



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

**Ηλεκτρικά αυτοκίνητα και περιβάλλον: στατιστική ανάλυση των
πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΚΟΝΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2025

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

**Ηλεκτρικά αυτοκίνητα και περιβάλλον: στατιστική ανάλυση των
πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΔΑΡΑΣ ΤΡΥΦΩΝ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΦΙΛΙΠΠΑΚΗΣ ΜΙΧΑΛΗΣ

ΑΠΟΣΤΟΛΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2025

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT	6
1.Ανάλυση καυσίμων - επιπτώσεις στο περιβάλλον.....	7
1.1 Καύσιμα για κινητήρες εσωτερικής καύσης.....	7
1.2 κατηγορίες καυσίμων	8
1.2.1 Ορυκτά καύσιμα.....	8
1.2.2 Ανανεώσιμα καύσιμα	13
1.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	16
2. Η ιστορία, η κατασκευή και οι επιπτώσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο περιβάλλον.....	22
2.1 Ιστορική Αναδρομή των Ηλεκτρικών Αυτοκινήτων	22
2.2 Τεχνολογία και Κατασκευή Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου	27
2.2.1 Συσσωρευτές	28
2.2.2 Υπερπυκνωτές.....	38
2.2.3 Κυψέλες καυσίμων	39
2.2.4 Μετατροπέας ισχύος (ελεγκτής)	40
2.2.5 Ηλεκτροκινητήρας.....	42
2.3 Οι επιπτώσεις της ηλεκτροκίνησης στο περιβάλλον	43
2.3.1 Αρνητικά παραγωγής μπαταριών	44
2.3.2 Αρνητικά ανακύκλωσης μπαταριών	57
2.3.3 Αρνητικά των πηγών προέλευσης της ενέργειας για την φόρτιση των μπαταριών	59
2.3.4 Επιπτώσεις όταν η ενέργεια παραγωγής προέρχεται από μη ανανεώσιμες πηγές	59
2.3.5 Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την λειτουργία των σταθμών φόρτισης.....	62
3. Σύγκριση μεταξύ των ηλεκτρικών και των συμβατικών οχημάτων	64
Συμπεράσματα	81
Βιβλιογραφία	83

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει το ενεργειακό ζήτημα στον τομέα των μεταφορών, εστιάζοντας στα καύσιμα που χρησιμοποιούνται από τα συμβατικά οχήματα και τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον, καθώς και στην εναλλακτική προοπτική που προσφέρουν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

Αρχικά, γίνεται αναλυτική παρουσίαση των κυριότερων τύπων καυσίμων που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, όπως η βενζίνη, το πετρέλαιο (diesel), το υγραέριο (LPG) και το φυσικό αέριο (CNG), περιγράφοντας τη διαδικασία παραγωγής τους και την ενεργειακή τους φύση (ορυκτά ή ανανεώσιμα καύσιμα). Κατόπιν, ακολουθεί εμπειριστατωμένη ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της χρήσης αυτών των καυσίμων, τόσο κατά την καύση τους όσο και κατά τα στάδια εξόρυξης, διύλισης και μεταφοράς, στη βάση τεκμηριωμένων στατιστικών και ερευνών.

Στη συνέχεια, η εργασία παρουσιάζει την ιστορική εξέλιξη του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, από τις πρώτες του εφαρμογές έως τη σύγχρονη τεχνολογική του αναγέννηση, εστιάζοντας στα επιμέρους τμήματά του, όπως η μπαταρία, ο ηλεκτροκινητήρας και τα συστήματα ελέγχου. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του ηλεκτρικού οχήματος, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη φάση παραγωγής όσο και τη φάση χρήσης του, με αναφορά σε ζητήματα όπως η ανακύκλωση των μπαταριών και το ενεργειακό αποτύπωμα της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η εργασία ολοκληρώνεται με μία συγκριτική αξιολόγηση των δύο τύπων οχημάτων – συμβατικών και ηλεκτρικών – σε επίπεδο περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και ενεργειακής απόδοσης. Στόχος είναι η ανάδειξη των δυνατοτήτων και των περιορισμών κάθε τεχνολογίας, καθώς και η υποστήριξη τεκμηριωμένων συμπερασμάτων για τη μελλοντική κατεύθυνση των βιώσιμων μεταφορών.

ABSTRACT

This paper examines the energy issue in the transportation sector, focusing on the fuels used by conventional vehicles and their environmental impacts, as well as the alternative perspective offered by electric vehicles.

Initially, a detailed presentation is made of the main types of fuels used in internal combustion engines, such as gasoline, diesel, liquefied petroleum gas (LPG), and compressed natural gas (CNG), describing their production processes and energy nature (fossil or renewable fuels). Then, a thorough analysis of the environmental impacts of using these fuels is provided, both during combustion and throughout the stages of extraction, refining, and transportation, based on documented statistics and research.

The paper then presents the historical evolution of the electric car, from its early applications to its modern technological revival, focusing on its components, such as the battery, electric motor, and control systems. Special emphasis is placed on the environmental impacts of electric vehicles, taking into account both the production phase and the usage phase, with references to issues like battery recycling and the energy footprint of electricity.

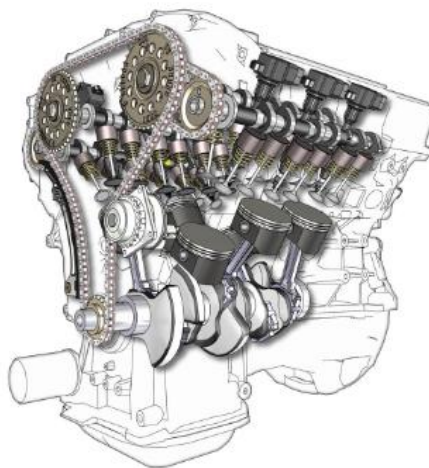
The paper concludes with a comparative assessment of the two types of vehicles – conventional and electric – in terms of environmental sustainability and energy efficiency. The goal is to highlight the possibilities and limitations of each technology, as well as to support well-founded conclusions regarding the future direction of sustainable transportation.

1.Ανάλυση καυσίμων - επιπτώσεις στο περιβάλλον

1.1 Καύσιμα για κινητήρες εσωτερικής καύσης

Τα καύσιμα αποτελούν μία από τις βασικότερες πηγές ενέργειας στον σύγχρονο κόσμο, διαδραματίζοντας καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία μηχανών και κυρίως κινητήρων εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engines - ICEs).

Ο όρος «καύσιμο» αναφέρεται σε οποιαδήποτε ουσία που μπορεί να οξειδωθεί, συνήθως με την παρουσία οξυγόνου, για να παραχθεί θερμική ενέργεια. Η θερμική αυτή ενέργεια στη συνέχεια μετατρέπεται σε κινητική ή ηλεκτρική ενέργεια. Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης είναι μια μηχανή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε μηχανική ενέργεια, καίγοντας το μίγμα καυσίμου και αέρα μέσα στους κυλίνδρους του. Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης βασίζονται στην καύση αυτών των καυσίμων μέσα στους κυλίνδρους τους, παράγοντας θερμότητα και πίεση, η οποία μετατρέπεται σε μηχανική κίνηση μέσω του μηχανισμού του κινητήρα. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την κίνηση των οχημάτων και τη λειτουργία διαφόρων μηχανών και μηχανισμών, καθιστώντας τα καύσιμα απαραίτητα για την καθημερινή ζωή και τη σύγχρονη βιομηχανία.



Εικόνα 1: Μηχανή εσωτερικής καύσης

Πηγή:

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%AE_%CE%B5%CF%83%CF%89%CF%84%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82_%CE%BA%CE%B1%CF%8D%CF%83%CE%B7%CF%82

Η χρήση των καυσίμων δεν περιορίζεται μόνο στον τομέα των μεταφορών, αλλά επεκτείνεται και σε άλλους τομείς όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η θέρμανση, καθώς και διάφορες βιομηχανικές διεργασίες. Για παράδειγμα, τα καύσιμα όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο χρησιμοποιούνται ευρέως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ τα στερεά καύσιμα όπως ο άνθρακας χρησιμοποιούνται επίσης σε μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις για τη θερμική παραγωγή ενέργειας.

Η χρήση των ορυκτών καυσίμων έχει ενισχύσει τη βιομηχανική ανάπτυξη και την οικονομική ανάπτυξη σε παγκόσμιο επίπεδο, δίνοντας την απαραίτητη ενέργεια για τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούμε καθημερινά. Ωστόσο, η συνεχιζόμενη εξάρτηση από

τα ορυκτά καύσιμα προκαλεί σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, κυρίως λόγω της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου, της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, και των αρνητικών επιπτώσεων στην ποιότητα του αέρα.

Η μελέτη της

- προέλευσης,
- της σύστασης,
- της χρήσης και
- των επιπτώσεων των καυσίμων

αποτελεί ένα κρίσιμο πρώτο βήμα για την κατανόηση των τεχνολογιών καύσης, των ενεργειακών στρατηγικών και της βιώσιμης ανάπτυξης. Το παρόν κεφάλαιο στοχεύει στην αναλυτική παρουσίαση των κυριότερων καυσίμων που χρησιμοποιούνται στους κινητήρες εσωτερικής καύσης, την προέλευσή τους και τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις.

1.2 Κατηγορίες καυσίμων

Η κατηγοριοποίηση των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στους κινητήρες εσωτερικής καύσης βασίζεται κυρίως (I) στην προέλευση και (II) τη δυνατότητα ανανέωσής τους. Έτσι, διακρίνονται σε **ορυκτά** και **ανανεώσιμα** καύσιμα. Τα ορυκτά καύσιμα προέρχονται από την επεξεργασία φυσικών πόρων που έχουν δημιουργηθεί μέσω γεωλογικών διεργασιών και απαιτούν εκατομμύρια χρόνια για να σχηματιστούν. Από την άλλη πλευρά, τα ανανεώσιμα καύσιμα παράγονται από πρώτες ύλες που μπορούν να ανανεώνονται φυσικά σε σύντομα χρονικά διαστήματα, όπως φυτικά ή οργανικά υλικά.

Η διάκριση αυτή δεν είναι μόνο θεωρητική, αλλά έχει σημαντικές πρακτικές προεκτάσεις που αφορούν

- το ενεργειακό αποτύπωμα,
- την οικονομική βιωσιμότητα,
- τη γεωπολιτική εξάρτηση από πηγές ενέργειας και
- τις περιβαλλοντικές συνέπειες που προκύπτουν από τη χρήση τους.

Η χρήση κάθε κατηγορίας καυσίμων συνοδεύεται από πλεονεκτήματα και προκλήσεις, τόσο σε τεχνικό όσο και σε κοινωνικο-οικονομικό επίπεδο, και γι' αυτό αποτελεί αντικείμενο έντονης μελέτης και έρευνας στον τομέα της ενέργειας και της μηχανολογίας (European Parliament, 2022).

1.2.1 Ορυκτά καύσιμα

Όσον αφορά τα ορυκτά καύσιμα, αυτά αποτελούν διαχρονικά τη βασική πηγή ενέργειας για τους κινητήρες εσωτερικής καύσης και γενικότερα για το σύνολο της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης. Η μεγάλη ενεργειακή τους απόδοση, η δυνατότητα μαζικής παραγωγής και η ήδη υπάρχουσα τεχνογνωσία και υποδομή γύρω από τη χρήση τους, τα έχουν καθιερώσει ως κύρια επιλογή στους περισσότερους τομείς των μεταφορών και της βιομηχανίας.

1.2.1.α Βενζίνη

Η βενζίνη αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα καύσιμα για κινητήρες εσωτερικής καύσης, κυρίως σε επιβατικά οχήματα, και παράγεται μέσω της διύλισης του αργού πετρελαίου. Η παραγωγική διαδικασία περιλαμβάνει μια σειρά πολύπλοκων χημικών και φυσικών διεργασιών που πραγματοποιούνται σε πετρελαϊκά διυλιστήρια. Το αργό πετρέλαιο, το οποίο εξάγεται από υπόγεια κοιτάσματα μέσω γεώτρησης, μεταφέρεται στα διυλιστήρια όπου υποβάλλεται σε αποθείωση και άλλες αρχικές διεργασίες καθαρισμού, προκειμένου να αφαιρεθούν οι ανεπιθύμητες προσμίξεις. Στη συνέχεια, ακολουθεί η διαδικασία της ατμοσφαιρικής απόσταξης, κατά την οποία το αργό πετρέλαιο θερμαίνεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και τα συστατικά του διαχωρίζονται βάσει των σημείων βρασμού τους.

Η βενζίνη εξάγεται από τα μεσαία κλάσματα της απόσταξης, σε θερμοκρασιακό εύρος περίπου 30–200°C. Ωστόσο, το απόσταγμα αυτό δεν είναι άμεσα κατάλληλο για χρήση ως καύσιμο, καθώς απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία ώστε να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά του. Για τον σκοπό αυτό εφαρμόζονται διεργασίες όπως η αναμόρφωση (reforming) και η αλκυλίωση (alkylation), οι οποίες αυξάνουν τον αριθμό οκτανίου της βενζίνης και συμβάλλουν στη βελτίωση της καύσης της στους κινητήρες. Συχνά, χρησιμοποιούνται πρόσθετα για την ενίσχυση της απόδοσης και την προστασία του κινητήρα από διαβρώσεις ή αποθέσεις.

Η τελική σύνθεση της βενζίνης είναι αποτέλεσμα ανάμειξης διαφόρων κλασμάτων και χημικών ενώσεων ώστε να πληροί τις προδιαγραφές ποιότητας και τις ρυθμιστικές απαιτήσεις. Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε οκτάνια, διατίθεται σε διαφορετικούς τύπους, οι οποίοι εξυπηρετούν διαφορετικές ανάγκες απόδοσης. Η παραγωγή βενζίνης αποτελεί ένα ώριμο τεχνολογικά πεδίο, που στηρίζεται σε προηγμένα μοντέλα διεργασιών και διαρκώς εξελισσόμενη χημική μηχανική, με στόχο τη μέγιστη απόδοση και ασφάλεια στην τελική χρήση (U.S. Energy Information Administration, 2025).



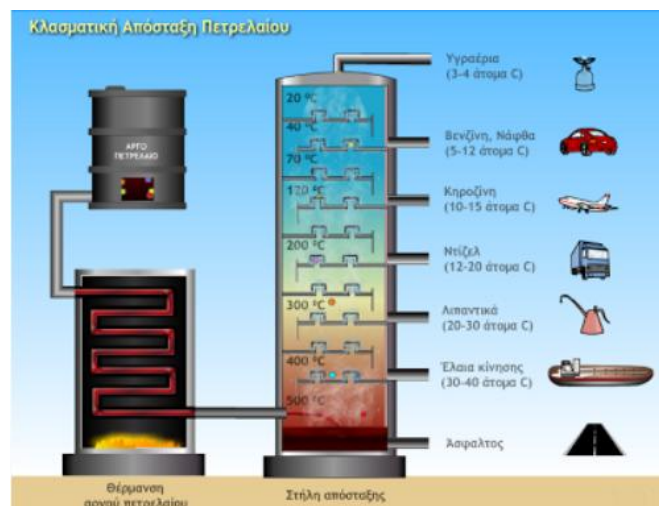
Εικόνα 2: Βενζίνη μέσα σε βάζο

Πηγή: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/39/Gasoline_in_mason_jar.jpg

1.2.1.β Πετρέλαιο

Το πετρέλαιο κίνησης, γνωστό και ως diesel, αποτελεί καύσιμο που παράγεται επίσης από τη διύλιση του αργού πετρελαίου, ακολουθώντας διαδικασίες παρόμοιες με αυτές της παραγωγής βενζίνης, αλλά με διαφοροποιήσεις ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τη θέση του στο φάσμα απόσταξης. Πρόκειται για ένα βαρύτερο κλάσμα του πετρελαίου, με σημείο βρασμού μεταξύ περίπου 200°C και 370°C, το οποίο καθιστά το diesel πιο πυκνό και ενεργειακά αποδοτικό σε σύγκριση με τη βενζίνη.

Η πρώτη φάση της παραγωγής του περιλαμβάνει τη θερμική απόσταξη, όπου το αργό πετρέλαιο θερμαίνεται και τα διάφορα συστατικά του διαχωρίζονται βάσει της πτητικότητάς τους. Το κλάσμα του diesel απομονώνεται στις υψηλότερες θερμοκρασίες από αυτές της βενζίνης και οδηγείται σε περαιτέρω επεξεργασία με σκοπό την αφαίρεση θείου και άλλων ανεπιθύμητων ενώσεων, μέσω της διαδικασίας της υδρογονοαποθείωσης (hydrosulfurization). Η αποθείωση είναι κρίσιμη, καθώς το πετρέλαιο περιέχει μεγαλύτερες ποσότητες θείου, η απομάκρυνση του οποίου είναι απαραίτητη για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών καύσης και την αποφυγή διαβρώσεων στο κινητήρα.



Εικόνα 3: Επεξεργασία πετρελαίου

Πηγή: <https://2epal-am.weebly.com/epsiloniotadeltaeta-kappaalphaphausilonsigmaiotamuomeganu.html>

Στη συνέχεια, το πετρέλαιο υποβάλλεται σε επιπλέον επεξεργασία για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του ως καύσιμο. Στόχος είναι να αποκτήσει κατάλληλο αριθμό κετανίου, ο οποίος σχετίζεται με την ποιότητα της καύσης στους κινητήρες diesel. Ο αριθμός κετανίου είναι αντίστοιχος του αριθμού οκτανίου στη βενζίνη, αλλά αφορά την ικανότητα ανάφλεξης του καυσίμου υπό πίεση και όχι μέσω σπινθήρα. Η τελική σύνθεση του καυσίμου περιλαμβάνει συχνά και προσθήκη πρόσθετων ουσιών για την ενίσχυση της ροής σε χαμηλές θερμοκρασίες, τη μείωση της φθοράς στα εξαρτήματα και τη βελτίωση της σταθερότητας αποθήκευσης.

Η παραγωγή του πετρελαίου diesel είναι ιδιαίτερα σημαντική στον τομέα των μεταφορών βαρέως τύπου, ενώ η διαδικασία εξευγενισμού του αποτελεί αντικείμενο συνεχούς εξέλιξης. Τα σύγχρονα διυλιστήρια προσαρμόζουν τις μονάδες τους για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του diesel, δεδομένης της υψηλής ζήτησης και της

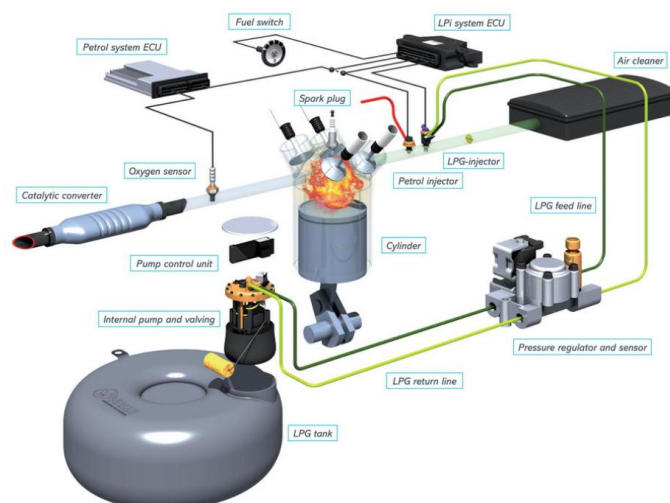
ενεργειακής του αποτελεσματικότητας στους σχετικούς κινητήρες (U.S. Energy Information Administration, 2025).

1.2.1.γ Υγραέριο

Το υγραέριο, γνωστό διεθνώς ως LPG (Liquefied Petroleum Gas), αποτελεί μείγμα ελαφρών υδρογονανθράκων, κυρίως προπανίου και βουτανίου, που βρίσκονται σε αέρια μορφή σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, αλλά υδροποιούνται εύκολα με μέτρια συμπίεση ή ψύξη. Η προέλευση του LPG είναι είτε ως παραπροϊόν της διύλισης του αργού πετρελαίου είτε ως παραγόμενο αέριο κατά τη φυσική εξόρυξη κοιτασμάτων φυσικού αερίου και πετρελαίου. Ως εκ τούτου, ανήκει στην κατηγορία των ορυκτών καυσίμων, παρόλο που απαιτεί ξεχωριστή επεξεργασία και δεν αποτελεί βασικό προϊόν των διυλιστηρίων.

Η παραγωγή LPG στα διυλιστήρια ξεκινά από τις πρώτες φάσεις της θερμικής ή καταλυτικής απόσταξης, όπου διαχωρίζονται οι ελαφρύτερες φάσεις του αργού πετρελαίου. Κατά τη διάρκεια αυτών των διεργασιών, το προπάνιο και το βουτάνιο διαχωρίζονται από τα υπόλοιπα κλάσματα και συγκεντρώνονται σε ειδικές μονάδες αποθήκευσης. Παράλληλα, σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας φυσικού αερίου, το LPG ανακτάται από τα υγρά φυσικού αερίου μέσω ψυκτικής συμπύκνωσης και άλλων φυσικών διεργασιών, προτού οδηγηθεί σε σταθεροποίηση και εμπορική διάθεση.

Το τελικό προϊόν αποθηκεύεται και μεταφέρεται υπό πίεση, σε υγρή μορφή, διευκολύνοντας τη διανομή και την κατανάλωση. Η δυνατότητα υδροποίησης χωρίς την ανάγκη εξαιρετικά υψηλών πιέσεων καθιστά το LPG εύκολα διαχειρίσιμο καύσιμο για πλήθος εφαρμογών, από οικιακή χρήση έως και κίνηση οχημάτων. Για τη χρήση του ως καύσιμο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης απαιτούνται συγκεκριμένες τεχνικές τροποποιήσεις στο σύστημα παροχής και ψεκασμού καυσίμου του οχήματος, έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργεί είτε αποκλειστικά με LPG είτε σε συνδυασμό με άλλα καύσιμα.



Εικόνα 4: Υγραεριοκίνηση

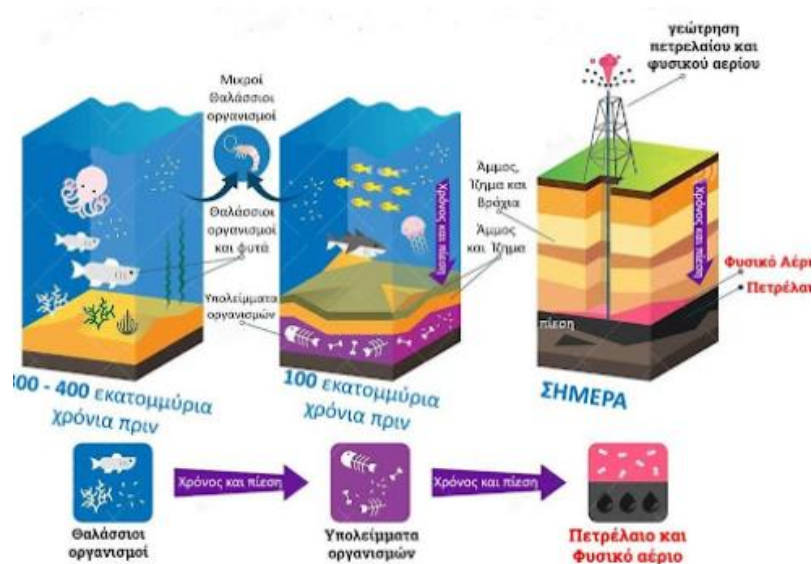
Πηγή: <https://www.caroto.gr/2010/12/15/%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%AF-%CF%85%CE%B3%CF%81%CE%B1%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%BF%CE%BA%CE%AF%CE%BD%CE%B7%CF%83%CE%B7%CF%82/>

Η σύσταση του LPG ελέγχεται αυστηρά και ποικίλλει ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής διάθεσης, καθώς ο λόγος προπανίου προς βουτανίου μεταβάλλεται για να διατηρούνται οι κατάλληλες φυσικές ιδιότητες ρευστότητας. Η διαδικασία παραγωγής του χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό αυτοματισμού και τεχνολογικής ωριμότητας, ενώ η χρήση του είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε παγκόσμιο επίπεδο λόγω της ευκολίας αποθήκευσης και μεταφοράς του (U.S. Energy Information Administration, 2025).

1.2.1.δ Φυσικό αέριο

Το φυσικό αέριο, όταν χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, είναι συνήθως σε μορφή CNG (Compressed Natural Gas), δηλαδή σε συμπιεσμένη κατάσταση. Το CNG αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4), ένα απλό και ελαφρύ υδρογονάνθρακα, και εξάγεται απευθείας από υπόγεια γεωλογικά κοιτάσματα. Η εξόρυξή του πραγματοποιείται είτε ως κύριο προϊόν από πεδία φυσικού αερίου είτε ως παραπροϊόν κατά την άντληση πετρελαίου. Το φυσικό αέριο θεωρείται ορυκτό καύσιμο, καθώς προέρχεται από οργανική ύλη που έχει υποστεί γεωλογική μετατροπή κατά την πάροδο εκατομμυρίων ετών.

Η επεξεργασία του φυσικού αερίου περιλαμβάνει διάφορα στάδια καθαρισμού, καθώς το αέριο εξέρχεται από το υπέδαφος μαζί με πλήθος άλλων αερίων και ρυπαντών, όπως διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο, άζωτο, υδρατμούς και υγρούς υδρογονάνθρακες. Σε μονάδες επεξεργασίας, οι ανεπιθύμητες ενώσεις απομακρύνονται με φυσικοχημικές διεργασίες όπως απορρόφηση, απόπλυση ή προσρόφηση, ώστε να διασφαλιστεί η καθαρότητα και η σταθερότητα του τελικού προϊόντος. Το καθαρό μεθάνιο στη συνέχεια συμπιέζεται σε πίεση της τάξης των 200–250 bar, προκειμένου να μειωθεί ο όγκος του και να καταστεί δυνατή η αποθήκευση και η μεταφορά του σε φιάλες υψηλής πίεσης, ειδικά σχεδιασμένες για χρήση σε οχήματα.



Εικόνα 5: Σχηματισμός φυσικού αερίου

Πηγή: http://www.daskalosa.eu/physics_st/9.%CE%A6%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CF%8C-%CE%B1%CE%AD%CF%81%CE%B9%CE%BF--%CE%88%CE%BD%CE%B1-%CF%80%CE%BF%CE%BB%CF%8D%CF%84%CE%B9%CE%BC%CE%BF-%CE%B1%CE%AD%CF%81%CE%B9%CE%BF-.html

Η χρήση του CNG ως καύσιμο απαιτεί συγκεκριμένη τεχνολογική υποδομή σε επίπεδο κινητήρων, με εξειδικευμένα συστήματα ψεκασμού και ελέγχου της παροχής καυσίμου, ενώ η αποθήκευσή του πραγματοποιείται σε κυλίνδρους κατασκευασμένους από ανθεκτικά υλικά, ικανά να αντέχουν σε υψηλές πιέσεις. Παρά το γεγονός ότι η συμπίεση δεν αλλάζει τη χημική σύσταση του φυσικού αερίου, απαιτείται προηγμένη τεχνογνωσία και αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας για τη διαχείριση και τη χρήση του.

Το φυσικό αέριο στη μορφή του CNG αποτελεί μια ώριμη τεχνολογία, με ευρεία εφαρμογή σε οχήματα δημόσιας χρήσης, στόλους λεωφορείων, καθώς και σε ιδιωτικά αυτοκίνητα, σε χώρες όπου υπάρχει ανεπτυγμένο δίκτυο ανεφοδιασμού. Η αξιοποίησή του βασίζεται σε επενδύσεις στην εφοδιαστική αλυσίδα και την υποδομή, ενώ η ίδια η διαδικασία παραγωγής του χαρακτηρίζεται από συνεχή πρόοδο σε επίπεδο αυτοματισμών και ασφάλειας (U.S. Energy Information Administration, 2025).

1.2.2 Ανανεώσιμα καύσιμα

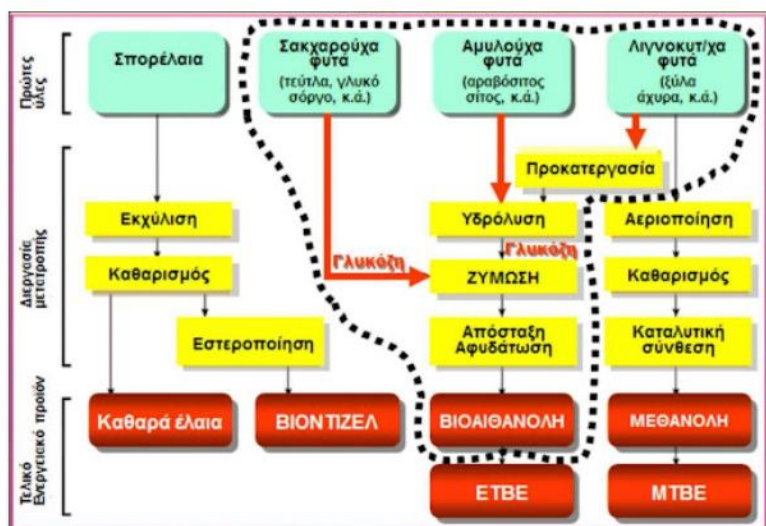
Όσον αφορά τα ανανεώσιμα καύσιμα, αυτά αποτελούν μία ταχέως αναπτυσσόμενη κατηγορία ενεργειακών πηγών, με στόχο την αντικατάσταση ή τον συμπληρωματικό ρόλο έναντι των παραδοσιακών ορυκτών καυσίμων στους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Προερχόμενα κυρίως από βιολογικές πρώτες ύλες, όπως φυτικά έλαια, γεωργικά υπολείμματα ή προϊόντα ζύμωσης σακχάρων, τα ανανεώσιμα καύσιμα διαθέτουν το πλεονέκτημα της δυνατότητας αναπαραγωγής σε σύντομα χρονικά διαστήματα, σε αντίθεση με τους μακροχρόνιους γεωλογικούς κύκλους σχηματισμού των ορυκτών καυσίμων. Η χρήση τους συνδέεται με την προσπάθεια μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς σε πολλές περιπτώσεις θεωρείται ότι οι εκπομπές CO₂ που παράγονται κατά την καύση τους αντισταθμίζονται από το CO₂ που απορροφάται κατά τη βιολογική ανάπτυξη των φυτικών πρώτων υλών.

Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων καυσίμων στον τομέα των μεταφορών υποστηρίζεται ενεργά από ευρωπαϊκές και διεθνείς πολιτικές για την προώθηση της πράσινης ενέργειας και την επίτευξη των στόχων βιωσιμότητας. Επιπλέον, πολλά από αυτά τα καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε αυτούσια είτε σε μείγματα με συμβατικά καύσιμα, διευκολύνοντας έτσι τη μετάβαση χωρίς την ανάγκη άμεσης αντικατάστασης του υπάρχοντος στόλου οχημάτων. Παρά τις τεχνολογικές προόδους, η παραγωγή ανανεώσιμων καυσίμων εξακολουθεί να αντιμετωπίζει προκλήσεις που σχετίζονται με το κόστος, τη διαθεσιμότητα πρώτων υλών και τον ανταγωνισμό με άλλες χρήσεις της γης, όπως η παραγωγή τροφίμων. Ωστόσο, η εξέλιξη της βιοτεχνολογίας και των διαδικασιών μετατροπής της βιομάζας ενισχύει τη δυναμική των καυσίμων αυτών ως βασικού πυλώνα ενός μελλοντικού, βιώσιμου ενεργειακού συστήματος στον τομέα των μεταφορών.

1.2.2.α Βιοαιθανόλη

Η βιοαιθανόλη είναι ένα ανανεώσιμο καύσιμο που παράγεται μέσω της ζύμωσης σακχάρων που βρίσκονται σε φυτικά προϊόντα, όπως το καλαμπόκι, το ζαχαροκάλαμο και άλλες πρώτες ύλες πλούσιες σε άμυλο ή σάκχαρα. Η διαδικασία παραγωγής της βιοαιθανόλης αρχίζει με την απορρόφηση του φυτικού υλικού και την εξαγωγή των σακχάρων από αυτό. Συνήθως, τα αμυλούχα φυτά υποβάλλονται σε θερμική επεξεργασία για να διασπαστούν τα αμυλόζη και να μετατραπούν σε απλά σάκχαρα,

τα οποία στη συνέχεια ζυμώνονται από ζύμες (κυρίως *Saccharomyces cerevisiae*). Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η ζύμη καταναλώνει τα σάκχαρα και παράγει αιθανόλη και διοξείδιο του άνθρακα ως υποπροϊόντα. Στη συνέχεια, η αιθανόλη καθαρίζεται και αποστάζεται για να επιτευχθεί η απαραίτητη καθαρότητα.



