



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ
ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΩΝ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΟΝ ΜΗΧΑΝΟΚΙΝΗΤΟ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**



ΙΩΑΝΝΗΣ.Π, ΔΕΡΜΕΝΤΖΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Πέππας Αντώνιος, ΔΕΠ

Αθήνα 2023

ΠΡΟΛΟΓΟΣ & ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα της Μεταλλευτικής Επιστήμης και Τεχνολογίας της Σχολής Μεταλλειολόγων - Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου κατά το ακαδημαϊκό έτος 2022-2023, υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Πέππα Αντώνη. Αντικείμενο της εργασίας αποτέλεσε η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής ενός λατομείου μαρμάρου κατά ένα πλήρως έτος λειτουργίας του και η πρόταση σεναρίων απαθρακοποίησης του συγκεκριμένου λατομείου με σκοπό την βελτίωση του περιβαλλοντικού του αποτυπώματος. Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται η φοίτηση μου στη Σχολή των Μεταλλειολόγων - Μεταλλουργών Μηχανικών του ΕΜΠ. Παραθέτω, λοιπόν, το ευχαριστήριό μου σημείωμα προς όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας και σε όσους στάθηκαν κοντά μου κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής, κ.Πέππα Αντώνη, για τη διαρκή επιστημονική καθοδήγηση και τις υποδείξεις που πραγματοποίησε, τη σχολαστικότητα και την επιμέλεια, καθώς επίσης και για τον σεβασμό της καθ'όλη τη συνεργασία μας. Τον ευχαριστώ επίσης για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος το οποίο συνδυάζει δύο τομείς για τους ποίους τρέφω ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Τόσο τον ενεργειακό τομέα και τις τεχνολογίες υδρογόνου όσο και τα λατομεία μαρμάρου.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία Ικτίνος Α.Ε, τον κ. Αλμπανόπουλο Χαράλαμπο Μηχανικό Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό και διευθυντή των λατομείων της Ικτίνος Ελλάς και τον κ. Τζιμπερτζοπουλο Αλέξανδρο Μηχανολόγο Μηχανικό της εταιρείας, για την εμπιστοσύνη τους και την συνεργασία κατά την διάρκεια της διπλωματικής

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και το κοντινό μου φιλικό περιβάλλον για την αμέριστη στήριξη και συμπαράσταση κατά την εκπόνηση της διπλωματικής αλλά και κατά την διάρκεια φοίτησής μου. Θα ήθελα να αφιερώσω την παρούσα διπλωματική εργασία στην οικογένεια μου και στον θείο μου τον Στέφανο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός λατομείου μαρμάρου κατά την λειτουργία του. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε το περιβαλλοντικό αποτύπωμα ενός λατομείου μαρμάρου που βρίσκεται στον νομό Δράμας στην περιοχή του Βόλακα κατά το έτος λειτουργίας 2022. Οι υπολογισμοί των περιβαλλοντικών επιπτώσεων πραγματοποιήθηκαν με την μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής (AKZ), ενώ παράλληλα προτάθηκαν και εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας του λατομείου με καύσιμο υδρογόνο με σκοπό την απανθρακοποίηση της εκμετάλλευσης.

Το μάρμαρο αποτελεί ένα από τα κύρια εξαγωγικά προϊόντα της ελληνικής οικονομίας, αφού η αξία εξαγωγών του για τα έτη 2020,2021 και 2022 ξεπέρασε τα 300.000.000 ευρώ ανά έτος. Η εξαγωγική αξία του ελληνικού μαρμάρου κατατάσσει την Ελλάδα στην 4η θέση παγκοσμίως στις εξαγωγές αυτού του είδους. Εύλογα γίνεται αντιληπτό πως για την εξόρυξη μεγάλων ποσοτήτων ακατέργαστου μαρμάρου απαιτείται και μεγάλο ποσό ενέργειας. Η ενέργεια αυτή παρέχεται στα λατομεία, είτε μέσω καύσιμου πετρελαίου, είτε μέσω ηλεκτρικής ενέργειας και, αφενός συνδράμει στην άρτια λειτουργία του λατομικού εξοπλισμού, αφετέρου επιφέρει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η λειτουργία λατομείου μαρμάρου της εταιρείας Ικτίνος Α.Ε. που λειτουργεί με σύγχρονο εξοπλισμό, για την εξόρυξη ακατέργαστων ογκομαρμάρων. Μετά την περιγραφή της λατομικής μονάδας για την εξόρυξη ογκομαρμάρων αναλύεται ο σκοπός της εργασίας που είναι η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής (AKZ) και πιο συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός και η ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούνται κατά την ετήσια λειτουργία του. Επιπλέον, εξετάζεται η χρήση εναλλακτικών καυσίμων μέσω τεχνολογιών υδρογόνου, για την αξιολόγηση του βαθμού απανθρακοποίησης και την βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Η διεξαγωγή της μελέτης AKZ πραγματοποιήθηκε σε τέσσερα στάδια. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τον ορισμό του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης, της λειτουργικής μονάδας και των ορίων του συστήματος. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την καταγραφή των δεδομένων, κατά την οποία προσδιορίστηκαν οι εισερχόμενες ροές κάθε τεχνολογίας και οι καταναλώσεις ενέργειας. Το τρίτο στάδιο της μελέτης AKZ περιλαμβάνει την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και συγκεκριμένα το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, την οξίνιση, τον ευτροφισμό και το φωτοχημικό σχηματισμό όζοντος. Στο τέταρτο στάδιο αξιολογούνται οι κύριοι παράγοντες που προκαλούν κατά βάση τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η AKZ πραγματοποιήθηκε σε τρία σενάρια. Ως σενάριο βάσης αναλύθηκε η λειτουργία του λατομείου σύμφωνα με τις καταγεγραμμένες καταναλώσεις ηλεκτρισμού και ορυκτών καυσίμων ανά κατηγορία εξοπλισμού. Για κάθε κατηγορία υπολογίστηκε η ισοδύναμη ενέργεια (kWh) που ζητήθηκε από τον εξοπλισμό, λαμβάνοντας υπόψη και τον χρόνο λειτουργίας. Στο δεύτερο και τρίτο σενάριο

υπολογίστηκε η αντίστοιχη μεσοσταθμική κατανάλωση υδρογόνου, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία αλλά και τα εμπορικά δεδομένα, με χρήση υδρογόνου σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ICE, ή σε fuel cells υδρογόνου.

Βάσει των υπολογισμών της αξιολόγησης των επιπτώσεων, για τις τέσσερις κύριες κατηγορίες (κλιματική αλλαγή, οξίνιση, ευτροφισμός και φωτοχημικό σχηματισμό όζοντος) που ευθύνονται για το περιβαλλοντικό αποτύπωμα προέκυψε σημαντική μείωση των επιπτώσεων αυτών μέσω τεχνολογιών υδρογόνου. Συγκεκριμένα η χρήση ορυκτών καυσίμων επιβαρύνει 3 έως 6 φορές περισσότερο (ανάλογα με την κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων) το περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σχέση με την αντίστοιχη λειτουργία του με τεχνολογίες υδρογόνου. Η διαφορά επιβάρυνσης ανάμεσα στις δυο τεχνολογίες υδρογόνου θεωρείται αμελητέα, με επιβλαβέστερη την χρήση κινητήρων εσωτερικής καύσης ICE, λόγω των εκπομπών NOx.

ABSTRACT

In this thesis the environmental impacts of a marble quarry in annual basis were studied, by applying LCA methodology. Specifically, the environmental footprint of a Greek marble quarry located in the prefecture of Drama in the area of Volakas, for the operating year of 2022 was calculated. The environmental impact calculations were carried out using the life cycle assessment (LCA) study, while alternative scenarios of operating the quarry with hydrogen in order to decarbonize the exploitation were proposed.

Marble is one of the main export products of the Greek economy, since its export value for the years 2020, 2021 and 2022 exceeded 300.000.000 euros per year. The export value of Greek marble ranks Greece in 4th place worldwide in marble exports. However, the extraction of large quantities of raw marble requires a large amount of energy. This energy is supplied to the marble quarries either through fossil fuels or electricity for the proper operation of the quarry equipment resulting to environmental impacts.

In this thesis, a grid connected marble quarry model of the company Iktinos S.A. is studied, consuming also fossil fuels for heavy vehicles and electric generators. After the description of the quarrying plant for the extraction of marble, the energy delivered from each type of equipment was calculated, based on monitored data for the operational time correlated to equipment specifications. LCA scope for the given quarry was the identification and quantification of the environmental impacts caused in annual basis, as well as to evaluate alternative scenarios based on hydrogen technologies to decarbonize the quarry and improve the environmental footprint. LCA was carried out in four stages. The first stage involves the definition of the Goal & Scope, the functional unit and the system boundaries. The second stage includes data collection and analysis for Life Cycle Inventory, in which the incoming flows of each technology and energy consumptions were identified. The third stage of the LCA study includes the assessment of environmental impacts, i.e. mitigation of climate change, acidification, eutrophication and photochemical ozone formation during the operation of the quarry.

LCA was carried out for three scenarios. In the first scenario the environmental footprint, in annual basis, was evaluated based on current methodology by powering the equipment with electricity from the grid and fossil fuels. The second and third scenario is analysing the environmental impact by utilizing H₂ internal combustion engines (ICE) and fuel cells.

Based on the impact assessment calculations, for the four main categories (climate change, acidification, eutrophication and photochemical ozone formation), it has been found that significant reductions can be achieved through hydrogen technologies. The current marble extraction method imposes 3-6 times more (depending on the environmental impact) in comparison with hydrogen technologies. Between the two

hydrogen technologies the difference in burden is considered negligible, with ICE application presenting higher impact due to NOx emissions.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	7
1. Ενεργειακή Κατάσταση της χώρας και δυνατότητες απανθρακοποίησης.....	11
1.1. Εγκατεστημένη ισχύς.....	11
1.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	13
1.3. Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.....	14
1.4. Εισαγωγές και εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας.....	16
1.5. Κατανάλωση ενέργειας στην ελληνική βιομηχανία.....	16
1.6. Κατανάλωση Ενέργειας στα Λατομεία Μαρμάρου.....	18
1.7. Τεχνολογίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε επιφανειακές εκμεταλλεύσεις (συνδεδεμένα, μη διασυνδεδεμένα συστήματα).....	20
1.8. Περιγραφή των μονάδων αυτοπαραγωγής ενέργειας και συγκεκριμένα των γεννητριών πετρελαίου.....	21
1.8.1. Πλεονεκτήματα των μη συνδεδεμένων στο δίκτυο μέσω παροχής ενέργειας (γεννήτριες πετρελαίου):.....	22
1.8.2. Μειονεκτήματα των μη συνδεδεμένων στο δίκτυο μέσω παροχής ενέργειας (γεννήτριες πετρελαίου) :.....	23
1.9. Περιγραφή εξοπλισμού ενός λατομείου, διασυνδεδεμένου σε δικτύου παροχής ενέργειας.....	24
2. Συμβατικός εξοπλισμός εξόρυξης μαρμάρου.....	25
2.1. Εταιρίας διεξαγωγής της μελέτης.....	25
2.1.1. Το λατομείο του Βύλακα.....	25
2.1.2. Ο ρόλος της εταιρείας στην παγκόσμια αγορά μαρμάρου.....	27
2.2. Μηχανοκίνητος εξοπλισμός λατομείου.....	28
2.2.1 Λαστιχοφόροι φορτωτές.....	28
2.2.2 Λαστιχοφόρος φορτωτής μεσαίου-μεγάλου μεγέθους.....	29
2.2.3 Λαστιχοφόρος φορτωτής μικρού μεγέθους.....	31
2.2.4. Ερπυστριοφόρος εκσκαφέας.....	33
2.2.5 Κομπρεσέρ αέρα.....	36
2.2.6 Μηχάνημα Διάτρησης.....	37
2.2.7. Ανατρεπόμενα φορτηγά (DUMPERS).....	39
2.2.8 Γεννήτρια πετρελαίου.....	40
2.2.9 Επικουρικός εξοπλισμός της εκμετάλλευσης.....	42
2.2.10 Υποσταθμός μέσης τάσης.....	43

3. Εφαρμογές υδρογόνου για την απανθρακοποίηση των λατομικών δραστηριοτήτων	48
3.1. Πληροφορίες για το υδρογόνο	48
3.2. Διαδικασία παραγωγής υδρογόνου.....	48
3.3. Κόστος παραγωγής πράσινου υδρογόνου στην Ελλάδα και την ΕΕ	52
3.4. Χρήση εναλλακτικών καυσίμων	55
3.5. Το υδρογόνο ως καύσιμο για κινητήρες εσωτερικής καύσης (ICE).....	57
3.5.1. Καύση του υδρογόνου σε κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα SI.....	58
3.5.2. Σύγκριση των δυο τύπων κινητήρα	59
3.6. Κυψέλες καυσίμου υδρογόνου	61
3.7. Εναλλακτικός εξοπλισμός με καύσιμο το υδρογόνο	64
3.7.1 Τεχνολογία κυψέλης καυσίμου υδρογόνου (fuel cell)	64
3.7.2. Τεχνολογία κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου (ICE)	66
4. Η Μεθοδολογία της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής (LCA).....	70
4.1. Εισαγωγή στην Ανάλυση του Κύκλου Ζωής.....	70
4.2. Ανάλυση Κύκλου Ζωής – Πρότυπα ISO	71
4.2.1. Ορισμός του σκοπού και του στόχου (Goal & Scope definition)	73
4.2.2. Ανάλυση της καταγραφής των δεδομένων του συστήματος (Life Cycle Inventory, LCI).....	74
4.2.3. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Interpretation).....	77
4.3. Πλεονεκτήματα της ανάλυσης κύκλου ζωής και περιορισμοί.....	78
4.4. Εφαρμογές της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής και κύρια λογισμικά.....	79
4.4.1. Εφαρμογές της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής	79
4.4.2. Λογισμικά διεξαγωγής Αναλύσεων Κύκλων Ζωής.....	80
4.5. Επιλογή του λογισμικού Gabi για την μελέτη LCA.....	81
5. Μεθοδολογία και Υπολογιστική Διαδικασία	82
5.1. Καθορισμός στόχων και ανάλυση μεθοδολογίας.....	82
5.1.1. Σκοπός της μελέτης.....	82
5.1.2. Καθορισμός λειτουργικής μονάδας αναφοράς.....	82
5.1.3. Καθορισμός των ορίων του συστήματος.....	82
5.1.4. Καθορισμός σεναρίων	82
5.2. Υπολογισμός καταναλώσεων για την μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής του λατομείου	83
5.3. Κύριες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μελέτης (AKZ)	84
5.4. Η εφαρμογή της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής στον συμβατικό εξοπλισμό του λατομείου	85

5.5. Η εφαρμογή της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής στον εναλλακτικό εξοπλισμό με καύσιμο υδρογόνο, για την απανθρακοποίηση του λατομείου	90
5.5.1. Εφαρμογή της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής για το σενάριο απανθρακοποίησης του λατομείου με την χρήση τεχνολογιών καυσίμου υδρογόνου σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ICE.....	90
5.5.2. Εφαρμογή της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής για το σενάριο απανθρακοποίησης του λατομείου με την χρήση τεχνολογιών υδρογόνου fuel cells (κυψέλες καυσίμου)..	95
5.6. Δυνατότητα διείσδυσης των τεχνολογιών υδρογόνου στα λατομεία μαρμάρου ..	99
6. Συμπεράσματα.....	103

Συντομογραφίες

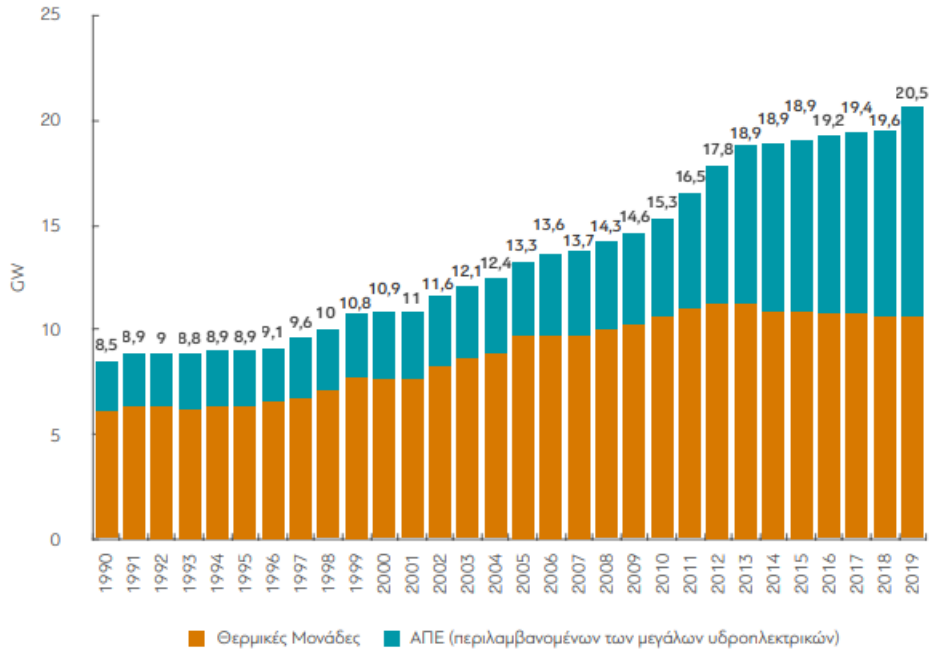
- 1) Heavy-duty vehicles (HDV) = βαρέα οχήματα
- 2) Zero-emission vehicles (ZEV) = οχήματα μηδενικών εκπομπών
- 3) Light-duty vehicle (LDV) = ελαφρών οχημάτων
- 4) Battery-electric trucks (BETs) = ηλεκτρική μπαταρία φορτηγά
- 5) Fuel cell electric trucks (FCETs) = ηλεκτρικά φορτηγά κυψελών καυσίμου
- 6) Total cost of ownership (TCO) = συνολικό κόστος ιδιοκτησίας
- 7) Direct manufacturing cost (DMC) = άμεσο κόστος κατασκευής
- 8) capital expenditure (CAPEX) = κεφαλαιουχικά έξοδα
- 9) Levelized Cost of Electricity (LCOE) = ισοπεδωμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας
- 10) Renewable fuels of non-biological origin (RFNBO) = ανανεώσιμα καύσιμα μη βιολογικής προέλευσης
- 11) Renewable Energy Sources (RES) = ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- 12) Hydrogen Refuelling Station (HRS) = ανεφοδιασμού με υδρογόνο σταθμούς
- 13) Discounted cash flow (DCF) = προεξοφλημένη ταμειακή ροή
- 14) Renewable Energy (RE) = ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια
- 15) Hydrogen Fuel Cells (HFC) = κυψελών καυσίμου υδρογόνου
- 16) Fuel cell vehicle (FCV) = οχήματα κυψελών καυσίμου
- 17) Spark-ignition engine (SI) = κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα
- 18) Compression Ignition (CI) = κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση
- 19) Hydrogen internal combustion engine (HICE) = κινητήρες εσωτερικής καύσης υδρογόνου
- 20) Port Fuel Injected (PFI) = μηχανές ψεκασμού καυσίμου με θύρα
- 21) Direct injection (DI) = κινητήρες άμεσου ψεκασμού
- 22) Low pressure direct injection (LPDI) = κινητήρας άμεσου ψεκασμού χαμηλής πίεσης
- 23) High pressure direct injection (HPDI) = κινητήρας άμεσου ψεκασμού υψηλής πίεσης
- 24) Τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (ΤΙΠ)
- 25) Τελική Κατανάλωση Ενέργειας (ΤΚΕ)
- 26) Global Warming Potential(GWP)=Κλιματική αλλαγή
- 27) Acidification Potential(AP)=Οξίνιση του περιβάλλοντος
- 28) Eutrophication Potential(EP)=Ευτροφισμός
- 29) Photochemical Ozone Formation(ReCiPe 2016)=χηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών

1. Ενεργειακή Κατάσταση της χώρας και δυνατότητες απανθρακοποίησης

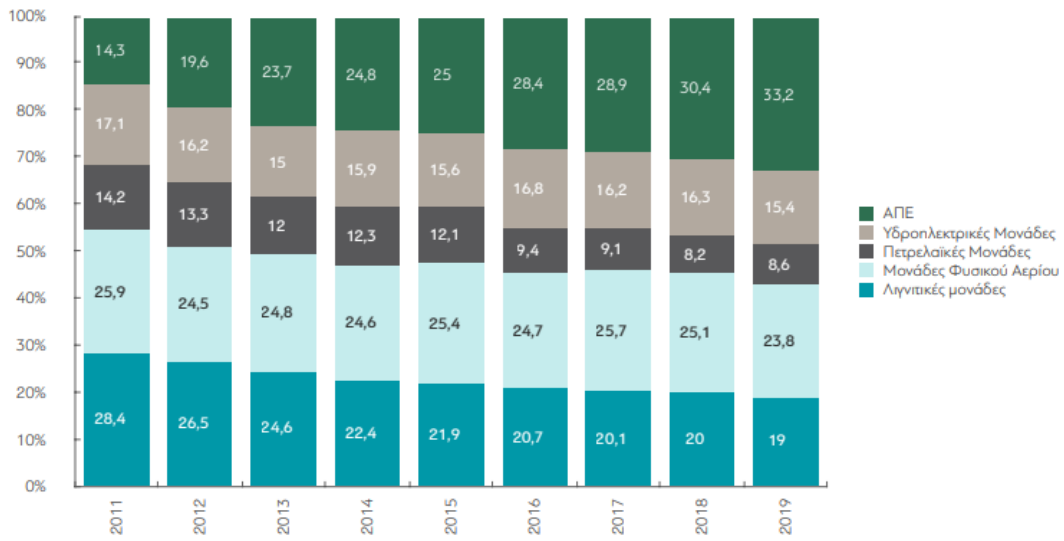
1.1.Εγκατεστημένη ισχύς

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στο εγχώριο σύστημα ηλεκτρισμού ανήλθε σε 20.564 MW το 2019, σημειώνοντας αύξηση κατά 1.056 MW (5,4%) σε σύγκριση με την αντίστοιχη για το 2018 (Διάγραμμα 1). Η μεγαλύτερη αύξηση των εγκατεστημένων μονάδων ισχύος καταγράφεται την περίοδο 2008-2013 (όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 1), λόγω της εγκατάστασης νέων μονάδων ΑΠΕ ισχύος 3.416 MW, ενώ την ίδια περίοδο εγκαταστάθηκαν και 1.186 MW νέων θερμικών μονάδων. [90]

Οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί κατείχαν το 51,4% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος το 2019, έναντι του 68,5%, που κατείχαν το 2011. Η πτώση αυτή οφείλεται στη διεύρυνση και ανοδική πορεία των ΑΠΕ και στην απένταξη των λιγνιτικών και πετρελαϊκών μονάδων (Διάγραμμα 2). Από το 2013 και έπειτα οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας με καύση λιγνίτη έπαυσαν να κατέχουν την πρωταρχική θέση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, έχοντας υποχωρήσει στο 19% το 2019 (μείωση κατά 9,4 ποσοστιαίες μονάδες σε σχέση με το 2011), ενώ κατά 5,6 ποσοστιαίες μονάδες υποχώρησε το μερίδιο των πετρελαϊκών σταθμών (8,6% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος το 2019). Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων με καύσιμο φυσικό αέριο και των μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών έμεινε σχεδόν σταθερή, με το μερίδιό τους να υποχωρεί σε 23,8% και 15,4% το 2019 έναντι του 25,9% και 17,1% αντίστοιχα για το 2011. Ωστόσο, σημαντική αύξηση παρουσιάζει η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας & Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού-Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (ΣΗΘΥΑ), η οποία υπερδιπλασιάστηκε σε 6,7 GW το 2019 από 2,4 GW το 2011, αποτελώντας πλέον το 32,7% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος, από το 14,3% του 2011. [90]



Διάγραμμα 1: Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ηλεκτρικής ενέργειας 1990-2019



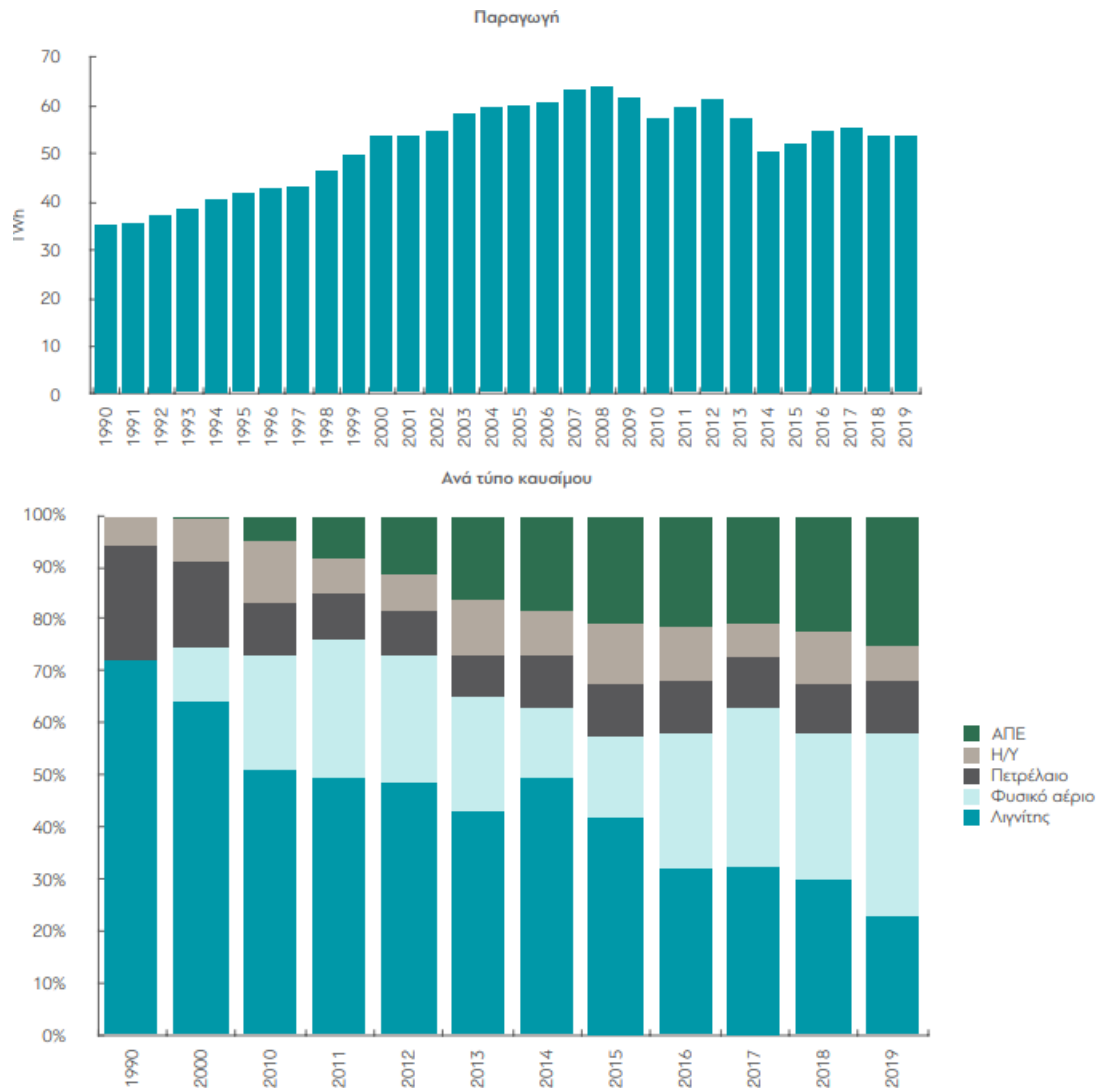
Διάγραμμα 2: Εγκατεστημένη ισχύς ανά τύπο παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας 2011-2019

1.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Για την κάλυψη των ετήσιων (έτος 2019) ενεργειακών αναγκών η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο της επικράτειας διαμορφώθηκε στις 53,3 TWh. Η συγκεκριμένη ετήσια παραγωγή βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με αυτήν του 2018 και του 2000, όπως απεικονίζεται και στο αντίστοιχο διάγραμμα 3α. Ένα ακόμη βασικό συμπέρασμα που ερμηνεύεται από το αντίστοιχο διάγραμμα είναι η σταδιακή πτωτική τάση της εγχώριας παραγωγής ενέργειας από την αρχή της οικονομικής κρίσης και έπειτα. Ειδικότερα, το 2019 η παραγωγή ήταν χαμηλότερη κατά 16,5% σε σύγκριση με το 2008 (63,7 TWh). [90]

Ο λιγνίτης διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα για αρκετές δεκαετίες, ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχει υποχωρήσει δραματικά. Το 2019 η συνολική παραγόμενη ενέργεια από λιγνιτικές μονάδες διαμορφώθηκε στις 10,4 TWh, αντιπροσωπεύοντας μόνο το 23% της συνολικής παραγωγής, συγκριτικά με το 50% του 2010 και το 72% του 1990. Η πτώση αυτή παρατηρείται και στο διάγραμμα 3β, ενώ ταυτόχρονα σημαντική αύξηση παρουσιάζει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με καύσιμο το φυσικό αέριο. Το 2019 οι μονάδες φυσικού αερίου κατείχαν το μεγαλύτερο ποσοστό της εγχώριας ηλεκτροπαραγωγής, καθώς η συνολική παραγόμενη ενέργεια ανήλθε σε 16,2 TWh από 14,1 TWh το 2018 (+15%), αντιπροσωπεύοντας το 35% της συνολικής παραγωγής (το αντίστοιχο ποσοστό ήταν 11% το 2000 και 22% το 2010). Η σημαντική πτώση του λιγνίτη και η αντίστοιχη άνοδος του φυσικού αερίου οφείλεται στην πολύ μικρότερη επιβάρυνση από τα δικαιώματα εκπομπών κατά την ηλεκτροπαραγωγή με φυσικό αέριο, λόγω του σημαντικά χαμηλότερου συντελεστή εκπομπών ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας (0,35 tCO₂/ MWh έναντι 1,54 tCO₂/MWh) κατά μέσο όρο για τη λιγνιτική παραγωγή. [90]

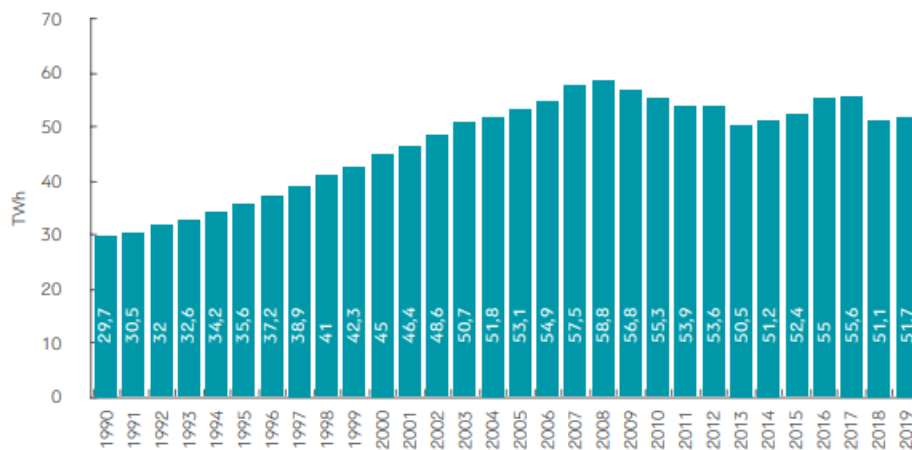
Οι μονάδες πετρελαίου, που λειτουργούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απευθύνονται στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, και η συμμετοχή τους για το έτος 2019 αποτελούσε το 10% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας. Το ποσοστό των μονάδων πετρελαίου βρίσκεται στις ίδιες τιμές την τελευταία δεκαετία με μικρές διαφοροποιήσεις, ωστόσο είναι σημαντικά χαμηλότερο σε σχέση με το 1990 (22%), όπου οι μονάδες αυτές προσέφεραν σημαντικές υπηρεσίες εξισορρόπησης στο διασυνδεδεμένο σύστημα. Την τελευταία δεκαετία η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζει σταθερή ανοδική πορεία, η οποία ανήλθε στις 11,3 TWh το 2019, με το μερίδιό τους να αποτελεί το 25% για το 2019 έναντι του 5% για το 2010. Τέλος, η συνεισφορά των μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών στην παραγόμενη ενέργεια επηρεάζεται άμεσα από τις επικρατούσες υδρολογικές συνθήκες. Για το 2019 το μερίδιό τους διαμορφώθηκε στο 7% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας, έναντι του 12% το 2015. Στο διάγραμμα 3α και 3β αποτυπώνονται, η εξέλιξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και οι εξελίξεις αυτές ανά τύπο καυσίμου. Το μεγαλύτερο μερίδιο προήλθε από σταθμούς παραγωγής φυσικού αερίου (40% ή 16,2 TWh), ενώ το μερίδιο της παραγωγής από λιγνιτικές μονάδες ήταν παρόμοιο με το μερίδιο των μονάδων ΑΠΕ (26%). [90]



Διάγραμμα 3: α) εξέλιξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, β) εξέλιξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά τύπο καυσίμου.

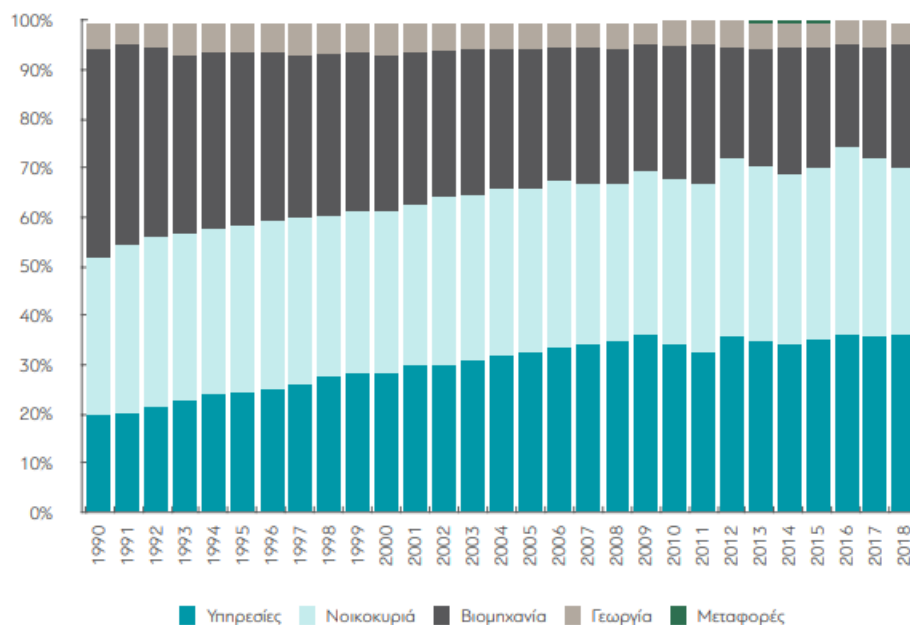
1.3. Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας

Μετά την λεπτομερή ανάλυση της εγχώριας προσφοράς ενέργειας ακολουθεί και η αντίστοιχη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Η ζήτηση αυτή σύμφωνα και με την απεικόνιση του διαγράμματος 4 ακολούθησε σταθερά ανοδική πορεία μέχρι το 2008, έπειτα από το 2008-2013 η ζήτηση αυτή ακολούθησε καθοδική πορεία, λόγω της κρίσης και της υποχώρησης της οικονομικής δραστηριότητας. Κατά τα έτη 2014-2017 η κατανάλωση αυξήθηκε, λόγω της αύξησης της κατανάλωσης στη βιομηχανία το 2014 και το 2017 και στον εμπορικό τομέα τη διετία 2015-2016. Παρόλα αυτά τη διετία 2018-2019 υποχώρησε εκ νέου με αποτέλεσμα το 2019 να διαμορφωθεί στις 51,7 TWh.



