



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΣΤΥΛΙΑΝΗ Κ. ΠΑΠΑΔΑΚΗ

ΛΙΘΙΟ : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ, ΧΡΗΣΕΙΣ, ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ
ΠΑΡΑΓΩΓΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2024



[λευκή σελίδα]



ΣΤΥΛΙΑΝΗ Κ. ΠΑΠΑΔΑΚΗ
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5836

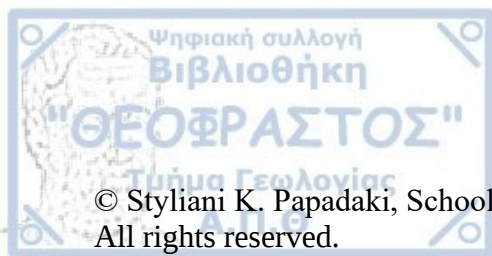
ΛΙΘΙΟ : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ, ΧΡΗΣΕΙΣ, ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων

κ. Καντηράνης Νικόλαος

© Στυλιανή Κ, Παπαδακη, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Κοιτασματολογίας, 2023
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
ΛΙΘΙΟ : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ, ΧΡΗΣΕΙΣ, ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ –
Διπλωματική Εργασία



© Styliani K. Papadaki, School of Geology, Dept. of Economic geology, 2023
All rights reserved.

LITHIUM : PROPERTIES, USES, DEPOSITS AND WORLD PRODUCTION – *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

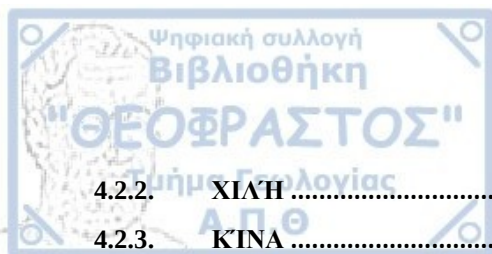
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου : Από το site Μεταλλεία Χαλκιδικής και απεικονίζεται Το Greenbushes στη Δυτική Αυστραλία, το μεγαλύτερο ορυχείο λιθίου στον κόσμο



Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	1
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΈΡΕΥΝΑΣ.....	2
1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΛΙΘΙΟΥ	5
2.1. ΑΤΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	5
2.1.1. ΑΤΟΜΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ.....	5
2.1.2. ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΛΙΘΙΟΥ ΜΕ ΆΛΛΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ 6	
2.2. ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	9
2.2.1. ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ, ΣΗΜΕΙΟ ΤΗΞΗΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΟ ΒΡΑΣΜΟΥ	9
2.2.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	10
2.2.3. ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΑΛΛΟΤΡΟΠΙΑ	13
2.3. ΙΣΟΤΟΠΑ ΚΑΙ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ	15
2.4. ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΛΙΘΙΟΥ.....	17
2.4.1. ΣΤΙΣ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΙΑΣ	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΛΙΘΙΟΥ.....	19
3.1. ΤΥΠΟΙ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ	19
3.1.1. ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΠΗΓΜΑΤΙΤΗ.....	19
3.1.2. ΆΛΑΤΑ (ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ).....	20
3.1.3. ΆΡΓΙΛΟΙ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΥΝ ΛΙΘΙΟ	21
3.2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΟΡΥΞΗΣ	23
3.2.1. ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗ ΕΞΟΡΥΞΗ ΈΝΑΝΤΙ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΑΛΜΗΣ	23
3.2.2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ.....	25
3.2.3. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΠΟΛΙΤΙΚΟΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΛΙΘΙΟΥ	29
4.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΛΙΘΙΟΥ	29
4.1.1. ΠΡΩΙΜΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	29
4.1.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΛΪΜΑΚΑ.....	30
4.2. ΚΟΡΥΦΑΙΕΣ ΧΩΡΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΛΙΘΙΟΥ	32
4.2.1. ΑΥΣΤΡΑΛΙΑ.....	32



4.2.2.	ΧΙΛΗ	33
4.2.3.	ΚΙΝΑ	33
4.2.4.	ΑΡΓΕΝΤΙΝΗ.....	34
4.3.	ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ.....	34
4.4.	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ	39
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΛΙΘΙΟΥ	42
5.1.	ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΙΟΝΤΩΝ-ΛΙΘΙΟΥ.....	42
5.2.	ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΓΥΑΛΙΟΥ ΚΑΙ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ	47
5.3.	ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ	49
5.4.	ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	52
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	53
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Το λίθιο, που συχνά αναφέρεται ως το "στοιχείο του μέλλοντος", αποτελεί απόδειξη της αξιοσημείωτης αλληλεπίδρασης μεταξύ επιστήμης, τεχνολογίας και κοινωνικής προόδου. Ανακαλύφθηκε το 1817 από τον Σουηδό χημικό Johan August Arfwedson. Το λίθιο βρήκε γρήγορα εφαρμογές σε διάφορους τομείς λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων του. Το όνομά του προέρχεται από την ελληνική λέξη "λίθος", που σημαίνει πέτρα, αντανakλώντας την παρουσία του στα ορυκτά (Boesgaard & Steigman, 1985).

Με την πάροδο των ετών, το λίθιο έχει μετατραπεί από ένα πολύ αφανές στοιχείο σε ένα κρίσιμο συστατικό των σύγχρονων τεχνολογιών. Αρχικά, η χρήση του περιοριζόταν στις φαρμακευτικές βιομηχανίες και τις βιομηχανίες υαλοκεραμικών. Ωστόσο, η πραγματική επανάσταση ήρθε με την ανάπτυξη επαναφορτιζόμενων μπαταριών ιόντων λιθίου (μπαταρίες ιόντων λιθίου) τη δεκαετία του 1970. Αυτές οι μπαταρίες έφεραν επανάσταση στον κόσμο των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών, επιτρέποντας τη διάδοση των φορητών υπολογιστών, των smartphones και άλλων φορητών συσκευών (Earnshaw & Greenwood, 1997).

Τις τελευταίες δεκαετίες, η σημασία του λιθίου έχει αυξηθεί εκθετικά λόγω του κεντρικού του ρόλου στην καταπολέμηση δύο παγκόσμιων προκλήσεων: της ανάγκης για βιώσιμη αποθήκευση ενέργειας και της μετάβασης σε καθαρές μεταφορές. Η εξάρση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας απαιτεί αποτελεσματικούς τρόπους αποθήκευσης της διακοπτόμενης ενέργειας και οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν αναδειχθεί ως η κορυφαία λύση. Επιπλέον, η επείγουσα προσπάθεια μείωσης της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έχει οδηγήσει σε ταχεία αύξηση της υιοθέτησης ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε μπαταρίες ιόντων λιθίου (Cao & Kapoor, 2012).

Οι εξελίξεις αυτές έχουν προκαλέσει σημαντική μεταβολή στην παγκόσμια ζήτηση λιθίου. Σημαντικές βιομηχανίες, από την αυτοκινητοβιομηχανία έως την αεροδιαστημική,

είναι πλέον αλληλένδετες με τη διαθεσιμότητα και το κόστος του λιθίου. Επιπλέον, οι γεωπολιτικές εκτιμήσεις που σχετίζονται με την εξασφάλιση αξιόπιστων πηγών λιθίου έχουν αποκτήσει εξέχουσα σημασία. Καθώς η εξόρυξη και η παραγωγή λιθίου συγκεντρώνονται σε συγκεκριμένες περιοχές, έχουν προκύψει ερωτήματα σχετικά με τη σταθερότητα της αλυσίδας εφοδιασμού και την ισότιμη πρόσβαση.

Το κίνητρο πίσω από την παρούσα πτυχιακή εργασία έγκειται στην ανάγκη να κατανοηθούν συνολικά οι πολύπλευρες πτυχές του λιθίου. Η βαθιά διερεύνηση των ιδιοτήτων, των εφαρμογών, της γεωγραφικής κατανομής και των τάσεων παραγωγής του είναι ζωτικής σημασίας για την ενημέρωση σχετικά με τη χάραξη πολιτικής, την τεχνολογική καινοτομία και τη βιώσιμη διαχείριση των πόρων. Εμβαθύνοντας στις περιπλοκές του λιθίου, η παρούσα έρευνα επιδιώκει να συμβάλει στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων, να ενισχύσει την ευαισθητοποίηση σχετικά με τις προκλήσεις και τις ευκαιρίες που περιβάλλουν το λίθιο και να ρίξει φως στις δυνατότητές του να διαμορφώσει το μέλλον της ενέργειας, της τεχνολογίας και της κοινωνίας.

Καθώς ο κόσμος συνεχίζει να περιηγείται στην πολυπλοκότητα ενός ταχέως μεταβαλλόμενου τεχνολογικού τοπίου, η κατανόηση της σημασίας του λιθίου γίνεται πιο κρίσιμη από ποτέ. Μέσω μιας συστηματικής διερεύνησης των χαρακτηριστικών, των εφαρμογών, των πηγών και της παγκόσμιας δυναμικής του, η παρούσα διατριβή προσπαθεί να παράσχει μια ολοκληρωμένη βάση για την κατανόηση και την πλοήγηση στον κόσμο του λιθίου τον 21ο αιώνα.

1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η διεξοδική διερεύνηση των ιδιοτήτων, των χρήσεων, των κοιτασμάτων και της δυναμικής της παγκόσμιας παραγωγής λιθίου. Κάθε κεφάλαιο εμβαθύνει σε συγκεκριμένες πτυχές του λιθίου, ξεκινώντας με μια επισκόπηση των ατομικών και χημικών ιδιοτήτων του, καθώς και των φυσικών χαρακτηριστικών του. Για την υλοποίηση αυτού του στόχου, είναι απαραίτητο να επιτευχθούν οι παρακάτω επιμέρους στόχοι:

- εις βάθος κατανόηση των εγγενών ιδιοτήτων του λιθίου και της σημασίας του σε διάφορες εφαρμογές, ιδίως στο πλαίσιο των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας.
- Διερεύνηση του ευρέως φάσματος βιομηχανιών που βασίζονται στο λίθιο και ανάλυση του ρόλου του στη διαμόρφωση των τεχνολογικών εξελίξεων και των κοινωνικών αλλαγών.
- Εξέταση της παγκόσμιας κατανομής των κοιτασμάτων λιθίου, κατηγοριοποιώντας διαφορετικούς τύπους κοιτασμάτων και αξιολογώντας την αντίστοιχη σημασία και τις προκλήσεις τους.
- Ανάλυση των πιο επίκαιρων τάσεων στην παραγωγή λιθίου σε παγκόσμια κλίμακα, λαμβάνοντας υπόψη τις κορυφαίες χώρες παραγωγής, τη δυναμική της προσφοράς-ζήτησης και τις αναδυόμενες τεχνολογίες.
- Αξιολόγηση των περιβαλλοντικών και κοινωνικών επιπτώσεων της εξόρυξης και της παραγωγής λιθίου, εξετάζοντας τις προκλήσεις που σχετίζονται με τη βιωσιμότητα, τη διατάραξη των οικοσυστημάτων και τις γεωπολιτικές επιπτώσεις.

1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ

Η παρούσα εργασία είναι δομημένη έτσι ώστε συστηματικό τρόπο να αναλύσει επαρκώς όλες τις πτυχές του ζητούμενου βήμα προς βήμα. Αναλυτικότερα, μετά το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο θα εμβαθύνει στα θεμελιώδη χαρακτηριστικά του στοιχείου αυτού εξετάζοντας τόσο τις ατομικές, όσο και τις χημικές ιδιότητες του. Έτσι θα γίνουν κατανοητές, ποικίλες εφαρμογές του στην βιομηχανία και την εφαρμογή του σε επιτεύγματα τεχνολογίας που αφορούν την αποθήκευση και την ενέργεια οι οποίες τον καθιστούν περιζήτητο. Τα χαρακτηριστικά τα οποία θα μελετηθούν μεταξύ άλλων είναι η κρυσταλλική δομή του λιθίου, η αντιδραστικότητα και η αγωγιμότητα του, καθώς και την συμβολή του στην δημιουργία μπαταριών ιόντων.

Στη συνέχεια, θα αναλυθούν και θα κατηγοριοποιηθούν τα διάφορα κοιτάσματα, όπως αυτό του πηγματίτη, των αλατούχων περιοχών (salars), των αργίλων που περιέχουν λίθιο και των άλμεων πετρελαϊκών πεδίων. Επίσης το ίδιο κεφάλαιο, θα εξεταστούν οι τεχνικές εξόρυξης που χρησιμοποιούνται.

Το επόμενο κεφάλαιο εμβαθύνει στην ιστορική εξέλιξη της παραγωγής λιθίου και εμβαθύνει στις τάσεις παραγωγής, τη δυναμική της προσφοράς και της ζήτησης, τη μεταβλητότητα των τιμών και τις τεχνολογικές καινοτομίες. Το κεφάλαιο παρέχει επίσης μια ματιά στις μελλοντικές προοπτικές για την παραγωγή λιθίου και τη δυνητική βιωσιμότητά της.

Εστιάζοντας στις εφαρμογές, το τέταρτο κεφάλαιο επισημαίνει τις κορυφαίες χώρες παραγωγής λιθίου, όπως η Αυστραλία, η Χιλή, η Κίνα και η Αργεντινή, εμβαθύνει στο ρόλο του ως κινητήριας δύναμης στις μπαταρίες ιόντων λιθίου, διευκρινίζει τη σημασία του στο γυαλί, στα κεραμικά, στην ιατρική και διερευνά τη συμβολή του στα λιπαντικά, στη μεταλλουργία και στην αεροδιαστημική τεχνολογία. Το κεφάλαιο αναδεικνύει την ευελιξία του λιθίου και τον ρόλο του στη διαμόρφωση της σύγχρονης κατασκευής και των τεχνολογικών εξελίξεων.

Εν είδη επιλόγου, συνοψίζονται τα ευρήματα των προηγούμενων κεφαλαίων, υπογραμμίζοντας τη σημαντικότητα του λιθίου στη διαμόρφωση των σύγχρονων τεχνολογιών και της κοινωνίας και τονίζει την ανάγκη για υπεύθυνη και βιώσιμη διαχείριση της εξόρυξης και χρήσης του. Το κεφάλαιο εξετάζει επίσης μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις και τομείς που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΛΙΘΙΟΥ

2.1. ΑΤΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

2.1.1. Ατομική δομή και ταξινόμηση

Κεντρικό ρόλο στις ιδιαίτερες ιδιότητες του λιθίου παίζουν τα εγγενή ατομικά χαρακτηριστικά του, τα οποία χρησιμεύουν ως θεμελιώδεις υπόστρωμα που διέπει τη συμπεριφορά και τις αλληλεπιδράσεις του τόσο στη χημεία όσο και στη φυσική. Η ατομική δομή του λιθίου, η οποία περιγράφεται από τον ατομικό αριθμό 3 και το χημικό σύμβολο Li, εκδηλώνεται ως πυρήνας με τρία πρωτόνια. Ο πυρήνας περιβάλλεται από τρία ηλεκτρόνια, τα οποία κατανέμονται σε διακριτά ενεργειακά επίπεδα ή κελύφη ηλεκτρονίων (Lyublinski, Vertkov & Evtikhin, 2009).

Μια πιο συστηματική εξέταση αποκαλύπτει ότι η πρωτεύον στιβάδα του λιθίου φιλοξενεί ένα συμπλήρωμα δύο ηλεκτρονίων, τηρώντας αυστηρά τις αρχές της αρχής αποκλεισμού του Pauli. Αυτή η θεμελιώδης αρχή υπαγορεύει τον αποκλεισμό δύο ηλεκτρονίων μέσα σε ένα άτομο από το να καταλαμβάνουν πανομοιότυπες κβαντικές καταστάσεις. Αυτή η πρώτη στιβάδα, που χαρακτηρίζεται ως τροχιακό 1s, βρίσκεται κοντά στον πυρήνα και περιλαμβάνει ηλεκτρόνια που παρουσιάζουν τις χαμηλότερες ενεργειακές καταστάσεις. Εν τω μεταξύ, η δευτερεύουσα στιβάδα, που χαρακτηρίζεται από το τροχιακό 2s, περιλαμβάνει ένα μοναχικό ηλεκτρόνιο. Αυτό το μοναχικό ηλεκτρόνιο, που χαρακτηρίζεται ως ηλεκτρόνιο σθένους, αποκτά ύψιστη σημασία λόγω της ενεργού συμμετοχής του στις χημικές αντιδράσεις (Chabot et al., 2013).

Η ατομική διαμόρφωση και η ηλεκτρονική διάταξη του λιθίου, συνοπτικά εκφρασμένες ως $1s^2 2s^1$, οδηγούν στην ταξινόμησή του ως αλκαλικό μέταλλο. Τα αλκαλικά μέταλλα, που αποτελούν την πρώτη στήλη του περιοδικού πίνακα, μοιράζονται ένα κοινό χαρακτηριστικό στην ηλεκτρονιακή διαμόρφωση που τους προσδίδει συγγενικά χαρακτηριστικά. Συλλογικά, τα αλκαλικά μέταλλα διαθέτουν ένα μοναδικό ηλεκτρόνιο σθένους στην εξωτερική τους στιβάδα, ένα χαρακτηριστικό που κατευθύνει ουσιαστικά

τις χημικές τους κλίσεις. Η εγγενής αστάθεια αυτού του ηλεκτρονίου σθένους προσδίδει στα αλκαλικά μέταλλα μια έμφυτη τάση να συμμετέχουν σε χημικούς μετασχηματισμούς, με γνώμονα την επιδίωξη αυξημένης σταθερότητας μέσω της μεταφοράς ηλεκτρονίων (Lodders, 2003).

Το λίθιο, το οποίο κατατάσσεται στην κατηγορία των αλκαλικών μετάλλων, μοιράζεται αυτή την ταξινόμηση με τα συγγενικά του μέταλλα: υδρογόνο (αν και με περιστασιακές αποκλίσεις από αυτή την ομαδοποίηση), νάτριο, κάλιο, ρουβίδιο, καίσιο και φράγκιο. Αυτή η συλλογική συγκέντρωση των στοιχείων, που συχνά αποκαλείται "blocks" στον περιοδικό πίνακα, υπογραμμίζει τις κοινές ηλεκτρονικές διαμορφώσεις τους, ένα κοινό χαρακτηριστικό που τα τοποθετεί αρμονικά σε μια συνεχόμενη στήλη (Krebs, 2006).

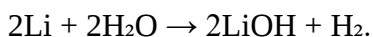
Η ταξινόμηση του λιθίου ως αλκαλικό μέταλλο υπογραμμίζει την τάση του να δημιουργεί ενώσεις με διάφορα στοιχεία, μια τάση που παρατηρείται πιο έντονα στην αλληλεπίδρασή του με το νερό, με αποκορύφωμα τη δημιουργία αερίου υδρογόνου και αλκαλικού διαλύματος. Η εμφανής ατομική διάταξη του λιθίου αποτελεί το υπόστρωμα για τις μοναδικές χημικές και φυσικές ιδιότητές του, προσδίδοντάς του έτσι κεντρικό ρόλο σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών, βιομηχανικών και τεχνολογικών τομέων (Lide, 2005).

2.1.2. Χημική συμπεριφορά και αντιδράσεις του λιθίου με άλλα στοιχεία

Το λίθιο, που κατέχει εξέχουσα θέση στην ομάδα των αλκαλικών μετάλλων του περιοδικού πίνακα, διαθέτει μια χαρακτηριστική χημική αντιδραστικότητα που έχει τις ρίζες της στην ηλεκτρονική του δομή. Χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτής της αντιδραστικότητας είναι η παρουσία ενός μοναχικού ηλεκτρονίου σθένους στην εξωτερική στιβάδα, ένα ηλεκτρόνιο το οποίο αποβάλλει εύκολα σε μια συντονισμένη προσπάθεια να αποκτήσει μια πιο σταθερή και χαμηλότερης ενέργειας διαμόρφωση. Αυτή η χαρακτηριστική τάση για δωρεά ηλεκτρονίων διαμορφώνει σε βάθος το ευρύ φάσμα ενώσεων που σφυρηλατεί το λίθιο, ασκώντας έτσι βαθιά επίδραση σε πολυάριθμες βιομηχανικές εφαρμογές και χημικές διεργασίες (Jeppson et al., 1978).

Αντίδραση με το νερό: η τάση του λιθίου για αλληλεπίδραση με το νερό αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα της χημικής αντιδραστικότητάς του. Η συνάντηση μεταξύ του

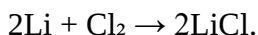
μετάλλου λιθίου και του νερού προκαλεί μια εξαιρετικά ενεργητική αντίδραση που χαρακτηρίζεται από την έντονη ανάπτυξη αερίου υδρογόνου και τον ταυτόχρονο σχηματισμό υδροξειδίου του λιθίου. Εκφράζεται προφανώς με την εξίσωση (Emsley, 2001):



Η χημική απόδοση του υδροξειδίου του λιθίου κορυφώνεται με τη δημιουργία ενός αλκαλικού μέσου. Το φαινόμενο αυτό, το οποίο αποτελεί άμεση συνέπεια της ιδιαίτερης αντιδραστικότητας του λιθίου, έχει καθοριστική σημασία για συγκεκριμένες τεχνολογίες μπαταριών, πλαίσια αποθήκευσης ενέργειας και επιλεγμένες χημικές διαδικασίες (Krebs, 2006).

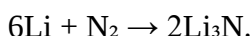
Αντίδραση με οξυγόνο: η ταχεία αντιδραστικότητα του λιθίου με το οξυγόνο, στοιχειώδες συστατικό του ατμοσφαιρικού αέρα, οδηγεί στη δημιουργία οξειδίου του λιθίου (Li_2O), ενώ η παρουσία υγρασίας καθιζάνει το σχηματισμό υδροξειδίου του λιθίου. Η θερμοδυναμική αυτής της εξώθερμης διεργασίας της προσδίδει την τάση να απελευθερώνει θερμότητα. Ο σχηματισμός ενός προσκολλημένου στρώματος οξειδίου στην επιφάνεια του λιθίου λειτουργεί ως προστατευτικό φράγμα, περιορίζοντας κάθε περαιτέρω αντίδραση με το οξυγόνο και την υγρασία. Αυτή η πτυχή της συμπεριφοράς του λιθίου έχει κεντρική σημασία για τη σταθερότητά του κατά την αποθήκευση και τον χειρισμό (Greenwood & Earnshaw, 1997, Jeppson et al., 1978).

Αντίδραση με αλογόνα: είναι ενδιαφέρον ότι η αντιδραστικότητα του λιθίου επεκτείνεται και στα αλογόνα, περιλαμβάνοντας το φθόριο, το χλώριο, το βρώμιο και το ιώδιο. Όταν εμπλέκεται με αυτά τα στοιχεία, το λίθιο υποκινεί έντονες αντιδράσεις με αποκορύφωμα τη δημιουργία αλογονιδίων λιθίου. Η αντίδραση με το χλώριο, ενδεικτικά, περικλείεται από την εξίσωση (Singh et al., 2012, Yao et al., 2016):



Τα αλογονίδια του λιθίου έχουν χρησιμότητα σε διάφορους τομείς, από το ρόλο των συστατικών ροής σε μεταλλουργικά περιβάλλοντα έως την καταλυτική τους ανάπτυξη σε μονοπάτια χημικής σύνθεσης.

Αντίδραση με άζωτο: μια συναρπαστική εκδήλωση της χημικής αντιδραστικότητας του λιθίου λαμβάνει χώρα όταν αλληλεπιδρά με το άζωτο, οπότε προκύπτει νιτρίδιο του λιθίου (Li_3N) (Rabenau & Schulz, 1976):



Η ένωση αυτή έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας ως πιθανό μέσο αποθήκευσης υδρογόνου.

Αντίδραση με οργανικές ενώσεις: η δυνατότητα συμμετοχής του λιθίου στην οργανική σύνθεση υπογραμμίζεται από την ανάπτυξή του ως αντιδραστήριο. Συγκεκριμένα, οι οργανομεταλλικές ενώσεις λιθίου, που περιλαμβάνουν αλκύλια και αλκοξείδια λιθίου, χρησιμοποιούνται για να διευκολύνουν περίπλοκους χημικούς μετασχηματισμούς, όπως η αποπρωτονίωση και ο σχηματισμός δεσμών άνθρακα-άνθρακα. Οι ενώσεις αυτές έχουν ουσιαστική σημασία για τη σύνθεση φαρμακευτικών παραγόντων, αγροχημικών και άλλων πολύπλοκων μοριακών οντοτήτων (Luisi & Capriati, 2014).

Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι η χημική αντιδραστικότητα του λιθίου, η οποία είναι άρρηκτα συνυφασμένη με την ηλεκτρονική του σύσταση και την τοποθέτησή του στον περιοδικό πίνακα, υπογραμμίζει την αναγκαιότητά του ως πολυδύναμου πρωταγωνιστή σε ποικίλες χημικές αντιδράσεις. Η κλίση του προς τη δωρεά ηλεκτρονίων διαπερνά τις αλληλεπιδράσεις του, ξεκινώντας από τη συναρπαστική σύνδεσή του με το νερό και καταλήγοντας στον κομβικό του ρόλο στις οργανικές συνθετικές προσπάθειες. Αυτή η χαρακτηριστική αντιδραστικότητα προσδιορίζει την αναγκαιότητα του λιθίου σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών τομέων και επιστημονικών πεδίων, προκαλώντας έτσι μια ένθερμη έκκληση για συνεχή έλεγχο και εξερεύνηση.

2.2.ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

2.2.1. Πυκνότητα, Σημείο τήξης και Σημείο βρασμού

Οι φυσικές ιδιότητες της πυκνότητας, του σημείου τήξης και του σημείου βρασμού καθορίζουν περίπλοκα τη συμπεριφορά και τη χρησιμότητα του λιθίου στο φάσμα των χημικών στοιχείων. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποτελούν εκδηλώσεις της λεπτής ισορροπίας μεταξύ ατομικών αλληλεπιδράσεων, μοριακών δυνάμεων και ηλεκτρονικής δομής, καθιστώντας τα έτσι καθοριστικά για την κατανόηση των πολύπλευρων εφαρμογών του λιθίου (Davison, 1968).

Αρχικά, η πυκνότητα του λιθίου, μια εκδήλωση της μάζας ανά μονάδα όγκου, αποκλίνει αξιοσημείωτα από τα τυπικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα μεταλλικά στοιχεία. Με πυκνότητα περίπου $0,53 \text{ g/cm}^3$, το λίθιο διεκδικεί τη διάκριση ενός από τα ελαφρύτερα γνωστά μέταλλα. Αυτή η εγγενής ιδιότητα προέρχεται από την επίδραση της ατομικής του μάζας και της αποτελεσματικότητας της συσκευασίας του στο κρυσταλλικό του πλέγμα (Davison, 1968). Η σημασία της χαμηλής πυκνότητας του λιθίου επεκτείνεται σε διάφορους τομείς, κυρίως στην αεροδιαστημική μηχανική. Η αεροδιαστημική βιομηχανία εκμεταλλεύεται την ελαφριά φύση του λιθίου για την ανάπτυξη εξαρτημάτων που βελτιώνουν την αποδοτικότητα των καυσίμων και την ευελιξία, χαρακτηριστικά ζωτικής σημασίας για την επιδίωξη βιώσιμων και υψηλών επιδόσεων αεροσκαφών και διαστημοπλοίων (Weller et al., 2019).

Συνακόλουθα, η αξιοσημείωτη ελαφρότητα του λιθίου το καθιστά βέλτιστη επιλογή για εφαρμογές που απαιτούν ελαχιστοποίηση της μάζας χωρίς να διακυβεύεται η μηχανική αντοχή, βρίσκοντας έτσι χρήση σε ελαφριά δομικά υλικά και προηγμένα σύνθετα υλικά. Η ιδιότητα αυτή υπόσχεται πολλά σε τομείς που κυμαίνονται από την κατασκευή ελαφρών οχημάτων έως την παραγωγή ανθεκτικών αλλά ελαφρών ιατρικών συσκευών (Lyublinski, Vertkov & Evtikhin, 2009).

Από την άλλη, το σημείο τήξης του λιθίου στους $180,5^\circ\text{C}$ ($356,9^\circ\text{F}$) και το σημείο βρασμού στους 1342°C (2448°F) αποτελούν παράδειγμα της ιδιαίτερης φύσης των αλκαλικών μετάλλων στον περιοδικό πίνακα. Αυτές οι σχετικά χαμηλές τιμές, σε αντιπαράθεση με άλλα μεταλλικά στοιχεία, οφείλονται στον εξασθενημένο μεταλλικό

δεσμό εντός της ομάδας των αλκαλικών μετάλλων. Το ηλεκτρόνιο σθένους του λιθίου, το οποίο βρίσκεται σε ένα εξώτατο ενεργειακό επίπεδο, υφίσταται σχετικά ασθενή ηλεκτροστατική έλξη προς τον θετικά φορτισμένο ατομικό πυρήνα, επιτρέποντας την εύκολη αποκόλληση υπό μέτρια θερμική διέγερση (Lodders, 2003, Möller, 2001).

Όσον αφορά τα μέτρια σημεία τήξης και βρασμού του λιθίου έχουν σημασία σε πολλές εφαρμογές, ιδίως στον τομέα των διεργασιών υψηλής θερμοκρασίας και της θερμικής διαχείρισης. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν το λίθιο κατάλληλο για ενσωμάτωση σε ειδικά κράματα που έχουν σχεδιαστεί για περιβάλλοντα υψηλών θερμοκρασιών. Επιπλέον, το σχετικά χαμηλό σημείο βρασμού διευκολύνει τις τεχνικές θερμικής εξάτμισης και εναπόθεσης που χρησιμοποιούνται στις τεχνολογίες λεπτών υμενίων, συμπεριλαμβανομένων των ημιαγωγών και των φωτοβολταϊκών (Lide, 2005, Isken et al, 2011).

Άρα, μπορεί κανείς να πει ότι η πυκνότητα, το σημείο τήξης και το σημείο βρασμού του λιθίου, που υποστηρίζονται από περίπλοκες ατομικές και μοριακές αλληλεπιδράσεις, αποτυπώνουν έναν ξεχωριστό χαρακτήρα σε αυτό το αλκαλικό μέταλλο. Η χαμηλή του πυκνότητα, συνέπεια της ατομικής του διάταξης, του προσδίδει μια εξέχουσα θέση σε ελαφρές εφαρμογές στους τομείς της αεροδιαστημικής, της ιατρικής και της μηχανικής υλικών. Ομοίως, τα συγκριτικά χαμηλά σημεία τήξης και βρασμού του καταλύουν τη χρήση του σε διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών, στρατηγικές θερμικής διαχείρισης και προηγμένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Το βάθος της κατανόησης αυτών των χαρακτηριστικών όχι μόνο υπογραμμίζει τον διαφοροποιημένο ρόλο του λιθίου σε διάφορους τεχνολογικούς και βιομηχανικούς τομείς, αλλά και ενημερώνει τις καινοτόμες προσπάθειες σχεδιασμού και μηχανικής που διαμορφώνουν το περίγραμμα της σύγχρονης επιστήμης και τεχνολογίας.

2.2.2. Ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα

Η μελέτη της ηλεκτρικής και θερμικής αγωγιμότητας του λιθίου αποκαλύπτει μια συναρπαστική σύνδεση μεταξύ της ατομικής δομής του, της ηλεκτρονικής συμπεριφοράς του και του απαραίτητου ρόλου του σε μια πληθώρα σύγχρονων τεχνολογικών εφαρμογών. Οι ιδιότητες αυτές, που έχουν τις ρίζες τους στην κβαντομηχανική

συμπεριφορά των ηλεκτρονίων στο κρυσταλλικό του πλέγμα, όχι μόνο καθορίζουν το λίθιο ως έναν κατεξοχήν αγωγό, αλλά χρησιμεύουν επίσης ως θεμέλιο για τις πολυποίκιλες εφαρμογές του σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών (Sanker & Baby, 2022).

Η εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα του λιθίου οφείλεται στη μοναδική ατομική του διαμόρφωση. Ως μέλος της ομάδας των αλκαλικών μετάλλων, το λίθιο διαθέτει ένα μόνο ηλεκτρόνιο σθένους που βρίσκεται στο απώτατο ενεργειακό του επίπεδο. Αυτό το ηλεκτρόνιο, ελάχιστα συνδεδεμένο με τον ατομικό πυρήνα, παρουσιάζει μια αξιοσημείωτη τάση για κινητικότητα μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Όταν εφαρμόζεται διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού σε ένα αγωγίμο μέσο, όπως ένα υλικό με βάση το λίθιο, αυτά τα αποεστιασμένα ηλεκτρόνια ανταποκρίνονται αμέσως στο προκύπτον ηλεκτρικό πεδίο. Το φαινόμενο αυτό κορυφώνεται με την εύκολη ροή ηλεκτρονίων, δημιουργώντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα (Zhang et al., 2022).

Η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα του λιθίου έχει μεγάλη απήχηση στον τομέα της ηλεκτρονικής. Η ξεχωριστή ιδιότητά του το καθιστά απαραίτητο συστατικό στο ευρύ φάσμα των σύγχρονων ηλεκτρονικών συσκευών. Η ενσωμάτωση του λιθίου είναι διάχυτη, βρίσκοντας έκφραση σε κρίσιμα εξαρτήματα όπως οι συλλέκτες ρεύματος και τα ηλεκτρόδια σε μπαταρίες και πυκνωτές. Σε τομείς όπου η ταχεία και αξιόπιστη μετάδοση ηλεκτρικών σημάτων είναι επιτακτική, όπως τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, οι αισθητήρες και τα δίκτυα διανομής ενέργειας, η αγωγιμότητα του λιθίου γίνεται εμφανώς εμφανής, προωθώντας τη λειτουργικότητα των σύγχρονων τεχνολογικών προτύπων (Earnshaw, A., & Greenwood, 1997, Lodders, 2003).

Η αξιοσημείωτη θερμική αγωγιμότητα του λιθίου, η οποία είναι στενά συνυφασμένη με την ηλεκτρονική δομή του και τον περίπλοκο χορό των ηλεκτρονίων εντός του κρυσταλλικού πλέγματος, αποκαλύπτει την πολύπλευρη χρησιμότητά του σε ποικίλα πλαίσια. Η μεταφορά θερμικής ενέργειας εντός ενός υλικού είναι ένα περίπλοκο φαινόμενο που περιλαμβάνει τη δονητική κίνηση των ατόμων ή των μορίων. Στα μέταλλα, όπως το λίθιο, αυτή η διάδοση ενέργειας διευκολύνεται από τη συντονισμένη αλληλεπίδραση των δονήσεων του πλέγματος και την ανεμπόδιση κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων (Steinhardt et al., 2022).

Από την άποψη αυτή, η κινητικότητα των ηλεκτρονίων στο λίθιο αναδεικνύεται σε σημαντικό παράγοντα που διέπει τη θερμική του αγωγιμότητα. Αυτά τα απελευθερωμένα ηλεκτρόνια μεταφέρουν απρόσκοπτα θερμική ενέργεια στο υλικό, δημιουργώντας έναν αποτελεσματικό μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας (Sanker & Baby, 2022). Αυτή η θερμική ικανότητα βρίσκει ιδιαίτερη απήχηση σε εφαρμογές που απαιτούν προσεκτική θερμική διαχείριση. Βιομηχανίες που χαρακτηρίζονται από αυστηρές απαιτήσεις ρύθμισης της θερμοκρασίας, όπως η αεροδιαστημική και η αυτοκινητοβιομηχανία, αξιοποιούν προς όφελός τους την εγγενή θερμική αγωγιμότητα των υλικών με βάση το λίθιο. Διευκολύνοντας την αποτελεσματική απαγωγή θερμότητας, τα υλικά αυτά εξασφαλίζουν τη διατήρηση των βέλτιστων προφίλ θερμοκρασίας, ενισχύοντας τη μακροζωία και τη λειτουργική ακεραιότητα των πολύπλοκων συστημάτων (Koo et al., 2014).

Η συμβολή της εξαιρετικής ηλεκτρικής και θερμικής αγωγιμότητας του λιθίου προσκαλεί τον κομβικό του ρόλο σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών. Ο τομέας των ηλεκτρονικών ειδών είναι ο πρώτος που επωφελείται από την αγωγιμότητα του λιθίου, καθώς ενσωματώνεται ανεμπόδιστα στην κατασκευή ημιαγωγών, τρανζίστορ και μπαταριών. Εδώ, η εγγενής ιδιότητά του ως κατ' εξοχήν αγωγός καταλύει την απρόσκοπτη μετάδοση δεδομένων και ενέργειας, αποτελώντας έτσι το θεμέλιο των σύγχρονων ψηφιακών συσκευών (Zhao et al., 2016).

Επιπλέον, ουσιαστική δράση και επίδραση των εξαιρετικών ιδιοτήτων θερμικής αγωγιμότητας του λιθίου αντηχεί σε όλες τις βιομηχανίες που χαρακτηρίζονται από περίπλοκη θερμική δυναμική. Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, τα υλικά που περιέχουν λίθιο αναδεικνύονται σε βασικούς παράγοντες στην προσπάθεια για αποτελεσματική απαγωγή της θερμότητας κατά τη διάρκεια της πτήσης. Ομοίως, ο τομέας της αυτοκινητοβιομηχανίας χρησιμοποιεί στρατηγικά τις ιδιότητες θερμικής αγωγιμότητας του λιθίου για την ενίσχυση της σταθερότητας των οχημάτων και τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων με την αποτροπή των κινδύνων της υπερθέρμανσης (Madani, Schaltz & Knudsen Kær, 2018).

Εν τέλει, η σύνθετη αλληλεπίδραση της ηλεκτρικής και θερμικής αγωγιμότητας του λιθίου προσκαλεί ένα πεδίο επιστημονικής έρευνας που συγκλίνει στη στοιχειώδη ουσία του. Βασισμένο στη διαφοροποιημένη συμπεριφορά των ηλεκτρονίων στο πλέγμα του,

αυτό το αλκαλικό μέταλλο αναδεικνύεται ως ο κατεξοχήν αγωγός, διαμορφώνοντας βαθιά το ρόλο του σε ποικίλες βιομηχανίες. Ως αγωγός ηλεκτρικών σημάτων και προάγγελος της θερμικής ισορροπίας, το λίθιο γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ των θεμελιωδών ιδιοτήτων και των πραγματικών εφαρμογών τους. Αυτή η γέφυρα, εμβληματική των σύγχρονων επιστημονικών και μηχανολογικών προσπαθειών, συμπυκνώνει τη συμβίωση μεταξύ θεμελιωδών ιδιοτήτων και μετασχηματιστικής τεχνολογίας, αφηγούμενη έτσι την ιστορία της ακλόνητης επιρροής του λιθίου σε όλο το φάσμα της ανθρώπινης εφευρετικότητας και καινοτομίας.

2.2.3. Κρυσταλλική δομή και αλλοτροπία

Η κρυσταλλική δομή και οι αλλοτροπικές ενώσεις του λιθίου αποτελούν πρωταρχικές πτυχές που επηρεάζουν βαθιά τη φυσικοχημική συμπεριφορά του, καθιστώντας τις καθοριστικές για την κατανόηση της δυνατότητας εφαρμογής του σε διάφορους επιστημονικούς και βιομηχανικούς τομείς. Αυτή η μοναδική διαμόρφωση δημιουργεί ένα φάσμα ιδιοτήτων που εκδηλώνονται ως συνέπεια της εγγενούς φύσης του πλέγματος και των ατομικών αλληλεπιδράσεων. Αυτά τα χαρακτηριστικά θέτουν στη συνέχεια τα θεμέλια για τις πιθανές μεταβάσεις και μετασχηματισμούς που σχετίζονται με τις αλλοτροπίες του λιθίου κάτω από διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες. Η περίπλοκη μελέτη των κρυσταλλικών δομών και των αλλοτροπιών στο πεδίο του λιθίου αναλαμβάνει σημαντικό ρόλο στην κατανόηση των αποχρώσεων και των περιπλοκών αυτής της στοιχειώδους οντότητας (Su et al., 2017). Το λίθιο, που τοποθετείται ως αρχέτυπο της ομάδας των αλκαλικών μετάλλων, παρουσιάζει μια ξεχωριστή προοπτική όταν εξετάζεται μέσα από το φακό της διάταξης του κρυσταλλικού του πλέγματος και των ποικίλων μορφών που λαμβάνει υπό ποικίλες εξωτερικές επιδράσεις. Η επαρκής γνώση και κατανόηση της κρυσταλλικής του δομής όχι μόνο αποκαλύπτει τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά του, αλλά και εξηγεί τις εφαρμογές του σε μια σειρά επιστημονικών και βιομηχανικών τομέων (Li et al., 2020).

Στις συνήθεις συνθήκες, η διάταξη του κρυσταλλικού πλέγματος του λιθίου ξεδιπλώνεται ως κυβική δομή με κέντρο το σώμα (bcc), αποτελώντας ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα αυτού του συγκεκριμένου αρχέτυπου στον τομέα των μετάλλων. Η κομψότητα

της διαμόρφωσης bcc έγκειται στη συστηματική και τακτική διάταξη των ατόμων, η οποία δημιουργεί ένα πλέγμα διασυνδέσεων μέσω ενός πλέγματος σημείων. Αυτή η εγγενής διάταξη δημιουργεί μια συμφωνία ιδιοτήτων που απορρέουν ως άμεση συνέπεια των αλληλεπιδράσεων που είναι εγγενείς στη δομή του πλέγματος. Έτσι, η διάταξη bcc καθίσταται θεμέλιο στον καθορισμό της συμπεριφοράς του λιθίου, επεκτείνοντας την επιρροή της στη σφαίρα των αλλοτροπών του (Qin et al., 2022, Li et al., 2019).

Η κρυσταλλική δομή bcc προσδίδει στο λίθιο ένα σύνολο σημαντικών ιδιοτήτων, με κυριότερες τη μηχανική σταθερότητα και την πυκνότητα. Αυτή η συγκεκριμένη διάταξη των ατόμων συμβάλλει σε αξιοσημείωτο βαθμό ολκιμότητας και πλαστιμότητας, χαρακτηριστικά που έχουν σημασία σε πολυάριθμες μηχανολογικές εφαρμογές. Η μηχανική συμπεριφορά του λιθίου σε διάφορα πλαίσια μπορεί να αποδοθεί στην αλληλεπίδραση της δομής του πλέγματος με εξωτερικά ερεθίσματα, διαμορφώνοντας έτσι τις ιδιότητες απόκρισης.

Επιπλέον, η ποικιλομορφία στην κρυσταλλική δομή του λιθίου γίνεται ιδιαίτερα εμφανής με την τάση του να δημιουργεί διαφορετικές αλλοτροπικές ενώσεις ως απόκριση στις μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης. Σε θερμοκρασίες κάτω των 369 K (96°C), το λίθιο υφίσταται μεταβολή φάσης, υιοθετώντας μια ορθορομβική δομή πλέγματος. Η μεταβολή αυτή όχι μόνο υπογραμμίζει την προσαρμοστικότητα της κρυσταλλογραφίας του λιθίου αλλά αποτελεί και απόδειξη της περίπλοκης ανταπόκρισής του στις ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Είναι ενδιαφέρον ότι η ποικιλία των δομικών μορφών του λιθίου επεκτείνεται πέρα από τα όρια των τυπικών πιέσεων, με εξαγωνικές στενά στοιβαγμένες (hcp) και κυβικές δομές με πρόσωπο (fcc) που προκύπτουν υπό την επίδραση των αυξημένων πιέσεων (Lin, Strobel & Cohen, 2015, Yi et al., 2020).

Η πολύπλευρη ύπαρξη τέτοιων αλλοτροπών προσδίδει στο στοιχείο του λιθίου μια εκτεταμένη ευελιξία και προσαρμοστικότητα, ιδιαίτερα στους τρόπους αξιοποίησής του για να εξυπηρετεί ξεχωριστές εφαρμογές. Η φάση hcp, που χαρακτηρίζεται από αυξημένη μηχανική αντοχή, βρίσκει ανταπόκριση σε σενάρια που απαιτούν δομική ευρωστία. Αντίθετα, η λιγότερο συμβατική φάση fcc προσφέρει μία εναλλακτική στη συναρπαστική αλληλεπίδραση μεταξύ των εξωτερικών επιδράσεων και των επακόλουθων μετασχηματισμών που μπορούν να προκληθούν (Qin et al., 2022).

Η δημιουργία και η αλληλεπίδραση των αλλοτροπικών ενώσεων του λιθίου εκτείνεται πέρα από τις απλές δομικές αναδιατάξεις, διαπερνώντας την αντιδραστικότητά του, τα ηλεκτρονικά χαρακτηριστικά και τα φαινόμενα μεταφοράς. Οι μεταβάσεις μεταξύ αυτών των αλλοτροπών μπορούν να προκαλέσουν βαθιές διαφοροποιήσεις στην ηλεκτρονική δομή των ζωνών του, αποδίδοντας έτσι αισθητές επιδράσεις στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, τις ηλεκτρονικές αλληλεπιδράσεις, ακόμη και τη θερμική αγωγιμότητα. Αυτές οι περίπλοκες δυναμικές μετασχηματισμού έχουν εκτεταμένες συνέπειες, ιδίως στο πλαίσιο της επινόησης τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας και της μηχανικής ηλεκτρονικών διατάξεων (Su et al., 2017).

Εν κατακλείδι, η εξερεύνηση της κρυσταλλικής δομής του λιθίου και των χαμαιλεοντικών αλλοτρόπων του αποκαλύπτει την πολύπλευρη θεμελιώδη ουσία του. Αυτή η περίπλοκη χορογραφία δομικών προσαρμογών και μετασχηματισμών όχι μόνο υπογραμμίζει την ηχηρή ευελιξία του λιθίου, αλλά και ενισχύει την έμφυτη δεκτικότητά του σε μια πληθώρα εξωτερικών επιδράσεων. Αυτή η λεπτή αλληλεπίδραση της πεμπτουσίας της δομικής δυναμικής και της εύελκτης συμπεριφοράς αποτελεί μαρτυρία της αναγκαιότητας του λιθίου σε ένα ευρύ φάσμα, τονίζοντας τη σημασία του σε τομείς όπως η επιστήμη των υλικών έως την σύγχρονη προηγμένη ηλεκτρονική.

2.3.ΙΣΟΤΟΠΑ ΚΑΙ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

Το λίθιο, διακρίνεται περαιτέρω από την ισοτοπική του σύνθεση, καθώς κάθε ισότοπο φέρει διακριτές πυρηνικές ιδιότητες και εφαρμογές τόσο στον επιστημονικό όσο και στον πρακτικό τομέα. Δύο σταθερά ισότοπα, το λίθιο-6 (^6Li) και το λίθιο-7 (^7Li), συγκεντρώνουν σημαντική προσοχή λόγω της επικράτησης και του ρόλου τους σε διάφορα πλαίσια. Το παροδικό και ραδιενεργό ισότοπο λίθιο-8 (^8Li), παρά την εφήμερη ύπαρξή του, αποτελεί μια συναρπαστική οδό για τη διερεύνηση πυρηνικών φαινομένων.

Ισότοπα λιθίου-6 (^6Li) και λιθίου-7 (^7Li) (Chernyshev et al., 2013, Gurov et al., 2010):

Το λίθιο-6, που αποτελεί περίπου το 7,59% του φυσικού λιθίου, παρουσιάζει εξαιρετική τάση για σύλληψη νετρονίων. Το χαρακτηριστικό αυτό το καθιστά κομβικής σημασίας σε πυρηνικές εφαρμογές, ιδίως ως απορροφητή νετρονίων σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Με την απορρόφηση νετρονίων, το λίθιο-6 παράγει τρίτιο (^3H) και ήλιο-4

(^4He) μέσω πυρηνικών αντιδράσεων, εκπληρώνοντας έτσι κρίσιμους ρόλους στη λειτουργία των αντιδραστήρων. Επιπλέον, το λίθιο-6 έχει σημασία στην έρευνα για τη σύντηξη, καθώς χρησιμεύει ως πολύτιμο υλικό για την αναπαραγωγή τριτίου σε αντιδραστήρες σύντηξης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της σύλληψης νετρονίων, ακολουθούμενης από διάσπαση βήτα, με αποκορύφωμα την παραγωγή τριτίου, βασικού καυσίμου για τις διεργασίες σύντηξης.

Αντίθετα, το λίθιο-7, που αποτελεί περίπου το 92,41% του φυσικού λιθίου, είναι αναπόσπαστο μέρος των πυρηνικών αντιδράσεων, παρά τη μέτρια διατομή σύλληψης νετρονίων. Στην έρευνα για τη σύντηξη, το λίθιο-7 αλληλεπιδρά με πυρήνες δευτερίου (^2H), καταλύοντας αντιδράσεις σύντηξης που δίνουν ήλιο και τρίτιο. Αυτό αποτελεί τη βάση της έρευνας για την ενέργεια σύντηξης, με τη συμμετοχή του λιθίου-7 στις αντιδράσεις να ενισχύει την ενεργειακή απόδοση των συσκευών σύντηξης.

Το λίθιο-8 (^8Li) και η ραδιενέργεια (Rumbaugh, et al., 1938, Stokes et al., 1982):

Το λίθιο-8, παρά την φευγαλέα ύπαρξή του με χρόνο ημιζωής περίπου 0,84 δευτερόλεπτα, αποκτά σημασία στο πεδίο των μελετών πυρηνικής διάσπασης. Η εγγενής ραδιενέργειά του προσφέρεται για τη διερεύνηση των περιπλοκών των διεργασιών της β-διάσπασης. Κατά τη διάσπαση βήτα, το λίθιο-8 μετατρέπεται σε δύο πυρήνες ηλίου-4, αποκαλύπτοντας γνώσεις σχετικά με την πυρηνική δομή και τη δυναμική της διάσπασης υπό ακραίες συνθήκες. Αν και η φευγαλέα φύση του περιορίζει τις άμεσες εφαρμογές, η μελέτη του λιθίου-8 εμπλουτίζει την κατανόηση των θεμελιωδών πυρηνικών αλληλεπιδράσεων.

Το ισοτοπικό πεδίο του λιθίου, που τονίζεται από τις ξεχωριστές ιδιότητες του λιθίου-6, του λιθίου-7 και την εφήμερη ραδιενέργεια του λιθίου-8, εισάγει μια πολύπλευρη πτυχή στη διερεύνηση αυτού του στοιχειώδους ακρογωνιαίου λίθου. Τα ισότοπα αυτά παρουσιάζουν έντονη πυρηνική συμπεριφορά, καθιστώντας το συγκεκριμένο στοιχείο θεμελιώδες για την πυρηνική φυσική και την παραγωγή ενέργειας. Η ολοκληρωμένη κατανόηση αυτών των ισοτοπικών διακρίσεων ενισχύει την πρωτοποριακή επιστημονική έρευνα (Millot & Girard, 2007).

2.4.ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΛΙΘΙΟΥ

2.4.1. Στις μπαταρίες ιόντων λιθίου και στις τεχνολογίες ενεργειακής αυτονομίας

Οι ραγδαίες εξελίξεις στις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας έχουν αποδώσει τις μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion) ως ακρογωνιαίο λίθο της εξάρτησης της σύγχρονης κοινωνίας από τα φορητά ηλεκτρονικά, τα ηλεκτρικά οχήματα και τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτές οι μπαταρίες είναι εμβληματικές του μετασχηματιστικού δυναμικού των ενώσεων λιθίου, εκδηλώνοντας τις εγγενείς ιδιότητες και τις χημικές συμπεριφορές τους στο πεδίο της μετατροπής και αποθήκευσης ενέργειας. Η παρούσα ενότητα αναλύει τον καίριο ρόλο που διαδραματίζουν τα συστατικά λιθίου στο σύνθετο πλαίσιο λειτουργίας των μπαταριών ιόντων λιθίου, διευκρινίζοντας τη συμβολή τους στους μηχανισμούς, τις επιδόσεις και τις πιθανές εξελίξεις αυτής της ζωτικής σημασίας τεχνολογίας (Bruce, Scrosati & Tarascon, 2008, Kamienski et al., 2000).

Στο επίκεντρο των μπαταριών ιόντων-λιθίου βρίσκεται το καθοδικό υλικό, ένα συστατικό που στηρίζεται βασικά στα οξείδια μεταβατικών μετάλλων λιθίου για να προκαλέσει τις κρίσιμες διαδικασίες παρεμβολής και αποεμβολής. Μεταξύ των παραδειγματικών υλικών καθόδου, ξεχωρίζουν το οξείδιο κοβαλτίου λιθίου (LiCoO_2), το φωσφορικό σίδηρο λιθίου (LiFePO_4) και το οξείδιο μαγγανίου λιθίου (LiMn_2O_4). Οι χαρακτηριστικές κρυσταλλικές δομές αυτών των υλικών διευκολύνουν τη φιλοξενία ιόντων λιθίου, προσδίδοντάς τους την ικανότητα να αποθηκεύουν και να απελευθερώνουν ηλεκτρική ενέργεια (Gregory, Schleyer & Snaith, 1991, von Schleyer, 1984). Το οξείδιο κοβαλτίου λιθίου (LiCoO_2), γνωστό για την υψηλή πυκνότητα ενέργειας και το καλά καθορισμένο κρυσταλλικό του πλαίσιο, υπογραμμίζει εύστοχα την έννοια της παρεμβολής ιόντων σε ατομικό επίπεδο. Αντίθετα, το LiFePO_4 , που διακρίνεται για την ισχυρή θερμική σταθερότητα και τα χαρακτηριστικά ασφαλείας του, ανταποκρίνεται στην επιτακτική ζήτηση για ασφαλείς λύσεις αποθήκευσης ενέργειας, ιδίως στα ηλεκτρικά οχήματα (Sapse & Schleyer, 1995).

Συμπληρωματικά προς τα υλικά καθόδου, τα υλικά ανόδου διαδραματίζουν πρωταρχικό ρόλο στη λειτουργία της μπαταρίας ιόντων λιθίου. Τα παραδοσιακά υλικά ανόδου γραφίτη ήταν απαραίτητα για τις ικανότητές τους στην παρεμβολή ιόντων λιθίου. Ωστόσο, η επιδίωξη αυξημένης χωρητικότητας αποθήκευσης ενέργειας και

παρατεταμένης διάρκειας ζωής κύκλου οδήγησε στην έρευνα για καινοτόμα υλικά ανόδου. Ειδικότερα, οι άνοδοι με βάση το πυρίτιο διαθέτουν σημαντικά αυξημένη θεωρητική χωρητικότητα σε σύγκριση με τον γραφίτη. Ωστόσο, οι ογκομετρικές μεταβολές που σχετίζονται με την εισαγωγή και την εξαγωγή λιθίου δημιουργούν μηχανικές καταπονήσεις, οδηγώντας σε υποβάθμιση του ηλεκτροδίου. Αυτές οι περιπλοκές υπογραμμίζουν την περίπλοκη αλληλεπίδραση των ενώσεων λιθίου εντός της ανόδου και της καθόδου, οριοθετώντας την απόδοση, τη σταθερότητα και τη συνολική αποτελεσματικότητα της μπαταρίας (Bae & Kim, 2021, Zhang, Wang & Cao, 2015).

Επιπλέον, το σύστημα ηλεκτρολύτη στις μπαταρίες ιόντων λιθίου ενορχηστρώνει τη δυναμική κίνηση των ιόντων-λιθίου μεταξύ της καθόδου και της ανόδου. Αυτός ο ηλεκτρολύτης περιλαμβάνει άλατα λιθίου διαλυμένα σε οργανικούς διαλύτες, διευκολύνοντας την απαιτούμενη ιοντική αγωγιμότητα για αποτελεσματική κινητικότητα ιόντων κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης. Το εξαφθοροφωσφορικό λίθιο (LiPF_6) αποτελεί το επικρατέστερο άλας του ηλεκτρολύτη, ενώ το ανθρακικό αιθυλένιο και το ανθρακικό διαιθυλένιο είναι καθιερωμένα συστατικά του διαλύτη. Η ακριβής βαθμονόμηση της σύνθεσης του ηλεκτρολύτη είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη αυξημένης απόδοσης της μπαταρίας, παρατεταμένης διάρκειας ζωής κύκλου και αυξημένης θερμικής ανθεκτικότητας (Zhong et al., 2008).

Υπό το πρίσμα αυτών των εξελίξεων, οι αναδυόμενες ενώσεις λιθίου ωθούν τον τομέα των μπαταριών προς αχαρτογράφητα πεδία αποθήκευσης ενέργειας. Οι μπαταρίες λιθίου-θείου (Li-S) και οι μπαταρίες λιθίου-αέρα (Li-air) αποτελούν πολλά υποσχόμενους δρόμους με ξεχωριστούς μηχανισμούς αποθήκευσης ενέργειας. Η χρήση του θείου στις μπαταρίες Li-S προσφέρει θεωρητική ενεργειακή πυκνότητα που ξεπερνά εκείνη των παραδοσιακών μπαταριών ιόντων-λιθίου. Ωστόσο, η περίπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ των ενώσεων λιθίου στις καθόδους θείου και των συναφών ηλεκτρολυτών τους απαιτεί σχολαστική εξέταση για την παράκαμψη ζητημάτων όπως η διάλυση πολυθειούχων και η αστάθεια των ηλεκτροδίων. Ομοίως, οι μπαταρίες λιθίου-αέρα (Li-air) αξιοποιούν την ηλεκτροχημική αναγωγή του ατμοσφαιρικού οξυγόνου, προωθώντας εξαιρετικά υψηλές ενεργειακές πυκνότητες. Ωστόσο, οι επιτακτικές προκλήσεις που περιλαμβάνουν τη συμβατότητα του ηλεκτρολύτη, τις παρασιτικές αντιδράσεις και την υποβάθμιση του

ηλεκτροδίου απαιτούν ολοκληρωμένη διερεύνηση (Mekonnen, Sundararajan, & Sarwat, 2016, Zhou et al., 2019).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΛΙΘΙΟΥ

3.1. ΤΥΠΟΙ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ

3.1.1. Κοιτάσματα πηγματίτη

Τα κοιτάσματα πηγματίτη αποτελούν σημαντική πηγή λιθίου, αξιοσημείωτα για την ορυκτολογική τους πολυπλοκότητα και την ικανότητά τους να φιλοξενούν ποικίλα λιθοφόρα ορυκτά. Αυτοί οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι συνήθως ενσωματωμένοι σε διεισδυτικά πετρώματα που μοιάζουν με γρανιτικές συνθέσεις, διαθέτοντας χονδροειδείς κρυσταλλικές δομές που συχνά περιλαμβάνουν σημαντικά μεγέθη κρυστάλλων. Μέσα στα όρια αυτών των σχηματισμών συναντώνται κυρίως ορυκτά λιθίου, όπως ο σποδομένης, ο λεπιδολίτης και ο πεταλίτης. Τα κοιτάσματα πηγματίτη, ως ένας από τους πρωταρχικούς αποθέτες λιθίου, υπογραμμίζουν τη σημασία τους στο ευρύτερο τοπίο της εκμετάλλευσης των πόρων λιθίου (Kesler et al., 2012, Xu et al., 2023).

Η ορυκτολογική ποικιλομορφία που παρουσιάζουν τα κοιτάσματα πηγματίτη συμβάλλει καθοριστικά στην παροχή μιας διαφοροποιημένης εικόνας της σημασίας τους. Ο σποδομένης, ένα ορυκτό πυρόξενου, αποτελεί το κυριότερο ορυκτό που περιέχει λίθιο σε αυτά τα κοιτάσματα. Η χαρακτηριστική μονοκλινής κρυσταλλική δομή του εγκλωβίζει το λίθιο στο ατομικό του πλαίσιο (Zhang et al., 2022). Ο λεπιδόλιθος, ένας πλούσιος σε λίθιο μαρμαρυγίας, αποτελεί ένα άλλο βασικό συστατικό, το οποίο διακρίνεται για τη λαμαρινώδη δομή του και την ενσωμάτωση του λιθίου ως βασικού δομικού συστατικού. Ο πεταλίτης, ένα πυριτικό αργίλιο λιθίου, αντιπροσωπεύει μια ακόμη εκδήλωση της προίκας λιθίου σε κοιτάσματα πηγματίτη. Η περίπλοκη αλληλεπίδραση αυτών των ορυκτών στο περιβάλλον του πηγματίτη περιγράφει την πολυπλοκότητα που ενυπάρχει σε αυτές τις λιθολογικές μονάδες (Stewart, 1978).

Στο πλαίσιο των μεθοδολογιών εξόρυξης, τα κοιτάσματα πεγματίτη απαιτούν παρέκκλιση από τις συμβατικές τεχνικές εξόρυξης. Η διαδικασία εξόρυξης περιλαμβάνει μια διαδοχή προσεκτικά ενορχηστρωμένων βημάτων, ξεκινώντας με διερευνητικές γεωτρήσεις για την αποκάλυψη της υπόγειας ορυκτολογικής σύνθεσης. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται τεχνικές ελεγχόμενης ανατίναξης για τον κατακερματισμό του μεταλλεύματος, ακολουθούμενες από μια ολοκληρωμένη διαδικασία κοπής, κατά την οποία το εξορυσσόμενο υλικό υποβάλλεται σε διαδικασίες θραύσης και άλεσης. Το συμπύκνωμα που προκύπτει, πλούσιο σε ορυκτά που περιέχουν λίθιο, υποβάλλεται στη συνέχεια σε διεργασίες εμπλουτισμού με στόχο τον εξευγενισμό της ορυκτολογικής σύνθεσης (Bradley, McCauley & Stillings, 2017).

3.1.2. Άλατα (πετρελαϊκών πεδίων)

Αλυκές (Salars)

Οι αλυκές, γνωστές επιστημονικά ως salars, αποτελούν μια ξεχωριστή και κρίσιμη κατηγορία κοιτασμάτων λιθίου που έχουν αποκτήσει σημαντική σημασία στη σύγχρονη παραγωγή λιθίου. Αυτές οι τεράστιες, επίπεδες εκτάσεις, που συχνά βρίσκονται σε άγονες ή ημίξηρες περιοχές, διαθέτουν μοναδικές γεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες που διευκολύνουν τη συσσώρευση άλμης πλούσιας σε λίθιο για εκτεταμένες χρονικές περιόδους. Η περίπλοκη αλληλεπίδραση γεωμορφολογικών, κλιματικών και υδρολογικών παραγόντων καταλήγει στο σχηματισμό αυτών των αλατούχων περιβαλλόντων, δημιουργώντας ένα περίπλοκο πλέγμα διεργασιών με κεντρικό ρόλο στη συγκέντρωση και την ενδεχόμενη εξόρυξη των πόρων λιθίου (Talens Peiró et al., 2013).

Η γεωλογική εξέλιξη των αλυκών περιλαμβάνει περίπλοκες τεκτονικές και κλιματικές δυναμικές. Συνήθως, οι εν λόγω αλατούχες εκτάσεις δημιουργούνται ως κλειστές λεκάνες αποστράγγισης, απομονωμένες από εξωτερικά υδρολογικά δίκτυα. Με την πάροδο του χρόνου, οι λεκάνες αυτές συσσωρεύουν νερό, με την περιορισμένη αποστράγγιση να κάνει την εξάτμιση να γίνεται η κυρίαρχη διαδικασία. Κατά συνέπεια, οι πλούσιες σε ορυκτά άλμες, οι οποίες διηθούνται μέσα από τα υπόγεια στρώματα, υφίστανται εξατμισοσυγκέντρωση λόγω του ξηρού κλίματος, οδηγώντας στην καταβύθιση και τη συσσώρευση αλάτων λιθίου μαζί με άλλα ορυκτά (Ide & Kunasz, 1990).

Η συγκέντρωση λιθίου στις αλυκές αποδίδεται σε μια υδρολογική διαδικασία πολλών σταδίων. Το νερό της βροχής, το οποίο μεταφέρει ίχνη λιθίου που προέρχονται από την αποσάθρωση των γύρω πετρωμάτων, διεισδύει στη λεκάνη. Καθώς ακολουθεί εξάτμιση υπό το ξηρό κλίμα, παρατηρούνται απώλειες νερού, αφήνοντας πίσω τους όλο και πιο συμπυκνωμένες άλμες. Αυτές οι άλμες χαρακτηρίζονται από αυξημένες συγκεντρώσεις λιθίου, καθώς το στοιχείο τείνει να παραμένει διαλυμένο κατά τη διαδικασία εξάτμισης. Αυτή η σταδιακή συγκέντρωση προκύπτει από την πολύπλοκη αλληλεπίδραση των αντιδράσεων κατακρήμνισης, διάλυσης και ιοντοανταλλαγής που λαμβάνουν χώρα στο εξελισσόμενο σύστημα άλμης (Meixner et al., 2022).

Η εξόρυξη λιθίου από αυτές τις αλυκές περιλαμβάνει κυρίως τεχνικές ηλιακής εξάτμισης, οι οποίες εκμεταλλεύονται τις φυσικά άγονες συνθήκες της περιοχής. Οι άλμες αντλούνται σε ρηχές λίμνες, επιτρέποντας στην ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος να οδηγήσουν την εξάτμιση. Καθώς η εξάτμιση προχωρεί, η άλμη γίνεται πιο συμπυκνωμένη, οδηγώντας στη διαδοχική καταβύθιση διαφορετικών αλάτων λιθίου, συμπεριλαμβανομένου του ανθρακικού λιθίου και του χλωριούχου λιθίου. Τα κατακρημνισμένα άλατα συλλέγονται, υποβάλλονται σε περαιτέρω επεξεργασία και σε διαδικασίες καθαρισμού για να ληφθούν ενώσεις λιθίου υψηλής καθαρότητας κατάλληλες για βιομηχανικές εφαρμογές (Cabello, 2021).

Ωστόσο, η εξέχουσα θέση των αλατούχων πλακών ως πρωταρχική πηγή λιθίου συνοδεύεται από μια σειρά προκλήσεων και ανησυχιών. Η διαδικασία εξόρυξης εξαρτάται κυρίως από τις κλιματολογικές συνθήκες, με πιθανό αποτέλεσμα να είναι διακοπτόμενες ή εποχιακές οι εργασίες. Επιπλέον, η συσσώρευση και η επεξεργασία των αλυκών μπορεί να συμβάλει στη λειψυδρία και την περιβαλλοντική υποβάθμιση σε άγονες περιοχές. Επιπλέον, η εξόρυξη λιθίου από αλυκές μπορεί επίσης να προκαλέσει κοινωνικοοικονομικές και πολιτικές ανησυχίες, ιδίως όσον αφορά τα δικαιώματα γης, τις αυτόχθονες κοινότητες και την κατανομή των πόρων (Bowell et al., 2020).

3.1.3. Αργίλοι που περιέχουν λίθιο

Η άνοδος των λιθιοφόρων αργίλων ως ξεχωριστής προέλευσης λιθίου έχει προκαλέσει αυξημένο επιστημονικό και βιομηχανικό ενδιαφέρον, με βάση τις περίπλοκες γεωχημικές

τους συνθέσεις και την προοπτική τους σημασία στην αναπτυσσόμενη αγορά λιθίου. Εντός αυτού του γεωλογικού στρώματος, οι εκτορίτες αναδεικνύονται ως ιδιαίτερα σημαντικοί λόγω της προδιάθεσής τους να ενθυλακώνουν κατιόντα λιθίου εντός της κρυσταλλικής τους μήτρας. Οι άργιλοι αυτοί, που συχνά προέρχονται από ιζηματογενή περιβάλλοντα απόθεσης, έχουν υποστεί παρατεταμένη γεωλογική εξέλιξη που χαρακτηρίζεται από ορυκτολογικούς μετασχηματισμούς και περίπλοκες γεωχημικές διεργασίες που καταλήγουν στον εμπλουτισμό τους σε λίθιο (Starkey, 1982, Zhao, Wang & Cheng, 2023).

Σε αντίθεση με τις συμβατικές πηγές λιθίου, όπως τα κοιτάσματα πηγματίτη και τις αλυκές, η εκμετάλλευση του λιθίου από αργίλικα κοιτάσματα απαιτεί μια πιο περίπλοκη και διαφοροποιημένη σύνθεση πρωτοκόλλων εξόρυξης. Η περιεκτικότητα σε λίθιο που διαπερνά αυτές τις αργίλους είναι στενά συνυφασμένη με μια ετερογενή μήτρα ορυκτών φάσεων, απαιτώντας έτσι καινοτόμες μεθοδολογίες έκπλυσης που εναρμονίζουν με λεπτότητα την επιταγή της αποτελεσματικής κινητοποίησης του λιθίου με την ταυτόχρονη επιταγή της καταστολής ανεπιθύμητων χημικών αγτιδράσεων (Zou et al., 2022).

Η διαδικασία έκπλυσης, που χρησιμεύει ως ο κεντρικός αγωγός για την εξαγωγή λιθίου από αυτές τις αργίλους, συνεπάγεται τη συνετή εφαρμογή επιλεκτικών χημικών παραγόντων για τη διευκόλυνση της απελευθέρωσης ιόντων λιθίου στο διάλυμα. Αξίζει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι η περίπλοκη ορυκτολογική σύσταση αυτών των αργίλων επιβάλλει τη βαθιά κατανόηση της συνεργιστικής αλληλεπίδρασης μεταξύ της αντιδραστικότητας των αντιδραστηρίων και της ευαισθησίας των ορυκτών. Αυτό υπογραμμίζει την έντονη σημασία των θεμελιωδών ερευνητικών προσπαθειών που αποσκοπούν στη διαλεύκανση της ορυκτολογικής συμπεριφοράς των αργίλων που περιέχουν λίθιο υπό διάφορες συνθήκες έκπλυσης (Xie et al., 2023).

Μετά την επιτυχή εξέλιξη της φάσης αυτής, τα επόμενα στάδια της πορείας της εκχύλισης περιλαμβάνουν διαδικασίες καθαρισμού και συγκέντρωσης. Το λίθιο που αποκτάται με αυτόν τον τρόπο συνοδεύεται πάντοτε από μια σειρά συνοδευτικών προσμίξεων και συν-εκχυλισθέντων ειδών, καθιστώντας έτσι αναγκαία την εφαρμογή συνετών τεχνικών διαχωρισμού που αποσκοπούν στην επίτευξη των προαπαιτούμενων ορίων καθαρότητας που είναι απαραίτητα για την εύλογη εμπορική εκμετάλλευση. Οι στρατηγικές που διέπουν τον καθαρισμό περιλαμβάνουν συμβατικά μια σειρά διαδοχικών

βημάτων που περιλαμβάνουν εκχύλιση με διαλύτη, ελεγχόμενους μηχανισμούς καθίζησης και σχολαστικά πρωτόκολλα διήθησης, τα οποία συγκλίνουν προς την απομόνωση και τη συγκέντρωση των ειδών λιθίου (Starkey, 1982).

Καθώς η παγκόσμια απαίτηση για λίθιο κλιμακώνεται συνεχώς, παράλληλα με την επιταχυνόμενη άνοδο των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των ηλεκτρονικών συσκευών, η επιταγή της εναρμόνισης της επιστημονικής οξυδέρκειας με την ηθική διαχείριση των πόρων αποκτά ύψιστη σημασία. Σε αυτό το μωσαϊκό, η ουσιαστική εξέλιξη της εξόρυξης λιθιούχου αργίλου αναδεικνύεται ως πρωτοπορία, συμπυκνώνοντας την πεμπτούσια της αλληλεπίδρασης μεταξύ της επιστημονικής καινοτομίας, της ηθικής πρακτικής και των απαιτήσεων της βιώσιμης διαχείρισης των πόρων.

3.2.ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΟΡΥΞΗΣ

3.2.1. Παραδοσιακή εξόρυξη έναντι εξόρυξης άλμης

Η εξόρυξη του λιθίου, ενός στρατηγικού και απαραίτητου στοιχείου στις σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές, υποστηρίζεται από μια σειρά μεθοδολογιών που προσαρμόζονται περίπλοκα στις γεωλογικές πολυπλοκότητες των διαφόρων τύπων κοιτασμάτων. Δύο εξέχουσες μεθοδολογίες, η παραδοσιακή εξόρυξη και η εξόρυξη με άλμη, έχουν αναδειχθεί ως κύριες οδοί για την αξιοποίηση των πόρων λιθίου. Η διχοτόμηση μεταξύ αυτών των μεθόδων, παρά τις εγγενείς διαφορές τους, απαιτεί αυστηρή εξέταση από πολύπλευρες προοπτικές που περιλαμβάνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, την αποδοτικότητα των πόρων και την τεχνολογική εξέλιξη.

Η παραδοσιακή εξορυκτική προσέγγιση, που αφορά κυρίως τα κοιτάσματα πηγματίτη, εκτυλίσσεται ως μια δομημένη ακολουθία συμβατικών εξορυκτικών εργασιών. Ξεκινώντας με ολοκληρωμένες γεωλογικές εκτιμήσεις για τον εντοπισμό της λιθιοφόρου μεταλλοφορίας, η προσέγγιση αυτή κορυφώνεται με τη δυναμική ενορχήστρωση των διαδικασιών γεώτρησης και ελεγχόμενων ανατινάξεων για την πρόσβαση σε υπόγειες λιθολογικές τοποθεσίες (Lin et al., 2021).

Οι επακόλουθες διαδικασίες μηχανικού κατακερματισμού, όπως η θραύση και η άλεση, είναι επιβεβλημένες για την απελευθέρωση των λιθιοφόρων ορυκτών από τα

ορυκτολογικά τους όρια. Ωστόσο, είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωριστεί ότι αυτές οι διεργασίες θραύσης είναι ενεργειακά απαιτητικές, απαιτώντας συχνά σημαντικές εισροές ενέργειας. Αυτή η ενεργοβόρα πτυχή της παραδοσιακής εξόρυξης επιδεινώνεται περαιτέρω από τον υδροβόρο χαρακτήρα των σταδίων διαχωρισμού και εμπλουτισμού των ορυκτών (Sterba et al., 2019).

Η αναγκαιότητα του νερού ως μέσου διαχωρισμού των σωματιδίων δημιουργεί ανησυχίες σχετικά με πιθανή λειψυδρία και μόλυνση, επιτείνοντας έτσι τις περιβαλλοντικές ανησυχίες. Επιπλέον, η γεωλογική μεταβλητότητα που είναι εγγενής στα κοιτάσματα πηγματίτη μπορεί να δημιουργήσει λειτουργικές πολυπλοκότητες, με αποτέλεσμα ανομοιόμορφες συγκεντρώσεις λιθίου, παρεμποδίζοντας έτσι την αποτελεσματική αξιοποίηση των πόρων (Lin et al., 2021).

Αντίθετα, η εξόρυξη με άλμη, μια μέθοδος που εφαρμόζεται κυρίως σε πλούσια σε λίθιο αλατούχα άλατα και άλμες πετρελαϊκών πεδίων, βασίζεται στις αρχές της ηλιακής εξάτμισης και της επακόλουθης χημικής καταβύθισης. Τα εν λόγω κοιτάσματα άλμης, που χαρακτηρίζονται από την υψηλή περιεκτικότητά τους σε λίθιο σε διαλυμένη μορφή, υποβάλλονται σε ελεγχόμενη εξάτμιση σε εκτεταμένες λίμνες εξάτμισης. Αυτή η τεχνική, που βασίζεται στην ανεξάντλητη ενέργεια του ήλιου, έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τις ενεργοβόρες διαδικασίες που είναι ενδημικές στην παραδοσιακή εξόρυξη. Ωστόσο, είναι αξιοσημείωτο ότι η εξόρυξη άλμης απαιτεί σημαντική διάθεση γης για υποδομές εξάτμισης και εξαρτάται από ευνοϊκές κλιματικές συνθήκες που ευνοούν την αποτελεσματική εξάτμιση (Song, Nghiem, Li & He, 2017, Sun et al., 2021)

Η επιλογή είτε της παραδοσιακής εξόρυξης είτε της εξόρυξης με άλμη εξαρτάται από ένα συγκεκριμένο γεωλογικών χαρακτηριστικών, γεωγραφικών εκτιμήσεων και επιταγών βιώσιμης εξόρυξης. Η παραδοσιακή εξόρυξη, ενώ παρέχει μεγαλύτερο έλεγχο της συγκέντρωσης των ορυκτών και της δυναμικής της επεξεργασίας, δημιουργεί σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις και οικολογικές διαταραχές. Οι εξαντλητικές απαιτήσεις για νερό, σε συνδυασμό με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μηχανικών διαδικασιών κατακερματισμού, τεκμηριώνουν τις ανησυχίες σχετικά με τη βιωσιμότητα. Αντίθετα, η εξόρυξη άλμης, που στηρίζεται στον ενεργειακά αποδοτικό μηχανισμό της ηλιακής εξάτμισης, προσφέρει μια πιο συνετή αξιοποίηση των φυσικών πόρων (Khalil et al., 2022).

Παρ' όλα αυτά, η τεχνική αυτή απαιτεί σχολαστική διαχείριση των υποδομών εξάτμισης και της κατανομής γης, υπογραμμίζοντας την άρρηκτη σχέση μεταξύ τεχνολογικής σκοπιμότητας και περιβαλλοντικής διαχείρισης. Η ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών εξόρυξης και οικολογικά προσεκτικών μεθοδολογιών υπογραμμίζει περαιτέρω την κρίσιμη πορεία της εξόρυξης λιθίου καθώς προσπαθεί να κινηθεί στο σταυροδρόμι της τεχνολογικής προόδου και της περιβαλλοντικής προσοχής (Liu et al., 2015).

Οι επιλογές εξόρυξης λιθίου, τα διαφορετικά χαρακτηριστικά τους, τα θετικά στοιχεία τους και οι πιθανές προκλήσεις που μπορεί να επιφέρουν είναι χαρακτηριστικά της ποικιλομορφίας της τεχνολογικής προόδου, οικολογικής ευθύνης και σκέψεων για τη συνειδητοποίηση των πόρων. Με μια βιομηχανία που χαρακτηρίζεται από δυναμική ανάπτυξη και κλιμακούμενη ζήτηση, η διαφοροποιημένη κατανόηση αυτών των μεθοδολογιών εξόρυξης καθίσταται καίριας σημασίας. Η οριοθέτηση μεταξύ της ενεργοβόρας φύσης της παραδοσιακής εξόρυξης και των απαιτούμενων απαιτήσεων της εξόρυξης άλμης που απαιτούν μεγάλη έκταση γης υπογραμμίζει την περίπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ της μεθοδολογικής βιωσιμότητας και της βιώσιμης χρήσης των πόρων. Η συμβολή των γεωλογικών χαρακτηριστικών, των τεχνολογικών καινοτομιών και της οικολογικής σύνεσης θα διαμορφώσει τελικά την πορεία της εξόρυξης λιθίου, έναν καθοριστικό παράγοντα για τη συγκεκριμενοποίηση μιας αρμονικής συνύπαρξης μεταξύ της τεχνολογικής προόδου και της διατήρησης του περιβάλλοντος.

3.2.2. Τεχνολογικές εξελίξεις στην εξόρυξη

Τα τελευταία χρόνια, το τοπίο της εξόρυξης λιθίου έχει υποστεί αξιοσημείωτο μετασχηματισμό μέσω της εισαγωγής προηγμένων τεχνολογιών, που συνεπάγονται αυξημένη αποδοτικότητα, μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και αυξημένη οικονομική βιωσιμότητα. Αυτές οι τεχνολογικές καινοτομίες ήταν ιδιαίτερα έντονες στον τομέα των τεχνικών άμεσης εξόρυξης λιθίου (DLE), οι οποίες φιλοδοξούν να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές μεθοδολογίες εξόρυξης στην επιδίωξη ενός πιο βιώσιμου και υπεύθυνου παραδείγματος παραγωγής λιθίου (Sun et al., 2021).

Η πεμπτούσια της τεχνολογικής καινοτομίας στην εξόρυξη λιθίου εντοπίζεται στο πεδίο των μεθοδολογιών DLE, οι οποίες παρακάμπτουν την παρατεταμένη χρονική διάρκεια και την ογκώδη κατανάλωση νερού που είναι εγγενείς στις συμβατικές τεχνικές εξάτμισης άλμης. Μια από τις βασικές υλοποιήσεις της DLE είναι η ανάπτυξη εκλεκτικών απορροφητικών μέσων, τα οποία επιτρέπουν τη στοχευμένη απομόνωση ιόντων λιθίου από διαλύματα άλμης. Η λειτουργία περιλαμβάνει την επιλεκτική απορρόφηση ιόντων λιθίου σε εξειδικευμένα υλικά απορρόφησης, διευκολύνοντας την επακόλουθη εκρόφηση, απελευθερώνοντας έτσι ιόντα λιθίου σε συμπτυκνωμένη μορφή. Αυτή η αποτελεσματική διαδικασία όχι μόνο μειώνει την εξάρτηση από την εκτεταμένη χρήση νερού, ένα οικολογικά πρωταρχικό ζήτημα στις άγονες περιοχές που φιλοξενούν αλατούχα άλατα, αλλά και παρακάμπτει τις μακρές διάρκειες εξάτμισης που απαιτούνται στις συμβατικές πρακτικές (Wanger, 2011).

Μεταξύ των πρωτοποριακών εξελίξεων συγκαταλέγεται η ενσωμάτωση τεχνολογιών διαχωρισμού με μεμβράνες, που ευνοούν τη διακριτική διαπερατότητα ιόντων λιθίου μέσω επιλεκτικών μεμβρανών. Η προσέγγιση αυτή έχει παρουσιάσει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα όσον αφορά την επιτάχυνση της διαδικασίας εκχύλισης και τη βελτίωση της απαιτούμενης ενέργειας. Επιπλέον, η τεχνολογία αυτή παρέχει μια οδό για αυξημένη επιλεκτικότητα, ενισχύοντας έτσι την καθαρότητα των διαλυμάτων λιθίου που εξάγονται, έναν παράγοντα καθοριστικό για την περαιτέρω επεξεργασία και την επακόλουθη χρήση (Khalil et al., 2022).

Επιπλέον, η συνέργεια μεταξύ των τεχνολογιών εξόρυξης και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γίνεται όλο και πιο εμφανής. Η ηλιακή ενέργεια, με την αυξανόμενη υπεροχή της, έχει βρει εφαρμογή στην προώθηση των λειτουργιών DLE, προωθώντας την απεξάρτηση από την εξάτμιση εξόρυξη λιθίου. Με την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για την απαιτούμενη θερμική ενεργειακή εισροή, επιτυγχάνεται εμφανής μείωση του αποτυπώματος άνθρακα, προωθώντας ταυτόχρονα την ευθυγράμμιση με τις επιταγές της αειφορίας (Barandiarán, 2019).

Είναι σημαντικό να υπογραμμιστεί ότι αυτές οι τεχνολογικές καινοτομίες, ενώ είναι μετασχηματιστικές, εντάσσονται σε ένα πλέγμα προκλήσεων που απαιτούν αυστηρό έλεγχο. Η κεφαλαιουχική φύση της τεχνολογικής ανάπτυξης, η τεχνολογική

επεκτασιμότητα και οι πιθανές οικολογικές επιπτώσεις των νέων υλικών απαιτούν προσεκτική αξιολόγηση. Είναι επιτακτική ανάγκη η διερεύνηση των τεχνολογικών εξελίξεων στην εξόρυξη λιθίου να παραμείνει συνδεδεμένη με μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των ευρύτερων θεωρήσεων βιωσιμότητας.

3.2.3. Περιβαλλοντικοί και κοινωνικοπολιτικοί προβληματισμοί

Η εξόρυξη κοιτασμάτων λιθίου, ενώ είναι επιτακτική για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων των σύγχρονων τεχνολογικών και ενεργειακών βιομηχανιών, εισάγει μια σύνθετη αλληλεπίδραση περιβαλλοντικών και κοινωνικοπολιτικών ανησυχιών. Οι ανησυχίες αυτές υπογραμμίζουν την ανάγκη μιας ολοκληρωμένης αξιολόγησης των επιπτώσεων που συνδέονται με την εξόρυξη λιθίου και των ευρύτερων συνεπειών τους τόσο για το φυσικό περιβάλλον όσο και για τις τοπικές κοινότητες.

Οι διαδικασίες εξόρυξης λιθίου συνεπάγονται μια σειρά περιβαλλοντικών συνεπειών που απαιτούν προσεκτική εξέταση. Οι εργασίες εξόρυξης, ιδίως στο πλαίσιο κοιτασμάτων σκληρών πετρωμάτων όπως οι πηγματίτες, μπορούν να προκαλέσουν καταστροφή οικοτόπων, διάβρωση του εδάφους και μεταβολές στα τοπικά υδρολογικά συστήματα. Επιπλέον, η ανάπτυξη χημικών παραγόντων στις διαδικασίες εξόρυξης μπορεί να οδηγήσει σε μόλυνση των υδάτων, διαταράσσοντας τα υδάτινα οικοσυστήματα και θέτοντας μακροπρόθεσμους οικολογικούς κινδύνους. Η σημασία αυτών των επιπτώσεων επεκτείνεται πέρα από την άμεση γειτνίαση με τις περιοχές εξόρυξης, με πιθανές επιπτώσεις στην περιφερειακή βιοποικιλότητα και την οικολογική ισορροπία (Bridge & Bolin, 2016, Dörre, 2020).

Στην περίπτωση της εξόρυξης άλμης, η μεγάλης κλίμακας μεταβολή των υδάτινων σωμάτων για λίμνες εξάτμισης μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την τοπική διαθεσιμότητα νερού και να επηρεάσει την ευαίσθητη ισορροπία των εύθραυστων άγονων οικοσυστημάτων. Ο ενεργοβόρος χαρακτήρας των διαδικασιών εξόρυξης λιθίου, ιδίως εκείνων που βασίζονται στην εξάτμιση, εγείρει επίσης ανησυχίες σχετικά με το αποτύπωμα άνθρακα που συνδέεται με αυτές τις δραστηριότητες. Ως εκ τούτου, η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής των διαφόρων τεχνικών

εξόρυξης είναι επιτακτική ανάγκη για την καθοδήγηση βιώσιμων πρακτικών (Hashim, Ho & Gan, 2019).

Πέραν των περιβαλλοντικών προβληματισμών, η εξόρυξη λιθίου συνοδεύεται από κοινωνικοπολιτικές προκλήσεις που χρήζουν δίκαιης προσοχής. Η εγκατάσταση και η λειτουργία των εξορυκτικών δραστηριοτήτων μπορεί να οδηγήσει σε απαλλοτρίωση γης, επηρεάζοντας άμεσα τις τοπικές κοινότητες, συμπεριλαμβανομένων των αυτόχθονων πληθυσμών, και τους παραδοσιακούς τρόπους ζωής τους. Οι επακόλουθες συγκρούσεις για τα δικαιώματα γης και την πρόσβαση στους πόρους μπορούν να επιδεινώσουν τις κοινωνικές εντάσεις και να υπονομεύσουν την ευημερία των ευάλωτων ομάδων (Davis & Caldeira, 2010, Förster et al., 2017).

Τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την εξόρυξη λιθίου πρέπει συχνά να αντιπαραβάλλονται με τα πιθανά μειονεκτήματα, όπως η αύξηση της ανισότητας, η άνιση κατανομή του πλούτου και η ανεπαρκής συμμετοχή της κοινότητας στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Επιπλέον, η συγκέντρωση της παγκόσμιας αλυσίδας εφοδιασμού λιθίου σε λίγες χώρες μπορεί να συμβάλει σε γεωπολιτικές εντάσεις και να επηρεάσει την οικονομική δυναμική τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο (Ali & Gujarati, 2020, Baruya, 2018, Björkman & Vehmas, 2018).

Η άμβλυνση αυτών των κοινωνικοπολιτικών προκλήσεων συνεπάγεται την προώθηση της διαφανούς δέσμευσης μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών, συμπεριλαμβανομένων των κυβερνήσεων, των εταιρειών εξόρυξης, των τοπικών κοινοτήτων και των ομάδων αυτοχθόνων. Η ενσωμάτωση των προοπτικών και των ανησυχιών των επηρεαζόμενων κοινοτήτων στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη βιώσιμης ανάπτυξης και τη διασφάλιση της δίκαιης κατανομής των οφελών από την εξόρυξη λιθίου (Lefebvre & Lefebvre, 2019).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΛΙΘΙΟΥ

4.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΛΙΘΙΟΥ

4.1.1. Πρώιμες μέθοδοι παραγωγής

Η εμφάνιση του λιθίου ως ξεχωριστού χημικού στοιχείου χρονολογείται από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα, όταν ο Άγγλος χημικός Sir Humphry Davy το απομόνωσε μέσω ηλεκτρόλυσης. Το 1807, ο Davy κατόρθωσε να λάβει στοιχειακό λίθιο με ηλεκτρόλυση τήγματος οξειδίου του λιθίου (Li_2O), αποδεικνύοντας τις δυνατότητές του για νέες χημικές εφαρμογές. Η απομόνωση του λιθίου αποτέλεσε κομβικό επίτευγμα, σηματοδοτώντας την είσοδο αυτού του αλκαλικού μετάλλου στη σφαίρα των απομονωμένων στοιχείων, μαζί με το νάτριο και το κάλιο. Αυτή η ανακάλυψη-ορόσημο άνοιξε δρόμους για τη συστηματική μελέτη των ιδιοτήτων και των εφαρμογών του λιθίου (Enghag, 2004, Emsley, 2001).

Ωστόσο, οι πιθανές εφαρμογές του λιθίου παρέμειναν σχετικά ανεξερεύνητες κατά τις δεκαετίες που ακολούθησαν την απομόνωσή του. Μόνο στο δεύτερο μισό του 19ου αιώνα το λίθιο άρχισε να συγκεντρώνει βιομηχανική προσοχή. Οι αρχικές προσπάθειες εξόρυξης επικεντρώθηκαν στα ορυκτά που περιείχαν λίθιο, ιδίως στον σποδοουμένη, ένα ορυκτό που περιέχει λίθιο και βρίσκεται σε κοιτάσματα πηγματίτη. Η πρώτη ουσιαστική παραγωγή ενώσεων λιθίου προέκυψε από τέτοια ορυκτά, αν και σε περιορισμένη κλίμακα λόγω της εκκολαπτόμενης ζήτησης και των υποτυπώδων τεχνικών εξόρυξης της εποχής (Garret, 2004).

Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, ο πρωταρχικός στόχος της παραγωγής λιθίου ήταν η παραγωγή ανθρακικού λιθίου, μιας ένωσης με εφαρμογές στην κεραμική, την υαλουργία και την ιατρική. Οι αλκαλικές του ανθρακικού λιθίου αξιοποιήθηκαν σε συνθέσεις γυαλιού για τη μείωση των σημείων τήξης και τη βελτίωση της αντοχής σε θερμικά σοκ. Επιπλέον, οι ενώσεις λιθίου βρήκαν χρήση στον τομέα της ψυχιατρικής, όπου τα άλατα λιθίου συνταγογραφούνταν ως θεραπείες για ορισμένες ψυχικές διαταραχές. Η θεραπευτική εφαρμογή των ενώσεων λιθίου στην ψυχιατρική προμήνυε τη μελλοντική σημασία του λιθίου ως κρίσιμο συστατικό στις σύγχρονες ψυχιατρικές θεραπείες (Ober, 2006).

Τα κοιτάσματα πηγματίτη, η κύρια πηγή ορυκτών λιθίου, δημιουργούσαν προκλήσεις όσον αφορά την εξόρυξη. Η εντάσεως εργασίας φύση της εξόρυξης και η αναποτελεσματικότητα των διαδικασιών διαχωρισμού των ορυκτών εμπόδιζαν την παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, η απουσία συντονισμένης ζήτησης για προϊόντα που περιέχουν λίθιο περιόρισε την ώθηση για την προώθηση των μεθόδων εξόρυξης (Kogel, 2006, Mcketta, 2007).

Συνοψίζοντας, η πρόωπη ιστορία της παραγωγής λιθίου υπογραμμίζει την αργή μετάβαση από μια επιστημονική περιέργεια σε ένα εξειδικευμένο βιομηχανικό αγαθό. Η απομόνωση του λιθίου από τον Davy σηματοδότησε μια κομβική στιγμή, αλλά η μετέπειτα χρήση των ενώσεων λιθίου παρέμεινε σχετικά περιορισμένη. Οι πρώτες μέθοδοι παραγωγής επικεντρώθηκαν στην εξόρυξη ορυκτών λιθίου από κοιτάσματα πηγματίτη, ωστόσο οι δυνατότητες του λιθίου ως μετασχηματιστικού βιομηχανικού στοιχείου παρέμειναν σε μεγάλο βαθμό ανεκμετάλλευτες. Με την έναρξη του 20ού αιώνα η πορεία του λιθίου πήρε μια αξιοσημείωτη στροφή, καθοδηγούμενη από τις αναδυόμενες τεχνολογίες και την εκρηκτική ζήτηση για νέα υλικά και λύσεις αποθήκευσης ενέργειας. Τα επόμενα κεφάλαια της παρούσας διατριβής θα εμβαθύνουν σε αυτές τις μετασχηματιστικές εξελίξεις, εξετάζοντας τη μετάβαση από τη σποραδική εξόρυξη στην οργανωμένη παραγωγή και την επακόλουθη ενσωμάτωση του λιθίου στις σύγχρονες τεχνολογίες και βιομηχανίες.

4.1.1. Παραγωγή σε βιομηχανική κλίμακα

Η μετάβαση στην παραγωγή λιθίου σε βιομηχανική κλίμακα προήλθε από την αυξανόμενη ζήτηση σε διάφορους κλάδους, ιδίως στην κεραμική, την υαλουργία, τη μεταλλουργία και τη σύνθεση λιπαντικών. Η εποχή αυτή επηρεάστηκε ιδιαίτερα από την εμφάνιση του λιθίου ως βασικού συστατικού σε συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, ιδίως σε μπαταρίες ιόντων λιθίου, οι οποίες στη συνέχεια επαναπροσδιόρισαν το τοπίο των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών, των ηλεκτρικών οχημάτων και των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Arfwedson, 2008).

Το καθοριστικό τεχνολογικό άλμα στην παραγωγή λιθίου σε βιομηχανική κλίμακα ήταν η τελειοποίηση των μεθόδων εξόρυξης τόσο από ορυκτά όσο και από άλμη. Ενώ

ορυκτά μεταλλεύματα όπως ο σποδούμενος και ο πεταλίτης παραδοσιακά υποβάλλονταν σε ενεργοβόρες διεργασίες που περιλάμβαναν θραύση, άλεση και φρύξη για την απελευθέρωση του λιθίου, η εξόρυξη από άλμη απέκτησε εξέχουσα θέση λόγω της συγκριτικής ευκολίας και της αποτελεσματικότητάς της. Η ανάπτυξη των τεχνικών εκχύλισης με διαλύτες και καταβύθισης έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην απομόνωση του λιθίου από τις άλμες, ανοίγοντας το δρόμο για αυξημένες αποδόσεις και μειωμένο κόστος παραγωγής (Clark, 2005).

Η παραγωγή λιθίου σε βιομηχανική κλίμακα επικεντρώνεται κατά κύριο λόγο στην παραγωγή ανθρακικού λιθίου και υδροξειδίου του λιθίου, που αποτελούν τις κύριες πρόδρομες ουσίες για τις καθόδους των μπαταριών ιόντων λιθίου. Η μετατροπή των εξαγόμενων ενώσεων λιθίου σε αυτές τις μορφές περιλαμβάνει χημική επεξεργασία, εκχύλιση με διαλύτη και στάδια καθαρισμού για να διασφαλιστούν τα υψηλότερα επίπεδα καθαρότητας και απόδοσης. Αυτή η πολύπλοκη διαδικασία απαιτεί ακρίβεια στον έλεγχο της θερμοκρασίας, τον χειρισμό του pH και τη διαχείριση των χημικών αντιδραστηρίων, υπογραμμίζοντας περαιτέρω την τεχνική πολυπλοκότητα που διέπει την παραγωγή σε βιομηχανική κλίμακα (Talens Peiró, Villalba Méndez & Ayres, 2013).

Η ανάπτυξη της παραγωγής λιθίου σε βιομηχανική κλίμακα έχει υπερβεί τα τομεακά όρια και έχει αναδειχθεί σε ακρογωνιαίο λίθο της παγκόσμιας οικονομίας. Χώρες με άφθονα αποθέματα λιθίου, όπως η Αυστραλία, η Χιλή, η Κίνα και η Αργεντινή, έχουν βιώσει οικονομική άνοδο λόγω της αύξησης των εξορυκτικών δραστηριοτήτων, των ευκαιριών απασχόλησης και των εξαγωγών. Επιπλέον, αυτή η στροφή οδήγησε στη δημιουργία ισχυρών αλυσίδων εφοδιασμού που εκτείνονται πέρα από την εξόρυξη πρώτων υλών και περιλαμβάνουν την κατασκευή μπαταριών, την παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων και την ανάπτυξη συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Ebensperger, Maxwell and Moscoso, 2005).

Η ραγδαία αύξηση της ζήτησης για μπαταρίες ιόντων λιθίου και η επακόλουθη ώθηση για αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα, μακροζωία και ασφάλεια έχουν ευνοήσει ένα δυναμικό τεχνολογικό οικοσύστημα. Οι ερευνητικές προσπάθειες κατευθύνονται προς τη βελτίωση των τεχνικών εξαγωγής λιθίου, τη βελτιστοποίηση των υλικών καθόδου και τη διερεύνηση εναλλακτικών πηγών λιθίου. Αξιοσημείωτες καινοτομίες περιλαμβάνουν τη

χρήση υλικών καθόδου πλούσιων σε λίθιο και τεχνολογίες μπαταριών στερεάς κατάστασης, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να επαναπροσδιορίσουν τα πρότυπα αποθήκευσης ενέργειας και να αντιμετωπίσουν ορισμένους από τους σημερινούς περιορισμούς των μπαταριών ιόντων λιθίου (Maxwell, 2014).

Ενώ η παραγωγή σε βιομηχανική κλίμακα έχει συμβάλει σημαντικά στην τεχνολογική πρόοδο, έχει επίσης εγείρει περιβαλλοντικές και κοινωνικές ανησυχίες. Ο ενεργοβόρος χαρακτήρας ορισμένων διαδικασιών εξόρυξης και το ενδεχόμενο εξάντλησης των υδάτων σε περιοχές με αποθέματα λιθίου καθιστούν αναγκαίες βιώσιμες πρακτικές. Επιπλέον, οι ηθικές διαστάσεις της εξόρυξης λιθίου σε σχέση με τα δικαιώματα γης των αυτοχθόνων και τις τοπικές κοινότητες υπογραμμίζουν την ανάγκη για υπεύθυνη διαχείριση των πόρων.

4.2.ΚΟΡΥΦΑΙΕΣ ΧΩΡΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΛΙΘΙΟΥ

Η παγκόσμια παραγωγή λιθίου, ενός κρίσιμου στοιχείου των σύγχρονων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, χαρακτηρίζεται από τη συγκεντρωτική κυριαρχία μερικών βασικών χωρών παραγωγής. Οι χώρες αυτές έχουν αναδειχθεί σε βασικούς παίκτες στην αγορά λιθίου λόγω των σημαντικών αποθεμάτων τους, των προηγμένων τεχνολογιών εξόρυξης και της στρατηγικής τους τοποθέτησης στο εξελισσόμενο τοπίο της μετάβασης στην καθαρή ενέργεια.

4.2.1. Αυστραλία

Η Αυστραλία αποτελεί εξέχοντα διεκδικητή στη σφαίρα της παραγωγής λιθίου, που χαρακτηρίζεται από τα άφθονα αποθέματα ορυκτών κοιτασμάτων λιθίου, συγκεκριμένα σχηματισμούς πηγματίτη πλούσιους σε σποδούμενα. Το ορυχείο λιθίου Greenbushes, που βρίσκεται στη Δυτική Αυστραλία, αποτελεί μια εξέχουσα παγκόσμια πηγή λιθίου. Η σημασία του έγκειται στην υψηλή περιεκτικότητα σε λίθιο μέσα στο μετάλλευμά του από σποδούμενο, που επιτρέπει αποτελεσματικές διαδικασίες εξόρυξης (King & Boxall, 2019).

Η εξόρυξη του λιθίου από αυτά τα κοιτάσματα ορυκτών περιλαμβάνει κυρίως μια ακολουθία τεχνικών κοπής, επίπλευσης αφρού και χημικής επεξεργασίας. Το συμπύκνωμα λιθίου που εξάγεται, το οποίο περιέχει σποδούμενο, υποβάλλεται σε φρύξη και όξινη επεξεργασία για την παραγωγή ανθρακικού λιθίου ή υδροξειδίου του λιθίου, βασικών

συστατικών στα υλικά καθόδου των μπαταριών. Το ισχυρό έρεισμα της Αυστραλίας στην παραγωγή λιθίου χρησιμεύει ως κρίσιμη υποστήριξη για τις φιλοδοξίες της στους τομείς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των ηλεκτρικών οχημάτων, προωθώντας την οικονομική ανάπτυξη και την τεχνολογική καινοτομία (Boxall et al, 2018).

4.2.2. Χιλή

Η Χιλή, ένα έθνος με πλούσια μεταλλευτική ιστορία, έχει συγκεντρώσει την παγκόσμια προσοχή ως κυρίαρχος παραγωγός λιθίου, βασιζόμενη στην εξόρυξη λιθίου από τεράστιες αλυκές, κυρίως από την αλυκή Ατακάμα. Γνωστή για τις χαμηλού κόστους και φιλικές προς το περιβάλλον διαδικασίες εξόρυξης λιθίου, η παραγωγή της Χιλής προέρχεται κυρίως από άλμες πλούσιες σε λίθιο. Οι μοναδικές κλιματικές και γεωλογικές συνθήκες της ερήμου Ατακάμα διευκολύνουν τη συγκέντρωση λιθίου σε επιφανειακές άλμες, οι οποίες στη συνέχεια υποβάλλονται σε τεχνικές ηλιακής εξάτμισης για τη συμπύκνωση (Cabello, 2021).

Η επάρκεια της Χιλής στην εξόρυξη λιθίου είναι συνυφασμένη με ανησυχίες σχετικά με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, ιδίως τη χρήση νερού και τις πιθανές επιπτώσεις στο εύθραυστο οικοσύστημα της ερήμου. Οι υψηλές περιεκτικότητες λιθίου που υπάρχουν στις άλμες της Ατακάμα, ωστόσο, επιτρέπουν ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην παγκόσμια αγορά λιθίου, τοποθετώντας τη Χιλή ως βασικό προμηθευτή σε βιομηχανίες που απαιτούν υψηλής ποιότητας ενώσεις λιθίου (Maxwell & Mora, 2020, Lunde Seefeldt, 2020).

4.2.3. Κίνα

Η άνοδος της Κίνας στον τομέα της παραγωγής λιθίου αποδίδεται στην πολύπλευρη προσέγγισή της, που περιλαμβάνει την εξόρυξη από μεταλλεύματα και άλμες, καθώς και την αναπτυσσόμενη εγχώρια βιομηχανία μπαταριών. Ως κορυφαίος παγκόσμιος παίκτης στην κατασκευή και ανάπτυξη ηλεκτρικών οχημάτων, η ζήτηση λιθίου στην Κίνα έχει αυξηθεί κατακόρυφα, γεγονός που καταλύει την εγχώρια παραγωγή λιθίου. Τα ορυκτά κοιτάσματα στα Jiajika και Altay παρέχουν μια θεμελιώδη πηγή για την παραγωγή λιθίου με βάση τα ορυκτά της Κίνας (Jian kang et al., 2015)

Επιπλέον, η επάρκεια της Κίνας στην κατασκευή μπαταριών ιόντων λιθίου έχει ενισχύσει τη ζήτηση λιθίου, προωθώντας την ολοκλήρωση μεταξύ της αλυσίδας εφοδιασμού μπαταριών και της παραγωγής λιθίου. Αυτή η στρατηγική ευθυγράμμιση υπογραμμίζει τις φιλοδοξίες της Κίνας για ενεργειακή ανεξαρτησία και τεχνολογική ηγεσία, ενώ παράλληλα εγείρει συζητήσεις σχετικά με τη βιώσιμη διαχείριση των πόρων και τη δυναμική της παγκόσμιας αλυσίδας εφοδιασμού (Wang et al., 2020).

4.2.4. Αργεντινή

Η Αργεντινή, προικισμένη με εκτεταμένους αλατούχους πόρους, ιδίως σε περιοχές όπως οι Salinas Grandes και Hombre Muerto, έχει αναδειχθεί σε πολλά υποσχόμενη χώρα παραγωγής λιθίου. Η μεθοδολογία εξόρυξης λιθίου της αντικατοπτρίζει εκείνη της Χιλής, βασισμένη σε τεχνικές ηλιακής εξάτμισης για τη συμπύκνωση άλμης πλούσιας σε λίθιο. Το δυναμικό λιθίου της Αργεντινής έχει συγκεντρώσει διεθνείς επενδύσεις, τροφοδοτώντας συζητήσεις σχετικά με την οικονομική ανάπτυξη, την περιβαλλοντική διαχείριση και τον ρόλο των ορυκτών πόρων στη διαμόρφωση των εθνικών προγραμμάτων (Barandiarán, 2019, Lunde Seefeldt, 2020).

Καθώς η αγορά λιθίου εξελίσσεται, η θέση της Αργεντινής υπογραμμίζει τη σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ της εκμετάλλευσης των πόρων, των περιβαλλοντικών εκτιμήσεων και της κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης, τονίζοντας την ανάγκη για βιώσιμες και υπεύθυνες πρακτικές κατά την επιδίωξη της εξόρυξης και παραγωγής λιθίου (Dorn & Peyré, 2020).

Εν κατακλείδι, οι κορυφαίες χώρες παραγωγής λιθίου Αυστραλία, Χιλή, Κίνα και Αργεντινή έχουν χαράξει ξεχωριστούς δρόμους στο παγκόσμιο τοπίο του λιθίου. Οι διαφορετικές μέθοδοι εξόρυξης, τα αποθέματα πόρων και οι κοινωνικοοικονομικές προτεραιότητές τους υπογραμμίζουν την πολύπλευρη φύση της παραγωγής λιθίου. Καθώς ο κόσμος στρέφεται προς καθαρότερα ενεργειακά πρότυπα, οι συνεισφορές αυτών των χωρών θα διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της πορείας του ρόλου του λιθίου στη βιώσιμη ανάπτυξη και τον παγκόσμιο ενεργειακό μετασχηματισμό.

4.3.ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

4.3.1. Δυναμική της προσφοράς και της ζήτησης

Η περίπλοκη σχέση προσφοράς - ζήτησης στην παγκόσμια αγορά λιθίου αποτελεί θεμελιώδη πτυχή που διαμορφώνει την οικονομική δυναμική, τις τεχνολογικές εξελίξεις και τις ενεργειακές μεταβάσεις. Η εκτίναξη της ζήτησης λιθίου τα τελευταία χρόνια συνδέεται άρρηκτα με την ταχεία διάδοση των μπαταριών ιόντων λιθίου σε διάφορους κλάδους, με σημαντικότερο παράδειγμα τα ηλεκτρικά οχήματα, τα συστήματα αποθήκευσης ανανεώσιμης ενέργειας και τις φορητές ηλεκτρονικές συσκευές (Evans, 2018). Η παρούσα ενότητα αναλύει κριτικά τις διαφοροποιημένες αλληλεπιδράσεις μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης λιθίου, διευκρινίζοντας τις υποκείμενες δυνάμεις που ωθούν αυτή τη σχέση και υπογραμμίζοντας τις πιθανές επιπτώσεις τόσο στη βιωσιμότητα όσο και στην οικονομική σταθερότητα (NMC Outlook, 2020).

Η άνοδος των μπαταριών ιόντων λιθίου ως η κατεξοχήν λύση αποθήκευσης ενέργειας έχει οδηγήσει σε μια άνευ προηγουμένου αύξηση της ζήτησης λιθίου. Η αύξηση αυτή συνδέεται στενά με την επιταχυνόμενη υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία, παρακινούμενα από την περιβαλλοντική συνείδηση και τις κυβερνητικές εντολές, έχουν αποκτήσει σημαντική έλξη ως βιώσιμη εναλλακτική λύση έναντι των συμβατικών οχημάτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης. Επιπλέον, η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει στην ανάγκη για αποτελεσματική αποθήκευση της ενέργειας, αυξάνοντας έτσι περαιτέρω τη σημασία του λιθίου. Κατά συνέπεια, αυτή η πολύπλευρη επέκταση της ζήτησης όχι μόνο έχει προσελκύσει την προσοχή των καθιερωμένων βιομηχανιών, αλλά έχει επίσης διευκολύνει την εμφάνιση νέων αγορών που βασίζονται στις ευέλικτες εφαρμογές του λιθίου (Crouch, 2020, IEA, 2020, Sprecher & Olalde, 2018).

Η εμφάνιση της ηλεκτρικής κινητικότητας, που προωθείται από τις παγκόσμιες επιταγές για τον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, έχει καταλύσει βαθιά τη ζήτηση για λίθιο. Καθώς τα έθνη προσπαθούν να πρωτοστατήσουν στον εξηλεκτρισμό των τομέων μεταφορών τους, η αναπτυξιακή πορεία της αγοράς ηλεκτρονικών οχημάτων ήταν έντονη (Vikström, Davidsson & Höök, 2013). Οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές αυτοκινήτων παγκοσμίως έχουν παρουσιάσει φιλόδοξα σχέδια για τη μετάβαση των στόλων οχημάτων τους σε

ηλεκτρική κίνηση, με αποτέλεσμα την άμεση μετάφραση της αυξημένης κατανάλωσης λιθίου. Ωστόσο, είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωριστεί ότι η ανάπτυξη αυτή δεν κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλες τις γεωγραφικές περιοχές, καθώς διαμορφώνεται από αποκλίνοντες παράγοντες όπως τα πλαίσια πολιτικής, η ανάπτυξη υποδομών και οι προτιμήσεις των καταναλωτών (IEA, 2020).

Η απρόσκοπτη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδίως της ηλιακής και της αιολικής, στα υφιστάμενα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί αποτελεσματικές λύσεις αποθήκευσης ενέργειας για την αντιμετώπιση των εγγενών προκλήσεων διαλείψεων που θέτουν οι πηγές αυτές. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν αναδειχθεί ως η βασική τεχνολογία ικανή να μετριάσει αυτές τις προκλήσεις, επιτρέποντας την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας κατά τη διάρκεια περιόδων πλεονάζουσας παραγωγής και στη συνέχεια την εκφόρτιση όταν η ζήτηση αυξάνεται. Κατά συνέπεια, καθώς η παγκόσμια κοινότητα ξεκινά μια φιλόδοξη μετάβαση προς βιώσιμα ενεργειακά συστήματα, ο ρόλος του λιθίου στη διευκόλυνση της αξιόπιστης αποθήκευσης ενέργειας καθίσταται όχι μόνο κομβικός αλλά και μετασχηματιστικός (Huang et al., 2022, Vikström, Davidsson & Höök, 2013).

Καθώς η ζήτηση κλιμακώνεται, το ενδεχόμενο περιορισμών στον εφοδιασμό γίνεται όλο και πιο εμφανές. Η γεωγραφική κατανομή των πόρων λιθίου παρουσιάζει σημαντικές ανισότητες, με περιορισμένες χώρες να φιλοξενούν το μεγαλύτερο μέρος των παγκόσμιων αποθεμάτων. Αυτή η συγκέντρωση δημιουργεί γεωπολιτικές περιπλοκές και τρωτά σημεία στις αλυσίδες εφοδιασμού, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για διαφοροποίηση και εφαρμογή στρατηγικών βιώσιμης διαχείρισης των πόρων. Επιπλέον, ο αυξημένος ανταγωνισμός για αυτούς τους πεπερασμένους πόρους μπορεί να προκαλέσει γεωπολιτικές εντάσεις, καθιστώντας αναγκαία μια συνεργατική και διεθνώς συντονισμένη προσέγγιση για τη χρήση και την κατανομή των πόρων (Evans, 1978, Gruber et al., 2011).

Ενώ το λίθιο διαδραματίζει αναμφισβήτητο ρόλο στην προώθηση καθαρότερων ενεργειακών λύσεων, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι η εξόρυξη και η επεξεργασία των μεταλλευμάτων και των ενώσεων λιθίου δεν στερούνται περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η εξόρυξη λιθίου από άλμη και κοιτάσματα ορυκτών συχνά συνεπάγεται σημαντική κατανάλωση νερού, συχνά σε περιοχές που ήδη αντιμετωπίζουν προβλήματα

λειψυδρίας. Επιπλέον, οι εργασίες εξόρυξης και η χημική επεξεργασία μπορούν δυνητικά να οδηγήσουν σε υποβάθμιση της γης και ρύπανση των υδάτων, καθιστώντας αναγκαία μια ισορροπημένη προσέγγιση για τη διασφάλιση της συνολικής βιωσιμότητας των διαδικασιών παραγωγής λιθίου (Crouch, 2020).

Η πολυσύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ προσφοράς και ζήτησης λιθίου ενορχηστρώνει μια αρμονική σύγκλιση τεχνολογικής καινοτομίας, οικονομικών ανακατατάξεων και περιβαλλοντικών ανησυχιών. Η κλιμακούμενη ζήτηση λιθίου, η οποία ωθείται από την άνοδο των ηλεκτρικών οχημάτων και την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, παρουσιάζει ένα πολύπλευρο τοπίο ευκαιριών και προκλήσεων. Για να εξασφαλιστεί μια σταθερή και βιώσιμη αλυσίδα εφοδιασμού λιθίου, είναι επιτακτική ανάγκη να υιοθετηθεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που να περιλαμβάνει υπεύθυνες μεθοδολογίες εξόρυξης, συνεχείς τεχνολογικές βελτιώσεις και διεθνή συνεργασία. Εν τέλει, η συνεχιζόμενη εξέλιξη της αγοράς λιθίου υπογραμμίζει τον αναντικατάστατο ρόλο της στην παγκόσμια επιδίωξη καθαρότερων ενεργειακών συστημάτων και μονοπατιών βιώσιμης ανάπτυξης.

4.3.2. Μεταβλητότητα των τιμών

Το φαινόμενο της μεταβλητότητας των τιμών στην αγορά λιθίου αποτελεί μια εξέχουσα πρόκληση που απορρέει από την περίπλοκη αλληλεπίδραση πολύπλευρων παραγόντων, που περιλαμβάνουν τη δυναμική της προσφοράς και της ζήτησης, τις γεωπολιτικές επιρροές, τις τεχνολογικές καινοτομίες και τις μακροοικονομικές διακυμάνσεις. Η παρούσα ενότητα εξετάζει τις υποκείμενες περιπλοκές της αστάθειας των τιμών του λιθίου σε ένα ολοκληρωμένο αναλυτικό πλαίσιο, διευκρινίζοντας τις επιπτώσεις της στους ενδιαφερόμενους φορείς σε διάφορους τομείς (Cairns & Slivinski, 2015).

Το λίθιο, ως στοιχειώδες συστατικό για τον πολλαπλασιασμό των προηγμένων τεχνολογιών μπαταριών, παρουσιάζει διακυμάνσεις στην αγοραία αξία/ αγοραστική του που ανταποκρίνονται έντονα στις μεταβολές της ζήτησης. Η ευρεία υιοθέτηση των μπαταριών ιόντων λιθίου σε εφαρμογές που κυμαίνονται από φορητές ηλεκτρονικές συσκευές έως ηλεκτρικά οχήματα έχει προκαλέσει πρωτοφανή ζήτηση για αυτό το βασικό αγαθό. Τέτοιες αυξήσεις της ζήτησης μπορούν να οδηγήσουν σε περιόδους αυξημένων

τιμών, καθώς η προσφορά αγωνίζεται να συγχρονιστεί με τις ταχέως κλιμακούμενες απαιτήσεις. Αντίθετα, στιγμές υπερπροσφοράς, λόγω επέκτασης της παραγωγικής ικανότητας ή γεωπολιτικών διαταραχών, μπορούν να συμπίεσουν τις τιμές σε επίπεδα που αμφισβητούν την οικονομική βιωσιμότητα των παραγωγών (Merlevede, & Valckx, 2020, Seba & Arbib, 2017).

Οι γεωπολιτικοί παράγοντες συμβάλλουν σημαντικά στις διακυμάνσεις των τιμών του λιθίου. Η γεωγραφική συγκέντρωση της παραγωγής λιθίου σε έναν περιορισμένο αριθμό χωρών, συγκεκριμένα στην Αυστραλία, τη Χιλή, την Κίνα και την Αργεντινή, καθιστά την αγορά ευάλωτη σε διαταραχές της προσφοράς που προκύπτουν από κανονιστικές αλλαγές, περιορισμούς στις εξαγωγές ή πολιτική αστάθεια στις περιοχές αυτές. Η αυξημένη ζήτηση για λίθιο από πηγές όπως οι κατασκευαστές ηλεκτρικών οχημάτων, σε συνδυασμό με πιθανές διαταραχές στον εφοδιασμό από γεωπολιτικά γεγονότα, μπορεί να ενισχύσει τις αιχμές των τιμών (BloombergNEF, 2021).

Οι τεχνολογικές καινοτομίες ασκούν σύνθετη επίδραση στη δυναμική των τιμών. Ενώ οι εξελίξεις στις μεθοδολογίες εξόρυξης και στις τεχνολογίες μπαταριών μπορούν ενδεχομένως να μειώσουν το κόστος, μπορούν επίσης να υποκινήσουν διακυμάνσεις των τιμών επιφέροντας αλλαγές στα πρότυπα ζήτησης. Η ανάπτυξη αποτελεσματικότερων τεχνικών εξόρυξης λιθίου θα μπορούσε να αυξήσει την προσφορά και να λειτουργήσει ως μετριοπαθής δύναμη στις τιμές. Αντίθετα, οι ανακαλύψεις στο σχεδιασμό μπαταριών που βελτιστοποιούν τη χρήση του λιθίου μπορεί να ωθήσουν σε μεγαλύτερη κατανάλωση, ενισχύοντας έτσι τις διακυμάνσεις των τιμών που προκαλούνται από τη ζήτηση (Castillo, Cruz & Vilches, 2019).

Οι μακροοικονομικοί παράγοντες και το κλίμα των επενδυτών συμβάλλουν περαιτέρω στον ασταθή χαρακτήρα των τιμών του λιθίου. Οι παγκόσμιες οικονομικές συνθήκες, οι συναλλαγματικές διακυμάνσεις και οι αλλαγές στην αντίληψη των επενδυτών για τις δυνατότητες της αγοράς λιθίου μπορούν να επηρεάσουν την πορεία των τιμών. Η αυξανόμενη προβολή του λιθίου ως στρατηγικού πόρου στο πλαίσιο των πρωτοβουλιών για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την απαλλαγή από τον άνθρακα μπορεί επίσης να εισάγει κερδοσκοπικές επιρροές στην αγορά, οδηγώντας σε υπερβολικές αυξήσεις των τιμών (Będowska-Sójka & Górka, 2022).

Οι επιπτώσεις της αστάθειας των τιμών του λιθίου αντανακλούν σε όλους τους κλάδους και τα ενδιαφερόμενα μέρη. Οι τελικοί χρήστες, συμπεριλαμβανομένων των κατασκευαστών ηλεκτρικών οχημάτων και των ολοκληρωτών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, αντιμετωπίζουν προκλήσεις κατά την εκπόνηση μακροπρόθεσμων στρατηγικών προμηθειών λόγω της απρόβλεπτης φύσης του κόστους των υλικών. Οι παραγωγοί και οι επενδυτές αντιμετωπίζουν αβεβαιότητες γύρω από τα οικονομικά στοιχεία των έργων, επηρεάζοντας τις επενδυτικές αποφάσεις σε επιχειρήσεις εξερεύνησης, εξόρυξης και επεξεργασίας. Επιπλέον, η ευρύτερη μετάβαση προς καθαρότερες ενεργειακές λύσεις εξαρτάται από τη σταθερότητα των τιμών, ώστε να δοθεί κίνητρο για τη συνεχή υιοθέτηση και ανάπτυξη τεχνολογιών ιόντων λιθίου (Igogo et al., 2019).

Συμπερασματικά, η πολυπαραγοντική αλληλεπίδραση της δυναμικής της προσφοράς και της ζήτησης, των γεωπολιτικών γεγονότων, των τεχνολογικών εξελίξεων και των μακροοικονομικών παραγόντων συμβάλλουν συλλογικά στην έντονη μεταβλητότητα των τιμών που παρατηρείται στην αγορά λιθίου. Καθώς η παγκόσμια οικονομία μεταβαίνει προς βιώσιμα ενεργειακά πρότυπα, η διαχείριση της αστάθειας των τιμών του λιθίου αποκτά αυξημένη σημασία. Οι στρατηγικές μετριασμού που δίνουν έμφαση στη διαφοροποίηση της προμήθειας, τη ρυθμιστική σταθερότητα, την τεχνολογική καινοτομία και τη διεθνή συνεργασία είναι επιτακτικές για τη δημιουργία μιας αγοράς λιθίου που θα παραμείνει ευνοϊκή για τη βιώσιμη υλοποίηση ενός πιο πράσινου μέλλοντος.