Εικόνα 6: Παραγωγή βιοαιθανόλης

Πηγή:

<http://www.agroenergy.gr/categories/%ce%b2%ce%b9%ce%bf%ce%b1%ce%b9%ce%b8%ce%b1%ce%bd%cf%8c%ce%bb%ce%b7>

Η βιοαιθανόλη χρησιμοποιείται κυρίως ως καύσιμο για κινητήρες εσωτερικής καύσης, είτε σε καθαρή μορφή είτε ως μείγμα με βενζίνη. Στους κινητήρες αυτούς, η βιοαιθανόλη χρησιμοποιείται κυρίως για τη βελτίωση της αποδοτικότητας καύσης, τη μείωση των εκπομπών ρύπων και την υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων.

Η βιοαιθανόλη, λόγω της υψηλής οκτανικής της τιμής, έχει την ικανότητα να αυξάνει την απόδοση του κινητήρα, αφού καθιστά πιο εύκολη την καύση με υψηλότερη σχέση συμπίεσης. Το καύσιμο αυτό, όταν χρησιμοποιείται σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, προάγει επίσης την καύση με χαμηλότερη θερμοκρασία, κάτι που μπορεί να μειώσει την εκπομπή μονοξειδίου του άνθρακα και άλλων επικίνδυνων ουσιών. Στην πράξη, αναμειγνύεται με τη βενζίνη για τη δημιουργία ενός μείγματος που είναι συμβατό με τα περισσότερα συστήματα κινητήρων, επιτρέποντας την πιο ευρεία χρήση της στον τομέα των μεταφορών (Zhang et al., 2023).

1.2.2.β Βιοντίζελ

Από την άλλη πλευρά, το βιοντίζελ είναι ένα άλλο σημαντικό ανανεώσιμο καύσιμο που παράγεται μέσω της επεξεργασίας φυτικών ελαίων ή ζωικών λιπών.



Εικόνα 7: Τρόπος παραγωγής βιοντίζελ

Πηγή:

<http://www.agroenergy.gr/categories/%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE-%CE%B2%CE%B9%CE%BF%CE%BD%CF%84%CE%AF%CE%B6%CE%B5%CE%BB>

Η διαδικασία παραγωγής του βιοντίζελ περιλαμβάνει τη μέθοδο της μετατροπής αυτών των ελαίων σε λιπαρά οξέα με τη βοήθεια της μεθυλοποίησης ή της αιθυλοποίησης, χρησιμοποιώντας μεθανόλη ή αιθανόλη και ένα καταλύτη (συνήθως υδροξείδιο του νατρίου ή του καλίου). Αυτή η αντίδραση παράγει μεθυλεστέρες (ή αιθυλεστέρες), οι οποίοι είναι τα βασικά συστατικά του βιοντίζελ. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας μετατροπής, το βιοντίζελ καθαρίζεται και είναι έτοιμο για χρήση.



Εικόνα 8: Τρόπος παραγωγής βιοντίζελ

Πηγή: <http://www.agroenergy.gr/content/%CE%BC%CE%BF%CE%BD%CE%AC%CE%B4%CE%B5%CF%82-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%BF%CF%83%CF%84%CE%AC%CF%83%CE%B9%CE%B1-%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%CF%82-%CE%B2%CE%B9%CE%BF%CE%BD%CF%84%CE%AF%CE%B6%CE%B5%CE%BB>

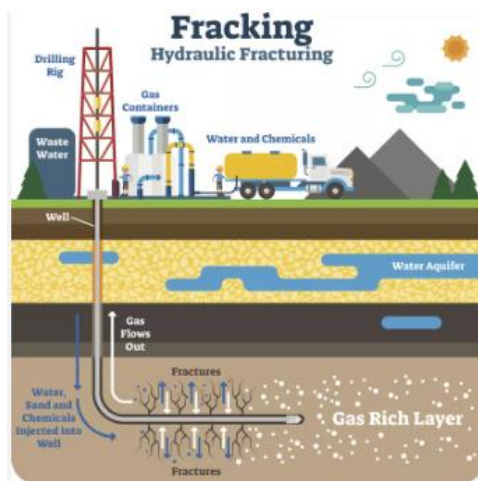
Το βιοντίζελ χρησιμοποιείται στους κινητήρες εσωτερικής καύσης ως υποκατάστατο του πετρελαίου ντίζελ, ενώ σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να αναμιχθεί με το παραδοσιακό ντίζελ σε διάφορους λόγους, ανάλογα με τη διάθεση των κινητήρων και

των συστημάτων καυσίμου. Οι κινητήρες που λειτουργούν με βιοντίζελ δεν απαιτούν σημαντικές τροποποιήσεις σε σχέση με τους κινητήρες που χρησιμοποιούν παραδοσιακό πετρέλαιο ντίζελ. Το βιοντίζελ έχει την ικανότητα να βελτιώνει την καύση, προσφέροντας υψηλότερη ποιότητα και καθαρότερη καύση σε σύγκριση με το παραδοσιακό ντίζελ. Η υψηλή περιεκτικότητα σε οξέα λιπαρά ωμέγα-3 βοηθά στην καλύτερη λίπανση των κινητήρων και στη μείωση της φθοράς των εξαρτημάτων τους. Επιπλέον, οι κινητήρες που χρησιμοποιούν βιοντίζελ μπορούν να μειώσουν την παραγωγή επιβλαβών ρύπων, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, οι υδρογονάνθρακες και τα οξείδια του αζώτου, αν και οι επιπτώσεις του βιοντίζελ στους ρύπους εξαρτώνται από τη σύσταση και τη χρήση του καυσίμου (Kosuru et al., 2024).

1.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η χρήση των συμβατικών καυσίμων στους κινητήρες εσωτερικής καύσης, όπως η βενζίνη, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, έχει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, τόσο κατά την εξόρυξη και παραγωγή τους όσο και κατά την κατανάλωσή τους.

Ένα από τα πλέον ανησυχητικά ζητήματα είναι η **υδραυλική ρωγμάτωση** (fracking), μια μέθοδος εξόρυξης σχιστολιθικού αερίου και πετρελαίου που απαιτεί τεράστιες ποσότητες νερού. Κάθε γεώτρηση μπορεί να χρησιμοποιεί από 1,5 έως και 16 εκατομμύρια γαλόνια νερού (περίπου 5,7 έως 60,5 εκατομμύρια λίτρα), με αποτέλεσμα την εξάντληση των τοπικών υδάτινων πόρων και την πιθανή ρύπανση των υπόγειων υδάτων με τοξικές ουσίες, όπως αρσενικό και υδράργυρο. Επιπλέον, μόνο το 15–35% του χρησιμοποιούμενου νερού ανακτάται, αυξάνοντας τον κίνδυνο ρύπανσης και ελλείψεων νερού σε περιοχές με ήδη περιορισμένους υδάτινους πόρους (FracTracker Alliance, n.d.).



Εικόνα 9: Υδραυλική ρωγμάτωση

Πηγή: <https://www.skai.gr/news/environment/i-ydryayliki-rogmatosi-fracking-prokalei-ena-neou-typou-seismo>

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που ανακύπτει είναι οι πετρελαιοκηλίδες, οι οποίες αποτελούν μια άλλη σοβαρή περιβαλλοντική απειλή. Το 2010, η καταστροφή της πλατφόρμας Deepwater Horizon στον Κόλπο του Μεξικού προκάλεσε τη διαρροή περίπου 205,8 εκατομμυρίων γαλονιών πετρελαίου, επηρεάζοντας δραματικά τη

θαλάσσια ζωή και τα οικοσυστήματα (Encyclopaedia Britannica, 2025). Παρά τις προσπάθειες καθαρισμού, μεγάλες ποσότητες πετρελαίου παραμένουν στο περιβάλλον, με μακροχρόνιες επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα. Αντίστοιχα, το 1989, η πετρελαιοκηλίδα του Exxon Valdez στην Αλάσκα προκάλεσε τον θάνατο εκατοντάδων χιλιάδων θαλάσσιων πτηνών και άλλων ζώων, με τις επιπτώσεις να είναι αισθητές για δεκαετίες (National Oceanic and Atmospheric Administration, n.d.).



Εικόνα 10: Πετρελαιοκηλίδα λόγω της πλατφόρμας Deepwater Horizon στον Κόλπο του Μεξικού

Πηγή: <https://www.taxydromos.gr/perivallon/684209/kolpos-mexikoy-to-quot-chameno-quot-petrelaio-tis-platformas-deepwater-horizon/>

Επιπλέον, η μεταφορά πετρελαίου μέσω αγωγών δεν είναι απαλλαγμένη από κινδύνους. Ο αγωγός Keystone, που μεταφέρει πετρέλαιο από τον Καναδά στις ΗΠΑ, έχει υποστεί πολλές διαρροές από την έναρξη λειτουργίας του το 2010, με σημαντικότερη αυτή του 2022 στο Κάνσας, όπου διέρρευσαν περίπου 14.000 βαρέλια πετρελαίου σε ένα ρυάκι. Αυτά τα περιστατικά υπογραμμίζουν την ευαλωτότητα των υποδομών και την ανάγκη για αυστηρότερη εποπτεία και συντήρηση (Sainato, 2022).

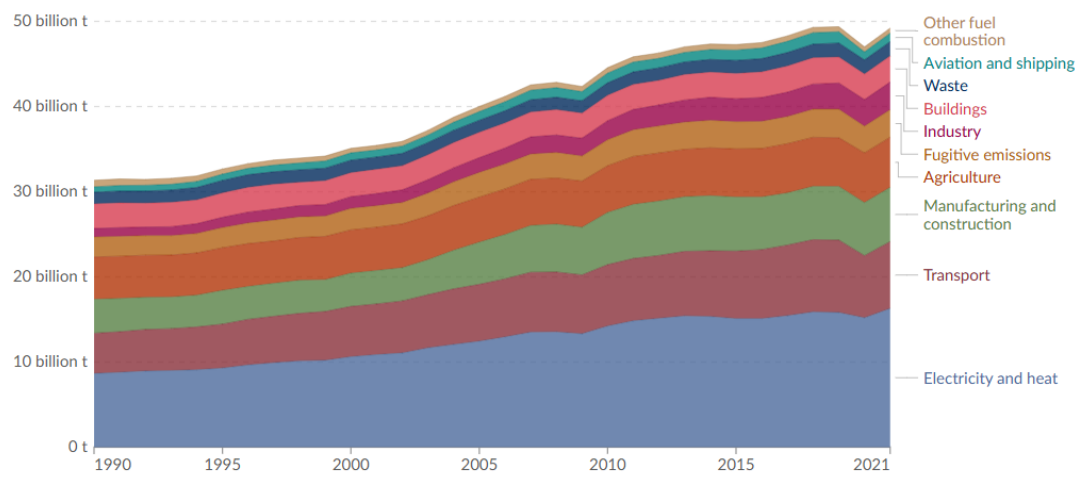


Εικόνα 11: αγωγός Keystone

Πηγή: <https://www.ekirikas.com/ekleise-prosorina-o-agogos-keystone-logo-diar/>
<https://www.alt.gr/ipa-kanadas-ekleise-prosorina-o-agogo/>

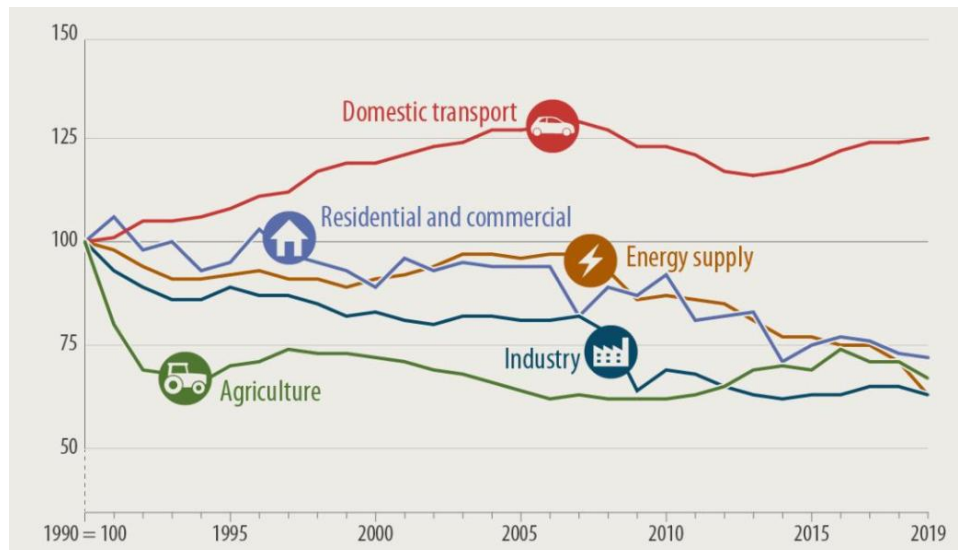
Παράλληλα, η καύση ορυκτών καυσίμων στους κινητήρες εσωτερικής καύσης αποτελεί μία από τις βασικές πηγές εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, και κυρίως

διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), το οποίο ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA, 2022), ο τομέας των μεταφορών συνεισφέρει περίπου το 24% των παγκόσμιων ενεργειακών εκπομπών CO₂, με τα επιβατικά οχήματα να ευθύνονται για σχεδόν το ήμισυ αυτών. Η συνεχής αύξηση του αριθμού των οχημάτων παγκοσμίως επιτείνει την έκλυση αυτών των ρύπων, εντείνοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου και τις συνακόλουθες κλιματικές αλλαγές.



Εικόνα 12: Εκκλήσεις CO₂ ανά τομέα

Πηγή: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>

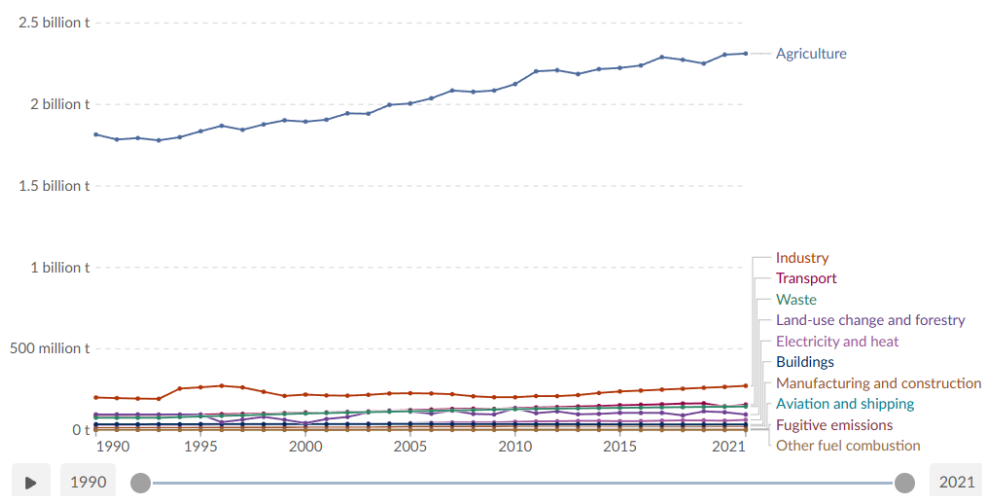


Εικόνα 13: Χρονική εξέλιξη εκκλήσεων CO₂ ανά τομέα στην ΕΕ

Πηγή: <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>

Επιπλέον, η καύση καυσίμων παράγει και πλήθος άλλων ρυπογόνων ουσιών, όπως οξείδια του αζώτου (NO_x), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) και μικροσωματίδια (PM_{2.5} και PM₁₀). Οι συγκεκριμένοι ρύποι όχι μόνο υποβαθμίζουν την ποιότητα του αέρα, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές, αλλά

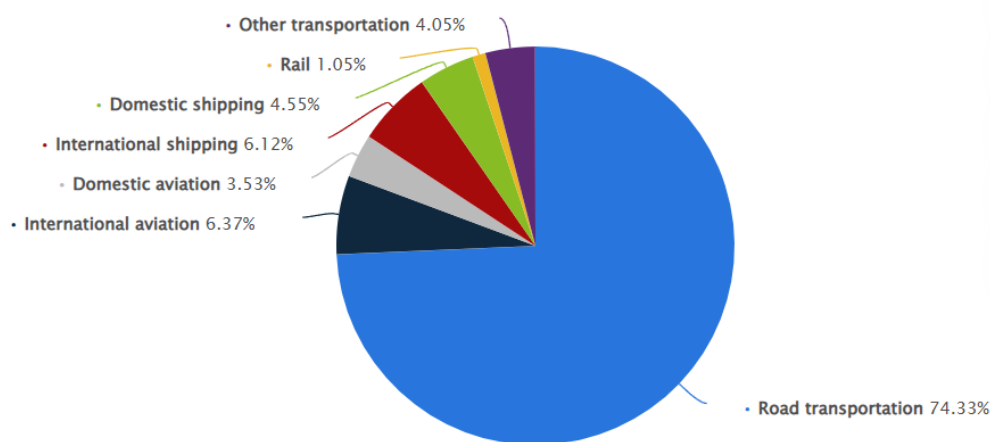
σχετίζονται και με σοβαρές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία. Σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από τα αυτοκίνητα αποτελούν σημαντικό παράγοντα στις συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ).



Εικόνα 14: Εκκλήσεις CO₂ ανά τομέα

Πηγή: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>

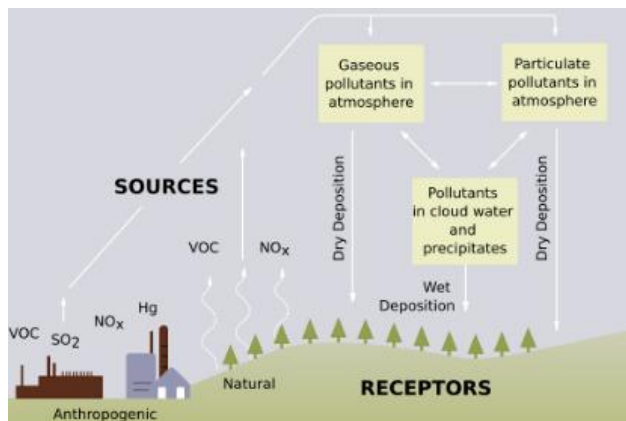
Αναλυτικά, ο τομέας των μεταφορών ευθύνεται για περίπου το 25% των συνολικών εκπομπών CO₂ στην ΕΕ, με το 71,7% αυτών να προέρχεται από τις οδικές μεταφορές. Οι επιβατικές μεταφορές με αυτοκίνητα αποτελούν τον κύριο παράγοντα ρύπανσης, αντιπροσωπεύοντας το 61% των εκπομπών CO₂ από τις οδικές μεταφορές στην ΕΕ. Το μέσο ποσοστό πληρότητας των αυτοκινήτων στην Ευρώπη ήταν μόλις 1,6 άτομα ανά όχημα το 2018, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αύξηση της πληρότητας μέσω κοινής χρήσης οχημάτων ή η μετάβαση σε δημόσια μέσα μεταφοράς, ποδηλασία και πεζοπορία θα μπορούσε να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών.



Εικόνα 15: Εκκλήσεις CO₂ ανά τομέα μετακίνησης

Πηγή: <https://www.statista.com/statistics/1185535/transport-carbon-dioxide-emissions-breakdown/>

Ένα επιπλέον πρόβλημα αφορά την οξίνιση του εδάφους και των υδάτινων οικοσυστημάτων. Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου και διοξειδίου του θείου από την καύση ορυκτών καυσίμων οδηγούν στον σχηματισμό όξινης βροχής, η οποία μεταβάλλει τη χημική σύσταση του εδάφους και των επιφανειακών νερών, διαταράσσοντας τη φυσιολογική ισορροπία των οικοσυστημάτων και απειλώντας τη χλωρίδα και την πανίδα (UNEP, 2020).



Εικόνα 16: Δημιουργία όξινης βροχής

Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Acid_rain

Η εξόρυξη και η μεταφορά των καυσίμων προκαλεί, επίσης, σημαντική υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος. Η δημιουργία υποδομών για εξόρυξη και αγωγούς μεταφοράς οδηγεί στην αποψίλωση δασών, την καταστροφή ενδιαιτημάτων άγριας ζωής και την αποσταθεροποίηση του εδάφους. Χαρακτηριστικό είναι το φαινόμενο της διάβρωσης του εδάφους σε περιοχές εντατικής εξορυκτικής δραστηριότητας, καθώς και η υποβάθμιση υπόγειων υδάτινων αποθεμάτων από τις χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται ή διαρρέουν κατά τη διαδικασία.

Αξιοσημείωτη είναι και η ηχορύπανση που προκαλείται από τα συμβατικά οχήματα, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή κυκλοφορία. Αν και η ηχητική ρύπανση δεν έχει άμεση επίδραση στο φυσικό περιβάλλον, έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, επιδρώντας στη ψυχική ευεξία, τον ύπνο και τη συγκέντρωση, ενώ επηρεάζει αρνητικά και την άγρια ζωή (Greenpeace, 2021).

Εκτός από τις ήδη αναφερθείσες επιπτώσεις, η χρήση συμβατικών καυσίμων στους κινητήρες εσωτερικής καύσης προκαλεί μια σειρά από άλλες σημαντικές περιβαλλοντικές συνέπειες. Για παράδειγμα η εξάτμιση και η διαρροή βενζίνης από δεξαμενές αποθήκευσης και πρατήρια καυσίμων οδηγεί σε ρύπανση του εδάφους και των υπόγειων υδάτων. Η βενζίνη περιέχει τοξικές ενώσεις όπως βενζόλιο, τολουόλιο και ξυλόλιο, οι οποίες είναι γνωστές καρκινογόνες ουσίες. Η εισπνοή των ατμών αυτών των ουσιών μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υγείας.

Επιπλέον, η καύση βενζίνης και πετρελαίου συμβάλλει στη δημιουργία φωτοχημικού νέφους, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές με υψηλή κυκλοφορία. Το νέφος αυτό σχηματίζεται όταν οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου και πτητικών οργανικών ενώσεων αντιδρούν υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, παράγοντας όζον σε επίπεδο εδάφους. Το όζον αυτό είναι επιβλαβές για την ανθρώπινη υγεία, προκαλώντας

αναπνευστικά προβλήματα και επιδεινώνοντας παθήσεις όπως το άσθμα (WHO, 2021).

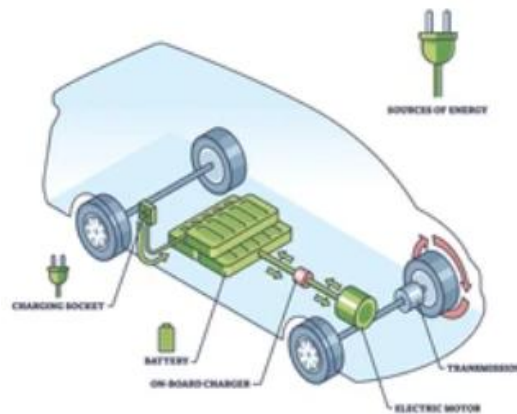
Τέλος, η εξάρτηση από τα συμβατικά καύσιμα συμβάλλει στην αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, επιδεινώνοντας το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής. Η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη οδηγεί σε ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως καύσωνες, πλημμύρες και ξηρασίες, με σοβαρές επιπτώσεις για το περιβάλλον και την ανθρώπινη κοινωνία.

Συμπερασματικά, η χρήση συμβατικών καυσίμων στους κινητήρες εσωτερικής καύσης έχει πολυδιάστατες και σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη για μετάβαση σε καθαρότερες και βιώσιμες μορφές ενέργειας.

2. Ηλεκτρικά αυτοκίνητα: ιστορία, κατασκευή και επιπτώσεις των στο περιβάλλον

2.1 Ιστορική Αναδρομή των Ηλεκτρικών Αυτοκινήτων

Ως **ηλεκτρικό αυτοκίνητο** θεωρείται το όχημα το οποίο δεν χρησιμοποιεί κάποιο καύσιμο για την κίνησή του. Αντίθετα, αυτή η κίνηση εξαρτάται αποκλειστικά από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αποθηκεύεται στις μπαταρίες.



Εικόνα 17: Ηλεκτρικό αυτοκίνητο

Πηγή: <https://www.shutterstock.com/image-vector/bev-battery-electric-vehicle-car-inner-2214186063>

Ιδιαίτερα από τεχνικής άποψης, τα ηλεκτρικά οχήματα συναντώνται σε διάφορες παραλλαγές ως προς την πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν, αλλά και ως προς τον τρόπο παραγωγής της κίνησής τους. Επιπλέον παρά τις διαφορές τους, μεταξύ τους υπάρχει ένα κοινό χαρακτηριστικό, που είναι η ύπαρξη ενός τουλάχιστον ηλεκτρικού κινητήρα, ο οποίος συμβάλει στην ώθηση του οχήματος.



Εικόνα 18: Ηλεκτρικό όχημα του Robert Anderson

Πηγή: <https://www.story-cars.com/1832-1839-robert-anderson-s-electric-carriage>

Ωστόσο τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν μια μακρόχρονη ιστορία, η οποία ξεκινά στα μέσα του 19ου αιώνα, περίπου 170 χρόνια πριν. Ένας από τους πατέρες της ηλεκτροκίνησης μπορεί να θεωρηθεί ο Robert Anderson (σκωτσέζικης καταγωγής), ο οποίος ήταν γνωστός για τις εφευρέσεις του. Δυστυχώς, λεπτομέρειες για την εφεύρεσή του δεν διασώζονται, ωστόσο, είναι ιστορικά αποδεκτό πως την περίοδο μεταξύ του 1832-1839 σχεδίασε, δημιούργησε και δοκίμασε την πρώτη άμαξα η οποία δεν χρειαζόταν την υποστήριξη αλόγων για την μετακίνησή της (horseless carriage), αλλά στηριζόταν στην ύπαρξη μιας μη-επαναφορτιζόμενης μπαταρίας (Hawkins H., 2014).

Εκτός από τον Anderson, ένας άλλος εφευρέτης που ερευνούσε το ενδεχόμενο δημιουργίας ενός παρόμοιου οχήματος, ήταν ο (ολλανδικής καταγωγής) Sibrandus Stratingh, ο οποίος εργαζόταν ως καθηγητής Χημείας στο πανεπιστήμιο του Groningen. Ο ίδιος ήταν πεπεισμένος πως μέσω της τεχνολογίας η μεταφορά των ανθρώπων και των αμαξών με άλογα θα ήταν πλέον περιττή. Συγκεκριμένα, ο Stratingh, μαζί με το γερμανό φίλο του και εφευρέτη Christopher Becker βρίσκονταν στην αρχή μιας επιστημονικής ανακάλυψης η οποία στηριζόταν στην ατμοκίνηση. Στις 25 Μαρτίου του 1834 η εφημερίδα *“The Provincial Groninger Courant”* δημοσίευσε ένα άρθρο στο οποίο ανέφερε πως το πρωί της 22ας Μαρτίου οι δύο αυτοί επιστήμονες πραγματοποίησαν το πρώτο επίσημο ταξίδι πάνω στην μηχανή ατμού που είχαν κατασκευάσει, ακολουθώντας ένα δυσμενές μονοπάτι. Δυστυχώς, η εφεύρεσή τους κρίθηκε ως αναποτελεσματική. Ωστόσο το 1835 ο Stratingh ενώ έδινε μία διάλεξη στη Royal Physics Society στο Groningen στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής κίνησης, εμπνεύστηκε την δημιουργία ενός, μικρής κλίμακας, ηλεκτρικού οχήματος (Nigel Burton , 2013).



Εικόνα 19: Η πρώτη προσπάθεια για την προώθηση της Ηλεκτροκίνησης από τον Sibrandus Stratingh .

Πηγή: Hawkins, H. (2014). The history of electric vehicles: From the first electric car to modern-day models. Green Energy Publishing.

Πρακτικά η κατασκευή αφορούσε μία μικρή ξύλινη πλατφόρμα, στην οποία ήταν τοποθετημένη μία γαλβανική μπαταρία, η οποία αποτελούνταν από δύο πλάκες, μία ψευδαργύρου και μία χαλκού. Οι πλάκες αυτές ήταν τυλιγμένες μαζί, αλλά χωρισμένες μεταξύ τους από ξύλινες ράβδους, ενώ παράλληλα στηρίζονταν σε ένα πορσελάνινο δοχείο, το οποίο περιείχε αραιωμένο οξύ. Ο ίδιος ο Stratingh περιέγραψε αυτή τη

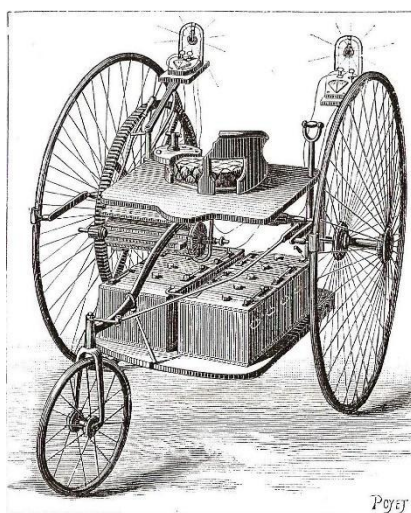
μηχανή ως το πρώτο ηλεκτρικό μοτέρ. Πιο συγκεκριμένα, η εφεύρεση ζύγιζε περίπου τρία κιλά, ενώ μπορούσε να λειτουργήσει για περίπου δεκαπέντε λεπτά, κουβαλώντας περίπου 1,5 kg, δηλαδή το μισό του βάρους της. Κάποιες από τις παραλλαγές του ηλεκτρικού αυτού του μοτέρ διασώζονται στο μουσείο Boerhaave, στο Λέιντεν της Ολλανδίας (Nigel Burton, 2013).



Εικόνα 20: Ηλεκτρικό αυτοκίνητο Stratingh

Πηγή: <https://www.thedrive.com/new-cars/40489/1881-trouv-electric-tricycle-replica-review-super-enlightening-mildly-terrifying>

Κατόπιν, το 1881 περίπου, παρουσιάστηκε η πρώτη ηλεκτρική μηχανή, η οποία τροφοδοτούταν από επαναφορτιζόμενες μπαταρίες (Szenasy E., n.d.). Ο Γάλλος ερευνητής Gustave Troune είχε αναπτύξει μία μηχανή για θαλάσσια σκάφη, τους λεγόμενους εξωλέμβιους κινητήρες. Συγκεκριμένα προσάρμοσε έναν αντίστοιχο κινητήρα διάστασης πέντε μέτρων σε ένα όχημα (αντίστοιχο του επονομαζόμενου τρίκυκλου ποδηλάτου) και τον Νοέμβριο του 1881 σχεδίασε μαζί με τον Βέλγο επιστήμονα Gaston Plante, μία τρίκυκλη μηχανή, της οποίας η κίνηση στηριζόταν σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες (Nigel Burton, 2013).



Εικόνα 21: Η παραλλαγή του ηλεκτρικού τρίκυκλου από τους William Ayrtton και John Perry.

Πηγή: <https://blog.upsbatterycenter.com/ayrton-and-perry-electric-tricycle/>

Ένα χρόνο αργότερα (1882) οι καθηγητές William Ayrton και John Perry συνδύασαν τις γνώσεις τους προκειμένου να δημιουργήσουν τη δική τους παραλλαγή του ηλεκτρικού τρίκυκλου, του οποίου χαρακτηριστικό ήταν οι δύο μεγάλες ρόδες ποδηλάτου, στα πλαϊνά, ενώ στη μέση υπήρχε μία μικρότερη. Ειδικότερα, έφερε πάνω του δύο ηλεκτρικούς λαμπτήρες, ως ένδειξη σωστής συνδεσιμότητας του βολτόμετρου και του αμπερόμετρου, και η ταχύτητά του άγγιζε τα 14km/h, ενώ μπορούσε να καλύψει έως και 40 km.

Στην Αμερική, ο διάσημος εφευρέτης Thomas Edison εργαζόταν πάνω σε έναν νέο τύπο μπαταρίας, ο οποίος βασιζόταν στο νικέλιο και τον σίδηρο και υπόσχονταν σημαντικά πλεονεκτήματα, ιδιαίτερα για τα ηλεκτρικά οχήματα. Σύμφωνα με άρθρο του περιοδικού *Electric World*, που δημοσιεύθηκε το 1925, την περίοδο 1910–1925 η τεχνολογία των μπαταριών σημείωσε αλματώδη πρόοδο, καθώς η χωρητικότητά τους αυξήθηκε κατά 35%, η διάρκεια ζωής τους βελτιώθηκε κατά 300%, ενώ το κόστος συντήρησης μειώθηκε κατά 63%. Παρά τα τεχνολογικά αυτά επιτεύγματα, στην Αμερική το βασικό πρόβλημα εκείνης της εποχής ήταν υγειονομικής φύσεως, εξαιτίας των οργανικών αποβλήτων των αλόγων στους δρόμους. Τα ηλεκτρικά οχήματα δεν προσέφεραν μόνο λύση σε αυτό το ζήτημα, αλλά επιπλέον παρήγαγαν λιγότερο θόρυβο και ξεκινούσαν πιο εύκολα, αφού δεν διέθεταν το σύνθετο κιβώτιο ταχυτήτων που χαρακτήριζε τα συμβατικά οχήματα της εποχής. Ένα ιδιαίτερα αξιοσημείωτο παράδειγμα ήταν ένα δωδεκαθέσιο ηλεκτρικό όχημα σχεδιασμένο από τον William Morrison, όπου η πλήρης φόρτισή του απαιτούσε περίπου δέκα ώρες, ενώ η μέγιστη ταχύτητά του έφτανε τα 22 km/h (Nigel Burton, 2013).