Διάγραμμα 4: Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα 1990-2019

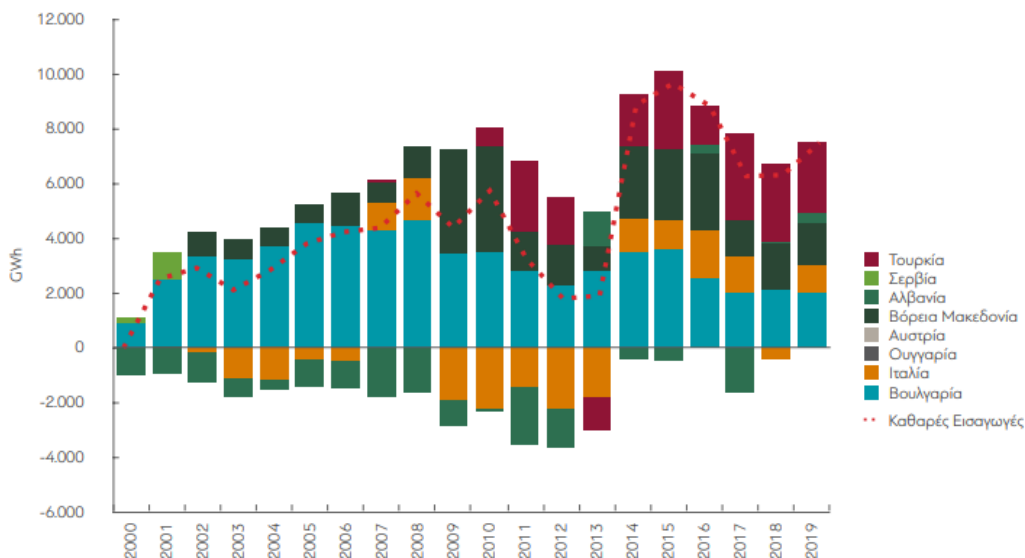
Πιο συγκεκριμένα στο διάγραμμα 5 παρουσιάζεται το ποσοστό συμμετοχής στην τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά κατηγορία καταναλωτών, με τις υπηρεσίες να καταγράφουν το υψηλότερο ποσοστό (34,9% για το 2018) και να ακολουθούν ο οικιακός τομέας (32,8%) και η βιομηχανία (24,3%). Ωστόσο, όπως απεικονίζεται και στο διάγραμμα 5, παρατηρείται μια σταδιακή υποχώρηση του βιομηχανικού τομέα, από το 40,8% του 1990 στο 26,3% το 2008, ενώ αντίθετα σημαντική αύξηση παρατηρείται στον τομέα των υπηρεσιών.[90]



Διάγραμμα 5: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά τομέα 1990-2018

1.4.Εισαγωγές και εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας

Για την εξασφάλιση των ενεργειακών αναγκών, αρκετές φορές πραγματοποιούνται ενεργειακές εισαγωγές και εξαγωγές μεταξύ των χωρών. Οι καθαρές εισαγωγές, οι οποίες συμπληρώνουν την εγχώρια παραγωγή ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος (δηλαδή οι εισαγωγές μείον τις εξαγωγές), ανήλθαν σε 7,5 TWh, έχοντας ενισχυθεί σημαντικά έπειτα από την έντονα πτωτική πορεία που είχαν σημειώσει την περίοδο 2011-2013 (Διάγραμμα 6)



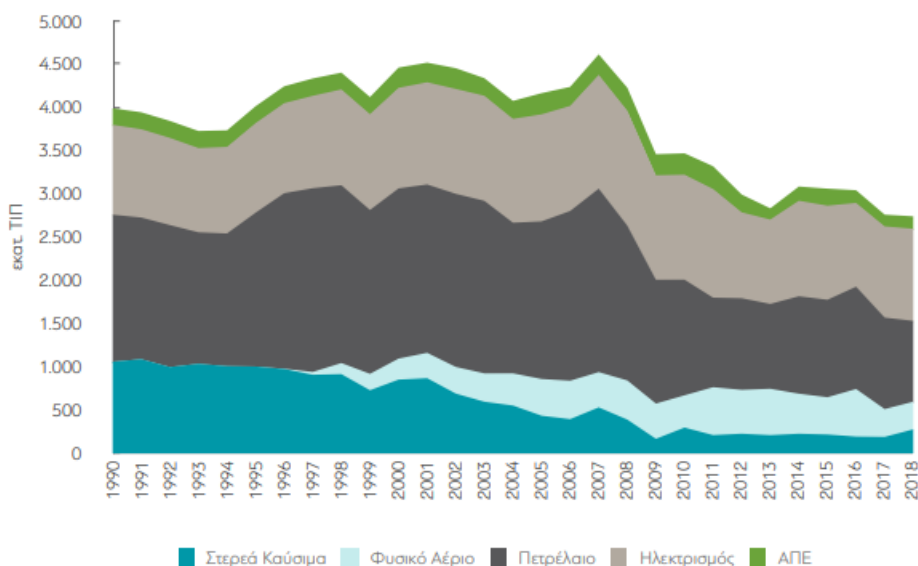
Διάγραμμα 6: Εισαγωγές-Εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας για την Ελλάδα

Οι περισσότερες εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας, πραγματοποιούνται διαχρονικά μέσω της Βουλγαρίας, όπως διαφαίνεται και στο διάγραμμα 6. Αντίστοιχα, και οι διασυνδέσεις με τη Βόρεια Μακεδονία και την Τουρκία χρησιμοποιούνται για μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας προς το ελληνικό σύστημα. Αντιθέτως, οι διασυνδέσεις με την Ιταλία και την Αλβανία χρησιμοποιούνταν κυρίως για εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας, ωστόσο από το 2013 και έπειτα οι διασυνδέσεις χρησιμοποιούνται κυρίως για εισαγωγές προς το ελληνικό σύστημα. [90]

1.5.Κατανάλωση ενέργειας στην ελληνική βιομηχανία

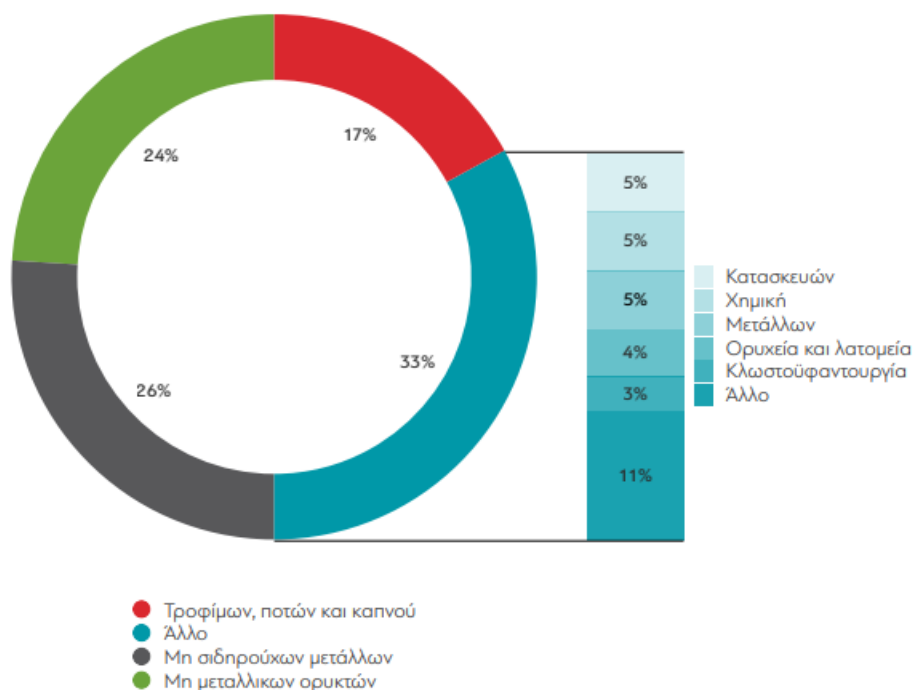
Στην Ελλάδα, στον τομέα της βιομηχανίας η συνολική κατανάλωση για ενεργειακή χρήση το έτος 2018 ανήλθε στα 2,7 εκατ. TΠΠ (τόνους ισοδύναμου πετρελαίου), μέγεθος που αντιστοιχεί στο 18% της συνολικής ΤΚΕ (τελικής κατανάλωσης ενέργειας). Η υψηλότερη τιμή κατανάλωσης ενέργειας στη βιομηχανία που έχει καταγραφεί ήταν το 2007 με 4,6 εκατ. TΠΠ, αλλά από τότε και έπειτα σημειώνει πτωτική πορεία, κυρίως λόγω της οικονομικής κρίσης και της υποχώρησης της βιομηχανικής δραστηριότητας. Η πορεία αυτή αποτυπώνεται και στο διάγραμμα 7 με τις αντίστοιχες καταναλώσεις ενέργειας στη βιομηχανία, μαζί με τις πηγές ενέργειας τους. Το πετρέλαιο για πολλά χρόνια αποτελούσε τη μεγαλύτερη πηγή ενέργειας μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 2010, ενώ τα επόμενα έτη η κατανάλωσή του

περιορίστηκε σημαντικά. Η ηλεκτρική ενέργεια κατέκτησε την πρώτη θέση, αφού για το 2018, αντιπροσώπευε το 39% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στη βιομηχανία, ενώ το πετρέλαιο ακολουθούσε με 34%, το φυσικό αέριο με 12% και τα στερεά καύσιμα με 10%. [90]



Διάγραμμα 7: Κατανάλωση ενέργειας στην βιομηχανία ανά πηγή ενέργειας 1995-2018

Οι κλάδοι της βιομηχανίας στην Ελλάδα με τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα (διάγραμμα 8) και είναι: η κατασκευή μη σιδηρούχων μετάλλων και κυρίως η παραγωγή του πρωτογενούς αλουμινίου, η παραγωγή μη μεταλλικών ορυκτών και κυρίως η παραγωγή τσιμέντου, και η βιομηχανία παραγωγής τροφίμων, ποτών και καπνού, τομείς οι οποίοι μαζί αντιπροσωπεύουν τα δύο τρίτα της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στην ελληνική βιομηχανία. Το υπόλοιπο ένα τρίτο της κατανάλωσης αυτής αντιπροσωπεύεται από τον κατασκευαστικό τομέα, την χημική βιομηχανία, τη βιομηχανία άλλων μετάλλων, τα ορυχεία και τα λατομεία, τη κλωστοϋφαντουργία και άλλες μικρότερες βιομηχανίες. [90,92]



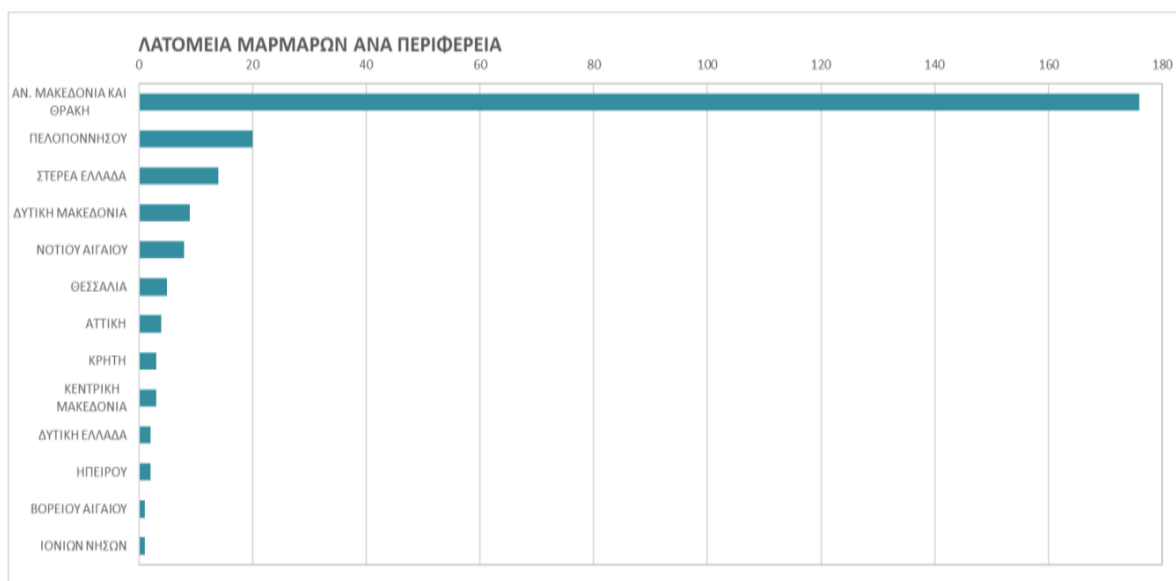
Διάγραμμα 8: Κατανάλωση ενέργειας στη βιομηχανία ανά κλάδο, Ελλάδα 2018

1.6. Κατανάλωση Ενέργειας στα Λατομεία Μαρμάρου

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας των εγχώριων λατομείων και ορυχείων αποτελεί το 4% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας για το έτος 2018, όπως προ αναφέρθηκε και στο διάγραμμα 8. Τα ενεργά λατομεία μαρμάρου στην Ελλάδα υπολογίζονται στα 248 σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα (διάγραμμα 9), η πλειονότητα των οποίων βρίσκονται στην περιοχή της ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (στην Θάσο, την Καβάλα και την Δράμα). Συγκεκριμένα στην περιφέρεια της ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης δραστηριοποιούνται περισσότερα από το 70% των συνολικών ενεργών λατομείων με τα περισσότερα να βρίσκονται στις περιοχές της Θάσου, του Βόλακα, του Γρανίτη – Οχυρού, το Στενωπό, του Νέστου, της Λιμνιάς, τις Πηγές, το Ελαφοχώρι, το Δύσβατο, του Βαθυλάκκου, της Παλαιάς Καβάλας και της Νικήσιανης. Στον παρακάτω πίνακα (πίνακα 1) αποτυπώνεται το πλήθος των ενεργών και ανενεργών εξορυκτικών χώρων στην Ελλάδα, ενώ στο διάγραμμα που ακολουθεί (διάγραμμα 9) κατανέμονται τα λατομεία μαρμάρου ανά περιοχή. [91,90,92]

Πίνακας 1: Χωρική κατανομή των ενεργών (=αριθμός ΔΔ) και μη ενεργών εξορυκτικών χώρων (=αριθμός ΔΑ)

ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ		ΑΙΓΑΙΟΥ	ΑΤΤΙΚΗΣ	ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ, ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ & ΙΟΝΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΗΠΕΙΡΟΥ-ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ	ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ-ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ	ΚΡΗΤΗΣ	ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ-ΘΡΑΚΗΣ	ΣΥΝΟΛΟ
ΜΑΡΜΑΡΑ	ΔΔ	9	4	23	11	19	3	179	248
	ΔΑ	3	-	3	5	8	3	41	63
ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ	ΔΔ	15	7	36	16	40	10	25	149
	ΔΑ	2	1	2	4	8	3	8	28
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ	ΔΔ	22	-	9	13	11	4	17	76
	ΔΑ	1	-	1	2	5	2	2	13
ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΙΚΕΣ ΠΛΑΚΕΣ	ΔΔ	9	-	6	12	15	2	16	60
	ΔΑ	1	1	5	3	5	2	7	24
ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ (ΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ)	ΔΔ	-	1	-	5	28	-	15	49
	ΔΑ	1	9	1	-	254	-	53	318
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΟΡΥΚΤΑ	ΔΔ	-	-	4	6	4	-	-	14
	ΔΑ		1	6	3	2		2	14



Διάγραμμα 9: Λατομεία μαρμάρων ανά περιφέρεια

Η κατανάλωση ενέργειας στα λατομεία μαρμάρου στην Ελλάδα αποτελεί σημαντικό κομμάτι της ενεργειακής οικονομίας της χώρας. Οι δραστηριότητες εξόρυξης και επεξεργασίας του μαρμάρου απαιτούν ενέργεια για τη λειτουργία των μηχανημάτων ενός λατομείου, την κοπή των ογκομαρμάρων, καθώς και τη μεταφορά τους προς τους τελικούς προορισμούς τους. Ειδικότερα οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας περιλαμβάνουν τις ακόλουθες διεργασίες. Αρχικά, είναι η

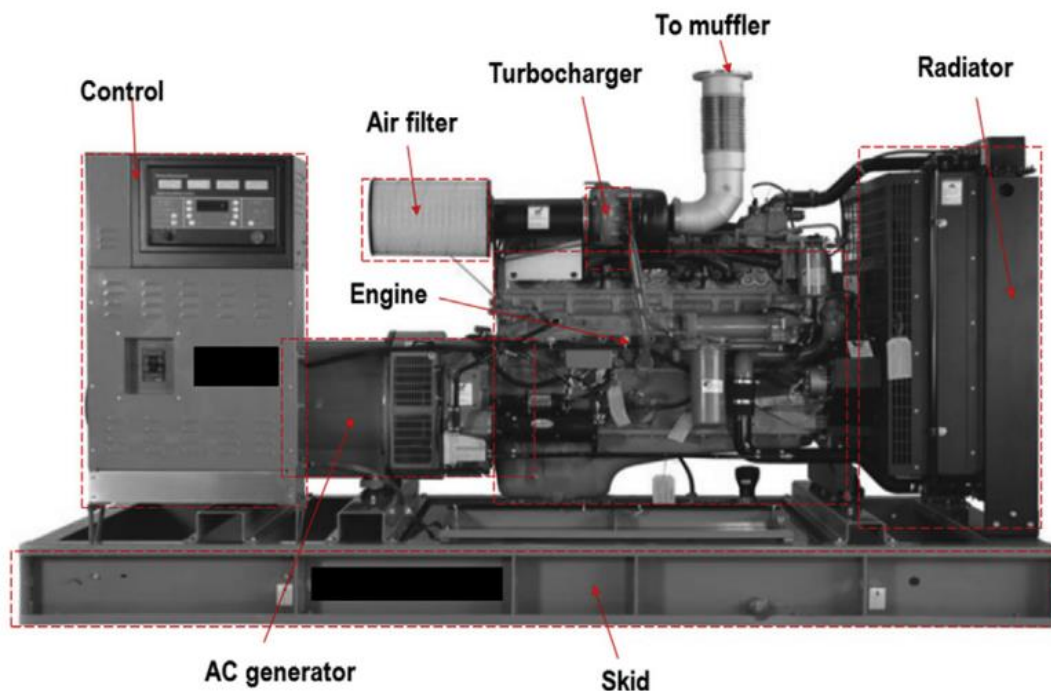
εξόρυξη, όπου για την απομάκρυνση των μαρμάρων από το έδαφος απαιτείται η χρήση συνδυασμού μηχανημάτων και εξοπλισμού που λειτουργούν με καύσιμα, όπως πετρέλαιο ή πετρέλαιο ντίζελ. Επίσης, σε ορισμένα λατομεία μπορεί να χρησιμοποιούνται εκρηκτικά για τον ξεριζωμό του μαρμάρου. Έπειτα, ακολουθεί η διεργασία της Επεξεργασίας, δηλαδή η κοπή και η επεξεργασία του μαρμάρου για την παραγωγή ογκομαρμάρων, η οποία απαιτεί τη λειτουργία μηχανημάτων όπως είναι οι συρματοκοπές, που επίσης λειτουργούν με ενέργεια. Στην συνέχεια, για την μεταφορά των ογκομαρμάρων εντός του λατομείου ή την μεταφορά του μαρμάρου από το λατομείο προς τον προορισμό του, τα εργοστάσια ή τον τελικό πελάτη, γίνεται συνήθως χρήση φορτηγών, γερανών και άλλων οχημάτων που καταναλώνουν επίσης καύσιμα. Πέρα από την ενέργεια που καταναλώνει ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στα λατομεία μαρμάρου, ενεργειακές απαιτήσεις παρουσιάζουν και οι λατομικές εγκαταστάσεις, αφού χρειάζονται ενέργεια για τον φωτισμό της εγκατάστασης, καθώς και για τη λειτουργία των γεννητριών και άλλων εξοπλισμών. [91,92]

1.7.Τεχνολογίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε επιφανειακές εκμεταλλεύσεις (συνδεδεμένα, μη διασυνδεδεμένα συστήματα)

Η ενέργεια που απαιτείται σε ένα λατομείο για την λειτουργία του, λαμβάνεται είτε ως ηλεκτρική ενέργεια για την ηλεκτροδότηση του, είτε ως καύσιμα (πετρέλαιο) τα οποία χρησιμοποιούνται για την λειτουργία των οχημάτων και μηχανημάτων του. Η παροχή της ενέργειας σε μια εκμετάλλευση μπορεί να γίνεται είτε μέσω εταιρειών κοινής ωφέλειας, στο δίκτυο των οποίων είναι συνδεδεμένη η εκμετάλλευση, είτε με την αυτοπαραγωγή ενέργειας με χρήση ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κ.α) ή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι διαφορές στην παροχή προκύπτουν κυρίως ανάλογα με το είδος της εκμετάλλευσης, υπόγειας ή υπαίθριας, την θέση της εκμετάλλευσης (πόσο κοντά στο δίκτυο βρίσκεται), καθώς και με άλλους σημαντικούς παράγοντες. Ωστόσο, οι βιομηχανίες επιφανειακής εξόρυξης, στις οποίες και θα αναφερθούμε, χρησιμοποιούν συνήθως συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων με την κύρια εκμετάλλευση να είναι συνδεδεμένη σε δίκτυο παροχής ενέργειας μέσω εταιρειών κοινής ωφέλειας, ενώ να βασίζεται στην αυτοπαραγωγή για απομακρυσμένες τοποθεσίες της εκμετάλλευσης. Οι γεννήτριες κινούνται συνήθως με κινητήρες ή λέβητες με καύση ορυκτών καυσίμων. Επιπλέον, οι γεννήτριες ντίζελ έκτακτης ανάγκης χρησιμοποιούνται εκτενώς για την παροχή ενέργειας σε κρίσιμα φορτία όπως ανυψωτικά και αντλίες λιπαντικών σε περίπτωση αστοχίας του δικτύου. Οι εκμεταλλεύσεις οι οποίες βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές καθιστούν την αυτοπαραγωγή ως μονόδρομο για την ηλεκτροδότηση τους, αφού η σύνδεση τους στο δίκτυο ενέργειας είναι ανέφικτη και αρκετά κοστοβόρα.

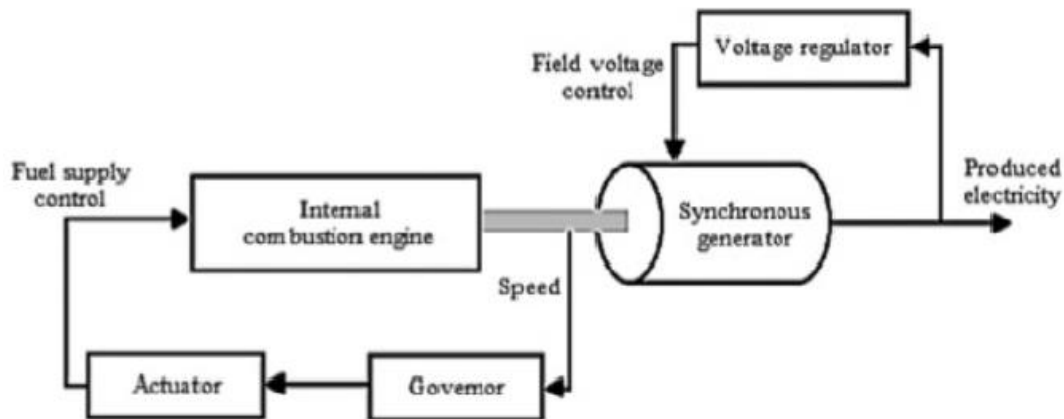
1.8.Περιγραφή των μονάδων αυτοπαραγωγής ενέργειας και συγκεκριμένα των γεννητριών πετρελαίου

Οι μονάδες αυτοπαραγωγής χαρακτηρίζονται ως αυτόνομα συστήματα αφού κατά την τροφοδοσία τους με ένα συγκεκριμένο καύσιμο (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, υδρογόνο και άλλα), παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Μια από τις συνηθέστερες μονάδες αυτοπαραγωγής ενέργειας είναι οι γεννήτριες πετρελαίου. Οι γεννήτριες πετρελαίου είναι πολύ χρήσιμες μηχανές, και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με την καύση καυσίμου ντίζελ (πετρελαίου). Η δομή της γεννήτριας πετρελαίου είναι αρκετά απλή και αποτελείται κυρίως από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης, μια ηλεκτρική γεννήτρια (συνήθως σύγχρονου τύπου), έναν μηχανικό σύνδεσμο, έναν αυτόματο ρυθμιστή τάσης, έναν ρυθμιστή ταχύτητας, ένα πλαίσιο στήριξης, μια μπαταρία για την εκκίνηση του κινητήρα που επιτρέπει την εκκίνηση της γεννήτριας ντίζελ, μια δεξαμενή καυσίμου και έναν πίνακα εντολών. Η συγκεκριμένη διάταξη διαφαίνεται και στην εικόνα 1.



Εικόνα 1: Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μια γεννήτρια πετρελαίου

Οι γεννήτριες ντίζελ μετατρέπουν μέρος της χημικής ενέργειας, που περιέχεται στο καύσιμο ντίζελ, σε μηχανική ενέργεια μέσω της καύσης. Η μηχανική ενέργεια στη συνέχεια περιστρέφει έναν στρόφαλο για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 2: Διάγραμμα του τρόπου λειτουργίας μιας γεννήτριας πετρελαίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Κατά μέσο όρο μια γεννήτρια ντίζελ θα χρησιμοποιήσει 0,4 λίτρα ντίζελ ανά kWh που παράγεται. Γενικά, οι κινητήρες ντίζελ έχουν την υψηλότερη θερμική απόδοση από οποιονδήποτε κινητήρα εσωτερικής καύσης, γεγονός που επιτρέπει την επίτευξη ενός κατά προσέγγιση ποσοστού της απόδοσης Carnot. [71,5,8]

1.8.1. Πλεονεκτήματα των μη συνδεδεμένων στο δίκτυο μέσω παροχής ενέργειας (γεννήτριες πετρελαίου):

Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης με καύσιμο το πετρέλαιο και κατά συνέπεια οι γεννήτριες πετρελαίου για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, αποτελούν τις πιο διαδεδομένες μονάδες αυτοπαραγωγής ενέργειας, εξαιτίας της ευρείας χρήσης τους στις περισσότερες εκμεταλλεύσεις. Η ευρεία χρήση τους οφείλεται στο πλήθος των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν [14,15]:

- 1) Οι γεννήτριες ντίζελ παρουσιάζουν **μεγάλη εφαρμογή** στην χρήση τους, ειδικά σε μη διασυνδεδεμένα συστήματα. Ακόμη και στη ναυσιπλοΐα χρησιμοποιούνται, για βοηθητικούς κυρίως σκοπούς, όπως για τον φωτισμό, αερισμό και ως συμπληρωματική ισχύ στο σύστημα πρόωσης του πλοίου.
- 2) **Ενεργειακή ανεξαρτησία**, αφού οι γεννήτριες είναι συνδεδεμένες σε δίκτυο ηλεκτροδότησης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κύρια πηγή ενέργειας ή για εφεδρικό σύστημα σε περιπτώσεις διακοπής ρεύματος παρέχοντας στο λατομείο ανεξαρτησία από τυχόν αστοχίες του δικτύου.
- 3) **Αξιοπιστία-αμεσότητα**, είναι δυο επιπλέον σημαντικά χαρακτηριστικά τα οποία περιγράφουν μια γεννήτρια πετρελαίου, καθώς είναι σε θέση να παρέχει ισχύ γρήγορα και συνεχώς καθ' όλη την διάρκεια της εκμετάλλευσης. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να τηρούνται κάποιες προϋποθέσεις όπως να έχει διαστασιολογηθεί επαρκώς η ισχύς και η χωρητικότητα της δεξαμενής καυσίμου για την αδιάλειπτη λειτουργία της. [14]

- 4) Οι περισσότερες μονάδες αυτοπαραγωγής ενέργειας (γεννήτριες ντίζελ) λόγω της **υψηλής ανθεκτικότητας** που τις χαρακτηρίζει μπορούν να φτάσουν τις δεκάδες χιλιάδες ώρες εργασίας πριν από την πρώτη επισκευή παρέχοντας ασφάλεια εργασίας σε μια εκμετάλλευση. [14]
- 5) Οι γεννήτριες πετρελαίου είναι **απλές στην χρήση τους** με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται εξειδίκευση και ειδικό προσωπικό για την λειτουργία και την συντήρησή τους.

1.8.2. Μειονεκτήματα των μη συνδεδεμένων στο δίκτυο μέσων παροχής ενέργειας (γεννήτριες πετρελαίου) :

Πέρα από τα πλεονεκτήματα και την ευκολία ως προς την χρήση τους, οι γεννήτριες πετρελαίου παρουσιάζουν και αρκετά μειονεκτήματα τα οποία τις καθιστούν ως μονάδες αυτοπαραγωγής με αβέβαιη μελλοντική χρήση. Μερικά από τα βασικότερα μειονεκτήματα τους είναι τα ακόλουθα:

- 1) **Μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και εξάντληση πόρων**, αφού η τροφοδοσία των συγκεκριμένων λατομείων βασίζεται στην χρήση γεννητριών πετρελαίου, οι οποίες για την λειτουργία τους και την παραγωγή ενέργειας καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες πετρελαίου. Επίσης, για την λειτουργία και την συντήρηση του συγκεκριμένου εξοπλισμού χρησιμοποιούνται λάδια μηχανής καθώς και άλλα λιπαντικά, τα οποία αποτελούν παράγωγα πετρελαίου. Η χρήση των προϊόντων αυτών μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτερη εξάντληση των μη ανανεώσιμων πόρων.
- 2) **Εκπομπές ρύπων-καυσαερίων**. Απαραίτητη προϋπόθεση για την λειτουργία των μονάδων αυτοπαραγωγής ενέργειας σε λατομικές εγκαταστάσεις είναι η καύση ντίζελ ή άλλων καυσίμων που συνοδεύεται με την παραγωγή αερίων που είναι επιβλαβή για το περιβάλλον και την υγεία των ανθρώπων. Κατά τη λειτουργία της, απελευθερώνει διάφορα αέρια, όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) , μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξειδία του αζώτου (NO_x), θείο και μικροσωματίδια. Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί κύριο αέριο του θερμοκηπίου και συμβάλλει στην αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας. Το μονοξείδιο του άνθρακα και τα οξειδία του αζώτου είναι επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία και μπορούν να προκαλέσουν πνευμονικά προβλήματα, άσθμα και άλλες αναπνευστικές παθήσεις. Το θείο είναι επίσης επιβλαβές για το περιβάλλον και την υγεία των ανθρώπων και μπορεί να προκαλέσει όξυνση του εδάφους και των υδάτων. [14]
- 3) **Η ηχορύπανση και οι κραδασμοί** είναι ακόμη δυο βασικά προβλήματα των γεννητριών πετρελαίου, με μεγάλο αντίκτυπο στον περιβάλλοντα χώρο προκαλώντας ενοχλήσεις σε περιπτώσεις όπου η εκμετάλλευση βρίσκεται κοντά σε κατοικημένη περιοχή. [7]

- 4) **Εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα**, όπως το πετρέλαιο το οποίο είναι το βασικότερο καύσιμο των γεννητριών.

1.9. Περιγραφή εξοπλισμού ενός λατομείου, διασυνδεδεμένου σε δικτύου παροχής ενέργειας

Οι σύγχρονες υπαίθριες εκμεταλλεύσεις συνδέονται στο τοπικό δίκτυο παροχής, όπου αυτή είναι εφικτή, ενώ ταυτόχρονα προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν την χρήση ηλεκτρογεννητριών ακόμη και στις απομακρυσμένες περιοχές. Για την σύνδεση μίας λατομικής μονάδας στο δίκτυο παροχής ενέργειας απαραίτητη προϋπόθεση είναι η αγορά και εγκατάσταση ενός υποσταθμού μέσης τάσης (υποσταθμού διανομής) για την μετατροπή της μέσης τάσης που προέρχεται από το δίκτυο διανομής σε μια χαμηλότερη τάση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον εξοπλισμό του λατομείου. Σε ένα λατομείο, ένας υποσταθμός μέσης τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει τους ηλεκτρικούς κινητήρες που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των μηχανημάτων στο λατομείο, καθώς και για την κάλυψη όλων των υπολοίπων ενεργειακών αναγκών του. Με τη χρήση ενός υποσταθμού μέσης τάσης, η ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί από το δίκτυο διανομής στο λατομείο με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα, ενώ ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος ατυχημάτων και ζημιών στον εξοπλισμό. Στην εικόνα 3 απεικονίζεται ένας υποσταθμός μέσης τάσης βιομηχανικού τύπου. [8,75,76]



Εικόνα 3: Υποσταθμός μέσης τάσης βιομηχανικού τύπου

2. Συμβατικός εξοπλισμός εξόρυξης μαρμάρου

2.1. Εταιρίας διεξαγωγής της μελέτης

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, βασίστηκε στα στοιχεία της Ελληνικής εταιρείας ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ Α.Ε, η οποία παρείχε αναλυτικά στοιχεία του στόλου των μηχανημάτων που χρησιμοποιεί, καθώς και τις αντίστοιχες καταναλώσεις τους στη διάρκεια της λειτουργίας τους. Η εταιρεία ιδρύθηκε στις 12.3.1974, από τον Αρχιτέκτονα Μηχανικό ΕΥΑΓΓΕΛΟ ΝΙΚ. ΧΑΪΔΑ και δραστηριοποιείται στον χώρο του μαρμάρου, ενώ το 2000 πραγματοποιήθηκε η είσοδος της ΙΚΤΙΝΟΣ Α.Ε στο Χρηματιστήριο Αξιών Αθηνών με Δημόσια Εγγραφή της Εταιρείας. Η Ικτίνος διαθέτει σήμερα 10 ενεργά λατομεία, τα οποία βρίσκονται κατά πλειοψηφία στη Βόρεια Ελλάδα. Αναλυτικά η Ικτίνος λειτουργεί τρία λατομεία στο νομό Δράμας (Βόλακας, Marvelous, Κάλλιστον), τρία λατομεία στη Θάσο, τρία στην Καβάλα και ένα στη Βλαχέρνα στην Πελοπόννησο. Η ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ έχει στη κατοχή της τρία εργοστάσια και δύο χώρους αποθήκευσης των προϊόντων της (warehouses). Τα εργοστάσια αποτελούν πλήρως καθετοποιημένες μονάδες, οι οποίες είναι εξοπλισμένες με τα πιο σύγχρονα μηχανήματα για κοπή και επεξεργασία των μαρμάρων. Η συνολική παραγωγική δυνατότητα όλων των εργοστασίων της εταιρείας σε πλάκες και πλακίδια ανέρχεται σε περισσότερα από 1.000.000 m² ετησίως. [84]

2.1.1. Το λατομείο του Βόλακα

Το υπό μελέτη λατομείο εξόρυξης μαρμάρων βρίσκεται στην περιοχή του Βόλακα στην πόλη της Δράμας και συγκεκριμένα στη θέση Λεπτοκαρυές. Το υψόμετρο της εκμετάλλευσης είναι από 1140μ έως 1190μ, παρουσιάζοντας έντονο ανάγλυφο. Η συνολική έκταση του λατομείου είναι 68.400m² και βρίσκεται σε απόσταση 37km από την πόλη της Δράμας. Την εκμετάλλευση του συγκεκριμένου λατομείου, ανέλαβε με νόμιμη άδεια εκμετάλλευσης η εταιρεία «ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ Α.Ε» από το 1995. Από το έτος έναρξης της εκμετάλλευσης έως το 2017, πραγματοποιήθηκε υπαίθρια εξόρυξη «open pit», ενώ από το 2017 ξεκίνησε παράλληλα και η υπόγεια εξόρυξη. Δεδομένου του έντονου ανάγλυφου στα ανώτερα υψόμετρα του λατομικού χώρου και σε συνδυασμό με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος, το οποίο καλύπτεται από σκούρα ασβεστιτικά πετρώματα και βυθίζεται με κλίση 35° – 40°, η επιλογή της υπόγειας εξόρυξης ήταν επιβεβλημένη για την παράταση της λειτουργίας του λατομείου και την πλήρη εξόφληση του κοιτάσματος. Η ετήσια παραγωγή σε εμπορεύσιμους όγκους μαρμάρου αγγίζει τα 30.000m³ ετησίως (περίπου 86.000 τόνους), ενώ έχει την δυνατότητα για παραγωγή που μπορεί να ξεπεράσει τους 100.000 τόνους ετησίως. Αυτή τη στιγμή στο χώρο του λατομείου απασχολούνται συνολικά 110 άτομα, επιστημονικό και εργατικό προσωπικό, ενώ λειτουργεί περίπου 12 μήνες τον χρόνο και 24 ώρες την ημέρα, καθώς δουλεύει με 3 οκτώωρες βάρδιες, με σκοπό την κάλυψη της παγκόσμιας ζήτησης σε λευκά μάρμαρα Βόλακα. Στην εικόνα 4 παρουσιάζεται άποψη του λατομείου, ενώ στην δεύτερη εικόνα (εικόνα 5) φαίνεται η ανατροπή ενός μαρμάρινου πάγκου κατά την υπαίθρια μέθοδο εξόρυξης. [88,84]



