ΤΕΕ ΤΜΗΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

Ε.Α.Π. 2012–2016
ΤΕΛΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

Ανάλυση και Τεκμηρίωση της Σκοπιμότητας Αξιοποίησης του Εγχώριου Λιγνίτη σε Προϊόντα Υψηλής Προστιθέμενης Αξίας

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ D 1.1 :

Τεχνική Αναφορά

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2022

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ..... 4
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ..... 5
ΠΡΟΛΟΓΟΣ..... 6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... 11
2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΛΙΓΝΙΤΗ..... 13
2.1. Τι είναι ο λιγνίτης..... 13
2.2. Πού βρίσκεται λιγνίτης στον ελλαδικό χώρο..... 13
2.3. Πού και πώς χρησιμοποιήθηκε ο λιγνίτης μέχρι σήμερα..... 14
2.4. Πόσος λιγνίτης έχει απομείνει..... 16
2.5. Πώς μπορούμε να αξιοποιήσουμε το λιγνίτη στο μέλλον..... 18
3. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΛΙΓΝΙΤΗ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΧΗΜΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ..... 21
3.1 Παραγωγή καυσίμων και πρώτων υλών για τη χημική βιομηχανία..... 21
3.2 Η Τεχνολογία της αεριοποίησης..... 21
3.2.1 Εμπορική ωριμότητα..... 23
3.3 Ενεργειακή Μετάβαση και Αεριοποίηση..... 24
3.3.1 Η περίπτωση του έργου CARBONTRANS..... 25
3.4 Υπόγεια Αεριοποίηση Λιγνίτη..... 26
3.4.1 Εμπορική ωριμότητα..... 27
3.4.2 Η περίπτωση της Βίο-αεριοποίησης..... 28
3.5 Η τεχνολογία της υγροποίησης..... 28
3.5.1 Εμπορική ωριμότητα..... 29
3.5.2 Η περίπτωση της μονάδας Shenhua Ningxia..... 29
3.6 Η κατάσταση στην Ελλάδα..... 29
4. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ ΑΠΟ ΛΙΓΝΙΤΗ..... 32
4.1 Ποιες είναι οι σπάνιες γαίες..... 32
4.2 Ποιοι και πού τις χρησιμοποιούν..... 33
4.3 Ποιες οι πηγές των σπάνιων γαιών..... 34
4.4. Ποια τα κριτήρια οικονομικότητας της εκμετάλλευσης των σπάνιων γαιών..... 36
4.5 Ποια η περιεκτικότητά των σπάνιων γαιών στους λιγνίτες και την τέφρα..... 37
4.6 Πως ανακτούμε τις σπάνιες γαίες..... 37
4.7 Τι έχει γίνει μέχρι σήμερα στην Ελλάδα;..... 38
5. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ..... 41
5.1 Τί είναι και που χρησιμοποιείται ο ενεργός άνθρακας..... 41
5.2 Παραγωγή ενεργού άνθρακα από λιγνίτη..... 42
5.3 Προϊόν με μεγάλη ζήτηση στη διαχείριση υδάτων και τη χημική βιομηχανία..... 43
5.3.1 Αέριας φάσης εφαρμογές ενεργού άνθρακα..... 45
5.3.2 Υγρής φάσης εφαρμογές ενεργού άνθρακα..... 46
6 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΝΑΝΟΫΛΙΚΩΝ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ..... 48
6.1 Τι είναι το γραφένιο 48
6.2 Ιδιότητες «εν τάχει» 49
6.3 Ενδεικτικές εφαρμογές..... 49
6.4 Κόστος γραφενίου..... 50
6.5 Από λιγνίτη σε γραφένιο..... 55
7. ΑΓΡΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ..... 57
7.1 Χρήση λιγνίτη στην παραγωγή εδαφοβελτιωτικών για εσωτερική και εξωτερική κατανάλωση..... 57
7.2. Η περίπτωση της Novihum (Γερμανία)..... 60
7.2.1 Ιστορία..... 60
7.2.2 Τι είναι το NOVIHUM® και πώς παρασκευάζεται (patented)..... 61

7.3 Η περίπτωση της Arctech (ΗΠΑ)..... 62
7.3.1 Ιστορία..... 62
7.3.2 Τι είναι το actosol® και πώς παρασκευάζεται (patented) 63
8. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ..... 65
8.1 Παραγωγή υδρογόνου..... 65
8.2 Παραγωγή υδρογόνου από λιγνίτη..... 66
8.2.1 Εμπορική Ωριμότητα..... 67
8.2.2 Η περίπτωση της Β. Ντακότα 67
8.3 Οικονομικότητα και ανταγωνισμός..... 68
9. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ..... 70
9.1 Τα παραπροϊόντα της βιομηχανίας του λιγνίτη..... 70
9.2 Τι έχει γίνει στο παρελθόν..... 72
9.3 Ποιες οι προδιαγραφές χρήσης των υλικών αυτών..... 76
9.3.1 Εμπορικές εφαρμογές των παραπροϊόντων λιγνίτη..... 76
9.4 Ποιες άλλες προϋποθέσεις πρέπει να τηρούνται για να διεισδαγορά..... 79
10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... 82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 85

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1. Σύσταση του λιγνίτη..... 13
Εικόνα 2.2. Ετήσια παραγωγή λιγνίτη και συνολικές εκσκαφές πετρωμάτων στα ορυχεία της ΔΕΗ στο λεκανοπέδιο Πτολεμαΐδας από την έναρξη της εκμετάλλευσής τους μέχρι σήμερα..... 15
Εικόνα 2.3. Λιγνιτικά κοιτάσματα και επιφανειακά ορυχεία στη Δυτική Μακεδονία..... 17
Εικόνα 3.1. Δυνητικά προϊόντα παραγόμενα μέσω της αεριοποίησης λιγνίτη..... 21
Εικόνα 3.2. Αντιπροσωπευτικό διάγραμμα λειτουργίας μονάδας IGCC..... 22
Εικόνα 3.3. Τυπικό γερμανικό αυτοκίνητο του 1940, εξοπλισμένο με αεριογόνο και τα απαραίτητα ξύλα ως τροφοδοσία..... 24
Εικόνα 3.4. Συνδυασμένη αεριοποίηση λιγνίτη και απορριμμάτων στο πλαίσιο του έργου Carbontrans..... 25
Εικόνα 3.5. Απλοποιημένο διάγραμμα ροής μονάδας υπόγειας αεριοποίησης γαιάνθρακα..... 26
Εικόνα 3.6. Πιλοτικές δράσεις έργων υπόγειας αεριοποίησης άνθρακα..... 27
Εικόνα 3.7. Διαδικασία άμεσης υγροποίησης λιγνίτη..... 29
Εικόνα 4.1. Περιοδικός πίνακας στον οποίο επισημαίνονται οι σπάνιες γαίες (κόκκινο πλαίσιο) και χαρακτηρίζεται η κρισιμότητά τους λόγω πιθανής έλλειψης στο μέλλον ... 33
Εικόνα 4.2. Χρήσεις σπάνιων γαιών στης ΗΠΑ κατά το έτος2020 34
Εικόνα 4.3. Διακύμανση της παραγωγής σπάνιων γαιών από το 1950 μέχρι σήμερα 35
Εικόνα 4.4. Παγκόσμια παραγωγή των ορυχείων σπανίων γαιών (σε τόνους) ανά χώρα για το έτος 2018 36
Εικόνα 4.5. Συντελεστής εμπλουτισμού των σπανίων γαιών στην ιπτάμενη τέφρα και την τέφρα πυθμένα του ΑΗΣ Μελίτης σε σχέση με τη μέση περιεκτικότητα στον ανώτερο ηπειρωτικό φλοιό της γης..... 40
Εικόνα 5.1. Μορφολογία ενεργού άνθρακα..... 41
Εικόνα 5.2. Φίλτρα ενεργού άνθρακα οικιακής χρήσης..... 44
Εικόνα 5.3. Εφαρμογές αέριας και υγρής φάσης ανθρακούχων προσροφητικών..... 44
Εικόνα 5.4. Εφαρμογές ανθρακούχων προσροφητικών για αέριας φάσης εφαρμογές... 45
Εικόνα 5.5. Βιομηχανικά φίλτρα ενεργού άνθρακα για τον καθαρισμό βιομηχανικών υγρών αποβλήτων..... 47
Εικόνα 5.6. Διαγραμματική απεικόνιση επεξεργασίας υγρών αποβλήτων..... 47
Εικόνα 6.1. Δομή γραφενίου..... 49
Εικόνα 6.2. Σχέση ζήτησης γραφενίου με τιμή μονάδας..... 52
Εικόνα 6.3. Η αγορά γραφενίου τα τελευταία έτη..... 52
Εικόνα 6.4. Εταιρίες που δραστηριοποιούνται στην παραγωγή γραφενίου..... 53
Εικόνα 6.5. Σχέση τιμή πώλησης-ποιότητας γραφενίου..... 54
Εικόνα 6.6. διεργασία παρασκευής γραφενίου υψηλής καθαρότητας από λιγνίτη με συγκεκριμένη μεθοδολογία βασιζόμενη στη μετατροπή του λιγνίτη σε χουμικό οξύ και μετέπειτα σε οξείδιο του γραφενίου πριν την παρασκευή του τελικού προϊόντος... 56
Εικόνα 7.1. Στρωματογραφική στήλη λεκάνης Δράμας 59
Εικόνα 7.2. Ανάλυση/σύσταση καθαρού NOVIHUM® παρασκευασμένο από λιγνίτη..... 61
Εικόνα 7.3. Διαγραμματική απεικόνιση παρασκευής NOVIHUM® από λιγνίτη..... 62
Εικόνα 7.4: Σύγκριση κοινών λιπασμάτων με το actosol® 64
Εικόνα 7.5: Ανάλυση/σύσταση καθαρού actosol® παρασκευασμένο από λιγνίτη..... 64
Εικόνα 8.1. Οι κατά σύμβαση αποχρώσεις του υδρογόνου..... 65
Εικόνα 8.2. Απλοποιημένο διάγραμμα παραγωγής υδρογόνου με χρήση λιγνίτη..... 66
Εικόνα 8.3. Κόστος παραγωγής υδρογόνου απο διαφορετικές πηγές και τεχνολογίες.... 69
Εικόνα 9.1. Παραγωγή τέφρας από τους λιγνιτικούς σταθμούς της ΔΕΗ Α.Ε. τη διετία 2018-19 (σε χιλιάδες τόνους)..... 71
Εικόνα 9.2. Ετήσια παραγωγή τσιμέντου στην Ελλάδα από το 2010 έως το 2019..... 75

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 7.1. Σύγκριση εδαφοβελτιωτικών Novihum® και Actsol®..... 64
Πίνακας 9.1. Υποπροϊόντα καύσης λιγνίτη και εφαρμογές..... 73
Πίνακας 9.2. Κατασκευαστικά έργα με χρήση Ιπταμένης Τέφρας..... 75
Πίνακας 9.3. Παραγόμενα παραπροϊόντα από καύση άνθρακα, λιγνίτη και WtE και εφαρμογές στον κατασκευαστικό κλάδο..... 81

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αντί Προλόγου…

Κάθε κλαδί αντιστοιχεί σε μια διαφορετική τεχνολογική δυνατότητα χρήσης του άνθρακα. Κάθε φυλλαράκι, αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό προϊόν που μπορεί να παραχθεί με βάση τον άνθρακα. Η ηλεκτροπαραγωγή, είναι απλά το πρώτο κλαδί κάτω αριστερά *(πηγή: U.S. Geological Survey)*

ΕΚΤΕΝΗΣ ΣΥΝΟΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας Τεχνικής Αναφοράς αποτελεί η αποτύπωση των εμπορικά ώριμων αλλά και των αναδυόμενων τεχνολογιών που αφορούν στην αξιοποίηση του εγχώριου λιγνίτη σε εναλλακτικές, έξω-ηλεκτρικές χρήσεις. Δεδομένου ότι τα οικονομικώς απολήψιμα αποθέματα άνθρακα ξεπερνούν παγκοσμίως τους 900 δις τόνους με το 32% να καταγράφεται στις ΗΠΑ, οι περισσότερες χώρες αναζητούν εναλλακτικές τεχνολογίες αξιοποίησης του άνθρακα και του λιγνίτη σε μη ενεργειακές χρήσεις. Σύμφωνα με τη ΔΕΗ ΑΕ, οι ποσότητες εγχώριου λιγνίτη που έχουν αξιοποιηθεί μέχρι σήμερα ανέρχονται στο 30% των αρχικών αποθεμάτων, ενώ τα αποθέματα που θα απομείνουν μετά την απόφαση για καθολική απολιγνιτοποίηση με χρονικό ορίζοντα το 2028, ξεπερνούν τους 3,1 δις τόνους.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι απαιιτήσεις της ενεργειακής μετάβασης και η απανθρακοποίηση του ηλεκτροπαραγωγικού μίγματος, δεν ταυτίζονται απαραίτητα με το οριστικό κλείσιμο των ορυχείων άνθρακα και λιγνίτη. Η κεφαλαιοποίηση των υποδομών και της τεχνογνωσίας που έχει σωρεύσει η αλυσίδα αξίας του άνθρακα τοπικά, η αναγκαιότητα δημιουργίας μιας ασφαλούς «γέφυρας» μετάβασης των τοπικών κοινωνιών στο νέο παραγωγικό περιβάλλον και βεβαίως, οι πολλαπλές προοπτικές που προσφέρει ο άνθρακας ως πρώτη ύλη, οριοθετούν νέες συνθήκες στην παγκόσμια οικονομία των γαιανθράκων.

Η χρήση του λιγνίτη για την παραγωγή καυσίμων κίνησης αλλά και πρώτων υλών για τη χημική βιομηχανία, σχετίζεται κυρίως με την τεχνολογία της **αεριοποίησης** (gasification), ενώ εμπορικά διαθέσιμη είναι και η τεχνολογία της **υγροποίησης** (liquefaction), μέσω της οποίας ο λιγνίτης μπορεί επίσης να μετατραπεί σε υγρά καύσιμα όπως βενζίνη, κηροζίνη και diesel. Τόσο η αεριοποίηση όσο και η υγροποίηση λιγνίτη αποτελούν εμπορικά ώριμες τεχνολογίες, ελκυστικές για τις χώρες με επαρκή κοιτάσματα γαιανθράκων και με παράλληλη δυσκολία πρόσβασης σε πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Αποτελούν επενδύσεις εντάσεως κεφαλαίου και τεχνογνωσίας, ενώ η βιωσιμότητά τους εξαρτάται σε καθοριστικό βαθμό από τις τιμές του πετρελαίου στην παγκόσμια αγορά και τη διακύμανση των τιμών διοξειδίου του άνθρακα στην αγορά ρύπων. Για την περίπτωση της αεριοποίησης, το κόστος επένδυσης είναι 110% υψηλότερο συγκριτικά με συμβατική μονάδα κονιοποιημένου λιγνίτη, προσφέροντας όμως τη δυνατότητα διαφοροποίησης της τροφοδοσίας μέσω προσθήκης και απορριμμάτων, καθώς και υψηλή ευελιξία στη διαφοροποίηση της παραγωγής. Η υγροποίηση του λιγνίτη αποτελεί μια απαιτητική και σύνθετη λειτουργικά διαδικασία και συνιστά ανταγωνιστική και βιώσιμη επένδυση με τιμές αργού πετρελαίου υψηλότερες των $80 το βαρέλι.

Επιπρόσθετα, ο ελληνικός λιγνίτης αποτελεί εξαιρετική πρώτη ύλη για παραγωγή **εδαφοβελτιωτικών** και **οργανοχουμικών** λιπασμάτων. Στην Ελλάδα, λόγω του

Μεσογειακού κλίματος αλλά και των εντατικών αγροτικών καλλιεργειών, έχει επέλθει μια σημαντική υποβάθμιση των εδαφών που υποστηρίζουν την πρωτογενή αγροτική παραγωγή, λόγω απώλειας οργανικού χούμου. Η κατανάλωση ανόργανων λιπασμάτων δεν επιλύει το πρόβλημα, αλλά επιτείνει τη νιτρορύπανση των υδροφόρων στρωμάτων, ενώ η αναζήτηση μεθόδων διατήρησης της οργανικής ύλης στα εδάφη γίνεται ολοένα και δαπανηρότερη. Κατά συνέπεια, αναδύεται ως αναγκαιότητα η υποστήριξη επενδυτικών σχεδίων με στόχο την αξιοποίηση μικρών κοιτασμάτων λιγνίτη για εφαρμογή είτε ως εδαφοβελτιωτικών είτε ως πρώτη ύλη για παραγωγή οργανοχουμικών λιπασμάτων, συστατικών πλούσιων σε χουμικά και φουλβικά οξέα. Μελέτες που έχουν γίνει με χουμικά συστατικά που απομονώθηκαν από λιγνίτη, έδειξαν ότι αυτά έχουν ευεργετική επίδραση στη βλάστηση σπόρων, στην απορρόφηση θρεπτικών συστατικών από τους ιστούς των φυτών, στην ανάπτυξη του βλαστού και του ριζικού συστήματος, καθώς και στην αύξηση της παραγωγής και της ποιότητας μεγάλης ποικιλίας καλλιεργειών. Σε διεθνές επίπεδο ο λιγνίτης χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή οργανοχουμικών λιπασμάτων με τη μορφή αλάτων χουμικών οξέων ή χουμικών οξέων εμπλουτισμένων σε άζωτο και κάλιο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα επιτυχούς χρήσης λιγνίτη προς παραγωγή εδαφοβελτιωτικών αποτελούν τα προϊόντα NOVIHUM® και actosol® των εταιριών Novihum (Γερμανία) και Arctech (ΗΠΑ) αντίστοιχα, δημιουργώντας εξαιρετικά επιτυχημένες και κερδοφόρες επενδύσεις.

Η παραγωγή **ενεργού άνθρακα** από λιγνίτη αποτελεί μια επιπλέον εμπορικά ώριμη τεχνολογία. Η σπουδαιότερη ιδιότητα των ενεργών ανθράκων, που οφείλεται στην πορώδη δομή τους, είναι η ικανότητά τους να προσροφούν και να συγκρατούν στην επιφάνειά τους ουσίες που βρίσκονται στην αέρια ή στην υγρή φάση. Σημαντικό πλεονέκτημα για τη χρησιμοποίηση του λιγνίτη ως πρώτη ύλη για την παραγωγή ενεργού άνθρακα αποτελεί το χαμηλό κόστος του, δεδομένου ότι ο ενεργός άνθρακας είναι προϊόν με μεγάλη ζήτηση στη διαχείριση υδάτων και τη χημική βιομηχανία. Η πλειοψηφία των εφαρμογών του ενεργού άνθρακα σχετίζεται με τον αποχρωματισμό, την απομάκρυνση της οσμής, καθαρισμό, αποχλωρίωση, απομάκρυνση τοξικών ουσιών, ανάκτηση διαλυτών και σαν υπόστρωμα σε καταλύτες. Στα συστήματα τριτοβάθμιας επεξεργασίας λυμάτων χρησιμοποιείται ενεργός άνθρακας για να αφαιρεθούν υπολειπόμενες ουσίες και άλλες τοξικές οργανικές ενώσεις μετά την πρωτοβάθμια διήθηση και δευτεροβάθμια διεργασία βιολογικού καθαρισμού.

Μία ανερχόμενη αλλά πολλά υποσχόμενη τεχνολογία αφορά στην παραγωγή **νανοϋλικών γραφενίου** με βάση το λιγνίτη. Το γραφένιο είναι ένα υλικό που αποτελείται από καθαρό άνθρακα, παρόμοιο με τον γραφίτη αλλά με χαρακτηριστικά που το καθιστούν εξαιρετικά ελαφρύ και ισχυρό. Ένα φύλλο ενός τετραγωνικού μέτρου γραφενίου ζυγίζει 0,77 mg, ενώ η αντοχή του είναι 200 φορές μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα και η πυκνότητά του είναι παρόμοια με αυτή των ανθρακονημάτων. Είναι ένα από τα πιο αγώγιμα υλικά για ηλεκτρισμό και θερμότητα, γεγονός που το καθιστά το πλέον δόκιμο υλικό για ηλεκτρονικά και πολλές άλλες βιομηχανικές χρήσεις. Για πολλούς ειδικούς, το γραφένιο είναι

το υλικό του μέλλοντος, δεδομένου ότι οι εφαρμογές του είναι πρακτικά απεριόριστες και υπόσχονται να φέρουν επανάσταση σε πολλούς τομείς. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι ενώ η παραγωγή του γραφενίου το 2010 ήταν 28 τόνοι, προβλέπεται να αυξηθεί σε πάνω 750 τόνους έως το 2025. Η αξία του συγκεκριμένου νανοϋλικού είναι εξαιρετικά υψηλή και ανέρχεται στα 862.000€/kg. Υφίστανται ήδη πολυεθνικές εταιρίες που δραστηριοποιούνται στην έρευνα και ανάπτυξη γραφενίου (π.χ. η Intel και η IBM στον τομέα της πληροφορικής, η Dow Chemicals και η BASF ως προμηθευτές βασικού υλικού γραφενίου και η Samsung στα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης). Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που αντιμετωπίζουμε σήμερα στην εμπορευματοποίηση του γραφενίου είναι ο τρόπος παραγωγής υψηλής ποιότητας υλικού, σε μεγάλη κλίμακα με χαμηλό κόστος και με αναπαραγόμενο τρόπο. Η ποιότητα του γραφενίου παίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς η παρουσία υπολειμμάτων, ακαθαρσιών, κόκκων, πολλαπλών φύλλων, δομικών διαταραχών, «ρυτίδων/ρωγμών» στο φύλλο γραφενίου μπορεί να έχει δυσμενή επίδραση στις ηλεκτρονικές και οπτικές του ιδιότητες. Ερευνητική ομάδα στην Ελλάδα πέτυχε την παρασκευή γραφενίου υψηλής καθαρότητας από λιγνίτη με συγκεκριμένη μεθοδολογία βασιζόμενη στη μετατροπή του λιγνίτη σε χουμικό οξύ και μετέπειτα σε οξείδιο του γραφενίου πριν την παρασκευή του τελικού προϊόντος.

Η περίπτωση των **σπάνιων γαιών** αφορά μια κατηγορία ορυκτών πρώτων υλών υψηλής ζήτησης που στο μέλλον αναμένεται να κλιμακωθεί περεταίρω. Οι σπάνιες γαίες χρησιμοποιούνται σε κρίσιμες για την ψηφιακή εποχή τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων πολλών που βρίσκουν εφαρμογή σε εξοπλιστικά συστήματα. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τον μικρό αριθμό εκμεταλλεύσιμων κοιτασμάτων και τον έλεγχο της παγκόσμιας αγοράς από την Κίνα, καθιστά την ανάκτηση σπάνιων γαιών από δευτερογενείς πηγές, πεδίο τεχνολογικής πρόκλησης πρώτης προτεραιότητας για την παγκόσμια βιομηχανία. Κατά συνέπεια, κρίνεται σκόπιμη η ενίσχυση της έρευνας από τοπικούς επιστημονικούς φορείς, με στόχο τόσο τη διαπίστωση της περιεκτικότητας των σπάνιων γαιών σε πετρώματα που εμφανίζονται στα λιγνιτωρυχεία της Δυτικής Μακεδονίας και στα παραπροϊόντα που παράγονται από την καύση του λιγνίτη, όσο και την εκτίμηση της δυνατότητας ανάκτησής τους με αποδεκτό κόστος. Σε περίπτωση που οι πρώτες έρευνες δώσουν ελπιδοφόρα μηνύματα,είναι εξαιρετικά πιθανό να υπάρξει διεθνές ενδιαφέρον για την εμπορική εκμετάλλευσή των σπάνιων γαιών που συνδέονται με τα λιγνιτικά κοιτάσματα της Δυτικής Μακεδονίας. Σε κάθε περίπτωση, είναι ήδη διαπιστωμένο ότι η ανάκτηση σπάνιων γαιών από λιγνίτη είναι ευκολότερη από ότι στην περίπτωση του λιθάνθρακα, ενώ η περιεκτικότητα σπάνιων γαιών στην τέφρα είναι αυξημένη κατά 6-10 φορές σε σχέση με τον λιγνίτη. Αυτό που είναι κοινά αποδεκτό από την επιστημονική κοινότητα είναι ότι δεν υπάρχει ακόμα μέθοδος για την ανάκτηση σπάνιων γαιών από τον λιγνίτη και τα παραπροϊόντα του, ικανήνα εφαρμοστεί σε βιομηχανική κλίμακα με οικονομικά βιώσιμους όρους.

Όσον αφορά στη χρήση του λιγνίτη για την παραγωγή **Υδρογόνου**, αξίζει να σημειωθεί ότι 98% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου προκύπτει σήμερα από ορυκτούς υδρογονάνθρακες. Περίπου 130 μονάδες αεριοποίησης γαιανθράκων για παραγωγή υδρογόνου βρίσκονται σε λειτουργία, ενώ περισσότερο από το 80% αυτών είναι εγκατεστημένοι στην Κίνα. Δεδομένου ότι στην Κίνα οι τιμές του φυσικού αερίου είναι σχεδόν τρεις φορές υψηλότερες από ό,τι στις Ηνωμένες Πολιτείες, τα τεράστια αποθέματα άνθρακα της συγκεκριμένης χώρας αποτελούν την ελκυστικότερη πηγή παραγωγής υδρογόνου. Το κόστος παραγωγής υδρογόνου με βάση τα ορυκτά είναι περίπου €1,5/kg, το εκτιμώμενο κόστος παραγωγής με βάση τα ορυκτά και με ταυτόχρονη δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα είναι περίπου €2 /kg, ενώ το κόστος πράσινου υδρογόνου ανέρχεται στα €2,5-5,5/kg. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι από 1 τόνο λιγνίτη Πτολεμαΐδας, μπορούν να παραχθούν περίπου 18 κιλά υδρογόνου.

Τέλος, πετρώματα που εξορύσσονται μαζί με τον λιγνίτη και παραπροϊόντα της καύσης του μπορούν να αξιοποιηθούν ως πρώτη ύλη στον κλάδο των **κατασκευών**. Στα προϊόντα και υποπροϊόντα αυτής της κατηγορίας ανήκουν τα άγονα υλικά, η ιπτάμενη τέφρα, η τέφρα πυθμένα, η σκωρία και η γύψος. Τα παραπάνω υλικά μπορούν να πωληθούν ανεπεξέργαστα ή αφού μεταποιηθούν σε δομικά υλικά. Ειδικά η ιπτάμενη τέφρα έχει πολλές εφαρμογές στα ορυχεία και στην τσιμεντοβιομηχανία, ως ασθενές ποζολανικό υλικό. Επιπλέον, μπορεί να υποκαταστήσει το τσιμέντο Portland σε άοπλα σκυροδέματα, στην κατασκευή τσιμεντοπροϊόντων (κυβόλιθοι, πλάκες πεζοδρομίων, κλπ.), στην κατασκευή στοιχείων από άοπλο ή ελαφρά οπλισμένο σκυρόδεμα (στηθαία ασφαλείας, κλπ.), στην κατασκευή φραγμάτων από σκυρόδεμα με την τεχνολογία RCC (κυλινδρούμενο σκυρόδεμα), στην κατασκευή άκαμπτων οδοστρωμάτων, αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων, σε επενδύσεις σηράγγων, σε τσιμεντενέσεις, σε παραγωγή έτοιμων κονιαμάτων και κατασκευή χρηστικών αντικειμένων (γλάστρες, κλπ). Επίσης, μπορεί να έχει εφαρμογή στην κατεργασία και σταθεροποίηση εδαφών, στην παραγωγή συνθετικών ζεόλιθων, στην οδοποιία (για την κατασκευή επιχωμάτων, υποβάσεων και βάσεων και ως συστατικό του ασφαλτοσκυροδέματος) και σε εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων για την απορρόφηση των τοξικών στοιχείων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, οι αναδυόμενες τεχνολογίες αποκεντρωμένης παραγωγής, η απαίτηση προσαρμογής της διαχείρισης ενέργειας στην ψηφιακή οικονομία και πρωτίστως η παγκόσμια πρόκληση αντιμετώπισης της κλιματικής κρίσης, οριοθετούν το νέο πλαίσιο για το σύνολο της ενεργειακής οικονομίας τόσο σε εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

Η τριπλή πρόκληση της απανθρακοποίησης, ψηφιοποίησης και αποκεντρωμένης ενεργειακής παραγωγής, γνωστή διεθνώς ως «3Ds» (Decarbonization-Digitalization-Decentralization) διαμορφώνει νέες συνθήκες στις περιφέρειες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι οικονομίες των οποίων στηρίζονταν διαχρονικά στα στερεά ορυκτά καύσιμα. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνεται και η Δυτική Μακεδονία, δεδομένου ότι το 25% του περιφερειακού της ΑΕΠ προκύπτει από την εξόρυξη και καύση του λιγνίτη.

Από την άλλη πλευρά, το 2020 η παγκόσμια αγορά ορυκτού άνθρακα ανήλθε στα 698 δις δολάρια, συντηρώντας παράλληλα 7 εκ. θέσεις εργασίας, ενώ τα περιουσιακά στοιχεία (assets) των σαράντα μεγαλύτερων εταιρειών που δραστηριοποιούνται στην εξόρυξη και διαχείριση άνθρακα, εκτιμήθηκαν στο ιλιγγιώδες ύψος των 1,16 τρις δολαρίων (Statista, 2021).

Επιπλέον, με δεδομένο ότι τα οικονομικώς απολήψιμα αποθέματα άνθρακα ξεπερνούν παγκοσμίως τους 900 δις τόνους με το 32% να καταγράφεται στις ΗΠΑ, οι περισσότερες χώρες αναζητούν εναλλακτικές τεχνολογίες αξιοποίησης του άνθρακα και του λιγνίτη σε μη ενεργειακές χρήσεις.

Κίνητρα για τις προσπάθειες αυτές αποτελούν η κεφαλαιοποίηση των υποδομών και της τεχνογνωσίας που έχει σωρεύσει η αλυσίδα αξίας του άνθρακα τοπικά, η δημιουργία μιας ασφαλούς «γέφυρας» μετάβασης των τοπικών κοινωνιών στο νέο παραγωγικό περιβάλλον και βεβαίως, οι πολλαπλές προοπτικές που προσφέρει ο άνθρακας ως πρώτη ύλη στις απαιτήσεις της νέας βιομηχανικής εποχής, γνωστής και ως Βιομηχανία 4.0.

Αντικείμενο της παρούσας Τεχνικής Αναφοράς αποτελεί η αποτύπωση των ώριμων τεχνολογιών που αφορούν στην αξιοποίηση του λιγνίτη της Δυτικής Μακεδονίας σε μη ενεργειακές, έξω-ηλεκτρικές χρήσεις. Ως παραδοτέο, εντάσσεται στο έργο «*Ανάλυση και τεκμηρίωση της σκοπιμότητας αξιοποίησης του εγχώριου λιγνίτη σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας*», το οποίο υλοποιείται από το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας/ΤΔΜ και χρηματοδοτείται από το Ειδικό Αναπτυξιακό Πρόγραμμα (Ε.Α.Π.) Δυτικής Μακεδονίας.

Το έργο, φιλοδοξεί να δώσει μια ολοκληρωμένη απάντηση στο καίριο ερώτημα του πως και κάτω από ποιες προϋποθέσεις, τα οικονομικώς απολήψιμα κοιτάσματα λιγνίτη που θα παραμείνουν στη Δυτική Μακεδονία μετά το οριστικό

κλείσιμο των λιγνιτικών μονάδων, μπορούν να αξιοποιηθούν στην παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας.

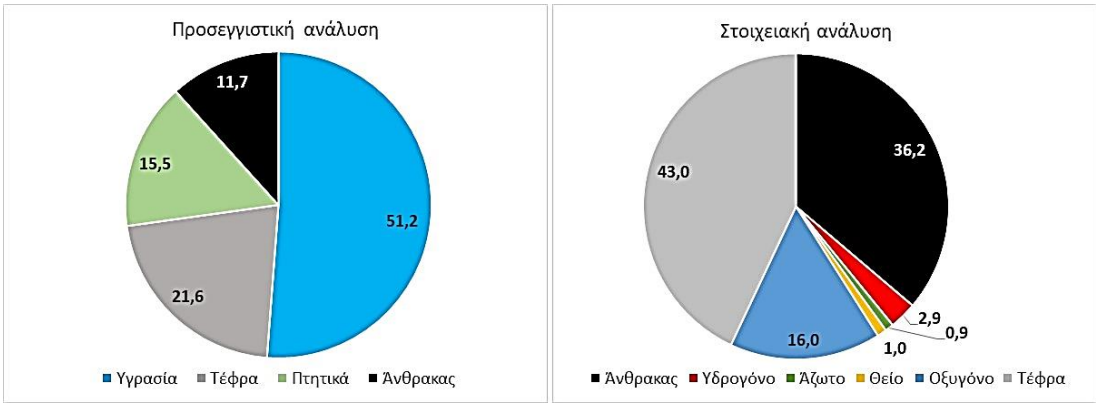
Το έργο διαρθρώνεται σε τέσσερα παραδοτέα με το πρώτο παραδοτέο (D1.1) να αποτελεί μια εκτενή παρουσίαση των διαθέσιμων τεχνολογιών αξιοποίησης του λιγνίτη σε έξω-ηλεκτρικές χρήσεις. Στο δεύτερο παραδοτέο (D1.2) αξιολογούνται οι διαθέσιμες τεχνολογίες με μια σειρά παραμέτρων, προκειμένου να αναδειχθούν οι περισσότερο υποσχόμενες για την περίπτωση της Δυτικής Μακεδονίας.Στο τρίτο παραδοτέο (D2.1) γίνεται μια πρωταρχική τεχνοοικονομική μελέτη των προκρινόμενων τεχνολογιών, ενώ στο τελευταίο παραδοτέο (D2.2) παρουσιάζεται το σύνολο των αποτελεσμάτων με τη μορφή περιφερειακής στρατηγικής για το μέλλον του λιγνίτη στη Δυτική Μακεδονία.

2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΛΙΓΝΙΤΗ

2.1 Τι είναι ο λιγνίτης

Ο λιγνίτης είναι μια στερεή καύσιμη ύλη. Είναι ένα ιζηματογενές πέτρωμα οργανικής προέλευσης, μαλακό, με χρώμα σκούρο καφέ. Αποτελείται κυρίως από τα στοιχεία άνθρακα, υδρογόνο, άζωτο, θείο και οξυγόνο ενώ περιέχει σε μεγάλο ποσοστό νερό. Ο λιγνίτης, όπως όλα τα πετρώματα που ανήκουν στην κατηγορία των γαιανθράκων, σχηματίστηκε από υπολείμματα φυτών σε λιμναίο περιβάλλον, τα οποία καταπλακώθηκαν και αποσυντέθηκαν κάτω από την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων. Η διαδικασία αυτή που ονομάζεται «ενανθράκωση» είχε ως αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό του λιγνίτη σε άνθρακα (Κούκουζας, 2020).

Ο λιγνίτης κατατάσσεται στα στερεά καύσιμα χαμηλής θερμιδικής αξίας. Το θερμιδικό περιεχόμενο των λιγνιτών είναι από 3 έως 7 φορές μικρότερο από το αντίστοιχο του λιθάνθρακα και 5 έως 10 φορές μικρότερο από αυτό του πετρελαίου. Παρόλα αυτά, μετά το τέλος του 2ου Παγκοσμίου Πολέμου δεκάδες υπαίθρια ορυχεία λιγνίτη τροφοδότησαν σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο.



Εικόνα 2.1: *Σύσταση του λιγνίτη*

2.2 Πού βρίσκεται λιγνίτης στον ελλαδικό χώρο

Τα επιβεβαιωμένα γεωλογικά αποθέματα λιγνίτη στην Ελλάδα ανέρχονται σε περίπου 5 δις τόνους και παρουσιάζουν αξιοσημείωτη γεωγραφική εξάπλωση σε όλο τον ελλαδικό χώρο, από τη Θράκη και τη Μακεδονία έως την Πελοπόννησο και την Κρήτη (Roumpos, 2018).

Τα κυριότερα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα λιγνίτη βρίσκονται στον ενεργειακό άξονα Κοζάνης – Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου – Φλώρινας, όπου λειτουργούν ήδη από τη δεκαετία του 1950 τα μεγαλύτερα υπαίθρια ορυχεία στην Ελλάδα. Η δεύτερη περιοχή σημαντικής λιγνιτικής εξορυκτικής δραστηριότητας βρίσκεται στην περιοχή της Μεγαλόπολης, στην Πελοπόννησο. Επιπρόσθετα, δύο

σημαντικά λιγνιτικά κοιτάσματα που μέχρι σήμερα παραμένουν ανεκμετάλλευτα βρίσκονται στις περιοχές της Δράμας και της Ελασσόνας (Κούκουζας, 2020).

Σύμφωνα με τη ΔΕΗ, οι ποσότητες λιγνίτη που έχουν εξορυχθεί μέχρι σήμερα φτάνουν περίπου στο 30% των αρχικών αποθεμάτων ενώ τα αποθέματα που απομένουν και είναι κατάλληλα για ενεργειακή εκμετάλλευση ανέρχονται σε περίπου 3,2 δις τόνους. Αν αναλογιστεί κανείς ότι στις καλύτερες εποχές της βιομηχανίας λιγνίτη της χώρας μας η ετήσια παραγωγή ήταν κοντά στα 70 εκατ. τόνους, καταλήγει εύκολα στο συμπέρασμα ότι τα αποθέματα που απομένουν είναι αρκετά για να καλύψουν τις ανάγκες πολλών δεκαετιών (Pavloudakis, 2018).

2.3 Πού και πώς χρησιμοποιήθηκε ο λιγνίτης μέχρι σήμερα

Η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος για πρώτη φορά στην Ελλάδα καταγράφεται το 1889 και, όπως ήταν φυσικό, ξεκίνησε από την Αθήνα. Σύμφωνα με τα ιστορικά στοιχεία της ΔΕΗ, η «Γενική Εταιρεία Εργοληψιών» κατασκεύασε στην Αθήνα, στην οδό Αριστείδου, την πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που έκαιγε γαιάνθρακα.

Ωστόσο, οι πρώτες προσπάθειες εκμετάλλευσης των λιγνιτικών κοιτασμάτων είχαν ήδη ξεκινήσει μετά τη σύσταση του Ελληνικού κράτους. Η παραγωγή λιγνίτη στην Κύμη Ευβοίας για την κάλυψη των αναγκών των ναυστάθμων του Ναυπλίου και του Πόρου χρονολογείται από το 1833, ενώ στη Ζαχάρω Ηλείας και το Μαρκόπουλο Αττικής ορυχεία λειτουργούσαν από το 1834 και 1840, αντίστοιχα. Σημαντικός αριθμός παραχωρήσεων εκμετάλλευσης δόθηκαν μετά το 1870. Η πρώτη συστηματική και μεγαλύτερης κλίμακας προσπάθεια για την εκμετάλλευση λιγνιτικών κοιτασμάτων στην Ελλάδα θεωρείται αυτή που ξεκίνησε το 1873 στο Αλιβέρι της Εύβοιας (Κούκουζας, 2020).

Στη Δυτική Μακεδονία ο λιγνίτης ήταν γνωστός από την Οθωμανοκρατία. Σε πολλά χωριά της επαρχίας Εορδαίας οι κάτοικοι είχαν ανοίξει πηγάδια και στοές για να πάρουν τον λιγνίτη και να τον χρησιμοποιήσουν για τη θέρμανση των σπιτιών τους. Η πρώτη επίσημη πράξη κρατικής υπηρεσίας για την εκμετάλλευση του λιγνίτη δημοσιεύεται στην εφημερίδα «Ηχώ της Κοζάνης» στις 2-2-1930 και αφορούσε στην οριστική παραχώρηση ορυχείου λιγνίτη στη θέση Δουρουτλάρ (σημερινό Προάστιο), στους Γ. Παυλίδη και Κ. Αδαμόπουλο (Μπούσιος, 1997).

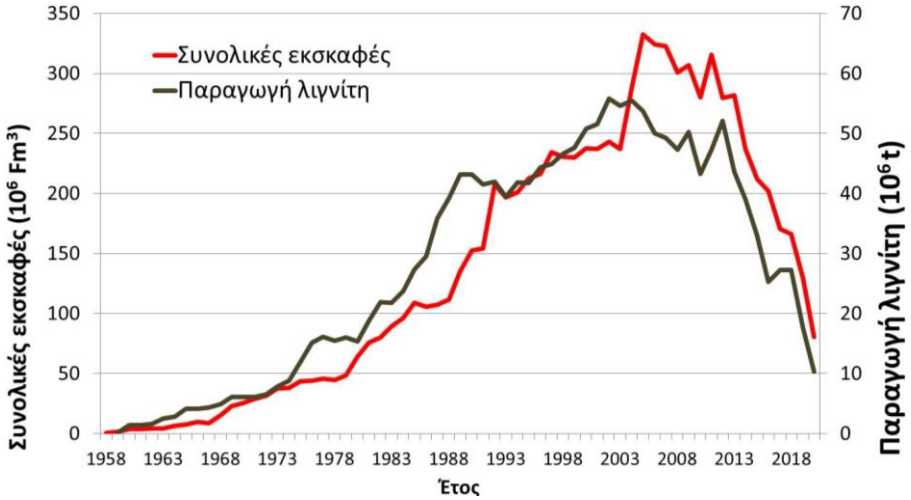
Το 1939, με τη δημοσίευση της έκθεσης του Γερμανού καθηγητή F. Kegel, ο οποίος εκτίμησε τα αποθέματα του λιγνίτη σε 6 δις τόνους, ξεκίνησε η πρώτη συστηματική προσπάθεια αξιοποίησης των λιγνιτών σε βιομηχανική κλίμακα. Την περίοδο εκείνη η Ελλάδα διέθετε περίπου 400 ιδιωτικές εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και κάλυπτε το 95% των ενεργειακών της αναγκών από εισαγωγές πετρελαίου και γαιάνθρακα.

Μετά τον 2ο Παγκόσμιο Πόλεμο οι Έλληνες πολιτικοί κατανόησαν τη σημασία της ενεργειακής ανεξαρτησίας και άρχισαν να σχεδιάζουν τον εξηλεκτρισμό της

χώρας με προτεραιότητα στην εκμετάλλευση των εγχώριων ενεργειακών πηγών. Η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού ιδρύθηκε τον Αύγουστο του 1950, κι έτσι οι δραστηριότητες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας συγκεντρώθηκαν για πρώτη φορά σε έναν Δημόσιο φορέα. Το ίδιο έτος ξεκίνησε από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) η υλοποίηση ενός μεγάλου προγράμματος ερευνητικών γεωτρήσεων, με στόχο τον εντοπισμό και την αξιολόγηση των λιγνιτικών κοιτασμάτων (Μπούσιος, 1997).

Σταθμός στις εξελίξεις που ακολούθησαν τα επόμενα έτη ήταν η ίδρυση, στις 7 Ιανουαρίου του 1956, της εταιρείας «Α.Ε.Μ.Β.Ε. ΛΙΓΝΙΤΩΡΥΧΙΩΝ ΠΤΟΛΕΜΑΙΔΑΣ», γνωστής ως ΛΙΠΤΟΛ, από τον Πρόδρομο Αθανασιάδη-Μποδοσάκη. Τον Σεπτέμβριο του ίδιου έτους, η ΛΙΠΤΟΛ υπέγραψε σύμβαση με τη γερμανική εταιρεία KHD για την κατασκευή του πρώτου σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύσιμο λιγνίτη, ισχύος 10 MW. Το 1957 ξεκίνησε η διάνοιξη του πρώτου ορυχείου, στο Κύριο Πεδίο και το 1959 εγκαινιάστηκαν η πρώτη μονάδα του ατμοηλεκτρικού σταθμού της ΛΙΠΤΟΛ, το εργοστάσιο λιγνιτοπλίνθων (μπριγκετών) και η πρώτη μονάδα του ατμοηλεκτρικού σταθμού Πτολεμαΐδας.

Η εκχώρηση του 90% των μετοχών της ΛΙΠΤΟΛ στη ΔΕΗ ήταν η απαρχή της ανάπτυξης υπαίθριων ορυχείων τεράστιας έκτασης που λειτουργούσαν με γερμανικής τεχνολογίας εξοπλισμό μεγάλης δυναμικότητας και τροφοδοτούσαν νέες, μεγαλύτερης ισχύος, ατμοηλεκτρικές μονάδες. Αυτή η συνεχής αύξηση της λιγνιτικής δραστηριότητας συνεχίστηκε μέχρι την δεκαετία του 2000. Έτσι, με την έναρξη λειτουργίας της μονάδας της Μελίτης Φλώρινας, η Δυτική Μακεδονία έφτασε να έχει 18 ατμοηλεκτρικές μονάδες με εγκατεστημένη ισχύ περίπου 4.400 MW και ορυχεία που έφτασαν να παράγουν σε ετήσια βάση 55 εκατ. τόνους λιγνίτη και να διακινούν συνολικά 330 εκατ. κυβικά μέτρα πετρωμάτων. Μέχρι σήμερα, περίπου 1,7 δισεκατομμύρια τόνοι λιγνίτη έχουν παραχθεί από τα ορυχεία της ΔΕΗ στη Δυτική Μακεδονία ενώ έχουν εξορυχθεί περισσότερα από 8,7 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα πετρωμάτων (Pavloudakis, 2021).



Εικόνα 2.2: *Ετήσια παραγωγή λιγνίτη και συνολικές εκσκαφές πετρωμάτων στα ορυχεία της ΔΕΗ στο λεκανοπέδιο Πτολεμαΐδας από την έναρξη της εκμετάλλευσής τους μέχρι σήμερα* (Pavloudakis, 2021).

Σε όλη την περίοδο της εντατικής εκμετάλλευσης του λιγνίτη με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρισμού, οι εναλλακτικές χρήσεις του λιγνίτη δεν αναπτύχθηκαν εξίσου. Το εργοστάσιο παραγωγής ημικώκ που κατασκευάστηκε για να τροφοδοτεί την μεταλλουργεία παραγωγής σιδηρονικελίου ΛΑΡΚΟ ουσιαστικά δεν λειτούργησε ποτέ. Αντίθετα, το εργοστάσιο λιγνιτοπλίνθων λειτούργησε από το 1959 μέχρι το 2008 παράγοντας μπριγκέτα και σκόνη λιγνίτη για οικιακή και βιομηχανική χρήση. Βασικοί βιομηχανικοί πελάτες υπήρξαν πλινθοποιεία, ασβεστοποιία, καθώς και οι μεταλλουργίες ΛΑΡΚΟ και ΓΕΝΙΜΑΚ, με έδρα στη Λάριμνα Φθιώτιδας και το Kavadarci της Βόρειας Μακεδονίας, αντίστοιχα, που χρησιμοποιούσαν το λιγνίτη για την αναγωγή και φρύξη του νικελιούχου σιδηρομεταλλεύματος. Η ΛΑΡΚΟ διέθετε και δικό της λιγνιτωρυχείο στην περιοχή Λάβα Σερβίων από το οποίο κάλυπτε για πολλά έτη τις ανάγκες της. Τα ιδιωτικά ορυχεία της Φλώρινας διέθεταν επίσης ποσότητες του ξυλίτη που παρήγαγαν σε οικιακούς καταναλωτές και σε θερμοκήπια των Νομών Πέλλας και Ημαθίας. Τέλος, μικρής κλίμακας εκμεταλλεύσεις σε διάφορους Νομούς της χώρας κάλυψαν κατά καιρούς τις ανάγκες των ελληνικών σιδηροδρόμων, της ΔΕΗ και διάφορων επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνταν στην περιοχή τους, από τσιμεντοβιομηχανίες και χαρτοβιομηχανίες μέχρι μονάδες παραγωγής εδαφοβελτιωτικών και οργανοχουμικών λιπασμάτων, κεραμοποιεία, ασβεστοποιεία και αρτοποιεία (Κούκουζας, 2020).

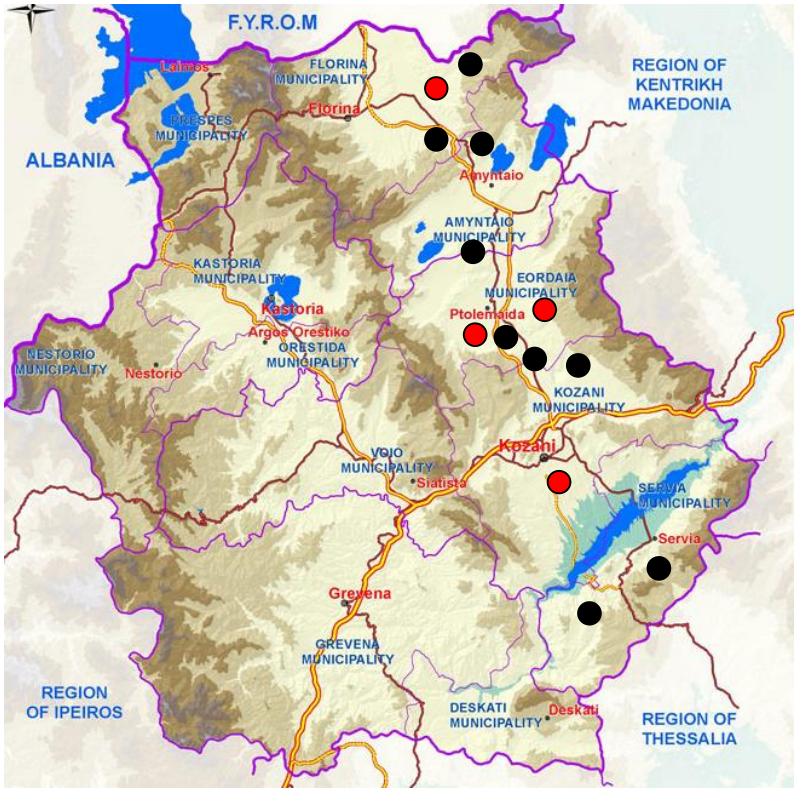
Αντίθετα απ' ότι συνέβαινε στην Ελλάδα, σε άλλες χώρες οι εξω-ηλεκτρικές χρήσεις του λιγνίτη αναπτύχθηκαν σε σημαντικό βαθμό, κυρίως σε βιομηχανικούς κλάδους που καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας, όπως οι χαλυβουργίες, οι μεταλλουργίες γενικά και τα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου. Το 2019 η παγκόσμια κατανάλωση μεταλλουργικού γαιάνθρακα ξεπέρασε το 1 δις τόνους, με την Κίνα να απορροφά 691 εκατ. τόνους. Επίσης, σε τεχνολογικό επίπεδο έχουν εξελιχθεί μέθοδοι για την αεριοποίηση και την υγροποίηση του λιγνίτη και την παραγωγή αερίου σύνθεσης, χωρίς όμως να επικρατήσουν εμπορικά λόγω υψηλού κόστους.

2.4 Πόσος λιγνίτης έχει απομείνει

Τα κυριότερα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα λιγνίτη βρίσκονται στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας, με απόθεμα 1,75 δις τόνους, στην Περιφερειακή Ενότητα (Π.Ε.) Δράμας, με απόθεμα 900 εκ. τόνους, στην περιοχή Ελασσόνας της Π.Ε. Λάρισας, με απόθεμα 169 εκ. τόνους και στην Περιφέρεια Πελοποννήσου, στην περιοχή Μεγαλόπολης της Π.Ε. Αρκαδίας, με εναπομένον απόθεμα περίπου 223 εκ. τόνους (Pavloudakis, 2018).

Σε ότι αφορά ειδικότερα τη Δυτική Μακεδονία, τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη που απομένουν στα λειτουργούντα ορυχεία της ΔΕΗ εκτιμώνται ότι είναι 690 εκατ. τόνοι (Εικόνα 2.3 και Πίνακας 1.1). Από αυτά, περίπου 50 εκατ. τόνοι προβλέπεται ότι θα καταναλωθούν από τους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς Αγίου

Δημητρίου και Πτολεμαΐδας V μέχρι την οριστική διακοπή της λειτουργίας τους. Επιπλέον, αποθέματα περίπου 170 εκατ. τόνων ανήκουν στα ιδιωτικά ορυχεία της περιοχής. Η ΔΕΗ έχει επίσης τα δικαιώματα εκμετάλλευσης 460 εκατ. τόνων λιγνίτη που έχουν εντοπιστεί σε περιοχές όπου δεν έχουν προς το παρόν ανοίξει ορυχεία ενώ πάνω από 300 εκατ. τόνοι έχουν εντοπιστεί σε περιοχές εκτός παραχωρήσεων (Pavloudakis, 2019).



Εικόνα 2.3: *Λιγνιτικά κοιτάσματα (●) και επιφανειακά ορυχεία (●) στη Δυτική Μακεδονία*

Πίνακας 1.1: *Αποθέματα των λιγνιτωρυχείων και των κοιτασμάτων λιγνίτη που παραμένουν ανεκμετάλλευτα της Δυτικής Μακεδονίας (πηγή: Κούκουζας, 2020, επικαιροποιημένη βάσει την παραγωγή των ορυχείων λιγνίτη των τελευταίων ετών).*

ΠΕΡΙΟΧΗ / Ορυχείο ή θέση κοιτάσματος	Γεωλογικά (αποδεδειγμένα)	Εκμεταλλεύσιμα	Πιθανά
ΦΛΩΡΙΝΑ	**343**	**306**	
Ιδιωτικά ορυχεία Αχλάδας και Βεύης		158	
Ορυχείο ΔΕΗ στο Κλειδί		31	
Λοιπά κοιτάσματα (Βεύη, Μελίτη, Λόφοι, κλπ)		107	
ΑΜΥΝΤΑΙΟ	**220**	**60**	180
Ορυχείο Αμυνταίου - Λακκιάς	220	60	
Κοίτασμα Βαλτόνερων			50

ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑ	**1891**	**1140**	**473**
Ορυχεία ΔΕΗ	950	600	
Λοιπά κοιτάσματα (Κομνηνά, Ανατολικό, κλπ)	941	540	473
ΚΟΖΑΝΗ	**293**	**138**	
ΣΕΡΒΙΑ	**5**	**9**	**115**
Ορυχεία Προσηλίου και Λάβας			

Πέρα από τα αποθέματα που έχουν απομείνει, σημαντική παρακαταθήκη για τη συνέχιση της οικονομικής εκμετάλλευσης του λιγνίτη αποτελούν η τεχνογνωσία που έχει συσσωρευθεί, τόσο στο επιστημονικό, όσο και το τεχνικό προσωπικό των ορυχείων καθώς και οι υπάρχουσες υποδομές και ο εξοπλισμός. Σε ότι αφορά τον τελευταίο, σήμερα στα ορυχεία της ΔΕΗ στη Δυτική Μακεδονία υπάρχουν 42 εκσκαφείς με καδοτροχό, 17 αποθέτες και πάνω από 200 χιλιόμετρα ταινιοδρόμων μεταφοράς των υλικών εξόρυξης. Επιπλέον, υπάρχει μεγάλος αριθμός πετρελαιοκίνητων μηχανημάτων, μερικά από τα οποία είναι τα μεγαλύτερα σε δυναμικότητα στη χώρα μας (Pavloudakis, 2018).

2.5 Πώς μπορούμε να αξιοποιήσουμε το λιγνίτη στο μέλλον

Η μετάβαση σε μια οικονομία μηδενικών εκπομπών άνθρακα δεν είναι έννοια ταυτόσημη με το κλείσιμο των ορυχείων λιγνίτη. Ο λιγνίτης θα συνεχίσει να χρησιμοποιείται σε διάφορες άλλες εφαρμογές που θεωρούνται κρίσιμες για σημαντικούς βιομηχανικούς κλάδους Σε ότι αφορά τις περιοχές που φιλοξενούν κοιτάσματα λιγνίτη, η συνέχιση της εκμετάλλευσής τους πρέπει να γίνει με τρόπο που θα δημιουργεί νέες ευκαιρίες εργασίας, θα μετριάζει τις κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις και θα εξασφαλίζει για όλους τους πολίτες την πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια με προσιτές τιμές.

Το Σχέδιο Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης (ΣΔΑΜ) για την Περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας χαρακτηρίζεται από πέντε αρχές (Pavloudakis, 2018):

- Ανάπτυξη ευκαιριών απασχόλησης στις τοπικές κοινότητες
- Αξιοποίηση των εγγενών πλεονεκτημάτων των περιοχών που θίγονται από τη μετάβαση
- Προτεραιότητα σε δράσεις με άμεσα θετικά αποτελέσματα
- Προώθηση της αειφορικής ανάπτυξης
- Ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών και προώθηση της καινοτομίας

Στο πλαίσιο αυτό, οι παραγωγικές δραστηριότητες που φαίνεται να πληρούν τις αρχές που προαναφέρθηκαν είναι οι εξής (Pavloudakis, 2019):

Παραγωγή «καθαρής» ενέργειας: Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων, τόσο από τη ΔΕΗ, όσο και από ιδιώτες επενδυτές και αγρότες αλλά και η αλλαγή του μείγματος καυσίμου στις τηλεθερμάνσεις των μεγάλων πόλεων της Δυτικής Μακεδονίας αποτελούν επενδύσεις που συμβάλουν στη μείωση της εξάρτισης από τα ορυκτά καύσιμα. Σε ότι αφορά τις τηλεθερμάνσεις, το νέο καύσιμο δεν είναι απαραίτητο να είναι το φυσικό αέριο. Ένα μίγμα λιγνίτη, βιομάζας και

επεξεργασμένων στερεών απορριμμάτων θα μπορούσε να λύσει ταυτόχρονα διαφορετικά προβλήματα που έχουν σχέση με την αποκατάσταση των εδαφών των ορυχείων και τη τελική διάθεση των καύσιμου κλάσματος των απορριμμάτων που παράγει η μονάδα επεξεργασίας που λειτουργεί στη Δυτική Μακεδονία. Η δημιουργία αντλισιοταμιευτήρων στα τελικά ορύγματα των λιγνιτωρυχείων αποτελεί επίσης μια λύση για την αποθήκευση ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές.

Βιομηχανία, βιοτεχνία, εμπόριο: Με την ολοκλήρωση του χωροταξικού σχεδιασμού των λιγνιτοφόρων περιοχών θα καθοριστούν ζώνες στις οποίες θα είναι δυνατό να εγκατασταθούν νέες παραγωγικές δραστηριότητες. Η αποδοχή του αιτήματος που έχει υποβληθεί προς την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για το χαρακτηρισμό των λιγνιτικών περιοχών ως περιοχών ειδικής φορολόγησης θα συμβάλει περαιτέρω στην προσέλκυση νέων δραστηριοτήτων.

«Έξυπνη» αγροτική παραγωγή: Η προοπτική της παραγωγής οργανοχουμικών λιπασμάτων και εδαφοβελτιωτικών με βάση το λιγνίτη και θερμότητας από μικρές μονάδας που θα καίνε λιγνίτη και βιομάζα μπορεί να αποτελέσει λύση για την παραγωγή μιας σειράς αγροτικών προϊόντων σε ανταγωνιστικές τιμές.

Τουρισμός: Η ανάπτυξη εναλλακτικών δράσεων τουρισμού μπορεί να αξιοποιήσει τη βιομηχανική κληρονομιά των ορυχείων και των ατμοηλεκτρικών σταθμών της Δυτικής Μακεδονίας.

Τεχνολογία και εκπαίδευση: Το Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας μπορεί να αποτελέσει τον κύριο πυλώνα έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης αλλά και εκπαίδευσης – κατάρτισης των εργαζόμενων που θα κληθούν να αλλάξουν αντικείμενο εργασίας.

Ειδικότερα για τις εξω-ηλεκτρικές χρήσεις του λιγνίτη, φαίνεται ήδη ότι πολλές από αυτές θα αποτελέσουν αντικείμενο έρευνας την επόμενη δεκαετία σε ότι αφορά τις προϋποθέσεις αξιοποίησης τους στην Δυτική Μακεδονία (Pavloudakis, 2021). Στις επόμενες παραγράφους της παρούσας μελέτης θα αναλυθούν οι ακόλουθες χρήσεις:

- Αεριοποίηση του λιγνίτη για παραγωγή πολυμερών και συνθετικών καυσίμων
- Εξαγωγή Σπανίων Γαιών
- Παραγωγή ενεργού άνθρακα
- Παραγωγή προϊόντων με βάση τα ανθρακονήματα
- Παραγωγή νανοϋλικών γραφενίου
- Παραγωγή οργανοχουμικών λιπασμάτων και εδαφοβελτιωτικών
- Παραγωγή δομικών υλικών από τα υποπροϊόντα της καύσης του λιγνίτη

Η επιλογή των χρήσεων αυτών έγινε με βάση: (α) τις εξελίξεις που σημειώνονται τα τελευταία χρόνια σε διεθνές επίπεδο γύρω από τις εξω-ηλεκτρικές χρήσεις του λιγνίτη, (β) τα επιτυχημένα παραδείγματα εφαρμογής τέτοιων χρήσεων σε άλλες Ευρωπαϊκές περιφέρειες που βρίσκονται υπό καθεστώς ενεργειακής μετάβασης και (γ) τις πρωτοβουλίες που λαμβάνονται από την Περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας και τις ερευνητικές στοχεύσεις τοπικών επιστημονικών φορέων.

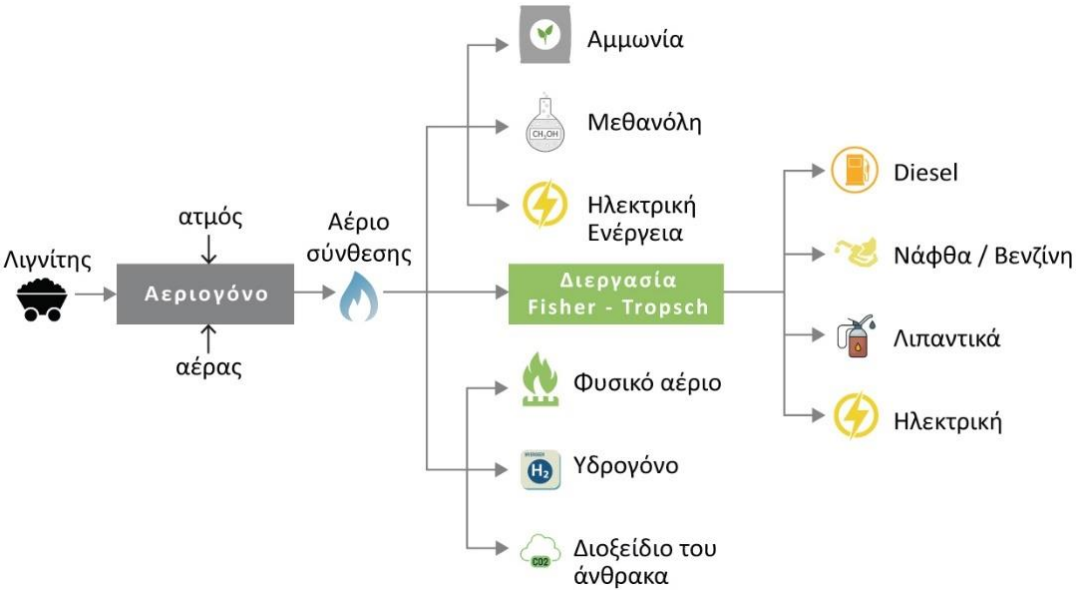
3. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΛΙΓΝΙΤΗ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΧΗΜΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

3.1 Παραγωγή καυσίμων και πρώτων υλών για τη χημική βιομηχανία

Η χρήση λιγνίτη για την παραγωγή καυσίμων κίνησης και πρώτων υλών για τη χημική βιομηχανία, σχετίζεται κυρίως με την τεχνολογία της **αεριοποίησης** (gasification). Στην ελληνική βιβλιογραφία θα τη συναντήσουμε και ως εξαερίωση, ένας όρος που αποδίδει τη γερμανική ορολογία Vergassung. Επιπρόσθετα, εμπορικά διαθέσιμη είναι και η τεχνολογία της **υγροποίησης** (liquefaction), μέσω της οποίας ο λιγνίτης μπορεί επίσης να μετατραπεί σε υγρά καύσιμα και πρώτες ύλες.

3.2 Η Τεχνολογία της αεριοποίησης

Με την τεχνολογία της αεριοποίησης κάθε στερεή η υγρή ουσία οργανικής προέλευσης, με προσθήκη ατμού και αέρα μετατρέπεται σε αέριο, γνωστό ως **αέριο σύνθεση**ς (syngas), το οποίο πρακτικά είναι μίγμα μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και υδρογόνου (H_2). Το παραγόμενο αέριο σύνθεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας ως καύσιμο για παραγωγή ισχύος, είτε να μετατραπεί σε μια σειρά ενεργειακών φορέων, προϊόντων τελικής κατανάλωσης ή πρώτων υλών για τη χημική βιομηχανία.



Εικόνα 3.1: *Δυνητικά προϊόντα παραγόμενα μέσω της αεριοποίησης λιγνίτη*

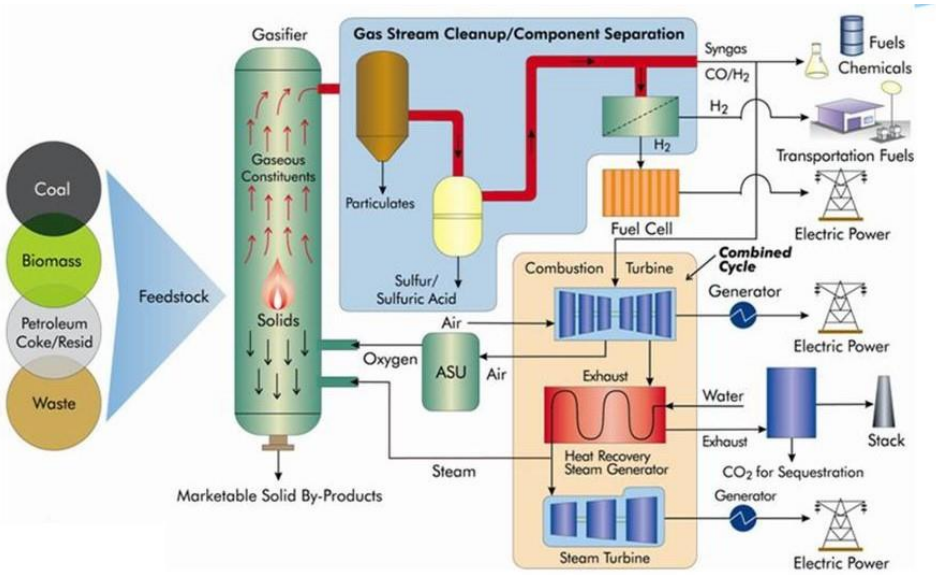
Στην περίπτωση της καύσης ο λιγνίτης οξειδώνεται πλήρως, μετατρέπεται σε καυσαέρια αποδίδοντας θερμότητα, ενώ τα άκαυστα συστατικά του

παραμένουν με τη μορφή τέφρας. Αντίθετα, στην περίπτωση της αεριοποίησης ο λιγνίτης οξειδώνεται μερικώς, αναβαθμίζεται σε αέριο μίγμα, ενώ η θερμότητα που παράγεται παρέχει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που απαιτείται για την εξέλιξη της διαδικασίας.

Η αεριοποίηση πραγματοποιείται σε ειδικούς αντιδραστήρες οι οποίοι καλούνται αεριογόνα (gasifiers), η τροφοδοσία των οποίων μπορεί να αποτελείται από οτιδήποτε υλικό οργανικής βάσης όπως λιγνίτης, απορρίμματα, βιομάζα αλλά και μίγματα αυτών. Υπάρχουν διαθέσιμοι διαφορετικοί τύποι αεριογόνων ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας, το μέγεθος της μονάδας, την εξειδίκευση της παραγωγής και τις απαιτήσεις διακύμανσης του φορτίου.

Ο συνδυασμός ενός αεριογόνου, μιας μονάδας επεξεργασίας αερίων και ενός συστήματος παραγωγής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου, αποτελεί τη βάση για τα **Ολοκληρωμένα Συστήματα Αεριοποίησης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC)**.

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2, στα παραγόμενα προϊόντα περιλαμβάνονται ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, υδρογόνο, επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια μέσω της καύσης του υδρογόνου σε κελιά καυσίμου (fuel cell), θεϊκό οξύ, άζωτο και βεβαίως, η δυνατότητα περαιτέρω παραγωγής βενζίνης, φυσικού αερίου και χημικών πρώτων υλών. Ακόμη και τα στερεά παραπροϊόντα του αεριογόνου αποτελούν εμπορεύσιμη πρώτη ύλη για τη βιομηχανία δομικών υλικών. Παράλληλα, η ενσωμάτωση του συστήματος συνδυασμένου κύκλου (ατμοστρόβιλος/αεριοστρόβιλος) αυξάνει σημαντικά την απόδοση της συνολικής διεργασίας.



Εικόνα 3.2: *Αντιπροσωπευτικό διάγραμμα λειτουργίας μονάδας IGCC (NETL, 2000)*

Τα συστήματα IGCC αποτελούν μια περισσότερο αποδοτική και λιγότερο ρυπογόνο τεχνολογία αξιοποίησης λιγνίτη, συγκριτικά με τη συμβατική καύση. Ενώ μια τυπική μονάδα καύσης μετατρέπει έως και το 38% του λιγνίτη σε ενέργεια, η τεχνολογία της αεριοποίησης μπορεί να αυξήσει το ποσοστό αυτό σε 45-50%, εκπέμποντας παράλληλα περίπου 20% λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα (Καρλόπουλος κ.α., 2005).

Από την άλλη πλευρά τα συστήματα IGCC απαιτούν υψηλό κόστος επένδυσης. Για παράδειγμα, εάν η υπό κατασκευή λιγνιτική μονάδα Πτολεμαΐδα V κατασκευαζόταν με την τεχνολογία IGCC θα απαιτούσε περίπου €2.4 δις, σχεδόν διπλάσιο κόστος συγκριτικά με τη συμβατική. Ενδεχομένως όμως, χρησιμοποιώντας συνδυασμένη τροφοδοσία λιγνίτη και απορριμμάτων, η μονάδα θα μπορούσε να λειτουργεί μέχρι το 2050, καλύπτοντας θερμικά το τοπικό σύστημα τηλεθέρμανσης, παράγοντας παράλληλα και υδρογόνο.

Επιπλέον, τα συστήματα IGCC είναι πολύπλοκα και σύνθετα στην ολοκληρωμένη λειτουργία τους. Ενώ η διαδικασία αεριοποίησης, οι μονάδες επεξεργασίας αερίων και το σύστημα συνδυασμένου κύκλου είναι εξαιρετικά ώριμες τεχνολογίες, η λειτουργική ολοκλήρωσή τους σε ένα ενιαίο παραγωγικό σύστημα αποτελεί τεχνολογική και διαχειριστική πρόκληση.

3.2.1 Εμπορική ωριμότητα

Η τεχνολογία της αεριοποίησης αποτελεί χαρακτηριστικότατο παράδειγμα για τον τρόπο με τον οποίο η στενότητα διαθεσιμότητας αλλά και η περιορισμένη προσβασιμότητα σε ενεργειακούς πόρους, επιδρούν καθοριστικά τόσο στις τεχνολογικές εξελίξεις όσο και στην αναζήτηση υποκατάστατων ενεργειακών φορέων.

Κατά τη διάρκεια του Β Παγκοσμίου Πολέμου η ζήτηση σε καύσιμα κίνησης ήταν ιδιαίτερα κρίσιμη, κυρίως σε χώρες όπως η Γερμανία οι οποίες δεν είχαν εύκολη πρόσβαση σε πετρέλαιο. Δεδομένου ότι η Γερμανία διατηρούσε στρατηγικά αποθέματα πετρελαίου για στρατιωτικούς σκοπούς, επέβαλε δια νόμου τη χρήση αεριογόνων βιομάζας για την κίνηση των οχημάτων. Υπολογίζεται ότι τη δεκαετία του 1940 εκατομμύρια γερμανικά οχήματα κινούνταν μέσω αεριοποίησης ξυλώδους βιομάζας (Freudenberg, 2020).

Εικόνα 3.3: *Τυπικό γερμανικό αυτοκίνητο του 1940, εξοπλισμένο με αεριογόνο και τα απαραίτητα ξύλα ως τροφοδοσία (Freudenberg, 2020)*

Περίπου τρία κιλά αερίου σύνθεσης ισοδυναμούσαν με ένα λίτρο βενζίνης, ενώ ανάλογα με το μέγεθος του αεριογόνου η αυτονομία του οχήματος κυμαινόταν από 80 έως 170 χιλιόμετρα (Freudenberg, 2020).

Με τη λήξη του πολέμου και την πρόσβαση σε φαινομενικά ανεξάντλητες και φθηνές πηγές καυσίμων με βάση το πετρέλαιο, η τεχνολογία της αεριοποίησης πέρασε στη λήθη. Η πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του 1970 επανάφερε την αεριοποίηση στο προσκήνιο. Σήμερα, η αεριοποίηση χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικά ώριμη τεχνολογία, επιπέδου **TRL[1] 9** (Carpenter et al., 2019). Σε τριάντα χώρες λειτουργούν 272 μονάδες παράγοντας αέριο σύνθεσης ισοδύναμο με 200 GWth, ενώ 74 μονάδες βρίσκονται σε φάση κατασκευής (Jafri et al., 2020). Για το 2019, η παγκόσμια αγορά αεριοποίησης κινήθηκε στα 479 δις δολάρια με προοπτική να φθάσει τα 900 δις το 2027 (Fortune Business Insights,2020).

3.3 Ενεργειακή Μετάβαση και Αεριοποίηση

Η μελλοντική τάση αξιοποίησης των στερεών ορυκτών καυσίμων σχετίζεται ευθέως με τη δυνατότητά τους να ενσωματωθούν αποτελεσματικά και συνεργατικά με τις νέες, αναδυόμενες τεχνολογίες, με απαιτήσεις Βιομηχανικής Συμβίωσης. Η προοπτική των γαιανθράκων θα κριθεί στο μέλλον από την δυνατότητά τους να ενσωματωθούν στο νέο ενεργειακό περιβάλλον με όρους Κυκλικής Οικονομίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το έργο Carbontrans στην περιοχή Saxony-Anhalt της Γερμανίας.

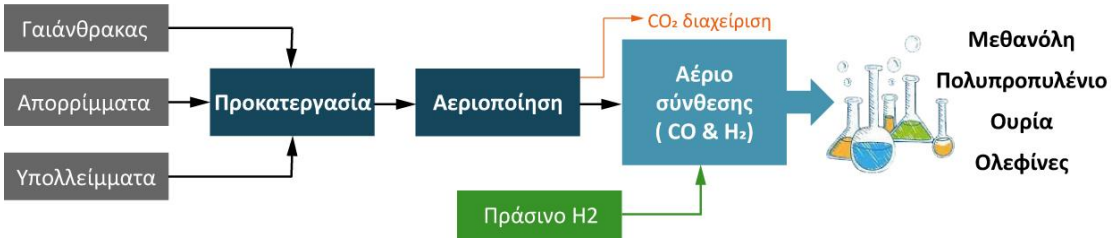
3.3.1 Η περίπτωση του έργου CARBONTRANS

Η Σαξονία-Άνχαλτ είναι ομόσπονδο κρατίδιο της Γερμανίας με σημαντική βιομηχανία εξόρυξης και καύσης στερεών ορυκτών καυσίμων. Η ετήσια παραγωγή λιγνίτη κυμαίνεται στους 19 εκ τόνους, απασχολώντας άμεσα περίπου 2.400 εργαζόμενους ενώ σύμφωνα με τις εξαγγελίες της Γερμανικής Κυβέρνησης, μέχρι το 2038 η συμβατική χρήση του λιγνίτη στην ηλεκτροπαραγωγή θα έχει μηδενισθεί (Kropp et al., 2019). Δεδομένου όμως ότι η βιομηχανία λιγνίτη έχει πολύ ισχυρή θετική επίπτωση στην απασχόληση και στην οικονομία της συγκεκριμένης περιοχής, οι τοπικοί φορείς αναζήτησαν εναλλακτικούς τρόπους αξιοποίησης του τοπικού λιγνίτη, προκειμένου να κεφαλαιοποιήσουν τις υπάρχουσες υποδομές και την τεχνογνωσία.

Στη κατεύθυνση αυτή δημιούργησαν συνεργατικό σχηματισμό (cluster) με τη συμμετοχή ακαδημαϊκών και ερευνητικών φορέων, μεγάλων και μικρών επιχειρήσεων, ακόμη και τοπικών μελετητικών γραφείων. Το 2018, κατέληξαν ότι

1 Η κλίμακα **T**echnology **R**eadiness **L**evel (TRL) ορίστηκε από τη NASA τη δεκαετία του 1990 ως μέσο για τη μέτρηση ή την ένδειξη της ωριμότητας μιας δεδομένης τεχνολογίας. Το TRL εκτείνεται σε εννέα κλιμακωτά επίπεδα, όπου ως TRL 1 χαρακτηρίζεται η τεχνολογία που έχει μόνο θεωρητική βάση, ενώ με TRL 9 χαρακτηρίζεται μια ώριμη και εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία.

η βέλτιστη επιλογή για την περιοχή τους αποτελεί η τεχνολογία συνδυασμένης αεριοποίησης λιγνίτη και απορριμμάτων με στόχο την παραγωγή πρώτων υλών για τη χημική βιομηχανία (Fraunhofer-Institut, 2018). Η τεχνολογική φιλοσοφία της διαδικασίας έχει ως ακολούθως:



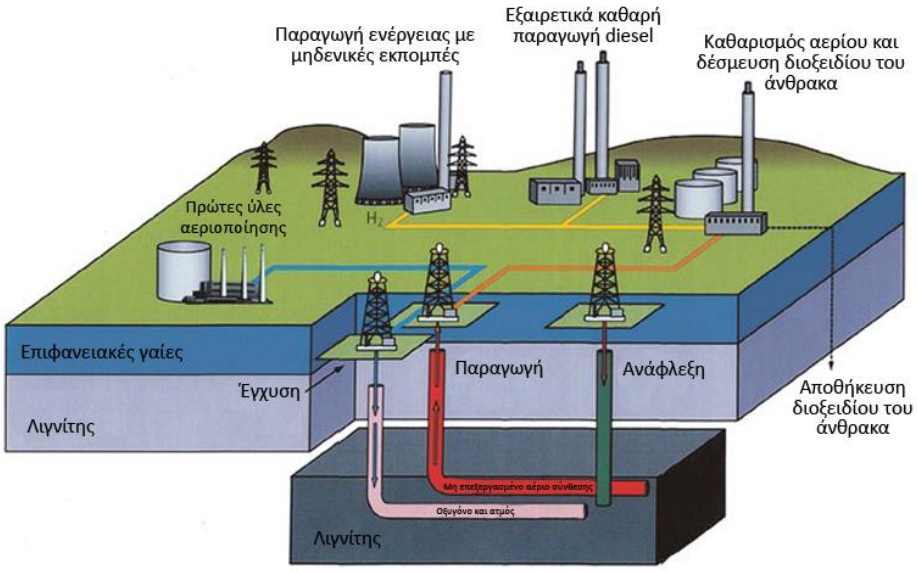
Εικόνα 3.4: *Συνδυασμένη αεριοποίηση λιγνίτη και απορριμμάτων στο πλαίσιο του έργου Carbontrans.*

Προκειμένου να ωριμάσουν τις τεχνικές παραμέτρους, να βελτιώσουν την παραγωγική διαδικασία και να αποφύγουν τυχόν αστοχίες, αποφάσισαν να κατασκευάσουν μια πιλοτική μονάδα κόστους 30 εκ ευρώ και να τη θέσουν σε λειτουργία το 2024. Η πιλοτική μονάδα θα τροφοδοτείται ετησίως με 25.000 τόνους λιγνίτη και απορριμμάτων, θα παράγει αρχικά κυρίως μεθανόλη ενώ το διάστημα 2018-2021 ολοκληρώθηκαν οι σχεδιαστικές και προπαρασκευαστικές διαδικασίες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι πολλές χώρες έχουν δείξει μεγάλο ενδιαφέρον για τα αποτελέσματα του εγχειρήματος και κυρίως για τον τρόπο με τον οποίο ένας συμβατικός ενεργειακός πόρος μπορεί να αξιοποιηθεί με πρακτικές κυκλικής οικονομίας, διευρύνοντας μια υπάρχουσα και αποδοτική αλυσίδα αξίας (Fraunhofer-Institut, 2018).

3.4 Υπόγεια Αεριοποίηση Λιγνίτη

Η διαδικασία της υπόγειας αεριοποίησης περιλαμβάνει τη διάνοιξη δυο γεωτρήσεων από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι μέσα στο στρώμα του λιγνίτη. Η πρώτη γεώτρηση χρησιμοποιείται για την έγχυση των μέσων αεριοποίησης (ατμός/αέρας ή ατμός/οξυγόνο) και η δεύτερη, προκειμένου να οδεύει το παραγόμενο αέριο στην επιφάνεια. Ο λιγνίτης αεριοποιείται υπόγεια στη ζώνη του αεριογόνου αντιδραστήρα όπου τα εγχεόμενα μέσα αντιδρούν με τον λιγνίτη για να σχηματίσουν το αέριο σύνθεσης, το οποίο κατευθύνεται στην επιφάνεια μέσα από την γεώτρηση παραγωγής, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3.5: *Απλοποιημένο διάγραμμα ροής μονάδας υπόγειας αεριοποίησης γαιάνθρακα.*

Μια σειρά προτερημάτων καθιστούν την υπόγεια αεριοποίηση ελκυστική για τις χώρες που διαθέτουν σημαντικά κοιτάσματα στερεών ορυκτών καυσίμων (Green et al., 2012):

- Δεδομένου ότι δεν απαιτούνται εργασίες συμβατικής εξόρυξης λιγνίτη, μειώνεται το λειτουργικό κόστος και εξαλείφονται θέματα ασφαλείας ορυχείων.
- Δυνατότητα αξιοποίησης μη ελκυστικών κοιτασμάτων σε μεγάλο βάθος ή χαμηλής ποιότητας, αυξάνοντας τη διαθεσιμότητα των εγχώριων πόρων.
- Δεν απαιτούνται συστήματα επιφανειακής αεριοποίησης, μειώνοντας σημαντικά το κόστος επένδυσης ενώ ταυτόχρονα, δεδομένου ότι δεν έχουμε διακίνηση υλικών με φορτηγά ή ταινιοδρόμους, το κόστος λειτουργίας μειώνεται περαιτέρω.
- Ο λιγνίτης δεν διακινείται και δεν μεταφέρεται στην επιφάνεια, μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε τοπικό επίπεδο, ενώ η τέφρα παραμένει αποθηκευμένη στο υπέδαφος.
- Δεν υπάρχει παραγωγή συμβατικών ρύπων (π.χ. SOx, NOx), οι υπόλοιποι ρύποι (υδράργυρος και σωματίδια) μειώνονται σε πολύ μεγάλο βαθμό συγκριτικά με την καύση λιγνίτη ενώ η διαχείρισή τους καθίσταται εξαιρετικά ευκολότερη και αποτελεσματική.

Επιπλέον, η υπόγεια αεριοποίηση δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες αποθήκευσης του CO_2 γεωλογικά, τόσο στη ζώνη του αντιδραστήρα όσο και σε παρακείμενα στρώματα.

3.4.1 Εμπορική ωριμότητα

Η τεχνολογία της υπόγειας αεριοποίησης, γνωστή διεθνώς ως Underground Coal Gasification (UCG) βρίσκεται σε πολύ προχωρημένο στάδιο, **TRL 6-7**, αλλά όχι σε εντελώς ώριμο επίπεδο. Η έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη κυρίως στην Κίνα, τη Ρωσία, την Ινδία, την Ευρώπη, τη Νότια Αφρική αλλά και στις ΗΠΑ (Carpenter et al., 2019).

Εικόνα 3.6: *Πιλοτικές δράσεις έργων υπόγειας αεριοποίησης άνθρακα (Yang et al., 2016)*

Η έρευνα αφορά στην απαίτηση παραγωγής οξυγόνου με ανταγωνιστικότερο κόστος, στον έλεγχο των συνθηκών στη ζώνη αεριοποίησης με στόχο την παραγωγή αερίου σύνθεσης σταθερής ποιότητας, στην ανάπτυξη αντιδιαβρωτικών υλικών και βεβαίως, στη διαχείριση του CO2 και στην προστασία του υδροφόρου ορίζοντα.

3.4.2 Η περίπτωση της βίο-αεριοποίησης

Μια αναδυόμενη πρακτική η οποία βρίσκεται ακόμη σε εργαστηριακό επίπεδο προσομοίωσης, αφορά στην έγχυση διαλύματος στο κοίτασμα του λιγνίτη με στόχο την παραγωγή βιοαερίου. Η τεχνολογία χαρακτηρίζεται ως βίο-αεριοποίηση (biogasification), δεδομένου ότι οι διαλύτες αποτελούνται από φυσικούς μικροοργανισμούς που χρησιμοποιεί η ίδια η φύση για την αποικοδόμηση της οργανικής ύλης, ενώ δεν προκύπτουν ανεπιθύμητα παραπροϊόντα. Πειραματικές δοκιμές έδειξαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα σε

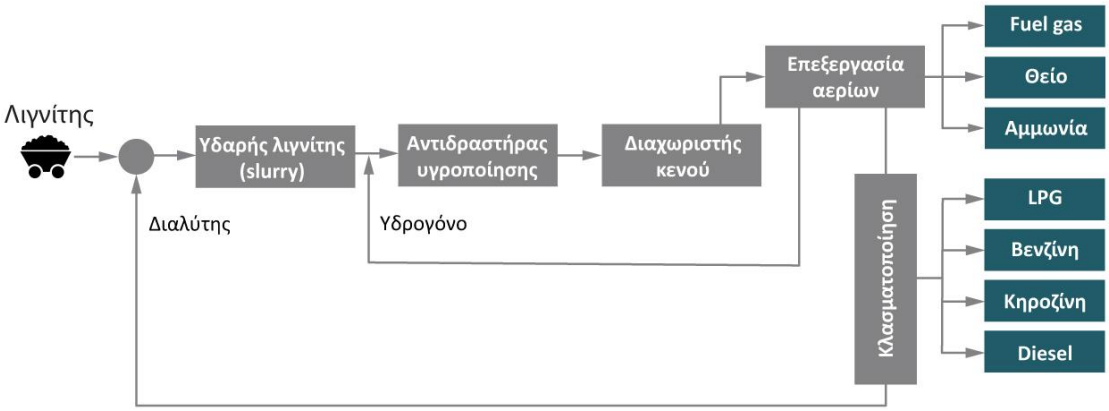
δείγματα λιγνίτη, με το παραγόμενο αέριο να αποτελείται σε ποσοστό 99.9% από μεθάνιο (Janiga et al., 2018).

3.5 Η τεχνολογία της υγροποίησης

Μέσω της υγροποίησης ο λιγνίτης μετατρέπεται σε υγρά καύσιμα κυρίως βενζίνη, κηροζίνη και diesel, ακολουθώντας δύο εναλλακτικές παραγωγικές διαδικασίες:

Έμμεση υγροποίηση όπου το αέριο σύνθεσης από την αεριοποίηση λιγνίτη μετατρέπεται σε υγρούς υδρογονάνθρακες μέσω της σύνθεσης Fischer-Tropsch (FT), μια ώριμη τεχνολογία γνωστή από το 1925. Η διαδρομή σύνθεσης FT παράγει κυρίως ντίζελ, λιπαντικά και παραφινική νάφθα για πετροχημικές εφαρμογές. Παράλληλα, με ενδιάμεσο στάδιο την σύνθεση μεθανόλης παράγονται βενζίνη, διμεθυλαιθέρας (DME) και μια σειρά χημικών πρώτων υλών.

Άμεση υγροποίηση του λιγνίτη η οποία περιλαμβάνει την άμεση επαφή του με καταλύτη σε αυξημένες θερμοκρασίες και πιέσεις με προσθήκη υδρογόνου (H_2) και παρουσία ενός διαλύτη, για να σχηματιστεί ένα ακατέργαστο υγρό προϊόν, το οποίο στη συνέχεια εξευγενίζεται σε υγρά καύσιμα και πρώτες ύλες. Η διαδικασία ονομάζεται άμεση, δεδομένου ότι ο λιγνίτης μετατρέπεται σε υγρό, χωρίς προηγουμένως να έχει αεριοποιηθεί.



Εικόνα 3.7: *Διαδικασία άμεσης υγροποίησης λιγνίτη.*

3.5.1 Εμπορική ωριμότητα

Εμπορικές μονάδες υγροποίησης άνθρακα για παραγωγή υγρών καυσίμων και πρώτων υλών, γνωστών διεθνώς ως μονάδες Coal to Liquid (CTL), λειτουργούν κυρίως στην Κίνα, στη Νότια Αφρική, την Ινδία και στις ΗΠΑ. Η τεχνολογία είναι ώριμη, επιπέδου **TRL 8-9** (Carpenter et al., 2019).

3.5.2 Η περίπτωση της μονάδας Shenhua Ningxia

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η μεγαλύτερη μονάδα CTL τέθηκε σε λειτουργία το 2016 στην Κίνα, ικανή να μετατρέπει 20 Mt άνθρακα σε 4 Mt προϊόντων πετρελαίου ετησίως, συμπεριλαμβανομένων 2,7 Mt ντίζελ, 980.000 t νάφθα και 340.000 τόνοι υγροποιημένου φυσικού αερίου (Shenhua Plant, 2020). Τα εμπορεύσιμα υποπροϊόντα περιλαμβάνουν 200.000 τόνους θείου, 75.000 τόνους αλκοόλης και 145.000 τόνοι θειικού αμμωνίου. Με μία επένδυση της τάξης των 7 δις δολαρίων, η Κίνα προσπαθεί να ισχυροποιήσει την ασφάλεια του ενεργειακού της εφοδιασμού, αξιοποιώντας τα τεράστια κοιτάσματα άνθρακα που διαθέτει.

Σε κάθε περίπτωση, οι μονάδες υγροποίησης λιγνίτη είναι εντάσεως κεφαλαίου όσον αφορά στην κατασκευή τους και πολύπλοκες λειτουργικά. Από την άλλη πλευρά όμως έχουν τη δυνατότητα να διαφοροποιούν την παραγωγή μεταξύ μιας μεγάλης γκάμας προϊόντων και να την προσαρμόζουν στα προϊόντα με τη μεγαλύτερη, τρέχουσα εμπορική αξία, αυξάνοντας την απόδοση της επένδυσης.

3.6 Η κατάσταση στην Ελλάδα

Ενδεχομένως να μην είναι ευρέως γνωστό αλλά η φαινομενικά «εξωτική» τεχνολογία της αεριοποίησης ήταν σε πλήρη εμπορική εφαρμογή στην Ελλάδα από την δεκαετία του 1960. Συγκεκριμένα, με χρήση αεριογόνου Koppers- Totzek, η Ανώνυμη Εταιρεία Βιομηχανία Αζωτούχων Λιπασμάτων (ΑΕΒΑΛ) στην Πτολεμαΐδα, παρήγαγε αέριο σύνθεσης με χρήση τοπικού λιγνίτη με τελικό προϊόν την παραγωγή αζωτούχων λιπασμάτων. Για διαφορετικούς λόγους, λίγο πριν το 2000 η ΑΕΒΑΛ ανέστειλε οριστικά τη λειτουργίας της.

Ανακεφαλαιώνοντας, τόσο η αεριοποίηση όσο και η υγροποίηση λιγνίτη αποτελούν εμπορικά ώριμες τεχνολογίες, ελκυστικές για τις χώρες με επαρκή κοιτάσματα γαιανθράκων και με ταυτόχρονη ανεπάρκεια σε κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου. Αποτελούν επενδύσεις εντάσεως κεφαλαίου και τεχνογνωσίας, ενώ η βιωσιμότητά τους εξαρτάται σε καθοριστικό βαθμό από τις τιμές του πετρελαίου στην παγκόσμια αγορά και τη διακύμανση των τιμών διοξειδίου του άνθρακα στην αγορά ρύπων.

Πίνακας 3.1: *Εμπορική ωριμότητα και οικονομικότητα τεχνολογιών αεριοποίησης –υγροποίησης λιγνίτη*

	Ωριμότητα	Οικονομικότητα
Αεριοποίηση	TRL 9	Κόστος επένδυσης 110% υψηλότερο συγκριτικά με συμβατική μονάδα καύσης κονιοποιημένου λιγνίτη, αλλά με δυνατότητα διαφοροποίησης της τροφοδοσίας μέσω προσθήκης και απορριμμάτων, καθώς και υψηλή ευελιξία στη διαφοροποίηση της παραγωγής (de Pee et al., 2018).

Υπόγεια Αεριοποίηση	TRL 6-7	Δεν απαιτεί ιδιαίτερα υψηλό κόστος επένδυσης, αλλά η βιωσιμότητά τους εξαρτάται από μια σειρά φυσικών χαρακτηριστικών όπως η διακύμανση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του λιγνίτη, το βάθος και το πάχος των κοιτασμάτων, η απόσταση μεταξύ των κενών χώρων εντός του πετρώματος καθώς και η αντλησιμότητα. Με βάση πραγματικά δεδομένα αλλά και θεωρητικούς υπολογισμούς, προκύπτει ένα εύρος κόστους από 1 έως 8 δολάρια ανά GJ παραγόμενου αερίου σύνθεσης (Business insider, 2011).
Υγροποίηση	TRL 8-9	Απαιτητική και σύνθετη λειτουργικά διαδικασία, ανταγωνιστική και βιώσιμη επένδυση με τιμές αργού πετρελαίου υψηλότερες των $80 το βαρέλι (Brian et al., 2014).

Αξίζει να αναφερθεί ότι το 2000, το Υπουργείο Εμπορίου και Βιομηχανίας του Ηνωμένου Βασιλείου δημοσίευσε μια στοχευμένη μελέτη για την προοπτική των τεχνολογιών υγροποίησης γαιανθράκων. Με βασικά κριτήρια τα διαθέσιμα κοιτάσματα λιγνίτη ανά χώρα, το βαθμό εξάρτησης από εισαγωγές ενεργειακών πόρων, το κόστος εξόρυξης λιγνίτη τοπικά και το λόγο παραγωγή λιγνίτη/οικονομικώς απολήψιμα κοιτάσματα, οι χώρες αξιολογήθηκαν στην κλίμακα 1 έως 5, με το 1 να αντιστοιχεί σε πολύ ψηλή προοπτική και κλιμακωτά, το 5 να αντιστοιχεί σε σχεδόν μηδενική προοπτική.

Οι ΗΠΑ κατέλαβαν την πρώτη θέση με δείκτη 1, ενώ η Ελλάδα, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Κίνα, η Ινδία, η Νότια Αφρική, η Ιαπωνία, η Ινδονησία και η Αυστραλία αξιολογήθηκαν με δείκτη 2, ως οι πλέον υποσχόμενες χώρες παγκοσμίως για τις τεχνολογίες υγροποίησης λιγνίτη. Ακολουθούν με δείκτη 3, Γερμανία, Βουλγαρία, Τουρκία, Ισπανία και Ρουμανία (UK-DTI, 1999).

Σε κάθε περίπτωση, αν και οι ερευνητικοί και ακαδημαϊκοί φορείς της χώρας μας έχουν συμμετάσχει και συμμετέχουν σε πολλά και σημαντικά ερευνητικά ευρωπαϊκά έργα με αντικείμενο τόσο την αεριοποίηση λιγνίτη, απορριμμάτων και βιομάζας όσο και τις πρακτικές διαχείρισης και αξιοποίησης του διοξειδίου του άνθρακα (CCS/CCU), δύσκολα θα ισχυριστεί κανείς ότι διαθέταμε ή διαθέτουμε μια ξεκάθαρη εθνική στρατηγική για τις συγκεκριμένες τεχνολογίες.

4. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΣΠΑΝΙΩΝ ΓΑΙΩΝ ΑΠΟ ΛΙΓΝΙΤΗ

4.1 Ποιες είναι οι σπάνιες γαίες

Σπάνιες γαίες ή σπάνια μέταλλα ή σπάνια οξείδια θεωρούνται τα 15 στοιχεία τα οποία στον περιοδικό πίνακα κατατάσσονται στη σειρά των Λανθανίδων (King, 2021):

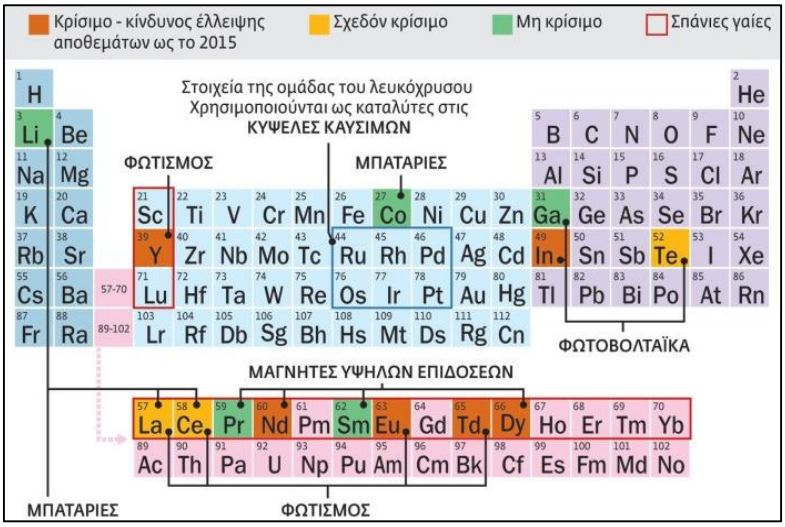
Λανθάνιο (La)	Σαμάριο (Sm)	Έρβιο (Er)
Δημήτριο (Ce)	Ευρώπιο (Eu)	Θούλιο (Tm)
Προσινοδύμιο (Pr)	Γαδολίνιο (Gd)	Υττέρβιο (Yb)
Νεοδύμιο (Nd)	Δυσπρόσιο (Dy)	Λουτήτιο (Lu)
Προμήθειο (Pm)	Όλμιο (Ho)	

Λόγω των παρόμοιων φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τους, οι σπάνιες γαίες εμφανίζονται συνήθως μαζί στα ορυκτά που τις φιλοξενούν. Για τον ίδιο λόγο, της ομοιότητας δηλαδή των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών, μαζί με τις σπάνιες γαίες συναντώνται και τα στοιχεία **Σκάνδιο (Sc)** και **Ύττριο (Y)** ώστε να κατατάσσονται και αυτά καταχρηστικά στις σπάνιες γαίες (US DoE, 2017; King, 2021).

Ως κρίσιμες σπάνιες γαίες θεωρούνται το Ύττριο, το Νεοδύμιο, το Ευρώπιο, το Τέρβιο, το Δυσπρόσιο και το Έρβιο (Seredin, 2010).

Οι σπάνιες γαίες δεν είναι τόσο σπάνιες όσο υπονοεί η ονομασία τους. Πολλές από αυτές έχουν μέσες συγκεντρώσεις στο στερεό φλοιό της γης μεγαλύτερες από πολλά άλλα στοιχεία που χρησιμοποιούμε συχνά στην καθημερινότητά μας. Για παράδειγμα, το **Δημήτριο** έχει ίδια μέση συγκέντρωση με το Χαλκό και διπλάσια από το Κοβάλτιο. Ίδια μέση συγκέντρωση με το Κοβάλτιο έχουν το **Λανθάνιο** και το **Νεοδύμιο**, ενώ όλα αυτά, μαζί με **το Ύττριο** και το **Σκάνδιο,** έχουν μεγαλύτερες μέσες συγκεντρώσεις από το Μόλυβδο. Σε σχέση με τα πολύτιμα μέταλλα όπως ο Χρυσός, πολλές από τις σπάνιες γαίες έχουν μέσες συγκεντρώσεις μεγαλύτερες κατά 100 φορές (King, 2021).

Παρόλα αυτά, ο χαρακτηρισμός σπάνιες γαίες συνδέεται με το γεγονός ότι τα στοιχεία αυτά σπάνια βρίσκονται σε συγκεντρώσεις που να επιτρέπουν την οικονομική τους εκμετάλλευση.



Εικόνα 4.1: Περιοδικός πίνακας στον οποίο επισημαίνονται οι σπάνιες γαίες (κόκκινο πλαίσιο) και χαρακτηρίζεται η κρισιμότητά τους λόγω πιθανής έλλειψης στο μέλλον *Πηγή: https://physicsgg.me (28/8/2011)*

4.2 Ποιοι και πού τις χρησιμοποιούν

Οι σπάνιες γαίες περιέχονται σε πολλές συσκευές που χρησιμοποιούμε καθημερινά. Η χρήση τους διασφαλίζει τεχνολογική υπεροχή σε προϊόντα όπως οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, τα κινητά τηλέφωνα, οι επίπεδες οθόνες, οι καταλυτικοί μετατροπείς, οι μαγνήτες, τα φθορίζοντα υλικά, κ.α.

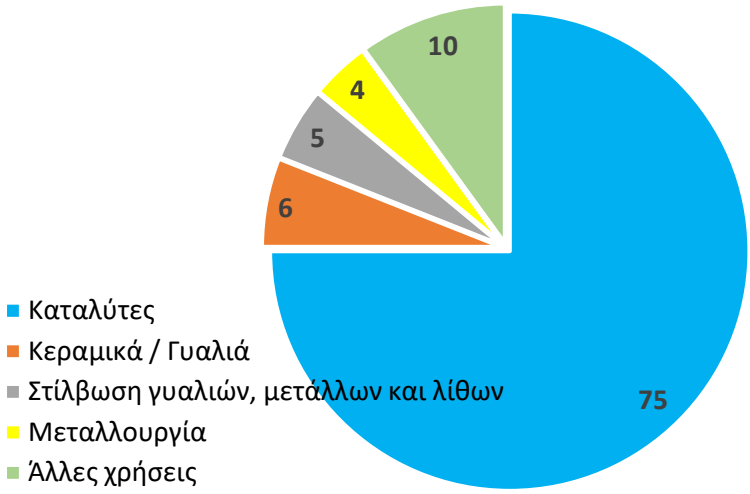
Στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζονται οι χρήσεις των σπάνιων γαιών στις ΗΠΑ για το έτος 2020, από το οποίο φαίνεται ότι η συντριπτική πλειοψηφία των σπάνιων γαιών χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή καταλυτικών μετατροπέων για τη δέσμευση ρύπων στις εξατμίσεις των αυτοκινήτων (US DoE, 2017; National Coal Council, 2019; King, 2021).

Σε ότι αφορά τις μελλοντικές τάσεις, η ζήτηση των σπάνιων γαιών αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά, ειδικά για την κατασκευή μπαταριών, λόγω της ευρύτατης χρήσης φορητών υπολογιστών και κινητών τηλεφώνων και της στροφής της αυτοκινητοβιομηχανίας σε ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα ώστε να μειωθούν οι εκπομπές ρύπων που ενοχοποιούνται για την κλιματική αλλαγή. Άλλες χρήσεις που προβλέπεται να ζητήσουν αυξημένες ποσότητες στο μέλλον είναι η παραγωγή καταλυτών και στιλβωτικών μέσων.

Οι σπάνιες γαίες έχουν επίσης αυξημένη σημασία για την αμυντική βιομηχανία. Το Λανθάνιο χρησιμοποιείται στην κατασκευή γυαλιών νυχτερινής οράσεως, το Νεοδύμιο σε αποστασιομετρητές laser, το Σαμάριο σε όπλα με καθοδήγηση ακριβείας καθώς και στην τεχνολογία Stealth.

Η χρήση των σπάνιων γαιών από την αμυντική βιομηχανία, σε συνδυασμό με το ότι η παραγωγή τους ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από τη Κίνα, τις καθιστούν πρώτες ύλες στρατηγικού ενδιαφέροντος για τις υπόλοιπες ισχυρές οικονομίες,

που χρηματοδοτούν με μεγάλα ποσά την αναζήτηση εναλλακτικών πηγών (US DoE, 2017; National Coal Council, 2019; King, 2021).

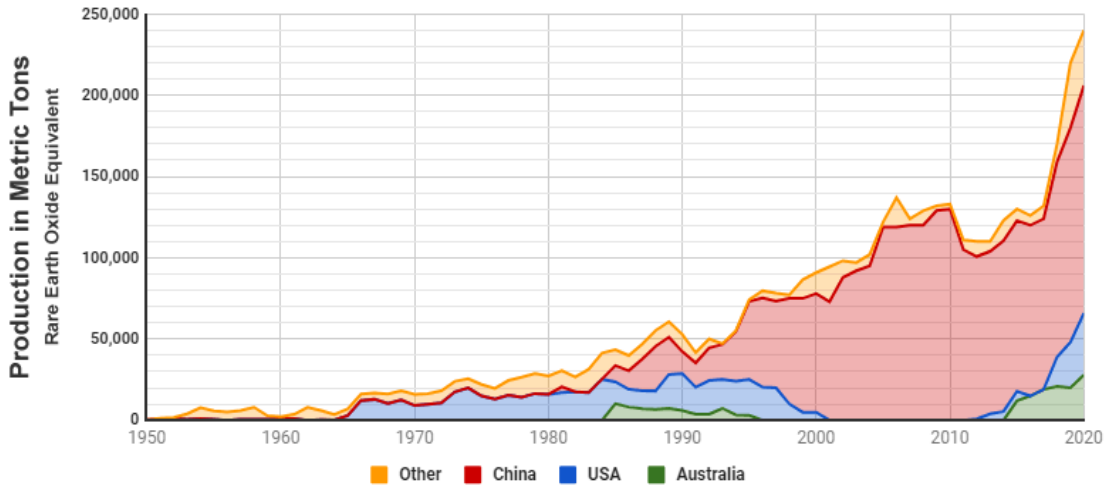


Εικόνα 4.2: *Χρήσεις σπάνιων γαιών στης ΗΠΑ κατά το έτος 2020*

4.3 Ποιες οι πηγές των σπάνιων γαιών

Οι σπάνιες γαίες περιέχονται συνήθως στα ορυκτά μπαστνεσίτης, μοναζίτης, αλλανίτης, πυριτικό ζιρκόνιο, απατίτης, χεραλίτης, ευδιαλίτης, λοπαρίτης, φωσφορίτης και ξενότιμο (Costis et al., 2019; USGS, 2019; King, 2021).

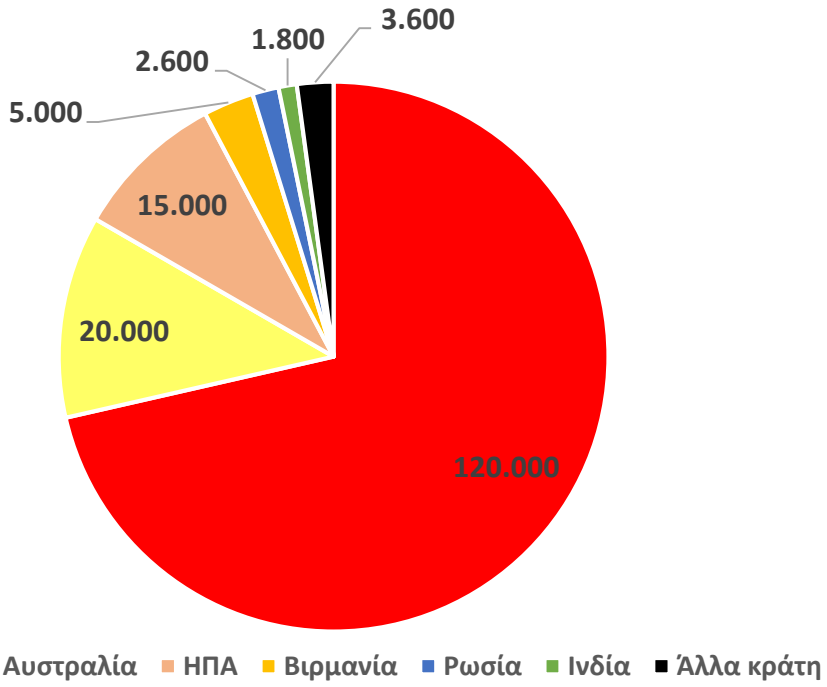
Τα τελευταία 20 χρόνια υπήρξε μια έκρηξη στη ζήτηση σπάνιων γαιών. Το 2020 η παγκόσμια παραγωγή σπάνιων γαιών έφτασε τους 240.000 τόνους (King, 2021). Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζεται η διακύμανση της παραγωγής τους από το 1950 μέχρι σήμερα. Είναι χαρακτηριστική μια πρώτη αύξηση της παραγωγής στα μέσα της δεκαετίας του 1960, όταν ξεκίνησε η πώληση των πρώτων έγχρωμων τηλεοράσεων στις ΗΠΑ. Αξίζει επίσης να επισημανθεί η πτώση της παραγωγής άλλων χωρών όταν, στα μέσα της δεκαετίας του 1980 η Κίνα άρχισε να προωθεί στην αγορά σπάνιες γαίες σε πολύ χαμηλές τιμές.



Εικόνα 4.3: *Διακύμανση της παραγωγής σπάνιων γαιών από το 1950 μέχρι σήμερα. Πηγή: King, 2021.*

Σήμερα, η Κίνα διαθέτει τη συντριπτική πλειοψηφία των εκμεταλλεύσιμων κοιτασμάτων και καλύπτει το 70% της παγκόσμιας παραγωγής, ενώ προσπαθεί να ελέγξει την παραγωγή ορυχείων που βρίσκονται σε άλλες χώρες (USGS, 2019). Σύμφωνα με άλλη πηγή, η Κίνα ελέγχει πλέον το 94% της παγκόσμιας παραγωγής (Costis et al., 2019), παρά το ότι σημαντικά εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα διαθέτουν και η Αυστραλία, οι ΗΠΑ, η Ρωσία και η Ινδία (USGS, 2019). Η ηγετική θέση της Κίνας στην αγορά των σπανίων γαιών δεν επιτρέπει τον προσδιορισμό των τιμών τους με βάση το νόμο της προσφοράς και της ζήτησης. Το 2010, όταν η Κίνα αποφάσισε να περιορίσει τις εξαγωγές της με στόχο την ενίσχυση των εγχώριων επιχειρήσεων και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οι τιμές σπανίων γαιών στην παγκόσμια αγορά εκτινάχθηκαν προς τα πάνω. Στη Εικόνα 4.4 φαίνεται η παγκόσμια παραγωγή των ορυχείων σπανίων γαιών για το έτος 2018.

Συμπερασματικά, οι εμφανίσεις σπανίων γαιών σε κοιτάσματα με συγκεντρώσεις που επιτρέπουν την εκμετάλλευσή τους με οικονομικά συμφέροντες όρους είναι ελάχιστες. Για το λόγο αυτό, ιδιαίτερο ενδιαφέρον υπάρχει για την ανάκτηση σπανίων γαιών από δευτερογενείς πηγές, όπως οι γαιάνθρακες και τα παραπροϊόντα τους, τα απόβλητα της επεξεργασίας του βωξίτη, ο φωσφογύψος και η ανακύκλωση συσκευών (Lin et al., 2017; King, 2021). Προς το παρόν η εμπορική λειτουργία μονάδων ανάκτησης σπάνιων γαιών από μονάδες ανακύκλωσης είναι περιορισμένη, όμως αναμένεται στα επόμενα χρόνια να αναπτυχθεί ραγδαία, με βάση προϊόντα όπως οι μπαταρίες, οι μαγνήτες, τα φωσφορίζοντα υλικά και οι καταλύτες (Lin et al., 2017).



Εικόνα 4.4: *Παγκόσμια παραγωγή των ορυχείων σπανίων γαιών (σε τόνους) ανά χώρα για το έτος 2018. Πηγή: USGS, 2019.*

4.4. Ποια τα κριτήρια οικονομικότητας της εκμετάλλευσης των σπάνιων γαιών

Μια εμφάνιση σπανίων γαιών θεωρείται ότι είναι εκμεταλλεύσιμη όταν η συγκέντρωση του συνόλου των περιεχόμενων σπάνιων γαιών υπερβαίνει τα 300 ppm (Inventure Renewables, 2019).

Άλλοι ερευνητές προτείνουν ως κρίσιμη συγκέντρωση αυτή των 1000 ppm και θεωρούν ότι η τιμή αυτή μπορεί να πέσει χαμηλότερα αν στο σύνολο των σπανίων γαιών υπάρχει κάποιο από τα στοιχεία που επικρατεί έναντι των υπολοίπων [προφορική ενημέρωση, Συνέδριο EUROCOALASH 2021].

Αξίζει επιλέον να αναφερθεί ότι η οικονομικότητα κάθε μεθόδου ανάκτησης σπανίων γαιών πρέπει να λάβει υπόψη τις επιπτώσεις στο περιβάλλον. Σε ότι αφορά τα ορυχεία και τις μονάδες εμπλουτισμού, οι επιπτώσεις είναι ανάλογες με αυτές που συνδέονται με την εξόρυξη και επεξεργασία μεταλλικών ορυκτών. Τα απόβλητα της επεξεργασίας είναι πιθανό να περιέχουν σε αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέα μέταλλα και ραδιενεργά στοιχεία (EPA, 2012).

4.5 Ποια η περιεκτικότητά των σπάνιων γαιών στους λιγνίτες και την τέφρα

Σε ότι αφορά τη σχέση των σπάνιων γαιών με το λιγνίτη, τα ερευνητικά προγράμματα που βρίσκονται σε εξέλιξη εξετάζουν τη δυνατότητα ανάκτησής τους από τις ακόλουθες πηγές:

- Γαιάνθρακες
- Τέφρα
- Απόβλητα μονάδων εμπλουτισμού γαιανθράκων
- Απόβλητα μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (όξινες απορροές)
- Γαιάνθρακες πρόσφατης γεωλογικής ηλικίας (λιγνίτες)

Η τελευταία κατηγορία διακρίνεται από την πρώτη λόγω του ότι οι σπάνιες γαίες που περιέχονται στους λιγνίτες είναι ευκολότερο να ανακτηθούν. Οι λιγνίτες περιέχουν πολλά χουμικά οξέα που δημιουργούν δεσμούς με τα μέταλλα και τις σπάνιες γαίες. Με την πάροδο του γεωλογικού χρόνου η περιεκτικότητα των γαιανθράκων σε χουμικά οξέα μειώνεται και οι σπάνιες γαίες ενσωματώνονται σε αργιλοπυριτικές αργίλους από τις οποίες είναι δυσκολότερο να διαχωριστούν.

Σε κάθε περίπτωση, υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι γαιανθράκων, όπως και τεφρών που παράγονται από την καύση τους. Σε αναφορά της Γεωλογικής Εταιρίας των ΗΠΑ (USGS, 2019) περιέχεται μια λίστα τεφρών από ορυχεία των ΗΠΑ και της Κίνας που περιέχουν σπάνιες γαίες σε ποσοστά που κυμαίνονται από 190 έως 1.660 ppm. Κατά κανόνα, η καύση έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των συγκεντρώσεων σπάνιων γαιών στην τέφρα κατά 6 έως 10 φορές σε σχέση με τον γαιάνθρακα (Erickson, 2018). Όμως, ερευνητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι το θερμικό σοκ κατά την καύση του γαιάνθρακα μειώνει το μέγεθος των κόκκων των σπάνιων γαιών και αυξάνει τη διασπορά τους, γεγονός που δυσχεραίνει την ανάκτησή τους (USGS, 2019).

Από μια βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε από ελληνική ερευνητική ομάδα και αφορούσε την περιεκτικότητα σπάνιων γαιών σε διάφορα εξορυκτικά απόβλητα, παραπροϊόντα και υγρά απόβλητα ορυχείων γαιανθράκων, βωξιτών και φωσφοριτών, προέκυψε ότι η αθροιστική περιεκτικότητα σπάνιων γαιών σε ιπτάμενες τέφρες κυμαίνεται μεταξύ 91.8 ppm και 775.5 ppm ενώ οι συγκεντρώσεις στις αποθέσεις αγόνων υλικών είναι πολύ μικρότερες και κυμαίνονται από 32 ppm έως 379 ppm (Pyrgaki et al., 2021).

4.6 Πως ανακτούμε τις σπάνιες γαίες

Η ανάκτηση των σπάνιων γαιών από τους γαιάνθρακες και τα παραπροϊόντα τους με μεθόδους που έχουν εύλογο κόστος αποτελεί αντικείμενο έρευνας σε όλο τον πλανήτη. Το 2018 στις ΗΠΑ υπήρχαν σε εξέλιξη πάνω από 30 ερευνητικά προγράμματα που χρηματοδοτούνταν από το Υπουργείο Ενέργειας με

εκατομμύρια δολάρια, με στόχο να βρεθεί μια φθηνή πηγή σπάνιων γαιών (Erickson, 2018).

Η ανάκτηση σπάνιων γαιών από το λιγνίτη και τα παραπροϊόντα του μπορεί να γίνει με μεθόδους φυσικού διαχωρισμού, έκπλυση με οξέα ή αλκάλια, έκπλυση με ιοντο-ανταλλαγή, βιο-έκπλυση, πυρομεταλλουργικές διεργασίες, θερμική επεξεργασία, επεξεργασία με αλκάλια, ρόφηση, καθίζηση, εκχύλιση με διαλύτες καθώς και με άλλες τεχνικές, η αποτελεσματικότητα των οποίων διαφέρει ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού που επεξεργάζονται (Costis et al., 2019; Zhang et al., 2020).

Αποτελέσματα μελέτης έδειξαν ότι σε δείγματα τέφρας οι σπάνιες γαίες εμφάνισαν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στο λεπτομερές κλάσμα, ενώ κατά τον μαγνητικό διαχωρισμό οι σπάνιες γαίες εμπλούτισαν το μη-μαγνητικό κλάσμα. Σε ότι αφορά τον βαρυτομετρικό διαχωρισμό, οι σπάνιες γαίες αύξησαν τη συγκέντρωσή τους στο ελαφρύτερο κλάσμα. Επιπλέον, οι σπάνιες γαίες φάνηκε ότι έχουν αυξημένη συσχέτιση με την ομάδα των αργιλοπυριτικών ορυκτών και ασθενέστερη με αυτές των ορυκτών του σιδήρου και του ασβεστίου (Lin et al., 2020; Zhang et al., 2020).

Ερευνητές στις ΗΠΑ επιχείρησαν να κατασκευάσουν ένα σύστημα διαχωρισμού των σπάνιων γαιών με βάση μια διαδικασία ανταλλαγής ιόντων που θα μπορούσε να επεξεργαστεί διαφορετικές πρώτες ύλες, από αργίλους και λιγνίτες μέχρι και λάσπες από την επεξεργασία αποβλήτων των ορυχείων. Με την αύξηση της συγκέντρωσης υδροχλωρικού οξέος το σύστημα πέτυχε των σταδιακό διαχωρισμό αρχικά των μονοσθενών και δισθενών κατιόντων και στη συνέχεια του Αργιλίου (Αλουμινίου) ενώ ο Σίδηρος μετασχηματίστηκε σε $FeCl_3$, χημική ένωση που μπορεί να θεωρηθεί παραπροϊόν με εμπορική αξία. Παρά το ότι επιτεύχθηκαν συγκεντρώσεις πάνω από 95% για 5 από τις σπάνιες γαίες, η οικονομοτεχνική ανάλυση της παραπάνω μεθόδου έδειξε ότι μπορεί να κριθεί ως οικονομικά βιώσιμη μόνο ως διαδικασία παραγωγής Αλουμινίου, με τις σπάνιες γαίες να ανακτώνται ως παραπροϊόντα (Inventure Renewables, 2019).

Στις μέρες μας δεν υπάρχει εμπορική μέθοδος για την ανάκτηση σπάνιων γαιών από τους γαιάνθρακες και τα παραπροϊόντα τους. Η ταυτόχρονη ανάκτηση άλλων στοιχείων, όπως το Αλουμίνιο και το Γάλλιο, μπορεί να βελτιώσει την οικονομικότητα εφαρμογής των μεθόδων που ερευνώνται.

4.7 Τι έχει γίνει μέχρι σήμερα στην Ελλάδα;

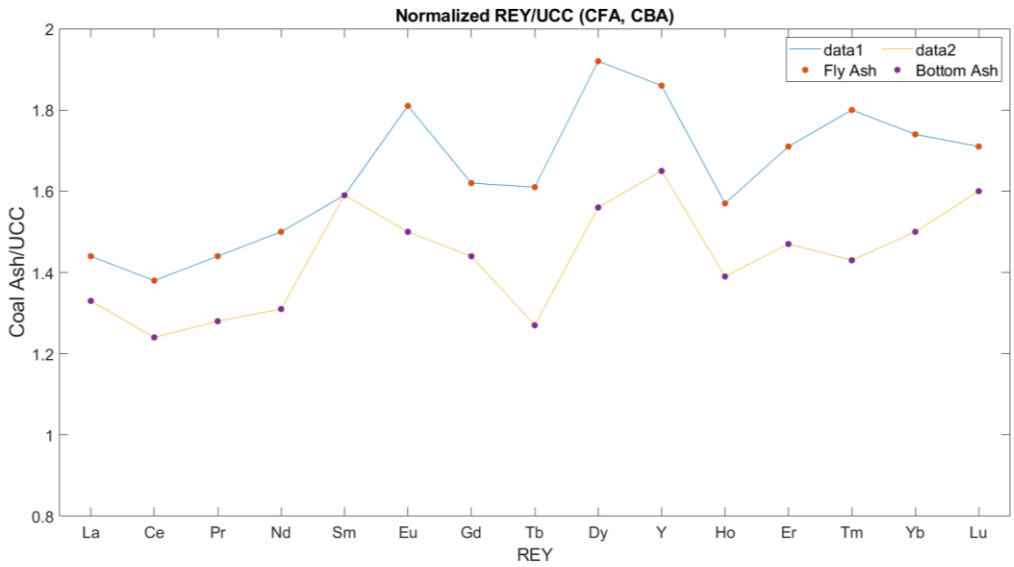
Στην Ελλάδα η έρευνα για τις σπάνιες γαίες έχει επικεντρωθεί στον εντοπισμό κοιτασμάτων που περιέχουν σε αυξημένες συγκεντρώσεις ορυκτά των σπανίων γαιών, όπως οι λατερίτες και οι βωξίτες, τα υποθαλάσσια ιζήματα άμμων βαρέων ορυκτών, οι γρανίτες και οι γρανιτικοί πιγματίτες και οι φωσφορίτες (Καλημέρη, 2015). Η ανάκτηση σπάνιων γαιών από δευτερεύουσες πηγές, όπως

τα παραπροϊόντα της καύσης του λιγνίτη και η ανακύκλωση συσκευών δεν έχει προχωρήσει ανάλογα.

Τα πολυμεταλλικά κοιτάσματα της Βορειοανατολικής Ελλάδας είναι τα πλέον ελπιδοφόρα για μελλοντική παραγωγή σπανίων γαιών. Επίσης, τα κοιτάσματα βωξιτών και λατεριτών της Κεντρικής και Βόρειας Ελλάδας, τα οποία ήδη υφίστανται εκμετάλλευση για την παραγωγή Al και Ni, περιέχουν σημαντικές ποσότητες σπάνιων γαιών (Eliopoulos et al., 2014; Καλημέρη, 2015). Η εταιρία MYTILINEOS, στο πλαίσιο της στρατηγικής βιώσιμης ανάπτυξης που ακολουθεί συμμετέχει στο ευρωπαϊκό πρόγραμμα SCALE που στοχεύει στην εξαγωγή σπάνιων γαιών και ειδικότερα ενώσεων σκανδίου και κραμάτων αλουμινίου – σκανδίου από μεταλλουργικά κατάλοιπα του βωξίτη (Όμιλος Μυτιληναίου, 2021).

Υψηλή περιεκτικότητα σπάνιων γαιών ανιχνεύεται σε προσχωσιγενείς αποθέσεις στο παράκτιο και υποθαλάσσιο περιβάλλον μεταξύ Χαλκιδικής και Αλεξανδρούπολης, κυρίως στις εκβολές των ποταμών Στρυμόνα, Νέστου και Έβρου. Κοιτασματολογικές έρευνες αλλά και αναλύσεις δειγμάτων που πραγματοποίησε το ΙΓΜΕ στο παρελθόν στις περιοχές αυτές ήταν αρκετά ενθαρρυντικές, εκτιμώντας αποθέματα 485 εκατ. tn με μέση περιεκτικότητα σπανίων γαιών 1,17% (κυρίως Ce, La και Nd) και δυστυχώς αρκετή περιεκτικότητα σε ραδιενεργό θόριο (Th) (Καλημέρη, 2015). Σε ανάλογα συμπεράσματα καταλήγει έρευνα του (Papadopoulos et al., 2019), η οποία θεωρεί ότι τα εκμεταλλεύσιμα υποθαλάσσια ιζήματα πιθανά να επεκτείνονται και στις νοτιότερες ακτές της χώρας (Μύκονος, Νάξος, Νίσυρος) (Papadopoulos et al., 2019).

Μια από τις λίγες προσπάθειες διερεύνησης της περιεκτικότητας σπάνιων γαιών σε ελληνικές τέφρες βρίσκεται σε εξέλιξη στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, στο πλαίσιο εκπόνησης διδακτορικής διατριβής στο Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Τα δείγματα τέφρας που μέχρι στιγμής έχουν αναλυθεί προήλθαν από τον ΑΗΣ Μελίτης. Στην μεν ιπτάμενη τέφρα η αθροιστική συγκέντρωση σπάνιων γαιών ήταν 254.7 ppm στη δε τέφρα πυθμένα 227.9 ppm. Επιπλέον, στο σχήμα 4.5 παρουσιάζονται οι συντελεστές εμπλουτισμού σε σχέση με τη μέση περιεκτικότητα του ανώτερου ηπειρωτικού φλοιού, όλων των σπανίων γαιών, χωριστά για την ιπτάμενη τέφρα και την τέφρα πυθμένα (Tsachouridis et al., 2021).



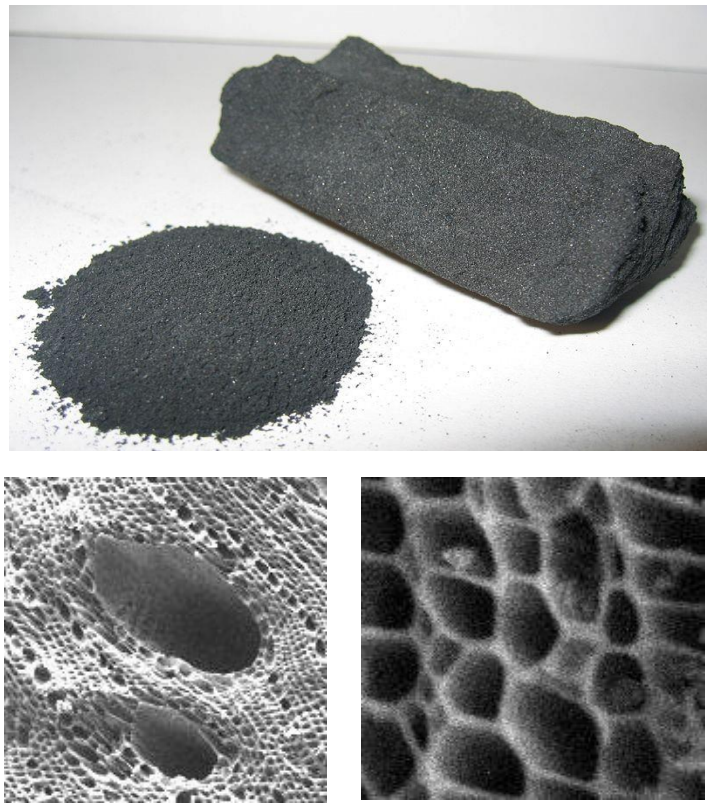
Εικόνα 4.5: *Συντελεστής εμπλουτισμού των σπανίων γαιών στην ιπτάμενη τέφρα και την τέφρα πυθμένα του ΑΗΣ Μελίτης σε σχέση με τη μέση περιεκτικότητα στον ανώτερο ηπειρωτικό φλοιό της γης* (Tsachouridis et al., 2021).

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η προοπτική ανάκτησης σπάνιων γαιών από τους ελληνικούς λιγνίτες και τα παραπροϊόντα τους δεν έχει ερευνηθεί επαρκώς. Σε κάθε περίπτωση, ακόμα και εντός της χώρας, υπάρχουν εναλλακτικές πηγές που μπορεί να αποδειχθούν πιο συμφέρουσες.

5. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

5.1 Τι είναι και που χρησιμοποιείται ο ενεργός άνθρακας

Ο όρος ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό των ανθρακούχων υλικών που παρουσιάζουν ανεπτυγμένη πορώδη δομή και εκτεταμένη ειδική επιφάνεια στο εσωτερικό τους (Figueiredo et al., 1999). Στο μικροσκόπιο, η δομή του ενεργού άνθρακα μοιάζει με λωρίδες χαρτιού που είναι τσαλακωμένες και αναμεμιγμένες με μικρά κομμάτια ξύλου. Υπάρχουν πάρα πολλά κοιλώματα και ρωγμές καθώς και πολλές περιοχές όπου επίπεδες επιφάνειες είναι παράλληλες μεταξύ τους και απέχουν η μία από την άλλη μόλις μερικά νανόμετρα. Η σπουδαιότερη ιδιότητα των ενεργών ανθράκων (Εικόνα 5.1), που οφείλεται στην πορώδη δομή τους, είναι η ικανότητά τους να προσροφούν και να συγκρατούν στην επιφάνειά τους ουσίες που βρίσκονται στην αέρια ή στην υγρή φάση, λόγω της μεγάλης ειδικής επιφάνειας που εμφανίζουν. (Figueiredo et al., 1999)



Εικόνα 5.1: *Μορφολογία ενεργού άνθρακα*

Με άλλα λόγια, οι σπουδαιότερες ιδιότητες του ενεργού άνθρακα οι οποίες τον καθιστούν αποτελεσματικό προσροφητικό υλικό είναι το ανεπτυγμένο πορώδες και η υψηλή ειδική επιφάνεια. Το πορώδες είναι ο λόγος του όγκου των κενών ενός κόκκου προς τον συνολικό όγκο του κόκκου. Με τον όρο ειδική επιφάνεια χαρακτηρίζεται η εξωτερική επιφάνεια καθώς και η επιφάνεια του εσωτερικού των

πόρων που αναπτύσσονται σε έναν κόκκο. Ο εργαστηριακός προσδιορισμός της ειδικής επιφάνειας γίνεται με τη μέθοδο της προσρόφησης αερίων.

Ένα γραμμάριο ενεργού άνθρακα έχει ειδική επιφάνεια περίπου ίση με την επιφάνεια δύο γηπέδων αντισφαίρισης. Πιο συγκεκριμένα, ένα γραμμάριο ενεργού άνθρακα μπορεί να έχει ειδική επιφάνεια από 400 έως 1500 m^2 (Figueiredo et al., 1999). Έτσι, οι ενεργοί άνθρακες αποτελούν σημαντικά προσροφητικά μέσα και σαν τέτοια χρησιμοποιούνται σήμερα σε διεργασίες που περιλαμβάνουν αποχρωματισμό, απομάκρυνση της οσμής, καθαρισμό, αποχλωρίωση, απομάκρυνση τοξικών ουσιών, ανάκτηση διαλυτών και σαν υπόστρωμα σε καταλύτες. Οι διεργασίες αυτές βρίσκουν εφαρμογές σε πλήθος διαφορετικών περιοχών που σχετίζονται με τη χημική και φαρμακευτική βιομηχανία, τη βιομηχανία τροφίμων, αυτοκινήτων, πετρελαίου, την πυρηνική τεχνολογία κλπ. Πρωταρχικό ρόλο έχει η χρησιμοποίηση του ενεργού άνθρακα στις διεργασίες που σχετίζονται με την ποιότητα του πόσιμου νερού και με την κατεργασία αερίων και υγρών αποβλήτων από διάφορες διεργασίες (Figueiredo et al., 1999).

Ο λιγνίτης, εξαιτίας του μεγάλου εύρους ιδιοτήτων, χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για τη παραγωγή ενεργού άνθρακα για τον καθαρισμό υγρών και αερίων. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα για τη χρησιμοποίηση του λιγνίτη ως πρώτη ύλη είναι η χαμηλή τιμή του. Όταν ο λιγνίτης πυρολύεται σε αδρανή ατμόσφαιρα, οι πτητικές οργανικές ουσίες που περιέχει απομακρύνονται ως αέρια προϊόντα και δημιουργείται ενεργός άνθρακας. Τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των ενεργών ανθράκων συνδέονται με τις θερμοκρασίες που εφαρμόστηκαν κατά την πυρόλυση. Στη συνέχεια ακολουθεί άλλο ένα βήμα, αυτό της ενεργοποίησης ώστε να επιτευχθεί μία ικανοποιητική τιμή ειδικής επιφάνειας απομακρύνοντας το εξανθράκωμα που δημιουργείται κατά την πυρόλυση. Το βήμα αυτό θα μπορούσε να παραληφθεί με τη χρήση της τεχνολογίας των περιστροφικών κλιβάνων (rotary kiln). Σε αυτή την περίπτωση, η ενεργοποίηση γίνεται παράλληλα με την πυρόλυση με μία επί τόπου (*in situ*) αντίδραση με τον αέρα. Η χρήση της τεχνολογίας αυτής με τους κατάλληλους λιγνίτες είναι αρκετά ελκυστική οικονομικά για την παραγωγή φθηνών ενεργών εξανθρακωμάτων με ένα βήμα πυρόλυσης/ενεργοποίησης σε περιστροφικό κλίβανο.

5.2 Παραγωγή ενεργού άνθρακα από λιγνίτη

Ο ενεργός άνθρακας παράγεται από έναν μεγάλο αριθμό οργανογενών υλικών βιολογικής προέλευσης όπως είναι το ξύλο, οι γαιάνθρακες και τα γεωργικά υπόλοιπα, με φυσική και χημική ενεργοποίηση της πρώτης ύλης. Η φυσική ενεργοποίηση περιλαμβάνει την εξανθράκωση ενός ανθρακούχου δείγματος που ακολουθείται από ενεργοποίηση του προκύπτοντος προσροφητικού άνθρακα παρουσία CO_2 ή ατμού. Αντίθετα, η χημική ενεργοποίηση είναι μία μέθοδος ενός βήματος όπου η εξανθράκωση του δείγματος και η ενεργοποίηση γίνονται ταυτόχρονα. Το βήμα αυτό είναι η εξανθράκωση του δείγματος

παρουσία χημικών παραγόντων, όπως είναι ο χλωριούχος ψευδάργυρος ($ZnCl_2$) και το υδροξείδιο του καλίου (KOH).

Στη φυσική ενεργοποίηση, είναι απαραίτητη η απομάκρυνση ενός μεγάλου ποσού εσωτερικής ανθρακικής μάζας ώστε να πετύχουμε μία καλά αναπτυγμένη δομή του άνθρακα, ενώ στη χημική ενεργοποίηση οι χημικοί παράγοντες που χρησιμοποιούνται ($ZnCl_2$, KOH) εμποδίζουν το σχηματισμό πίσσας, ενισχύοντας κατά συνέπεια την ανάπτυξη των πόρων του υλικού.

Οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται στη χημική ενεργοποίηση είναι χαμηλότερες από ότι στη φυσική ενεργοποίηση, και επομένως η ανάπτυξη μιας πορώδους δομής είναι οικονομικότερη στην περίπτωση της χημικής ενεργοποίησης (Macia-Agullo et al., 2003). Η παραγωγή από λιγνίτη που είναι ιδιαίτερα σημαντική συνοψίζεται ως εξής:

Κατά τη χημική ενεργοποίηση, η πρώτη ύλη (λιγνίτης) εμποτίζεται με τον παράγοντα ενεργοποίησης με την ανάμειξή του με διάλυμα από αυτόν ή με ρεύμα αερίου του. Το εμποτισμένο υλικό θερμαίνεται σε θερμοκρασία που κυμαίνεται μεταξύ των 400 και των 800 °C, απουσία αέρα και ακολουθεί διαδικασία πυρολυτικής αποσύνθεσης. Ο ρόλος του παράγοντα ενεργοποίησης συνίσταται στην οξείδωση του υλικού, η οποία βοηθά στην καύση της δομής του εξανθρακώματος και επομένως στην ανάπτυξη της μικροπορώδους δομής, που είναι και η επιθυμητή. Η θερμοκρασία κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης και ο βαθμός εμποτισμού με τον παράγοντα ενεργοποίησης είναι οι δύο κύριοι παράγοντες που καθορίζουν τις τελικές προσροφητικές ικανότητες του ενεργοποιημένου άνθρακα. Η βέλτιστη θερμοκρασία της διαδικασίας πρέπει να προσδιοριστεί πειραματικά για να αποκτήσουμε υλικό με ιδιότητες που έχουν αξία χρήσης. Θεωρείται ότι ο συνολικός όγκος πόρων του προϊόντος αυξάνει με την αύξηση του βαθμού εμποτισμού. Από ένα σημείο και μετά όμως, η αύξηση της συγκέντρωσης του διαλύματος εμποτισμού αυξάνει τόσο τη διάμετρο των πόρων, ώστε μειώνεται το μικροπορώδες. Επομένως είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί το βέλτιστο της θερμοκρασίας της πυρόλυσης και του βαθμού εμποτισμού.

5.3 Προϊόν με μεγάλη ζήτηση στη διαχείριση υδάτων και τη χημική βιομηχανία

Ο ενεργός άνθρακας, εκτός από την επεξεργασία νερού, χρησιμοποιείται στον καθαρισμό αποβλήτων (ανακύκλωση), στον καθαρισμό αέρα (πχ κλιματιστικά, καμινάδες εργοστασίων),στην ιατρική (σε δηλητηριάσεις) κ.α. Τα φίλτρα του ενεργού άνθρακα έχουν χρησιμοποιηθεί για αρκετές εκατοντάδες χρόνια και θεωρούνται ένα από τα παλαιότερα μέσα καθαρισμού του πόσιμου νερού (Εικόνα 5.2).

Εικόνα 5.2: *Φίλτρα ενεργού άνθρακα οικιακής χρήσης.*

Το 2000 π.Χ. σε Σανσκριτικό κείμενο, αναφέρεται το φιλτράρισμα του νερού μέσω κάρβουνου. Η πρώτη σύγχρονη χρήση της φίλτρο άνθρακα για τον καθαρισμό του πόσιμου νερού, πραγματοποιήθηκε το 1862. Η φίλτρανση με άνθρακα βρήκε περαιτέρω εφαρμογή στα μέσα της δεκαετίας του 1970 από της και H. Allen Rice & Alvin E. Rice ,όταν κατασκεύασαν για πρώτη φορά, ένα πορώδες φίλτρο άνθρακα για χρήση στο πόσιμο νερό.

Τα προϊόντα ενεργού άνθρακα χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, από τον καθαρισμό του πόσιμου νερού μέχρι τον έλεγχο της εκπομπής ρύπων από τα διάφορα οχήματα (Kirk et al., 1992). Ο ενεργός άνθρακας έχει ευρεία εφαρμογή σε βιομηχανίες τροφίμων, φαρμάκων, χημικών, πετρελαίου, εξόρυξης μεταλλεύματος, πυρηνικές, αυτοκινήτων και κατασκευής αναρροφητήρων, λόγω των προσροφητικών του ιδιοτήτων που παρέχει η υψηλή επιφάνεια μέσα από την πορώδη δομή του (El-Hendawy et al., 2001). Ο ενεργός άνθρακας μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο για τον καθαρισμό αέριων ρύπων όσο και ρύπων που βρίσκονται στην υδατική φάση. Στην Εικόνα 5.3 απεικονίζεται η ποσοστιαία συνεισφορά του ενεργού άνθρακα στις κύριες εφαρμογές του.

Εικόνα 5.3: *Εφαρμογές αέριας και υγρής φάσης ανθρακούχων προσροφητικών (Henning, 2010).*

5.3.1 Αέριας φάσης εφαρμογές ενεργού άνθρακα

Η πλειοψηφία των εφαρμογών του ενεργού άνθρακα σε αέρια και ατμούς, περιλαμβάνει τη διαδικασία καθαρισμού αερίων, τον καθαρισμό του αέρα, την κατάλυση των καυσαερίων, την ανάκτηση διαλυτών και τον έλεγχο εκπομπών των αυτοκινητοβιομηχανιών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.4.

Εικόνα 5.4: *Εφαρμογές ανθρακούχων προσροφητικών για αέριας φάσης εφαρμογές (Henning, 2010).*

Πολλές διεργασίες καθαρισμού αερίων, μερικές από τις οποίες είναι η παραγωγή καθαρών αερίων στη χημική βιομηχανία, η απομάκρυνση του πετρελαίου από πεπιεσμένο αέρα, καθώς και ο καθαρισμός αέριων αποβλήτων, χρησιμοποιούν ενεργό άνθρακα. Χρησιμοποιείται επίσης για να αφαιρεθείρητίνη και υδρογονάνθρακες από τα αέρια πριν από τη διοχέτευσή τους σε καταλύτες. Στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και αποτέφρωσης απορριμμάτων, για την απομάκρυνση SO_2 και NO_X από καυσαέρια έχουν αναπτυχθεί πολλές διαδικασίες με χρήση ενεργού άνθρακα. Επίσης, ρύποι που παράγονται από το βιοαέριο, όπως H_2S και πυριτικά άλατα, μπορεί να βλάψουν τους κινητήρες, αλλά εύκολα αφαιρούνται με αποτέλεσμα ο κινητήρας εσωτερικής καύσης να προστατεύεται από τη διάβρωση και τις διακοπές λειτουργίας και έτσι επιμηκύνεται η διάρκεια ζωής του. Χρησιμοποιείται επίσης σε συστήματα κλιματισμού-εξαερισμού για τον καθαρισμό του αέρα που εισέρχεται από το εξωτερικό περιβάλλον, σε χώρους όπου απαιτούνται εσωτερικές συνθήκες παρόμοιες με αυτές του περιβάλλοντος όπως για παράδειγμα στα αεροδρόμια, κοντά σε χημικά εργοστάσια, ή στα δωμάτια των νοσοκομείων και των μουσείων.

Στην εσωτερική ειδική επιφάνεια του άνθρακα, υπάρχουν επιφάνειες οξειδίων, τα οποία έχουν αναγνωριστεί ως καρβονυλικές ομάδες, φαινολικές ομάδες υδροξύλια, και καρβοξυλικές ομάδες. Αυτές οι επιφάνειες οξειδίων μπορούν να συμμετέχουν σε οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, και είναι ένας λόγος για την αποτελεσματικότητά του ως καταλύτη σε αντιδράσεις οξείδωσης.

Μια από τις πρώιμες εφαρμογές του ενεργού άνθρακα είναι τα φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν από τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο από τις ένοπλες δυνάμεις για αναπνευστήρες μάσκες. Η χρήση αυτή έχει έκτοτε επεκταθεί στη βιομηχανία για την προστασία από επικίνδυνα αέρια. Στο πεδίο των πυρηνικών εγκαταστάσεων, για την αφαίρεση ραδιενεργών ιωδιούχων ενώσεων από τα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα, χρησιμοποιούνται εμποτισμένοι ενεργοί άνθρακες.

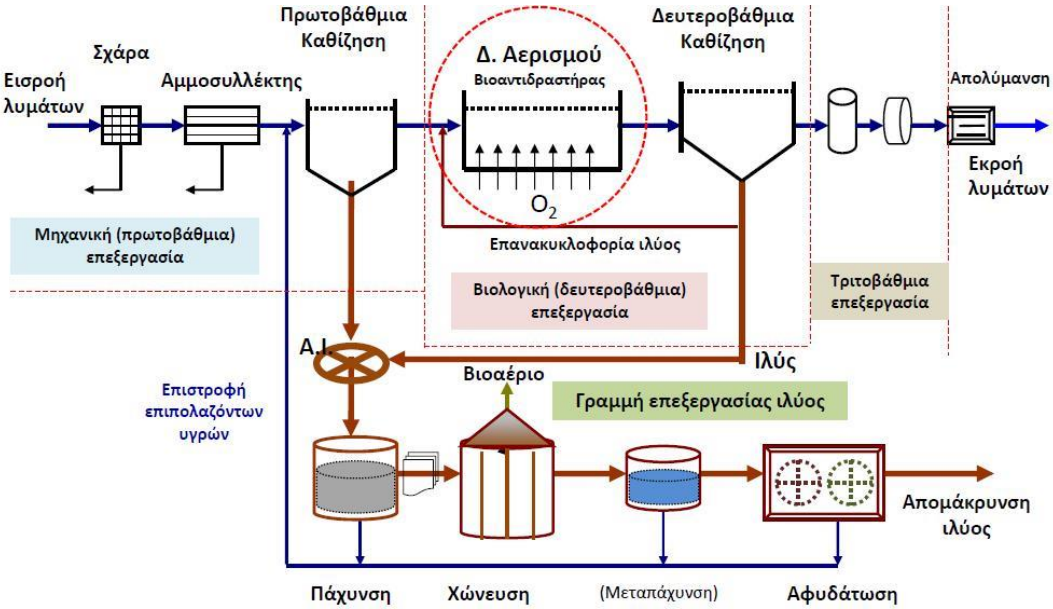
Ο ενεργός άνθρακας καθώς και ο εμποτισμένος, χρησιμοποιούνται επίσης για πολλές εφαρμογές ελέγχου εκπομπών οσμών: στέγνωμα πριονιδιών ξύλου (πινένιου, τερπενίων), την επεξεργασία πλαστικών (στυρόλιο, βενζόλιο, κλπ.). Τέλος, στα φίλτρα τσιγάρων και στα εξαρτήματα για πίπες καπνού, ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται για να μειώσει τη νικοτίνη και την πίσσα του περιεχομένου του καπνού (Hutchins, 1980).

5.3.2 Υγρής φάσης εφαρμογές ενεργού άνθρακα

Οι εφαρμογές του ενεργού άνθρακα στα υγρά εκτιμάται ότι αντιστοιχούν σε πάνω από τα δύο τρίτα της παγκόσμιας κατανάλωσης του. Σε αυτές τις εφαρμογές μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως σκόνη, κόκκους, ή διαμορφωμένα σχήματα (Hutchins, 1980). Ενεργός άνθρακας σε σκόνη (PAC) χρησιμοποιείται συχνά για την προσωρινή επίλυση προβλημάτων ρύπανσης. Για την αφαίρεση ουσιαστικά όλων των ακαθαρσιών από το υγρό που υφίσταται επεξεργασία συνήθως χρησιμοποιούνται κοκκώδεις και διαμορφωμένοι άνθρακες σε συνεχή ροή μέσω κλίνης. PAC χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με άλλα πολυστρωματικά φίλτρα στην επεξεργασία πόσιμου νερού σε αερόβιες ή αναερόβιες εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού, προκειμένου να απορροφηθούν τοξικές ουσίες και να σταθεροποιηθεί η βιολογική δραστηριότητα. Επίσης, φίλτρα ενεργού άνθρακα χρησιμοποιούνται σε νοικοκυριά για καθαρισμό του νερού βρύσης. Η επεξεργασία του πόσιμου νερού αποτελεί περίπου το 31% του συνολικού AC που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υγρής φάσης (Henning, 2010).

Στα συστήματα τριτοβάθμιας επεξεργασίας λυμάτων χρησιμοποιούνται PAC ή σε κόκκους για να αφαιρεθούν υπολειπόμενες ουσίες και άλλες τοξικές οργανικές ενώσεις μετά την πρωτεύουσα διήθηση και δευτερεύουσα διαδικασία βιολογικού καθαρισμού, ενώ άνθρακας σε σκόνη χρησιμοποιείται ως άμεσο προσθετικό άνθρακα στη δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία. Τα λύματα (βιομηχανικά και αστικά) μπορεί να περιέχουν αιωρούμενα στερεά, επιβλαβείς μικροοργανισμούς και τοξικές οργανικές και ανόργανες προσμίξεις που πρέπει να αποβληθούν και να καταστραφούν πριν από την απόρριψή τους στο περιβάλλον. Επιπλέον φίλτρα κοκκώδους ενεργού άνθρακα (Εικόνα 5.5) συχνά χρησιμοποιούνται στην τριτοβάθμια επεξεργασία μετά τη συμβατική δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία (Εικόνα 5.6).

Εικόνα 5.5: *Βιομηχανικά φίλτρα ενεργού άνθρακα για τον καθαρισμό βιομηχανικών υγρών αποβλήτων.*



Εικόνα 5.6: *Διαγραμματική απεικόνιση επεξεργασίας υγρών αποβλήτων - στην τριτοβάθμια επεξεργασία χρησιμοποιούνται κλίνες ενεργού άνθρακα.*

Μερικές ακόμη υγρής φάσης εφαρμογές του ενεργού άνθρακα είναι η αποκατάσταση των υπόγειων υδάτων, η εξόρυξη μεταλλευμάτων, η επεξεργασία φαρμακευτικών προϊόντων, καθώς και ο αποχρωματισμός της ζάχαρης. Επιπροσθέτως, πολλά αντιβιοτικά, βιταμίνες και στεροειδή απομονώνονται με προσρόφηση σε άνθρακα ενώ ο κοκκώδης ενεργός άνθρακας με ημιπερατή επικάλυψη χρησιμοποιείται για αιμοκάθαρση σε περιπτώσεις νεφρικής ανεπάρκειας και ασθένειες του ήπατος ή δηλητηρίαση (Henning, 2010).

6. Παραγωγή νανοϋλικών γραφενίου

6.1 Τι είναι το γραφένιο

Για πολλά χρόνια, το γραφένιο δεν ήταν παρά μόνο μια ιδέα για την περιγραφή άλλων πιο πολύπλοκων αρωματικών ανθράκων. Η μόνη εξαίρεση, ήταν οι λιγοστές παρατηρήσεις χημικώς παραγόμενων φύλλων γραφενίου και αργότερα ο χαρακτηρισμός μονοστρωμάτων γραφίτη σε μέταλλα και καρβίδια. Όλα αυτά όμως μέχρι το 2004, όπου τα πράγματα αλλάζουν με την απευθείας παρατήρηση ενός απομονωμένου μονοστρώματος γραφενίου (Geim and Novoselov, 2007). Στα επόμενα χρόνια που ακολουθούν, το ενδιαφέρον των επιστημόνων μεγαλώνει ολοένα και περισσότερο για αυτό το νέο δισδιάστατο υλικό. Αρχικά, το γραφένιο προσέλκυσε το ενδιαφέρον των μεσοσκοπικών φυσικών, με την ασυνήθιστη ηλεκτρονική συμπεριφορά του υπό την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου σε χαμηλή θερμοκρασία (Geim and Novoselov, 2007; Catsro Neto et al., 2009). Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι ιδιότητες μεταφοράς του, από τις μακροσκοπικές ως τις μοριακές κλίμακες. Ήδη, οι επιστήμονες των υλικών έχουν εκμεταλλευτεί ορισμένα από τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το γραφένιο και ερευνούν τρόπους εφαρμογής του σε συσκευές και υλικά, αλλά και τρόπους μαζικής παραγωγής αυτού (Novoselov et al., 2005; Geim and Novoselov, 2007; Catsro Neto et al., 2009).

Αναλυτικά, το γραφένιο είναι επίπεδα από μονοστρωματικά άτομα άνθρακα καλά συσκευασμένα σε ένα δισδιάστατο (2D) πλέγμα κυψελών, και αποτελεί βασικό στοιχείο για την οικοδόμηση γραφιτικών υλικών όλων των διαστάσεων (Novoselov et al., 2005; Geim and Novoselov, 2007). Μπορεί να είναι κλεισμένο σε 0D φουλερένια, τυλιγμένο σε 1D νανοσωλήνες ή στοιβάζονται σε 3D γραφίτη. Ένα σημαντικό βήμα προόδου στην επιστήμη του γραφενίου ήρθε όταν ο Andre Geim και ο Kostya Novoselov στο Πανεπιστήμιο του Μάντσεστερ κατάφεραν να εξάγουν μονοατομικού πάχους κρυσταλλίτες (γραφένιο) από ακατέργαστο γραφίτη το 2004. Οι μοναδικές ηλεκτρονικές ιδιότητες του γραφενίου παράγουν μια απροσδόκητα μεγάλη αδιαφάνεια για μία ατομική μονή στρώση, με εκπληκτικά απλή τιμή: απορροφά περίπου το 2,3% του λευκού φωτός. Αυτό είναι συνέπεια της ασυνήθιστα χαμηλής ενέργειας της ηλεκτρονικής δομής του μονοστρωματικού γραφενίου το οποίο αναδεικνύει ηλεκτρόνια και οπές κωνικής ζώνης που συναντιούνται μεταξύ τους στο σημείο Dirac που είναι ποιοτικά διαφορετικό από τις πιο κοινές τετραγωνικές συμπαγείς ζώνες (Novoselov et al., 2005). Το 2008 πραγματοποιείται το πρώτο πείραμα που αποδεικνύει ότι το γραφένιο είναι το ισχυρότερο υλικό που υπάρχει στη φύση. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι το γραφένιο έχει αντοχή εφελκυσμού 100 φορές μεγαλύτερη από το ατσάλι. Συνεπώς, το γραφένιο είναι εντελώς διαφορετικό από τα περισσότερα συμβατικά τρισδιάστατα υλικά.

6.2 Ιδιότητες «εν τάχει»

Το γραφένιο είναι ένα υλικό που αποτελείται από καθαρό άνθρακα, παρόμοιο με τον γραφίτη αλλά με χαρακτηριστικά που το καθιστούν εξαιρετικά ελαφρύ και ισχυρό. Ένα φύλλο ενός τετραγωνικού μέτρου γραφενίου ζυγίζει 0,77 mg. Η αντοχή του είναι 200 φορές μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα και η πυκνότητά του είναι παρόμοια με αυτή των ανθρακονημάτων. Όλα αυτά το κάνουν να αντιστέκεται σε υψηλές δυνάμεις κάμψης χωρίς να σπάει. Είναι ένα από τα πιο αγώγιμα υλικά για ηλεκτρισμό και θερμότητα, γεγονός που το καθιστά το τέλειο υλικό για ηλεκτρονικά και πολλές άλλες βιομηχανίες.

Εικόνα 6.1: *Δομή γραφενίου*

Για πολλούς ειδικούς, **το γραφένιο είναι το υλικό του μέλλοντος**. Ο επιστημονικός του ορισμός μπορεί να θεωρηθεί κάπως περίπλοκος, αλλά η αλήθεια είναι ότι οι ιδιότητες αυτού του υλικού ανοίγουν έναν νέο ορίζοντα στον κόσμο της τεχνολογίας. **Οι εφαρμογές του είναι ουσιαστικά απεριόριστες** και υπόσχονται να φέρουν επανάσταση σε πολλούς τομείς: από τα ηλεκτρονικά και τους υπολογιστές μέχρι τις κατασκευές ή ακόμα και την υγεία. Χαρακτηριστικό είναι δε το γεγονός ότι το γραφένιο ονομάζεται «θαυματουργό υλικό». Υπάρχουν δεκάδες έρευνες σχετικά με αυτό που δεν έχουν δημοσιευτεί ακόμη, αλλά μπορεί να αλλάξουν «τον κόσμο αύριο».

6.3 Ενδεικτικές εφαρμογές

Θεωρείται ότι θα φέρει την επανάσταση στα πάντα που έχει γύρω του ο άνθρωπος. Αυτοκίνητα, ρούχα, λαμπτήρες, το νερό, ακόμη και τα προφυλακτικά θα αλλάξουν χάρη στο γραφένιο. Το υλικό αυτό, που μπορεί να μεταμορφωθεί με άπειρους τρόπους, που ακόμη τους ανακαλύπτουν διαρκώς οι επιστήμονες, έχει εφαρμογές σε κάθε πτυχή της ζωής. Περιληπτικά ορισμένες εφαρμογές είναι οι εξής (Zhu et al., 2010):

- **Φθηνότεροι, ταχύτεροι υπολογιστές**: Μπορεί να αντικαταστήσει τα σημερινά τσιπ σιλικόνης των υπολογιστών.
- **Λαμπτήρες μεγαλύτερης διάρκειας**: Έχει καλύτερες «επιδόσεις» στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, οπότε μπορεί ένας τέτοιος λαμπτήρας να είναι 10% πιο αποδοτικός και μεγαλύτερης διάρκειας από τους τύπου

- **Καλύτερα εργαλεία για απορρόφηση πετρελαιοκηλίδων**: Μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει δημιουργηθεί «σφουγγάρια» που μπορούν να καθαρίσουν πιο γρήγορα τις πετρελαιοκηλίδες, αφού μπορούν να απορροφήσουν 900 φορές το βάρος τους.
- **Εκπληκτικά γρήγορες και αποδοτικές μπαταρίες**: Η αποτελεσματικότητά του ως αγωγός του ηλεκτρισμού σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για νέου τύπου επαναχρησιμοποιήσιμων μπαταριών, που θα αποθηκεύουν περισσότερη ενέργεια και θα φορτίζονται ταχύτερα από κάθε άλλη που υπάρχει σήμερα.
- **Ευλύγιστες ηλεκτρονικές συσκευές**: Με την ανάμειξή του με γραφίτη και άλλα στοιχεία το αποτέλεσμα έχει υγρή μορφή που μπορεί να έχει πολλές εφαρμογές, ανάμεσά τους και οι ηλεκτρονικές συσκευές που θα λυγίζουν και θα τυλίγονται χωρίς να σπάσουν.
- **Ανθεκτικά βιονικά μέλη**: Τα προσθετικά μέλη βοηθούν αλλά δεν είναι το τέλειο υποκατάστατο για κάποιον που έχει υποστεί ακρωτηριασμό. Τα ηλεκτρονικά προσθετικά, που ονομάζονται βιονικά, δίνουν στους ασθενής μεγαλύτερη κινητικότητα από ποτέ και το γραφένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί θεωρητικά για ελέγχει ο άνθρωπος αυτά τα μέλη με τον εγκέφαλό του.
- **Το τέλος της λειψυδρίας**: Έχει ήδη παρουσιαστεί ένα πορώδες φύλλο από γραφένιο, το οποίο εύκολα αφαλατώνει το νερό.
- **Πιο ελαφριά και ισχυρά αλεξίσφαιρα γιλέκα**: Σε τεστ, το γραφένιο ήταν δύο φορές πιο αποτελεσματικό από το Kevlar, το υλικό που παραδοσιακά χρησιμοποιείται για τα αλεξίσφαιρα.
- **Άθραυστες οθόνες των smartphone**: Είναι ιδανικό υλικό για αυτό καθώς είναι διαφανές, ελαφρύ, αγωγός ηλεκτρισμού, ισχυρό και κυρίως εύπλαστο.
- **Ηλεκτρονικές συσκευές που φοριούνται**: Ήδη επιστήμονες έχουν αναπτύξει νέα τεχνική για την ενσωμάτωση ηλεκτροδίων γραφενίου σε ίνες πολυπροπυλενίου, που κάνει πιο εύκολη την κατασκευή συσκευών που φοριούνται.
- **Ταχύτερες και καλύτερες μέθοδοι για την αφαίρεση πάγου από αεροπλάνα**: Το χημικό που χρησιμοποιείται τώρα στα αεροπλάνα, προκειμένου να μην επιτρέπεται ο σχηματισμός πάγου στην ουρά και τα φτερά, είναι βαρύ και επιβραδύνει το σκάφος, ενώ δεν είναι ούτε φιλικό προς το περιβάλλον. Το γραφένιο μπορεί να αποτελέσει λύση και για αυτό, αναμεμειγμένο με πολυμερή ρητίνης, υλικό με το οποίο θα βάφονται τα αεροπλάνα.

6.4 Κόστος γραφενίου

Το κόστος του νανοϋλικού αυτού είναι εξαιρετικά υψηλό. Ενδεικτικές τιμές αναφοράς δίνουν αγορά 0.5 g σκόνης γραφενίου στα 431 € (Sigma-Aldrich, 2021). Πρακτικά, δηλαδή 862.000€/kg. Το ποσό αυτό πρακτικά είναι αδιανόητα υψηλό, ωστόσο αν σκεφτεί κανείς τις εφαρμογές του, οι περισσότεροι ερευνητές

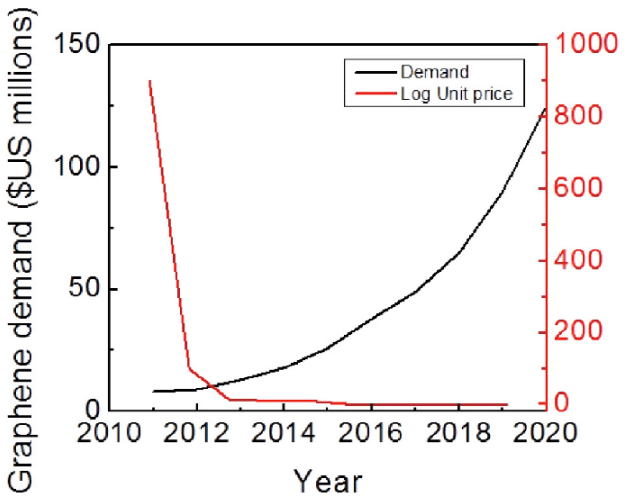
ομολογούν πως «αξίζει τον κόπο…». Ωστόσο, τα ανωτέρω αριθμητικά δεδομένα, αφορούν αγορά καθαρού γραφενίου από την μεγαλύτερη εταιρεία χημικών αντιδραστηρίων, την Sigma-Aldrich προς εργαστηριακή χρήση.

Μία εταιρεία ανάπτυξης και παραγωγής, σε βιομηχανικό πλέον επίπεδο, του οξειδίου του γραφενίου (και όχι καθαρού γραφενίου), Abalonyx, με έδρα τη Νορβηγία, λέει ότι υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για λύσεις οξειδίου του γραφενίου (GO) στην ερευνητική κοινότητα, σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών (Abalonyx, 2021). Η Abalonyx εκτιμά ότι η αποδοχή του συγκεκριμένου πεδίου σχετίζεται στενά με το κόστος. Το τρέχον κόστος παραγωγής της Abalonyx είναι περίπου 800 €/kg (με βάση το ξηρό βάρος) - καθώς το GO της Εταιρείας χρησιμοποιείται επί του παρόντος από ερευνητές και από τις πρώτες προσπάθειες R&D (Abalonyx, 2021). Η Abalonyx εκτιμά ότι καθώς αυξάνεται ο όγκος παραγωγής, η τιμή της παραγωγής θα μπορούσε να φτάσει περίπου τα 22 €/kg - κάτι που θα κάνει το GO να εφαρμοστεί σε τομείς όπως το σκυρόδεμα και η άσφαλτος. Σήμερα, η Abalonyx πωλεί επί του παρόντος το GO του στα 1.300-4.000 €/kg ανάλογα με την ποσότητα και την ποιότητα (Abalonyx, 2021) .

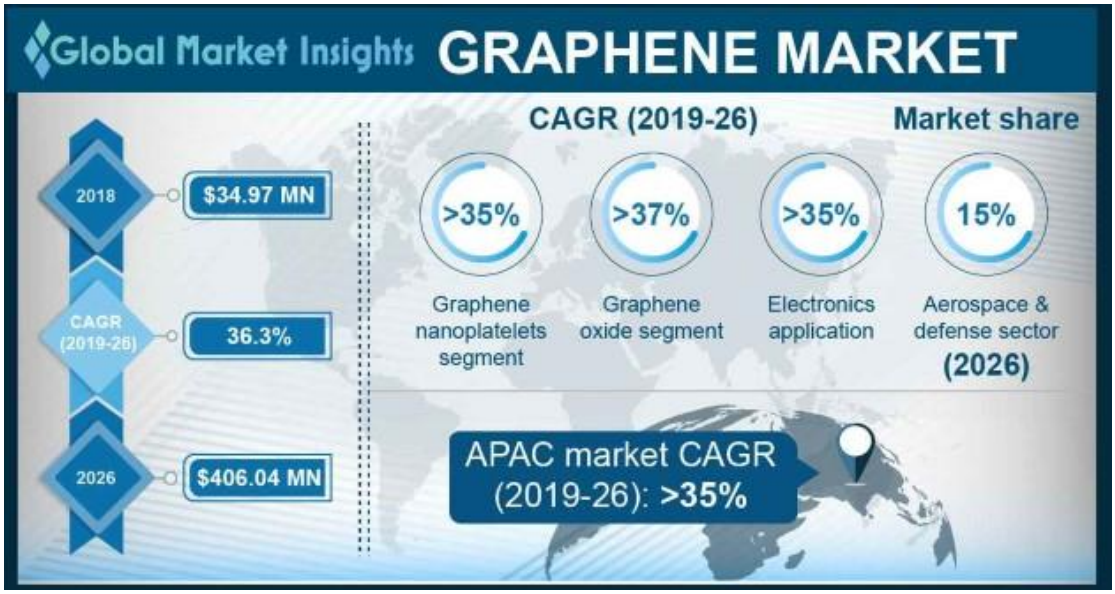
Αν και 3.000 σχετικές ερευνητικές εργασίες και περισσότερες από 400 αιτήσεις διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας που σχετίζονται με την τεχνολογία γραφενικών νανοϋλικών υποβλήθηκαν τα τελευταία 10 έτη, η μαζική εμπορευματοποίηση του γραφενίου μπορεί να απέχει ακόμη χρόνια λόγω ορισμένων εμποδίων στα προϊόντα και τις διεργασίες, όπως:

1) κόστος ανάπτυξης/παραγωγής, το οποίο πιθανότατα θα μειωθεί καθώς οι καινοτομίες στη διαδικασία μειώνουν τη μεταβλητότητα στην παραγωγή και καθώς αυξάνεται η απόδοση.
2) τεχνολογική επιπλοκή που σχετίζεται με την υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού. Οι επιστήμονες πρέπει να εντοπίσουν έναν τρόπο συγκράτησης του φορτίου σε φύλλα γραφενίου, έτσι ώστε τα ψηφιακά σήματα να μπορούν να υποβληθούν σε σωστή επεξεργασία.
3) δυσκολίες που σχετίζονται με την υγεία και την ασφάλεια της νανοτεχνολογίας γενικά, αν και το γραφένιο διατηρεί ορισμένα πλεονεκτήματα ασφάλειας έναντι του στενού του «ξαδέλφου», των νανοσωλήνων άνθρακα.

Ορισμένες πολυεθνικές δραστηριοποιούνται στην έρευνα και ανάπτυξη γραφενίου (π.χ. η Intel και η IBM στον τομέα της πληροφορικής, η Dow Chemicals και η BASF ως προμηθευτές βασικού υλικού γραφενίου και η Samsung στα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης). Χαρακτηριστικό είναι ότι το 2010, η συνολική παραγωγή διαφόρων ειδών γραφενίου είναι πάνω από 15 τόνοι ετησίως, που παράγεται σε περισσότερα από 40.000 ft^2 εγκαταστάσεων, και αυτό αναμένεται να αυξηθεί σε περισσότερους από 200 τόνους ετησίως εντός των επόμενων ετών (Van Noorden, 2008; Milne, 2015; Critchley, 2019).

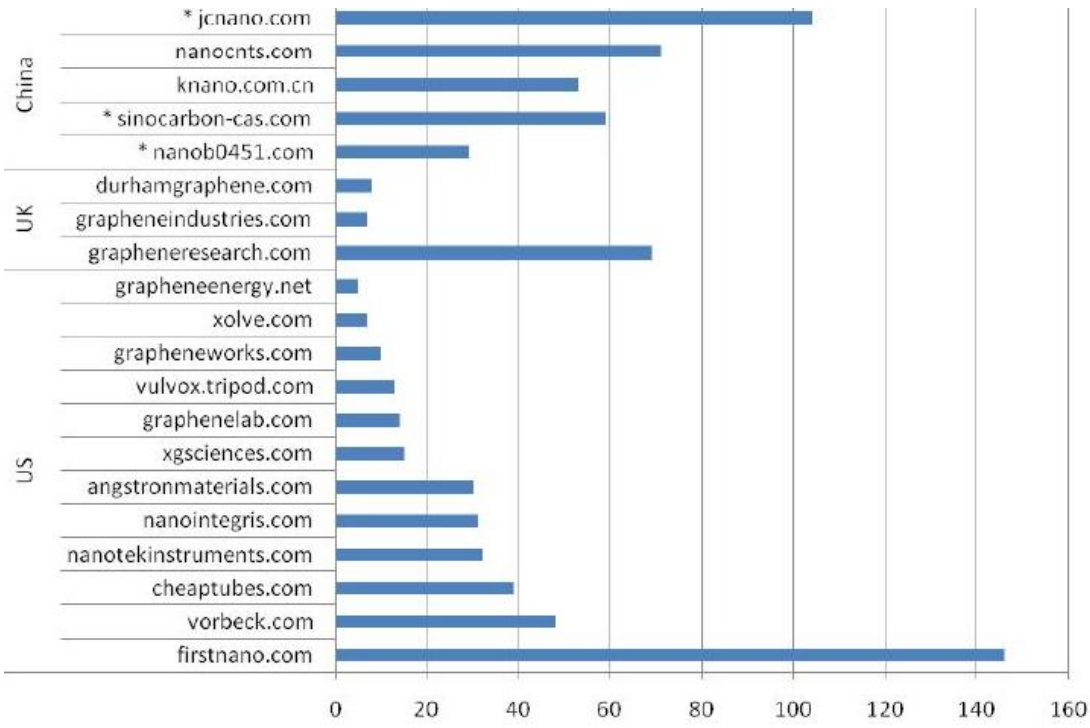


Εικόνα 6.2: *Σχέση ζήτησης γραφενίου με τιμή μονάδας.*



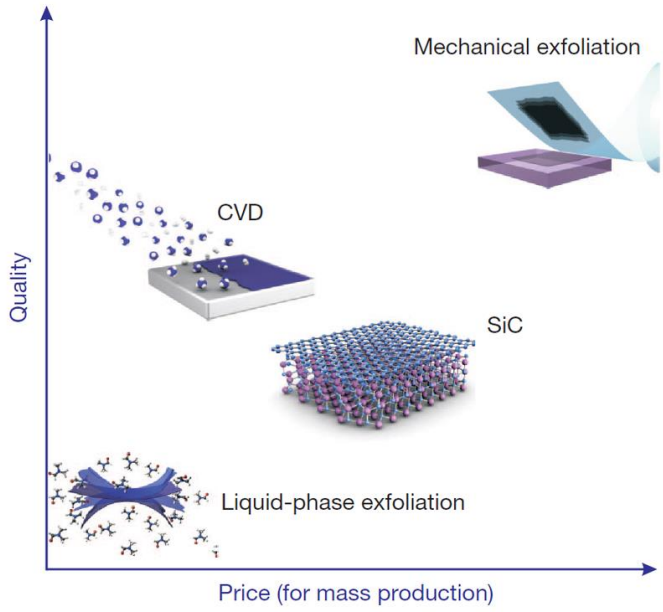
Εικόνα 6.3: *Η αγορά γραφενίου τα τελευταία έτη.*

Τρεις μικρές αμερικανικές εταιρείες αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγικής ικανότητας γραφενίου: Angstron Materials; Materials Vorbeck in Jessup, Maryland; και XG Sciences in East Lansing, Michigan. Οι εταιρείες ακολουθούν την ίδια βασική προσέγγιση κατασκευής, η οποία είναι η διάσπαση του γραφίτη στα φύλλα γραφενίου που τον αποτελούν — συνήθως παρεμβάλλοντας οξέα μεταξύ τους. Το προκύπτον ενδιάμεσο στη συνέχεια υποβάλλεται σε θερμική ή μηχανική επεξεργασία για την εξαγωγή nanoplatelets γραφενίου (NanoGrafi, 2019; Woodford, 2020).



Εικόνα 6.4: *Εταιρίες που δραστηριοποιούνται στην παραγωγή γραφενίου*

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που αντιμετωπίζουμε σήμερα στην εμπορευματοποίηση του γραφενίου είναι ο τρόπος παραγωγής υψηλής ποιότητας υλικού, σε μεγάλη κλίμακα με χαμηλό κόστος και με αναπαραγόμενο τρόπο (Van Noorden, 2008; Milne, 2015). Η ποιότητα του γραφενίου παίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς η παρουσία υπολειμμάτων, ακαθαρσιών, κόκκων, πολλαπλών φύλλων, δομικών διαταραχών, «ρυτίδων/ρωγμών» στο φύλλο γραφενίου μπορεί να έχει δυσμενή επίδραση στις ηλεκτρονικές και οπτικές του ιδιότητες. Στις ηλεκτρονικές εφαρμογές, το κύριο σημείο προσοχής είναι η απαίτηση δειγμάτων μεγάλου μεγέθους, κάτι που είναι δυνατό μόνο στην περίπτωση της διεργασίας CVD (Chemical Vapor Deposition), αλλά είναι δύσκολο να παραχθούν υψηλής ποιότητας και μονοκρυσταλλικά λεπτά υμένια γραφενίου με πολύ υψηλές ηλεκτρικές και θερμικές αγωγιμότητες μαζί με εξαιρετική οπτική διαφάνεια (Van Noorden, 2008; Milne, 2015; Critchley, 2019).



Εικόνα 6.5: *Σχέση τιμή πώλησης-ποιότητας γραφενίου*

Το σημαντικότερο εμπόδιο στην παρασκευή γραφενίου σε βιομηχανική κλίμακα είναι η πολυπλοκότητα της διαδικασίας και το σχετικό υψηλό κόστος παραγωγής του, το οποίο οδηγεί σε ακριβό προϊόν. Για παράδειγμα, επί του παρόντος, οι τιμές πώλησης των λεπτών μεμβρανών γραφενίου 50x50 με μία στρώση της εταιρείας Graphene Square είναι $263 και $819 σε φύλλο Cu και λεπτή μεμβράνη PET, αντίστοιχα. Τα nanoplatelets γραφενίου (πάχους 5-8 nm) που παραασκευάζονται από την XG Sciences πωλούνται περίπου στα $219-229/kg. Το υψηλό κόστος του γραφενίου είναι ένα από τα σημαντικότερα εμπόδια στην ευρεία υιοθέτησή του για εμπορικές εφαρμογές.

Το γραφένιο γίνεται όλο και πιο διαθέσιμο και προσιτό. Η εμπορευματοποίηση γραφενίου ακολουθεί μια στρατηγική που πιέζει για μια μακροπρόθεσμη και σοβαρή πτωτική πίεση στις τιμές. Αυτό συμβαίνει επειδή ακόμη και η τιμή του πιο ακριβού άνθρακα που επιδιώκει να αντικαταστήσει (νανοσωλήνες άνθρακα) πέφτει ραγδαία (λιγότερο από 50 $/kg για MWCNTs). Ως εκ τούτου, οι τιμές του γραφενίου πρέπει να μειωθούν, ενώ η βιομηχανία εξακολουθεί να αναζητά αυτή τη «κρίσιμη ισορροπία». Ορισμένοι προμηθευτές έχουν ήδη αρχίσει να δίνουν τιμές μικρότερες για 100$/kg για ορισμένους τύπους γραφενίου (μικρής καθαρότητας). Πολλοί στον κλάδο φοβούνται ότι η σχετικά απότομη και πρόωρη εμπορευματοποίηση του γραφενίου σε συνδυασμό με την πολλαπλότητα των μεθόδων παραγωγής, προκαλούν μεγάλες διακυμάνσεις στις τιμές και μάλιαστα κατά πολλές τάξεις μεγέθους στην αγορά σήμερα. Ο τομέας των υλικών επίστρωσης και άλλων όπως αντιδιαβρωτικές επιστρώσεις, αγώγιμα ηλεκτρονικά, προσκέφαλα καθισμάτων αυτοκινήτου, αποπαγωτικά κ.λπ. αναμένεται να δώσει στην αγορά σχεδόν 25 εκατομμύρια δολάρια στην αγορά το 2025. Σε άλλον τομέα, όπως η αποθήκευση ενέργειας θα αναδειχθεί επίσης ως βασικός τομέας για το γραφένιο. Η IDTechEx Research προβλέπει ότι

σχεδόν 100 εκατομμύρια δολάρια γραφενίου θα πωληθούν στον τομέα αποθήκευσης ενέργειας το 2026. Επίσης, στον τομέα των μπαταριών με επικαλύψεις γραφενίου, αναμένεται οτι θα γίνουν αγορές άνω των 7 δισ. $ έως το 2026, αντίστοιχα.

Γενικά, αναμένεται ότι η αγορά γραφενίου θα αυξηθεί αλματωδώς την επόμενη δεκαετία. Σύμφωνα με μια έκθεση εκτιμάται ότι ο όγκος παραγωγής γραφενίου το 2010 ήταν 28 τόνοι και προβλέπεται να αυξηθεί σε πάνω 750 τόνους έως το 2025.

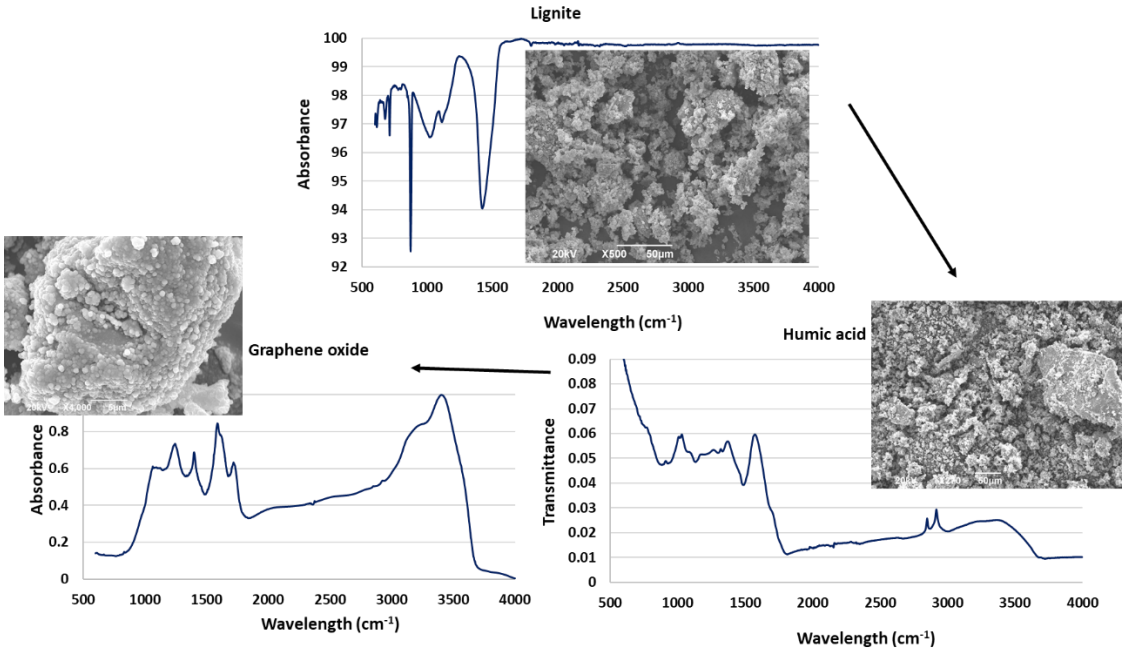
Επί του παρόντος, οι πιο κοινές διαθέσιμες τεχνικές για την παραγωγή γραφενίου περιλαμβάνουν μικρομηχανική διάσπαση, εναπόθεση χημικών ατμών, επιταξιακή ανάπτυξη σε υποστρώματα SiC, χημική αναγωγή του αποφλοιωμένου οξειδίου του γραφενίου, απολέπιση (exfoliation) υγρής φάσης γραφίτη. Για να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια στην εμπορευματοποίηση του γραφενίου, γίνονται συντονισμένες προσπάθειες από ερευνητές σε διάφορα Ινστιτούτα R&D, πανεπιστήμια και εταιρείες από όλο τον κόσμο για να αναπτύξουν νέες μεθόδους για μεγάλης κλίμακας παραγωγή γραφενίου χαμηλού κόστους και υψηλής ποιότητας μέσω απλών και φιλικών προς το περιβάλλον προσεγγίσεων.

6.5 Από λιγνίτη σε γραφένιο…

Ένα άλλο θέμα σχετικά με τη σύνθεση γραφενίου με συμβατικές μεθόδους αφορά τη χρήση τοξικών χημικών ουσιών και αυτές οι μέθοδοι συνήθως έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία επικίνδυνων αποβλήτων και δηλητηριωδών αερίων. Ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθούν πράσινες μέθοδοι για την παραγωγή γραφενίου ακολουθώντας φιλικές προς το περιβάλλον προσεγγίσεις.

Με βάση όλα τα παραπάνω, η πρωταρχική σκέψη που υπάρχει και με δεδομένο ότι λιγνίτης και γραφένιο έχουν ως βάση τον άνθρακα, είναι να αξιοποιηθεί ο λιγνίτης ως βάση για την παραγωγή υψηλής καθαρότητας γραφενίου.

Ερευνητική ομάδα με επικεφαλής τον Πρόεδρο του Τμήματος Χημείας τους Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, Καθ. Γ. Κύζα κατέχουν δίπλωμα ευρεσιτεχνίας (αρ. ΔΕ20210100243)με θέμα την διεργασία παρασκευής γραφενίου υψηλής καθαρότητας από λιγνίτη με συγκεκριμένη μεθοδολογία βασιζόμενη στη μετατροπή του λιγνίτη σε χουμικό οξύ και μετέπειτα σε οξείδιο του γραφενίου πριν την παρασκευή του τελικού προϊόντος (Kyzas and Mitropoulos, 2021). Η διεργασία αυτή βασίζεται στην αξιοποίηση του λιγνίτη (που εξορύσσεται σε ποσότητες της τάξης εκατομμυρίων τόνων ανά έτος) από τις βιομηχανίες ηλεκτρισμού και την μετατροπή του σε γραφένιο.



Εικόνα 6.6: *διεργασία παρασκευής γραφενίου υψηλής καθαρότητας από λιγνίτη με συγκεκριμένη μεθοδολογία βασιζόμενη στη μετατροπή του λιγνίτη σε χουμικό οξύ και μετέπειτα σε οξείδιο του γραφενίου πριν την παρασκευή του τελικού προϊόντος*

Η μέθοδος που προτείνεται πλεονεκτεί έναντι των υπολοίπων μέχρι τώρα διότι απαιτείται μικρότερο ενεργειακό ποσό για την τελική σύνθεση, δεδομένου ότι ο αρχικός λιγνίτης μετατρέπεται σε χουμικό οξύ, στη συνέχεια σε οξείδιο του γραφενίου και τελικά σε γραφένιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρακάμπτονται άκρως ενεργοβόρα ενδιάμεσα στάδια που αφορούν την τυπική μετατροπή του λιγνίτη σε γραφένιο ((α) μετατροπή λιγνίτη σε άνθρακα, (β) ενεργοποίηση του άνθρακα σε ενεργό άνθρακα, (γ) μετατροπή του ενεργού άνθρακα σε γραφίτη, (δ) μετατροπή του γραφίτη σε οξείδιο του γραφίτη, (ε) μετατροπή του οξειδίου του γραφίτη σε οξείδιο του γραφενίου, (στ) αναγωγή του οξειδίου του γραφενίου σε γραφένιο). Οι δυνητικές εφαρμογές του γραφενίου είναι πάρα πολλές που τεκμηριώνονται βιβλιογραφικά.

Αντιλαμβάνεται εύκολα κανείς ότι με την συγκεκριμένη διεργασία ο στόχος που επιτυγχάνεται είναι τριπλός: (i) Παράγεται ως ενδιάμεσο χουμικό οξύ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό, (ii) παράγεται υψηλής καθαρότητας γραφένιο (~77%) με φιλικότερη περιβαλλοντικά και ενεργειακά μέθοδο, προς χρήση σε αναρίθμητές εφαρμογές, (iii) παράγεται οξείδιο του γραφενίου που χρησιμοποιείται κατά κόρον στην τεχνολογία αντιρρύπανσης για τον καθαρισμό βιομηχανικών αποβλήτων (ως ροφητικό υλικό στην τριτοβάθμια επεξεργασία). Συνεπώς, αξιοποιείται πλήρως τον λιγνίτη σε πλήρως εξω-ηλεκτρικές εφαρμογές.

7. ΑΓΡΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ

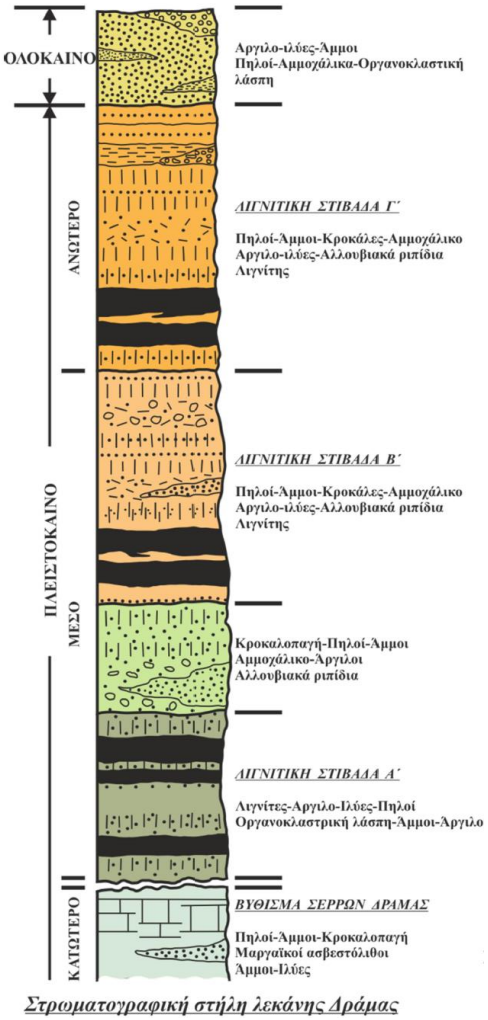
7.1 Χρήση λιγνίτη στην παραγωγή εδαφοβελτιωτικών για εσωτερική και εξωτερική κατανάλωση

Ο Ελληνικός λιγνίτης δύναται να αποτελέσει εξαιρετική πρώτη ύλη για παραγωγή εδαφοβελτιωτικών και οργανοχουμικών λιπασμάτων (Kalaitzidis et al., 2003; Chassapis and Roulia 2008; Giannouli et al., 2009; Γιαννούλη, 2017). Στην Ελλάδα λόγω του Μεσογειακού κλίματος αλλά και των εντατικών αγροτικών καλλιεργειών έχει επέλθει σημαντική υποβάθμιση (δηλ. απώλεια οργανικού χούμου) των εδαφών, που υποστηρίζουν την πρωτογενή αγροτική παραγωγή. Το φαινόμενο αυτό προβλέπεται να ενταθεί στο μέλλον. Η κατανάλωση ανόργανων λιπασμάτων δεν επιλύει το θέμα, και μάλιστα επιτείνει το πρόβλημα της νιτρορύπανσης υδροφόρων στρωμάτων, ενώ η αναζήτηση τρόπων διατήρησης της οργανικής ύλης στα εδάφη γίνεται ολοένα και ακριβότερη. Συνεπώς προτείνεται η υποστήριξη επενδυτικών σχεδίων για αξιοποίηση μικρών κοιτασμάτων λιγνίτη για εφαρμογή είτε ως εδαφοβελτιωτικών είτε ως πρώτη ύλη για παραγωγή οργανοχουμικών λιπασμάτων, δηλαδή συστατικών πλούσιων σε χουμικά και φουλβικά οξέα.

Ο χούμος είναι το μόνιμο κλάσμα του εδαφικού οργανικού υλικού και αποτελεί το 80-90% του ολικού οργανικού υλικού στο έδαφος. Πρόκειται για ένα περίπλοκο και σχετικά ανθεκτικό στα μικρόβια μίγμα καστανού έως σχεδόν μαύρου χρώματος άμορφων και κολλοειδών συστατικών τροποποιημένων σε σχέση με τους αρχικούς φυτικούς ιστούς ή επανασυσταμένων από εδαφικούς οργανισμούς. Περιέχει κατά προσέγγιση 10% υδατάνθρακες, 10% ενώσεις αζώτου (πρωτεΐνες, αμινοξέα, κυκλικές ενώσεις N), 10% λιπίδια (αλκάνια, αλκένια, λιπαρά οξέα, εστέρες) και 70% χουμικά συστατικά. Τα χουμικά συστατικά μπορούν να οριστούν ως «μία γενική κατηγορία φυσικών, βιογενών, ετερογενών οργανικών συστατικών, τα οποία έχουν κίτρινο έως μαύρο χρώμα, μεγάλο μοριακό βάρος και χαρακτηρίζονται για την ανθεκτικότητά τους». Πρόκειται για άμορφα, εν μέρει αρωματικά, πολυηλεκτρολυτικά υλικά, τα οποία δεν έχουν πλέον χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά, που να συνδέονται με συγκεκριμένες οργανικές ενώσεις (Schnitzer and Schulten 1995). Τα χουμικά συστατικά χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη συγκέντρωση άνθρακα και υδρογόνου και μικρότερη συγκέντρωση οξυγόνου σε σύγκριση με τους αρχικούς ζωικούς, φυτικούς και μικροβιακούς ιστούς, από τους οποίους προήλθαν, εξαιτίας της επίδρασης πολλών επεισοδίων οξείδωσης και υδρόλυσης. Επίσης κατά τη διαδικασία αποδόμησης οι ενώσεις αζώτου αντιδρούν με ελεύθερες ρίζες με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης αζώτου στα χουμικά συστατικά. Τα χουμικά συστατικά συνίστανται περίπου από 50-55% C, 5% H, 33% O, 4,5% N, 1% S και 1% P. Άλλα μέταλλα και θρεπτικά συστατικά, όπως Al, Ca, Zn και Cu είναι παρόντα σε μικρότερες ποσότητες (Horwath 2007).

Από το τέλος του 18ου αιώνα τα χουμικά συστατικά διακρίνονται σε τρία κλάσματα: χουμικά οξέα, φουλβικά οξέα και χουμίνες. Τα κλάσματα αυτά ορίζονται αυστηρώς λειτουργικά, δηλαδή με βάση τη διαλυτότητά τους σε όξινα ή αλκαλικά διαλύματα. Επισημαίνεται βέβαια ότι η διάκριση των τριών κλασμάτων δεν είναι απόλυτη. Αποτελούν όλα μέρος ενός ακραία ετερογενούς υπερ-μοριακού συστήματος και οι διαφορές τους οφείλονται σε διαφορές στην οξύτητα, στον βαθμό υδροφοβικότητας και στον σχηματισμό ενδομοριακών ενώσεων λόγω εντροπίας. Τα χουμικά οξέα είναι το κλάσμα εκείνο, που δεν είναι διαλυτό σε pH<2, αλλά διαλύεται σε υψηλότερες τιμές pH. Τα φουλβικά οξέα είναι το κλάσμα, που παραμένει σε διάλυση για κάθε τιμή pH. Τέλος οι χουμίνες αποτελούν το κλάσμα των χουμικών συστατικών, που παραμένει αδιάλυτο για κάθε τιμή pH. Οι χουμίνες θεωρούνται ότι είναι συστατικά παρόμοια με τα χουμικά οξέα, τα οποία έχουν αναπτύξει ισχυρούς δεσμούς με το ανόργανο υλικό και επομένως ανθίστανται στην επίδραση οξέων και αλκαλίων. Εξαιτίας του αδιάλυτου χαρακτήρα τους και της μακρομοριακής τους φύσης οι χουμίνες έχουν μελετηθεί ελάχιστα συγκριτικά με τα άλλα κλάσματα των χουμικών συστατικών.

Μελέτες που έχουν γίνει με χουμικά συστατικά που απομονώθηκαν από λιγνίτη (Εικόνα 7.1), έδειξαν ότι αυτά έχουν ευεργετική επίδραση στη βλάστηση σπόρων, στην απορρόφηση θρεπτικών συστατικών από τους ιστούς των φυτών, στην ανάπτυξη του βλαστού και του ριζικού συστήματος, καθώς και στην αύξηση της παραγωγής και της ποιότητας μεγάλης ποικιλίας φυτών. Σήμερα σε διεθνές επίπεδο ο λιγνίτης χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή οργανοχουμικών λιπασμάτων με τη μορφή αλάτων χουμικών οξέων (humates) ή χουμικών οξέων εμπλουτισμένων σε άζωτο (nitrohumates), κάλιο (potassium humate) κ.ά. Επίσης έχουν γίνει μελέτες πάνω στη χρήση του λιγνίτη ως εδαφοβελτιωτικού μετά από εμπλουτισμό του με άζωτο μέσω της διαδικασίας της οξειδωτικής αμμωνόλυσης (Χρηστάνης κ.ά. 2006, 2009).



Εικόνα 7.1: *Στρωματογραφική στήλη λεκάνης Δράμας.*

Συνοπτικά μπορεί να αναφερθεί ότι τα χαρακτηριστικά εκείνα που ακριβώς καθιστούν τον Ελληνικό λιγνίτη φτωχό σε θερμαντική ικανότητα, είναι ακριβώς αυτά που απαιτούνται για την παραγωγή π.χ. χουμικών συστατικών αλλά και εδαφοβελτιωτικών. Πλήθος μικρών κοιτασμάτων στον Ελλαδικό χώρο, συμπεριλαμβανομένων συγκεκριμένων στρωμάτων από τις κύριες λιγνιτοφόρες λεκάνες Φλώρινας-Πτολεμαΐδας-Κοζάνης και Μεγαλόπολης, δύνανται να αξιοποιηθούν προς αυτήν την κατεύθυνση. Οι μελέτες έως τώρα αποδεικνύουν υψηλή ικανότητα παραγωγής χουμικών συστατικών σε εργαστηριακή κλίμακα από διάφορα κοιτάσματα του Ελληνικού χώρου, αλλά και αποτελεσματικότητας της εφαρμογής τροποποιημένου λιγνίτη σε δενδροφυτεύσεις αποκατάστασης (π.χ. σε αποκατάσταση τοπίου σε ορυχεία βωξίτη και καολίνη, ιδιοκτησίας της σημερινής ΙΜΕΡΥΣ, Χρηστάνης κ.ά. 2009).

Η προσπάθεια για τη διατήρηση του εξορυκτικού κλάδου λιγνίτη και τη στροφή σε εξω-ηλεκτρικές εφαρμογές πρέπει να υποστηριχθεί, αλλά και να ενισχυθεί στα πλαίσια τόσο της Δίκαιης Μετάβασης στη Μεταλιγνιτική Εποχή, αλλά και στα πλαίσια των στρατηγικών Green Mining και Recycling of Raw Materials.

Η δραστηριοποίηση μικρών εξορυκτικών εταιρειών σε διάφορες μεταλλευτικές περιοχές διευκολύνει τη μετάβαση σε μια εναλλακτική και καθαρή χρήση του εγχώριου λιγνίτη με ταυτόχρονη ανάπτυξη καθετοποιημένης παραγωγής οργανοχουμικών λιπασμάτων. Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι η ανάπτυξη παραγωγής χουμικών συστατικών ή εδαφοβελτιωτικών από λιγνίτη για χρήσεις, όπως η αγροτική παραγωγή, η αποκατάσταση ορυχείων, η αναβάθμιση καμένων εδαφών κτλ., θα δημιουργήσει έναν κύκλο εργασιών και εισοδήματα, που σε δεύτερη φάση δύνανται να επενδυθούν για την παραγωγή πιο καθαρών χουμικών συστατικών, τα οποία βρίσκουν εφαρμογές στη βιομηχανία καλλυντικών αλλά και τη φαρμακευτική βιομηχανία. Με τον τρόπο αυτό θεμελιώνεται ένας κύκλος ανάπτυξης εγχώριων προϊόντων, τα οποία θα μπορούν να υποστηρίξουν την τοπική αγορά αλλά και να εξάγονται σε χώρες, όπου τα αντίστοιχα υλικά θεωρούνται πρώτες ύλες. Η γεωγραφική θέση της Ελλάδας παρουσιάζει πλεονεκτήματα αναφορικά με την παρουσία εμπορικών δικτύων διακίνησης αυτών των προϊόντων, ιδιαίτερα σε χώρες του Ευρωπαϊκού Νότου, αλλά και της Μέσης Ανατολής.

Εν κατακλείδι, τα κοιτάσματα λιγνίτη στην Ελλάδα αποτέλεσαν χώρο ερευνητικής εργασίας πλήθους γεω-επιστημόνων και μηχανικών απ' όλον τον κόσμο. Συνέβαλλαν και πρέπει να συνεχίσουν να συμβάλουν στην κατανόηση της γεωλογικής ιστορίας της χώρας, στον τρόπο που οι αλληλεπιδράσεις γεώσφαιρας-υδρόσφαιρας-ατμόσφαιρας εξελίχθηκαν στο πέρασμα του γεωλογικού χρόνου, αλλά και σε πρακτικά θέματα χρήσης των γαιανθράκων στη βιομηχανία είτε ως αναγωγικών μέσων είτε ως πρώτης ύλης για ανάκτηση άλλων ωφέλιμων συστατικών, όπως σπάνια μέταλλα, χουμικά κ.ά.

7.2. Η περίπτωση της Novihum (Γερμανία)

7.2.1 Ιστορία

Η εντατική γεωργία εξαντλεί το έδαφος από τα κρίσιμα θρεπτικά συστατικά που απαιτούνται για την καλλιέργεια τροφίμων. Με την υποστήριξη από το Enterprise Europe Network, ο Peter Langer, Διευθύνων Σύμβουλος της Novihum Technologies, αναβάθμισε ένα πανεπιστημιακό ερευνητικό πρόγραμμα και άρχισε να κατασκευάζει ένα προϊόν που όχι μόνο θα μπορούσε να αναπληρώσει αυτά τα εδάφη, αλλά και να αυξήσει την απόδοση (Novihum, 2021).

Το Novihum είναι μια πλούσια σε άνθρακα τεχνολογία ρύθμισης του εδάφους που βελτιώνει τη γονιμότητα του εδάφους για 10 χρόνια, αυξάνοντας σημαντικά τις αποδόσεις των καλλιεργειών, ενώ μειώνει τη χρήση του νερού και τη ρύπανση. Μετά από δεκαπέντε χρόνια έρευνας στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο της Δρέσδης (Γερμανία), δημιουργήθηκε μια εταιρεία γύρω από την τεχνολογία με στόχο να κλιμακώσει την έρευνα σε εμπορικό προϊόν. Ιδρυτές της εταιρείας ήταν ο Peter Langer, Διευθύνων Σύμβουλος, και ο Horst Ninnemann, Διευθυντής R&D (Novihum, 2021).

Ο Langer και ο Ninnemann ίδρυσαν τη Novihum Technologies το 2012. Ήξεραν από την αρχή ότι χρειάζονταν ένα εργοστάσιο όπου θα μπορούσαν να παράγουν μια σταθερή προμήθεια Novihum με λογικό κόστος. Μόλις το είχαν, σχεδίαζαν να εισέλθουν στις ευρωπαϊκές και διεθνείς αγορές κηπουρικής, πρασίνου, βιομηχανικής καλλιέργειας και βιωσιμότητας (Novihum, 2021).

Το Enterprise Europe Network είναι το μεγαλύτερο δίκτυο υποστήριξης στον κόσμο για μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις (ΜΜΕ) με διεθνείς φιλοδοξίες. Η Novihum ανέπτυξε μια ισχυρή εφαρμογή για χρηματοδότηση από το SME Instrument της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, το πρόγραμμα έρευνας και καινοτομίας της ΕΕ που βοηθά τις μικρές επιχειρήσεις με υψηλές δυνατότητες ανάπτυξης. Έλαβε περισσότερα από 2 εκατομμύρια ευρώ τα οποία χρησιμοποίησε για την ανάπτυξη μιας πιλοτικής μονάδας παραγωγής στο Dortmund που μπορεί να παράγει 1.000 τόνους Novihum ετησίως (Novihum, 2021). Αυτό δημιούργησε 20 θέσεις εργασίας στη διαδικασία, ενώ ήδη βρίσκονται σε εξέλιξη σχέδια για την ανάπτυξη μιας πλήρους μονάδας παραγωγής που θα μπορούσε να παράγει 30.000 τόνους Novihum ετησίως και να πωλεί σε πελάτες σε όλο τον κόσμο, διασφαλίζοντας ακόμη περαιτέρω δημιουργία θέσεων εργασίας. Συνολικά, η χρηματοδότηση βοήθησε τη Novihum Technologies να επιταχύνει την είσοδό της στην αγορά κατά τουλάχιστον ένα χρόνο (Novihum, 2021).

7.2.2 Τι είναι το NOVIHUM® και πώς παρασκευάζεται (patented)

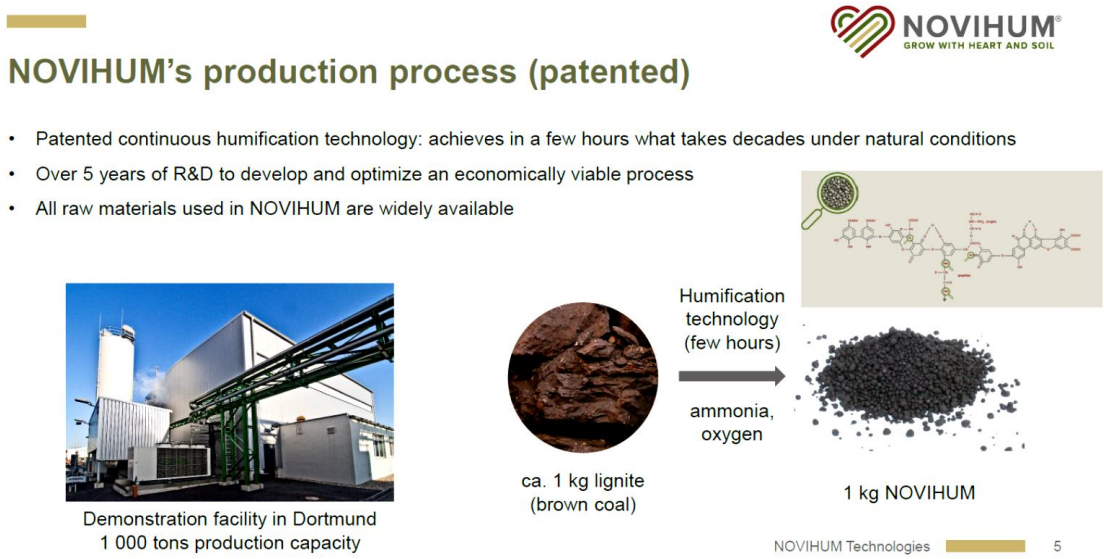
Το NOVIHUM® παράγεται από ευρέως διαθέσιμες πρώτες ύλες - καφέ άνθρακα (**λιγνίτης**), αμμωνία και οξυγόνο. Το NOVIHUM® είναι χημικά ενεργό αλλά αργά στην αποσύνθεση, παρέχοντας πλήρη και ισορροπημένη παροχή άνθρακα,

αζώτου και χουμικών ουσιών για τα επόμενα χρόνια. Εγγυημένη 60% (ή μεγαλύτερη) ποσότητα χουμικών ουσιών – χουμίνες, χουμικά και φουλβικά οξέα. Τα ενισχυτικά εδάφους δεν έχουν νάτριο (Novihum, 2021) .

ANALYSIS (PURE NOVIHUM®)			
pH (H_2O)	7.7	Nitrogen	3.5%
CEC_{pot}	138 mmolc /100g	– Ammoniacal nitrogen	1.1%
Density	0.8 kg/l	– Water Insoluble Nitrogen	2.4%
Carbon	41%	Ash	3.3%
Humic substances*	>60%		

Εικόνα 7.2: *Ανάλυση/σύσταση καθαρού NOVIHUM® παρασκευασμένο από λιγνίτη* (Novihum, 2021).

Η προστατευμένη από δίπλωμα ευρεσιτεχνίας διεργασία παρασκευής του NOVIHUM® απεικονίζεται διαγραμματικά παρακάτω.



Εικόνα 7.3: *Διαγραμματική απεικόνιση παρασκευής NOVIHUM® από λιγνίτη* (Novihum, 2021).

Αντιλαμβάνεται λοιπόν εύκολα κανείς τα πολλαπλά οφέλη της χρήσης λιγνίτη στην αγροτεχνολογία. Ο λιγνίτης είναι οργανικό υλικό με πολύτιμες λιγνινικές δομές που είναι εξαιρετικά κατάλληλο για εφαρμογή στο έδαφος εάν ρυθμιστεί (π.χ. ενσωμάτωση αζώτου, όπως με το NOVIHUM). Η NOVIHUM χρησιμοποιεί λιγνίτη ως πρώτη ύλη και παρουσιάζει ευνοϊκό αποτύπωμα CO_2 αφού δεν χρησιμοποιείται για παραγωγή ενέργειας. Υπάρχει διαθέσιμη υποδομή (εξόρυξη,

επεξεργασία) και ευνοϊκή ισορροπία κόστους για παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα (Novihum, 2021). Αναφέρεται ελεγχόμενη ποιότητα, χωρίς μικροπλαστικά, χωρίς παθογόνους παράγοντες, χωρίς ρύπους. Συνεπώς, η γεωργική/αγροτική αγορά προσφέρει μια μεγάλη ευκαιρία για χρήση του λιγνίτη πέρα από την ενέργεια με δεδομένο ότι υπάρχουν παγκοσμίως περί των 1,5 δισεκατομμυρίων εκταρίων καλλιεργούμενης γης, ενώ περίπου το 1/3 της καλλιεργούμενης γης θεωρείται υποβαθμισμένη ή σοβαρά υποβαθμισμένη (κάθε χρόνο χάνονται 10 εκατομμύρια εκτάρια καλλιεργήσιμης γης) (Novihum, 2021). **Η αγορά λοιπόν μπορεί να απορροφήσει αρκετά εκατομμύρια τόνους λιγνίτη ετησίως για τη βελτίωση του εδάφους.**

7.3 Η περίπτωση της Arctech (ΗΠΑ)

7.3.1 Ιστορία

Η ARCTECH, Inc. είναι μια αμερικανική εταιρεία (ΗΠΑ) που παρέχει οικονομικά αποδοτικές λύσεις για τους τομείς της γεωργίας, της ενέργειας και της περιβαλλοντικής αγοράς (Arctech, 2021). Ο όμιλος ARCTECH, που ιδρύθηκε ως spin-off εταιρεία από το τμήμα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας της Atlantic Research Corporation, μέσα από 25 χρόνια εμπειρίας στην ενέργεια, την ενέργεια, το περιβάλλον και τη γεωργία, έχει δημιουργήσει ενοποιημένες λύσεις σε αυτούς τους αλληλένδετους τομείς της αγοράς. Οι επιχειρηματίες, επιστήμονες και μηχανικοί της ARCTECH **πρωτοστάτησαν στη χρήση των τεράστιων πόρων άνθρακα** για οικονομική καθαρή ενέργεια, καθαρό νερό και περιβάλλον, ασφαλέστερα τρόφιμα, ανακύκλωση στρατιωτικών και βιομηχανικών αποβλήτων, με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

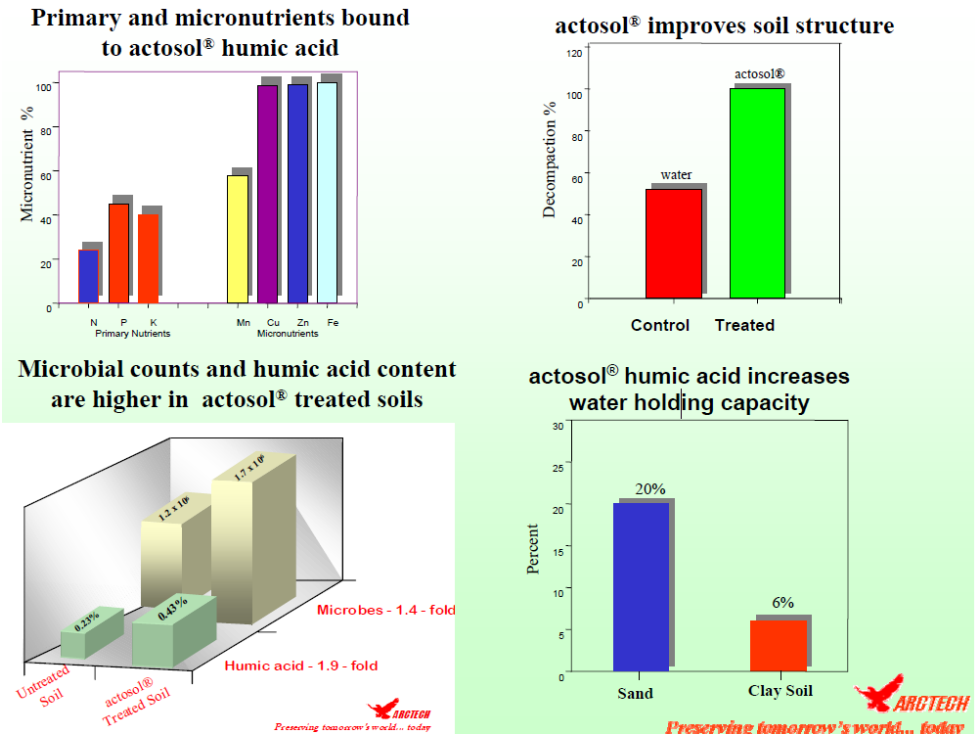
Η ARCTECH διατηρεί ένα υπερσύγχρονο ερευνητικό κέντρο στην εταιρική της έδρα στο Chantilly της Βιρτζίνια στην περιοχή της Ουάσιγκτον. Οι τεχνολογίες της ARCTECH προστατεύονται από διάφορες ευρεσιτεχνίες. Η συνεργασία της ARCTECH περιλαμβάνει πλέον τις χώρες του Κόλπου, την Αίγυπτο, τον Λίβανο, τη Νότια Κορέα, την Τουρκία, την Ινδία, την Κίνα και τη Βραζιλία (Arctech, 2021).

7.3.2 Τι είναι το actosol® και πώς παρασκευάζεται (patented)

Το actosol® βελτιώνει την απόδοση και την ποιότητα των καλλιεργειών, των λαχανικών και των φρούτων, παράγει υγιή και βαθύτερη ριζική μάζα για ανώτερο χλοοτάπητα, δημιουργεί βλάστηση σε αλατούχα και φτωχά εδάφη με την ενίσχυση της δομής του εδάφους και της γονιμότητας μέσω της προσθήκης ζωτικής σημασίας οργανική ύλη στο έδαφος (Arctech, 2021). Με αποτελεσματική μεταφορά των θρεπτικών και μικροθρεπτικών συστατικών του λιπάσματος λόγω της υψηλής αναλογίας χηλίωσης και ανταλλαγής κατιόντων το ενεργό συστατικό χουμικού οξέος του actosol®, επιτυγχάνει την αύξηση της ικανότητας συγκράτησης υγρασίας του εδάφους, την αύξηση της μικροβιακής

δραστηριότητας στο έδαφος. και την ενίσχυση της βιομάζας των φυτικών κυττάρων. Στην εικόνα 7.4 δίδεται η σύγκριση του απλού λιπάσματος με το **actosol®** (Arctech, 2021).

Το actosol® λοιπόν είναι ένας οργανικός ενεργοποιητής θρεπτικών συστατικών που ενισχύει τη γονιμότητα του εδάφους και διεγείρει την ανάπτυξη ,και την ανάπτυξη των φυτών. **Περιέχει μη φυτικά συστατικά τροφίμων 2,9% χουμικό/φουλβικό οξύ που προέρχεται από λιγνίτη** (Arctech, 2021). Παρέχει γρήγορη και διαρκή απελευθέρωση με 30% άζωτο, 50% P_2O_5 και 50% K_2O δεσμευμένα σε χουμικά/φουλβικά συστατικά. Δηλαδή, αποτελείται από φυσικά χουμικά και φουλβικά οξέα, τα ενεργά συστατικά του πλούσιου χούμου του εδάφους. Σήμερα τα εδάφη εξαντλούνται σε μεγάλο βαθμό σε οργανικό χούμο και ακόμη με υψηλές εισροές θρεπτικών συστατικών, οι αποδόσεις υπολείπονται (Arctech, 2021).



Εικόνα 7.4: *Σύγκριση κοινών λιπασμάτων με το actosol®.*

TYPICAL ANALYSIS OF actosol® PRODUCTS (w/v%)

	HUMIC ACID	N	P (P_2O_5)	K (K_2O)	Ca	Mg	S	B	Cl	Cu	Fe	Mn	Zn
Turf Booster actosol®	3	20	5	5	0.08	0.07	.10	0.007	0.5	0.01	0.1	0.01	0.01
Horticultural actosol®	3	10	10	10	0.08	0.07	.10	0.007	0.5	0.01	0.1	0.01	0.01
Calcium actosol®	3	2	-	-	2.00	0.07	.10	0.007	0.5	0.01	0.1	0.01	0.01
Micronutrient actosol®	3	0.4	0.08	.5	0.08	0.07	.10	0.007	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Bio-Activated Base actosol®	6	0.4	0.08	1.5	0.08	0.07	.10	0.007	0.5	0.01	0.5	0.01	0.01

Εικόνα 7.5: *Ανάλυση/σύσταση καθαρού actosol® παρασκευασμένο από λιγνίτη*

Πίνακας 7.1: *Σύγκριση εδαφοβελτιωτικών Novihum® και Actsol® (Arctech, 2021, Novihum, 2021)*

	Τεχνολογία	Προϊόν	Παρούσα κατάσταση
Novihum®	Ήπια οξείδωση – Αμμονώλυση	Χουμικό οξύ	1000 t/y εφαρμογή, 280 δοκιμές σε Ευρωπαϊκές χώρες
Actsol®	Αναερόβια χώνευση	Αέριο και χουμικό οξύ	Εμπορική εφαρμογή σε ΗΠΑ, Τουρκία, Αίγυπτο, Κίνα

8. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

8.1 Παραγωγή υδρογόνου

Το υδρογόνο είναι το ελαφρύτερο στοιχείο του περιοδικού πίνακα και το πλέον διαδεδομένο συστατικό, δεδομένου ότι το 73% της μάζας του ορατού σύμπαντος αποτελείται από υδρογόνο (Nuclear Science, 2009). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη στη βιομηχανία, ως καύσιμο αλλά και ως ενεργειακός φορέας. Το ισχυρό προτέρημά του να μην παράγει διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) όταν καίγεται, το καθιστά βασικό πυλώνα της δρομολογούμενης μετάβασης σε μια οικονομία χαμηλών και μακροπρόθεσμα μηδενικών ρύπων.

Οι αποχρώσεις του Υδρογόνου

Εικόνα 8.1: *Οι κατά σύμβαση αποχρώσεις του υδρογόνου (Energy Cities, 2020)*

Αν και το υδρογόνο είναι από τη φύση του άχρωμο, τα τελευταία χρόνια έχει επικρατήσει διεθνώς ο χαρακτηρισμός του με διακριτές αποχρώσεις, οι οποίες

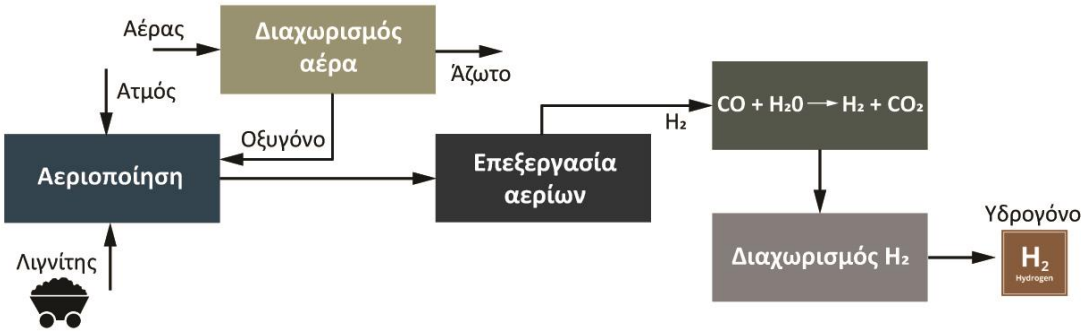
αφορούν στον τρόπο παραγωγής του και αντανακλούν το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, το υδρογόνο παράγεται σε ποσοστό 98% από ορυκτούς υδρογονάνθρακες. Περίπου το 70% είναι γκρι υδρογόνο και παράγεται μέσω της αναμόρφωσης του φυσικού αερίου ενώ το υπόλοιπο αντιστοιχεί στο καφέ υδρογόνο, που παράγεται από γαιάνθρακες μέσω αεριοποίησης. Το πράσινο υδρογόνο που παράγεται αποκλειστικά από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, αντιπροσωπεύει επί του παρόντος λιγότερο από το 1% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής (Energy Cities, 2020).

8.2 Παραγωγή υδρογόνου από λιγνίτη

Η καύση του λιγνίτη, κύρια διεργασία των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι η πλήρης οξείδωση του λιγνίτη μέσω εξώθερμης διαδικασίας η οποία παράγει ενέργεια σε μορφή θερμότητας και διοξείδιο του άνθρακα. Το διοξείδιο του άνθρακα δεν μπορεί να οξειδωθεί περαιτέρω και αποτελεί άκαυστο τελικό προϊόν της διαδικασίας καύσης.

Στην αεριοποίηση αντίθετα, ο λιγνίτης δεν οξειδώνεται πλήρως δεδομένου ότι πρόκειται για μια ενδοθερμική διαδικασία η οποία απαιτεί εισροή θερμότητας για να προχωρήσει. Κατά συνέπεια, το παραγόμενο αέριο σύνθεσης (CO και H_2) μπορεί να αξιοποιηθεί για περαιτέρω χρήσεις, όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Εικόνα 8.2: *Απλοποιημένο διάγραμμα παραγωγής υδρογόνου με χρήση λιγνίτη.*

Επιπρόσθετα, ενώ στην περίπτωση της καύσης είναι περισσότερο αποδοτικοί οι λιθάνθρακες και γενικά οι γαιάνθρακες υψηλού θερμιδικού περιεχομένου, στην περίπτωση της αεριοποίησης περισσότερο αποδοτικοί είναι οι λιγνίτες και γενικά οι γαιάνθρακες «νεαρής» γεωλογικής ηλικίας. Η υψηλή περιεκτικότητα των λιγνιτών σε οξυγόνο τους καθιστά λιγότερο σταθερούς χημικά με αποτέλεσμα να αντιδρούν ευκολότερα με το μέσο αεριοποίησης, ενώ το δεσμευμένο υδρογόνο που υπάρχει στους λιγνίτες παρέχει ώθηση και επιταχύνει την όλη

διαδικασία (Bielowicz, 2019). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι από 1 τόνο λιγνίτη Πτολεμαΐδας, μπορούν να παραχθούν περίπου 18 κιλά υδρογόνου (Carpenter et al., 2019).

Από περιβαλλοντική σκοπιά, το γεγονός ότι στο λιγνίτη η αναλογία άνθρακα προς υδρογόνο είναι συγκριτικά μεγαλύτερη με αυτή του φυσικού αερίου, η αεριοποίηση του λιγνίτη παράγει περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα σε σύγκριση με την παραγωγή υδρογόνου από φυσικό αέριο.

8.2.1 Εμπορική Ωριμότητα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αεριοποίηση είναι μια εξαιρετικά ώριμη τεχνολογία (**TRL 9**) και ευρέως διαδεδομένη, με συνέπεια ο άνθρακας να συμμετέχει με υψηλό ποσοστό στην παραγωγή υδρογόνου. Σε παγκόσμιο επίπεδο, περίπου 130 μονάδες αεριοποίησης γαιανθράκων για παραγωγή υδρογόνου βρίσκονται σε λειτουργία, ενώ περισσότερο από το 80% αυτών είναι εγκατεστημένοι στην Κίνα (Coal Age, 2021). Δεδομένου ότι στην Κίνα οι τιμές του φυσικού αερίου είναι σχεδόν τρεις φορές υψηλότερες από ό,τι στις Ηνωμένες Πολιτείες, τα τεράστια αποθέματα άνθρακα της συγκεκριμένης χώρας αποτελούν την ελκυστικότερη πηγή παραγωγής υδρογόνου (World LNG Report, 2019).

Όσον αφορά στην αεριοποίηση γαιανθράκων με σύστημα δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα (CCS), υπάρχουν επί του παρόντος τρεις εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας που παράγουν υδρογόνο από γαιάνθρακα και οπτάνθρακα (οπτάνθρακας (κώκ) είναι μια δευτερογενή, τεχνητή καύσιμη ύλη και προκύπτει από την πύρωση του άνθρακα σε σχάρες ή ειδικά καμίνια.), συνολικής δυναμικότητας 0,6 Mt υδρογόνου το χρόνο. Πρόκειται για τις μονάδες Great Plains και Coffeyville στις ΗΠΑ και τη μονάδα Sinopec Qila στην Κίνα. Οι εν λόγω μονάδες αποδεικνύουν ότι η μεγάλης κλίμακας παραγωγή υδρογόνου χαμηλών εκπομπών CO_2 με χρήση συστημάτων CCS, είναι τεχνικά και εμπορικά εφικτή (Coal Age, 2021).

8.2.2 Η περίπτωση της Β. Ντακότα

Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η περίπτωση της μονάδας **Great Plains Synfuel** στη Βόρεια Ντακότα των ΗΠΑ, η οποία παράγει 1.300 τόνους υδρογόνου την ημέρα μέσω αεριοποίησης λιγνίτη, αποτελώντας τη μεγαλύτερη μονάδα παγκοσμίως. Περίπου 16 χιλιάδες τόνοι λιγνίτη τροφοδοτούνται καθημερινά στα αεριογόνα τεχνολογίας Lurgi Mark IV, ενώ η κατασκευή της μονάδας απαίτησε $2,1 δις. Το διοξείδιο του άνθρακα δεσμεύεται και μεταφέρεται μέσω ενός αγωγού μήκους 320 χιλ. σε δύο πετρελαϊκές εταιρείες, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό μέσο στην εξόρυξη του αργού πετρελαίου (Coal Age, 2021), (Synfuels Plant, 2008).

Βεβαίως, δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι η συγκεκριμένη, μεγάλης κλίμακας μονάδα παραγωγής υδρογόνου από λιγνίτη βρίσκεται εγκατεστημένη στη Βόρεια Ντακότα των ΗΠΑ, δεδομένου ότι (N. Dakota State Website, 2021).

- Η Β. Ντακότα διαθέτει τα μεγαλύτερα κοιτάσματα λιγνίτη σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ περισσότερες από 15 χιλιάδες άμεσες θέσεις εργασίας σε τοπικό επίπεδο, συντηρεί η βιομηχανία λιγνίτη
- Οι εργαζόμενοι τόσο στα ορυχεία όσο και στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, αμείβονται σημαντικά υψηλότερα συγκριτικά με τον μέσο όρο αμοιβών σε επίπεδο Πολιτείας
- Τα τελευταία χρόνια, η Πολιτεία της Β. Ντακότα εισέπραξε περισσότερα από 1 δις δολάρια από τις εταιρείες εκμετάλλευσης λιγνίτη, υπό μορφή φόρων και δικαιωμάτων εξόρυξης
- Οι κάτοικοι όλης της Πολιτείας πληρώνουν το ηλεκτρικό ρεύμα σε χαμηλότερη τιμή συγκριτικά με τους κατοίκους των άλλων Πολιτειών των ΗΠΑ. Για παράδειγμα, το 2016 η μέση τιμή χρέωσης για τη Β. Ντακότα ήταν τα10,3 cents/kWh, όταν οι υπόλοιπες Πολιτείες πλήρωναν 12,75 cents/kWh.

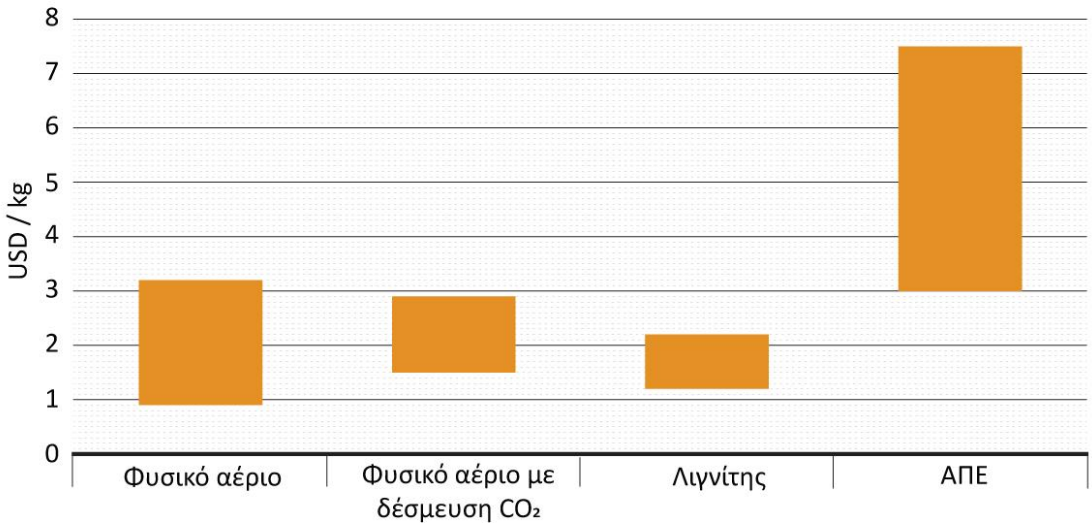
Παράλληλα, η τοπική βιομηχανία λιγνίτη τόσο στη συμβατική της μορφή (καύση) όσο και στη συνεχή εξέλιξή της σε καινοτόμες τεχνολογίες και πρακτικές (αεριοποίηση), προσελκύει ακαδημαϊκούς και ερευνητικούς φορείς, δημιουργώντας τοπικά συνθήκες Έξυπνης Εξειδίκευσης παγκοσμίου επιπέδου. Πανεπιστήμια και Κολλέγια όπως τα Bismarck, Minot, Fort Yates, Devils Lake, Wahpeton, Fargo, Grand Forks και Williston, λειτουργούν στην περιοχή και συνεισφέρουν σημαντικά στην προσπάθεια της ενεργειακής μετάβασης.

8.3 Οικονομικότητα και ανταγωνισμός

Σύμφωνα με στοιχεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το κόστος παραγωγής υδρογόνου με βάση τα ορυκτά είναι περίπου €1,5/kg, το εκτιμώμενο κόστος παραγωγής υδρογόνου με βάση τα ορυκτά με δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα είναι περίπου €2/kg, ενώ το κόστος πράσινου υδρογόνου ανέρχεται στα €2,5-5,5/kg (European Commission, 2020).

Από την άλλη πλευρά, το κόστος του πράσινου υδρογόνου μειώνεται σταθερά. Το κόστος των μονάδων ηλεκτρόλυσης έχει ήδη μειωθεί κατά 60% τα τελευταία δέκα χρόνια και αναμένεται να μειωθεί ακόμη περισσότερο. Μετά το 2030, σε περιοχές όπου η ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές θα είναι σχετικά φθηνή, οι μονάδες ηλεκτρόλυσης αναμένεται να είναι σε θέση να ανταγωνιστούν το υδρογόνο που παράγεται από ορυκτές πρώτες ύλες (European Commission, 2020).

Επιπλέον, σύμφωνα με την Παγκόσμια Επιτροπή Ενέργειας (IEA) το κόστος παραγωγής υδρογόνου διαμορφώνεται σήμερα ως ακολούθως (IEA, 2019).



Εικόνα 8.3: *Κόστος παραγωγής υδρογόνου από διαφορετικές πηγές και τεχνολογίες.*

Το υδρογόνο βρίσκεται ψηλά στην ατζέντα της Ευρωπαϊκής Ένωσης όσον αφορά στις διαδικασίες μετάβασης σε μια οικονομία μηδενικών ρύπων, δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στην ανταγωνιστικότητα του κόστους και την κλίμακα παραγωγής, στις ανάγκες σε υποδομές καθώς σε θέματα ρυθμιστικού και κανονιστικού πλαισίου.

Σύμφωνα με τη μελέτη "Hydrogen Insights" που δημοσιεύθηκε τον Αύγουστο του 2021 από την εταιρεία συμβούλων McKinsey, προβλέπεται μια κλιμακούμενη δραστηριότητα στην παραγωγή υδρογόνου, εν όψει των επιταχυνόμενων κλιματικών στόχων. Από τον Φεβρουάριο του 2021 έχουν ανακοινωθεί 131 νέα μεγάλα έργα παγκοσμίως, ανεβάζοντας το σύνολο των προβλεπόμενων έργων υδρογονοπαραγωγής σε 359. Έως το 2030 οι συνολικές επενδύσεις σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας εκτιμάται ότι θα ανέλθουν σε 500 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ, ενώ η παραγωγική ικανότητα υδρογόνου χαμηλών εκπομπών άνθρακα, αναμένεται να ξεπεράσει τους 10 εκατομμύρια τόνους ετησίως (McKinsey & Co, 2021).

9. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ

9.1 Τα παραπροϊόντα της βιομηχανίας του λιγνίτη

Σύμφωνα με το US Geological Survey (USGS) (Schweinfurth, 2003), η διαδικασία καύσης των γαιανθράκων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παράγει πληθώρα παραπροϊόντων που μπορούν να αξιοποιηθούν ως πρώτες ύλες από πολλούς παραγωγικούς τομείς. Ένας απ' αυτούς είναι ο κατασκευαστικός τομέας που μπορεί να αξιοποιήσει την ιπτάμενη τέφρα, την τέφρα πυθμένα, την σκωρία λέβητα, τη γύψο και τα άγονα υλικά χωρίς να απαιτούνται εξειδικευμένες διαδικασίες επεξεργασίας και επενδύσεις έντασης κεφαλαίου.

Άγονα πετρώματα

Κατά την εξόρυξη του λιγνίτη υλοποιείται ταυτόχρονα και εξόρυξη αγόνων υλικών, πετρωμάτων δηλαδή που δεν έχουν θερμιδικό περιεχόμενο και δεν μπορούν να καούν στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς. Τα άγονα πετρώματα καταλήγουν συνήθως στις αποθέσεις του ορυχείου και μπορεί να θεωρηθεί ότι, σε κάποιες περιπτώσεις, συμβάλουν στην επαναφορά του τοπογραφικού ανάγλυφου στην κατάσταση που ήταν πριν την έναρξη της εξόρυξης. Όμως, στα άγονα πετρώματα ενδέχεται να υπάρχουν και υλικά που μπορούν να αξιοποιηθούν ως παραπροϊόντα, όπως άργιλοι, άμμοι, κροκαλοπαγή, κ.α. Η αξιοποίηση αυτή μπορεί να αφορά το ίδιο το ορυχείο, π.χ. για τις ανάγκες κατασκευής της εσωτερικής του οδοποιίας, αλλά πολλές φορές, όταν η ποιότητα των υλικών αυτών είναι πληροί κάποιες προδιαγραφές, μπορεί να αποκτήσουν και εμπορικό ενδιαφέρον.

Ιπτάμενη Τέφρα

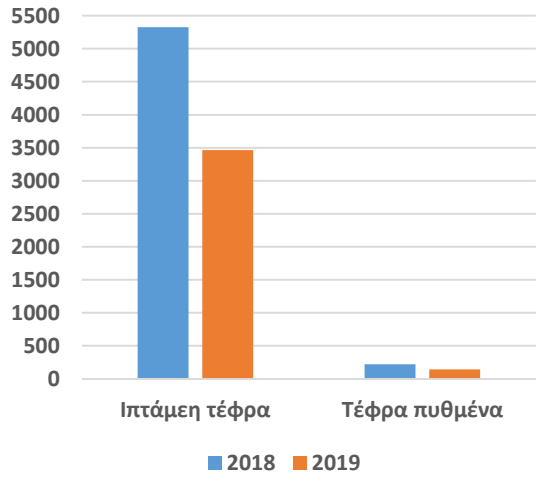
Η ιπτάμενη τέφρα συγκρατείται από τα φίλτρα που διαθέτουν όλες οι μονάδες καύσης, τα οποία την δεσμεύουν από τα καυσαέρια που οδηγούνται προς τις καμινάδες. Η ιπτάμενη τέφρα που παράγεται στους ΑΗΣ της Δυτικής Μακεδονίας αξιοποιείται σε ποσοστό 10% από την βιομηχανία τσιμέντου. Το υπόλοιπο 90% αποτίθεται μαζί με τα άγονα πετρώματα των ορυχείων. Η παρουσία της τέφρας στις αποθέσεις θεωρείται ότι μειώνει την πιθανότητα να συμβούν κατολισθήσεις και συγκρατεί τα βαρέα μέταλλα ώστε να μην διαλυθούν στο νερό, λόγω του υψηλού pH που διαθέτει.

Τέφρα πυθμένα

Η τέφρα πυθμένα (ή τέφρα βάσης, η καθιζάνουσα τέφρα) είναι το δεύτερο σε όγκο παραπροϊόν της καύσης του λιγνίτη μετά από την ιπτάμενη τέφρα. Σε σχέση με την ιπτάμενη τέφρα, περιέχει μεγαλύτερο ποσοστό χονδρόκοκκων σωματιδίων καθώς και οργανικής ύλης, προερχόμενης από κόκκους λιγνίτη μεγάλου μεγέθους που δεν πρόλαβαν να καούν. Η τέφρα πυθμένα έχει την μορφή κοκκώδους και πορώδους υλικού στο μέγεθος της άμμου, χρώματος

σκούρου γκρι ή μαύρου ή καφέ. Αποτελεί λειαντικό υλικό για αμμοβολή και για εφαρμογές σε προϊόντα παραγωγής εύκαμπτων κεραμιδιών και γενικότερα ως αντιολισθητικό και στεγανοποιητικό υλικό.

Οι ποσότητες ιπτάμενης τέφρας και τέφρας πυθμένα που παράχθηκαν από τους λιγνιτικούς σταθμούς της ΔΕΗ Α.Ε. τη διετία 2018-19 παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.1. Το 2019 η παραγωγή της ιπτάμενης τέφρας από τους ΑΗΣ ανήλθε σε 3.463 χιλ. τόνους και η τέφρα πυθμένα σε 144 χιλ. τόνους. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατανάλωση λιγνίτη των σταθμών του λεκανοπεδίου Πτολεμαΐδας την ίδια περίοδο ήταν 27,2 και 17,7 εκατ. τόνοι, αντίστοιχα, για τα έτη 2018 και 2019, όταν το 2020 μειώθηκε στα 10,3 εκατ. τόνους και για τα επόμενα έτη αναμένεται να κυμανθεί μεταξύ 5-8 εκατ. τόνων. Οι αριθμοί αυτοί καταδεικνύουν ότι οι διαθέσιμες προς αξιοποίηση ποσότητες τέφρας για τα επόμενα χρόνια θα είναι μικρότερες σε σχέση ακόμα και με το πρόσφατο παρελθόν.



***Εικόνα 9.1**: Παραγωγή τέφρας από τους λιγνιτικούς σταθμούς της ΔΕΗ Α.Ε. τη διετία 2018-19 (σε χιλιάδες τόνους)*

Ως εκμεταλλεύσιμες ποσότητες τέφρας, υπό προϋποθέσεις, θα μπορούσαν να θεωρηθούν ότι είναι και αυτές που έχουν αποτεθεί στις δύο αποθέσεις που βρίσκονται στον ΑΗΣ Μελίτης και στο Ορυχείου Νοτίου Πεδίου. Η πρώτη έχει δεχτεί μέχρι σήμερα περίπου 14,5 εκατ. τόνους ιπτάμενης τέφρας και γύψου ενώ η δεύτερη έχει πρόσφατα ογκομετρηθεί 19 εκατ. κυβικά μέτρα, μαζί με το κάλυμμα φυτικής γης. Σε ότι αφορά τη γύψο που παράγεται από τα συστήματα αποθείωσης, η ετήσια παραγωγή του ΑΗΣ Μελίτης Φλώρινας ανέρχεται περίπου σε 300.000 τόνους με περιεχόμενα στερεά 90%, ενώ η ποσότητα της γύψου που θα παράγεται από τη νέα μονάδα του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας V μετά την έναρξη λειτουργίας του θα ανέρχεται σε 200.000 τόνους ετησίως.

Σκωρία λέβητα

Η σκωρία λέβητα προέρχεται από υλικό που επικάθεται στα εσωτερικά τοιχώματα του λέβητα και σε τακτική βάση απομακρύνεται προκειμένου να επανέλθει η εναλλαγή θερμότητας μεταξύ του καυσίμου λιγνίτη και του ατμού σε

υψηλά επίπεδα. Η σκωρία λέβητα έχει υψηλή σκληρότητα και για το λόγο αυτό αποτελεί ιδανικό λειαντικό υλικό για χρήση σε εργασίες αμμοβολής.

Γύψος

Η γύψος FGD (Flue Gas Desulfurization) που παράγεται από τις εγκαταστάσεις αποθείωσης σύγχρονων θερμοηλεκτρικών σταθμών είναι ένα προϊόν υψηλής ποιότητας. Διακρίνεται για την εξαιρετική καθαρότητά του, που υπερβαίνει το 96% (η καθαρότητα του φυσικού γύψου κυμαίνεται από 70% έως 90 %). Μέχρι πρόσφατα η γύψος FGD οδηγούνταν σε υγειονομική ταφή. Με την εξέλιξη των τεχνολογιών και την ανάγκη βιώσιμης ανάπτυξης στον τομέα παραγωγής υλικών δόμησης, η γύψος FGD αποτελεί βασική πρώτη ύλη στην παραγωγή οικοδομικών προϊόντων (π.χ. γυψοσανίδες). Η γύψος χρησιμοποιείται επίσης, σε μικρές ποσότητες, στο σκυρόδεμα και σε γεωργικές εφαρμογές (Σ. Schweinfurth, 2003).

Τέφρα από τη μικτή καύση λιγνίτη, βιομάζας και αποβλήτων

Η εκμετάλλευση του ενεργειακού περιεχομένου της βιομάζας και των αποβλήτων είναι μια πρακτική ευρύτατα διαδεδομένη. Περίπου το 70% της τέφρας βιομάζας που παράγεται στις ΗΠΑ χρησιμοποιείται στα υλικά οδοποιίας. Με βάση τις φυσικές, χημικές και ορυκτολογικές ιδιότητές της, η τέφρα από την καύση ξύλου μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σκυρόδεμα και τα κονιάματα (Ε. Παπαδάκης, 2009).

Σε ότι αφορά τη δυνατότητα χρήσης τέφρας προερχόμενης από την καύση αποβλήτων, προτείνεται η χρήση της μόνο για την παρασκευή άοπλων τσιμεντοκονιαμάτων σε μικρό (5%) ποσοστό αντικατάστασης της άμμου. Σημειώνεται ότι δεν έχει παρατηρηθεί κάποια περίπτωση ρύπανσης λόγω έκπλυσης μετάλλων από την τέφρα αυτού του τύπου (Σίδερης κ.α., 2005).

Η μικτή καύση λιγνίτη, βιομάζας και αποβλήτων μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να αποτελεί τη λύση για την επιλογή καυσίμου μικρών, αποκεντρωμένων μονάδων τηλεθέρμανσης οικισμών αλλά και βιομηχανικών και αγροτικών μονάδων. Η λύση αυτή συνδυάζει τη σταθερότητα τροφοδοσίας καυσίμου που εγγυάται ο λιγνίτης με τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα που έχουν η χρήση μιας ανανεώσιμης πηγής, όπως η βιομάζα, και η καύση των αποβλήτων ως μέθοδος τελικής διάθεσης με ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η εκμετάλλευση της τέφρας που θα παράγεται σε τέτοιες μονάδες από τον κατασκευαστικό τομέα αναμένεται να είναι εφικτή, στο βαθμό που και οι τέφρες των επιμέρους συστατικών καυσίμων είναι και αυτές εκμεταλλεύσιμες (Xu Yan, 2020).

Τα υποπροϊόντα που αποτελούν πρώτη ύλη στον κατασκευαστικό τομέα αναφέρονται στον πίνακα 9.1.

9.2 Τι έχει γίνει στο παρελθόν

Σε ότι αφορά ειδικά την ιπτάμενη τέφρα, η χρησιμοποίησή της στην παραγωγή σκυροδέματος ξεκίνησε τη δεκαετία του 1950, στις βιομηχανικά ανεπτυγμένες

χώρες, Η αξιοποίηση των ιπτάμενων τεφρών υψηλού ασβεστίου (CaO) ξεκίνησε 20 χρόνια αργότερα, καταρχήν για την κατασκευή οδοστρωμάτων, πεζοδρόμων και χώρων στάθμευσης από σκυρόδεμα (Dakota, USA) και στη συνέχεια για την παραγωγή ετοίμου σκυροδέματος (Καταλωνία), προκατασκευασμένων προϊόντων σκυροδέματος και ενεμάτων (Milwawkee, USA).

Στην Ελλάδα, η προσθήκη της τέφρας ως τέταρτου συστατικού του σκυροδέματος σε μερική αντικατάσταση του τσιμέντου, έχει καθυστερήσει αρκετά, παρόλη την εδώ και πολλά χρόνια τεκμηρίωση των τεχνολογικών και οικονομικών οφελών από την χρήση της. Το φράγμα της Πλατανόβρυσης του ποταμού Νέστου βρίσκεται στο Νομό Δράμας και έχει κατασκευαστεί με κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (RCC), στο οποίο η συνδετική κονία αποτελούνταν από 80% κατεργασμένη ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας και 20% τσιμέντο. Το φράγμα λειτουργεί από το 1997 χωρίς κανένα πρόβλημα.

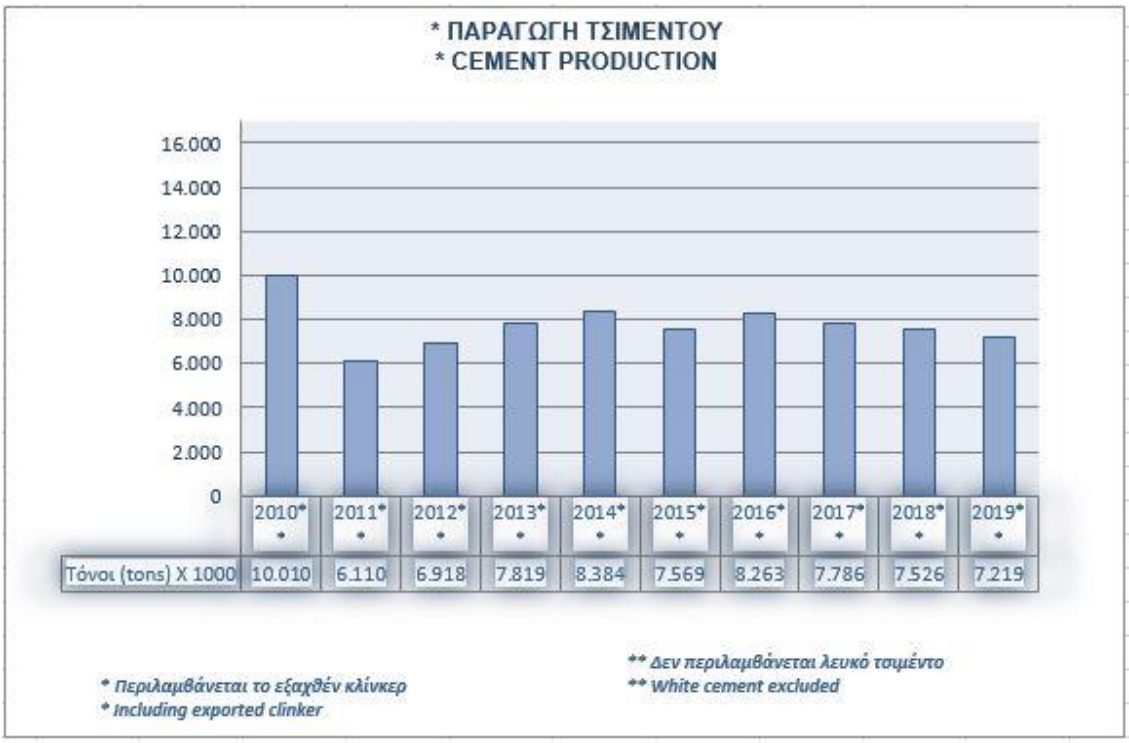
Η ΔΕΗ Α.Ε. εκμεταλλεύεται εμπορικά την τέφρα και έχει προχωρήσει στην καταχώρηση της τέφρας σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό κανονισμό REACH για την αδειοδότηση χημικών προϊόντων. Επιπρόσθετα, το έτος 2011 ξεκίνησε τις διαδικασίες καταχώρησης και της γύψου, έτσι ώστε και αυτό το παραπροϊόν να καταστεί εμπορεύσιμο. Λόγω έλλειψης εμπορικού ενδιαφέροντος η διαδικασία καταχώρησης έχει προσωρινά ανασταλεί (ΔΕΗ Α.Ε., 2019).

Ο μοναδικός ίσως αγοραστής της τέφρας που παράγεται από ατμοηλεκτρικούς σταθμούς της ΔΕΗ Α.Ε. είναι η τσιμεντοβιομηχανία. Οι ποσότητες τσιμέντου που παράγονται στην Ελλάδα είναι σημαντικές, παρά την κάμψη της ζήτησης που προέκυψε μετά την οικονομική κρίση του 2010 (Σχήμα 2). Όμως, σε περίπτωση που τεθεί ζήτημα αντικατάστασης έως και 70% του τσιμέντου με επεξεργασμένη ιπτάμενη τέφρα (σύμφωνα με τις μέχρι τώρα δοκιμές δεν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση των ιδιοτήτων, Ε. Τσικαρδάνη, 2005) είναι αμφίβολο αν οι ποσότητες της τέφρας που παράγονται πλέον, μετά το κλείσιμο των περισσότερων λιγνιτικών μονάδων της χώρας, επαρκούν για να καλύψουν την ζήτηση αυτή.

Πίνακας 9.1: *Υποπροϊόντα καύσης λιγνίτη και εφαρμογές*

Υποπροϊόντα καύσης λιγνίτη	**Εφαρμογές υποπροϊόντων**
Α. Άγονα	1. Πλήρωση κοιλοτήτων 2. Αποκατάσταση των περιοχών εξόρυξης 3. Απόθεση σε εξωτερικούς χώρους των λιγνιτωρυχείων
Β. Ιπτάμενη τέφρα	1. Κάλυψη αναγκών των ορυχείων (οδοποιία, σταθεροποίηση αποθέσεων) 2. Ελληνική Τσιμεντοβιομηχανία ως ασθενές ποζολανικό υλικό 3. Υποκατάσταση του τσιμέντου Portland σε:

	• άοπλα σκυροδέματα • κατασκευή τσιμεντοπροϊόντων (κυβόλιθοι, πλάκες πεζοδρομίων, κράσπεδα, τσιμεντοσωλήνες, πάσσαλοι, αποστάτες οπλισμού κλπ) • κατασκευή στοιχείων από άοπλο ή ελαφρά οπλισμένο σκυρόδεμα (στηθαία ασφαλείας New Jersey, τριγωνικές τάφροι, δομικά τυποποιημένα στοιχεία κλπ) • φράγματα από σκυρόδεμα με την τεχνολογία RCC (κυλινδρούμενο σκυρόδεμα) • άκαμπτα οδοστρώματα • αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα • επένδυση σηράγγων • τσιμεντενέσεις • παραγωγή έτοιμων κονιαμάτων • κατασκευή χρηστικών αντικειμένων (γλάστρες, ζαρντινιέρες κλπ) 4. Κατεργασία και σταθεροποίηση εδαφών 5. Παραγωγή συνθετικών ζεόλιθων 6. Υλικό οδοποιίας (για την κατασκευή επιχωμάτων, για την κατασκευή υπόβασης ή και βάσης υποστρώματος, σαν συστατικό του ασφαλτοσκυροδέματος) 7. Κατασκευή γεωπολυμερών υλικών 8. Κατασκευή τούβλων 9. Απορρόφηση τοξικών στοιχείων στις εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων
Γ. Τέφρα πυθμένα	1. Αμμοβολή 2. Παραγωγή εύκαμπτων κεραμιδιών 3. Παραγωγή αντιολισθηρών & στεγανοποιητικών υλικών 4. Ελαφρύ αδρανές σε σκυρόδεμα, π.χ. παραγωγή τούβλων.
Δ. Γύψος αποθείωσης	1. Παραγωγή οικοδομικών προϊόντων από γύψο.
Ε. Τέφρα βιομάζας	1. Ποζολανικό ανόργανο συστατικό 2. Ενεργοποιητής στο σκυρόδεμα και τα κονιάματα



Εικόνα 9.2: *Ετήσια παραγωγή τσιμέντου στην Ελλάδα από το 2010 έως το 2019*
Πηγή 1: (Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος, 2019)

Μεγάλης κλίμακας έργα που έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα στην Ελλάδα και στο εξωτερικό, με προσθήκη μεγάλου ποσοστού ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα, αναφέρονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 9.2: *Κατασκευαστικά έργα με χρήση Ιπταμένης Τέφρας (Κοντομηνά, 2017)*

Κατασκευαστικά Έργα με Χρήση Ιπταμένης Τέφρας	Έτος κατασκευής	Ποσοστό Ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα
Φράγμα Νέας Βικτωρίας, Αυστραλία	1991	66%
Φράγμα Puylaurent στη Lozère, Γαλλία	1995	40%
Το φράγμα της Πλατανόβρυσης, Ελλάδα	1997	82%
Φράγμα Salto Caxias, Βραζιλία	1998	20%
Φράγμα Beni Haroun, Αλγερία	2000	63%
Αυτοκινητόδρομος Yelgun-Chinderah, Australia	2002	30%
Νοσοκομείο κοινότητας Boulder Foothills, Κολοράντο, ΗΠΑ	2003	0%-25%
Φράγμα Klong Tha Dan, Ταϊλάνδη	2004	52%

Σε ερευνητικό επίπεδο, από το Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), σε συνεργασία με την εταιρία ΤΕΧΝΟΜΠΕΤΟΝ Α.Ε. διερευνήθηκε η αξιοποίηση λιγνιτικής και λιθανθρακικής ιπτάμενης τέφρας στην

παραγωγή κυβόλιθων, στην παραγωγή κεραμικών υλικών και σε ζεολιθικά προϊόντα αναβαθμισμένης ικανότητας εξευγενισμού υγρών αποβλήτων.

Επιπλέον, στο πλαίσιο ενός άλλου ερευνητικού έργου του ΕΚΕΤΑ, σε συνεργασία με το Τ.Ε.Ι. Λάρισας - Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών - Γενικό Τμήμα Θετικών Επιστημών διερευνήθηκε η αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας σε κεραμικά προϊόντα. Στόχος του έργου ήταν η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των παραγόμενων σύνθετων κεραμικών προϊόντων (Δρ. Ν. Κούκουζας, 2009).

9.3 Ποιες οι προδιαγραφές χρήσης των υλικών αυτών

Ο τρόπος με τον οποίο τα παραπροϊόντα της καύσης του λιγνίτη και τα άλλα πρόσμικτα υλικά χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα και στα κονιάματα, σε συνδυασμό με το τσιμέντο, προσδιορίζεται από τα αντίστοιχα Ευρωπαϊκά πρότυπα. Για το σκυρόδεμα το Ευρωπαϊκό Πρότυπο είναι το **ΕΛΟΤ ΕΝ 206−1 (2000)** Concrete−Part 1 Specification, Performance Production and Conformity. Ειδικότερα, η ποσότητα των προσμίκτων που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα, η μέθοδος υπολογισμού, οι προϋποθέσεις, ο τύπος του τσιμέντου και τα όρια αντικατάστασης του τσιμέντου από τα πρόσμικτα, αναφέρονται στο πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ 206−1, παρ. 5.2.5. καθώς και στο σχετικό εθνικό προσάρτημα.

Σε ότι αφορά την ιπτάμενη τέφρα, αυτή διακρίνεται ανάλογα με τη σύσταση της σε πυριτική και σε ασβεστοπυριτική και ασβεστούχα. Οι Ελληνικές ιπτάμενες τέφρες ανήκουν στην κατηγορία των ασβεστοπυριτικών και πλουσίων σε ασβέστιο τεφρών.

Η καταλληλόλητα των πυριτικών ιπτάμενων τεφρών για τη χρήση τους στο σκυρόδεμα προσδιορίζεται στο πλαίσιο του ΕΛΟΤ ΕΝ 206−1 από το **Ευρωπαϊκό Πρότυπο ΕΝ 450−1**. Για τις ασβεστούχες τέφρες δεν υπάρχει Ευρωπαϊκό Πρότυπο και η δυνατότητα χρησιμοποίησης τους διασφαλίζεται με Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή «Ελληνικές Ιπτάμενες Τέφρες» υπ' αριθμ. ΔΙΠΑΔ/οικ.281/Φ200 ΦΕΚ Β551/18-04-2007, η οποία προσαρμόζεται στο ΕΛΟΤ ΕΝ 206−1. Οι ιπτάμενες τέφρες που προδιαγράφονται μπορεί να έχουν υποστεί κατεργασία, όπως επιλεκτική συλλογή, ομογενοποίηση, άλεση, μείωση του ποσοστού ελευθέρας άσβεστου ή άλλη κατεργασία προς βελτίωση των ιδιοτήτων και της αποτελεσματικότητας των υλικών.

9.3.1 Εμπορικές εφαρμογές των παραπροϊόντων λιγνίτη

Οι εμπορικές εφαρμογές των παραπροϊόντων λιγνίτη παγκοσμίως είναι πολλές στον τομέα των κατασκευών και ήδη πλήθος εταιριών δραστηριοποιούνται αφενός στην εμπορία των παραπροϊόντων, που αποτελεί την πιο απλή και άμεση χρήση των παραπροϊόντων και αφετέρου στην παραγωγή προϊόντων χρησιμοποιώντας τα παραπροϊόντα ως πρώτη ύλη.

Οι εφαρμογές των παραπροϊόντων στον κατασκευαστικό κλάδο είναι ευρέος διαδεδομένες σε χώρες όπως η Αυστραλία, η Βουλγαρία, η Ελλάδα, η ΗΠΑ, η

Ινδία, η Κίνα και οι σκανδιναβικές χώρες όπου υπάρχουν μεγάλα αποθέματα άνθρακα – λιγνίτη που χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Μέχρι στιγμής έχουν κατασκευαστεί μεγάλα έργα οδοποιίας, φραγμάτων και κτιρίων, με χρήση μεγάλου ποσοστού ιπτάμενης τέφρας (IT) στο σκυρόδεμα σε αρκετές χώρες παγκοσμίως, όπως το φράγμα της Πλατανόβρυσης, το 1997, που ήδη αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Η εμπορία των παραπροϊόντων σε γενικές γραμμές είναι μια απλή διαδικασία που περιλαμβάνει αρχικά των διαχωρισμό κλασμάτων της μορφής των παραγόμενων παραπροϊόντων (μέγεθος από μικρά Micron ((μ)- μορφή πούδρας) μέχρι λίγα εκατοστά cm), ενδεχομένως να απαιτείται περαιτέρω θραύση για παραγωγή μικρότερης κοκκομετρίας και ακολουθεί η εναπόθεση - αποθήκευση ανά επιθυμητή κοκκομετρία στο έδαφος (stock piles), σε κοντέινερ, σε μέγασάκους 1,5 & 2 tn ή/και σακιά 25 kg, 50 kg. Εν συνεχεία, τα παραπροϊόντα μεταφέρονται με φορτηγά πλοία ή αυτοκίνητα αποτελώντας με την σειρά τους πρώτη ύλη σε κατασκευαστικές εταιρίες, σε τσιμεντοβιομηχανίες, βιοτεχνίες παραγωγής τσιμεντοπροϊόντων και προϊόντων γύψου. Οι ΗΠΑ, η Ινδία και η Κίνα, είναι οι μεγαλύτεροι εξαγωγείς ιπτάμενης τέφρας σε κράτη όπως η Γαλλία, το Μπαγκλαντές, η Τανζανία, η Ταϊβάν, ο Λίβανος κλπ.

Ξηρά δόμηση - Τσιμεντοσανίδες

Δομικό προϊόν που αποτελείται από φύλλα τσιμεντοκονιάματος. Οι τσιμεντοσανίδες αποτελούν το κύριο υλικό εσωτερικής ή/και εξωτερικής τοιχοποιίας τοποθετούμενες σε μεταλλικά πλαίσια (συστήματα τοιχοποιίας) (http://portal.tee.gr).

Στην πόλη Quanzhou της Κίνας, βρίσκεται εργοστάσιο παραγωγής πάνελ τοίχου τύπου σάντουιτς με ετήσια παραγωγική ικανότητα πάνω από ένα εκατομμύριο τετραγωνικά μέτρα. Η εταιρία ειδικεύεται στην ανάπτυξη και την παραγωγή νέων υλικών εξοικονόμησης ενέργειας πάνελ τοίχου. Οι πρώτες ύλες παραγωγής των προϊόντων είναι το πολυαιθυλένιο ως βασικό υλικό, το πυριτικό ασβέστιο, η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία.

Σκυρόδεμα Υψηλής Περιεκτικότητας σε Ιπτάμενη Τέφρα

Χρησιμοποιείται στην οδοποιία και την κατασκευή φραγμάτων. Ο σχεδιασμός των σύγχρονων οδοστρωμάτων των εθνικών οδών είναι βασισμένος στην αντοχή και στη κάμψη του σκυροδέματος, ιδιότητες που μπορούν να βελτιωθούν με την προσθήκη ιπτάμενης τέφρας. Το ενισχυμένο υψηλής απόδοσης σκυρόδεμα με HVFA χρησιμοποιείται σε αποβάθρες, σε τοίχους που χρησιμοποιούνται ως αντιστηρίγματα και σε άλλα μέρη γεφυρών.

Τεχνητά ελαφροαδρανή

Τα ελαφροαδρανή υλικά βρίσκουν όλο ένα και περισσότερες εφαρμογές είτε ως δομικό και θερμομονωτικό υλικό είτε ως υπόστρωμα κήπων, γεγονός που δημιουργεί συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις. Η ιπτάμενη τέφρα και η τέφρα πυθμένα μπορούν να αποτελέσουν την α' ύλη για αυτή την διεργασία.

Ενσακισμένα τσιμέντα με ιπτάμενη τέφρα

Η αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας από την καύση γαιανθράκων λαμβάνει χώρα κυρίως στις ΗΠΑ, την Ινδία και την Κίνα. Η ιπτάμενη τέφρα μεταφέρεται χύμα ή σε σακιά βάρους 20 κιλών μέχρι και 1,5 τόνου, με πλοία, εμπορευματοκιβώτια και φορτηγά για να καλύψει τις ανάγκες των εσωτερικών αγορών για την παραγωγή σκυροδέματος και τσιμεντοπροϊόντων, ενώ σημαντική ποσότητα εξάγεται σε άλλα κράτη.

Η εταιρία TITAN μείωσε την συμμετοχή κλίνκερ στη διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου, με την προσθήκη ιπτάμενης τέφρας από τη ΔΕΗ, γεγονός που συνεπάγεται μεγάλη μείωση στην κατανάλωση ενέργειας. Το τσιμέντο TITAN CEM II 32,5 N είναι ένα σύνθετο τσιμέντο τύπου Portland ιπτάμενης τέφρας/ποζολάνης/ασβεστόλιθου. Περιέχει ιπτάμενη τέφρα, η οποία συνδυασμένη με ποζολάνη (ηφαιστειακό υλικό που εξορύσσεται σε λατομεία) και αλεσμένο ασβεστόλιθο, δημιουργεί ένα πιο βιώσιμο τσιμέντο και ενισχύει, παράλληλα, τα χαρακτηριστικά των επιδόσεών του (TITAN GREECE, 2021).

Ο όμιλος Ηρακλής παράγει το τσιμέντο HERACLES ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ CEM II/B-M (P-W-L) 32,5N (χύδην) που περιλαμβάνει κλίνκερ τύπου Πόρτλαντ, ασβεστούχα ιπτάμενη τέφρα, ασβεστόλιθο και γύψο. Συνιστάται για χρήση ως αντλήσιμο σκυρόδεμα, σε σκυροδετήσεις σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, σε συμπαγείς και ογκώδεις κατασκευές, καθώς και σε κατασκευές σε διαβρωτικό περιβάλλον (Όμιλος Ηρακλής, 2021).

Στην Αυστραλία, η εταιρία Cement Australia είναι προμηθευτής ιπτάμενης τέφρας και παραγωγός τσιμέντου. Η ιπτάμενη τέφρα είναι συμπληρωματικό υλικό που προσφέρει μακροπρόθεσμα βελτιωμένη αντοχή, εργασιμότητα και ενισχύει τις ιδιότητες ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Χρησιμοποιείται ως μεμονωμένο προϊόν ή ως πρόσθετο για την παραγωγή τσιμέντου, σε όλες σχεδόν τις συμβατικές εφαρμογές σκυροδέματος (ενέματα, ασβεστοκονίαμα κ.α.). Μπορεί να αντικαταστήσει το τσιμέντο σε ποσοστό 20% – 30% στο σκυρόδεμα (Cement Australia, 2021).

Επεξεργασμένη σκωρία

Στην Αμερική η εταιρία Ensio Resources INC επεξεργάζεται σκωρία άνθρακα. Τα προϊόντα σκωρίας άνθρακα ERI δεν παρουσιάζουν χαρακτηριστικά επικίνδυνων αποβλήτων, ελέγχονται για βαρέα μέταλλα και είναι εγκεκριμένα από το Πολεμικό Ναυτικό των Ηνωμένων Πολιτειών για των καθαρισμό πολεμικών πλοίων και υποβρυχίων με ριπές σκωρίας στις μεγάλες βάσεις των ΗΠΑ. Επειδή τα προϊόντα σκωρίας άνθρακα ανακυκλώνονται, η παραγωγή τους δεν επηρεάζει το περιβάλλον, όπως γίνεται με την εξόρυξη ανταγωνιστικών προϊόντων όπως ο γρανάτης ή η άμμος. Τα προϊόντα σκωρίας άνθρακα έχουν από την φύση τους χαμηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο και αποτελούν την ασφαλέστερη εναλλακτική λύση από την πυριτική άμμο και άλλα υλικά πλούσια σε κρυσταλλικό πυρίτιο. Η σκωρία άνθρακα εκτός από τον καθαρισμό επιφανειών με ριπές, είναι πρώτη ύλη για την παραγωγή ευκάμπτων κεραμιδιών (Ensio Resources INC , 2021).

Γύψος

Η εταιρία TECHNOGIPS Pro είναι η πρώτη βουλγαρική εταιρεία παραγωγής δομικών προϊόντων από 100% FGD γύψο. Επωφελούμενη από την εξαιρετική ποιότητα της γύψου FGD, η TECHNOGIPS Pro ξεκίνησε τη συνεργασία της με τον θερμοηλεκτρικό σταθμό Μαρίτσα Ίζτοκ ΙΙ και εγκατέστησε την παραγωγική της μονάδα δίπλα σε αυτόν. Με αυτόν τον τρόπο μείωσε σημαντικά τα έξοδα μεταφοράς και τις επιβλαβείς εκπομπές CO_2, κατήργησε την εξόρυξη κοιτασμάτων γύψου και τη δημιουργία χώρων αποθήκευσής (TECHNOGIPS Pro, 2021).

Τέφρα σύνκαυσης γαιάνθρακα, βιομάζας και αστικών απορριμμάτων

Στην Φινλανδία, στο νησί Vaskiluoto, η εταιρία VASKILUODON VOIMA έχει τρεις ξεχωριστούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέονται με το εθνικό δίκτυο της Φινλανδίας. Ο σταθμός Vaskiluoto 2, λειτουργεί από το 1982, με άνθρακα και το 2012 προστέθηκε παράλληλα μια μονάδα αεριοποίησης βιομάζας 140 MW, η οποία καίει κυρίως δασικά υπολείμματα και υποπροϊόντα βιομηχανιών επεξεργασίας ξύλου (πριονίδι, πούδρα, ξακρίδια κλπ).

Η VASKILUODON VOIMA παράγει 70.000 τόνους τέφρας ετησίως, που χρησιμοποιείται για χωματουργικές εργασίες, λόγω ότι η ανάμιξη της με τα αδρανή υλικά βελτιώνει τα φυσικά και μηχανικά τους χαρακτηριστικά, καθιστώντας τις κατασκευές πιο ανθεκτικές. Η τέφρα χρησιμοποιείται κυρίως στην οδοποιία για την κατασκευή υπόβασης, βάσης υποστρώματος και χώρων στάθμευσης (Vaskiluodon Voima, 2021), σε διάφορες περιοχές στην Φιλανδία.

Στην Σουηδία, ο θερμοηλεκτρικός Σταθμός Kraftvarmeverket Transtorp, που βρίσκεται στον Δήμο Nybro στη νότια Σουηδία και λειτουργεί από το 2016, χρησιμοποιεί ως καύσιμο αποκλειστικά μεικτά αστικά απόβλητα περίπου 55.000 τόνων ετησίως. Η παραγόμενη τέφρα πυθμένα περιέχει 80% περίπου άμμο, από την οποία αφαιρούνται τα εναπομείναντα μεταλλικά υπολείμματα, έτσι ώστε, να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην οδοποιία ή για την κάλυψη χώρων υγειονομικής ταφής (Nybro Energi AB, 2016).

Στον πίνακα που ακολουθεί καταγράφονται χώρες στις οποίες παράγονται παραπροϊόντα από την καύση του άνθρακα, του λιγνίτη και των μονάδων WtE, με εφαρμογές στον κατασκευαστικό κλάδο.

9.4 Ποιες άλλες προϋποθέσεις πρέπει να τηρούνται για να διεισδύσουν στην αγορά

Η αξιοποίηση των παραπροϊόντων του λιγνίτη από τον κατασκευαστικό κλάδο έχει προοπτικές. Με την κατάλληλη επεξεργασία δύναται να διατεθούν ως πρώτη ύλη εντός Ελλάδος, ή να εξαχθεί στις γειτονικές χώρες. Η αξιοποίηση αυτή θα μπορούσε όμως να αποτελέσει και το έναυσμα για την δημιουργία δορυφορικών επιχειρήσεων που θα αναπτύξουν παραγωγικές δραστηριότητες

παραπλήσιες με αυτές που προαναφέρθηκαν ως παραδείγματα από την Αμερική, την Αυστραλία, την Κίνα κ.α.

Οι προϋποθέσεις για την αξιοποίηση των παραπροϊόντων, ανεξάρτητα από την επένδυση που θα επιλεγεί, είναι: α) η ύπαρξη ικανών αποθεμάτων, β) η διασφάλιση σταθερής ποιότητας προϊόντων και γ) η παραγωγή και διάθεση των προϊόντων αυτών σε χαμηλό κόστος. Όσον αφορά την τελευταία προϋπόθεση, πρέπει να διερευνηθεί κατά πόσο η τιμή των προϊόντων θα τα καθιστά ελκυστικά ώστε να απορροφηθούν από βιομηχανίες μεγάλης κλίμακας. Εν συνεχεία, πρέπει να αναζητηθεί ο τρόπος μεταφοράς (χύδην ή συσκευασμένα), το μέσο μεταφοράς (φορτηγό, εμπορευματοκιβώτιο, τρένο, τα πλοίο) και να υπολογιστεί το σχετικό κόστος, αφού πολλές φορές οι παράγοντες αυτοί καθορίζουν την ζήτηση των πρώτων υλών σε παγκόσμιο επίπεδο. Στον κατασκευαστικό κλάδο το κόστος των πρώτων υλών (πχ αδρανή υλικά, γύψος, ανθρακικό ασβέστιο) δεν είναι μεγάλο, όμως επιβαρύνεται σημαντικά από το κόστος μεταφοράς.

Πίνακας 9.3: *Παραγόμενα παραπροϊόντα από καύση άνθρακα , λιγνίτη και WtE και εφαρμογές στον κατασκευαστικό κλάδο.*

α/α	Χώρα παραγωγής	Εταιρία παραγωγής	Ιστότοπος	Παραπροϊόν – α' ύλη	Τελικό Προϊόν	Συσκευασία
1	Αυστραλία	Cementaustralia	www.cementaustralia.com.au	Ιπτάμενη Τέφρα	1. Ιπτάμενη τέφρα 2. Τσιμέντο ανάμειξης	1. Χύμα, 2. μεγασάκος 1tn, 3. σακί 20 kg
2	Βουλγαρία	FIBRAN-TECHNOGIPS Pro	www.technogips.bg	100% Γύψος Αποθείωσης FGD (Flue Gas Desul-furization Gyps-um)	1. Απλή γυψοσανίδα 2. Πυράντοχη γυψοσανίδα 3. Ανθυγρή γυψοσανίδα 4. Γυψοσανίδα εξωτερικής χρήσης 5. Κόλλα γύψου 6. Στόκος αρμολόγησης 7. Σοβάς γύψου μηχανής 8. Οικοδομικός γύψος ταχείας ωρίμανσης	1. Φύλλα/Παλέτα, 2. Σακιά παλέτα
3	Ελλάδα	TITAN GREECE	www.titan.gr/el/	Ιπτάμενη Τέφρα	Τσιμέντο σύνθετο τσιμέντο τύπου Portland TITAN CEM II 32,5 N	1. Χύμα, 2. σακί 25 kg, 50 kg
		Όμιλος ΗΡΑΚΛΗΣ	www.lafarge.gr/	Ιπτάμενη Τέφρα	Τσιμέντο HERACLES ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ CEM II/B-M (P-W-L) 32,5N	1. Χύμα, 2. σακί 25 kg, 50 kg
4	ΗΠΑ	Ensio Resources INC.	www.ensioresources.com/patriot-blast	Σκωρία άνθρακα	Σκωρία άνθρακα	Μέγασάκος 1,5 & 2 tn
5	Ινδία	Phenixenterprise	www.phenixenterprise.com	Ιπτάμενη Τέφρα	Ιπτάμενη Τέφρα	1. Χύμα, 2. Break Bulk 3. Μέγα σάκος 1,4 tn
6	Κίνα	Xiamen ZhongJingtai Co, Ltd	www.zhongjingtai.com	Ιπτάμενη τέφρα, σκωρία	Πάνελ τοίχου τύπου σάντουιτς εξωτερικής και εσωτερικής χρήσης	1. Φύλλα/Παλέτα,
7	Σουηδία	ΑΗΣ με WtE Kraftvarmeverket Transtorp	www.nybroenergi.se	Τέφρα πυθμένα	1.Οδοποιία 2. Κάλυψη χώρων υγειονομικής ταφής	1. Χύμα

10. Συμπεράσματα

Στην παρούσα Τεχνική Αναφορά αποτυπώθηκαν τόσο οι εμπορικά ώριμες όσο και οι αναδυόμενες τεχνολογίες που αφορούν στην αξιοποίηση των γαιανθράκων σε εναλλακτικές, μη ενεργειακές χρήσεις. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στις τεχνολογίες που σχετίζονται με την αξιοποίηση γαιανθράκων χαμηλού θερμιδικού περιεχομένου, όπως είναι η περίπτωση του εγχώριου λιγνίτη. Συμπερασματικά, τα ευρήματα της Τεχνικής Αναφοράς έχουν ως ακολούθως:

- Το 2020, η παγκόσμια αγορά ορυκτού άνθρακα ανήλθε στα 698 δις δολάρια, ενώ τα περιουσιακά στοιχεία (assets) των μεγαλύτερων εταιρειών που δραστηριοποιούνται στην εξόρυξη και διαχείριση άνθρακα, εκτιμήθηκαν στο ιλιγγιώδες ύψος των 1,16 τρις δολαρίων. Δεδομένου ότι τα οικονομικώς απολήψιμα αποθέματα άνθρακα ξεπερνούν παγκοσμίως τους 900 δις τόνους με το 32% να καταγράφεται στις ΗΠΑ, οι χώρες με σημαντική παραγωγή στερεών ορυκτών καυσίμων, αναζητούν εναλλακτικές τεχνολογίες αξιοποίησης του άνθρακα και του λιγνίτη σε μη ενεργειακές χρήσεις.
- Σε παγκόσμιο επίπεδο, η απαίτηση για Ενεργειακή Μετάβαση και η αναγκαιότητα απανθρακοποίησης του ηλεκτροπαραγωγικού μίγματος, δεν ταυτίζεται απαραίτητα με το οριστικό κλείσιμο των ορυχείων άνθρακα και λιγνίτη. Η κεφαλαιοποίηση των υποδομών και της τεχνογνωσίας που έχει σωρεύσει η αλυσίδα αξίας του άνθρακα τοπικά, η αναγκαιότητα δημιουργίας μιας ασφαλούς «γέφυρας» μετάβασης των τοπικών κοινωνιών στο νέο παραγωγικό περιβάλλον και βεβαίως, οι πολλαπλές προοπτικές που προσφέρει ο άνθρακας ως πρώτη ύλη, οριοθετούν νέες συνθήκες στην παγκόσμια οικονομία των γαιανθράκων.
- Οι ποσότητες εγχώριου λιγνίτη που έχουν αξιοποιηθεί μέχρι σήμερα στη χώρα μας ανέρχονται στο 30% των αρχικών αποθεμάτων, ενώ τα αποθέματα που θα απομείνουν μετά την απόφαση για καθολική απολιγνιτοποίηση μέχρι το 2028, ξεπερνούν τους 3,1 δις τόνους.
- Οι τεχνολογίες **αεριοποίησης και υγροποίησης** λιγνίτη αποτελούν εξαιρετικά ώριμες τεχνολογίες και προσφέρουν τη δυνατότητα παραγωγής καυσίμων κίνησης όπως βενζίνη, κηροζίνη και diesel, αλλά και μια μεγάλη γκάμα προϊόντων για τη χημική βιομηχανία. Αποτελούν τεχνολογίες εντάσεως κεφαλαίου και τεχνογνωσίας, ενώ η βιωσιμότητά τους εξαρτάται σε καθοριστικό βαθμό από τις τιμές του πετρελαίου στην παγκόσμια αγορά και τη διακύμανση των τιμών διοξειδίου του άνθρακα στην αγορά ρύπων.
- Ο εγχώριος λιγνίτης αποτελεί εξαιρετική πρώτη ύλη για παραγωγή **εδαφοβελτιωτικών και οργανοχουμικών λιπασμάτων**. Οι τεχνολογίες είναι εμπορικά ώριμες, ενώ πέρα από τη δημιουργία μιας νέας αλυσίδας αξίας στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας με ισχυρό εξαγωγικό χαρακτήρα, ο λιγνίτης μπορεί να αξιοποιηθεί με όρους Κυκλικής

Οικονομίας, συμβάλλοντάς σημαντικά στην ανάσχεση των επιπτώσεων της Κλιματικής Κρίσης, πρωτίστως στην απώλεια γόνιμων εδαφών.

- Η παραγωγή **ενεργού άνθρακα** από λιγνίτη συνιστά μια επιπλέον εμπορικά ώριμη τεχνολογία. Σημαντικά πλεονεκτήματα για τη χρησιμοποίηση του εγχώριου λιγνίτη ως πρώτη ύλη για την παραγωγή ενεργού άνθρακα αποτελούν η διαθεσιμότητά του, τα ποιοτικά του χαρακτηριστικά και το χαμηλό κόστος. Ο ενεργός άνθρακας είναι προϊόν με μεγάλη ζήτηση τόσο στη χημική βιομηχανία όσο στην επεξεργασία υδάτων των βιολογικών καθαρισμών.
- Μία ανερχόμενη αλλά πολλά υποσχόμενη τεχνολογία αφορά στην παραγωγή **νανοϋλικών γραφενίου** με βάση το λιγνίτη. Για πολλούς ειδικούς, το γραφένιο είναι το υλικό του μέλλοντος, δεδομένου ότι οι εφαρμογές του είναι πρακτικά απεριόριστες και υπόσχονται να φέρουν επανάσταση σε πολλούς τομείς. Δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι ενώ το 2010 η παραγωγή του γραφενίου ήταν 28 τόνοι, προβλέπεται να αυξηθεί σε πάνω 750 τόνους έως το 2025. Η αξία του συγκεκριμένου νανοϋλικού είναι εξαιρετικά υψηλή και ανέρχεται στα 862.000€/kg.
- Η περίπτωση των **σπάνιων γαιών**αφορά μια ιδιαίτερη κατηγορία ορυκτών πρώτων υλών υψηλής ζήτησης που στο μέλλον αναμένεται να κλιμακωθεί περεταίρω. Οι σπάνιες γαίες χρησιμοποιούνται σε κρίσιμες για την ψηφιακή εποχή τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων πολλών που βρίσκουν εφαρμογή σε εξοπλιστικά συστήματα. Σε κάθε περίπτωση, αν και η τεχνολογία δεν είναι εμπορικά ώριμη, είναι ήδη διαπιστωμένο ότι η ανάκτηση σπάνιων γαιών από λιγνίτη είναι ευκολότερη από ότι στην περίπτωση του λιθάνθρακα, ενώ η περιεκτικότητα σπάνιων γαιών στην τέφρα λιγνίτη είναι αυξημένη κατά 6-10 φορές.
- Όσον αφορά στη χρήση του λιγνίτη για την παραγωγή **Υδρογόνου**, αξίζει να σημειωθεί ότι 98% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου προκύπτει σήμερα από ορυκτούς υδρογονάνθρακες. Το κόστος παραγωγής υδρογόνου με βάση τα ορυκτά είναι περίπου €1,5/kg, το εκτιμώμενο κόστος παραγωγής υδρογόνου με βάση τα ορυκτά με δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα είναι περίπου €2 /kg, ενώ το κόστος πράσινου υδρογόνου ανέρχεται στα €2,5-5,5/kg. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι από 1 τόνο λιγνίτη Πτολεμαΐδας, μπορούν να παραχθούν περίπου 18 κιλά υδρογόνου.
- Πετρώματα που εξορύσσονται μαζί με τον λιγνίτη και παραπροϊόντα της καύσης του μπορούν να αξιοποιηθούν ως πρώτη ύλη στον κλάδο των **κατασκευών**. Στα προϊόντα και υποπροϊόντα αυτής της κατηγορίας ανήκουν τα άγονα υλικά, η ιπτάμενη τέφρα, η τέφρα πυθμένα, η σκωρία και η γύψος. Τα παραπάνω υλικά μπορούν να πωληθούν ανεπεξέργαστα ή αφού μεταποιηθούν σε δομικά υλικά.

Στα πλαίσια του έργου, οι προαναφερόμενες δυνητικές χρήσεις του λιγνίτη θα αξιολογηθούν στη συνέχεια μέσω μιας σειράς παραμέτρων, προκειμένου να αναδειχθούν οι περισσότερο υποσχόμενες για την περίπτωση της Δυτικής Μακεδονίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abalonyx, (2021). https://www.graphene-info.com/abalonyx-sees-go-production-cost-reaching-22-eurokg-high-volumes
2. Arctech, (2021). https://www.arctech.com/
3. Bielowicz, "The suitability of Polish lignite for gasification", Clean Technologies and Environmental Policy (2019) 21:1115–1130, (https://doi.org/10.1007/s10098-019-01695-z)
4. Burton, E., J. Friedman, R. Upadhye, (2019). Best Practices in Underground Coal Gasification, Lawrence Livermore National Laboratory under Contract DE-AC52-07NA27344 with U.S. Department of Energy.
5. Carpenter, D. Adams, "Global Review of State-of –the Art Coal Related RTD", EU Research Fund for Coal and Steel under grant agreement No. 794369, IEA Clean Coal Centre, August 2019
6. Castro Neto, A.H, Guinea F, Peres NMR, Novoselov KS, Geim AK. The electronic properties of graphene. Reviews of Modern Physics 2009; 81: 109-162.
7. Cement Australia. 2021. Fly Ash, Product Data Sheet. www.cementaustralia.com.au. [Ηλεκτρονικό] 2021. [Παραπομπή: 13 11 2121.] https://www.cementaustralia.com.au/products/fly-ash.
8. Chassapis, K., Roulia, M., 2008. Evaluation of low-rank coals as raw material for Fe and Ca organomineral fertilizer using a new EDXRF method. Int. J. Coal Geol. 75, 185-188.
9. Coal Age magazine, Jacksonville, FL 32224 USA *(https://www.coalage.com/features/hydrogen-from-coal)*
10. Costis, S., K.K. Mueller, J-F. Blais, A. Royer-Lavallee, L. Coudert, C.M. Neculita, (2019), *Review of recent work on the recovery of rare earth elements from secondary sources*, Final Report No R1859 submitted to Natural Resources Canada, 63p.
11. Critchley, L. (2019). *Why Are There Challenges with Graphene Manufacturing?* https://nano-magazine.com/news/2019/4/13/why-are-there-challenges-with-graphene-manufacturing
12. Culp G., G. Wesner, R. Williams, M.V. Hughes, (1980). *A useful review of waste water treatment with activated carbon*. Waste water Reuse and Recycling Technology. 343-432
13. El-Hendawy, A-N.A., S.E. Samra, B.S. Girgis, (2001). *Adsorption characteristics of activated carbons obtained from corncobs*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 180:209-221
14. Eliopoulos, D., G. Economou, I. Tzifas, C. Papatrechas, (2014), *The potential of Rare Earth Elements in Greece*, ERES2014: 1st European Rare Earth Resources Conference, Milos, Greece, 04-07/09/2014, pp.308-316.

15. Ensio Resources INC, (2021), Brochure, Patriot Blast & Black Velvet Roofing Granules, www.ensioresources.com/patriot-blast. [Ηλεκτρονικό] 2021. [Παραπομπή: 13 11 2021.] www.ensioresources.com/patriot-blast.

16. EPA (2012), *Rare Earth Elements: A review of production, processing, recycling, and associated environmental issues*, EPA/600/R-12/572, December 20212 Revised.

17. Erickson, B.E., (2018), *From coal, a new source of rare earths – US efforts to extract valuable elements from coal waste sludge*, Inorganic Chemistry, Vol.96, Issue 28.

18. European Commission, "Questions and answers: A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe", 8 July 2020, *(https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_20_1257)*

19. Figueiredo, J.L., M.F.R. Pereira, M.M.A. Freitas, J.J.M. Órfão, (1999), *Modification of the surface chemistry of activated carbons*. Carbon, 1999, 37, 1379-1389.

20. Fortune Business Insights, (https://www.fortunebusinessinsights.com/gasification-market-103487)

21. Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS, https://www.imws.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/pilotanlage-carbontrans.html

22. Freudenberg FST GmbH, Innovating Together, (https://www.fst.com/corporate/magazine/e-mobility/a-technology-left-behind)

23. Geim, A.K., K.S. Novoselov, (2007). *The rise of graphene*. Nature Materials, 6, 183-191.

24. Giannouli, A., Kalaitzidis, S., Siavalas, G., Chatziapostolou, A., Christanis, K., Papazisimou, S., Papanicolaou, C., Foscolos, A., 2009. Evaluation of Greek low rank coals as potential raw material for the production of soil amendments and organic fertilizers. Int. J. Coal Geol. 77(3-4), 383-393.

25. Great Plains Synfuels Plant, *(http://www.zeroco2.no/projects/the-great-plains-synfuels-plant)*

26. Green, M., Y. Sheng, N. Hristov, (2012). Briefing: New life for old coal, Proceedings of the ICE - Energy 165 (4), 165-167.

27. Henning, K-D., (2010). *Carbotech aktivkohlen gmbH*. Activated carbon, 4-5, 1-27

28. Hutchins R.A., (1980). Liquid phase adsorption—Maximizing performance. Chem Eng., 87, 101-110

29. Hydrogen Council-McKinsey & Company, "Hydrogen Insights-A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness", February 2021

30. International Energy Agency (IEA), "The Future of Hydrogen", Technology Report-June 2019, IEA Publications

31. International Gas Union, "World LNG Report 2019", June 7, 2019, 08003 Barcelona-Spain

32. Inventure Renewables INC (2019), *Recovery of rare earth elements from coal mining waste materials*, Final Report of Project granted by US Department of Energy, DE-FE0030146, 41p.

33. Jafri, Y., L. Waldheim, J. Lundgren, "Emerging Gasification Technologies for Waste & Biomass", IEA Bioenergy: Task 33, ISBN 978-1-910154-84-7, December 2020

34. Janiga, M., P. Kapusta, M. Kania, "Microbiological coal biogasification under laboratory conditions – biogas quantity and quality", Oil and Gas Institute – National Research Institute, DOI: 10.18668/NG.2018.09.03

35. Kalaitzidis, S., Papazisimou, S., Giannouli, A., Bouzinos, A., Christanis, K., 2003. Preliminary comparison analyses of two Greek leonardites. Fuel 82(7), 859-861.

36. Kalaitzidis, S., Karapanagioti, H., Christanis, K., Bouzinos, A., Iliopoulou, E., 2006. Evaluation of peat and lignite phenanthrene sorption properties in relation to coal petrography: the impact of inertinite. Int. J. Coal Geol. 68, 30-38.

37. Karapanagioti, H., Kalaitzidis, S., Vakros, I., Christanis, K., Liebner, F., 2010. The effect of ammonoxidation on the geochemical properties of lignite. Environ. Chem. Let. 8(4), 373-380.

38. Kelessidis, V.C., Tsamantaki, C., Michalakis, A., Christidis, G.E., Makri, P., Papanicolaou, K., Foscolos, A., 2007. Greek lignites as additives for controlling filtration properties of water–bentonite suspensions at high temperatures. Fuel 86(7-8), 1112–1121.

39. King, H.M., *REE – Rare earth elements and their uses*, https://geology.com/articles/rare-earth-elements/.

40. Kirk I.R., D.F. Othmer, (1992). *Encyclopedia of chemical technology*, Wiley, 4th edition, London, UK

41. Kropp, P., U. Sujata, A. Weyh, B. Fritzsche, Kurzstudie zur Beschäftigungsstruktur im Mitteldeutschen Revier, ISSN 1861-1354, 1-2019 IAB Sachsen

42. Kyzas G.Z, A.C. Mitropoulos, "High-purity graphene produced by lignite", Industrial Property Organization of Greece, S.Ref. No 20210100243, 2021.

43. Lin, R., B. Howard, E. Roth, T. Bank, E. Granite, Y. Song, *Enrichment of rare earth elements from coal and coal by-products by physical separations*, Fuel, 200, 506-520.

44. Macia-Agullo, J.A., B.C. Moore, D. Cazorla-Amoros, A. Linares-Solano, (2003), *Activation of coal tar pitch carbon fibres: Physical activation vs chemical activation*. Carbon, 42, 1367-1369.

45. Milne, S. (2015). *The Challenges Facing Graphene Commercialisation.* https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3950

46. NanoGrafi, (2019). *60 Uses of Graphene – The Ultimate Guide to Graphene's (Potential) Applications in 2019,* https://nanografi.com/blog/60-uses-of-graphene/

47. National Coal Council (2019), *Coal in a new carbon age, powering a wave of innovation in advanced products & manufacturing*, https://www.nationalcoalcouncil.org/studies/ 2019/NCC-COAL-IN-A-NEW-CARBON-AGE-Appendices.pdf.

48. North Dakota Official State Website, *(https://www.ndstudies.gov/energy/level2/module-3-coal/how-coal-production-affects-people-north-dakota)*

49. Novoselov, K.S., A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, M.I. Katsnelson, I.V. Grigorieva, (2005). *Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene*. Nature, 438, 197-200.

50. Novihum, (2021). https://novihum.com/

51. Nybro Energi AB. 2016. www.nybroenergi.se, En informationstidning utgiven av Nybro Energi 2016. [Ηλεκτρονικό] 2016. https://nybroenergi.se/wp-content/uploads/2015/12/NybroEnergi-Nytt-Kraftvarmeverk.pdf.

52. Of Cheap Energy: Underground Coal Gasification, (https://www.businessinsider.com/the-future-of-cheap-energy-underground-coal gasification-2011}

53. Origin of the Elements, *(https://www2.lbl.gov/abc/wallchart/chapters/10/0.html)*

54. Papadopoulos, A., I. Tzifas, H. Tsikos, (2019), *The Potential for REE and Associated Critical Metals in Coastal Sand (Placer) Deposits of Greece: A Review*, Minerals, 2019, 9, 469; doi:10.3390/min9080469.

55. Papanicolaou, C., Passadakis, N., Dimou, D., Kalaitzidis, S.,Papazisimou, S., Foscolos, A.E., 2009. Adsorption of NO, SO2 and light hydrocarbons on activated Greek brown coals. Int. J. Coal Geol. 77(3-4), 401-408.

56. Pasadakis, N., Romanos, G., Perdikatsis, V., Foscolos, A.E., 2011. The Production of Activated Carbons Using Greek Lignites by Physical and Chemical Activation Methods: A Comparative Study. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 33(8), 713-723.

57. Pavloudakis F., C. Roumpos, E. Karlopoulos, N. Koukouzas Planning and implementing surface mines reclamation works under the new EU strategy for the transition of lignite intensive regions to a post-mining era. Mine Closure 2018 [Συνέδριο]. - Leipzig, Germany : [s.n.], 2018.

58. Pavloudakis F., C. Roumpos, E. Karlopoulos, N. Koukouzas, C.G. Sachanidis, S. Pyrtses Economic and social impact assessment of decarbonisation in Ptolemais lignite mining area, Proc. of 9th Intl. Conf. COAL 2019 [Συνέδριο]. - Zlatibor, Serbia : [s.n.], 2019.

59. Pavloudakis F., E. Karlopoulos, C. Roumpos, N. Koukouzas Energy transition and the future of lignite mining in the Region of western Macedonia, Greece, Proc. of 11th Intl. Conf. COAL 2021, 13-16 Oct 2021, p.100-107 [Συνέδριο]. - Zlatibor, Serbia : [s.n.], 2021.

60. de Pee, D. Pinner, O. Roelofsen, K. Somers, E. Speelman , M. Witteveen, "Decarbonization of industrial sectors: the next frontier", McKinsey and Company, June 2018.

61. The Future Pyrgaki, K., V. Gemeni, C. Karkalis, N. Koukouzas, P. Koutsovitis, P. Petrounias, (2021), *Geochemical Occurrence of Rare Earth Elements in Mining Waste and Mine Water: A Review*. Minerals, 2021, 11, 860. https://doi.org/10.3390/min11080860, 24p.

62. Roumpos C., F. Pavloudakis, A. Liakoura, D. Nalmpanti, K. Arampatzis Utilisation of Lignite Resources within the Context of a Changing Electricity Generation Mix. 10th Jubilee Intl. Brown Coal Mining Congress: "Brown Coal Today and in the Future". [Συνέδριο]. - Belchatow, Poland : [s.n.], 2018.

63. Schweinfurth, S., (2003), Coal — A Complex Natural Resource, An overview of factors affecting coal quality and use in the United States, WASHINGTON: US GOVERNMENT PRINTING OFFICE.

64. Seredin, V., (2010), *A New Method for Primary Evaluation of the Outlook for Rare Earth Element Ores*, Geology of Ore Deposits, 52, 428-433. 10.1134/S1075701510050077.

65. Shenhua Coal to Liquids Plant, (https://www.hydrocarbons-technology.com/projects/shenhua/)

66. Sigma-Aldrich, (2021). https://www.sigmaaldrich.com/GR/en/product/aldrich/900561.

67. TECHNOGIPS Pro. 2021. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ. https://www.technogipspro.com/attachments/Catalog/2/catalog/GR-Product-Catalogue-2021.pdf. [Ηλεκτρονικό] 2021. [Παραπομπή: 12 11 2021.] https://www.technogipspro.com/el.

68. The European Association of cities in energy transition, *(https://energy-cities.eu/50-shades-of-grey-and-blue-and-green-hydrogen/)*

69. TITAN GREECE, (2021). https://www.titan.gr/el/proionta-kai-yphresies/tsimento/xuma-tsimento/xuma-tsimento-inner/faio-tsimento-32-komma-5.

70. Towler, Brian F. "Coal and Clean Coal Technologies", ISBN978-0-12-801027-3, The Future of Energy, 2014

71. Tsachouridis, A., F. Pavloudakis, N. Kitratzis, (2021), *Development of Rare Earth Elements separation processes from coal fly ash,* Materials Proceedings, 2021, 3, MDPI Publications.

72. UK-Department of Trade and Industry (1999). Coal Liquefaction, Technology Status Report 010, UK-Department of Trade and Industry, October 1999

73. US DoE (2017), *Report on rare earth elements from coal and coal byproducts*, US Department of Energy, Report to Congress, January 2017, 43p.

74. USGS (2019), *Rare earth elements in coal and coal fly ash*, Fact sheet 2019-3048, 4p.

75. Van Noorden, R. (2008). *The Graphene Challenge*. https://www.chemistryworld.com/features/the-graphene-challenge/3004835.article

76. Vaskiluodon Voima. 2021. Pioneer of Biofuel Plants, Producer of Combined Heat And Power. www.vv.fi. [Ηλεκτρονικό] 2021. [Παραπομπή: 15 11 2021.] https://www.vv.fi/wp-content/uploads/sites/8/2017/03/Vaskiluodon_Voima_ENG_FINAL-1.pdf.

77. Woodford, C. (2020) *Graphene - a simple introduction.* https://www.explainthatstuff.com/graphene.html

78. Xiamen Zhong Jingtai οικοδομικά υλικά Co, Ltd. ZhongJingtai . [Ηλεκτρονικό] 2021.[Παραπομπή: 5 10 2021.] http://m.gr.lightweightsandwichpanel.com/roof-panel/manufacturer-fireproof-cement-board-sandwich.html.

79. Xu Yan. 2020. Coal-Biomass Co-Firing Power Generation Technology: Current Status, Challenges and Policy Implications. [Ηλεκτρονικό] 2020. https://www.mdpi.com/2071-1050/12/9/3692.

80. Yang, D., N. Koukouzas, Y. Sheng, (2016). Recent development on underground coal gasification and subsequent CO2 storage, Journal of The Energy Institute, 89, 469-484.

81. Zhang, W., A. Noble, X. Yang, R. Honacker, (2020), *A comprehensive review of rare earth elements recovery from coal-related materials*, Minerals 2020, 10, 451; doi: 10.3390/min10050451.

82. Zhu, Y., S. Murali, W. Cai, X. Li, J.W. Suk, J.R. Potts, R.S. Ruoff. *Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications*. Advanced Materials, 2010, 22, 3906-3924.

83. Γιαννούλη, Α., 2017. Περιβαλλοντικά φιλικές τεχνολογικές εφαρμογές Ελληνικών λιγνιτών και τυρφών: αξιοποίηση ως προς την ικανότητα παραγωγής εδαφοβελτιωτικών και οργανοχουμικών λιπασμάτων. Διδ. Διατριβή, Παν. Πατρών, Πάτρα, 336 σελ.

84. ΔΕΗ Α.Ε. – Λ.Κ.Δ.Μ. 2009. Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Ορυχείων Πτολεμαΐδας (ΜΠΕ), Ν. Κοζάνης. Κεφ. 5ο . Πτολεμαΐδα : ΔΕΗ Α.Ε. – Λ.Κ.Δ.Μ., 2009.

85. ΔΕΗ Α.Ε., (2019). Έκθεση Βιώσιμης ανάπτυξης 2019. https://www.dei.gr/Documents2/%CE%95%CE%9A%CE%95/Apologismos%20EKE_BiosimiAnaptyxi%2027x22cm-new_GR.pdf.

86. Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος, (2019). http://www.hcia.gr/el/statistical-elements/production/.

87. Καλημέρη, Ζ., (2015), Έρευνα αγοράς – Σπάνιες γαίες, Ινστιτούτο Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών, ΕΣΠΑ 2007-2013, ΜΕΟΠΥ / Υποέργο 7: Βάση στατιστικών δεδομένων Ελληνικών ορυκτών πρώτων υλών.

88. Καρλόπουλος, Ε., Ε. Κακαράς, Ν. Κούκουζας, "Συνδυασμένη αεριοποίηση στερεών απορριμμάτων και λιγνίτη-Μελέτη εφαρμογής για τη Δυτική Μακεδονία", Heleco '05, ΤΕΕ, Αθήνα, 3-6 Φεβρουαρίου 2005.

89. Κοντομηνά, Α. (2017). Πτυχιακή Εργασία: Αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας σε Ελλάδα και στο εξωτερικό. Πειραιάς: ΤΕΙ Πειραιά, ΣΤΕ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

90. Κούκουζας, Ν. (2009). 2ο Συνέδριο ΕΒΙΠΑΡ, Αιανή Κοζάνης, ΙΤΕΣΚ. http://www.evipar.org/innet/files/2o_EVIPAR_07_Koukouzas.pdf.

91. Κούκουζας Ν. Ποιοτικά χαρακτηριστικά γαιανθράκων, σελ. 1040 [Βιβλίο]. - Αθήνα : [s.n.], 2020. - ISBN: 978-618-5495-10-7.

92. Μπούσιος Α. Το έργο της Πτολεμαΐδας ή Η ιστορία της ΛΙΠΤΟΛ , σελ. 222 [Βιβλίο]. - Αθήνα : Κέντρο Τεχνολογίας & Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων, 1997.

93. Μυτιληναίος (2021), *Η MYTILINEOS πρωτοπορεί για τη βιώσιμη βιομηχανία… σκάνδιο*, Πηγή: https://www.defence-point.gr/news/i-mytilineos-protoporei-gia-ti-viosimi-viomichania-skandio (ημερομηνία πρόσβασης: 18/11/2021).

94. Όμιλος Ηρακλής, (2021). ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ. https://www.lafarge.gr/heracles-enisxumeno-cem2.

95. Παπαδάκης, Ε. (2009). Χρήση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων και Τεχνικών για Μείωση του Περιβαλλοντικού Κόστους των Κατασκευών. http://www.evipar.org/innet/files/2oEVIPAR_full_text_11_Papadakis.pdf .

96. Παπακριβού, Α. (2021). Προοπτικές ΣυνΚαύσης Βιομάζας και Λιγνίτη σε Μεγάλες Μονάδες. http://repository.library.teiwest.gr/xmlui/handle/123456789/9220.

97. Σίδερης Κ.Κ., (2005). Διερεύνηση της Δυνατότητας Χρήσης Τέφρας Αποτεφρωτηρών στις Κατασκευές. http://www.evipar.org/innet/files/1oEVIPAR_full_text_15_Sideris2.pdf.

98. Τσικαρδάνη, Ε. (2005). Οικονομική και Περιβαλλοντική Αξιολόγηση της Χρήσης Ιπταμένης Τέφρας για την Παραγωγή Τσιμεντοπροϊόντων. http://www.evipar.org/innet/files/1oEVIPAR_full_text_45_Tsikardani1.pdf .

99. ΦΕΚ 551 Β' 2007. Έγκριση Εθνικής Τεχνικής Προδιαγραφής «ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΙΠΤΑΜΕΝΕΣ ΤΕΦΡΕΣ». s.l. : Εθνικό Τυπογραφείο, Εφημερίδα της Κυβέρνησης.

100. Χρηστάνης, Κ., Γιαννούλη, Α., Καλαϊτζίδης, Σ., Katzur, J., Böcker, L., Πετράκης, Γ., 2006. Εφαρμογή εδαφοβελτιωτικών μέσων που παρασκευάζονται με βάση τον λιγνίτη στην αποκατάσταση μεταλλευτικών περιοχών. Ορυκτός Πλούτος 140, 43-55.

101. Χρηστάνης, Κ., Γιαννούλη, Α., Σιαβάλας, Γ., Χατζηαποστόλου, Α., Καλαϊτζίδης, Σ., Katzur, J., Böcker, L., Haubold-Rosar, M., Liebner, F., 2009. Τελική έκθεση του ερευνητικού έργου: Εφαρμογή Novihum® στην αποκατάσταση μεταλλευτικών σωρών στείρων υλικών. Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 82 σελ.

102. https://www.statista.com/statistics/208727/total-assets-of-the-top-mining-companies/

103. https://netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/project-examples

104. http://portal.tee.gr. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 13 10 2021.] http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/KSIRA_DOMI

SI/do1_2.htm#4._%CE%A0%CF%81%CF%8E%CF%84%CE%B5%CF%82_%CF%8D%CE%BB%CE%B5%CF%82_%CE%B3%CE%B9%CE%B1_%CF%84%CE%B7%CE%BD_%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE.

105. https://ravagobuildingsolutions.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 14 10 2021.] https://ravagobuildingsolutions.com/ravatherm-gr/el/%cf%80%cf%81%ce%bf%ce%b9%ce%bf%ce%bd%cf%84%ce%b1/.