4.4.ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ

Η πορεία της παραγωγής λιθίου συνδέεται αναπόφευκτα με την παγκόσμια προσπάθεια για βιώσιμη ενέργεια και τεχνολογική πρόοδο. Καθώς ο κόσμος παλεύει με την επείγουσα ανάγκη μετριασμού της κλιματικής αλλαγής και μετάβασης σε οικονομίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα, ο ρόλος του λιθίου, ιδίως στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και στην ηλεκτρική κινητικότητα, καθίσταται όλο και πιο ζωτικός. Ωστόσο, αυτός ο καίριος ρόλος θέτει επίσης προκλήσεις που καθιστούν αναγκαία τη σχολαστική εξέταση των μελλοντικών προοπτικών και της βιωσιμότητας στη βιομηχανία λιθίου (Babbitt, 2020, Christmann, 2015).

Οι προβλέψεις δείχνουν σημαντική αύξηση της ζήτησης λιθίου, η οποία οφείλεται κυρίως στην εκθετική αύξηση των ηλεκτρικών οχημάτων και των εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ενώ αυτό παρουσιάζει προσοδοφόρες ευκαιρίες για τους παραγωγούς λιθίου, ταυτόχρονα επιτείνει τις ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια του εφοδιασμού. Η γεωγραφική συγκέντρωση της παραγωγής λιθίου σε περιορισμένες χώρες αυξάνει τα πιθανά τρωτά σημεία σε γεωπολιτικές διαταραχές. Για τον μετριασμό αυτών των κινδύνων, η διαφοροποίηση των πηγών εφοδιασμού και η εξερεύνηση ανεκμετάλλευτων κοιτασμάτων λιθίου αναδεικνύονται σε στρατηγικές που χρήζουν αυστηρής εξέτασης (Alessia et al., 2021, Yang et al., 2021).

Η παραγωγή λιθίου δεν στερείται περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ιδίως σε περιοχές που εξαρτώνται από τις υδροβόρες μεθόδους εξόρυξης άλμης. Η εξόρυξη λιθίου από , όπως η έρημος Ατακάμα, εγείρει οικολογικές ανησυχίες σχετικά με τη χρήση νερού, την υποβάθμιση της γης και την πιθανή διατάραξη των εύθραυστων οικοσυστημάτων. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη περιβαλλοντικά υπεύθυνων πρακτικών εξόρυξης και αυστηρών κανονισμών είναι επιτακτική ανάγκη. Η αξιοποίηση προηγμένων συστημάτων ανακύκλωσης νερού, καθώς και η ολοκληρωμένη αξιολόγηση των οικολογικών επιπτώσεων, θα πρέπει να αποτελούν αναπόσπαστα στοιχεία της βιώσιμης παραγωγής λιθίου (Petavratzi, 2022, Roy et al., 2022).

Η επιδίωξη της βιωσιμότητας στη βιομηχανία λιθίου είναι άρρηκτα συνυφασμένη με την τεχνολογική καινοτομία. Η έρευνα για αποδοτικότερες και φιλικότερες προς το περιβάλλον μεθόδους εξόρυξης βρίσκεται σε εξέλιξη, με στόχο τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος της παραγωγής λιθίου. Επιπλέον, η ανακύκλωση των μπαταριών ιόντων λιθίου συγκεντρώνει αυξημένη προσοχή ως μέσο ανάκτησης πολύτιμων υλικών και μείωσης των αποβλήτων. Οι εξελίξεις στον σχεδιασμό των μπαταριών που διευκολύνουν την αποσυναρμολόγηση και την ανακύκλωση είναι ζωτικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης από τα απόβλητα που περιέχουν λίθιο (Babbitt, 2020, Yang et al., 2021).

Η βιωσιμότητα στον τομέα του λιθίου απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση που περιλαμβάνει όχι μόνο περιβαλλοντικές αλλά και κοινωνικές και ηθικές πτυχές. Οι τοπικές κοινότητες, ιδίως εκείνες που κατοικούν κοντά σε χώρους εξόρυξης λιθίου, θα πρέπει να

είναι βασικοί ενδιαφερόμενοι στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Η διασφάλιση δίκαιων εργασιακών πρακτικών, δίκαιων μηχανισμών καταμερισμού των οφελών και η διασφάλιση των δικαιωμάτων των αυτόχθονων κοινοτήτων αποτελούν βασικές πτυχές της βιώσιμης παραγωγής λιθίου. Επιπλέον, η αντιμετώπιση πιθανών ζητημάτων ανθρωπίνων δικαιωμάτων στην αλυσίδα εφοδιασμού, όπως η παιδική εργασία και οι μη ασφαλείς συνθήκες εργασίας, είναι απαραίτητη για την τήρηση των ηθικών προτύπων (Ambrose & Kendall, 2020, Prior et al., 2013).

Η έννοια της κυκλικής οικονομίας, κατά την οποία τα προϊόντα σχεδιάζονται, χρησιμοποιούνται και ανακυκλώνονται σε έναν κλειστό κύκλο, προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη οδό για την επίτευξη βιωσιμότητας στη βιομηχανία λιθίου. Ο σχεδιασμός μπαταριών με γνώμονα την ανακυκλωσιμότητα, σε συνδυασμό με την αποτελεσματική υποδομή συλλογής και ανακύκλωσης, έχει τη δυνατότητα να μειώσει την εξάρτηση από τις πρωτογενείς πρώτες ύλες και να μετριάσει τις ανησυχίες για τη σπανιότητα των πόρων (Babbitt, 2020).

Η βιώσιμη παραγωγή λιθίου απαιτεί τις συντονισμένες προσπάθειες των κυβερνήσεων, των βιομηχανιών και των διεθνών οργανισμών. Η εφαρμογή ισχυρών πλαισίων πολιτικής που παρέχουν κίνητρα για βιώσιμες πρακτικές, παρέχουν σαφείς κατευθυντήριες γραμμές για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και προωθούν την υπεύθυνη προμήθεια λιθίου, είναι ζωτικής σημασίας. Επιπλέον, η διεθνής συνεργασία για την ανταλλαγή βέλτιστων πρακτικών, την ανάπτυξη κοινών προτύπων και την αντιμετώπιση διασυνοριακών περιβαλλοντικών προκλήσεων μπορεί να διευκολύνει την ανάδυση μιας πιο βιώσιμης παγκόσμιας αγοράς λιθίου (Liu & Agusdinata, 2020, Prior et al., 2013).

Συμπερασματικά, οι μελλοντικές προοπτικές και η βιωσιμότητα της βιομηχανίας λιθίου είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τους ευρύτερους στόχους της περιβαλλοντικής διαχείρισης, της τεχνολογικής καινοτομίας και της ηθικής ευθύνης. Η επίτευξη μιας αρμονικής ισορροπίας μεταξύ της κάλυψης της κλιμακούμενης ζήτησης λιθίου και του μετριασμού των συναφών οικολογικών και κοινωνικών επιπτώσεων απαιτεί μια πολυδιάστατη προσέγγιση. Αγκαλιάζοντας τις τεχνολογικές εξελίξεις, προωθώντας τη διεθνή συνεργασία και θεσπίζοντας ολοκληρωμένα ρυθμιστικά πλαίσια, η βιομηχανία λιθίου μπορεί να ανοίξει το δρόμο για ένα βιώσιμο ενεργειακό τοπίο που θα προστατεύει

το περιβάλλον, θα σέβεται τα ανθρώπινα δικαιώματα και θα ωθεί την ανθρωπότητα προς ένα πιο βιώσιμο μέλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΛΙΘΙΟΥ

5.1.ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΙΟΝΤΩΝ-ΛΙΘΙΟΥ

5.1.1. Ηλεκτρικά οχήματα

Η χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου σε οχήματα ηλεκτροκίνησης αξιοποιεί τις χαρακτηριστικές ηλεκτροχημικές ιδιότητες του λιθίου. Η ενεργειακή πυκνότητα και το ηλεκτροχημικό δυναμικό του λιθίου συμβάλλουν στην ανάπτυξη μπαταριών που παρουσιάζουν αξιοσημείωτες δυνατότητες όσον αφορά την αποθήκευση και την εκφόρτιση ενέργειας. Αυτή η εγγενής ικανότητα επιτρέπει στα ηλεκτρικά οχήματα να επιτυγχάνουν εκτεταμένες αποστάσεις οδήγησης, μειώνοντας τους παραδοσιακούς περιορισμούς της ηλεκτροκίνησης και ενισχύοντας την εμπιστοσύνη των καταναλωτών στην τεχνολογία (Chen et al., 2012, Gruber et al., 2011).

Η συνέργεια μεταξύ λιθίου και ηλεκτρικής κίνησης είναι πιο εμφανής στις έντονες βελτιώσεις που παρατηρούνται στην επιτάχυνση και την παροχή ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου παρέχουν υψηλή αναλογία ισχύος προς βάρος, με αποτέλεσμα την ταχεία και αποτελεσματική μετατροπή της ενέργειας. Αυτό, με τη σειρά του, μεταφράζεται σε ζωηρή επιτάχυνση και ευέλικτη απόδοση, επαναπροσδιορίζοντας την οδηγική εμπειρία για τους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων (Kennedy, Patterson & Camilleri, 2000). Τέτοιες εξελίξεις έχουν επίσης τη δυνατότητα να αναδιαμορφώσουν τις αντιλήψεις για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα από το να αποτελούν απλώς εναλλακτικές λύσεις με περιβαλλοντική συνείδηση στο να προσφέρουν συναρπαστική δυναμική οδήγησης.

Η ενσωμάτωση των μπαταριών ιόντων λιθίου στα ηλεκτρικά οχήματα αντιμετωπίζει τις ανησυχίες σχετικά με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και την ποιότητα του αέρα. Με μηδενικές εκπομπές καυσαερίων, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που τροφοδοτούνται από μπαταρίες ιόντων λιθίου συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και των αστικών ατμοσφαιρικών ρύπων, βελτιώνοντας τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αποδίδονται στα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης. Η συμβολή της τεχνολογίας των μπαταριών ιόντων λιθίου και των ηλεκτρικών

οχημάτων παίζει καθοριστικό ρόλο στην κατεύθυνση των αυτοκινητιστικών μεταφορών προς μια πιο οικολογικά υπεύθυνη πορεία, ευθυγραμμιζόμενη με τις παγκόσμιες προσπάθειες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής (Karimi, & Li, 2013, Rangarajan et al., 2022).

Ωστόσο, η μαζική υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων συνεπάγεται επίσης την εξέταση ολόκληρου του κύκλου ζωής των μπαταριών ιόντων λιθίου, που περιλαμβάνει την εξόρυξη πόρων, την κατασκευή, τη χρήση και τη διάθεση (Chen et al., 2012). Ενώ οι μπαταρίες ιόντων λιθίου προσφέρουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη κατά τη λειτουργία τους, η εξόρυξη και η επεξεργασία των πρώτων υλών, συμπεριλαμβανομένου του λιθίου, εγείρουν περιβαλλοντικές και κοινωνικές προκλήσεις, απαιτώντας συνειδητές στρατηγικές διαχείρισης. Επιπλέον, η ενδεχόμενη ανακύκλωση και διάθεση των μπαταριών ιόντων λιθίου απαιτεί καινοτόμες και βιώσιμες λύσεις για τον μετριασμό των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Pražanová, Knap & Stroe, 2022).

Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση των μπαταριών ιόντων λιθίου στα ηλεκτρικά οχήματα σηματοδοτεί μια καμπή στην εξέλιξη της τεχνολογίας των μεταφορών. Αξιοποιώντας τα εγγενή ηλεκτροχημικά χαρακτηριστικά του λιθίου, τα ηλεκτροκίνητα οχήματα που είναι εξοπλισμένα με μπαταρίες ιόντων λιθίου προσφέρουν αυξημένες επιδόσεις, διευρυμένη εμβέλεια και μειωμένες εκπομπές. Αυτή η αλλαγή όχι μόνο επαναπροσδιορίζει το τοπίο της αυτοκινητοβιομηχανίας, αλλά ενσωματώνει επίσης μια ευρύτερη προσπάθεια προς τη βιώσιμη κινητικότητα, καταδεικνύοντας τη βαθιά επιρροή του λιθίου στη διαμόρφωση του περιγράμματος του σύγχρονου οικοσυστήματος μεταφορών.

5.1.2. Φορητές ηλεκτρονικές συσκευές

Η ευρεία χρήση των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών έχει γίνει εμβληματική της σύγχρονης ψηφιακής εποχής και στον πυρήνα αυτών των εξελίξεων βρίσκεται η πανταχού παρούσα χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου. Η πορεία προς τη σμίκρυνση, τις βελτιωμένες επιδόσεις και την παρατεταμένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας υποστηρίζεται από τα μοναδικά χαρακτηριστικά του λιθίου, καθιστώντας το ουσιαστικό στοιχείο στην εξέλιξη των φορητών ηλεκτρονικών.

Οι μπαταρίες ιόντων-λιθίου, που χαρακτηρίζονται από την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, την ελαφριά σύνθεση και την επαναφορτιζόμενη δυνατότητα, έχουν φέρει επανάσταση στο τοπίο των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών. Η φορητότητα και η ευκολία συσκευών όπως τα smartphones, οι φορητοί υπολογιστές, τα tablets και η φορητή τεχνολογία έχουν διαμορφωθεί αμετάκλητα από αυτές τις μπαταρίες. Η περίπλοκη αλληλεπίδραση του λιθίου με άλλα υλικά μέσα σε αυτές τις μπαταρίες έχει κεντρικό ρόλο στη λειτουργικότητα και την απόδοσή τους, παρέχοντας στους καταναλωτές συσκευές που είναι όχι μόνο πιο κομψές και συμπαγείς αλλά και ικανές να αντέχουν παρατεταμένες περιόδους χρήσης χωρίς τη συνεχή ανάγκη επαναφόρτισης (Morita, Saito, Yoshioka & Shiratori, 2021).

Η συμπαγής μορφή των μπαταριών ιόντων-λιθίου επέτρεψε την ανάπτυξη συσκευών με όλο και πιο λεπτό προφίλ, επιτρέποντας πρωτοφανή επίπεδα ευκολίας για τον χρήστη. Η ενσωμάτωση του λιθίου έχει διευκολύνει τη σμίκρυνση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, επιτρέποντας έτσι τη δημιουργία συσκευών που δεν είναι μόνο αισθητά ευχάριστες αλλά και εργονομικά αποδοτικές. Αυτή η μείωση του μεγέθους, ωστόσο, δεν συνεπάγεται συμβιβασμό στη λειτουργικότητα. Αντιθέτως, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών ιόντων-λιθίου διασφαλίζει ότι οι συσκευές αυτές διαθέτουν μια σταθερή και αξιόπιστη πηγή ενέργειας, διευκολύνοντας την απρόσκοπτη εμπειρία του χρήστη ακόμη και όταν ασχολείται με εργασίες υψηλής έντασης ενέργειας (Saxena, Sanchez & Pecht, 2017, Talens Peiró, Villalba Méndez & Ayres, 2013).

Επιπλέον, ο ελαφρύς χαρακτήρας των μπαταριών ιόντων-λιθίου έχει προκαλέσει αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο γίνονται αντιληπτές και χρησιμοποιούνται οι φορητές ηλεκτρονικές συσκευές. Οι ημέρες των δυσκίνητων συσκευών υποχωρούν γρήγορα, και αντικαθίστανται από συσκευές που δεν είναι μόνο ισχυρές αλλά και εγγενώς προσαρμόσιμες στο δυναμικό τρόπο ζωής των σύγχρονων ατόμων. Αυτή η μεταμόρφωση στο σχεδιασμό και την κατασκευή των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών έχει καθοριστική σημασία για τη διαμόρφωση της πορείας της σύγχρονης επικοινωνίας, επιτρέποντας στους χρήστες να παραμένουν συνδεδεμένοι και να εμπλέκονται με το ψηφιακό οικοσύστημα, ανεξάρτητα από τη γεωγραφική τους θέση (Korthauer, 2018).

Επιπλέον, η δυνατότητα επαναφόρτισης των μπαταριών ιόντων λιθίου ευθυγραμμίζεται με το ήθος της βιωσιμότητας που καθορίζει τον 21ο αιώνα. Η ικανότητα αυτών των μπαταριών να υποβάλλονται σε πολλαπλούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης χωρίς σημαντική υποβάθμιση των επιδόσεων εξασφαλίζει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής για τις φορητές ηλεκτρονικές συσκευές. Αυτό, με τη σειρά του, συμβάλλει στη μείωση των ηλεκτρονικών αποβλήτων, ένα κρίσιμο ζήτημα ενόψει της κλιμακούμενης τεχνολογικής απαξίωσης (Ebensperger, Maxwell & Moscoso, 2005).

Εν κατακλείδι, η χρήση των μπαταριών ιόντων-λιθίου στη σφαίρα των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών προκάλεσε μια μετασχηματιστική επανάσταση. Ο συγκερασμός της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, της ελαφριάς σύνθεσης και της δυνατότητας επαναφόρτισης έχει προσδώσει σε αυτές τις συσκευές μια ζωτικότητα που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του σύγχρονου τρόπου ζωής. Ως αποτέλεσμα, οι φορητές ηλεκτρονικές συσκευές έχουν πάψει να είναι απλά εργαλεία, είναι πλέον αγωγοί που ενδυναμώνουν, συνδέουν και εμπλουτίζουν τη ζωή των ατόμων με τρόπο που δεν είχε προηγούμενο (Saxena, Sanchez & Pecht, 2017).

5.1.3. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό τοπίο παρουσιάζει μια σημαντική πρόκληση: τη διαλείπουσα εγγενή φύση των πηγών αυτών και την ασύγχρονη φύση της ζήτησης ενέργειας. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS) αναδεικνύονται ως κρίσιμοι παράγοντες μιας βιώσιμης και αξιόπιστης ενεργειακής υποδομής, αντιμετωπίζοντας τη χρονική αναντιστοιχία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Μεταξύ των τεχνολογιών που βρίσκονται στην πρώτη γραμμή αυτής της προσπάθειας, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, λόγω της εξαιρετικής ενεργειακής πυκνότητας, της διάρκειας ζωής και της αποδοτικότητάς τους, έχουν γίνει ο ακρογωνιαίος λίθος των σύγχρονων λύσεων εξοικονόμησης ενέργειας (Ibrahim, Ilincă & Perron, 2008, Ribeiro et al., 2001).

Οι μπαταρίες ιόντων-λιθίου λειτουργούν με βάση την αρχή της αναστρέψιμης παρεμβολής και αποδιαμερισμού του λιθίου στα υλικά της καθόδου και της ανόδου, συνοδευόμενη από τη μεταφορά ιόντων-λιθίου μέσω του ηλεκτρολύτη. Η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει αποτελεσματική αποθήκευση και απελευθέρωση ενέργειας με ελάχιστη

υποβάθμιση κατά τη διάρκεια πολλαπλών κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης. Η σύνθεση των υλικών καθόδου, που συχνά περιλαμβάνει φωσφορικό σίδηρο λιθίου (LiFePO_4), οξείδιο του λιθίου μαγγανίου (LiMn_2O_4) ή οξείδιο του λιθίου νικελίου κοβαλτίου μαγγανίου (LiNiCoMnO_2), επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά απόδοσης της μπαταρίας, όπως η ενεργειακή πυκνότητα, η χωρητικότητα και η διάρκεια ζωής των κύκλων (Alva, Lin & Fang, 2018, Olabi, 2017).

Μία από τις εξέχουσες εφαρμογές των μπαταριών ιόντων-λιθίου σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι η χρονική μετατόπιση ενέργειας. Αυτό περιλαμβάνει την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ή την εκφόρτιση της και υψηλή παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε περιόδους αιχμής της ζήτησης. Με τον τρόπο αυτό, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορούν να συμβάλουν στην εξισορρόπηση του φορτίου, μειώνοντας την καταπόνηση του ηλεκτρικού δικτύου και βελτιστοποιώντας τη χρήση της ενέργειας. Επιπλέον, αυτές οι μπαταρίες προσφέρουν επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο, όπως ρύθμιση συχνότητας και σταθεροποίηση τάσης, ενισχύοντας την αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα του δικτύου (Mitali, Dhinakaran & Mohamad, 2022).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζουν συχνά μεταβλητότητα λόγω καιρικών συνθηκών, ημερήσιων κύκλων και άλλων παραγόντων. Αυτή η μεταβλητότητα μπορεί να οδηγήσει σε αναντιστοιχίες μεταξύ προσφοράς και ζήτησης. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες ιόντων λιθίου διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στον μετριασμό αυτής της πρόκλησης, απορροφώντας την πλεονάζουσα ενέργεια σε περιόδους υψηλής παραγωγής και παρέχοντάς την σε περιόδους χαμηλής παραγωγής. Η ικανότητα αυτή υποστηρίζει την απρόσκοπτη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο και ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία σε εφαρμογές μικροδικτύων, ιδίως σε απομακρυσμένες ή εκτός δικτύου τοποθεσίες (Collath et al., 2022, Gutsch & Leker, 2022, Olabi et al., 2021).

Το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τον εξηλεκτρισμό και την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές σε τομείς όπως οι μεταφορές, η βιομηχανία και οι οικιστικοί χώροι δίνει πρόσθετη έμφαση στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου διευκολύνουν την ανάπτυξη των διαλείπουσων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και

διευκολύνουν τη μετάβαση σε εναλλακτικές λύσεις καθαρής ενέργειας. Με την αποθήκευση της πλεονάζουσας ανανεώσιμης ενέργειας, τα συστήματα μπαταριών ιόντων-λιθίου εξασφαλίζουν συνεχή και αξιόπιστη παροχή ενέργειας ακόμη και όταν η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι ανεπαρκής.

5.2.ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΓΥΑΛΙΟΥ ΚΑΙ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ

Η χρήση του λιθίου στη βιομηχανία γυαλιού και κεραμικών αποτελεί απόδειξη της ουσιαστικής επιρροής του στοιχείου αυτού στην επιστήμη των υλικών και στις διαδικασίες κατασκευής. Η ενσωμάτωση ενώσεων λιθίου στις συνθέσεις γυαλιού και κεραμικών εισάγει μια σειρά μετασχηματιστικών αποτελεσμάτων που εκτείνονται από τη βελτίωση των φυσικών χαρακτηριστικών έως τη χειραγώγηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων (Phark & Duarte Jr, 2022).

Ο αντίκτυπος της εκμετάλλευσης του λιθίου στη βιομηχανία γυαλιού παρατηρείται πιο εμφανώς στο ρόλο του ως παράγοντα ροής. Η προσθήκη οξειδίου του λιθίου (Li_2O) στις συνθέσεις γυαλιού διευκολύνει τη μείωση των θερμοκρασιών τήξης, επιτρέποντας έτσι πιο ενεργειακά αποδοτικές διαδικασίες παραγωγής γυαλιού. Αυτή η μείωση των θερμοκρασιών τήξης είναι ιδιαίτερα επωφέλης στην κατασκευή ειδικών γυαλιών που απαιτούν περίπλοκη διαμόρφωση και λεπτό έλεγχο των θερμικών συνθηκών (Hallmann, Ulmer & Kern, 2018).

Επιπλέον, το οξείδιο του λιθίου συμβάλλει στη βελτίωση ορισμένων μηχανικών ιδιοτήτων του γυαλιού, συμπεριλαμβανομένου του συντελεστή θερμικής διαστολής του. Αυτή η ιδιότητα καθίσταται ζωτικής σημασίας σε εφαρμογές όπου η αντοχή σε θερμικά σοκ είναι απαραίτητη, όπως μαγειρικά σκεύη, ο εργαστηριακός εξοπλισμός. Η μοναδική ικανότητα του λιθίου να προσδίδει αυξημένη θερμική σταθερότητα, διατηρώντας παράλληλα τα επιθυμητά οπτικά χαρακτηριστικά, οδήγησε στην εφαρμογή του σε προηγμένα οπτικά γυαλιά που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες και στην οπτική ακριβείας (Lubauer et al., 2022).

Η παρουσία του λιθίου σε συνθέσεις κεραμικών εισάγει μια πληθώρα πλεονεκτικών επιδράσεων που διαμορφώνουν τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Η ενσωμάτωση ενώσεων λιθίου μπορεί να ενισχύσει τη μηχανική αντοχή των κεραμικών, επιτρέποντας

έτσι την κατασκευή λεπτότερων αλλά και πιο ανθεκτικών εξαρτημάτων. Αυτό το χαρακτηριστικό έχει αξιοσημείωτες επιπτώσεις στην κατασκευή μονωτήρων, κοπτικών εργαλείων και ηλεκτρονικών υποστρωμάτων, όπου επιδιώκεται τόσο η μηχανική αντοχή όσο και οι συμπαγείς διαστάσεις (Kamienski et al., 2000).

Επιπλέον, η τάση του λιθίου να τροποποιεί την ηλεκτρική αγωγιμότητα των κεραμικών αξιοποιείται στην παραγωγή ηλεκτρολυτών στερεάς κατάστασης για μπαταρίες ιόντων λιθίου. Τα κεραμικά που έχουν προστεθεί ιόντα λιθίου παρουσιάζουν υψηλή ιοντική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου, ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό για τη λειτουργικότητα των μπαταριών ιόντων λιθίου, εξασφαλίζοντας την ομαλή μετακίνηση των ιόντων-λιθίου μεταξύ ανόδου και καθόδου (Hallmann, Ulmer & Kern, 2018).

Η αλληλεπίδραση μεταξύ του λιθίου και του γυαλιού ή των κεραμικών διέπεται από πολύπλοκους μηχανισμούς που περιλαμβάνουν ατομικές αντικαταστάσεις, ανισορροπίες φορτίου και παραμορφώσεις του κρυσταλλικού πλέγματος. Τα ιόντα λιθίου μπορούν να αντικαταστήσουν άλλα κατιόντα εντός της κρυσταλλικής δομής αυτών των υλικών, οδηγώντας σε τροποποιήσεις των φυσικών ιδιοτήτων, όπως οι συντελεστές θερμικής διαστολής και οι δείκτες διάθλασης. Επιπλέον, η εισαγωγή του λιθίου μπορεί να μεταβάλει τη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης, επηρεάζοντας τη συμπεριφορά του υλικού υπό ποικίλες θερμικές συνθήκες (Elsaka & Elnaghy, 2016).

Επομένως, ο ρόλος του λιθίου στη βιομηχανία γυαλιού και κεραμικών εκτείνεται πολύ πέρα από αυτόν ενός απλού πρόσθετου. Η ικανότητά του να δρα ως ροή, η ικανότητά του να ενισχύει τη μηχανική αντοχή και η επίδρασή του στην ηλεκτρική αγωγιμότητα καταδεικνύουν συλλογικά την πολύπλευρη φύση της επίδρασής του. Η περίπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ του λιθίου και αυτών των υλικών υπογραμμίζει τη σημασία του προσαρμοσμένου σχεδιασμού υλικών, αναδεικνύοντας τον αναπόσπαστο ρόλο που αναλαμβάνει αυτό το αλκαλικό μέταλλο στην πρόοδο τόσο του τομέα της επιστήμης των υλικών όσο και του ποικίλου φάσματος εφαρμογών που βασίζονται στο γυαλί και τα κεραμικά.

5.3.ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ

Η αξιοποίηση του λιθίου στον τομέα της φαρμακευτικής και της ιατρικής δημιουργεί ένα γόνιμο πεδίο μελέτης που υπερβαίνει τις στοιχειώδεις ιδιότητές του και εγκαινιάζει μια βαθιά επίδραση στην ανθρώπινη υγεία. Ενώ το λίθιο αναγνωρίζεται κυρίως για τον ρόλο του στη θεραπεία της διπολικής διαταραχής, οι θεραπευτικές του δυνατότητες επεκτείνονται σε ένα ευρύτερο φάσμα νευρολογικών και φυσιολογικών καταστάσεων. Η παρούσα ενότητα εμβαθύνει στην πολύπλευρη σχέση μεταξύ του λιθίου και του ιατρικού τομέα, διευκρινίζοντας τις φαρμακολογικές του ιδιότητες, τους μηχανισμούς δράσης του και τις τρέχουσες διερευνήσεις των θεραπευτικών του εφαρμογών (Oruch, 2014).

Η χρήση του λιθίου ως παράγοντα σταθεροποίησης της διάθεσης στη διαχείριση της διπολικής διαταραχής αποτελεί την επιτομή της σημασίας του στην ψυχιατρική. Ο περίπλοκος μηχανισμός δράσης του περιλαμβάνει τη διαμόρφωση της σηματοδότησης των νευροδιαβιβαστών, ιδίως επηρεάζοντας την ισορροπία των συστημάτων γλουταμινικού και γ-αμινοβουτυρικού οξέος (GABA) (Duvall & Gallicchio, 2017). Η ικανότητα του λιθίου να μετριάξει τη δραστηριότητα της κυκλικής μονοφωσφορικής αδενοσίνης (cAMP) και να ρυθμίζει νευροπροστατευτικές οδούς συμβάλλει στην αποτελεσματικότητά του στην άμβλυνση των μανιακών και καταθλιπτικών επεισοδίων. Ειδικότερα, το λίθιο έχει επιδείξει τις ικανότητές του στην πρόληψη της αυτοκτονίας και στη μείωση των ποσοστών υποτροπής, εδραιώνοντας τη θέση του ως θεραπεία ακρογωνιαίου λίθου στη διπολική διαταραχή (Mota de Freitas, Levenson & Goossens, 2016).

Το φάσμα των ασθενειών για τις οποίες το λίθιο αποτελεί θεραπεία επεκτείνεται πέρα από τη διπολική διαταραχή και περιλαμβάνει νευροεκφυλιστικές παθήσεις όπως η νόσος του Αλτσχάιμερ και η νόσος του Πάρκινσον. Οι νευροπροστατευτικές ιδιότητες του λιθίου, συμπεριλαμβανομένης της ικανότητάς του να προκαλεί την αυτοφαγία και να ρυθμίζει τις κυτταρικές διεργασίες, έχουν συγκεντρώσει σημαντική προσοχή. Προκλινικές μελέτες έχουν καταδείξει την ικανότητά του να μετριάξει τη συσσώρευση τοξικών πρωτεϊνικών συσσωματωμάτων και να ενισχύει τη γνωστική λειτουργία. Αν και η μετάφραση αυτών των ευρημάτων σε κλινικές εφαρμογές παραμένει ένα πολύπλοκο εγχείρημα, η προοπτική παρεμβάσεων με βάση το λίθιο στις νευροεκφυλιστικές νόσους

προσφέρει μια αχτίδα ελπίδας εν μέσω των προκλήσεων αυτών των καταστάσεων (Karimi et al., 2017, Rybakowski & Ferensztajn-Rochowiak, 2023).

Τα αναδυόμενα στοιχεία έχουν αποκαλύψει τον πιθανό ρόλο του λιθίου στην ογκολογία, παρουσιάζοντας μια ενδιαφέρουσα οδό για θεραπευτική καινοτομία. Η συμμετοχή του λιθίου στην αναστολή της δραστηριότητας της κινάσης της συνθάσης του γλυκογόνου-3β (GSK-3β) και στη διαμόρφωση του μονοπατιού Wnt/β-κατενίνης παρουσιάζει ευκαιρίες για τη διακοπή του πολλαπλασιασμού και της μετάστασης των καρκινικών κυττάρων. Η συνέργειά της με τους υπάρχοντες χημειοθεραπευτικούς παράγοντες και η δυνατότητά της να ευαισθητοποιεί ανθεκτικούς όγκους στη θεραπεία βρίσκονται υπό εξέταση. Ωστόσο, η λεπτή ισορροπία μεταξύ της θεραπευτικής αποτελεσματικότητας και των πιθανών ανεπιθύμητων ενεργειών υπογραμμίζει την ανάγκη αυστηρής διερεύνησης πριν από την ενσωμάτωση του λιθίου στα θεραπευτικά σχήματα του καρκίνου (Nowicki et al., 2008, Thakur, Tobey & Klubo-Gwiedzinska, 2019).

Ο αντίκτυπος του λιθίου στη νευρογένεση -μια διαδικασία ζωτικής σημασίας για τη μάθηση, τη μνήμη και τη συναισθηματική ρύθμιση- παρέχει πληροφορίες για τις ευρύτερες επιδράσεις του στην ψυχική υγεία. Ενισχύοντας τα νευρωνικά προγονικά κύτταρα και επηρεάζοντας τη νευρωνική πλαστικότητα, το λίθιο εμφανίζει πιθανές αντικαταθλιπτικές επιδράσεις. Επιπλέον, οι επιπτώσεις του στις αγχώδεις διαταραχές, στη διαταραχή μετατραυματικού στρες (PTSD), ακόμη και στη διαχείριση του πόνου, απαιτούν σχολαστική διερεύνηση (Palmos et al., 2021, Yoneda, Tamaki & Kakuda, 2008).

Λιπαντικά και γράσα

Ο βιομηχανικός τομέας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στα λιπαντικά και τα γράσα για να διασφαλίσει την ομαλή λειτουργία των μηχανημάτων και των μηχανικών συστημάτων. Στο πλαίσιο αυτό, τα λιπαντικά και τα γράσα με βάση το λίθιο έχουν συγκεντρώσει σημαντική προσοχή λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις διαφόρων εφαρμογών. Η στρατηγική ενσωμάτωση ενώσεων λιθίου σε λιπαντικά προσδίδει στις ουσίες αυτές απaráμιλλα χαρακτηριστικά, καθιστώντας τις απαραίτητες σε πολλούς τομείς (Delgado et al., 2006).

Ο εξέχων ρόλος του λιθίου στη λίπανση μπορεί να αποδοθεί στην ικανότητά του να ενισχύει το δείκτη ιξώδους, να προσδίδει αντοχή στο νερό και να προσδίδει θερμική σταθερότητα. Ο υψηλός δείκτης ιξώδους είναι ιδιαίτερα πλεονεκτικός, καθώς επιτρέπει σταθερή απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Αυτή η προσαρμοστικότητα είναι ζωτικής σημασίας σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις όπου τα μηχανήματα λειτουργούν υπό διαφορετικές συνθήκες. Επιπλέον, η αξιοσημείωτη αντοχή του λιθίου στο νερό εξασφαλίζει ότι η λίπανση παραμένει αποτελεσματική ακόμη και παρουσία υγρασίας, αποτρέποντας έτσι τη διάβρωση και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού (Ahmed et al., 2020, Fan, Xia & Wang, 2014).

Η εξαιρετική σταθερότητα στη θερμοκρασία που παρουσιάζουν τα λιπαντικά με βάση το λίθιο είναι υψίστης σημασίας σε τομείς που χαρακτηρίζονται από ακραίες θερμοκρασιακές διαφορές. Βιομηχανίες όπως η μεταποίηση, η εξόρυξη και οι μεταφορές βασίζονται στα λιπαντικά για τη διατήρηση της λειτουργικής απόδοσης σε απαιτητικές συνθήκες. Εδώ, τα σκευάσματα με βάση το λίθιο υπερέχουν παραμένοντας λειτουργικά και προστατευτικά σε υψηλές θερμοκρασίες, αποτρέποντας τη μηχανική φθορά και τον επακόλουθο χρόνο διακοπής λειτουργίας (Kudryavtsev, 2016).

Η αυτοκινητοβιομηχανία είναι ένας κυρίαρχος τομέας βιομηχανικής παραγωγής που αξιοποιεί λιπαντικά και γράσα λιπαντικών με λίθιο. Τα εξαρτήματα του κινητήρα, τα κιβώτια ταχυτήτων και τα ρουλεμάν των τροχών επωφελούνται από αυτά τα σκευάσματα λόγω της ικανότητάς τους να μειώνουν την τριβή, να διαχέουν τη θερμότητα και να αποτρέπουν τη μηχανική φθορά. Επιπλέον, ο τομέας της αεροδιαστημικής, όπου η ασφάλεια και η ακρίβεια είναι υψίστης σημασίας, αξιοποιεί λιπαντικά με βάση το λίθιο για να εξασφαλίσει την αξιόπιστη λειτουργία περίπλοκων συστημάτων που υπόκεινται σε δυναμικές καταπονήσεις (Delgado, Franco & Kuhn, 2008).

Υπό το πρίσμα αυτών των χαρακτηριστικών, η χρήση λιπαντικών και γράσων με βάση το λίθιο αναμένεται να διατηρηθεί και να εξελιχθεί. Καθώς οι βιομηχανίες συνεχίζουν να εξελίσσονται και να απαιτούν πιο ανθεκτικές και αποτελεσματικές λύσεις λίπανσης, οι προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης σε αυτόν τον τομέα θα ενταθούν αναμφίβολα. Αυτό υπογραμμίζει τη διαρκή σημασία του λιθίου στη λίπανση και τον καθοριστικό του ρόλο

στη διατήρηση της βέλτιστης λειτουργίας των τομέων που κινούνται με μηχανήματα (Delgado et al., 2006).

5.4.ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η επιδίωξη ελαφρών αλλά και ανθεκτικών υλικών αποτελεί σήμα κατατεθέν τόσο της μεταλλουργίας όσο και της αεροδιαστημικής μηχανικής. Η αναζήτηση αυτή έχει προωθηθεί ουσιαστικά με την ενσωμάτωση του λιθίου, ενός ευπροσάρμοστου αλκαλικού μετάλλου, στον τομέα της επιστήμης των υλικών. Η στρατηγική κραματοποίηση του λιθίου με μέταλλα άνοιξε το δρόμο για τη δημιουργία υλικών που παρουσιάζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και μειωμένη πυκνότητα, καλύπτοντας έτσι κρίσιμες ανάγκες σε αεροδιαστημικές και μεταλλουργικές εφαρμογές (Ahmed & Wu, 2014).

Η αεροδιαστημική βιομηχανία, η οποία χαρακτηρίζεται από τις αυστηρές απαιτήσεις της για υλικά που προσφέρουν ταυτόχρονα χαμηλό βάρος και υψηλή αντοχή, βρήκε μια συναρπαστική λύση στα κράματα λιθίου. Τα κράματα αυτά, που έχουν σχεδιαστεί σχολαστικά μέσω ακριβούς ελέγχου της σύνθεσης, προσδίδουν σημαντική μείωση της πυκνότητας, διατηρώντας παράλληλα τη δομική ακεραιότητα. Αυτό, με τη σειρά του, οδηγεί σε βελτιωμένη αποδοτικότητα καυσίμου, μεγαλύτερη χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου και βελτιωμένη συνολική απόδοση των αεροδιαστημικών εξαρτημάτων (Prasad, Gokhale & Wanhill, 2013).

Η μεταλλουργία, επίσης, έχει δει μετασχηματιστικά αποτελέσματα από την ενσωμάτωση του λιθίου. Η σκόπιμη έγχυση λιθίου σε μεταλλικές μήτρες έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει τις δομές των κόκκων, ενισχύει τη μηχανική ανθεκτικότητα και βελτιώνει τη συνολική εργασιμότητα. Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν αξιοποιηθεί στην παραγωγή ελαφρών αλλά ανθεκτικών εξαρτημάτων για ποικίλες εφαρμογές, από την αυτοκινητοβιομηχανία έως τις κατασκευές (Brückner, Frank & Elwert, 2020, Xiao, Li & Xu, 2017).

Ο ρόλος του λιθίου στην επιστήμη των υλικών είναι εμβληματικός για τις δυνατότητές του να διευκολύνει την καινοτομία και την πρόοδο σε κρίσιμους τομείς. Καθώς οι βιομηχανίες συνεχίζουν να διευρύνουν τα όρια της μηχανικής, η εξερεύνηση νέων κραμάτων και υλικών με βάση το λίθιο είναι έτοιμη να επιμείνει, επιτρέποντας τη

δημιουργία δομών που δεν είναι μόνο τεχνικά προηγμένες αλλά και οικολογικά συνειδητοποιημένες. Κατά συνέπεια, η ενσωμάτωση του λιθίου στη σφαίρα της μεταλλουργίας και της αεροδιαστημικής μηχανικής αποτελεί απόδειξη της ικανότητάς του να υπερβαίνει τα παραδοσιακά όρια και να προωθεί την τεχνολογική πρόοδο (Prasad, Gokhale & Wanhill, 2013).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, οι ιδιότητες του λιθίου, τόσο ατομικές όσο και χημικές, το καθιστούν ένα μοναδικό και ιδιαίτερα δραστικό στοιχείο. Τα φυσικά χαρακτηριστικά του, όπως η χαμηλή πυκνότητα και η εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα, έχουν οδηγήσει στον απαραίτητο ρόλο του σε διάφορες βιομηχανίες, ιδίως στην ανάπτυξη μπαταριών ιόντων λιθίου. Αυτές οι μπαταρίες έχουν φέρει επανάσταση στο τοπίο της αποθήκευσης ενέργειας, τροφοδοτώντας ηλεκτρικά οχήματα και διευκολύνοντας την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο, η κυριαρχία των μπαταριών ιόντων λιθίου εγείρει επίσης ανησυχίες σχετικά με τη βιωσιμότητα της αλυσίδας εφοδιασμού τους, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωγραφική κατανομή των κοιτασμάτων λιθίου.

Τα κοιτάσματα λιθίου ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό, από πηγματίτες και αλατούχες εκτάσεις έως αργίλους και άλμες πετρελαϊκών πεδίων. Η παγκόσμια παραγωγή λιθίου έχει σημειώσει σημαντική αύξηση. Τα σημαντικότερα κοιτάσματα λιθίου συγκεντρώνονται σε περιοχές όπως η Αυστραλία, η Χιλή, η Κίνα και η Αργεντινή. Οι καινοτομίες στις τεχνικές εξόρυξης εξελίσσονται συνεχώς για να καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση για αυτόν τον κρίσιμο πόρο. Ωστόσο, αυτή η αναπτυσσόμενη βιομηχανία αντιμετωπίζει προκλήσεις, όπως οι διακυμάνσεις της προσφοράς και της ζήτησης, η αστάθεια των τιμών και οι ανησυχίες για τη βιωσιμότητα.

Η ανακύκλωση και οι αναδυόμενες τεχνολογίες υπόσχονται να διαμορφώσουν το μέλλον της παραγωγής λιθίου και να αμβλύνουν αυτές τις προκλήσεις. Ωστόσο, είναι ζωτικής σημασίας να αντιμετωπιστούν οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις της εξόρυξης και της επεξεργασίας λιθίου. Η βιομηχανία λιθίου εγείρει ζητήματα που σχετίζονται με τη χρήση νερού, τη διατάραξη των οικοτόπων και τις εκπομπές διοξειδίου

του άνθρακα. Έχει επίσης κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις, προσφέροντας οικονομικά οφέλη, ενώ θέτει ερωτήματα σχετικά με τα δικαιώματα των ιθαγενών και τις γεωπολιτικές εντάσεις.

Η σημασία της παρούσας μελέτης έγκειται στο ότι φωτίζει τον κρίσιμο ρόλο του λιθίου στη μετάβαση προς καθαρές και βιώσιμες ενεργειακές λύσεις. Η σημασία αυτού του στοιχείου εκτείνεται πέρα από την αποθήκευση ενέργειας- έχει επιπτώσεις στη γεωπολιτική, το περιβάλλον και την κοινωνία. Προχωρώντας προς τα εμπρός, η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στις τεχνολογικές εξελίξεις στην εξόρυξη και την ανακύκλωση λιθίου, στις στρατηγικές περιβαλλοντικού μετριασμού, στις εμπεριστατωμένες γεωπολιτικές μελέτες περιοχών πλούσιων σε λίθιο, στις συνεχιζόμενες εξελίξεις στην τεχνολογία μπαταριών και στις κοινωνικές επιπτώσεις της εξόρυξης λιθίου στις κοινότητες των αυτοχθόνων και στους τοπικούς πληθυσμούς.

Εν κατακλείδι, η κεντρική θέση του λιθίου στη βιώσιμη ενέργεια και ο πολύπλοκος αντίκτυπός του σε διάφορες πτυχές της κοινωνίας και του περιβάλλοντος απαιτούν συνολική κατανόηση και ισορροπημένες προσεγγίσεις. Η παρούσα διατριβή συμβάλλει στην κατανόηση αυτή και παρέχει τα θεμέλια για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων και βιώσιμων πρακτικών στην παραγωγή και τη χρήση λιθίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahmed, B., & Wu, S. J. (2014). Aluminum lithium alloys (Al-Li-Cu-X)-new generation material for aerospace applications. *Applied Mechanics and Materials*, 440, 104-111.
- Ahmed, E., Nabhan, A., Ghazaly, N. M., & Abd El Jaber, G. T. (2020). Tribological behavior of adding nano oxides materials to lithium grease: A review. *Am. J. Nanomater*, 8, 1-9.

Alessia, A., Alessandro, B., Maria, V. G., Carlos, V. A., & Francesca, B. (2021).

Challenges for sustainable lithium supply: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 300, 126954.

Ali, A., & Gujarati, R. (2020). Lithium mining and its financial implications: Evidence from Australia and Chile. *The Extractive Industries and Society*, 7(2), 481-488.

Alva, G., Lin, Y., & Fang, G. (2018). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 144, 341-378.

Ambrose, H., & Kendall, A. (2020). Understanding the future of lithium: Part 1, resource model. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 80-89.

Babbitt, C. W. (2020). Sustainability perspectives on lithium-ion batteries. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22, 1213-1214.

Bae, H., & Kim, Y. (2021). Technologies of lithium recycling from waste lithium ion batteries: a review. *Materials advances*, 2(10), 3234-3250.

Barandiarán, J. (2019). Lithium and development imaginaries in Chile, Argentina and Bolivia. *World Development*, 113, 381-391.

Baruya, P. (2018). Lithium and the financialization of energy storage: A political economic analysis. *Energy Research & Social Science*, 40, 154-163.

Będowska-Sójka, B., & Górka, J. (2022). The lithium and oil markets—dependencies and volatility spillovers. *Resources Policy*, 78, 102901.

Björkman, T., & Vehmas, J. (2018). Extractive economies and financialization: Socio-economic implications of lithium mining in Finland. *Journal of Rural Studies*, 57, 235-245.

BloombergNEF. (2021). The lithium-ion battery supply chain in 2021. Bloomberg New Energy Finance.

Bowell, R. J., Lagos, L., de los Hoyos, C. R., & Declercq, J. (2020). Classification and characteristics of natural lithium resources. *Elements*, 16(4), 259-264.

Boxall, N. J., King, S., Cheng, K. Y., Gumulya, Y., Bruckard, W., & Kaksonen, A. H. (2018). Urban mining of lithium-ion batteries in Australia: Current state and future trends. *Minerals Engineering*, 128, 45-55.

Bradley, D. C., McCauley, A. D., & Stillings, L. L. (2017). *Mineral-deposit model for lithium-cesium-tantalum pegmatites* (No. 2010-5070-O). US Geological Survey.

Bradley, D. C., Stillings, L. L., Jaskula, B. W., Munk, L., & McCauley, A. D. (2017). *Lithium* (No. 1802-K). US Geological Survey.

Bridge, G., & Bolin, R. (2016). Rethinking the lithium commodity cycle: Geographies of value and new spaces of accumulation. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 48(11), 2135-2153.

Bruce, P. G., Scrosati, B., & Tarascon, J. M. (2008). Nanomaterials for rechargeable lithium batteries. *Angewandte Chemie International Edition*, 47(16), 2930-2946.

Brückner, L., Frank, J., & Elwert, T. (2020). Industrial recycling of lithium-ion batteries—A critical review of metallurgical process routes. *Metals*, 10(8), 1107.

Cabello, J. (2021). Lithium brine production, reserves, resources and exploration in Chile: An updated review. *Ore Geology Reviews*, 128, 103883.

Cairns, R. D., & Slivinski, A. (2015). The economics of lithium markets. *Mineral Economics*, 28(3), 109-124.

- Castillo, A. F., Cruz, P., & Vilches, R. A. (2019). Lithium and cobalt prices and the dynamics of electric vehicle diffusion and infrastructure development. *Resources Policy*, 62, 16-27.
- Chabot, V., Farhad, S., Chen, Z., Fung, A. S., Yu, A., & Hamdullahpur, F. (2013). Effect of electrode physical and chemical properties on lithium-ion battery performance. *International Journal of Energy Research*, 37(14), 1723-1736.
- Chan, L. H., Starinsky, A., & Katz, A. (2002). The behavior of lithium and its isotopes in oilfield brines: evidence from the Heletz-Kokhav field, Israel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(4), 615-623.
- Chen, X., Shen, W., Vo, T. T., Cao, Z., & Kapoor, A. (2012, December). An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles. In *2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)* (pp. 230-235). IEEE.
- Chernyshev, B. A., Gurov, Y. B., Karpukhin, V. S., Korotkova, L. Y., Lapushkin, S. V., Pritula, R. V., & Sandukovsky, V. G. (2013). Spectroscopy of the heavy lithium isotopes 10-12Li. *The European Physical Journal A*, 49(6), 68.
- Christmann, P., Gloaguen, E., Labbé, J. F., Melleton, J., & Piantone, P. (2015). Global lithium resources and sustainability issues. In *Lithium process chemistry* (pp. 1-40). Elsevier.
- Clark, Jim (2005). "Some Compounds of the Group 1 Elements".
- Collath, N., Tepe, B., Englberger, S., Jossen, A., & Hesse, H. (2022). Aging aware operation of lithium-ion battery energy storage systems: A review. *Journal of Energy Storage*, 55, 105634.

- Crouch, J. (2020). Lithium Boom Girds for Test as Electric Cars Take Back Seat. Bloomberg. Daitch, P. J. (2018). *Lithium extraction from oilfield brine* (Doctoral dissertation).
- Davis, S. J., & Caldeira, K. (2010). Consumption-based accounting of CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(12), 5687-5692.
- Davison, H. W. (1968). *Compilation of thermophysical properties of liquid lithium* (Vol. 4650). National Aeronautics and Space Administration.
- Delgado, M. A., Franco, J. M., & Kuhn, E. (2008). Effect of rheological behaviour of lithium greases on the friction process. *Industrial Lubrication and Tribology*, 60(1), 37-45.
- Delgado, M. A., Valencia, C., Sánchez, M. C., Franco, J. M., & Gallegos, C. (2006). Thermorheological behaviour of a lithium lubricating grease. *Tribology Letters*, 23, 47-54.
- Dorn, F. M., & Peyré, F. R. (2020). Lithium as a strategic resource: geopolitics, industrialization, and mining in Argentina. *Journal of Latin American Geography*, 19(4), 68-90.
- Dörre, K. (2020). Lithium capitalism and the social and environmental destruction in the Atacama Desert. *Socialism and Democracy*, 34(2), 33-54.
- Duvall, A., & Gallicchio, V. S. (2017). Lithium treatment in clinical medicine: history, current status and future use. *J Cell Sci Ther*, 8(270), 2.
- Earnshaw, A., & Greenwood, N. N. (1997). *Chemistry of the Elements* (Vol. 60). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Ebensperger, A., Maxwell, P., and Moscoso, C., 2005, The lithium industry: Its recent evolution and future prospects: *Resources Policy*, v. 30, p. 218-231.

Elsaka, S. E., & Elnaghy, A. M. (2016). Mechanical properties of zirconia reinforced lithium silicate glass-ceramic. *Dental materials*, 32(7), 908-914. Emsley, J. (2001).

Nature's Building Blocks Hardcover.

Enghag, P. (2008). *Encyclopedia of the elements: technical data-history-processing-applications*. John Wiley & Sons.

Evans, C. (2018). Lithium availability, recycling, and its growth within the global electric mobility market. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 315-333.

Evans, R. K. (1978). Lithium reserves and resources. In *Lithium Needs and Resources* (pp. 379-385). Pergamon.

Fan, X., Xia, Y., & Wang, L. (2014). Tribological properties of conductive lubricating greases. *Friction*, 2, 343-353.

Förster, H., Andrew, R. M., Schipper, L., & Lenzen, M. (2017). International comparison of CO2 emission trends in the iron and steel industry. *Energy Policy*, 107, 395-405.

Garrett, D. E. (2004). *Handbook of lithium and natural calcium chloride*. Elsevier.

Gregory, K., Schleyer, P. V. R., & Snaith, R. (1991). Structures of Organonitrogen—Lithium Compounds: Recent Patterns and Perspectives in Organolithium Chemistry. *Advances in inorganic chemistry*, 37, 47-142.

Gruber, P. W., Medina, P. A., Keoleian, G. A., Kesler, S. E., Everson, M. P., & Wallington, T. J. (2011). Global lithium availability: A constraint for electric vehicles?. *Journal of Industrial Ecology*, 15(5), 760-775.

- Gurov, Y. B., Kalinin, E. M., Karpukhin, V. S., Lapushkin, S. V., Laukhin, I. V., Pechkurov, V. A., ... & Shchurenkova, T. D. (2010). Heavy lithium isotope ^{11}Li production in pion absorption reactions on a ^{14}C radioactive target. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 74, 433-436.
- Gutsch, M., & Leker, J. (2022). Global warming potential of lithium-ion battery energy storage systems: A review. *Journal of Energy Storage*, 52, 105030.
- Hallmann, L., Ulmer, P., & Kern, M. (2018). Effect of microstructure on the mechanical properties of lithium disilicate glass-ceramics. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 82, 355-370.
- Hashim, H., Ho, W. S., & Gan, S. (2019). A review on lithium-ion battery safety concerns: Existing solutions and recent developments. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1194-1217.
- Huang, Z., Deng, Z., Zhong, Y., Xu, M., Li, S., Liu, X., ... & Huang, Y. (2022). Progress and challenges of prelithiation technology for lithium-ion battery. *Carbon Energy*, 4(6), 1107-1132.
- Ibrahim, H., Ilinca, A., & Perron, J. (2008). Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(5), 1221-1250.
- Ide, F., & Kunasz, I. A. (1990). Origin of lithium in Salar de Atacama, northern Chile.
- IEA. (2020). Global EV Outlook 2020: Entering the decade of electric drive? International Energy Agency.
- Igogo, T. A., Sandor, D. L., Mayyas, A. T., & Engel-Cox, J. (2019). *Supply chain of raw materials used in the manufacturing of light-duty vehicle lithium-ion batteries* (No.

NREL/TP-6A20-73374). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Isken, P., Dippel, C., Schmitz, R., Schmitz, R. W., Kunze, M., Passerini, S., ... & Lex-Balducci, A. (2011). High flash point electrolyte for use in lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 56(22), 7530-7535.

Jeppson, D. W., Ballif, J. L., Yuan, W. W., & Chou, B. E. (1978). Lithium literature review: lithium's properties and interactions.

Jiankang, L., Tianren, Z., Xifang, L., Denghong, W., & Xin, D. (2015). The metallogenetic regularities of lithium deposits in China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 89(2), 652-670.

Kamienski, C. W., McDonald, D. P., Stark, M. W., & Papcun, J. R. (2000). Lithium and lithium compounds. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*.

Karimi, A., Bahrampour, K., Moghaddam, M. A. M., Asadikaram, G., Ebrahimi, G., Torkzadeh-Mahani, M., ... & Nematollahi, M. H. (2017). Evaluation of lithium serum level in multiple sclerosis patients: A neuroprotective element. *Multiple sclerosis and related disorders*, 17, 244-248.

Karimi, G., & Li, X. (2013). Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *International Journal of Energy Research*, 37(1), 13-24.

Kennedy, B., Patterson, D., & Camilleri, S. (2000). Use of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 90(2), 156-162.

Kesler, S. E., Gruber, P. W., Medina, P. A., Keoleian, G. A., Everson, M. P., & Wallington, T. J. (2012). Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore geology reviews*, 48, 55-69.

Khalil, A., Mohammed, S., Hashaikeh, R., & Hilal, N. (2022). Lithium recovery from brine: Recent developments and challenges. *Desalination*, 528, 115611.

King, S., & Boxall, N. J. (2019). Lithium battery recycling in Australia: defining the status and identifying opportunities for the development of a new industry. *Journal of Cleaner Production*, 215, 1279-1287.

Kogel, J. E. (Ed.). (2006). *Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and uses*. SME. Korthauer, R. (Ed.). (2018). *Lithium-ion batteries: basics and applications*. Springer. Krebs, R. E. (2006). *The history and use of our earth's chemical elements: a reference guide*. Greenwood Publishing Group.

Kudryavtsev, P. (2016). Lithium in nature, application, methods of extraction. *Scientific Israel: Technological Advantages*, 18(3).

Kumar, A., Fukuda, H., Hatton, T. A., & Lienhard, J. H. (2019). Lithium recovery from oil and gas produced water: a need for a growing energy industry. *ACS Energy Letters*, 4(6), 1471-1474.

Lefebvre, H., & Lefebvre, L. A. (2019). Lithium and the financialization of energy storage: A Foucauldian analysis. *European Journal of Political Economy*, 57, 19-29.

Li, C., He, L., Luo, J., Tang, J., Cheng, N., & Chen, Z. (2020). Theoretical anchoring effect of new phosphorus allotropes for lithium–sulfur batteries. *Nanoscale*, 12(20), 11095-11111.

Li, W., Lu, M., Zurek, E., Xu, X., Chen, L., Zhang, M., ... & Liu, W. (2019). Crystal structures of silicon-rich lithium silicides at high pressure. *Physics Letters A*, 383(10), 1047-1051.

Lide, D. R. (2005). Physical constant of inorganic compound. *Handbook of chemistry and physics*, 474.

Lin, S., Hatzell, M., Liu, R., Wells, G., & Xie, X. (2021). Mining resources from water. *Resources, Conservation and Recycling*, 175(C).

Lin, Y., Strobel, T. A., & Cohen, R. E. (2015). Structural diversity in lithium carbides. *Physical Review B*, 92(21), 214106.

Liu, W., & Agusdinata, D. B. (2020). Interdependencies of lithium mining and communities sustainability in Salar de Atacama, Chile. *Journal of Cleaner Production*, 260, 120838.

Liu, X., Chen, X., He, L., & Zhao, Z. (2015). Study on extraction of lithium from salt lake brine by membrane electrolysis. *Desalination*, 376, 35-40.

Lodders, K. (2003). Solar system abundances and condensation temperatures of the elements. *The Astrophysical Journal*, 591(2), 1220.

Lubauer, J., Belli, R., Peterlik, H., Hurle, K., & Lohbauer, U. (2022). Grasping the Lithium hype: Insights into modern dental Lithium Silicate glass-ceramics. *Dental Materials*, 38(2), 318-332.

Luisi, R., & Capriati, V. (Eds.). (2014). *Lithium compounds in organic synthesis: from fundamentals to applications*. John Wiley & Sons.

Lunde Seefeldt, J. (2020). Lessons from the Lithium Triangle: Considering Policy Explanations for the Variation in Lithium Industry Development in the "Lithium Triangle" Countries of Chile, Argentina, and Bolivia. *Politics & Policy*, 48(4), 727-765.

- Lyublinski, I. E., Vertkov, A. V., & Evtikhin, V. A. (2009). Application of lithium in systems of fusion reactors. 1. Physical and chemical properties of lithium. *Plasma Devices and Operations*, 17(1), 42-72.
- Madani, S. S., Schaltz, E., & Knudsen Kær, S. (2018). Review of parameter determination for thermal modeling of lithium ion batteries. *Batteries*, 4(2), 20.
- Maxwell, P. (2014). Analysing the lithium industry: Demand, supply, and emerging developments. *Mineral Economics*, 26, 97-106.
- Maxwell, P., & Mora, M. (2020). Lithium and Chile: looking back and looking forward. *Mineral Economics*, 33(1-2), 57-71.
- McKetta, John J. (18 July 2007). *Encyclopedia of Chemical Processing and Design: Volume 28 – Lactic Acid to Magnesium Supply-Demand Relationships*. M. Dekker. ISBN 978-0-8247-2478-8. Retrieved 29 September 2010.
- Meixner, A., Alonso, R. N., Lucassen, F., Korte, L., & Kasemann, S. A. (2022). Lithium and Sr isotopic composition of salar deposits in the Central Andes across space and time: the Salar de Pozuelos, Argentina. *Mineralium Deposita*, 1-24.
- Mekonnen, Y., Sundararajan, A., & Sarwat, A. I. (2016). A review of cathode and anode materials for lithium-ion batteries. *SoutheastCon 2016*, 1-6.
- Merlevede, B., & Valckx, N. (2020). The lithium rush: The geopolitics of the 21st century? *Resources Policy*, 65, 101547. Meta-analysis of experimental results for heat capacity and thermal conductivity in lithium-ion batteries: A critical review. *Journal of Power Sources*, 522, 230829.

- Millot, R., & Girard, J. P. (2007, September). Lithium isotope fractionation during adsorption onto mineral surfaces. In *International Meeting on Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Lille, France*.
- Mitali, J., Dhinakaran, S., & Mohamad, A. A. (2022). Energy storage systems: A review. *Energy Storage and Saving*.
- Möller, K. C., Hodal, T., Appel, W. K., Winter, M., & Besenhard, J. O. (2001). Fluorinated organic solvents in electrolytes for lithium ion cells. *Journal of power sources*, 97, 595-597.
- Morita, Y., Saito, Y., Yoshioka, T., & Shiratori, T. (2021). Estimation of recoverable resources used in lithium-ion batteries from portable electronic devices in Japan. *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 105884.
- Mota de Freitas, D., Levenson, B. D., & Goossens, J. L. (2016). Lithium in medicine: Mechanisms of action. *The Alkali Metal Ions: Their Role for Life*, 557-584.
- NMC Outlook. (2020). Nickel Manganese Cobalt (NMC) Batteries Forecast 2020-2025. Bloomberg New Energy Finance.
- Nowicki, M. O., Dmitrieva, N., Stein, A. M., Cutter, J. L., Godlewski, J., Saeki, Y., ... & Lawler, S. (2008). Lithium inhibits invasion of glioma cells; possible involvement of glycogen synthase kinase-3. *Neuro-oncology*, 10(5), 690-699.
- Ober, J. A. (2006). Mineral resource of the month: lithium. *Geotimes*, 2006(JUL).
- Olabi, A. G. (2017). Renewable energy and energy storage systems. *Energy*, 136, 1-6.
- Olabi, A. G., Onumaegbu, C., Wilberforce, T., Ramadan, M., Abdelkareem, M. A., & Al-Alami, A. H. (2021). Critical review of energy storage systems. *Energy*, 214, 118987.

- Oruch, R., Elderbi, M. A., Khattab, H. A., Pryme, I. F., & Lund, A. (2014). Lithium: a review of pharmacology, clinical uses, and toxicity. *European journal of pharmacology*, 740, 464-473.
- Palmos, A. B., Duarte, R. R., Smeeth, D. M., Hedges, E. C., Nixon, D. F., Thuret, S., & Powell, T. R. (2021). Lithium treatment and human hippocampal neurogenesis. *Translational psychiatry*, 11(1), 555.
- Petavratzi, E., Sanchez-Lopez, D., Hughes, A., Stacey, J., Ford, J., & Butcher, A. (2022). The impacts of environmental, social and governance (ESG) issues in achieving sustainable lithium supply in the Lithium Triangle. *Mineral Economics*, 35(3-4), 673-699.
- Phark, J. H., & Duarte Jr, S. (2022). Microstructural considerations for novel lithium disilicate glass ceramics: A review. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 34(1), 92-103.
- Prasad, N. E., Gokhale, A., & Wanhill, R. J. (Eds.). (2013). *Aluminum-lithium alloys: processing, properties, and applications*.
- Butterworth-Heinemann. Pražanová, A., Knap, V., & Stroe, D. I. (2022). Literature Review, Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles, Part I: Recycling Technology. *Energies*, 15(3), 1086.
- Prior, T., Wäger, P. A., Stamp, A., Widmer, R., & Giurco, D. (2013). Sustainable governance of scarce metals: The case of lithium. *Science of the total environment*, 461, 785-791.

- Qin, Z., Wang, R., Li, S., Wen, T., Yin, B., & Wu, Z. (2022). MEAM interatomic potential for thermodynamic and mechanical properties of lithium allotropes. *Computational Materials Science*, 214, 111706.
- Rabenau, A., & Schulz, H. (1976). Re-evaluation of the lithium nitride structure. *Journal of the Less Common Metals*, 50(1), 155-159.
- Ribeiro, P. F., Johnson, B. K., Crow, M. L., Arsoy, A., & Liu, Y. (2001). Energy storage systems for advanced power applications. *Proceedings of the IEEE*, 89(12), 1744-1756.
- Roy, J. J., Rarotra, S., Krikstolaityte, V., Zhuoran, K. W., Cindy, Y. D. I., Tan, X. Y., ... & Srinivasan, M. (2022). Green recycling methods to treat lithium-ion batteries E-waste: a circular approach to sustainability. *Advanced Materials*, 34(25), 2103346.
- Rumbaugh, L. H., Roberts, R. B., & Hafstad, L. R. (1938). Nuclear Transmutations of the Lithium Isotopes. *Physical Review*, 54(9), 657.
- Rybakowski, J. K., & Ferensztajn-Rochowiak, E. (2023). Updated perspectives on how and when lithium should be used in the treatment of mood disorders. *Expert Review of Neurotherapeutics*, 23(2), 157-167. S.
- Rangarajan, S., Sunddararaj, S. P., Sudhakar, A. V. V., Shiva, C. K., Subramaniam, U., Collins, E. R., & Senjyu, T. (2022). Lithium-ion batteries—The crux of electric vehicles with opportunities and challenges. *Clean Technologies*, 4(4), 908-930.
- Sanker, S. B., & Baby, R. (2022). Phase change material based thermal management of lithium ion batteries: A review on thermal performance of various thermal conductivity enhancers. *Journal of Energy Storage*, 50, 104606.

Sapse, A. M., & Schleyer, P. V. R. (Eds.). (1995). Lithium chemistry: a theoretical and experimental overview.

Saxena, S., Sanchez, G., & Pecht, M. (2017). Batteries in portable electronic devices: A user's perspective. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11(2), 35-44.

Seba, T., & Arbib, T. (2017). Rethinking transportation 2020-2030: The disruption of transportation and the collapse of the internal-combustion vehicle and oil industries.

RethinkX. Singh, V., Hardman, K. S., Tariq, N., Lu, M. J., Ellis, A., Morrison, M. J., & Weinstein, J. D. (2012). Chemical reactions of atomic lithium and molecular calcium monohydride at 1 K. *Physical review letters*, 108(20), 203201.

Song, J. F., Nghiem, L. D., Li, X. M., & He, T. (2017). Lithium extraction from Chinese salt-lake brines: opportunities, challenges, and future outlook. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 3(4), 593-597.

Sprecher, B., & Olalde, G. (2018). Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals. *Sustainable Materials and Technologies*, 16, 13-19.

Starkey, H. C. (1982). *The role of clays in fixing lithium* (No. 1278). US Government Printing Office.

Sterba, J., Krzemień, A., Fernández, P. R., García-Miranda, C. E., & Valverde, G. F. (2019). Lithium mining: Accelerating the transition to sustainable energy. *Resources Policy*, 62, 416-426.

Stewart, D. B. (1978). Petrogenesis of lithium-rich pegmatites. *American Mineralogist*, 63(9-10), 970-980.

- Stokes, P. E., Okamoto, M., Lieberman, K. W., Alexander, G., & Triana, E. (1982). Stable isotopes of lithium: in vivo differential distribution between plasma and cerebrospinal fluid. *Biological Psychiatry*, 17(4), 413-421.
- Su, X., Dogan, F., Ilavsky, J., Maroni, V. A., Gosztola, D. J., & Lu, W. (2017). Mechanisms for lithium nucleation and dendrite growth in selected carbon allotropes. *Chemistry of Materials*, 29(15), 6205-6213.
- Sun, Y., Wang, Q., Wang, Y., Yun, R., & Xiang, X. (2021). Recent advances in magnesium/lithium separation and lithium extraction technologies from salt lake brine. *Separation and Purification Technology*, 256, 117807.
- Talens Peiró, L., Villalba Méndez, G., & Ayres, R. U. (2013). Lithium: Sources, production, uses, and recovery outlook. *Jom*, 65, 986-996.
- Thakur, S., Tobey, A., & Klubo-Gwiedzinska, J. (2019). The Role of Lithium in Management of Endocrine Tumors—A Comprehensive Review. *Frontiers in Oncology*, 9, 1092. Toward lithium ion batteries with enhanced thermal conductivity. *ACS nano*, 8(7), 7202-7207.
- Vikström, H., Davidsson, S., & Höök, M. (2013). Lithium availability and future production outlooks. *Applied Energy*, 110, 252-266.
- von Schleyer, P. R. (1984). Remarkable structures of lithium compounds. *Pure and Applied Chemistry*, 56(1), 151-162.
- Wang, D. H., Dai, H. Z., Liu, S. B., Wang, C. H., Yu, Y., Dai, J. J., ... & Ma, S. C. (2020). Research and exploration progress on lithium deposits in China. *China Geology*, 3(1), 137-152.

Wanger, T. C. (2011). The Lithium future—resources, recycling, and the environment. *Conservation Letters*, 4(3), 202-206.

Weller, C., Pampel, J., Dörfler, S., Althues, H., & Kaskel, S. (2019). Polysulfide shuttle suppression by electrolytes with low-density for high-energy lithium–sulfur batteries. *Energy Technology*, 7(12), 1900625.

Xiao, J., Li, J., & Xu, Z. (2017). Recycling metals from lithium ion battery by mechanical separation and vacuum metallurgy. *Journal of hazardous materials*, 338, 124-131.

Xie, R., Zhao, Z., Tong, X., Xie, X., Song, Q., & Fan, P. (2023). Review of the research on the development and utilization of clay-type lithium resources. *Particuology*.

Xu, Z., Zheng, B., Zhu, W., Chen, Y., Li, G., Gao, J., ... & Yan, H. (2023). Geologic Scenario from Granitic sheet to Li-rich Pegmatite Uncovered by Scientific Drilling at the Jiajika Lithium Deposit in Eastern Tibetan Plateau. *Ore Geology Reviews*, 105636.

Yang, Y., Okonkwo, E. G., Huang, G., Xu, S., Sun, W., & He, Y. (2021). On the sustainability of lithium ion battery industry—A review and perspective. *Energy Storage Materials*, 36, 186-212.

Yao, X., Dong, Q., Cheng, Q., & Wang, D. (2016). Why do lithium–oxygen batteries fail: parasitic chemical reactions and their synergistic effect. *Angewandte Chemie International Edition*, 55(38), 11344-11353.

Yi, W., Jiang, X., Yang, T., Yang, B., Liu, Z., & Liu, X. (2020). Crystalline structures and energetic properties of lithium pentazolate under ambient conditions. *ACS omega*, 5(38), 24946-24953.

Yoneda, Y., Tamaki, K., & Kakuda, T. (2008). Disturbance of adult neurogenesis by PTSD. *The International Journal of Neuropsychopharmacology*, 11, 50.

Zhang, B., Qi, F. Y., Gao, X. Z., Li, X. L., Shang, Y. T., Kong, Z. Y., ... & Wang, G. D. (2022). Geological characteristics, metallogenic regularity, and research progress of lithium deposits in China. *China Geology*, 5(4), 734-767.

Zhang, J., Shao, D., Jiang, L., Zhang, G., Wu, H., Day, R., & Jiang, W. (2022). Advanced thermal management system driven by phase change materials for power lithium-ion batteries: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112207.

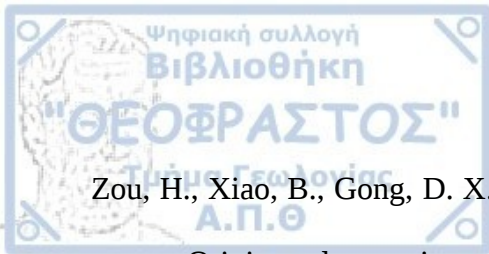
Zhang, M., Wang, T., & Cao, G. (2015). Promises and challenges of tin-based compounds as anode materials for lithium-ion batteries. *International Materials Reviews*, 60(6), 330-352.

Zhao, B., Jiang, L., Zeng, X., Zhang, K., Yuen, M. M., Xu, J. B., ... & Wong, C. P. (2016). A highly thermally conductive electrode for lithium ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(38), 14595-14604.

Zhao, H., Wang, Y., & Cheng, H. (2023). Recent advances in lithium extraction from lithium-bearing clay minerals. *Hydrometallurgy*, 106025.

Zhong, Z., Ouyang, C., Shi, S., & Lei, M. (2008). Ab initio Studies on Li^{4+} $\text{xTi}_5\text{O}_{12}$ Compounds as Anode Materials for Lithium-Ion Batteries. *ChemPhysChem*, 9(14), 2104-2108.

Zhou, C. X., Wang, P. B., Zhang, B., Tang, L. B., Tong, H., He, Z. J., & Zheng, J. C. (2019). Formation and effect of residual lithium compounds on Li-rich cathode material $\text{Li}_{1-35}[\text{Ni}_{0-35}\text{Mn}_{0-65}]\text{O}_2$. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(12), 11518-11526.



Zou, H., Xiao, B., Gong, D. X., Huang, C. C., Li, M., Yu, L. M., ... & Hu, C. H. (2022).

Origin and tectonic setting of Pingqiao fluorite-lithium deposit in the Guizhou, southwest Yangtze Block, China. *Ore Geology Reviews*, 143, 104755.

πρότυπο εμφάνισης κειμένου