Εικόνα 4: Το λατομείο μαρμάρου του Βόλακα



Εικόνα 5: Ανατροπή μαρμάρινου πάγκου

2.1.2. Ο ρόλος της εταιρείας στην παγκόσμια αγορά μαρμάρου

Ένα μεγάλο ποσοστό των παραγόμενων ογκομαρμάρων εξάγονται ως ογκομάραμα ή επεξεργασμένα, στην Κίνα, την Ινδία, την Ασία, τις ΗΠΑ, τις χώρες του Αραβικού Κόλπου, την Λατινική Αμερική, την Αίγυπτο, την Τυνησία αλλά και την Ευρώπη. Οι εξαγωγές της εταιρείας «ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ Α.Ε» ανέρχονται σε ποσοστό άνω του 95% του συνολικού κύκλου εργασιών. Για πολλά χρόνια την κύρια αγορά της εταιρείας αποτελούσε η Κίνα, αφού έως το 2020 οι εξαγωγές στη Κίνα αντιστοιχούσαν περίπου στο 60% του συνολικού κύκλου εργασιών. Κατά το 2021 οι εξαγωγές προς την Κίνα μειώθηκαν στο 40%-45%, ενώ για το έτος 2022 το ποσοστό των εξαγωγών έπεσε στο 30%, καταγράφοντας συνολική πτώση 50% σε δυο έτη. Για την εξισορρόπηση του συνολικού ποσοστού των εξαγωγών μετά την σημαντική πτώση των εξαγωγών προς τη Κίνα, η Ικτίνος έκανε ένα σημαντικό άνοιγμα «χτίζοντας» σχέσεις με νέους πελάτες σε χώρες όπως η Ινδία, και οι χώρες της Βόρειας Αφρικής (Αίγυπτο και Τυνησία). [85,86]

Η εταιρεία «ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ Α.Ε» πέραν της δυναμικότητας της στον τομέα εξαγωγής ογκομαρμάρων έχει αναλάβει και ολοκληρώσει πολλά εντυπωσιακά έργα ανά την υφήλιο, όπως τα μάρμαρα της Μέκκας και της Μεδίνας, το αεροδρόμιο Las Palmas στην Ισπανία, τα εντυπωσιακά πρότζεκτ στο Ντουμπάι, ξενοδοχεία στο Μακάο, το Λας Βέγκας, τη Βοστώνη, τη Σιγκαπούρη, τη Ρωσία και την Ινδία. Πιο συγκεκριμένα η εταιρεία Ικτίνος έχει επενδύσει επιφάνειες σε έξι ξενοδοχεία της αλυσίδας καζίνο Wynn σε Λας Βέγκας, Βοστώνη και αλλού, το Dubai Mall, το Emirates Palace στο Αμπου Ντάμπι, το ξενοδοχείο Royal Bengal Hotel Colcata στην Ινδία, το κτίριο της Γαλλικής Τηλεόρασης στο Παρίσι, το δημοτικό θέατρο στη Λίμα του Περού και πολλά άλλα. Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 6) φαίνονται τα λευκά μάρμαρα του Βόλακα να «κοσμούν» το ξενοδοχείο Royal Bengal Hotel Colcata στην Ινδία. [85,86]



Εικόνα 6: Ξενοδοχείο Royal Bengal Hotel Colcata στην Ινδία

2.2. Μηχανοκίνητος εξοπλισμός λατομείου

Ένα λατομείο μαρμάρου πέρα από τις ενεργειακές του ανάγκες σε ηλεκτρικό ρεύμα και καύσιμα, για την λειτουργία του και την εκτέλεση της κάθε δραστηριότητας στα πλαίσια της εξόρυξης, χρειάζεται και ένα στόλο μηχανημάτων. Ο μηχανοκίνητος εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την άρτια λειτουργία του λατομείου μαρμάρου στην περιοχή του Βόλακα αποτελείται από 32 μονάδες. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι κατηγορίες και ο αριθμός των μηχανημάτων της κάθε κατηγορίας:

Πίνακας 2: Κατηγορίες μηχανημάτων

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ
Λαστιχοφόροι φορτωτές	7
Λαστιχοφόροι μικροί φορτωτές (φορτωτάκια)	4
Ερπυστριοφόροι εκσκαφείς	7
Διατηρητικά μηχανήματα	2
Συμπιεστές αέρα	4
Ανυψωτικά	3
Φορητό μεταφοράς στείρων υλικών (Dumper)	2
Σπαστήρες	2
Γεννήτρια πετρελαίου	1
Πριονωτή γέφυρα κοπής	1

2.2.1 Λαστιχοφόροι φορτωτές

Στις λατομικές εκμεταλλεύσεις οι φορτωτές χρησιμοποιούνται για τη φόρτωση, την μεταφορά και την απόθεση διαφόρων υλικών (ογκομαρμάρων και στείρων) σε παρακείμενα τροχοφόρα μεταφορικά οχήματα (dumper) ή σε άλλους χώρους του λατομείου. Ο πιο χαρακτηριστικός τύπος φορτωτή, ο οποίος χρησιμοποιείται σήμερα στις εκμεταλλεύσεις μαρμάρου είναι ο αρθρωτός φορτωτής (articulated). Ο συγκεκριμένος τύπος φορτωτή αποτελείται από δύο τμήματα, που συνδέονται μεταξύ τους με μια κατακόρυφη άρθρωση και δυο υδραυλικούς κυλίνδρους για την κίνηση αριστερά και δεξιά αντίστοιχα. Το εμπρόσθιο τμήμα του φορτωτή αποτελείται από τους δύο εμπρόσθιους ελαστικούς τροχούς και το δίδυμο βραχίονα με τον κάδο φόρτωσης ενώ το οπίσθιο τμήμα του από τους οπίσθιους ελαστικούς τροχούς, τον κινητήρα και το υδραυλικό σύστημα μεταδόσεως κινήσεως. Το αρθρωτό σύστημα προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με το ολόσωμο σύστημα μετωπικού φορτωτή με κυριότερο εξ αυτών την αύξηση της ευελιξίας του μηχανήματος, αφού μειώνονται αισθητά οι απαιτούμενοι χρόνοι ελιγμών σε σχέση 1:3, με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης του μηχανήματος. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η φθορά των ελαστικών λόγω κυκλικής, και όχι σημειακής, κινήσεως στην περίπτωση των ελιγμών.

2.2.2 Λαστιχοφόρος φορτωτής μεσαίου-μεγάλου μεγέθους

Ο φορτωτής είναι ένα απαραίτητο μηχάνημα σε ένα λατομείο για την φόρτωση και την μεταφορά των όγκων μαρμάρου και των στείρων (μπαζών). Τα μοντέλα Volvo L350F (Εικόνα 7α), CAT 980H και CAT 980K (Εικόνα 7β), αποτελούν λαστιχοφόρους φορτωτές μεσαίου-μεγάλου μεγέθους (στις δραστηριότητες εξόρυξης μαρμάρου οι συγκεκριμένοι φορτωτές CAT 980H και CAT 980K αποτελούν έναν μεσαίου μεγέθους φορτωτή ενώ για τις δραστηριότητες εξόρυξης μαρμάρου ο Volvo L350F αποτελεί ένα μεγάλο μηχάνημα). [13]



Εικόνα 7α : VOLVO L350F



Εικόνα 7β : CAT 980K

Οι συγκεκριμένοι φορτωτές τοποθετούν κουβά πλήρωσης για την φόρτωση και την μεταφορά των στείρων ενώ για την εύκολη και ασφαλή μεταφορά και φόρτωση ογκομαρμάρων τοποθετούνται στους αντίστοιχους φορτωτές πιρούνια (forklift), τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 8. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον πίνακα 3.



Εικόνα 8: Λαστιχοφόρος φορτωτής με πιρούνια (forklift)

Πίνακας 3: Τεχνικά χαρακτηριστικά μεσαίου-μεγάλου μεγέθους λαστιχοφόρων φορτωτών

ΜΟΝΤΕΛΟ	Ισχύς (Engine Power) KW(HP)	Βάρος (Weight) (KG)	Δεξαμενή καυσίμου (Fuel Tank) (L)	Δεξαμενή λαδιού μηχανής (Engine Oil Tank) (L)
VOLVO L350F	394 (528)	52,200	660	40
CAT 980H	237 (322)	30159	479	37.9
CAT 980K	272 (369)	30159	481	37.9

Το λατομείο του Βόλακα έχει συνολικά 7 φορτωτές μεσαίου-μεγάλου μεγέθους εκ των οποίων: 2 Volvo L350F, 4 CAT 980H και 1 CAT 980K, οι οποίοι εργάζονται ταυτόχρονα. Στον πίνακα 4, παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ώρες λειτουργίας σε ετήσια βάση, τα συνολικά λίτρα κατανάλωσης καθώς και η μέση κατανάλωση των μηχανημάτων.

Πίνακας 4: Ώρες λειτουργίας, λίτρα κατανάλωσης και μέση κατανάλωση των αντίστοιχων φορτωτών μεσαίου και μεγάλου μεγέθους.

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (H)	ΛΙΤΡΑ (L)	ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (L/H)
VOLVO L350F	2.549	63.178	25,0
VOLVO L350F	862	24.152	27,0
CAT 980H	1.659	45.941	27,6
CAT 980H	1.452	37.296	25,7
CAT 980H	1.336	32.619	24,3
CAT 980H	1.436	37.985	27,0
CAT 980K	1.655	35.801	21,6

2.2.3 Λαστιχοφόρος φορτωτής μικρού μεγέθους

Πέρα από τους μεγάλους και μεσαίους σε ιπποδύναμη και βάρος φορτωτές, οι μικροί λαστιχοφόροι φορτωτές (φορτωτάκια) αποτελούν άλλη μια κατηγορία φορτωτών με ευρεία χρήση. Η ευελιξία, η ταχύτητα και η χαμηλή κατανάλωση των συγκεκριμένων μηχανημάτων τα καθιστά κατάλληλα για τις λατομικές εκμεταλλεύσεις. Οι εργασίες που επιτελούν τα συγκεκριμένα μηχανήματα είναι η μεταφορά και η τοποθέτηση άλλων μηχανημάτων εντός του λατομείου, όπως οι συρματοκοπές και τα διατρητικά, ενώ χρησιμοποιούνται και για την μεταφορά διάφορων αντικειμένων, αναλώσιμων και ανταλλακτικών. Επίσης, χάρη στην ευελιξία τους, απομακρύνουν- καθαρίζουν τον χώρο από λάσπες χώματα και στείρα υλικά που αδυνατεί να φορτώσει ένας μεγάλος φορτωτής. Παραδείγματα μικρών φορτωτών αποτελούν τα μοντέλα CAT IT14G και CAT 914G τα οποία χρησιμοποιούνται και στην συγκεκριμένη εκμετάλλευση. Στην εικόνα 9, φαίνεται ένας παρόμοιος φορτωτής, ενώ στον πίνακα 5, παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων μηχανημάτων.



Εικόνα 9: Λαστιχοφόρος φορτωτής CAT 914G

Πίνακας 5: Τεχνικά χαρακτηριστικά φορτωτών μικρού μεγέθους λαστιχοφόρων

ΜΟΝΤΕΛΟ	Ισχύς (Engine Power) KW(HP)	Βάρος (Weight) (KG)	Δεξαμενή καυσίμου (Fuel Tank) (L)	Δεξαμενή λαδιού μηχανής (Engine Oil Tank) (L)
CAT IT14G	71(96.53)	8450	150	7
CAT 914G	71.6(97.4)	7378	150	7

Σύμφωνα με τον πίνακα τεχνικών χαρακτηριστικών (πίνακας 4), η εταιρεία χρησιμοποιεί δυο μοντέλα μικρών φορτωτών, το CAT IT14G με 3 φορτωτές και το CAT 914G με 1 φορτωτή. Στον πίνακα 5 διαφαίνονται οι ώρες λειτουργίας, τα συνολικά λίτρα και η μέση κατανάλωση των αντιστοιχων μηχανημάτων για το έτος 2022.

ΜΙΚΡΟΙ ΦΟΡΤΩΤΕΣ

Πίνακας 6: Ώρες λειτουργίας, λίτρα κατανάλωσης και μέση κατανάλωση των αντίστοιχων φορτωτών

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (H)	ΛΙΤΡΑ (L)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (L/H)
CAT114G	3.350	17.923	5,4
CAT114G	1.770	8.063	4,6
CAT114G	638	3.064	4,8
CAT914G	3.748	16.937	4,7

2.2.4.Ερπυστριοφόρος εκσκαφέας

Οι εκσκαφείς αποτελούν ένα απαραίτητο μηχάνημα για την λειτουργία ενός λατομείου μαρμάρου καθώς επιτελούν σημαντικές διεργασίες, όπως η εκσκαφή και η μετακίνηση του εδάφους ή η φόρτωση σε οχήματα μεταφοράς των στείρων και των επιφανειακών κοιτασμάτων. Επιπλέον, οι εκσκαφείς είναι υπεύθυνοι για την δημιουργία ή την κατάργηση των δρόμων εντός του λατομείου, μέσω των οποίων γίνεται η διέλευση των μηχανημάτων. Το κύριο χαρακτηριστικό των μηχανημάτων αυτών είναι ότι η εκσκαφή του εδάφους επιτυγχάνεται και χωρίς την μετατόπιση του μηχανήματος από μια θέση. Ανάλογα με την κίνηση του εκσκαφέα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, η πρώτη αφορά τους λαστιχοφόρος εκσκαφείς, η κίνηση των οποίων γίνεται μέσω ελαστικών τροχών και στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μικρότεροι εκσκαφείς, ενώ στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι εκσκαφείς, η κίνηση των οποίων γίνεται μέσω ερπυστριών. Οι ερπυστριοφόροι εκσκαφείς έχουν καλύτερη διανομή του βάρους του μηχανήματος και οι μεταφερόμενες στο έδαφος δυνάμεις διανέμονται σε μεγαλύτερη επιφάνεια, έτσι η πίεση πάνω σε χαλαρό έδαφος διατηρείται σε χαμηλές τιμές, συνήθως μικρότερες του 1 Kp/cm². Ο κάδος αποτελεί ένα εργαλείο του εκσκαφέα το οποίο εκτελεί συγχρόνως σκαπτική και μεταφορική εργασία. Πέρα από τον κάδο, ο εκσκαφέας χρησιμοποιεί διάφορα εργαλεία κατά την εξόρυξη, όπως η σφύρα (υδραυλικό σφυρί για την θραύση των υπερκείμενων), το νύχι (μέσω του οποίου γίνεται η αποκόλληση των υπερκείμενων αλλά και η ανατροπή των μαρμάρινων πάγκων) και άλλα τα οποία διευκολύνουν την εκμετάλλευση.



Εικόνα 10: CAT 345C Excavator

Στην εικόνα 10 φαίνεται ο υδραυλικός εκσκαφέας CAT 345C ο οποίος έχει στο άκρο του έναν κουβά που μπορεί να αλλάξει και να προσαρμόζεται στην θέση του άκρου του ένα «νύχι» ή αλλιώς ripper (εικόνα 11), με το νύχι πραγματοποιεί την ανατροπή των μαρμάρινων πάγκων (φέτα) μετά την αποκοπή τους από το μητρικό πέτρωμα, καθώς και για το ξεσκάρωμα στειρών υλικών που είναι αδύνατο να γίνει μόνο με την χρήση του φορτωτή. Ακόμη με την τοποθέτηση του κουβά στο άκρο του εκσκαφέα πραγματοποιούνται εργασίες όπως η απομάκρυνση και φόρτωση των στειρών.



Εικόνα 11: ripper «νύχι» εκσκαφέα

Πέρα από τον παραπάνω εκσκαφέα CAT 345C το υπό μελέτη λατομείο έχει άλλους 6 εκσκαφείς, τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον πίνακα 7.

Πίνακας 7: Τεχνικά χαρακτηριστικά των εκσκαφών

ΜΟΝΤΕΛΟ	Ισχύς (Engine Power) KW(HP)	Βάρος (Weight) (KG)	Δεξαμενή καυσίμου (Fuel Tank) (L)	Δεξαμενή λαδιού μηχανής (Engine Oil Tank) (L)
CAT 345C	254(345)	44974	704	42
CAT 345B	216(294)	43000	600	42
CAT 336E	227(308)	37194.6	620	30.5
LIEBHERR R934	150(204)	31003.1	580	29
CAT 350L	309(420)	49010	700	32

Στον πίνακα 7 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά μόνο 5 εκσκαφών αφού για τα μοντέλα CAT 345C και CAT 336E υπάρχουν από 2 εκσκαφείς. Οι ώρες λειτουργίας τους, τα συνολικά λίτρα κατανάλωσης και η μέση κατανάλωση των μηχανημάτων για το 2022 παρουσιάζονται στον πίνακα 8.

ΕΚΣΚΑΦΕΙΣ

Πίνακας 8: Ώρες λειτουργίας, λίτρα κατανάλωσης και μέση κατανάλωση των αντίστοιχων εκσκαφών

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (H)	ΛΙΤΡΑ (L)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (L/H)
CAT 345C	953	30.482	28,8
CAT 345C	1.336	41.415	32,6
CAT 345B	1.619	48.058	31,3
CAT 336E	1.213	25.230	20,4
CAT 336E	613	10.268	17,4
LIEBHERR R934	1.323	26.235	20,4
CAT 350L	142	4.651	30,6

2.2.5 Κομπρεσέρ αέρα

Ο ρόλος ενός κομπρεσέρ αέρα, σε ένα λατομείο μαρμάρου είναι αρκετά σημαντικός. Ο κύριος ρόλος του είναι να δημιουργεί συμπιεσμένο αέρα για την λειτουργία των πνευματικών εργαλείων και μηχανημάτων της εκμετάλλευσης, όπως πνευματικές σφυρίδες και τρυπάνια, καθώς και για την λειτουργία μηχανημάτων συντήρησης και επισκευής. Ακόμη, παρέχει αέρα, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθαρισμό της σκόνης και των εκπομπών από τα εργαλεία και τις μηχανές που χρησιμοποιούνται στο λατομείο.



Εικόνα 12: Κομπρεσέρ αέρα XAS 186D Atlas Copco

Στον Πίνακα 9 φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου κομπρεσέρ αέρα (XAS 186D Atlas Copco air compressor), τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τις συγκρίσεις των μηχανημάτων.

Πίνακας 9: Τεχνικά χαρακτηριστικά XAS 186D Atlas Copco air compressor

ΜΟΝΤΕΛΟ	Ισχύς (Engine Power) KW(HP)	Βάρος (Weight) (KG)	Δεξαμενή καυσίμου (Fuel Tank) (L)	Δεξαμενή λαδιού μηχανής (Engine Oil Tank) (L)
Atlas Copco XAS 186	88 (120)	1800	175	9

Πέρα από τα τεχνικά χαρακτηριστικά στον πίνακα 10 δίνονται ο ακριβής αριθμός των κομπρεσέρ που χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο λατομείο καθώς και οι ώρες λειτουργίας τους, τα συνολικά λίτρα κατανάλωσης τους και η μέση τιμή κατανάλωσης τους για το έτος 2022.

ΚΟΜΠΡΕΣΕΡ

Πίνακας 10: Ώρες λειτουργίας, λίτρα κατανάλωσης και μέση κατανάλωση των αντίστοιχων των κομπρεσέρ

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (H)	ΛΙΤΡΑ (L)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (L/H)
ATLAS COPCO XAS 186	248	4.184	13,6
ATLAS COPCO XAS 186	176	3.437	20,0
ATLAS COPCO XAS 186	169	1.992	13,2
ATLAS COPCO XAS 186	78	920	11,4

2.2.6 Μηχάνημα Διάτρησης

Η διάτρηση αποτελεί σημαντικό στάδιο στη διαδικασία εξόρυξης μαρμάρου. Συγκεκριμένα, η διάτρηση προηγείται της κοπής των μαρμάρινων πάγκων και χρησιμοποιείται για να δημιουργηθούν οπές στο μάρμαρο, στις οποίες τοποθετούνται τα αδαμαντοφόρα σύρματα που χρησιμοποιούνται για την κοπή ή τον διαχωρισμό του μαρμάρου. Η διάτρηση επιτυγχάνεται συνήθως με χρήση εξειδικευμένων μηχανημάτων διάτρησης, τα οποία κατασκευάζονται ώστε να μπορούν να διαπερνούν το σκληρό μάρμαρο. Η αύξηση της τεχνολογίας διάτρησης επιτρέπει στους εργάτες να δημιουργούν ακριβείς και καθαρές οπές στο μάρμαρο, προετοιμάζοντας το έδαφος για την τοποθέτηση των αδαμαντοφόρων συρμάτων, γι αυτό και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στάδια της εξόρυξης. Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 13) απεικονίζεται ένα αντίστοιχο διατρητικό μηχάνημα με αυτό που χρησιμοποιεί τον εν λόγω λατομείο καθώς και ο αντίστοιχος πίνακας (πίνακας 11) των βασικών τεχνικών χαρακτηριστικών:



Εικόνα 13: Διατρητικό μηχάνημα Atlas Copco troc 15

Πίνακας 11: Τεχνικά χαρακτηριστικά διατρητικού μηχανήματος ATLAS COPCO TROC 15

MONTELO	Ισχύς (Engine Power) KW(HP)	Βάρος (Weight) (KG)	Δεξαμενή καυσίμου (Fuel Tank) (L)	Δεξαμενή λαδιού μηχανής (Engine Oil Tank) (L)
ATLAS COPCO TROC 15	55(74)	3 570 kg	175	9

Στην συγκεκριμένη εκμετάλλευση υπάρχουν 2 διατρητικά, για την ολοκλήρωση όλων των διατρημάτων. Στον πίνακα 12 παρουσιάζονται οι ώρες λειτουργίας, τα συνολικά λίτρα κατανάλωσης τους καθώς και η μέση κατανάλωση των μηχανημάτων για το έτος 2022.

ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΑ

Πίνακας 12: Ώρες λειτουργίας, λίτρα κατανάλωσης και μέση κατανάλωση των αντίστοιχων διατρητικών

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (H)	ΛΙΤΡΑ (L)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (L/H)
ATLAS COPCO TROC 15	1.304	5,9	7.266
ATLAS COPCO TROC 15	1.155	6,3	7.036

2.2.7. Ανατρεπόμενα φορτηγά (DUMPERS)

Τα ανατρεπόμενα φορτηγά (dumpers) χρησιμοποιούνται για τη μετακίνηση και την απόθεση των στείρων υλικών στις λατομικές εκμεταλλεύσεις. Είτε ένας εκσκαφέας, είτε ένας τροχοφόρος φορτωτής, συσσωρεύει το υλικό στο φορτηγό ντάμπινγκ και το φορτηγό το μεταφέρει και το απορρίπτει σε ένα σωρό (σωρό απόθεσης στείρων υλικών). Η απόθεση επιτυγχάνεται με την ανατροπή του κάδου του φορτηγού, δηλαδή το μπροστινό μέρος του κάδου μπορεί να ανυψωθεί για να επιτρέπεται η πτώση του περιεχομένου στο έδαφος πίσω από το φορτηγό στον τόπο παράδοσης, μέσω ενός υδραυλικού συστήματος. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι ειδικών ανατρεπόμενων φορτηγών. Τα φορτηγά άκαμπτης μεταφοράς (RHT) αποτελούν τα μεγαλύτερα ανατρεπόμενα φορτηγά, αφού μεταφέρουν φορτία που ζυγίζουν εκατοντάδες τόνους και εργάζονται στα μεγαλύτερα ορυχεία. Τα αρθρωτά ανατρεπόμενα φορτηγά (ADT) έχουν μικρότερη χωρητικότητα 10-60 τόνων, όπως και τα υπόγεια αρθρωτά ανατρεπόμενα φορτηγά (UADT), τα οποία ονομάζονται επίσης ADT χαμηλού προφίλ.



Εικόνα 14α: CAT 771D



Εικόνα 14β: CAT 730C

Στις εικόνες 14α και 14β απεικονίζονται τα δύο φορτηγά (dumpers) που χρησιμοποιούνται στο λατομείο του Βόλακα. Στην εικόνα 14α έχουμε ένα φορτηγό άκαμπτης μεταφοράς της CAT και συγκεκριμένα το 771D, ενώ στην εικόνα 14β ένα αρθρωτό ανατρεπόμενο φορτηγό της CAT και πιο συγκεκριμένα το 730C. Στον πίνακα 13 έχουμε τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των αντίστοιχων μηχανημάτων, ενώ στον πίνακα 14 παρουσιάζονται οι ώρες λειτουργίας, τα συνολικά λίτρα κατανάλωσης τους καθώς και η μέση κατανάλωση των μηχανημάτων για το έτος 2022.

Πίνακας 13: Τεχνικά χαρακτηριστικά των ανατρεπόμενων φορτηγών (dumpers)

ΜΟΝΤΕΛΟ	Ισχύς (Engine Power) KW(HP)	Βάρος (Weight) (KG)	Δεξαμενή καυσίμου (Fuel Tank) (L)	Δεξαμενή λαδιού μηχανής (Engine Oil Tank) (L)
CAT 771D	361.7(492)	34750	530	42
CAT 730C	273.7(372)	24100	411.9	36

ΑΝΑΤΡΕΠΟΜΕΝΑ ΦΟΡΤΗΓΑ (DUMPER)

Πίνακας 14: Ώρες λειτουργίας, λίτρα κατανάλωσης και μέση κατανάλωση των ανατρεπόμενων φορτηγών (dumpers)

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (H)	ΛΙΤΡΑ (H)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (L/H)
CAT 771D	2.056	41.434	21,6
CAT 730C	1.210	14.480	12,5

2.2.8 Γεννήτρια πετρελαίου

Το λατομείο του Βόλακα για την κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών χρησιμοποιεί έναν υποσταθμό μέσης τάσης, ωστόσο εντός των ορίων του λατομείου υπάρχει ένα νέο μέτωπο παραγωγής σε μεγάλη απόσταση από την κύρια εκμετάλλευση. Για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του συγκεκριμένου μετώπου παραγωγής χρησιμοποιείται γεννήτρια πετρελαίου και συγκεκριμένα η γεννήτρια CAT 500KVA, τα τεχνικά χαρακτηριστικά της οποίας δίνονται στον πίνακα 15, ενώ μια παρόμοια γεννήτρια αυτής της εκμετάλλευσης φαίνεται στην εικόνα 15.



Εικόνα 15: Γεννήτρια πετρελαίου CAT 500KVA

Πίνακας 15: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννήτριας πετρελαίου CAT 500KVA

ΜΟΝΤΕΛΟ	Ισχύς (Engine Power) KW(HP)	Βάρος (Weight) (KG)	Δεξαμενή καυσίμου (Fuel Tank) (L)	Δεξαμενή λαδιού μηχανής (Engine Oil Tank) (L)
CAT 500KVA	364(495)	3,363 kg	908	9

Το νέο αυτό μέτωπο της εκμετάλλευσης ξεκίνησε το 2022 ενώ στον πίνακα 16 φαίνονται οι συνολικές ώρες λειτουργίας της γεννήτριας, τα λίτρα που κατανάλωσε καθώς και η μέση κατανάλωση της.

ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Πίνακας 16: Ώρες λειτουργίας, λίτρα κατανάλωσης και μέση κατανάλωση της γεννήτριας πετρελαίου

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (H)	ΛΙΤΡΑ (L)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (L/H)
CAT 500KVA	1.725	26.121	18,2

2.2.9 Επικουρικός εξοπλισμός της εκμετάλλευσης

Το λατομείο της ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ Α.Ε, χρησιμοποιεί και άλλα δευτερεύοντα μηχανήματα όπως σπαστήρες, για την καλύτερη διαχείριση των στείρων (μπαζών), ανυψωτικά, για την διευκόλυνση κάποιων εργασιών και αυτοκινούμενα πριόνια, για τον ορθογωνισμό των ογκομαρμάρων. Παρακάτω, στον πίνακα 17 παρουσιάζονται όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μηχανημάτων, ενώ στον πίνακα 18 παρουσιάζονται οι συνολικές ώρες λειτουργίας, τα λίτρα που κατανάλωσε, καθώς και η μέση κατανάλωση του κάθε μηχανήματος.

Πίνακας 17: Τεχνικά χαρακτηριστικά μηχανημάτων

Είδος Μηχανήματος	ΜΟΝΤΕΛΟ	Ισχύς (Engine Power) KW(HP)	Βάρος (Weight) (KG)	Δεξαμενή καυσίμου (Fuel Tank) (L)	Δεξαμενή λαδιού μηχανής (Engine Oil Tank) (L)
Σπαστήρας	HARTL 404	231(314)	48700	-	-
Σπαστήρας	LOKOTRACK 100	180(245)	47000	800	-
Ανυψωτικά	JLG 450AJ	49 (66.7)	6418.33	60.57	-
Ανυψωτικά	JLG M600JP	5(6.8)	7280.2	49.3	-
Αυτό.Πριόνι	CAT 432F	74.5 (101.2)	9100	160	8.8

Πίνακας 18: Ώρες λειτουργίας, λίτρα κατανάλωσης και μέση κατανάλωση του κάθε μηχανήματος

ΕΙΔΟΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (H)	ΛΙΤΡΑ(L)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ(L/H)
ΣΠΑΣΤΗΡΑΣ	HARTL 404	606	14.309	21,4
ΣΠΑΣΤΗΡΑΣ	LOKOTRACK 100	502	10.989	24,4
ΑΝΥΨΩΤΙΚΑ	JLG 450AJ	877	1.803	2,5
ΑΝΥΨΩΤΙΚΑ	JLG 450AJ	641	1.472	2,6
ΑΝΥΨΩΤΙΚΑ	JLG M600JP	208	318	1,6
ΑΥΤΟ.ΠΡΙΟΝΙ	CAT 432F	1.582	13.272	8,4

2.2.10 Υποσταθμός μέσης τάσης

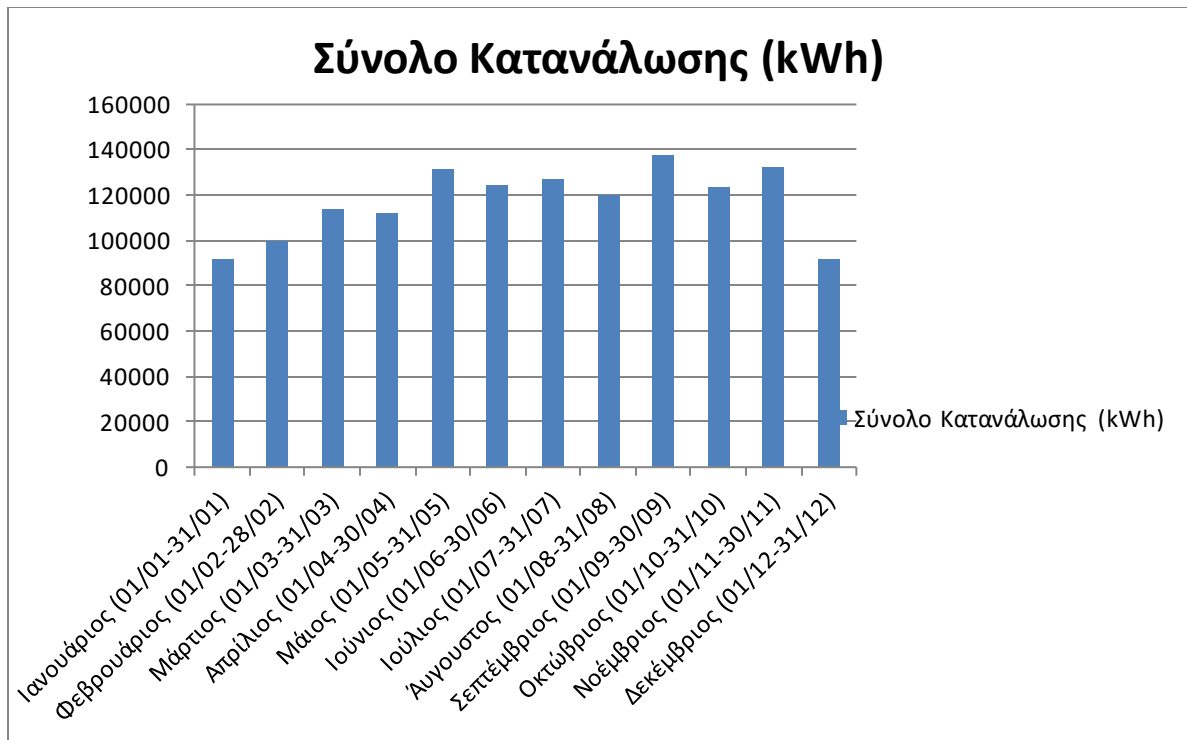
Για την ηλεκτροδότηση του συγκεκριμένου λατομείου χρησιμοποιείται υποσταθμός μέσης τάσης. Ο υποσταθμός μέσης τάσης καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες της κύριας εκμετάλλευσης, αφού για μια απομακρυσμένη περιοχή εντός του λατομείου χρησιμοποιείται μονάδα παραγωγής ενέργειας με καύσιμο πετρέλαιο. Στον παρακάτω πίνακα διαφαίνονται οι μηνιαίες καταναλώσεις σε kwh, του αντίστοιχου υποσταθμού για το έτος 2022.

Πίνακας 19: Πίνακας κατανάλωσης υποσταθμού μέσης τάσης

ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (kWh)
Ιανουάριος (01/01-31/01)	91721,6
Φεβρουάριος (01/02-28/02)	99630,33
Μάρτιος (01/03-31/03)	113472
Απρίλιος (01/04-30/04)	112515,3
Μάιος (01/05-31/05)	131569,5
Ιούνιος (01/06-30/06)	124377,1
Ιούλιος (01/07-31/07)	127124,3
Αύγουστος (01/08-31/08)	120400,7
Σεπτέμβριος (01/09-30/09)	137963,8
Οκτώβριος (01/10-31/10)	123533,9
Νοέμβριος (01/11-30/11)	132519,3
Δεκέμβριος (01/12-31/12)	91569,68

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις του εξοπλισμού μεταβάλλονται και οι μηνιαίες καταναλώσεις σε kWh. Στο διάγραμμα 10 παρουσιάζονται οι αυξομειώσεις των μηνιαίων καταναλώσεων σε kWh του λατομείου.



Διάγραμμα 10: Διάγραμμα κατανάλωσης σε kWh του υποσταθμού μέσης τάσης

Μετά την περιγραφή της λειτουργίας του μηχανοκίνητου εξοπλισμού, της μονάδας παραγωγής ενέργειας αλλά και του υποσταθμού μέσης τάσης ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας (πίνακας 19) όλων των συμβατικών μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται στο συγκεκριμένο λατομείο, στον οποίο περιγράφονται οι ώρες λειτουργίας (H), η κατανάλωση (L/H) και το άθροισμα συνολικών λίτρων κατανάλωσης (L) του κάθε μηχανήματος για το έτος 2022.