Εικόνα 22: Δωδεκαθέσιο ηλεκτρικό όχημα σχεδιασμένο από τον William Morrison

<https://blog.upsbatterycenter.com/the-morrison-four-wheel-electric-carriage/>

Τη συγκεκριμένη περίοδο, η αυτοκίνηση άρχισε να αποκτά σημαντική παρουσία και στον χώρο των αγώνων αυτοκινήτων, με δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα. Το πρώτο αφορά τον αγώνα που διοργάνωσαν οι *Chicago Times Herald* το 1895, σε μια διαδρομή 87 km από το Chicago στο Evanston και πίσω. Λόγω της μεγάλης απόστασης και των δυσμενών καιρικών συνθηκών, το ηλεκτρικό όχημα που συμμετείχε κατάφερε να διανύσει μόνο το ένα τέταρτο της διαδρομής. Το δεύτερο παράδειγμα αφορά το ηλεκτρικό αυτοκίνητο *The Electrobat*, το οποίο κατασκευάστηκε από τους Henry

Morris και Pedro Salom στη Philadelphia. Και αυτό το όχημα ηττήθηκε για τον ίδιο λόγο, καθώς δεν κατάφερε να ολοκληρώσει τη διαδρομή, με αποτέλεσμα να υπερσχύσει τελικά ένα βενζινοκίνητο αυτοκίνητο.



Εικόνα 23: Ο Henry Morris και ο Pedro Salom πάνω στην ηλεκτρική του εφεύρεση το 1895.

Πηγή: <https://www.woodlandsphila.org/blog/2016/1/22/the-great-electrobat>

Στην Ευρώπη, και συγκεκριμένα στη Γαλλία, ωστόσο, υπήρξαν αρκετοί υποστηρικτές της ηλεκτρικής ενέργειας ήδη από την πρώιμη περίοδο, γεγονός που την κατέστησε κατεξοχήν χώρα κατασκευής κινητήρων. Δεκάδες αυτοκινητοβιομηχανίες δραστηριοποιούνταν στη Γαλλία, καλύπτοντας κυρίως τις ανάγκες των εύπορων πολιτών. Ένα αξιοσημείωτο γεγονός έλαβε χώρα στις 27 Νοεμβρίου 1898, όταν σε έναν αγώνα 32 km, βόρεια του Παρισιού, το νικητήριο όχημα ήταν ένα ηλεκτροκίνητο και το οδηγούσε ο βελγικής καταγωγής Camille Jenatzy. Η ταχύτητα που ανέπτυξε άγγιξε τα 27 km/h, ενώ για πρώτη φορά τη δεύτερη θέση κατέλαβε ένα βενζινοκίνητο όχημα, γνωστό ως *Bollee*. Κατά συνέπεια, στα τέλη του 19ου και τις αρχές του 20ού αιώνα, η ηλεκτροκίνηση είχε ήδη αποκτήσει σημαντικό ρόλο στην ιστορία της αυτοκίνησης. Παρόμοιο αποτέλεσμα σημειώθηκε και σε αγώνα που πραγματοποιήθηκε λίγο αργότερα, στις 17 Ιανουαρίου 1899, όπου το ηλεκτρικό όχημα κατέκτησε και πάλι την πρώτη θέση, φτάνοντας την ταχύτητα των 70.31 km/h.



Εικόνα 24: Ο Camille Jenatzy μαζί με τη σύζυγό του πάνω στο Bollee.

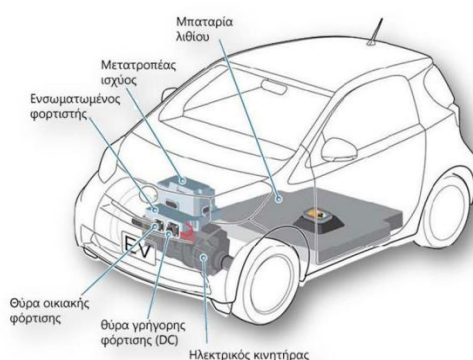
Πηγή: <https://automotivehistory.org/camille-jenatzy-death/>

Παρόλο που στα τέλη του 19ου αιώνα τα ηλεκτρικά οχήματα κατέγραφαν σημαντικές επιτυχίες, όπως στους πρώτους αγώνες ταχύτητας, δεν κατάφεραν να διατηρήσουν την πρωτοκαθεδρία τους. Τα βενζινοκίνητα οχήματα άρχισαν να υπερτερούν κυρίως λόγω της μεγαλύτερης αυτονομίας τους, της ταχύτερης επαναφόρτισης (μέσω ανεφοδιασμού καυσίμου) και της σταδιακής δημιουργίας υποδομών που εξυπηρετούσαν τα συμβατικά καύσιμα. Επιπλέον, οι τεχνολογικές βελτιώσεις στους κινητήρες εσωτερικής καύσης και το μειούμενο κόστος παραγωγής τα κατέστησαν πιο προσιτά στο ευρύ κοινό. Ως αποτέλεσμα, η ηλεκτροκίνηση παραγκωνίστηκε για πολλές δεκαετίες.

Τα τελευταία χρόνια, και ιδίως από τα μέσα του 20ού αιώνα, μελέτες κατέδειξαν ότι μεγάλο μέρος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης οφείλεται στη χρήση συμβατικών οχημάτων. Για την αντιμετώπιση αυτού του κρίσιμου ζητήματος, ξεκίνησαν πρωτοβουλίες τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο, με στόχο τη θέσπιση κατάλληλων μέτρων και κανονισμών. Ενώ στο παρελθόν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα περιορίζονταν στη μετακίνηση πλουσίων σε μικρές αποστάσεις – κυρίως ως *electric cabs* – σήμερα έχει καταστεί αναγκαία η ανάπτυξη ηλεκτρικών οχημάτων που όχι μόνο είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον, αλλά προσφέρουν και μεγαλύτερη αυτονομία. Κατά την τελευταία δεκαετία, έχουν παρουσιαστεί αρκετά μοντέλα μαζικής παραγωγής που σηματοδοτούν τη νέα εποχή της ηλεκτροκίνησης, όπως τα Tesla Roadster, Tesla Model S, Nissan Leaf, Mitsubishi i MiEV, Peugeot iOn και Citroën C-Zero, με τα τρία τελευταία να παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες μεταξύ τους.

2.2 Τεχνολογία και Κατασκευή Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου

Η δομή ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου διαφέρει σημαντικά από εκείνη ενός αυτοκινήτου που χρησιμοποιεί μηχανή εσωτερικής καύσης. Οι εξωτερικές διαφορές είναι ελάχιστες, καθώς ομοιότητες υπάρχουν στα κύρια μέρη και των δύο, όπως είναι το αμάξωμα, το πλαίσιο, το σύστημα διεύθυνσης, η ανάρτηση και τα φρένα. Οι κυριότερες διαφορές εντοπίζονται στη δομή του κινητήριου συνόλου, δηλαδή στα μέρη που σχετίζονται με την ηλεκτροκίνηση. Τα κυριότερα εξ αυτών είναι οι συσσωρευτές (μπαταρίες), ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος (ελεγκτής) και ο ηλεκτροκινητήρας (K. Latha, n.d.).



Εικόνα 25: Σχηματική απεικόνιση της δομής του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

Πηγή: <https://newelectriccars.wordpress.com/electric-concept-cars-2/toyota-iq-ev/>

2.2.1 Συσσωρευτές

Οι συσσωρευτές αποτελούν την πηγή ενέργειας του ηλεκτρικού οχήματος καθώς μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική κατά την εκφόρτισή τους και το αντίθετο κατά τη φόρτισή τους.

Ένα είδος συσσωρευτή υπάρχει και στα συμβατικά αυτοκίνητα και ονομάζεται μπαταρία εκκίνησης καθώς τροφοδοτεί το βενζινοκινητήρα. Η συγκεκριμένη μπαταρία είναι απαραίτητη και στα υβριδικά οχήματα, σε συνδυασμό με μία υψηλής τάσης μπαταρία για να τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα και κάποια άλλα περιφερειακά συστήματα (K. Latha Maheswari et al., n.d.).

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα καθώς και τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου δε χρειάζονται μπαταρία εκκίνησης. Η βασική ενεργειακή πηγή τους είναι οι μπαταρίες υψηλής τάσης, υψηλής ισχύος αλλά και οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης, δηλαδή αυτές που έχουν τη δυνατότητα συχνής πλήρους εκφόρτισης ή πλήρους φόρτισης. Συχνά τείνουν να έχουν μικρότερη στιγμιαία ισχύ από μια μπαταρία εκκίνησης αλλά μπορούν να προσδώσουν ηλεκτρική ενέργεια για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα καθώς και να υποστούν περισσότερες βαθιές εκφορτίσεις.



Εικόνα 26: Μπαταρία ηλεκτρικού αυτοκινήτου

Πηγή: <https://autospecialist.gr/bataries-ilektrikon-aftokiniton/>

Συνήθως οι μπαταρίες αποτελούνται από πλήθος μικρότερων στοιχείων, τα λεγόμενα κελιά. Κάθε κελί αποτελείται από δύο στοιχεία, την άνοδο και την κάθοδο, που χωρίζονται μεταξύ τους με κάποιον ηλεκτρολύτη, ο οποίος διαφοροποιείται από εφαρμογή σε εφαρμογή. Όταν στην άνοδο και στην κάθοδο του συσσωρευτή συνδεθεί ένα εξωτερικό κύκλωμα τότε υπάρχει ροή ηλεκτρονίων ανάμεσά τους, εξ' αιτίας της ηλεκτροχημικής αντίδρασης που συμβαίνει μεταξύ των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη, που εκφράζεται στο εξωτερικό κύκλωμα ως ηλεκτρικό ρεύμα. Σε περίπτωση που εφαρμοστεί εξωτερικό ρεύμα στην μπαταρία, τότε συμβαίνει η αντίστροφη διαδικασία και η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται με τη μορφή χημικής ενέργειας (D. Ebbing & S.D. Gammon, 2016).

Οι συσσωρευτές ποικίλλουν ως προς τα υλικά κατασκευής τους και τα επιμέρους χαρακτηριστικά και ιδιότητες που έχουν, επομένως πολλοί διαφορετικοί τύποι

μπαταριών είναι διαθέσιμοι για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες των ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων.

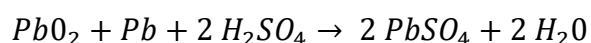
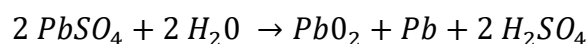
2.2.1.α Συσσωρευτής Μολύβδου- Οξέος

Οι μπαταρίες Μολύβδου-Οξέος συγκαταλέγονται στις παλαιότερες μορφές επαναφορτιζόμενων μπαταριών και χρησιμοποιούνται ευρέως.

Αποτελούνται από έξι γαλβανικά στοιχεία, καθένα από τα οποία αποδίδει τάση 2 Volt. Αυτά συνδέονται σε σειρά, προσδίδοντας στη μπαταρία συνολική ονομαστική τάση 12 Volt στους ακροδέκτες της. Ωστόσο, η πραγματική τιμή της τάσης δεν είναι σταθερή· μετά από πλήρη φόρτιση μπορεί να φτάσει τα 14.5 Volt, ενώ όταν είναι πλήρως αποφορτισμένη μπορεί να πέσει έως τα 10.8 Volt.

Η λειτουργία τους βασίζεται σε μια χημική αντίδραση ανάμεσα στο διοξείδιο του μολύβδου (PbO_2), που αποτελεί την θετική πλάκα, και στο καθαρό μόλυβδο (Pb), που σχηματίζει την αρνητική πλάκα. Αυτά τα στοιχεία είναι εμβυθισμένα σε έναν ηλεκτρολύτη που περιέχει θειικό οξύ και σουλφοξυλικό οξύ, τα οποία επιτρέπουν την ανταλλαγή ιόντων και τη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας (*Pb Acid Batteries, 2020*).

Κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση συμβαίνουν αντίστοιχα οι ακόλουθες χημικές αντιδράσεις:

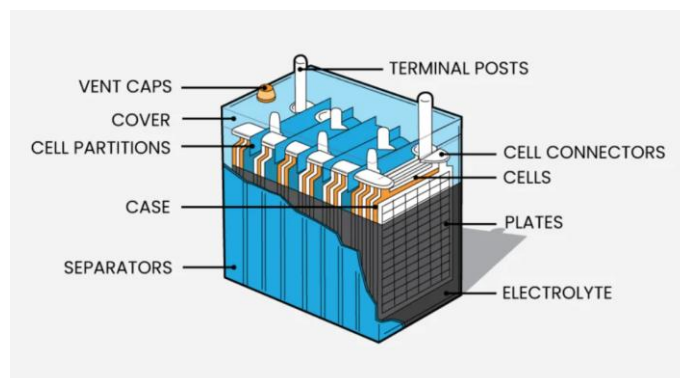


Οι συσσωρευτές Μολύβδου-Οξέος διαθέτουν ενεργειακή πυκνότητα που κυμαίνεται μεταξύ 25 και 50 Wh/kg, ενώ η πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου φτάνει τα 60 έως 110 Wh/L, τιμές αισθητά χαμηλότερες σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες μπαταριών. Η πυκνότητα ισχύος τους είναι περίπου 180 W/kg. Η διάρκεια ζωής τους περιορίζεται γύρω στους 500 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης, έπειτα από τους οποίους η απόδοσή τους αρχίζει να φθίνει σημαντικά. Παρόλα αυτά, ο χρόνος ζωής μπορεί να διαφέρει ανάλογα με διάφορους παράγοντες, όπως η συχνότητα χρήσης, οι θερμοκρασιακές συνθήκες, η γενικότερη λειτουργική συμπεριφορά αλλά και η συντήρησή τους (*S. Petrovic, n.d.*). Ο ρυθμός αποφόρτισης κυμαίνεται μεταξύ 2 και 10 C, ενώ η τάση που θεωρείται ως όριο αποφόρτισης (τάση ανακοπής) είναι 1.75 V. Οι θερμοκρασίες στις οποίες μπορεί να λειτουργεί αποτελεσματικά η μπαταρία εκτείνονται από τους $-20^{\circ}C$ έως και τους $60^{\circ}C$.

Στα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας περιλαμβάνεται το χαμηλό κόστος παραγωγής, λόγω της ευρείας διαθεσιμότητας του μολύβδου, γεγονός που επιτρέπει την κατασκευή των μπαταριών σε μεγάλη κλίμακα και σε ποικιλία μεγεθών και αποθηκευτικών δυνατοτήτων. Ένα ακόμη σημαντικό θετικό στοιχείο είναι η δυνατότητα ανακύκλωσης, αφού εκτιμάται πως περίπου το 90% των συσσωρευτών Μολύβδου-Οξέος ανακυκλώνονται (*X. Fan et al., 2020*).

Ωστόσο, τα μειονεκτήματα δεν είναι αμελητέα. Ο περιορισμένος κύκλος ζωής και η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα συντελούν σε αυξημένο βάρος, το οποίο μειώνει την απόδοση σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή κινητικότητα. Επιπλέον, ο μόλυβδος είναι ιδιαίτερα τοξικό υλικό, κάτι που καθιστά τη διαδικασία απόσυρσης και

διαχείρισης των παλαιών συσσωρευτών πιο περίπλοκη και επικίνδυνη, εάν δεν εφαρμοστούν τα κατάλληλα μέτρα.



Εικόνα 27: Εικονική αναπαράσταση της μπαταρίας μολύβδου-οξέος .

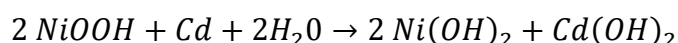
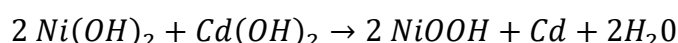
Πηγή: <https://sinovoltaics.com/learning-center/storage/lead-acid-batteries/>

2.2.1.β Συσσωρευτής Νικελίου- Καδμίου

Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου (Ni-Cd) συγκαταλέγονται στις πρώτες τεχνολογίες που αξιοποιήθηκαν σε ηλεκτρικά οχήματα και χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής, προσφέροντας σημαντικό αριθμό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης συγκριτικά με άλλους τύπους μπαταριών.

Η δομή τους βασίζεται σε δύο βασικά ηλεκτρόδια: την άνοδο, η οποία αποτελείται από καθαρό κάδμιο (Cd), και την κάθοδο, η οποία περιλαμβάνει οξυ-υδροξείδιο του νικελίου (NiOOH). Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται σε αυτές τις μπαταρίες είναι αλκαλικός και συνήθως πρόκειται για διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH) σε νερό (C. Jeyaseelan et al., 2020)

Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση αντίστοιχα είναι οι ακόλουθες:



Τα ηλεκτρόδια στις μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου είναι διαμορφωμένα σε σπειροειδή μορφή και διαχωρίζονται μεταξύ τους με ένα λεπτό, πορώδες μονωτικό υλικό – συνήθως από πολυαμίδιο. Όλα τα εξαρτήματα τοποθετούνται μέσα σε μεταλλικό περίβλημα, το οποίο ενσωματώνεται σε πλαστικό ή μεταλλικό δοχείο. Σημαντικό στοιχείο ασφαλείας αυτών των μπαταριών είναι η βαλβίδα εκτόνωσης, η οποία επιτρέπει τη διοχέτευση των αερίων που παράγονται κατά την υπερφόρτιση (S.T. Revankar, 2019).

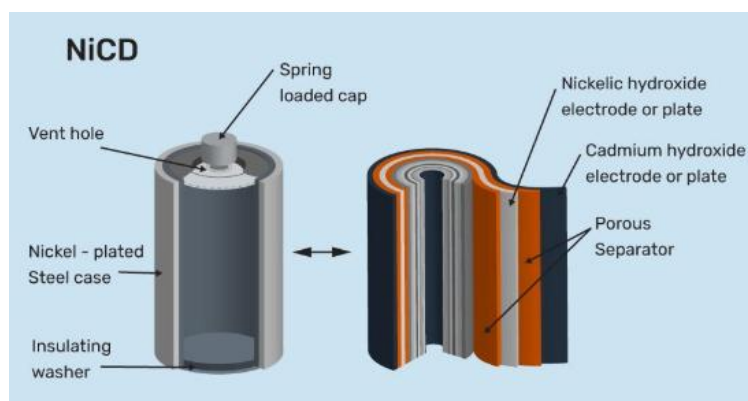
Σε πλήρως φορτισμένη κατάσταση, οι συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου έχουν τάση 1.2 V, ενώ κατά την πλήρη αποφόρτιση η τάση τους μειώνεται έως τα 0.85 V. Είναι σε θέση να φορτιστούν ταχύτατα, με ρυθμούς 4 έως 6 C, μέσα σε μία ή δύο ώρες. Η ενεργειακή τους πυκνότητα κυμαίνεται μεταξύ 40 και 60 Wh/kg, ενώ η πυκνότητα ενέργειας ανά λίτρο ανέρχεται στα 150–190 Wh/L. Η πυκνότητα ισχύος τους φτάνει τα 150 W/kg. Η διάρκεια ζωής τους είναι εντυπωσιακά μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, καθώς μπορούν να αντέξουν από 2.000 έως και 3.000 κύκλους

φόρτισης/εκφόρτισης. Επίσης, λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, από -40°C έως και 60°C (S. Petrovic et al., 2021).

Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η ικανότητά της να αποφορτίζεται πλήρως και για μεγάλα χρονικά διαστήματα με αργό ρυθμό, χωρίς να υποβαθμίζεται σημαντικά η απόδοση. Επιπλέον, επιτρέπεται η ταχεία φόρτιση χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα.

Ωστόσο, υπάρχουν και σοβαρά μειονεκτήματα. Ένα βασικό πρόβλημα είναι το γνωστό φαινόμενο μνήμης, το οποίο εμφανίζεται κυρίως όταν η μπαταρία φορτίζεται χωρίς να έχει προηγηθεί πλήρης αποφόρτιση. Σε αυτή την περίπτωση, η μπαταρία "θυμάται" το επίπεδο από το οποίο ξεκίνησε η φόρτιση και κατά την επόμενη χρήση τείνει να αποφορτίζεται γρήγορα μέχρι εκείνο το σημείο, με ταυτόχρονη απότομη πτώση τάσης. Επιπλέον, το κάδμιο είναι εξαιρετικά τοξικό, επιβλαβές τόσο για το περιβάλλον όσο και για την ανθρώπινη υγεία. Γι' αυτόν τον λόγο, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει περιορισμούς στη χρήση των μπαταριών Ni-Cd και έχει θέσει ως στόχο την ανακύκλωση τουλάχιστον του 75% αυτών (X. Fan et al., 2020).

Άλλα αρνητικά στοιχεία περιλαμβάνουν τη σχετικά χαμηλή τάση και ενεργειακή πυκνότητα, καθώς και το υψηλό κόστος κατασκευής σε σύγκριση με άλλες διαθέσιμες τεχνολογίες.



Εικόνα 28: Εικονική αναπαράσταση του συσσωρευτή νικελίου-καδμίου.

Πηγή: <https://www.solarreviews.com/blog/best-uses-for-nickel-cadmium-batteries>

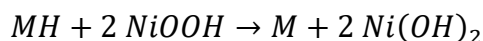
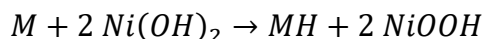
2.2.1.γ Συσσωρευτής Νικελίου- Υδριδίου μετάλλου

Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες Νικελίου-Υδριδίου Μετάλλου (Ni-MH) σχεδιάστηκαν με στόχο να αντικαταστήσουν τους συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου, προσφέροντας μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση, παρότι διατηρούν αρκετές κοινές κατασκευαστικές αρχές.

Το θετικό ηλεκτρόδιο τους αποτελείται, όπως και στους συσσωρευτές Ni-Cd, από οξυ-υδροξείδιο του νικελίου (NiOOH). Ωστόσο, στη θέση της ανόδου, αντί για κάδμιο, χρησιμοποιείται κράμα μετάλλου ικανό να απορροφά και να αποθηκεύει υδρογόνο. Το υλικό αυτό λειτουργεί ως δεξαμενή υδρογόνου, κάτι που συμβάλλει καθοριστικά στην αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας. Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH), ενώ ο διαχωριστής των ηλεκτροδίων είναι

συνήθως φτιαγμένος από μη-υφασμένο υλικό πολυολεφίνης, το οποίο διασφαλίζει την καλή μόνωση και την κυκλοφορία των ιόντων (Ni-MH, 2020).

Κατά τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης πραγματοποιούνται αντίστοιχα οι παρακάτω αντιδράσεις:



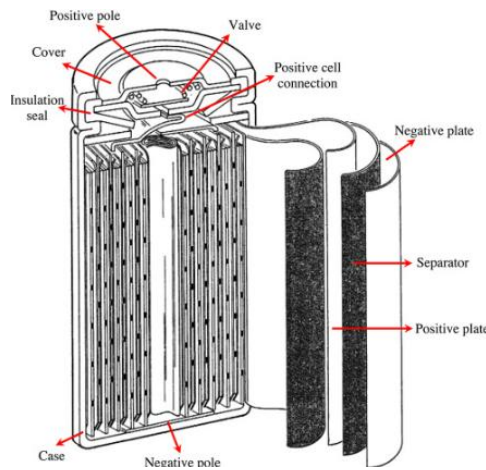
Κατασκευαστικά, οι συσσωρευτές Νικελίου-Υδριδίου Μετάλλου παρουσιάζουν ομοιότητες με αυτούς Νικελίου-Καδμίου, καθώς τα ηλεκτρόδια είναι διαμορφωμένα σε σπειροειδή διάταξη και τοποθετούνται μέσα σε κυλινδρικό μεταλλικό περίβλημα. Όπως και οι αντίστοιχες Ni-Cd, περιλαμβάνουν βαλβίδα εκτόνωσης για την ασφαλή απομάκρυνση των αερίων που δημιουργούνται σε περίπτωση υπερφόρτισης, αποτρέποντας έτσι την πιθανότητα έκρηξης (P.-J. Tsais & L. Chan, 2013).

Οι συγκεκριμένοι συσσωρευτές προσφέρουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 70 και 120 Wh/kg, ενώ η ενεργειακή πυκνότητα ανά λίτρο κυμαίνεται από 140 έως 300 Wh/L. Η πυκνότητα ισχύος είναι επίσης ιδιαίτερα αυξημένη, φτάνοντας από 250 έως 1.000 W/kg. Η διάρκεια ζωής τους κυμαίνεται συνήθως από 500 έως 1.000 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης, με δυνατότητα αποφόρτισης σε ρυθμούς έως 10 C. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται μεταξύ -20°C και 60°C (S. Petrovic, 2021).

Αυτό το είδος μπαταρίας είναι ικανό να προσφέρει σχεδόν διπλάσια ενεργειακή απόδοση σε σχέση με τις Ni-Cd, ενώ επιτρέπει ταχεία φόρτιση μέσα σε 1 έως 4 ώρες. Επιπλέον, λειτουργεί με ασφάλεια σε υψηλές τάσεις, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για εφαρμογές υψηλής απαιτητικότητας.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η περιβαλλοντική της φιλικότητα. Οι συσσωρευτές Νικελίου-Υδριδίου Μετάλλου είναι ανακυκλώσιμοι, περιέχουν λιγότερα τοξικά συστατικά σε σχέση με τους Ni-Cd και η διαδικασία παραγωγής τους είναι λιγότερο επιβαρυντική για το περιβάλλον.

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, δεν στερούνται μειονεκτημάτων. Αν και το φαινόμενο μνήμης εμφανίζεται λιγότερο έντονα σε αυτούς τους συσσωρευτές, εξακολουθεί να υπάρχει. Επίσης, το κόστος τους είναι υψηλότερο σε σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος και η απόδοσή τους μειώνεται αισθητά σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών. Το κυριότερο αρνητικό χαρακτηριστικό τους, ωστόσο, είναι ο υψηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης, ο οποίος μπορεί να φτάσει έως και το 20% μηνιαίως.



Εικόνα 29: Εικονική αναπαράσταση της μπαταρίας νικελίου- υδριδίου μετάλλου.

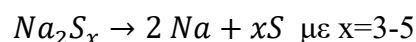
Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/nickel-metal-hydride-battery>

2.2.1.δ Συσσωρευτές Νατρίου- Θείου

Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες Νατρίου-Θείου (Na-S), που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του 1960. Η τεχνολογία τους διαφέρει ριζικά από εκείνη των υπόλοιπων μπαταριών που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροκίνηση. Παρότι αρχικά προορίζονταν και για τέτοιες εφαρμογές, οι αυξημένες απαιτήσεις σε θέματα ασφάλειας τις έχουν περιορίσει σε άλλους τομείς, όπως η σταθερή αποθήκευση ενέργειας, π.χ. σε βιομηχανικά συστήματα ή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.

Η βασικότερη κατασκευαστική ιδιαιτερότητα των συσσωρευτών Νατρίου-Θείου είναι η χρήση υγρών ηλεκτροδίων. Πιο συγκεκριμένα, η άνοδος αποτελείται από τετηγμένο νάτριο (Na), ενώ η κάθοδος από τετηγμένο θείο (S). Τα δύο αυτά στοιχεία διαχωρίζονται μέσω μιας κεραμικής μεμβράνης από βήτα-αλουμίνα, η οποία έχει τη μορφή σωλήνα και λειτουργεί ως στερεός ηλεκτρολύτης (S.T. Revankar, 2019).

Κατά τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης πραγματοποιούνται αντίστοιχα οι παρακάτω αντιδράσεις (Energy Storage Technologies, 2016).



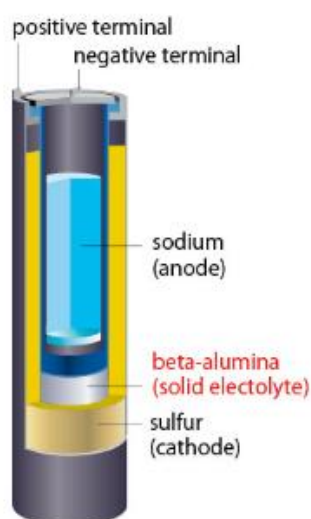
Το αρνητικό ηλεκτρόδιο των συσσωρευτών Νατρίου-Θείου βρίσκεται τοποθετημένο στο εσωτερικό της μπαταρίας, μέσα στον κεραμικό σωληνοειδή ηλεκτρολύτη, ενώ το υγρό θείο βρίσκεται στο εξωτερικό μέρος του δοχείου. Τα υλικά αυτά περικλείονται από ένα κυλινδρικό, ατσάλινο και πλήρως σφραγισμένο περίβλημα, το οποίο εξασφαλίζει ότι δεν θα έρθουν σε επαφή με τον αέρα, διατηρώντας έτσι τη σταθερότητα και την υγρή τους μορφή.

Η ενεργειακή πυκνότητα των συσσωρευτών Νατρίου-Θείου θεωρητικά αγγίζει τα 760 Wh/kg, όμως στην πράξη κυμαίνεται μεταξύ 180 και 220 Wh/kg. Η πυκνότητα ισχύος που παρέχουν ανέρχεται σε 60 έως 80 W/kg. Οι κύκλοι ζωής τους φτάνουν τις 2.500 με 5.000 φορτίσεις και εκφορτίσεις. Για να διατηρούνται τα ηλεκτρόδια σε τετηγμένη

κατάσταση, οι συσσωρευτές αυτοί απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, που κυμαίνονται από 300°C έως 350°C.

Στα βασικά τους πλεονεκτήματα περιλαμβάνονται η ταχύτητα φόρτισης, η μεγάλη διάρκεια ζωής, καθώς και η εξαιρετική αντίσταση στην αυτοεκφόρτιση. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και πυκνότητα ισχύος προσδίδουν στις μπαταρίες αυτές σημαντικές δυνατότητες για ενεργειακά απαιτητικές εφαρμογές. Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι τα υλικά τους —νάτριο και θείο— είναι φθηνά και ευρέως διαθέσιμα στη φύση.

Ωστόσο, η ανάγκη διατήρησης της υγρής μορφής των ηλεκτροδίων συνεπάγεται κατανάλωση επιπλέον ενέργειας, γεγονός που μειώνει τη συνολική ενεργειακή απόδοση. Παράλληλα, απαιτείται υψηλής ποιότητας θερμική μόνωση, κάτι που ανεβάζει το κόστος παραγωγής. Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας περιορίζει δραστικά τη χρήση τους σε φορητές ή μικρές εφαρμογές. Επιπρόσθετα, υπάρχει σοβαρό ζήτημα ασφάλειας: σε περίπτωση αστοχίας του κεραμικού διαχωριστικού, είναι πιθανό τα δύο υλικά των ηλεκτροδίων να έρθουν σε επαφή, προκαλώντας επικίνδυνες χημικές αντιδράσεις, έκρηξη ή φωτιά (S.T. Revankar, 2014).



Εικόνα 30: Εικονική αναπαράσταση της μπαταρίας νατρίου-θείου.

Πηγή <https://www.ngk-insulators.com/en/product/nas-about.html>

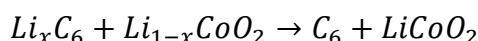
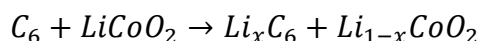
2.2.1.ε Συσσωρευτές Λιθίου- Ιόντων

Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες Λιθίου-Ιόντων αποτελούν ίσως τη σημαντικότερη τεχνολογία ηλεκτροχημικής αποθήκευσης ενέργειας από το 1991 που διατέθηκαν στην αγορά για πρώτη φορά έως και σήμερα, καθώς χρησιμοποιούνται στην πλειοψηφία των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών και ηλεκτρικών οχημάτων.

Οι μπαταρίες Λιθίου- Ιόντων γενικότερα είναι κατασκευασμένες σε κυλινδρική μορφή ή σε σχήμα κυκλικού δίσκου και περιβάλλονται συνήθως από επινικελωμένο ατσάλι ή αλουμίνιο. Συγκεκριμένα, οι κυλινδρικές μπαταρίες Λιθίου- Ιόντων τύπου 21700 (όπου το όνομα προέρχεται από τις διαστάσεις τους: 2mm διάμετρος και 70mm μήκος)

χρησιμοποιούνται και στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα S, 3 και X της αμερικανικής αυτοκινητοβιομηχανίας Tesla (J.T. Warner, 2019).

Τα υλικά της ανόδου, της καθόδου αλλά και του ηλεκτρολύτη ποικίλλουν και προσδίδουν στο συσσωρευτή διάφορα χαρακτηριστικά. Η κλασική δομή των μπαταριών Λιθίου- Ιόντων αποτελείται από υγρό οργανικό ηλεκτρολύτη, άνοδο γραφίτη (C_6) και κάθοδο Λιθίου-οξειδίου κοβαλτίου ($LiCoO_2$) και οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση αντίστοιχα είναι οι εξής (S.K. Martha, 2019):



Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται ως άνοδος, πέραν από το φυσικό γραφίτη (372 mAh g^{-1}) και τον τεχνητό γραφίτη (342 mAh g^{-1}), είναι ο σκληρός άνθρακας (480 mAh g^{-1}), ο μαλακός άνθρακας (255 mAh g^{-1}) και τα οξείδια του τιτανίου ($Li_4Ti_5O_{12}$) (175 mAh g^{-1}). Επίσης η άνοδος έχει ένα συλλέκτη ρεύματος κατασκευασμένο από χαλκό (Cu). Όσον αφορά την κάθοδο, ο συλλέκτης ρεύματος είναι από αλουμίνιο (Al) ενώ ενεργό υλικό χρησιμοποιούνται οξείδια μετάλλων μετάπτωσης όπως λιθίου-οξείδιο του κοβαλτίου ($LiCoO_2$), λιθίου-οξείδιο του μαγγανίου ($LiMn_2O_4$), λιθίου-οξείδιο του φωσφορικού σιδήρου ($LiFePO_4$) και άλλα (J.T. Warner, 2019).

Ένα κρίσιμο στοιχείο για την απόδοση και τη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών Λιθίου-Ιόντων είναι το SEI (Solid Electrolyte Interface). Το στρώμα αυτό σχηματίζεται κατά την πρώτη φόρτιση, όταν ο οργανικός ηλεκτρολύτης αντιδρά με την άνοδο (συνήθως ανθρακούχα), δημιουργώντας ένα προστατευτικό φιλμ. Το SEI προστατεύει την άνοδο από περαιτέρω αντιδράσεις με τον ηλεκτρολύτη. Ωστόσο, με τη συνεχή χρήση, το στρώμα αυτό αυξάνεται σε πάχος, καταναλώνοντας ηλεκτρολύτη και μειώνοντας την αντιστρεψιμότητα της μπαταρίας, κάτι που οδηγεί τελικά σε αυξημένη εσωτερική αντίσταση, απώλεια τάσης και σταδιακή γήρανση. Σε ακραίες περιπτώσεις, μπορεί να προκύψουν και σοβαροί κίνδυνοι, όπως εκρήξεις λόγω υπερθέρμανσης.

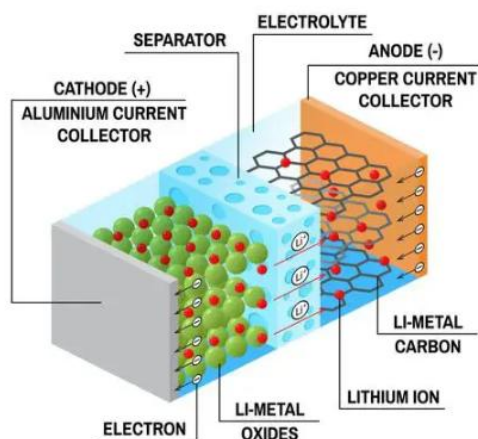
Ένα ακόμα φαινόμενο που παρατηρείται είναι η πλήρης αποφόρτιση (deep discharge). Όταν η μπαταρία μένει αχρησιμοποίητη για μεγάλο χρονικό διάστημα (συνήθως άνω των δύο ετών) ή όταν υπερφορτίζεται συχνά, μπορεί να μην επαναφορτιστεί ποτέ ή να απαιτεί σημαντικά περισσότερο χρόνο για να επανέλθει σε λειτουργική κατάσταση (J.T. Warner, 2019).

Στα μειονεκτήματα των συσσωρευτών, συγκαταλέγονται το υψηλό κόστος κατασκευής αλλά και η χαμηλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες. Ακόμη, η παραγωγή των συγκεκριμένων μπαταριών αποτελεί μια ενεργοβόρα διαδικασία που βασίζεται στην εξόρυξη του λιθίου και του κοβαλτίου, γεγονός που ελλοχεύει πολλές περιβαλλοντικές αλλά και ηθικές επιπτώσεις. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως οι μπαταρίες Λιθίου-Ιόντων ανακυκλώνονται σε ποσοστό μονάχα 5% με 10% παγκοσμίως και 20% με 30% στην Ευρώπη. Τα χαμηλά αυτά ποσοστά οφείλονται στην τοξικότητα των υλικών, τα οποία απαιτούν ειδικούς χειρισμούς κατά την ανακύκλωση, αλλά και στην

πολυπλοκότητα του διαχωρισμού και της ανάκτησης των υλικών αυτών (F. Wu et al., 2019).

Εκτός των παραπάνω χαρακτηριστικών, οι συσσωρευτές Λιθίου παρουσιάζουν πληθώρα πλεονεκτημάτων, γεγονός που τις κατατάσσει στις πιο διαδεδομένες μπαταρίες για χρήση σε φορητά ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά είδη. Πέραν του ότι έχουν τις καλύτερες αναλογίες ενέργειας προς βάρος, η ενέργειά τους αποθηκεύεται διαμέσου της κίνησης των ιόντων λιθίου (του τρίτου δηλαδή ελαφρύτερου χημικού στοιχείου) και ως εκ τούτου είναι πολύ ελαφρύτερες και μικρότερες σε μέγεθος από άλλες ισοδύναμες, επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Συγχρόνως, έχουν τη μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και υψηλότερη τάση ανοιχτού κυκλώματος σε σχέση με τις άλλες υδάτινες μπαταρίες που προαναφέρθηκαν. Επιπλέον, έχουν μεγάλο κύκλο ζωής, όπως φαίνεται και στο παραπάνω πίνακα καθώς η αυτοεκφόρτισή τους γίνεται με χαμηλό ρυθμό (λιγότερο από 10% το μήνα), ενώ παράλληλα έχουν τη δυνατότητα πλήρους φόρτισης σε πολύ λίγο χρόνο (X. Fan et al., 2020).

Ένας άλλος τύπος συσσωρευτή Λιθίου- ιόντων που τείνει να αντικαταστήσει τις προαναφερθείσες μπαταρίες με υγρό ηλεκτρολύτη, είναι οι μπαταρίες Ιόντων- λιθίου πολυμερούς (LiPo). Σε αυτές χρησιμοποιείται gel πολυμερούς ηλεκτρολύτη που αποτελείται από άλατα λιθίου και οργανικούς διαλύτες που εμποτίζονται σε ένα πολυμερές πλαίσιο από πολυαιθυλενογλυκόλη (PEO), πολυβινυλοβουτυράλη (PVB), πολυακρυλονιτρίλιο (PAN) ή φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (PVDF) και έτσι δημιουργείται μια πολυμερική μεμβράνη. Η μπαταρία LiPo πέραν από ελαφριά, είναι μικρότερη σε μέγεθος και πιο ευέλικτη, έχοντας ποικίλα σχήματα και μεγέθη, ενώ συγχρόνως η χρήση του πολυμερούς ηλεκτρολύτη αντί του υγρού, παρέχει μεγαλύτερη ασφάλεια αφού εξαλείφονται τα φαινόμενα διαρροής. Για τους λόγους αυτούς, η συγκεκριμένη μπαταρία χρησιμοποιείται ευρέως στην πλειονότητα των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών όπως στα κινητά τηλέφωνα, στους φορητούς υπολογιστές και στα μη επανδρωμένα αεροσκάφη. Η ενεργειακή πυκνότητά της είναι 250 Wh kg^{-1} , το δυναμικό ισορροπίας είναι 3.6 V, ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας της κυμαίνεται στους $-20-60^\circ\text{C}$. Τέλος, οι κύκλοι ζωής είναι 300-500 και έχει μέγιστο ρυθμό αποφόρτισης 50 C (Y. Liang et al., 2019).



Εικόνα 31: Εικονική αναπαράσταση τμήματος του συσσωρευτή λιθίου-ιόντων.

Πηγή: https://www.electricbee.co/lithium-ion-battery-how-does-it-work/#google_vignette

Τα τελευταία χρόνια γίνονται εκτεταμένες έρευνες για την αντικατάσταση των άκαμπτων ενεργών υλικών που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες ιόντων-λιθίου με νανοϋλικά (J.T. Warner, 2019).

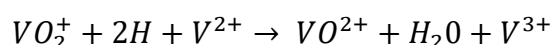
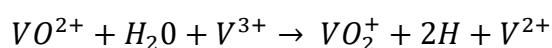
2.2.1.ζ Οξειδοαναγωγικοί συσσωρευτές ροής

Οι επαναφορτιζόμενοι οξειδοαναγωγικοί συσσωρευτές ροής παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά από τη NASA κατά τη δεκαετία του '70 και αποτελούν μια ειδική κατηγορία μπαταριών καθώς διαφέρουν δομικά και λειτουργικά από τις προαναφερθείσες (S. Trikalitis et al., 2021).

Βασική διαφορά μεταξύ των συσσωρευτών ροής και των συμβατικών μπαταριών είναι πως η ενέργεια αποθηκεύεται στο υγρό του ηλεκτρολύτη και όχι στα ηλεκτρόδια. Το ηλεκτρολυτικό διάλυμα είναι τοποθετημένο σε δύο εξωτερικά δοχεία τα οποία συνδέονται με τα ηλεκτρόδια και με τη βοήθεια δύο αντλιών επιτυγχάνεται η κυκλοφορία του διαλύματος προκειμένου να διενεργηθεί η ηλεκτροχημική αντίδραση.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ηλεκτροδίων είναι συνήθως βασισμένα στον άνθρακα, όπως ο γραφίτης, λόγω της υψηλής αγωγιμότητάς του και μεταξύ των ηλεκτροδίων υπάρχει ο διαχωριστής, ο οποίος έχει τη μορφή μεμβράνης. Στις περισσότερες μπαταρίες ροής χρησιμοποιείται υπερφθοριωμένη μεμβράνη Nafion. Όσον αφορά τους ηλεκτρολύτες, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες με βάση τις οποίες οι μπαταρίες κατηγοριοποιούνται ως εξής: μπαταρίες ροής βαναδίου (VRFB), μπαταρίες ροής ψευδαργύρου- βρωμίου (ZBFB) και μπαταρίες ροής σιδήρου (IFB). Ωστόσο ο συσσωρευτής ροής που κυριαρχεί τεχνολογικά είναι αυτός που χρησιμοποιεί διάλυμα βαναδίου με οξειδοαναγωγικά ζεύγη V^{2+}/V^{3+} ως άνοδο και VO^{2+}/VO^{3+} ως κάθοδο (S. Trikalitis et al., 2021).

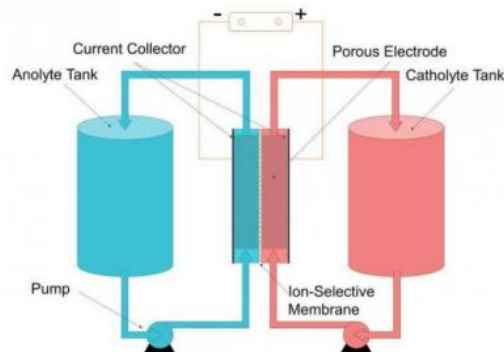
Οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση αντίστοιχα είναι οι εξής:



Τα κοινά χαρακτηριστικά των παραπάνω μπαταριών που αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι το χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης καθώς και η εύκολη αντικατάσταση τόσο των δεξαμενών όσο και του υγρού του ηλεκτρολύτη για την αύξηση χωρητικότητας του συστήματος αλλά και άμεση επαναφόρτιση. Ακόμα, υπάρχει δυνατότητα διεξαγωγής πολλών κύκλων φόρτισης/ αποφόρτισης, γεγονός που μειώνει το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα, με την αποφόρτιση να γίνεται σε βάθος και παρατηρείται επίσης πως έχουν υψηλό δείκτη ασφάλειας. Τέλος, τα υλικά που χρησιμοποιούνται στους συγκεκριμένους συσσωρευτές είναι λιγότερο τοξικά από τα υλικά άλλων μπαταριών και είναι εύκολο να επαναχρησιμοποιηθούν.

Η περίπλοκη κατασκευή τους, ωστόσο, αποτελεί το κύριο τους μειονέκτημα αφού τα διάφορα μέρη τους, όπως οι δεξαμενές και οι αντλίες απαιτούν μεγάλο χώρο και έτσι είναι ασύμφωτες για χρήση σε φορητές συσκευές. Έτσι, χρησιμοποιούνται κυρίως για αποθήκευση ενέργειας μεγάλης κλίμακας ή ως εφεδρικά συστήματα ενέργειας σε

βιομηχανίες. Επιπλέον, συγκριτικά με άλλες μπαταρίες, παρουσιάζουν αρκετά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα (S. Trikalitis et al., 2021).



Εικόνα 32: Εικονική αναπαράσταση των οξειδοαναγωγικών συσσωρευτών ροής.

Πηγή: <https://www.engineersonline.nl/honingraat-membraan-maakt-redox-flowbatterij-efficiënter/>

2.2.2 Υπερπυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές αποτελούν μια σημαντική καινοτομία στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας και τα τελευταία χρόνια έχουν συγκεντρώσει μεγάλο ενδιαφέρον κυρίως λόγω των πολλών κύκλων ζωής αλλά και των υψηλών τιμών πυκνότητας ισχύος τους.

Αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια μέσα σε ηλεκτρολυτικό διάλυμα και ένα διαχωριστή που αποτρέπει την επαφή των ηλεκτροδίων. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για το κάθε δομικό μέρος τους διαφοροποιούνται από υπερπυκνωτή σε υπερπυκνωτή καθώς αυτοί, με βάση το μηχανισμό αποθήκευσης φορτίου που χρησιμοποιούν, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: τους ηλεκτροχημικούς πυκνωτές διπλού στρώματος (Electric Double Layer Capacitors/ EDLC), τους ψευδοπυκνωτές (Pseudocapacitors), και τους υβριδικούς υπερπυκνωτές (Hybrid Supercapacitors) (E. Sum, 1985).

Τα ηλεκτρόδια των ηλεκτροχημικών πυκνωτών διπλού στρώματος είναι κατασκευασμένα από πορώδη άνθρακα, ενώ ως ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούνται υδατικά διαλύματα όπως υδροξείδιο του καλίου (KOH) και θειικό οξύ (H_2SO_4) και μη υδατικά διαλύματα όπως ανθρακικό προπυλένιο (PC). Όσο για τους διαχωριστές, κατασκευάζονται συνήθως από πολυαιθυλένιο (PE), πολύπροπυλένιο (PP) ή πολυακρυλικό οξύ (PAA). Οι εσωτερικές διαδικασίες των υπερπυκνωτών αυτών δεν περιλαμβάνουν ηλεκτροχημική αντίδραση καθώς η αποθήκευση του φορτίου γίνεται ηλεκτροστατικά μέσω της προσρόφησης ιόντων στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Η παραπάνω διαδικασία εξασφαλίζει ενέργεια με μεγάλη ταχύτητα (A. Muzaffar et al., 2019).

Οι ψευδοπυκνωτές αποτελούνται συνήθως από ηλεκτρόδια κατασκευασμένα από οξείδια μετάλλων όπως το οξείδιο του μαγγανίου (MnO_2) και το οξείδιο του νικελίου (NiO) και έχουν για ηλεκτρολύτες υδατικά και μη υδατικά διαλύματα, ιοντικά υγρά και πολυμερικούς ηλεκτρολύτες. Ο μηχανισμός που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη τεχνολογία προκειμένου να αποθηκευτεί η ενέργεια βασίζεται σε οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου και λόγω των

ενεργών υλικών παρατηρείται μεγάλη χωρητικότητα, αντιστρεψιμότητα και ταχύτητα. (K.K. Kar, 2020).

Οι υβριδικοί υπερπυκνωτές συνδυάζουν τις τεχνολογίες των δύο παραπάνω πυκνωτών. Πιο συγκεκριμένα, τα υλικά της καθόδου που χρησιμοποιούνται στο γνωστότερο υβριδικό υπερπυκνωτή, τον υπερπυκνωτή ιόντων- λιθίου (*Li-HSCs*), είναι όμοια με τα υλικά των ηλεκτροχημικών πυκνωτών διπλού στρώματος σε συνδυασμό με οργανικό ηλεκτρολύτη ενώ η άνοδος θυμίζει συσσωρευτή ιόντων-λιθίου. Επιπλέον, ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι είτε υδατικός, είτε μη υδατικός και ο διαχωριστής συνήθως αποτελείται από μικροπορώδες φιλμ πολυολεφίνης. Η διαδικασία που πραγματοποιείται κατά τη φόρτιση, μοιάζει με αυτή των ηλεκτροχημικών πυκνωτών διπλού στρώματος καθώς αποτελείται από προσρόφηση ιόντων στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω τεχνολογιών, λοιπόν, προσδίδει στους υβριδικούς υπερπυκνωτές μεγαλύτερη χωρητικότητα, ενεργειακή πυκνότητα και υψηλότερη τάση συγκριτικά με τους προαναφερθέντες υπερπυκνωτές (Z. He & Y. Liu, 2018).

Όπως γίνεται αντιληπτό οι πολλοί κύκλοι ζωής αποτελούν ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των υπερπυκνωτών καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς αντικατάσταση, μειώνοντας έτσι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που συνδέεται με την παραγωγή και την απόρριψη. Ακόμη, οι υπερπυκνωτές προσφέρουν υψηλή πυκνότητα ρεύματος την οποία απελευθερώνουν γρήγορα και αποδοτικά, γεγονός που συμβάλλει στην κατανάλωση λιγότερου καυσίμου όπως και στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στα υβριδικά οχήματα. Τέλος, η απουσία τοξικών μετάλλων διευκολύνει τη διαδικασία ανακύκλωσής τους.

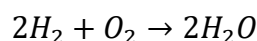
Ωστόσο, στον παραπάνω πίνακα παρατηρείται επίσης η πολύ χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και τάση των συγκεκριμένων τεχνολογιών συγκριτικά με άλλα είδη συσσωρευτών που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Για το λόγο αυτό, οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται στις φορητές ηλεκτρονικές συσκευές ή και στα υβριδικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα συνδυαστικά με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. (M.A. Scibioh & B. Viswanathan, 2020).

2.2.3 Κυψέλες καυσίμων

Οι κυψέλες καυσίμου είναι συσκευές στις οποίες πραγματοποιούνται ηλεκτροχημικές αντιδράσεις και έτσι μετατρέπουν τη χημική ενέργεια των καυσίμων σε ηλεκτρική (D. Akinyele, 2020). Καθώς χρησιμοποιούν φιλικά προς το περιβάλλον αντιδραστήρια, αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την επίτευξη βιώσιμων μεταφορών, παρόλο που δεν έχει ακόμη υιοθετηθεί πλήρως λόγω δυσκολιών που χρήζουν αντιμετώπισης. Όπως και τα προηγούμενα είδη συσσωρευτών που αναφέρθηκαν, αποτελούνται από μια άνοδο και μια κάθοδο που διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι συνήθως το υδρογόνο (H_2), το οποίο εισάγεται στην άνοδο, οξειδώνεται και δημιουργεί ιόντα τα οποία ταξιδεύουν μέσω του ηλεκτρολύτη στην κάθοδο όπου και συνδυάζονται με το άλλο αντιδραστήριο που εισάγεται εκεί, που είναι συνήθως το οξυγόνο (O_2). Έτσι, απελευθερώνονται

ηλεκτρόνια τα οποία κινούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα παράγοντας συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα. Ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως ένα πολυμερές ή κάποιο άλλο υλικό που επιτρέπει τη διέλευση ιόντων αλλά εμποδίζει τη μεταφορά ηλεκτρονίων (L. Yan et al., 2020).

Η αντίδραση που λαμβάνει χώρα σε μια κυψέλη καυσίμου είναι η εξής:



Υπάρχουν βέβαια πολλοί τύποι κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούν διαφορετικά υλικά στην άνοδο, στην κάθοδο αλλά και ως ηλεκτρολύτη. Σε κάθε περίπτωση, αποτελούν μια πολύ αποδοτική τεχνολογία με ενεργειακή απόδοση έως και 70%, ποσοστό μεγαλύτερο από αυτό άλλων ηλεκτροχημικών συσσωρευτών. Ακόμη, η αρθρωτή τους δομή, τους επιτρέπει να στοιβάζονται η μία δίπλα στην άλλη, με την παρεμβολή πορώδους υλικού που τις συνδέει ηλεκτρικά σε σειρά, και έτσι μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή ισχύς. Τέλος, εξίσου βασικό πλεονέκτημα αποτελούν οι χαμηλές εκπομπές ρύπων, γεγονός που καθιστά τις κυψέλες καυσίμου μια εξαιρετικά φιλική προς το περιβάλλον λύση για την τροφοδοσία ενός ηλεκτρικού οχήματος.

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα, η δυσκολία της αποθήκευσης του υδρογόνου για χρήση ως καύσιμο αποτελεί σίγουρα το βασικότερο. Απαιτούνται δεξαμενές που να αποθηκεύουν σωστά το υδρογόνο και να ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο έκρηξης σε περίπτωση ατυχήματος. Τέλος, μειονεκτήματα είναι επίσης και η αθόρυβη λειτουργία τους, το υψηλό κόστος κατασκευής, η σχετικά μικρή διάρκεια ζωής αλλά και η χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τα καύσιμα που προέρχονται από πετρέλαιο. Για τους παραπάνω λόγους, οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται συνδυαστικά με άλλα είδη μπαταριών και συχνά αποτελούν εφεδρικά συστήματα ενέργειας σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές και σε υβριδικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα (A. Brouzgou, 2014).

2.2.4 Μετατροπéας ισχύος (ελεγκτής)

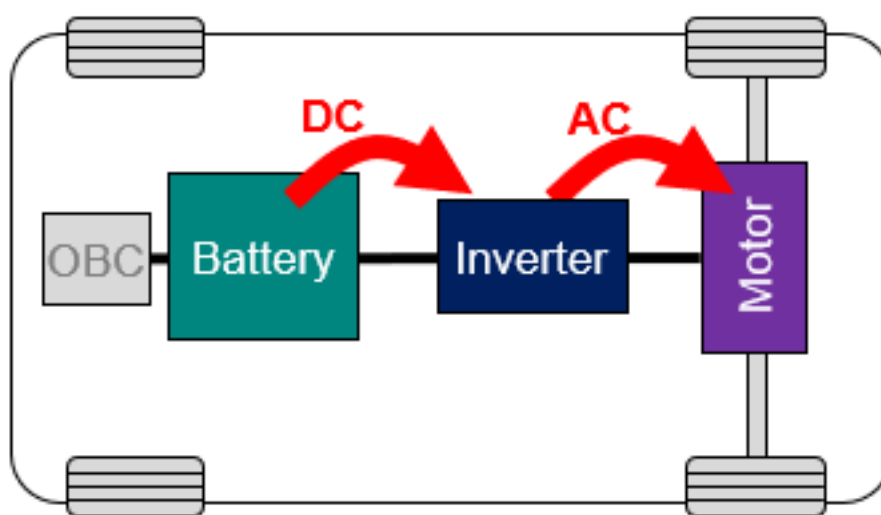
Ο μετατροπέας ισχύος είναι ένα εξάρτημα που παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής ισχύος και του κινητήρα. Κύρια λειτουργία του είναι να μετασχηματίζει την ηλεκτρική ενέργεια από τη μπαταρία, δηλαδή τη συνεχή τάση των συσσωρευτών, σε τάση και ρεύμα εξόδου κατάλληλης μορφής και πλάτους για την τροφοδότηση του κινητήρα. Η επιλογή του μετατροπέα που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα ηλεκτρικό όχημα εξαρτάται από το είδος της πηγής αλλά και του κινητήρα. Οι συνηθέστεροι μετατροπéες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτροκίνησης είναι ο μετατροπέας DC- DC (chopper) και DC- AC (inverter).

Ο μετατροπέας DC- DC (chopper) είναι ένας ηλεκτρονικός μηχανισμός που μετατρέπει μια συνεχή τάση (DC), σε μια ρυθμιζόμενη συνεχή τάση (DC) άλλης τιμής. Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται μέσω μιας τεχνικής διακοπής της τροφοδοσίας του φορτίου σε πολύ υψηλές συχνότητες. Πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια διακοπών τύπου τρανζίστορ ή θυριστόρων, συνδέεται και αποκόπτεται το φορτίο είτε με σταθερή συχνότητα μεταβάλλοντας το χρόνο αγωγής, είτε διατηρώντας σταθερά τα χρονικά

διαστήματα και μεταβάλλοντας τη συχνότητα. Έτσι η έξοδος του chopper να μπορεί να προσαρμοστεί σε μια επιθυμητή τιμή.

Ο μετατροπέας DC- AC (inverter) είναι μία συσκευή που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα DC σε εναλλασσόμενο AC. Η βασική αρχή λειτουργίας του μονοφασικού αντιστροφέα περιλαμβάνει τη χρήση τεσσάρων διακοπών- θυριστόρων. Κλείνοντας και ανοίγοντας ζεύγη διακοπών, δημιουργείται μια τετραγωνική κυματομορφή στην έξοδο, η οποία μπορεί να προσεγγίσει τη μορφή του εναλλασσόμενου ρεύματος. Για την τροφοδότηση με επαγωγικά φορτία, κάθε διακόπτης μπορεί να υλοποιηθεί με ένα θυρίστορ και μια αντιπαράλληλη δίοδο, επιτρέποντας τη δημιουργία άεργης ισχύος. Στον τριφασικό αντιστροφέα, υπάρχουν έξι διακόπτες που ενεργοποιούνται σε φάσεις με γωνιακές διαφορές, παράγοντας τριφασική έξοδο. Με τη διαμόρφωση εύρους παλμών, η κυματομορφή προσεγγίζει την ημιτονοειδή μορφή. Η συχνότητα εξόδου του αντιστροφέα εξαρτάται από το είδος των ηλεκτρονικών διακοπών, ενώ ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής σταθεροποιεί την τάση εισόδου. Σε περιπτώσεις όπου διατίθεται εναλλασσόμενο ρεύμα, απαιτούνται δύο στάδια μετατροπής: από AC σε DC και μετά από DC σε AC.

Οι μετατροπείς ισχύος που αναφέρθηκαν χρησιμοποιούνται επιπλέον προκειμένου να γίνεται έλεγχος στροφών με τη βοήθεια της μεταβλητής τάσης. Με την αντιστροφή της πολικότητας μπορεί να γίνει εύκολα και η ομαλή πέδηση του οχήματος με επιστροφή ενέργειας στους συσσωρευτές. Επίσης η εκκίνηση γίνεται ομαλά και εύκολα, γιατί η τάση μπορεί να αυξάνεται βαθμιαία. Στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που ο κινητήρας τροφοδοτείται από συσσωρευτές, η χρήση των μετατροπέων απαλλάσσει από όλες τις αντιστάσεις ρύθμισης, εκκίνησης, πέδησης, που καταναλώνουν σημαντική ποσότητα ενέργειας. Τέλος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο τάσης διέγερσης σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος (Sumukh Surya et al., n.d.).



Εικόνα 33: Σύστημα μετατροπής ισχύος

Πηγή:

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Findustrial.panasonic.com%2Ftw%2Fds%2Fss%2Ftechnical%2Fap6&psig=AOvVaw08ESJj4BPzp7ntao-tv0z&ust=1758219430553000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBUQjRxqFwoTCMDsxv6z4I8DFQAAAAAdAAAAABAE>

2.2.5 Ηλεκτροκινητήρας

Ο ηλεκτρικός κινητήρας αποτελεί την καρδιά ενός ηλεκτρικού οχήματος, μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική κίνηση. Αποτελείται από δύο κύρια μέρη: τον στάτη, που είναι το ακίνητο εξωτερικό μέρος του κινητήρα, και τον δρομέα, το κινούμενο εσωτερικό μέρος που περιστρέφεται. Ο στάτης περιλαμβάνει πηνία ή μόνιμους μαγνήτες που δημιουργούν μαγνητικό πεδίο, ενώ ο δρομέας, τοποθετημένος μέσα στον στάτη, περιέχει αγωγούς που αλληλεπιδρούν με το μαγνητικό πεδίο, προκαλώντας περιστροφή. Ο συνδυασμός αυτών των στοιχείων επιτρέπει στον ηλεκτροκινητήρα να λειτουργεί αποδοτικά, παρέχοντας κίνηση στα ηλεκτρικά οχήματα. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται είναι είτε συνεχούς ρεύματος (DC), είτε εναλλασσόμενου (AC).



Εικόνα 35: Ηλεκτροκινητήρας

Πηγή : https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Finsideevs.com%2Fnews%2F374749%2FTesla-ev-gas-car-electric-horses%2F&psig=AOvVaw1loZ2TKGZxSWMG0VjM1Q_L&ust=1758219541716000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBUQjRxqFwoTCJCcoL-04I8DFQAAAAAdAAAAABAE

2.2.5.1 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος (DC)

Οι κυριότεροι τύποι κινητήρων συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροκίνηση είναι οι εξής: Ο κινητήρας με διέγερση εν σειρά, ο οποίος έχει τα πηνία διέγερσης και το πηνίο του δρομέα συνδεδεμένα σε σειρά, προσφέροντας υψηλή ροπή εκκίνησης. Χρησιμοποιείται συχνά σε οχήματα που απαιτούν δυνατή επιτάχυνση από στάση, όπως σε κάποιες εφαρμογές ηλεκτρικών αυτοκινήτων και τρένων. Ο κινητήρας με παράλληλη διέγερση, όπου τα πηνία διέγερσης είναι συνδεδεμένα παράλληλα με το πηνίο του δρομέα, παρέχοντας πιο σταθερή ταχύτητα και είναι κατάλληλος για εφαρμογές όπου η σταθερότητα της ταχύτητας είναι σημαντική. Ο κινητήρας με ξένη διέγερση, ο οποίος έχει τα πηνία διέγερσης τροφοδοτούμενα από ξεχωριστή πηγή τάσης, επιτρέποντας ανεξάρτητο έλεγχο της ροπής και της ταχύτητας, κάτι που τον καθιστά ιδανικό για εξειδικευμένες βιομηχανικές εφαρμογές. Τέλος, ο κινητήρας με μόνιμο μαγνήτη, ο οποίος χρησιμοποιεί μόνιμους μαγνήτες αντί για πηνία διέγερσης, προσφέροντας υψηλή απόδοση και απλότητα κατασκευής, και είναι συνηθισμένος σε μικρότερα ηλεκτρικά οχήματα και μοτοποδήλατα.

2.2.5.2 Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC)

Όσον αφορά τους κινητήρες AC, αυτοί χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Κινητήρες με ημιτονοειδή τάση τροφοδοσίας:

Οι κυριότεροι τύποι τριφασικών κινητήρων που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροκίνηση είναι οι εξής: Ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού, ο οποίος είναι ευρέως διαδεδομένος λόγω της απλότητας, της ανθεκτικότητας και του χαμηλού κόστους κατασκευής. Χρησιμοποιείται σε πολλές βιομηχανικές και οικιακές εφαρμογές. Ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα, ο οποίος επιτρέπει καλύτερο έλεγχο της εκκίνησης και της ταχύτητας, αν και είναι πιο περίπλοκος και ακριβότερος. Τέλος, ο σύγχρονος τριφασικός κινητήρας με ή χωρίς μόνιμο μαγνήτη, ο οποίος είναι γνωστός για την υψηλή αποδοτικότητα και το συμπαγή σχεδιασμό του. Χρησιμοποιείται συχνά σε σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα λόγω της υψηλής απόδοσης και της δυναμικής απόκρισης.

- Κινητήρες που τροφοδοτούνται με τετραγωνικούς παλμούς:

Ο κινητήρας τύπου Brushless DC (BLDC), ο οποίος συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των κινητήρων συνεχούς ρεύματος με την αποδοτικότητα των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος, προσφέροντας υψηλή απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής λόγω της απουσίας ψυκτρών. Ο κινητήρας τύπου Switched Reluctance, ο οποίος χρησιμοποιεί έναν απλό και ανθεκτικό σχεδιασμό, καθιστώντας τον ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ταχύτητα και αντοχή.

Η επιλογή του κατάλληλου κινητήρα για ένα ηλεκτρικό όχημα εξαρτάται από διάφορα κριτήρια, όπως η ενεργειακή αποδοτικότητα, η απόδοση, το κόστος, η απλότητα κατασκευής και οι συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής. Συχνά, ο τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας με βραχυκυκλωμένο κλωβό, ο σύγχρονος κινητήρας με μόνιμο μαγνήτη, ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος με μόνιμο μαγνήτη και οι κινητήρες τύπου Brushless DC αποτελούν τις πιο δημοφιλείς επιλογές λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν σε αποδοτικότητα, αντοχή και ευκολία συντήρησης (K. C. Ramya et al., n.d.).

2.3 Οι επιπτώσεις της ηλεκτροκίνησης στο περιβάλλον

Η ηλεκτροκίνηση για πολλούς αποτελεί πλέον μια αναγκαιότητα για την προστασία του περιβάλλοντος και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Τα συμβατικά οχήματα, που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα, εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και άλλων ρύπων, συμβάλλοντας στη ρύπανση του αέρα και την αύξηση του ανθρακικού αποτυπώματος. Αντιθέτως, τα ηλεκτρικά οχήματα δεν εκπέμπουν ρύπους κατά την κίνησή τους, μειώνοντας σημαντικά τη ρύπανση στις πόλεις και συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας ζωής συνεπώς η εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης και η συνεχής προσπάθεια που καταβάλλεται σε εθνικό, ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο για την ενσωμάτωσή της στην καθημερινότητα, έχουν αναπτυχθεί σημαντικά.

Παρά τα αδιαμφισβήτητα οφέλη της, η ηλεκτροκίνηση δεν στερείται προκλήσεων και αρνητικών πτυχών που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Καθώς η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται, εμφανίζονται νέες ανησυχίες, οι οποίες σχετίζονται κυρίως με το περιβαλλοντικό κόστος.

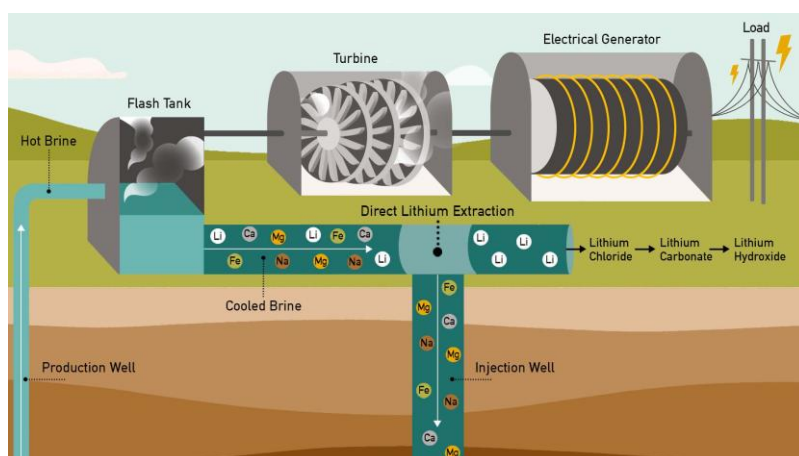
2.3.1 Αρνητικά παραγωγής μπαταριών

Οι μπαταρίες των ηλεκτρικών αυτοκινήτων αποτελούν έναν από τους βασικότερους λόγους για τους οποίους η ηλεκτροκίνηση προβάλλεται ως μια βιώσιμη λύση για το μέλλον των μεταφορών. Ένα από τα κύρια θετικά των μπαταριών είναι ότι επιτρέπουν στα ηλεκτρικά οχήματα να λειτουργούν χωρίς την εκπομπή ρύπων, κάτι που συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και του ανθρακικού αποτυπώματος. Επιπλέον, οι μπαταρίες λιθίου-ιόντων, που χρησιμοποιούνται ευρέως στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, γεγονός που σημαίνει ότι αποθηκεύουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε σχετικά μικρό όγκο, προσφέροντας ικανοποιητική αυτονομία. Ωστόσο η ανακύκλωση και η διαδικασία παραγωγής των συσσωρευτών των ηλεκτρικών οχημάτων φέρει έντονους προβληματισμούς, σχετικά με τη φιλική δράση της ηλεκτροκίνησης προς το περιβάλλον (van den Brink et al., 2013).

2.3.1.α Επιπτώσεις του λιθίου στο περιβάλλον ως μέρος της παραγωγής

Συγκεκριμένα, η παραγωγή αυτών των συσσωρευτών συμβάλλει σημαντικά στην περιβαλλοντική ρύπανση, καθώς απαιτεί τη χρήση πρώτων υλών όπως το λίθιο, το κοβάλτιο και διάφορα άλλα σπάνια μέταλλα. Η εξόρυξη και η επεξεργασία αυτών των υλικών δημιουργούν σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα, καθώς καταναλώνουν τεράστιες ποσότητες ενέργειας και νερού, ενώ παράλληλα προκαλούν τη ρύπανση του εδάφους και του υδροφόρου ορίζοντα (Sutherland W. et al., 2004).

Ειδικότερα το λίθιο, ένα από τα κύρια συστατικά των μπαταριών, δεν είναι ανανεώσιμο και εξάγεται με δύο βασικές μεθόδους: 1) από ορυχεία σκληρού πετρώματος και 2) από αλμυρές λίμνες, γνωστές και ως άλμες.

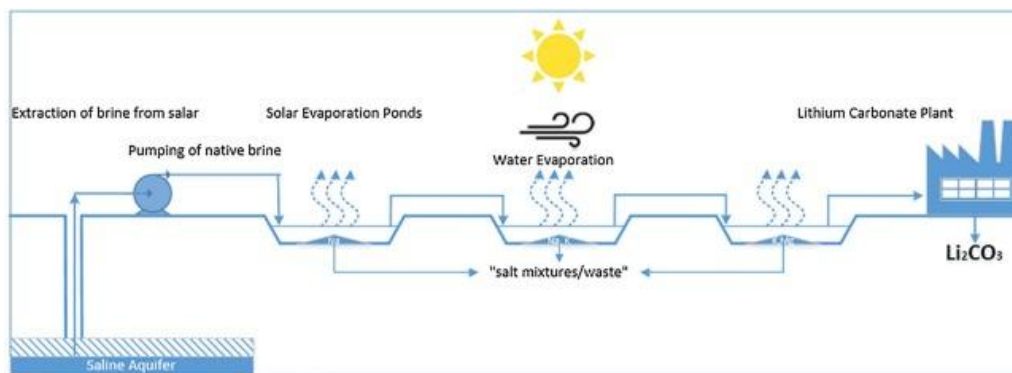


Εικόνα 36: Εξόρυξη λιθίου από σκληρό πέτρωμα

Πηγή: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.thinkgeoenergy.com%2Freviewing-technologies-for-lithium-extraction-from-geothermal-brines%2F&psig=AOvVaw3AV7n4eFLs-YeMTi5Ti2ya&ust=1758219749762000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CБУQjRxqFwoTCliC4214I8DFQAAAAAAdAAAAABAE>

Η πρώτη μέθοδος, εξόρυξης από σκληρό πέτρωμα, περιλαμβάνει την εξόρυξη λίθων που περιέχουν λίθιο, όπως ο σπιλυμένος, ένα ορυκτό πλούσιο σε αυτό το μέταλλο. Οι βράχοι αυτοί εξορύσσονται από το έδαφος με παραδοσιακές μεθόδους εξόρυξης, συνθλίβονται και στη συνέχεια υποβάλλονται σε χημική επεξεργασία, προκειμένου να απομονωθεί το λίθιο από τα υπόλοιπα στοιχεία. Αυτή η διαδικασία πέραν ότι είναι πιο δαπανηρή και ενεργοβόρα από την δεύτερη, προσφέρει υψηλότερες συγκεντρώσεις λιθίου.

Η δεύτερη μέθοδος είναι η εξόρυξη από αλμυρές λίμνες, μια πιο συνηθισμένη και οικονομική διαδικασία. Στην περίπτωση αυτή, το λίθιο εξάγεται από υπόγειες αλμυρές λίμνες, οι οποίες βρίσκονται κυρίως σε αλυκές περιοχές της Νότιας Αμερικής, όπως το γνωστό "Τρίγωνο του Λιθίου" που καλύπτει τη Χιλή, την Αργεντινή και τη Βολιβία. Η διαδικασία ξεκινά με την άντληση της άλμης, η οποία είναι πλούσια σε λίθιο, στην επιφάνεια της γης. Εκεί, η άλμη αφήνεται να εξατμιστεί φυσικά σε μεγάλες δεξαμενές υπό τον ήλιο, με στόχο να αυξηθεί η συγκέντρωση του λιθίου. Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται χημικές διεργασίες για την απομόνωσή του. Συγκεκριμένα, για να παραχθεί ένας τόνος λιθίου, απαιτούνται περίπου 2,2 εκατομμύρια λίτρα νερού, γεγονός που έχει οδηγήσει σε συγκρούσεις και αντιπαραθέσεις σχετικά με την πρόσβαση στο νερό, από τις τοπικές κοινότητες. Αυτή η έλλειψη νερού επιδεινώνει τις συνθήκες διαβίωσης στις περιοχές εξόρυξης, προκαλώντας κοινωνικές εντάσεις και περιβαλλοντική υποβάθμιση. Παράλληλα, αν και το αλμυρό νερό περιέχει δυνητικά έως και 180 δισεκατομμύρια τόνους λιθίου, παραμένει μια ανεκμετάλλευτη πηγή, καθώς η τεχνολογία που θα επέτρεπε την οικονομική του εκμετάλλευση, δυστυχώς, δεν έχει ακόμα αναπτυχθεί.



Εικόνα 37: Εξόρυξη λιθίου από αλμυρές λίμνες

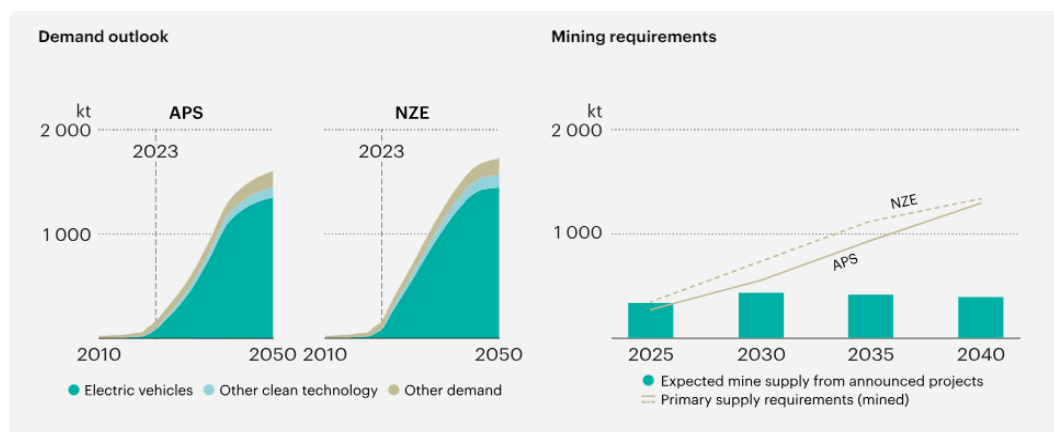
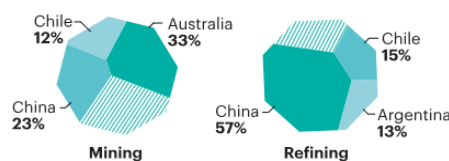
Πηγή:

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2FS0892687519302791&psig=AOvVaw2SG6SfhnP6J954GfPZhlxY&ust=1758220060754000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBUQjRxqFwoTCOiYnKW24I8DFQAAAAAdAAAAABAL>

Παρακάτω απεικονίζεται η προβλεπόμενη ζήτηση και οι απαιτήσεις εξόρυξης του λιθίου, σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA, 2024).

Li Lithium

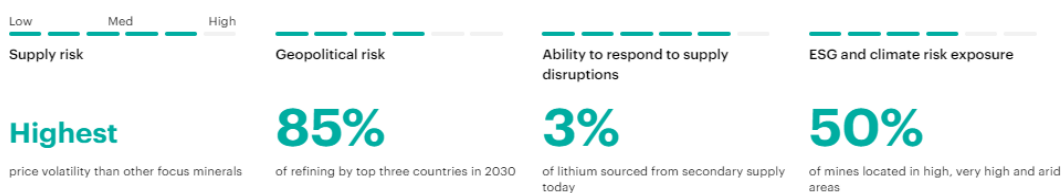
Top three producers 2030



Διάγραμμα 1: προβλεπόμενη ζήτηση και οι απαιτήσεις εξόρυξης του λιθίου

Milestones (APS)	2021	2023	2030	2040
Cleantech demand (kt)	38	92	442	1203
Other uses (kt)	63	73	90	123
Total demand (kt)	101	165	531	1326
Secondary supply and reuse (kt)	2	5	28	154
Primary supply requirements (kt)	100	160	503	1172
Share of top three mining countries	89%	85%	68%	70%
Share of top three refining countries	100%	96%	85%	84%

Clean energy transition risk assessment



Πίνακας 1: προβλεπόμενη ζήτηση και οι απαιτήσεις εξόρυξης του λιθίου

Πηγή: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>

Σύμφωνα με το γράφημα οι τρεις κορυφαίες χώρες που θα παράγουν λίθιο το 2030 μέσω εξόρυξης είναι η Κίνα(23%), η Αυστραλία(33%) και η Χιλή(12%), ενώ μέσω δύλισης θα είναι η Κίνα(57%) ,η Αργεντινή(13%) και η Χιλή(15%). Αυτό δείχνει ότι, παρά την προσπάθεια παραγωγής από πολλές χώρες, η Κίνα θα έχει κυρίαρχη θέση στην παραγωγή λιθίου, καθώς αναμένεται να κατέχει τεράστιο μερίδιο στην παγκόσμια παραγωγή.Επειτα απεικονίζονται οι προοπτικές ζήτησης (Demand Outlook), οι οποίες δείχνουν την προβλεπόμενη ζήτηση του λιθίου για τα επόμενα χρόνια σε δύο σενάρια:1)APS (Announced Pledges Scenario): Περιλαμβάνει δεσμεύσεις που έχουν

ήδη ανακοινωθεί από κυβερνήσεις και εταιρείες για την παραγωγή καθαρής ενέργειας

2) NZE (Net Zero Emissions): Πρόβλεψη για το σενάριο όπου επιτυγχάνεται καθαρός μηδενικός άνθρακας έως το 2050. Και στα δύο σενάρια, η ζήτηση για λίθιο αυξάνεται κατακόρυφα κυρίως λόγω των ηλεκτρικών οχημάτων και άλλων καθαρών τεχνολογιών, όπως η αποθήκευση ενέργειας.

Επιπρόσθετα παρουσιάζονται οι απαιτήσεις εξόρυξης, καθώς και η διαφορά μεταξύ των απαιτήσεων και της προσφοράς από ανακοινωθέντα έργα εξόρυξης. Μάλιστα, για το σενάριο APS, η προβλεπόμενη παραγωγή φτάνει κοντά στα 1000 kt (κιλοτόνους) για το 2030, ενώ για το σενάριο NZE, η προβλεπόμενη παραγωγή αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά, προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτούμενες ανάγκες, φτάνοντας περίπου τα 1500 kt το 2040. Ακόμη κάποια από τα σημαντικότερα δεδομένα που μπορούμε να αντλήσουμε επίσης, είναι: 1) η ζήτηση για λίθιο από την καθαρή τεχνολογία, η οποία αναμένεται να αυξηθεί από 38 kT, που παρατηρήθηκαν, το 2021 σε 1203 kT το 2040 2) Οι εναλλακτικές χρήσεις λιθίου (πέραν της καθαρής ενέργειας) οι οποίες παραμένουν σχετικά σταθερές για μικρή χρονική περίοδο, αλλά παρουσιάζουν μια ανοδική τάση για τα έτη 2030-2040 από 90 σε 123 kt 3) Οι απαιτήσεις εξόρυξης για την πρωτογενή προσφορά λιθίου, οι οποίες αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά από 100 kT το 2021 σε 1172 kT το 2040.

Τέλος παρατίθεται μια αξιολόγηση κινδύνων (risk assessment) που σχετίζεται με τη μετάβαση στην καθαρή ενέργεια μέσω της εξόρυξης και της επεξεργασίας του λιθίου. Ειδικότερα αναλύεται ο κίνδυνος σε τέσσερις κατηγορίες, εκ των οποίων οι σημαντικότερες είναι:

- 1) Ο γεωπολιτικός κίνδυνος, οποίος είναι αρκετά υψηλός, καθώς το 85% της διύλισης γίνεται σε τρεις χώρες
- 2) Ο κίνδυνος προμήθειας, ο οποίος είναι χαμηλός αφού μόνο το 3% του λιθίου προέρχεται από δευτερογενείς πηγές
- 3) οι δείκτες ESG και η έκθεση σε κλιματικούς κινδύνους, τα οποία έχουν υψηλό ποσοστό (μόλις 50%) δηλώνοντας πως τουλάχιστον το ήμισυ των ορυχείων λιθίου βρίσκεται σε περιοχές με υψηλά ή άνωδρα κλίματα, κάτι που σημαίνει ότι η εξόρυξη ενέχει σοβαρές περιβαλλοντικές προκλήσεις και κινδύνους βιωσιμότητας.

Συμπερασματικά μέχρι το 2040 αναμένεται μία ραγδαία αύξηση στη ζήτηση του λιθίου, κυρίως λόγω της μετάβασης στην καθαρή ενέργεια και την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων. Ταυτόχρονα παρουσιάζεται έντονα ο γεωπολιτικός κίνδυνος ο οποίος συνδέεται στενά με την εξόρυξη του συγκεκριμένου μετάλλου.



Εικόνα 38: Οι Αλυκές απόληψης Λιθίου στην Βολιβία .

Πηγή: <https://cen.acs.org/energy/energy-storage-/Bolivia-picks-Chinese-firms-1-billion-lithium-project/101/web/2023/01>

2.3.1.β Επιπτώσεις του κοβαλτίου στο περιβάλλον ως μέρος της παραγωγής

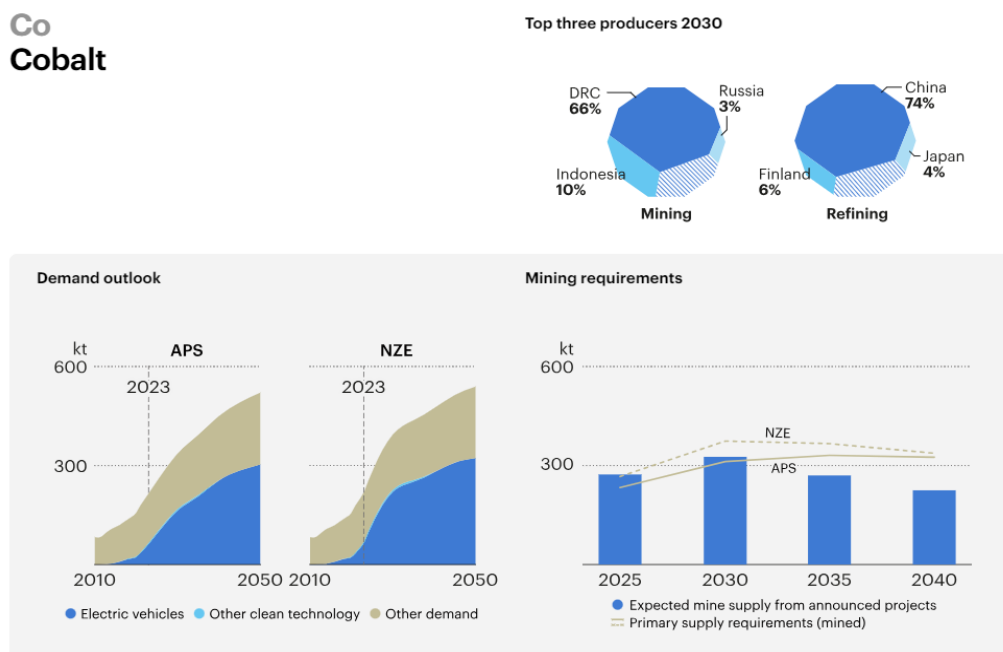
Πέρα από το λίθιο ένα από τα σημαντικότερα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι το κοβάλτιο. Το κοβάλτιο, όπως και το λίθιο (όπως προαναφέρθηκε), παίζει κεντρικό ρόλο στην αποθήκευση ενέργειας και στην αύξηση της αποδοτικότητας των μπαταριών, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπως τα ηλεκτρικά οχήματα (EVs) και οι φορητές συσκευές.

Η εξόρυξη κοβαλτίου πραγματοποιείται κυρίως στη Δημοκρατία του Κονγκό (DRC), η οποία καλύπτει πάνω από το 60% της παγκόσμιας παραγωγής. Το κοβάλτιο συνήθως εξορύσσεται ως υποπροϊόν της εξόρυξης χαλκού και νικελίου, ενώ η διαδικασία εξόρυξής του περιλαμβάνει την απομάκρυνση μεγάλων όγκων γης, προκειμένου να αποκτηθεί πρόσβαση στα πλούσια κοιτάσματα του μεταλλεύματος τα οποία βρίσκονται στα υπόγεια στρώματα. Στη συνέχεια, το μέταλλευμα μεταφέρεται σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας, όπου το κοβάλτιο διαχωρίζεται από άλλα υλικά μέσω πολύπλοκων και χημικά έντονων διεργασιών.

Ωστόσο, η εξόρυξη και επεξεργασία του κοβαλτίου έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

- Πρώτον, η εξόρυξη σε μεγάλες κλίμακες οδηγεί στην αποψίλωση δασών και στη διαταραχή των φυσικών οικοσυστημάτων, καθώς απαιτούνται μεγάλες εκτάσεις γης για την εξόρυξη των μεταλλευμάτων. Αυτές οι δραστηριότητες αυξάνουν τον κίνδυνο διάβρωσης του εδάφους, υποβαθμίζοντας τη γονιμότητα και την ποιότητα των τοπικών φυσικών πόρων.
- Δεύτερον, η διαδικασία της εξόρυξης και επεξεργασίας μπορεί να μολύνει τα υπόγεια ύδατα, μέσω της διαρροής τοξικών ουσιών που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία του κοβαλτίου. Τα ορυκτά απόβλητα και οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται μπορεί να διεισδύσουν στους υδάτινους πόρους, προκαλώντας περιβαλλοντική ρύπανση, γεγονός που συνεπάγεται επιζήμιες επιπτώσεις, τόσο στην ανθρώπινη υγεία, όσο και στο φυσικό οικοσύστημα (Öko-Institut, 2011) .

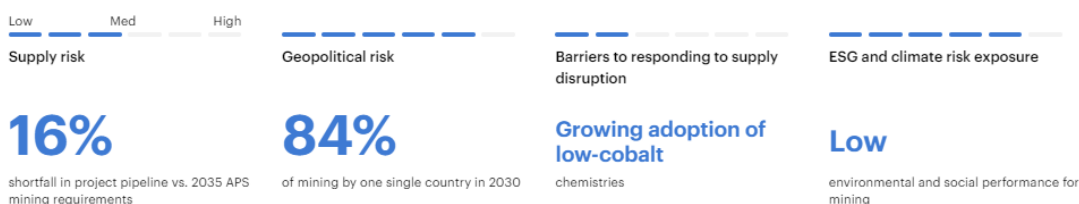
Παρακάτω απεικονίζεται η προβλεπόμενη ζήτηση και οι απαιτήσεις εξόρυξης του κοβαλτίου, σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA, 2024).



Διάγραμμα 2: προβλεπόμενη ζήτηση και οι απαιτήσεις εξόρυξης του κοβαλτίου

Milestones (APS)	2021	2023	2030	2040
Cleantech demand (kt)	36	64	177	260
Other uses (kt)	145	150	167	194
Total demand (kt)	181	215	344	454
Secondary supply and reuse (kt)	15	24	45	131
Primary supply requirements (kt)	100	166	299	323
Share of top three mining countries	75%	77%	84%	84%
Share of top three refining countries	86%	88%	84%	85%

Clean energy transition risk assessment



Πίνακας 2: προβλεπόμενη ζήτηση και οι απαιτήσεις εξόρυξης του κοβαλτίου

Πηγή: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>

Σύμφωνα με το γράφημα οι τρεις κορυφαίες χώρες που θα παράγουν κοβάλτιο το 2030 μέσω εξόρυξης είναι η Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό(66%), η Ινδονησία (10%) και η Ρωσία (3%), ενώ μέσω διύλισης θα είναι η Κίνα(74%), η Ιαπωνία (4%) και η Φινλανδία(6%). Έπειτα απεικονίζονται οι προοπτικές ζήτησης (Demand Outlook), οι οποίες δείχνουν την προβλεπόμενη ζήτηση του κοβαλτίου για τα επόμενα χρόνια σε

δύο σενάρια. Όπως και πριν το σενάριο APS (Announced Pledges Scenario) περιλαμβάνει δεσμεύσεις που έχουν ήδη ανακοινωθεί από κυβερνήσεις και εταιρείες για την παραγωγή καθαρής ενέργειας, ενώ το σενάριο NZE (Net Zero Emissions), αφορά την πρόβλεψη σύμφωνα με την οποία επιτυγχάνεται καθαρός μηδενικός άνθρακας έως το 2050. Και στα δύο σενάρια, η ζήτηση για κοβάλτιο αυξάνεται έντονα, κυρίως λόγω των ηλεκτρικών οχημάτων και άλλων καθαρών τεχνολογιών, όπως η αποθήκευση ενέργειας.

Επιπρόσθετα παρουσιάζονται οι απαιτήσεις εξόρυξης, καθώς και η διαφορά μεταξύ των απαιτήσεων και της προσφοράς από ανακοινωθέντα έργα εξόρυξης. Μάλιστα, για το σενάριο APS, η προβλεπόμενη παραγωγή φτάνει περίπου τα 300 kt (κιλοτόνους) για το 2030, ενώ για το σενάριο NZE, η προβλεπόμενη παραγωγή αναμένεται να μειωθεί ελάχιστα, παραμένοντας σχεδόν στα 300 kt και το 2040. Ακόμη μερικά από τα σημαντικότερα δεδομένα που μπορούμε να αντλήσουμε επίσης, είναι: 1) η ζήτηση για κοβάλτιο από την καθαρή τεχνολογία, η οποία αναμένεται να αυξηθεί από 36 kT, που παρατηρήθηκαν, το 2021 σε 260 kT το 2040 2) Οι εναλλακτικές χρήσεις κοβαλτίου (πέραν της καθαρής ενέργειας) οι οποίες παρουσιάζουν μια ανοδική τάση για τα έτη 2030-2040 από 344 σε 454 kt 3) Οι απαιτήσεις εξόρυξης για την πρωτογενή προσφορά κοβαλτίου, οι οποίες αναμένεται να αυξηθούν ελάχιστα από 100 kT το 2021 σε 323 kT το 2040.

Τέλος παρατίθεται η αξιολόγηση κινδύνων (risk assessment) σχετικά με τη μετάβαση στην καθαρή ενέργεια μέσω της εξόρυξης και της επεξεργασίας του κοβαλτίου. Ειδικότερα ο γεωπολιτικός κίνδυνος είναι ο μόνος ο οποίος είναι αρκετά υψηλός, λαμβάνει ένα ποσοστό της τάξης του 86%. Συμπερασματικά μέχρι το 2040 αναμένεται μία έντονη αύξηση στη ζήτηση του κοβαλτίου, κυρίως λόγω της μετάβασης στην καθαρή ενέργεια και την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων.



Εικόνα 39: Πλάνο από την διαδικασία εξόρυξης Κοβαλτίου στην Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό.

Πηγή: <https://www.leighday.co.uk/news/blog/2023-blogs/cobalt-mining-in-the-democratic-republic-of-congo-where-next/>

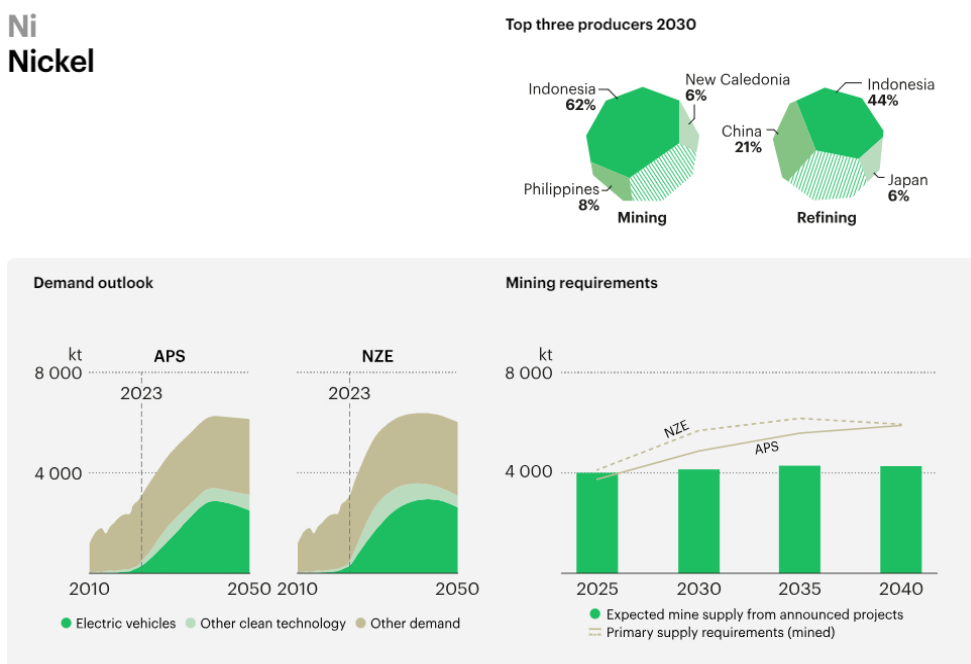
2.3.1.γ Επιπτώσεις του νικελίου στο περιβάλλον ως μέρος της παραγωγής

Το νικέλιο όπως είδαμε είναι ένα από τα πιο σημαντικά μέταλλα που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και ειδικά στις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Το νικέλιο δεν βελτιώνει μόνο την αποδοτικότητα και την ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών αλλά αυξάνει και την ενεργειακή αποθήκευση. Ακόμη μειώνει την ανάγκη για κοβάλτιο, το οποίο έχει πιο περιορισμένες πηγές και σοβαρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Ειδικότερα, η εξόρυξη του νικελίου μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο βασικούς τρόπους, ανάλογα με τον τύπο του κοιτάσματος. 1) την εξόρυξη από θειούχα μεταλλεύματα και 2) την εξόρυξη από λατεριτικά κοιτάσματα. Η πρώτη μέθοδος περιλαμβάνει την εκσκαφή και επεξεργασία θειούχων μεταλλευμάτων, όπου το νικέλιο συνήθως βρίσκεται σε συνδυασμό με χαλκό και σίδηρο. Η εξόρυξη των λατεριτικών κοιτασμάτων, που απαντώνται σε τροπικές περιοχές όπως η Ινδονησία και οι Φιλιππίνες, είναι πιο απαιτητική και ενεργοβόρα, καθώς το νικέλιο εξάγεται από το επιφανειακό έδαφος και στη συνέχεια υποβάλλεται σε χημική επεξεργασία με σκοπό να απομονωθεί.

Η εξόρυξη και επεξεργασία του νικελίου παρα τα οφέλη στην αυτοβιομηχανία έχει πολλές περιβαλλοντικές συνέπειες. Αρχικά, η εξόρυξη λατεριτικών κοιτασμάτων σε τροπικές περιοχές οδηγεί συχνά σε αποψίλωση δασών (όπως και το κοβάλτιο) και καταστροφή των φυσικών οικοσυστημάτων, επιδεινώνοντας την απώλεια βιοποικιλότητας. Αυτές οι δραστηριότητες απαιτούν την απομάκρυνση του εδάφους, το οποίο επηρεάζει τη γονιμότητα του εδάφους και μπορεί να προκαλέσει διάβρωση. Η επεξεργασία του νικελίου είναι επίσης ενεργοβόρα και παράγει μεγάλες ποσότητες τοξικών αποβλήτων. Οι μεταλλευτικές δραστηριότητες συχνά απελευθερώνουν ρύπους, όπως διοξείδιο του θείου και άλλους τοξικούς αέριους ρύπους, που συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση και την οξίνιση των υδάτων. Επιπλέον, η απόρριψη τοξικών υγρών αποβλήτων στις υδάτινες πηγές μπορεί να ρυπάνει ποτάμια και λίμνες, επηρεάζοντας τη ζωή των υδρόβιων οργανισμών και την ποιότητα του πόσιμου νερού.

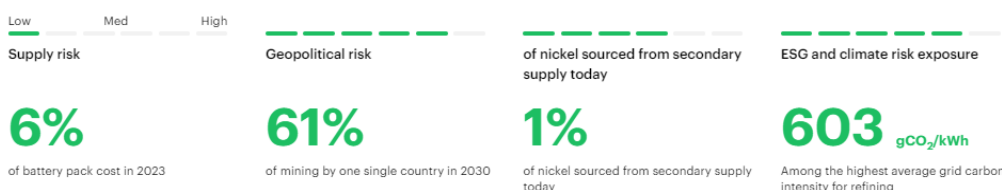
Παρακάτω απεικονίζεται η προβλεπόμενη ζήτηση και οι απαιτήσεις εξόρυξης του νικελίου, σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA, 2024).



Διάγραμμα 3: προβλεπόμενη ζήτηση και οι απαιτήσεις εξόρυξης του νικελίου

Milestones (APS)	2021	2023	2030	2040
Cleantech demand (kt)	240	478	1 953	3 381
Other uses (kt)	2 519	2 627	2 802	2 857
Total demand (kt)	2 759	3 104	4 754	6 238
Secondary supply and reuse (kt)	10	43	139	613
Primary supply requirements (kt)	2 749	3 061	4 615	5 625
Share of top three mining countries	60%	69%	76%	83%
Share of top three refining countries	66%	71%	71%	73%

Clean energy transition risk assessment



Πίνακας 3: προβλεπόμενη ζήτηση και οι απαιτήσεις εξόρυξης του νικελίου

Πηγή: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>

Σύμφωνα με το γράφημα οι τρεις κορυφαίοι παραγωγοί για το 2030 μέσω εξόρυξης αναμένεται να είναι η Ινδονησία (62%) ,οι Φιλιπίνες (8%)και η Νέα Καληδονία(6%) , ενώ μέσω δύλισης αναμένεται να είναι η Κίνα(21%) , η Ιαπωνία (6%) και η Ινδονησία(44%). Έπειτα απεικονίζονται οι προοπτικές ζήτησης (Demand Outlook), οι οποίες δείχνουν την προβλεπόμενη ζήτηση του κοβαλτίου για τα επόμενα χρόνια σε δύο σενάρια. Όπως και πριν το σενάριο APS (Announced Pledges Scenario)περιλαμβάνει δεσμεύσεις που έχουν ήδη ανακοινωθεί από κυβερνήσεις και εταιρείες για την παραγωγή καθαρής ενέργειας, ενώ το σενάριο NZE (Net Zero Emissions),αφορά την πρόβλεψη σύμφωνα με την οποία επιτυγχάνεται καθαρός μηδενικός άνθρακας έως το 2050.Και στα δύο σενάρια, η ζήτηση για νικέλιο αυξάνεται

έντονα, όμως παρατηρείται μία ελάχιστη μείωση στη ζήτηση για λόγους ηλεκτροκίνησης μεταξύ των ετών 2040-2050.

Επιπρόσθετα παρουσιάζονται οι απαιτήσεις εξόρυξης, καθώς και η διαφορά μεταξύ των απαιτήσεων και της προσφοράς από ανακοινωθέντα έργα εξόρυξης. Συγκεκριμένα σύμφωνα με τις προβλέψεις, οι ανάγκες εξόρυξης θα αυξηθούν σταθερά μέχρι το 2040. Το γράφημα δείχνει ότι η προμήθεια από ανακοινωμένα έργα (πράσινες στήλες) θα καλύπτει μεγάλο μέρος της ζήτησης, αλλά για το σενάριο NZE (διακεκομμένη γραμμή), μπορεί να υπάρχουν ελλείψεις αν δεν υπάρχει επιπλέον εξόρυξη. Ακόμη μερικά από τα σημαντικότερα δεδομένα που μπορούμε να αντλήσουμε επίσης, είναι ότι 1) η ζήτηση νικελίου για καθαρές τεχνολογίες (κυρίως για ηλεκτρικά οχήματα) θα αυξηθεί από 240 kt το 2021 σε 3.381 kt το 2040 2) η συνολική ζήτηση νικελίου θα φτάσει τις 6.238 kt το 2040, και 3) ο δευτερογενής εφοδιασμός και η ανακύκλωση του νικελίου θα αυξηθούν σταδιακά, από μόλις 10 kt το 2021 σε 613 kt το 2040.

Τέλος παρατίθεται η αξιολόγηση κινδύνων (risk assessment) σχετικά με τη μετάβαση στην καθαρή ενέργεια μέσω της εξόρυξης και της επεξεργασίας του νικελίου. Συγκεκριμένα ο Κίνδυνος εφοδιασμού (Supply risk) καταλαμβάνει το 16% καθιστώντας τον κίνδυνο για διακοπές στην αλυσίδα εφοδιασμού υπαρκτό. Επίσης ο Γεωπολιτικός κίνδυνος (Geopolitical risk) καταλαμβάνει ένα μεγάλο ποσοστό της τάξης του 69%, ενώ οι δείκτες ESG και οι κίνδυνοι περιβαλλοντικής έκθεσης μπορούν να αυξηθούν με την πάροδο του χρόνου λόγω της εντατικής εξόρυξης σε τροπικές περιοχές.



Εικόνα 40: Πλάνο από την διαδικασία εξόρυξης Νικελίου στην Ινδονησία.

Πηγή: <https://pulitzercenter.org/stories/tentacles-nickel-mines>

2.3.1.δ Επιπτώσεις του γραφίτη στο περιβάλλον ως μέρος της παραγωγής

Συμπερασματικά η αύξηση της ζήτησης για νικέλιο οδηγεί σε μεγαλύτερες προκλήσεις στην αλυσίδα εφοδιασμού, ενώ οι γεωπολιτικοί και περιβαλλοντικοί κίνδυνοι αυξάνονται. Προκειμένου να διασφαλιστεί μια πιο ομαλή μετάβαση προς την καθαρή ενέργεια και τη μαζική παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων, θα απαιτηθούν πιο βιώσιμες λύσεις εξόρυξης, καλύτερη ανακύκλωση και διεθνής συνεργασία για τη μείωση των κινδύνων αυτών.

Ο γραφίτης είναι ένα υλικό που κερδίζει όλο και περισσότερη προσοχή λόγω της κρίσιμης του σημασίας για τις μπαταρίες ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Πρόκειται για μια μορφή άνθρακα που έχει μοναδικές ιδιότητες, όπως η υψηλή αγωγιμότητα και η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας, καθιστώντας τον ιδανικό για τη χρήση στις μπαταρίες λιθίου-ιόντων (Li-ion), που είναι η πιο κοινή τεχνολογία στις σύγχρονες ηλεκτρικές οχηματικές μπαταρίες (όπως αναπτύχθηκε στη σχετική παράγραφο).

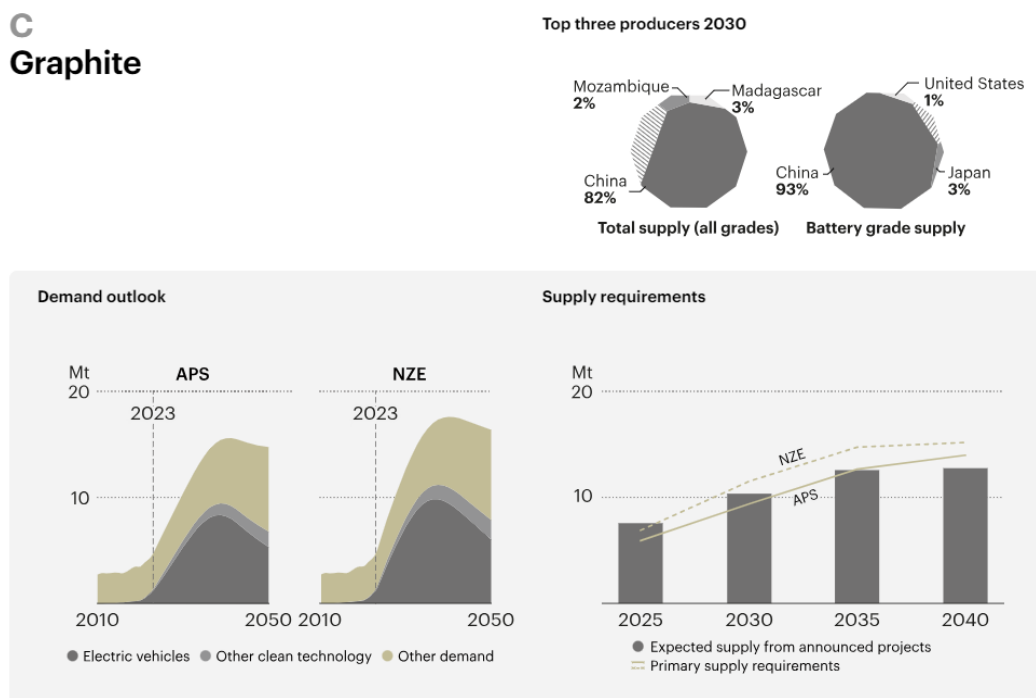
Η εξόρυξη του γραφίτη πραγματοποιείται συνήθως με δύο κύριες μεθόδους: 1) την υπόγεια εξόρυξη και 2) την ανοιχτή εξόρυξη. Η υπόγεια εξόρυξη περιλαμβάνει τη δημιουργία στοών κάτω από την επιφάνεια της γης για την εξαγωγή του γραφίτη, ενώ η ανοιχτή εξόρυξη περιλαμβάνει την αφαίρεση μεγάλων ποσοτήτων εδάφους και βράχων για την εξαγωγή του γραφίτη που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια. Η ανοιχτή εξόρυξη είναι συχνά πιο επιβλαβής για το περιβάλλον, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αλλαγές στη τοπική οικολογία, καταστροφή δασών και αύξηση της διάβρωσης του εδάφους. Επιπλέον, η διαδικασία εξόρυξης μπορεί να μολύνει τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα με χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Ακόμη ένα ζήτημα είναι η επιβάρυνση της ατμόσφαιρας, καθώς οι διαδικασίες εξόρυξης και επεξεργασίας του γραφίτη μπορούν να απελευθερώσουν σωματίδια και ρύπους στον αέρα, επηρεάζοντας την υγεία των τοπικών κοινοτήτων.



Εικόνα 41: Εξόρυξη γραφίτη

Πηγή: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.marketindex.com.au%2Fnews%2Fwhich-asx-graphite-stock-offers-the-best-value&psig=AOvVaw2dr8tn-b13llf514pIHF2p&ust=1758220252116000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CБУQjRxFwoTCNjAh4634I8DFQAAAAAdAAAAABAE>

Παρακάτω απεικονίζεται η προβλεπόμενη ζήτηση και οι απαιτήσεις εξόρυξης του γραφίτη, σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA, 2024).

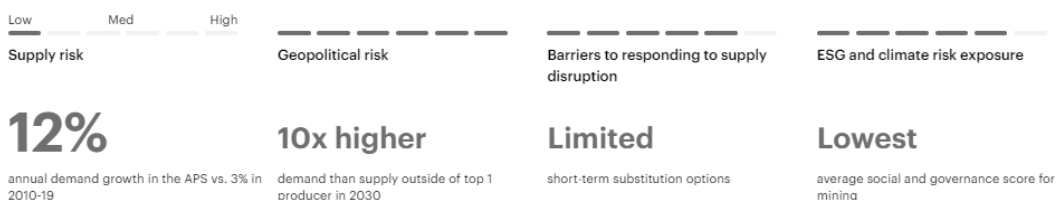


Διάγραμμα 4: προβλεπόμενη ζήτηση και οι απαιτήσεις εξόρυξης του γραφίτη

Πηγή: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>

Milestones (APS)	2021	2023	2030	2040
Cleantech demand (kt)	532	1 292	6 013	9 839
Other uses (kt)	3 388	3 340	4 406	6 185
Total demand (kt)	3 920	4 632	10 419	16 023
Secondary supply and reuse (kt)	149	308	1 333	2 489
Primary supply requirements (kt)	3 771	4 324	9 086	13 535
Share of top three mining countries	89%	92%	88%	89%
Share of top three refining countries	97%	98%	97%	98%

Clean energy transition risk assessment



Πίνακας 4: προβλεπόμενη ζήτηση και οι απαιτήσεις εξόρυξης του γραφίτη

Η ανάλυση των στατιστικών δεδομένων που αφορούν τον γραφίτη, βασίζεται στις προβλέψεις για την παραγωγή, τη ζήτηση και τους κινδύνους της αγοράς έως το 2050. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά είναι η κυριαρχία της Κίνας στην παγκόσμια παραγωγή γραφίτη. Μέχρι το 2030, η Κίνα θα κατέχει το 82% της συνολικής παραγωγής γραφίτη για όλες τις ποιότητες, ενώ το μερίδιό της στην παραγωγή γραφίτη που χρησιμοποιείται σε μπαταρίες θα ανέρχεται στο 93%. Άλλες χώρες με μικρή

συμμετοχή στην παραγωγή περιλαμβάνουν τη Μοζαμβίκη με 2%, τη Μαδαγασκάρη με 3%, τις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ιαπωνία που κατέχουν το 1% και 3% της παραγωγής μπαταριών, αντίστοιχα.

Στη ζήτηση, παρατηρούνται δύο σενάρια: το APS (Announced Pledges Scenario) και το NZE (Net Zero Emissions). Το APS παρουσιάζει αύξηση της ζήτησης κυρίως λόγω της χρήσης γραφίτη σε ηλεκτρικά οχήματα και άλλες καθαρές τεχνολογίες, με την τάση να συνεχίζεται μέχρι το 2050. Αντίστοιχα, το NZE δείχνει ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της ζήτησης, υποδηλώνοντας την κρίσιμη σημασία του γραφίτη για τη μετάβαση σε μηδενικές εκπομπές άνθρακα. Η ζήτηση για γραφίτη από ηλεκτρικά οχήματα αναμένεται να φτάσει σε υψηλά επίπεδα, ενώ η ζήτηση από άλλες καθαρές τεχνολογίες θα συνεχίσει να αυξάνεται σταδιακά.

Η συνολική ζήτηση για γραφίτη, που συμπεριλαμβάνει και άλλες χρήσεις εκτός των καθαρών τεχνολογιών, αναμένεται να φτάσει τα 16.023 kt το 2040, με την ανάγκη για πρωτογενείς προμήθειες να φτάνει τα 13.535 kt την ίδια χρονιά. Αυτή η αύξηση στη ζήτηση, ειδικά από τις καθαρές τεχνολογίες, θα ανέλθει στα 9.839 kt το 2040 σε σύγκριση με τα 532 kt, που παρατηρήθηκαν το 2021.

Όσον αφορά τον κίνδυνο στην αλυσίδα εφοδιασμού, υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η εξάρτηση από τους κύριους παραγωγούς είναι σημαντική, καθώς τρεις χώρες καλύπτουν το 89% της συνολικής παραγωγής, ενώ το 98% της δύλισης γίνεται από αυτές τις χώρες. Αυτό δημιουργεί γεωπολιτικούς κινδύνους, καθώς η εξάρτηση από μια μικρή ομάδα χωρών μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια εφοδιασμού.



Εικόνα 42: Φωτογραφία από την διαδικασία εξόρυξης Γραφίτη.

Πηγή: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/graphite-emissions-fuel-search-for-solutions-along-ev-supply-chain-69599516>

2.3.1.ε Συμπεράσματα και επιπλέον επιπτώσεις από την παραγωγή μπαταριών

Η διαδικασία κατασκευής των μπαταριών και των εξαρτημάτων τους μεταξύ άλλων περιβαλλοντικών και κοινωνικών προβλημάτων συνεισφέρει στην εκπομπή CO₂. Ειδικότερα η παραγωγή μπαταριών ιόντων λιθίου είναι πιο απαιτητική σε υλικά από την παραγωγή παραδοσιακών κινητήρων εσωτερικής καύσης και η ζήτηση για υλικά

μπαταριών αυξάνεται σημαντικά. Ιδιαίτερα στα ορυχεία σκληρών πετρωμάτων, για κάθε τόνο εξορυσσόμενου λιθίου, εκπέμπονται στον αέρα 15 τόνοι CO₂ ενώ η διαδικασία κατασκευής προσθέτει επίσης στο οικολογικό αποτύπωμα.

Για τη σύνθεση των υλικών που απαιτούνται για την παραγωγή, απαιτείται θερμότητα μεταξύ 800 και 1.000 βαθμών Κελσίου – μια θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί οικονομικά μόνο με την καύση ορυκτών καυσίμων, η οποία προσθέτει και πάλι στις εκπομπές CO₂. Η ακριβής ποσότητα CO₂ που εκπέμπεται κατά τη μακρά διαδικασία κατασκευής μιας μπαταρίας μπορεί να ποικίλλει πολύ ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται, τον τρόπο προμήθειάς τους και τις πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή (Matsumoto et al., 2017).

Ενδεικτικά, το Tesla Model 3 διαθέτει μπαταρία ιόντων λιθίου 80 kWh. Οι εκπομπές CO₂ για την κατασκευή αυτής της μπαταρίας κυμαίνονται μεταξύ 2400 kg (σχεδόν δύομισι μετρικοί τόνοι) και 16.000 kg (16 μετρικοί τόνοι). Αν αναρωτηθεί κανείς πόσος ακριβώς είναι ένας τόνος CO₂, η απάντηση είναι όσο εκπέμπει ένα τυπικό αυτοκίνητο με κινητήρα φυσικού αερίου σε περίπου 2.500 μίλια οδήγησης – ακριβώς το ίδιο βάρος με έναν λευκό καρχαρία (Ellingsen, 2014).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.), παράλληλα έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για την κατάργηση των συμβατικών κινητήρων, προωθώντας την ηλεκτροκίνηση ως τη βέλτιστη λύση για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, μέχρι να βρεθούν πιο βιώσιμες εναλλακτικές για την εξόρυξη και την παραγωγή των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, όπως ο γραφίτης, το λίθιο, το νικέλιο και το κοβάλτιο, είναι πιθανό να χρειαστεί να αναθεωρηθεί αυτή η προσέγγιση και να εξεταστούν και άλλα ενδεχόμενα. Η ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την προώθηση μιας βιώσιμης και οικολογικά συνειδητής μεταφοράς και χρήζει ιδιαίτερης προσοχής.

2.3.2 Αρνητικά ανακύκλωσης μπαταριών

Ένα δεύτερο κρίσιμο σημείο που σχετίζεται με τις μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η ανακύκλωσή τους. Παρά τις προσπάθειες των επιστημόνων να αναπτύξουν αποτελεσματικές μεθόδους ανακύκλωσης για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου, η διαδικασία παραμένει ιδιαίτερα σύνθετη και δαπανηρή (Gaines Linda, 2014).

Για παράδειγμα, σε ένα εργοστάσιο ανακύκλωσης μπαταριών που δημιουργήθηκε μέσω της συνεργασίας των εταιρειών Renault, Veolia και Solvay, τα ενεργά υλικά των μπαταριών υποβάλλονται σε μια πολύπλοκη διαδικασία ανακύκλωσης. Συγκεκριμένα αυτή περιλαμβάνει τη βύθισή τους σε μία ουσία λεγόμενη ως Ν-μεθυλοπυριδίνιο, η οποία βοηθά στη διάλυση των υλικών αυτών, διευκολύνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη συνέχεια της διαδικασίας, όπου τα υλικά αποστραγγίζονται, ξηραίνονται, συνθλίβονται (με τη χρήση υπερήχων) και εκπλένονται με οξύ. Μέσω αυτής της μεθόδου, είναι δυνατό να ανακτηθεί έως και το 96% του κοβαλτίου και το 98% του λιθίου, δηλαδή των δύο βασικών υλικών των μπαταριών.

Ωστόσο, η διαδικασία αυτή αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις. Το υψηλό κόστος της εργασίας, που οφείλεται στην πολυπλοκότητα της διαδικασίας, καθώς και το υψηλό αποτύπωμα άνθρακα που συνοδεύει την ανακύκλωση, δημιουργούν ζητήματα που

πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά. Επίσης, το κόστος αποσύνθεσης των μπαταριών αποτελεί έναν ακόμη παράγοντα που δεν μπορεί να αγνοηθεί. Αυτά τα οικονομικά και περιβαλλοντικά εμπόδια κάνουν τη βιωσιμότητα της ανακύκλωσης μπαταριών λιγότερο ελκυστική, παρά τις τεχνολογικές βελτιώσεις.

Αξίζει να αναφερθούν επίσης κάποιες από τις σημαντικές επιπτώσεις του Ν-μεθυλοπυριινιδίου (NMP) μέσω της συμμετοχής του στην διαδικασία ανάκτησης και ανακύκλωσης των ηλεκτρικών μπαταριών, στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα, η επίδραση του NMP στη φυσική ζωή είναι ανησυχητική, καθώς η τοξικότητά του μπορεί να βλάψει τόσο τα φυτά, όσο και τα ζώα, επηρεάζοντας την αναπαραγωγή, αλλά και την ανάπτυξή τους. Επιπλέον, το NMP δεν αποδομείται, εύκολα στο περιβάλλον και μπορεί να παραμείνει για μεγάλες χρονικές περιόδους, προκαλώντας μακροχρόνια ρύπανση τόσο του εδάφους, όσο και του υδροφόρου ορίζοντα, επηρεάζοντας την διαθεσιμότητα του καθαρού νερού. Ακόμη, η επαφή με το NMP, είτε μέσω επαγγελματικής χρήσης είτε μέσω της κατανάλωσης μολυσμένων τροφίμων ή νερού, μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις για την υγεία των ανθρώπων, εφόσον δεν διασφαλιστεί η σωστή διαχείριση και απομάκρυνσή του (Zhang Li et al., 2018).

Τέλος, ενώ τα εξωτερικά περιβλήματα και άλλα εξαρτήματα των μπαταριών ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου αποσυντίθενται μέσα σε περίπου 100 χρόνια, οι χημικές ουσίες που περιέχουν μπορεί να παραμείνουν στο περιβάλλον για εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια ή ακόμη και για πάντα. Αυτό το γεγονός δημιουργεί σημαντικούς προβληματισμούς σχετικά με τη μακροχρόνια περιβαλλοντική επίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων. Παρά τις προφανείς περιβαλλοντικές ωφέλειες της μείωσης των εκπομπών CO₂ μέσω της ηλεκτροκίνησης, η ατελής διαχείριση και ανακύκλωση των μπαταριών απειλεί να υπονομεύσει τα περιβαλλοντικά οφέλη, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη για ανάπτυξη πιο αποδοτικών και φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών ανακύκλωσης.



Εικόνα 43: Το εργοστάσιο Hydrovolt. Ένα από τα μεγαλύτερα εργοστάσια ανακύκλωσης μπαταριών ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην Ευρώπη.

Πηγή: <https://www.hydro.com/en/global/media/news/2022/europes-largest-electric-vehicle-battery-recycling-plant-begins-operations/>

2.3.3 Αρνητικά των πηγών προέλευσης της ενέργειας για την φόρτιση των μπαταριών

Παρά την προβολή των ηλεκτρικών οχημάτων ως λύση για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η πραγματική περιβαλλοντική τους επίδοση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από την πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους. Σε περιοχές όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας ή το φυσικό αέριο, η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να συμβάλει στην αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και άλλων ρύπων.

Συγκεκριμένα, ο άνθρακας, που εξακολουθεί να αποτελεί βασική πηγή ενέργειας σε πολλές χώρες, παράγει μεγάλες ποσότητες CO₂ κατά την καύση του. Έτσι, όταν η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος προέρχεται από μονάδες παραγωγής που λειτουργούν με άνθρακα, το περιβαλλοντικό όφελος της ηλεκτροκίνησης μειώνεται σημαντικά. Αντί να μειώνεται το ανθρακικό αποτύπωμα, όπως είναι ο στόχος, μπορεί να προκύψει ακόμα και αύξηση των συνολικών εκπομπών, ειδικά αν ληφθεί υπόψη η ενεργειακή απώλεια που συμβαίνει κατά τη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπλέον, η χρήση φυσικού αερίου, αν και λιγότερο ρυπογόνα από τον άνθρακα, εξακολουθεί να παράγει σημαντικές ποσότητες CO₂ και μεθανίου, ενός αερίου του θερμοκηπίου που είναι εξαιρετικά επιβλαβές για το περιβάλλον. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ενεργειακή απόδοση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να αμφισβητηθεί, καθώς η ενέργεια που καταναλώνεται για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και η μετατροπή της σε κινητική ενέργεια είναι συχνά λιγότερο αποτελεσματική από τη χρήση ορυκτών καυσίμων απευθείας στον κινητήρα εσωτερικής καύσης ενός παραδοσιακού οχήματος.

2.3.4 Επιπτώσεις όταν η ενέργεια παραγωγής προέρχεται από μη ανανεώσιμες πηγές

Η απόδοση της ενεργειακής μετατροπής αποτελεί έναν άλλο κρίσιμο παράγοντα που επηρεάζει τη συνολική περιβαλλοντική αποτύπωση των ηλεκτρικών οχημάτων. Σε κάθε στάδιο της ενεργειακής αλυσίδας - από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως τη φόρτιση και τη χρήση της από το όχημα - σημειώνονται ενεργειακές απώλειες. Αυτές οι απώλειες μπορεί να προκύψουν κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες παραγωγής στο δίκτυο, κατά τη διαδικασία φόρτισης της μπαταρίας του οχήματος, αλλά και κατά τη μετατροπή της αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητική ενέργεια από τον ηλεκτροκινητήρα. Όσο μεγαλύτερες είναι αυτές οι απώλειες, τόσο λιγότερο αποδοτική είναι η συνολική διαδικασία, και τόσο μεγαλύτερο είναι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του οχήματος (Union of Concerned Scientists, 2022).

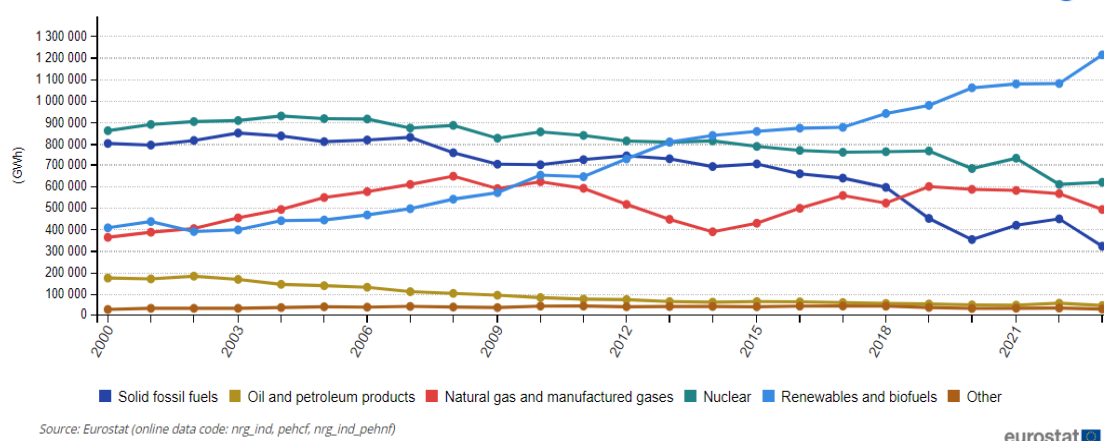
Για παράδειγμα, σε μια χώρα όπου το ρεύμα παράγεται κυρίως από άνθρακα, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα ενός ηλεκτρικού οχήματος μπορεί να είναι συγκρίσιμο ή ακόμα και μεγαλύτερο από αυτό ενός οχήματος με κινητήρα εσωτερικής καύσης, αν συνυπολογιστούν οι απώλειες στη μετατροπή και η χρήση της ενέργειας. Αντίθετα, σε

περιοχές όπου η ενέργεια προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως η αιολική ή η ηλιακή ενέργεια, η ηλεκτροκίνηση μπορεί να προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη.

Αυτό αναδεικνύει τη σημασία της υιοθέτησης μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης στην προώθηση της ηλεκτροκίνησης, που θα λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τη μείωση των εκπομπών από την οδική χρήση των οχημάτων, αλλά και την προέλευση της ενέργειας που τα τροφοδοτεί. Η μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί ότι τα ηλεκτρικά οχήματα θα έχουν πραγματικά θετική συνεισφορά στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. Μέχρι να επιτευχθεί αυτό, η εξάρτηση από την τρέχουσα μέθοδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να θέσει περιορισμούς στα περιβαλλοντικά οφέλη που προσφέρει η ηλεκτροκίνηση, υπονομεύοντας τις προσπάθειες για έναν πιο πράσινο και βιώσιμο κόσμο.

Το παρόν γράφημα παρέχει μια επισκόπηση της παραγωγής και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και παραγόμενης θερμότητας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ). Τα στοιχεία βασίζονται στα ετήσια στοιχεία που παρέχουν τα κράτη μέλη (Eurostat, 2023).

Gross electricity production by fuel, EU, 2000-23



Διάγραμμα 5: επισκόπηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά είδος χρήσης καυσίμου

Πηγή: https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Electricity_and_heat_statistics

Οι κατηγορίες που εξετάζονται περιλαμβάνουν τα στερεά ορυκτά καύσιμα (άνθρακας), τα πετρελαιοειδή προϊόντα, το φυσικό αέριο, τα πυρηνικά, τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική, ηλιακή, βιοκαύσιμα κ.λπ.), και άλλες πηγές.

Από το διάγραμμα γίνεται εμφανές ότι, από το 2000 έως το 2023, η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (μπλε γραμμή) έχει αυξηθεί σημαντικά, ξεπερνώντας άλλα καύσιμα. Συγκεκριμένα, η παραγωγή από στερεά ορυκτά καύσιμα έχει σημειώσει μείωση, ιδιαίτερα μετά το 2010, και συνεχίζει την καθοδική της πορεία. Το ίδιο ισχύει και για το φυσικό αέριο και τα πετρελαιοειδή προϊόντα, αν και οι μεταβολές για το φυσικό αέριο ήταν πιο σταδιακές.

Παράλληλα, η παραγωγή από πυρηνική ενέργεια παρέμεινε σχετικά σταθερή, με μια ελαφρά πτωτική τάση τα τελευταία χρόνια. Αντίθετα, οι ανανεώσιμες πηγές έχουν

παρουσιάσει μια σταθερή άνοδο, με σημαντική αύξηση στην παραγωγή από αιολική και ηλιακή ενέργεια.

Η μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, τα οποία είναι η κύρια αιτία για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Οι ανανεώσιμες πηγές, όπως η αιολική, η ηλιακή, και η υδροηλεκτρική ενέργεια, προσφέρουν καθαρή ενέργεια χωρίς να παράγουν άμεσες εκπομπές CO₂.

Ωστόσο, παρά την εντυπωσιακή πρόοδο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η παραγωγή ενέργειας στην ΕΕ εξακολουθεί να στηρίζεται σε μη ανανεώσιμες πηγές (ιδιαίτερα το φυσικό αέριο και τα στερεά καύσιμα). Παρά τη μείωση, τα ορυκτά καύσιμα εξακολουθούν να διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, κάτι που υποδηλώνει ότι η Ευρώπη δεν έχει ακόμη φτάσει στο σημείο πλήρους απεξάρτησης από αυτά.

Η άνοδος της ηλεκτροκίνησης είναι μια θετική εξέλιξη στον αγώνα κατά της κλιματικής αλλαγής, καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα (EVs) έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων κατά τη χρήση τους. Ωστόσο, είναι κρίσιμο να ληφθεί υπόψη η πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση αυτών των οχημάτων. Εάν η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, τότε η συνολική θετική επίδραση της ηλεκτροκίνησης μειώνεται σημαντικά. Αυτό συμβαίνει επειδή, παρά τη μηδενική εκπομπή CO₂ από τα ίδια τα οχήματα, η ηλεκτροπαραγωγή από άνθρακα ή φυσικό αέριο εξακολουθεί να προκαλεί σημαντικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Για παράδειγμα, χώρες που εξακολουθούν να βασίζονται σε στερεά ορυκτά καύσιμα ή φυσικό αέριο για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας θα αντιμετωπίσουν δυσκολίες στην επίτευξη των κλιματικών τους στόχων, ακόμη και με την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης. Από την άλλη, χώρες που επενδύουν σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η Δανία και η Γερμανία, είναι σε καλύτερη θέση να ωφεληθούν από την ηλεκτροκίνηση και να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές τους.

Η αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης απαιτεί μια συνολική στρατηγική που περιλαμβάνει τη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας και τη σταδιακή μείωση των ορυκτών καυσίμων. Η ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης πρέπει να συνοδεύεται από καθαρές πηγές ενέργειας, έτσι ώστε η περιβαλλοντική ωφέλεια να είναι πραγματικά σημαντική. Το διάγραμμα αποδεικνύει ότι υπάρχει σαφής πρόοδος στην παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές, αλλά τα ορυκτά καύσιμα εξακολουθούν να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο.

Συμπερασματικά, η αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αποτελεί σαφές βήμα προς τη σωστή κατεύθυνση, ειδικά σε έναν κόσμο που κινείται γρήγορα προς την ηλεκτροκίνηση. Ωστόσο, η ΕΕ και οι άλλες χώρες πρέπει να διασφαλίσουν ότι η ηλεκτροπαραγωγή προέρχεται από καθαρές πηγές, διαφορετικά η μετάβαση σε ηλεκτρικά οχήματα δεν θα έχει τον επιθυμητό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Η σταδιακή απομάκρυνση από τα ορυκτά καύσιμα είναι απαραίτητη για να επιτευχθεί μια βιώσιμη και καθαρή μελλοντική ενεργειακή οικονομία.

2.3.5 Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την λειτουργία των σταθμών φόρτισης

Η ηλεκτροκίνηση, όπως έχει αναφερθεί για πολλοστή φορά, αναδεικνύεται ως μία από τις βασικές λύσεις για τη μείωση των εκπομπών ρύπων και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, οι επιπτώσεις της στην υποδομή αποτελούν έναν σημαντικό παράγοντα που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Η ανάπτυξη και λειτουργία των σταθμών φόρτισης, καθώς και η αυξημένη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, δημιουργούν νέες προκλήσεις που επηρεάζουν όχι μόνο το περιβάλλον αλλά και τη βιωσιμότητα της ηλεκτροκίνησης ως λύσης (IEA, 2021).

Πρώτον, η κατασκευή και συντήρηση των σταθμών φόρτισης απαιτεί σημαντικούς πόρους, όπως μέταλλα, πλαστικά και ενέργεια, με πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Συγκεκριμένα, οι σταθμοί φόρτισης περιλαμβάνουν εξοπλισμό κατασκευασμένο από υλικά όπως το χαλκό, το αλουμίνιο και το πλαστικό, που εξάγονται, επεξεργάζονται και μεταποιοούνται μέσω διαδικασιών που επιβαρύνουν το περιβάλλον. Η εξόρυξη και επεξεργασία αυτών των υλικών συνεπάγεται συχνά την καταστροφή φυσικών οικοσυστημάτων, την απώλεια βιοποικιλότητας και την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων και ρύπων. Ειδικά στην περίπτωση των πλαστικών, η παραγωγή τους από παράγωγα του πετρελαίου συμβάλλει στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, ενώ τα απορρίμματα από την κατασκευή και τον εκσυγχρονισμό των σταθμών φόρτισης μπορεί να καταλήξουν σε χώρους υγειονομικής ταφής, προσθέτοντας περαιτέρω περιβαλλοντικά προβλήματα.

Επιπλέον, η ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή και τη λειτουργία αυτών των σταθμών φόρτισης ενισχύει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της ηλεκτροκίνησης. Αν η ενέργεια αυτή προέρχεται από μη ανανεώσιμες πηγές, όπως ορυκτά καύσιμα, όπως προαναφέρθηκε στην προηγούμενη υποενότητα, τότε το συνολικό όφελος από τη χρήση ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να μειωθεί. Για παράδειγμα, η ενέργεια που καταναλώνεται για τη λειτουργία ενός σταθμού φόρτισης, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο, αυξάνει την ανάγκη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και αν αυτή προέρχεται από μονάδες που λειτουργούν με άνθρακα ή φυσικό αέριο, τότε οι εκπομπές CO₂ παραμένουν υψηλές.

Δεύτερον, η αυξημένη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια λόγω της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες απαιτήσεις στο ηλεκτρικό δίκτυο, ενδεχομένως απαιτώντας αναβάθμιση ή επέκταση της υποδομής. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων στους δρόμους, το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να δυσκολευτεί να ανταποκριθεί στις αυξημένες ανάγκες για ενέργεια, ιδιαίτερα κατά τις ώρες αιχμής. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερφόρτωση του δικτύου, διακοπές ρεύματος και ανάγκη για εκτεταμένες αναβαθμίσεις της υποδομής, που με τη σειρά τους απαιτούν περαιτέρω πόρους και ενέργεια.

Οι αναβαθμίσεις του ηλεκτρικού δικτύου περιλαμβάνουν την κατασκευή νέων σταθμών παραγωγής ενέργειας, τη βελτίωση των γραμμών μεταφοράς και τη δημιουργία νέων υποσταθμών. Αυτές οι διαδικασίες μπορεί να έχουν σημαντικό περιβαλλοντικό κόστος, καθώς συχνά απαιτούν εκσκαφές, εκκαθάριση γης και κατασκευή νέων δομών, οι οποίες μπορεί να επιβαρύνουν τα τοπικά οικοσυστήματα και να συμβάλλουν στην αποψίλωση των δασών και την απώλεια βιοποικιλότητας.

Επίσης, η επέκταση του δικτύου ενδέχεται να αυξήσει την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα, αν η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων δεν παράγεται από ανανεώσιμες πηγές.

Επιπροσθέτως, η ανάπτυξη του δικτύου φόρτισης σε απομακρυσμένες ή αγροτικές περιοχές μπορεί να είναι δύσκολη και δαπανηρή, απαιτώντας μεγάλες επενδύσεις και πολύπλοκα έργα υποδομής. Σε αυτές τις περιοχές, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μπορεί να είναι πιο έντονες, καθώς η κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς και η εγκατάσταση σταθμών φόρτισης μπορεί να απαιτούν εκτεταμένη εκκαθάριση φυσικών περιοχών, με αποτέλεσμα την απώλεια φυσικών οικοσυστημάτων και τη διατάραξη της τοπικής βιοποικιλότητας (European Environment Agency, n.d.).

Τέλος, η πίεση στο ηλεκτρικό δίκτυο από την αυξημένη ζήτηση για φόρτιση μπορεί να ενθαρρύνει τη χρήση εφεδρικών πηγών ενέργειας, όπως οι γεννήτριες πετρελαίου ή φυσικού αερίου, οι οποίες, αν και προσφέρουν μια γρήγορη λύση σε περιόδους αιχμής, συμβάλλουν στην περαιτέρω αύξηση των εκπομπών CO₂ και άλλων ρύπων. Αυτή η κατάσταση υπονομεύει τις προσπάθειες για μείωση των εκπομπών μέσω της ηλεκτροκίνησης, και θέτει υπό αμφισβήτηση την αποτελεσματικότητά της ως λύση για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής.

3. Σύγκριση μεταξύ των ηλεκτρικών και των συμβατικών οχημάτων

Η αυτοκινητοβιομηχανία, ως ένας από τους πλέον δυναμικούς και τεχνολογικά εξελισσόμενους τομείς, βρίσκεται τα τελευταία χρόνια στο επίκεντρο σημαντικών αλλαγών, οι οποίες αντανακλούν την παγκόσμια στροφή προς πιο βιώσιμες και περιβαλλοντικά φιλικές μορφές μετακίνησης. Σε αυτό το πλαίσιο, η συζήτηση γύρω από την υπεροχή των ηλεκτρικών αυτοκινήτων έναντι των συμβατικών οχημάτων εσωτερικής καύσης είναι πιο επίκαιρη από ποτέ.

Η παρούσα ανάλυση επιχειρεί να συγκρίνει τα δύο είδη οχημάτων μέσα από:

- τεχνολογική,
- περιβαλλοντική και
- οικονομική σκοπιά,

με στόχο την ανάδειξη των δυνατοτήτων και περιορισμών κάθε τεχνολογίας.

Αρχικά, από τεχνολογική άποψη, η βασική διαφορά μεταξύ ηλεκτρικών και συμβατικών αυτοκινήτων έγκειται στον τύπο του κινητήρα και της πηγής ενέργειας που χρησιμοποιούν. Τα ηλεκτρικά οχήματα (Electric Vehicles – EVs) λειτουργούν μέσω ενός ή περισσοτέρων ηλεκτροκινητήρων που αντλούν ενέργεια από επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, συνήθως ιόντων λιθίου. Αντιθέτως, τα συμβατικά αυτοκίνητα βασίζονται σε κινητήρες εσωτερικής καύσης που καταναλώνουν ορυκτά καύσιμα, όπως βενζίνη ή πετρέλαιο. Οι ηλεκτροκινητήρες υπερέχουν σε επίπεδο ενεργειακής απόδοσης, καθώς μετατρέπουν μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας σε κίνηση, ενώ παράγουν λιγότερο θόρυβο και παρουσιάζουν μειωμένες μηχανικές φθορές λόγω της απουσίας κινούμενων μερών σε σχέση με τους θερμικούς κινητήρες.

Επιπλέον, σημαντική είναι η συμβολή των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην περιβαλλοντική προστασία. Καθώς δεν εκπέμπουν ρύπους κατά τη λειτουργία τους, μειώνουν δραστικά το αποτύπωμα άνθρακα στον αστικό ιστό, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και στη μείωση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, αξίζει να επισημανθεί ότι η συνολική περιβαλλοντική τους επίδοση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας και την προέλευση των υλικών που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες. Η εξόρυξη λιθίου, κοβαλτίου και σπανίων γαιών ενέχει περιβαλλοντικές και κοινωνικές προκλήσεις, ενώ η διαδικασία ανακύκλωσης των μπαταριών αποτελεί ακόμη αντικείμενο τεχνολογικής και θεσμικής εξέλιξης. Αντιθέτως, τα συμβατικά οχήματα συνεισφέρουν άμεσα στην ατμοσφαιρική ρύπανση με την έκλυση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), μονοξειδίου του άνθρακα (CO), οξειδίων του αζώτου (NO_x) και αιωρούμενων σωματιδίων (PM), κυρίως στις αστικές περιοχές, όπου η κυκλοφορία είναι έντονη.

Στο οικονομικό επίπεδο, η σύγκριση παρουσιάζει πολυπλοκότητα. Το αρχικό κόστος απόκτησης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι υψηλότερο σε σχέση με ένα συμβατικό, κυρίως λόγω της τιμής της μπαταρίας, η οποία αποτελεί το πιο ακριβό εξάρτημα. Ωστόσο, η τάση είναι πτωτική καθώς εξελίσσονται οι τεχνολογίες παραγωγής και αυξάνεται η κλίμακα παραγωγής. Από την άλλη πλευρά, το λειτουργικό κόστος των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι σημαντικά χαμηλότερο, τόσο λόγω της φθηνότερης

ενέργειας (ηλεκτρικό ρεύμα σε σχέση με τα καύσιμα) όσο και της περιορισμένης ανάγκης για συντήρηση, εφόσον τα ηλεκτρικά συστήματα έχουν μικρότερη φθορά. Τα συμβατικά οχήματα, αν και φθηνότερα στην αγορά τους, εμφανίζουν υψηλότερα κόστη χρήσης, συντήρησης και κατανάλωσης καυσίμων, ειδικά σε συνθήκες αυξανόμενων τιμών πετρελαίου και βενζίνης.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η αυτονομία και η ευκολία επαναφόρτισης. Τα σύγχρονα ηλεκτρικά αυτοκίνητα προσφέρουν αυτονομία που μπορεί να ξεπεράσει τα 400 χιλιόμετρα με μία φόρτιση, όμως αυτό εξαρτάται από το μοντέλο και τις συνθήκες οδήγησης. Παρ' όλα αυτά, ο χρόνος φόρτισης, που κυμαίνεται από 30 λεπτά (σε ταχυφορτιστές) έως αρκετές ώρες (σε οικιακή παροχή), παραμένει ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα σε σχέση με την ταχύτητα ανεφοδιασμού των συμβατικών αυτοκινήτων. Επιπλέον, η περιορισμένη ακόμα διαθεσιμότητα δημοσίων φορτιστών, ιδίως σε μη αστικές περιοχές, συνιστά εμπόδιο στην ευρύτερη υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Η επίδραση των κρατικών πολιτικών και των κινήτρων δεν πρέπει να παραβλέπεται, καθώς διαμορφώνει ουσιαστικά την αγοραστική συμπεριφορά. Πολλές χώρες, μεταξύ αυτών και η Ελλάδα, προσφέρουν επιδοτήσεις για την αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων, φορολογικές απαλλαγές και πρόσβαση σε προνομιακές λωρίδες κυκλοφορίας. Τέτοια μέτρα αποσκοπούν στην ενίσχυση της ζήτησης και στην επιτάχυνση της μετάβασης σε ένα πιο πράσινο μοντέλο κινητικότητας. Στον αντίποδα, η σταδιακή αυστηροποίηση των κανονισμών εκπομπών για τα συμβατικά οχήματα αναμένεται να οδηγήσει σε αυξημένο κόστος συμμόρφωσης για τις αυτοκινητοβιομηχανίες, το οποίο ενδεχομένως να μετακυλιστεί στους καταναλωτές.

Τέλος, η εμπειρία οδήγησης και η αποδοχή των οδηγών διαφέρει ανάμεσα στους δύο τύπους οχημάτων. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα προσφέρουν άμεση επιτάχυνση, αθόρυβη λειτουργία και εξελιγμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας. Η αίσθηση της οδήγησης διαφοροποιείται αισθητά σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, τα οποία συχνά προτιμώνται από όσους δίνουν έμφαση στην παραδοσιακή οδηγική αίσθηση, τον ήχο του κινητήρα και την αίσθηση χειροκίνητου ελέγχου. Παρόλα αυτά, η ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτόνομης οδήγησης, συνδεσιμότητας και τεχνητής νοημοσύνης ευνοεί περισσότερο τα ηλεκτρικά οχήματα, τα οποία σχεδιάζονται εξ αρχής με ενσωμάτωση αυτών των καινοτομιών.

Συμπερασματικά, η σύγκριση μεταξύ ηλεκτρικών και συμβατικών αυτοκινήτων αναδεικνύει ένα ευρύ φάσμα διαφορών, που αφορούν τόσο την τεχνολογική και περιβαλλοντική διάσταση, όσο και την οικονομική βιωσιμότητα και εμπειρία χρήσης. Παρότι τα ηλεκτρικά οχήματα εμφανίζονται ως η πλέον υποσχόμενη επιλογή για ένα βιώσιμο μέλλον, η πλήρης υιοθέτησή τους εξαρτάται από την πρόοδο στην τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας, την επέκταση της υποδομής φόρτισης και τη διατήρηση ισχυρών πολιτικών υποστήριξης. Την ίδια στιγμή, τα συμβατικά αυτοκίνητα διατηρούν την κυρίαρχη θέση στην παγκόσμια αγορά, κυρίως λόγω της διαθεσιμότητας, της ευκολίας ανεφοδιασμού και του χαμηλότερου αρχικού κόστους. Η μετάβαση σε ένα μοντέλο κινητικότητας βασισμένο στην ηλεκτροκίνηση φαίνεται αναπόφευκτη, ωστόσο θα απαιτήσει χρόνο, στρατηγικό σχεδιασμό και ενεργό συμμετοχή όλων των εμπλεκόμενων φορέων.

4. Στατιστική ανάλυση -- Συσχετίσεις αριθμού ηλεκτρικών αυτοκινήτων με παράγοντες

Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να εξετάσουμε πιθανές συσχετίσεις του ποσοστού των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε σχέση με τον συνολικό στόλο με μια σειρά από παράγοντες/μεταβλητές. Θεωρούμε τέτοιου είδους ενδιαφέροντες παράγοντες συνήθως περιβαλλοντικούς παράγοντες είναι οι:

- κατά κεφαλήν εισόδημα (GDP per capita)
- κατά κεφαλήν ακαθάριστο εθνικό προϊόν (GNP per capita)
- εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο 2023
- εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο 2022
- κατανάλωση ενέργειας ανά κάτοικο 2024
- κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο 2024
- παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 2023
- κατανάλωση φυσικού αερίου ανά κάτοικο 2023
- κατανάλωση πετρελαίου 2024
- αριθμός νέων ηλεκτρικών αυτοκινήτων που πωλήθηκαν 2024
- παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας 2024
- παραγωγή αιολικής ενέργειας 2024
- παραγωγή ηλιακής ενέργειας 2024
- παραγωγή ενέργειας από βιοκαύσιμα 2024
- κατανάλωση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές 2024

Η ανάλυσή έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού MINITAB (version 22).

i. Κατά κεφαλήν εισόδημα (GDP per capita)

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-5,19	6,14	-0,85	0,409	
GDP (\$)	0,2317	0,0987	2,35	0,031	1,00

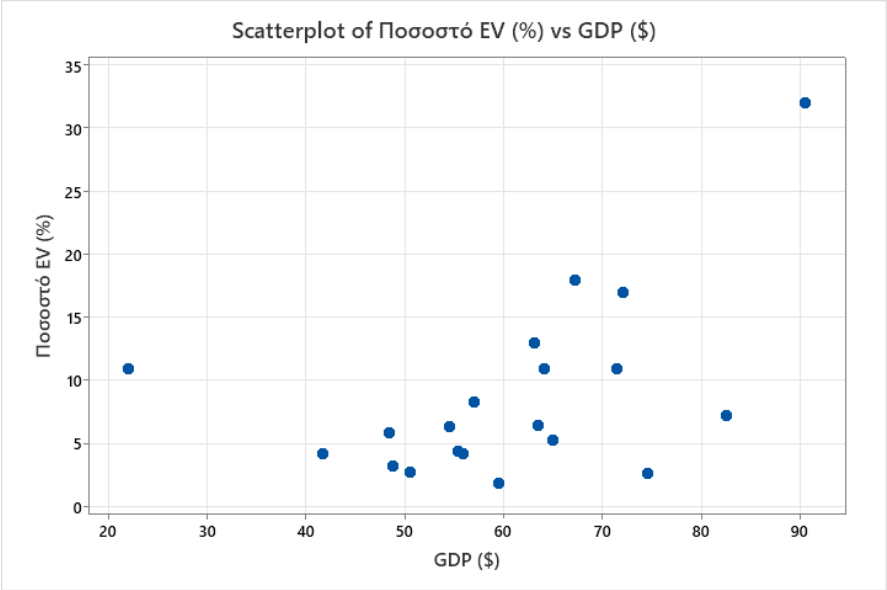
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
6,42084	23,44%	19,18%	0,00%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	227,1	227,15	5,51	0,031
GDP (\$)	1	227,1	227,15	5,51	0,031
Error	18	742,1	41,23		
Total	19	969,2			

Η (απλή γραμμική) παλινδρόμηση μεταξύ **ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων** και **Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος (\$)** δείχνει θετική, ασθενή και στατιστικά σημαντική συσχέτιση. Ο συντελεστής συσχέτισης (0,2317) υποδηλώνει ότι η αύξηση του ΑΕΠ σχετίζεται (πιθανά) με υψηλότερη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, ενώ η τιμή p-value (0,031) επιβεβαιώνει τη (στατιστική) σημαντικότητα της σχέσης. Το R^2 (23,44%) δείχνει ότι το μοντέλο εξηγεί ένα σημαντικό αλλά όχι πλήρως καθοριστικό μέρος της διακύμανσης του ποσοστού των ηλεκτρικών αυτοκινήτων (ανά χώρα). Συνεπώς, προκύπτει ότι, το υψηλότερο επίπεδο οικονομικής ανάπτυξης συνδέεται συνήθως με μεγαλύτερη υιοθέτηση ηλεκτρικών αυτοκινήτων.



Διάγραμμα 6: διάγραμμα διασποράς ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων ως προς το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν

ii. Κατανάλωση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές 2024

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1,46	2,25	0,65	0,526	
Energy consumption renewables %	0,2345	0,0606	3,87	0,001	1,00

Model Summary

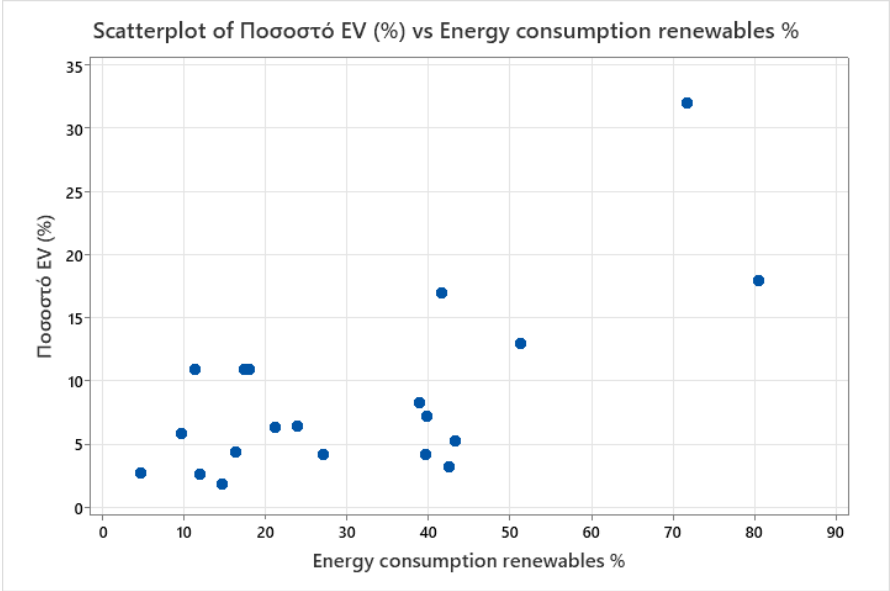
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5,42018	45,44%	42,41%	23,64%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	440,4	440,43	14,99	0,001
Energy consumption renewables %	1	440,4	440,43	14,99	0,001
Error	18	528,8	29,38		
Total	19	969,2			

Η συσχέτιση μεταξύ του **ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων** και της **κατανάλωσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές το 2024 (%)** δείχνει θετική, μέτρια και στατιστικά

σημαντική σχέση. Ο συντελεστής (0,2345) υποδηλώνει ότι υψηλότερη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σχετίζεται με μεγαλύτερο ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων, ενώ η τιμή p (0,001) επιβεβαιώνει τη (στατιστική) σημαντικότητα της σχέσης. Το R^2 (45,44%) δείχνει ότι το μοντέλο εξηγεί σχεδόν το μισό της διακύμανσης του ποσοστού EVs. Συνεπώς, τα δεδομένα υποστηρίζουν θετική συσχέτιση μεταξύ χρήσης ανανεώσιμης ενέργειας και διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων.



Διάγραμμα 7: διάγραμμα διασποράς ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων ως προς την κατανάλωση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές το 2024

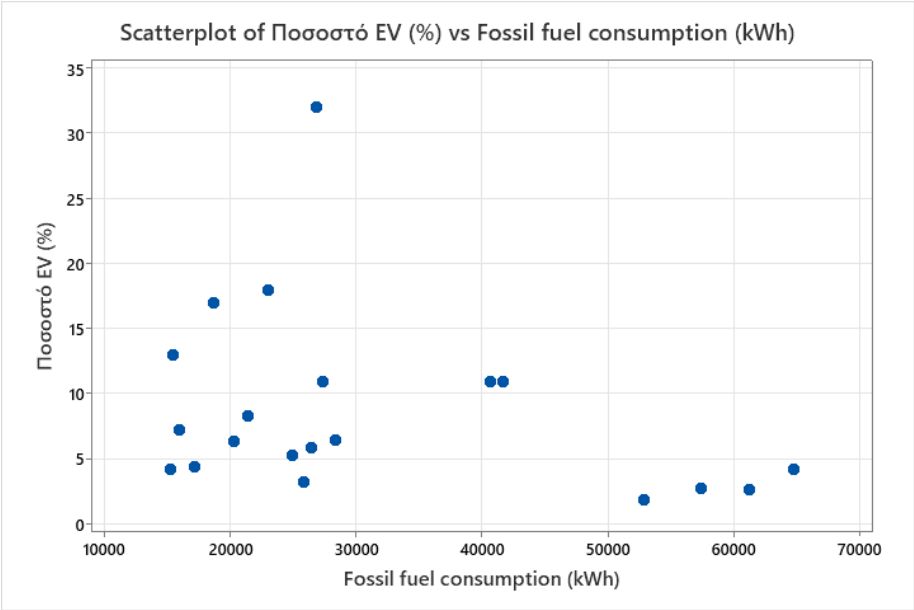
iii. Κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο 2024

Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	13,25	3,48	3,80	0,001	
Fossil fuel consumption (kWh)	-0,000142	0,000100	-1,42	0,171	1,00

Model Summary				Analysis of Variance		
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	Source	DF	Adj SS
6,95645	10,13%	5,14%	0,00%	Regression	1	98,18
				Fossil fuel consumption (kWh)	1	98,18
				Error	18	871,06
				Total	19	969,24

Η σχέση (παλινδρόμηση) μεταξύ **κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο το 2024 (kWh) και ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων** εμφανίζει αρνητική αλλά μη στατιστικά σημαντική συσχέτιση. Ο εκτιμώμενος συντελεστής (-0,000142) υποδηλώνει ότι, αυξημένη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων συνδέεται με ελαφρώς χαμηλότερο ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων, όμως η τιμή p (0,171) δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος (μη στατιστικά σημαντική σχέση). Το R^2 (10,13%)

παραμένει χαμηλό, υποδεικνύοντας ότι το μοντέλο εξηγεί περιορισμένο μέρος της διακύμανσης. Συνεπώς, τα δεδομένα δεν υποστηρίζουν ισχυρή γραμμική σχέση μεταξύ κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και ποσοστού υιοθέτησης ηλεκτρικών οχημάτων.



Διάγραμμα 8: διάγραμμα διασποράς ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων ως προς την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο το 2024

iv. Κατανάλωση ενέργειας ανά κάτοικο 2024

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	3,95	3,06	1,29	0,213	
Energy consumption (kWh)	0,000087	0,000047	1,83	0,084	1,00

Analysis of Variance

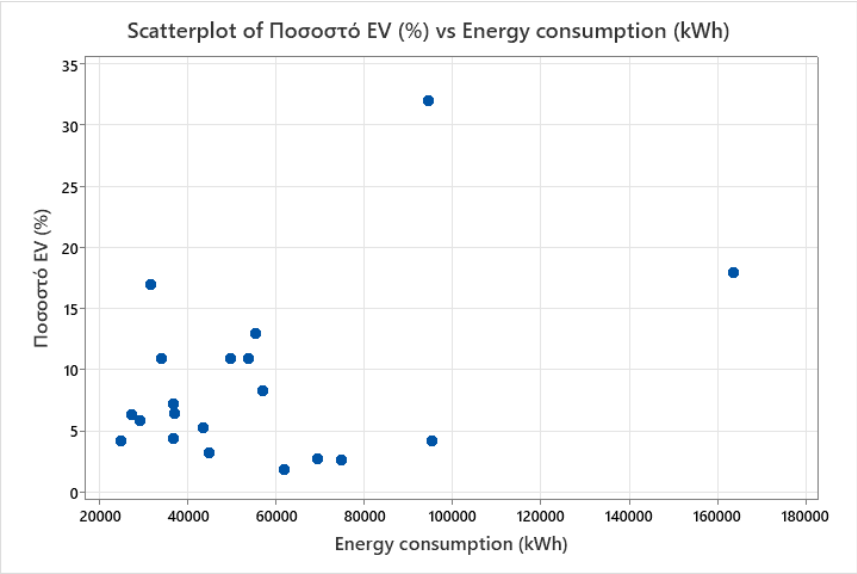
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
6,73900	15,66%	10,97%	0,00%

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	151,8	151,78	3,34	0,084
Energy consumption (kWh)	1	151,8	151,78	3,34	0,084
Error	18	817,5	45,41		
Total	19	969,2			

Η παλινδρόμηση μεταξύ **κατανάλωσης ενέργειας ανά κάτοικο (kWh)** και **ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων** δείχνει θετική και στατιστικά σημαντική σχέση (σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0,10$). Ο συντελεστής της μεταβλητής είναι θετικός (0,000087), γεγονός που υποδηλώνει ότι μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας συνδέεται με υψηλότερο ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων, όμως η τιμή p (0,084) δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος στο επίπεδο σημαντικότητας 0,05. Το R^2 (15,66%) καταδεικνύει ότι, το μοντέλο εξηγεί ένα σχετικά μικρό αλλά υπολογίσιμο μέρος της

διακύμανσης. Συνεπώς, διαφαίνεται μια τάση θετικής συσχέτισης, η οποία όμως δεν είναι επαρκώς ισχυρή για να θεωρηθεί στατιστικά τεκμηριωμένη.



Διάγραμμα 9: διάγραμμα διασποράς ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων ως προς την κατανάλωση ενέργειας ανά κάτοικο (kWh)

ν. Κατανάλωση φυσικού αερίου ανά κάτοικο 2023

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	12,07	2,34	5,15	0,000	
Natural gas consumption (Bcm)	-35,9	19,7	-1,82	0,086	1,00

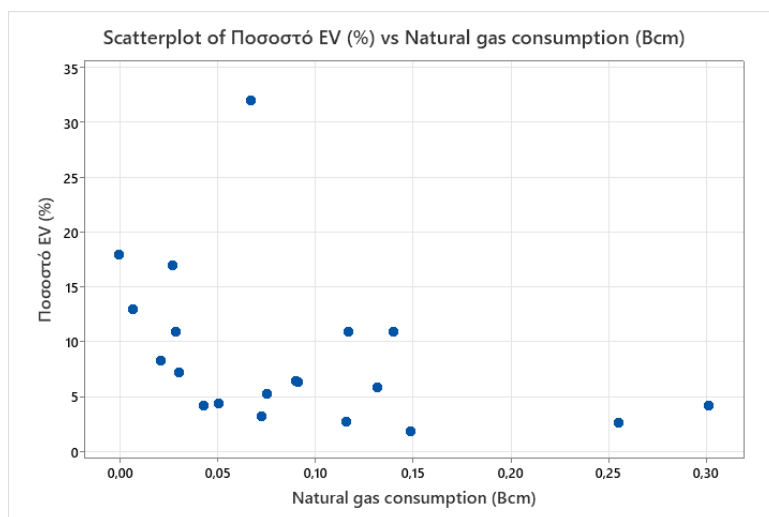
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
6,74475	15,52%	10,82%	2,22%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	150,4	150,39	3,31	0,086
Natural gas consumption (Bcm)	1	150,4	150,39	3,31	0,086
Error	18	818,9	45,49		
Total	19	969,2			

Η γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ ποσοστού **ηλεκτρικών αυτοκινήτων** και **κατανάλωσης φυσικού αερίου ανά κάτοικο το 2023** (Bcm) δείχνει αρνητική και στατιστικά σημαντική συσχέτιση σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.10$. Ο συντελεστής (-35,9) υποδηλώνει ότι υψηλότερη κατανάλωση φυσικού αερίου σχετίζεται με χαμηλότερη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, ωστόσο η τιμή p (0,086) ξεπερνά το καθιερωμένο όριο σημαντικότητας (0,05). Το R^2 (15,52%) καταδεικνύει ότι το μοντέλο εξηγεί ένα περιορισμένο αλλά αξιοσημείωτο μέρος της διακύμανσης. Συνεπώς, παρατηρείται μια αρνητική τάση, η οποία όμως δεν μπορεί να θεωρηθεί στατιστικά ισχυρή.



Διάγραμμα 10: διάγραμμα διασποράς ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων ως προς την κατανάλωση φυσικού αερίου ανά κάτοικο το 2023

vi. Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν 2023

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	9,46	1,81	5,23	0,000	
GNP (\$)	-0,000000	0,000000	-0,79	0,439	1,00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7,21356	3,36%	0,00%	0,00%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	32,60	32,60	0,63	0,439
GNP (\$)	1	32,60	32,60	0,63	0,439
Error	18	936,64	52,04		
Total	19	969,24			

Σύμφωνα με την ανάλυση παλινδρόμησης μεταξύ του **χρηματικού μεγέθους «Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν»** και του **ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων**, δεν προκύπτει στατιστικά σημαντική σχέση. Ο συντελεστής της ανεξάρτητης μεταβλητής είναι πρακτικά μηδενικός, ενώ το χαμηλό R^2 (2,87%) δείχνει ότι το μοντέλο δεν εξηγεί ουσιαστικά τη διακύμανση της εξαρτημένης μεταβλητής. Επιπλέον, η τιμή p (0,439) υπερβαίνει κατά πολύ το επίπεδο σημαντικότητας, γεγονός που ενισχύει το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική συσχέτιση. Συνεπώς, το ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων παραμένει σχεδόν ανεξάρτητο από το μέγεθος των χρημάτων στη συγκεκριμένη ανάλυση.

vii. Εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο 2023

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	12,16	3,76	3,23	0,005	
CO ₂ emission 2023 (tn)	-0,452	0,460	-0,98	0,339	1,00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7,14859	5,10%	0,00%	0,00%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	49,40	49,40	0,97	0,339
CO ₂ emission 2023 (tn)	1	49,40	49,40	0,97	0,339
Error	18	919,84	51,10		
Lack-of-Fit	17	594,72	34,98	0,11	0,993
Pure Error	1	325,13	325,13		
Total	19	969,24			

Η παλινδρόμηση μεταξύ **εκπομπών CO₂ ανά κάτοικο το 2023 (tn)** και **ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων** καταδεικνύει αρνητική αλλά μη στατιστικά σημαντική σχέση. Ο εκτιμώμενος συντελεστής (-0,452) δείχνει ότι υψηλότερες εκπομπές συνδέονται με χαμηλότερη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, ωστόσο η τιμή p (0,339) δεν υποστηρίζει στατιστική σημαντικότητα. Το R² (5,10%) είναι ιδιαίτερα χαμηλό, γεγονός που αποκαλύπτει ότι το μοντέλο εξηγεί ελάχιστο μέρος της διακύμανσης. Συνεπώς, τα δεδομένα δεν τεκμηριώνουν ισχυρή γραμμική συσχέτιση ανάμεσα στις εκπομπές CO₂ και το ποσοστό ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

viii. Εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο 2022

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	12,01	3,82	3,14	0,006	
CO ₂ emission 2022 (tn)	-0,404	0,439	-0,92	0,369	1,00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7,17073	4,51%	0,00%	0,00%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	43,69	43,69	0,85	0,369
CO ₂ emission 2022 (tn)	1	43,69	43,69	0,85	0,369
Error	18	925,55	51,42		
Total	19	969,24			

Η παλινδρόμηση μεταξύ **εκπομπών CO₂ ανά κάτοικο το 2022 (tn)** και **ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων** δείχνει αρνητική αλλά μη στατιστικά σημαντική συσχέτιση. Ο εκτιμώμενος συντελεστής (-0,404) υποδηλώνει ότι υψηλότερες εκπομπές CO₂ συνδέονται με χαμηλότερη υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων, ωστόσο η τιμή p (0,369) δεν επιτρέπει την απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης. Το R² (4,51%) είναι ιδιαίτερα χαμηλό, γεγονός που δείχνει ότι το μοντέλο δεν εξηγεί ουσιαστικά τη

διακύμανση της εξαρτημένης μεταβλητής. Συνεπώς, δεν προκύπτουν ισχυρά στοιχεία που να τεκμηριώνουν άμεση σχέση μεταξύ εκπομπών CO₂ και ποσοστού ηλεκτρικών οχημάτων.

ix. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 2023

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	8,95	1,77	5,06	0,000	
Electricity production (TWh)	-0,000160	0,000750	-0,21	0,833	1,00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7,32872	0,25%	0,00%	0,00%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	2,455	2,455	0,05	0,833
Electricity production (TWh)	1	2,455	2,455	0,05	0,833
Error	18	966,783	53,710		
Total	19	969,238			

Η παλινδρόμηση μεταξύ ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το 2023 (TWh) δείχνει ουσιαστικά ανύπαρκτη γραμμική συσχέτιση. Ο εκτιμώμενος συντελεστής (-0,000160) είναι πρακτικά μηδενικός, ενώ η τιμή p (0,833) δεν υποστηρίζει στατιστική σημαντικότητα. Το εξαιρετικά χαμηλό R² (0,25%) αποκαλύπτει ότι το μοντέλο δεν εξηγεί τη διακύμανση της εξαρτημένης μεταβλητής. Συνεπώς, δεν προκύπτει καμία ένδειξη ότι η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σχετίζεται με το ποσοστό διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων.

x. Κατανάλωση πετρελαίου 2024

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	9,20	1,81	5,09	0,000	
Oil Consumption (Barrels/day)	-0,000000	0,000000	-0,50	0,623	1,00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7,28755	1,37%	0,00%	0,00%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	13,29	13,29	0,25	0,623
Oil Consumption (Barrels/day)	1	13,29	13,29	0,25	0,623
Error	18	955,95	53,11		
Lack-of-Fit	17	940,83	55,34	3,66	0,392
Pure Error	1	15,13	15,13		
Total	19	969,24			

Η παλινδρόμηση μεταξύ **ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων και κατανάλωσης πετρελαίου το 2024** (barrels/day) δείχνει ανύπαρκτη στατιστικά σημαντική συσχέτιση. Ο συντελεστής είναι πρακτικά μηδενικός, ενώ η τιμή p (0,623) καταδεικνύει ότι δεν

υπάρχει ένδειξη γραμμικής σχέσης. Το πολύ χαμηλό R^2 (1,37%) δείχνει ότι το μοντέλο δεν εξηγεί ουσιαστικά τη διακύμανση της εξαρτημένης μεταβλητής. Συνεπώς, δεν τεκμηριώνεται σύνδεση ανάμεσα στην κατανάλωση πετρελαίου και την υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων.

xi. Αριθμός νέων ηλεκτρικών αυτοκινήτων που πωλήθηκαν 2024

Coefficients						Model Summary			
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
Constant	8,73	1,73	5,06	0,000		7,33331	0,13%	0,00%	0,00%
Electric cars sold 2024	0,000000	0,000001	0,15	0,881	1,00				

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	1,245	1,245	0,02	0,881
Electric cars sold 2024	1	1,245	1,245	0,02	0,881
Error	18	967,993	53,777		
Total	19	969,238			

Η παλινδρόμηση μεταξύ **ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων** και **αριθμού νέων ηλεκτρικών αυτοκινήτων** που πωλήθηκαν το 2024 (Νούμερο) δεν αναδεικνύει στατιστικά σημαντική συσχέτιση. Ο συντελεστής είναι ουσιαστικά μηδενικός, ενώ η τιμή p (0,881) δείχνει πλήρη απουσία στατιστικής σημαντικότητας. Το R^2 (0,13%) αποκαλύπτει ότι το μοντέλο δεν εξηγεί τη διακύμανση της εξαρτημένης μεταβλητής. Συνεπώς, δεν τεκμηριώνεται γραμμική σχέση ανάμεσα στον αριθμό πωληθέντων ηλεκτρικών οχημάτων και το συνολικό ποσοστό τους στον στόλο των χωρών.

xii. Παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας 2024

Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	8,66	1,80	4,82	0,000	
Hydropower generation (TWh)	0,00110	0,00554	0,20	0,845	1,00

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	2,124	2,124	0,04	0,845
Hydropower generation (TWh)	1	2,124	2,124	0,04	0,845
Error	18	967,114	53,729		
Lack-of-Fit	17	961,994	56,588	11,05	0,233
Pure Error	1	5,120	5,120		
Total	19	969,238			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7,32998	0,22%	0,00%	0,00%

Η παλινδρόμηση μεταξύ **ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων** και **υδροηλεκτρικής παραγωγής το 2024** (TWh) δείχνει απουσία στατιστικά σημαντικής συσχέτισης. Ο συντελεστής (0,00110) είναι πρακτικά αμελητέος, ενώ η τιμή p (0,845) επιβεβαιώνει ότι δεν υπάρχει γραμμική, στατιστικά σημαντική, σχέση. Το εξαιρετικά χαμηλό R^2 (0,22%) υποδηλώνει ότι το μοντέλο δεν εξηγεί ουσιαστικά καμία από τη διακύμανση της εξαρτημένης μεταβλητής. Συνεπώς, δεν παρατηρείται σχέση μεταξύ υδρο-ηλεκτρικής παραγωγής και ποσοστού διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων.

xiii. Παραγωγή αιολικής ενέργειας 2024

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	8,92	1,79	4,99	0,000	
Wind power generation (TWh)	-0,00108	0,00722	-0,15	0,883	1,00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7,33348	0,12%	0,00%	0,00%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	1,199	1,199	0,02	0,883
Wind power generation (TWh)	1	1,199	1,199	0,02	0,883
Error	18	968,039	53,780		
Total	19	969,238			

Η παλινδρόμηση μεταξύ **ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων** και **αιολικής παραγωγής ενέργειας το 2024** (TWh) δείχνει ανύπαρκτη στατιστικά σημαντική σχέση. Ο συντελεστής (-0,00108) είναι πρακτικά μηδενικός, ενώ η τιμή p (0,883) καταδεικνύει πλήρη απουσία στατιστικής σημαντικότητας. Το R^2 (0,12%) είναι σχεδόν μηδενικό, γεγονός που αποκαλύπτει ότι το μοντέλο δεν εξηγεί τη διακύμανση της εξαρτημένης μεταβλητής. Συνεπώς, δεν τεκμηριώνεται γραμμική συσχέτιση μεταξύ αιολικής παραγωγής ενέργειας και ποσοστού υιοθέτησης ηλεκτρικών οχημάτων.

xiv. Παραγωγή ηλιακής ενέργειας 2024

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	8,90	1,75	5,08	0,000	
Solar power generation (TWh)	-0,00127	0,00877	-0,15	0,886	1,00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7,33373	0,12%	0,00%	0,00%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	1,133	1,133	0,02	0,886
Solar power generation (TWh)	1	1,133	1,133	0,02	0,886
Error	18	968,105	53,784		
Total	19	969,238			

Η ανάλυση παλινδρόμησης μεταξύ **ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων** και **παραγωγής ηλιακής ενέργειας το 2024 (TWh)** δείχνει ανύπαρκτη γραμμική συσχέτιση. Ο συντελεστής (-0,00127) είναι πρακτικά μηδενικός, ενώ η τιμή p (0,886) καταδεικνύει πλήρη απουσία στατιστικής σημαντικότητας. Το R^2 (0,12%) είναι σχεδόν μηδενικό, γεγονός που αποκαλύπτει ότι το μοντέλο δεν εξηγεί τη διακύμανση της εξαρτημένης μεταβλητής. Συνεπώς, δεν προκύπτει σχέση ανάμεσα στην παραγωγή ηλιακής ενέργειας και την υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων.

xv. Παραγωγή ενέργειας από βιοκαύσιμα 2024

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	9,29	1,69	5,51	0,000	
Biofuel energy production (TWh)	-0,0129	0,0140	-0,92	0,369	1,00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7,17089	4,50%	0,00%	0,00%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	43,65	43,65	0,85	0,369
Biofuel energy production (TWh)	1	43,65	43,65	0,85	0,369
Error	18	925,59	51,42		
Lack-of-Fit	13	351,64	27,05	0,24	0,983
Pure Error	5	573,95	114,79		
Total	19	969,24			

Η παλινδρόμηση μεταξύ **ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων** και **παραγωγής ενέργειας από βιοκαύσιμα το 2024 (TWh)** δείχνει ασθενή και μη στατιστικά σημαντική συσχέτιση. Ο συντελεστής (-0,0129) είναι μικρός και αρνητικός, ενώ η τιμή p (0,369) δείχνει ότι δεν υπάρχει στατιστική σημαντικότητα. Το R^2 (4,50%) είναι πολύ χαμηλό, πράγμα που σημαίνει ότι το μοντέλο δεν εξηγεί ουσιαστικά τη διακύμανση

του ποσοστού ηλεκτρικών οχημάτων. Συνεπώς, δεν τεκμηριώνεται σαφής σχέση μεταξύ παραγωγής ενέργειας από βιοκαύσιμα και διείσδυσης EVs.

xvii Κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ανά άτομο 2024 σε σχέση με εκπομπές CO₂ ανά άτομο το 2022.

Coefficients						Model Summary			
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
Constant	796	3773	0,21	0,835		7078,98	81,54%	80,51%	77,54%
CO ₂ emission 2022 (tn)	3861	433	8,92	0,000	1,00				

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	3983158983	3983158983	79,49	0,000
CO ₂ emission 2022 (tn)	1	3983158983	3983158983	79,49	0,000
Error	18	902014777	50111932		
Total	19	4885173760			

Η παλινδρόμηση μεταξύ **κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο το 2024** (kWh) και **εκπομπών CO₂ ανά κάτοικο το 2022** (tn) δείχνει ισχυρή και στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση. Ο συντελεστής (3861) υποδηλώνει ότι αύξηση των εκπομπών CO₂ σχετίζεται με σημαντική αύξηση στην κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο, ενώ η τιμή p (<0,001) επιβεβαιώνει τη στατιστική σημαντικότητα της σχέσης. Το υψηλό R² (81,54%) δείχνει ότι το μοντέλο εξηγεί την πλειονότητα της διακύμανσης στην κατανάλωση ορυκτών καυσίμων. Συνεπώς, τα δεδομένα τεκμηριώνουν ισχυρή γραμμική εξάρτηση μεταξύ εκπομπών CO₂ και κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο.

xviii Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν ανά άτομο 2023 ως προς πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων το 2024

Coefficients						Model Summary			
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
Constant	63,19	2,94	21,50	0,000		12,4916	33,62%	29,93%	0,00%
Electric cars sold 2024	-0,000003	0,000001	-3,02	0,007	1,00				

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	1423	1422,6	9,12	0,007
Electric cars sold 2024	1	1423	1422,6	9,12	0,007
Error	18	2809	156,0		
Total	19	4231			

Η παλινδρόμηση μεταξύ Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος ανά κάτοικο το 2023 (\$) και του αριθμού νέων ηλεκτρικών αυτοκινήτων που πωλήθηκαν το 2024 δείχνει αρνητική και στατιστικά σημαντική σχέση. Ο συντελεστής (-0,00000347) υποδηλώνει ότι υψηλότερος αριθμός νέων ηλεκτρικών αυτοκινήτων σχετίζεται με μικρή μείωση του ΑΕΠ ανά κάτοικο, ενώ η τιμή p (0,007) επιβεβαιώνει τη στατιστική σημαντικότητα της σχέσης. Το R^2 (33,62%) δείχνει ότι το μοντέλο εξηγεί ένα μέτριο ποσοστό της διακύμανσης του ΑΕΠ ανά κάτοικο. Συνεπώς, τα δεδομένα υποστηρίζουν την ύπαρξη γραμμικής εξάρτησης μεταξύ πωλήσεων νέων ηλεκτρικών οχημάτων και ΑΕΠ ανά κάτοικο, αν και η επίδραση είναι σχετικά μικρή.

xix Συνδυασμός παραγόντων

Θα θέλαμε στη συνέχεια να δούμε, πως συνεισφέρουν συνδυαστικά οι παράγοντες που ήδη εξετάσαμε, στο ποσοστό ηλεκτρικών αυτοκινήτων ανά χώρα. Προσπαθούμε λοιπόν να κατασκευάσουμε ένα μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, με εξαρτημένη μεταβλητή το ποσοστό ηλεκτρικών αυτοκινήτων ανά χώρα και ανεξάρτητες όλες ή κάποιες από τις μεταβλητές που περιγράψαμε στην αρχή του κεφαλαίου.

Αρχικά, αν χρησιμοποιούμε την μέθοδο enter (όλες οι μεταβλητές παίρνουν μέρος στο μοντέλο και εξετάζεται η σημαντικότητά του), τότε προκύπτει ένα μη στατιστικά σημαντικό μοντέλο.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	14	815,431	58,245	1,89	0,249
GNP (\$)	1	14,394	14,394	0,47	0,524
CO ₂ emission 2023 (tn)	1	12,492	12,492	0,41	0,552
Energy consumption (kWh)	1	29,230	29,230	0,95	0,374
Fossil fuel consumption (kWh)	1	0,465	0,465	0,02	0,907
GDP (\$)	1	111,487	111,487	3,62	0,115
CO ₂ emission 2022 (tn)	1	30,610	30,610	1,00	0,364
Electricity production (TWh)	1	6,780	6,780	0,22	0,658
Natural gas consumption (Bcm)	1	1,495	1,495	0,05	0,834
Oil Consumption (Barrels/day)	1	7,405	7,405	0,24	0,644
Electric cars sold 2024	1	7,425	7,425	0,24	0,644
Hydropower generation (TWh)	1	5,378	5,378	0,17	0,693
Wind power generation (TWh)	1	28,453	28,453	0,92	0,380
Solar power generation (TWh)	1	3,209	3,209	0,10	0,760
Biofuel energy production (TWh)	1	7,361	7,361	0,24	0,645
Error	5	153,807	30,761		
Total	19	969,238			

Θα χρησιμοποιήσουμε λοιπόν (στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση) μιά μέθοδο επιλογής των σημαντικότερων από αυτές της μεταβλητές, την λεγόμενη μέθοδο stepwise (βηματική επιλογή).

Παρατήρηση (μέθοδος stepwise)

Η stepwise method (βηματική μέθοδος) είναι μια διαδικασία επιλογής μεταβλητών στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση. Ουσιαστικά, χρησιμοποιείται όταν έχουμε πολλές ανεξάρτητες μεταβλητές (predictors) και δεν είναι ξεκάθαρο ποιες πρέπει να μπουν στο τελικό μοντέλο.

- ♦ Τι κάνει η stepwise method:

Χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο που προσθέτει ή αφαιρεί μεταβλητές από το μοντέλο βήμα-βήμα (step by step).

Κριτήρια επιλογής: συνήθως βασίζεται σε στατιστικά τεστ (π.χ. p-values) ή κριτήρια πληροφορίας (AIC, BIC).

Υπάρχουν τρεις κύριες παραλλαγές:

Forward Selection (πρόσθεση προς τα εμπρός):

Ξεκινά με κανένα predictor.

Σε κάθε βήμα προσθέτει τη μεταβλητή που βελτιώνει περισσότερο το μοντέλο.

Σταματά όταν καμία νέα μεταβλητή δεν είναι στατιστικά σημαντική.

Backward Elimination (αφαίρεση προς τα πίσω):

Ξεκινά με όλες τις μεταβλητές.

Σε κάθε βήμα αφαιρεί εκείνη με τη μικρότερη συμβολή (συνήθως με το μεγαλύτερο p-value).

Συνεχίζει μέχρι να μείνουν μόνο οι σημαντικές.

Stepwise Selection (μικτή):

Συνδυασμός των δύο.

Προσθέτει μεταβλητές, αλλά σε κάθε βήμα ελέγχει αν κάποιες από αυτές που ήδη υπάρχουν στο μοντέλο έχουν χάσει τη σημαντικότητά τους και τις αφαιρεί.

- ♦ Πλεονεκτήματα:

Δίνει αυτοματοποιημένο τρόπο επιλογής μεταβλητών.

Χρήσιμο όταν έχουμε πολλά predictors.

- ♦ Μειονεκτήματα:

Μπορεί να οδηγήσει σε overfitting.

Τα αποτελέσματα δεν είναι πάντα σταθερά (αν αλλάξουν λίγο τα δεδομένα, μπορεί να αλλάξει το τελικό μοντέλο).

Δεν λαμβάνει υπόψη το θεωρητικό υπόβαθρο ή τις αιτιώδεις σχέσεις, μόνο στατιστικά κριτήρια.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Stepwise Selection of Terms

α to enter = 0,15; α to remove = 0,15

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4,36673	72,46%	62,62%	30,89%

Regression Equation

Ποσοστό EV (%) = -14,55 - 0,000000 GNP (\$) + 0,000053 Energy consumption (kWh)
+ 0,3727 GDP (\$) - 35,0 Natural gas consumption (Bcm)
+ 0,01738 Hydropower generation (TWh)

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-14,55	5,52	-2,64	0,020	
GNP (\$)	-0,000000	0,000000	-1,77	0,098	2,06
Energy consumption (kWh)	0,000053	0,000033	1,60	0,132	1,17
GDP (\$)	0,3727	0,0894	4,17	0,001	1,78
Natural gas consumption (Bcm)	-35,0	14,2	-2,47	0,027	1,23
Hydropower generation (TWh)	0,01738	0,00529	3,29	0,005	2,57

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι, οι σημαντικότερες από τις μεταβλητές, τις οποίες επιλέγει η μέθοδος για την κατασκευή ενός μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης είναι οι:

Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν (GNP)

Κατανάλωση ενέργειας (;energy consumption)

Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (GDP)

Κατανάλωση φυσικού αερίου (natural gas consumption)

Παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας (hydropower generation)

Σηματικότερη από όλες είναι το Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν (μεγαλύτερο t-value=4,17, κατά απόλυτη τιμή).

Από την ανάλυση γίνεται φανερό, ότι οι 5 αναφερθείσες μεταβλητές/ παράγοντες συνδέονται (γραμμικά) ισχυρά, στατιστικά σημαντικά, με το ποσοστό ηλεκτρικών αυτοκινήτων ανά χώρα (συντελεστής συσχέτισης $R=0,851$ και συντελεστής προσδιορισμού $R^2=0,7246$). Από τον πίνακα Anova που ακολουθεί βλέπουμε ότι η σχέση αυτή είναι στατιστικά σημαντική (sig. <0,05).

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	702,28	140,46	7,37	0,001
GNP (\$)	1	59,95	59,95	3,14	0,098
Energy consumption (kWh)	1	48,85	48,85	2,56	0,132
GDP (\$)	1	331,12	331,12	17,36	0,001
Natural gas consumption (Bcm)	1	116,34	116,34	6,10	0,027
Hydropower generation (TWh)	1	205,98	205,98	10,80	0,005
Error	14	266,96	19,07		
Total	19	969,24			

Εάν κάποιος κατασκευάσει ένα μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης του ποσοστού ηλεκτρικών αυτοκινήτων ανά χώρα σε σχέση με τις 5 μεταβλητές που ήδη αναφέρθηκαν, τότε από τον παραπάνω πίνακα παρατηρεί ότι, αυτό θα δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \text{Ποσοστό EV (\%)} = & -14,55 - 0,000000 \text{ GNP (\$)} \\ & + 0,000053 \text{ Energy consumption (kWh)} \\ & + 0,3727 \text{ GDP (\$)} \\ & - 35,0 \text{ Natural gas consumption (Bcm)} \\ & + 0,01738 \text{ Hydropower generation (TWh)} \end{aligned}$$

5. Συμπεράσματα

Η ηλεκτροκίνηση, αν και αναγνωρίζεται ευρέως ως η επόμενη μεγάλη πρόοδος στον τομέα των μεταφορών, δεν είναι χωρίς τις προκλήσεις και τις αμφιβολίες της. Οι συνεχείς εξελίξεις στην τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων και η στήριξη από κυβερνήσεις και βιομηχανίες δημιουργούν μια εικόνα προόδου και καινοτομίας, αλλά είναι επίσης απαραίτητο να εξετάσουμε προσεκτικά τα οικονομικά και κοινωνικά ζητήματα που προκύπτουν από αυτή την αλλαγή.

Στην προσπάθεια μας να διαμορφώσουμε ένα βιώσιμο μέλλον, η ηλεκτροκίνηση φέρνει μαζί της μια σειρά από προκλήσεις που είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε. Από τις τεράστιες επενδύσεις που απαιτούνται για την ανάπτυξη υποδομών φόρτισης, έως τις επιπτώσεις που έχει η μετάβαση από τα παραδοσιακά καύσιμα στις νέες τεχνολογίες. Η οικονομική επιβάρυνση είναι αισθητή όχι μόνο για τους καταναλωτές, αλλά και για τις βιομηχανίες που προσαρμόζονται σε μια νέα εποχή. Αξιοσημείωτο είναι ότι η ηλεκτροκίνηση επηρεάζει ευρύτερους τομείς της οικονομίας, όπως η παραγωγή και διάθεση καυσίμων, η εφοδιαστική αλυσίδα και η αγορά εργασίας, προκαλώντας ανακατατάξεις που μπορεί να έχουν μακροπρόθεσμες συνέπειες.

Αξιολογώντας τις προκλήσεις που συνεπάγεται η ηλεκτροκίνηση, είναι φυσικό να αναρωτηθούμε για την πραγματική αξία και βιωσιμότητα αυτής της τεχνολογίας. Εξάλλου, η υιοθέτηση νέων τεχνολογιών δεν είναι ποτέ μια διαδικασία χωρίς δυσκολίες. Η ηλεκτροκίνηση, παρόλο που υπόσχεται μια καθαρότερη και βιώσιμη κινητικότητα, δεν έρχεται χωρίς κόστος και προκλήσεις. Υπάρχουν ερωτήματα που απαιτούν προσεκτική σκέψη: είμαστε έτοιμοι να αντιμετωπίσουμε τα οικονομικά και κοινωνικά αποτελέσματα της μετάβασης σε ηλεκτρικά οχήματα; Θα μπορέσουμε να διαχειριστούμε τις αλλαγές που φέρνει η ηλεκτροκίνηση στην αγορά εργασίας και την εφοδιαστική αλυσίδα; Και πιο σημαντικό, η ηλεκτροκίνηση θα αποδειχθεί ότι είναι μια διαρκής λύση ή απλώς μια προσωρινή και υπερεκτιμημένη τεχνολογία;

Ο μεγάλος Σέρβος επιστήμονας και εφευρέτης Nikola Tesla είπε: «Άσε το μέλλον να πει την αλήθεια». Ογδόντα χρόνια μετά το θάνατό του, οι καινοτομίες του, όπως το εναλλασσόμενο ρεύμα και η γεννήτρια, χρησιμοποιούνται για να προωθήσουν την ηλεκτροκίνηση. Αλλά αν η τεχνολογία που σήμερα θεωρούμε επαναστατική και απαραίτητη θα αποδειχθεί ότι είναι πραγματικά η λύση που αναζητούμε ή μια υπερεκτιμημένη και βραχύβια λύση, αυτό είναι κάτι που μόνο το μέλλον θα μπορέσει να αποκαλύψει. Τα ερωτήματα που παραμένουν ανοιχτά θα καθορίσουν αν η ηλεκτροκίνηση θα επιβεβαιώσει τις προσδοκίες μας ή αν θα αναδείξει νέες προκλήσεις που δεν είχαμε προβλέψει. Εν τω μεταξύ, ας συνεχίσουμε να παρακολουθούμε και να αναλύουμε την εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης με κριτική σκέψη, κρατώντας ανοιχτό το μυαλό μας για τις αλήθειες που θα μας αποκαλύψει το μέλλον.

Βιβλιογραφία

- B. Sundén, Chapter 8 - Fuel cell types - overview, in: B. Sundén (Ed.) Hydrogen, Batteries and Fuel Cells, Academic Press, 2019, pp. 123-144.
- Brouzgou, S. Song, P. Tsiakaras, Applied Catalysis B: Environmental, 158 (2014) 209-216.
- C. Jeyaseelan, A. Jain, P. Khurana, D. Kumar, S. Thatai, Rechargeable Batteries: History,
- D. Akinyele, E. Olabode, A. Amole, Inventions, 5 (2020) 42.
- D. Ebbing, S.D. Gammon, General chemistry, Cengage Learning, 2016.
- E. Sum, M. Skyllas-Kazacos, Journal of Power sources, 15 (1985) 179-190.
- Ellingsen, Linda A.-W., et al. "Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack." *Journal of Industrial Ecology*, vol. 18, no. 1, 2014, p. 113-124.
- Encyclopaedia Britannica. (2025, April 14), *Deepwater Horizon oil spill: Environmental disaster, Gulf of Mexico [2010]*.
- Energy Storage Technologies, Energy Storage in Power Systems, 2016, pp. 93-141
- European Environment Agency, "Electric Vehicles from Life Cycle and Circular Economy Perspectives.
- European Parliament. (2022, October 13). *Εναλλακτικά καύσιμα οχημάτων: Ποια είναι και πώς θα ενισχύσουμε τη χρήση τους*.
- Eurostat, "Electricity and Heat Statistics." *Eurostat*, 2023
- F. Wu, J. Maier, Y. Yu, Chemical Society Reviews, 49 (2020) 1569-1614.
- FracTracker Alliance. (n.d.). *Health & environmental effects of fracking*.
- Gaines, Linda. "The Future of Automotive Lithium-Ion Battery Recycling: Charting a Sustainable Course." *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 1, 2014, p. 2-7
- Greenpeace. (2021). *The impact of oil extraction on biodiversity*.
- Hawkins, H. (2014). *The history of electric vehicles: From the first electric car to modern-day models*. Green Energy Publishing.
- International Energy Agency (IEA), "The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions." *IEA*, 2021
- International Energy Agency (IEA). (2022). *CO₂ emissions from fuel combustion: Overview*.
- International Energy Agency (IEA). (2024). *Global Critical Minerals Outlook 2024*.
- J.T. Warner, Chapter 3 - Lithium-ion battery operation, in: J.T. Warner (Ed.) Lithium-Ion Battery Chemistries, Elsevier, 2019, pp. 43-77.
- J.T. Warner, Chapter 6 - The Anodes, in: J.T. Warner (Ed.) Lithium-Ion Battery Chemistries, Elsevier, 2019, pp. 115-138.

- J.T. Warner, Chapter 7 - Inactive materials, in: J.T. Warner (Ed.) *Lithium-Ion Battery Chemistries*, Elsevier, 2019, pp. 139-170.
- K. C. Ramya, J. Geetha Ramani, A. Sridevi, Rajakumar S. Rai, and D. Ruth Anita Shirley, “Introduction to Electric Vehicles and Hybrid Electric Vehicles” p. 43-58
- K. Latha Maheswari, S. Kavitha, and M. Kathires, “Introduction to Electric Vehicles and Hybrid Electric Vehicles” p. 1-30
- K.K. Kar, *Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials I*, Springer, 2020.
- Kosuru, S. M. Y., Delhiwala, Y., Koorla, P. B., & Mekala, M. (2024). A review on the biodiesel production: Selection of catalyst, pre-treatment, post treatment methods. *Green Technologies and Sustainability*.
- L. Yan, B. Zhang, J. Zhu, Y. Li, P. Tsiakaras, P.K. Shen, *Applied Catalysis B: Environmental*, 265 (2020) 118555.
- Lithium Mining and Its Impacts on the Environment. *EnergySage*, 5 June 2021
- M.A. Scibioh, B. Viswanathan, Chapter 2 - Fundamentals and energy storage mechanisms—overview, in: M.A. Scibioh, B. Viswanathan (Eds.) *Materials for Supercapacitor Applications*, Elsevier, 2020, pp. 15-33.
- Ma, X., Li, M. I., Hendrickson, T. P., & Kirchain, R. (2021). Cobalt supply chain analysis: Implications for sustainable energy transitions. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(40), 13570–13580.
- Matsumoto, Hitoshi, et al. "Energy Consumption and CO₂ Emissions in the Production of Lithium-Ion Batteries." *Journal of Power Sources*, vol. 340, 2017, p.116-125.
- Muzaffar, M.B. Ahamed, K. Deshmukh, J. Thirumalai, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101 (2019) 123-145.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (n.d.). *Exxon Valdez oil spill. NOAA Damage Assessment, Remediation, and Restoration Program*.
- Nickel-Metal Hydride (Ni-MH) Batteries, *Rechargeable Batteries*, 2020, pp. 131-175
- Nigel Burton (2013), “A history of electric cars”, The Crowood Press, Ramsbury, Marlborough, p.16-17
- Nigel Burton (2013) , “A history of electric cars”, The Crowood Press, Ramsbury, Marlborough, p.10-11
- Nigel Burton (2013), “A history of electric cars”, The Crowood Press, Ramsbury, Marlborough, p.12-13
- Nigel Burton (2013), “A history of electric cars”, The Crowood Press, Ramsbury, Marlborough, p.14-15
- Nigel Burton (2013), “A history of electric cars”, The Crowood Press, Ramsbury, Marlborough, p.18-23
- Öko-Institut. (2011). *Cobalt from the DR Congo—Potential, Risks and Significance for the Global Cobalt Market*.

- P.E. Lokhande, U.S. Chavan, A. Pandey, *Electrochemical Energy Reviews*, 3 (2020) 155- 186.
- P.-J. Tsais, L. Chan, *Electricity Transmission, Distribution and Storage Systems*, (2013) 309-397.
- Pb Acid Batteries, Rechargeable Batteries, 2020, pp. 17-39.
- S. Banerjee, P. Sinha, K.D. Verma, T. Pal, B. De, J. Cherusseri, P. Manna, K.K. Kar, *Capacitor to Supercapacitor, Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials I*, Springer, 2020, pp. 53-89.
- S. Petrovic, *Lead–Acid Batteries, Battery Technology Crash Course*, Springer, pp. 47-71.
- S. Petrovic, *Nickel–Cadmium Batteries, Battery Technology Crash Course*, Springer, 2021, pp. 73-88.
- S. Petrovic, *Nickel–Metal Hydride Batteries, Battery Technology Crash Course*, Springer, 2021, pp. 89-91.
- S. Song, V. Maragou, P. Tsiakaras, (2007)
- S. Trikalitis, G. Lavidas, J.K. Kaldellis, *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 6 (2021) 34.
- S.K. Martha, L. Elias, *Nanomaterials for Electrochemical Energy Storage Devices*, (2019) 147.
- S.T. Revankar, *Chemical energy storage, Storage and Hybridization of Nuclear Energy*, Elsevier, 2019, pp. 177-227.
- Sainato, M. (2022, December 21). *Keystone pipeline raises concerns after third major spill in five years*. The Guardian.
- Selebi-Phikwe Development Trust. (n.d.). Socio-economic impacts of mining in Botswana: A case study of the Selebi-Phikwe copper-nickel mine.
- Sumukh Surya, P. Supriya, and Sheldon S. Williamson, “Introduction to Electric Vehicles and Hybrid Electric Vehicles” p. 59-82
- Sutherland, W. J., Pullin, A. S., Dolman, P. M., & Knight, T. M. (2004). The need for evidence-based conservation. *Conservation Biology*, 18(6), 1401–1403.
- Szenasy, E. (n.d.). *History – The invention of the electric motor 1800-1854*. University of Szeged.
- U.S. Energy Information Administration (2025, April 19), *Refining crude oil - the refining process*.
- Union of Concerned Scientists, "Environmental Impacts of Renewable Energy Technologies." *UCSUSA*, 25 Jan. 2022
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). *The environmental impact of acid rain*.
- van den Brink, S., Kleijn, R., Sprecher, B., & Tukker, A. (2013). Identifying supply risks by mapping the cobalt supply chain. *Environmental Sciences Europe*, 24(14).
- World Health Organization (WHO). (2021). *Air quality and health*.

- X. Fan, B. Liu, J. Liu, J. Ding, X. Han, Y. Deng, X. Lv, Y. Xie, B. Chen, W. Hu, Transactions of Tianjin University, 26 (2020) 92-103.
- Y. Liang, C.Z. Zhao, H. Yuan, Y. Chen, W. Zhang, J.Q. Huang, D. Yu, Y. Liu, M.M. Titirici, Y.L. Chueh, InfoMat, 1 (2019) 6-32.
- Z. He, Y. Liu, Fundamentals of lithium-ion supercapacitors, Lithium-Ion Supercapacitors, CRC Press, 2018, pp. 1-11.
- Zhang, H., Zhang, P., Wu, T., & Ruan, H. (2023). Bioethanol production based on *Saccharomyces cerevisiae*: Opportunities and challenges.
- Zhang, Li, et al, "Environmental and Health Impacts of N-Methylpyrrolidone in Battery Production." *Environmental Science & Technology*, vol. 52, no. 3, 2018, pp. 1234-1243.