός ο τύπος αποβλήτων ανήκει επίσης στα Απόβλητα Κατεδαφίσεων και κατασκευών (CDW) και η σύνθεσή του είναι πολύ κοντά σε εκείνη των αποβλήτων που προέρχονται από αυτές τις δραστηριότητες. Τα απόβλητα τούβλων κονιορτοποιήθηκαν (pro-pilot plant μύλος, L = 480 mm, D = 380 mm) προκειμένου να ενισχυθεί η αντιδραστικότητά τους.



Fraction	Brick
d ₉₀ (μm)	71.4
d ₅₀ (μm)	13.7

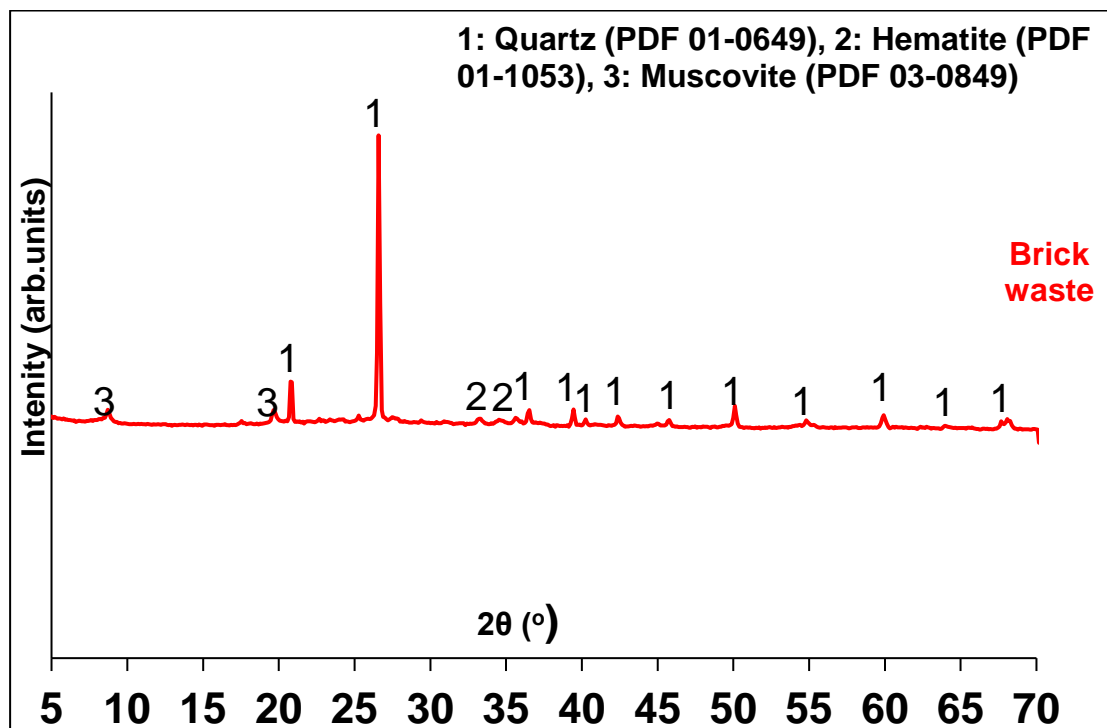
Εικόνα 28 Κοκκομετρική κατανομή του αποβλήτου τούβλου

Η χημική σύσταση των υλικών αποβλήτων προσδιορίστηκε με φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων X (XRF). Το επιλεγμένο απόβλητο τούβλου είναι μια πολλά υποσχόμενη πρόδρομη ουσία αργιλοπυριτικών αλάτων, δεδομένου ότι περιέχει επαρκείς ποσότητες SiO₂ και Al₂O₃ που είναι απαραίτητες για τις αντιδράσεις του γεωπολυμερισμού.

Πίνακας 2-3 Χημική σύσταση Αποβλήτου τούβλου (BW % κ.β).

Waste	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cl
Brick	61.02	18.85	7.87	1.73	3.03	3.40	1.27	0.26	0.89	0.17	0.02

Αντίστοιχα, η ορυκτολογική σύσταση του αποβλήτου τούβλου φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, η οποία πραγματοποιήθηκε μέσω XRD.



Διάγραμμα 2 Ορυκτολογική σύσταση Αποβλήτου τούβλου μέσω XRD

2.3.3 Φωτοβολταϊκό Πάνελ

Το φωτοβολταϊκό όπου χρησιμοποιήθηκε για το παρόν πείραμα είναι μονοκρυσταλλικό μάρκας Hareonsolar 195W. Στον πίνακα 2-3 φαίνεται η χημική σύσταση του φωτοβολταϊκού πάνελ.

Πίνακας 2-4 Αναλυτικός πίνακας από ανάλυση XRF του μη επεξεργασμένου – αλεσμένου φωτοβολταϊκού. (%W/W)

Oxide	Na2O	MgO	SiO2	P2O5	SO3	Cl	K2O	CaO	TiO2	Cr2O3	MnO	Fe2O3	CuO	As2O3	NiO	ZrO2	Nb2O5	Sb2O3	SnO2	TeO2	Br	MoO3
PV	13.61	2.51	70.27	0.11	0.53	0.01	0.03	9.60	0.02	0.30	0.02	1.17	0.04	0.16	0.14	0.07	0.01	0.07	0.03	0.01	0.05	0.03

Για τη συλλογή του PV, που χρησιμοποιήθηκε ως διάλυμα ενεργοποίησης στην παρασκευή του γεωπολυμερούς υλικού ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Συγκομιδή ενός μέρους του φωτοβολταϊκού πάνελ, δηλαδή το φωτοβολταϊκό στοιχείο, το ειδικό γυαλί στο εμπρόσθιο μέρος, το υλικό EVA για την ενθυλάκωση των φωτοβολταϊκών στοιχείων και το ειδικό φύλλο προστασία στο πίσω μέρος (TPT Tedlar).
- Τα ανωτέρω κομμάτια του φωτοβολταϊκού κόπηκαν κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να τοποθετηθούν σε μηχανήμα δόνησης αλεστικού μύλου.



Εικόνα 29 Μηχάνημα δόνησης αλεστικού μύλου του ΕΜΠ Μεταλλειολόγων Μηχανικών

- Μετά την θρυμματίσή τους μέσω της παραπάνω διαδικασίας περισυλλέχθηκε το υλικό σε μικρότερα κομμάτια πλέον (σκόνη), αλλά αφαιρώντας ένα μεγάλο μέρος του φύλλου προστασίας, όπου παρέμεινε σχεδόν στην φυσική του κατάσταση.



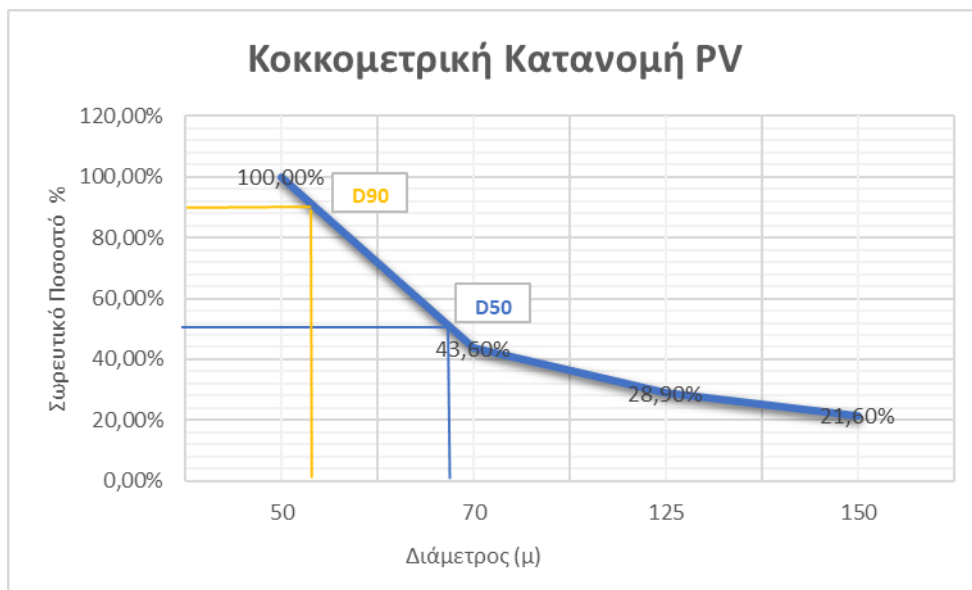
Εικόνα 30 Φωτογραφία μετά την πρώτη άλεση από το μηχάνημα δόνησης

- Το τελευταίο βήμα περιλαμβάνει την περαιτέρω άλεση της σκόνης σε μηχάνημα pulverisette της εταιρείας Fritsch



Εικόνα 31 Μηχάνημα pulverisette της εταιρείας Fritsch του ΕΜΠ τμήμα Χημικών Μηχανικών

Η κοκκομετρική κατανομή της πούδρας φωτοβολταϊκού πάνελ φαίνεται στο διάγραμμα 3 ενώ το τελικό αποτέλεσμα της πούδρας όπου δημιουργήθηκε μέσω της άνω διαδικασίας στην εικόνα 32.



Διάγραμμα 3 Κοκκομετρική κατανομή του φωτοβολταϊκού πάνελ



Εικόνα 32 Πούδρα Φωτοβολταϊκού πάνελ μετά από την άλεση.

2.4 Παραγωγή Διαλύματος ενεργοποίησης

Για την παραγωγή του διαλύματος ενεργοποίησης, βασικό κριτήριο αποτέλεσε το ποσοστό διαλυτοποίησης του φωτοβολταϊκού πάνελ σε αλκαλικό περιβάλλον. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν και διερευνήθηκαν είναι:

- Ο τύπος του αλκαλίου (Na ή K) Σύνθεση του διαλύματος με Αλκαλικό Νάτριο (NaOH) ή αλκαλικό Κάλιο (KOH)

- Ο μοριακός λόγος $[Si]/R_2O$ όπου το R: Na ή K, για λόγους 0.8, 1 και 1.2 για κάθε Αλκάλιο ξεχωριστά.
- Χρόνος διαλυτοποίησης του φωτοβολταϊκού πάνελ στο αλκαλικό περιβάλλον

Τα διαλύματα αναδεύτηκαν σε αυτόκλειστο σύστημα στους 80 °C . Το διάλυμα με τις βέλτιστες τιμές παραμέτρων, χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή γεωπολυμερούς ιπτάμενης τέφρας και απόβλητο τούβλου. Εξετάστηκαν οι αντοχές των τελικών προϊόντων σε μονοαξονική θλίψη και συγκρίθηκαν με δείγματα αναφοράς , που παράχθηκαν με εμπορικά προϊόντα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, εκτελέστηκαν 6 συνθέσεις, τρεις συνθέσεις με αλκαλικό Νάτριο (NaOH) και άλλες τρεις για το αλκαλικό Κάλιο (KOH) και για τους λόγους $[Si]/R_2O = 0.8 , 1 , 1.2$.

2.5 Παραγωγή Υδρογόνου

Για τη μέτρηση του όγκου του παραγόμενου υδρογόνου από την αντίδραση, χρησιμοποιείται η διάταξη AMPTS II (Automatic Methane Potential Test System). Η συγκεκριμένη προορίζεται για τη μέτρηση του όγκου του μεθανίου σε βιολογικές διεργασίες αναερόβιας χώνευσης, όμως εκτελεί ικανοποιητικά και την απαιτούμενη λειτουργία σε αυτή την περίπτωση. Εκτός του ταυτόχρονου υπολογισμού του όγκου του παραγόμενου υδρογόνου σε πολλαπλά διαλύματα, παρέχει, επίσης, τη δυνατότητα παρακολούθησης του ρυθμού με τον οποίο εκλύεται σε πραγματικό χρόνο - για το παρόν πείραμα είναι οι 24 ώρες, όπως και της ρύθμισης της θερμοκρασίας – για το παρόν πείραμα 80 °C.

Αφού πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες προετοιμασίες των δειγμάτων, ρυθμίζεται η θερμοκρασία του θερμοστατικού υδατόλουτρου. Τοποθετούνται οι αναδευτήρες στα δοχεία, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με τους ρυθμιστές και με τη συσκευή μέτρησης όγκου με πλαστικούς ελαστικούς σωλήνες. Μέσω του λογισμικού, εμφανίζονται τα αποτελέσματα των

μετρήσεων όγκου και ογκομετρικής ροής του παραγόμενου αερίου, τα οποία θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 33 Διάταξη AMPTS II (Automatic Methane Potential Test System)

2.6 Σύνθεση Γεωπολυμερούς υλικού με διάλυμα ενεργοποίησης

Για τον προσδιορισμό του γεωπολυμερικού δυναμικού της ιπτάμενης τέφρας και του απρριπτόμενου τούβλου που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, εφαρμόστηκε το πολυπαραγοντικό μοντέλο σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi, και προηγήθηκε από το εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, η αριστοποίηση των συνθηκών διμερούς σύνθεσης με κριτήριο τη βελτιστοποίηση των αντοχών σε θλίψη των τελικών δοκιμίων.

2.6.1 Αριστοποίηση συνθηκών σύνθεσης διμερών γεωπολυμερών.

Φάνηκε πως ο παράγοντας με την σημαντικότερη επίδραση στη σύνθεση των γεωπολυμερών είναι ο μοριακός λόγος $[Si]/R_2O$ και αναπαράχθηκε σε κάθε επόμενη σύνθεση. Συγκεκριμένα, περιγράφει την συνολική ποσότητα διαλυτού πυριτίου που περιέχεται στο διάλυμα ενεργοποίησης προς το οξείδιο του αλκαλίου που περιέχεται στο διάλυμα ενεργοποίησης. Ωστόσο, σε όλες τις συνθέσεις επιλέχθηκε η χρήση μόνο υδροξειδίου του νατρίου $NaOH$, για την απλοποίηση της αναπαραγωγής των αποτελεσμάτων με στερεούς ενεργοποιητές. Έτσι, μοριακός λόγος που εκφράζει το είδος των αλκαλίων στο διάλυμα ενεργοποίησης είναι $Na/Na+K$, παρέμεινε σε όλες τις συνθέσεις ίσος με 1.0. Τέλος, η αλκαλικότητα των διαλυμάτων

ενεργοποίησης εκφρασμένη ως μοριακή αναλογία νατρίου προς αλουμίνιο Na/Al, παρέμεινε σταθερή και ίση με 1, σε όλες τις περιπτώσεις

2.6.2 Παραγωγή διμερών γεωπολυμερών

Μέσα από την διερεύνηση που παρουσιάστηκε στην υποπαράγραφο 2.3 χρησιμοποιήθηκε το βέλτιστο διάλυμα ενεργοποίησης όπως προέκυψε από την υποπαράγραφο.

Για την παραγωγή του γεωπολυμερούς υλικού, διαλύθηκε σε απιονισμένο νερό η επιθυμητή ποσότητα καυστικού αλκαλίου, σύμφωνα με τις συνθήκες της σύνθεσης. Λόγω του ισχυρά εξώθερμου χαρακτήρα της αντίδρασης διαλυτοποίησης του καυστικού αλκαλίου, το διάλυμα αναδεύτηκε έως ότου η θερμοκρασία του επανέλθει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έπειτα, προστέθηκε σταδιακά, η υπολογισμένη σύμφωνα με το κάθε πείραμα, ποσότητα διαλύματος πυριτίας (SiO₂ 50% w/w). Όλη η διαδικασία πραγματοποιήθηκε υπό διαρκή ανάδευση έως ότου διαλυτοποιηθεί πλήρως και η πυριτία (~1 ώρα ανάδευσης). Το διάλυμα που προέκυψε από αυτήν τη διαδικασία ήταν διαυγές και χρησιμοποιήθηκε σε θερμοκρασία δωματίου.

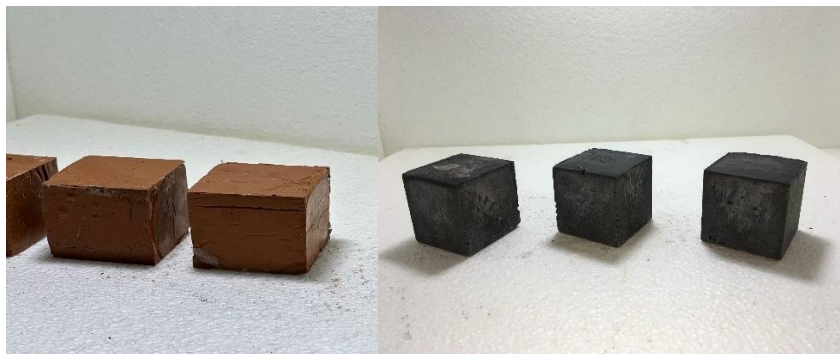
Στην συνέχεια, το διάλυμα ενεργοποίησης τοποθετήθηκε σε μίξερ κονιαμάτων (Controls 65-L0005) όπου προστέθηκε σταδιακά η ιπτάμενη τέφρα, υπό συνεχή ανάδευση. Η μηχανική ανάδευση είχε διάρκεια για όσο χρονικό διάστημα απαιτήθηκε για την πλήρη διαβροχή της στερεής πρώτης ύλης από το υγρό διάλυμα και το σχηματισμό ενός ομοιογενούς πολτού. Ακολουθεί χύτευση του πολτού σε κυβικά καλούπια διαστάσεων 50x50x50mm και ήπια δόνηση ώστε να απομακρυνθεί τυχόν εγκλωβισμένος αέρας. Για κάθε σύνθεση παρασκευάζονται 3 κυβικά δοκίμια. Τα δοκίμια διατηρούνται σε θερμοκρασία δωματίου για 2h πριν την σκλήρυνση τους. Στις περιπτώσεις χρήσης των Για κάθε αργιλοπυριτική πρώτη ύλη η θερμοκρασία θέρμανσης του δοκιμίου είναι διαφορετική, δηλαδή για την ιπτάμενη τέφρα ανέρχεται σταδιακά στους 70°C, ενώ στην περίπτωση χρήσης του αποβλήτου τούβλου στους 80°C. Μετά από 48 ώρες ακολουθεί σταδιακή ψύξη των δοκιμίων. Στο τέλος της διαδικασίας αυτής τα τελικά προϊόντα απομακρύνονται από τις μήτρες και διατηρούνται αεροστεγώς σε συνθήκες περιβάλλοντος για 7 ημέρες πριν πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις αντοχών σε θλίψη.



Εικόνα 34 Αριστερή φωτογραφία: Μηχάνημα γεωπολυμερισμού υλικών και Δεξιά φωτογραφία μήτρα των γεωπολυμερών.

Ο λόγος στερεών/υγρών (s/l) μεταβλήθηκε κατάλληλα ανά περίπτωση ώστε να επιτευχθεί παραπλήσια εργασιμότητα σε όλες τις παρασκευασθέντες πάστες.

Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία για τον γεωπολυμερισμό του απορριπτόμενου τούβλου, χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά αντί για ιπτάμενη τέφρα την πούδρα του απορριπτόμενου τούβλου.



Εικόνα 35 Αριστερά: Γεωπολυμερή υλικά με σύνδεση αποβλήτου τούβλου – διάλυμα ενεργοποίησης από το PV1 NAOH, Δεξιά: Γεωπολυμερή υλικά με σύνδεση Ιπτάμενης τέφρας – διάλυμα ενεργοποίησης από το PV1 NAOH.

2.7 Μέθοδοι Χαρακτηρισμού

Φθοροσιμετρία Ακτίνων X

Η χημική σύσταση των αργιλοπυριτικών πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα, προσδιορίστηκε μέσω φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων X (XRF) με την χρήση αντίστοιχου οργάνου, μοντέλου Epsilon 1, της Malvern Panalytical.

Προσδιορισμός θλιπτικών αντοχών

Η δοκιμή των τελικών προϊόντων σε μονοαξονική ανεμπόδιστη θλίψη πραγματοποιήθηκε σε ειδική πρέσα της Matest, μοντέλο E181N, με ρυθμό φόρτισης 1,5 KN/s, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ASTM C109. Ο προσδιορισμός των αντοχών σε θλίψη κάθε δείγματος προκύπτουν από το μέσο όρο τριών μετρήσεων.

Περίθλασιμετρία ακτίνων X

Ο ορυκτολογικός χαρακτηρισμός των πρώτων υλών, των στερεών ενεργοποιητών και των προϊόντων πραγματοποιήθηκε με περίθλαση ακτίνων X (XRD), με τη χρήση του οργάνου D8 ADVANCE της Bruker το οποίο λειτουργεί με λυχνία CuK α . Οι συνθήκες μέτρησης ήταν συνεχής σάρωση σε εύρος γωνιών 2 θ , 10-70°, βήμα σάρωσης 0,1°/sec και χρόνο βήματος 1sec. Τα δεδομένα αξιολογήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού Diffrac Eva v3.1.

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν οι τρόποι επεξεργασίας του φωτοβολταϊκού πάνελ μετά την διαδικασία της άλεσης ώστε να εξαχθούν τα αποτελέσματα για την δημιουργία του τελικού διαλύματος ενεργοποίησης το οποίο συμμετείχε στον γεωπολυμερισμό και θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της παραγωγής του Υδρογόνου κατά τη διάκριση της ανάδευσης του διαλύματος ενεργοποίησης.

3.1 Τρόπος επεξεργασίας φωτοβολταϊκού πάνελ

Εκτελέστηκαν στο σύνολο 6 πειράματα ώστε να δούμε την τελική τους σύσταση στο διάλυμα ενεργοποίησης.

Σε κάθε περίπτωση πειράματος και με βάση την αναλογία του στερεού/υγρού είχαμε συγκεκριμένες ποσότητες από Αλκάλιο – απιονισμένο νερό και πρώτη ύλη φωτοβολταϊκού (το αλεσμένο φωτοβολταϊκό < 90 μm, όπου περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.3)

Οπότε στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά οι ποσότητες για τα Αλκάλια πριν και μετά την ξήρανση του διαλύματος PV – NaOH ή KOH – H₂O για τους λόγους [Si]/Na₂O = **0.8, 1 και 1.2**

Πίνακας 3-1 Συνθέσεις πειραματικών διαλυμάτων

Τύπος Σύνθεσης	Παράμετροι			Αρχική Σύνθεση			Τελική Σύνθεση
	Si/R ₂ O	T (°C)	Αλκάλιο	H ₂ O (gr)	R ₂ OH (gr)	PV (gr)	Ίζημα (gr)
PV0.8_Na	0.8	80	Na	203	48.44	42.06	42.41
PV1_Na	1	80	Na	211	40.37	43.69	44.37
PV1.2_Na	1.2	80	Na	200.46	32.3	41.37	42.03
PV0.8_K	0.8	80	K	199.38	67.96	41.55	51.54
PV1_K	1	80	K	200	51.42	41.27	50.33
PV1.2_K	1.2	80	K	228.9	51.42	47.11	54.52

Η διαδικασία που θα περιγραφεί παρακάτω δεν έγινε μαζικά σε όλα τα δείγματα, αλλά ξεχωριστά στο καθένα, ώστε να υπάρχει χρόνος ξήρανσης αλλά και δημιουργία της πρώτης ύλης από το φωτοβολταϊκό πάνελ. Μετά την παρασκευή των παραπάνω έξι διαλυμάτων με τις συγκεκριμένες ποσότητες που φαίνονται στον πίνακα 3-1 έγινε ανάδευση σε διάταξη AMPTS II στους 80 °C για 24 ώρες με παράλληλη ογκομέτρηση αερίου υδρογόνου.

Το κάθε διάλυμα θα περάσει από μία **διάταξη διήθησης υπό κενό**, όπου στο διηθητικό χαρτί θα απομείνει το **ίζημα του διαλύματος** και στην **φιάλη το υγρό διάλυμα ενεργοποίησης** που θα εξετασθεί για κάθε πειραματική διάταξη, δηλαδή έξι φορές, ώστε να καταλήξουμε στο καταλληλότερο.

Το ίζημα κάθε διαλύματος έμεινε εντός του φούρνου στους 70 °C για 24 ώρες, πριν την μέτρηση έτσι ώστε να μην περιέχει υγρασία. Τα αποτελέσματα της μέτρησης των ποσοτήτων φαίνονται στον πίνακα 3-1, τρεις ποσότητες από την πειραματική διαδικασία με χρήση NaOH (Αλκαλικό Νάτριο – Καυστικό Νάτριο) και άλλες τρεις από την πειραματική διαδικασία με χρήση KOH (Αλκαλικό Κάλιο – Καυστικό Κάλιο).

Το επόμενο στάδιο για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων ήταν η ανάλυση όλων των δειγμάτων του πίνακα μέσω XRF ποσοτικοποιήθηκε η χημική σύσταση των ιζημάτων.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του XRF των ιζημάτων.

COMPOUND	PV 0.8 Na %	pv 1 Na %	pv 1.2 Na %	pv 1 K %
Na ₂ O	34.71	31.18	31.72	3.55
Al ₂ O ₃	1.15	1.17	1.14	
SiO ₂	31.66	34.95	35.46	30.02
SO ₃	0.23	0.20	0.29	0.18
K ₂ O	0.12	0.10	0.11	34.89
CaO	9.67	10.00	9.03	9.4
TiO ₂	0.03	0.02	0.03	0.02
Cr ₂ O ₃	0.31	0.30	0.28	0.18
MnO	0.02	0.02	0.02	0.01
Fe ₂ O ₃	1.22	1.18	1.08	0.77
NiO	0.14	0.14	0.13	0.07
CuO	0.04	0.04	0.04	0.03
As ₂ O ₃	0.06	0.06	0.07	0.05
ZrO ₂	0.01	0.01	0.01	0.01
MoO ₃	0.03	0.03	0.03	0.02
SnO ₂	0.02	0.02	0.02	0.03
Sb ₂ O ₃	0.06	0.06	0.06	0.09
TeO ₂	0.01	0.01	0.01	0.01

BaO		0.02		0.03
CeO ₂	0.01			
PbO	0.03	0.03	0.02	0.02

Πίνακας 3-2 Αναλυτικός πίνακας από ανάλυση XRF της σύνθεσης PV 0.8 Na, PV 1 Na, PV 1.2 Na και PV1 K. (%W/W)

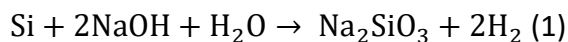
Κάποια από τα διαλύματα ενεργοποίησης εξετάστηκαν μέσω ατομικής απορρόφησης από το τμήμα Μεταλλειολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, ώστε να μετρηθούν πειραματικά τα στοιχεία Si, Na και K στο διάλυμα ενεργοποίησης. (Στο NaOH διεξήχθη για λόγους 0.8 και 1, ενώ για το KOH για τον λόγο 1). Διαπιστώθηκε ότι, τα πειραματικά αποτελέσματα του διαλύματος ενεργοποίησης μέσω της ατομικής απορρόφησης σε σχέση με τη διαδικασία μέτρησης του ιζήματος μέσω xrf και άρα την θεωρητική εξεύρεση των στοιχείων Si, Na και K στο διάλυμα ενεργοποίησης, η απόκλιση των αποτελεσμάτων υπολογίστηκε λιγότερη από 10 % (αποδεκτή τιμή πειραματικών διαδικασιών), με αποτέλεσμα την συνέχεια της διαδικασίας μόνο μέσω του xrf, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τον χρόνο εκτέλεσης των πειραμάτων.

3.2 Παραγωγή Υδρογόνου

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο 2.5 κατά την ανάδευση των διαλυμάτων αλκαλίου (NaOH ή KOH) – H₂O – PV παράγεται αέριο Υδρογόνου. Για να μετρηθεί η ποσότητα αυτή, η καλύτερη λύση ήταν αντί η ανάδευση να γίνει σε κάποια διάταξη όπου θα υπήρχε η διαφυγή του αερίου, να διεξαχθεί σε διάταξη AMPTS II, η οποία μετράει τον όγκο αερίου και αναδύει το διάλυμα. Με αυτό τον τρόπο αποτελέσματα σε κάθε μία από τις έξι μετρήσεις, απευθείας από την διάταξη μέτρησης αερίων.

Μία σημαντική σημείωση είναι ότι στην παρουσίαση των πρακτικών αποτελεσμάτων θα υπάρχουν κάποιες απώλειες λόγω γρήγορης εξώθερμης αντίδρασης, οπότε η ποσότητα παραγωγής αερίου είναι υψηλότερη από αυτή που έχει μετρηθεί.

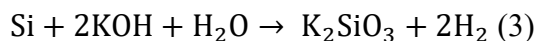
Η αντίδραση που πραγματοποιείται κατά την παραγωγή Υδρογόνου με αλκαλικό Νάτριο και νερό είναι:



Ενώ λαμβάνει χώρα και η παρακάτω αντίδραση χωρίς όμως να παράγεται Υδρογόνο.



Οι αντίστοιχες αντιδράσεις που πραγματοποιείται κατά την παραγωγή Υδρογόνου με αλκαλικό Κάλιο είναι:



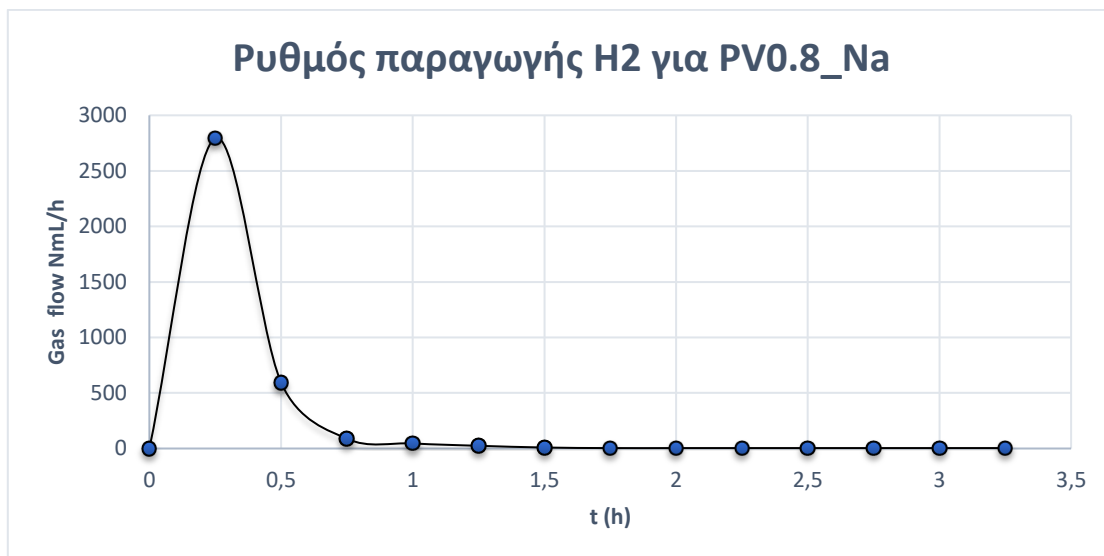
Σύμφωνα με την αντίδραση 1 και 3, βιβλιογραφικά το 3 % του συνολικού όγκου του φωτοβολταϊκού πάνελ αποτελείται από κρυσταλλικό πυρίτιο (Athanaïlidis V. Ilias, 2018) και αντιδράει με το Αλκάλιο ώστε να παραχθεί Υδρογόνο.

Στον πίνακα 3-3 παρουσιάζονται οι παράμετροι και τα αποτελέσματα του ρυθμού παραγωγής υδρογόνου κατά την ανάδευση των έξι πειραματικών διαλυμάτων.

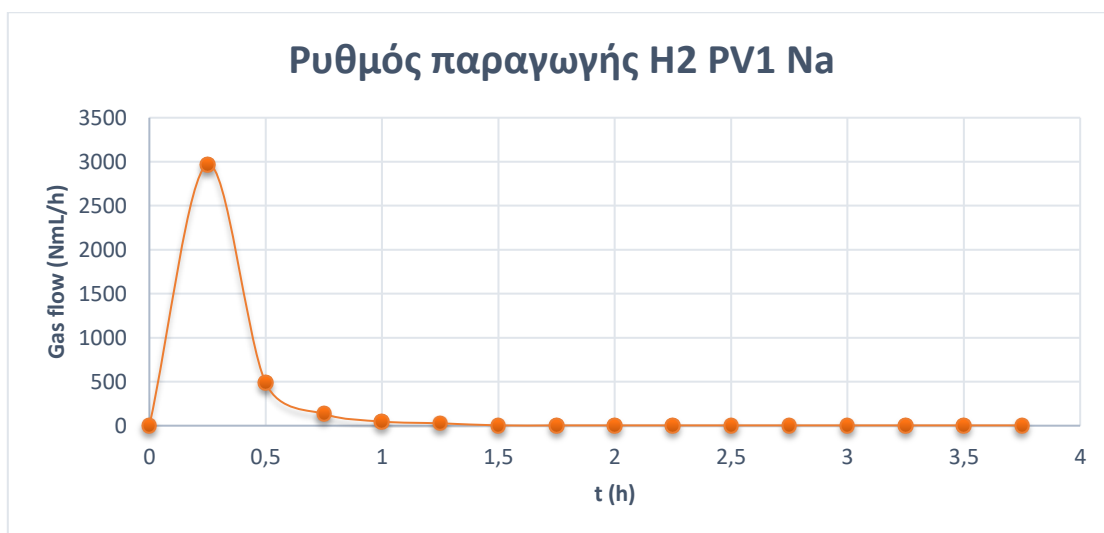
Πίνακας 3-3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων παραγωγής υδρογόνου

ΤΥΠΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	T °C	ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ (h)	ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ H ₂ (Nml/h)	ΟΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ H ₂ (h)
PV0.8_Na	80	24	2793.3	3.25
PV1_Na	80	24	2968.2	3.75
PV1.2_Na	80	24	2881.2	6.75
PV0.8_K	80	24	3003	1.25
PV1_K	80	24	2022.4	1.25
PV1.2_K	80	24	2784.9	1.25

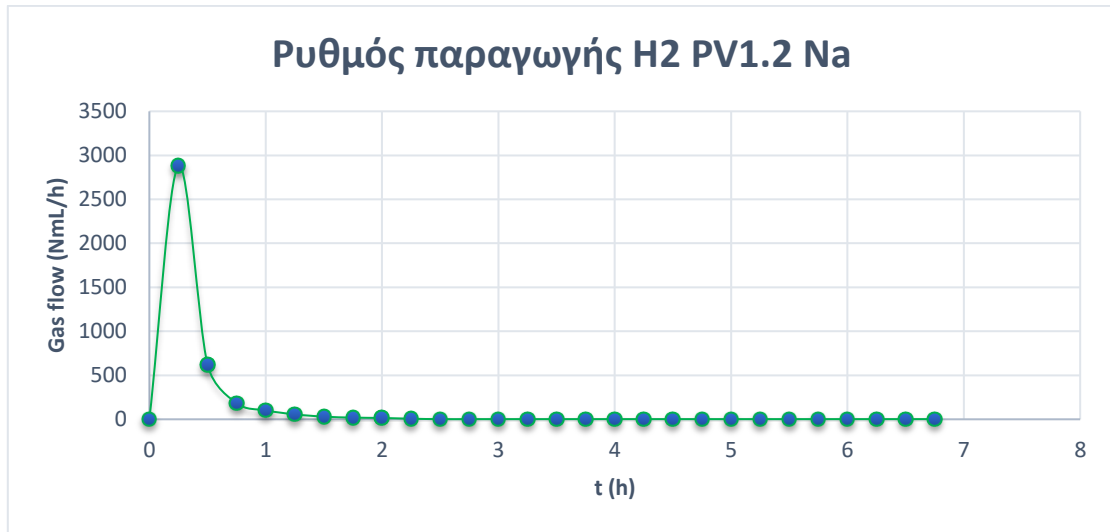
Στα διαγράμματα 4 έως 9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την μέτρηση του ρυθμού παραγωγής Υδρογόνου μέσω της διάταξης, για κάθε μία από τις έξι πειραματικές συνθέσεις του διαλύματος ενεργοποίησης.



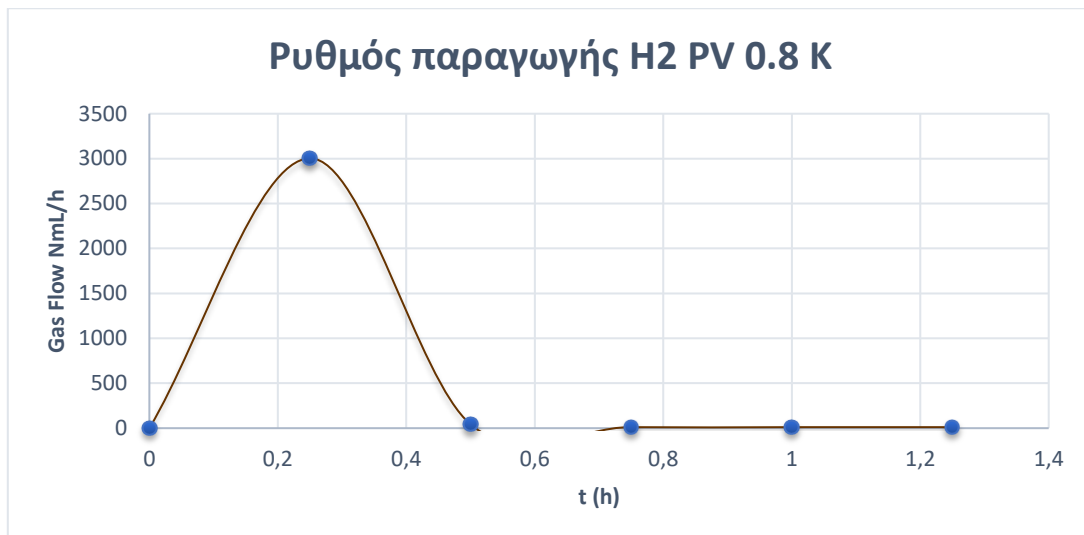
Διάγραμμα 4 Ρυθμός παραγωγής Υδρογόνου κατά την ανάδευση του διαλύματος PV 0.8 NAOH



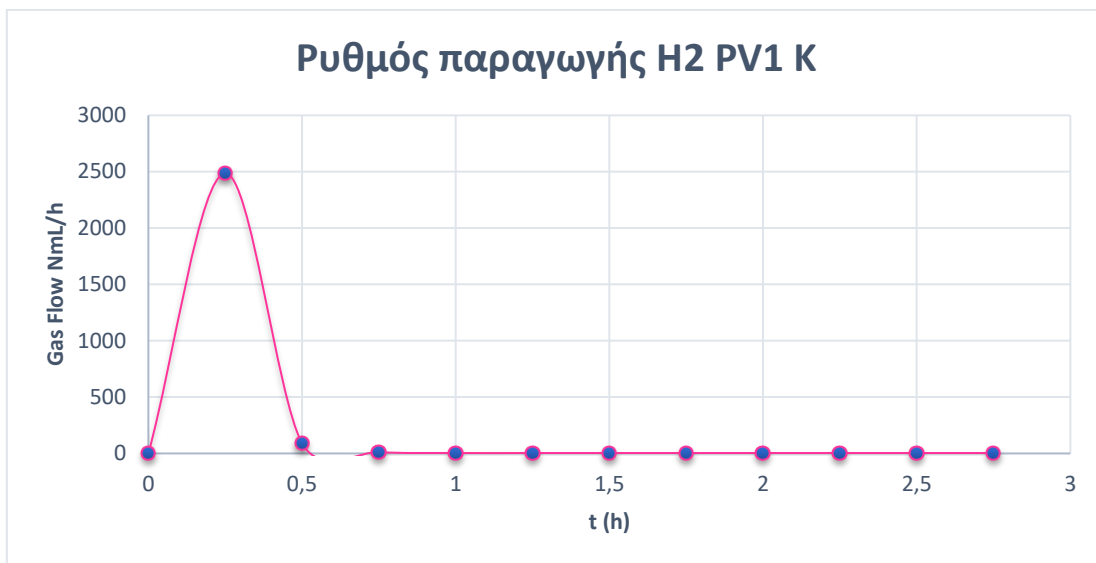
Διάγραμμα 5 Ρυθμός παραγωγής Υδρογόνου κατά την ανάδευση του διαλύματος PV 1 NAOH



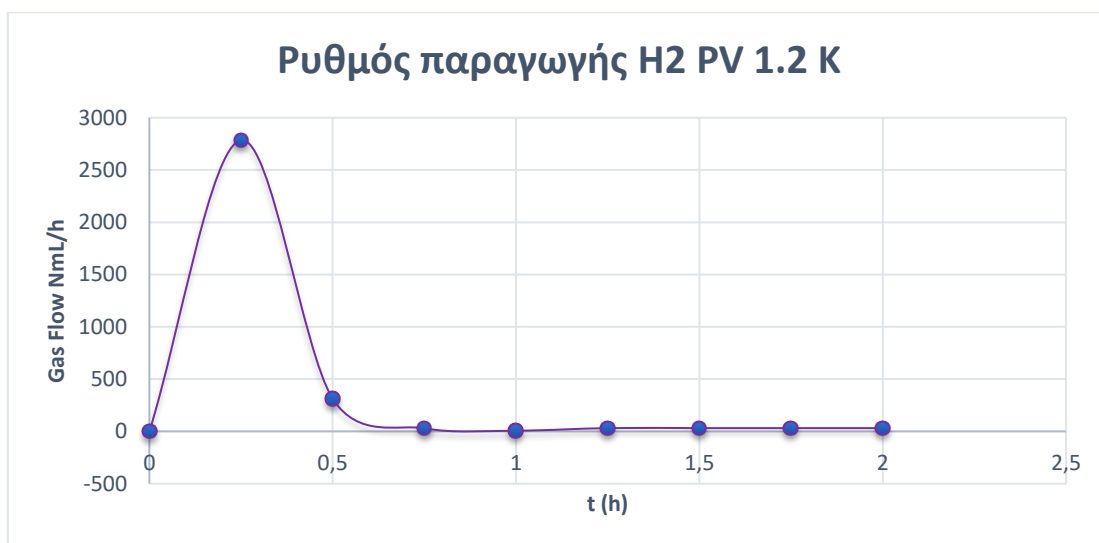
Διάγραμμα 6 Ρυθμός παραγωγής Υδρογόνου κατά την ανάδευση του διαλύματος PV 1.2 NaOH



Διάγραμμα 7 Ρυθμός παραγωγής Υδρογόνου κατά την ανάδευση του διαλύματος PV 0.8 KOH



Διάγραμμα 8 Ρυθμός παραγωγής Υδρογόνου κατά την ανάδευση του διαλύματος PV 1 KOH



Διάγραμμα 9 Ρυθμός παραγωγής Υδρογόνου κατά την ανάδευση του διαλύματος PV 1.2 KOH

3.3 Επιλογή Διαλύματος Ενεργοποίησης

Πίνακας 3-4 Τελική επιλογή διαλύματος για τη σύνθεση του γεωπολυμερισμού με βάση τις παραμέτρους.

	Initial			solution			Επιλογή
Alkali	SiO ₂ /(Na ₂ O+K ₂ O)	T (oC)	Time (h)	Si yield	Alkali yield	SiO ₂ /(Na ₂ O+K ₂ O)	
Na	0,8	80	24	54,6	66,0	0,58	
	1,0	80	24	53,4	60,6	0,75	
	1,2	80	24	41,9	58,4	0,70	
K	0,8	80	24	31,8	72,5	0,12	
	1,0	80	24	45,0	61,7	0,64	
	1,2	80	24	43,9	65,1	0,65	

Για να γίνει η τελική επιλογή, όπως αναφέρθηκε, εξετάστηκαν τα δείγματα XRF και μέσω της θεωρητικής επίλυσης των αποτελεσμάτων διεξήχθη η τελική επιλογή με τις κατάλληλες παραμέτρους για γεωπολυμερισμό.

Στον παραπάνω πίνακα παρατίθενται όλες οι μετρήσεις των συνθέσεων με βάση τις παραμέτρους που εξετάστηκαν και αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2.4. Για την τελική επιλογή του καταλληλότερου διαλύματος ενεργοποίησης για την παρασκευή διμερούς γεωπολυμερούς εξετάστηκε η ποσότητα της μετατροπής του πυριτίου και ο μοριακός λόγος SiO₂/(Na₂O+K₂O) στο διάλυμα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια το Na οδηγεί σε καλύτερη διαλυτοποίηση του αποβλήτου πετυχαίνοντας παράλληλα τους μεγαλύτερους μοριακούς λόγους SiO₂/(Na₂O+K₂O) εξυπηρετώντας την διαλυτοποίηση της ιπτάμενης τέφρας και του απορριπτόμενου τούβλου.

Επίσης, από τους λόγους $\text{SiO}_2/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})_{\text{initial}}$ που εξετάστηκαν προκρίθηκε ο λόγος 1 καθώς η μετατροπή του πυριτίου είναι σχεδόν η ίδια με το δείγμα NaOH 0.8, αλλά παράλληλα μεγιστοποιείται ο λόγος $\text{SiO}_2/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ στο τελικό διάλυμα.

Στον πίνακα 3-2 παρουσιάζεται το XRF του ιζήματος του βέλτιστου διαλύματος ενεργοποίησης, δηλαδή το PV1 NAOH.

Το διήθημα, δηλαδή το βέλτιστο διάλυμα ενεργοποίησης που χρησιμοποιήθηκε για τη σύνθεση των γεωπολυμερών υλικών, είχε υποστεί και ακόμα μία πειραματική διαδικασία ατομικής απορρόφησης στα εργαστήρια των Μηχανολόγων Μηχανικών, με αποτέλεσμα 58,74 g/lit Na και 27,73 g/lit Si.

3.4 Σύνθεση Γεωπολυμερούς υλικού και θλιπτικές αντοχές

Για τη σύνθεση των γεωπολυμερών υλικών με διαφορετική αργιλοπυριτική πρώτη ύλη, όπως έχει αναφερθεί αναλυτικά η διαδικασία της παραγωγής διμερών γεωπολυμερών στο κεφάλαιο 2.5, είναι η ίδια και για τις δύο συνθέσεις. Και οι δύο συνθέσεις περιλαμβάνουν το διάλυμα ενεργοποίησης από το φωτοβολταϊκό πάνελ με τις βέλτιστες αναλογίες που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3.3 ενώ διαφοροποιούνται στην αργιλοπυριτική πρώτη ύλη (απορριπτόμενο τούβλο και ιπτάμενη τέφρα).

Τα γεωπολυμερή ιπτάμενης τέφρας και απόβλητο τούβλου έχουν μελετηθεί εκτεταμένα στο εργαστήριο. Έχει γίνει αριστοποίηση και των δύο αργιλοπυριτικών υλών με κριτήριο τις μέγιστες μηχανικές αντοχές και πλήρης χαρακτηρισμός των τελικών προϊόντων. Στο Πίνακα 3-5 φαίνονται οι μέγιστες θλιπτικές αντοχές των διμερών γεωπολυμερών που παρασκευάστηκαν με τις δύο διαφορετικές πρώτες ύλες.

Πίνακας 3-5 Αποτελέσματα παραμέτρων και θλιπτικών αντοχών των γεωπολυμερών συνθέσεων.

ΤΥΠΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ			ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ (Mpa)
	Si/Al	R/Al	Na/Na+K	
G_FA_PV1NA	2.18	0.75	1	18.8
G_BW_PV1NA	3	0.75	1	32.9

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η παρούσα πειραματική εργασία προτείνει έναν τρόπο μεγιστοποίησης της αξιοποίησης των απορριμάτων που μπορούν να δημιουργηθούν από: τα φωτοβολταϊκά πάνελ στο τέλος κύκλου ζωής τους, τα απορρίματα τούβλου αλλά και την ιπτάμενη τέφρα, στην τεχνολογία των γεωπολυμερών. Το απορριπτόμενο τούβλο και η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιήθηκαν ως αργιλοπυριτικές πρώτες ύλες ενώ το βέλτιστο διάλυμα του φωτοβολταϊκού πάνελ ως διάλυμα ενεργοποίησης στο γεωπολυμερισμό. Κατά τη διάρκεια της παρασκευής διαλύματος ενεργοποίησης μελετήθηκε και ο όγκος παραγωγής υδρογόνου. Παράλληλα, στο επόμενο υποκεφάλαιο θα καταγραφούν κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα στην αναφερόμενη τεχνολογία των πρώτων υλών για το γεωπολυμερισμό, ώστε να βελτιωθεί η αντοχή τους ή ο τρόπος επεξεργασίας.

4.1 Διάλυμα ενεργοποίησης και Γεωπολυμερισμός

- Το γεωπολυμερές με αργιλοπυριτική πρώτη ύλη από απορριπτόμενο τούβλο και με διάλυμα ενεργοποίησης από το φωτοβολταϊκό πάνελ μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί με επιτυχία ως δομικό υλικό, καθώς τα δομικά χαρακτηριστικά του είναι παρόμοια με αυτά των εμπορικών προϊόντων (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 32,9 MPa). Η σύνθεση γεωπολυμερών βελτιστοποιήθηκε αποτελεσματικά με την εφαρμογή της μεθόδου Taguchi, μιας κλασματικής πολυπαραγοντικής μεθοδολογίας σχεδιασμού.
- Το γεωπολυμερές με αργιλοπυριτική πρώτη ύλη ιπτάμενη τέφρα και διάλυμα ενεργοποίησης επίσης από το φωτοβολταϊκό πάνελ έχει ικανοποιητικές αντοχές σε μονοαξονική θλίψη (> 10 MPa), όμως δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό π.χ. θεμελίωσης, παρά μόνο ως υποστηρικτικό υλικό για κάποιες εσωτερικές κατασκευές πχ διακοσμητικό τοιχίο.
- Τα δύο γεωπολυμερή υλικά έχουν τον ίδιο λόγο $R/Al = 0,75$ ($R = \text{Αλκάλιο}$) και διαφέρουν στον λόγο Si/Al . Η εισαγωγή επιπλέον πυρίτιο στη σύνθεση, μέσω του

διαλύματος ενεργοποίησης, ευνοεί την παρασκευή γεωπολυμερών προϊόντων με βελτιωμένη μηχανική απόδοση. Τα επιπλέον ιόντα πυριτίου ευνοούν το σχηματισμό της μήτρα του γεωπολυμερούς ενεργώντας ως σημεία πυρήνωσης για τις αντιδράσεις πολυσυμπύκνωσης. (Duxson, Mallicoat, Lukey, Kriven, & Deventer, 2007) (Κιουρπίς, Σκαροπούλου, Τσιβίλης, & Κακάλι, Valorization of Brick and Glass CDWs for the Development of Geopolymers Containing More Than 80% of Wastes, 2020)

- Το διάλυμα ενεργοποίησης από το μέρος του φωτοβολταϊκού πάνελ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση διαλύματος ενεργοποίησης, αντί των εμπορικών προϊόντων, για τη σύνθεση των γεωπολυμερών και για τις δύο αργιλοπυριτικές πρώτες ύλες. Η βέλτιστη σύνθεση που ικανοποιεί τον λόγο του γεωπολυμερισμού είναι το PV με λόγο $[Si]/Na_2O = 1$ (διαλυτό πυρίτιο / Οξείδιο του Νατρίου) και χρήση NaOH (Υδροξείδιο του Νατρίου).
- Τα γεωπολυμερή υλικά είναι μία νέα τεχνολογία η οποία εφαρμόζεται ήδη στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας, χρησιμοποιώντας πρώτες ύλες που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν πχ ιπτάμενη τέφρα, απόβλητο τούβλου, οι οποίες σε άλλη περίπτωση θα απορρίπτονταν εργοστασιακά, αυξάνοντας τα ποσοστά CO₂ στην ατμόσφαιρα. Όμως, η καινοτομία στην παρούσα μελέτη βρίσκεται στην διερεύνηση των παραμέτρων του διαλύματος ενεργοποίησης από μέρος φωτοβολταϊκού πάνελ ώστε να αντικαταστήσει τα εμπορικά προϊόντα, ελαχιστοποιώντας ακόμα περισσότερο τη χρήση αυτών των εμπορικών προϊόντων και επαναχρησιμοποιώντας ένα απορριπτόμενο υλικό.
- Το φωτοβολταϊκό πάνελ είναι μία τεχνολογία αρκετά διαδεδομένη με χρόνο ζωής μέχρι 25 χρόνια, άρα δεν έχει προλάβει να κλείσει τον κύκλο ζωής έχοντας χαμηλό όγκο απόβλητων τη δεδομένη χρονική στιγμή σε σχέση με τα μελλοντικά που θα δημιουργηθούν, καθώς πλέον είναι οικονομικά προσβάσιμα για οικιακή χρήση. Άρα, είναι αναγκαία η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση μελών του πάνελ, ώστε να μην παράγεται μεγάλος όγκος αποβλήτων από μία τεχνολογία που εντάσσεται στις Α.Π.Ε. και κατ'επέκταση να συμβαδίζει με τις οδηγίες της Ε.Ε. περί ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων.

4.2 Παραγωγή Υδρογόνου

- Το μεγαλύτερο ποσοστό υδρογόνου παράγεται μέσω της αντίδρασης $\text{Si} + 2\text{NaOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 + 2\text{H}_2$ (1), συμμετέχοντας κυρίως το solar cell του φωτοβολταϊκού πάνελ, το οποίο περιέχει μεταλλικό πυρίτιο (3 % της συνολικής μάζας του φωτοβολταϊκού πάνελ).
- Από τα πειραματικά αποτελέσματα, παρατηρήθηκε ότι η παραγωγή υδρογόνου έχει ολοκληρωθεί σε κάθε δείγμα διαφορετική ώρα, μέγιστος χρόνος ολοκλήρωσης 6,75 ώρες και ελάχιστος χρόνος 1,25 ώρες, με μέσο όρο για όλα τα δείγματα 3 ώρες. Η παραγωγή του αερίου υδρογόνου για τη βέλτιστη σύνθεση που διαλύματος ενεργοποίησης ολοκληρώθηκε στις 3,75 ώρες με σταθεροποίηση του όγκου παραγωγής αερίου στις 2,5 ώρες.
- Σε όλα τα δείγματα παρατηρήθηκε ότι η μεγαλύτερο όγκος αερίου παράχθηκε μέχρι την πρώτη ώρα της ανάδευσης του διαλύματος. Συγκεκριμένα στο βέλτιστο διάλυμα PV1 NaOH παρήχθησαν 1050 ml H_2 σε 2,5 ώρες. Για το βέλτιστο διάλυμα ενεργοποίησης έχουμε 1050 ml H_2 που αντιστοιχούν σε 43.69 gr φωτοβολταϊκού πάνελ. Άρα 24 ml H_2 /gr φωτοβολταϊκού πάνελ.
- Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε έχει την ονομασία AMPTS II (Automatic Methane Potential Test System), όπως αναφέρθηκε και στο υπόκεφάλαιο 2.5. Η συγκεκριμένη προορίζεται για τη μέτρηση του όγκου του μεθανίου σε βιολογικές διεργασίες αναερόβιας χώνευσης, όμως εκτελεί ικανοποιητικά και την απαιτούμενη λειτουργία σε αυτή την περίπτωση.
- Το υδρογόνο που παράγεται κατά την παρασκευή του διαλύματος ενεργοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί από έναν σταθμό παραγωγής υδρογόνου μικρής κλίμακας χρησιμοποιώντας το απόβλητο πυριτίου του φωτοβολταϊκού πάνελ ως κύριο συστατικό ή μπορεί να είναι μέρος μιας μεγαλύτερης εγκατάστασης παραγωγής πράσινων καυσίμων που περιλαμβάνει κυψέλη καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας υδρογόνο ως αέριο καύσιμο.

4.3 Μελλοντική Έρευνα

Πολλές εφαρμογές θα μπορούσαν να διερευνηθούν με βάση την παρούσα διερεύνηση του διαλύματος ενεργοποίησης, την αριστοποίηση παραμέτρων διμερών γεωπολυμερών και τέλος την παραγωγή υδρογόνου. Παρακάτω θα σημειωθούν προτάσεις περαιτέρω έρευνας.

- Μία πρώτη παρατήρηση σε σχέση με το γεωπολυμερές με διάλυμα ενεργοποίησης από μέρος του φωτοβολταϊκού πάνελ και από ιπτάμενη τέφρα είναι η βελτιστοποίηση των αντοχών μονοαξονικής θλίψης. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί, αν προστεθούν αδρανή υλικά στο σκυρόδεμα που έχει ήδη δημιουργηθεί ώστε να ελεγχθεί ξανά η αντοχή και κατά πόσο αυξάνεται. Τα παραπάνω αδρανή υλικά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν είναι μέλη του TPT-Tedlar, όπου στην προκείμενη δεν χρησιμοποιήθηκαν.
- Ένα ακόμη κομμάτι που θα μπορούσε να διερευνηθεί είναι ο απαιτούμενος όγκος του ιζήματος, το οποίο θα μπορούσε να λειτουργήσει ως αδρανές υλικό για την βελτιστοποίηση της αντοχής του γεωπολυμερούς.
- Σχετικά με το ίζημα του διαλύματος, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μία ανάλυση ορυκτολογικής και χημικής σύστασης, ώστε να διερευνηθεί η χρήση του σε άλλες εφαρμογές.
- Σχετικά με την παραγωγή υδρογόνου, θα μπορούσε να γίνει μία εκτεταμένη παρατήρηση σε περισσότερα δείγματα, ώστε να εξαχθεί συμπέρασμα κατά πόσο επηρεάζει το είδος του αλκαλίου στον ρυθμό παραγωγής του υδρογόνου.
- Παράλληλα θα μπορούσε να διεξαχθεί τεχνοοικονομική μελέτη δημιουργίας μικρής κλίμακας σταθμού παραγωγής του παρόντος διαλύματος ενεργοποίησης με ταυτόχρονη αποθήκευση η κατανάλωση υδρογόνου που παράγεται από την παραπάνω διαδικασία.
- Η παραγωγή γεωπολυμερούς από φωτοβολταϊκό πάνελ μπορεί να προστεθεί σε μελέτες ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) των φωτοβολταϊκών, ως μέθοδος ανακύκλωσης μέσου του συστήματος.

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξένη βιβλιογραφία

- Adami, L., & Schiavon, M. (2021, January 18). From Circular Economy to Circular Ecology: A Review on the Solution of Environmental Problems through Circular Waste Management Approaches. *Waste Management and Application of the Principles of the Circular Economy*, 13(2), σ. 925. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3390/su13020925>
- Alami, I., & al, e. (2023). International financial subordination: a critical research agenda. *Review of International Political Economy*, 30(4), 1360-1386. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1080/09692290.2022.2098359>
- Alhazmi, H., & Syeed Adnan, R. (2021, May 23). Utilization of Polymer Concrete Composites for a Circular Economy: A Comparative Review for Assessment of Recycling and Waste Utilization. *Polymers and the Circular Economy Model*, 13(13), σ. 2135. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3390/polym13132135>
- Allahverdi, A., & Najafi, E. (2009). Construction Wastes as Raw Materials for Geopolymer Binders. *International Journal of Civil Engineering*, 7(3), 154-160. Ανάκτηση από https://www.researchgate.net/publication/279601477_Construction_Wastes_as_Raw_Materials_for_Geopolymer_Binders
- Al-Qahtani, A., & al, e. (2021). Uncovering the true cost of hydrogen production routes using life cycle monetisation. *Applied Energy*, 281, 115958. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115958>
- Asdrubali, F., & Desideri, U. (2019). Chapter 7 - High Efficiency Plants and Building Integrated Renewable Energy Systems. Στο F. Asdrubali, & U. Desideri, *Handbook of Energy Efficiency in Buildings- A Life Cycle Approach* (σσ. 441-595). ELSEVIER. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812817-6.00040-1>
- Athanailidis V. Ilias, R. G. (2018). Integration & assessment of recycling into c-Si photovoltaic module's life cycle. *International Journal of Sustainable Engineering*. doi:[10.1080/19397038.2018.1428833](https://doi.org/10.1080/19397038.2018.1428833)

- Aviles-Palacios, C., & Rodriguez - Olalla, A. (2021, April 14). The Sustainability of Waste Management Models in Circular Economies. *Industrial Engineering and Management*, 13(13), σ. 7105. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3390/su13137105>
- Azarpour, A., & Suardi, S. (2013). A Review on the Drawbacks of Renewable Energy as a Promising Energy Source of the Future. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38, 317-328. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0436-6>
- Aziz, I. H., Zulkifly, K., Sakkas, K., Panias, D., Tsaousi, G. M., Bakri, M. M., & Yong, H. C. (2017). The Characterization of Steel Slag by Alkali Activation. *Open Access Library Journal*, 4(11). doi:10.4236/oalib.1103816
- Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., Kirchheim, A. P., & Provis, J. (2016). Management and valorisation of wastes through use in producing alkali-activated cement materials. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 91(9). doi:10.1002/jctb.4927
- Bernardes, S., & al, e. (2021). Characterization and Design of Photovoltaic Solar Cells That Absorb Ultraviolet, Visible and Infrared Light. *Nanomaterials*, 11(1), 78. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3390/nano11010078>
- Blomsma, F., & Brennan, G. (2017, May 9). The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), σσ. 603-614. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1111/jiec.12603>
- Bonsu, N. O. (2020, May 20). Towards a circular and low-carbon economy: Insights from the transitioning to electric vehicles and net zero economy. *Journal of Cleaner Production*, 256, σ. 120659. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120659>
- Chowdhury, M. S., Rahman, K. S., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., Akhtaruzzaman, M., . . . Amin, N. (2020). An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*, 27, σ. 100431. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>
- Cong, P., & Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymers materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 283-314. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>

- Criado, M., Fernández-Jiménez, A., b, A. d., Aranda, M., & Palomo, A. (2007). An XRD study of the effect of the SiO₂/Na₂O ratio on the alkali activation of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 671-679. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.013>
- Das, S., Lee, S.-H., Kumar, P., Ki-Hyun, K., Sang Soo, L., & Sundar Bhattacharya, S. (2019, April 24). Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability. *Journal of Cleaner Production*, σσ. 658-678. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.323
- Davidovits, J. (1988). Geopolymer Chemistry and Properties. *1st International Conference on Geopolymer '88, 1*, σσ. 25-48. Compiègne.
- Davidovits, J. (1988). Geopolymers of the first generation: siliface-process, geopolymer. *1rst European Conference on Soft Mineralurgy, Geopolymer '88. 1*, σσ. 49-67. France: Université Technologique Compiègne.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8), σσ. 1633-1656. doi:10.1007/BF01912193
- Davidovits, J. (1994). Properties of geopolymer cements. *First international conference on alkaline cements and concretes, 1*, σσ. 131-149.
- Davidovits, J. (1998). Geopolymer Chemistry and Properties. *1st International Conference on Geopolymer, 1*, σσ. 25-48. Compiègne.
- Davidovits, J. (2005). Geopolymer chemistry and sustainable development. *Geopolymer Green Chemistry and Sustainable Development Solutions, Geopolymer 2005 Conference. 1*, σσ. 9-17. Saint-Quentin, France.: Géopolymère / Geopolymer Institute. Ανάκτηση από https://www.researchgate.net/publication/284514069_Geopolymer_chemistry_and_sustainable_development
- Davidovits, J. (2015). False Values on CO₂ Emission for Geopolymer Cement/Concrete published in Scientific Papers. *Scientific Papers, 24*. Ανάκτηση από <https://www.geopolymer.org/wp-content/uploads/False-CO2-values.pdf>
- Davidovits, J. (2016). *Geopolymer Chemistry and Applications* (4 εκδ.). Saint-Quentin, France: Institut Géopolymère, Geopolymer Institute. doi:9782954453118

- Davidovits, J., Comrie, D. C., Paterson, J. H., & Ritcey, D. J. (1990, July). Geopolymeric concretes for environmental protection. *Concrete international*, 12(7), σσ. 30-40.
- Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11094-11111. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>
- Dumée, L. F. (2021, June 26). Circular Materials and Circular Design—Review on Challenges Towards Sustainable Manufacturing and Recycling. *Circular Economy and Sustainability*, 2, σσ. 9-23. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00085-2>
- Duxson, P., Mallicoat, S., Lukey, G., Kriven, W., & Deventer, J. v. (2007). The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 292(1), 8-20. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.05.044>
- Duxson, P., Provis, J., Fernández-Jiménez, A., & Lukey, G. C. (2007). Geopolymer Technology: The Current State of the Art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917-2933. doi:10.1007/s10853-006-0637-z
- Dvoynikov, M., & al, e. (2021). New Concepts of Hydrogen Production and Storage in Arctic Region. *Resources*, 10(1), 3. doi: <https://doi.org/10.3390/resources10010003>
- Elimbi, A., Tchakoute, H., & Njorwouo, D. (2011). Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements. *Construction and Building Materials*, 25(6), σσ. 2805-2812. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.055>
- Fernández-Jiménez, A., M., C., & Palomo, A. (2006). Alkali activated fly ash binders. A comparative study between sodium and potassium activators. *Materiales de Construcción*, 56(281), 51-65. doi:10.3989/mc
- Geng, Y., & Doberstein, B. (2008, July). Developing the circular economy in China: Challenges and opportunities for achieving 'leapfrog development'. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 15(3), σσ. 231-239. doi:10.3843/SusDev.15.3:6

- Glukhovsky, V. R. (1980). High Strength Slag-Alka-line Cements. *7th International Congress on the Chemistry of Cements*, (σσ. 164-168). Paris.
- Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2001). *The Eco-indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle*. PRe.
- Goetzberger, A., & al., e. (2003). Photovoltaic Materials, History, Status and Outlook. *Materials Science and Engineering R Reports*, 40(1), 1-46. doi:10.1016/S0927-796X(02)00092-X
- Hanjitsuwan, S., & Sitchai Hunpratub, P. T. (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cement and Concrete Composites*, 45, 9-14. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.09.012
- Hanley, S. (2020). Chinese Solar Perseveres During Pandemic. *Clean Technica*. Ανάκτηση από Chinese Solar Perseveres During Pandemic: <https://cleantechnica.com/2020/05/21/chinese-solar-perseveres-during-pandemic/>
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). *Development and Properties of Low-calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete*. Perth: Faculty of Engineering, Curtin University of Technology. Ανάκτηση από <https://www.geopolymer.org/wp-content/uploads/curtin-flyash-GP-concrete-report.pdf>
- Hattaf, R., Aboulayt, A., Samdi, A., Lahlou, N., Touhami, M., Gomina, M., & Redouane, M. (2021, July 20). Reusing Geopolymer Waste from Matrices Based on Metakaolin or Fly Ash for the Manufacture of New Binder Geopolymeric Matrices. *Innovative Construction Materials for Sustainable Development*, 13(14), σ. 8070. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3390/su13148070>
- Hattaraki, S., Dixit, U. D., & Patil, P. (2021). Power Management and Tracking System Using Dual Axis Solar Panel-DASP. *2021 IEEE International Conference on Mobile Networks and Wireless Communications (ICMNWC)*. doi:10.1109/ICMNWC52512.2021.9688334
- Hejazi, S. (2020). *Utilization of noble metal co-catalysts on TiO₂ for photocatalytic H₂ production: from nanoparticle positioning to single-atom catalysis*. Iran: Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Ανάκτηση από

https://www.researchgate.net/publication/344900944_Utilization_of_noble_metal_co-catalysts_on_TiO2_for_photocatalytic_H2_production_from_nanoparticle_positioning_to_single-atom_catalysis/fulltext/5f9819f992851c14bcead687/Utilization-of-noble-metal-co-cata

- Hu, Y., Yan, H., Liu, K., Cao, H., & Li, W. (2015). Hydrogen production using solar grade wasted silicon. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(28), 8633-8641. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.025>
- Hussain, C. M. (2018). Chapter 41 - Engineered Nanomaterials for Energy Applications. Στο C. M. Hussain, *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications* (σσ. 751-767). Elsevier. doi:ISBN 9780128133514
- Intelligence, S. B. (2011). *Study on PV panels supplementing the impact assesment for a recast of the WEEE Directive*. European Commission DG ENV.
- Isabela, C. (2021). Comparative Study of Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) Solar Cell With Other Solar Technologies. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(11), 2273 - 2283. doi:10.1039/D0SE01717E
- Islam, T., & al., e. (2021). Panic buying in the COVID-19 pandemic: A multi-country examination. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 59, 102357. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2020.102357>
- Jaarsveld, J. G., Deventer, J. S., & Lorenzen, L. (1998). Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized flyash. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 29, 283-291. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1007/s11663-998-0032-z>
- Jaarsveld, J. V., J.S.J., V. D., & Lorenzen, L. (1997). The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications. *Minerals Engineering*, 10(7), σσ. 659-669. Ανάκτηση από [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(97\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(97)00046-0)
- Kalamaras, C. M., & Efstathiou, A. (2013). Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments. *Conference Paper in Energy - Power Options for the Eastern Mediterranean Region. 2013*, σ. 9. Hindawi Publishing Corporation. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1155/2013/690627>

- Kioupis, D., Skaropoulou, A., Tsvivilis, S., & Kakali, G. (2020). Valorization of Brick and Glass CDWs for the Development of Geopolymers Containing More Than 80% of Wastes. *Minerals*, 10(8), 672. doi:<https://doi.org/10.3390/min10080672>
- Kiser, B. (2016, March 23). Circular economy: Getting the circulation going. *Nature*, 531, σσ. 443-446. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1038/531443a>
- Komnitsas, K., Perdikatsis, V., & Zaharaki, D. (2007). Geopolymerisation of Low Calcium Ferronickel Slags. *Journal of Materials Science*, 42(9), σσ. 3073-3082. doi:10.1007/s10853-006-0529-2
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G., & Galetakis, M. (2015). Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers. *Advanced Powder Technology*, 26(2), σσ. 368-376. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.appt.2014.11.012>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppala, J. (2017, July 12). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, σσ. 37-46. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Kousi, K. (2021). *Greek Women in STEM*. Ανάκτηση από The colours of hydrogen: <https://greekwomeninstem.com/the-colours-of-hydrogen/>
- Krauklis, A. E., Karl, C., Gagani, A., & Jorgensen, J. (2021, January 15). Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s. *Waste to Advance Composite Materials*, 5(1), σ. 28. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3390/jcs5010028>
- Lai, C., Li, X., Zhang, D., Xiang, Z., Yang, W., & Guo, X. (2014). Fabrication and corrosion behavior of fresh porous silicon in sodium hydroxide solution. *Materials Chemistry and Physics*, 144(3), 355-360. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.01.002>
- Lameirinhas, R. A., & al, e. (2022). A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications. *energies*, 15, 1823. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3390/en15051823>
- Larsen, K. (2009). End-of-life PV: then what? *Renewable Energy Focus*, 10(4), σσ. 48-53. Ανάκτηση από [https://doi.org/10.1016/S1755-0084\(09\)70154-1](https://doi.org/10.1016/S1755-0084(09)70154-1)

- Ma, T., Yang, H., Lu, L., & Peng, J. (2015). Pumped storage-based standalone photovoltaic power generation system: Modeling and techno-economic optimization. *Applied Energy*, 137, 649-659. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.005>
- Martin, J., & Henrichs, T. (2010). *The European Environment: State and Outlook 2010, Material Resources and Waste - Synthesis*. European Environmental Agency.
- Martino, M., & al, e. (2021). Main Hydrogen Production Processes: An Overview. *Catalysts*, 11(5), 547. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3390/catal11050547>
- Masson, G., Brunisholz, M., & Orlandi, S. (2015). *Snapshot of Global PV Markets 1992-2014*. IEA. doi:978-3-906042-32-9
- MaySunSolar. (2023). *MaySunSolar*. Ανάκτηση από <https://www.maysunsolar.com/blog-what-are-the-main-components-of-solar-panels/>
- McEvoy, A. (2018). *McEvoy's Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications* (3 εκδ.). (S. Kalogirou, Επιμ.) doi:ISBN: 9780128103975
- McEvoy, A., Markvart, T., & Castaner, L. (2012). *Practical Handbook of Photovoltaics*. Academic Press. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05723-X>
- Mijarsh, M., & Johari, M. M. (2014). Synthesis of geopolymer from large amounts of treated palm oil fuel ash: Application of the Taguchi method in investigating the main parameters affecting compressive strength. *Construction and Building Materials*, 52, 473-481. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.039>
- Minelgaitè, A., & Liobikienè, G. (2019, June). Waste problem in European Union and its influence on waste management behaviours. *Sci Total Environ*, 1(667), σσ. 86-93. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.02.313
- Mohapatra, R., & Rao, J. R. (2001). Some aspects of characterisation, utilisation and environmental effects of fly ash. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 76(1), 9-26. doi:10.1002/1097-4660(200101)76:1<9::AID-JCTB335>3.0.CO;2-5
- Mucsi, G., & Ambrus, M. (2017). Raw Materials for Geopolymerisation. *MultiScience - XXXI. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference*. Hungary. doi:10.26649/musci.2017.008

- Mussabek, G., Alekseev, S. A., Manilov, A. I., Tutashkonko, S., Nychporuk, T., Shabdan, Y., . . . Lysenko, V. (2020). Kinetics of Hydrogen Generation from Oxidation of Hydrogenated Silicon Nanocrystals in Aqueous Solutions. *Nanomaterials*, *10*(7), 1413. doi:<https://doi.org/10.3390/nano10071413>
- Nakayama, S., Kuwata, S., & Imai, S. (2022). Simple hydrogen gas production method using waste silicon. *Results in Materials*, *13*, σ. 100254. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2022.100254>
- Osman, A., & al, e. (2021). Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters* , *20*, 153-188. doi:<https://doi.org/10.1007/s10311-021-01322-8>
- Palomo, A. G. (1999). Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future. *Cement and Concrete Research*, *29*, 1323-1329. Ανάκτηση από [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- Papadopoulou, K., Pavlopoulos, C., Panitsa, O., Theodoropoulou, M., Gkioni, S., Kioupi, D., . . . Lyberatos, G. (2023). Production of hydrogen and geopolymers from end of life photovoltaic panels. *18th International Conference on Environmental Science and Technology*. Athens: CEST2023. doi:<https://doi.org/10.30955/gnc2023.00583>
- Phetchuay, C., Suksiripattanapong, C., Chinkulkijniwat, A., & Horpibulsuk, S. (2014). Calcium carbide residue: Alkaline activator for clay–fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials* , *69*, 285-294. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2014.07.018](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.018)
- Provis, J., Deventer, J. S., & Lukey, G. C. (2005). Do Geopolymers Actually Contain Nanocrystalline Zeolites? A Reexamination of Existing Results. *Chemistry of Materials*, *17*(12), 3075-3085. doi:[10.1021/cm050230i](https://doi.org/10.1021/cm050230i)
- Rabaia, M. K., Semeraro, C., & Olabi, A.-G. (2022, November 1). Recent progress towards photovoltaics' circular economy. *Journal of Cleaner Production*, *373*, σ. 133864. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133864>
- Rajamma, R., & Ferreira, V. M. (2012). Alkali activation of biomass fly ash–metakaolin blends. *Fuel*, *98*, 265-271. doi:[10.1016/j.fuel.2012.04.006](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.006)

- Rao, B., Dai, H., Gao, L., Xie, H., Gao, G., Peng, K., . . . Pan, Y. (2022). Surprisingly highly reactive silica that dissolves rapidly in dilute alkali (NaOH) solution even at ambient temperatures (25 °C). *Journal of Cleaner Production*, 341, 130779.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130779>
- Rapazote, J. G., Laginhas, C., & Teixeira-Pinto, A. (2011). Development of Building Materials through Alkaline Activation of Construction and Demolition Waste (CDW) – Resistance to High Temperatures. Στο I. C. Components (Επιμ.), xii. Porto.
- Reig, L., Tashima, M., Borrachero, M., Monzó, J., Cheeseman, C., & Payá, J. (2013). Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 43, 98-106. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.031>
- Rickard, W. D., Williams, R., Temuujin, J., & Riessen, A. v. (2011). Assessing the suitability of three Australian fly ashes as an aluminosilicate source for geopolymers in high temperature applications. *Materials Science and Engineering: A*, 528(9), 3390-3397. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.005>
- Rickard, W., Temuujin, a., & Riessen, J. a. (2012). Thermal Analysis of Geopolymer Pastes Synthesised From Five Fly Ashes of Variable Composition. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358(12), 1830-1839. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2012.05.032
- Rickard, W., Williams, R., Temuujin, J., & Riessen, J. a. (2011). Assessing the Suitability of Three Australian Fly Ashes as an Aluminosilicate Source for Geopolymers in High Temperature Applications. *Materials Science and Engineering A*, 598(9), 3390-3397. doi:10.1016/j.msea.2011.01.005
- Sander, K. (2007). *Study on the development of a take back and recovery system for photovoltaic products*. Institut für Ökologie und Politik.
- Santoro, S. A. (2008). Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products. *Waste Management*, 28(2), 416-423. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.001>

- Santos, S. A., & al, e. (2021). The impact of aging of solar cells on the performance of photovoltaic panels. *Energy Conversion and Management*, 10(9). doi:10.1016/j.ecmx.2021.100082
- Sata, V., Chindaprasirt, P., & Sathonsaowaphak, A. (2012). Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack. *Cement and Concrete Composites*, 34(5), 700–708. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.01.010
- Sayed, E. T., & al, e. (2021). A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: Wind, hydro, biomass and geothermal. *Science of The Total Environment*, 766, 144505. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144505>
- Schafer, O., & Watson, J. (2019). *Global Market outlook for Solar Power / 2015-2019*. Solar Power Europe.
- Schulte, K. (2017). Highly Transparent Compositionally Graded Buffers for New Metamorphic Multijunction Solar Cell Designs. *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS*, 7(1), 347-353. doi:10.1109/JPHOTOV.2016.2619183
- Sharma, A., Pandey, S., & Kolhe, M. (2019). Global review of policies & guidelines for recycling of solar PV modules. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 8(5), σσ. 597-610. doi:10.12720/sgce.8.5.597-610
- Singh, N., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455>
- Skene, K. R. (2017, August 30). Circles, spirals, pyramids and cubes: why the circular economy. *Sustain Sci*, 13, σσ. 479-492. doi:10.1007/s11625-017-0443-3
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., & Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, 90(6), 2118-2124. doi:10.1016/j.fuel.2011.01.018
- Statista. (2023). *Statista*. Ανάκτηση από Solar PV - statistics & facts: <https://www.statista.com/statistics/279504/cumulative-installed-capacity-of-solar-power-in-china/>

- Sukmak, P., Horpibulsuk, S., & Shen, S.-L. (2013). Strength development in clay–fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, *40*, 566-574. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.015
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S., Shen, S.-L., Chindaprasirt, P., & Suksiripattanapong, C. (2013). Factors influencing strength development in clay–fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, *47*, 1125-1136. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.104
- Sukmak, P., silva, P. d., Horpibulsuk, S., & Chindaprasirt, P. (2015). Sulfate Resistance of Clay-Portland Cement and Clay High-Calcium Fly Ash Geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *27*(5), 04014158. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001112
- Sun, Z., An, H., Cui, H., & Tao, D. (2013). Synthesis and thermal behavior of geopolymer-type material from waste ceramic. *Construction and Building Materials*, *49*(5), 281-287. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.063
- Syngas, G. -G. (χ.χ.). *GSTC*. Ανάκτηση από <https://globalsyngas.org/syngas-technology/syngas-production/auto-thermal-reforming/>
- Utekar, S., Suriya, V., Neha, M., & Adarsh, R. (2021, February 15). Comprehensive study of recycling of thermosetting polymer composites – Driving force, challenges and methods. *Composites Part B: Engineering*, *207*, σ. 108596. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108596>
- van Jaarsveld, J. G. (2000). *The physical and chemical characterisation of fly ash based geopolymers*. PhD thesis, Department of Chemical Engineering, The University of Melbourne. Ανάκτηση από <http://hdl.handle.net/11343/36118>
- Walker, S., Coleman, N., Hodgson, P., Collins, N., & Brimacombe, L. (2018, December 15). Evaluating the Environmental Dimension of Material Efficiency Strategies Relating to the Circular Economy. *Environmental Life Cycle Assessment*, *10*(3), σ. 666. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3390/su10030666>
- Wang H., L. H. (2005). Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymers. *Journal of Colloids and Surfaces A – Physicochemical and Engineering Aspects*, *268*(1-3), 1-6. doi:10.1016/j.colsurfa.2005.01.016

- Wesoff, E. (2017, April 27). IEA: Global Installed PV Capacity Leaps to 303 Gigawatts. *gtm*.
Ανάκτηση από <https://www.greentechmedia.com/articles/read/iea-global-installed-pv-capacity-leaps-to-303-gw>
- Wuster, S. (2021, April 26). Creating a Circular Economy in the Automotive Industry: The Contribution of Combining Crowdsourcing and Delphi Research. *Circular Economy, Innovation and Quality Infrastructure*, 13(12), σ. 6762. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3390/su13126762>
- Xie, Z., & Xi, Y. (2001). Hardening Mechanism of an Alkaline-Activated Class F Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1245-1249. doi:10.1016/S0008-8846(01)00571-3
- Yin, W.-J., & al, e. (2015). Halide perovskite materials for solar cells: a theoretical review. *Journal of Materials Chemistry A*, 17(3), 8926-8942. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1039/C4TA05033A>
- Yoon, K.-H. (2019). *PVEducation*. Ανάκτηση από PVCDROM:
<https://www.pveducation.org/pvcdrom/welcome-to-pvcdrom/instructions>
- Zaharaki, D., Galetakis, M., & Komnitsas, K. (2016). Valorization of construction and demolition (C&D) and industrial wastes through alkali activation. *Construction and Building Materials*, 121, σσ. 686-693. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.051
- Zapf-Gottwick, R., Koch, M., Fischer, K., & Schwerdt, F. (2015). Leaching Hazardous Substances out of Photovoltaic Modules. *International Journal of Advanced Applied Physics Research*, 2, σσ. 7-14. doi:10.15379/2408-977X.2015.02.02.2

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αλιάδης Δημήτριος, & Λίντας Δημήτριος. (2018). *Αλκαλική ενεργοποίηση ιπτάμενης τέφρας για την παρασκευή κονιαμάτων*. Θεσσαλονίκη: ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ.
- Βελωνιάς, Γ. (2018). *ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΑΠΟ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης - Τμήμα Ορυκτών Πόρων .

- Βλάχου, Α. (2015). *Δυνατότητα γεωπολυμερισμού αποβλήτων από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ)*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης - Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
- Εγγλέζος, Δ. (2020). *Μελέτη φωτοβολταϊκών συλλεκτών για παραγωγή*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κατσαρού, Ε. (2006). *Σύνθεση και ιδιότητες γεωπολυμερών που παράγονται από ιπτάμενη τέφρα λιγνιτικών σταθμών*. Χανιά: ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ - ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ.
- Κοντομηνά, Α. (2017). *ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΕ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ*. Πειραιάς: Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών .
- Κούκουζας, Ν., & Παπανικολάου, Δ. (2006). *Ανάπτυξη Νέων προϊόντων με τη χρήση ιπτάμενης τέφρας στη Δυτική Μακεδονία*. Κοζάνη: ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ.
- Κουρμούσης, Φ. (2013). *ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΑΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΙΣ - Δημιουργία μοντέλου υπολογισμού των παραγόμενων ποσοτήτων αποβλήτων από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις* . Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ. Ανάκτηση από https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/38956/kourmousisf_cdw_aste.pdf?sequence=1
- Κωβαίος, Ι. (2011). *Διδακτορική Διατριβή: Μοντελοποίηση και έλεγχος ρευστοδυναμικών συστημάτων με τη χρήση έξυπνων υλικών*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών - Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών. doi:10.12681/eadd/25675
- LORENA, I. (2018). *ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΡΓΙΛΟΠΥΡΙΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ*. Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.
- Μαματάς, Δ. (2016). *Ανακύκλωση Φωτοβολταϊκών Πλαισίων*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Μαρνέλλος, Γ. (χ.χ.). Ενότητα 5(α): Παραγωγή Υδρογόνου. Στο Γ. Μαρνέλλος, *Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας* (σ. 25). Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.

- Fraunhofer. (2023). *PHOTOVOLTAICS REPORT*. Fraunhofer ISE. Ανάκτηση από <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- HELAPCO. (2024). *Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2023*. Σύνδεσμος εταιρειών φωτοβολταϊκών. Ανάκτηση από https://helapco.gr/xoorigle/2024/02/pv-stats_greece_2023_19Feb2024.pdf
- IRENA. (2021). *IRENA*. Ανάκτηση από <https://www.irena.org/>
- NREL. (2021). *NREL*. Ανάκτηση από Photovoltaic Research: <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>
- RystadEnergy. (2022, July). RystadEnergy. Ανάκτηση από <https://www.rystadenergy.com/news/reduce-reuse-solar-pv-recycling-market-to-be-worth-2-7-billion-by-2030>
- Science, I. (2017). *Science lab*. Ανάκτηση από Science lab.gr: <https://www.sciencelab.gr/2017/10/03/hydrogen/>