Πίνακας 20 : Πίνακας μέσων καταναλώσεων, συνολικών ωρών και συνολικών λίτρων κατανάλωσης όλων των μηχανημάτων του λατομείου

ΜΗΧΑΝΗΜΑ	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΩΡΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (H)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ (L/H)	ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΩΝ ΛΙΤΡΩΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ (L)
ΦΟΡΤΩΤΕΣ	VOLVO L350F	2.549	25,0	63.178
ΦΟΡΤΩΤΕΣ	VOLVO L350F	862	27,0	24.152
ΦΟΡΤΩΤΕΣ	CAT 980H	1.659	27,6	45.941
ΦΟΡΤΩΤΕΣ	CAT 980H	1.452	25,7	37.296
ΦΟΡΤΩΤΕΣ	CAT 980K	1.655	21,6	35.801
ΦΟΡΤΩΤΕΣ	CAT 980H	1.336	24,3	32.619
ΦΟΡΤΩΤΕΣ	CAT 980H	1.436	27,0	37.985
ΦΟΡΤΩΤΑΚΙΑ	CAT IT14G	3.350	5,4	17.923
ΦΟΡΤΩΤΑΚΙΑ	CAT 914G	3.748	4,7	16.937
ΦΟΡΤΩΤΑΚΙΑ	CAT IT14G	1.770	4,6	8.063
ΦΟΡΤΩΤΑΚΙΑ	CAT IT14G	638	4,8	3.064
ΤΣΑΠΕΣ	CAT 336E	1.213	20,4	25.230
ΤΣΑΠΕΣ	CAT 345C	953	28,8	30.482
ΤΣΑΠΕΣ	CAT 336E	613	17,4	10.268
ΤΣΑΠΕΣ	CAT 345B	1.619	31,3	48.058
ΤΣΑΠΕΣ	CAT 345C	1.336	32,6	41.415
ΤΣΑΠΕΣ	LIEBHERR R934	1.323	20,4	26.235
ΤΣΑΠΕΣ	CAT 350L	142	30,6	4.651
DUMPER	CAT 771D	2.056	21,6	41.434
DUMPER	CAT 730C	1.210	12,5	14.480
ΑΥΤΟ. ΠΡΙΟΝΙ	CAT 432F	1.582	8,4	13.272
ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΑ	ATLAS COPCO	1.304	5,9	7.266

	TROC 15			
ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΑ	ATLAS COPCO TROC 15	1.155	6,3	7.036
ΚΟΜΠΡΕΣΕΡ	ATLAS COPCO XAS 186	248	13,6	4.184
ΚΟΜΠΡΕΣΕΡ	ATLAS COPCO XAS 186	176	20,0	3.437
ΚΟΜΠΡΕΣΕΡ	ATLAS COPCO XAS 186	169	13,2	1.992
ΚΟΜΠΡΕΣΕΡ	ATLAS COPCO XAS 186	78	11,4	920
ΑΝΥΨΩΤΙΚΑ	JLG 450AJ	877	2,5	1.803
ΑΝΥΨΩΤΙΚΑ	JLG 450AJ	641	2,6	1.472
ΑΝΥΨΩΤΙΚΑ	JLG M600JP	208	1,6	318
ΣΠΑΣΤΗΡΕΣ	HARTL 404	606	21,4	14.309
ΣΠΑΣΤΗΡΕΣ	LOKOTRACK 100	502	24,4	10.989
ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	CAT 500KVA	1.725	18,2	26.121

3. Εφαρμογές υδρογόνου για την απανθρακοποίηση των λατομικών δραστηριοτήτων

3.1. Πληροφορίες για το υδρογόνο

Το υδρογόνο (H_2) βρίσκεται στην πρώτη θέση του περιοδικού πίνακα. Σε κανονικές συνθήκες είναι ένα άχρωμο, άοσμο και εξαιρετικά εύφλεκτο αέριο. Ο ατομικός του αριθμός είναι ίσος με 1, το ατομικό του βάρος ίσο με 1,00797 g/mol και το μοριακό του βάρος ίσο με 2,01594g. Παρόλο που υπάρχει σε αφθονία στη φύση είναι δύσκολο να βρεθεί ως ξεχωριστό στοιχείο. Συνήθως βρίσκεται στο νερό (συνδέεται με χημικό δεσμό με το οξυγόνο) ή σε υδρογονάνθρακες, όπου σχηματίζει δεσμούς με τον άνθρακα. [51][52]

Ως εγγενής απαίτηση για τη μείωση των παγκόσμιων αερίων του θερμοκηπίου και των εκπομπών CO_2 , η ενεργειακή μετάβαση σε εναλλακτικές λύσεις χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών έχει γίνει μια μεγάλη πρόκληση για τα επόμενα χρόνια. Το υδρογόνο αποτελεί μια άφθονη και γνωστή πηγή ενέργειας που θεωρείται τόσο καθαρή, όσο και ανανεώσιμη, λόγω του ότι κατά την καύση του ή όταν χρησιμοποιείται σε εφαρμογές κυψελών καυσίμου, εκπέμπεται προς το περιβάλλον μόνο νερό. Το υδρογόνο χρησιμοποιείται ευρέως ως φορέας ενέργειας ή για την αποθήκευση ενέργειας με δυνατότητα υποκατάστασης των εξαντλούμενων ορυκτών καυσίμων τα οποία τροφοδοτούν τις περισσότερες ενεργειακές εφαρμογές σήμερα. Το υδρογόνο είναι επίσης επωφελές, αφού είναι μια πυκνή ενέργεια με χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη 120 MJ/kg και υψηλότερη θερμογόνο δύναμη 142 MJ/kg. [51],[52]

Η χρήση τεχνολογιών υδρογόνου έχει αυξηθεί σημαντικά κατά τη διάρκεια του 21ου αιώνα, με παράδειγμα την εγκατάσταση σταθμού καυσίμων υδρογόνου στο Ηνωμένο Βασίλειο το 2011 και την ανάπτυξη ενός τρένου που κινείται με υδρογόνο στη Γερμανία το 2018. Οι εφαρμογές υδρογόνου για τη βαριά βιομηχανία, τον κατασκευαστικό εξοπλισμό και τις δραστηριότητες εκμετάλλευσης είναι ένας τομέας με ιδιαίτερο ενδιαφέρον και ευκαιρίες ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια, αφού ο εξοπλισμός κατασκευών της Hyundai μαζί με τη Hyundai motor group, η Volvo, η JCB, η Caterpillar, η Liebherr και η Komatsu, έχουν ήδη αναπτύξει εξοπλισμό που τροφοδοτείται με υδρογόνο. [51],[52]

3.2. Διαδικασία παραγωγής υδρογόνου

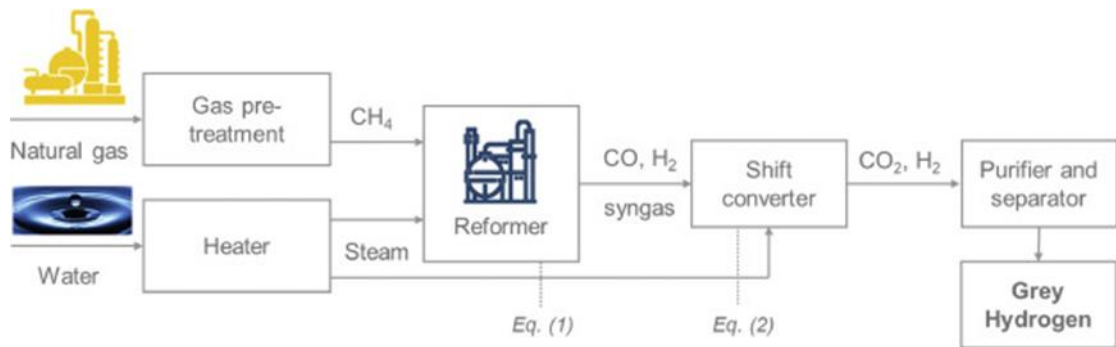
Η διαδικασία παραγωγής υδρογόνου βασίζεται σε διάφορες τεχνικές, όπως με αναμόρφωση υδρογονανθράκων, αεριοποίηση βιομάζας/άνθρακα ή ηλεκτρόλυση του νερού. Οι μέθοδοι αναμόρφωσης βασίζονται στη μετατροπή των υδρογονανθράκων σε πλούσιο σε υδρογόνο αέριο, όπου το υδρογόνο αργότερα διαχωρίζεται και καθαρίζεται. Οι τρεις κύριες μέθοδοι διαδικασίας αναμόρφωσης είναι, η αναμόρφωση με ατμό (SR), η μερική οξείδωση (POX) και η αυτοθερμική αναμόρφωση (AR). Η αεριοποίηση της βιομάζας/άνθρακα βασίζεται στη θέρμανση ενός καυσίμου σε

υποστοιχειομετρικό περιβάλλον για την παραγωγή ενός αερίου πλούσιο σε υδρογόνο. Τρεις κοινοί τύποι τεχνολογιών αεριοποίησης είναι, ο ατμός αεριοποίησης, αεριοποίηση με αέρα και αεριοποίηση με οξυγόνο. Η παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση γίνεται με την εφαρμογή συνεχούς ρεύματος στην κάθοδο, η οποία επιτρέπει τη διάσπαση των μορίων του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο. Οι πιο ανεπτυγμένοι ηλεκτρολύτες είναι οι μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), οι αλκαλικοί και οι ηλεκτρολύτες στερεού οξειδίου (SOEC). Ωστόσο το μεγαλύτερο μέρος του υδρογόνου εξακολουθεί να παράγεται παγκοσμίως από μη ανανεώσιμες πηγές μέσω της μετατροπής ορυκτών καυσίμων, όπως η αναμόρφωση με ατμό του φυσικού αερίου, με αποτέλεσμα την παραγωγή ποσότητας εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο δεν είναι φιλικό προς το περιβάλλον. Ανάλογα με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που παράγονται, το υδρογόνο κατηγοριοποιείται σε διάφορα χρώματα όπως γκριζο, πράσινο, μπλε κ.α. [59]

Το υδρογόνο το οποίο παράγεται από ορυκτά καύσιμα χωρίς δέσμευση, χρήση και αποθήκευση άνθρακα (CCUS), ονομάζεται γκριζο υδρογόνο. Οι διαδικασίες παραγωγής γκριζου υδρογόνου περιλαμβάνουν το υδρογόνο που παράγεται με αναμόρφωση ατμού φυσικού αερίου ή αεριοποίησης άνθρακα χωρίς CCUS. Περισσότερο από το 40% του γκριζου υδρογόνου αποτελεί υποπροϊόν άλλων χημικών διεργασιών. Το συγκεκριμένο υδρογόνο βρίσκει χρήση στην βιομηχανία των πετροχημικών και συμβάλει στην παραγωγή αμμωνίας. Για την παραγωγή του γκριζου υδρογόνου χρησιμοποιούνται περίπου το 6% του παγκόσμιου εξαγόμενου φυσικού αερίου και το 2% του άνθρακα ετησίως. Το βασικότερο μειονέκτημα του γκριζου υδρογόνου είναι οι σημαντικές εκπομπές CO₂ που παράγονται κατά την παραγωγή του υδρογόνου, οι οποίες εκτιμάται ότι είναι περίπου 830 Mt CO₂ ετησίως. [59,52]

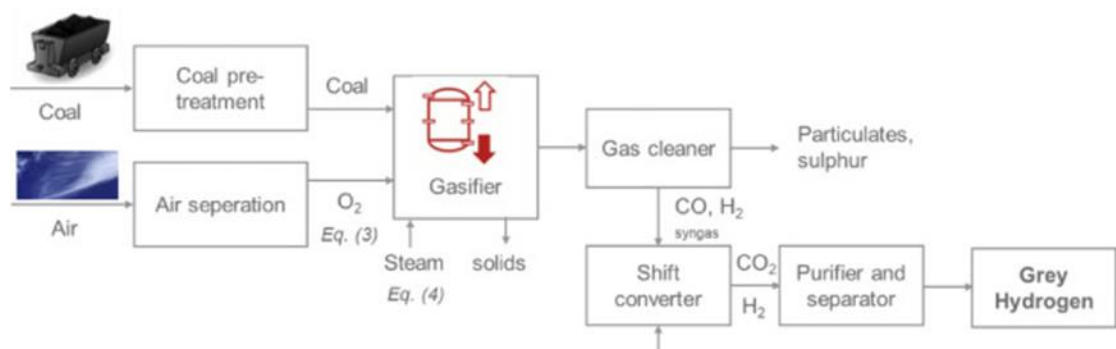
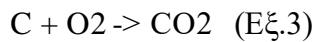
Η αναμόρφωση φυσικού αερίου με ατμό (SMR) χωρίς CCUS, είναι μια διαδικασία με χαμηλό κόστος. Κατά τη διαδικασία, το φυσικό αέριο υφίσταται προεπεξεργασία και το νερό θερμαίνεται. Στη συνέχεια, το μεθάνιο διασπάται στον αναμορφωτή με ατμό, σε αέριο σύνθεσης (Εξ. (1)), έχοντας ως κύρια συστατικά το CO και το H₂. Αυτό στη συνέχεια μετατρέπεται από την αντίδραση μετατόπισης αερίου νερού (Εξ. (2)) σε CO₂ και H₂, το CO₂ διαχωρίζεται και το H₂ καθαρίζεται. Η διαδικασία αυτή φαίνεται και στην εικόνα 16.





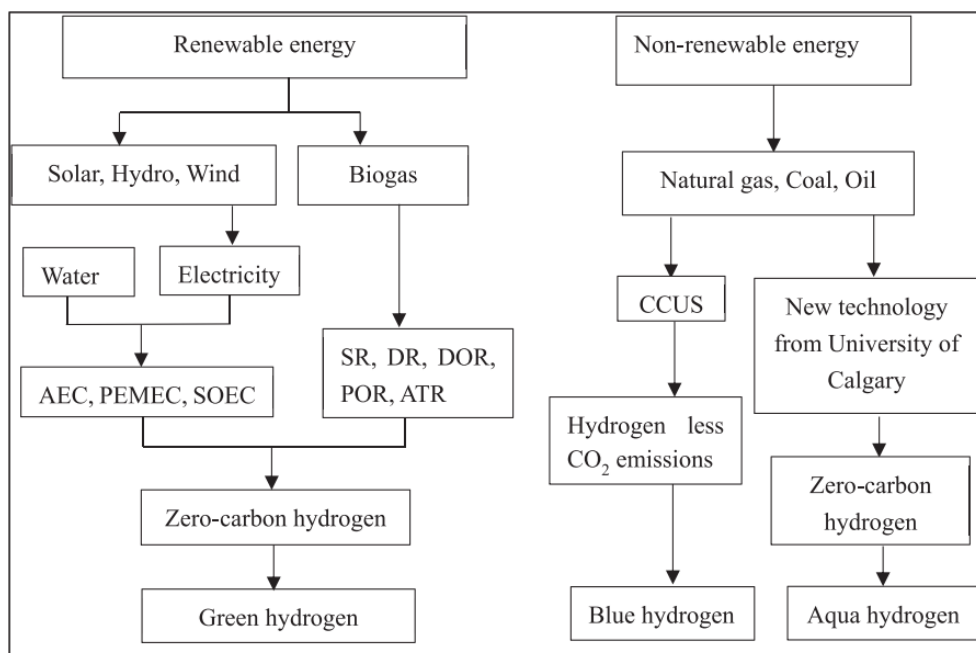
Εικόνα 16: Διαδικασία αναμόρφωσης φυσικού αερίου με ατμό χωρίς CCUS για την παραγωγή γκρίζου υδρογόνου.

Μια ακόμη σημαντική διαδικασία για την παραγωγή του γκρίζου υδρογόνου είναι η αεριοποίηση άνθρακα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται αρκετά στην Κίνα λόγω των μεγάλων αποθεμάτων άνθρακα. Αναλυτικότερα, κατά την διαδικασία αυτή ξηρός και κονιοποιημένος άνθρακας, εισάγεται στον αεριοποιητή, όπου αντιδρά σε υψηλή θερμοκρασία (άνω των 900 °C) με οξυγόνο και ατμό, για τη σύνθεση CO₂ και H₂. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Πρώτον, ο αέρας τροφοδοτείται στον αεριοποιητή και οξειδώνει ένα κλάσμα του άνθρακα σε CO₂ (Εξ. (3)) ενώ ταυτόχρονα αποθηκεύεται η θερμότητα εντός του καυσίμου. Στο δεύτερο στάδιο, διακόπτεται η εισροή αέρα και εγχέεται ατμός. Ο ατμός αντιδρά με τον άνθρακα, προς CO₂ και το H₂ (Εξ. (4)). Όταν η θερμοκρασία μειωθεί, ανατροφοδοτείται αέρας στον αεριοποιητή. Αυτές είναι οι δύο κύριες αντιδράσεις που εναλλάσσονται και χρησιμοποιούνται στις περισσότερες μεθόδους αεριοποίησης. Η διαδικασία αυτή φαίνεται και στην εικόνα 17.



Εικόνα 17: Διαδικασία αεριοποίησης άνθρακα για την παραγωγή γκρίζου υδρογόνου.

Προκειμένου το υδρογόνο να διαδραματίσει κυρίαρχο ρόλο στα βιώσιμα ενεργειακά συστήματα, η παραγωγή του θα πρέπει να έχει αρκετά χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα καθώς και χαμηλό οικονομικό κόστος. Το υδρογόνο χαμηλών εκπομπών άνθρακα περιλαμβάνει γενικά το πράσινο υδρογόνο (υδρογόνο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας), το μπλε υδρογόνο (υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα με μειωμένες εκπομπές CO₂ μέσω δέσμευσης, αξιοποίησης ή και αποθήκευσης). Το πράσινο υδρογόνο θεωρείται ότι δεν περιέχει εκπομπές άνθρακα και αναπτύσσεται με ταχείς ρυθμούς, αλλά σε σύγκριση με το υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα, εξακολουθεί να έχει υψηλότερο κόστος. Το μπλε υδρογόνο δεν είναι εγγενώς ελεύθερο από άνθρακα και η CCUS τεχνολογία είναι υψηλού κόστους. [52]



Εικόνα 19: Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου χαμηλών εκπομπών CO₂

Πράσινο υδρογόνο

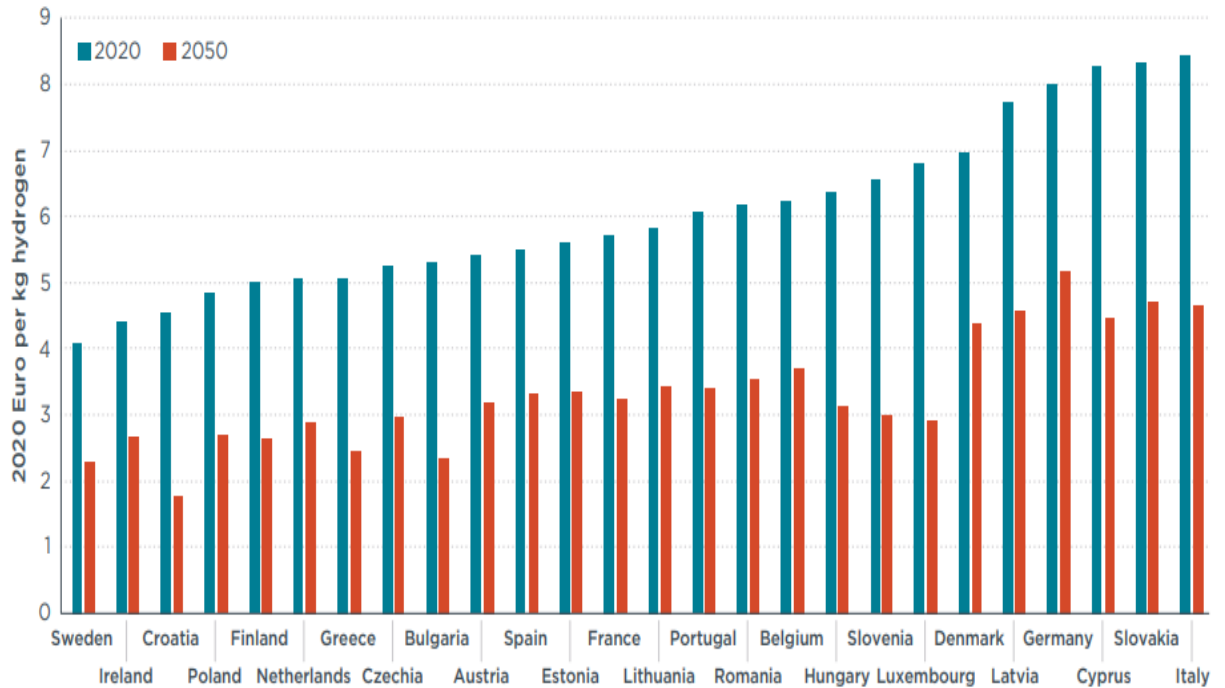
Το πράσινο υδρογόνο αποτελεί μια επιλογή υδρογόνου χωρίς άνθρακα και η παραγωγή γίνεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Με την αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και λόγω της ηλιακής και αιολικής διαλείψεως, έχουν αναδυθεί νέες προοπτικές για το υδρογόνο, ιδίως λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για την επίλυση της προβλήματος της μακροπρόθεσμης αποθήκευσης της πλεονάζουσας ηλεκτρικής και αιολικής ενέργειας. Ωριμες τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν την ηλεκτρόλυση νερού και η αναμόρφωση με ατμό βιοαερίου. Η τεχνολογία ηλεκτρόλυσης περιλαμβάνει τρεις διαφορετικούς τύπους ηλεκτρόλυσης. Πιο συγκεκριμένα περιλαμβάνει τις αλκαλικές κυψέλες ηλεκτρόλυσης (AEC), τις

κυψέλες ηλεκτρόλυσης με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMEC) και τις κυψέλες ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου (SOEC). Τα SOEC μπορούν να παράγουν υδρογόνο με την υψηλότερη απόδοση και να συν-ηλεκτρολύουν διοξείδιο του άνθρακα, έτσι λόγω της μεγάλης απόδοσης μετατροπής ενέργειας, αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία. Οι διεργασίες αναμόρφωσης αποτελούν την άλλη τεχνολογία παραγωγής πράσινου υδρογόνου. Οι διεργασίες αυτές για την παραγωγή υδρογόνου χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη το βιοαέριο. Αναλυτικότερα, οι διεργασίες οι οποίες περιλαμβάνονται στην συγκεκριμένη τεχνολογία είναι η αναμόρφωση με ατμό (SR), η ξηρή αναμόρφωση (DR), η αναμόρφωση ξηρής οξείδωσης (DOR), η αναμόρφωση μερικής οξείδωσης (POR) και η αυτοθερμική αναμόρφωση (ATR). [52]

3.3. Κόστος παραγωγής πράσινου υδρογόνου στην Ελλάδα και την ΕΕ

Για τη μείωση των εκπομπών CO₂ το καύσιμο υδρογόνου που επιλέγεται να χρησιμοποιείται από ορισμένες χώρες ή περιοχές (π.χ. η ΕΕ) είναι το υδρογόνο που παράγεται κυρίως χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (πράσινο υδρογόνο). Ωστόσο, το τρέχων κόστος καθώς και η μελλοντική εξέλιξη του κόστους του υδρογόνου θα είναι κρίσιμο σημείο για την υιοθέτησή του ως ένα εναλλακτικό καύσιμο. Το τελικό κόστος του υδρογόνου ως καύσιμο στην αντλία για τον τελικό χρήστη, αποτελείται από το κόστος παραγωγής υδρογόνου συμπεριλαμβανομένου του κόστους που απαιτείται για τη συμπίεση του υδρογόνου στην καθορισμένη πίεση (έως 700 bar), κόστος μεταφοράς υδρογόνου, εάν χρειάζεται, και κόστος σταθμού ανεφοδιασμού, δηλ. το κόστος διανομής. Παρακάτω, θα αναλυθεί το τελικό κόστος αντλίας επτά ευρωπαϊκών χωρών που αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 75% της ευρωπαϊκής αγοράς βαρέων οχημάτων (HDV). Συγκεκριμένα, οι χώρες αυτές είναι η Γαλλία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Γερμανία, η Ιταλία, η Ισπανία, η Ολλανδία και η Πολωνία. [56,55]

Αρχικά, το κόστος παραγωγής του υδρογόνου αποτελεί τον βασικότερο συντελεστή της τελικής τιμής αντλίας και ορίζεται ως το κόστος της ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή καθαρού υδρογόνου. Στο διάγραμμα 11, παρουσιάζεται το κόστος παραγωγής υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές το 2020 και το 2050 σε κάθε μία από τις 26 χώρες της ΕΕ. Οι αισθητές διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των χωρών οφείλονται στις διαφορετικές τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές, το δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και των φορολογικών τελών, των τιμών του νερού και του WACC (το οποίο είναι αποτέλεσμα της εταιρικών φόρων ανά χώρα). Το μέσο κόστος παραγωγής της ΕΕ για το 2020 είναι 6 ευρώ ανά κιλό, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 11, ωστόσο το κόστος αυτό μπορεί να διαφέρει σημαντικά μεταξύ των χωρών, όπως από 4 ευρώ ανά κιλό στη Σουηδία έως 8,5 ευρώ ανά κιλό στην Ιταλία. [56]



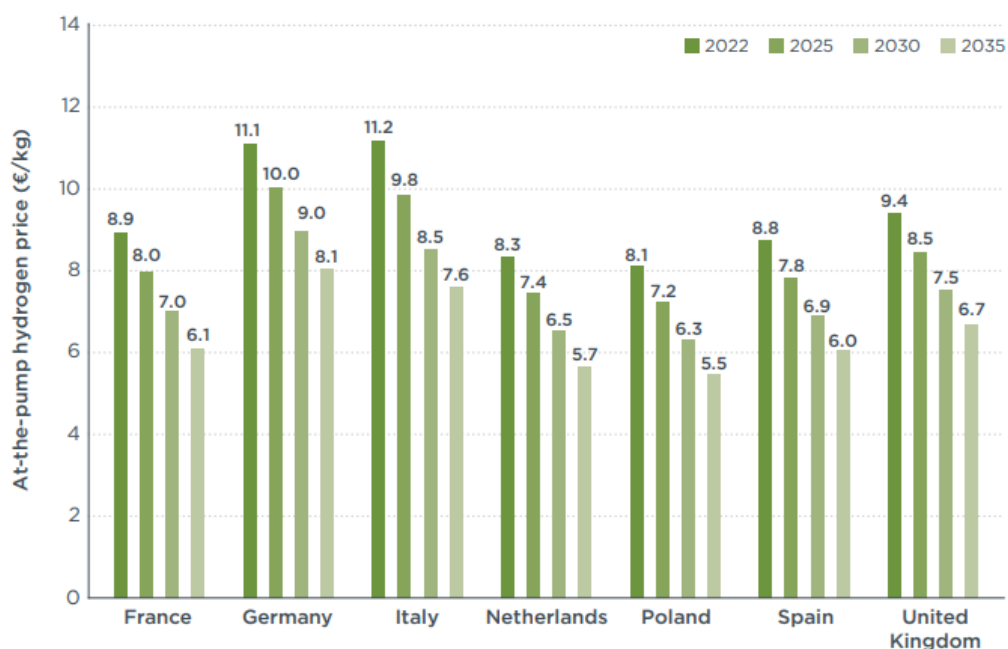
Διάγραμμα 11: Το κόστος παραγωγής υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές το 2020 και το 2050 σε κάθε μία από τις 26 χώρες ΕΕ

Μετά την παραγωγή του το υδρογόνο πρέπει να συμπιέζεται πριν από τη μεταφορά, αφού παράγεται, συνήθως, σε σχετικά χαμηλές πιέσεις (20–30 bar). Οι περισσότεροι συμπιεστές που χρησιμοποιούνται σήμερα για συμπίεση αερίου υδρογόνου είναι, είτε συμπιεστές θετικής μετατόπισης, είτε φυγοκεντρικοί συμπιεστές. Στον πίνακα 21, φαίνονται οι τιμές του υδρογόνου μετά την συμπίεση του στα 700 bar, για τις 7 χώρες που αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 75% της ευρωπαϊκής αγοράς βαρέων οχημάτων. [57,56,58]

Πίνακας 21: Κόστος παραγωγής υδρογόνου στην Ευρώπη συμπεριλαμβανομένου του κόστους συμπίεσης στα 700 bar

Country	Green Hydrogen (€/kg)		
	2022	2030	2035
France	5.47	4.45	4.15
Germany	7.68	6.41	6.10
Italy	7.95	5.98	5.65
Netherlands	4.85	3.98	3.71
Poland	4.63	3.77	3.50
Spain	5.26	4.36	4.10
United Kingdom	5.90	4.98	4.71

Η τελική τιμή υδρογόνου στην αντλία είναι το άθροισμα της παραγωγής υδρογόνου και το κόστος συμπίεσης καθώς και το κόστος του σταθμού ανεφοδιασμού. Σύμφωνα με εκτιμήσεις της ευρωπαϊκής επιτροπής για το κεφάλαιο και το λειτουργικό κόστος πρατηρίου καυσίμων από το 2020 έως το 2035, οι τελικές τιμές του υδρογόνου αντλίας για τις 7 χώρες της ΕΕ παρουσιάζονται στο διάγραμμα 12. Ακόμη, εκτιμάται ότι ο σταθμός ανεφοδιασμού υδρογόνου δεν θα χρησιμοποιείται στο μέγιστο των δυνατοτήτων του και το ποσοστό αυτό θα αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Για το βασικό σενάριο αυτής της μελέτης, υποθέτουμε ποσοστά χρησιμοποίησης 30% το 2022, 50% το 2030 και 70% το 2035, ακολουθώντας τις υποθέσεις σε προηγούμενες μελέτες [55,56]



Διάγραμμα 12: Τιμή πράσινου υδρογόνου στην αντλία το 2020, 2025, 2030 και 2035 σε κάθε μία από τις 7 χώρες της ΕΕ που αναλαμβάνουν τα ακόλουθα ποσοστά χρήσης σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου (30% το 2022, 40% το 2025, 50% το 2030 και 70% το 2035).

Η Γερμανία και η Ιταλία παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές πράσινου υδρογόνου, ωστόσο οι τιμές αυτές οφείλονται σε διαφορετικούς λόγους. Όσον αφορά την Γερμανία οφείλεται στο υψηλό τέλος δικτύου που πληρώνουν οι παραγωγοί υδρογόνου όταν λαμβάνουν ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο, ενώ για την Ιταλία το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι αρκετά υψηλό διότι οι πηγές ηλιακής και αιολικής ενέργειας δεν είναι άφθονες.[56]

3.4. Χρήση εναλλακτικών καυσίμων

Σήμερα, για την παραγωγή ενός εναλλακτικού καυσίμου δεν πρέπει μόνο να είναι τεχνικά εφικτό και οικονομικά βιώσιμο, αλλά, πάνω απ' όλα, πρέπει να μειώνει τις επιβλαβείς για το περιβάλλον εκπομπές, συμπεριλαμβανομένου του CO₂, κατά μέγιστο δυνατό βαθμό. Τα κύρια εναλλακτικά καύσιμα, όπως η αιθανόλη, η μεθανόλη, το βιοντίζελ, το προπάνιο και το υδρογόνο μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές του κινητήρα σε διάφορους βαθμούς σε σύγκριση με τις εκπομπές που προκαλούνται από τα συμβατικά υγρά καύσιμα υδρογονανθράκων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο και βενζίνη). Από τα παραπάνω εναλλακτικά καύσιμα, το υδρογόνο, ως φορέας ενέργειας, είναι το μόνο που είναι δυναμικά απαλλαγμένο από υδρογονάνθρακες, μονοξείδιο του άνθρακα και εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.[28]

Οι φυσικοχημικές ιδιότητες του υδρογόνου διαφέρουν σημαντικά από αυτές των υπόλοιπων συμβατικών ορυκτών καυσίμων. Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός καυσίμου υδρογόνου σε σύγκριση με άλλα καύσιμα που χρησιμοποιούνται συνήθως στους κινητήρες εσωτερικής καύσης (ICE) παρουσιάζονται στον πίνακα 22. [28]

Πίνακας 22: Οι φυσικοχημικές ιδιότητες του υδρογόνου σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα (βενζίνη, πετρέλαιο)

Property	Hydrogen	Methane	Gasoline	Diesel
Carbon content (mass%)	0	75	84	86
Lower (net) heating value (MJ/kg)	119.9	45.8	43.9	42.5
Density (at 1 bar & 273 K; kg/m ³)	0.089	0.72	730–780	830
Volumetric energy content (at 1 bar & 273 K; MJ/m ³)	10.7	33.0	33 × 10 ³	35 × 10 ³
Molecular weight	2.016	16.043	~110	~170
Boiling point (K)	20	111	298–488	453–633
Auto-ignition temperature (K)	853	813	~623	~523
Minimum ignition energy in air (at 1 bar & at stoichiometry; mJ)	0.02	0.29	0.24	0.24
Stoichiometry air/fuel mass ratio	34.4	17.2	14.7	14.5
Quenching distance (at 1 bar & 298 K at stoichiometry; mm)	0.64	2.1	~2	-
Laminar flame speed in air (at 1 bar & 298 K at stoichiometry; m/s)	1.85	0.38	0.37–0.43	0.37–0.43
Diffusion coefficient in air (at 1 bar & 273 K; m ² /s)	8.5 × 10 ⁻⁶	1.9 × 10 ⁻⁶	-	-
Flammability limits in air (vol %)	4–76	5.3–15	1–7.6	0.6–5.5
Adiabatic flame temperature (at 1 bar & 298 K at stoichiometry; K)	2480	2214	2580	~2300
Octane number (R+M)/2	130+	120+	86–94	-
Cetane number	-	-	13–17	40–55

Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται και στον πίνακα 22, σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία 273 K, η πυκνότητα του υδρογόνου είναι πολύ χαμηλή μόλις 0.089kg/m³, κάτι που οφείλεται στο πολύ χαμηλό μοριακό του βάρος. Για την αύξηση της πυκνότητας του υδρογόνου και του σχετικού ογκομετρικού ενεργειακού περιεχομένου, απαραίτητη είναι η συμπίεση του. Για παράδειγμα, το υδρογόνο που συμπιέζεται στα 350 bar στους 273 K μπορεί να αυξήσει την πυκνότητα του αερίου στα 31 kg/m³, ενώ την ίδια στιγμή το ογκομετρικό ενεργειακό περιεχόμενο αυξάνεται στα 3700 MJ/m³. Αντίθετα με την πυκνότητα του, το υδρογόνο έχει την υψηλότερη αναλογία μάζας-ενέργειας μεταξύ των χημικών καυσίμων, ενώ όσον αφορά την κατανάλωση μάζας-ενέργειας, ξεπερνά τα συμβατικά καύσιμα βενζίνης κατά περίπου 3 φορές, το αλκοόλ κατά 5 έως 6 φορές και το μεθάνιο και το προπάνιο κατά 2,5 φορές. Έτσι, κατά την πρόσμιξη του υδρογόνου με κάποιο καύσιμο υδρογονάνθρακα, αυξάνεται η αποτελεσματική απόδοση του κινητήρα, ενώ παράλληλα μειώνεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου. Δυο επιπλέον χρήσιμα χαρακτηριστικά του υδρογόνου για την διαδικασία της καύσης, είναι η υψηλή μοριακή διαχυτικότητα και η ταχύτητα φλόγας του καιόμενου υδρογόνου, με αποτέλεσμα την ταχύτερη παραγωγή ενός ομοιογενούς μίγματος καυσίμου και την καλύτερη απόδοση καύσης. Η υψηλή διαχυτικότητα του υδρογόνου είναι η ικανότητα

του να διασκορπίζεται στον αέρα και είναι πολύ γρηγορότερη από αυτή της βενζίνης. Αυτό είναι επωφελές για δύο βασικούς λόγους: πρώτον διευκολύνει το σχηματισμό ενός ομοιογενούς μίγματος καυσίμου-αέρα και δεύτερον από άποψη ασφάλειας εφαρμογής, διασκορπίζεται γρήγορα σε περίπτωση διαρροής υδρογόνου. Ακόμη, το υδρογόνο παρουσιάζει μεγάλα όρια ευφλεκτότητας σε σύγκριση με άλλα καύσιμα (για παράδειγμα 4–75% σε σύγκριση με το 1,4–2,3% κατ' όγκο στον αέρα στην περίπτωση της βενζίνης), δίνοντας του το πλεονέκτημα να τρέξει σε ένα άπαχο μείγμα, ενώ το ευρύ φάσμα ευφλεκτότητας επιτρέπει την εξαιρετικά αποδοτική λειτουργία του κινητήρα και κατά συνέπεια χαμηλότερες εκπομπές NOx και την αυξημένη θερμική απόδοση πέδησης. Η θερμοκρασία αυτοανάφλεξης του υδρογόνου είναι 853 K, σημαντικά υψηλότερη από αυτή των άλλων καυσίμων (623K για την βενζίνη και 523K για το πετρέλαιο), με αποτέλεσμα η ανάφλεξη του μίγματος υδρογόνου-αέρα να είναι πολύ πιο δύσκολη όταν βασίζεται μόνο στην αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη συμπίεση. Τέλος, για την πλήρη καύση του υδρογόνου στον αέρα, η σωστή στοιχειομετρική αναλογία του (Αέρα/Καύσιμου υδρογόνου) A/F είναι 34,29 kg αέρα προς 1 kg υδρογόνου, δίνοντας ένα στοιχειομετρικό ποσοστό 29,52% υδρογόνου στον αέρα κατ' όγκο. Το ποσοστό αυτό είναι πολύ υψηλότερο από την αναλογία 7:1 (A/F) που απαιτείται για τη βενζίνη. Η ταχύτητα φλόγας του υδρογόνου είναι πολύ υψηλή σε στοιχειομετρικές αναλογίες και υπό αυτές τις συνθήκες, η ταχύτητα φλόγας του υδρογόνου είναι σχεδόν μια τάξη μεγέθους υψηλότερη (γρηγορότερη) από αυτή της βενζίνης. Αυτό επιτρέπει στους κινητήρες υδρογόνου να προσεγγίζουν περισσότερο τον θερμοδυναμικά ιδανικό κύκλο κινητήρα. [27,29]

3.5. Το υδρογόνο ως καύσιμο για κινητήρες εσωτερικής καύσης (ICE)

Το υδρογόνο θεωρείται ένα πολλά υποσχόμενο εναλλακτικό καύσιμο για επιβατηγά οχήματα και βαρέα οχήματα, λόγω του πλήθους των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει, όπως υψηλή απόδοση, καθαρή καύση, γρήγορη διάδοση της φλόγας, και χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης. Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν το υδρογόνο κατάλληλο καύσιμο για την χρήση του σε κινητήρες εσωτερικής καύσης. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στα δύο είδη κινητήρων εσωτερικής καύσης, είτε σε κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα (SI) είτε σε κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση (CI). Στην συνέχεια, θα αναλυθεί η λειτουργία της καύσης του υδρογόνου στους κινητήρες SI, αφού οι κινητήρες CI δεν μπορούν να λειτουργήσουν με υδρογόνο ως αυτόνομο καύσιμο, γιατί η θερμοκρασία συμπίεσης είναι ανεπαρκής για την έναρξη της καύσης, λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας αυτανάφλεξης του υδρογόνου. Παρόλα αυτά στους κινητήρες αυτούς το υδρογόνο μπορεί να φτάσει έως και το 70-90% στην αναλογία του συνολικού καυσίμου. [35]

3.5.1. Καύση του υδρογόνου σε κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα SI

Το καύσιμο υδρογόνου, κατά την ανάμειξη του με τον αέρα σχηματίζει ένα εύφλεκτο μείγμα. Το μείγμα αυτό μπορεί να καεί σε έναν συμβατικό κινητήρα ανάφλεξης με σπινθήρα με αναλογία ισοδυναμίας κάτω από το όριο ευφλεκτότητας ενός αντίστοιχου μείγματος βενζίνης-αέρα. Η καύση παράγει χαμηλές θερμοκρασίες φλόγας, με χαμηλότερη μεταφορά θερμότητας στα τοιχώματα, υψηλότερη απόδοση κινητήρα και χαμηλότερες εκπομπές NOx. Οι εκπομπές NOx αποτελούν τους κύριους ρύπους στους κινητήρες υδρογόνου λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών καύσης σε σχέση με τους αντίστοιχους κινητήρες βενζίνης. Οι εκπομπές NOx αυξάνονται όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε στοιχειομετρικές αναλογίες καυσίμου-αέρα, ενώ με την μείωση της αναλογίας αυτής μειώνεται και η θερμοκρασία καύσης και κατά συνέπεια οι εκπομπές NOx. Συγκεκριμένα, η αναλογία καυσίμου/αέρα, μπορεί να καθορίσει την θερμοκρασία καύσης η οποία με την σειρά της, την ποσότητα εκπομπών NOx που σχηματίζεται. [33][40]

Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης υδρογόνου (HICE) ταξινομούνται σε δύο τύπους ως προς την τροφοδοσία του καυσίμου υδρογόνου: στις μηχανές ψεκασμού καυσίμου με θύρα (PFI) και στους κινητήρες άμεσου ψεκασμού (DI). [31]

Στις μηχανές PFI, το καύσιμο υδρογόνου εγχέεται εντός της θύρας με μηχανικά ή ηλεκτρονικά ελεγχόμενα μπεκ. Συχνά, για τον ακριβή έλεγχο του ψεκασμού σε υψηλές στροφές κινητήρα, προτιμώνται τα ηλεκτρονικά μπεκ. Οι εγχυτήρες επιτρέπουν τον ακριβή έλεγχο της διάρκειας έγχυσης του, ενώ παράλληλα ο αέρας τροφοδοτείται ξεχωριστά για την αραιώση των καυτών υπολειμματικών αερίων. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η θερμοκρασία στον θάλαμο καύσης του κινητήρα [32,33,36]. Επίσης, όσο λιγότερο αέριο (υδρογόνο ή αέρας), τόσο μειώνεται το ενδεχόμενο της πρόωρης ανάφλεξης. [34]

Αντίθετα, στην κατηγορία DI, το υδρογόνο εγχέεται απευθείας στον θάλαμο καύσης. Εξαιτίας της υψηλής διαχυτικότητας, το υδρογόνο διαχέεται γρήγορα και η ανάμειξη του με τον αέρα προκαλεί την άμεση εξάπλωση της φλόγας. Για την ανάφλεξη του χρησιμοποιείται σπινθήρας (μπουζί). Κατά την μέθοδο της άμεση έγχυσης δεν υπάρχει το ενδεχόμενο τυχόν πτώσης της ισχύος και η μέθοδος αυτή θεωρείται αποτελεσματικότερη σε σύγκριση με άλλες. Ακόμη, κατά την χρήση της επιτυγχάνεται αύξηση 20% της απόδοσης ισχύος σε σύγκριση με έναν συμβατικό βενζινοκινητήρα λόγω της υψηλότερης στοιχειομετρικής θερμότητας καύσης ανά κιλό αέρα για το υδρογόνο (περίπου 3,37 MJ για το υδρογόνο σε σύγκριση με 2,83 MJ για τη βενζίνη). Ωστόσο, η χρήση του υδρογόνου σε έναν κινητήρα DI επιφυλάσσει ορισμένες προκλήσεις, που σχετίζονται με τις ιδιότητες του καυσίμου υδρογόνου, όπως η υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης του υδρογόνου, η καθυστέρηση αυτανάφλεξης και ο γρήγορος ρυθμός αύξησης της πίεσης. Με την

χρήση άμεσου ψεκασμού μπορεί να λυθεί το πρόβλημα της πρόωρης ανάφλεξης, αλλά δεν εγγυάται τον έλεγχο έναντι πιθανής εμφάνισης προανάφλεξης στο θάλαμο καύσης του κινητήρα. Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προκλήσεων τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιήσουν δύο τύπους ψεκασμού ανάλογα με την πίεση, τον άμεσο ψεκασμό χαμηλής πίεσης (LPDI) και τον άμεσο ψεκασμό υψηλής πίεσης (HPDI). Το LPDI βασίζεται στην έγχυση καυσίμου όταν η βαλβίδα εισαγωγής είναι κλειστή και υπό χαμηλή πίεση κυλίνδρου, ενώ το HPDI βασίζεται στην έγχυση καυσίμου στο τέλος της διαδρομής συμπίεσης.[37,38,39] Για τον ψεκασμό υψηλής πίεσης (HPDI), απαιτείται μεγαλύτερο έργο για την παροχή της απαραίτητης πίεσης. Το έργο αυτό αντικατοπτρίζεται στην απόδοση, το υψηλότερο κόστος και τη πολυπλοκότητα του συστήματος.[41]

3.5.2. Σύγκριση των δυο τύπων κινητήρα

Κατά την σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων ψεκασμού για έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου (τον ψεκασμό καυσίμου στη θύρα και τον άμεσο ψεκασμό) λαμβάνονται αρκετές πληροφορίες σχετικά με το πια μέθοδος είναι ασφαλέστερη, αποδοτικότερη, οικονομικότερη κ.α. Αρχικά, ο άμεσος ψεκασμός επιτρέπει μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και έλεγχο της καύσης σε σχέση με τον ψεκασμό στην θύρα. Ακόμη, με την ίδια πίεση φόρτισης-αέρα, επιτυγχάνεται υψηλότερη απόδοση κατά τον άμεσο ψεκασμό. Αντίθετα, η μέθοδος ψεκασμού καυσίμου στην θύρα αποτελεί απλούστερο σύστημα και έχει χαμηλότερο κόστος, για τον λόγο αυτόν και πολλές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στο PFI. Στους παρακάτω πίνακες περιγράφονται και απεικονίζονται οι διαφορές μεταξύ των δυο αυτών μεθόδων. [28]

Στον πίνακα 23 συγκρίνονται τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά και οι παράμετροι των συστημάτων PFI και DI.

Πίνακας 23: Χαρακτηριστικά και οι παράμετροι των συστημάτων PFI και DI

Features and Parameters	Intake Manifold		Direct Injection	
			Low Pressure DI	High Pressure DI
H2 injection	PFI single point	PFI open valve	Suction & begin of compression stroke	Near TDC
Fuel Injection Equipment costs	Moderate		Best cost/benefit Trade-off	Costly H2 Injection system
Power density	Ca. -30% comp. To Diesel		Comparable to Diesel resp. 0 to -20%	
Efficiency	Slightly below Diesel		Close to Diesel	
Further features	High risk of backfire	Risk of backfire	H2 LP—system as FCEV, allows high milage	H2 compression pump require

Ο Πίνακας 24 συνοψίζει ορισμένα από τα πλεονεκτήματα του άμεσου ψεκασμού DI σε σύγκριση με τον ψεκασμό καυσίμου στη θύρα ψεκασμού PFI.[28]

Πίνακας 24: Πλεονεκτήματα κινητήρα DI σε σχέση με PFI

Βασικά Πλεονεκτήματα	Σχετικά με τη διαδικασία έγχυσης
Βελτίωση της πυκνότητας ισχύος Ο αέρας δεν εκτοπίζεται από το H2 κατά τη διάρκεια της διαδρομής εισαγωγής	Μειωμένες θερμικές απώλειες Ελάχιστη επαφή του τοιχώματος με τον καπνό
Εξάλειψη της ανάφλεξης Έγχυση H2 μετά το κλείσιμο της βαλβίδας εισαγωγής	Στρατηγικές πολλαπλών εγχύσεων χαμηλού NOx
Ανάκτηση μέρους της ενέργειας της δεξαμενής Ιδανική έγχυση στο TDC	Έλεγχος του ρυθμού αύξησης της πίεσης με πολλαπλή έγχυση
Μειωμένη τάση προανάφλεξης Η καθυστερημένη έγχυση έχει ως αποτέλεσμα λιγότερη θέρμανση συμπίεσης, χρόνο παραμονής στον κύλινδρο και έκθεση σε θερμά σημεία	Βελτιωμένη θερμική απόδοση Αυξημένη δυνατότητα αναλογίας συμπίεσης

Τέλος, στον πίνακα 25 απεικονίζονται μια σύγκριση των διαφορετικών διεργασιών καύσης υδρογόνου DI και PFI ως προς τις παραμέτρους: απόδοση, πυκνότητα ισχύος, σχηματισμός εκπομπών NOx, ανωμαλίες καύσης και σταθερότητα, δυνατότητα ελέγχου και τελικό κόστος. [42]

Πίνακας 25: Σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων καύσης του H₂

Parameters	PFI - SI	Low Pressure DI - SI	High Pressure DI - SI	High Pressure DI - Diffusive
Brake Efficiency	↓	→	↑	↑
Power Density	↓	↑	↑	↑
NO _x Formation (Part Load / Full Load)	↑ / →	↑ / ↓	→ / →	→ / →
Combustion Anomalies & Stability	↓	→	→	↑
Controlability	→	→	→	→
Costs	↑	→	↓	↓

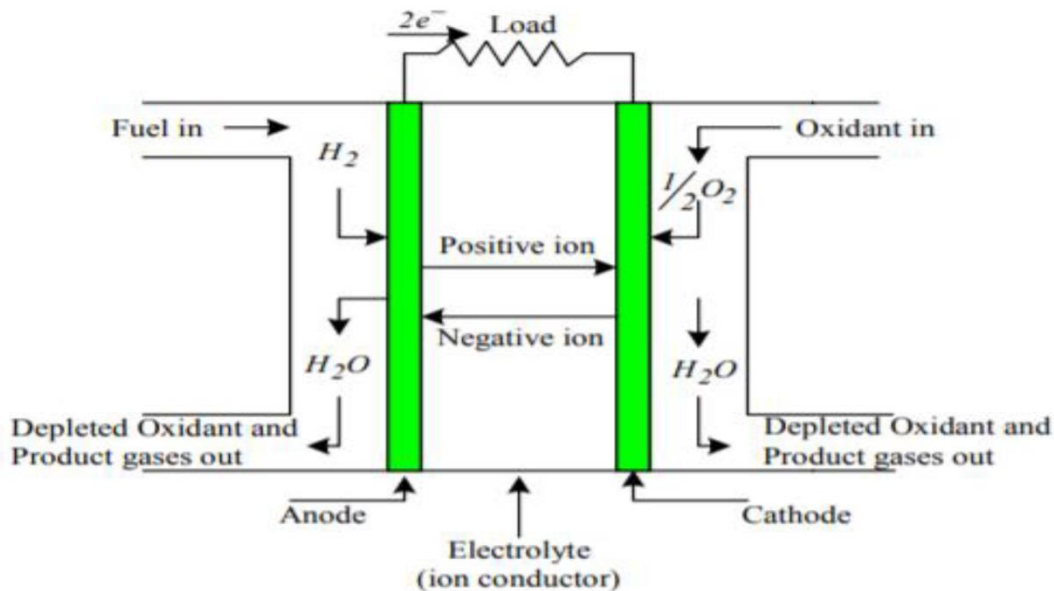
3.6. Κυψέλες καυσίμου υδρογόνου

Η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων προκαλεί συνεχείς ενεργειακές ελλείψεις και περιβαλλοντικά προβλήματα. Πολλές χώρες ακολουθούν στρατηγικές μηδενικών εκπομπών και καθαρής ενέργειας για να επιδιώξουν την μείωση του διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το 2050. Το υδρογόνο ως βιώσιμος φορέας ενέργειας για την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων μπορεί να μειώσει τα προβλήματα υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Όλο και περισσότερες χώρες προχωρούν στην ανάπτυξη του υδρογόνου και των τεχνολογιών κυψελών καυσίμου. Η κυψέλη καυσίμου είναι μια συσκευή που καταναλώνει υδρογόνο και οξυγόνο για την ηλεκτροχημική αντίδραση, ώστε να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και νερό δίχως να εκπέμπει επιβλαβή αέρια ή αέρια του θερμοκηπίου.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συστημάτων κυψελών καυσίμου (FC). Παρόλα αυτά, η αρχή της λειτουργίας τους είναι παρόμοια, αφού για την λειτουργία ενός συστήματος κυψελών καυσίμου, απαιτούνται τρεις βασικοί πυλώνες: μια άνοδος, μια κάθοδος και ένας ηλεκτρολύτης. Ανάλογα με τον τύπο του υλικού του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται υπάρχουν διαφορετικές κατηγορίες FC[43]. Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου FC είναι η εξής: τροφοδοτείται το καύσιμο (καθαρό υδρογόνο) στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου ενώ ο αέρας ή το καθαρό οξυγόνο τροφοδοτείται στην πλευρά της καθόδου του FC. Τα ηλεκτρόνια διαχωρίζονται στην πλευρά της ανόδου της κυψέλης, καθώς το αέριο προσπαθεί να περάσει μέσα από την μεμβράνη του ηλεκτρολύτη, η οποία λειτουργεί ως φίλτρο και διαχωρίζει τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα υδρογόνου. Στην πλευρά της καθόδου, τα ιόντα υδρογόνου που πέρασαν από

την μεμβράνη ενώνονται με τα άτομα οξυγόνου από την παροχή αέρα και παράγουν H₂O ως υποπροϊόν. Η θερμότητα αποτελεί ένα ακόμη υποπροϊόν, ενώ οι κυψέλες καυσίμου δεν παράγουν τις επιβλαβείς εκπομπές που παράγουν οι κινητήρες εσωτερικής καύσης, αφού δεν υπάρχει καύση. Η παραπάνω λειτουργία παριστάνεται στο ακόλουθο σχήμα (εικόνα 19). [43]



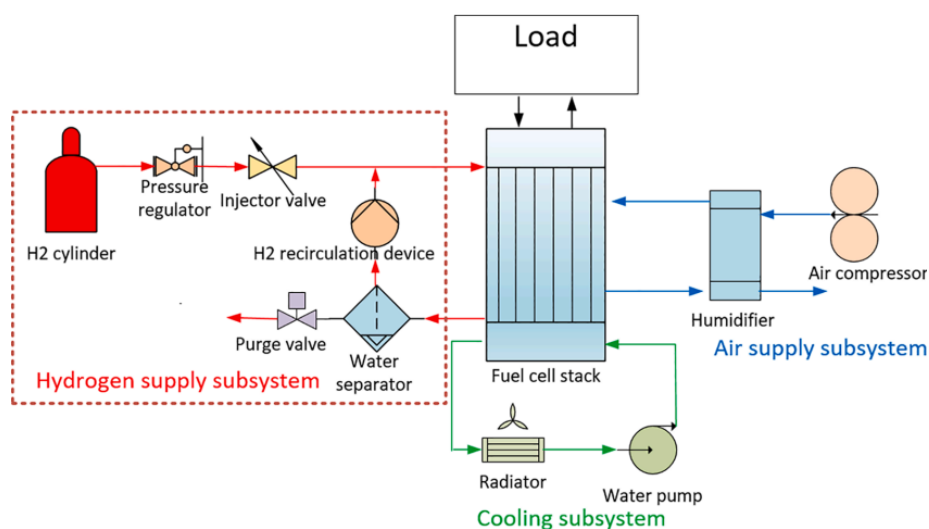
Εικόνα 19 : Διάγραμμα λειτουργίας κυψελών καυσίμου

Ανάλογα με τον τύπο της μεμβράνης που χρησιμοποιούν ταξινομούνται και τα συστήματα κυψελών καυσίμου, με τον πίνακα 26 να δείχνει μερικά από τα πιο κοινά συστήματα FC και τον τύπο της μεμβράνης που χρησιμοποιούν. [43][46]

Πίνακας 26: Ταξινόμηση συστημάτων κυψελών καυσίμου με βάση τη χρησιμοποιούμενη μεμβράνη

Fuel Cell	Abbreviation	Membrane
Solid Oxide Fuel cells	SOFC	Yttria-stabilized zirconia
Direct methanol fuel cell	DMFC	Solid polymer electrolyte (Nafion)
Phosphoric Acid fuel cell	PAFC	Phosphoric Acid (H ₃ PO ₄)
Polymer electrolyte fuel cell Or Proton exchange membrane	PEMFC	Solid polymer electrolyte (Nafion)
Alkaline fuel cell	AFC	Aqueous solution Potassium Hydroxide (KOH)

Από τους τύπους μεμβρανών που παρουσιάζονται στον πίνακα 26 οι στερεές πολυμερείς μεμβράνες αποτελούν τις πιο χρησιμοποιούμενες στον τομέα των μεταφορών, των οχημάτων και των μηχανημάτων έργων και εξόρυξης. Στερεές πολυμερείς μεμβράνες χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρολύτης σε PEMFC. Η πολυμερής μεμβράνη είναι υπερφθοροσουλφονικό οξύ που αναφέρεται ως Nafion και είναι όξινη. Ως εκ τούτου, τα ιόντα που μεταφέρονται είναι ιόντα υδρογόνου ή πρωτόνια. Το PEMFC τροφοδοτείται με καθαρό υδρογόνο και το οξειδωτικό είναι αέρας ή καθαρό οξυγόνο. Τα PEMFC είναι κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας που μεταφέρουν ιόντα υδρογόνου (H^+). Αυτές οι κυψέλες καυσίμου είναι οι πιο χρησιμοποιούμενες και λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, γύρω στους $80\text{ }^\circ\text{C}$, έχοντας σχετικά σύντομους χρόνους εκκίνησης και διακοπής. Ένα ακόμη βασικό πλεονέκτημα των PEMFC είναι ότι έχουν πολύ υψηλή απόδοση και πυκνότητα ισχύος. Στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 20) φαίνεται ένα τυπικό σύστημα PEMFC που εφαρμόζεται για οχήματα κυψελών καυσίμου. Το υποσύστημα παροχής υδρογόνου, παρέχει υδρογόνο στις κυψέλες καυσίμου. Το υδρογόνο που καταναλώνεται στην άνοδο των κυψελών καυσίμου παρέχεται από διάφορες δεξαμενές υδρογόνου υψηλής πίεσης. Το υδρογόνο υψηλής πίεσης ρέει μέσω της βαλβίδας μείωσης της πίεσης και της βαλβίδας ρύθμισης και τελικά εισέρχεται στην άνοδο.



Εικόνα 20: Διάγραμμα συστήματος PEMFC για κυψέλες υδρογόνου

3.7. Εναλλακτικός εξοπλισμός με καύσιμο το υδρογόνο

Το υδρογόνο είναι ένα καθαρό, ανανεώσιμο και μεταφερόμενο καύσιμο, ικανό να τροφοδοτεί μεγαλύτερο εξοπλισμό εκμεταλλεύσεων λατομείων. Η αντικατάσταση του σύγχρονου εξοπλισμού πετρελαίου με μελλοντικές τεχνολογίες υδρογόνου συμβάλλει στην μείωση των εκπομπών και στην απανθρακοποίηση των λατομείων. Οι τεχνολογίες υδρογόνου που μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα λατομείο είναι: οι κινητήρες εσωτερικής καύσης υδρογόνου (ICE) και οι κυψέλες καυσίμων υδρογόνου (fuel cells). Στην συνέχεια, αναλύεται εξοπλισμός αντίστοιχος του πετρελαιοκίνητου ο οποίος λειτουργεί με υδρογόνο, τόσο για τον μηχανοκίνητο εξοπλισμό όσο και για τις μονάδες παραγωγής ενέργειας, για την κάθε τεχνολογία υδρογόνου. Ωστόσο, οι τεχνολογίες αυτές στον εξοπλισμό λατομείου βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο, αφού ελάχιστες είναι οι εταιρείες, που έχουν προχωρήσει στο τελικό στάδιο της παραγωγής του εξοπλισμού. Παρόλα αυτά, όλες οι μεγάλες εταιρείες παραγωγής βαρέων οχημάτων (Caterpillar, Komatsu, Hyundai, Liebherr, κ.α.) βρίσκονται στο στάδιο των δοκιμών παρόμοιου εξοπλισμού.

3.7.1 Τεχνολογία κυψέλης καυσίμου υδρογόνου (fuel cell)

Ανατρεπόμενο Φορτηγό με τεχνολογία fuel cell (DUMPER)

Το Volvo HX04 αποτελεί το πρώτο αρθρωτό ανατρεπόμενο φορτηγό με καύσιμο υδρογόνο επιδιώκοντας την μείωση των εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου. Το πρωτότυπο αυτό ανατρεπόμενο φορτηγό έχει έξι τροχούς και υιοθετεί την τεχνολογία υδρογόνου-ηλεκτρικού καυσίμου που αναπτύχθηκε από την FuelCell Sweden AB. Σύμφωνα με την τεχνολογία αυτήν οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα χρησιμοποιώντας υδρογόνο και οξυγόνο από την ατμόσφαιρα – καταργώντας την ανάγκη σύνδεσης του μηχανήματος σε φορτιστή. Το ανατρεπόμενο φορτηγό με τεχνολογία fuel cell φαίνεται στην εικόνα 21 [61, 18]



Εικόνα 21: Ανατρεπόμενο φορτηγό υδρογόνου fuel cell

Το Volvo HX04 ζυγίζει 35 τόνους και μπορεί να γεμίσει με 11,7 κιλά υδρογόνου σε μόλις 7,5 λεπτά. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος απεικονίζονται στον πίνακα 28. Το ανατρεπόμενο όχημα μπορεί να λειτουργήσει για τέσσερις ώρες πριν τον ανεφοδιασμό του. Τα οχήματα με ηλεκτρικά συστήματα κίνησης κυψελών καυσίμου έχουν χρόνο λειτουργίας, αυτονομία και χρόνο τροφοδοσίας παρόμοιο με εκείνο των οχημάτων που κινούνται με κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Πίνακας 27: Τεχνικά χαρακτηριστικά ανατρεπόμενου φορτηγού Volvo HX04

ΕΙΔΟΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΙΣΧΥΣ (KW)	ΒΑΡΟΣ (KG)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (KG/H)
ΑΝΑΤΡΕΠΟΜΕΝΑ ΦΟΡΤΗΓΑ (DUMPERS)	Volvo HX04	300	35.000	3

Μονάδα παραγωγής ενέργειας κυψέλης καυσίμου (fuel cell)

Η μονάδα παραγωγής ενέργειας GEH2 100 kVA της EODen αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα γεννήτριας κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου αποτελείται από μέταλλο, γραφίτη, ηλεκτρόδια και η διεργασία της είναι χημική, (αφού μετατρέπει την χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε μοριακούς δεσμούς σε ηλεκτρική ενέργεια). Η συγκεκριμένη μονάδα παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιεί κυψέλη PEMFC (μεμβράνης πρωτονίων). Κατά την λειτουργία της φέρνει υδρογόνο μέσω της ανόδου και οξυγόνο μέσω της καθόδου. Στην πλευρά της ανόδου, τα μόρια υδρογόνου διασπώνται σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια. Τα πρωτόνια διασχίζουν τη μεμβράνη του ηλεκτρολύτη, ενώ τα ηλεκτρόνια που αδυνατούν να διέλθουν μέσω της μεμβράνης ομαδοποιούνται μέσω ενός κυκλώματος, δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα και περίσσεια θερμότητας. Στην πλευρά της καθόδου, τα πρωτόνια, τα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο συνδυάζονται και παράγουν μόρια νερού. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από μεμονωμένες κυψέλες οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν μεγαλύτερες στοίβες και με τη σειρά τους αυτές οι στοίβες μπορούν να συνδυαστούν σε μεγαλύτερα συστήματα.[65,66,67]



Εικόνα 22: Hydrogen fuel cell generator, EODev GEH2 | 100 kVA

Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 28) παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας GEH2, η οποία απεικονίζεται στην εικόνα 22.

Πίνακας 28: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννήτριας κυψελών καυσίμου υδρογόνου

ΕΙΔΟΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΙΣΧΥΣ (KW)	ΒΑΡΟΣ (KG)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (KG/H)
ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	GEH2 FUEL CELL 110 Kva	80	3.300	4.7

3.7.2. Τεχνολογία κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου (ICE)

Εκσκαφέας φορτωτής με τεχνολογία υδρογόνου ICE

Όμοια με την Volvo και η JCB αποτελεί μια εταιρεία «πρότυπο», αφού πρωτοστατεί στην ανάπτυξη μηχανημάτων που λειτουργούν με καύσιμο υδρογόνο. Ωστόσο η JCB για την μείωση του κόστους της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου υδρογόνου έχει προχωρήσει στην ανάπτυξη ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου (ICE) ο οποίος τροφοδοτεί ήδη ένα πρωτότυπο φορτωτή εκσκαφέα και τηλεσκοπικό χειριστή, αποτελώντας μια ακόμη λύση μηδενικών εκπομπών. Ο νέος κινητήρας υδρογόνου JCB έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιεί μια καινούργια τεχνολογία καύσης που αντικαθιστά το καύσιμο ντίζελ με αέριο υδρογόνο. Ως εκ τούτου, τα μηχανήματα που είναι εξοπλισμένα με κινητήρα υδρογόνου μπορούν να κάνουν ότι ακριβώς και τα

αντίστοιχα με κινητήρα ντίζελ. Ο σχεδιασμός του συγκεκριμένου κινητήρα βασίζεται στην καθιερωμένη τεχνολογία κινητήρα, αφού το καύσιμο υδρογόνου αναφλέγεται και η ισχύς παρέχεται όμοια με έναν κινητήρα ντίζελ. Στην εικόνα 23 παρουσιάζεται αντίστοιχος φορτωτής-εκσκαφέας της JCB [16]



Εικόνα 23: Φορτωτής-εκσκαφέας υδρογόνου ICE της JCB

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου εκσκαφέα-φορτωτή.

Πίνακας 29: Τεχνικά χαρακτηριστικά του εκσκαφέα φορτωτή JCB

ΕΙΔΟΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΙΣΧΥΣ (KW)	ΒΑΡΟΣ (KG)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (KG/H)
Εκσκαφέας φορτωτής	JCB backhoe loader	70	9.200	1

Μονάδες παραγωγής ενέργειας με κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου (ICE)

Η CMB.TECH έχει αναπτύξει μια μονάδα παραγωγής ενέργειας με κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου 45kVA μηδενικών εκπομπών, ικανή να εξοικονομήσει έως και 1 τόνο CO₂ ανά ημέρα (24ωρη λειτουργία), σε σύγκριση με την αντίστοιχη συμβατική γεννήτρια ντίζελ. Το υδρογόνο ως καύσιμο μπορεί να παρέχει καθαρή ενέργεια με 0,0g/kWh HC + NO_x (χωρίς CO ή CO₂) και είναι πιστοποιημένο ως μηδενικών εκπομπών, καθιστώντας το ισοδύναμο με μια κυψέλη καυσίμου, όσον αφορά τις εκπομπές ρύπων. Ως απαραίτητα μέτρα ασφαλείας υπάρχει εγκαταστημένος μέσα στον κινητήρα αισθητήρας πίεσης ικανός να ανιχνεύει τυχόν προανάφλεξη υδρογόνου και σε περίπτωση εντοπισμού της ο κινητήρας σβήνει αμέσως. Με βάση το CAPEX και το OPEX, αυτό το σετ γεννήτριας μονοκαυσίμου υδρογόνου παρέχει την πιο οικονομική λύση για μηδενικό CO₂ και φορητή ισχύ. Η γεννήτρια καυσίμου υδρογόνου έχει μεγαλύτερη αντίσταση στις ακαθαρσίες του υδρογόνου σε σύγκριση με τις κυψέλες καυσίμου. Στην εικόνα 24 παρουσιάζεται η συγκεκριμένη γεννήτρια υδρογόνου η οποία χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς για την αντικατάσταση της συμβατικής με καύσιμο το πετρέλαιο.[70,68,69]



Εικόνα 24: Μονάδα παραγωγής ενέργειας με καύσιμο υδρογόνο ICE, CMB.TECH 45 kVA

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης μονάδας καύσιμου υδρογόνου παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 30)

Πίνακας 30: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννήτριας μονοκαύσιμου υδρογόνου

ΕΙΔΟΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΙΣΧΥΣ (KW)	ΒΑΡΟΣ (KG)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (KG/H)
ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	CMB.TECH MONO FUEL 45 kVA	40	1100	3.8

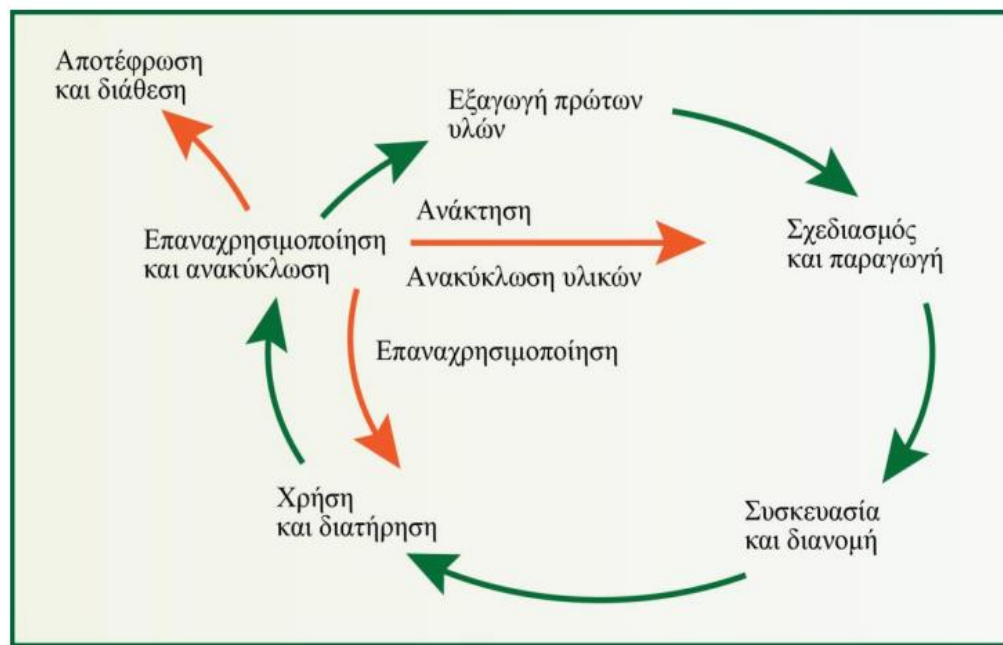
4. Η Μεθοδολογία της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής (LCA)

4.1. Εισαγωγή στην Ανάλυση του Κύκλου Ζωής

Το παγκόσμιο οικολογικό αποτύπωμα του ανθρώπου, το οποίο λαμβάνει υπόψη τη χρήση των ανθρώπινων πόρων, έχει αυξηθεί κατά 80%, με την σπανιότητα των φυσικών πόρων να αντανακλάται στην αύξηση των τιμών των πρώτων υλών και των φυσικών αγαθών. Η αύξηση της περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης, έχει οδηγήσει αρκετές βιομηχανίες και επιχειρήσεις στην αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο οι δραστηριότητές τους επηρεάζουν το περιβάλλον για αυτό και οι περισσότερες διερευνούν τρόπους ελαχιστοποίησης των επιπτώσεων τους στο περιβάλλον. Πολλές εταιρείες έχουν διαπιστώσει ότι είναι επωφελές να διερευνήσουν τρόπους για να προχωρήσουν πέρα από τη συμμόρφωση, χρησιμοποιώντας στρατηγικές πρόληψης της ρύπανσης και συστήματα περιβαλλοντικής διαχείρισης για την βελτίωση των περιβαλλοντικών τους επιδόσεων. Πλέον υπάρχουν αρκετά εργαλεία μέσω των οποίων θα μπορούσε να γίνει περιβαλλοντικός έλεγχος, αξιολόγηση και διαχείριση της περιβαλλοντικής επίδοσης, με σκοπό την μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Τα κυριότερα εργαλεία είναι ο «Καθαρός Σχεδιασμός» (clean design), η «Ανάλυση Κύκλου Ζωής» (Life Cycle Assessment), η «Βιομηχανική Οικολογία» (Industrial Ecology) και η «Παρακολούθηση Προϊόντων» (Product Stewardship). Ορισμένα από τα παραπάνω περιβαλλοντικά διαχειριστικά εργαλεία έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό για την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και την ανεύρεση λύσεων μείωσης του περιβαλλοντικού αντίκτυπου. [22],[79]

Η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), ή (Life Cycle Assessment) LCA σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία αποτελεί ένα από τα βασικότερα εργαλεία. Η αξιολόγηση του κύκλου ζωής είναι μια διαδικασία αξιολόγησης των βιομηχανικών συστημάτων και των προϊόντων "από την κούνια μέχρι το λάκκο", όπως συχνά αναφέρεται. Η αξιολόγηση αυτή αρχίζει με τη συλλογή των πρώτων υλών από τη γη για τη δημιουργία του προϊόντος και τελειώνει στο σημείο όπου όλα τα υλικά επιστρέφουν ξανά στη γη. Το LCA αξιολογεί όλα τα στάδια της ζωής ενός προϊόντος από τη σκοπιά ότι είναι αλληλοεξαρτώμενα, δηλαδή η μία λειτουργία οδηγεί στην επόμενη. Το LCA επιτρέπει την εκτίμηση της συσσωρευτικής περιβαλλοντικής επίπτωσης που προκύπτει από όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του προϊόντος, συχνά συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων που δεν λαμβάνονται υπόψη σε πιο παραδοσιακές αναλύσεις (π.χ. εξόρυξη πρώτων υλών, υλικά μεταφορά, τελική διάθεση του προϊόντος κ.λπ.), παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα των περιβαλλοντικών πτυχών του προϊόντος ή της διαδικασίας και μια πιο ακριβή εικόνα των πραγματικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την επιλογή προϊόντων και διαδικασιών. [22][80]

Για την εύκολη κατανόηση των σταδίων που λαμβάνουν χώρα κατά την ανάλυση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, παρατίθεται η ακόλουθη εικόνα (εικόνα 25), στην οποία διαφαίνεται μια σχηματική απεικόνιση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος [79]. Σημειώνεται πως για την εγκυρότητα του αποτελέσματος που λαμβάνεται από την ανάλυση του κύκλου ζωής είναι αναγκαία η σαφής καταγραφή και ο διεξοδικός έλεγχος όλων των σταδίων ζωής του προϊόντος.



Εικόνα 25: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος

4.2. Ανάλυση Κύκλου Ζωής – Πρότυπα ISO

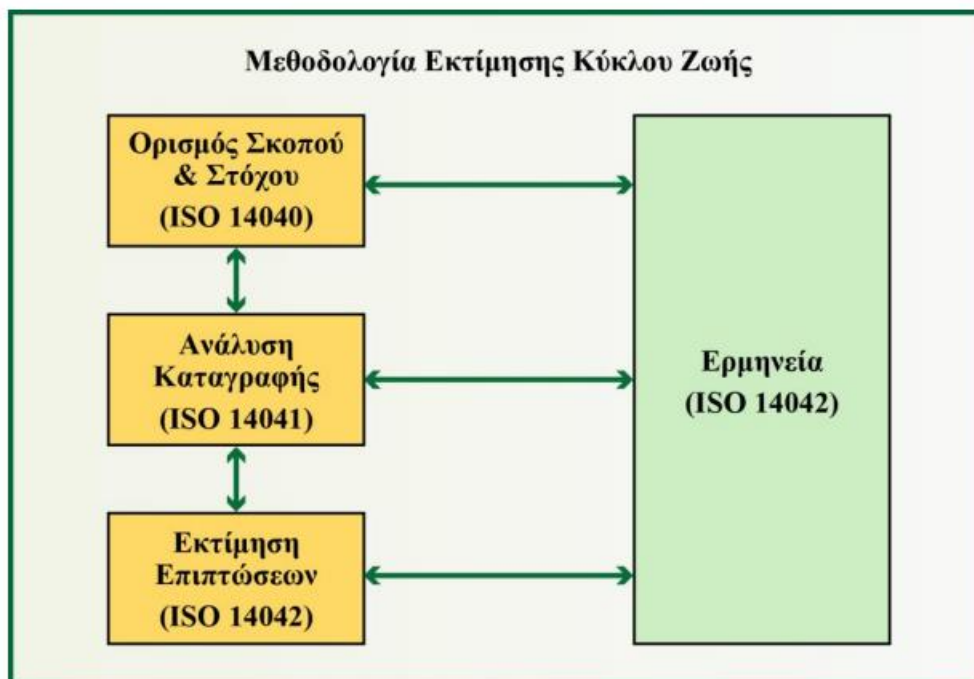
Επί χρόνια με σκοπό την αντικειμενικότερη προσέγγιση του μεθοδολογικού πλαισίου της ανάλυσης LCA έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές προσπάθειες, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλών διαφορετικών κατευθυντήριων γραμμών. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης ISO (International Standardization Organization) για την προσέγγιση αυτήν έχει δημιουργηθεί μια σειρά πρωτοτύπων ISO, που αποτελούν τη σειρά ISO 14040 (και είναι ειδικότερα τα ISO 14040, 14041, 14042, 24043). Η συγκεκριμένη σειρά περιγράφεται αναλυτικότερα με την ανάπτυξη του αντίστοιχου μεθοδολογικού πλαισίου. Η διαδικασία ανάλυσης κύκλου ζωής LCA είναι μια συστηματική, σταδιακή προσέγγιση και αποτελείται από τέσσερις συνιστώσες. Το συγκεκριμένο μεθοδολογικό πλαίσιο της ανάλυσης απεικονίζεται και στο ακόλουθο σχήμα (εικόνα26):

1) Ορισμός σκοπού και στόχου (Goal and scope definition – ISO 14040): Αφορά τον καθορισμό και την περιγραφή των προϊόντων, τη διαδικασία ή τη δραστηριότητα. Καθορίστε το πλαίσιο όπου πρόκειται να γίνει η αξιολόγηση και προσδιορίστε τα όρια και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που πρέπει να εξεταστούν για την σωστή αξιολόγηση. [54]

2) Ανάλυση καταγραφής δεδομένων (LCI, Life Cycle Inventory – ISO 14041) : Προσδιορίστε και ποσοτικοποιήστε την ενέργεια, το νερό των υλικών και τις περιβαλλοντικές εκλύσεις (π.χ. αέρας εκπομπές, διάθεση στερεών αποβλήτων, απορρίψεις λυμάτων).

3) Εκτίμηση επιπτώσεων (LCIA, Life Cycle Impact Assessment – ISO 14042): Αξιολόγηση των πιθανών ανθρώπινων και οικολογικών επιπτώσεων από τη χρήση ενέργειας, νερού και υλικών και τις περιβαλλοντικές εκλύσεις που προσδιορίζονται κατά την ανάλυση απογραφής.

4) Ερμηνεία (Interpretation – ISO 14042): Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της απογραφής ανάλυσης και της εκτίμησης επιπτώσεων για την επιλογή των προτιμώμενων προϊόντων και της διαδικασίας με σαφή κατανόηση των αβεβαιοτήτων και των παραδοχών που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 26: Μεθοδολογικό πλαίσιο της ανάλυσης κύκλου ζωής

4.2.1. Ορισμός του σκοπού και του στόχου (Goal & Scope definition)

Ο καθορισμός του στόχου και του σκοπού αποτελεί το πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας κατά την εκτίμηση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, μιας διαδικασίας ή μιας δραστηριότητας. Αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στάδια της μεθοδολογίας λόγω των παραγόντων που προσδιορίζονται, οι οποίοι είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για την έκβαση της μελέτης. Πρέπει να σημειωθεί πως ο στόχος και ο σκοπός της ανάλυσης, λόγω των νέων πληροφοριών που προστίθενται κατά την διεξαγωγή της μελέτης LCA υφίσταται συνεχώς αναθεώρηση και βελτίωση. Ειδικότερα οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν:

Σκοπός: Κατά τον ορισμό του σκοπού, ορίζονται όλα τα στοιχεία που συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση κύκλου ζωής και το είδος της μεθόδου εκτίμησης που επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί, ενώ ταυτόχρονα θέτει τα όρια της εκτίμησης του κύκλου ζωής. [79]

Στόχος: Κατά τον στόχο της μελέτης, δηλώνεται ακριβώς η επιδιωκόμενη εφαρμογή της, συμπεριλαμβανομένων των αιτίων που λαμβάνει χώρα η μελέτη, καθώς και το πλήθος των ενδιαφερόμενων, στους οποίους και απευθύνεται η συγκεκριμένη ανάλυση. Επιπλέον, μέσω του στόχου, ορίζεται η μελλοντική χρήση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν, καθώς και οι χρήστες που θα τα αξιοποιήσουν. [79]

Λειτουργική μονάδα: Ως λειτουργική μονάδα καθορίζεται η μονάδα αναφοράς, μέσω της οποίας γίνεται η κανονικοποίηση των δεδομένων που εισάγονται και εξάγονται στο σύστημα. Η συγκεκριμένη μονάδα ορίζει την κλίμακα για τη μετρίσιμη σύγκριση των προϊόντων (δύο ή περισσότερων). Για παράδειγμα με την σύγκριση δύο συσκευασιών για αναψυκτικά, η λειτουργική μονάδα ορίζεται ως «η ποσότητα της συσκευασίας που απαιτείται για ένα συγκεκριμένο όγκο ποτού». Έτσι, μια ορθά ορισμένη λειτουργική μονάδα είναι απαραίτητη για την διασφάλιση της συγκρισιμότητας των αποτελεσμάτων. [79][24][23]

Όρια συστήματος: Ο ρόλος των ορίων του συστήματος είναι να καθορίζουν τις συγκεκριμένες διεργασίες-λειτουργίες που θα ληφθούν υπόψη κατά την ανάλυση. Επίσης, καθορίζονται οι εισροές και εκροές κατά την εκτίμηση του κύκλου ζωής των υπό μελέτη προϊόντων, διεργασιών ή μιας δραστηριότητας. Τέτοια όρια μπορεί να είναι: όρια τεχνόσφαιρας (προκύπτουν από την ανθρώπινη δραστηριότητα), όρια οικόσφαιρας (δεν οφείλονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα), καθώς και χρονικά ή γεωγραφικά όρια. [79]

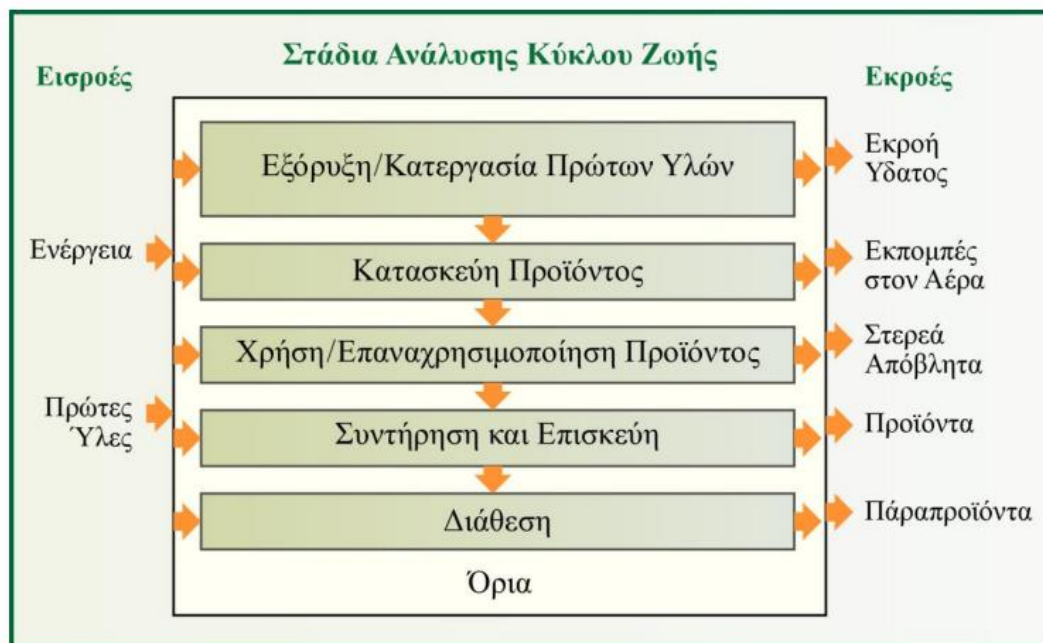
Ποιότητα δεδομένων: Η ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην μελέτη αντικατοπτρίζει και την ποιότητα των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται και κατ' επέκταση την ποιότητα της μελέτης LCA. [79]

Διαδικασία κριτικής επισκόπησης: Πραγματοποιείται με σκοπό την επιβεβαίωση της ποιότητας της μεθόδου LCA. [79]

4.2.2. Ανάλυση της καταγραφής των δεδομένων του συστήματος (Life Cycle Inventory, LCI)

Η δεύτερη φάση της μεθοδολογίας για την δημιουργία μια μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής ενός προϊόντος, μιας διαδικασίας ή δραστηριότητας (ΑΚΖ), συνεχίζεται με την ανάλυση της απογραφής όλων των διαθέσιμων δεδομένων. Αναλυτικότερα αυτό το στάδιο της ανάλυσης περιλαμβάνει τα ακόλουθα θέματα:

Συλλογή δεδομένων: Το στάδιο της ανάλυσης, απογραφή δεδομένων, περιλαμβάνει τη συλλογή και επεξεργασία όλων των απαραίτητων δεδομένων με σκοπό την ποσοτικοποίηση των εισροών και εκροών ενός συστήματος. Η συλλογή των δεδομένων αποτελεί μια από τις πιο χρονοβόρες και κρίσιμες διαδικασίες της μελέτης, γι αυτό και απαιτεί ηλεκτρονική βάση για την καταγραφή και επεξεργασία των δεδομένων για την αποφυγή πιθανών λαθών. Η ορθή συλλογή των δεδομένων συνεπάγεται της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Αναλυτικά, κατά το στάδιο αυτό, προσδιορίζονται τα στάδια του κύκλου ζωής, τα οποία απεικονίζονται και στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 27) και είναι: η απόκτηση/επεξεργασία των πρώτων υλών, η βιομηχανική επεξεργασία αυτών και η δημιουργία προϊόντος, η χρήση και ανακύκλωση του, ενώ τέλος η απόθεσή του. Έπειτα, πραγματοποιείται η συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων για την ποσοτικοποίηση των εισροών και εκροών του συστήματος. Οι εισροές περιλαμβάνουν τις πρώτες ύλες και την ενέργεια που θα δαπανηθεί, ενώ οι εκροές περιλαμβάνουν: τα προϊόντα, τα στερεά απόβλητα, τους αέριους ρύπους, τα υγρά απόβλητα καθώς και την απόβλητη ενέργεια. [79]



Εικόνα 27: Διάγραμμα ροής ενός προϊόντος

Επανακαθορισμός των ορίων του συστήματος: Μετά το στάδιο της συλλογής των δεδομένων που θα λάβουν χώρα στην ανάλυση, μπορεί με την προσθήκη νέων

δεδομένων να χρειαστεί να γίνει επανακαθορισμός των ορίων που είχαν καθοριστεί στο πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας. [79]

Αναφορά δεδομένων: Τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν κατά την ανάλυση της απογραφής, δίνονται στο ανάλογο κοινό το οποίο καλείται να υποβάλει το μέρος των δεδομένων που χρίζει βελτίωση ή διαφοροποίηση. [79], [81]

Συσχέτιση δεδομένων: Μετά την συλλογή των τελικών δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν στην μελέτη ανάλυσης του κύκλου ζωής, τα δεδομένα αυτά ανάγονται στην λειτουργική μονάδα που έχει οριστεί στο πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας (ορισμός του σκοπού και του στόχου). [79]

Κατανομή επιπτώσεων και ανακύκλωση: Σε ένα περίπλοκο σύστημα, κατά την μελέτη της ΑΚΖ η εκτίμηση όλων των δυνατών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των επιμέρους συστατικών του και των εκροών εντός των ορίων του συστήματος, μπορεί να είναι αδύνατη. Για τον λόγο αυτόν, συχνά απαιτείται η επιλογή μόνο των σημαντικότερων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των συστατικών και των εκροών του συστήματος. [79][81]

4.2.3. Εκτίμηση των επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)

Η εκτίμηση των επιπτώσεων (impact assessment), αποτελεί το τρίτο στάδιο της μεθοδολογίας της μελέτης ΑΚΖ. Κατά την εκτίμηση των επιπτώσεων, αναφέρονται και χαρακτηρίζονται (ως θετικές ή αρνητικές) οι επιπτώσεις που προκαλούνται στο περιβάλλον από το υπό εξέταση σύστημα. Για την σωστή και έγκυρη εκτίμηση των επιπτώσεων πρέπει να έχει γίνει σωστή συλλογή των δεδομένων, κατά το στάδιο απογραφής των δεδομένων. Τα στάδια που περιγράφουν την εκτίμηση των επιπτώσεων είναι τα εξής:

Επιλογή της μεθόδου και των κατηγοριών επιπτώσεων: Πριν τον ορισμό των κατηγοριών που εξετάζονται μεταξύ των επιπτώσεων θα πρέπει να γίνει η επιλογή της ανάλογης μεθόδου. Πιο συγκεκριμένα, η εκτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μπορεί να γίνει μέσω κατηγοριών ενδιάμεσου (midpoint) ή και τελικού σημείου (endpoint). Οι επιπτώσεις που εντάσσονται στις κατηγορίες ενδιάμεσου σημείου, οφείλονται σε διαφορετικές κατηγορίες, ενώ αυτές που εντάσσονται στις κατηγορίες τελικού σημείου ταξινομούνται σε 3 επίπεδα αντίκτυπων:

- 1) Επιπτώσεις πάνω στην ανθρώπινη υγεία
- 2) Επιπτώσεις στο οικοσύστημα (ως προς την δομή και την λειτουργία του)
- 3) Επιπτώσεις φυσικών πόρων (αφορά την εξάντληση τους)

Η μέθοδος ILCD 2011 Midpoint+ είναι η τρέχουσα μέθοδος που έχει προταθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση για τον χαρακτηρισμό του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος ενός Προϊόντος (EUPEF), ενώ οι κατηγορίες που εξετάζει η συγκεκριμένη μέθοδος είναι οι εξής [26],[25]:

- 1) Κλιματική αλλαγή (Climate change)
- 2) Καταστροφή του όζοντος (Ozone depletion)
- 3) Τοξικότητα στον άνθρωπο- καρκινογόνες επιδράσεις (Human toxicity)
- 4) Τοξικότητα για τον άνθρωπο -μη καρκινογόνες επιδράσεις (Human toxicity)
- 5) Αιωρούμενα σωματίδια (Particulate matter)
- 6) Ιονίζουσα ακτινοβολία (Ionising radiation)
- 7) Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος (Photochemical ozone formation)
- 8) Ευτροφισμός - επίγειος (Eutrophication)
- 9) Ευτροφισμός – υδάτινος (Eutrophication)
- 10) Οξίνιση (Acidification)
- 11) Οικοτοξικότητα για καθαρά υδατικά συστήματα (Exotoxicity)
- 12) Εξάντληση πόρων- νερό (Depletion of sources)
- 13) Εξάντληση πόρων - ορυκτά, μεταλλεύματα (Depletion of sources)
- 14) Μετασχηματισμός της γης

Κατηγοριοποίηση: Κατά το στάδιο αυτό πραγματοποιείται η κατηγοριοποίηση των δεδομένων εισροής και εκροής του συστήματος στις ανάλογες κατηγορίες επιπτώσεων, βάσει της επιστημονικής ανάλυσης των σχετικών περιβαλλοντικών διαδικασιών. [79][81]

Χαρακτηρισμός: Στο συγκεκριμένο στάδιο πραγματοποιείται η διαμόρφωση (χαρακτηρισμός) όλων των κατηγοριών υπό την μορφή δεικτών. Έπειτα δημιουργείται μια βάση δεδομένων για το σύνολο των εισροών και εκροών της κάθε επιμέρους κατηγορίας. Με την χρήση των δεικτών αυτών διαφαίνεται ευκολότερα και αποτελεσματικότερα η συνολική θετική ή αρνητική μεταβολή των εισροών και εκροών στην κάθε κατηγορία που βρίσκεται υπό εξέταση. [79] [81]

Εκτίμηση/Αξιολόγηση: Το βήμα αυτό αποσκοπεί στην ορθή αξιολόγηση ή και στην συνάθροιση των επιμέρους αποτελεσμάτων διαφορετικών κατηγοριών επιπτώσεων που αφορούν την εκτίμηση των επιδράσεων των κύκλων ζωής, με σκοπό την έκθεση του αντίστοιχου ποσοστού σημαντικότητας των ποικίλων αυτών αποτελεσμάτων. [79]

4.2.3. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Interpretation)

Η αξιολόγηση και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα 3 παραπάνω στάδια της μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής, αποτελεί το τέταρτο και τελευταίο στάδιο της μεθοδολογίας. Σε αυτό το στάδιο εντοπίζονται, ελέγχονται, ποσοτικοποιούνται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το στάδιο της εκτίμησης των επιπτώσεων, ενώ ταυτόχρονα ερμηνεύονται και συνοψίζονται όλα τα αποτελέσματα των παραπάνω σταδίων. Τα στάδια που περιγράφουν την ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι τα εξής:

Αναγνώριση των περιβαλλοντικά σημαντικών θεμάτων: Κατά το στάδιο αυτό γίνεται άντληση πληροφοριών από την φάση της καταγραφής των δεδομένων ή από την φάση της εκτίμησης των επιπτώσεων της μελέτης, και στην συνέχεια ορίζονται τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά ζητήματα, σύμφωνα με τον αρχικό καθορισμό του στόχου και του σκοπού της ανάλυσης κύκλου ζωής. [79][81]

Αξιολόγηση: Στο βήμα αυτό, πραγματοποιείται αξιολόγηση όλων των αποτελεσμάτων της μελέτης LCA, δηλαδή γίνεται έλεγχος ακρίβειας όλων των υπολογισμών, έλεγχος συνέπειας και πληρότητας, ανάλυση συμβολής, ανάλυση διαταραχής και ανάλυση αβεβαιότητας. Με τον τρόπο αυτόν επιβεβαιώνεται η αξιοπιστία του αποτελέσματος της μελέτης, καθώς και τα κύρια περιβαλλοντικά ζητήματα που ταυτοποιήθηκαν κατά τον ορισμό του σκοπού και του στόχου. [79][81]

Συμπεράσματα και προτάσεις: Τέλος στο βήμα αυτό και έπειτα από το στάδιο της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων εξάγονται τα βασικά συμπεράσματα και παρατίθενται προτάσεις με σκοπό την μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. [79][81]

4.3. Πλεονεκτήματα της ανάλυσης κύκλου ζωής και περιορισμοί

Οι μελέτες ανάλυσης κύκλου ζωής παρουσιάζουν εκθετική ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία. Η ανάπτυξη αυτή οφείλεται στο πλήθος των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που οφείλονται στην μελέτη LCA κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά αλλαγές με σκοπό την βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος: αναγνωρίζονται ευκαιρίες για την βελτίωση των διαδικασιών και των προϊόντων, γίνεται η σύγκριση και η καταγραφή των αποτελεσμάτων της απόδοσης μεταξύ των εναλλακτικών και των προϋπαρχόντων διαδικασιών, προϊόντων και τεχνολογιών. Ακόμη, επιτρέπεται η εκτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μιας διαδικασίας ή ενός προϊόντος. Από την άλλη, η δεύτερη κατηγορία των πλεονεκτημάτων αφορά την βελτίωση της επικοινωνίας μεταξύ του πλήθους των ενδιαφερόμενων, είτε μέσω της παροχής ποσοτικής πληροφόρησης στις ενδιαφερόμενες ομάδες, είτε μέσω της ανάπτυξης σχέσεων εμπιστοσύνης και της δημιουργίας ενός παραγωγικότερου πλαισίου επικοινωνίας με την ευρύτερη κοινωνία.

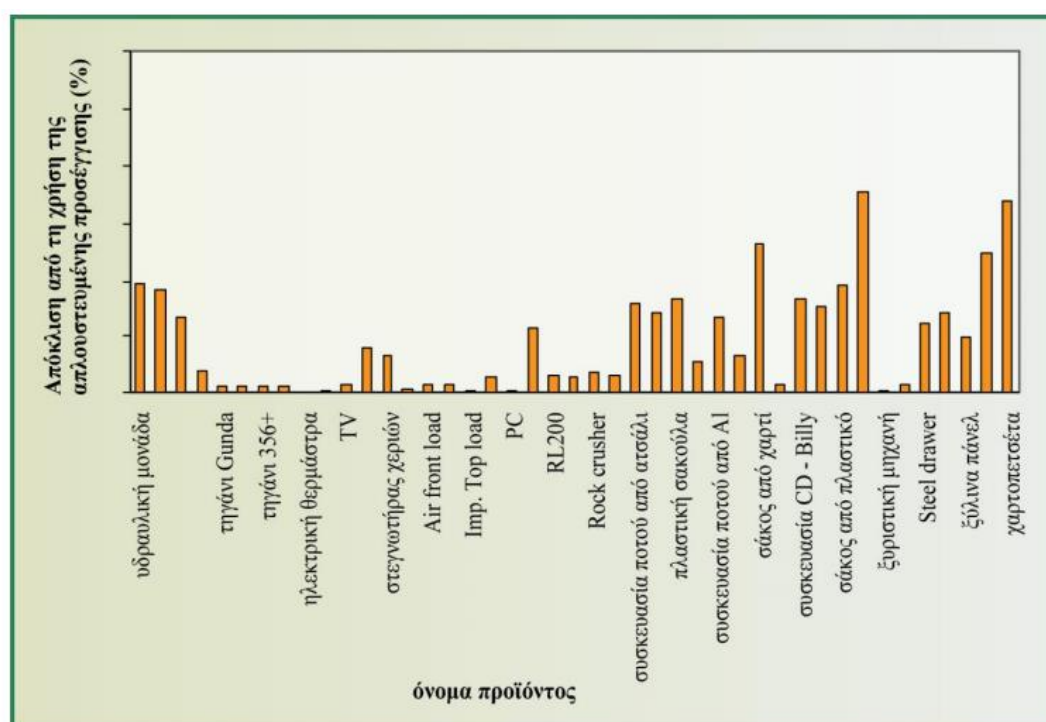
Οι περιορισμοί της μεθόδου LCA θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, ενώ οφείλονται κυρίως, στους παρακάτω παράγοντες [82]

- Η ανεπαρκής ποιότητα δεδομένων της LCI φάσης, η οποία, για παράδειγμα, μπορεί να έχει προκληθεί από αβεβαιότητες ή διαφορές στις διαδικασίες ανάθεσης και σύνθεσης
- Αδυναμία αναγνώρισης των χωρικών και χρονικών επιδράσεων, εισάγει την αβεβαιότητα στα αποτελέσματα της LCIA.
- Αδυναμία συνυπολογισμού των μηχανισμών αγοράς και των δευτερογενών αποτελεσμάτων της τεχνολογικής ανάπτυξης,
- Αναγνώριση όλων των διαδικασιών ως γραμμικών, αναφορικά με τον οικονομικό και περιβαλλοντικό τομέα.
- Ορισμός μίας σειράς τεχνικών θεωρήσεων και υποκειμενικών επιλογών,
- Αδυναμία αντικατάστασης ή τροποποίησης της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.
- Αναφορικά με την επιλογή των κατηγοριών επίδρασης, υπάρχουν ποικίλες πρακτικές δυσκολίες που σχετίζονται με την έλλειψη προτυποποίησης σε διάφορες κατηγορίες επίδρασης που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία της LCA
- Ένα ακόμη πιθανό στοιχείο που μπορεί να επηρεάσει το επίπεδο εμπιστοσύνης των LCA αποτελεσμάτων για τη λήψη αποφάσεων είναι αν ο ερευνητής της LCA θα επιλέξει ενδιάμεσες (midpoint) ή τελικές/βλαβών (endpoint) κατηγορίες επίδρασης.

4.4. Εφαρμογές της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής και κύρια λογισμικά

4.4.1. Εφαρμογές της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Η μεθοδολογία της ανάλυσης του κύκλου ζωής έχει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογής, αφού η συγκεκριμένη μέθοδος έχει εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία στο χαρτί, στο γυαλί, στο ξύλο, στα μέταλλα, στα απορρυπαντικά, στο ελαιόλαδο, στο ψωμί, στα πολυμερή, στο φυσικό αέριο, στα διάφορα προϊόντα πετρελαίου κ.α. Το μεγάλο πεδίο εφαρμογής της ΑΚΖ απεικονίζεται και στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 28), όπου απεικονίζεται ο αριθμός χαρακτηριστικών εφαρμογών ΑΚΖ για τα διάφορα προϊόντα.



Εικόνα 28: Εφαρμογές της μεθόδου LCA σε διάφορα προϊόντα

Ανάλογα με είδος της εφαρμογής της μεθόδου ΑΚΖ, μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στην δημόσια και την ιδιωτική. Αρχικά, οι μελέτες ΑΚΖ που κατατάσσονται σε δημόσια εφαρμογή επιτελούνται από τις δημόσιες υπηρεσίες με σκοπό την ανάπτυξη και την υποστήριξη της περιβαλλοντικής νομοθεσίας και των αντίστοιχων περιβαλλοντικών κανονισμών. Για την εδραίωση ορθών κριτηρίων για τους περιβαλλοντικούς φόρους, αλλά ακόμη και για την ενημέρωση των καταναλωτών. Σταδιακά όλο και πιο θετική είναι η στάση του δημοσίου στις μελέτες ανάλυσης κύκλου ζωής, δίνοντας πολλές προοπτικές σε πιθανά μελλοντικά σενάρια επιβολής των συγκεκριμένων μελετών ΑΚΖ για τη λήψη περιβαλλοντικών αποφάσεων που αφορούν ολόκληρη την κοινωνία. [79][81]

Επιπρόσθετα, η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει πεδίο εφαρμογής και σε ιδιωτικό επίπεδο, αφού μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις βιομηχανίες και τις επιχειρήσεις ανεξαρτήτως του αντικειμένου ενασχόλησής τους. Τα συμπεράσματα που

λαμβάνονται από την συγκεκριμένη μέθοδο για τα προϊόντα της κάθε επιχείρησης μπορούν να βοηθήσουν με ποικίλους τρόπους. Αρχικά, μπορούν να λάβουν πληροφορίες για την πρώτη ύλη που προμηθεύονται και στην συνέχεια να ωθήσουν τους προμηθευτές τους να ενεργήσουν με τρόπο φιλικότερο προς το περιβάλλον εδραιώνοντας έτσι μια αξιόπιστη περιβαλλοντική πολιτική για την επιχείρηση. Έπειτα, έχοντας μια νέα φιλικότερη περιβαλλοντική ταυτότητα η επιχείρηση μπορεί να υποστηρίξει την καλύτερη παραγωγή των προϊόντων τους και την προώθησή τους σε νέες αγορές. [81]

4.4.2. Λογισμικά διεξαγωγής Αναλύσεων Κύκλων Ζωής

Για την διεξαγωγή μελετών ανάλυσης κύκλου ζωής έχει αναπτυχθεί ένα μεγάλο σύνολο λογισμικών LCA. Μερικά από αυτά είναι: Boustead (Europe), CLEAN (U.S.), CUMPAN (Germany), EcoAssessor (UK), EcoManager (Europe/U.S.), ECONTROL (Switzerland), EcoPack2000 (Switzerland), EcoPro (Switzerland), EcoSys (U.S.), EDIP (Denmark), EMIS (Switzerland), EPS (Sweden), GaBi (Germany), Heraklit (Germany), IDEA (Europe), KCL-ECO (Finland), LCA1 (Europe), LCAD (U.S.), LCAIT (Sweden), LCASys (Netherlands), LIMS (U.S.), LMS Eco-Inv. Tool (Austria), Oeko-Base II (Switzerland), PEMS (Ave. European), PIA (Europe), PIUSSOECOS (Germany), PLA (Denmark), REGIS (Switzerland), REPAQ (U.S.), SimaPro (Netherlands), SimaTool (Netherlands), Simbox (Switzerland), TEAM (Europe/U.S.), TEMIS (Europe), TetraSolver (Europe), Umberto (Germany), Umcon (Germany), Ökobilanz von Packstoffen (Switzerland). [81]

Ωστόσο, τα δημοφιλέστερα και πιο εύχρηστα λογισμικά διεξαγωγής μελετών LCA σύμφωνα με τον βαθμό χρήσης τους είναι το Gabi, το SimaPro και το OpenLCA.

4.5. Επιλογή του λογισμικού Gabi για την μελέτη LCA

Για την πραγματοποίηση της μελέτης Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής LCA χρησιμοποιήθηκε ένα εμπορικά διαθέσιμο υπολογιστικό πακέτο, το Gabi που είναι ένα από τα κορυφαία προγράμματα λογισμικού τόσο για τη βιομηχανία όσο και για τον ακαδημαϊκό κόσμο, διεθνώς αναγνωρισμένο και αρκετά αξιόπιστο. Το λογισμικό GaBi LCA (Life Cycle Assessment) αποτελεί ένα ισχυρό λογισμικό που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων διαφόρων προϊόντων, τεχνολογιών, υπηρεσιών, δραστηριοτήτων και συστημάτων που μπορούν να πραγματοποιήσουν οι χρήστες με το GaBi Life Cycle Costing (LCC) και το Life Cycle Working Environment (LCWE). Το λογισμικό έχει καλή δυνατότητα εισαγωγής και εξαγωγής έργων και δεδομένων Αποθέματος Κύκλου Ζωής (LCI). Το πιο σημαντικό σημείο του Gabi είναι ότι υπάρχει μια τεράστια βάση δεδομένων με δεδομένα του Life Cycle Inventory (LCI) σε διάφορους κλάδους, όπως ηλεκτρονικά, χημικά, πλαστικά και κατασκευές, εκτός από τη δημοφιλή βάση δεδομένων ecoinvent, σε αντίθεση με άλλες λύσεις λογισμικού.[21] Το δεύτερο είναι, το φιλικό προς το χρήστη γραφικό περιβάλλον GUI, αφού οι χρήστες μπορούν να περιηγηθούν στα πολλά μέρη και τις λειτουργίες του λογισμικού λόγω της φιλικής προς το χρήστη διεπαφής του. Ακόμη ο χρήστης μπορεί εύκολα να μοντελοποιεί και να βλέπει τη διαδικασία μοντελοποίησης με οπτικοποιημένο τρόπο, δηλαδή οι χρήστες μπορούν να σχεδιάσουν μοναδικές αναφορές που μπορούν να αντιπαραβάλουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις με μια δημιουργία αναφορών κατασκευής που ονομάζεται "i-Report".[20] Το λογισμικό αυτό λόγω της ευκολίας του ως προς την χρήση έχει ένα ευρύ πλήθος χρηστών, αφού χρησιμοποιείται από μικρές επιχειρήσεις, μεγάλες εταιρείες και άλλους διάφορους οργανισμούς. Το Gabi επιτρέπει στους χρήστες να αξιολογούν γρήγορα και αποτελεσματικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επίσης το συγκεκριμένο λογισμικό συνοδεύεται από ένα σύνολο εργαλείων σε μια δυνατότητα που ονομάζεται «Gabi Analyst», χάρις την οποία ο τελικός χρήστης μπορεί να εκτελέσει διάφορες αναλύσεις όπως: ανάλυση monte calo, ανάλυση ευαισθησίας, ανάλυση σεναρίων κ.α.. Τέλος το Gabi προσφέρει στον χρήστη την δυνατότητα παραλλαγής παραμέτρων, δηλαδή επιτρέπει στον χρήστη να αλλάζει τις αριθμητικές τιμές των υλικών και της ενέργειας με τοπικές και καθολικές παραμέτρους.[21]

5. Μεθοδολογία και Υπολογιστική Διαδικασία

5.1. Καθορισμός στόχων και ανάλυση μεθοδολογίας

5.1.1. Σκοπός της μελέτης

Σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής είναι η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του ενεργειακού συστήματος κατά την ετήσια λειτουργία του λατομείου στον Βώλακα, που αντιστοιχεί σε παραγωγή 30.000m³ ογκομαρμάρων. Στόχος της ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός του περιβαλλοντικού αντικτύπου της διεργασίας αυτής και ο προσδιορισμός των παραμέτρων και των ενδιάμεσων διεργασιών που επιδρούν σημαντικά στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Επιπλέον, αναλύεται η δυνατότητα περιβαλλοντικής βελτιστοποίησης μέσω αντικατάστασης των ορυκτών καυσίμων με πράσινο υδρογόνο, με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού.

5.1.2. Καθορισμός λειτουργικής μονάδας αναφοράς

Η λειτουργική μονάδα που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής του συστήματος, είναι η ετήσια λειτουργία του λατομείου στον Βώλακα, που αντιστοιχεί σε παραγωγή 30.000m³ ογκόλιθων μαρμάρου. Επιλέχθηκε ως μονάδα αναφοράς το έτος και γίνεται αναγωγή στη μονάδα του τελικού προϊόντος, ώστε να δοθεί μία αντιπροσωπευτική εικόνα των συνολικών εκπομπών του ενεργειακού συστήματος ενός λατομείου μέσου μεγέθους, το οποίο και είναι το κύριο παραγωγικό μοντέλο στη χώρα.

5.1.3. Καθορισμός των ορίων του συστήματος

Η μελέτη αυτή περιλαμβάνει από τη γέννηση στην πύλη 30.000m³ ογκόλιθων μαρμάρου, αναλύοντας αποκλειστικά τις εκπομπές που προέρχονται από τις ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις της παραγωγικής μονάδας, είτε προέρχεται από το δίκτυο ηλεκτροδότησης ή από τη χρήση άλλων πηγών (ορυκτά ή και εναλλακτικά καύσιμα).

5.1.4. Καθορισμός σεναρίων

Τα σεναρία που καθορίστηκαν για τη διεξαγωγή της μελέτης ΑΚΖ είναι τρία. Στο πρώτο σενάριο αναλύεται η παρούσα κατάσταση με κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, με ταυτόχρονη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων για τη λειτουργία δύο βασικών τύπων εξοπλισμού: βαρέων οχημάτων-εξοπλισμού επεξεργασίας μαρμάρου και ηλεκτροπαραγωγών ζευγών. Στο δεύτερο σενάριο αντικαταστάθηκε ο εξοπλισμός με αντίστοιχο εξοπλισμό κυψελών καυσίμου και το τρίτο με εξοπλισμό εσωτερικής καύσης πράσινου υδρογόνου. Οι καταναλώσεις υδρογόνου υπολογίστηκαν σε κοινή μονάδα βάσης ως προς την τελική ενέργεια ανά κατηγορία εξοπλισμού που ζητήθηκε για την ετήσια λειτουργία του λατομείου.

5.2. Υπολογισμός καταναλώσεων για την μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής του λατομείου

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό του περιβαλλοντικού αποτυπώματος λατομείου που χρησιμοποιεί συμβατικό μηχανοκίνητο εξοπλισμό, μονάδα παραγωγής ενέργειας πετρελαίου αλλά και υποσταθμού μέσης τάσης, για την κάλυψη όλων των ενεργειακών αναγκών και την άρτια λειτουργία της, απεικονίζεται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 31). Για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων θα υπολογιστούν οι συνολικές εκπομπές CO₂ που παράγονται συνολικά σε ένα έτος λειτουργίας. Ο υπολογισμός αυτός θα πραγματοποιηθεί μέσω μια μελέτης LCA, από το λογισμικό Gabi χρησιμοποιώντας τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα. Για την κατασκευή του συγκεκριμένου πίνακα ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Αρχικά δόθηκαν από την υπό μελέτη εταιρία τα ακριβή στοιχεία για τις ώρες λειτουργίας (h), τα λίτρα καυσίμου κατανάλωσης (lt) και τις τιμές της μέσης κατανάλωσης σε lt/h για όλον τον εξοπλισμό της εταιρείας. Στην συνέχεια βρέθηκε η υπάρχουσα ισχύς λειτουργίας του κάθε μηχανήματος. Έπειτα πολλαπλασιάζοντας την ισχύ (kw) με τις ώρες (h) λειτουργίας του κάθε μηχανήματος υπολογίστηκαν οι KWh του κάθε μηχανήματος. Προσθέτοντας όλες τις KWh των μηχανημάτων υπολογίζονται οι συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις σε KWh (7.143.983,2 kwh) για την λειτουργία του μηχανοκίνητου εξοπλισμού σε ένα έτος. Οι αντίστοιχες ετήσιες KWh για την μονάδα παραγωγής ενέργειας (γεννήτρια πετρελαίου) υπολογίστηκαν ως 627.900kwh, ενώ του υποσταθμού μέσης τάσης ως 1.406.397,51 kwh. Στην συνέχεια διαιρώντας τα συνολικά ετήσια λίτρα καυσίμου κατανάλωσης με τις αντίστοιχες ετήσιες KW των μηχανημάτων, υπολογίζεται η μέση κατανάλωση σε λίτρα ανά κιλοβατώρα $[(632.210 \text{ (lt)} / 7.143.983,2 \text{ (kwh)}) = 0,0885 \text{ (lt/kwh)}]$. Η αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό όλων των μέσων καταναλώσεων που προβάλλονται στον πίνακα. Ωστόσο όσων αφορά τον μηχανοκίνητο εξοπλισμό και τις μονάδες παραγωγής υδρογόνου οι ετήσιες καταναλώσεις σε Kg ήταν άγνωστες, αφού το συγκεκριμένο κομμάτι αποτελεί μια μελλοντική εναλλακτική. Έχοντας λοιπόν την ισχύ των μηχανημάτων υδρογόνου που επιλέχθηκαν καθώς και τις αντίστοιχες ενεργειακές απαιτήσεις σε kwh του συμβατικού εξοπλισμού, υπολογίστηκαν οι απαιτούμενες ώρες (h) που θα χρειαστεί να λειτουργήσει ο εξοπλισμός υδρογόνου ώστε να καλύψει τις απαιτήσεις αυτές. Στην συνέχεια έχοντας τις ετήσιες ώρες καθώς και τις μέσες καταναλώσεις του εξοπλισμού υδρογόνου σε kg/h (σύμφωνα με τα εργοστασιακά δεδομένα) υπολογίστηκαν τα συνολικά ετήσια κιλά (kg) υδρογόνου που χρειάζονται. Τέλος διαιρώντας τα ετήσια κιλά υδρογόνου (kg) με τις αντίστοιχες kwh, προκύπτει η μέση κατανάλωση κιλών ανά κιλοβατώρα (kg/kwh). Η συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιήθηκε για όλον τον εξοπλισμό, τα αποτελέσματα της οποίας αναγράφονται στον πίνακα 31.

Πίνακας 31: Μέσες καταναλώσεις (Lt-KG)/KWh όλου του εξοπλισμού

Τύπος Μηχανήματος	Μέση κατανάλωση (Lt-KG)/KWh	Συνολικές ετήσιες καταναλισκόμενες KWh	Συνολικά ετήσια (lt-kg) που καταναλώθηκαν	Ετήσιες KWh δικτύου παροχής ενέργειας
Μηχανοκίνητος εξοπλισμός πετρελαίου	0,0885	7.143.983,2	632.210	1.406.397,51
Μονάδα παραγωγής ενέργειας πετρελαίου	0,0416	627.900	26.121	1.406.397,51
Μηχανοκίνητος εξοπλισμός κυψέλης καυσίμου υδρογόνου	0,0119	7.143.983,2	85.047,4	1.406.397,51
Μονάδα παραγωγής ενέργειας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου	0,0588	627.900	36.889,1	1.406.397,51
Μηχανοκίνητος εξοπλισμός υδρογόνου (ICE)	0,0299	7.143.983,2	213.605,9	1.406.397,51
Μονάδα παραγωγής ενέργειας υδρογόνου (ICE)	0,095	627.900	59.650,5	1.406.397,51

5.3. Κύριες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μελέτης (AKZ)

Στην ενότητα 4.2.3 έγινε η γενική περιγραφή του 3^{ου} βήματος της μεθοδολογίας ανάλυσης κύκλου ζωής. Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η εκτίμηση των επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment, LCIA). Κατά την διεξαγωγή της μελέτης AKZ για το συγκεκριμένο λατομείο μαρμάρου (κατά την λειτουργία του με καύσιμο πετρέλαιο καθώς και των πιλοτικών σεναρίων με υδρογόνο ως καύσιμο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ή για την λειτουργία του με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου), οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μελετήθηκαν ήταν η κλιματική αλλαγή, η οξίνιση του περιβάλλοντος, ο ευτροφισμός και ο σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών. Αναλυτικότερα με τον όρο κλιματική αλλαγή ορίζεται η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου. Κατά το φαινόμενο αυτό, οι ανθρώπινες διεργασίες εκλύουν ένα πλήθος αερίων (CO₂, 74 N₂O, CH₄, VOCs) με ένα από τα κυριότερα το CO₂, τα οποία συμβάλουν στην αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας θεωρείται πως είναι υπεύθυνη για την πρόκληση έντονων κλιματικών αλλαγών, την ερημοποίηση περιοχών, την ανόδου της στάθμης της θάλασσας και την εξάπλωση πλήθους ασθενειών. Η περιβαλλοντική επίπτωση της οξίνισης, αφορά την μείωση του pH λόγω ανθρωπογενών εκπομπών όξινων παραγόντων. Το διοξείδιο του θείου (SO₂) αποτελεί ένα από τα κύρια όξινα αέρια, το οποίο κατά την αντίδρασή του με το νερό δημιουργεί την όξινη βροχή. Η όξινη βροχή προκαλεί πλήθος βλαβών τόσο στα φυσικά οικοσυστήματα όσο και στα οικιστικά. Ο ευτροφισμός αποτελεί μια ακόμη σημαντική περιβαλλοντική επίπτωση, κατά την οποία πλήθος χημικών θρεπτικών συστατικών συγκεντρώνονται σε ένα οικοσύστημα όπου και παρατηρείται μη φυσιολογική παραγωγικότητα. Μερικές από τις συνέπειες του ευτροφισμού είναι η εκτεταμένη ανάπτυξη φυτών (όπως φύκια) στα

ποτάμια με αποτέλεσμα σοβαρές μεταβολές της ποιότητας του νερού και των ζώντων οργανισμών. Οι κύριες ουσίες που θεωρούνται υπεύθυνες για την ανάπτυξη του φαινομένου αυτού είναι τα φωσφορικά άλατα, τα νιτρικά άλατα, η αμμωνία και τα οξείδια του αζώτου. Η τελευταία περίπτωση που μελετήθηκε αφορά τον φωτοχημικό σχηματισμό οξειδωτικών ή τον φωτοχημικό σχηματισμό όζοντος. Η κύρια ουσία για την ανάπτυξη του φαινομένου αυτού είναι τα οξείδια του αζώτου, τα οποία υπό την παρουσία θερμότητας και ηλιακού φωτός σχηματίζουν ένα τύπο αιθαλομίχλης το φωτοχημικό όζον.

5.4. Η εφαρμογή της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής στον συμβατικό εξοπλισμό του λατομείου

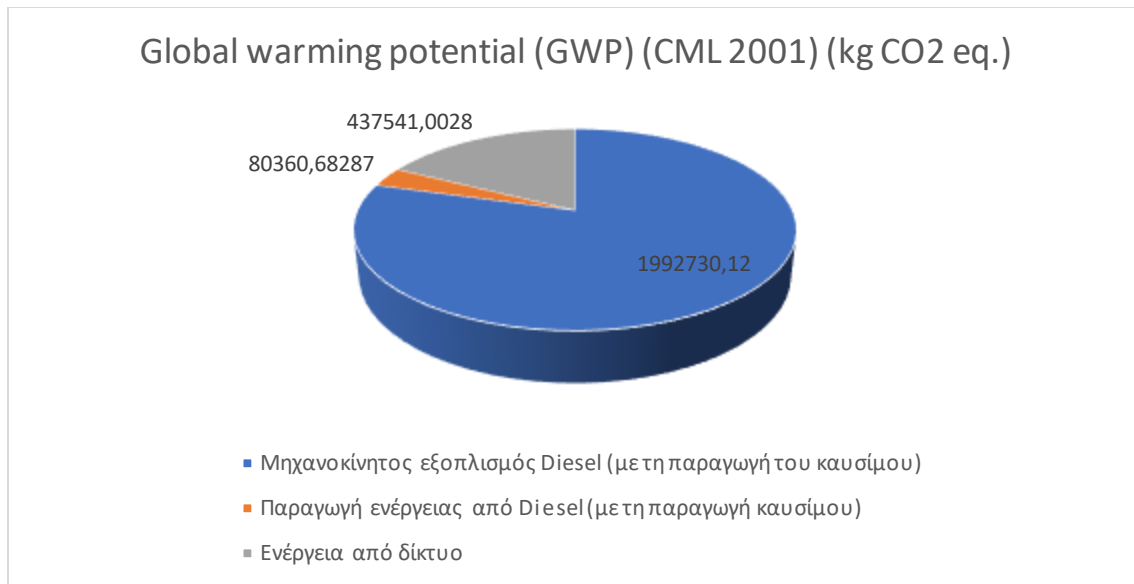
Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα υπολογισμένα περιβαλλοντικά φορτία σε kg για κάθε κατηγορία επίπτωσης, με τους αριθμούς των συνολικών φορτίων και των φορτίων του επιμέρους εξοπλισμού ξεχωριστά. Στην πρώτη οριζόντια γραμμή του πίνακα, δίνονται οι τρεις επιμέρους διαφορετικές κατηγορίες του εξοπλισμού για τις οποίες υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι τρεις κατηγορίες αυτές αφορούν τον μηχανοκίνητο εξοπλισμό diesel, την μονάδα παραγωγής ενέργειας με καύσιμο diesel και την ενέργεια που παρέχεται από το δίκτυο στο λατομείο μέσω του υποσταθμού μέσης τάσης. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των επιμέρους τεχνολογιών για τις οποίες πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί είναι η κλιματική αλλαγή, η οξίνιση του περιβάλλοντος, ο ευτροφισμός και ο σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών. Στον πίνακα 32 οι επιπτώσεις αυτές αποτυπώνονται στην πρώτη κάθετη στήλη του.

Πίνακας 32: Αποτελέσματα για σενάριο diesel

	Μηχανοκίνητος εξοπλισμός Diesel (με τη παραγωγή του καυσίμου)	Παραγωγή ενέργειας από Diesel (με τη παραγωγή καυσίμου)	Ενέργεια από δίκτυο	Σύνολο
Global warming potential (GWP) (CML 2001) (kg CO₂ eq.)	1.992.730,12	80.400	437.541,003	2.510.631,805
Acidification Potential (AP) (CML 2001) (kg SO₂ eq.)	4.769,375	204	913,506	5.886,842
Eutrophication Potential (EP) (CML 2001) (kg Phosphate eq.)	1.057,732	19,8	106,569	1.184,127
Photochemical Ozone Formation (ReCiPe 2016) (kg NO_x eq.)	8.094,117	152	511,761	8.757,41

Κλιματική αλλαγή

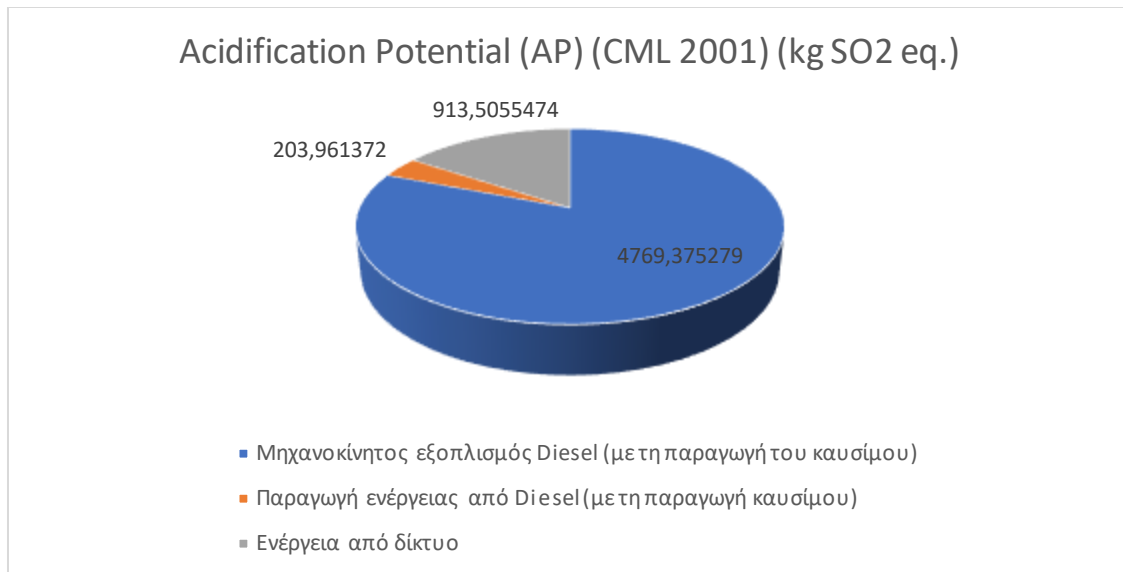
Οι παραπάνω υπολογισμοί των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τις τεχνολογίες του συμβατικού πετρελαιοκίνητου εξοπλισμού αποτυπώνονται καλύτερα στα ακόλουθα διαγράμματα. Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής είναι άμεσα συνδεδεμένο με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που εκλύονται. Οι τιμές των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα υπολογίστηκαν για κάθε κατηγορία του εξοπλισμού ξεχωριστά αλλά και συνολικά. Η συνολικές εκπομπές CO₂ σε kg για όλον τον εξοπλισμό υπολογίστηκαν σε 2.510.631,805 kg CO₂ eq, ενώ αναλυτικότερα ο μηχανοκίνητος εξοπλισμός diesel αποτελεί περίπου το 79,37%, η μονάδα παραγωγής ενέργειας με καύσιμο diesel το 3,2% και η ενέργεια που παρέχεται από το δίκτυο το υπόλοιπο 17,43% των συνολικών kg CO₂ eq. Η αναλογία αυτή αποτυπώνεται στο ακόλουθο διάγραμμα 13.



Διάγραμμα 13: Φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής αναλογικά με τις εκπομπές CO₂ σε kg του συνολικού συμβατικού εξοπλισμού

Οξίνιση του περιβάλλοντος

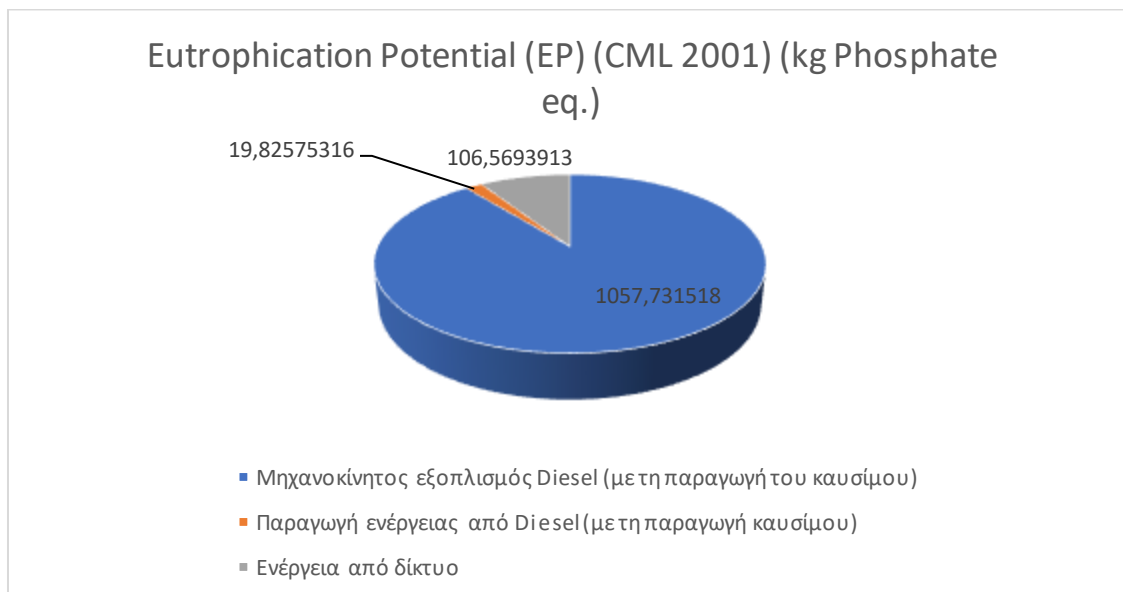
Για τις επιπτώσεις της οξίνισης του περιβάλλοντος λόγω της χρήσης του συμβατικού πετρελαιοκίνητου εξοπλισμού υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες εκπομπές διοξειδίου του θείου σε κιλά ενώ συνολικά για όλες τις κατηγορίες του εξοπλισμού οι εκπομπές αυτές ανέρχονται σε 5.886,842 kg SO₂ eq. Συγκεκριμένα ο μηχανοκίνητος εξοπλισμός diesel εκπέμπει περίπου το 81,01% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του θείου, ενώ 3,47% και 15,52% είναι οι εκπομπές της μονάδας παραγωγής ενέργειας με καύσιμο το πετρέλαιο και της ενέργειας που παρέχεται από το δίκτυο αντίστοιχα. Τα ποσοστά αυτά απεικονίζονται και στο διάγραμμα 14.



Διάγραμμα 14: Οξίνιση του περιβάλλοντος αναλογικά με τις εκπομπές SO₂ σε kg του συνολικού συμβατικού εξοπλισμού

Ευτροφισμός

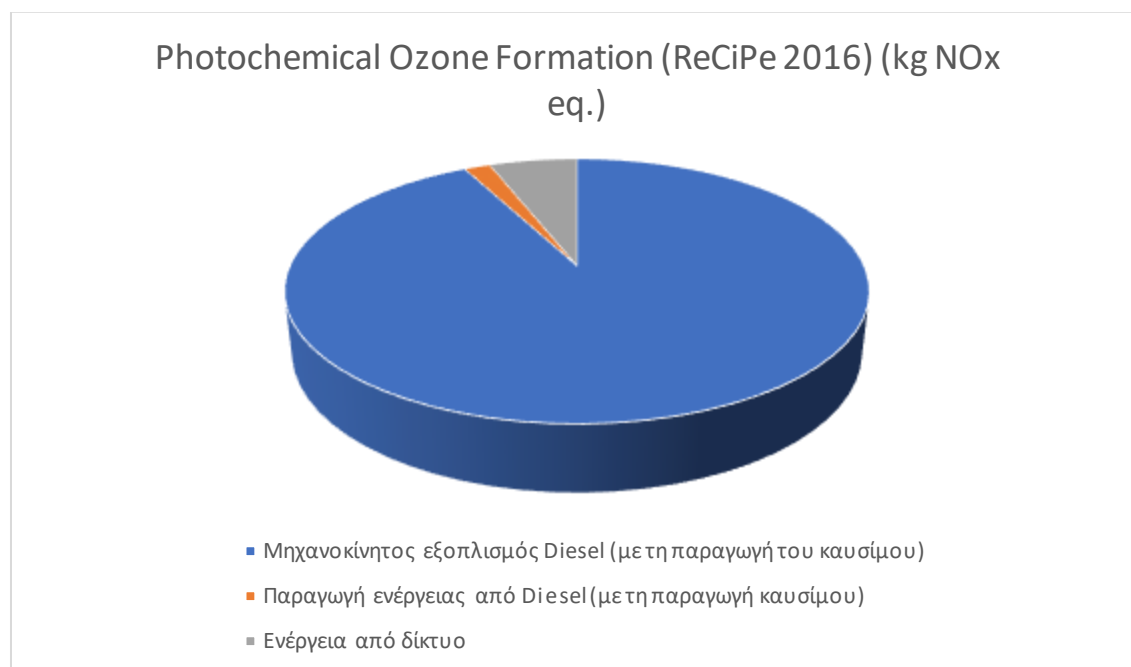
Ως προς τον ευτροφισμό, ο εξοπλισμός πετρελαίου που λειτουργεί στο συγκεκριμένο λατομείο προκαλεί την συνολική παραγωγή 1.184,127 kg phosphate (φωσφορικού άλατος). Ενώ για την κάθε κατηγορία του εξοπλισμού ξεχωριστά προκύπτουν τα ποσοστά σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα (διάγραμμα 15). Για τον μηχανοκίνητο εξοπλισμό πετρελαίου 89,33%, στην μονάδα παραγωγής ενέργειας με καύσιμο diesel αντιστοιχεί το 1,67% ενώ στην ενέργεια που προέρχεται από το δίκτυο αντιστοιχεί το υπόλοιπο 9% του συνολικού παραγόμενου φωσφορικού άλατος.



Διάγραμμα 15: Επίπτωση του ευτροφισμού ανάλογα με το παραγόμενο φωσφορικό άλας σε kg του συνολικού συμβατικού εξοπλισμού.

Σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών

Τέλος για τον συμβατικό εξοπλισμό λειτουργίας του εν λόγω λατομείου μαρμάρου υπολογίστηκαν οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου σε κιλά. Τα παραγόμενα οξείδια του αζώτου κατά την επίδραση τους με την ηλιακή ακτινοβολία είναι υπεύθυνα για τον σχηματισμό φωτοχημικών οξειδωτικών. Οι συνολικές εκπομπές NO_x αντιστοιχούν σε 8.757,41 kg, ενώ ο μηχανοκίνητος εξοπλισμός diesel συμβάλει στην παραγωγή του 92,42% των εκπομπών αυτών, η μονάδα παραγωγής ενέργειας από καύσιμο πετρέλαιο στο 1,74% και το δίκτυο παροχής ενέργειας στο υπόλοιπο 5,84% των συνολικών κιλών NO_x . Το διάγραμμα 16 αποτυπώνει το περιβαλλοντικό φορτίο που αναλογεί στον επιμέρους εξοπλισμό ανάλογα με το ποσοστό παραγωγής οξειδίων του αζώτου.



Διάγραμμα 16: Σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών ανάλογα των εκπομπών NO_x σε kg του συνολικού συμβατικού εξοπλισμού

5.5.Η εφαρμογή της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής στον εναλλακτικό εξοπλισμό με καύσιμο υδρογόνο, για την απανθρακοποίηση του λατομείου

Μετά τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συμβατικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται από το συγκεκριμένο λατομείο μαρμάρου, θα πραγματοποιηθεί ο αντίστοιχος υπολογισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για δυο πιλοτικά μοντέλα λατομείου τα οποία θα χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο. Το πρώτο εκ των δυο σεναρίων θα χρησιμοποιεί το υδρογόνο ως καύσιμο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ICE, ενώ κατά το δεύτερο σενάριο ο εξοπλισμός του λατομείου θα λειτουργεί με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου.

5.5.1. Εφαρμογή της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής για το σενάρια απανθρακοποίησης του λατομείου με την χρήση τεχνολογιών καυσίμου υδρογόνου σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ICE

Στον πίνακα (πίνακας 33) που ακολουθεί περιγράφεται το σενάριο λειτουργίας με καύσιμο υδρογόνο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ICE. Στον πίνακα αυτόν απεικονίζονται όμοια με τον πίνακα 32 τα υπολογισμένα περιβαλλοντικά φορτία σε kg για κάθε κατηγορία επίπτωσης, με τους αριθμούς των συνολικών φορτίων και των φορτίων του επιμέρους εξοπλισμού υδρογόνου ξεχωριστά. Στην πρώτη στήλη του πίνακα 33 τοποθετούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενώ στην πρώτη οριζόντια γραμμή του πίνακα, οι 4 επιμέρους διαφορετικές κατηγορίες για τις οποίες υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες επιπτώσεις. Οι τέσσερις αυτές κατηγορίες αφορούν: την διαδικασία παραγωγής H₂ με ρεύμα από PVs, την μονάδα παραγωγής ενέργειας με κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου ICE, τον μηχανοκίνητο εξοπλισμό ICE και τέλος το παρεχόμενο ρεύμα από το δίκτυο.

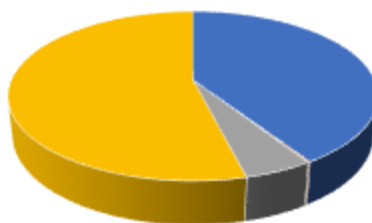
Πίνακας 33: Αποτελέσματα για σενάριο ICE Υδρογόνου

	Παραγωγή H2 με ρεύμα από PVs	Μονάδα παραγωγής ICE (με ρεύμα από PV για συμπίεση H2)	Μηχανοκίνητος εξοπλισμός ICE (εκσκαφείς)(με ρεύμα από PV για συμπίεση H2)	Ρεύμα από το δίκτυο	Σύνολο
Global warming potential (GWP) (CML 2001) (kg CO2 eq.)	332.497,225	1.361,329	41.044,337	437.541,003	812.443,894
Acidification Potential (AP) (CML 2001) (kg SO2 eq.)	1.565,605	9,199	11,871	913,506	2.500,180
Eutrophication Potential (EP) (CML 2001) (kg Phosphate eq.)	127,58	1,502	11,871	106,569	247,522
Photochemical Ozone Formation (ReCiPe 2016) (kg NOx eq.)	816,177	10,889	11,871	511,762	1.350,698

Κλιματική αλλαγή

Στην συνέχεια και στα επόμενα τέσσερα διαγράμματα θα αποτυπωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η επιρροή που θα έχει η κάθε κατηγορία του εξοπλισμού για ένα μελλοντικό μοντέλο λατομείου που θα λειτουργεί με καύσιμο υδρογόνο. Αρχικά στο διάγραμμα 17 αποτυπώνεται το αντίκτυπο του πιλοτικού μοντέλου απανθρακοποίησης με πράσινο υδρογόνο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ως προς την υπερθέρμανση του πλανήτη. Οι συνολικές εκπομπές CO₂ σε kg που οδηγούν στην υπερθέρμανση του πλανήτη είναι 812.443,894 kg CO₂. Το μεγαλύτερο ποσοστό των εκπομπών αυτών εκλύεται από την παραγωγή H₂ με ρεύμα από PVs, ποσοστό 40,93%, ενώ ακολουθεί με ποσοστό 53,85% η ενέργεια που παρέχεται από το δίκτυο. Με πολύ μικρότερα ποσοστά ακολουθούν ο μηχανοκίνητος εξοπλισμός και η μονάδα παραγωγής ενέργειας με κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου ICE με ποσοστά 5,05% και 0,17% αντίστοιχα.

Global warming potential (GWP) (CML 2001) (kg CO₂ eq.)



- Παράγωγή Η2 με ρεύμα από PVs
- Μοναδά παραγωγής ICE (με ρεύμα από PV για συμπίεση Η2)
- Μηχανοκίνητος εξοπλισμός ICE (εξκαφεείς)(με ρεύμα από PV για συμπίεση Η2)
- Ρεύμα από το δίκτυο

Διάγραμμα 17: Φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής αναλογικά του ποσοστού των εκλυόμενων εκπομπών CO₂ σε kg

Οξίνιση του περιβάλλοντος

Η οξίνιση του περιβάλλοντος αποτελεί άλλη μια σοβαρή περιβαλλοντική επίπτωση προκαλείται από τις εκπομπές διοξειδίου του θείου SO₂, για τον λόγο αυτόν στο διάγραμμα 18 φαίνονται οι εκπομπές σε kg SO₂ eq, για την κάθε κατηγορία του εξοπλισμού. Οι συνολικές εκπομπές αυτές ανέρχονται σε 2.500,180 kg SO₂ eq. Αναλυτικότερα η παραγωγή Η2 με ρεύμα από PVs βρίσκεται στην πρώτη θέση σε παραγωγή εκπομπών με ποσοστό 62,62% των συνολικών εκπομπών. Τη δεύτερη μεγαλύτερη πηγή εκπομπών διοξειδίου του θείου αποτελεί η ενέργεια (ρεύμα) που παρέχεται από το δίκτυο με ποσοστό 36,54%, ενώ ο μηχανοκίνητος εξοπλισμός ICE και η μονάδα παραγωγής ενέργειας ICE ακολουθούν με αρκετά μικρότερα ποσοστά 0,47% και 0,37% αντίστοιχα των συνολικών εκπομπών SO₂.

Acidification Potential (AP) (CML 2001) (kg SO₂ eq.)

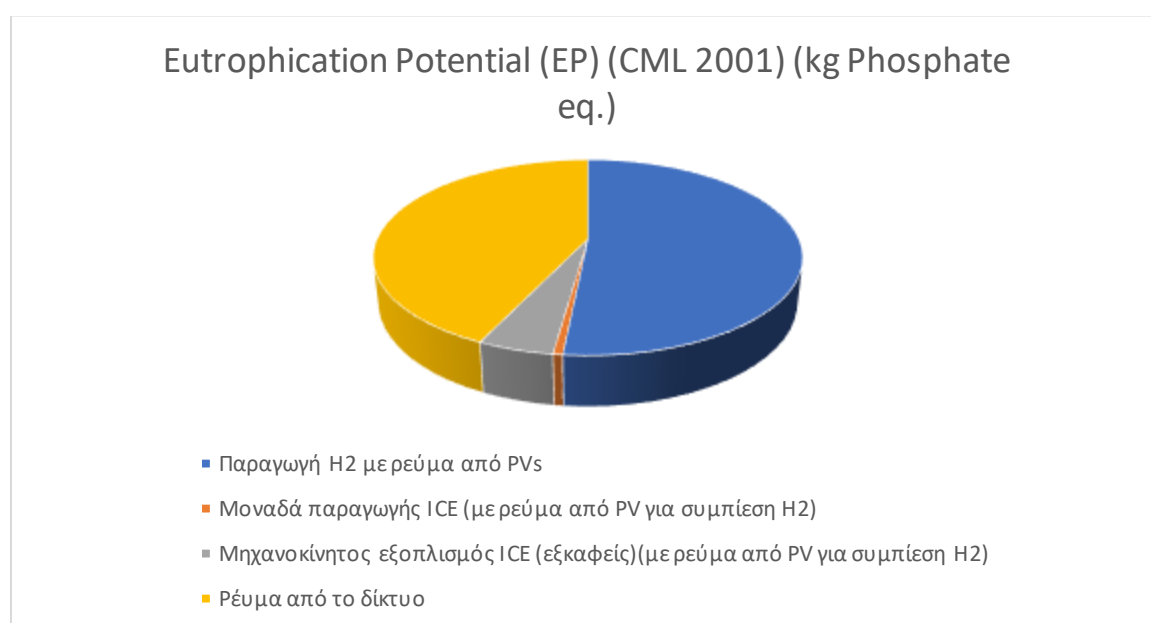


- Παράγωγή Η2 με ρεύμα από PVs
- Μοναδά παραγωγής ICE (με ρεύμα από PV για συμπίεση Η2)
- Μηχανοκίνητος εξοπλισμός ICE (εξκαφεείς)(με ρεύμα από PV για συμπίεση Η2)
- Ρεύμα από το δίκτυο

Διάγραμμα 18: Επίπτωση της οξίνιση του περιβάλλοντος αναλογικά των συνολικών εκπομπών SO₂ σε kg του εξοπλισμού.

Ευτροφισμός

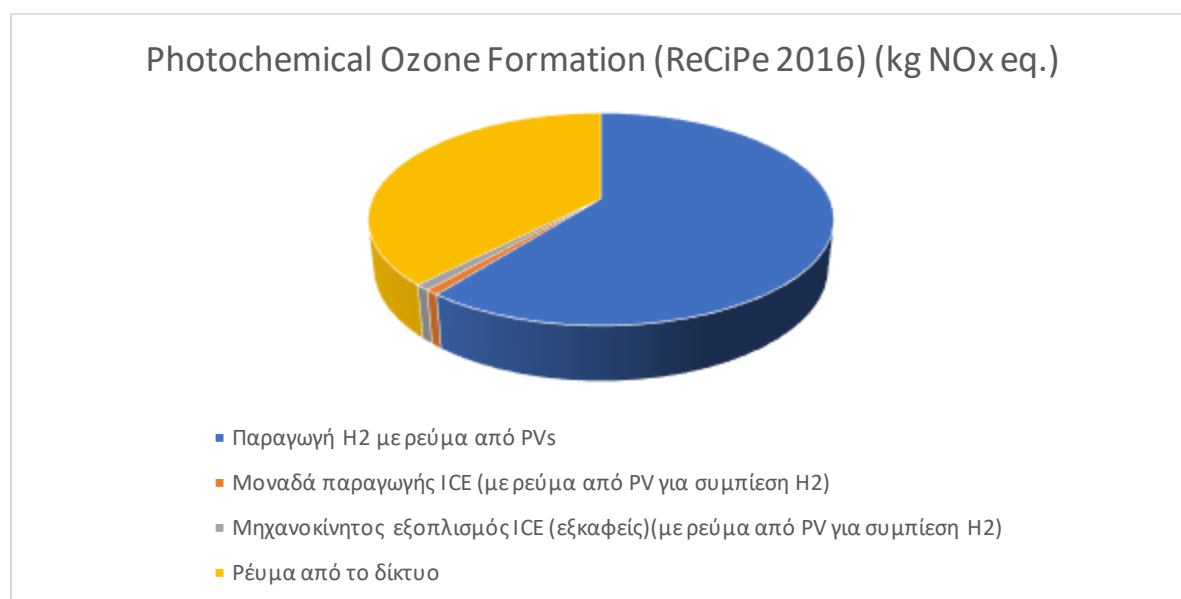
Ως προς τον ευτροφισμό, ο συνολικός εξοπλισμός με καύσιμο υδρογόνο σε κινητήρες ICE υπολογίστηκε ότι θα παράγει συνολικά 247,522 kg phosphate (φωσφορικού άλατος). Ενώ για την κάθε κατηγορία του εξοπλισμού ξεχωριστά προκύπτουν τα ποσοστά σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα (διάγραμμα 19). Για την παραγωγή H₂ με ρεύμα από PVs και την ενέργεια (ρεύμα) που παρέχεται από το δίκτυο, τα ποσοστά παραγωγής φωσφορικού άλατος σε kg δίνονται αντίστοιχα 51,52% και 43,05%. Για τον μηχανοκίνητο εξοπλισμό ICE και τη μονάδα παραγωγής ενέργειας ICE αναλογούν το 4,8% και 0,60%, της συνολικής παραγωγής φωσφορικού άλατος σε kg.



Διάγραμμα 19: Περιβαλλοντική επίπτωση του ευτροφισμού αναλογικά παραγόμενο φωσφορικό άλας σε kg του συνολικού εξοπλισμού.

Σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών

Τέλος για την επίδραση του μοντέλου απανθρακοποίησης με καύσιμο υδρογόνο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ICE, στην δημιουργία φωτοχημικών οξειδωτικών υπολογίστηκαν οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου σε κιλά. Οι συνολικές εκπομπές NO_x αντιστοιχούν σε 1.350,698 kg, ενώ η παραγωγή H₂ με ρεύμα από PVs και η ενέργεια (ρεύμα) που παρέχεται από το δίκτυο συμβάλλουν σημαντικά στην άμβλυνση του φαινομένου με ποσοστό 60,43% και 37,89% αντίστοιχα. Με αρκετά χαμηλότερο ποσοστό ακολουθούν ο μηχανοκίνητος εξοπλισμός ICE και η μονάδα παραγωγής ενέργειας ICE με ποσοστά 0,88% και 0,80%, των συνολικών εκπομπών οξειδίου του αζώτου. Τα ποσοστά αυτά απεικονίζονται και στο ακόλουθο διάγραμμα (διάγραμμα 20).



Διάγραμμα 20: Σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών αναλογικά των εκπομπών NO_x σε kg του συνολικού εξοπλισμού.

5.5.2. Εφαρμογή της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής για το σενάρια απανθρακοποίησης του λατομείου με την χρήση τεχνολογιών υδρογόνου fuel cells (κυψέλες καυσίμου).

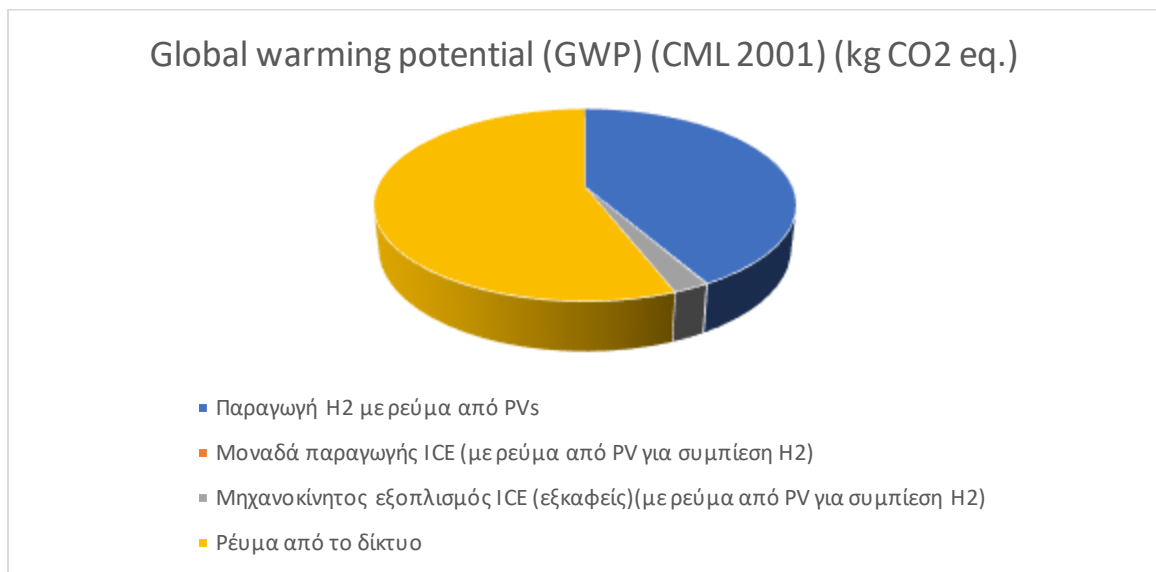
Στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 34) περιγράφεται το δεύτερο και τελευταίο σενάριο για την απανθρακοποίηση του λατομείου μαρμάρου μέσω κυψέλων καύσιμου υδρογόνου. Στον πίνακα 34 απεικονίζονται όμοια με τον πίνακα 33 τα υπολογισμένα περιβαλλοντικά φορτία σε kg για κάθε κατηγορία επίπτωσης, με τους αριθμούς των συνολικών φορτίων και των φορτίων του επιμέρους εξοπλισμού υδρογόνου ξεχωριστά. Στην πρώτη στήλη του πίνακα 34 τοποθετούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενώ στην πρώτη οριζόντια γραμμή του πίνακα οι 4 επιμέρους διαφορετικές κατηγορίες για τις οποίες υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες επιπτώσεις. Οι τέσσερις αυτές κατηγορίες αφορούν: την διαδικασία παραγωγής H₂ με ρεύμα από PVs, την μονάδα παραγωγής ενέργειας με Fuel Cell, τον Μηχανοκίνητος εξοπλισμούς Fuel Cell και τέλος το παρεχόμενο ρεύμα από το δίκτυο.

Πίνακας 34: Αποτελέσματα για σενάριο Fuel Cell Υδρογόνου

	Παραγωγή H ₂ με ρεύμα από PVs	Μονάδα παραγωγής Fuel Cell (με ρεύμα από PV για εκκίνηση)	Μηχανοκίνητος εξοπλισμούς Fuel Cell (με ρεύμα από PV για εκκίνηση)	Ρεύμα από το δίκτυο	Σύνολο
Global warming potential (GWP) (CML 2001) (kg CO₂ eq.)	328.103,323	377,801	18.163,793	437.541,003	784.185,92
Acidification Potential (AP) (CML 2001) (kg SO₂ eq.)	1.544,916	1,507	72,459	913,506	2.532,388
Eutrophication Potential (EP) (CML 2001) (kg Phosphate eq.)	125,894	0,145	6,972	106,569	239,58
Photochemical Ozone Formation (ReCiPe 2016) (kg NO_x eq.)	805,391	0,930	44,727	511,761	1362,809

Κλιματική αλλαγή

Η περιβαλλοντική επίπτωση της κλιματικής αλλαγής εξαιτίας της χρήσης λατομικού εξοπλισμού με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου απεικονίζεται στο διάγραμμα 21. Οι συνολικές εκπομπές CO₂ σε kg που οδηγούν στην υπερθέρμανση του πλανήτη είναι 784.185,92 kg CO₂. Το μεγαλύτερο ποσοστό των εκπομπών αυτών εκλύεται από την παραγωγή H₂ με ρεύμα PVs ποσοστό 41,84%, ενώ ακολουθεί με ποσοστό 55,8% η ενέργεια που παρέχεται από το δίκτυο. Ο μηχανοκίνητος εξοπλισμός fuel cell και η μονάδα παραγωγής ενέργειας μέσω κυψέλων καυσίμου υδρογόνου επηρεάζουν σε πολύ μικρότερα ποσοστά 2,32% και 0,048% αντίστοιχα, των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα .

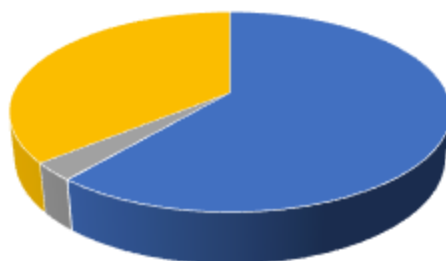


Διάγραμμα 21: Φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής αναλογικά του ποσοστού των εκκλύμενων εκπομπών CO₂ σε kg

Οξίνιση του περιβάλλοντος

Η οξίνιση του περιβάλλοντος λόγω χρήσης εξοπλισμού κυψέλων καυσίμου υδρογόνου αποτελεί άλλη μια σοβαρή περιβαλλοντική επίπτωση που προκαλείται από τις εκπομπές διοξειδίου του θείου SO₂, για τον λόγο αυτόν στο διάγραμμα 22 φαίνονται οι εκπομπές σε kg SO₂ eq, για την κάθε κατηγορία του εξοπλισμού. Οι συνολικές εκπομπές αυτές ανέρχονται σε 2.532,388 kg SO₂ eq. Αναλυτικότερα η παραγωγή H₂ με ρεύμα από PVs βρίσκεται στην πρώτη θέση σε παραγωγή εκπομπών με ποσοστό 61% των συνολικών εκπομπών SO₂. Τη δεύτερη μεγαλύτερη πηγή εκπομπών διοξειδίου του θείου αποτελεί η ενέργεια (ρεύμα) που παρέχεται από το δίκτυο με ποσοστό 36,07%, ενώ η μονάδα παραγωγής ενέργειας και ο μηχανοκίνητος εξοπλισμός fuel cell, συμβάλουν ελάχιστα στην άμβλυνση του φαινομένου της οξίνισης αφού κατέχουν το 0,06% και το 2,86% αντίστοιχα των συνολικών εκπομπών SO₂.

Acidification Potential (AP) (CML 2001) (kg SO₂ eq.)



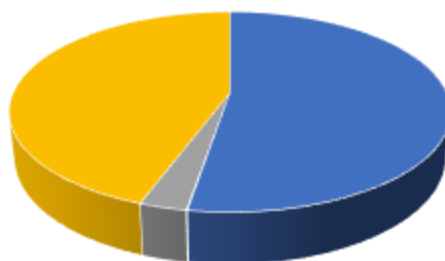
- Παραγωγή H₂ με ρεύμα από PVs
- Μοναδά παραγωγής ICE (με ρεύμα από PV για συμπίεση H₂)
- Μηχανοκίνητος εξοπλισμός ICE (εξκαφεείς)(με ρεύμα από PV για συμπίεση H₂)
- Ρεύμα από το δίκτυο

Διάγραμμα 22: Επίπτωση της οξίνιση του περιβάλλοντος αναλογικά των συνολικών εκπομπών SO₂ σε kg του εξοπλισμού.

Ευτροφισμός

Ο ευτροφισμός αποτελεί την τρίτη περιβαλλοντική επίπτωση που οφείλεται στην λειτουργία ενός λατομείου με τεχνολογίες fuel cells. Ο κύριος ρύπος ο οποίος παράγεται και οδηγεί στον ευτροφισμό είναι το φωσφορικού άλας (phosphate). Κατά την λειτουργία του λατομείου υπολογίστηκε ότι θα παράγει συνολικά 239,58kg phosphate (φωσφορικού άλατος). Ενώ για την κάθε κατηγορία του εξοπλισμού ξεχωριστά προκύπτουν τα ποσοστά σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα (διάγραμμα 23). Για την παραγωγή H₂ με ρεύμα από PVs και την ενέργεια (ρεύμα) που παρέχεται από το δίκτυο τα ποσοστά παραγωγής φωσφορικού άλατος σε kg δίνονται αντίστοιχα 52,55% και 44,48%. Για τον μηχανοκίνητο εξοπλισμό fuel cell και την αντίστοιχη μονάδα παραγωγής ενέργειας fuel cell αναλογούν τα ποσοστά 2,91% και 0,06% της συνολικής παραγωγής φωσφορικού άλατος σε kg.

Eutrophication Potential (EP) (CML 2001) (kg Phosphate eq.)



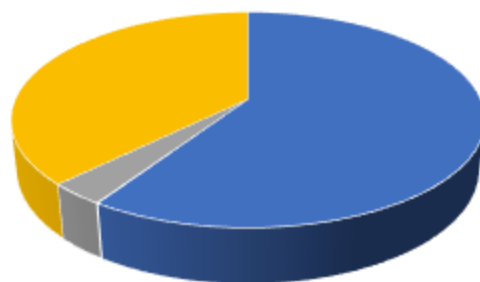
- Παραγωγή H2 με ρεύμα από PVs
- Μοναδά παραγωγής ICE (με ρεύμα από PV για συμπίεση H2)
- Μηχανοκίνητος εξοπλισμός ICE (εξκαφεείς)(με ρεύμα από PV για συμπίεση H2)
- Ρεύμα από το δίκτυο

Διάγραμμα 23: Περιβαλλοντική επίπτωση του ευτροφισμού αναλογικά παραγόμενο φωσφορικό άλας σε kg του συνολικού εξοπλισμού.

Σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών

Η τελευταία περιβαλλοντική επίπτωση αφορά τον σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους. Ο σχηματισμός του επιτυγχάνεται με την αλληλεπίδραση των παραγόμενων οξειδίων του αζώτου με την ηλιακή ακτινοβολία. Οι συνολικές εκπομπές NO_x για την τεχνολογία fuel cell αντιστοιχούν σε 1362,809 kg. Η παραγωγή H2 με ρεύμα από PVs και η ενέργεια (ρεύμα) που παρέχεται από το δίκτυο συμβάλλουν σημαντικά στην άμβλυνση του φαινομένου με ποσοστό 59,1% και 37,55% αντίστοιχα. Με αρκετά χαμηλότερο ποσοστό παραγωγής σε kg των συνολικών εκπομπών οξειδίου του αζώτου βρίσκονται ο μηχανοκίνητος εξοπλισμός fuel cell και η αντίστοιχη μονάδα παραγωγής ενέργειας fuel cell, 3,28% και 0,068% αντίστοιχα για το καθένα. Στο διάγραμμα 24 απεικονίζεται η παραγωγή εκπομπών οξειδίου του αζώτου ανάλογα με εξοπλισμό που χρησιμοποιείται.

Photochemical Ozone Formation (ReCiPe 2016) (kg NO_x eq.)



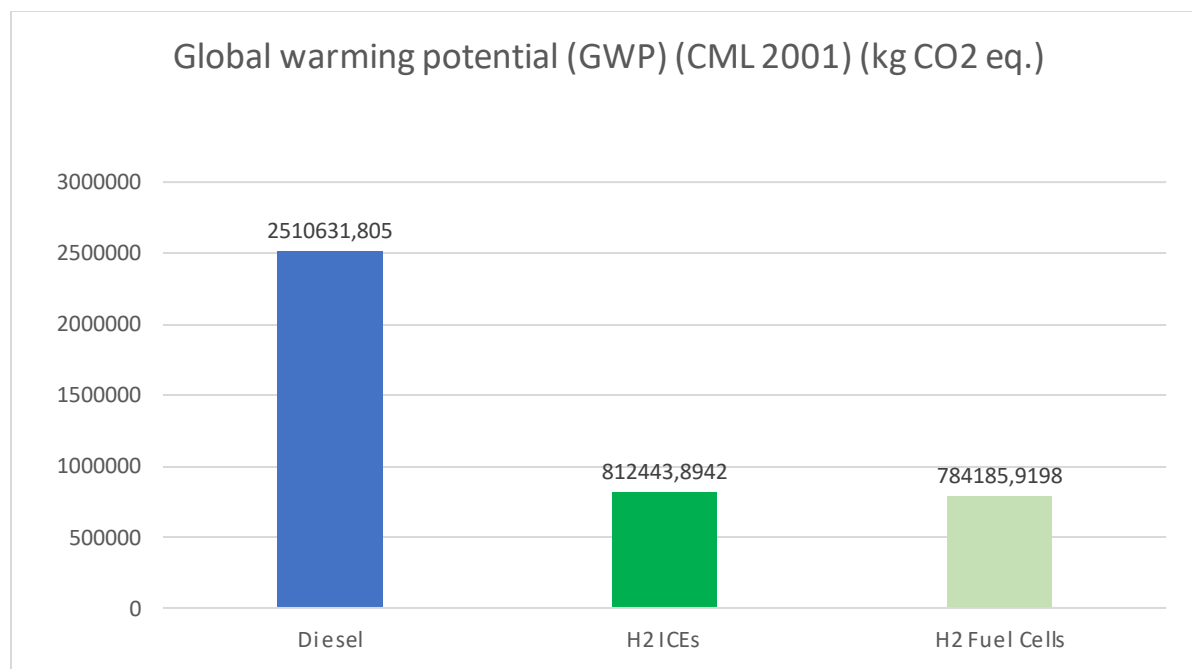
- Παραγωγή H2 με ρεύμα από PVs
- Μοναδά παραγωγής ICE (με ρεύμα από PV για συμπίεση H2)
- Μηχανοκίνητος εξοπλισμός ICE (εξκαφεείς)(με ρεύμα από PV για συμπίεση H2)
- Ρεύμα από το δίκτυο

Διάγραμμα 24: Σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών αναλογικά των εκπομπών NO_x σε kg του συνολικού εξοπλισμού.

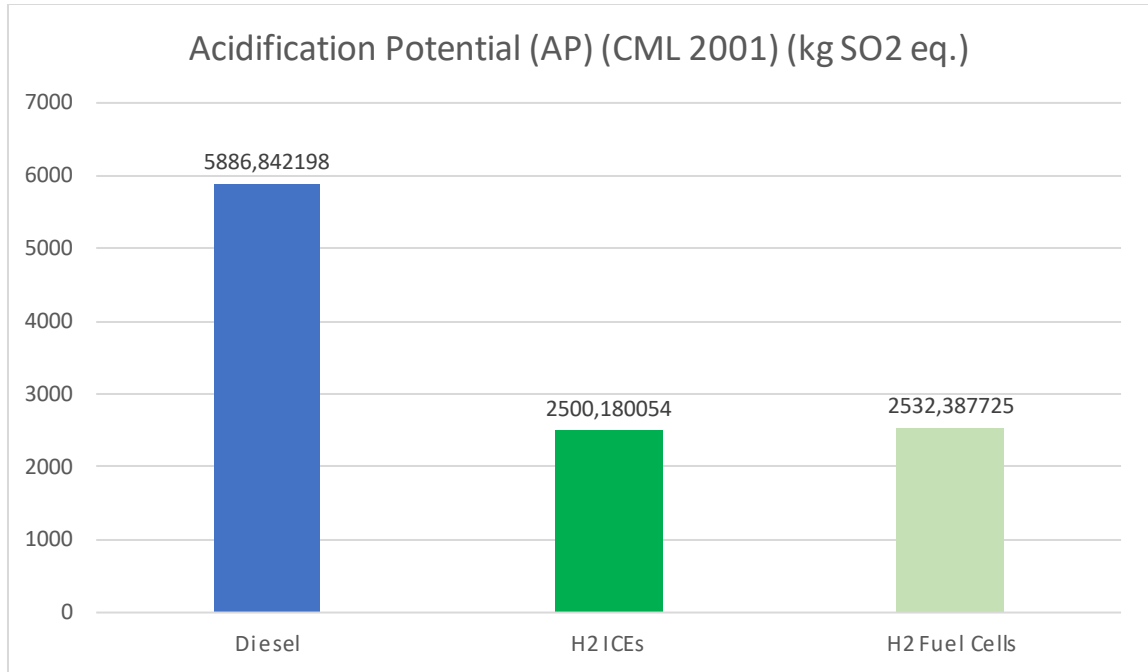
5.6. Δυνατότητα διείσδυσης των τεχνολογιών υδρογόνου στα λατομεία μαρμάρου

Οι τεχνολογίες υδρογόνου τόσο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ICE όσο και σε κυψέλες καυσίμου υδρογόνου που παρουσιάστηκαν ως τα δυο σενάρια για την απανθρακοποίηση των λατομείων μαρμάρου παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις έναντι του συμβατικού πετρελαιοκίνητου εξοπλισμού. Στα ακόλουθα 4 διαγράμματα (διάγραμμα 25,26,27,28) παρουσιάζονται οι τέσσερις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το αντίκτυπο της κάθε μιας τεχνολογίας κατά την λειτουργία του λατομείου ως προς τις επιπτώσεις αυτές. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (διάγραμμα 25) και κατά συνέπεια οι επιπτώσεις του συμβατικού εξοπλισμού diesel ως προς την κλιματική αλλαγή είναι σχεδόν τριπλάσιες από τις αντίστοιχες που αφορούν το υδρογόνο, ενώ μεταξύ των δύο τεχνολογιών υδρογόνου, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου έχουν τις λιγότερες εκπομπές CO₂ επηρεάζοντας λιγότερο το φαινόμενο της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας και της κλιματικής αλλαγής. Για την περιβαλλοντική επίπτωση της οξίνισης, που απεικονίζεται στο διάγραμμα 26, οι τιμές των εκπομπών SO₂ του εξοπλισμού με καύσιμο το πετρέλαιο είναι υπερδιπλάσιες από τις αντίστοιχες των τεχνολογιών υδρογόνου. Όσον αφορά τις εκπομπές μεταξύ των τεχνολογιών υδρογόνου, ελάχιστα πιο αυξημένες παρατηρούνται κατά την περίπτωση του εξοπλισμού fuel cells. Ανάλογα με τις εκπομπές διοξειδίου του θείου επηρεάζεται και το φαινόμενο της οξίνισης. Στην συνέχεια για το φαινόμενο του ευτροφισμού υπολογίστηκαν οι τιμές σε kg του φωσφορικού άλατος για την κάθε τεχνολογία. Οι

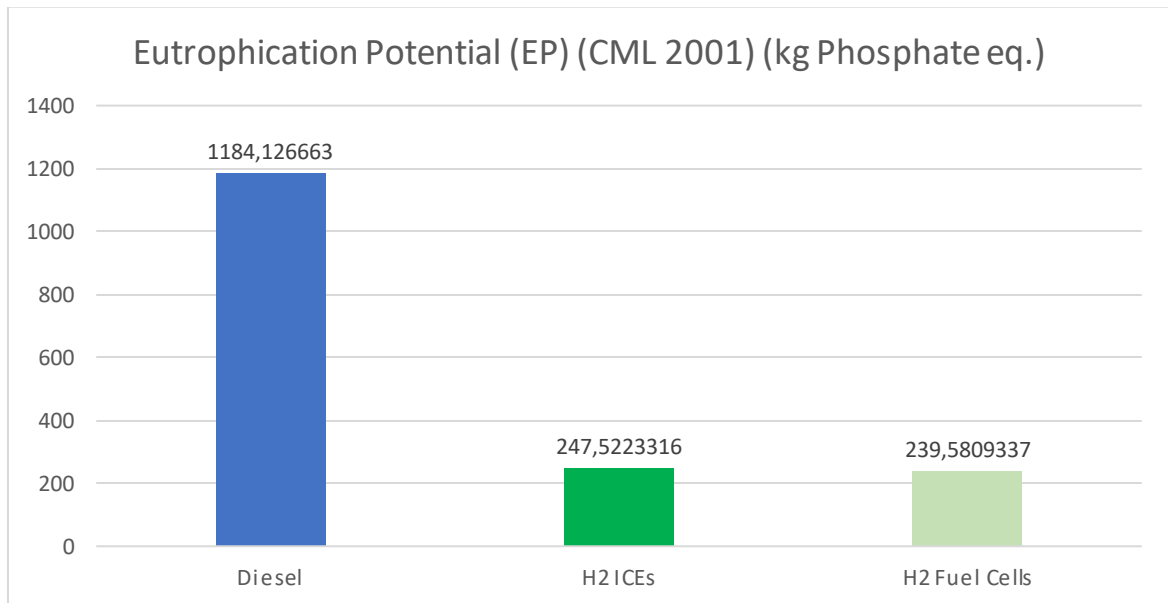
υπολογισμοί αυτοί παρουσιάζονται στο διάγραμμα 27. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι ο εξοπλισμός με καύσιμο το πετρέλαιο συμβάλει έως και τέσσερις φορές παραπάνω στον ευτροφισμό από τον αντίστοιχο εξοπλισμό υδρογόνου. Συγκρίνοντας τα δυο είδη εξοπλισμού υδρογόνου μεταξύ τους, προκύπτει ότι η παραγωγή σε kg φωσφορικού άλατος κατά την λειτουργία του εξοπλισμού με υδρογόνο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ICE να είναι ελαφρώς πιο αυξημένη έναντι των αντίστοιχων για τον εξοπλισμό υδρογόνου με fuel cells. Η διαφορά μεταξύ των τεχνολογιών υδρογόνου είναι ελάχιστη, ωστόσο κατά τον εξοπλισμό με κυψέλες καυσίμου ευνοείται λιγότερο το φαινόμενο του ευτροφισμού. Τέλος στο διάγραμμα 28 απεικονίζονται οι συνολικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου οι οποίες συμβάλλουν στην ανάπτυξη του φωτοχημικού νέφους, για κάθε σενάριο λειτουργίας του λατομείου. Κατά την λειτουργία του λατομικού εξοπλισμού με καύσιμο diesel παράγονται εξαπλάσιες εκπομπές NO_x σε kg σε σύγκριση με την λειτουργία του με καύσιμο υδρογόνο. Συγκρίνοντας για τις τεχνολογίες καυσίμου υδρογόνου, ο εξοπλισμός με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου παράγει ελάχιστα πιο πολλές εκπομπές NO_x. Ανάλογα με τις εκπομπές NO_x αυξάνεται και ο σχηματισμός του φωτοχημικού νέφους. Συνοψίζοντας οι τεχνολογίες με καύσιμο υδρογόνο συμβάλλουν στην μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από 2 έως 6 φορές, ανάλογα την περιβαλλοντική επίπτωση του μελετάτε, ενώ μεταξύ των δύο σεναρίων υδρογόνου οι διαφορές ως προς το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κρίνονται ελάχιστες.



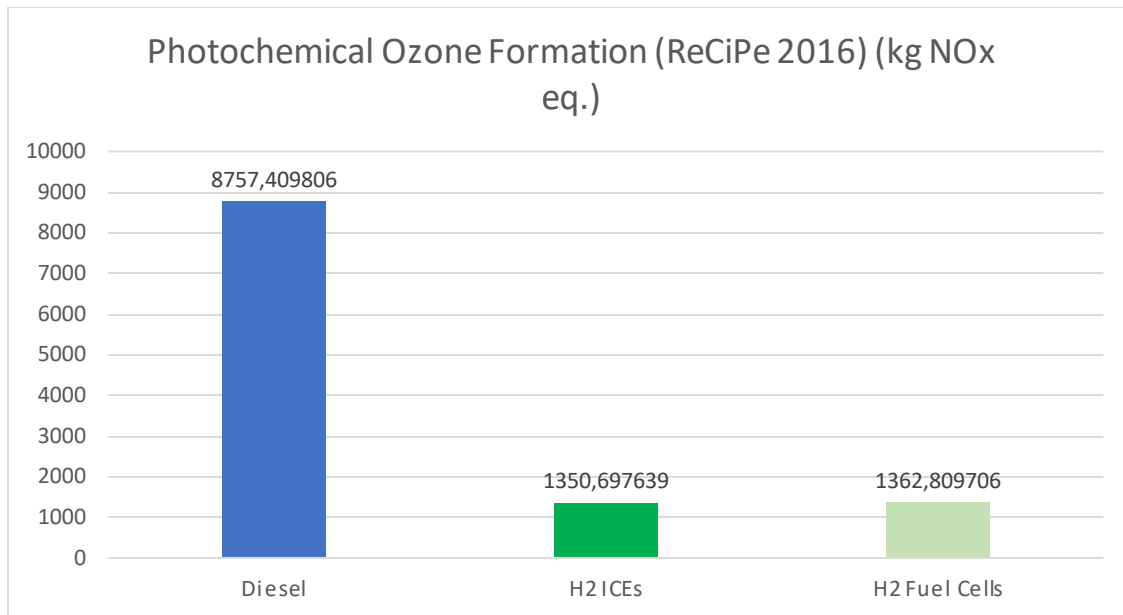
Διάγραμμα 25: Επίδραση των σεναρίων λειτουργίας του λατομείου στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής αναλογικά του ποσοστού των εκλυόμενων εκπομπών CO₂ σε kg



Διάγραμμα 26: Επίδραση των σεναρίων λειτουργίας του λατομείου στην περιβαλλοντική επίπτωση της οξίνισης αναλογικά των συνολικών εκπομπών SO₂ σε kg του εξοπλισμού.



Διάγραμμα 27: Επίδραση των σεναρίων λειτουργίας του λατομείου στην περιβαλλοντική επίπτωση του ευτροφισμού αναλογικά με το παραγόμενο φωσφορικό άλας σε kg του συνολικού εξοπλισμού.



Διάγραμμα 28: Επίδραση των σεναρίων λειτουργίας του λατομείου στον σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών αναλογικά των εκπομπών NO_x σε kg του συνολικού εξοπλισμού.

6. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστίασε στη μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής του ενεργειακού συστήματος ενός λατομείου σε ετήσια βάση που αντιστοιχεί σε παραγωγή 30.000m³ ογκόλιθων μαρμάρου. Επιπλέον, αναλύεται η δυνατότητα περιβαλλοντικής βελτιστοποίησης μέσω αντικατάστασης των ορυκτών καυσίμων από πράσινο υδρογόνο, με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού. Επιλέχθηκε ως μονάδα αναφοράς η λειτουργία του λατομείου για ένα έτος, ώστε να δοθεί μία αντιπροσωπευτική εικόνα των συνολικών εκπομπών του ενεργειακού συστήματος ενός λατομείου μέσου μεγέθους, το οποίο και είναι το κύριο παραγωγικό μοντέλο της χώρας. Τα όρια του συστήματος περιελάμβανε την παραγωγή από τη γέννηση έως την πύλη 30.000m³ ογκόλιθων μαρμάρου, αναλύοντας αποκλειστικά τις εκπομπές που προέρχονται από τις ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις της παραγωγικής μονάδας προερχόμενες από το δίκτυο ηλεκτροδότησης ή από τη χρήση άλλων πηγών (ορυκτά ή και εναλλακτικά καύσιμα).

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας των εγχώριων λατομείων και ορυχείων αποτελεί το 4% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη ότι σήμερα δραστηριοποιούνται στη χώρα 248 λατομεία, η πλειονότητα των οποίων βρίσκονται στην περιοχή της ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (στην Θάσο, την Καβάλα και την Δράμα). Η Ελλάδα εφαρμόζει εκτενείς αναδιατάξεις στον τομέα της ενέργειας, με σκοπό την επίτευξη μιας κλιματικά ουδέτερης οικονομίας και την υιοθέτηση ανταγωνιστικών αγορών, με την σταδιακή κατάργηση των λιγνιτικών μονάδων παραγωγής έως το 2023 και την επένδυση 5 δισεκατομμυρίων για την υποστήριξη των κοινωνιών που θα επηρεαστούν από αυτή την αλλαγή. Ο ηλεκτρισμός εξελίσσεται ως κύριος ενεργειακός φορέας με επέκταση των χρήσεων υποκαθιστώντας ορυκτά καύσιμα, αποτελώντας μοχλό ανάπτυξης.

Ο ρόλος του υδρογόνου θα είναι επίσης πολύ σημαντικός και στην Ελλάδα σύμφωνα με τη Μακροχρόνια Ενεργειακή Στρατηγική για το 2050. Με βάση τα δύο σενάρια που οδηγούν τη χώρα σχεδόν στην κλιματική ουδετερότητα ως το 2050 (μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου το 2050 κατά 95% σε σχέση με το 1990), θα αποθηκεύονται σε μορφή υδρογόνου 15,7-33,1 TWh ηλεκτρικής ενέργειας, με αντίστοιχο μερίδιο 70%-78% της συνολικά αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, ενώ η ισχύς των συστημάτων ηλεκτροδότησης για παραγωγή υδρογόνου θα κυμανθεί, στα δύο πιο φιλόδοξα σενάρια, από 4,3 GW έως 23,5 GW, καταλαμβάνοντας μερίδια 51%-84% της συνολικής αποθηκευτικής ισχύος της χώρας, αντίστοιχα.

Στο πλαίσιο αυτό αναλύθηκαν οι επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή, την οξίνιση, τον ευτροφισμό και τον φωτοχημικό σχηματισμό οξειδωτικών, αξιολογώντας το περιβαλλοντικό αντίκτυπο ανά κάθε κατηγορία, από την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με υδρογόνο σε κυψέλες καυσίμων και κινητήρων εσωτερικής καύσης. Ειδικότερα, διαπιστώθηκε ότι παρόλο που η παραγωγή πράσινου υδρογόνου προκαλεί σημαντικές εκπομπές CO₂, ωστόσο είναι σημαντικά μικρότερες σε σχέση με τη λειτουργία του λατομείου με ορυκτά καύσιμα. Σε σχέση με τις τεχνολογίες H₂, η λειτουργία του εξοπλισμού και των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών με κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου παρουσίασαν τις βέλτιστες επιδόσεις.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, φαίνεται πως το H₂ θα είναι ένας μελλοντικός βασικός φορέας ενέργειας, αν και θα χρειαστεί να πραγματοποιηθεί μία ομαλή απανθρακοποίηση των λατομικών δραστηριοτήτων, τα χρόνια που θα ακολουθήσουν. Τα δύο βασικότερα προτερήματα του H₂ είναι πως αφενός έχει το υψηλότερο

ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα μάζας, συγκριτικά με άλλα καύσιμα και αφετέρου κατά την καύση του παράγονται μόνο νερό και θερμότητα και για το λόγο αυτό δε ρυπαίνει το περιβάλλον και συνάδει με την ενεργειακή μετάβαση που αναμένεται να λάβει χώρα στην Ευρωπαϊκή ήπειρο. Προς το παρόν, το μεγαλύτερο ίσως μειονέκτημα σχετίζεται με το αυξημένο κόστος παραγωγής του H₂ χαμηλών εκπομπών. Στο αυξημένο κόστος έρχεται να προστεθεί το πρόβλημα της αργής ανάπτυξης υποδομών H₂, σε συνδυασμό με έλλειψη κανονισμών και την έλλειψη σταθμών ανεφοδιασμού.

Το επενδυτικό ενδιαφέρον στην οικονομία του υδρογόνου πυκνώνει ειδικά γύρω από τις νέες τεχνολογίες για την παραγωγή “πράσινου” υδρογόνου, με ενδεικτικές τις υψηλές αποδόσεις που απολαμβάνουν οι εισηγμένες εταιρείες που αντικαθιστούν τον άνθρακα με υδρογόνο στην παραγωγή τους. Στο πλαίσιο της μετάβασης στην οικονομία του υδρογόνου οι μεταλλευτικές εταιρείες μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην επιτάχυνση της χρήσης και της αξιοποίησης αυτής της βιώσιμης πηγής ενέργειας ως μια εναλλακτική λύση για τα ορυκτά καύσιμα.

Οι μεταλλευτικές εταιρείες έχουν επίσης περισσότερα κίνητρα να στραφούν σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λόγω του υψηλότερου κόστους ενέργειας στις απομακρυσμένες δραστηριότητες τους, και ως εκ τούτου είναι σε καλύτερη θέση για την παραγωγή “πράσινου” υδρογόνου χρησιμοποιώντας τις συγκεκριμένες υποδομές ΑΠΕ. Διαθέτουν βαρέα οχήματα που μπορούν να υποστηρίξουν μεταφορά φορτίων αποθήκευσης υδρογόνου σε αντίθεση με τα ελαφρά οχήματα που για να κάνουν την ίδια δουλειά απαιτούν υψηλότερο κόστος συμπίεσης και πιο ακριβά συστήματα αποθήκευσης. Οι μεταλλευτικές εταιρείες είναι επίσης εξοικειωμένες με την ασφαλή αποθήκευση και διαχείριση χημικών, αντιδραστηρίων και συμπιεσμένων αερίων.

Οι οικονομικοί αναλυτές εκτιμούν ότι τα μεταλλεία που συχνά βρίσκονται σε περιοχές με υψηλό δυναμικό ηλιακής και αιολικής ενέργειας και μπορούν να γίνουν πλεονασματικοί παραγωγοί συνεχίζοντας να παράγουν υδρογόνο και μετά την εξάντληση των πόρων του ορυχείου, όταν αυτό θα πρέπει να κλείσει. Το θέμα αποκτά ολόένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε μια εποχή που παγκοσμίως οι εταιρείες σε όλες τις βιομηχανίες αφιερώνουν σημαντικούς πόρους για τη μείωση του αποτυπώματος του άνθρακα. Ομοίως, οι εταιρείες εξόρυξης αυξάνουν τους δικούς τους στόχους βιωσιμότητας κι έχουν την ευκαιρία να επηρεάσουν την αντίληψη που υπάρχει σχετικά με τη δέσμευσή τους για την προστασία του περιβάλλοντος αναλαμβάνοντας ενεργό ρόλο στην αναπτυσσόμενη οικονομία υδρογόνου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- 1) P. Michalopoulos, G.J. Tsekouras, F.D. Kanellos, and J.M. Prousalidis, “Optimal Selection of the Diesel Generators Supplying a Ship Electric Power System”, 17 Oct. 2022
- 2) Department of Industry Innovation and Science. (Oct. 24 2017). Annual Report 2016-2017.
- 3) P. Darling and M. Society for Mining, and Exploration, SME Mining Engineering Handbook, 3rd ed. Englewood, CO, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2011
- 4) Annaratone D., Steam Generators: Description and Design. Milano: Springer, 2007
- 5) Jalil Yaghoobi, Power Quality Issues of Distorted and Weak Distribution Networks in Mining Industry, November 18, 2019
- 6) 10th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, IMechE London, UK, 2012
- 7) M. G. Jahromi, G. Mirzaeva, S. D. Mitchell, and D. Gay, “Powering mobile mining machines: DC versus AC power,” IEEE Ind. Sep./Oct. 2016
- 8) P. Aqueveque, E. P. Wiechmann, J. A. Henríquez, and L. G. Muñoz, “Energy quality and efficiency of an open pit mine distribution system: Evaluation and solution,” IEEE Trans , Jan./Feb. 2016.
- 9) V. N. Ferreira, G. A. Mendonça, A. V. Rocha, R. S. Resende, and B. J. C. Filho, “Medium voltage IGBT-based converters in mine hoist systems,” in Proc. IEEE Ind, Oct. 2016, pp. 1–8
- 10) H. K. Mohamed, S. M. El-Debeiky, H. M. Mahmoud, K. M. El Destawy: Data Mining for Electrical Load Forecasting In Egyptian Electrical Network
- 11) B. K. Duncan, B. G. Bailey “Protection, Metering, Monitoring, and Control of Medium-Voltage Power Systems”, IEEE, Jan/Feb 2004
- 12) Caterpillar, www.cat.com
- 13) Université de Technologie de Compiègne, Urban DC Microgrid , France 2016
- 14) A. Q. Jakhani, A. R. Henry Rigit, A. Othman, S. R. Samo, S. A. Kamboh “Estimation of Carbon Footprints from Diesel Generator Emissions”, 2012 International Conference in Green and Ubiquitous Technology

- 15) