



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ & ΚΡΙΣΕΩΝ

POST GRADUATE PROGRAM
ENVIRONMENTAL, DISASTER & CRISES MANAGEMENT STRATEGIES

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης

Master Thesis

**«Οικονομική και κοινωνική αποτίμηση της ανάπτυξης δομής ανάκτησης
/ ανακύκλωσης σπάνιων γαιών από προϊόντα που έχουν εξαντλήσει τον
κύκλο ζωής τους στην ευρύτερη περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας»**

“Economic and social evaluation of the development of a structure for the recovery of rare
earth elements from end-of-life products in the broader region of Western Macedonia”

ΑΓΓΕΛΟΣ ΤΣΑΧΟΥΡΙΔΗΣ / AGGELOS TSACHOURIDIS

A.M. / R.N. : 7114132200271

Ειδικές Εκδόσεις / Special Publications:

No. 2024309

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

Athens, October 2024



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ & ΚΡΙΣΕΩΝ

POST GRADUATE PROGRAM
ENVIRONMENTAL, DISASTER & CRISES MANAGEMENT STRATEGIES

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης Master Thesis

«Οικονομική και κοινωνική αποτίμηση της ανάπτυξης δομής ανάκτησης / ανακύκλωσης σπάνιων γαιών από προϊόντα που έχουν εξαντλήσει τον κύκλο ζωής τους στην ευρύτερη περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας»

“Economic and social evaluation of the development of a structure for the recovery of rare
earth elements from end-of-life products in the broader region of Western Macedonia”

ΑΓΓΕΛΟΣ ΤΣΑΧΟΥΡΙΔΗΣ / AGGELOS TSACHOURIDIS

A.M. / R.N. : 7114132200271

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Δρ. Μοιρασγεντής Σεβαστιανός,
Κύριος Ερευνητής – Διευθυντής Ερευνών Εθν.
Αστεροσκοπείου Αθηνών

Δρ. Διακάκης Μιχαήλ,
Επίκουρος Καθηγητής ΕΚΠΑ

Δρ. Λέκκας Ευθύμιος,
Καθηγητής ΕΚΠΑ

Ειδική Επιστημονική Καθοδήγηση

Δρ. Μοιρασγεντής Σεβαστιανός,
Κύριος Ερευνητής – Διευθυντής Ερευνών Εθν.
Αστεροσκοπείου Αθηνών

Ειδικές Εκδόσεις / Special Publications:

No. 2024309

**Αθήνα, Οκτώβριος
2024**

Athens, October 2024

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΟΙ ΣΠΑΝΙΕΣ ΓΑΙΕΣ (R.E.E.)	
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
2.2 ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ, ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ R.E.E.	12
2.3 ΑΝΑΚΤΗΣΗ R.E.E. ΑΠΟ ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ	15
2.3 ΑΝΑΚΤΗΣΗ R.E.E. ΑΠΟ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Η ΔΥΤΙΚΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ ΚΑΙ Η ΛΙΓΝΙΤΟΦΟΡΟΣ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ	28
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	28
3.2 Η ΛΙΓΝΙΤΟΦΟΡΟΣ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ	30
3.3 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ	32
3.4 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΠΤΥΚΗΣ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ R.E.E. ΣΤΑ ΟΡΥΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ	33
3.5 ΑΠΟΛΙΓΝΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΤΟ MASTER PLAN ΔΙΚΑΙΗΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΗΣ.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ	38
4.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ	38
4.2 ΧΡΗΜΑΤΟ – ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ.....	40
4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΟΦΕΛΟΥΣ	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΤΕΧΝΙΚΑ & ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ R.E.E.	47
5.1 Η ΔΟΜΗ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ	47
5.2 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ	48
5.3 ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΙΩΝ	53
5.4 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΜΕΡΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ.....	56
5.5 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	57
5.6 ΚΟΣΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	59
5.7 ΘΕΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΟΥ ΘΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΗΣΕΙ Η ΔΟΜΗ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ	62
5.8 ΧΡΗΜΑΤΙΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΞΙΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΟΜΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΚΟ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	70
6.1 ΑΚΟ ΑΝΑΛΥΣΗ	64
6.2 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	90

“Στην οικογένεια, τους φίλους μου, αλλά και σε όλους τους κατοίκους της Δυτικής Μακεδονίας που για δεκαετίες έζησαν και εργάστηκαν στην περιοχή, συνέλαβαν με κάθε τρόπο στο να γίνει η ενεργειακή καρδιά της χώρας και τώρα καλούνται να αντιμετωπίσουν τις επιπτώσεις των επιλογών της ενεργειακής μετάβασης.

Η εργασία αυτή αφιερώνεται σε αυτούς, με την ελπίδα να αποτελέσει βάση για οποιαδήποτε εγχείρημα θα μπορούσε να υλοποιηθεί στην περιοχή και να συμβάλει ουσιαστικά στη βελτίωση της ζωής τους”

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία καθιστά νομικά δεσμευτικό τον στόχο μείωσης των εκπομπών κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030 και επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050. Οι επιχειρήσεις ηλεκτρισμού προσαρμόζονται, αντικαθιστώντας τον λιγνίτη με φυσικό αέριο και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Η Δυτική Μακεδονία, μια περιοχή που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την παραγωγή λιγνίτη, βρίσκεται στην καρδιά αυτής της μετάβασης και αντιμετωπίζει σοβαρές οικονομικές επιπτώσεις και κοινωνικές προκλήσεις λόγω της απολιγνιτοποίησης. Η τοπική κοινωνία καλείται να αλλάξει πλήρως το παραγωγικό της μοντέλο και να αξιοποιήσει τα επενδυτικά εργαλεία που της παρέχει η Ευρωπαϊκή Ένωση για την υλοποίηση αυτής της μετάβασης. Σε αυτή τη βάση, προτείνεται η ανάπτυξη ενός νέου αναπτυξιακού μοντέλου που θα στηρίζεται στην πράσινη ενέργεια, τις ΑΠΕ και τη βιομηχανική διαφοροποίηση. Μια σημαντική πτυχή αυτού του μοντέλου είναι η αξιοποίηση των κρίσιμων πρώτων υλών (CRM) και σπάνιων γαιών (R.E.E.), όπως το δυσπρόσιο, το νεοδύμιο και το πρασεοδύμιο, τα οποία είναι απαραίτητα για τεχνολογίες που σχετίζονται με την ενεργειακή μετάβαση, όπως η ηλεκτροκίνηση και οι ΑΠΕ.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί μέτρα για τη βιώσιμη προμήθεια αυτών των πρώτων υλών, μέσω της ενίσχυσης της κυκλικής οικονομίας και της μείωσης της εξάρτησης από εισαγωγές, ιδιαίτερα από την Κίνα, που κυριαρχεί στην αγορά των κρίσιμων πρώτων υλών. Η Δυτική Μακεδονία, με την ενεργειακή και βιομηχανική κουλτούρα δεκαετιών που έχει και με τη στήριξη του Ταμείου Δίκαιης Μετάβασης, έχει τη δυνατότητα να μετατραπεί σε ένα κέντρο έρευνας και παραγωγής κρίσιμων πρώτων υλών, παρέχοντας οικονομικές ευκαιρίες και ενισχύοντας τη βιωσιμότητα της τοπικής οικονομίας καθώς προσαρμόζεται στις νέες προκλήσεις της κλιματικής πολιτικής.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται ο προσδιορισμός των οικονομικών και τεχνικών παραγόντων που σχετίζονται με τη δημιουργία μιας δομής ανάκτησης σπάνιων γαιών (R.E.E.) εργαστηριακής - ημιπilotικής κλίμακας στη Δυτική Μακεδονία, η οποία θα συμβάλει στην πράσινη ανάπτυξη της περιοχής, ειδικά μετά την απολιγνιτοποίηση. Η δομή θα αξιοποιεί υπάρχοντες τεχνικούς πόρους και θα αναπτύξει, σε πρώτη φάση, τεχνολογίες ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες NdFeB, λαμπτήρες φθορισμού και ιπτάμενη τέφρα. Το κόστος και η αποτελεσματικότητα της θα εξαρτηθούν από την υπάρχουσα τεχνολογία και τις υλικοτεχνικές υποδομές, τις συγκεντρώσεις των μετάλλων αυτών στις πρώτες ύλες και τις εργαστηριακές απαιτήσεις που αφορούν τον εμπλουτισμό και την χημική ανάκτηση. Η εργασία αυτή επιδιώκει να αναδείξει τη σημασία ανάπτυξης μιας τέτοιας δομής στην περιοχή, να αξιολογήσει τις οικονομικοτεχνικές παραμέτρους που εμπλέκονται στη δημιουργία της και να αποτελέσει το υπόβαθρο για τη μελλοντική διεκδίκηση χρηματοδότησης, με εμπεριστατωμένο τρόπο, από το Ταμείο Δίκαιης Μετάβασης για την υλοποίηση της εν λόγω δομής.

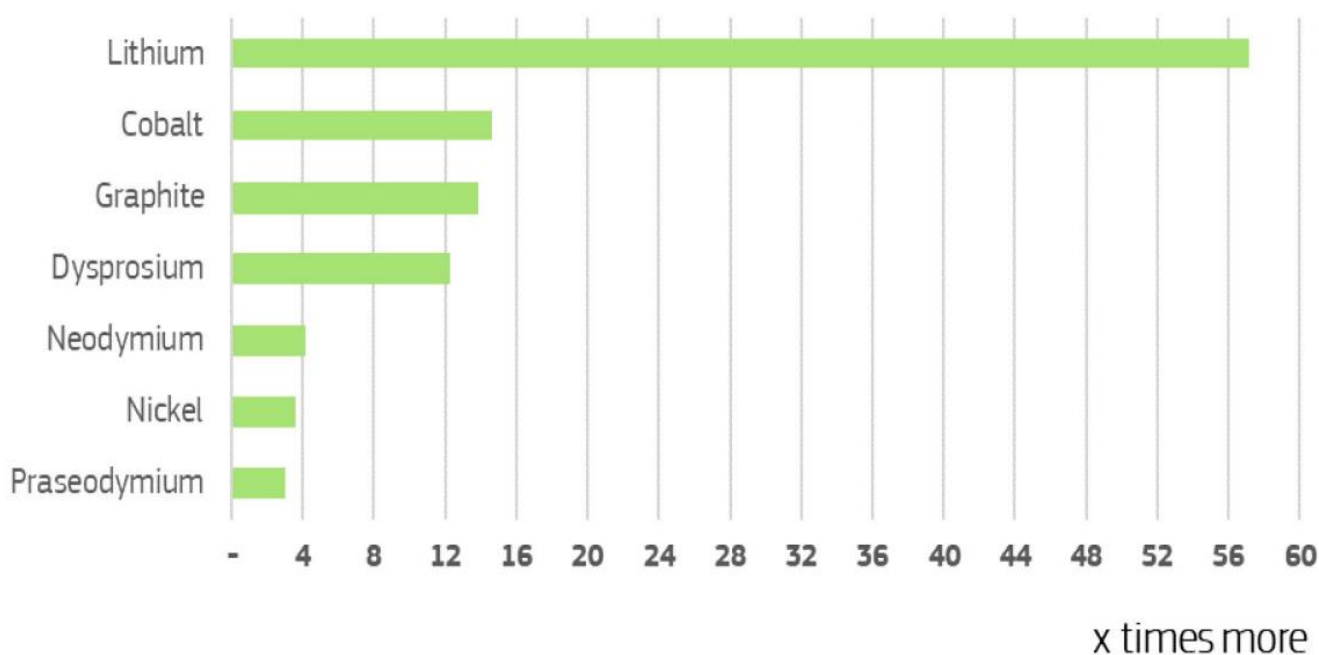
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal) καθιστά νομική υποχρέωση την επίτευξη του κλιματικού στόχου της ΕΕ για μείωση των εκπομπών της ΕΕ κατά τουλάχιστον 55 % έως το 2030 σε σχέση με το 1990 και για κλιματική ουδετερότητα το 2050. Οι χώρες της ΕΕ επεξεργάζονται και σταδιακά υιοθετούν μια σειρά Οδηγιών και Κανονισμών προκειμένου να επιτευχθούν οι εν λόγω στόχοι. Η στρατηγική αυτή φιλοδοξεί να μετατρέψει την Ε.Ε. σε μια δίκαιη και ευημερούσα κοινωνία με μια ισχυρή και ανταγωνιστική οικονομία, όπου η ανάπτυξη είναι αποσυνδεδεμένη από την εντατική χρήση πεπερασμένων πόρων και τις εκπομπές θερμοκηπικών αερίων GHG [1]. Σε αυτή την εξέλιξη και υπό την πίεση του ανταγωνισμού που διαμορφώνεται κυρίως από την υψηλή τιμή των δικαιωμάτων εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα, οι επιχειρήσεις ηλεκτρισμού έχουν ήδη αρχίσει να εφαρμόζουν προγράμματα για τη σταδιακή μείωση της χρήσης άνθρακα και λιγνίτη, έχοντας στραφεί είτε στο φυσικό αέριο, ως μεταβατικό καύσιμο, είτε απευθείας στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Η ενεργειακή μετάβαση που καλούνται να υλοποιήσουν οι ευρωπαϊκές κοινωνίες, θα αποτελέσει σημαντική πρόκληση για ορισμένες περιφέρειες που θα κληθούν να υιοθετήσουν μια ριζική αναδιάρθρωση των οικονομιών τους, με αλλαγές στα υφιστάμενα επιχειρηματικά μοντέλα τους και ανάπτυξη νέων δεξιοτήτων [2]. Σύμφωνα με ανάλυση που δημοσιεύτηκε από το Ινστιτούτο Wuppertal, οι πιέσεις που προκαλούνται από την απανθρακοποίηση είναι υψηλότερες στις λιγνιτοπαραγωγικές περιοχές, που είναι αγροτικές περιοχές με χαμηλή πυκνότητα πληθυσμού, όπου τα ορυχεία και οι ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί ήταν οι κύριοι πάροχοι θέσεων εργασίας και η βάση της τοπικής οικονομίας. Οι περιφέρειες που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση του λιγνίτη για σκοπούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να διασφαλίσουν ότι οι νέες οικονομικές δραστηριότητες μπορούν να διατηρήσουν την κοινωνική συνοχή και να προσφέρουν επαρκή αριθμό νέων θέσεων εργασίας [3].

Στο πλαίσιο αυτό, η ελληνική κυβέρνηση ανακοίνωσε το κλείσιμο των λιγνιτικών ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων έως το 2028 και την αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής μέσω ΑΠΕ σε ποσοστό έως και 87% μέχρι το 2030 [1]. Δεδομένου ότι περίπου το 70% της παραγωγής λιγνίτη στην Ελλάδα πραγματοποιείται στην περιοχή Δυτικής Μακεδονίας, αυτή η περιοχή βρίσκεται στο επίκεντρο της ενεργειακής μετάβασης, με όλες τις απειλές και τις ευκαιρίες που αυτό συνεπάγεται. Δεδομένου ότι αυτήν τη στιγμή δεν υπάρχει σημαντική εναλλακτική οικονομική δραστηριότητα που να αντικαθιστά τις θέσεις εργασίας και τον πλούτο που προσφέρει εδώ και δεκαετίες η τοπική λιγνιτική βιομηχανία, το νέο αναπτυξιακό μοντέλο της Δυτικής Μακεδονίας θα πρέπει να βασίζεται σε έντονα διαφοροποιημένες και συμπληρωματικές δραστηριότητες. Οι δραστηριότητες αυτές θα πρέπει να βασίζονται σε ένα χωροταξικό σχέδιο που θα καθορίζει, λαμβάνοντας υπόψη μια σειρά κριτηρίων βιωσιμότητας, τις απαραίτητες πρακτικές αποκατάστασης για τη βέλτιστη χρήση γης, που θα επιτρέπουν την εφαρμογή ενός ευρέος συνόλου παραγωγικών δραστηριοτήτων.

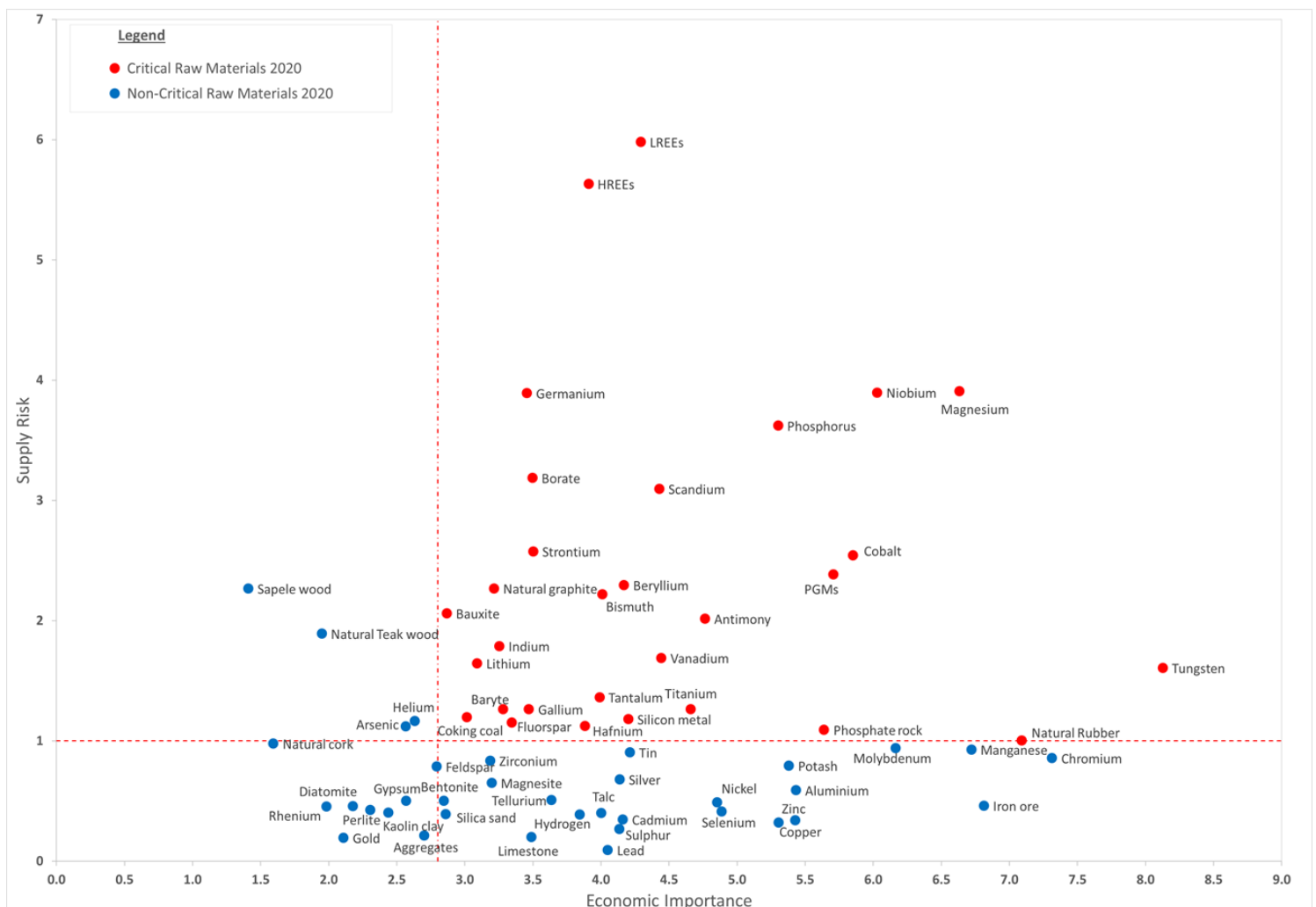
Υπό αυτές τις συνθήκες, η επιτυχία της στρατηγικής ενεργειακής μετάβασης στη Δυτική Μακεδονία θα βασίζεται στην «πράσινη» ενέργεια, την έξυπνη αγροτική παραγωγή, τις μικρές βιομηχανίες και το εμπόριο, αλλά και σε οικονομικούς τομείς που σχετίζονται άμεσα με την εκμετάλλευση του λιγνίτη και των παραπροϊόντων του [3].

Η απρόσκοπτη, αξιόπιστη, ασφαλής και βιώσιμη πρόσβαση σε ορισμένες πρώτες ύλες αποτελεί τη βασική προϋπόθεση της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και μια τεράστια πρόκληση για την κοινωνική και οικονομική ευημερία της Ε.Ε.. Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, το 2011 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημιούργησε την πρώτη λίστα κρίσιμων πρώτων υλών CRM (Critical Raw Materials), ώστε να ταξινομήσει αυτά τα υλικά ανάλογα με την βιομηχανική τους ζήτηση, τον εφοδιαστικό κίνδυνο που συνδέεται με αυτά και με τον αντίκτυπό τους στην ενεργειακή μετάβαση [4]. Τον Σεπτέμβριο του 2020 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε το αναθεωρημένο σχέδιο δράσης “Action Plan on Critical Raw Materials” και δημοσιοποίησε τον επικαιροποιημένο κατάλογο των κρίσιμων πρώτων υλών που θα είναι απαραίτητες για την υλοποίησή της ενεργειακής μετάβασης. Οι πρώτες ύλες κρίσιμης σημασίας είναι ένας από τους τομείς στους οποίους η Ευρώπη πρέπει να καταστεί πιο ανθεκτική, ώστε να είναι προετοιμασμένη να αντιμετωπίσει μελλοντικούς κλυδωνισμούς και να αποκτήσει μεγαλύτερη στρατηγική αυτονομία. Για τη Δυτική Μακεδονία, ιδιαίτερη σημασία έχει η Δράση 5 του εν λόγω σχεδίου δράσης: «Εντοπισμός έργων εξόρυξης και επεξεργασίας και προσδιορισμός των επενδυτικών αναγκών και των σχετικών ευκαιριών χρηματοδότησης για πρώτες ύλες κρίσιμης σημασίας στην Ευρωπαϊκή Ένωση που μπορούν να εισέλθουν στο επιχειρησιακό στάδιο έως το 2025, με προτεραιότητα στις περιφέρειες εξόρυξης άνθρακα και λιγνίτη». Τα νέα συστήματα ΑΠΕ, η οικονομία του πράσινου Υδρογόνου και αυτή της ηλεκτροκίνησης θα απαιτήσουν μεγάλες ποσότητες πρώτων υλών όπως ιρίδιο, δυσπρόσιο, πρασεοδύμιο, νεοδύμιο, προμήθειο, νιόβιο, παλλάδιο, πλατίνα, τιτάνιο, νικέλιο και κοβάλτιο. Τα περισσότερα εξ αυτών έχουν ήδη χαρακτηριστεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή ως CRM, λόγω του συνδυασμού του εφοδιαστικού κινδύνου και της οικονομικής σημασίας τους στην σύγχρονη παγκόσμια βιομηχανία και στον τομέα της ενέργειας [5]. Στην Εικόνα 1 αποτυπώνεται η επιπρόσθετη κατανάλωση κρίσιμων μετάλλων το 2050 σε σύγκριση με την τρέχουσα κατανάλωση εντός Ε.Ε., σε όλες τις εφαρμογές.



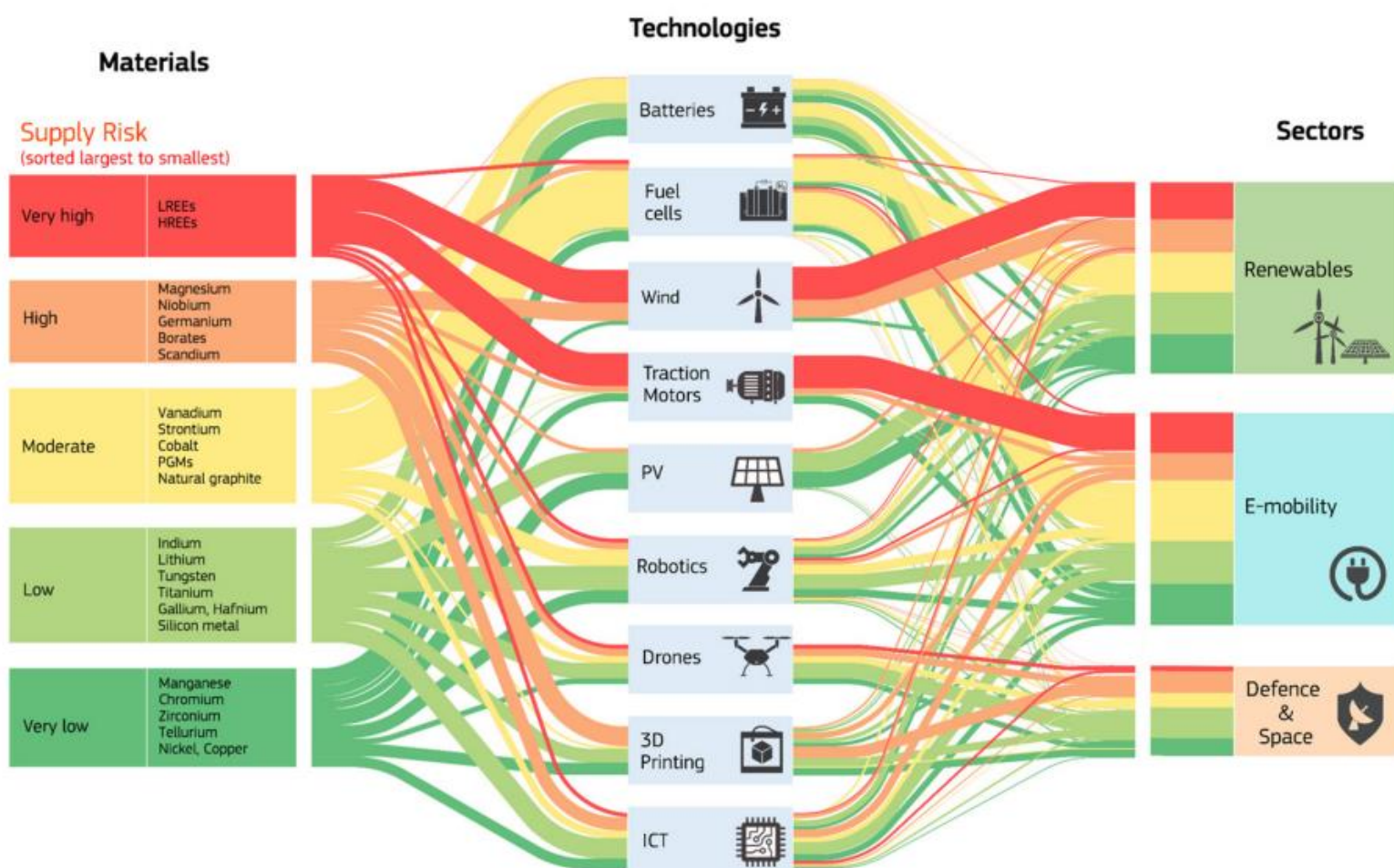
Εικόνα 1: Επιπρόσθετη κατανάλωση κρίσιμων μετάλλων το 2050 σε σχέση με την τρέχουσα κατανάλωση εντός Ε.Ε., σε όλες τις εφαρμογές (“Action Plan on Critical Raw Materials”) (<https://rmis.jrc.ec.europa.eu/eu-critical-raw-materials>).

Από τα προαναφερθέντα μέταλλα, το δυσπρόσιο (Dy), το νεοδύμιο (Nd) και το πρασεοδύμιο (Pr) ανήκουν στην οικογένεια των σπάνιων γαιών (R.E.E. - Rare Earth Elements). Τα μέταλλα των R.E.E. αποτελούν βασικές πρώτες ύλες για ένα μεγάλο φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών και προϊόντων, όπως ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα, tablet και κινητά τηλέφωνα επόμενης γενιάς, φωτοβολταϊκά πάνελ και ανεμογεννήτριες, έξυπνα οπτικά συστήματα και διαστημική τεχνολογία. Το αναθεωρημένο σχέδιο δράσης του 2020 περιλαμβάνει 83 κρίσιμες πρώτες ύλες, μεταξύ των οποίων τα R.E.E. - ομαδοποιημένα ως “βαριά” (Heavy R.E.E. - H.R.E.E.) και “ελαφριά” (Light R.E.E. - L.R.E.E.), ανάλογα με το ατομικό τους βάρος - κατέχουν πολύ σημαντική θέση. Πιο συγκεκριμένα, με βάση τον συνδυασμό εφοδιαστικού κινδύνου και της οικονομικής σημασίας τους στην σύγχρονη παγκόσμια βιομηχανία, τα R.E.E. ταξινομούνται ως οι κρίσιμες πρώτες ύλες η έλλειψη των οποίων ενέχει τον υψηλότερο εφοδιαστικό κίνδυνο με μια σχετική μέση οικονομική σημασία, σε σχέση με τις υπόλοιπες εξεταζόμενες πρώτες ύλες [4]. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η αναθεωρημένη από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή λίστα των κρίσιμων πρώτων υλών, όπου κατατάσσονται διάφορα μέταλλα και υλικά ανάλογα με τον κίνδυνο ανεφοδιασμού που ενέχουν στη βιομηχανία και με την οικονομική τους σημασία, ενώ στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται συνοπτικά οι κρίσιμες πρώτες ύλες που προσδιορίζει το σχέδιο δράσης και οι τεχνολογικές εφαρμογές στις οποίες αυτές αξιοποιούνται.



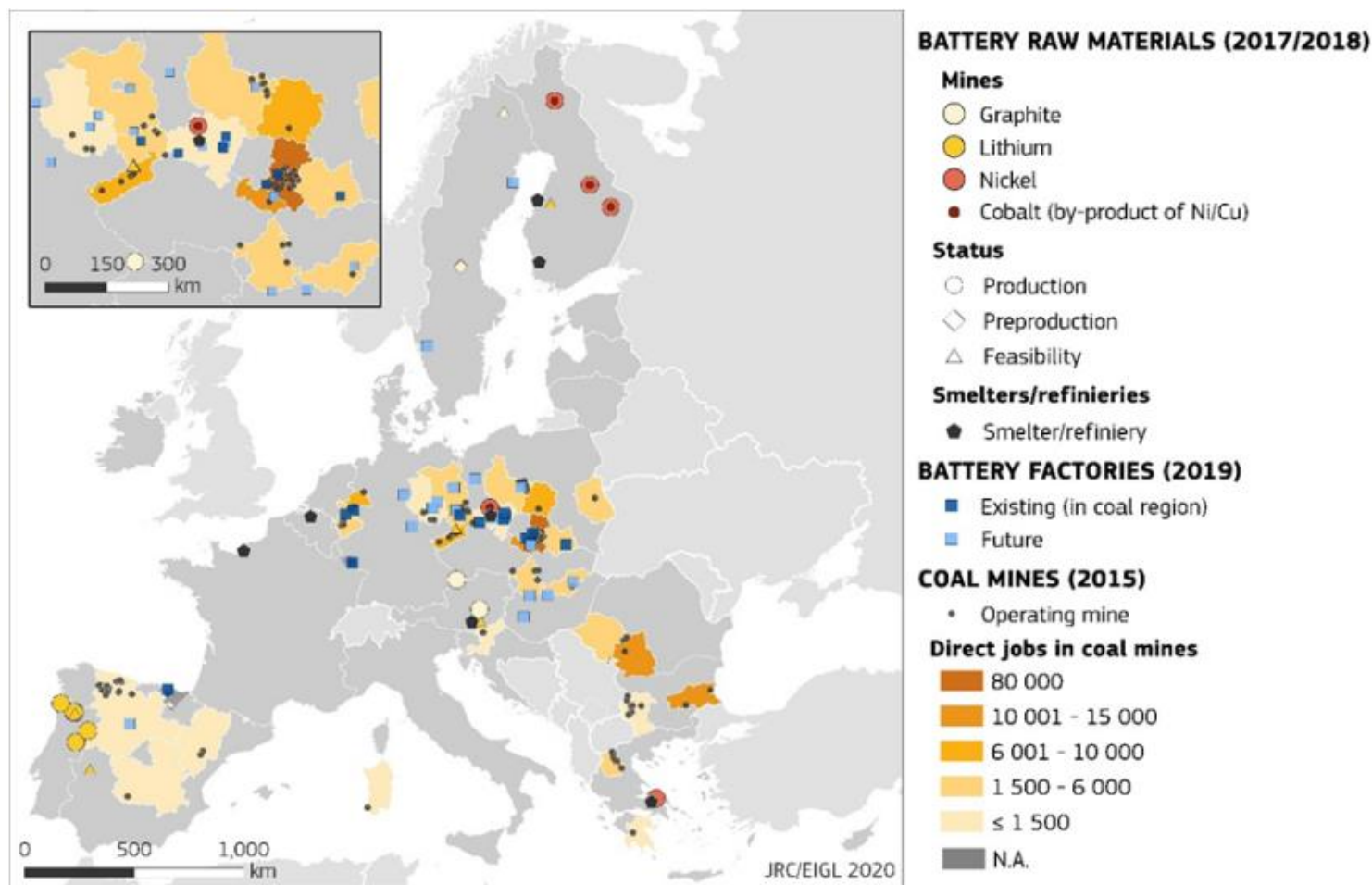
Εικόνα 2: Κατάταξη των κρίσιμων πρώτων υλών, ανάλογα με τον εφοδιαστικό τους κίνδυνο και την οικονομική τους σημασία (<https://www.lifepラスplus.eu/news/study-on-the-eus-list-of-critical-raw-materials-2020/>).

Σε συνδυασμό με το προαναφερθέν σχέδιο δράσης και για να διασφαλιστεί ότι καμία περιοχή της Ευρωπαϊκής Ένωσης δεν θα μείνει πίσω κατά την ενεργειακή μετάβαση, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δρομολόγησε το 2017 την πρωτοβουλία “Initiative for coal regions in transition”, για να συμβάλει στον μετριασμό των κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων της μετάβασης στις περιοχές όπου η εκμετάλλευση των λιγνιτοφόρων λεκανών αποτελεί τη βασική βιομηχανική δραστηριότητα πάνω στην οποία βασίζεται η οικονομική ζωή των περιοχών αυτών [6].



Εικόνα 3: Κρίσιμες πρώτες ύλες και εφαρμογές τους (<https://consilium-europa.libguides.com/c.php?q=708148&p=5105594>).

Η εξόρυξη, ανάκτηση, επεξεργασία και ανακύκλωση κρίσιμων πρώτων υλών θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια σημαντική εναλλακτική βιομηχανική δραστηριότητα για τις περιοχές αυτές. Στην Εικόνα 4 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι λιγνιτοφόρες περιοχές που προσδιορίζονται εντός του σχεδίου δράσης, όπου θα μπορούσαν να αναπτυχθούν σχετικές δομές για την υλοποίηση τέτοιας δραστηριότητας.



Εικόνα 4: Λιγνιτοφόρες περιοχές όπου θα μπορούσαν να φιλοξενηθούν δομές ανακύκλωσης, εξόρυξης, ανάκτησης και κατεργασίας CRM (<https://www.energy-storage.news/european-commission-adds-lithium-to-critical-raw-materials-list/>)

Τον Φεβρουάριο του 2021, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο ενέκρινε ψήφισμα σχετικά με το νέο Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία που ζητά περαιτέρω δράση για την επίτευξη μιας ουδέτερης από άνθρακα, περιβαλλοντικά βιώσιμης, απαλλαγμένης από τοξικά και πλήρως κυκλικής οικονομίας στην Ευρώπη έως το 2050. Αυτό το ψήφισμα περιλαμβάνει αυστηρότερους κανόνες ανακύκλωσης και δεσμευτικούς στόχους για τη χρήση και κατανάλωση υλικών έως το 2030. Τον Μάρτιο του 2022, η Επιτροπή δημοσίευσε την πρώτη δέσμη μέτρων για την επιτάχυνση της μετάβασης σε μια κυκλική οικονομία, ως μέρος του σχεδίου δράσης για την κυκλική οικονομία.

Οι προτάσεις περιλαμβάνουν την ενίσχυση βιώσιμων προϊόντων, την ενδυνάμωση των καταναλωτών για την πράσινη μετάβαση, την αναθεώρηση του κανονισμού για τα προϊόντα δομικών κατασκευών και μια στρατηγική βιώσιμης κλωστοϋφαντουργίας. Τον Νοέμβριο του 2022, η Επιτροπή πρότεινε νέους ευρωπαϊκούς κανόνες για τις συσκευασίες. Υπάρχουν προτάσεις για τη βελτίωση του σχεδιασμού της συσκευασίας, όπως η σαφής επισήμανση, για την προώθηση της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης. Με δεδομένη την στροφή της ανθρωπότητας σε ανανεώσιμες και φιλικότερες προς το περιβάλλον πηγές ενέργειας, τα κρίσιμα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στις ΑΠΕ θα αποτελέσουν ζωτικό κομμάτι της ανθρώπινης βιομηχανικής και οικονομικής δραστηριότητας και η ζήτηση τους ήδη καταγράφει σημαντική αύξηση.

Προς αυτήν την κατεύθυνση, δεδομένης και της ανάγκης απεξάρτησης της Ευρώπης από τις πρώτες ύλες της Κίνας και με βάση τα ανωτέρω, είναι σκόπιμο να διερευνηθεί η δημιουργία ερευνητικής δομής εργαστηριακής - ημιπilotικής κλίμακας και εθνικής εμβέλειας στη Δυτική Μακεδονία, με αντικείμενο την ολοκληρωμένη έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογιών παραγωγής κρίσιμων πρώτων υλών και σπάνιων γαιών από πρωτογενείς αλλά και από δευτερογενείς πηγές. Στις πρωτογενείς πηγές περιλαμβάνονται οι ορυκτές πρώτες ύλες κάθε μορφής, ενώ οι δευτερογενείς αφορούν στην ανάκτηση κρίσιμων πρώτων υλών μέσω κυκλικής οικονομίας. Η υπό διερεύνηση δομή θα αναπτύξει ικανότητα και εξειδίκευση στα ακόλουθα πεδία:

- Χαρτογράφηση των δυνητικών πηγών, αρχικά σε επίπεδο Δυτικής Μακεδονίας
- Χαρακτηρισμός δειγμάτων μέσω εργαστηριακών δοκιμών και αξιολόγησή τους
- Ανάπτυξη μεθόδων εμπλουτισμού και ανάκτησης κρίσιμων πρώτων υλών και σπάνιων γαιών εργαστηριακής κλίμακας (TRL 3-5)
- Τεχνοοικονομική αξιολόγηση εμπορικής αξιοποίησης της δομής για σχετικές αναλύσεις
- Σταδιακή κλιμάκωση της ικανότητας σε πιλοτική κλίμακα (TRL 5-7)

Το κόστος ανάπτυξης μιας τέτοιας δομής εξαρτάται από τον ήδη υπάρχοντα τεχνικό και εργαστηριακό εξοπλισμό, τα κρίσιμα μέταλλα που θα ανακτώνται, τις διαθέσιμες συμβατικές ή νέες τεχνολογίες που θα αναπτυχθούν, τις συγκεντρώσεις των κρίσιμων υλικών στα ρεύματα τροφοδοσίας, τις απαιτούμενες τιμές καθαρότητας του τελικού προϊόντος. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να εκπονηθεί σχετική μελέτη προκειμένου να αποτυπωθούν με ποσοτικό τρόπο τόσο οι τεχνοοικονομικές παράμετροι όσο και ο οδικός χάρτης του συνολικού εγχειρήματος, δίνοντας παράλληλα τη δυνατότητα στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας, αλλά και σε άλλους φορείς, να διεκδικήσουν με τεκμηριωμένο τρόπο την δημιουργία και λειτουργία της εν λόγω δομής κρίσιμων πρώτων υλών στην περιοχή της. Η Δυτική Μακεδονία, ως η περιοχή της Ελλάδας που επηρεάζεται περισσότερο από την απολιγνιτοποίηση, δικαιούται σημαντικά κονδύλια από το Ταμείο Δίκαιης Μετάβασης (ΤΔΜ). Η ελληνική κυβέρνηση, σε συνεργασία με την Ευρωπαϊκή Ένωση, έχει προγραμματίσει τη χορήγηση οικονομικής στήριξης για να αντισταθμίσει τις επιπτώσεις της σταδιακής απόσυρσης των λιγνιτικών μονάδων, με το γεγονός αυτό να αποτελεί σημαντική ευκαιρία για την υλοποίηση της εν λόγω δομής.

Συνοψίζοντας, **σκοπός** της παρούσας εργασίας είναι να αποτελέσει μια μελέτη σκοπιμότητας όπου θα διερευνάται από οικονομοτεχνική άποψη η ανάπτυξη και λειτουργία μιας δομής ανάκτησης σπάνιων γαιών εργαστηριακής - ημιπilotικής κλίμακας και εθνικής εμβέλειας στη Δυτική Μακεδονία. Στην εργασία θα διερευνηθεί η δυνατότητα ανάκτησης R.E.E., με ανάκτηση των στοιχείων αυτών από διάφορες πρώτες ύλες και πιο συγκεκριμένα από: α) μαγνήτες NdFeB, β) από λαμπτήρες φθορισμού, γ) από την ήδη υπάρχουσα ποσότητα ιπτάμενης τέφρας CFA (Coal Fly Ash) που υπάρχει σε 2 μεγάλες πλατείες απόθεσης στη Δυτική Μακεδονία και δ) από πιθανό συνδυασμό των παραπάνω υλικών, αλλά και η παράλληλη λειτουργία της δομής σαν εργαστήριο εμπλουτισμού και γεωχημικού χαρακτηρισμού άλλων υλικών και γεωλογικών δειγμάτων. Ανάλογα με τα αποτελέσματα και τις μελλοντικές απαιτήσεις σε αυτά τα κρίσιμα μέταλλα, η ικανότητα ανάκτησης της δομής θα μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω, σε πιλοτική - ημιβιομηχανική κλίμακα.

2.2 ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ, ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ R.E.E.

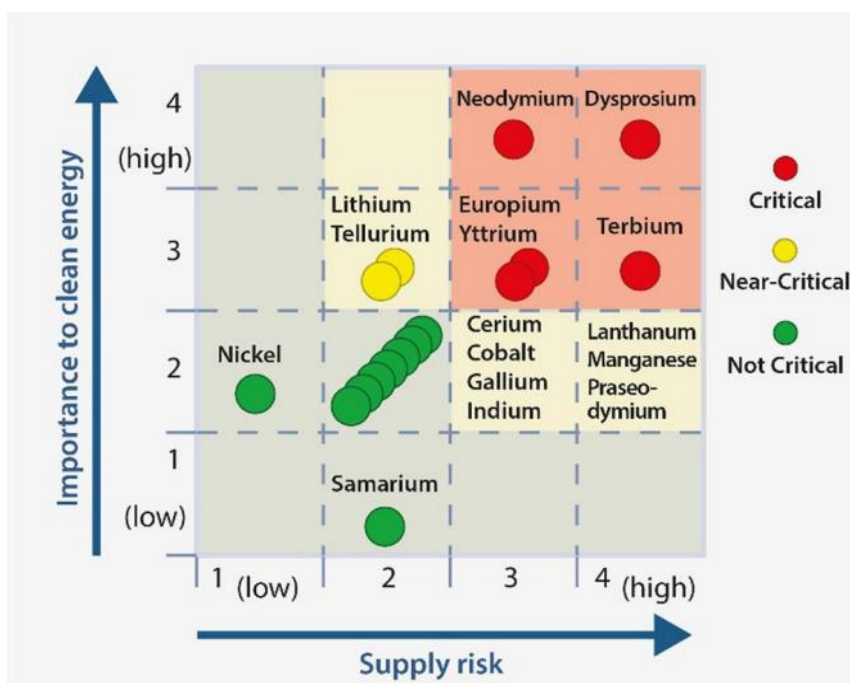
Σε αντίθεση με ό,τι μπορεί να υποδηλώνει το όνομα τους, οι σπάνιες γαίες μόνο «σπάνιες» δεν είναι στον φλοιό της Γης, ωστόσο απαντώνται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις, δεν υπάρχουν σε καθαρή μορφή και εμφανίζονται μαζί ως ενώσεις σε κάποια ορυκτά. Από τα 83 στοιχεία που απαντώνται στην φύση, τα 16 φυσικά απαντώμενα στοιχεία σπάνιων γαιών εμπίπτουν στο 50ο εκατοστημόριο των στοιχειακών αφθονιών. Το προμήθειο (Pm), το οποίο είναι ραδιενεργό, με το πιο σταθερό ισότοπο να έχει χρόνο ημιζωής 17,7 χρόνια, δεν θεωρείται ότι απαντάται στη φύση, αν και έχουν βρεθεί ίχνη σε ορισμένα ραδιενεργά μεταλλεύματα. Το δημήτριο (Ce), που είναι το πιο άφθονο, κατατάσσεται στην 28η θέση και το θούλιο (Tm), το λιγότερο άφθονο, στην 63η θέση. Συλλογικά, οι σπάνιες γαίες κατατάσσονται ως το 22ο πιο άφθονο «στοιχείο» (στο 68ο εκατοστημόριο). Τα μη λανθανιδικά στοιχεία σπάνιων γαιών, το ύτριο (Y) και το σκάνδιο (Sc), βρίσκονται στην 29η και 44η θέση, αντίστοιχα, από άποψη αφθονίας [7]. Όπως προαναφέρθηκε, μπορούν να ταξινομηθούν ως “Heavy” (H) και “Light” (L), με βάση τον ατομικό τους αριθμό, με τα ελαφρά R.E.E. να είναι τα στοιχεία από το La στο Sm (Ατομικός αριθμός 57 → 62) και τα βαρέα R.E.E. από το Eu στο Lu (Ατομικός αριθμός 63 → 71) [8]. Το λανθάνιο και τα L.R.E.E. είναι πιο άφθονα από τα H.R.E.E. και, συνεπώς, τα L.R.E.E. είναι σε γενικές γραμμές λιγότερο ακριβά από τα H.R.E.E.. Επιπλέον, τα στοιχεία με ζυγούς ατομικούς αριθμούς (δημήτριο (Ce), νεοδύμιο (Nd), σαμάριο (Sm), γαδολίνιο (Gd), δυσπρόσιο (Dy), έρβιο (Er) και υτέrbιο (Yb)) είναι πιο άφθονα από τα γειτονικά τους με περιττούς ατομικούς αριθμούς (λανθάνιο (La), πρασεοδύμιο (Pr), προμήθειο (Pm), ευρώπιο (Eu), τέρβιο (Tb), θούλιο (Tm), όλμιο (Ho), λουτέτιο (Lu)) [7].

Κοιτάσματα μεταλλευμάτων R.E.E. βρίσκονται σε όλο τον κόσμο. Τα κύρια κοιτάσματα απαντώνται στην Κίνα, τις Ηνωμένες Πολιτείες, την Αυστραλία και τη Ρωσία, ενώ άλλα αξιοποιήσιμα κοιτάσματα βρίσκονται στον Καναδά, την Ινδία, τη Νότια Αφρική και τη νοτιοανατολική Ασία. Τα κυριότερα ορυκτά που εμπεριέχουν R.E.E. είναι ο μπαστνασίτης (La, Ce, Y)CO₃F, ο μοναζίτης (Ce, La, Pr, Nd, Th, Y)PO₄, ο λοπαρίτης [(R,Na,Sr,Ca)(Ti,Nb,Ta,Fe³⁺)O₃] και οι λατεριτικοί βωξίτες (SiO₂, Al₂O₃, και Fe₂O₃). Άλλα ορυκτά που αποτελούν πηγές R.E.E. σε μικρότερες συγκεντρώσεις είναι ο απατίτης, ο ευξενίτης, το ξενότιμο. Ο αλλανίτης, ο φθορίτης, ο περοβσκίτης, η σφαίρη και το ζirkόνιο έχουν τη δυνατότητα να αποτελέσουν μελλοντικές πηγές. Επιπλέον, τα απορρίματα ουρανίου και σιδήρου έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν ως πηγή των H.R.E.E. συν ύτριο (Y) και των L.R.E.E. συν λανθάνιο (La), αντίστοιχα. Πολλά από αυτά τα ορυκτά, όπως ο απατίτης και ο ευξενίτης, υποβάλλονται σε κατεργασία για ανάκτηση άλλων συστατικών και τα R.E.E. θα μπορούσαν να ανακτηθούν ως υποπροϊόν [7].

Τα κινεζικά κοιτάσματα αντιπροσώπευαν περίπου το 80 % των R.E.E. που εξορύχθηκαν στον κόσμο το 2017 (105.000 τόνοι οξειδίου των σπάνιων γαιών – R.E.O.). Περίπου το 94 % των R.E.E. που εξορύσσονται στην Κίνα προέρχονται από κοιτάσματα μπαστνασίτη. Το κύριο κοιτάσμα βρίσκεται στο Bayan Obo, στην Εσωτερική Μογγολία (συγκέντρωση 83%), ενώ μικρότερα κοιτάσματα εξορύσσονται στις επαρχίες Shandong (συγκέντρωση 8%) και Sichuan (συγκέντρωση 3%). Το μονοπώλιο της Κίνας της επέτρεψε να αυξήσει κατακόρυφα τις τιμές για διάφορα υλικά σπάνιων γαιών από το 2009 έως το 2011 και να επιβάλει επίσης ποσοστώσεις εξαγωγών σε πολλά από αυτά

τα προϊόντα. Αυτό επέφερε μια σημαντική αλλαγή στη δυναμική των αγορών σπάνιων γαιών. Η εξόρυξη μπαστνασίτη ξεκίνησε ξανά στο Mountain Pass της Καλιφόρνια το 2011, μετά από εννέα χρόνια παύσης και η εξόρυξη μοναζίτη ξεκίνησε την ίδια χρονιά στο Mount Weld της Αυστραλίας. Την ίδια περίοδο, λοπαρίτης εξορύσσονταν στη Ρωσία, ενώ μοναζίτης εξορύσσονταν στην Ινδία, το Βιετνάμ, την Ταϊλάνδη και τη Μαλαισία [7].

Μια άλλη ταξινόμηση των διαφόρων κοιτασμάτων και πηγών R.E.E., με βάση τη δυνητική βιομηχανική αξία των εμπεριεχόμενων στοιχείων, σύμφωνα με τους Seredin & Dai [9], κατηγοριοποιεί αυτά τα R.E.E. ως κρίσιμα (Nd, Eu, Tb, Dy, Y, Er), μη κρίσιμα (La, Pr, Sm, Gd) και άφθονα (Ce, Ho, Tm, Yb, Lu). Με βάση αυτόν τον χαρακτηρισμό, οι εν λόγω συγγραφείς ανέφεραν ότι κάθε πιθανή πηγή θα έπρεπε ιδανικά να έχει υψηλή συγκέντρωση σε κρίσιμα R.E.E. και μικρή συγκέντρωση σε άφθονα R.E.E. (ειδικά Ce, που είναι το πιο άφθονο στη φύση) [7]. Το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ προβλέπει ως τα πιο κρίσιμα στοιχεία σπάνιων γαιών τα Nd, Eu, Tb, Dy και Y, για το διάστημα 2015-2025, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6: Πρόβλεψη κρισιμότητας του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ (2015-2025)
<https://css.umich.edu/publications/factsheets/material-resources/critical-materials-factsheet>.

Προκειμένου να χαρακτηριστεί περαιτέρω το υπό διερεύνηση υλικό, χρησιμοποιούνται οι δείκτες Outlook Coefficient και Critical % που περιγράφονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$Outlook\ Coef. = \frac{(Nd + Eu + Tb + Dy + Er + Y)/\sum REE}{(Ce + Ho + Tm + Yb + Lu)/\sum REE} \quad (1)$$

$$Critical\ \% = \frac{(Nd + Eu + Tb + Dy + Er + Y)}{\sum REE} \times 100 \quad (2)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις εμπεριέχουν στον αριθμητή τη συγκέντρωση συγκεκριμένων στοιχείων R.E.E. (σε ppm) που βρίσκεται σε κάθε πηγή, και το ΣREE είναι το συνολικό άθροισμα των επιμέρους συγκεντρώσεων των στοιχείων αυτών στην εν λόγω πηγή. Προφανώς, όσο υψηλότερος είναι ο δείκτης Outlook Coefficient, τόσο πιο πολλά υποσχόμενη είναι η πηγή R.E.E., σε σχέση με την δυνητική βιομηχανική αξία των στοιχείων που φιλοξενεί. Σύμφωνα με τους Dai et al. [10], πηγές που στις οποίες η τιμή του δείκτη Outlook Coefficient κυμαίνεται μεταξύ 0,7 και 1,9 θα πρέπει να θεωρούνται πολλά υποσχόμενες.

Οι ίδιοι συγγραφείς αναφέρουν ότι υπάρχουν διαφορετικά μοτίβα κατανομής εμπλουτισμού R.E.E. σε διαφορετικές πηγές τέφρας άνθρακα. Οι τέφρες άνθρακα μπορεί να είναι εμπλουτισμένες σε κατανομή τύπου L (Light), τύπου M (Medium) ή τύπου H (Heavy), σε σχέση με τις συγκεντρώσεις αυτών των στοιχείων στον ανώτερο ηπειρωτικό φλοιό (Upper Continental Crust - U.C.C.) που προσδιορίζουν τον τύπο N (Normal) [9]. Ο παραπάνω χαρακτηρισμός δηλαδή βασίζεται σε μια «κανονικοποίηση» των συγκεντρώσεων των R.E.E. σε σχέση με τις αντίστοιχες, σταθερές τιμές του U.C.C. Αυτά τα μοτίβα δείχνουν το γεωλογικό υπόβαθρο και τις διαδικασίες σχηματισμού του κοιτάσματος λιγνίτη από το οποίο έχει προκύψει η εκάστοτε υπό μελέτη τέφρα. Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο κατανομής τύπου L ($LaN/LuN > 1$) είναι ενδεικτικό τυρφώδους προέλευσης στην οποία ο εμπλουτισμός σε R.E.E. συνέβη κατά το πρώτο στάδιο σχηματισμού του λιγνίτη. Σε αυτόν τον τύπο μοτίβου, οι τιμές του Outlook Coefficient κυμαίνονται μεταξύ 0,5 και 0,9. Μια κατανομή R.E.E. τύπου M ($(LaN/SmN < 1)$, $(GdN/LuN > 1)$) σχετίζεται με την παροχή R.E.E. από όξινα υδροθερμικά διαλύματα και οι τιμές Outlook Coefficient κυμαίνονται μεταξύ 0,8 και 1,3. Τέλος, ο τύπος κατανομής H ($LaN/LuN < 1$) σχετίζεται με την κυκλοφορία φυσικού νερού εμπλουτισμένο σε H.R.E.E. σε λιγνιτοφόρες λεκάνες. Οι τιμές του Outlook Coefficient κυμαίνονται μεταξύ 0,9 και 3,8 [9]. Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι οι τέφρες διαφορετικής γεωλογικής προέλευσης μπορεί να συμπεριφερθούν διαφορετικά στις διάφορες μεθόδους εμπλουτισμού που μπορεί να εφαρμοστούν πριν το στάδιο της κυρίως ανάκτησης των R.E.E. [11].

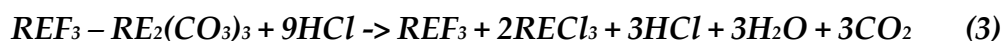
Λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα περιορισμένα κοιτάσματα όσο και την υψηλή αξία των R.E.E., η ανακύκλωση αυτών των στοιχείων από προϊόντα που φτάνουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους αναμένεται να γίνει πολύ ουσιαστική για την παγκόσμια οικονομία και βιομηχανία. Προς το παρόν, η ανακύκλωση πραγματοποιείται μόνο από υλικά scrap, μαγνήτες νεοδυμίου ($NdFeB$) και οι ενώσεις που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή λαμπτήρων φθορισμού και καταλυτών. Ωστόσο, και πολλά προϊόντα που περιέχουν σχετικά μεγάλες συγκεντρώσεις R.E.E. θα μπορούσαν να ανακυκλωθούν άμεσα, χρησιμοποιώντας τις ήδη υπάρχουσες τεχνικές. Αυτά περιλαμβάνουν τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου ($Ni-MH$) που περιέχουν μερικά γραμμάρια έως λίγα κιλά κραμάτων, με βάση το $LaNi_5$, ως απορροφητή υδρογόνου, καθώς και μεγάλους μόνιμους μαγνήτες με βάση το $Nd_2Fe_{14}B$. Όλα αυτά τα υλικά εμπεριέχουν 25-30 % w/w L.R.E.E., πολύ περισσότερο δηλαδή από ό,τι ακόμη και το πιο πλούσιο μέταλλευμα που φιλοξενεί R.E.E.. Ωστόσο, η πλειονότητα των ηλεκτρονικών συσκευών περιέχει μόνο μικρές ποσότητες R.E.E.. Για παράδειγμα, ο μαγνήτης ενός σκληρού δίσκου περιέχει μόνο μερικά γραμμάρια $Nd_2Fe_{14}B$. Ένας μαγνήτης στα ηχεία ενός κινητού τηλεφώνου αποτελεί λιγότερο από το 0,1 % της συνολικής μάζας του τηλεφώνου. Ένας συμπαγής λαμπτήρας φθορισμού έχει μόνο ένα κλάσμα του γραμμαρίου R.E.E. [12].

2.3 ΑΝΑΚΤΗΣΗ R.E.E. ΑΠΟ ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ

Η ανακύκλωση και ανάκτηση R.E.E. από tailings ορυχείων, scraps και άλλα προϊόντα που έχουν ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής τους προσφέρει εξαιρετικές ευκαιρίες για την εξασφάλιση της προμήθειας R.E.E. στην Ευρώπη. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι βασικές πρωτογενείς πηγές που φιλοξενούν R.E.E. είναι ο μπαστνασίτης και ο μοναζίτης [13].

1) Ανάκτηση από Μπαστνασίτη

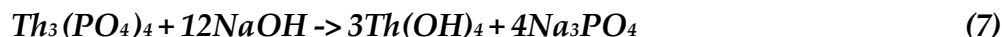
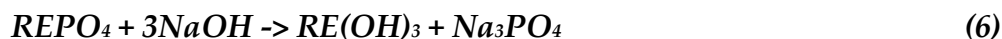
Ο μπαστνασίτης ((La, Ce, Y)CO₃F) είναι ορυκτό το οποίο περιέχει L.R.E.. Μετά τις φυσικές διεργασίες εμπλουτισμού, τα συμπυκνώματα μεταλλευμάτων μπαστνασίτη έχουν περιεκτικότητα από 40 έως 60% R.E.E.. Ένα από τα βασικά προβλήματα στις παλαιότερες τεχνολογίες κατεργασίας μπαστνασιτών ήταν η αδυναμία εξαγωγής των φθοριδίων R.E.E.. Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε σήμερα με δύο διαφορετικούς τρόπους: προ/μετα-κατεργασία με αλκαλικές ενώσεις ή ψήσιμο με θειικό οξύ. Η αλκαλική κατεργασία, που αναπτύχθηκε από τους Kruesi και Duker της Molycorp [14], αποτελείται από μια διαδικασία σε τρία βήματα, χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες αντιδράσεις:



Το μεταλλουργικό ψήσιμο με θειικό οξύ (H₂SO₄) είναι η άλλη κύρια διεργασία που χρησιμοποιείται επί του παρόντος στην αγορά, για την κατεργασία του μπαστνασίτη. Σε αυτήν την διεργασία, το συμπύκνωμα μπαστνασίτη θερμαίνεται σε διάλυμα H₂SO₄ 98 % στους 500°C, για αρκετές ώρες. Αυτό αποσυνθέτει τη φθοροανθρακική φάση του μπαστνασίτη, που οδηγεί στην απελευθέρωση του CO₂ και αερίου HF. Τα R.E.E. μετατρέπονται στις θεικές ρίζες τους και μπορεί να καταβυθιστούν επιλεκτικά με έκπλυση του ιζήματος με νερό που περιέχει NaCl. Η διεργασία αυτή χρησιμοποιείται επί του παρόντος στο ορυχείο Bayan Obo στην Κίνα, ενώ την αλκαλική μέθοδο χρησιμοποιούσε η Molycorp στο ορυχείο Mountain Pass πριν κλείσει [14].

2) Ανάκτηση από Μοναζίτη

Ο μοναζίτης ((Ce, La, Pr, Nd, Th, Y)PO₄) είναι ένα φωσφορικό ορυκτό που περιέχει κυρίως L.R.E.E. και σε μικρότερο βαθμό H.R.E.E.. Μπορεί να περιέχει έως και 70 % R.E.E., κυρίως δημήτριο (Ce) και λανθάνιο (La), καθώς και σημαντικές ποσότητες νεοδυμίου (Nd) και πρασεοδυμίου (Pr). Η περιεκτικότητα σε θούλιο (Th) είναι επίσης αρκετά υψηλή, από 4 έως 12 %. Η αλκαλική κατεργασία είναι μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες έκπλυσης μοναζίτη και περιλαμβάνει τις εξής αντιδράσεις:



Αυτή η διεργασία απαιτεί καλή λειοτρίβιση του μοναζίτη πριν από την αντίδραση (μέγεθος σωματιδίων < 45 μm) έτσι ώστε ποσοστά ανάκτησης μέχρι και 98 % να μπορούν να επιτευχθούν ακόμη και με μεταλλεύματα χαμηλής ποιότητας (αυστραλιανός μοναζίτης 48,6 % REE³⁺) [14].

2.4 ΑΝΑΚΤΗΣΗ R.E.E. ΑΠΟ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ

3) Ανάκτηση από την ιπτάμενη τέφρα (C.F.A.)

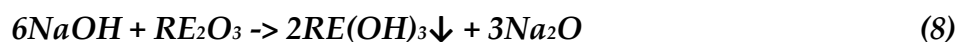
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ιπτάμενη τέφρα (Coal Fly Ash, C.F.A.) και η τέφρα βάσης (Bottom Coal Ash, B.C.A.) από την καύση του λιγνίτη αποτελούν παραπροϊόντα που θεωρούνται, κατά συνθήκη, καλές εναλλακτικές πηγές R.E.E., με την C.F.A. να είναι καλύτερη πηγή, καθώς, σε γενικές γραμμές, αποτελείται σε μεγαλύτερο ποσοστό από άμορφη υαλώδη φάση (>70 %), σε σχέση με την B.F.A. (≈ 60 %). Όπως απέδειξαν οι Wang et al. μελετώντας τέφρες του ατμοηλεκτρικού σταθμού Luzhou, στην επαρχία Sichuan της Κίνας, πάνω από το 90% του περιεχόμενου ποσοστού R.E.E. συνδέεται με την άμορφη υαλώδη φάση στην C.F.A., σε αντίθεση με την B.F.A. όπου το αντίστοιχο ποσοστό R.E.E. στην υαλώδη φάση είναι μικρότερο από 50 % [15].

Η C.F.A. είναι καλύτερη πηγή R.E.E. για τους εξής λόγους: (i) Η ποσότητα της C.F.A. που παράγεται ετησίως είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της παραγόμενης B.F.A. που αντιστοιχεί μόνο στο 10-20 % της ολικής παραγόμενης ποσότητας τέφρας, (ii) Η C.F.A. έχει μικρότερο μέγεθος σωματιδίων και λιγότερη περιεκτικότητα σε άκαυστο άνθρακα (λιγότερο οργανικό υλικό που δεν έχει καεί) από την B.F.A. και η περιεκτικότητα σε άμορφη υαλώδη φάση στην C.F.A. είναι μεγαλύτερη από αυτή της B.F.A, καθιστώντας έτσι C.F.A. πιο ελκυστικό στόχο για ανάκτηση R.E.E., (iii) μεγαλύτερο ποσοστό των R.E.E. υπάρχει στην C.F.A. παρά στην B.F.A. και σχετίζεται με την άμορφη αργυλοπιριτική υαλώδη φάση, που ξεπλένεται πιο εύκολα από οξέα [15]. Αναφορικά με τις τέφρες τις Δυτικής Μακεδονίας, η αρχική συγκέντρωση σε R.E.E. καθώς και μια διαδοχική διεργασία μεθόδων εμπλουτισμού εφαρμόστηκε σε δείγματα C.F.A. που ελήφθησαν από τον ΑΗΣ Μελίτης στη Φλώρινα, από τον συντάκτη αυτής τη εργασίας [8]. Στο τέλος του κεφαλαίου θα παρουσιαστούν τα σχετικά δεδομένα.

Για την κυρίως ανάκτηση των R.E.E. από C.F.A. έχουν προταθεί τα τελευταία χρόνια αρκετές μεθοδολογίες, με τις πιο συνηθισμένες να αποτελούνται από μια διαδοχική κατεργασία με βάσεις και οξέα όπως αυτή που προτάθηκε από τους Wang et al [15]. Στην εργασία τους επιχειρήθηκε η διάλυση της C.F.A. και της B.C.A. με υδροφθορικό οξύ 4 % (HF) και αποδείχθηκε ότι το ≈ 90% όλων των R.E.E. στην C.F.A. σχετίζονται με την άμορφο υαλώδη φάση.

Μια διαδοχική διεργασία έκπλυσης με NaOH-HCl χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή της ικανότητας εξαγωγής των R.E.E. από την C.F.A. του εργοστασίου Luzhou. Διερευνήθηκαν και οι πειραματικές μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένης της συγκέντρωσης του διαλύτη, της αναλογίας υγρού προς στερεό, της θερμοκρασίας έκπλυσης και του χρόνου έκπλυσης. Οι βέλτιστες συνθήκες χώνεψης με NaOH έδωσαν ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση κατά 41,10 % του SiO₂ και τον αντίστοιχο εμπλουτισμό σε R.E.E. που έφτασε σε ποσοστό 39,43 %. Τελικά, η έκπλυση με HCl της αποπυριτιομένης C.F.A. πέτυχε 88,15 % απόδοση εξαγωγής R.E.E. υπό τις βέλτιστες πειραματικές συνθήκες [15].

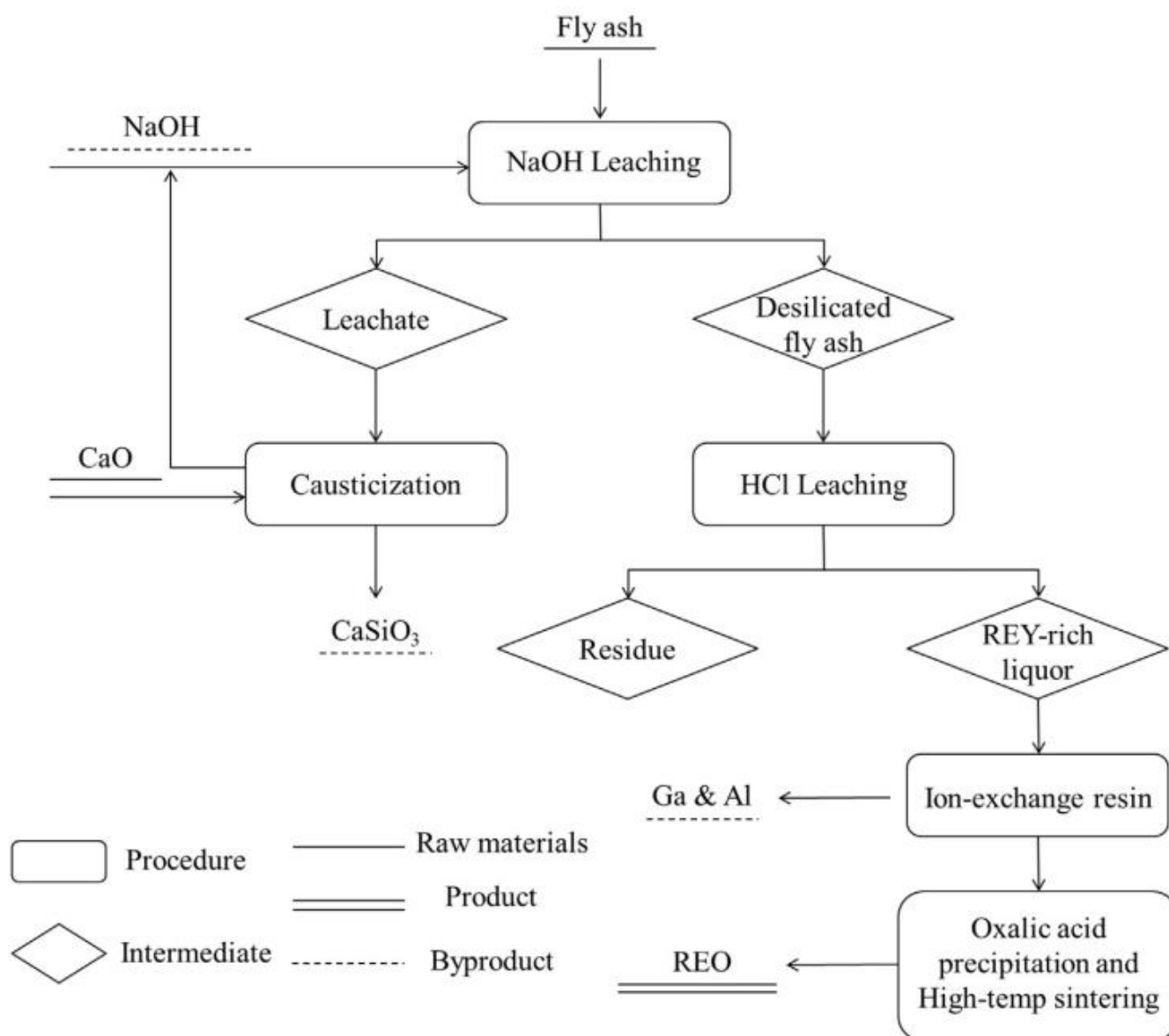
Πιο συγκεκριμένα, 10 gr δείγματος αναμίχθηκαν με 200 ml διαλύματος HF 4 %. Τα μείγματα ανακινήθηκαν με το χέρι και στη συνέχεια φυγοκεντρήθηκαν σε 25 rpm για 24 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου. Μετά την φυγοκέντρωση, τα στερεά ιζήματα διηθήθηκαν με απιονισμένο νερό (DI) και ξεπλύθηκαν τουλάχιστον τρεις φορές, και στη συνέχεια ξηράνθηκε σε θερμοστατικό φούρνο στους 60 °C. Υποσύνολα του ιζήματος υποβλήθηκαν περαιτέρω σε ανάλυση ICP-MS και XRD. Η διαδικασία έκπλυσης που ακολουθήθηκε περιελάμβανε δύο διαδοχικές διαδικασίες έκπλυσης από NaOH και HCl, αντίστοιχα. Μετά την έκπλυση με NaOH, το αποπυριτιομένο δείγμα C.F.A. ξεπλύθηκε με απιονισμένο νερό και ξηράνθηκε σε φούρνο, όπως περιγράφεται παραπάνω, και υποβλήθηκε σε αναλύσεις XRF και ICP-MS. Οι αντιδράσεις μεταξύ C.F.A. και NaOH περιγράφονται παρακάτω:



Το NaOH μετατρέπει τα R.E.E. σε αδιάλυτα στερεά (RE(OH)₃) ενώ το SiO₂ απομακρύνεται μέσω της μετατροπής του σε Na₂SiO₃ (ευδιάλυτη φάση). Επιτυγχάνεται δηλαδή ο εμπλουτισμός της C.F.A. σε R.E.E. με την απομάκρυνση του SiO₂ [15]. Στη συνέχεια, μετά την χώνεψη με NaOH η αποπυριτιομένη C.F.A. εκπλύθηκε με HCl. Στην έκπλυση με HCl, το HCl διαλύει τα αδιάλυτα υδροξείδια RE(OH)₃ και δημιουργούνται πλέον διαλυτά χλωρίδια R.E.E. (RECl₃). Η έκπλυση αυτή συνοψίζεται στην παρακάτω αντίδραση.



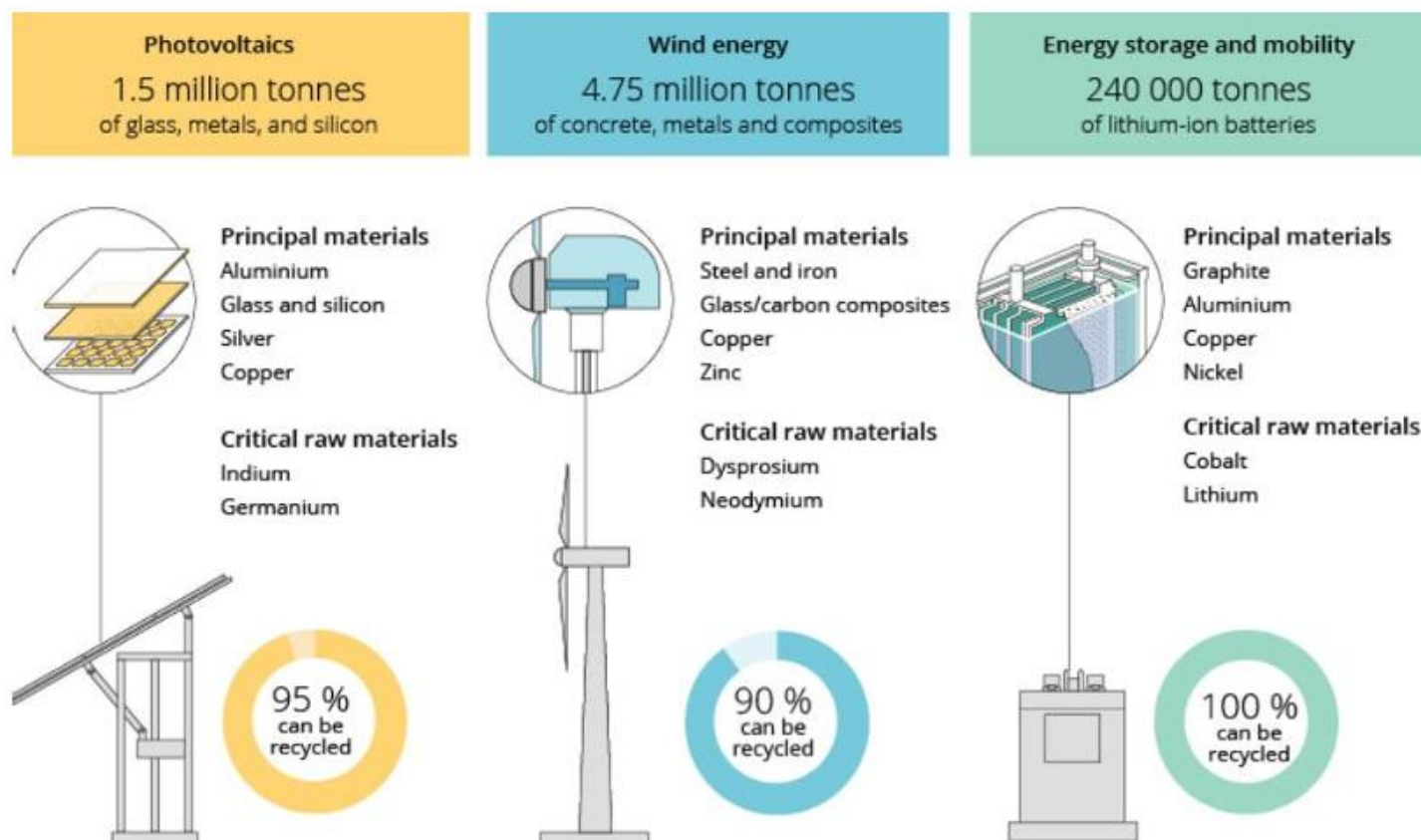
Αν και η απόδοση εξαγωγής R.E.E. μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την γεωλογική προέλευση των διαφόρων πηγών C.F.A., η παραπάνω διεργασία μπορεί να εφαρμοστεί για την ανάκτηση σε κάθε δομή όπως αυτή που επιχειρείται να περιγραφεί σε αυτήν την εργασία. Συνολικά η διεργασία παρουσιάζεται σχηματικά παρακάτω. Αξίζει να σημειωθεί πως η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και για ανάκτηση R.E.E. από μπαστνασίτη και μοναζίτη. Η συνολική διεργασία ανάκτησης αποτυπώνεται στην Εικόνα 7.



Εικόνα 7: Διάγραμμα ροής ανάκτησης R.E.E. από την C.F.A. του εργοστασίου Luzhou (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166516218310097>).

4) Ανάκτηση από μόνιμους μαγνήτες (NdFeB)

Οι μόνιμοι μαγνήτες νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου (NdFeB) χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε πράσινες τεχνολογίες, όπως οι ανεμογεννήτριες και ηλεκτρικά οχήματα. Σε σύγκριση με την πρωτογενή παραγωγή, η ανακύκλωση μαγνητών NdFeB εξαλείφει τις πιο δαπανηρές και περιβαλλοντικά επιζήμιες πτυχές των παραγωγικών διαδικασιών για τα R.E.E., όπως η εξόρυξη, ο εμπλουτισμός, η έκπλυση και η εκχύλιση με διαλύτες. Η μέγιστη διάρκεια ζωής μιας ανεμογεννήτριας εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ 20 και 25 χρόνων. Επομένως, μπορεί κανείς να αναμένει ότι μια μεγάλη ποσότητα μαγνητών από ανεμογεννήτριες θα είναι διαθέσιμη μετά το 2025, και, συνεπώς, κρίνεται επιτακτική η ανάπτυξη κατάλληλων οδών ανακύκλωσης με στόχο την αξιοποίηση αυτού του όγκου υλικών.



Εικόνα 8: Ανάκτηση CRM από ΑΠΕ (<https://www.airclim.org/acidnews/material-recovery-opportunities-clean-energy-sector>).

Ενδεικτικά, αναφέρεται η μεθοδολογία των Pietrantonio et al. για την ανάκτηση οξειδίων σπανίων γαιών (R.E.O.) και FeOH_3 από μαγνήτες NdFeB με μια υδρομεταλλουργική μέθοδο, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας [16]. Σε αυτήν την εργασία, τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν παραχωρήθηκαν από την εταιρεία “The Switch A Yaskawa Company” και η σύστασή τους, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 9, θεωρείται αντιπροσωπευτική για κάθε ανακυκλώμενο μαγνήτη [17].

Fe	Nd	Pr	Co	Tb	B
<i>Composition (mg g⁻¹)</i>					
690±47	198±23	60±9	16±1	10±1	9±1
Cu	Al	Ni	Dy	Mn	Cr
1.6±0.3	1.2±0.2	<0.07	<0.6	<0.1	<0.04

Εικόνα 9: Τυπική σύσταση μαγνήτη NdFeB

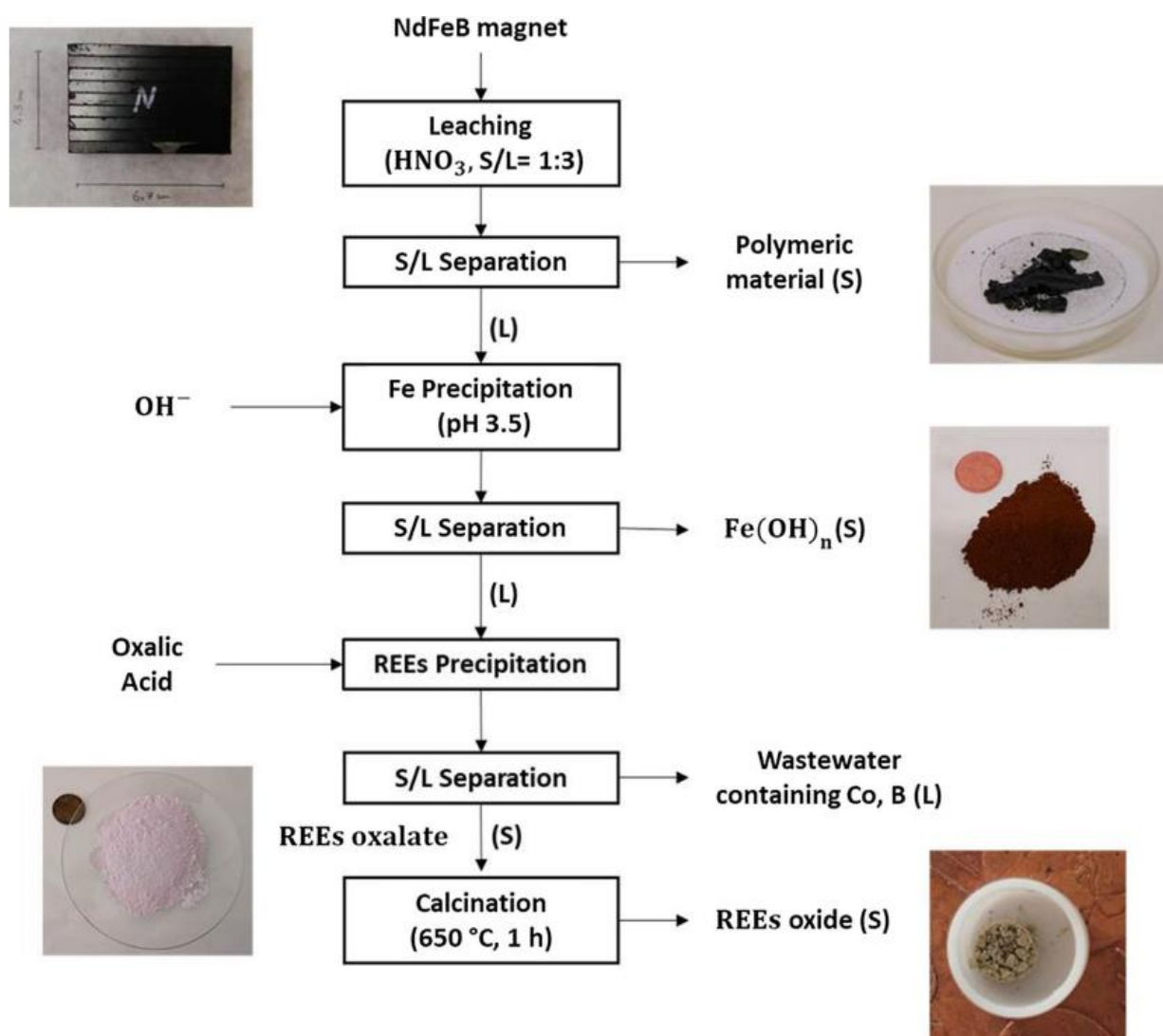
(https://www.researchgate.net/publication/353347623_Materials_recovery_from_end-of-life_wind_turbine_magnets).

Το κράμα του μαγνήτη συνήθως περιέχει 60–70 wt % σίδηρο, 28–35 wt % R.E.E. (Pr, Nd, Tb, Dy), 1–2 wt % βόριο και 0–4 wt % κοβάλτιο, ενώ για μια ανεμογεννήτρια απαιτούνται 250–650 kg μαγνήτη NdFeB για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια 1 MW [17]. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται το βάρος του NdFeB μαγνήτη ανά μονάδα ισχύος παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και η αντίστοιχη περιεκτικότητα σε Nd.

Power (MW)	NdFeB Magnet (kg)	NdFeB per kW (kg)	Nd per kW (kg) ⁽¹⁾	Ref.
3.5	2000	0.6	0.2	Lucas et al., 2015
1.5	350	0.2	0.06	European Parliament briefing, 2013
1	700	0.7	0.15	Rademaker et al., 2013 ⁽²⁾

Εικόνα 10: Περιεχόμενο NdFeB σε μόνιμους μαγνήτες σε ανεμογεννήτριες (<https://www.ree4eu.eu/public-documents/>).

Η συνολική διεργασία περιλαμβάνει βήματα με διαδοχικές καθιζήσεις, με την τελική καθίζηση να οδηγεί στην παραγωγή οξαλικού R.E.E. το οποίο τελικά μετατρέπεται σε R.E.O. μέσω φρύξης στους 650 °C. Η διεργασία αποτυπώνεται στο διάγραμμα ροής της Εικόνας 11.



Εικόνα 11: Διάγραμμα ροής για την ανάκτηση Fe(OH)_3 και R.E.O. από μαγνήτες NdFeB (https://www.researchgate.net/publication/353347623_Materials_recovery_from_end-of-life_wind_turbine_magnets).

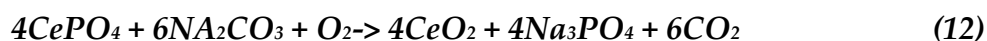
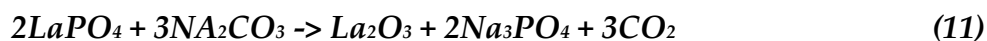
Συνοψίζοντας, η διαδικασία βασίζεται σε αρχική έκπλυση με HNO_3 (αναλογία στερεού/υγρό=1:3, $t=24$ ώρες) που επέτρεψε διάλυση του μαγνήτη χωρίς διάλυση του πολυμερικού film, το οποίο στη συνέχεια διαχωρίστηκε εύκολα σε αυτό το βήμα. Ως εκ τούτου αποφεύγεται ο κίνδυνος μόλυνσης με οργανικές ενώσεις. Στη συνέχεια, ο σίδηρος διαχωρίστηκε από το έκπλυμα μέσω καθίζησης με βάσεις (40 % w/w NaOH / 28% w/w NH_4OH) σε pH 3,5, ενώ η καθίζηση των R.E.E. επιτεύχθηκε με ένα δεύτερο βήμα καθίζησης με κορεσμένο διάλυμα οξαλικού οξέος ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$). Τα λαμβανόμενα προϊόντα ($\text{Fe}(\text{OH})_3$ και οξαλικό R.E.E. $_2\text{Ox}_3$) έχουν βαθμό καθαρότητας περίπου 98 και 99%, αντίστοιχα. Το μικτό R.E.E. $_2\text{Ox}_3$ μετατράπηκε σε R.E.O., με φρύξη στους 650 °C για μία ώρα. Η παραπάνω διεργασία είναι σχετικά απλή και θα μπορούσε εύκολα να εφαρμοστεί σε ημιβιομηχανική ή ακόμα και βιομηχανική κλίμακα [16].

5) Ανάκτηση από λαμπτήρες φθορισμού (CFL - LFL) και λαμπτήρες LED

Με την αυξανόμενη χρήση λαμπτήρων φθορισμού (Compact fluorescent lamp - CFL) και LED, και την αναλόγως αυξανόμενη ποσότητα σχετικών απόβλητων, οι λαμπτήρες αποτελούν μια ενδιαφέρουσα δευτερεύουσα πηγή για ανάκτηση κρίσιμων μετάλλων (Y, Eu, Tb, Ce). Οι εν λόγω λαμπτήρες αποτελούν σημαντική τεχνολογική εφαρμογή των R.E.E. και αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 30 % της συνολικής χρηματιστηριακής αξίας τους σήμερα. Αυτά τα υλικά αποτελούνται από ένα μείγμα κόκκινου $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:Eu}^{3+}$ (YOX), πράσινου $\text{LaPO}_4\text{:Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$ (LAP), $(\text{Gd}, \text{Mg})\text{B}_5\text{O}_{10}\text{:Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$, (CBT), $\text{CeMgAl}_{11}\text{O}_{19}\text{:Tb}^{3+}$ (CAT) και μπλε $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}\text{:Eu}^{2+}$ (BAM) φωσφόρου. Οι περισσότερες μελέτες σήμερα επικεντρώνονται στην ανάκτηση του υτρίου και του ευρωπίου από τον κόκκινο φώσφορο YOX, επειδή είναι τα στοιχεία που ανακτώνται ευκολότερα και αντιπροσωπεύουν την υψηλότερη αξία στα απόβλητα φωσφόρου. Η ανακύκλωση των πράσινων φωσφόρων (LAP, CAT) είναι επίσης πολύ ενδιαφέρουσα λόγω της υψηλής συγκέντρωσης του κρίσιμου και ακριβού τερβίου. Ωστόσο, οι πράσινοι φώσφοροι είναι πολύ πιο δύσκολο να διαλυθούν από το YOX, απαιτώντας μεγάλες συγκεντρώσεις οξέων σε συνδυασμό με μεγάλες θερμοκρασίες (ενεργειακή κατανάλωση) [18]. Πιο συγκεκριμένα, μεταξύ αυτών των ενώσεων, η έκπλυση των R.E.E. από το YOX είναι η πιο εύκολη, καθώς διαλύονται σε σχετικά αραιά οξέα (0,5 M H_2SO_4). Συγκριτικά, τα R.E.E. στις άλλες ενώσεις μπορούν να εκπλυθούν μόνο σε συγκέντρωση H_2SO_4 18 M [13]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα R.E.E. στο YOX υπάρχουν ως οξείδια (R.E.O.), ενώ τα R.E.E. στους άλλους φωσφόρους συγκροτούν πολύ ισχυρότερους χημικούς δεσμούς. Βρέθηκε ότι για αυτές τις ενώσεις οι ίδιες μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν και για κατεργασία του μοναζίτη ήταν σχετικά αποτελεσματικές [13]. Παρακάτω περιγράφεται εν συντομία η διεργασία ανάκτησης R.E.E. που διερευνήθηκε από τους Yurramendi et al. και θα μπορούσε να εφαρμοστεί στην προτεινόμενη δομή.

Ένα πρώτο βήμα έκπλυσης πραγματοποιήθηκε στα απόβλητα της λάμπας φθορισμού (λειοτριβημένη σκόνη) για την παραγωγή ιζήματος που θα περιέχει σημαντική ποσότητα R.E.E., υπό τη μορφή των φωσφορικών αλάτων, που θα χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη για τα πειράματα της προτεινόμενης διεργασίας. Η αρχική έκπλυση έγινε με H_2SO_4 2,65 M στους 70 °C για 2 ώρες, με αναλογία στερεού προς υγρό (S/L) 155 g/L [12]. Στην συνέχεια ακολούθησε η διαδικασία χώνεψης με Na_2CO_3 σε κλίβανο, χρησιμοποιώντας κεραμικές κάψες 60 ml και 25 g δείγματος σκόνης, με

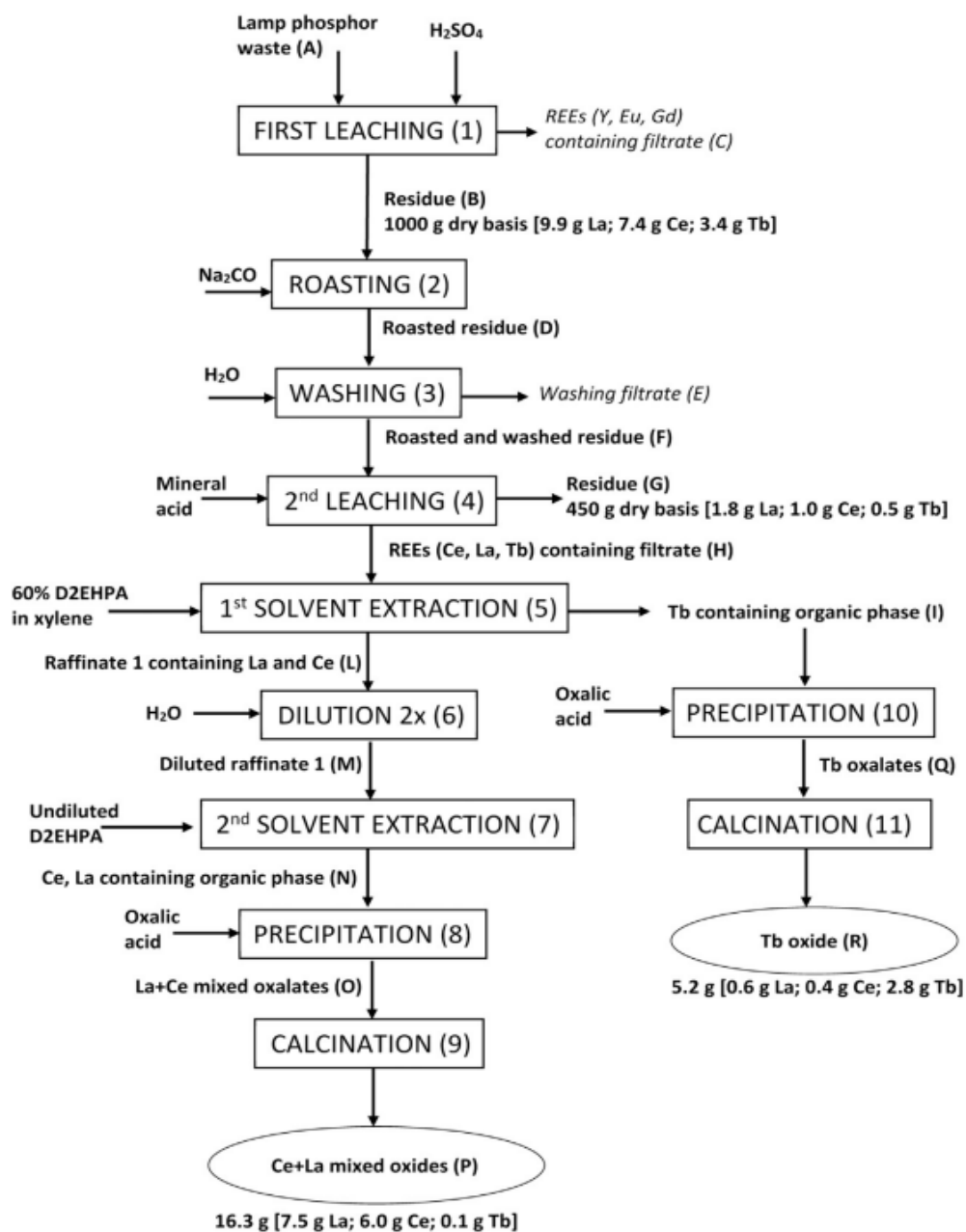
σταδιακή μεταβολή του χρόνου αντίδρασης (1–3 h), της θερμοκρασίας (200–900 °C) και μεταβολή της αναλογίας βάρους δείγματος σκόνης προς Na₂CO₃ (R = 1:0,5, 1:1 και 1:3). Οι αντιδράσεις κατά την χώνεψη με Na₂CO₃ μετατρέπουν τα φωσφορικά R.E.E. σε οξείδια R.E.O και αποτυπώνονται παρακάτω:



Τα προϊόντα της χώνεψης λειοτριβήθηκαν ξανά σε μέγεθος κόκκου < 250 μm και στη συνέχεια εκπλύθηκαν με απεσταγμένο H₂O. Το στάδιο αυτό της έκπλυσης πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία δωματίου για 2 ώρες, ανάδευση στα 200 rpm και αναλογία S/L: 15/100. Το διήθημα αναλύθηκε με ICP-OES για επαλήθευση της απουσίας R.E.E. Το ίζημα, μετά την παραπάνω διεργασία χώνεψης και έκπλυσης, εκπλύθηκε εκ νέου με οξέα (HCl και H₂SO₄) [12]. Το τελικό στάδιο περιελάμβανε την ανάκτηση R.E.E. από έκπλυμα που ελήφθησε από την παραπάνω πυρο-υδρομεταλλουργική διεργασία μέσω εκχύλισης με εκχυλιστικό μέσο το D2EHPA (di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid) [12]. Διάφορες πειραματικές συνθήκες μελετήθηκαν, όπως η αραιώση του εκπλύματος σε νερό, η συγκέντρωση του εκχυλιστικού μέσου (50 - 100 vol % D2EHPA σε ξυλόλιο) και αναλογία όγκου οργανικό προς υδατικό (O/A: 0,2 - 1). Ο χρόνος επαφής και η θερμοκρασία ρυθμίστηκε σε 1 ώρα και 25 °C, αντίστοιχα. Η οργανική φάση διαχωρίστηκε από το έκπλυμα με φυγοκέντριση και η συγκέντρωση του μετάλλου στο εμπλουτισμένο προϊόν αναλύθηκε με φασματοσκοπία TXRF, για να υπολογιστεί το ποσοστό εξαγωγής. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάκτηση των R.E.E. από την εμπλουτισμένη οργανική φάση μέσω καθίζησης με οξαλικό οξύ (C₂H₂O₄). Η εμπλουτισμένη οργανική φάση ήρθε σε επαφή με ένα υδατικό διάλυμα οξαλικού οξέος (1,5 M) σε γυάλινα φιαλίδια σε μηχανικό αναδευτήρα για 40 λεπτά [12]. Μετά τη φυγοκέντριση, η απόδοση καθίζησης προσδιορίστηκε με μέτρηση της συγκέντρωσης μετάλλου στην οργανική φάση με φασματοσκοπία TXRF. Τα ανακτηθέντα μικτά οξαλικά μετατράπηκαν τελικά στα αντίστοιχα οξείδια με πύρωση (T = 700 °C, t = 4 hr) [12].

Η προτεινόμενη διαδικασία επιτρέπει την ανάκτηση των τερβίου, λανθανίου και δημητρίου από υπολείμματα έκπλυσης λαμπτήρων φθορισμού με συνδυασμό πυρο-υδρομεταλλουργικών διεργασιών. Η χώνεψη με Na₂CO₃ (T = 900 °C) βελτίωσε το ποσοστό έκπλυσης των R.E.E. μετατρέποντας τα φωσφορικά άλατα σπάνιων γαιών (REPO₄) σε οξείδια (R.E.O). Η έκπλυση με HCl αποδείχθηκε αποτελεσματικότερη από την έκπλυση με H₂SO₄, φτάνοντας σε αποδόσεις ανάκτησης 86% για το δημήτριο, 81% για το λανθάνιο και 85 % για το τέρβιο. Λόγω της υψηλής οικονομικής του αξίας, το τέρβιο είναι το κύριο στοιχείο που πρέπει να ανακτηθεί και η χρήση του HCl ως διαλύτη βελτιώνει την ανάκτησή του. Ωστόσο, το συγκεκριμένο βήμα έκπλυσης είναι φθηνότερο όταν χρησιμοποιείται το H₂SO₄, ενώ με το HCl πρέπει να ληφθούν υπόψη τεχνικά και περιβαλλοντικά ζητήματα (όπως προβλήματα διάβρωσης όταν χρησιμοποιείται το HCl). Η ανάκτηση των R.E.E. από

το έκπλυμα HCl διερευνήθηκε μέσω εκχύλισης με εκχυλιστικό μέσο το D2EHPA σε ξυλόλιο. Το 96% του τερβίου εκχυλίστηκε σε ένα μόνο στάδιο με 60 % D2EHPA, με περιορισμένη συνεκχύλιση δημητρίου και λανθανίου. Στο δεύτερο στάδιο εκχύλισης, 93 % λανθανίου και 95 % δημητρίου εκχυλίστηκαν σε δύο στάδια με αδιάλυτο D2EHPA. Τέλος, τα R.E.E. ανακτήθηκαν από τις εμπλουτισμένες οργανικές φάσεις μέσω καθίζησης με οξαλικό οξύ, ακολουθούμενη από πύρωση για την παραγωγή των αντίστοιχων οξειδίων R.E.O. Συνοψίζοντας, η αποτελεσματικότητα ανάκτησης που επιτεύχθηκε με την προτεινόμενη διαδικασία ήταν 82 %, 75 % και 82 % για το δημήτριο, το λανθάνιο και το τέρβιο, αντίστοιχα. Ένα βασικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης διαδικασίας είναι οι σχετικά ήπιες πειραματικές συνθήκες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν (2 hr, 70 °C) με τις οποίες επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση έκπλυσης [12]. Το διάγραμμα ροής της διεργασίας αποτυπώνεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12: Ανάκτηση R.E.O. από λαμπτήρες <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X18308326>.

6) Μελέτη περιεκτικότητας και εμπλουτισμού R.E.E. σε τέφρες του ΑΗΣ Μελίτης Φλώρινας

Δεδομένου ότι η συγκέντρωση των R.E.E. στην τέφρα δεν είναι κάτι σταθερό αλλά ποικίλει, ανάλογα τα γεωλογικά και γεωχημικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε λιγνιτοφόρου περιοχής, πρέπει να προσδιοριστεί μια αρχική συγκέντρωση στην οποία θα βασιστεί μια σχετική μελέτη σκοπιμότητας. Η αρχική συγκέντρωση σε R.E.E. τεφρών από διάφορα σημεία των ΑΗΣ και των αποθέσεων της Δυτικής Μακεδονίας έχει μελετηθεί από τον γράφοντα αυτής της εργασίας και παρακάτω θα παρουσιαστούν ενδεικτικά στοιχεία που αφορούν την αρχική συγκέντρωση και τον εμπλουτισμό των R.E.E. δειγμάτων C.F.A. του ΑΗΣ Μελίτης, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για να καταστρωθούν στα επόμενα κεφάλαια τα απαραίτητα ισοζύγια μάζας που απαιτούνται για τους οικονομοτεχνικούς υπολογισμούς [8]. Στην εν λόγω μελέτη, μια μεγάλη ποσότητα C.F.A. και B.C.A. συλλέχθηκε κάθε μέρα, για πέντε ημέρες, από τον ΑΗΣ Μελίτης στη Φλώρινα. Το υλικό αναμείχθηκε και υποβλήθηκε σε τεταρτημοριασμό έτσι ώστε να παραχθούν δύο τελικά δείγματα C.F.A. και B.C.A., αντιπροσωπευτικά του υλικού που ο ΑΗΣ παράγει σε εβδομαδιαία βάση. Τα δύο τελικά δείγματα υποβλήθηκαν σε θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TGA) για τον προσδιορισμό του εναπομείναντος οργανικού υλικού μετά την καύση (Loss On Ignition - LOI). Το περιεχόμενο LOI υποδεικνύει έμμεσα την ποσότητα του άκαυτου άνθρακα οποιουδήποτε δεδομένου δείγματος. Η σύσταση των κύριων και δευτερευόντων στοιχείων των δειγμάτων εξετάστηκε με ανάλυση φθορισμού ακτίνων Χ (XRF), ενώ η περιεκτικότητά τους σε R.E.E. προσδιορίστηκε με φασματοσκοπία μάζας (ICP-MS). Η ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων προσδιορίστηκε με περίθλαση ακτίνων Χ (XRD). Το δείγμα C.F.A. είχε μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε R.E.E. και επιλέχθηκε σαν βάση για μια σειρά μεθόδων εμπλουτισμού [8].

Ο διαχωρισμός μεγέθους σωματιδίων ήταν η πρώτη μέθοδος εμπλουτισμού που εφαρμόστηκε, με ξηρή κοσκίνιση. Το εύρη μεγέθους σωματιδίων που αξιολογήθηκαν ήταν τα ακόλουθα: +50 Mesh (> 297 μm), 50-120 Mesh (297-125 μm), 120-200 Mesh (125-75 μm), 200-325 Mesh (75-44 μm), 325-400 Mesh (44-37 μm) και -400 Mesh (< 37 μm).

Ο υγρός μαγνητικός διαχωρισμός ήταν η δεύτερη μέθοδος εμπλουτισμού που εφαρμόστηκε στην C.F.A. μετά τον διαχωρισμό μεγέθους. Το υλικό τροφοδοσίας της διαδικασίας ελήφθη από το μικρότερο κλάσμα μεγέθους σωματιδίων που προέκυψε από τον διαχωρισμό μεγέθους (-400 Mesh), καθώς ήταν το υλικό, με την καλύτερη (κατά βάρος) ανάκτηση R.E.E.. Για τον πολφό, 120 gr C.F.A. αναμείχθηκαν με 480 ml H₂O (αναλογία στερεού προς υγρό 1:4) και το μείγμα υποβλήθηκε σε μαγνητικό διαχωρισμό, σε δύο διαφορετικές μαγνητικές ροές. (4200 Gauss και 8420 Gauss). Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, τα μαγνητικά ορυκτά προσκολλώνται στις μαγνητικές σφαίρες μέσω του οποίου διέρχεται ο πολφός, ενώ τα μη μαγνητικά ορυκτά εξέρχονται ανεπηρέαστα από τον πυθμένα του διαχωριστή. Μετά από προκαθορισμένο χρόνο, το μαγνητικό πεδίο απενεργοποιείται και το μαγνητικό κλάσμα απελευθερώνεται από τις μαγνητικές σφαίρες. Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας παρουσιάστηκαν στο “1st International Conference on Sustainable Chemical and Environmental Engineering” [8].

Ο υγρός μαγνητικός διαχωρισμός επαναλήφθηκε, αυτή τη φορά με έναν πολφό που υποβλήθηκε σταδιακά σε τρεις διαφορετικές μαγνητικές ροές, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η πιθανή επίδραση της

διακύμανση της μαγνητικής ροής στη συγκέντρωση R.E.E., σε σύγκριση με τη βασική διαδικασία μαγνητικού διαχωρισμός που περιγράφηκε παραπάνω. Ομοίως, 120 gr του υλικού -400 Mesh αναμίχθηκαν με 480 ml νερού (αναλογία στερεού προς υγρό 1:4). Οι διαδοχικές ροές στις οποίες υποβλήθηκε ο πολφός ήταν: 8420 G → 4200 G → 7490 G.

Το τελικό βήμα εμπλουτισμού περιελάμβανε τον διαχωρισμό πυκνότητας με την μέθοδο των βαρέων υγρών, χρησιμοποιώντας ως μέσο το βαρύ υγρό SPT (Sodium Polytungstate). Ο διαχωρισμός πυκνότητας εφαρμόστηκε με υλικό τροφοδοσίας από το κλάσμα -400 Mesh του διαχωρισμού μεγέθους. Η αρχική πυκνότητα του βαρέος υγρού ήταν 3gr/ml και με την αραιώση του αρχικού διαλύματος παρήχθησαν υγρά χαμηλότερης πυκνότητας (2,68 gr/ml, 2,33 gr/ml και 2,06 gr/ml). Το καταβυθισθέν υλικό από τον διαχωρισμό πυκνότητας με μέσο το υγρό στην αρχική του πυκνότητα (3 gr/ml) ήταν πιο εμπλουτισμένο σε R.E.E. σε σχέση με το επιπλεύσαν, γεγονός που έδειξε πως δεν ήταν απαραίτητη η διερεύνηση των υπόλοιπων χαμηλότερων πυκνοτήτων. Τα αποτελέσματα του συνόλου των χημικών αναλύσεων και τα αποτελέσματα των μεθόδων εμπλουτισμού που εφαρμόστηκαν παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

Πίνακας 1: Χημική σύσταση αρχικών δειγμάτων και των κλασμάτων μεγέθους (<https://www.mdpi.com/2673-4605/5/1/69>).

Elements	Bottom Ash	Fly Ash	+50 M	50-120 M	120-200 M	200-325 M	325-400 M	-400M
SiO ₂	38.34	41.07	31.07	31.71	38.84	39.87	40.67	41.37
Al ₂ O ₃	14.86	16.89	15.12	14.56	17.09	16.93	16.85	17.08
Fe ₂ O ₃	12.69	8.52	6.97	7.73	7.92	8.15	8.44	9.35
CaO	17.71	14.83	9.23	15.34	13.31	13.63	15.26	16.03
MgO	2.72	3.73	3.22	3.05	3.38	3.41	3.68	3.85
K ₂ O	1.71	2.05	1.44	1.57	1.93	1.97	2.04	2.15
Na ₂ O	1.53	2.02	0.95	1.08	0.87	1.49	1.77	2.2
SO ₃	3.37	4.32	4.03	2.7	2.64	2.97	4.09	4.88
La	39.93	43.11	45.6	45.4	43.1	41.6	39.2	39.9
Ce	79.38	88.14	91.4	92.1	90.3	89.1	84.3	85.4
Pr	9.06	10.2	10.2	10.4	10.1	10.05	9.45	9.51
Nd	33.87	38.97	38.1	38.4	38.8	38.5	35.7	36.6
Sm	7.21	7.25	7.2	7.75	7.35	7.63	7.19	7.36
Eu	1.26	1.52	1.62	1.62	1.68	1.79	1.62	1.69
Gd	5.59	6.29	7.12	6.72	7.13	7.11	6.96	7.14
Tb	0.86	1.09	0.99	0.99	1.07	1.12	1.03	1.07
Dy	5.51	6.78	6.22	6.39	6.57	6.83	6.22	6.51
Ho	1.17	1.32	1.27	1.3	1.39	1.42	1.32	1.36
Er	3.45	4.02	3.8	3.82	4.08	4.22	3.92	4.11
Tm	0.48	0.61	0.52	0.56	0.6	0.64	0.6	0.58
Yb	3.29	3.82	3.86	3.76	4.22	4.07	3.84	4.15
Lu	0.54	0.58	0.55	0.59	0.58	0.64	0.59	0.63
Y	36.37	40.99	36.5	38.1	39.3	41.1	40.1	41.2
ΣREY	227.92	254.68	254.95	257.9	256.27	255.82	242.04	247.21
Critical (%)	35.67	36.66	34.22	34.63	35.71	36.57	36.61	36.89

Πίνακας 2: Αποτελέσματα διαχωρισμού μεγέθους (<https://www.susteng.eu/p/proceedings>).

Size Fraction	REY Conc. (ppm)	Enrichment Factor	Recovery (%)	Critical (%)
+50 Mesh	254.95	1.001	4.07	34.22
50-120 Mesh	257.9	1.013	14.59	34.63
120-200 Mesh	256.27	1.006	14.17	35.71
200-325 Mesh	255.82	1.005	18.24	36.57
325-400 Mesh	242.04	0.951	11.31	36.61
-400 Mesh	247.21	0.971	37.62	36.89

Πίνακας 3: Χημική σύσταση των επιμέρους κλασμάτων των 2 μαγνητικών διαχωρισμών (<https://www.susteng.eu/p/proceedings>).

Elements	-400M (Feed)	Magn. 7.0 Amp.	Non-Magn. 7.0 Amp.	Magn. 2.0 Amp.	Non-Magn. 2.0 Amp.	Non-Magnetic	Strongly Magnetic	Moderately Magnetic	Weakly Magnetic
SiO ₂	41.37	39.5	41.13	41.03	41.09	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	17.08	17.56	16.72	18.24	16.53	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	9.35	12.05	7.04	13.48	6.95	-	-	-	-
CaO	16.03	14.15	16.26	13.93	16.63	-	-	-	-
MgO	3.85	4.03	3.72	4.41	3.62	-	-	-	-
K ₂ O	2.15	2.08	2.11	2.08	2.13	-	-	-	-
Na ₂ O	2.20	1.43	2.32	1.68	2.31	-	-	-	-
SO ₃	4.88	2.89	5.07	2.41	5.20	-	-	-	-
La	39.9	46.40	38.0	48.7	36.7	35.60	49.90	45.90	37.00
Ce	85.4	90.80	73.9	94.4	72.9	78.70	108.00	93.70	81.20
Pr	9.51	11.05	9.08	11.5	8.95	9.07	12.15	11.00	9.24
Nd	36.6	41.40	35.3	43.4	34.6	32.90	45.70	42.20	34.30
Sm	7.36	7.93	7.13	8.68	6.77	6.91	8.50	8.51	7.25
Eu	1.69	1.60	1.48	1.67	1.37	1.32	2.02	1.69	1.57
Gd	7.14	7.94	6.72	8.42	6.75	6.31	8.50	7.97	6.70
Tb	1.07	1.18	0.99	1.23	1.03	1.00	1.33	1.22	1.02
Dy	6.51	7.60	6.42	8.17	6.2	5.95	8.12	7.51	6.06
Ho	1.36	1.50	1.27	1.56	1.27	1.31	1.72	1.58	1.31
Er	4.11	4.53	3.93	4.75	4.19	3.78	4.76	4.38	3.92
Tm	0.58	0.66	0.56	0.67	0.62	0.58	0.77	0.63	0.59
Yb	4.15	4.51	3.82	4.40	3.98	3.74	4.37	4.19	3.47
Lu	0.63	0.66	0.60	0.64	0.59	0.58	0.73	0.69	0.60
Y	41.2	46.1	38.5	45.8	39.3	37.90	48.50	46.90	40.40
ΣREY	247.21	273.86	227.7	283.99	225.22	225.65	305.07	278.07	234.63
Critical (%)	36.89	37.4	38.04	36.98	38.49	36.72	36.20	37.36	37.19

Πίνακας 4: Αποτελέσματα πρώτου μαγνητικού διαχωρισμού (<https://www.susteng.eu/p/proceedings>).

Fraction Current/M.Flow	REY Conc. (ppm)	Enrichment Factor	Recovery (%)	Critical (%)
Magn. 7.0 A./8420 G.	273.86	1.108	52.36	37.40
Non-Magn. 7.0 A./8420 G.	227.70	0.921	47.64	38.04
Magn. 2.0 A./4200 G.	283.99	1.149	45.77	36.98
Non-Magn. 2.0 A./4200 G.	225.22	0.911	54.23	38.49

Πίνακας 5: Αποτελέσματα δεύτερου μαγνητικού διαχωρισμού (<https://www.susteng.eu/p/proceedings>).

Fraction Current/M.Flow	REY Conc. (ppm)	Enrichment Factor	Recovery (%)	Critical (%)
Non-Magnetic	225.65	0.913	46.80	36.72
Strongly Magnetic	305.07	1.234	31.17	36.20
Moderately Magnetic	278.07	1.125	13.11	37.36
Weakly Magnetic	234.63	0.949	8.92	37.19

Πίνακας 6: Περιεχόμενο R.E.E. του καταβυθισθέντος κλάσματος στα 3 gr/ml του διαχωρισμού πυκνότητας.

Elements	-400M (Feed)	SINK (@ 3gr/ml)	FLOAT (@ 3gr/ml)
SiO ₂	41.37	-	-
Al ₂ O ₃	17.08	-	-
Fe ₂ O ₃	9.35	-	-
CaO	16.03	-	-
MgO	3.85	-	-
K ₂ O	2.15	-	-
Na ₂ O	2.20	-	-
SO ₃	4.88	-	-
La	39.9	42.30	33.30

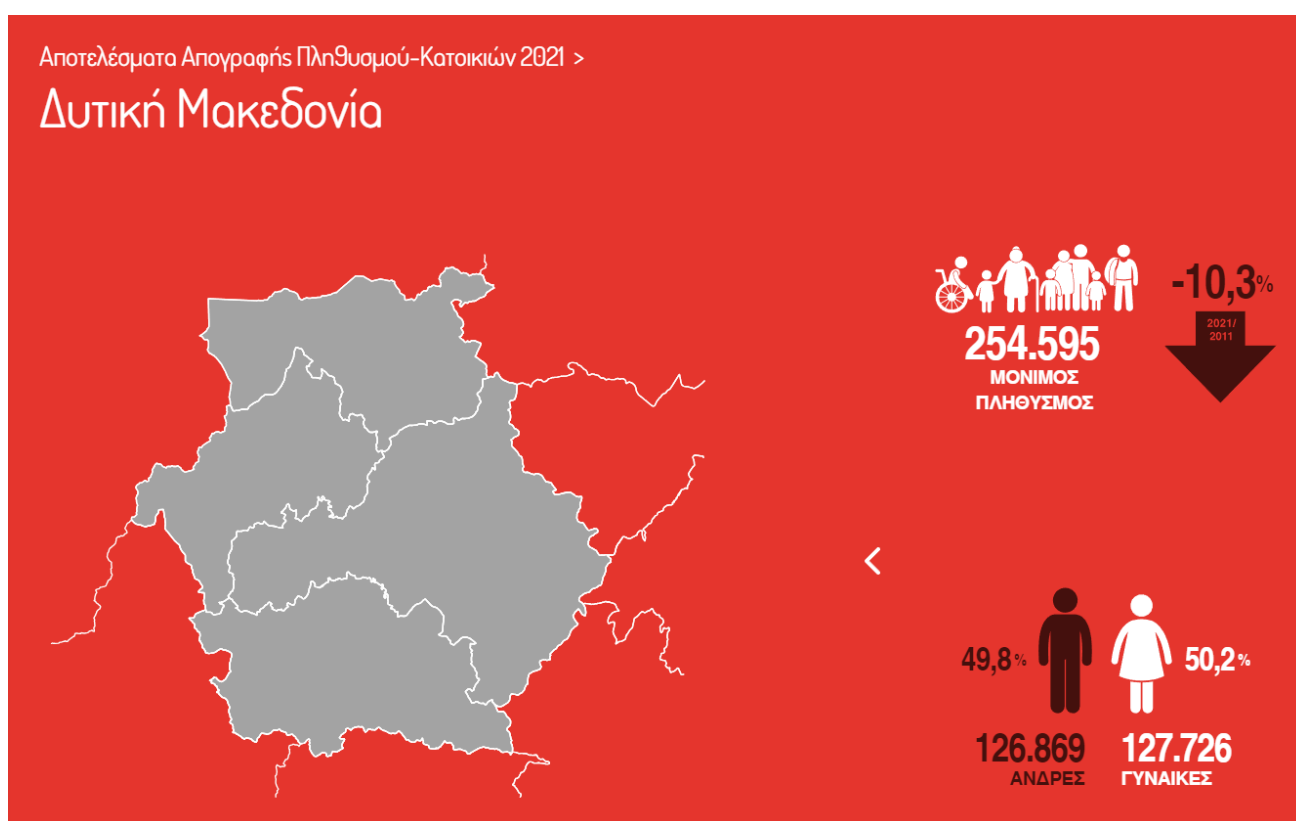
Ce	85.4	92.80	67.50
Pr	9.51	10.40	7.75
Nd	36.6	42.80	30.50
Sm	7.36	8.68	5.82
Eu	1.69	1.66	1.15
Gd	7.14	9.15	5.31
Tb	1.07	1.38	0.82
Dy	6.51	8.71	4.85
Ho	1.36	1.88	1.00
Er	4.11	5.69	2.94
Tm	0.58	0.88	0.38
Yb	4.15	5.78	2.97
Lu	0.63	0.98	0.46
Y	41.2	57.10	31.30
ΣREY	247.21	290.19	196.05
Critical (%)	36.89	40.44	36.50

Στον Πίνακα 1 αποτυπώνεται η συγκέντρωση των κύριων οξειδίων και των R.E.E. των αρχικών δειγμάτων B.C.A. και C.F.A., καθώς επίσης και οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα επιμέρους κλάσματα μεγέθους που προέκυψαν μετά τον διαχωρισμό μεγέθους. Ο Πίνακας 2 αποτελεί συνέχεια του Πίνακα 1 και αποτυπώνει τον βαθμό εμπλουτισμού σε R.E.E., το ποσοστό ανάκτησης R.E.E. και το Critical (%) (Εξίσωση 2), σε κάθε ένα από τα κλάσματα μεγέθους. Αντίστοιχα, ο Πίνακας 3 αποτυπώνει τη χημική σύσταση του κλάσματος μεγέθους -400 Mesh, που αποτέλεσε την τροφοδοσία των μαγνητικών διαχωρισμών και τη χημική σύσταση των επιμέρους μαγνητικών κλασμάτων που προέκυψαν από τη διεργασία του εμπλουτισμού. Οι Πίνακες 4 και 5 αποτελούν και αυτοί συνέχεια του Πίνακα 3 και αποτυπώνουν τον βαθμό εμπλουτισμού σε R.E.E., το ποσοστό ανάκτησης R.E.E. και το Critical (%), σε κάθε ένα από τα κλάσματα των 2 μαγνητικών διαχωρισμών. Τέλος, ο Πίνακας 6 αποτυπώνει τη χημική σύσταση πάλι του -400 Mesh κλάσματος, ως υλικό τροφοδοσίας και του διαχωρισμού πυκνότητας και την αντίστοιχη χημική σύσταση του επιπλεύσαντος και καταβυθισθέντος κλάσματος, σε πυκνότητα διαχωρισμού 3 gr/ml, που επιλέχθηκε για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα στοιχεία αυτά αναφέρονται καθώς αποτελούν πραγματικά δεδομένα που αφορούν την C.F.A. του ΑΗΣ Μελίτης και η βέλτιστη συγκέντρωση από τα πειράματα εμπλουτισμού θα χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστούν τα απαραίτητα ισοζύγια μάζας για τον σχεδιασμό της δομής ανάκτησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Η ΔΥΤΙΚΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ ΚΑΙ Η ΛΙΓΝΙΤΟΦΟΡΟΣ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Δυτική Μακεδονία είναι μια από τις περιφέρειες της Ελλάδας και αποτελείται από τέσσερις περιφερειακές ενότητες: Γρεβενών, Καστοριάς, Κοζάνης και Φλώρινας. Η απογραφή του 2021 μας δίνει μια εικόνα των πληθυσμιακών χαρακτηριστικών και της οικονομικής διαρθρώσεως της περιοχής. Ο πληθυσμός της Δυτικής Μακεδονίας ανέρχεται σε περίπου 255.000 άτομα, σημειώνοντας μείωση σε σχέση με την απογραφή του 2011, όπου ο πληθυσμός ήταν πάνω από 280.000 άτομα. Αυτή η πτώση αντανακλά την τάση δημογραφικής συρρίκνωσης που παρατηρείται σε πολλές αγροτικές και ημι-αγροτικές περιοχές της Ελλάδας [19]. Η μείωση αυτή ισοδυναμεί με ποσοστό 10.3% σε σχέση με το 2011 και αποτυπώνεται στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13: Στοιχεία απογραφής πληθυσμού Δυτικής Μακεδονίας (2021).
(<https://census2021results.statistics.gr/perifereies/dytiki-makedonia>)

Η Δυτική Μακεδονία χαρακτηρίζεται από έντονη γήρανση του πληθυσμού. Το ποσοστό των ατόμων άνω των 65 ετών αυξήθηκε σημαντικά, φτάνοντας περίπου το 25-30% του συνολικού πληθυσμού. Αντίθετα, οι νέοι (κάτω των 15 ετών) αποτελούν λιγότερο από το 15% του πληθυσμού. Ο δείκτης γήρανσης (ο αριθμός των ατόμων άνω των 65 ετών ανά 100 άτομα κάτω των 15 ετών) είναι από τους υψηλότερους στη χώρα, υποδεικνύοντας σημαντικές δημογραφικές προκλήσεις. Η εσωτερική και εξωτερική μετανάστευση είναι έντονη στη Δυτική Μακεδονία. Πολλοί νέοι αναζητούν εργασία σε αστικά κέντρα ή στο εξωτερικό, οδηγώντας σε περαιτέρω πληθυσμιακή συρρίκνωση και κοινωνικοοικονομικά προβλήματα [20].

Οικονομική διάρθρωση Δυτικής Μακεδονίας

Όσον αφορά τον πρωτογενή τομέα, η γεωργία, η κτηνοτροφία και η δασοκομία παραμένουν σημαντικές δραστηριότητες στην περιοχή, ιδίως σε αγροτικές και ορεινές περιοχές. Η καλλιέργεια σιτηρών, αμπελώνων και δενδροκαλλιέργειες είναι κοινές, ενώ η κτηνοτροφία (αιγοπρόβατα) συνεισφέρει σημαντικά στο τοπικό εισόδημα. Ωστόσο, ο πρωτογενής τομέας αντιμετωπίζει προκλήσεις, όπως η γήρανση των αγροτών, η χαμηλή τεχνολογική υιοθέτηση και οι δυσκολίες πρόσβασης σε αγορές [20].

Αναφορικά με τον δευτερογενή τομέα, η βιομηχανία ενέργειας υπήρξε ο κυρίαρχος τομέας στη Δυτική Μακεδονία για πολλές δεκαετίες, κυρίως λόγω των μεγάλων λιγνιτωρυχείων και των θερμοηλεκτρικών σταθμών της ΔΕΗ (Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού) στην περιοχή της Πτολεμαΐδας και του Αμυνταίου. Με την σταδιακή απολιγνιτοποίηση, η περιοχή βρίσκεται σε φάση μετάβασης προς μια νέα οικονομική πραγματικότητα. Αυτή η μετάβαση αναμένεται να επηρεάσει αρνητικά την τοπική οικονομία, εφόσον χιλιάδες θέσεις εργασίας συνδέονται άμεσα ή έμμεσα με την παραγωγή ενέργειας. Η αναπτυξιακή στρατηγική επικεντρώνεται τώρα στην ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, καθώς και στην προώθηση της πράσινης και κυκλικής οικονομίας [20].

Τέλος, όσον αφορά τον τριτογενή τομέα, οι υπηρεσίες αποτελούν ένα σημαντικό αλλά όχι κυρίαρχο κομμάτι της οικονομίας. Τομείς όπως το εμπόριο, οι δημόσιες υπηρεσίες και ο τουρισμός παρουσιάζουν ευκαιρίες ανάπτυξης. Ο τουρισμός, και ειδικά ο εναλλακτικός και ορεινός τουρισμός, αρχίζει να αναπτύσσεται περισσότερο τα τελευταία χρόνια, με έμφαση στις φυσικές ομορφιές, τα παραδοσιακά χωριά και τα ιστορικά μνημεία της περιοχής. Η λίμνη της Καστοριάς, τα χιονοδρομικά κέντρα της περιοχής και οι προστατευόμενες φυσικές περιοχές αποτελούν σημαντικά τουριστικά αξιοθέατα [20].

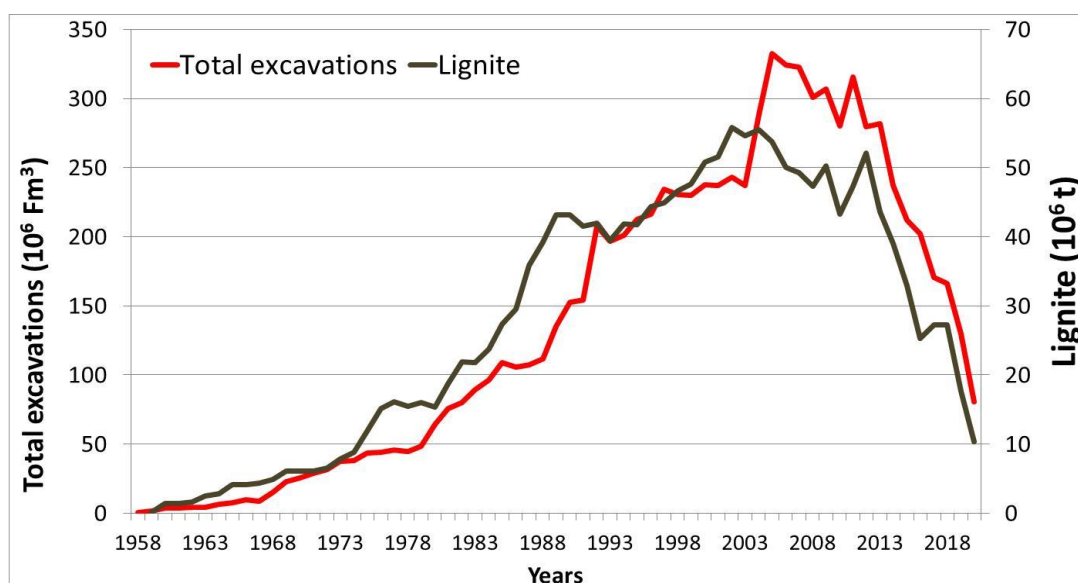
Δυστυχώς, η Δυτική Μακεδονία καταγράφει το υψηλότερο ποσοστό ανεργίας στην Ελλάδα, με το ποσοστό να κυμαίνεται άνω του 20% σύμφωνα με τις τελευταίες εκτιμήσεις. Η ανεργία επηρεάζεται από την απολιγνιτοποίηση, τις απολύσεις στη βιομηχανία και τις περιορισμένες ευκαιρίες απασχόλησης σε άλλους τομείς. Αυτό δημιουργεί σοβαρές κοινωνικοοικονομικές προκλήσεις, καθιστώντας την ανάγκη για οικονομική διαφοροποίηση και επενδύσεις επιτακτική [21].

Η Δυτική Μακεδονία αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις, αλλά υπάρχουν και προοπτικές για την ανάπτυξη νέων τομέων, όπως η ανανεώσιμη ενέργεια, η βιομηχανία και ο τουρισμός. Οι επενδύσεις σε υποδομές, η ενίσχυση της επιχειρηματικότητας και η στήριξη του ανθρώπινου κεφαλαίου θα είναι καθοριστικές για την οικονομική αναδιάρθρωση της περιοχής. και την υποστήριξη της τοπικής κοινότητας, καθώς η εξορυκτική δραστηριότητα του λιγνίτη αποτελούσε την βασική πηγή εισόδων για την περιοχή, για πολλές δεκαετίες [22].

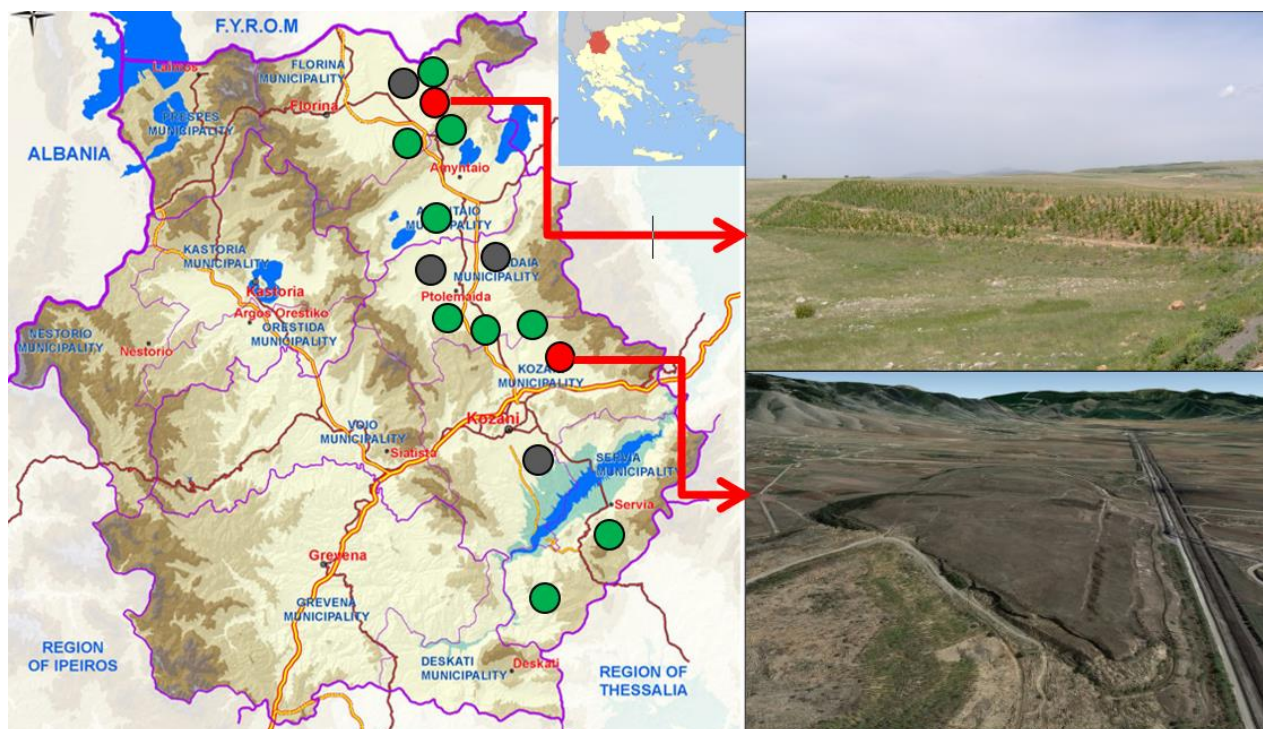
3.2 Η ΛΙΓΝΙΤΟΦΟΡΟΣ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

Η εξόρυξη λιγνίτη στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας ξεκίνησε στα τέλη του 19ου αιώνα. Μετά το 1956, η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε. (ΔΕΗ) ξεκίνησε την εντατική εκμετάλλευση του λιγνιτικού κοιτάσματος της Πτολεμαΐδας. Ήταν μια κεντρική πολιτική απόφαση, που υποστηρίχθηκε από όλες τις ελληνικές κυβερνήσεις, έδωσε ώθηση στην οικονομική ανάπτυξη και οδήγησε στην ενεργειακή ασφάλεια της χώρας, διαμορφώνοντας την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη της Δυτικής Μακεδονίας αλλά και της Ελλάδας γενικότερα [2]. Μετά το 2004 η λιγνιτική βιομηχανική δραστηριότητα στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας εισήλθε σε περίοδο ύφεσης. Οι αρνητικές επιπτώσεις αυτής της εξέλιξης άρχισαν να παρατηρούνται στην τοπική κοινωνία μετά την οικονομική κρίση του 2009 και πυροδοτήθηκαν από: (i) τις αυξημένες τιμές CO₂ που καθορίστηκαν από το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών, το οποίο με τη σειρά του αύξησε το λειτουργικό κόστος της καύσης λιγνίτη στα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής, (ii) οι πολιτικές που προωθούν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και φυσικού αερίου και (iii) οι τεχνολογικές βελτιώσεις στις ΑΠΕ, που είχαν ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους εγκατάστασης [2].

Μέχρι σήμερα, 1,7 δισεκατομμύρια τόνοι λιγνίτη έχουν εξορυχθεί από τα ορυχεία της ΔΕΗ ενώ συνολικά έχουν ανασκαφεί περισσότερα από 8,7 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα πετρωμάτων (Εικόνα 14). Ο συνολικός όγκος υπτάμενης τέφρας που έχει παραχθεί κατά την καύση του λιγνίτη εκτιμάται σε 300 εκατομμύρια τόνους και μόνο ένα μικρό μέρος αυτής της ποσότητας έχει χρησιμοποιηθεί στην τσιμεντοβιομηχανία και σε άλλες βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. κατασκευή φράγματος στον ποταμό Νέστο). Επιπλέον, αυτήν την στιγμή υπάρχουν μόνο δύο σωροί απόθεσης τέφρας, με τον ένα να βρίσκεται κοντά στον ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου με συνολικό όγκο 19 εκατομμυρίων m³, συμπεριλαμβανομένης της κάλυψης του εδάφους, και ο άλλος να βρίσκεται κοντά στο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Μελίτης, που έχει δεχθεί 14,5 εκατομμύρια τόνους τέφρας και γύψου (CaSO₄·2H₂O) που παράγεται από τη μονάδα αποθείωσης (Εικόνα 15) [2].



Εικόνα 14: Συνολικές εκσκαφές και παραγωγή λιγνίτη στα ορυχεία της ΔΕΗ Α.Ε. στη Δυτική Μακεδονία (1956-2020). <https://tdm.tee.gr/parousiasi-tou-ergou-tis-omadas-ergasias-analysi-kai-tekmiriosi-tis-skopimotitas-aksiopoiisis-tou-egchoriou-ligniti-se-proionta-ypsilis-prostithemenis-aksias-2/>.



Εικόνα 15: Κοιτάσματα λιγνίτη (μαύρες κουκκίδες), επιφανειακά ορυχεία (πράσινες) και χώροι απόθεσης τέφρας (κόκκινες) στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας (<https://tdm.tee.gr/parousiasi-tou-ergou-tis-omadas-ergasias-analysi-kai-tekmiriosi-tis-skopimotitas-aksiopoiisis-tou-egchoriou-ligniti-se-proionta-ypsilis-prostithemenis-aksias-2/>).

Τα εναπομείναντα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα στο λιγνιτικό κοιτάσμα που εκμεταλλεύεται η ΔΕΗ υπολογίζονται σε 820 εκατομμύρια τόνους, ενώ τα αποθέματα που εκμεταλλεύονται ιδιωτικές εταιρείες υπολογίζονται σε 120 εκατομμύρια τόνους [2]. Η ΔΕΗ έχει επίσης τα δικαιώματα εκμετάλλευσης 460 εκατομμυρίων τόνων λιγνίτη που βρίσκονται σε περιοχές όπου μέχρι στιγμής δεν έχουν αναπτυχθεί μεταλλευτικές δραστηριότητες (Πίνακας 1). Ωστόσο, ως αποτέλεσμα της στρατηγικής της ενεργειακής μετάβασης, τα λιγνιτωρυχεία αντιμετωπίζουν κλείσιμο πολύ πριν από την εξάντληση των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων τους.

Πίνακας 7: Υπολειπόμενα αποθέματα στα λιγνιτωρυχεία και ανεκμετάλλευτα κοιτάσματα της Δυτικής Μακεδονίας (<https://tdm.tee.gr/parousiasi-tou-ergou-tis-omadas-ergasias-analysi-kai-tekmiriosi-tis-skopimotitas-aksiopoiisis-tou-egchoriou-ligniti-se-proionta-ypsilis-prostithemenis-aksias-2/>).

Περιοχή / Ενεργό Ορυχείο ή απόθεμα	Γεωλογικά (αποδεδειγμένα)	Εξορύξιμα	Πιθανά
ΦΛΩΡΙΝΑ Ιδιωτικά Ορυχεία (Αχλάδα & Βέβη) Ορυχεία ΔΕΗ (Κλειδί) Άλλα αποθέματα (Βέβη, Αχλάδα, Μελίτη)	343	306 158 31 107	
ΑΜΥΝΤΑΙΟ Ορυχείο Αμύνταιου - Λακκιάς Απόθεμα Βαλτόνερων	220 220	60 60	180 50
ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑ Ορυχεία ΔΕΗ Ανεκμετάλλευτα αποθέματα	1891 950 941	1140 600 540	473 473
ΚΟΖΑΝΗ	293	138	

3.3 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Τα δύο βασικά παραπροϊόντα της καύσης του λιγνίτη είναι η ιπτάμενη τέφρα (Coal Fly Ash - CFA) και η τέφρα βάσης (Coal Bottom Ash - CBA), με την C.F.A. να είναι μια από τις βασικές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία ποικιλία βιομηχανικών εφαρμογών, που σχετίζονται κυρίως με την κατασκευή δομικών υλικών, τσιμεντοβιομηχανία (υλικά ανάμειξης) και τη σύνθεση γεωπολυμερών. Η C.F.A. αντιπροσωπεύει το 65% της συνολικής παραγωγής αποβλήτων από την καύση άνθρακα [23], με λιγότερο από το ήμισυ αυτής της ποσότητας να υπόκειται σε επεξεργασία για επαναχρησιμοποίηση σε: (i) μακροεπιπεδοποίηση, σταθεροποίηση του εδάφους, (ii) ορυχεία, ως υλικό επίχωσης και υλικό σε διάφορα φρεάτια απόθεσης, (iii) κεραμικά (πλινθοβιομηχανία), (iv) παραγωγή οικοδομικών υλικών (τσιμέντο και σκυρόδεμα), (v) οδοποιία και (vi) δέσμευση CO₂.

Οι χημικές και ορυκτολογικές ομοιότητες μεταξύ C.F.A. και ζεόλιθων έχουν επίσης οδηγήσει σε αρκετές μελέτες σχετικά με τη μετατροπή της ιπτάμενης τέφρας σε ζεόλιθο. Οι σημαντικές προσροφητικές και ιοντοανταλλακτικές ιδιότητες των προϊόντων ιπτάμενης τέφρας ζεόλιθου επιτρέπουν την εφαρμογή τους σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς, όπως η γεωργία, η φαρμακευτική, η χημική και περιβαλλοντική μηχανική. Σε σύγκριση με τους φυσικούς ζεόλιθους, αυτά τα συνθετικά προϊόντα παρουσιάζουν μια πιο πολλά υποσχόμενη ικανότητα ροφητή ορυκτών, για χρήση σε διάφορες περιβαλλοντικές εφαρμογές [24].

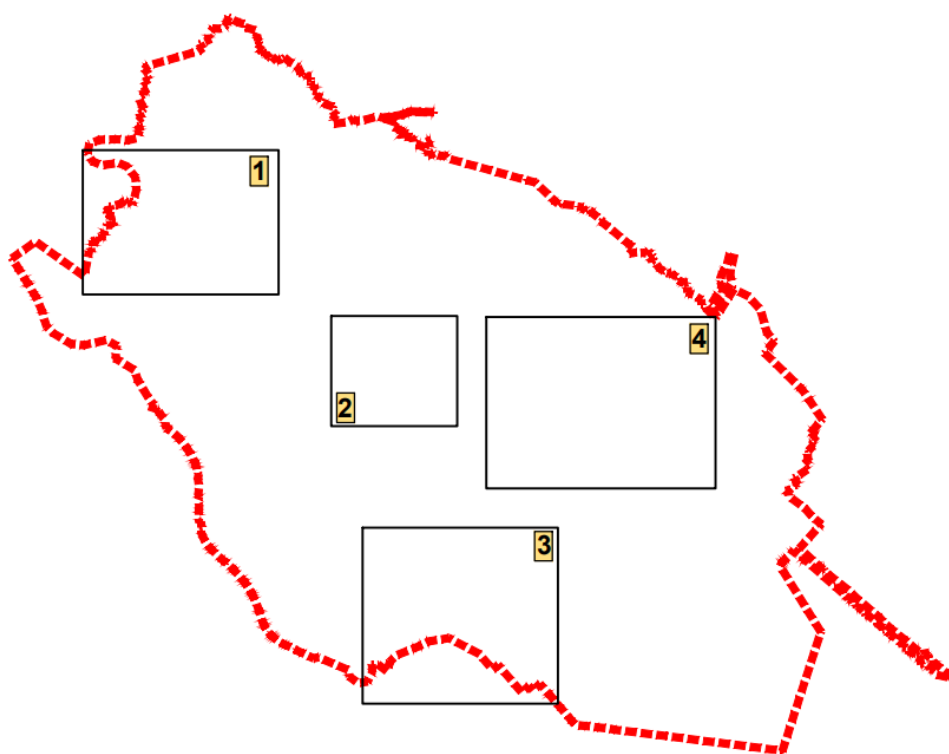
Η πιο εδραιωμένη εφαρμογή της C.F.A. έγκειται στη χρήση της στην παραγωγή δομικών υλικών και προϊόντων τσιμέντου. Πρόσφατες μελέτες έχουν αποδείξει ότι τα γεωπολυμερή υλικά με βάση την ιπτάμενη τέφρα αντιπροσωπεύουν μια εξαιρετική εναλλακτική στα πιο «παραδοσιακά» δομικά υλικά, δεδομένου ότι η σύνθεσή τους δεν απαιτούσε την προσθήκη τσιμέντου, άμμου ή αδρανών. Τα σχετικά αποτελέσματα έδειξαν εξοικονόμηση περίπου 40% στις εκπομπές CO₂ σε κατασκευαστικές εφαρμογές με μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις [25].

Τα τελευταία χρόνια έχει αποδειχθεί και πειραματικά ότι η C.F.A. και η B.C.A. μπορεί να αποτελέσουν μια σημαντική πηγή R.E.E., με την C.F.A. να αποτελεί, σε γενικές γραμμές, το υλικό που είναι πιο εμπλουτισμένο σε R.E.E. από τις δύο τέφρες [26]. Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι τέφρες διαφορετικής γεωλογικής προέλευσης συνήθως έχουν διαφορετικές συγκεντρώσεις R.E.E. και συμπεριφέρονται διαφορετικά κατά τις διεργασίες εμπλουτισμού και χημικής ανάκτησης που μπορεί να εφαρμοστούν σε διεργασίες ανάκτησης των R.E.E.. Διαφορετικές θερμοκρασίες καύσης και οι συνολικές συνθήκες λειτουργίας των διαφόρων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής επηρεάζουν επίσης τις διεργασίες εμπλουτισμού και χημικής ανάκτησης [8]. Η δυνατότητα ανάκτησης R.E.E. από τις τέφρες της Δυτικής Μακεδονίας διερευνήθηκε πρόσφατα από τον συντάκτη της παρούσης εργασίας, με δείγματα C.F.A. και B.F.A. που ελήφθησαν από τον ΑΗΣ Μελίτης, στη Φλώρινα [8].

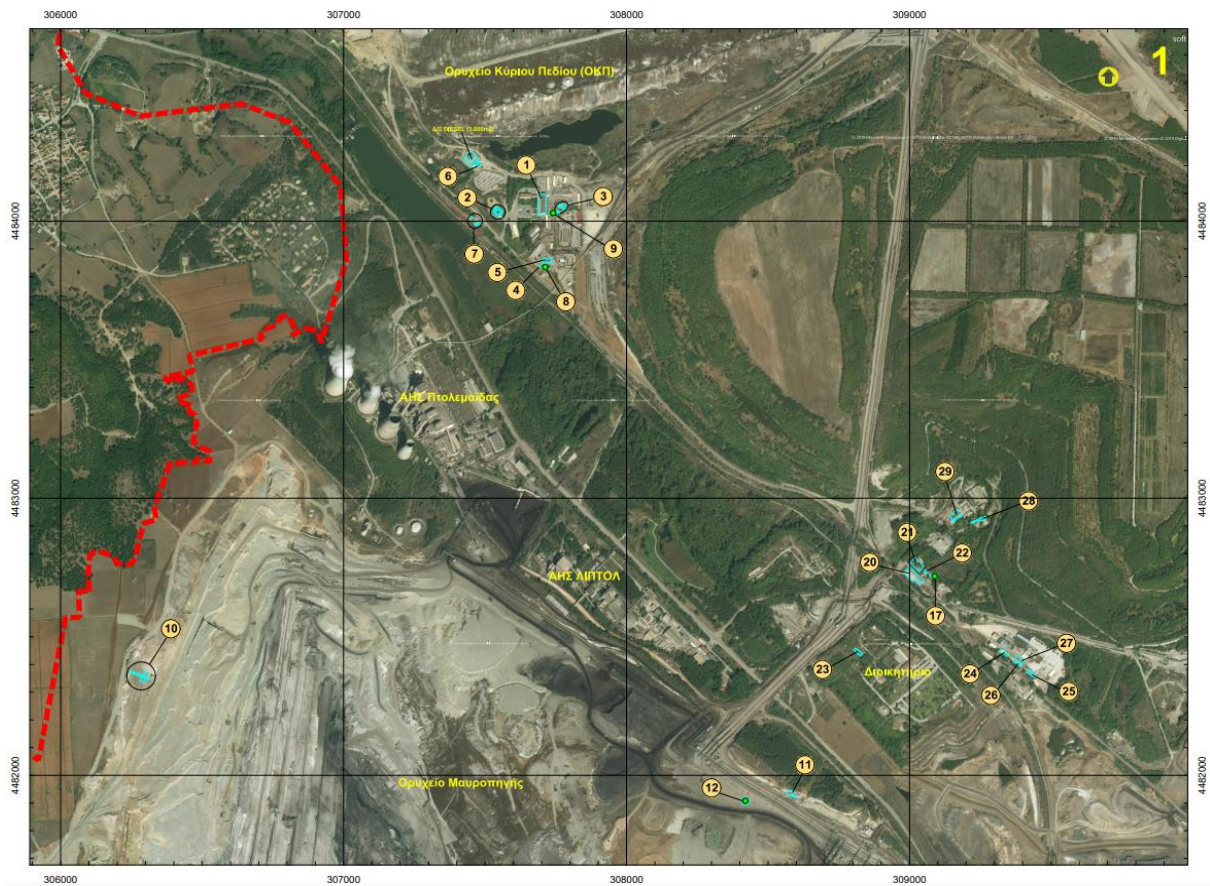
3.4 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ R.E.E. ΣΤΑ ΟΡΥΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ

Σήμερα, τα ορυχεία της ΔΕΗ καταλαμβάνουν 17.000 εκτάρια. Οι εκτάσεις που έχουν ανακτηθεί είναι 3.700 εκτάρια που αποτελούνται κυρίως από καλλιεργήσιμες εκτάσεις σε οριζόντιες περιοχές στην κορυφή των σωρών απόθεσης και αναδασωτέες περιοχές στις επικλινείς επιφάνειες στα περιθώρια των σωρών. Το πρόωρο κλείσιμο των λιγνιτωρυχείων, λόγω της στρατηγικής για την ενεργειακή μετάβαση, έχει ως αποτέλεσμα την αναθεώρηση των σχεδίων αποκατάστασης γης που έχουν προσδιοριστεί στις περιβαλλοντικές άδειες. Πολλές εργασίες που θα έπρεπε να ολοκληρωθούν μέσα στις επόμενες δεκαετίες πρέπει να έχει ολοκληρωθούν μέσα στα επόμενα χρόνια, απαιτώντας αυξημένες προσπάθειες από τα εμπλεκόμενα μέρη και, φυσικά, χρηματοδότηση [2].

Οι φορείς εκμετάλλευσης των ορυχείων κατέχουν ένα μεγάλο χαρτοφυλάκιο πιθανών χρήσεων γης που ποικίλλουν, από αυτές που προβλέπουν τη μεγιστοποίηση των κερδών, σε αυτές που προσπαθούν να εξισορροπήσουν την οικολογική αποκατάσταση με τους στόχους χρηματοδότησης. Η ανάπτυξη φωτοβολταϊκών πάρκων είναι μια επενδυτική ευκαιρία που προσελκύει τον τελευταίο καιρό τόσο επιχειρήσεις του ενεργειακού τομέα όσο και μικρούς επενδυτές που οργανώνονται σε διάφορες μορφές συνεταιριστικών προγραμμάτων [27]. Υπάρχουν αρκετές θέσεις εντός των ορυχείων Πτολεμαΐδας που θα μπορούσαν να φιλοξενήσουν μια δομή ανάκτησης/ανακύκλωσης R.E.E. και άλλων κρίσιμων μετάλλων. Στις Εικόνες 16, 17, 18, 19 και 20 παρουσιάζονται οι τοπογραφικές κατόψεις του συνολικού χώρου των ορυχείων, τμηματοποιημένες σε τέσσερεις επιμέρους περιοχές που υπάρχουν σήμερα στα ορυχεία.



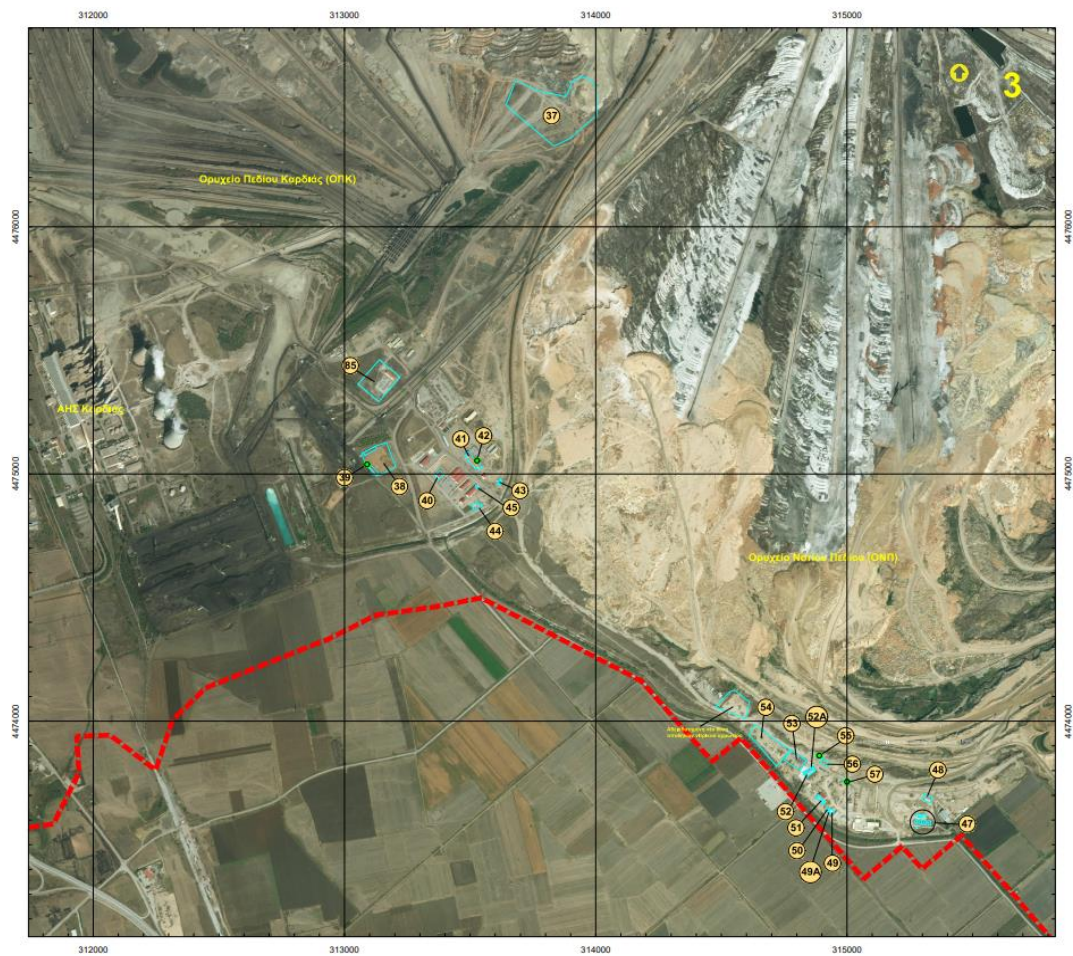
Εικόνα 16: Κάτοψη των ορυχείων της ΔΕΗ στην Πτολεμαΐδα.



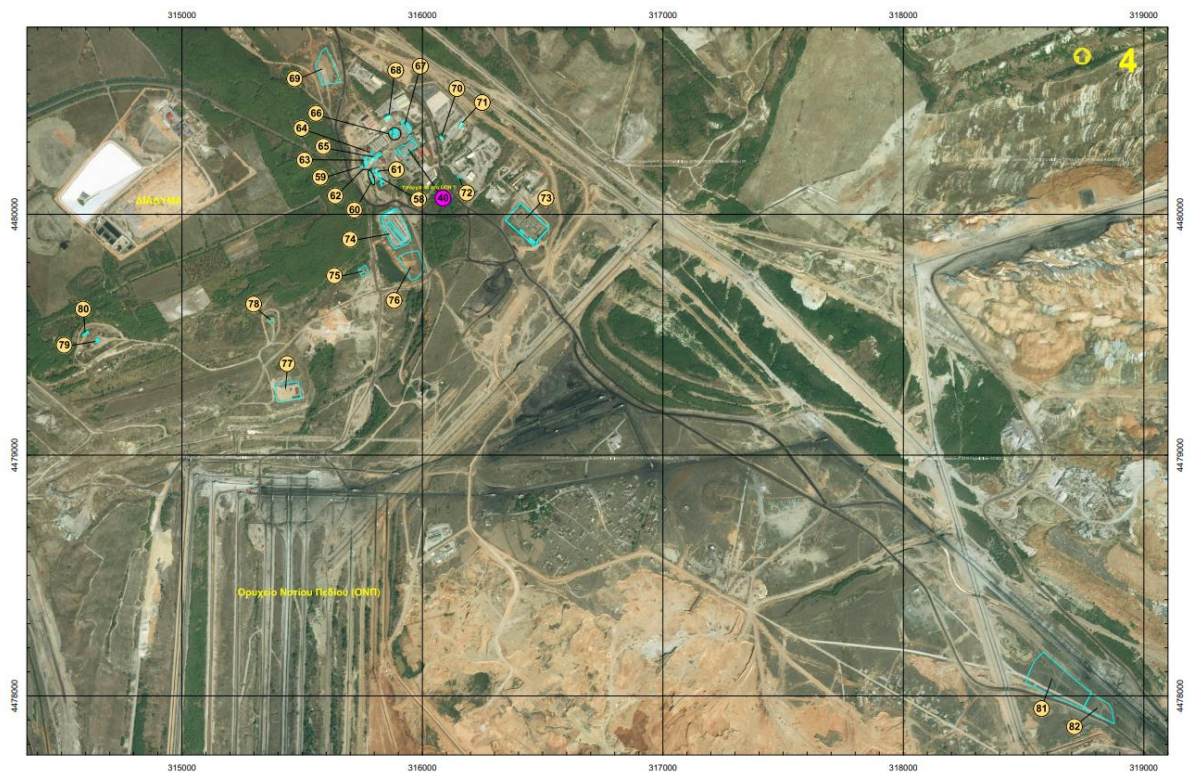
Εικόνα 17: Περιοχή 1 (ΑΗΣ Πτολεμαΐδας, Πρώην ΑΗΣ Λιπτόλ, Ορυχείο Μαυροπηγής, Διοικητήριο).



Εικόνα 18: Περιοχή 2 (Συγκρότημα Κεντρικό Συεργείων, βόρειο τμήμα Ορυχείου Πεδίου Καρδιάς).



Εικόνα 19: Περιοχή 3 (Νότιο τμήμα Ορυχείου Πεδίου Καρδιάς, ΑΗΣ Καρδιάς, Ορυχείο Νοτίου Πεδίου).



Εικόνα 20: Περιοχή 4 (Περιοχή ΔΙΑΔΥΜΑ, βόρειο τμήμα Νοτίου Πεδίου).

3.5 ΑΠΟΛΙΓΝΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΤΟ MASTER PLAN ΔΙΚΑΙΗΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΗΣ

Η ενεργειακή βιομηχανία της Δυτικής Μακεδονίας έχει να αντιμετωπίσει ένα γρήγορο χρονοδιάγραμμα σταδιακής κατάργησης του λιγνίτη, δημιουργώντας κοινωνικοοικονομικές προκλήσεις, καθώς η τοπική οικονομία βασίζεται σε δραστηριότητες που σχετίζονται με τον λιγνίτη που αντιπροσωπεύουν το 34% του περιφερειακού ΑΕΠ. Η περιοχή αντιμετωπίζει επίσης διαρθρωτικές αδυναμίες καθώς υποφέρει από υψηλά ποσοστά ανεργίας, χαμηλό βαθμό διαφοροποίησης από το υπάρχον παραγωγικό μοντέλο και περιορισμένες δυνατότητες καινοτομίας. Συνοψίζοντας τις επιπτώσεις της απολιγνιτοποίησης στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας και έχοντας ως αναφορά το έτος 2013, η μηδενική παραγωγή λιγνίτη το 2028 αναμένεται να επιφέρει τις ακόλουθες συνέπειες:

- Το περιφερειακό ΑΕΠ θα μειωθεί κατά 26% με ετήσια απώλεια εσόδων 1,2 δισ. ευρώ
- Απώλεια 21.000 άμεσων και έμμεσων θέσεων εργασίας
- Συνολική απώλεια εισοδήματος για την περίοδο 2013 - 2028 που θα προσεγγίζει τα 9 δισ. Ευρώ

Αυτό καθιστά σαφές ότι η μακροπρόθεσμη εξάρτηση της Δυτικής Μακεδονίας από τον λιγνίτη έχει δημιουργήσει διαρθρωτικά οικονομικά προβλήματα στην περιοχή που αντικατοπτρίζονται στη χαμηλή διαφοροποίηση από το υπάρχον παραγωγικό μοντέλο και στα χαμηλά ποσοστά καινοτομίας. Επιπλέον, έχει δημιουργήσει διαρθρωτικές κοινωνικοοικονομικές συνθήκες που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν με διορθωτικές βραχυπρόθεσμες παρεμβάσεις αλλά απαιτούν μακροπρόθεσμες πολιτικές αναδιάρθρωσης της παραγωγής, οι οποίες θα πρέπει να εκμεταλλεύονται τα ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα της ευρύτερης περιοχής [28].

Πρόσφατα, συστάθηκε Κυβερνητική Επιτροπή για την έγκριση και την παρακολούθηση της εφαρμογής του σχεδίου “Master Plan Transition Just Development”, το οποίο βασίζεται σε πέντε αρχές: Έμφαση σε τομείς έντασης εργασίας για τη δημιουργία τοπικών ευκαιριών απασχόλησης, προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης, εστίαση στις γρήγορες κερδοφορίες, ενσωμάτωση σύγχρονης τεχνολογίας και καινοτομίας και αξιοποίηση των περιφερειακών πλεονεκτημάτων. Με βάση αυτές τις αρχές, το Γενικό Σχέδιο για τη Μετάβαση βασίζεται σε πέντε βασικούς αναπτυξιακούς πυλώνες:

- Ανάπτυξη καθαρής ενέργειας (π.χ. εγκατάσταση ΑΠΕ άνω των 2,5 GW σε εγκαταλελειμμένα ορυχεία λιγνίτη, παραγωγή μπαταριών, εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου), συμπεριλαμβανομένου αερίου που ρέει μέσω του αγωγού TAP που διασχίζει την περιοχή
- Βιομηχανικές μεταποιητικές δραστηριότητες και εμπόριο
- Έξυπνη αγροτική παραγωγή
- Βιώσιμος τουρισμός
- Τεχνολογία και εκπαίδευση

Η συνολική χρηματοδότηση που απαιτείται για την υλοποίηση των μέτρων του σχεδίου εκτιμάται σε 5 δισ. ευρώ. Η απαιτούμενη επένδυση στη Δυτική Μακεδονία θα χρηματοδοτηθεί από ευρωπαϊκά

κεφάλαια κυρίως από το Ταμείο Δίκαιης Μετάβασης της ΕΕ (JTF) και εθνικές πηγές, δημόσια χαμηλότοκα δάνεια από ευρωπαϊκές πηγές και άλλα χρηματοδοτικά μέσα, εμπορικά δάνεια και ιδιωτικές επενδύσεις. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η σταδιακή κατάργηση του λιγνίτη δεν θα επηρεάσει αρνητικά την περιφερειακή οικονομία, η Δυτική Μακεδονία μπορεί να αξιοποιήσει τις δυνάμεις και τα ανταγωνιστικά της πλεονεκτήματα, όπως η υψηλή συγκέντρωση εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού, η βιομηχανική κουλτούρα, η ενεργειακές υποδομές, ο πρωτογενής αγροτικός τομέας με υψηλή προοπτική, οι υφιστάμενες ακαδημαϊκές και ερευνητικές δομές και η ευρύτερη στρατηγική γεωγραφική θέση της Δυτικής Μακεδονίας στη Νοτιοανατολική Ευρώπη [28].

Συνολικά, οι παρεμβάσεις τοπικών φορέων όπως η περιφερειακή αρχή, οι δήμοι, η ακαδημαϊκή κοινότητα και η επιχειρηματική κοινότητα, τα επιμελητήρια και οι συνδικαλιστικές οργανώσεις, δείχνουν μέχρι στιγμής μια ευρεία απροθυμία να αποδεχτούν μια βίαιη διαδικασία απεξάρτησης από άνθρακα και σταδιακής κατάργησης του λιγνίτη. Γίνεται ολοένα και πιο σαφές ότι η ενεργειακή μετάβαση δεν αφορά μόνο την επιλογή των καλύτερων τεχνικών λύσεων, αλλά βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις ανθρώπινες συνήθειες και συμπεριφορά και θα πρέπει να διασφαλίζει ότι καμία περιοχή ή εργαζόμενος δεν θα μείνει πίσω (“Just Transition”). Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τη Δυτική Μακεδονία, όπου η ενεργειακή μετάβαση συνοδεύεται από το αίτημα για μια γενικευμένη παραγωγική ανασυγκρότηση. Κατά συνέπεια, η συμμετοχική λήψη αποφάσεων, η διαφάνεια της πολιτικής δέσμευσης και η οικοδόμηση εμπιστοσύνης είναι ζωτικής σημασίας για μια επιτυχημένη και δίκαιη ενεργειακή μετάβαση [28].

Οι πρόσφατες πολιτικές εξελίξεις και η επιταχυνόμενη σταδιακή κατάργηση του λιγνίτη αύξησαν τον επείγοντα χαρακτήρα των διαρθρωτικών προσαρμογών στην περιοχή και, ως εκ τούτου, ενίσχυσαν τη σημασία και την εξέχουσα σημασία της έρευνας CINTRAN για τη Δυτική Μακεδονία, προκειμένου να ξεπεραστούν οι προκλήσεις μετάβασης που σχετίζονται με την υψηλή ανεργία, την ενεργειακή φτώχεια, χαμηλά ποσοστά καινοτομίας και περιορισμένη οικονομική διαφοροποίηση [28]. Η έρευνα CINTRAN εξετάζει τον ρυθμό μετασχηματισμού και την ικανότητα των περιφερειών να αντιμετωπίσουν και να προσαρμοστούν στην ενεργειακή μετάβαση, μέσω διεπιστημονικής έρευνας και συνεργασίας με περιφερειακούς φορείς από τέσσερις περιοχές που εξαρτώνται από τα ορυκτά καύσιμα: Δυτική Μακεδονία (Ελλάδα), Σιλεσία (Πολωνία), Ida-Virumaa (Εσθονία) και την περιοχή εξόρυξης της Ρηνανίας (Γερμανία). Αυτή η γνώση θα συμβάλει στην αποτελεσματικότερη, δίκαιη, δίχως αποκλίσεις διακυβέρνηση των περιφερειακών μετασχηματισμών [29].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ

4.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ

Μία επένδυση ξεκινάει από την επισήμανση μίας επιχειρηματικής ιδέας ή ευκαιρίας ή από τον εντοπισμό μίας ανάγκης που προκύπτει από την ίδια τη λειτουργία της επιχείρησης ή από το ευρύτερο οικονομικό ή νομοθετικό περιβάλλον. Αν η ιδέα κριθεί ενδιαφέρουσα ή η ανάγκη επιτακτική, συγκεκριμενοποιείται μετά από μελέτη ένα «επενδυτικό σχέδιο» το οποίο πρέπει να αξιολογηθεί ως προς την αποδοτικότητά του, και γενικότερα τη σκοπιμότητα υλοποίησής του. Αν το αποτέλεσμα της αξιολόγησης είναι θετικό, η επένδυση υλοποιείται και μετά την ολοκλήρωσή της, λειτουργεί για όλο το χρόνο ζωής της [30]. Η λήψη μίας επενδυτικής απόφασης διαφέρει και σε πολλά σημεία ουσίας από τη λήψη μίας καταναλωτικής απόφασης:

- Σε μία επένδυση δεσμεύονται σημαντικοί χρηματικοί πόροι σήμερα, με προσδοκία οφέλους (οικονομικού και μη) στο μέλλον. Αντίθετα, το όφελος μίας καταναλωτικής απόφασης είναι άμεσα αντιληπτό, μη χρηματικό και συνδέεται με τη χρησιμότητα του αγαθού.
- Το μελλοντικό χρηματικό όφελος παρέχει τη δυνατότητα στον επενδυτή να ανακτήσει σταδιακά το καταβληθέν χρηματικό ποσό, δυνατότητα που δεν υπάρχει στις καταναλωτικές αποφάσεις.
- Η δυνατότητα ανάκτησης του κεφαλαίου παρέχει τη βάση για μία αντικειμενική αξιολόγηση της επένδυσης. Αντίθετα, στις καταναλωτικές αποφάσεις η αξιολόγηση της χρησιμότητας του αγαθού έχει έντονα υποκειμενικό χαρακτήρα.
- Το αποτέλεσμα της αξιολόγησης, στο βαθμό που στηρίζεται σε μελλοντικά –άρα εκτιμώμενα οφέλη- μπορεί να διαψευσθεί στην πράξη, ενώ οι τυχόν μη αναμενόμενες αρνητικές επιπτώσεις είναι μακροχρόνιες και δεν είναι εύκολα αναστρέψιμες. Αντίθετα οι όποιες επιπτώσεις μίας καταναλωτικής απόφασης είναι βραχυχρόνιες και μπορούν ευκολότερα να διορθωθούν.

Το αντικείμενο της αξιολόγησης επενδύσεων στηρίζεται αρχικά στην αναλυτική καταγραφή αρνητικών και θετικών επιπτώσεων, δηλαδή παραμέτρων κόστους και οφέλους. Στη συνέχεια, ακολουθείται μία τυπική υπολογιστική διαδικασία σύνθεσης όλων των παραμέτρων, από την οποία συμπεραίνεται αν το επενδυτικό σχέδιο πρέπει να υλοποιηθεί ή να απορριφθεί, ή ακόμη να υιοθετηθούν συγκεκριμένες αλλαγές που θα αυξήσουν την αποδοτικότητα ή τη συνολική του ελκυστικότητα [30].

Η αξιολόγηση μίας επένδυσης διαφοροποιείται ως προς το εύρος των επιπτώσεων που εξετάζει. Διακρίνονται οι εξής κατηγορίες επιπτώσεων [30]:

- Άμεσες οικονομικές επιπτώσεις: αφορούν τον ίδιο τον επενδυτικό φορέα που δεσμεύει τους πόρους του και περιλαμβάνουν:
 - Κόστη και οφέλη που μεταφράζονται σε κέρδη ή ζημιές
 - Ανάκτηση ή απώλεια του επενδεδυμένου κεφαλαίου

- Έμμεσες οικονομικές επιπτώσεις: αφορούν το σύνολο της οικονομίας στην οποία πραγματοποιείται η επένδυση και περιλαμβάνουν:
 - Πολλαπλασιαστικές επιδράσεις σε άλλους τομείς της οικονομίας
 - Αύξηση της απασχόλησης
 - Αύξηση εξαγωγών, μείωση εισαγωγών
 - Συμβολή στην οικονομική ανάπτυξη της περιοχής, της χώρας, κλπ.
- Έμμεσες περιβαλλοντικές & κοινωνικές επιπτώσεις: αφορούν το σύνολο της κοινωνίας που επηρεάζεται θετικά ή αρνητικά από την υλοποίηση της επένδυσης, και περιλαμβάνουν επιπτώσεις:
 - Στην ανθρώπινη υγεία
 - Στα οικοσυστήματα
 - Στο κλίμα
 - Στις συνθήκες διαβίωσης

Οι 3 αυτές κατηγορίες επιπτώσεων καθορίζουν δύο βασικές προσεγγίσεις αξιολόγησης που εφαρμόζονται για την αξιολόγηση ενός επενδυτικού σχεδίου:

- Χρηματο-οικονομική Ανάλυση (Financial Analysis): η αξιολόγηση γίνεται από την οπτική του ιδιώτη που ενδιαφέρεται για τις άμεσες οικονομικές επιπτώσεις και θέλει να αποφασίσει αν θα πρέπει να δεσμεύσει τα χρήματά του για την υλοποίηση της επένδυσης. Η ανάλυση στηρίζεται στις τιμές αγοράς που προσδιορίζουν το κόστος και το όφελος του ιδιώτη.
- Ανάλυση Κόστους-Οφέλους (Cost-Benefit Analysis): η αξιολόγηση γίνεται από την οπτική της κοινωνίας που ενδιαφέρεται για όλες τις έμμεσες επιπτώσεις που επηρεάζουν την κοινωνική ευημερία, και δεν λαμβάνονται υπόψη από τον ιδιώτη επενδυτή. Αποσκοπεί δηλαδή στο να προσδιορίσει αν η επένδυση είναι χρήσιμη για την κοινωνία και διακρίνεται σε:
 - Οικονομική Ανάλυση Κόστους-Οφέλους (Economic CBA): εστιάζει στις έμμεσες οικονομικές επιπτώσεις στο επίπεδο της εθνικής οικονομίας. Η ανάλυση στηρίζεται σε τροποποίηση των τιμών αγοράς έτσι ώστε να προσδιορισθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το πραγματικό όφελος ή κόστος για την εθνική οικονομία.
 - Κοινωνική Ανάλυση Κόστους-Οφέλους (social CBA): εστιάζει στις έμμεσες περιβαλλοντικές & κοινωνικές επιπτώσεις στο επίπεδο που αφορούν ολόκληρη την κοινωνία ανεξάρτητα από χρόνο ή εθνικά σύνορα. Ανάλογα με το αν οι επιπτώσεις αυτές αφορούν εμπορεύσιμα ή μη εμπορεύσιμα αγαθά, η ανάλυση στηρίζεται αντίστοιχα, στις τιμές της αγοράς ή στις αξίες που προκύπτουν από εφαρμογή τεχνικών των οικονομικών της ευημερίας.

Και οι δύο προσεγγίσεις αντιμετωπίζουν δυσκολίες, κυρίως λόγω της ανάγκης πρόβλεψης της μελλοντικής εξέλιξης διαφόρων κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης (κόστος πόρων, τιμές, κλπ.) ή παραμέτρων που προσδιορίζουν το εξωγενές οικονομικό, νομοθετικό, κοινωνικό και φυσικό περιβάλλον (επιτόκια, περιβαλλοντικοί κανονισμοί, επίπεδα ανεργίας, επίπεδα ρύπανσης, κλπ) [30].

4.2 ΧΡΗΜΑΤΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ

Η αξιολόγηση επενδύσεων στηρίζεται στις εξής έννοιες:

- Χρηματοροή (cash flow): το χρηματικό ποσό που εισέρχεται ή εξέρχεται από μία οικονομική μονάδα μία χρονική στιγμή. Διακρίνουμε:
 - Θετικές χρηματοροές: έσοδα
 - Αρνητικές χρηματοροές: έξοδα
 - Καθαρές χρηματοροές: η διαφορά θετικών και αρνητικών
- Χρονική αξία του χρήματος (time value of money): ένα χρηματικό ποσό σήμερα είναι περισσότερο χρήσιμο από ένα ίσο ποσό που θα είναι διαθέσιμο στο μέλλον. Η διαφοροποίηση αυτή στηρίζεται στις αρχές λειτουργίας του χρηματοπιστωτικού συστήματος, αλλά αντισταθμίζει και τις ανθρώπινες προτιμήσεις για γρήγορο κέρδος που είναι δυνατό να αξιοποιηθεί για την κάλυψη άμεσων αναγκών [30].
- Επιτόκιο (interest rate): ποσοτικοποιεί τη χρονική αξία του χρήματος και επιτρέπει την αναγωγή χρηματοροών σε μία ενιαία χρονική βάση (στο παρόν ή στο μέλλον). Η αναγωγή αυτή επιτυγχάνεται με δύο τεχνικές:
 - Ανατοκισμός (compounding): ο υπολογισμός Μέλλουσας Αξίας (FV) μίας σημερινής χρηματοροής (C) με βάση ένα επιτόκιο αναγωγής (i). Για το χρόνο (t) ισχύει:

$$FV=C(1+i)^t.$$

Σε περίπτωση μίας σειράς χρηματοροών $C_0, C_1, C_2, \dots, C_t$ που προκύπτουν αντίστοιχα σήμερα, σε 1, 2, ..., t χρόνια, η συνολική Μέλλουσα Αξία τους για το χρόνο (t) είναι:

$$FV= C_0(1+i)^t + C_1(1+i)^{t-1} + C_2(1+i)^{t-2} + \dots C_t$$

Όπου:

i: επιτόκιο ανατοκισμού (compound rate)

$(1+i)^k$: συντελεστής ανατοκισμού

- Προεξόφληση (discounting): η διαδικασία υπολογισμού της Παρούσας Αξίας (PV) μίας χρηματοροής (C) που θα προκύψει στο χρόνο (t) με βάση ένα επιτόκιο αναγωγής (i):

$$PV=C(1+i)^{-t}$$

Σε περίπτωση μίας σειράς χρηματοροών $C_0, C_1, C_2, \dots, C_t$ που προκύπτουν αντίστοιχα σήμερα, σε 1, 2, ..., t χρόνια, η συνολική Παρούσα Αξία τους για το χρόνο (t) είναι:

$$PV= C_0 + C_1(1+i)^{-1} + C_2(1+i)^{-2} + \dots C_t(1+i)^{-t}$$

Όπου:

i: επιτόκιο προεξόφλησης (discount rate)

$(1+i)^{-k}$: συντελεστής προεξόφλησης

Αν το επιτόκιο ανατοκισμού στο χρόνο αυτό είναι i, τότε η αξία μίας χρηματοροής C, σε 1 χρόνο θα είναι:

$$FV = C(1+i)$$

Όμως, η πραγματική αγοραστική της αξία θα είναι:

$$FV_R = FV/(1+f) = C[(1+i)/(1+f)]$$

και επεκτείνοντας για t χρόνια:

$$FV_{R,t} = C[(1+i)/(1+f)]^t$$

Γίνεται φανερό ότι μόνο αν το επιτόκιο i είναι μεγαλύτερο από τον πληθωρισμό f προκύπτει αύξηση της πραγματικής αξίας. Η επίδραση του πληθωρισμού στη μεταβολή της αξίας χρηματοροών που προκύπτουν σε μία επένδυση αντιμετωπίζεται με δύο τρόπους:

- Μέθοδος σταθερών τιμών: αγνοείται τελείως ο πληθωρισμός θεωρώντας ή ότι δεν επηρεάζει αισθητά τις αξίες των χρηματοροών ή ότι επηρεάζει στον ίδιο βαθμό θετικές και αρνητικές χρηματοροές. Η μέθοδος των σταθερών τιμών είναι εκείνη που χρησιμοποιείται κατά κανόνα σε χρηματο-οικονομικές αναλύσεις.
- Μέθοδος των πληθωριστικά μεταβαλλομένων χρηματοροών: Αν ο συντελεστής πληθωρισμού είναι f και η προβλεπόμενη για το χρόνο t χρηματοροή είναι C_t , τότε το ύψος της χρηματοροής σε τρέχουσες τιμές του χρόνου t είναι: $C'_t = C_t(1+f)^t$. Οι τιμές αυτές ανατοκίζονται ή προεξοφλούνται για τον υπολογισμό της Μέλλουσας ή Παρούσας Αξίας τους, αντίστοιχα. Η μέθοδος εφαρμόζεται μόνο κατ' εξαίρεση, αν διαφοροποιείται σημαντικά η επίδραση του πληθωρισμού στις παραμέτρους κόστους και οφέλους.
- Υπολειμματική αξία: αντιπροσωπεύει την πραγματική αξία της επένδυσης στον τελευταίο χρόνο του χρονικού ορίζοντα της ανάλυσης. Ο χρονικός ορίζοντας της ανάλυσης μπορεί να συμπίπτει με το χρόνο ζωής της επένδυσης (πχ. 25 έτη), ή να περιορισθεί σε μία μικρότερη χρονική περίοδο (πχ. 10 έτη). Και στις δύο περιπτώσεις, η επένδυση έχει μία μικρότερη ή μεγαλύτερη αξία που αντανακλά αντίστοιχα είτε την αξία που θα απομείνει μετά τη διάλυση και εκποίηση των περιουσιακών της στοιχείων, είτε το κέρδος που θα εξακολουθήσει να δημιουργεί αν συνεχίσει να λειτουργεί μετά το χρονικό ορίζοντα της ανάλυσης και μέχρι το τέλος του χρόνου ζωής της επένδυσης. Κατά κανόνα, υπολογίζεται προσεγγιστικά ως ποσοστό επί του αρχικού κόστους επένδυσης [30].

4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ - ΟΦΕΛΟΥΣ

Ο στόχος της Ανάλυσης Κόστους Οφέλους (ΑΚΟ) είναι να διευρυνθεί η οπτική αξιολόγησης έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις της επένδυσης που εκτός από τον ίδιο τον επενδυτή διαχέονται και επηρεάζουν το σύνολο της οικονομίας και της κοινωνίας [30]. Ο στόχος αυτός εντάσσεται στο πλαίσιο της στρατηγικής για τη 'Βιώσιμη Ανάπτυξη', δηλαδή την ανάπτυξη που συνδυάζει την οικονομική μεγέθυνση, με την κοινωνική ευημερία και το σεβασμό στο φυσικό περιβάλλον, έτσι ώστε να περιορισθούν οι σημερινές ανισότητες και να μην υποθηκεύεται η ευημερία των μελλοντικών γενιών. Όσο και αν οι σημερινές αναπτυξιακές επιλογές απέχουν ακόμη αισθητά από αυτό το στόχο, εν τούτοις προωθούνται σε όλο και μεγαλύτερο βαθμό πολιτικές και εργαλεία απόφασης προς την κατεύθυνση αυτή. Η ΑΚΟ αποσκοπεί ακριβώς να επεκτείνει τις αρχές της χρηματο-οικονομικής ανάλυσης στην αξιολόγηση έργων και πολιτικών, έτσι ώστε οι δείκτες που υπολογίζονται να μην αντανakλούν μόνο την επιδίωξη αύξησης της χρηματικής απόδοσης ενός ιδιώτη, αλλά και την επιθυμία αύξησης της ευημερίας ολόκληρης της κοινωνίας, σήμερα και στο μέλλον. Επίσης, ορισμένες επενδύσεις, έργα ή προγράμματα που έχουν στόχο την αύξηση της κοινωνικής ευημερίας (π.χ. προγράμματα ενίσχυσης της απασχόλησης) ή την προστασία του περιβάλλοντος (π.χ. εγκατάσταση αντιρρυπαντικής τεχνολογίας) αποτελούν δράσεις που δεν μπορούν να αξιολογηθούν με χρηματο-οικονομική ανάλυση, καθώς δεν αποφέρουν ορατά οφέλη για τον ιδιώτη [30]. Το ζητούμενο από μία ΑΚΟ, είναι να τεκμηριωθεί η σκοπιμότητα υλοποίησης της δράσης (yes - no αποφάσεις) ή να επιλεγεί μεταξύ εναλλακτικών δράσεων εκείνη που μεγιστοποιεί το καθαρό όφελος για την εθνική οικονομία και το σύνολο της κοινωνίας (either - or αποφάσεις). Για να γίνει αυτό εφικτό πρέπει να αλλάξει η λογική θεώρησης των εννοιών κόστους και οφέλους, και να μην περιορίζεται στις χρηματοροές από και προς τον ιδιώτη. Έτσι στο πλαίσιο της ΑΚΟ:

- Κόστος, θεωρείται το σύνολο των πόρων που δεσμεύονται, καταναλώνονται ή καταστρέφονται για την υλοποίηση της επένδυσης ή άλλης δράσης και πολιτικής, με συνέπεια τη μείωση της κοινωνικής ευημερίας.
- Όφελος, θεωρείται το σύνολο των οικονομικών, κοινωνικών ή περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την επένδυση που συμβάλλουν θετικά στην εθνική οικονομία και κοινωνική ευημερία.

Η ΑΚΟ εφαρμόζεται για την αξιολόγηση επενδυτικών σχεδίων, πολιτικών ή άλλων δράσεων που σχεδιάζονται από δημόσιους φορείς ή αποτελούν δράσεις κοινής ωφελείας. Για παράδειγμα η αξιολόγηση ενός δημόσιου έργου (π.χ. οδικά δίκτυα, λιμάνια), μίας αντιρρυπαντικής τεχνολογίας (π.χ. συστήματα αποθείωσης) ή ενός περιβαλλοντικού μέτρου (π.χ. διόδια για είσοδο αυτοκινήτων στα αστικά κέντρα), αποτελούν δράσεις που πρέπει να αξιολογηθούν με Ανάλυση Κόστους-Οφέλους. Στην Ε.Ε., πολλές Οδηγίες με περιβαλλοντικούς κανονισμούς, στόχους ή πολιτικές αξιολογούνται με τη βοήθεια ΑΚΟ και αξιοποιώντας εκτιμήσεις εξωτερικού κόστους- οφέλους που έχουν προκύψει από τεχνικές οικονομικής αποτίμησης. Επιπλέον, σε ορισμένες κατηγορίες μεγάλων έργων από δημόσιους ή ιδιωτικούς φορείς είναι υποχρεωτική η εκπόνηση και κατάθεση ΑΚΟ [30].

Σε ορισμένες περιπτώσεις, δεν είναι απαραίτητη η πλήρης αποτίμηση του κόστους και του οφέλους που χαρακτηρίζουν τις αξιολογούμενες δράσεις, οπότε είναι δυνατή η εφαρμογή απλούστερων τεχνικών, και συγκεκριμένα:

- **Ανάλυση Κόστους-Αποτελέσματος (Cost-Effectiveness Analysis):** Η ανάλυση εστιάζει σε μία συγκεκριμένη επίπτωση και προσδιορίζεται το καθαρό κόστος ανά μονάδα αποτελέσματος (π.χ. €/τόνο μείωσης CO₂, €/στρέμμα αρδευόμενης έκτασης) χωρίς να είναι απαραίτητο το όφελος από τη μείωση CO₂, ή από την άρδευση καλλιεργήσιμης γης να εκφρασθεί σε χρηματικές μονάδες.
- **Ανάλυση Ελάχιστου Κόστους (Least cost Analysis):** Η ανάλυση εστιάζει και πάλι σε μία συγκεκριμένη επίπτωση και προσδιορίζεται το καθαρό κόστος για ένα ορισμένο αποτέλεσμα (π.χ. € για μείωση CO₂ κατά 5%, € για άρδευση 10 χιλ. στρεμμάτων) το οποίο επίσης μπορεί να μην εκφρασθεί σε χρηματικές μονάδες.

Διαδικασία Ανάλυσης Κόστους-Οφέλους

Η διαδικασία εκπόνησης μίας ΑΚΟ περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- **Καθορισμός αντικειμένου:** περιγράφονται αναλυτικά οι προς αξιολόγηση δράσεις, είτε πρόκειται για μια μοναδική δράση που πρόκειται να υιοθετηθεί ή να απορριφθεί, είτε για εναλλακτικές επιλογές μεταξύ των οποίων αναζητείται η βέλτιστη.
- **Προσδιορισμός επιπτώσεων:** καταγράφονται οι κατηγορίες οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων κάθε επιλογής, η γεωγραφική κλίμακα και ο χρονικός ορίζοντας επίδρασής τους, καθώς και το πλήθος των αποδεκτών που επηρεάζουν.
- **Ποσοτικοποίηση επιπτώσεων:** προσδιορίζεται το ύψος και η ένταση κάθε επίπτωσης στην κατάλληλη για κάθε περίπτωση ποσοτική κλίμακα. Επιπτώσεις που αφορούν εμπορεύσιμα αγαθά, είτε θετικές (παραγωγή προϊόντων, συμβολή στο εθνικό εισόδημα) είτε αρνητικές (κατανάλωση πόρων, απώλεια γης) μεταφράζονται αυτόματα σε χρηματικές μονάδες.
- **Έκφραση επιπτώσεων σε κοινές μονάδες:** στο βαθμό που οι άμεσες επιπτώσεις εκφράζονται σε χρήμα και ο στόχος της ΑΚΟ είναι να συμπληρώσει τη χρηματο-οικονομική ανάλυση, επιλέγονται οι χρηματικές μονάδες ως κοινή βάση μέτρησης. Δεδομένου ότι πολλές από τις έμμεσες κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις αφορούν μη εμπορεύσιμα αγαθά (π.χ. μείωση ατυχημάτων, μείωση ανεργίας, αύξηση ατμοσφαιρικής ρύπανσης) και εκφράζονται σε φυσικές μονάδες, η αποτίμησή τους στηρίζεται στη χρήση μεθόδων της οικονομικής του περιβάλλοντος. Στις περισσότερες περιπτώσεις παραμένουν επιπτώσεις που είτε δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν (π.χ. οπτική ρύπανση) είτε είναι δύσκολο να αποτιμηθούν.
- **Αναγωγή χρηματοροών σε παρούσες αξίες:** κατ' αναλογία με τη χρηματο-οικονομική ανάλυση οι καθαρές χρηματοροές που προκύπτουν από την άθροιση όλων των παραμέτρων κόστους και οφέλους ανάγονται σε παρούσες αξίες.

- Υπολογισμός δεικτών αξιολόγησης: κατ' αναλογία με τη χρηματο-οικονομική ανάλυση υπολογίζονται δείκτες της συνολικής κοινωνικής αποδοτικότητας του έργου από τους οποίους συνάγεται αν και κατά πόσο το συνολικό όφελος που προκύπτει από το έργο υπερβαίνει το κόστος του, και αν είναι σκόπιμη και κοινωνικά επιθυμητή η υλοποίησή του.

Η διαδικασία αυτή είναι παρόμοια με τη διαδικασία της χρηματο-οικονομικής ανάλυσης, παρουσιάζει όμως επιπρόσθετες δυσκολίες, και συγκεκριμένα:

- Την ανάγνωση ορισμένων οικονομικών μεγεθών που συμμετέχουν και στη χρηματο-οικονομική ανάλυση από την ευρύτερη οπτική γωνία της κοινωνίας. Αυτό προϋποθέτει τη χρήση πρόσθετων δεδομένων και διορθωτικών συντελεστών.
- Την εκτίμηση και ποσοτικοποίηση πολλών και διαφορετικών επιπτώσεων σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα. Αυτό προϋποθέτει λεπτομερή έρευνα και αξιοποίηση γνώσεων από πολλά πεδία.
- Την αποτίμηση επιπτώσεων σε μη εμπορεύσιμα αγαθά. Αυτό προϋποθέτει την πρωτογενή εφαρμογή τεχνικών αποτίμησης ή αξιόπιστη μεταφορά εκτιμήσεων προγενέστερων ερευνών (τεχνικές Benefit Transfer).

Η έλλειψη επαρκών δεδομένων και γνώσεων αλλά και οι ανεπάρκειες των ίδιων των επιστημονικών προσεγγίσεων που εφαρμόζονται δεν επιτρέπουν συνήθως την πλήρη αντιμετώπιση αυτών των δυσκολιών, ενώ οι τελικές εκτιμήσεις χαρακτηρίζονται κατά κανόνα από ένα σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας σε σχέση με τη συμβατική χρηματο-οικονομική ανάλυση. Γι' αυτό και είναι αναγκαία η συστηματική ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων ως προς κρίσιμες ή ιδιαίτερα αβέβαιες παραμέτρους [30].

Δείκτες κοινωνικής αξιολόγησης

Οι δείκτες κοινωνικής αξιολόγησης εκφράζουν αν η αξία του συνόλου των πόρων που δεσμεύονται σε μία επένδυση, δράση ή πολιτική επιστρέφονται στην κοινωνία, με τι ρυθμό γίνεται αυτή η επιστροφή και αν απομένει κάποιο κέρδος για την κοινωνία [30].

Με βάση τις έννοιες που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο υπολογίζονται οι χρηματοροές της επένδυσης, όπως γίνονται αντιληπτές από την εθνική οικονομία και το σύνολο της κοινωνίας. Συγκεκριμένα, γίνονται οι ακόλουθες τροποποιήσεις και συμπληρώσεις σε σχέση με τη χρηματο-οικονομική ανάλυση:

- Κόστος επένδυσης: το σύνολο των πόρων που δεσμεύονται και όχι μόνο τα ίδια κεφάλαια. Εφαρμόζονται κατάλληλοι ΣΔ στις τιμές της αγοράς, π.χ. στο κόστος εισαγόμενου εξοπλισμού ή στο κόστος του οικοπέδου
- Έσοδα: εκφράζουν την κοινωνική αξία των παραγόμενων αγαθών και προκύπτουν από την εφαρμογή κατάλληλων ΣΔ στις τιμές της αγοράς αν η τιμή της αγοράς δεν αντανακλά την πραγματική Διάθεση για Πληρωμή της Κοινωνίας (π.χ. εξαγωγές, μονοπωλιακές καταστάσεις).

- Κόστος λειτουργίας: εφαρμόζονται κατάλληλοι ΣΔ στις τιμές της αγοράς, π.χ. στο κόστος εισαγόμενων εισροών (πρώτες ύλες, ενέργεια) και εργασίας.
- Άλλες παράμετροι ιδιωτικού κόστους: δεν λαμβάνονται υπόψη τόκοι και αποσβέσεις, ενώ σε άλλες παραμέτρους (κόστος διοίκησης, διαφήμισης, κλπ.) εφαρμόζονται κατάλληλοι ΣΔ.
- Εξωτερικές οικονομίες: λαμβάνεται υπόψη το εξωτερικό κόστος και το εξωτερικό όφελος που δημιουργεί η επένδυση, με αφαίρεση ή προσθήκη των αντίστοιχων συνιστωσών στην παραγόμενη κοινωνική αξία.

Οι ετήσιες καθαρές χρηματοροές που υπολογίζονται από τις προηγούμενες συνιστώσες, ανάγονται στο παρόν με χρήση ενός κοινωνικού επιτοκίου προεξόφλησης. Οι δείκτες NPV και IRR που χρησιμοποιούνται στη χρηματο-οικονομική ανάλυση, εφαρμόζονται και στην ΑΚΟ, έτσι ώστε να εκτιμηθεί άμεσα η πιθανή απόκλιση μεταξύ ιδιωτικού και κοινωνικού συμφέροντος και να προσδιορισθούν οι πολιτικές που θα επιτρέψουν τη σύγκλιση τους:

- Μία επένδυση με χαμηλή ιδιωτική και υψηλή κοινωνική αποδοτικότητα δεν θα αναληφθεί από τον ιδιώτη, αν και είναι επιθυμητή για την κοινωνία. Η πολιτεία θα πρέπει να ενθαρρύνει τον ιδιώτη με σχετικά κίνητρα (επιχορηγήσεις, φορολογικές ελαφρύνσεις) που ανταποκρίνονται στο κοινωνικό όφελος που θα προκύψει από την υλοποίηση της επένδυσης.
- Μία επένδυση με υψηλή ιδιωτική και χαμηλή κοινωνική αποδοτικότητα θα προσελκύσει το ενδιαφέρον των ιδιωτών, αν και δεν είναι επιθυμητή για την κοινωνία. Η πολιτεία θα πρέπει να αποθαρρύνει τον ιδιώτη με σχετικά αντικίνητρα (φορολογικές επιβαρύνσεις) ή απαγορευτικές διατάξεις.

Εκτός όμως από τους δείκτες NPV και IRR, ο πιο χαρακτηριστικός δείκτης μίας ΑΚΟ είναι ο δείκτης οφέλους/κόστους B/C, δηλαδή ο λόγος της παρούσας αξίας όλων των συνιστωσών οφέλους προς την παρούσα αξία όλων των συνιστωσών κόστους. Η κοινωνική αποδοτικότητα της επένδυσης αξιολογείται με βάση το αν και κατά πόσο το συνολικό κοινωνικό όφελος υπερβαίνει το συνολικό κοινωνικό κόστος:

- Αν $B/C > 1$: η επένδυση είναι κοινωνικά συμφέρουσα.
- Αν $B/C < 1$ η επένδυση είναι κοινωνικά επιζήμια.
- Αν $B/C = 1$: η κοινωνική αποδοτικότητα της επένδυσης είναι οριακή [30].

Όπως και ο δείκτης IRR, και ο αδιάστατος δείκτης B/C είναι κατάλληλος για τη συγκριτική αξιολόγηση της αποδοτικότητας ανόμοιων έργων. Οι δείκτες αποδοτικότητας μίας ΑΚΟ χαρακτηρίζονται από υψηλότερο βαθμό αβεβαιότητας σε σύγκριση με τους δείκτες χρηματο-οικονομικής απόδοσης για τους εξής λόγους:

- Οι σκιάδεις τιμές αποτελούν μία ατελή προσέγγιση της πραγματικής αξίας εμπορεύσιμων αγαθών.
- Δεν μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια οι επιπτώσεις της επένδυσης στο φυσικό και κοινωνικό περιβάλλον.

- Δεν μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια η αξία των κοινωνικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
- Το κοινωνικό επιτόκιο προεξόφλησης επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα [30].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΤΕΧΝΙΚΑ & ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ

5.1 Η ΔΟΜΗ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ

Με βάση όλα όσα συζητήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, η δομή που διερευνά η παρούσα εργασία θα αποτελείται από τρία επιμέρους ρεύματα για την ανάκτηση R.E.E. από (i) την ήδη υπάρχουσα C.F.A., (ii) τους μόνιμους μαγνήτες NdFeB από τις προς απόσυρση ανεμογεννήτριες και (iii) από λαμπτήρες φθορισμού προς ανακύκλωση. Θα διερευνηθεί επίσης και η λειτουργία δομής συνδυαστικής ανάκτησης. Η επιλογή των θέσεων στις οποίες θα μπορούσαν να οργανωθούν τα βασικά στοιχεία της δομής ανάκτησης R.E.E. εντός των ορυχείων Πτολεμαΐδας αποτελεί σύνθετο, πολυπαραγοντικό ζήτημα. Η κάτοψη που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2 είναι τοπογραφικό σχέδιο που σχεδιάστηκε το 2021 και περιλαμβάνει 85 σημεία στον ευρύτερο χώρο των ορυχείων. Με βάση τις πρόσφατες εξαγγελίες της ΔΕΗ, η σύγχρονη μονάδα V θα είναι η μόνη μονάδα που θα παράγει ηλεκτρικό ρεύμα από λιγνίτη και αυτό μέχρι το 2026. Σύντομα λοιπόν, όλοι οι χώροι που εμπεριέχονται στο τοπογραφικό θα μπορούσαν δυνητικά να χρησιμοποιηθούν για τους σκοπούς αυτής της μελέτης. Ωστόσο, η ηλεκτρική παραγωγή από λιγνίτη σε γειτονικές χώρες θα συνεχίσει να πραγματοποιείται και μετά το 2026, οπότε η υπτάμενη τέφρα θα συνεχίσει να αποτελεί μια πιθανή πηγή ανάκτησης R.E.E. και τα επόμενα χρόνια. Πιο συγκεκριμένα, την περίοδο συγγραφής αυτής της εργασίας, 70 περίπου φορτηγά με λιγνίτη που τροφοδοτούν το εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας στα Μπίτολα και το θερμοηλεκτρικό εργοστάσιο του Οσλομεί αποστέλλονται καθημερινά στη Β. Μακεδονία [31].

Η βασική υπόθεση εργασίας προσδιορίζει ότι τα κριτήρια με βάση τα οποία θα γίνει η επιλογή των θέσεων της δομής είναι (i) η ύπαρξη επαρκούς χώρου όπου θα συγκεντρώνονται τα αρχικά υλικά, (ii) η ύπαρξη εγκατάστασης κατεργασίας λυμάτων πλησίον του χώρου όπου θα γίνεται η κατεργασία με τις διεργασίες που παρουσιάστηκαν παραπάνω και (iii) η ύπαρξη δεξαμενών όπου θα μπορούν να αποθηκευτούν τα υγρά/αντιδραστήρια με τα οποία θα γίνεται η κατεργασία. Δεδομένου ότι σε εργαστηριακή κλίμακα έχει επιβεβαιωθεί η δυνατότητα ανάκτησης, με τα αντίστοιχα ποσοστά που προαναφέρθηκαν, οι παραδοχές που αναγκαστικά πρέπει να γίνουν σε αυτήν την εργασία θα αφορούν δομή με παραγωγή μεταξύ εργαστηριακής και πιλοτικής κλίμακας.

Το τελικό προϊόν (gr) αντίστοιχων δομών πιλοτικής κλίμακας μπορεί να ποικίλει και μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διαφορές στη μάζα του τελικού παραγόμενου μετάλλου. Ενδεικτικά αναφέρονται η δομή πιλοτικής κλίμακας του Πανεπιστημίου του Kentucky όπου παράγεται συμπύκνωμα R.E.E. από υπτάμενη τέφρα και άλλα προϊόντα/παραπροϊόντα που σχετίζονται με την ηλεκτροπαραγωγή από λιγνίτη [32] [33], η δομή πιλοτικής κλίμακας ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες NdFeB της SINTEF, με έδρα το Trondheim στη Νορβηγία, του ευρωπαϊκού προγράμματος REE4EU: PROJECT RARE EARTH RECYCLING FOR EUROPE [34] και η δομή ανάκτησης R.E.E. (υτρίου και ευρωπίου) από λαμπτήρες φθορισμού (LFL & CFL) του ευρωπαϊκού προγράμματος RECLAIM [35]. Η ημερήσια παραγωγή R.E.E. του Πανεπιστημίου του Kentucky κυμαινόταν από 10 έως 100 gr R.E.O., στο REE4U project παρήχθησαν περίπου 300 kg R.E.O. με υλικό τροφοδοσίας πάνω από 2 τόνους αρχικής σκόνης που προερχόταν από μαγνήτες, ενώ στο πρόγραμμα RECLAIM, ο αρχικός στόχος ήταν η παραγωγή 30 - 100 gr R.E.E. σε καθημερινή βάση.

Οι διεργασίες που εφαρμόζονται στις παραπάνω υπάρχουσες δομές δεν έχουν ουσιαστικές διαφορές με τις προτεινόμενες μεθοδολογίες ανάκτησης που εξετάσθηκαν στο κεφάλαιο 2 (για την ακρίβεια η απόδοση των προτεινόμενων διεργασιών του κεφαλαίου 2 είναι υψηλότερη σε σχέση με αυτήν που επετεύχθη στις παραπάνω δομές).

Δεδομένου ότι η παρούσα εργασία προσπαθεί να προσεγγίσει τους οικονομοτεχνικούς παράγοντες της δημιουργίας μιας αντίστοιχης δομής ανάκτησης, χωρίς όμως να υπάρχει στην περιοχή και το αντίστοιχο έργο εργαστηριακής κλίμακας με δεδομένα πάνω στο οποίο θα βασιστεί η εν λόγω δομή (με εξαίρεση ίσως την ιπτάμενη τέφρα), πρέπει να γίνει η παραδοχή ενός στοχαστικού μοντέλου, το οποίο με βάση τις προαναφερθείσες υπάρχουσες δομές, την υπάρχουσα πρώτη ύλη και τις προτεινόμενες μεθοδολογίες ανάκτησης, μπορεί ρεαλιστικά να παράγει περίπου **100 gr R.E.O/R.E.E.** ημερησίως από κάθε προτεινόμενη πηγή αρχικού υλικού. Πρέπει να σημειωθεί ότι ειδικά για την ανάκτηση R.E.E. από λάμπες φθορισμού, είναι απαραίτητη αρχικά η απομάκρυνση του υδραργύρου, κάτι το οποίο όμως έχει τυποποιηθεί, δεν αποτελεί ιδιαίτερα κοστοβόρα διαδικασία και θα μπορούσε να αναπτυχθεί και στην υπό συζήτηση δομή [35]. Εξετάζοντας την αναλογία συγκέντρωσης βάρους / ανάκτησης των παραπάνω πηγών και των προτεινόμενων διεργασιών ανάκτησης πρέπει να υπολογιστούν τα αρχικά, ενδεικτικά ισοζύγια μάζας.

5.2 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ

Ισοζύγιο Μάζας για την κατεργασία ιπτάμενης τέφρας (C.F.A.)

Χωρίς να έχει γίνει η πλήρης γεωχημική χαρτογράφηση της περιεκτικότητας σε R.E.E. των τεφρών που προέρχονται από ελληνικούς λιγνίτες και με βάση αποκλειστικά την έρευνα που έχει γίνει από τον γράφοντα, η βέλτιστη συγκέντρωση σε R.E.E. της C.F.A. του ΑΗΣ Μελίτης, κατόπιν εμπλουτισμού, ήταν τα 305.07 ppm (Πίνακας 3). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι σε 1 kg C.F.A. εμπεριέχονται 305.07 mg R.E.E. [8]. Η προτεινόμενη μεθοδολογία ανάκτησης των Wang et al. πέτυχε, όπως προαναφέρθηκε, ποσοστό ανάκτησης 88.15% [15]. Εφαρμόζοντας λοιπόν αυτήν τη διεργασία ανάκτησης στην εμπλουτισμένη C.F.A. του ΑΗΣ Μελίτης, θα υπάρχει, για τροφοδοσία 1 kg C.F.A., τελική ανάκτηση $305,07 \times 0.8815 = 268,92$ mg R.E.E.. Η ποσότητα αυτή πρέπει να μετατραπεί στην αντίστοιχη ποσότητα R.E.O., μέσω του μοριακού βάρους, δεδομένου ότι γενικά η οξειδωτική κατάσταση των R.E.E. είναι η +3 ($R.E.E._2O_3 \rightarrow AB_{R.E.E.} \times 2 + AB_O \times 3$). Έτσι, η ποσότητα των 268,92 mg R.E.E. αντιστοιχεί σε ποσότητα 382.1 mg R.E.O. Για την παραγωγή λοιπόν 100 gr R.E.O. χρειάζονται:

$$[1000 \text{ gr C.F.A.} \times 100 \text{ gr R.E.O.}] / [0.3821 \text{ gr R.E.O.}] = 260.417 \text{ gr} \approx 260 \text{ kg C.F.A.}$$

Με δεδομένο ότι η πυκνότητα της τέφρας είναι $\approx 2.5 \text{ gr/cm}^3$ ($2.5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$), στους 2 χώρους απόθεσης που αναφέρθηκαν στο 3^ο κεφάλαιο υπάρχουν αυτήν τη στιγμή περίπου 14 εκατομμύρια τόνοι C.F.A. (δεδομένης της μικρής συγκέντρωσης S στην C.F.A.) και περίπου 10 εκατομμύρια m³

C.F.A. (δεδομένης της χωρικής κατανομής του πάνω στο έδαφος που αποτίθεται), που αντιστοιχούν σε $10.000.000 \text{ m}^3 \times 2.5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3 = 25.000 \text{ kg}$. Συνεπώς, με βάση την υφιστάμενη κατάσταση, υπάρχουν στους 2 σωρούς απόθεσης $14 \times 10^9 + 25 \times 10^3 \text{ kg} = 14.000.025.000 \text{ kg C.F.A.}$. Για θεωρητική παραγωγή 100 gr R.E.O. ημερησίως, απαιτούνται με την προτεινόμενη μεθοδολογία ανάκτησης: $260 \text{ kg} \times 5 \approx 1300 \text{ kg C.F.A.}$, συνεπώς σε μια δομή πενθήμερης λειτουργίας η τροφοδοσία θα είναι: $4 \times 1300 \approx 5200 \text{ kg C.F.A.}$ και ετησίως $\approx 62.400 \text{ kg}$. Η ποσότητα αυτή είναι κατά πολύ μικρότερη από την ήδη υπάρχουσα των 2 σωρών απόθεσης.

Ισοζύγιο Μάζας για την κατεργασία μαγνητών NdFeB

Αναφορικά με την ανάκτηση από τους μαγνήτες NdFeB, η συγκέντρωση R.E.E. δεν είναι σταθερή και κυμαίνεται μεταξύ 28 - 35% όπως προαναφέρθηκε. Τα τελευταία 20 χρόνια, οι διαστάσεις των ανεμογεννητριών έχουν αυξηθεί προκαλώντας δραστική αύξηση της μάζας του κράματος NdFeB σε αυτούς τους μαγνήτες, μερικές φορές της τάξεως των εκατοντάδων kg. Με βάση την προτεινόμενη διεργασία ανάκτησης των Pietrantonio et al. επετεύχθη ανάκτηση των τριών R.E.E. που περιείχε το αρχικό δείγμα (Nd, Pr, Tb, σε μορφή R.E.O.), με βαθμό καθαρότητας του προϊόντος 99% [16]. Για να υιοθετηθεί ένα στοιχειώδες ισοζύγιο μάζας, πρέπει αρχικά να γίνει η παραδοχή ότι η συγκέντρωση R.E.E. σε αυτά τα υλικά είναι σταθερή και ίση με 30% (Εικόνα 10). Επομένως, σε μια ανεμογεννήτρια μέσης ισχύος 3,5 MW, ο μόνιμος μαγνήτης NdFeB ζυγίζει περίπου 600 kg και συνεπώς το βάρος των R.E.E. (κυρίως του Nd) ισούται με περίπου 200 Kg. Με βάση αυτό, για την παραγωγή 100 gr R.E.O. ημερησίως απαιτούνται:

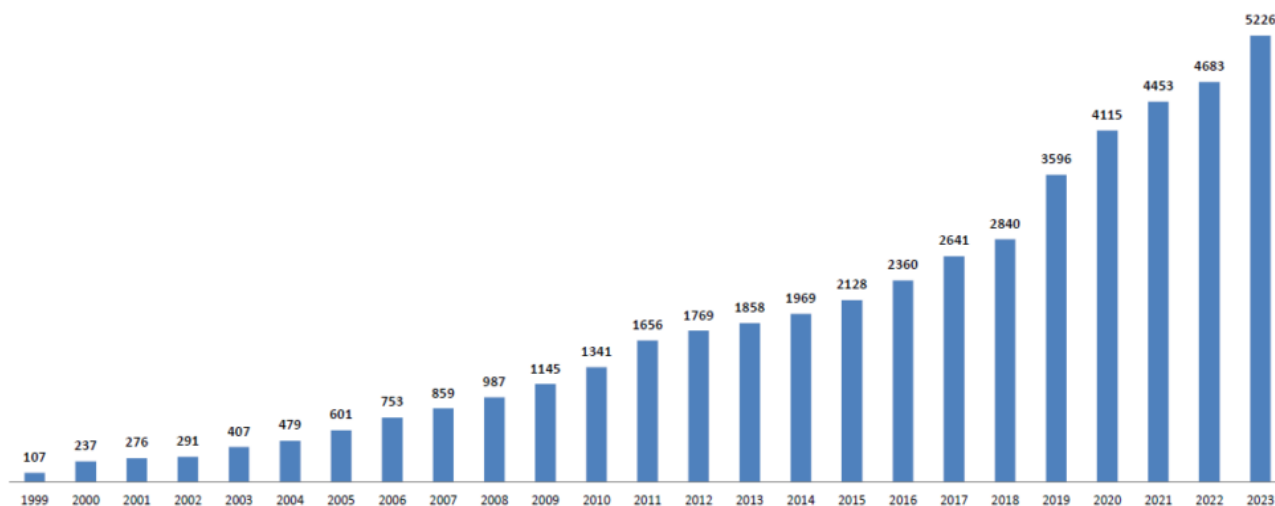
$$[100 \text{ gr σκ. NdFeB} \times 100 \text{ gr R.E.O.}] / [(0.3 \times 0.99 \times 100) \text{ gr R.E.O.}] \approx 336.7 \text{ gr σκόνης NdFeB}$$

Για την ημερήσια παραγωγή λοιπόν 100 gr R.E.O. με την προτεινόμενη διεργασία απαιτούνται 336.7 gr λειοτριβημένης σκόνης κράματος NdFeB μαγνήτη. Με βάση τα δεδομένα της HWEA (Hellenic Wind Energy Association) [36], τα τελευταία 20 έτη, η ετήσια παραγόμενη ισχύς από αιολική ενέργεια κυμάνθηκε από 479 W το 2004, στα 5226 W το 2023, όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 21.

Δεδομένου ότι ο μέσος χρόνος ζωής μιας ανεμογεννήτριας είναι κάτι παραπάνω από 20 χρόνια, τα επόμενα έτη μια μεγάλη ποσότητα ανεμογεννητριών θα βγει εκτός λειτουργίας, με ότι αυτό συνεπάγεται για τις πρώτες ύλες που θα μπορούν να επανακτηθούν από αυτές. Με βάση την ανάλυση που έγινε στην ενότητα 2.2, για μια ανεμογεννήτρια απαιτούνται 250-650 kg μαγνήτη NdFeB για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια 1 MW [17]. Θα θεωρήσουμε λοιπόν ότι για 1 MW απαιτούνται περίπου 450 kg μαγνήτη NdFeB. Πριν το 2010, η παραγόμενη ισχύς από αιολική ενέργεια στη Δυτική Μακεδονία ήταν μικρή (<24 MW), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 22, ενώ σήμερα, η ισχύς ανέρχεται στα 374 MW, όπως φαίνεται στην Εικόνα 23.



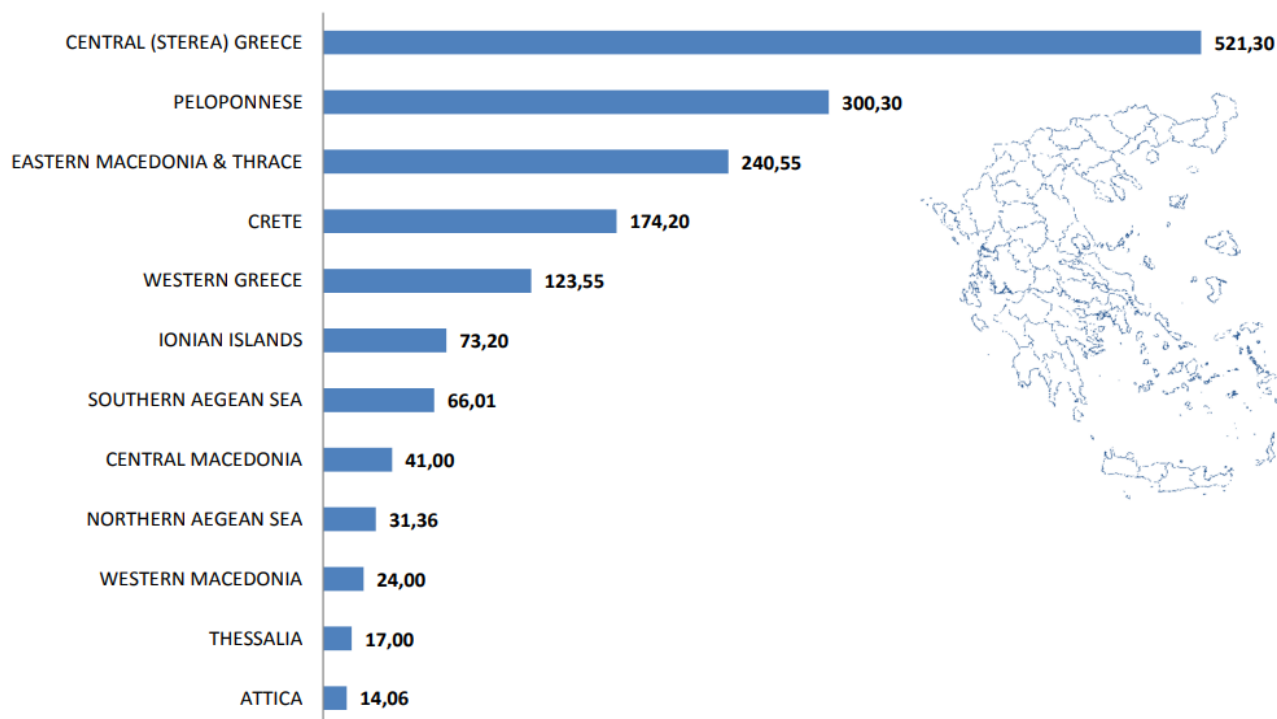
Total capacity to the grid (MW) per year



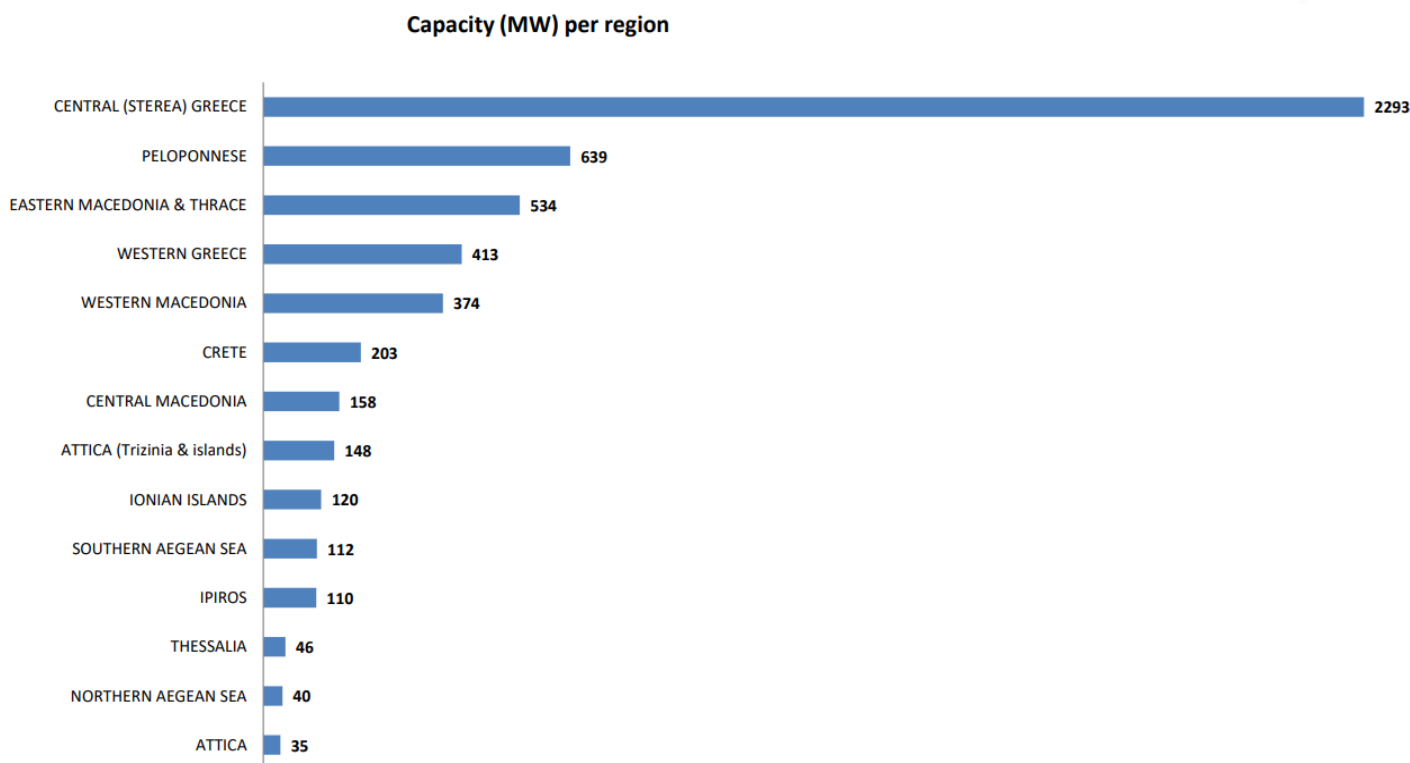
The HWEA Wind Energy Statistics take into account the wind capacity which is in commercial or test operation in Greece and are based on sources from the market actors. HWEA has made effort to crosscheck and confirm the data. However, HWEA does not guarantee the accuracy of them and do not undertake any relevant liability.

Εικόνα 21: Προσφορά ισχύος από αιολική ενέργεια, έτη 1999-2023 (<https://wattcrop.com/for-the-first-time-wind-power-in-greece/>).

Installed MW per region



Εικόνα 22: Παραγόμενη ισχύς από αιολική ενέργεια ανά περιφέρεια, 2010 (Δεδομένα ΕΛΕΤΑΕΝ, <https://eletaen.gr/hwea-wind-statistics/>).



Εικόνα 23: Παραγόμενη ισχύς από αιολική ενέργεια ανά περιφέρεια σήμερα (Δεδομένα ΕΛΕΤΑΕΝ, <https://eletaen.gr/hwea-wind-statistics/>).

Οπότε, η μέση ετήσια προσθήκη ισχύος στο ενεργειακό μίγμα ήταν περίπου $350/20 \approx 17.5$ MW. Αν θεωρήσουμε λοιπόν ότι μέσα στα επόμενα 20 έτη θα αποσύρονται ετησίως ανεμογεννήτριες που προσέφεραν 17.5 MW ισχύος, αυτό σημαίνει ότι η συνολική αποσυρόμενη αυτή ποσότητα υλικού θα συνεπάγεται $17.5 \times 450 = 7.875$ kg μαγνήτη NdFeB προς επανάκτηση, ετησίως. Με δεδομένο το ισοζύγιο μάζας ανάκτησης 100 gr R.E.O. που προτάθηκε παραπάνω, από αυτήν την επανακτώμενη ποσότητα μπορούν, με την προτεινόμενη διεργασία, να παραχθούν 2.338,9 kg R.E.O. ετησίως. Σε μια δομή ανάκτησης πενθήμερης λειτουργίας, αυτή η ποσότητα θα αντιστοιχούσε σε δυνητική ανάκτηση 8,99 kg R.E.O. περίπου ημερησίως. Προφανώς, η συγκεκριμένη ποσότητα σαν τροφοδοσία είναι μεγάλη και μπορεί εύκολα να καλύψει τον στόχο των 100 gr R.E.O. από ανακυκλωμένους μαγνήτες της υπό συζήτησης δομής.

Ισοζύγιο Μάζας για την κατεργασία λαμπτήρων φθορισμού

Αναφορικά με την ανάκτηση R.E.E. από τους λαμπτήρες φθορισμού, θα γίνει η παραδοχή ότι η συγκέντρωση των R.E.E. σε όλους τους λαμπτήρες είναι ίδια με αυτήν στην εργασία των Yurramendi et al., η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 24. Στην εργασία τους πραγματοποιήθηκε ένα αρχικό βήμα έκπλυσης της λειοτριβημένης σκόνης του λαμπτήρα για την παραγωγή ενός ιζήματος με σημαντική ποσότητα υπολειμματικών R.E.E., με τη μορφή των φωσφορικών αλάτων, που χρησιμοποιήθηκε ως τροφοδοσία για την διεργασία ανάκτησης που πραγματοποίησαν [12]. Στη συνέχεια, 25 gr αυτού του υλικού υποβλήθηκαν στη διεργασία που αποτυπώνεται στο διάγραμμα ροής της Εικόνας 12.

	Concentration, wt%
Y	6.29
La	0.90
Ce	0.74
Eu	0.43
Tb	0.32
Gd	0.14

Εικόνα 24: Συγκέντρωση R.E.E. του δείγματος της σκόνης λαμπτήρων φθορισμού στη μελέτη των Yurramendi et al. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X18308326>).

Η απόδοση της προτεινόμενης διεργασίας ανάκτησης ήταν 82%, 75% και 82% για Ce, La και Tb, αντίστοιχα. Επομένως, στα 1000 gr αρχικού υλικού σκόνης λαμπτήρων φθορισμού εμπεριέχονταν 9.9 gr La, 7.4 gr Ce, 3.4 gr Tb, 62.9 gr Y, 4.3 gr Eu και 1.4 gr Gd (Εικόνα 12). Μετά την προτεινόμενη διεργασία, το Y, το Gd και το Eu διαλύονται πλήρως στο H₂SO₄ και μπορούν να ανακτηθούν σχετικά εύκολα μετά από καθίζηση με Na₃PO₄ όπως προτείνουν οι Beltrami et al. [37]. Η μεθοδολογία που περιγράφεται σε αυτήν την διεργασία οδηγεί σε ανάκτηση 68% Y, 77% Gd και θα πρέπει να γίνει μια παραδοχή πως η αντίστοιχη ανάκτηση Eu θα προσεγγίζει το 70%. Αυτές οι αναλογίες σε 1000 gr σκόνης λαμπτήρα αντιστοιχούν σε 42.8 gr Y, 1.1 gr Gd και 3 gr Eu. Αντίστοιχα, το La, το Ce και το Tb ανακτήθηκαν στο 1^ο μικτό κλάσμα (στάδιο 9 / 16.3 gr R.E.O., Εικόνα 12) που περιείχε 7.5 gr La, 6.0 gr Ce, 0.1 gr Tb (13.6 gr R.E.E.) και στο 2^ο μικτό κλάσμα (στάδιο 11 / 5.2 gr R.E.O.) που περιείχε 0.6 gr La, 0,4 gr Ce, 2.8 gr Tb (3.8 gr R.E.E.). Στα 1000 gr σκόνης λαμπτήρων, μετά την αρχική διάλυση με H₂SO₄ θα ανακτώνται με την μεθοδολογία των Beltrami et al. [37] τα 46.9 gr που αφορούν το Y, το Gd και το Eu και 17.4 gr που αφορούν το Ce, το La και το Tb, με βάση τη μεθοδολογία των Yurramendi et al. [12]. Συνολικά δηλαδή 64.3 gr R.E.E.. Εφόσον έχουμε την ποσότητα R.E.O. για το La, Ce και Tb, πρέπει να γίνει η μετατροπή της ποσότητας του Y, Gd και Eu στην αντίστοιχη ποσότητα R.E.O. μέσω του μοριακού βάρους, όπως έγινε και με την C.F.A. παραπάνω. Η ημερήσια ποσότητα των 64.3 gr R.E.E. αντιστοιχεί σε 99.4 gr R.E.O., όση περίπου και η ποσότητα που επιδιώκεται να ανακτά η δομή.

$$[1000 \text{ gr σκ. λαμπτήρα} \times 100 \text{ gr R.E.O.}] / 99.4 \text{ gr R.E.O.} \approx 1007.5 \text{ gr σκόνης λαμπτήρα}$$

Δεδομένου ότι η σκόνη του λαμπτήρα αποτελείται κατά 45% περίπου από (YOX) και (CBT) και κατά 55% από (LAP), (CAT), (BAM) [38] και ότι τα φωσφορικά και τα αργιλικά είναι ανθεκτικά στην διάλυση με χημική κατεργασία [12], η παραπάνω ποσότητα σκόνης καταμερίζεται σε 2 ρεύματα, κατά την προτεινόμενη διεργασία. Αυτό έχει σημασία για τον υπολογισμό των αντιδραστηρίων που θα ακολουθήσει. Από τα επίσημα δεδομένα της εταιρείας ΔΙΑΔΥΜΑ (Διαχείριση Απορριμμάτων Δυτικής Μακεδονίας), που αφορούν την φωτοκύκλωση λαμπτήρων για τα έτη 2020, 2021, 2022 (ΑΗΗΕ έτη 2020-2022), η μέση ετήσια μάζα λαμπτήρων που ανακυκλώνονται είναι 9242 kg, ποσότητα αρκετά μεγαλύτερη από αυτήν που απαιτείται για τη λειτουργία της δομής με βάση το παραπάνω ισοζύγιο.

5.3 ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΙΩΝ

Με βάση τα ισοζύγια μάζας που υπολογίστηκαν στην παραπάνω ενότητα θα υπολογισθούν και οι αντίστοιχες ποσότητες χημικών αντιδραστηρίων που απαιτούνται σε κάθε βήμα κατά την διεργασία ανάκτησης.

Αναφορικά με την C.F.A., λόγω της μικρής συγκέντρωσης των R.E.E. σε αυτήν, οι ποσότητες των χημικών αντιδραστηρίων που απαιτούνται για την διεργασία θα είναι σημαντικά μεγαλύτερος σε σχέση με τα άλλα δύο υλικά. Για ημερήσια ανάκτηση 100 gr R.E.O., αυτό συνεπάγεται αρχική ποσότητα τροφοδοσίας 260 kg C.F.A.. Αυτή η ποσότητα, με την προτεινόμενη μεθοδολογία ανάκτησης, απαιτεί **520 lit HF, 260 lit NaOH και 648.3 lit HCl**. Οι μεγάλες ποσότητες αυτές καθιστούν δύσκολη την ανάκτηση των R.E.E. από την C.F.A. του ΑΗΣ Μελίτης, στην παρούσα φάση. Ωστόσο, με δεδομένη αυτήν τη συγκέντρωση των R.E.E. σαν αντιπροσωπευτική της για το σύνολο της C.F.A. που υπάρχει στους 2 σωρούς απόθεσης, υπάρχουν περίπου 3,6 τόνοι R.E.E. που μπορούν να ανακτηθούν με τη σταδιακή βελτίωση των προτεινόμενων διεργασιών.

Αναφορικά με τους λαμπτήρες φθορισμού, για ημερήσια ανάκτηση ≈ 100 gr R.E.O. απαιτούνται περίπου **1007.5 gr** σκόνης λαμπτήρα φθορισμού. Αυτή η ποσότητα απαιτεί για την αρχική διάλυση 6.5 lit H_2SO_4 . Στη συνέχεια δημιουργούνται 2 ρεύματα όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Στο 1^ο ρεύμα που θα αποτελείται θεωρητικά από 450 περίπου gr της αρχικής ποσότητας ($\approx 45\%$), πραγματοποιείται η ανάκτηση του Y, Gd, Eu με καθίζηση με Na_3PO_4 , για την οποία απαιτούνται περίπου 200 gr Na_3PO_4 , 150 gr NaOH, 1.5 lit H_2O_2 (3%) και 100 ml HCl (1M) [37]. Για το 2^ο ρεύμα που θα αποτελείται από 550 gr ($\approx 55\%$), με πρώτο βήμα σύντηξης με Na_2CO_3 , απαιτούνται 275 gr αντιδραστηρίου. Στη συνέχεια, για το επόμενο βήμα έκπλυσης απαιτούνται 3.5 lit απιονισμένου H_2O και 3.5 lit HCl. Μετά την έκπλυση ακολουθεί το στάδιο εκχύλισης υγρού-υγρού με 60% D2EHPA, με αναλογία οργανικού - μη οργανικού υγρού 1:1, το οποίο συνεπάγεται και ≈ 3.5 lit D2EHPA. Η οργανική φάση της εκχύλισης, που θα εμπεριέχει το Tb, θα συλλεχθεί και θα επιχειρηθεί η καθίζηση του με οξαλικό οξύ, με αναλογία οργανικού – μη οργανικού 20:1. Αυτό συνεπάγεται, για 3.5 lit D2EHPA, περίπου 175 ml οξαλικού οξέος. Η μη οργανική φάση που θα εμπεριέχει το La και το Ce υπόκειται ξανά σε εκχύλιση με πυκνό D2EHPA, σε ίδια αναλογία. Το τελικό στάδιο ανάκτησης $(La/Ce)_2O_3$ περιλαμβάνει την καθίζηση τους με οξαλικό οξύ, στην προηγούμενη αναλογία (20:1), που συνεπάγεται άλλα 175 ml οξαλικού οξέος.

Αναφορικά με τους μαγνήτες NdFeB, για ημερήσια ανάκτηση 100 gr R.E.O. απαιτούνται περίπου 336.7 gr σκόνης μαγνήτη. Η σύσταση του υλικού είναι σαφώς απλούστερη σε σχέση με τους λαμπτήρες και την C.F.A., γεγονός που συνεπάγεται λιγότερα αντιδραστήρια για την ανάκτηση των R.E.O.. Με βάση την προτεινόμενη διεργασία, για τροφοδοσία 336.7 gr θα απαιτηθούν περίπου 1 lit NH_3 για την αρχική διάλυση. Στη συνέχεια, για το στάδιο της καθίζησης του Fe, θα απαιτηθεί περίπου 1 lit NaOH. Για το τελικό βήμα, δεδομένου ότι θα έχει απομακρυνθεί το σύνολο του σιδήρου ($2/3$ της συνολικής μάζας), θα απαιτηθεί 400 ml περίπου οξαλικού οξέος. Συνολικά, οι ποσότητες που απαιτούνται απεικονίζονται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Συνολικές ποσότητες αντιδραστηρίων της δομής ανάκτησης ημερησίως.

Πηγή Υλικού	Αντιδραστήριο	Ποσότητα (lit ή gr)
C.F.A.	HF	520 lit
"	NaOH	260 lit
"	HCl	648.3 lit
Λαμπτήρες	H ₂ SO ₄	6.5 lit
"	Na ₃ PO ₄	200 gr
"	NaOH	150 gr
"	H ₂ O ₂	1.5 lit
"	Na ₂ CO ₃	275 gr
"	Απιονισμένο νερό	3.5 lit
"	D2EHPA	3.5 lit
"	Οξαλικό οξύ	300 ml
"	HCl	3.6 lit
NdFeB μαγνήτες	HNO ₃	1 lit
"	NaOH	1 lit
"	Οξαλικό οξύ	500 ml

Για τον υπολογισμό του συνολικού ημερήσιου κόστους, θα χρησιμοποιηθούν ενδεικτικές τιμές από την αγορά για κάθε αντιδραστήριο. Οι τιμές μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τον προμηθευτή και την καθαρότητα των χημικών. Ακολουθούν οι εκτιμώμενες τιμές για τα αντιδραστήρια που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 8.

1. HF (υδροφθορικό οξύ): 30 € ανά λίτρο
2. NaOH (υδροξείδιο του νατρίου) (pellet): 0.3 € ανά γραμμάριο
3. NaOH (υδροξείδιο του νατρίου): 5 € ανά λίτρο
4. HCl (υδροχλωρικό οξύ): 15 € ανά λίτρο
5. H₂SO₄ (θειικό οξύ): 10 € ανά λίτρο
6. Na₃PO₄ (φωσφορικό νάτριο): 0.075 € ανά γραμμάριο
7. H₂O₂ (Υπεροξείδιο του υδρογόνου): 2 € ανά λίτρο
8. Na₂CO₃ (ανθρακικό νάτριο): 0.008 € ανά γραμμάριο
9. D2EHPA: 70 € ανά λίτρο
10. Οξαλικό οξύ: 5 € ανά λίτρο
11. HNO₃ (νιτρικό οξύ): 7 € ανά λίτρο

Το συνολικό ημερήσιο κόστος με βάση αυτές τις τιμές του Πίνακα 8 υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται στον Πίνακα 9:

Πίνακας 9: Ανάλυση ημερήσιου κόστους αντιδραστηρίων για τη λειτουργία της δομής ανάκτησης.

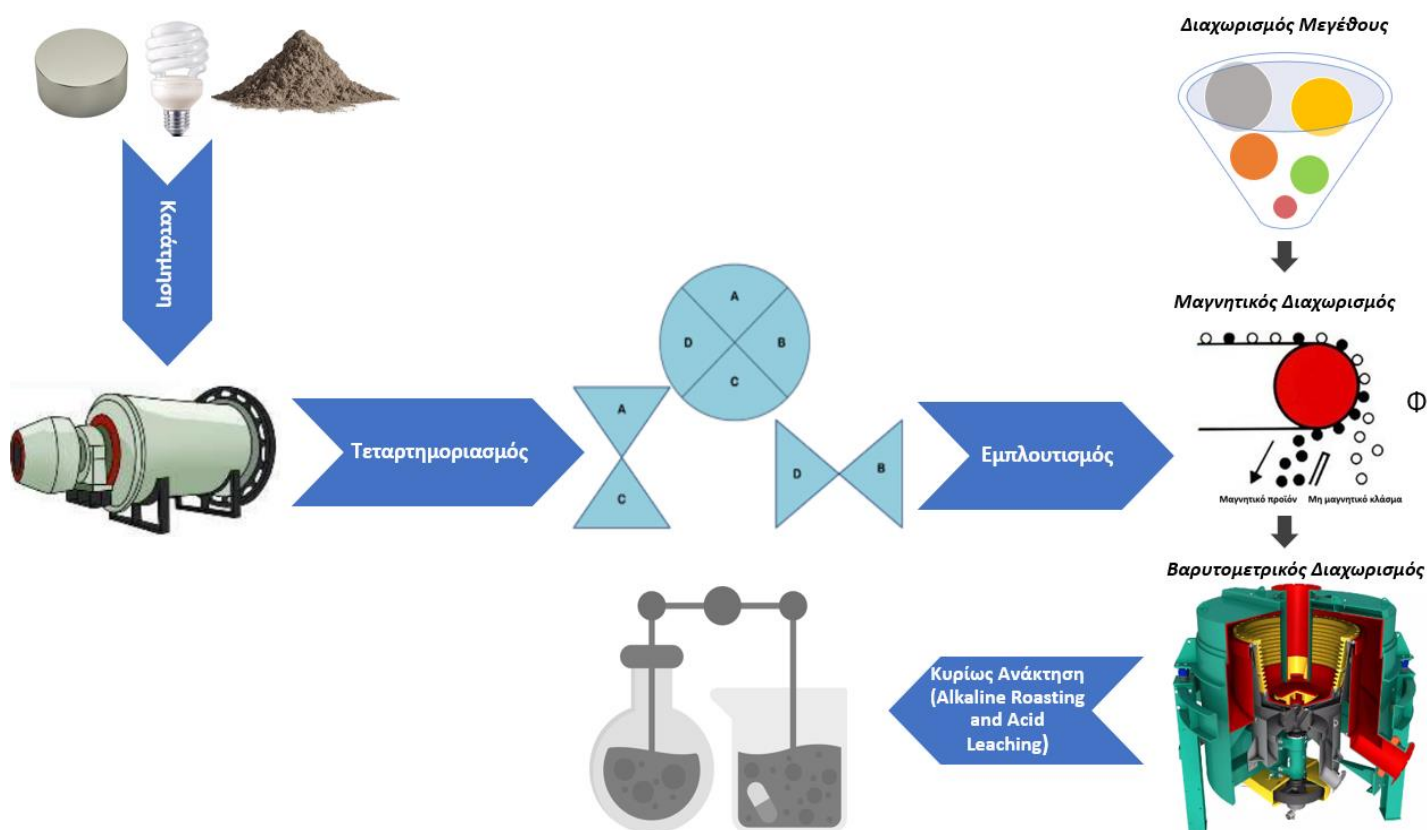
Πηγή Υλικού	Αντιδραστήριο	Ποσότητα (lit ή gr)	Τιμή ανά μονάδα	Κόστος (€)	Συνολικό Κόστος Αντιδραστηρίων (€)
C.F.A.	HF	520 lit	30 €/lit	15600	26.624,5
"	NaOH	260 lit	5 €/lit	1300	
"	HCl	648.3 lit	15 €/lit	9724.5	
Λαμπτήρες	H ₂ SO ₄	6.5 lit	10 €/lit	65	434.2
"	Na ₃ PO ₄	200 gr	0.075 €/gr	15	
"	NaOH	150 gr	0.3 €/gr	45	
"	H ₂ O ₂	1.5 lit	2 €/lit	3	
"	Na ₂ CO ₃	275 gr	0.008 €/gr	2.2	
"	Απιον. νερό	3.5 lit	1 €/lit	3.5	
"	D2EHPA	3.5 lit	70 €/lit	245	
"	Οξαλικό οξύ	300 ml	5 €/lit	1.5	
"	HCl	3.6 lit	15 €/lit	54	
NdFeB μαγνήτες	HNO ₃	1 lit	7 €/lit	7	14.5
"	NaOH	1 lit	5 €/lit	5	
"	Οξαλικό οξύ	500 ml	5 €/lit	2.5	

Γίνεται επίσης κατανοητό ότι η ανάκτηση των R.E.E. από την C.F.A. κρίνεται αποτρεπτική, δεδομένης της μικρής αρχικής συγκέντρωσης τους στην πρώτη ύλη και της αντίστοιχα πολύ μεγάλης απαιτούμενης ποσότητας πρώτης ύλης και αντιδραστηρίων για την ανάκτηση τους. Δεδομένου ότι η δομή θα εκτελεί σε καθημερινή βάση τις προτεινόμενες διεργασίες, είναι ασφαλές να θεωρηθεί ότι η προμήθεια τους σε μεγάλες ποσότητες μπορεί να είναι έως και 15% φθηνότερη, συνολικά. Επομένως, για την C.F.A., τούς λαμπτήρες φθορισμού και τους μαγνήτες NdFeB οι παραπάνω τιμές, για προμήθεια μεγάλων ποσοτήτων αντιδραστηρίων, μπορούν να εκτιμηθούν γύρω στα 22.630 €, 369.1 € και 12.3 € αντίστοιχα. Γίνεται ήδη αντιληπτό πως το κόστος για την ανάκτηση R.E.E. από την C.F.A. φαίνεται αποτρεπτικό για την υλοποίηση της διεργασίας ανάκτησης τους στη δομή.

5.4 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΜΕΡΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ

Πριν το στάδιο της κυρίως ανάκτησης είναι δεδομένο πως οι πρώτες ύλες θα περάσουν από ένα στάδιο προεμπλουτισμού (κατάτμηση - λειοτρίβιση) και από ένα στάδιο εμπλουτισμού. Για αυτές τις διεργασίες θα απαιτηθεί σχετικός εξοπλισμός. Για την λειοτρίβιση του αρχικού υλικού απαιτείται σφαιρόμυλος ενώ το στάδιο του εμπλουτισμού θα περιλαμβάνει ταξινόμηση μεγέθους, μαγνητικό διαχωρισμό και βαρυτομετρικό διαχωρισμό, με βάση τα όσα ενδεικτικά συζητήθηκαν για τον εμπλουτισμό της C.F.A. στο κεφάλαιο 2.2. Η κάθε διεργασία εμπλουτισμού είναι ενδεικτική, με κάποια από τα βήματα της να έχουν άλλη σειρά ή να μην εφαρμόζονται, ανάλογα την αρχική μελέτη για κάθε υλικό. Κατά το στάδιο της κυρίως ανάκτησης πρέπει να υπολογιστούν και οι ποσότητες αντιδραστηρίων που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε βήμα των προτεινόμενων διεργασιών.

Η δομή πρέπει να περιλαμβάνει και αναλυτικά όργανα για την χημική και ορυκτολογική ανάλυση του αρχικού υλικού, των προϊόντων μετά τον εμπλουτισμό και των τελικών ανακτημένων προϊόντων, καθώς επίσης και για την ανάλυση-χαρτογράφηση δειγμάτων από άλλες περιοχές. Τα αναλυτικά αυτά όργανα θα περιλαμβάνουν συσκευή XRF (Ανάλυση Φθορισμού Ακτίνων Χ) για την αρχική ανάλυση των κύριων στοιχείων των δειγμάτων, συσκευή XRD (Περίθλαση Ακτίνων Χ) για τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης των δειγμάτων C.F.A. και φασματομετρία μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP-MS) για την ανάλυση των R.E.E. και άλλων ιχνοστοιχείων. Το διάγραμμα ροής των εργαστηριακών διεργασιών της δομής ανάκτησης αποτυπώνεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25: Διάγραμμα ροής προ-εμπλουτισμού, εμπλουτισμού και κυρίως ανάκτησης της δομής ανάκτησης.

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι οι τιμές μπορεί να διαφέρουν σημαντικά για διεργασίες διαφορετικής κλίμακας, καθώς οι τιμές μπορεί να εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως οι ποσότητες - διαστάσεις, η παραγωγικότητα, η απόδοση και άλλοι. Ακολουθεί μια προσεγγιστική κοστολόγηση των συσκευών του εργαστηρίου εμπλουτισμού και του εργαστηρίου χημικής ανάκτησης, με βάση ενδεικτικές τιμές που προτείνουν ιστότοποι όπως το 911 Metallurgist [39].

- **Σφαιρόμυλος (Ball Mill):** 10.000 € - 20.000 € (Ενδεικτικά 15.000€)
- **Δονούμενος αναλυτής (Sieve Shaker) + συστοιχία κοσκίνων:** 2.000 € - 8.000 € (Ενδεικτικά 5.000 €)
- **Δονούμενη Τράπεζα (Shaking Table):** 5.000 € - 10.000 € (Ενδεικτικά 7.000 €)
- **Φυγοκεντρικός Διαχωριστής (Centrifugal Separator):** 5.000 € - 20.000 € (Ενδεικτικά 10.000€)
- **Μαγνητικός Διαχωριστής:** 10.000 € - 30.000 € (Ενδεικτικά 20.000 €)

Συνολικά λοιπόν, το κόστος των συσκευών του εργαστηρίου εμπλουτισμού θα προσεγγίζει τα **60.000 €**.

- **ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry):** 150.000 € - 250.000 € (Ενδεικτικά 200.000€)
- **XRF (X-ray Fluorescence):** 50.000 € - 100.000 € (Ενδεικτικά 75.000 €)
- **XRD (X-ray Diffraction):** 50.000 € - 200.000 € (Ενδεικτικά 125.000 €)

Συνολικά λοιπόν, το κόστος των συσκευών του εργαστηρίου χημικής ανάκτησης θα προσεγγίζει τα **400.000 €**. Το συνολικό κόστος των δύο εργαστηρίων θα προσεγγίζει τα **460.000 €**.

5.5. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ

Διαχείριση υδραργύρου των λαμπτήρων φθορισμού

Σε όλα τα στάδια των προτεινόμενων διεργασιών παράγονται παραπροϊόντα μερικά από τα οποία πρέπει να υποβληθούν σε ανάλογη διαχείριση καθώς είναι επικίνδυνα για το περιβάλλον. Ο υδράργυρος είναι βασικό συστατικό των λαμπτήρων φθορισμού, συμπεριλαμβανομένων των συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού (CFL) και των παραδοσιακών λαμπτήρων πυρακτώσεως [40]. Η παρουσία υδραργύρου κάνει τους λαμπτήρες φθορισμού πιο αποδοτικούς ενεργειακά καθώς παράγουν περισσότερο φως για την ίδια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Η ποσότητα υδραργύρου σε μια λάμπα φθορισμού είναι σχετικά μικρή, συνήθως μετρούμενη σε mg. Ένας τυπικός λαμπτήρας CFL περιέχει περίπου 3-5 mg υδραργύρου [41]. Ωστόσο, λόγω της τοξικότητάς του υδραργύρου, ο σωστός χειρισμός και η απομάκρυνση του είναι απαραίτητα για τον μετριασμό των κινδύνων για την υγεία και το περιβάλλον. Ο υδράργυρος δεν παρουσιάζει μόνο περιβαλλοντικό κίνδυνο λόγω της τοξικότητάς του, αλλά είναι και ανεπιθύμητο συστατικό σε διεργασίες εμπλουτισμού και ανάκτησης R.E.E. Μια ενδεικτική μέθοδος για την απομάκρυνση του υδραργύρου από τους λαμπτήρες φθορισμού είναι η διαδικασία θερμικής επεξεργασίας που περιλαμβάνει την ελεγχόμενη θέρμανση

για την εξάτμιση του υδραργύρου, ακολουθούμενη από δέσμευση και συμπύκνωση των ατμών υδραργύρου. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Οι λαμπτήρες φθορισμού αρχικά λειοτριβούνται σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα μέσα σε ένα σφραγισμένο σύστημα για να περιοριστούν τυχόν ατμοί υδραργύρου και να αποτραπεί η έκθεση στους εργαζόμενους ή το περιβάλλον.
2. Τα λειοτριβημένα υλικά, τα οποία περιλαμβάνουν γυαλί, σκόνη φωσφόρου (που περιέχει τις R.E.E.) και υδράργυρο, τροφοδοτούνται σε έναν εξειδικευμένο κλίβανο σχεδιασμένο για ανάκτηση υδραργύρου. Ο κλίβανος λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας, μεταξύ 600 °C και 900 °C, συνήθως στους 800 °C [40]. Η ακριβής θερμοκρασία εξαρτάται από το σχεδιασμό του κλιβάνου και τις απαιτήσεις της διεργασίας. Σε αυτές τις θερμοκρασίες, ο υδράργυρος, ο οποίος έχει σχετικά χαμηλό σημείο βρασμού (356,7 °C), εξατμίζεται. Τα άλλα υλικά, όπως το γυαλί και τα μέταλλα, παραμένουν στερεά και μπορούν να διαχωριστούν αργότερα [40].
3. Ένα σύστημα κενού χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να μειώσει την πίεση και να βοηθήσει στην αποτελεσματική απομάκρυνση των ατμών υδραργύρου από τον κλίβανο. Ο ατμός υδραργύρου στη συνέχεια κατευθύνεται σε ένα σύστημα συμπύκνωσης, όπου ψύχεται και επιστρέφει στην υγρή του κατάσταση. Αυτό το σύστημα περιλαμβάνει συνήθως μια σειρά από πηνία ψύξης ή έναν υδρόψυκτο συμπυκνωτή [40].
4. Ο συμπυκνωμένος υγρός υδράργυρος συλλέγεται σε ένα ασφαλές δοχείο. Αυτό το δοχείο είναι σχεδιασμένο για να αποθηκεύει με ασφάλεια τον υδράργυρο έως ότου μπορεί είτε να επαναχρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές διεργασίες είτε να απορριφθεί σε μια εγκατάσταση επικίνδυνων αποβλήτων. Αφού εξατμιστεί και αφαιρεθεί ο υδράργυρος, τα υπόλοιπα συστατικά διαχωρίζονται για την σχετική ανάκτηση, όπως προτάθηκε [40].

Τα συστήματα που έχουν σχεδιαστεί για εργαστηριακές εφαρμογές μικρής κλίμακας είναι λιγότερο ακριβά από αυτά που έχουν σχεδιαστεί για βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Ενδεικτικά, για ένα μικρής κλίμακας σύστημα θερμικής επεξεργασίας υδραργύρου, κατάλληλο για εφαρμογές ανάλογες με αυτές που προτείνονται εδώ, το κόστος κυμαίνεται γύρω στα **45.000 €** [42]. Η μονάδα αυτή κατεργασίας θα μπορούσε να λειτουργήσει και τελείως ξεχωριστά και αυτόνομα και χωρίς την υλοποίηση της προτεινόμενης δομής.

Διαχείριση όξινου εκπλύματος (leachate) που προκύπτει από τις διεργασίες χημικής ανάκτησης

Η ιπτάμενη τέφρα (C.F.A.) χρησιμοποιείται εκτενώς σήμερα ως συστατικό στην παραγωγή τσιμέντου και σε άλλες κατασκευαστικές διαδικασίες [43]. Μια άλλη εφαρμογή της στον κατασκευαστικό κλάδο αφορά την χρήση της ως υποκατάστατο των αδρανών και του τσιμέντου στην παραγωγή σκυροδέματος. Στην παρούσα πρόταση η C.F.A., πέραν της αξιοποίησης της ως πρώτη ύλη για παραγωγή R.E.E., μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως χημικός καθαριστής για ιχνοστοιχεία αλλά και σαν αντιδραστήριο εξουδετέρωσης των όξινων διαλυμάτων που παράγονται κατά τις διεργασίες έκπλυσης [43].

Σχετικά με τις προτεινόμενες διεργασίες, θα προκύπτουν 3 όξινα διαλύματα τα οποία πρέπει να εξουδετερωθούν. Το ένα σχετίζεται με το διάλυμα που προκύπτει στο τελικό στάδιο έκπλυσης με οξαλικό οξύ για την ανάκτηση R.E.E. από μαγνήτες NdFeB και τα άλλα 2, με τα όξινα υδατικά διαλύματα που παράγονται στα 2 τελικά streams της προτεινόμενης διεργασίας για την ανάκτηση από λαμπτήρες, μετά την έκπλυση με οξαλικό οξύ. Στην εργασία τους οι Lieberman et al. [43] χρησιμοποίησαν C.F.A. για να διερευνήσουν την εξουδετέρωση των όξινων διαλυμάτων που παράγονται κατά την έκπλυση φωσφορικών πετρωμάτων με πυκνό HCl. Χρησιμοποιώντας διάφορες αναλογίες ανάμιξης όξινου εκπλύματος και C.F.A. (L/S) διαπίστωσαν πως όχι μόνο το παραγόμενο γαλάκτωμα έχει σχεδόν ουδέτερο pH (ή/και ελαφρώς βασικό), αλλά και ότι μετά τη στερεοποίηση του προκύπτει ένα νέο, περιβαλλοντικά φιλικό προϊόν που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο αδρανών υλικών και τσιμέντου για την παραγωγή σκυροδέματος και για το οποίο δεν απαιτείται αποθήκευση. Πιο συγκεκριμένα, μετά από την γήρανση (3 ημέρες) του προϊόντος της αντίδρασης όξινου διαλύματος + C.F.A., τα pH των υδατικών εκπλυμάτων αυτών των προϊόντων για αναλογίες ανάμιξης όξινου διαλύματος + C.F.A. 1:1, 1:2 και 1:4, ήταν 7.7, 9.2 και 10.7 αντίστοιχα [43].

Στην προτεινόμενη εφαρμογή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η μεγάλη ποσότητα των 2 σωρών απόθεσης της Δυτ. Μακεδονίας σαν παράγοντας εξουδετέρωσης των όξινων διαλυμάτων (HCl και C₂H₂O₄) που θα προκύπτουν από τις εκπλύσεις, σε μια ενδεικτική αναλογία L/S 1:1 (1 ml / 1 gr). Θα μπορούσε παράλληλα να διερευνηθεί και η αξιοποίηση του παραγόμενου γαλακτώματος σαν δομικό υλικό, μετά την στερεοποίηση του. Δεδομένου ότι το κόστος της C.F.A. ανά τόνο είναι αμελητέο (≈ 10 €/ton), ο συνυπολογισμός του σαν κόστος για την εξουδετέρωση δεν θα ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς.

5.6 ΚΟΣΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Σχετικά με τις πρώτες ύλες της προτεινόμενης δομής ανάκτησης, δεν υπάρχει προς το παρόν ιστορικό που να αφορά την μεταφορά και διαχείριση μαγνητών από ανεμογεννήτριες που έχουν φτάσει στο τέλος της ζωής τους. Σχετικά με τους λαμπτήρες, στη Δυτ. Μακεδονία η μόνη εταιρεία που διαχειρίζεται τέτοια υλικά είναι η ΔΙΑΔΥΜΑ, ωστόσο δεν υπάρχουν διαθέσιμα καταγεγραμμένα στοιχεία που να αφορούν την μεταφορά τους από τα σημεία συλλογής στο χώρο κατεργασίας και διαχείρισης. Αντίστοιχα, δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία που να αφορούν το κόστος μεταφοράς της C.F.A. από τους ενεργούς σταθμούς στους 2 υφιστάμενους σωρούς απόθεσης. Ωστόσο, γενικές εκτιμήσεις για παρόμοιους τύπους αποβλήτων μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο σημείο αναφοράς και γι' αυτό το λόγο θα προταθούν κάποιες ενδεικτικές τιμές που εφαρμόζονται σε αντίστοιχες περιπτώσεις στο εξωτερικό.

Το κόστος μεταφοράς για λαμπτήρες φθορισμού μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του τύπου του λαμπτήρα και της απόστασης που απαιτείται για τη μεταφορά. Το κόστος μεταφοράς υπολογίζεται γενικά με βάση την απόσταση και την ποσότητα

του υλικού που μεταφέρεται. Για παράδειγμα, η eWaste Disposal, Inc. χρεώνει περίπου 250 \$ ($\approx$ 230 €) για παραλαβή και 100 \$ ($\approx$ 92 €) για μεταφορά εντός 100 μιλίων ($\approx$ 160 km), με πρόσθετες χρεώσεις καυσίμων και άλλες χρεώσεις που ενδέχεται να ισχύουν. Χρησιμοποιούν επίσης 800 lbs ($\approx$ 363 kg) ανά τύμπανο ως μέσο βάρους για τον υπολογισμό του κόστους μεταφοράς [44]. Συγκριτικά, για υπηρεσίες ανακύκλωσης χύδην, όπως αυτές που προσφέρονται από εταιρείες όπως η Ecolamp Recycling Solutions Ltd UK [45], το κόστος μπορεί να υπολογιστεί ανά μονάδα συλλογής. Για παράδειγμα, ένα κοντέινερ 6 ft ($\approx$ 1.8 m) μπορεί να κοστίσει περίπου 229 £ ($\approx$ 285 €) για παράδοση και παραλαβή. Αυτό το κόστος περιλαμβάνει τη μεταφορά και το χειρισμό των λαμπτήρων για να διασφαλιστεί η απόρριψή τους με φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο, που συχνά περιλαμβάνει τον διαχωρισμό και την ανάκτηση υδραργύρου και άλλων υλικών.

Από το 2022, ο ευρωπαϊκός δείκτης οδικών εμπορευματικών ναύλων επί συμβάσεων έφτασε σε ιστορικό υψηλό, αντανακλώντας το αυξημένο κόστος λόγω παραγόντων όπως οι αυξήσεις των τιμών των καυσίμων, οι ελλείψεις οδηγών και ο πληθωρισμός [46]. Αυτά τα έξοδα μεταφοράς μπορεί να ποικίλλουν σημαντικά, αλλά το εκτιμώμενο μέσο κόστος μεταφοράς για επικίνδυνα απόβλητα όπως οι λαμπτήρες φθορισμού μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 50 και 200 ευρώ ανά τόνο, ανάλογα με την απόσταση και τη συγκεκριμένη υλικοτεχνική υποστήριξη.

Το κόστος μεταφοράς της C.F.A. στη Δυτική Μακεδονία μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με διάφορους παράγοντες, όπως η απόσταση, ο τρόπος μεταφοράς και συγκεκριμένα υλικοτεχνικά ζητήματα. Σύμφωνα με την American Coal Ash Association, το κόστος μεταφοράς της C.F.A. μπορεί να κυμαίνεται, επηρεασμένο από τη συγκεκριμένη τελική χρήση και την ποιότητα της. Για παράδειγμα, η C.F.A. που χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα μπορεί να κοστίσει από 20 έως 45 \$ ανά τόνο ($\approx$ 18,5 - 41 € / ton), ενώ άλλες εφαρμογές, όπως η σταθεροποίηση του εδάφους, μπορεί να είναι λιγότερο δαπανηρές [47]. Στη Δυτ. Μακεδονία, όπου οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής λιγνίτη και η παραγωγή C.F.A. είναι σημαντικές, το συγκεκριμένο κόστος υλικοτεχνικής υποστήριξης μπορεί να επηρεαστεί από περιφερειακούς παράγοντες όπως η τοπική υποδομή και η απόσταση από τους σωρούς απόθεσης. Δεδομένων αυτών των παραγόντων, το μέσο κόστος μεταφοράς σε αυτήν την περιοχή μπορεί να θεωρηθεί ότι ευθυγραμμίζεται με το ευρύτερο φάσμα που αναφέρεται παραπάνω, πιθανότατα περίπου 20 έως 30 \$ ανά τόνο ($\approx$ 18,5 - 27,5€ / ton) για τυπικές χρήσεις. Αυτή η εκτίμηση λαμβάνει υπόψη το περιφερειακό πλαίσιο της Δυτ. Μακεδονίας και τα γνωστά εύρη κόστους για τη μεταφορά της C.F.A.. Τέλος, το κόστος μεταφοράς για τους μαγνήτες NdFeB από ανεμογεννήτριες που έχουν φτάσει στο τέλος του κύκλου ζωής τους μπορεί να ποικίλλει με βάση διάφορους παράγοντες, όπως η απόσταση, η μέθοδος μεταφοράς, ο όγκος και το βάρος των μαγνητών και το τοπικό κόστος logistics. Αν και είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ένα ακριβές κόστος χωρίς συγκεκριμένες λεπτομέρειες, ακολουθούν ορισμένες πρόχειρες εκτιμήσεις που βασίζονται στα εξής σενάρια:

1. Οδικές μεταφορές: Για μικρές αποστάσεις εντός της χώρας, το κόστος μπορεί να κυμαίνεται από 0,09 € έως 0,45 € ανά κιλό.
2. Σιδηροδρομικές μεταφορές: Για μεγάλες αποστάσεις εντός μιας ηπείρου, το κόστος μπορεί να είναι περίπου 0,046 € έως 0,18 € ανά κιλό.

3. Θαλάσσιες μεταφορές: Για διεθνή ναυτιλία, το κόστος κυμαίνεται από 0,018 € έως 0,092 € ανά κιλό, μη συμπεριλαμβανομένων των τελών διαχείρισης λιμένων και των τελωνείων.
4. Αεροπορικές μεταφορές: Συνήθως 1.8 έως 4.6 € ανά κιλό, που χρησιμοποιούνται κυρίως για επείγουσες αποστολές.

Στην Ελλάδα, ενώ μπορεί να μην υπάρχουν εταιρείες που να ειδικεύονται αποκλειστικά στη μεταφορά μαγνητών NdFeB από ανεμογεννήτριες στο τέλος του κύκλου ζωής τους, αρκετές εταιρείες logistics έχουν την τεχνογνωσία και την ικανότητα να διαχειριστούν τέτοιες εξειδικευμένες μεταφορές. Αυτές οι εταιρείες προσφέρουν υπηρεσίες που εξυπηρετούν βαρύ και μεγάλου μεγέθους βιομηχανικό φορτίο, συμπεριλαμβανομένων εξαρτημάτων από ανεμογεννήτριες. Τέτοιες εταιρείες, που δραστηριοποιούνται και στη Δυτ. Μακεδονία, και που θα μπορούσαν να διαχειριστούν αυτό το είδος μεταφοράς, αλλά και τη μεταφορά των λαμπτήρων και της C.F.A., είναι οι Kuehne + Nagel Greece, η DHL Global Forwarding Greece και η DB Schenker Greece [48], [49], [50]. Τα παραπάνω στοιχεία παρουσιάζονται στον πίνακα της Εικόνας 26.

Κατηγορία	Κόστος (ανά μονάδα βάρους)	Απόσταση (σε χλμ)
Μεταφορά λαμπτήρων φθορισμού	92 € για μεταφορά	160 km
Μεταφορά λαμπτήρων φθορισμού	285 € για παράδοση και παραλαβή	-
Μεταφορά επικίνδυνων αποβλήτων	50-200 € ανά τόνο	-
Μεταφορά C.F.A. για χρήση στο σκυρόδεμα	18,5 - 41 € ανά τόνο	-
Μέσο κόστος μεταφοράς C.F.A. στη Δυτική Μακεδονία	18,5 - 27,5 € ανά τόνο	-
Μεταφορά μαγνητών NdFeB (οδικές μεταφορές)	0.09 - 0.45 € ανά κιλό	50 - 300 km
Μεταφορά μαγνητών NdFeB (σιδηροδρομικές μεταφορές)	0.046 - 0.18 € ανά κιλό	500 - 2000 km
Μεταφορά μαγνητών NdFeB (θαλάσσιες μεταφορές)	0.018 - 0.092 € ανά κιλό	2000 - 10000 km
Μεταφορά μαγνητών NdFeB (αεροπορικές μεταφορές)	1.8 - 4.6 € ανά κιλό	1000 - 10000 km

Εικόνα 26: Κόστος μεταφοράς πρώτης ύλης ανά μονάδα βάρους και ανά χιλιομετρική απόσταση.

Δεδομένου ότι η μελέτη αφορά στην κυκλική οικονομία υλικών που συλλέγονται και μεταφέρονται εντός της Δυτ. Μακεδονίας, όλες οι αποστάσεις θα αφορούν μια ακτίνα μεταφοράς έως 150 km και οι ενδεικτικές τιμές που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούν να υιοθετηθούν με ασφάλεια. Συνοπτικά, το κόστος μεταφοράς λαμπτήρων μπορεί να θα προσδιοριστεί στα 175 €/ton, το κόστος μεταφοράς της C.F.A. σε 30 €/ton και το κόστος για μαγνήτες NdFeB σε περίπου 300 €/ton.

5.7. ΘΕΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΟΥ ΘΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΗΣΕΙ Η ΔΟΜΗ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον αριθμό των θέσεων εργασίας σε μια δομή ανάκτησης κρίσιμων μετάλλων μικρής πιλοτικής κλίμακας είναι πολλαπλοί και αφορούν διάφορες πτυχές της λειτουργίας και των απαιτήσεων της εν λόγω δομής. Παρακάτω παρατίθενται οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τον αριθμό των θέσεων εργασίας:

Παράγοντες που Επηρεάζουν τον Αριθμό των Θέσεων Εργασίας

1. Μέγεθος και Κλίμακα της Δομής

Μικρή Κλίμακα: Λιγότερες θέσεις εργασίας, με λιγότερο εξειδικευμένο προσωπικό που θα καλύπτει πολλούς ρόλους.

Μεγάλη Κλίμακα: Περισσότερες θέσεις εργασίας, με εξειδικευμένο προσωπικό.

2. Επίπεδο Αυτοματοποίησης

Υψηλή Αυτοματοποίηση: Μειωμένη ανάγκη για χειριστές, αυξημένη ανάγκη για τεχνικούς συντήρησης και προγραμματιστές αυτοματισμού.

Χαμηλή Αυτοματοποίηση: Περισσότεροι χειριστές για χειροκίνητες διαδικασίες.

3. Πολυπλοκότητα των Διεργασιών

Απλές Διεργασίες: Λιγότερο εξειδικευμένο προσωπικό.

Πολύπλοκες Διεργασίες: Απαιτήση για εξειδικευμένους μηχανικούς, χημικούς και τεχνικούς.

4. Ωράριο Λειτουργίας

Μονοβάρδια: Λιγότερο προσωπικό.

Πολλαπλές Βάρδιες: Περισσότερο προσωπικό για κάλυψη όλων των βαρδιών.

5. Κανονισμοί Υγιεινής και Ασφάλειας

Αυστηροί Κανονισμοί: Περισσότερο εξειδικευμένο προσωπικό για συμμόρφωση με τους κανονισμούς.

Ευέλικτοι Κανονισμοί: Λιγότερο προσωπικό για συμμόρφωση.

6. Διαθεσιμότητα και Εκπαίδευση Προσωπικού

Εξειδικευμένο Προσωπικό: Επαρκής αριθμός εκπαιδευμένου προσωπικού μπορεί να μειώσει την ανάγκη για περισσότερους εργαζόμενους.

Ανεκπαίδευτο Προσωπικό: Μπορεί να απαιτηθούν περισσότερα άτομα για να καλυφθούν τα κενά γνώσεων και εμπειρίας.

7. Τεχνολογία και Εξοπλισμός

Προηγμένος Εξοπλισμός: Μειώνει την ανάγκη για χειροκίνητη εργασία και αυξάνει την ανάγκη για τεχνική υποστήριξη.

Παραδοσιακός Εξοπλισμός: Απαιτεί περισσότερο προσωπικό για λειτουργία και συντήρηση.

Πιο συγκεκριμένα, το εργαστήριο εμπλουτισμού μιας δομής ανάκτησης κρίσιμων μετάλλων μικρής πιλοτικής κλίμακας μπορεί να προσφέρει αρκετές θέσεις εργασίας, ανάλογα με την πολυπλοκότητα των διαδικασιών, τον βαθμό αυτοματοποίησης και τις απαιτήσεις υγιεινής και ασφάλειας. Ακολουθεί μια προσέγγιση των θέσεων που μπορεί να απαιτούνται.

Κατηγορίες και εκτίμηση θέσεων εργασίας στο εργαστήριο εμπλουτισμού:

- **Χειριστές:** 1-2 Χειριστές (για να καλύπτουν διαφορετικές βάρδιες, αν χρειάζεται)
- **Μηχανικοί:** 1 Μεταλλειολόγος ή Μηχανικός Ορυκτών Πόρων (Mineral Resources Engineer),
- **Τεχνικοί:** 1 Τεχνικός Συντήρησης (για μηχανολογικά και ηλεκτρολογικά ζητήματα)
- **Εργαστηριακό Προσωπικό:** 1-2 Τεχνικοί Εργαστηρίου (δοκιμές, ποιοτικό έλεγχο)
- **Υγιεινή και Ασφάλεια:** 1 Τεχνικός Υγιεινής και Ασφάλειας
- **Διοικητικό και Υποστηρικτικό Προσωπικό:** 1-2 εργαζόμενοι σαν Διοικητικό Προσωπικό (για τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, των προμηθειών και γενική διοικητική υποστήριξη).

Συνοψίζοντας, το εργαστήριο εμπλουτισμού μιας δομής ανάκτησης κρίσιμων μετάλλων μικρής πιλοτικής κλίμακας μπορεί να προσφέρει συνήθως περίπου 6 - 8 θέσεις εργασίας, με τις θέσεις να διαμορφώνονται ανάλογα με τις συγκεκριμένες ανάγκες και την πολυπλοκότητα των διεργασιών.

Το εργαστήριο χημικής ανάκτησης μιας δομής ανάκτησης κρίσιμων μετάλλων μικρής πιλοτικής κλίμακας, που θα τροφοδοτείται από το εργαστήριο εμπλουτισμού, μπορεί να προσφέρει αρκετές θέσεις εργασίας, ανάλογα με την πολυπλοκότητα των διαδικασιών, τον βαθμό αυτοματοποίησης και τις απαιτήσεις υγιεινής και ασφάλειας. Ακολουθεί μια προσέγγιση των θέσεων που μπορεί να απαιτούνται.

Κατηγορίες και εκτίμηση θέσεων εργασίας στο εργαστήριο χημικής ανάκτησης:

- **Χειριστές:** 1-2 Χειριστές (για να καλύπτουν διαφορετικές βάρδιες, αν χρειάζεται)
- **Μηχανικοί:** 1 Χημικός Μηχανικός (Chemical Engineer)
- **Τεχνικοί:** 1 Τεχνικός Συντήρησης (για μηχανολογικά και ηλεκτρολογικά ζητήματα)
- **Εργαστηριακό Προσωπικό:** 1 Χημικός ή 1-2 Τεχνικοί Εργαστηρίου (δοκιμές, ποιοτικό έλεγχο)
- **Υγιεινή και Ασφάλεια:** 1 Τεχνικός Υγιεινής και Ασφάλειας
- **Διοικητικό και Υποστηρικτικό Προσωπικό:** 1-2 εργαζόμενοι σαν Διοικητικό Προσωπικό (για τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, των προμηθειών και γενική διοικητική υποστήριξη).

Συνοψίζοντας, το εργαστήριο χημικής ανάκτησης μιας δομής ανάκτησης κρίσιμων μετάλλων μικρής πιλοτικής κλίμακας μπορεί να προσφέρει συνήθως περίπου 7 - 8 θέσεις εργασίας, με τις θέσεις να διαμορφώνονται ανάλογα με τις συγκεκριμένες ανάγκες και την πολυπλοκότητα των διεργασιών.

Το εργαστήριο διαχείρισης των αποβλήτων, που θα προκύπτουν από το εργαστήριο χημικής ανάκτησης, μιας δομής ανάκτησης κρίσιμων μετάλλων μικρής πιλοτικής κλίμακας μπορεί να προσφέρει αρκετές θέσεις εργασίας, ανάλογα με την πολυπλοκότητα και το εύρος των δραστηριοτήτων του. Ακολουθεί μια προσέγγιση των θέσεων που μπορεί να απαιτούνται.

Κατηγορίες και εκτίμηση θέσεων εργασίας στο εργαστήριο διαχείρισης αποβλήτων:

- **Χειριστές:** 1-2 Χειριστές (για τη λειτουργία των συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων)

- **Μηχανικοί:** 1 Μηχανικός Περιβάλλοντος (Environmental Engineer) ή 1 Χημικός Μηχανικός (Chemical Engineer) (για την επίβλεψη των χημικών διαδικασιών και την ασφάλεια)
- **Τεχνικοί:** 1-2 Τεχνικοί Συντήρησης (για μηχανολογικά και ηλεκτρολογικά ζητήματα)
- **Εργαστηριακό Προσωπικό:** 1 Χημικός, 1 Τεχνικός Εργαστηρίου (για ανάλυση και ποιοτικό έλεγχο των αποβλήτων)
- **Υγιεινή και Ασφάλεια:** 1 Τεχνικός Υγιεινής και Ασφάλειας
- **Διοικητικό και Υποστηρικτικό Προσωπικό:** 1 -2 εργαζόμενοι σαν Διοικητικό Προσωπικό.

Συνοψίζοντας, το εργαστήριο διαχείρισης αποβλήτων μιας δομής ανάκτησης κρίσιμων μετάλλων μικρής πιλοτικής κλίμακας μπορεί να προσφέρει συνήθως περίπου 7 - 8 θέσεις εργασίας, με τις θέσεις να διαμορφώνονται ανάλογα με τις συγκεκριμένες ανάγκες και την πολυπλοκότητα των διεργασιών. Συνολικά, και τα **3 εργαστήρια της δομής θα απασχολούν 20 με 25 εργαζομένους**.

5.8 ΧΡΗΜΑΤΙΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΞΙΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΟΜΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ

Οι τρέχουσες τιμές των μετάλλων των σπάνιων γαιών (R.E.E.) και των οξειδίων τους (R.E.O.), με βάση τις τελευταία στοιχεία για τον Ιούνιο του 2024, αποτυπώνονται στις Εικόνες 27 και 28 αντίστοιχα.

Metal	Min Price (€/kg)	Max Price (€/kg)
Cerium Metal (99% min EXW China)	€4.74	€4.87
Dysprosium Metal (99.5% min EXW China)	€343.16	€349.60
Europium Metal (99.5% min FOB China)	€262.20	€271.40
Gadolinium Metal (99.5% min EXW China)	€343.00	€350.00
Lanthanum Metal (99% min EXW China)	€4.83	€4.97
Neodymium Metal (99% min EXW China)	€58.74	€59.43
Praseodymium Metal (99.5% min FOB China)	€94.76	€97.52
Samarium Metal (99.5% min EXW China)	€12.42	€12.70
Scandium Metal (99.99% min EXW China)	€2,938.48	€3,071.00
Scandium Metal (99.999% min EXW China)	€5,275.63	€5,543.00
Terbium Metal (99.9% min EXW China)	€708.00	€715.00
Terbium Metal (99.9% min FOB China)	€709.00	€718.00
Yttrium Metal (99.9% min EXW China)	€28.06	€30.73
Yttrium Metal (99.9% min FOB China)	€28.52	€29.44

Εικόνα 27: Τιμές των R.E.E., Ιούνιος 2024 (<https://www.metal.com/Rare-Earth-Metals>).

Oxide	Min Price (€/kg)	Max Price (€/kg)
Cerium Oxide (99.9% min EXW China)	€1.60	€1.67
Cerium Oxide (99.99% min EXW China)	€5.81	€6.08
Dysprosium Oxide (99.5% min EXW China)	€257.60	€260.36
Erbium Oxide (99.5% min EXW China)	€25.67	€26.31
Europium Oxide (99.999% min EXW China)	€30.08	€31.37
Gadolinium Oxide (99.5% min EXW China)	€25.37	€25.78
Gadolinium Oxide (99.99% min EXW China)	€30.72	€31.56
Holmium Oxide (99.5% min EXW China)	€54.10	€54.74
Lanthanum Oxide (99.9% min EXW China)	€1.54	€1.60
Neodymium Oxide (99.5% min EXW China)	€44.29	€44.85
Neodymium Oxide (99.5% min FOB China)	€44.66	€45.54
Praseodymium Oxide (99.5% min EXW China)	€52.16	€53.49
Praseodymium Oxide (99.5% min FOB China)	€52.44	€53.16
Samarium Oxide (99.9% min EXW China)	€1.63	€1.76
Terbium Oxide (99.99% min EXW China)	€541.00	€545.00
Terbium Oxide (99.99% min FOB China)	€543.00	€548.00
Yttrium Oxide (99.999% min EXW China)	€2.74	€2.87
Ytterbium Oxide (99.99% min EXW China)	€14.44	€15.09

Εικόνα 28: Τιμές των R.E.O., Ιούνιος 2024 (<https://en.institut-seltene-erden.de/aktuelle-preise-von-seltenen-erden/>).

Με βάση όλα όσα ζητήθηκαν παραπάνω και τα όσα παρουσιάστηκαν στο 2^ο κεφάλαιο, σχετικά με τις διεργασίες ανάκτησης, θα πρέπει τώρα να προσδιοριστεί η ημερήσια ποσότητα R.E.O. που θα ανακτάται στη δομή από κάθε πρώτη ύλη και να γίνει η σχετική κοστολόγηση του προϊόντος.

Σχετικά με τους μαγνήτες NdFeB, θεωρώντας τη σύσταση της Εικόνας 9 αντιπροσωπευτική και με βάση μια θεωρητική απόδοση διεργασίας ανάκτησης $\approx 95\%$, θα γίνει η παραδοχή ότι στα 1000 gr υλικού η ποσότητα των R.E.E. θα είναι περίπου 297 gr, με 225 gr από αυτά να είναι Nd, 62 gr Pr και 10 gr Tb. Με βάση την παραπάνω απόδοση ανάκτησης, αυτές οι ποσότητες σε 336.7 gr αρχικού υλικού θα ισοδυναμούν με περίπου 75 gr Nd, 21 gr Pr και 3.5 gr Tb στο ανακτηθέν προϊόν. Με βάση το μοριακό βάρος R.E.O. θα προσδιοριστεί η συνολική ποσότητα που θα ανακτάται στην δομή ημερησίως. Τα μοριακά βάρη των R.E.O. θα είναι:

- $MB_{Nd2O3} = 2 \times 144,24 + 3 \times 16 = 336,48 \text{ gr}$
- $MB_{Pr6O11} = 1.021,44 \text{ gr}$

- $MB_{Tb_2O_3} = 365,85 \text{ gr}$
- Άρα, αναφορικά με το Nd:
στα 336,48 gr Nd_2O_3 έχουμε 288,48 gr Nd. Επομένως τα 75 gr Nd εμπεριέχονται
σε $\frac{336,48 \cdot 75}{288,48} = 87.5 \text{ gr } Nd_2O_3$
- αναφορικά με το Pr:
στα 1.021,44 gr Pr_6O_{11} έχουμε 870 gr Pr. Επομένως τα 21 gr Pr εμπεριέχονται
σε $\frac{1021,44 \cdot 21}{870} = 24.7 \text{ gr } Pr_6O_{11}$
- αναφορικά με το Tb:
στα 365,85 gr Tb_2O_3 έχουμε 317.85 gr Tb. Επομένως τα 3.5 gr Tb εμπεριέχονται
σε $\frac{365,85 \cdot 3,5}{317,85} = 4 \text{ gr } Tb_2O_3$

Με βάση τις τιμές των R.E.O. της Εικόνας 28 οι ποσότητες αυτές αντιστοιχούν σε αξία:

Nd_2O_3 : $0,0875 \times 45 = 4 \text{ €}$ ημερησίως

Pr_6O_{11} : $0,0247 \times 53 = 1,3 \text{ €}$ ημερησίως

Tb_2O_3 : $0,004 \times 550 = 2.2 \text{ €}$ ημερησίως

Αντίστοιχα, ο Fe που εμπεριέχεται σε 1000 gr μαγνήτη NdFeB ισούται με περίπου 700 gr. Μια διεργασία με θεωρητική απόδοση ανάκτησης $\approx 95 \%$ συνεπάγεται 665 gr Fe στο ανακτηθέν προϊόν. Με βάση το μοριακό βάρος $Fe(OH)_3$ θα προσδιοριστεί η συνολική ποσότητα που θα ανακτάται στην δομή ημερησίως, για 336.7 gr που ορίστηκαν ως η ποσότητα αρχικής τροφοδοσίας μαγνητών στη δομή.

- $MB_{Fe(OH)_3} = 55,845 + 3 \times 17,007 \approx 106,9 \text{ gr}$

Άρα στα 106,9 gr $Fe(OH)_3$ έχουμε 55,845 gr Fe. Επομένως τα 665 gr Fe εμπεριέχονται

σε $\frac{106,9 \cdot 665}{55,845} = 1272,96 \text{ gr } Fe(OH)_3$

Οι τιμή αυτή προκύπτει από 1000 gr αρχικού υλικού μαγνήτη, επομένως για να υπολογιστεί η αντίστοιχη ποσότητα που προκύπτει από 336.7 gr υλικού:

$1272.96 \times 0.3367 = 428,6 \text{ gr } Fe(OH)_3$

Με βάση την τιμή του $Fe(OH)_3$ [51] η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε αξία:
 $Fe(OH)_3$: $428,6 \times 5,50 = 2,36 \text{ €}$ ημερησίως.

Συνολικά, με την βάση όλα τα ανωτέρω, η αξία των ανακτώμενων υλικών από τους μαγνήτες NdFeB θα ανέρχεται σε **9.9 €** ημερησίως.

Σχετικά με τους λαμπτήρες φθορισμού, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η απόδοση της προτεινόμενης διεργασίας ανάκτησης ήταν 82%, 75% και 82% για Ce, La και Tb, αντίστοιχα. Επομένως, στα 1000 gr αρχικού υλικού σκόνης λαμπτήρων φθορισμού εμπεριέχονταν 9.9 gr La, 7.4 gr Ce, 3.4 gr Tb, 62.9 gr Y, 4.3 gr Eu και 1.4 gr Gd. Μετά την προτεινόμενη διεργασία, το Y, το Gd και το Eu διαλύονται πλήρως στο H_2SO_4 και μπορούν να ανακτηθούν σχετικά εύκολα μετά από καθίζηση με Na_3PO_4 όπως προτείνουν οι Beltrami et al. [37]. Η μεθοδολογία που περιγράφεται σε αυτήν την διεργασία οδηγεί σε ανάκτηση 68% Y, 77% Gd και θα πρέπει να γίνει μια παραδοχή πως η αντίστοιχη ανάκτηση Eu θα προσεγγίζει το 70%. Αυτές οι αναλογίες σε 1000 gr σκόνης λαμπτήρα αντιστοιχούν σε 42.8 gr Y, 1.1 gr Gd και 3 gr Eu. Αντίστοιχα, το La, το Ce και το Tb ανακτήθηκαν στο 1^ο μικτό κλάσμα (στάδιο 9 / 16.3 gr R.E.O.) που περιείχε 7.5 gr La, 6.0 gr Ce, 0.1 gr Tb (13.6 gr R.E.E.) και στο 2^ο μικτό κλάσμα (στάδιο 11 / 5.2 gr R.E.O.) που περιείχε 0.6 gr La, 0,4 gr Ce, 2.8 gr Tb (3.8 gr R.E.E.). Στα 1000 gr σκόνης λαμπτήρων, μετά την αρχική διάλυση με H_2SO_4 θα ανακτώνται με την μεθοδολογία των Beltrami et al. [37] τα 46.9 gr που αφορούν το Y, το Gd και το Eu και 17.4 gr που αφορούν το Ce, το La και το Tb, με βάση τη μεθοδολογία των Yurramendi et al. [12]. Συνολικά δηλαδή 64.3 gr R.E.E. με την ποσότητα αυτή να αντιστοιχεί σε 99.4 gr R.E.O., περίπου όση ποσότητα επιδιώκεται να ανακτά και η δομή ημερησίως. Για να επιτευχθεί ο θεωρητικός στόχος των 100 gr R.E.O. ημερησίως, υπολείπονται 0.6 gr R.E.O. που μπορεί αντίστοιχα να προκύψουν από επιπρόσθετη ποσότητα 7.5 gr σκόνης λαμπτήρα. Αυτή η ποσοστιαία αύξηση ($\approx 7.5\%$) θα ισούται και με αντίστοιχη αύξηση στις ποσότητες των R.E.O. στο ανακτηθέν προϊόν. Συνεπώς, αυτό θα αντιστοιχεί σε ημερήσιες ποσότητες **43.2 gr Y, 1.1 gr Gd, 3.01 gr Eu, 8.2 gr La, 6.5 gr Ce και 3 gr Tb.**

Με βάση τις τιμές των R.E.E. της εικόνας 28 οι ποσότητες αυτές αντιστοιχούν σε αξία:

Y: $0.0432 \times 30 = 1.3 \text{ €}$ ημερησίως

Gd: $0.0011 \times 350 = 0.39 \text{ €}$ ημερησίως

Eu: $0.00301 \times 271.4 = 1.12 \text{ €}$ ημερησίως

La: $0.0082 \times 5 = 0.04 \text{ €}$ ημερησίως

Ce: $0.006 \times 5 = 0.03 \text{ €}$ ημερησίως

Tb: $0.003 \times 720 = 2.2 \text{ €}$ ημερησίως

Συνολικά, με βάση όλα τα ανωτέρω, η αξία των ανακτώμενων υλικών από τους λαμπτήρες φθορισμού θα ανέρχεται σε **5.1 €** ημερησίως.

Σχετικά με την C.F.A., όπως φάνηκε και στο ισοζύγιο μάζας, τα 268.92 gr R.E.E. αντιστοιχούν σε 382.1 gr R.E.O.. Με δεδομένο τη σύσταση της εμπλουτισμένης τέφρας του Πίνακα 3, γίνεται αντιληπτό ότι τα κύρια στοιχεία των R.E.E. που αποτελούν την % σύσταση της C.F.A. είναι το La, το Ce, το Pr, το Nd, το Dy και το Y. Θα γίνει η παραδοχή ότι το σύνολο της συγκέντρωσης R.E.E. στην C.F.A. σχετίζεται με αυτά τα στοιχεία. Οπότε, με βάση τις συγκεντρώσεις του πίνακα και το ποσοστό ανάκτησης της προτεινόμενης διεργασίας, στα 268.92 gr R.E.E. (382.1 gr R.E.O.), έχουμε 44 gr La (62.5 gr La_2O_3). Επομένως, στα 100 gr R.E.O. θα ανακτώνται ημερησίως 16.5 gr La_2O_3 . Με δεδομένο τη σύσταση της

εμπλουτισμένης τέφρας του Πίνακα 3, γίνεται αντιληπτό ότι τα κύρια στοιχεία των R.E.E. που αποτελούν την % σύσταση της C.F.A. είναι το La, το Ce, το Pr, το Nd, το Dy και το Y. Θα γίνει η παραδοχή ότι το σύνολο της συγκέντρωσης R.E.E. στην C.F.A. σχετίζεται με αυτά τα στοιχεία. Οπότε στα 100 gr R.E.O. θα ανακτώνται 16.5 gr La_2O_3 , 39 gr CeO_2 , 5.5 gr Pr_2O_3 , 17 gr Nd_2O_3 , 4 gr Dy_2O_3 και 18 gr Y_2O_3 .

Με βάση τις τιμές των R.E.O. της εικόνας 29 οι ποσότητες αυτές αντιστοιχούν σε αξία:

La_2O_3 : $1.6 \times 0.0165 = 0.026 \text{ €}$ ημερησίως

CeO_2 : $1.67 \times 0.039 = 0.065 \text{ €}$ ημερησίως

Pr_2O_3 : $53.49 \times 0.0055 = 0.3 \text{ €}$ ημερησίως

Nd_2O_3 : $45.5 \times 0.017 = 0.774 \text{ €}$ ημερησίως

Dy_2O_3 : $260.36 \times 0.004 = 1.042 \text{ €}$ ημερησίως

Y_2O_3 : $2.7 \times 0.018 = 0.049 \text{ €}$ ημερησίως

Συνολικά, με βάση όλα τα ανωτέρω, η αξία των ανακτώμενων υλικών από την C.F.A. του ΑΗΣ Μελίτης θα ανέρχεται σε **2.26 €** ημερησίως.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, σημαντική για την αξιολόγηση της δομής ανάκτησης είναι και η προοπτική εμπορικής αξιοποίησης της σαν εργαστήριο εμπλουτισμού – γεωχημικού χαρακτηρισμού και για άλλα γεωλογικά δείγματα. Οι τιμές των υπηρεσιών σε εργαστήρια εμπλουτισμού και γεωχημικού χαρακτηρισμού μπορούν να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τις συγκεκριμένες δοκιμές και διαδικασίες που εμπλέκονται, καθώς και με τον τύπο του επεξεργαζόμενου μεταλλεύματος. Ακολουθούν μερικές τυπικές χρεώσεις για διάφορες υπηρεσίες που προσφέρονται από εργαστήρια εμπλουτισμού και γεωχημικού χαρακτηρισμού:

1. **Προετοιμασία Δειγμάτων:** Περιλαμβάνει την ξήρανση, αφυδάτωση και ανάμιξη των δειγμάτων, με κόστος που κυμαίνεται από 45 έως 160 € ανά δείγμα, ανάλογα με την πολυπλοκότητα και τον όγκο του υλικού. **Περίπου 100 € / δείγμα** [52].
2. **Θραύση - Λειοτρίβηση:** Μείωση του μεγέθους των πετρωμάτων, απαραίτητη για τις περισσότερες διαδικασίες εμπλουτισμού, με κόστος από 90 έως 450 € ανά δείγμα. **Περίπου 270 € / δείγμα** [52].
3. **Ταξινόμηση Μεγέθους:** Ταξινόμηση του λειοτριβημένου υλικού σε κλάσματα μεγέθους. Το κόστος κυμαίνεται μεταξύ 135 και 270 € ανά δείγμα. **Περίπου 200 € / δείγμα** [52].
4. **Μαγνητικός Διαχωρισμός:** Ανάλογα με το αν είναι υγρός ή ξηρός μαγνητικός διαχωρισμός, το κόστος μπορεί να κυμαίνεται από 200 έως 500 € ανά δείγμα. **Περίπου 350 € / δείγμα** [52].
5. **Βαρυτομετρικός Διαχωρισμός:** Ταξινόμηση του υλικού με βάση τις διαφορετικές πυκνότητες των περιεχόμενων ορυκτών που μπορεί να κοστίζει από 180 έως 450 € ανά δείγμα. **Περίπου 310 € / δείγμα** [52].
6. **Υδρομεταλλουργία:** Βασική υδρομεταλλουργία ανάκτησης και διαδικασίες όπως αυτές που περιεγράφηκαν παραπάνω, που γενικά είναι αρκετά ακριβές και μπορεί να κοστίζουν συνήθως μεταξύ 300 και 1,200 € ανά δείγμα. **Περίπου 700 € / δείγμα** [52].

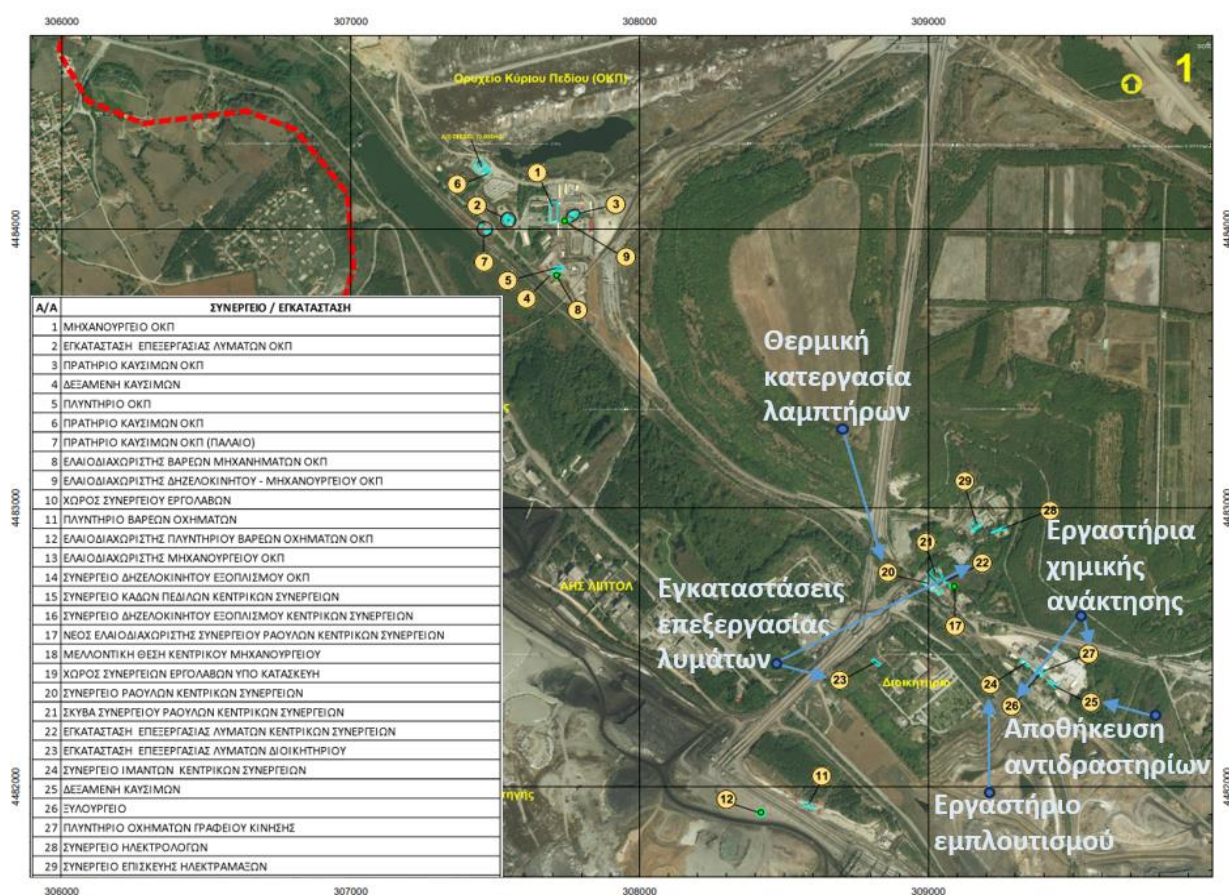
7. **Ορυκτολογική Ανάλυση (XRD):** Χαρακτηρισμός και ανάλυση των ορυκτολογικών φάσεων των δειγμάτων που κοστίζει συνήθως 30 έως 90 € ανά δείγμα. **Περίπου 60 € / δείγμα** [53].
8. **Ανάλυση κύριων στοιχείων (XRF):** Χημική ανάλυση των βασικών στοιχείων του δείγματος (μέχρι 0.01% w/w) που κοστίζει συνήθως από 40 έως 100 € ανά δείγμα. **Περίπου 60 € / δείγμα** [54].
9. **Ανάλυση ICP-MS:** Χημική ανάλυση των ιχνοστοιχείων του δείγματος που κοστίζει συνήθως 40 έως 100 €. **Περίπου 80 € / δείγμα** [55].

Οι παραπάνω τιμές αποτελούν προσεγγίσεις με βάση τις υπηρεσίες που παρέχουν παρόμοια πιστοποιημένα εργαστήρια.

Αναφορικά με τον υδράργυρο, η μονάδας θερμικής κατεργασίας που προτάθηκε και κοστολογήθηκε παραπάνω μπορεί να λειτουργεί ξεχωριστά, να αξιοποιηθεί εμπορικά και να παρέχει τις υπηρεσίες της παράλληλα με την ανάκτηση των κρίσιμων μετάλλων και τη λειτουργία των 2 εργαστηρίων εμπλουτισμού και γεωχημικού χαρακτηρισμού. Το κόστος των παρεχόμενων υπηρεσιών αντίστοιχων μονάδων στο εξωτερικό μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την ποσότητα και τον τύπο των λαμπτήρων που ανακυκλώνονται. Για παράδειγμα, η Veolia προσφέρει το πρόγραμμα RecyclePak® [56] το οποίο περιλαμβάνει μικρά και μεγάλα δοχεία, σχεδιασμένο για μικρές και μεγάλες ποσότητες λαμπτήρων αντίστοιχα. Για μικρότερες ποσότητες, όπως μερικά κουτιά λαμπτήρων, το RecyclePak® της Veolia μπορεί να κοστίζει περίπου 100 - 300 € ανά δοχείο, συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς και της επεξεργασίας. Περίπου δηλαδή **200 € ανά μικρό δοχείο λαμπτήρων**, μια τιμή που θα υιοθετηθεί και στην ανάλυση κόστους οφέλους που θα ακολουθήσει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΚΟ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Με βάση όλα όσα συζητήθηκαν παραπάνω, θα προταθούν συγκεκριμένα σημεία από την κάτοψη που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.2. εντός των ορυχείων Πτολεμαΐδας που θα μπορούσαν να φιλοξενήσουν τα επί μέρους συστατικά της δομής ανάκτησης. Από την ανάλυση που ακολουθεί γίνεται κατανοητό πως η ανάκτηση R.E.E. από την C.F.A. κρίνεται σχεδόν απαγορευτική, με βάση το benefit-to-cost ratio που προκύπτει. Ως εκ τούτου, στην προτεινόμενη δομή θα γίνεται ανάκτηση R.E.E. από μαγνήτες NdFeB και από λαμπτήρες. Η θέσεις που θα προταθούν αφορούν, πρωτίστως, την χωροταξική διάταξη που θα έχουν τα επί μέρους συστατικά της δομής και δευτερευόντως, θα ληφθεί υπόψιν η προηγούμενη ιδιότητα του χώρου. Έτσι, ιδανικότερο σημείο της κάτοψης κρίνεται ο χώρος γύρω από το παλαιό Διοικητήριο. Το σημείο της κάτοψης **20**, που ήταν συνεργείο ράουλων κεντρικών συνεργείων, προτείνεται ως ο χώρος που θα γίνεται η θερμική κατεργασία των λαμπτήρων για την απομάκρυνση του υδραργύρου. Το σημείο **24**, που ήταν το συνεργείο ιμάντων κεντρικών συνεργείων, προτείνεται ως ο χώρος για το εργαστήριο εμπλουτισμού. Τα σημεία **26** και **27**, προτείνονται ως χώροι για τα εργαστήρια χημικής ανάκτησης λαμπτήρων και μαγνητών, ενώ τα σημεία **22** και **23**, ως πρώην εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων προτείνονται για την κατεργασία των αποβλήτων που θα προκύπτουν από τα 2 εργαστήρια χημικής ανάκτησης. Τέλος, το σημείο **25**, ως πρώην δεξαμενή καυσίμων, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως χώρος αποθήκευσης των αντιδραστηρίων των διεργασιών ανάκτησης. Τα σημεία **24**, **25**, **26**, **27** βρίσκονται κοντά το ένα στο άλλο, γεγονός απαραίτητο για υλοποίηση της προτεινόμενης διεργασίας (Εικόνα 29).



Εικόνα 29: Προτεινόμενα σημεία για τα επί μέρους συστατικά της δομής ανάκτησης.

Οι πραγματικές διαστάσεις των υφιστάμενων κτηρίων και υποδομών δεν έχουν ληφθεί υπόψη καθώς δεν έχει γίνει και εκτίμηση των διαστάσεων των προτεινόμενων για την υλοποίηση της δομής χώρων, εργαστηρίων και εγκαταστάσεων. Το συγκεκριμένο ζήτημα δεν αποτελεί ζητούμενο της συγκεκριμένης εργασίας αλλά θα πρέπει να διερευνηθεί στο μέλλον, σε περίπτωση υλοποίησης της συγκεκριμένης ή οποιασδήποτε παρόμοιας πρότασης.

Τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν παραπάνω συμπεριλήφθηκαν σε μια ανάλυση ΑΚΟ, με ανάλυση ευαισθησίας στην παράμετρο του επιτοκίου, με μεταβολή αυτής της παραμέτρου σε τιμές 5%, 3% και 2%. Τα σενάρια που θα παρουσιαστούν παρακάτω αφορούν: α) Δημιουργία δομής ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες NdFeB, β) δημιουργία δομής ανάκτησης R.E.E. από λαμπτήρες, γ) δημιουργία δομής ανάκτησης R.E.E. από C.F.A. και δ) δημιουργία δομής συνδυαστικής ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες και λαμπτήρες. Στην ανάλυση συνυπολογίστηκε η αυτόνομη λειτουργία των εργαστηρίων εμπλουτισμού, χημικής ανάκτησης και θερμικής κατεργασίας Hg, δεδομένου ότι μπορούν να λειτουργήσουν και για άλλα δείγματα, πρώτες ύλες, αλλά και για άλλα ανακυκλώμενα υλικά πέραν των προαναφερθέντων και για ποσότητες μεγαλύτερες των 100 gr R.E.O, σε περίπτωση βελτίωσης των διεργασιών και scale up της κλίμακας ανάκτησης. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ανάκτηση R.E.E. αποκλειστικά και μόνο από C.F.A. φαίνεται σχεδόν αποτρεπτική μέχρι να ωριμάσουν νέες, πιο καινοτόμες διεργασίες, καθώς οι προτεινόμενες απαιτούν μεγάλες ποσότητες αντιδραστηρίων, γεγονός που καθιστά την ανάκτηση ιδιαίτερα κοστοβόρα αλλά και περιβαλλοντικά επιζήμια. Το κάθε σενάριο τελικά αξιολογήθηκε με βάση το benefit-cost ratio που προκύπτει. Ακολουθεί η παρουσίαση της ΑΚΟ ανάλυσης για τα διάφορα σενάρια.

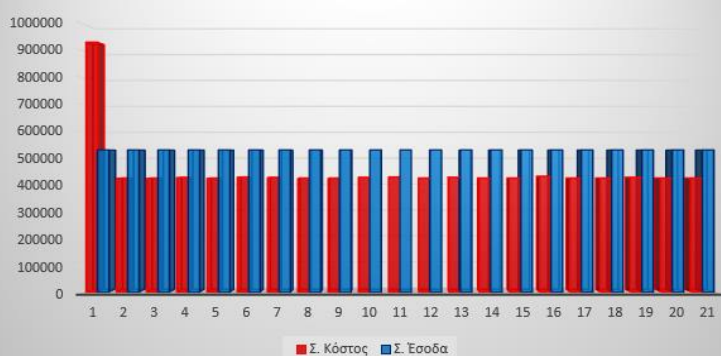
6.1. ΑΚΟ ΑΝΑΛΥΣΗ

Το πρώτο σενάριο που διερευνήθηκε αφορά την δομή ανάκτηση R.E.E. από μαγνήτες NdFeB, λειτουργίας 20 ετών με επιτόκιο 5%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα της Εικόνας 30 και στα γραφήματα της Εικόνας 31.

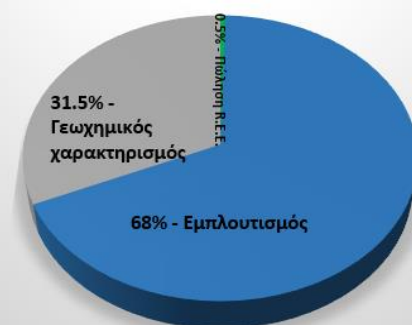
ΟΝΟΜΑ ΔΟΜΗΣ	Δομή Ανάκτησης Κρίσιμων Μετάλλων																				ΕΝΑΡΞΗ	6/2024	
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	ΑΝΑΚΤΗΣΗ R.E.E. ΑΠΟ: Μαγνήτες NdFeb																				ΛΗΞΗ	6/2024	
ΚΟΣΤΟΣ																							
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																							
Εργαστηριακός Εξοπλισμός	460000																					460000	
Εξοπλισμός / Επιπλώση Γραφείων	5000																					5000	
Κόστος Hardware	20000																					20000	
Κόστος Software	15000																					15000	
Servers	4000																					4000	
Μονάδα θερμικής κατεργασίας Υδραργύρου																						0	
Άλλου είδους Υποδομές	5000																					5000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	509000																					509000	
ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																						ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
Αντιδραστήρια	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	61992	12.3 € / d
Hardware/Software (Ανανέωση αδειών χρήσης)				3000			3000			3000			3000			3000			3000			18000	
Συντήρηση Εξοπλισμού		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	40000	2000 € / yr
Αναλώσιμα (Η/Υ, υλικά γραφείου)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	21000	
Άμοιβές Υπαλλήλων	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	6930000	1100 € avg
Εκπαίδευση Υπαλλήλων	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	52500	2500 € / yr
Μεταφορά Πρώτων Υλών	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	6300	300 € / yr
Ενοίκιαση Υποδομών από τη ΔΕΗ	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	1260000	6000 € / mo
Ηλεκτροδότηση	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	504000	2000 € / mo
Τηλεπικοινωνίες	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	37800	150 € / mo
Servers						4000					4000					4000						12000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	422552	424552	424552	427552	424552	428552	427552	424552	424552	427552	428552	424552	427552	424552	424552	431552	424552	424552	427552	424552	424552	8943592	
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	931552	424552	424552	427552	424552	428552	427552	424552	424552	424552	428552	424552	427552	424552	424552	431552	424552	424552	427552	424552	424552	9452592	
ΟΦΕΛΟΣ																							
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΦΕΛΟΥΣ ΕΙΣΟΔΑ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
Πώληση Ανακτηθέντων Σπάνιων Γαιών	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	49896	9.9 € / d
Εμπλουτισμός Υλικών και Δειγμάτων	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	7560000	1500 € / d
Γεωχημικός Χαρακτηρισμός Δειγμάτων	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	3528000	700 € / d
Θερμική κατεργασία (απομάκρυνση) Υδραργύρου																						0	150 € / d
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΙΣΟΔΑ	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	11137896	
Καθαρή Ετήσια Χρηματορροή	-931552	105824	105824	102824	105824	101824	102824	105824	105824	102824	101824	105824	102824	105824	105824	98824	105824	105824	102824	105824	105824		
Επιτόκιο	0.05																						
NPVC	\$6,241,046.26																						
NPVB	\$7,140,033.27																						
NPV	\$898,987.01																						
BCR	1.14																						

Εικόνα 30: Συνοπτική παρουσίαση δεδομένων κόστους - οφέλους για δομή ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες NdFeB, λειτουργίας 20 ετών (5% επιτόκιο).

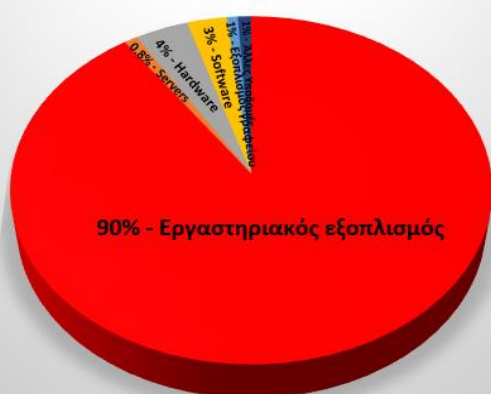
Cost Vs Benefit (€) - Μαγνήτες 5% Ε.Π.



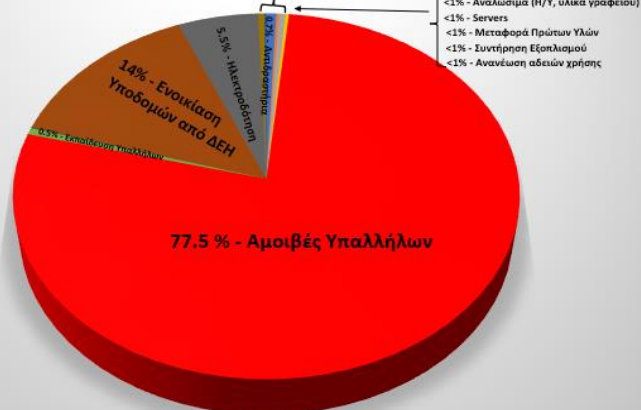
Συνολικά έσοδα δομής NdFeB



Μη Επαναλαμβανόμενα Κόστη



Επαναλαμβανόμενα Κόστη



Εικόνα 31: Οπτική απεικόνιση δεδομένων κόστους - οφέλους δομής ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες NdFeB, λειτουργίας 20 ετών (5% επιτόκιο).

Από την σχετική ανάλυση με βάση τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, προκύπτει ότι η δημιουργία δομής ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες NdFeB αποτελεί μια ώριμη, οικονομικά βιώσιμη και υλοποιήσιμη πρόταση. Το benefit - cost ratio της πρότασης με επιτόκιο 5% ισούται με **1.14**, γεγονός που επιβεβαιώνει την βιωσιμότητα της. Τα βασικά έσοδα - οικονομικά οφέλη της δομής σε αυτό το σενάριο προέρχονται από το εργαστήριο εμπλουτισμού (68%), ακολουθούμενα από αυτά του εργαστηρίου γεωχημικού χαρακτηρισμού (31.5%). Η πώληση των ανακτώμενων R.E.E. αφορά το 0.5% των εσόδων. Τα έσοδα αυτά θα είναι τα ίδια και στα επόμενα 2 σενάρια που αφορούν τους μαγνήτες NdFeB. Αναφορικά με τα κόστη, τα μη επαναλαμβανόμενα κόστη αφορούν κυρίως τον εργαστηριακό εξοπλισμό (90%). Το υπόλοιπο 10% αφορά το Hardware/Software (4% και 3% αντίστοιχα), τους servers (0.8%), τον εξοπλισμό γραφείου (1%) και άλλα λειτουργικά κόστη και υποδομές. Τα μη επαναλαμβανόμενα κόστη θα είναι τα ίδια σε όλα τα σενάρια που θα παρουσιαστούν και παρακάτω. Τα επαναλαμβανόμενα κόστη του σεναρίου αφορούν κυρίως τις αμοιβές των εργαζομένων στη δομή (77.5%), την ενοικίαση των υποδομών από την ΔΕΗ (14%), την ηλεκτροδότηση (5.5%) και τα αντιδραστήρια (0.7%). Το υπόλοιπο 2.3% αφορά τα έξοδα για μεταφορά των πρώτων υλών, συντήρηση εξοπλισμού, servers, τηλεπικοινωνίες, αναλώσιμα και ανανέωση αδειών χρήσης. Τα επαναλαμβανόμενα κόστη θα είναι τα ίδια και για τα επόμενα δύο σενάρια που αφορούν τους μαγνήτες NdFeB.

Το δεύτερο σενάριο που διερευνήθηκε αφορά την ανάκτηση R.E.E. από μαγνήτες NdFeB, λειτουργίας 20 ετών με επιτόκιο 3%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα της Εικόνας 32 και στα γραφήματα της Εικόνας 31. Το benefit - cost ratio της πρότασης με επιτόκιο 3% ισούται με **1.16** γεγονός αναμενόμενο, λόγω του μικρότερου επιτοκίου σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο, που επιβεβαιώνει την βιωσιμότητα της πρότασης. Έσοδα και κόστη είναι τα ίδια για τα τρία σενάρια που αφορούν τους μαγνήτες, όπως προαναφέρθηκε και αποτυπώνονται στην Εικόνα 31.

ΟΝΟΜΑ ΔΟΜΗΣ		Δομή Ανάκτησης Κρίσιμων Μετάλλων																				ΕΝΑΡΞΗ		6/2024
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΩΝ		ΑΝΑΚΤΗΣΗ R.E.E. ΑΠΟ: Μαγνήτες NdFeb																				ΛΗΞΗ		6/2044
ΚΟΣΤΟΣ																								
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ		
ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																								
Εργαστηριακός Εξοπλισμός	460000																					460000		
Εξοπλισμός / Έπιπλωση Γραφείων	5000																					5000		
Κόστος Hardware	20000																					20000		
Κόστος Software	15000																					15000		
Servers	4000																					4000		
Μονάδα Θερμικής κατεργασίας Υδραργύρου																						0		
Άλλου είδους Υποδομές	5000																					5000		
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	509000																					509000		
ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																						ΣΥΝΟΛΙΚΑ		
Αντιδραστήρια	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	61992	12.3 € / d
Hardware/Software (Ανανέωση αδειών χρήσης)				3000			3000			3000			3000			3000			3000			3000	18000	
Συντήρηση Εξοπλισμού		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	40000	2000 € / yr
Αναλώσιμα (Η/Υ, υλικά γραφείου)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	21000	
Αμοιβές Υπαλλήλων	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	6930000	1100 € avg
Εκπαίδευση Υπαλλήλων	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	52500	2500 € / yr
Μεταφορά Πρώτων Υλών	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	6300	300 € / yr
Ενοίκιαση Υποδομών από τη ΔΕΗ	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	1260000	6000 € / mo
Ηλεκτροδότηση	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	504000	2000 € / mo
Τηλεπικοινωνίες	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	37800	150 € / mo
Servers						4000					4000					4000						12000		
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	422552	424552	424552	427552	424552	428552	427552	424552	424552	427552	428552	424552	427552	424552	424552	431552	424552	424552	427552	424552	424552	8943592		
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	931552	424552	424552	427552	424552	428552	427552	424552	424552	427552	428552	424552	427552	424552	424552	431552	424552	424552	427552	424552	424552	9452592		
ΟΦΕΛΟΣ																								
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΦΕΛΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ		
ΕΣΟΔΑ																								
Πώληση Ανακτηθέντων Σπάνιων Γαιών	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	49896	9.9 € / d
Εμπλουτισμός Υλικών και Δειγμάτων	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	7560000	1500 € / d
Γεωχημικός Χαρακτηρισμός Δειγμάτων	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	3528000	700 € / d
Θερμική κατεργασία (απομάκρυνση) Υδραργύρου																						0	150 € / d	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΣΟΔΑ	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	11137896	
Καθαρή Ετήσια Χρηματοροή	-931552	105824	105824	102824	105824	101824	102824	105824	105824	102824	101824	105824	102824	105824	105824	98824	105824	105824	102824	105824	105824	105824		
Επιτόκιο	0.03																							
NPVC	\$7,270,157.00																							
NPVB	\$8,421,031.61																							
NPV	\$1,150,874.60																							
BCR	1.16																							

Εικόνα 32: Συνοπτική παρουσίαση δεδομένων κόστους - οφέλους για δομή ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες NdFeB, λειτουργίας 20 ετών (3% επιτόκιο).

Το τρίτο και τελευταίο σενάριο αφορά την ανάκτηση R.E.E. από μαγνήτες NdFeB, λειτουργίας 20 ετών με επιτόκιο 2%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα της Εικόνας 33 και στα γραφήματα της Εικόνας 31. Το benefit - cost ratio της πρότασης με επιτόκιο 2% ισούται με **1.17** γεγονός που αποτυπώνει το καλύτερο σενάριο που διερευνήθηκε. Έσοδα / κόστη είναι τα ίδια για τα τρία σενάρια που αφορούν τους μαγνήτες, όπως προαναφέρθηκε και αποτυπώνονται στην Εικόνα 32. Συνολικά, η ανάκτηση R.E.E. από μαγνήτες NdFeB κρίνεται μια ώριμη και οικονομικά βιώσιμη πρόταση.

ΟΝΟΜΑ ΔΟΜΗΣ	Δομή Ανάκτησης Κρίσιμων Μετάλλων																				ΕΝΑΡΞΗ	6/2024	
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	ΑΝΑΚΤΗΣΗ R.E.E. ΑΠΟ: Μαγνήτες NdFeb																				ΛΗΞΗ	6/2044	
ΚΟΣΤΟΣ																							
ΠΟΣΙΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																							
Εργαστηριακός Εξοπλισμός	460000																					460000	
Εξοπλισμός / Έπιπλωση Γραφείων	5000																					5000	
Κόστος Hardware	20000																					20000	
Κόστος Software	15000																					15000	
Servers	4000																					4000	
Μονάδα θερμικής κατεργασίας Υδραργύρου																						0	
Άλλου είδους Υποδομές	5000																					5000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	509000																					509000	
ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																						ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
Αντιδραστήρια	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	2952	61992	12.3 € / d
Hardware/Software (Ανανέωση αδειών χρήσης)				3000			3000			3000			3000			3000			3000			18000	
Συντήρηση Εξοπλισμού		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	40000	2000 € / yr
Αναλώσιμα (H/Y, υλικά γραφείου)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	21000	
Αμοιβές Υπαλλήλων	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	6930000	1100 € avg
Εκπαίδευση Υπαλλήλων	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	52500	2500 € / yr
Μεταφορά Πρώτων Υλών	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	6300	300 € / yr
Ενοίκιαση Υποδομών από τη ΔΕΗ	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	1260000	6000 € / mo
Ηλεκτροδότηση	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	504000	2000 € / mo
Τηλεπικοινωνίες	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	37800	150 € / mo
Servers						4000				4000					4000						12000		
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	422552	424552	424552	427552	424552	428552	427552	424552	424552	427552	428552	424552	427552	424552	424552	431552	424552	424552	427552	424552	424552	8943592	
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	931552	424552	424552	427552	424552	428552	427552	424552	427552	428552	424552	427552	424552	424552	424552	431552	424552	424552	427552	424552	424552	9452592	
ΟΦΕΛΟΣ																							
ΠΟΣΙΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΦΕΛΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΕΣΟΔΑ																							
Πώληση Ανακτηθέντων Σπάνιων Γαιών	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	49896	9.9 € / d
Εμπολισμός Υλικών και Δειγμάτων	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	7560000	1500 € / d
Γεωχημικός Χαρακτηρισμός Δειγμάτων	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	3528000	700 € / d
Θερμική κατεργασία (απομάκρυνση) Υδραργύρου																						0	150 € / d
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΣΟΔΑ	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	530376	11137896	
Καθαρή Ετήσια Χρηματοροή	-931552	105824	105824	102824	105824	101824	102824	105824	105824	102824	101824	105824	102824	105824	105824	98824	105824	105824	102824	105824	105824		
Επιτόκιο	0.02																						
NPVC	\$7,898,158.25																						
NPVB	\$9,202,783.81																						
NPV	\$1,304,625.56																						
BCR	1.17																						

Εικόνα 33: Συνοπτική παρουσίαση δεδομένων κόστους - οφέλους για δομή ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες NdFeB, λειτουργίας 20 ετών (2% επιτόκιο).

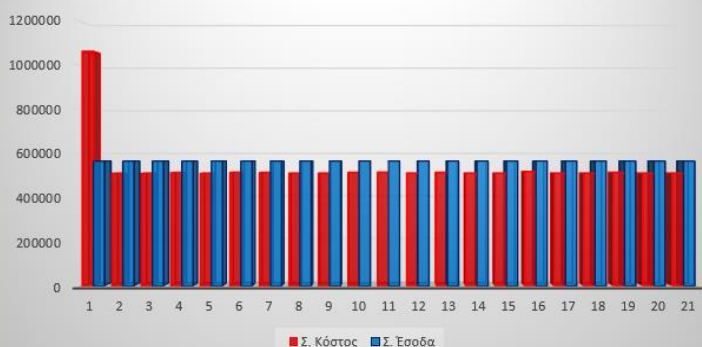
Δομή ανάκτησης R.E.E. από λαμπτήρες με επιτόκιο 5%, 3% και 2%

Η επόμενη ομάδα σεναρίων που διερευνήθηκε αφορούν την ανάκτηση R.E.E. από λαμπτήρες φθορισμού, με επιτόκιο 5%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα της Εικόνας 34 και στα γραφήματα της Εικόνας 35.

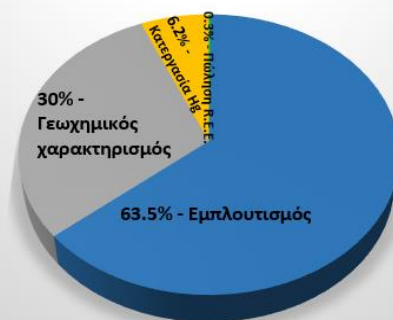
ΟΝΟΜΑ ΔΟΜΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	Δομή Ανάκτησης Κρίσιμων Μετάλλων																					ΕΝΑΡΞΗ ΛΗΞΗ	6/2024 6/2044	
ΚΟΣΤΟΣ																								
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ		
ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																						ΣΥΝΟΛΙΚΑ		
Εργαστηριακός Εξοπλισμός	460000																					460000		
Εξοπλισμός / Έπιπλωση Γραφείων	5000																					5000		
Κόστος Hardware	20000																					20000		
Κόστος Software	15000																					15000		
Servers	4000																					4000		
Μονάδα Θερμικής κατεργασίας Υδραργύρου	45000																					45000		
Άλλου είδους Υποδομές	5000																					5000		
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	554000																					554000		
ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																						ΣΥΝΟΛΙΚΑ		
Αντιδραστήρια	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	1860264	369.1 € / d	
Hardware/Software (Ανανέωση αδειών χρήσης)				3000			3000			3000			3000			3000			3000			18000		
Συντήρηση Εξοπλισμού		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	40000	2000 € / yr	
Αναλώσιμα (Η/Υ, υλικά γραφείου)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	21000		
Άμοιβές Υπαλλήλων	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	6930000	1100 € avg	
Εκπαίδευση Υπαλλήλων	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	52500	2500 € / yr	
Μεταφορά Πρώτων Υλών	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2100	100 € / yr	
Ενοίκιαση Υποδομών από τη ΔΕΗ	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	1260000	6000 € / mo	
Ηλεκτροδότηση	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	504000	2000 € / mo	
Τηλεπικοινωνίες	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	37800	150 € / mo	
Servers						4000					4000					4000					12000			
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	507984	509984	509984	512984	509984	513984	512984	509984	509984	512984	513984	509984	512984	509984	509984	516984	509984	509984	512984	509984	509984	10737664		
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	1061984	509984	509984	512984	509984	513984	512984	509984	509984	512984	513984	509984	512984	509984	509984	516984	509984	509984	512984	509984	509984	11291664		
ΟΦΕΛΟΣ																								
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΦΕΛΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ		
ΕΣΟΔΑ																								
Πώληση Ανακτηθέντων Σπάνιων Γαιών	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	25704	5.1 € / d	
Εμπλουτισμός Υλικών και Δειγμάτων	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	7560000	1500 € / d	
Γεωχημικός Χαρακτηρισμός Δειγμάτων	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	3528000	700 € / d	
Θερμική κατεργασία (απομάκρυνση) Υδραργύρου	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	756000	150 € / d	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΣΟΔΑ	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	11869704		
Καθαρή Ετήσια Χρηματοροπή	-1061984	55240	55240	52240	55240	51240	52240	55240	55240	52240	51240	55240	52240	55240	55240	48240	55240	55240	52240	55240	55240			
Επιτόκιο	0.05																							
NPVC	\$7,436,149.82																							
NPVB	\$7,609,164.38																							
NPV	\$173,014.56																							
BCR	1.02																							

Εικόνα 34: : Συνοπτική παρουσίαση δεδομένων κόστους - οφέλους για δομή ανάκτησης R.E.E. από λαμπτήρες, λειτουργίας 20 ετών (5% επιτόκιο).

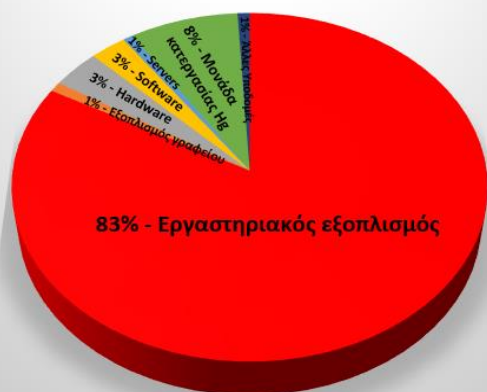
Cost Vs Benefit (€) - Λαμπτήρες φθορισμού



Συνολικά έσοδα δομής Λαμπτήρων Φθορισμού



Μη Επαναλαμβανόμενα Κόστη



Επαναλαμβανόμενα Κόστη



Εικόνα 35: Οπτική απεικόνιση δεδομένων κόστους - οφέλους δομής ανάκτησης R.E.E. από λαμπτήρες φθορισμού, λειτουργίας 20 ετών.

Από την σχετική ανάλυση με βάση τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, προκύπτει ότι η δημιουργία δομής ανάκτησης R.E.E. από λαμπτήρες φθορισμού αποτελεί μια ώριμη, οικονομικά βιώσιμη και υλοποιήσιμη πρόταση, καθώς το benefit - cost ratio της πρότασης με επιτόκιο 5% ισούται με **1.02**, γεγονός που την καθιστά πολλά υποσχόμενη για άμεση υλοποίηση. Τα βασικά έσοδα - οικονομικά οφέλη της δομής σε αυτό το σενάριο προέρχονται από το εργαστήριο εμπλουτισμού (63.5%), ακολουθούμενα από αυτά του εργαστηρίου γεωχημικού χαρακτηρισμού (30%). Η πώληση των ανακτώμενων R.E.E. και η θερμική κατεργασία του Hg των λαμπτήρων θα αποδίδουν το υπολειπόμενο 0.3% και 6.2% των εσόδων αντίστοιχα. Τα έσοδα αυτά θα είναι τα ίδια και στα επόμενα 2 σενάρια που αφορούν τους λαμπτήρες φθορισμού. Αναφορικά με τα κόστη, τα μη επαναλαμβανόμενα κόστη αφορούν τον εργαστηριακό εξοπλισμό σε ποσοστό 83%, το κόστος της μονάδας θερμικής κατεργασίας Hg (8%), το κόστος hardware/software ($\approx 3\%$), το κόστος των servers, του εξοπλισμού γραφείου και το κόστος άλλων υποδομών, σε ποσοστό $\approx 1\%$ και για τα τρία. Τα επαναλαμβανόμενα κόστη της δομής αφορούν κυρίως τις αμοιβές των εργαζομένων στη δομή (64.5%), τα αντιδραστήρια (4.5%) την ενοίκια των υποδομών από την ΔΕΗ (10%) και την ηλεκτροδότηση (4%). Το υπόλοιπο 2% αφορά τα έξοδα για μεταφορά των πρώτων υλών, συντήρηση εξοπλισμού, servers, τηλεπικοινωνίες, αναλώσιμα και ανανέωση αδειών χρήσης. Τα επαναλαμβανόμενα κόστη θα είναι τα ίδια και για τα επόμενα δύο σενάρια που αφορούν την ανάκτηση από λαμπτήρες.

Το δεύτερο σενάριο που διερευνήθηκε αφορά την ανάκτηση R.E.E. από λαμπτήρες, λειτουργίας 20 ετών με επιτόκιο 3%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα της Εικόνας 36 και στα γραφήματα της Εικόνας 35. Το benefit - cost ratio της πρότασης με επιτόκιο 3% ισούται με **1.03**, ελαφρώς αυξημένο σε σχέση με το αρχικό σενάριο. Έσοδα και κόστη είναι τα ίδια για τα τρία σενάρια που αφορούν τους λαμπτήρες, όπως προαναφέρθηκε και αποτυπώνονται στην Εικόνα 35.

ΟΝΟΜΑ ΔΟΜΗΣ	Δομή Ανάκτησης Κρίσιμων Μετάλλων																				ΕΝΑΡΞΗ	6/2024	
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	ΑΝΑΚΤΗΣΗ R.E.E. ΑΠΟ: Λαμπτήρες φθορισμού																				ΛΗΞΗ	6/2044	
ΚΟΣΤΟΣ																							
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																							
Εργαστηριακός Εξοπλισμός	460000																					460000	
Εξοπλισμός / Έπιπλωση Γραφείων	5000																					5000	
Κόστος Hardware	20000																					20000	
Κόστος Software	15000																					15000	
Servers	4000																					4000	
Μονάδα θερμικής κατεργασίας Υδραργύρου	45000																					45000	
Άλλου είδους Υποδομές	5000																					5000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	554000																					554000	
ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																						ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
Αντιδραστήρια	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	1860264	369.1 € / d
Hardware/Software (Ανανέωση αδειών χρήσης)				3000				3000			3000			3000			3000			3000		18000	
Συντήρηση Εξοπλισμού		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	40000	2000 € / yr
Αναλώσιμα (H/Y, υλικά γραφείου)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	21000	
Αμοιβές Υπαλλήλων	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	6930000	1100 € avg
Εκπαίδευση Υπαλλήλων	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	52500	2500 € / yr
Μεταφορά Πρώτων Υλών	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2100	100 € / yr
Ενοίκιαση Υποδομών από τη ΔΕΗ	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	1260000	6000 € / mo
Ηλεκτροδότηση	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	504000	2000 € / mo
Τηλεπικοινωνίες	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	37800	150 € / mo
Servers						4000					4000					4000						12000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	507984	509984	509984	512984	509984	513984	512984	509984	509984	512984	513984	509984	512984	509984	509984	516984	509984	509984	512984	509984	509984	10737664	
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	1061984	509984	509984	512984	509984	513984	512984	509984	509984	512984	513984	509984	512984	509984	509984	516984	509984	509984	512984	509984	509984	11291664	
ΟΦΕΛΟΣ																							
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΦΕΛΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΕΣΟΔΑ																							
Πώληση Ανακτηθέντων Σπάνιων Γαιών	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	25704	5.1 € / d
Εμπλουτισμός Υλικών και Δειγμάτων	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	7560000	1500 € / d
Γεωχημικός Χαρακτηρισμός Δειγμάτων	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	3528000	700 € / d
Θερμική κατεργασία (απομάκρυνση) Υδραργύρου	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	756000	150 € / d
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΣΟΔΑ	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	11869704	
Καθαρή Ετήσια Χρηματοροή	-1061984	55240	55240	52240	55240	51240	52240	55240	55240	52240	51240	55240	52240	55240	55240	48240	55240	55240	52240	55240	55240		
Επιτόκιο	0.03																						
NPVC	\$8,671,601.44																						
NPVB	\$8,974,329.85																						
NPV	\$302,728.42																						
BCR	1.03																						

Εικόνα 36: Συνοπτική παρουσίαση δεδομένων κόστους - οφέλους για δομή ανάκτησης R.E.E. από λαμπτήρες, λειτουργίας 20 ετών (3% επιτόκιο).

Το τρίτο και τελευταίο σενάριο αφορά την ανάκτηση R.E.E. από λαμπτήρες φθορισμού, λειτουργίας 20 ετών με επιτόκιο 2%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα της Εικόνας 37 και στα γραφήματα της Εικόνας 35. Το benefit - cost ratio της πρότασης με επιτόκιο 2% ισούται με **1.04** γεγονός που το καθιστά το καλύτερο σενάριο που διερευνήθηκε για τους λαμπτήρες. Έσοδα και κόστη αποτυπώνονται στην Εικόνα 37. Συνολικά, η ανάκτηση R.E.E. από λαμπτήρες φθορισμού κρίνεται μια πολλά υποσχόμενη πρόταση, ώριμη και οικονομικά βιώσιμη με τις διεργασίες το γενικότερο πλάνο που έχει προταθεί στην παρούσα εργασία.

ΟΝΟΜΑ ΔΟΜΗΣ	Δομή Ανάκτησης Κρίσιμων Μετάλλων																				ΕΝΑΡΞΗ	6/2024	
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	ΑΝΑΚΤΗΣΗ R.E.E. ΑΠΟ: Λαμπτήρες φθορισμού																				ΛΗΞΗ	6/2044	
ΚΟΣΤΟΣ																							
ΠΟΣΙΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																							
Εργαστηριακός Εξοπλισμός	460000																					460000	
Εξοπλισμός / Έπιπλωση Γραφείων	5000																					5000	
Κόστος Hardware	20000																					20000	
Κόστος Software	15000																					15000	
Servers	4000																					4000	
Μονάδα Θερμικής κατεργασίας Υδραργύρου	45000																					45000	
Άλλου είδους Υποδομές	5000																					5000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	554000																					554000	
ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																						ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
Αντιδραστήρια	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	88584	1860264	369.1 € / d
Hardware/Software (Ανανέωση αδειών χρήσης)				3000			3000			3000			3000			3000			3000			18000	
Συντήρηση Εξοπλισμού		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	40000	2000 € / yr
Αναλώσιμα (H/Y, υλικά γραφείου)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	21000	
Αμοιβές Υπαλλήλων	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	6930000	1100 € avg
Εκπαίδευση Υπαλλήλων	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	52500	2500 € / yr
Μεταφορά Πρώτων Υλών	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2100	100 € / yr
Ενοίκιαση Υποδομών από τη ΔΕΗ	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	1260000	6000 € / mo
Ηλεκτροδότηση	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	504000	2000 € / mo
Τηλεπικοινωνίες	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	37800	150 € / mo
Servers						4000					4000					4000						12000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	507984	509984	509984	512984	509984	513984	512984	509984	509984	512984	513984	509984	512984	509984	509984	516984	509984	509984	512984	509984	509984	10737664	
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	1061984	509984	509984	512984	509984	513984	512984	509984	509984	512984	513984	509984	512984	509984	509984	516984	509984	509984	512984	509984	509984	11291664	
ΟΦΕΛΟΣ																							
ΠΟΣΙΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΦΕΛΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΕΣΟΔΑ																							
Πώληση Ανακτηθέντων Σπάνιων Γαιών	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	1224	25704	5.1 € / d
Εμπλουτισμός Υλικών και Δειγμάτων	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	7560000	1500 € / d
Γεωχημικός Χαρακτηρισμός Δειγμάτων	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	3528000	700 € / d
Θερμική κατεργασία (απομάκρυνση) Υδραργύρου	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	756000	150 € / d
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΣΟΔΑ	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	565224	11869704	
Καθαρή Ετήσια Χρηματοροή	-1061984	55240	55240	52240	55240	51240	52240	55240	55240	52240	51240	55240	52240	55240	55240	48240	55240	55240	52240	55240	55240		
Επιτόκιο	0.02																						
NPVC	\$9,425,525.91																						
NPVB	\$9,807,446.56																						
NPV	\$381,920.65																						
BCR	1.04																						

Εικόνα 37: Συνοπτική παρουσίαση δεδομένων κόστους - οφέλους για δομή ανάκτησης R.E.E. από λαμπτήρες, λειτουργίας 20 ετών (2% επιτόκιο).

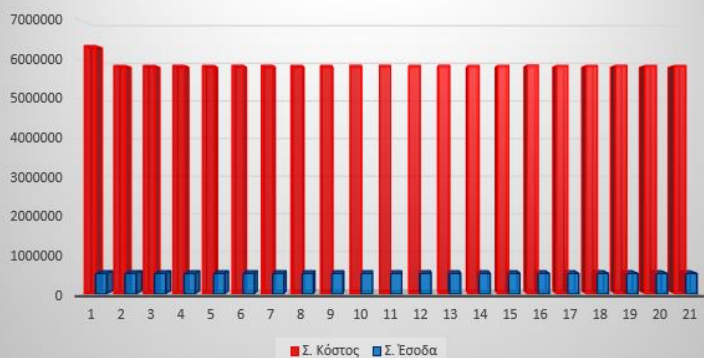
Δομή ανάκτησης R.E.E. από C.F.A. με επιτόκιο 5%, 3% και 2%

Τα επόμενα σενάρια αφορούν την ανάκτηση R.E.E. από C.F.A.. Η πολύ μικρή συγκέντρωση R.E.E. στην C.F.A. συνεπάγεται αντιστρόφως ανάλογη ποσότητα αντιδραστηρίων για την ανάκτηση τους, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Ωστόσο, κρίνεται σκόπιμο να αποτυπωθούν αυτά τα μεγέθη σε παρόμοια σενάρια με αυτά των μαγνητών και λαμπτήρων, ώστε να ποσοτικοποιηθεί και το benefit - cost ratio. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα της Εικόνας 38 και στα γραφήματα της Εικόνας 39.

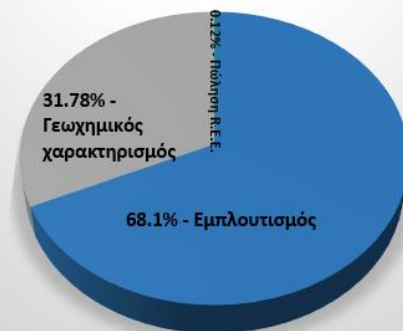
ΟΝΟΜΑ ΔΟΜΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΩΝ		Δομή Ανάκτησης Κρίσιμων Μετάλλων ΑΝΑΚΤΗΣΗ R.E.E. ΑΠΟ: C.F.A.																				ΕΝΑΡΞΗ ΛΗΞΗ		6/2024 6/2044
ΚΟΣΤΟΣ																								
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ		
ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																								
Εργαστηριακός Εξοπλισμός	460000																						460000	
Εξοπλισμός / Έπιπλωση Γραφείων	5000																						5000	
Κόστος Hardware	20000																						20000	
Κόστος Software	15000																						15000	
Servers	4000																						4000	
Μονάδα θερμικής κατεργασίας Υδραργύρου																							0	
Άλλου είδους Υποδομές	5000																						5000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	509000																						509000	
ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																							ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
Αντιδραστήρια	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	114055200	22630 € / d
Hardware/Software (Ανανέωση αδειών χρήσης)				3000				3000				3000							3000				18000	
Συντήρηση Εξοπλισμού		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	40000	2000 € / yr
Αναλώσιμα (Η/Υ, υλικά γραφείου)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	21000	
Αμοιβές Υπαλλήλων	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	6930000	1100 € avg
Εκπαίδευση Υπαλλήλων	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	52500	2500 € / yr
Μεταφορά Πρώτων Υλών	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2100	100 € / yr
Ενοίκιαση Υποδομών από τη ΔΕΗ	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	1260000	
Ηλεκτροδότηση	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	504000	2000 € / mo
Τηλεπικοινωνίες	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	37800	150 € / mo
Servers						4000					4000					4000						12000		
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	5850600	5852600	5852600	5855600	5852600	5856600	5855600	5852600	5852600	5855600	5856600	5852600	5855600	5852600	5852600	5859600	5852600	5852600	5855600	5852600	5852600	5852600	122932600	
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	6359600	5852600	5852600	5855600	5852600	5856600	5855600	5852600	5852600	5855600	5856600	5852600	5855600	5852600	5852600	5859600	5852600	5852600	5855600	5852600	5852600	5852600	123441600	
ΟΦΕΛΟΣ																								
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΦΕΛΟΥΣ ΕΣΟΔΑ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ		
Πώληση Ανακτηθέντων Σπάνιων Γαιών	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	13104	2.6 € / d
Εμπλουτισμός Υλικών και Δειγμάτων	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	7560000	1500 € / d
Γεωχημικός Χαρακτηρισμός Δειγμάτων	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	3528000	700 € / d
Θερμική κατεργασία (απομάκρυνση) Υδραργύρου																							0	150 € / d
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΣΟΔΑ	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	11101104	
Καθαρή Ετήσια Χρηματοροπή	-6359600	-5323976	-5323976	-5326976	-5323976	-5327976	-5326976	-5323976	-5323976	-5326976	-5327976	-5323976	-5326976	-5323976	-5323976	-5330976	-5323976	-5323976	-5326976	-5323976	-5323976	-5323976		
Επιτόκιο	0.05																							
NPVC	\$79,314,570.19																							
NPVB	\$7,116,447.48																							
NPV	(\$72,198,122.71)																							
BCR	0.09																							

Εικόνα 38: Συνοπτική παρουσίαση δεδομένων κόστους - οφέλους για δομή ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες και λαμπτήρες, λειτουργίας 20 ετών (5% επιτόκιο).

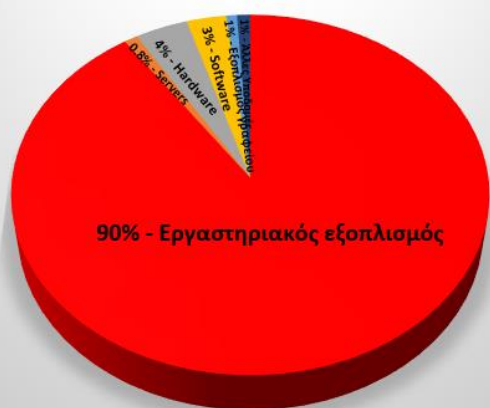
Cost Vs Benefit (€) - C.F.A.



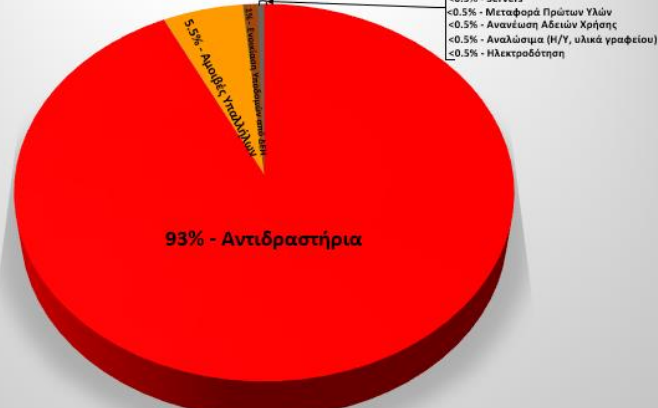
Συνολικά έσοδα δομής C.F.A.



Μη Επαναλαμβανόμενα Κόστη



Επαναλαμβανόμενα Κόστη



Εικόνα 39: Οπτική απεικόνιση δεδομένων κόστους - οφέλους δομής ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες NdFeB και λαμπτήρες φθορισμού, λειτουργίας 20 ετών.

Από την σχετική ανάλυση με βάση τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, προκύπτει ότι η δημιουργία δομής ανάκτησης R.E.E. από C.F.A. απέχει πολύ από το να χαρακτηριστεί οικονομικά βιώσιμη και υλοποιήσιμη πρόταση, καθώς το benefit - cost ratio της πρότασης με επιτόκιο 5% ισούται με **0.09**, με το ratio αυτό να είναι ελαφρώς μεγαλύτερο στα επόμενα δύο σενάρια (επιτόκιο 3% και 2%). Τα βασικά έσοδα - οικονομικά οφέλη της δομής σε αυτό το σενάριο προέρχονται από το εργαστήριο εμπλουτισμού (68.1%), ακολουθούμενα από αυτά του εργαστηρίου γεωχημικού χαρακτηρισμού (31.78%) ενώ η πώληση των ανακτώμενων R.E.E. θα αποδίδει το υπολειπόμενο 0.12% των εσόδων. Τα έσοδα αυτά θα είναι τα ίδια και στα επόμενα 2 σενάρια που αφορούν τους την ανάκτηση από C.F.A.. Αναφορικά με τα κόστη, τα μη επαναλαμβανόμενα κόστη είναι ίδια με αυτά της δομής ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες NdFeB (ίδιες αρχικές υποδομές και λειτουργίες χωρίς τη δομή θερμικής κατεργασίας Hg). Τα επαναλαμβανόμενα κόστη της δομής αφορούν κατά κύριο λόγο την μεγάλη ποσότητα αντιδραστηρίων που απαιτείται για την ανάκτηση των R.E.E. (93%), τις αμοιβές των υπαλλήλων (5.6%) και την ενοικίαση των υποδομών από τη ΔΕΗ (1%). Το υπόλοιπο 0.4% αφορά τα έξοδα για μεταφορά των πρώτων υλών, συντήρηση εξοπλισμού, servers, τηλεπικοινωνίες, αναλώσιμα και ανανέωση αδειών χρήσης. Τα επαναλαμβανόμενα κόστη θα είναι τα ίδια και για τα επόμενα δύο σενάρια που αφορούν την ανάκτηση από μαγνήτες και λαμπτήρες.

Το δεύτερο σενάριο που διερευνήθηκε αφορά την ανάκτηση R.E.E. από C.F.A., λειτουργίας 20 ετών με επιτόκιο 3%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα της Εικόνας 40 και στα γραφήματα της Εικόνας 39. Το benefit - cost ratio της πρότασης με επιτόκιο 3% ισούται και αυτό με **0.09**. Έσοδα και κόστη είναι τα ίδια για τα τρία σενάρια που αφορούν μαγνήτες και λαμπτήρες, όπως προαναφέρθηκε και αποτυπώνονται στην Εικόνα 39.

ΟΝΟΜΑ ΔΟΜΗΣ	Δομή Ανάκτησης Κρίσιμων Μετάλλων																				ΕΝΑΡΞΗ	6/2024	
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	ΑΝΑΚΤΗΣΗ R.E.E. ΑΠΟ: C.F.A.																				ΛΗΞΗ	6/2044	
ΚΟΣΤΟΣ																							
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																							
Εργαστηριακός Εξοπλισμός	460000																					460000	
Εξοπλισμός / Έπιπλωση Γραφείων	5000																					5000	
Κόστος Hardware	20000																					20000	
Κόστος Software	15000																					15000	
Servers	4000																					4000	
Μονάδα θερμικής κατεργασίας Υδραργύρου																						0	
Άλλου είδους Υποδομές	5000																					5000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	509000																					509000	
ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																						ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
Αντιδραστήρια	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	114055200
Hardware/Software (Ανανέωση αδειών χρήσης)				3000				3000			3000			3000			3000			3000			18000
Συντήρηση Εξοπλισμού		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	40000
Αναλώσιμα (Η/Υ, υλικά γραφείου)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	21000
Αμοιβές Υπαλλήλων	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	3300000	69300000
Εκπαίδευση Υπαλλήλων	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	52500
Μεταφορά Πρώτων Υλών	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2100
Ενοίκιαση Υποδομών από τη ΔΕΗ	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	1260000
Ηλεκτροδότηση	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	504000
Τηλεπικοινωνίες	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	37800
Servers						4000					4000					4000						12000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	5850600	5852600	5852600	5855600	5852600	5856600	5855600	5852600	5852600	5855600	5856600	5852600	5855600	5852600	5852600	5859600	5852600	5852600	5855600	5852600	5852600	5852600	122932600
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	6359600	5852600	5852600	5855600	5852600	5856600	5855600	5852600	5852600	5855600	5856600	5852600	5855600	5852600	5852600	5859600	5852600	5852600	5855600	5852600	5852600	5852600	123441600
ΟΦΕΛΟΣ																							
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΦΕΛΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΕΣΟΔΑ																							
Πώληση Ανακτηθέντων Σπάνιων Γαιών	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	13104	
Εμπλουτισμός Υλικών και Δειγμάτων	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	7560000	
Γεωχημικός Χαρακτηρισμός Δειγμάτων	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	3528000	
Θερμική κατεργασία (απομάκρυνση) Υδραργύρου																						0	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΣΟΔΑ	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	11101104	
Καθαρή Ετήσια Χρηματοροή	-6359600	-5323976	-5323976	-5326976	-5323976	-5327976	-5326976	-5323976	-5323976	-5326976	-5327976	-5323976	-5326976	-5323976	-5323976	-5330976	-5323976	-5323976	-5326976	-5323976	-5323976		
Επιτόκιο	0.03																						
NPVC	\$93,453,852.66																						
NPVB	\$8,393,214.27																						
NPV	(\$85,060,638.39)																						
BCR	0.09																						

Εικόνα 40: Συνοπτική παρουσίαση δεδομένων κόστους - οφέλους για δομή ανάκτησης R.E.E. από C.F.A. 20 ετών (3% επιτόκιο).

Το τρίτο και τελευταίο σενάριο αφορά την ανάκτηση R.E.E. από C.F.A., λειτουργίας 20 ετών με επιτόκιο 2%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα της Εικόνας 41 και στα γραφήματα της Εικόνας 39. Το benefit - cost ratio της πρότασης με επιτόκιο 2% ισούται και εδώ με **0.09**. Έσοδα και κόστη αποτυπώνονται στην Εικόνα 40. Συνολικά, η ανάκτηση R.E.E. από C.F.A. απέχει πολύ από το να χαρακτηριστεί ώριμη και οικονομικά βιώσιμη, ωστόσο η προοπτική ανάκτησης υπάρχει αν βελτιωθούν οι υφιστάμενες διεργασίες.

ΟΝΟΜΑ ΔΟΜΗΣ	Δομή Ανάκτησης Κρίσιμων Μετάλλων																				ΕΝΑΡΞΗ	6/2024	
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	ΑΝΑΚΤΗΣΗ R.E.E. ΑΠΟ: C.F.A.																				ΛΗΞΗ	6/2044	
ΚΟΣΤΟΣ																							
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																							
Εργαστηριακός Εξοπλισμός	460000																					460000	
Εξοπλισμός / Έπιπλωση Γραφείων	5000																					5000	
Κόστος Hardware	20000																					20000	
Κόστος Software	15000																					15000	
Servers	4000																					4000	
Μονάδα Θερμικής κατεργασίας Υδραργύρου																						0	
Άλλου είδους Υποδομές	5000																					5000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	509000																					509000	
ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																						ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
Αντιδραστήρια	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	5431200	114055200	22630 € / d
Hardware/Software (Ανανέωση αδειών χρήσης)				3000			3000		3000		3000		3000		3000		3000		3000		3000	18000	
Συντήρηση Εξοπλισμού		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	40000	2000 € / yr
Αναλώσιμα (Η/Υ, υλικά γραφείου)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	21000	
Αμοιβές Υπαλλήλων	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	6930000	1100 € avg
Εκπαίδευση Υπαλλήλων	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	52500	2500 € / yr
Μεταφορά Πρώτων Υλών	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2100	100 € / yr
Ενοίκιαση Υποδομών από τη ΔΕΗ	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	1260000	6000 € / mo
Ηλεκτροδότηση	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	504000	2000 € / mo
Τηλεπικοινωνίες	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	37800	150 € / mo
Servers						4000					4000					4000						12000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	5850600	5852600	5852600	5855600	5852600	5856600	5855600	5852600	5852600	5855600	5856600	5852600	5855600	5852600	5852600	5859600	5852600	5852600	5855600	5852600	5852600	122932600	
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	6359600	5852600	5852600	5855600	5852600	5856600	5855600	5852600	5852600	5855600	5856600	5852600	5855600	5852600	5852600	5859600	5852600	5852600	5855600	5852600	5852600	123441600	
ΟΦΕΛΟΣ																							
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΦΕΛΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΕΙΣΟΔΑ																							
Πώληση Ανακτηθέντων Σπάνιων Γαιών	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	13104	2.6 € / d
Εμπλουτισμός Υλικών και Δειγμάτων	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	7560000	1500 € / d
Γεωχημικός Χαρακτηρισμός Δειγμάτων	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	3528000	700 € / d
Θερμική κατεργασία (απομάκρυνση) Υδραργύρου																						0	150 € / d
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΙΣΟΔΑ	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	528624	11101104	
Καθαρή Ετήσια Χρηματορροή	-6359600	-5323976	-5323976	-5326976	-5323976	-5327976	-5326976	-5323976	-5323976	-5326976	-5327976	-5323976	-5326976	-5323976	-5323976	-5330976	-5323976	-5323976	-5326976	-5323976	-5323976		
Επιτόκιο	0.02																						
NPVC	\$102,082,571.32																						
NPVB	\$9,172,384.10																						
NPV	(\$92,910,187.22)																						
BCR	0.09																						

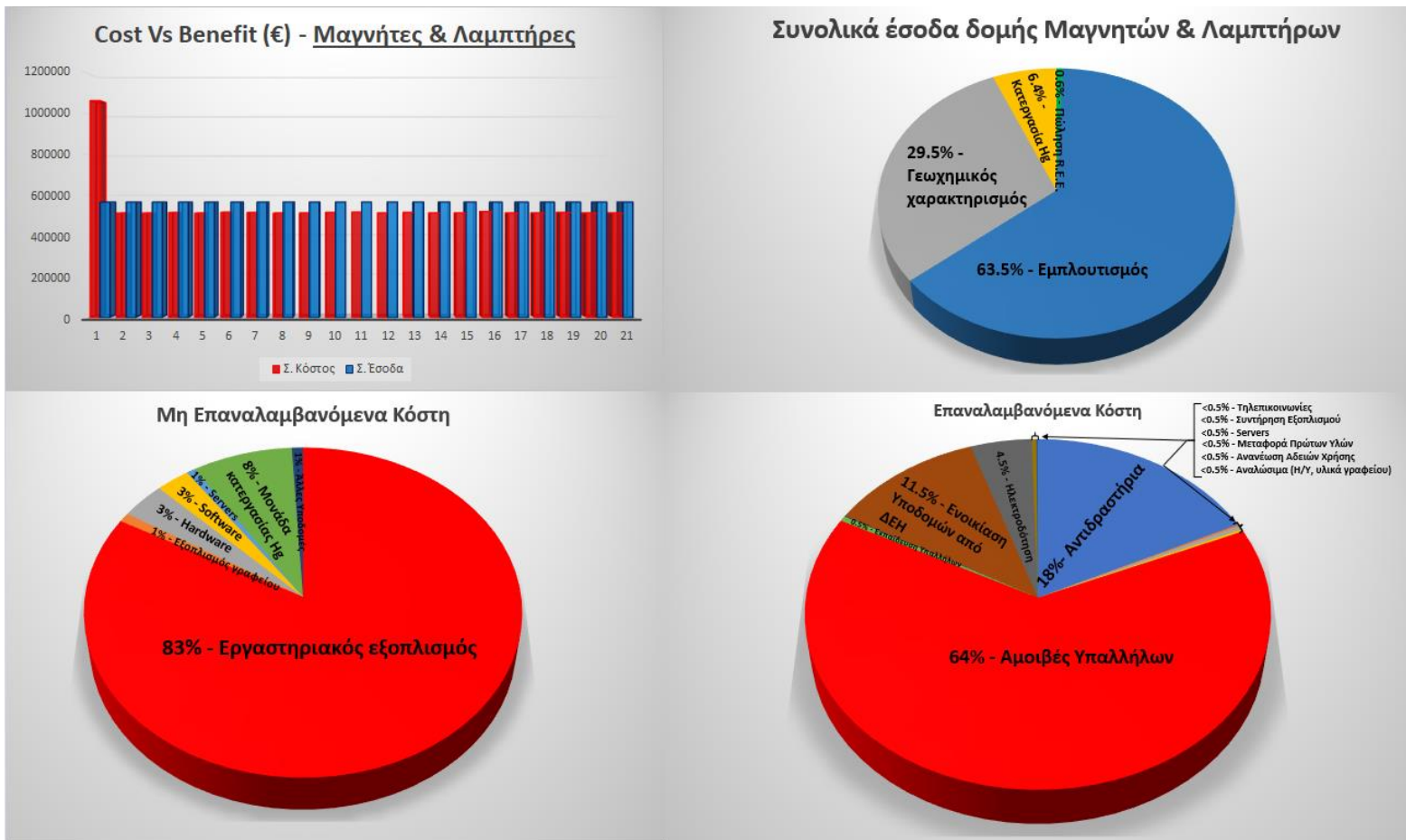
Εικόνα 41: Συνοπτική παρουσίαση δεδομένων κόστους - οφέλους για δομή ανάκτησης R.E.E. από C.F.A. λειτουργίας 20 ετών (2% επιτόκιο).

Δομή ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες NdFeB και λαμπτήρες φθορισμού με επιτόκιο 5%, 3% και 2%

Τα τελευταία τρία σενάρια αφορούν την ανάκτηση R.E.E. από μαγνήτες NdFeB και λαμπτήρες φθορισμού με επιτόκιο 5%, 3% και 2%. Όπως έγινε κατανοητό παραπάνω, η ανάκτηση R.E.E. από C.F.A. αποτελεί ένα ιδιαίτερα κοστοβόρο και μη βιώσιμο εγχείρημα. Κρίνεται σκόπιμο να αξιολογηθεί η συνδυαστική ανάκτηση από μαγνήτες και λαμπτήρες, δεδομένου ότι και οι 2 πρώτες ύλες έδωσαν αποτελέσματα που μπορούν να υλοποιηθούν. Τα δεδομένα από την συνδυαστική ανάκτηση με επιτόκιο 5% συνοψίζονται παρακάτω.

ΟΝΟΜΑ ΔΟΜΗΣ	Δομή Ανάκτησης Κρίσιμων Μετάλλων																					ΕΝΑΡΞΗ	6/2024
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	ΑΝΑΚΤΗΣΗ R.E.E. ΑΠΟ: Μαγνήτες + Λαμπτήρες																					ΛΗΞΗ	6/2044
ΚΟΣΤΟΣ																							
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																							
Εργαστηριακός Εξοπλισμός	460000																					460000	
Εξοπλισμός / Επιπλώση Γραφείων	5000																					5000	
Κόστος Hardware	20000																					20000	
Κόστος Software	15000																					15000	
Servers	4000																					4000	
Μονάδα θερμικής κατεργασίας Υδραργύρου	45000																					45000	
Άλλου είδους Υποδομές	5000																					5000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	554000																					554000	
ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																						ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
Αντιδραστήρια	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	1922256	
Hardware/Software (Ανανέωση αδειών χρήσης)				3000				3000					3000				3000					18000	
Συντήρηση Εξοπλισμού		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	40000	
Αναλώσιμα (Η/Υ, υλικά γραφείου)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	21000	
Αμοιβές Υπαλλήλων	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	6930000	
Εκπαίδευση Υπαλλήλων	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	52500	
Μεταφορά Πρώτων Υλών	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	8400	
Ενοίκιαση Υποδομών από τη ΔΕΗ	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	1260000	
Ηλεκτροδότηση	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	504000	
Τηλεπικοινωνίες	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	37800	
Servers						4000							4000				4000					12000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	511236	513236	513236	516236	513236	517236	516236	513236	513236	516236	517236	513236	516236	513236	513236	520236	513236	513236	516236	513236	513236	10805956	
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	1065236	513236	513236	516236	513236	517236	516236	513236	513236	516236	517236	513236	516236	513236	513236	520236	513236	513236	516236	513236	513236	11359956	
ΟΦΕΛΟΣ																							
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΦΕΛΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΕΣΟΔΑ																							
Πώληση Ανακτηθέντων Σπάνιων Γαιών	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	75600	
Εμπλουτισμός Υλικών και Δειγμάτων	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	7560000	
Γεωχημικός Χαρακτηρισμός Δειγμάτων	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	3528000	
Θερμική κατεργασία (απομάκρυνση) Υδραργύρου	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	756000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΣΟΔΑ	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	11919600	
Καθαρή Ετήσια Χρηματοροή	-1065236	54364	54364	51364	54364	50364	51364	54364	54364	51364	50364	54364	51364	54364	54364	47364	54364	54364	51364	54364	54364		
Επιτόκιο	0.05																						
NPVC	\$7,479,928.92																						
NPVB	\$7,641,150.59																						
NPV	\$161,221.67																						
BCR	1.02																						

Εικόνα 42: Συνοπτική παρουσίαση δεδομένων κόστους - οφέλους για δομή ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες και λαμπτήρες, λειτουργίας 20 ετών (5% επιτόκιο).



Εικόνα 43: Οπτική απεικόνιση δεδομένων κόστους - οφέλους δομής ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες NdFeB και λαμπτήρες φθορισμού, λειτουργίας 20 ετών.

Από την σχετική ανάλυση με βάση τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, προκύπτει ότι η δημιουργία δομής συνδυαστικής ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες NdFeB και λαμπτήρες φθορισμού αποτελεί μια οικονομικά βιώσιμη και υλοποιήσιμη πρόταση, καθώς το benefit - cost ratio της πρότασης με επιτόκιο 5% ισούται με **1.02**, γεγονός αναμενόμενο δεδομένου ότι και οι δύο πρώτες ύλες έδωσαν ratios μεγαλύτερα του 1. Τα βασικά έσοδα - οικονομικά οφέλη της δομής σε αυτό το σενάριο προέρχονται από το εργαστήριο εμπλουτισμού (63.5%), ακολουθούμενα από αυτά του εργαστηρίου γεωχημικού χαρακτηρισμού (29.5%). Η πώληση των ανακτώμενων R.E.E. και η θερμική κατεργασία του Hg θα αποδίδουν το υπολειπόμενο 0.6% και 6.4% των εσόδων αντίστοιχα. Τα έσοδα αυτά θα είναι τα ίδια και στα επόμενα 2 σενάρια που αφορούν τους την συνδυαστική λειτουργία δομής μαγνητών και λαμπτήρων. Αναφορικά με τα κόστη, τα μη επαναλαμβανόμενα κόστη αφορούν τον εργαστηριακό εξοπλισμό σε ποσοστό 83%, το κόστος της μονάδας θερμικής κατεργασίας Hg (8%), το κόστος hardware/software ($\approx 3\%$), το κόστος των servers, του εξοπλισμού γραφείου και το κόστος άλλων υποδομών, σε ποσοστό $\approx 1\%$ και για τα τρία. Τα βασικά επαναλαμβανόμενα κόστη της δομής αφορούν τις αμοιβές των υπαλλήλων (64%), τα αντιδραστήρια (18%), την ενοίκια των υποδομών από την ΔΕΗ (11.5%) και την ηλεκτροδότηση (4.5%). Το υπόλοιπο 2% αφορά τα έξοδα για μεταφορά των πρώτων υλών, συντήρηση εξοπλισμού, servers, τηλεπικοινωνίες, αναλώσιμα, ανανέωση αδειών χρήσης και εκπαίδευση υπαλλήλων.

Το δεύτερο σενάριο που διερευνήθηκε αφορά την ανάκτηση R.E.E. από μαγνήτες NdFeB και λαμπτήρες, λειτουργίας 20 ετών με επιτόκιο 3%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα της Εικόνας 44 και στα γραφήματα της Εικόνας 43. Το benefit - cost ratio της πρότασης με επιτόκιο 3% ισούται με **1.03** . Έσοδα και κόστη είναι τα ίδια για τα τρία σενάρια που αφορούν μαγνήτες και λαμπτήρες όπως προαναφέρθηκε και αποτυπώνονται στην Εικόνα 43.

ΟΝΟΜΑ ΔΟΜΗΣ	Δομή Ανάκτησης Κρίσιμων Μετάλλων																				ΕΝΑΡΞΗ	6/2024	
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	ΑΝΑΚΤΗΣΗ R.E.E. ΑΠΟ: Μαγνήτες + Λαμπτήρες																				ΛΗΞΗ	6/2044	
ΚΟΣΤΟΣ																							
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																							
Εργαστηριακός Εξοπλισμός	460000																					460000	
Εξοπλισμός / Έπιπλωση Γραφείων	5000																					5000	
Κόστος Hardware	20000																					20000	
Κόστος Software	15000																					15000	
Servers	4000																					4000	
Μονάδα θερμικής κατεργασίας Υδραργύρου	45000																					45000	
Άλλου είδους Υποδομές	5000																					5000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	554000																					554000	
ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																						ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
Αντιδραστήρια	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	1922256	381.4 € / d
Hardware/Software (Ανανέωση αδειών χρήσης)				3000			3000			3000			3000			3000			3000			18000	
Συντήρηση Εξοπλισμού		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	40000	2000 € / yr
Αναλώσιμα (Η/Υ, υλικά γραφείου)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	21000	
Αμοιβές Υπαλλήλων	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	6930000	1100 € avg
Εκπαίδευση Υπαλλήλων	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	52500	2500 € / yr
Μεταφορά Πρώτων Υλών	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	8400	400 € / yr
Ενοίκιαση Υποδομών από τη ΔΕΗ	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	1260000	6000 € / mo
Ηλεκτροδότηση	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	504000	2000 € / mo
Τηλεπικοινωνίες	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	37800	150 € / mo
Servers						4000					4000					4000						12000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	511236	513236	513236	516236	513236	517236	516236	513236	513236	516236	517236	513236	516236	513236	513236	520236	513236	513236	516236	513236	513236	10805956	
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	1065236	513236	513236	516236	513236	517236	516236	513236	513236	516236	517236	513236	516236	513236	513236	520236	513236	513236	516236	513236	513236	11359956	
ΟΦΕΛΟΣ																							
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΦΕΛΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΕΣΟΔΑ																							
Πώληση Ανακτηθέντων Σπάνιων Γαιών	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	75600	15 € / d
Εμπλουτισμός Υλικών και Δειγμάτων	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	7560000	1500 € / d
Γεωχημικός Χαρακτηρισμός Δειγμάτων	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	3528000	700 € / d
Θερμική κατεργασία (απομάκρυνση) Υδραργύρου	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	756000	150 € / d
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΣΟΔΑ	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	11919600	
Καθαρή Ετήσια Χρηματοροπή	-1065236	54364	54364	51364	54364	50364	51364	54364	54364	51364	50364	54364	51364	54364	54364	47364	54364	54364	51364	54364	54364		
Επιτόκιο	0.03																						
NPVC	\$8,723,234.98																						
NPVB	\$9,012,054.73																						
NPV	\$288,819.75																						
BCR	1.03																						

Εικόνα 44: Συνοπτική παρουσίαση δεδομένων κόστους - οφέλους για δομή ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες και λαμπτήρες λειτουργίας 20 ετών (3% επιτόκιο).

Το τρίτο και τελευταίο σενάριο αφορά την ανάκτηση R.E.E. από μαγνήτες και λαμπτήρες, λειτουργίας 20 ετών με επιτόκιο 2%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα της Εικόνας 45 και στα γραφήματα της Εικόνας 43. Το benefit - cost ratio της πρότασης με επιτόκιο 2% ισούται και εδώ με **1.04**. Έσοδα και κόστη αποτυπώνονται στην Εικόνα 44. Συνολικά, η ανάκτηση R.E.E. από μαγνήτες NdFeB και λαμπτήρες φθορισμού κρίνεται βιώσιμη και οικονομικά υλοποιήσιμη πρόταση με τις διεργασίες και το γενικότερο πλάνο που έχει προταθεί στην παρούσα εργασία.

ΟΝΟΜΑ ΔΟΜΗΣ	Δομή Ανάκτησης Κρίσιμων Μετάλλων																				ΕΝΑΡΞΗ	6/2024	
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	ΑΝΑΚΤΗΣΗ R.E.E. ΑΠΟ: Μαγνήτες + Λαμπτήρες																				ΛΗΞΗ	6/2044	
ΚΟΣΤΟΣ																							
ΠΟΣΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																							
Εργαστηριακός Εξοπλισμός	460000																					460000	
Εξοπλισμός / Έπιπλωση Γραφείων	5000																					5000	
Κόστος Hardware	20000																					20000	
Κόστος Software	15000																					15000	
Servers	4000																					4000	
Μονάδα Θερμικής κατεργασίας Υδραργύρου	45000																					45000	
Άλλου είδους Υποδομές	5000																					5000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΜΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	554000																					554000	
ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ																						ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
Αντιδραστήρια	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	91536	1922256	381.4 € / d
Hardware/Software (Ανανέωση αδειών χρήσης)				3000			3000			3000			3000			3000			3000			18000	
Συντήρηση Εξοπλισμού		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	40000	2000 € / yr
Αναλώσιμα (H/Y, υλικά γραφείου)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	21000	
Αμοιβές Υπαλλήλων	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	330000	6930000	1100 € avg
Εκπαίδευση Υπαλλήλων	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	52500	2500 € / yr
Μεταφορά Πρώτων Υλών	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	8400	400 € / yr
Ενοίκιαση Υποδομών από τη ΔΕΗ	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	1260000	6000 € / mo
Ηλεκτροδότηση	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	504000	2000 € / mo
Τηλεπικοινωνίες	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	37800	150 € / mo
Servers						4000					4000					4000						12000	
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΚΟΣΤΗ	511236	513236	513236	516236	513236	517236	516236	513236	513236	516236	517236	513236	516236	513236	513236	520236	513236	513236	516236	513236	513236	10805956	
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	1065236	513236	513236	516236	513236	517236	516236	513236	513236	516236	517236	513236	516236	513236	513236	520236	513236	513236	516236	513236	513236	11359956	
ΟΦΕΛΟΣ																							
ΠΟΣΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΦΕΛΟΥΣ	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	
ΕΣΟΔΑ																							
Πώληση Ανακτηθέντων Σπάνιων Γαιών	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	75600	15 € / d
Εμπλουτισμός Υλικών και Δειγμάτων	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	7560000	1500 € / d
Γεωχημικός Χαρακτηρισμός Δειγμάτων	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	3528000	700 € / d
Θερμική κατεργασία (απομάκρυνση) Υδραργύρου	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	36000	756000	150 € / d
ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΣΟΔΑ	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	567600	11919600	
Καθαρή Ετήσια Χρηματοροπή	-1065236	54364	54364	51364	54364	50364	51364	54364	54364	51364	50364	54364	51364	54364	54364	47364	54364	54364	51364	54364	54364		
Επιτόκιο	0.02																						
NPVC	\$9,481,952.77																						
NPVB	\$9,848,673.57																						
NPV	\$366,720.80																						
BCR	1.04																						

Εικόνα 45: Συνοπτική παρουσίαση δεδομένων κόστους - οφέλους για δομή ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες και λαμπτήρες, λειτουργίας 20 ετών (2% επιτόκιο).

6.2. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η δημιουργία μιας δομής ανάκτησης σπάνιων γαιών (R.E.E.) εργαστηριακής – ημιπilotικής κλίμακας από μαγνήτες NdFeB, λαμπτήρες φθορισμού και ιπτάμενη τέφρα (C.F.A.), ειδικά στη Δυτική Μακεδονία και σε άλλες περιοχές της Ευρώπης όπου υπήρχαν λιγνιτικά ορυχεία, είναι σημαντική για διάφορους λόγους, ειδικά με βάση τις πρόσφατες εξαγγελίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για σταδιακή μετάβαση προς ένα ενεργειακό μοντέλο που θα είναι ανεξάρτητο από τα ορυκτά καύσιμα και τις πεπερασμένες πρώτες ύλες. Όπως αναφέρθηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο της εργασίας, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως στόχο τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και την υιοθέτηση καθαρότερων μορφών ενέργειας. Τα μέταλλα των R.E.E., όπως αυτά που περιέχονται στις παραπάνω πρώτες ύλες, είναι απαραίτητα για την ενός ευραίου φάσματος βιομηχανικών και τεχνολογικών εφαρμογών αιχμής. Η ανάκτηση τους από παλαιούς εξοπλισμούς, υλικά και βιομηχανικά απόβλητα είναι ζωτικής σημασίας για την ενίσχυση της βιωσιμότητας των πράσινων τεχνολογιών.

Με δεδομένο ότι τα μέταλλα αυτά εξορύσσονται κυρίως στην Κίνα, η οποία ελέγχει μεγάλο μέρος της παγκόσμιας αγοράς, η Ευρωπαϊκή Ένωση στοχεύει στην ενίσχυση της στρατηγικής ανθεκτικότητας απέναντι σε κρίσεις που αφορούν την προμήθεια πρώτων υλών. Η ανακύκλωση R.E.E. με τη δημιουργία τοπικών εργαστηριακών δομών ανάκτησης μειώνουν τις πιθανότητες οικονομικών και γεωπολιτικών πιέσεων και εξαρτήσεων από τις παγκόσμιες αγορές. Η Ευρώπη επιδιώκει να μειώσει την εξάρτηση από τρίτες χώρες για κρίσιμες πρώτες ύλες, για να εξασφαλίσει τη σταθερότητα και την αυτάρκειά της στην παραγωγή τεχνολογικών αγαθών. Η αξιοποίηση προϊόντων και υλικών που έχουν κλείσει τον κύκλο ζωής τους για την ανάκτηση R.E.E. αποτελεί μια βιώσιμη λύση που συνδέει τη μετάβαση από τον λιγνίτη σε πιο οικολογικές πρακτικές, ενώ παράλληλα δημιουργεί νέες οικονομικές ευκαιρίες για τις τοπικές κοινωνίες. Η ανάκτηση τους από μαγνήτες NdFeB και λαμπτήρες φθορισμού αλλά και από αξιοποιήσιμα απόβλητα, όπως η C.F.A., συμβάλλει στην κυκλική οικονομία, μειώνοντας την ανάγκη για νέα εξόρυξη και τη συνολική περιβαλλοντική επιβάρυνση. Αυτή η προσέγγιση ευθυγραμμίζεται με τις ευρωπαϊκές πολιτικές για την κυκλική οικονομία και τη βιώσιμη χρήση των πόρων.

Η δημιουργία δομών ανάκτησης και ανακύκλωσης R.E.E. σε περιοχές που πλήττονται από την απολιγνιτοποίηση, όπως η Δυτική Μακεδονία, μπορεί να συμβάλλει στην οικονομική ανάκαμψη αυτών των περιοχών και να προσφέρει νέες θέσεις εργασίας. Οι σχετικές τεχνολογίες ανάκτησης και ανακύκλωσης αυτών των μετάλλων αποτελεί ένα σχετικά καινούργιο αντικείμενο με μεγάλα περιθώρια βελτίωσης των διεργασιών που εφαρμόζονται, δεδομένης της οικονομικής και κοινωνικής συγκυρίας.

Έτσι, σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η οικονομετεχνική διερεύνηση, μέσω μιας ΑΚΟ ανάλυσης, της λειτουργίας μιας τέτοιας δομής ανάκτησης R.E.E. εργαστηριακής - ημιπilotικής κλίμακας στη Δυτ. Μακεδονία, στα ορυχεία της Πτολεμαΐδας, στην οποία θα ανακτώνται τα μέταλλα αυτά από C.F.A., μαγνήτες NdFeB, και λαμπτήρες φθορισμού. Ο σχεδιασμός των ισοζυγίων μάζας και οι συνεπακόλουθες κοστολογήσεις βασίστηκαν στις διεργασίες ανάκτησης που των μετάλλων αυτών όπως προτάθηκαν από τους Pietrantonio et al. [16], Yurramendia et al. [12] και Wang et al. [15], για

μαγνήτες NdFeB, λαμπτήρες φθορισμού και C.F.A. αντίστοιχα. Σχεδιάστηκαν δώδεκα σενάρια λειτουργίας 20 ετών της εν λόγω δομής, τα οποία περιελάμβαναν: α) τρία σενάρια λειτουργίας της δομής με ανάκτηση R.E.E. από μαγνήτες NdFeB, με επιτόκια 5%, 3% και 2%, β) τρία σενάρια λειτουργίας της δομής με ανάκτηση R.E.E. από λαμπτήρες φθορισμού, με επιτόκια 5%, 3% και 2%, γ) τρία σενάρια λειτουργίας της δομής με ανάκτηση R.E.E. από C.F.A., με επιτόκια 5%, 3% και 2% και τέλος, δ) τρία σενάρια λειτουργίας της δομής με συνδυαστική ανάκτηση R.E.E. από μαγνήτες NdFeB και λαμπτήρες φθορισμού, με επιτόκια 5%, 3% και 2%. Για να σχεδιαστεί το κάθε σενάριο ελήφθησαν υπόψιν ένα σύνολο υλικοτεχνικών παραγόντων και υπηρεσιών, που θα αποτελούν οργανικά μέρη της δομής, αλλά και άλλων παραγόντων από τους οποίους θα εξαρτάται άμεσα η λειτουργία της. Η ποσοτική ανάλυση κόστους και οφέλους σε κάθε σενάριο βασίστηκε στην οικονομική αξιολόγηση καθενός από αυτούς τους παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί και τα σχετικά τους κόσθη ή έσοδα ήταν:

Μη Επαναλαμβανόμενα Κόστη

- Εργαστηριακός εξοπλισμός
- Εξοπλισμός / επίπλωση γραφείων
- Κόστος Hardware και Software
- Κόστος των Servers
- Κόστος μονάδας κατεργασίας Hg (για τα σενάρια που αφορούν ανάκτηση από λαμπτήρες)
- Κόστη που αφορούν άλλου είδους υποδομές

Επαναλαμβανόμενα Κόστη

- Αντιδραστήρια
- Ανανέωση αδειών χρήσης
- Συντήρηση εξοπλισμού
- Αναλώσιμα (H/Y, υλικά γραφείου)
- Αμοιβές υπαλλήλων
- Εκπαίδευση υπαλλήλων
- Μεταφορά πρώτων υλών
- Ενοικίαση υποδομών από τη ΔΕΗ
- Ηλεκτροδότηση
- Τηλεπικοινωνίες
- Servers (ανανέωση)

Έσοδα

- Πώληση ανακτηθέντων σπάνιων γαιών
- Εμπλουτισμός υλικών και δειγμάτων
- Γεωχημικός χαρακτηρισμός δειγμάτων
- Θερμική κατεργασία (απομάκρυνση) Hg

Μέσα από την ανάλυση ΑΚΟ γίνεται κατανοητό ότι τα οφέλη από την ανάκτηση 100 gr R.E.O. από τις συγκεκριμένες πρώτες ύλες είναι πολύ μικρά και η λειτουργία της δομής δεν μπορεί να βασιστεί μόνο σε αυτά. Γι' αυτό το λόγο συνυπολογίστηκε η αυτόνομη λειτουργία των εργαστηρίων εμπλουτισμού, χημικής ανάκτησης και θερμικής κατεργασίας Hg, δεδομένου ότι μπορούν να λειτουργήσουν και για άλλα δείγματα, πρώτες ύλες, αλλά και για άλλα ανακυκλώμενα υλικά πέραν των προαναφερθέντων και για ποσότητες μεγαλύτερες των 100 gr R.E.O, σε περίπτωση βελτίωσης των διεργασιών και scale up της κλίμακας ανάκτησης.

Η ΑΚΟ ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία έδειξε ότι η ανάκτηση R.E.E. από προϊόντα που έχουν εξαντλήσει τον κύκλο ζωής τους μπορεί όντως να αποτελέσει μια οικονομικά βιώσιμη και υλοποιήσιμη πρόταση. Πιο συγκεκριμένα, η ποσοτική ανάλυση κόστους - οφέλους για τα τρία σενάρια που αφορούν την 20ετή λειτουργία δομής ανάκτησης R.E.E. από μαγνήτες NdFeB αποδεικνύουν ότι μπορεί να αποτελέσει μια ώριμη πρόταση, με βάση τους συνδυασμούς των υλικοτεχνικών παραγόντων και υπηρεσιών που προτάθηκαν και με βάση τα benefit - cost ratio που υπολογίστηκαν για το κάθε σενάριο. Οι τιμές αυτές ήταν 1.14, 1.16 και 1.17 για επιτόκιο 5%, 3% και 2% αντίστοιχα, γεγονός που αποδεικνύει ότι κάθε σενάριο για τους μαγνήτες NdFeB έχει θετική απόδοση και μπορεί να αποτελέσει μια κερδοφόρα επένδυση. Τα τρία σενάρια που αφορούσαν τους λαμπτήρες φθορισμού έδειξαν πως και αυτή η εναλλακτική αποτελεί μια ώριμη πρόταση, άμεσα υλοποιήσιμη. Τα benefit - cost ratio που αφορούσαν την 20ετή λειτουργία δομής ανάκτησης R.E.E. ήταν ίσα με 1.02, 1.03 και 1.04 για επιτόκιο 5%, 3% και 2% αντίστοιχα, γεγονός που αποδεικνύει ότι και αυτή η πηγή μπορεί να αποτελέσει μια κερδοφόρα επένδυση. Σε αντίθεση με τις δύο πρώτες πηγές ανάκτησης, η ΑΚΟ ανάλυση έδειξε ότι η ανάκτηση R.E.E. από την C.F.A. του ΑΗΣ Μελίτης δεν αποτελεί μέχρι στιγμής μια ώριμη και άμεσα υλοποιήσιμη πρόταση. Η πολύ μικρή συγκέντρωση αυτών των μετάλλων στην εν λόγω τέφρα απαιτεί ιδιαίτερα μεγάλες ποσότητες αντιδραστηρίων για την ανάκτηση τους, κάτι που συνεπάγεται και πολύ μεγάλο κόστος για την αγορά τους. Τα benefit - cost ratio και για τα τρία σενάρια ισοδυναμούν με 0.09, γεγονός που δείχνει ότι το κόστος υπερβαίνει σημαντικά το όφελος και η επένδυση θα ήταν οικονομικά μη βιώσιμη και ζημιογόνα. Τέλος, διερευνήθηκε και η συνδυαστική ανάκτηση από μαγνήτες και λαμπτήρες, δεδομένου ότι και οι 2 πρώτες ύλες έδωσαν αποτελέσματα που μπορούν άμεσα να υλοποιηθούν. Τα benefit - cost ratio που αφορούσαν την 20ετή λειτουργία δομής ανάκτησης ήταν ίσα με 1.02, 1.03 και 1.04 για επιτόκιο 5%, 3% και 2% αντίστοιχα, γεγονός που αποδεικνύει ότι και η συνδυαστική ανάκτηση R.E.E. από μαγνήτες NdFeB και λαμπτήρες φθορισμού μπορεί να υλοποιηθεί άμεσα, με θετική απόδοση από την επένδυση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία - Ευρωπαϊκή Επιτροπή.” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_el
- [2] “(PDF) ENERGY TRANSITION AND THE FUTURE OF LIGNITE MINING IN THE REGION OF WESTERN MACEDONIA, GREECE.” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/355486804_ENERGY_TRANSITION_AND_THE_FUTURE_OF_LIGNITE_MINING_IN_THE_REGION_OF_WESTERN_MACEDONIA_GREECE
- [3] “CINTRAN - Sustainable Energy Transition - Europa-Universität Flensburg (EUF).” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.uni-flensburg.de/en/departement-for-sustainable-energy-transition/research/current-projects/cintran>
- [4] “Critical raw materials - European Commission.” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en
- [5] “European Critical Raw Materials Act - European Commission.” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_en
- [6] “EU coal regions in transition - European Commission.” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/carbon-management-and-fossil-fuels/eu-coal-regions-transition_en
- [7] “Rare-earth element | Uses, Properties, & Facts | Britannica.” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/rare-earth-element>
- [8] A. Tsachouridis, F. Pavloudakis, and N. Kiratzis, “Development of Rare Earth Elements Separation Processes from Coal Fly Ash,” *Materials Proceedings 2021, Vol. 5, Page 69*, vol. 5, no. 1, p. 69, Dec. 2021, doi: 10.3390/MATERPROC2021005069.
- [9] V. V. Seredin and S. Dai, “Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium,” *Int J Coal Geol*, vol. 94, pp. 67–93, May 2012, doi: 10.1016/J.COAL.2011.11.001.
- [10] S. Dai *et al.*, “Enrichment of U-Re-V-Cr-Se and rare earth elements in the Late Permian coals of the Moxinpo Coalfield, Chongqing, China: Genetic implications from geochemical and mineralogical data,” *Ore Geol Rev*, vol. 80, pp. 1–17, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.OREGEOREV.2016.06.015.
- [11] W. Rosita, I. M. Bendiyasa, I. Perdana, and F. Anggara, “Sequential particle-size and magnetic separation for enrichment of rare-earth elements and yttrium in Indonesia coal fly ash,” *J Environ Chem Eng*, vol. 8, no. 1, p. 103575, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.JECE.2019.103575.
- [12] L. Yurramendi, L. Gijsemans, F. Forte, J. L. Aldana, C. del Río, and K. Binnemans, “Enhancing rare-earth recovery from lamp phosphor waste,” *Hydrometallurgy*, vol. 187, pp. 38–44, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.HYDROMET.2019.04.030.
- [13] “LEACHING OF RARE EARTH ELEMENTS: REVIEW OF PAST AND PRESENT TECHNOLOGIES | Request PDF.” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available:

https://www.researchgate.net/publication/283516874_LEACHING_OF_RARE_EARTH_ELEMENTS_REVIEW_OF_PAST_AND_PRESENT_TECHNOLOGIES

- [14] N. Krishnamurthy and C. K. Gupta, "Extractive metallurgy of rare earths, second edition," *Extractive Metallurgy of Rare Earths, Second Edition*, pp. 1–809, Jan. 2015, doi: 10.1201/B19055/EXTRACTIVE-METALLURGY-RARE-EARTHS-NAGAIYAR-KRISHNAMURTHY-CHIRANJIB-KUMAR-GUPTA/ACCESSIBILITY-INFORMATION.
- [15] Z. Wang, S. Dai, J. Zou, D. French, and I. T. Graham, "Rare earth elements and yttrium in coal ash from the Luzhou power plant in Sichuan, Southwest China: Concentration, characterization and optimized extraction," *Int J Coal Geol*, vol. 203, pp. 1–14, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.COAL.2019.01.001.
- [16] M. Pietrantonio, S. Pucciarmati, L. Sebastianelli, F. Forte, and D. Fontana, "Materials recovery from end-of-life wind turbine magnets," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 19, no. 8, pp. 8019–8026, Aug. 2022, doi: 10.1007/S13762-021-03546-1.
- [17] "REE recovery from end-of-life NdFeB permanent magnet scrap: A critical review — TU Delft Research Portal." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://research.tudelft.nl/en/publications/ree-recovery-from-end-of-life-ndfeb-permanent-magnet-scrap-a-crit>
- [18] S. Van Loy, K. Binnemans, and T. Van Gerven, "Recycling of rare earths from lamp phosphor waste: Enhanced dissolution of LaPO₄:Ce³⁺, Tb³⁺ by mechanical activation," *J Clean Prod*, vol. 156, pp. 226–234, Jul. 2017, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.03.160.
- [19] "Αποτελέσματα Απογραφής 2021 | Δυτική Μακεδονία." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://census2021results.statistics.gr/perifereies/dytiki-makedonia>
- [20] "Στατιστικές - ELSTAT." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SAM04/->
- [21] "Οικονομικές δραστηριότητες - ELSTAT." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.statistics.gr/el/economic-activities>
- [22] "Front Page - Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.pdm.gov.gr/>
- [23] "Non-energy uses of coal, CCC/291 - ICSC." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.sustainable-carbon.org/report/non-energy-uses-of-coal-report-ccc291/>
- [24] W. Franus, M. Wdowin, and M. Franus, "Synthesis and characterization of zeolites prepared from industrial fly ash," *Environ Monit Assess*, vol. 186, no. 9, pp. 5721–5729, 2014, doi: 10.1007/S10661-014-3815-5.
- [25] R. M. Kalombe, V. T. Ojumu, C. P. Eze, S. M. Nyale, J. Kevern, and L. F. Petrik, "Fly Ash-Based Geopolymer Building Materials for Green and Sustainable Development," *Materials 2020, Vol. 13, Page 5699*, vol. 13, no. 24, p. 5699, Dec. 2020, doi: 10.3390/MA13245699.
- [26] "Characterization of rare earth elements present in coal ash by sequential extraction." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/343823032_Characterization_of_rare_earth_elements_present_in_coal_ash_by_sequential_extraction

- [27] A. Servou, N. Paraskevis, C. Roumpos, and F. Pavlidakis, "Evaluation of surface mining areas through geospatial analysis. The case of Ptolemais lignite mines," *MATEC Web of Conferences*, vol. 342, p. 02013, 2021, doi: 10.1051/MATECCONF/202134202013.
- [28] "Accelerated Delignification – The Status of the Energy Transition in Western Macedonia | Coal Transitions." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://coaltransitions.org/news/accelerated-delignification-the-status-of-the-energy-transition-in-western-macedonia/>
- [29] "Completed Projects | Coal Transitions." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://coaltransitions.org/projects/completed/>
- [30] Π. Μ. Σ. Δ. Π. Κ. και Κ. Δρ Σεβαστιανός Μοιρασγεντής Κύριος Ερευνητής Ινστ. Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, "Οικονομικά του Περιβάλλοντος".
- [31] "Στα 28-30 ευρώ/τόνο εξήγαγε πέρυσι η Ελλάδα λιγνίτη από την Αχλάδα στη Βόρεια Μακεδονία," *EnergyPress.gr*. Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://energypress.gr/news/sta-28-30-eyrotono-poylise-perysi-i-ellada-posotites-ligniti-sti-boreia-makedonia>
- [32] D. V. Preda, "High Yield, Economical and Environmentally Benign Production of Rare Earth Elements from Coal Ash (Phase II Final Summary Report)," Jun. 2022, doi: 10.2172/1873739.
- [33] "UK researchers are leaders in recovering materials that power our world | UKNow." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://uknow.uky.edu/research/uk-researchers-are-leaders-recovering-materials-power-our-world>
- [34] "Recycled permanent magnets provide a source for rare earth elements | REE4EU Project | Results in brief | H2020 | CORDIS | European Commission." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/article/id/415387-recycled-permanent-magnets-provide-a-source-for-rare-earth-elements>
- [35] "Reclamation of Gallium, Indium and Rare-Earth Elements from Photovoltaics, Solid-State Lighting and Electronics Waste | RECLAIM | Project | News & Multimedia | FP7 | CORDIS | European Commission." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/309620/reporting/it>
- [36] "For the first time, wind power in Greece exceeded 5 GW! - WattCrop." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://wattcrop.com/for-the-first-time-wind-power-in-greece/>
- [37] D. Beltrami, G. J. P. Deblonde, S. Bélair, and V. Weigel, "Recovery of yttrium and lanthanides from sulfate solutions with high concentration of iron and low rare earth content," *Hydrometallurgy*, vol. 157, pp. 356–362, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.HYDROMET.2015.07.015.
- [38] "Fluorescent powder composition and fluorescent lamp manufactured from same," Nov. 2012.
- [39] "Equipments - 911Metallurgist." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://911metallurgist.com/equipment/>
- [40] K. Binnemans *et al.*, "Recycling of rare earths: A critical review," *J Clean Prod*, vol. 51, pp. 1–22, Jul. 2013, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2012.12.037.
- [41] Y. Li and L. Jin, "Environmental release of mercury from broken compact fluorescent lamps," *Environ Eng Sci*, vol. 28, no. 10, pp. 687–691, Oct. 2011, doi: 10.1089/EES.2011.0027.

- [42] R. H. Krabill, I. J. L. Shippy, and J. R. L. Hallman, "Thermal desorption treatability studies on selected mercury-, PCB-, and organic-contaminated waste streams," Dec. 31, 1995, *American Chemical Society, Washington, DC (United States)*.
- [43] J. Hower, R. Nir, R. Nir Lieberman, E. Lederman, I. Pelly, and H. Cohen, "Fly Ash as a Potential Scrubber of Acidic Wastes from the Phosphate Industries in Israel," *Coal Combustion and Gasification Products*, vol. 6, pp. 7–15, 2014, doi: 10.4177/CCGP-D-14-00002.1.
- [44] "Hazardous and Bio waste removal and transportation." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.ewastedisposal.net/services/>
- [45] "Services | Ecolamp Recycling Solutions." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://ecolamp.co.uk/services/>
- [46] "Benchmark of European road freight rates in Q2 2022: European road transport prices break new records | IRU | World Road Transport Organisation." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.iru.org/news-resources/newsroom/benchmark-european-road-freight-rates-q2-2022-european-road-transport-prices-break-new-records>
- [47] "What Are CCPs? – ACAA." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://acaa-usa.org/about-coal-ash/what-are-ccps/>
- [48] "Υπηρεσίες οδικών μεταφορών | Kuehne+Nagel." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://gr.kuehne-nagel.com/el/-/services/road-transport-metafores>
- [49] "DHL Global Forwarding - Παγκόσμια εταιρεία αεροπορικών, θαλάσσιων και σιδηροδρομικών μεταφορών - Ελλάδα." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.dhl.com/gr-el/home/global-forwarding.html>
- [50] "Παγκόσμιες λύσεις logistics και διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας | DB SCHENKER." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.dbschenker.com/gr-el>
- [51] "Iron III Hydroxide at Rs 500/kilogram | Iron Polymaltose Complex Tablets in Ahmedabad | ID: 13729395773." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/iron-iii-hydroxide-13729395773.html>
- [52] "Metallurgical Testing and Lab Services - Sepro Labs." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://labs.seprosystems.com/services/>
- [53] "Powder X-Ray Diffraction (XRD) Service | MSE Supplies LLC." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.msesupplies.com/products/powder-x-ray-diffraction-analysis-xrd-phase-identification-mse-supplies?variant=38125653647>
- [54] "Pricelist X-ray fluorescence analysis - CRB GmbH." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.crb-gmbh.com/en/pricelists/pricelist-xrf-analysis>
- [55] "ICP-MS Analysis Services | IMR Test Labs." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://imrtest.com/chemical-analysis-services/icp-ms/>
- [56] "Lamps, Ballast and Lighting Components Recycling | Veolia North America." Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.veolianorthamerica.com/what-we-do/waste-capabilities/lamps-ballast-and-lighting-components-recycling>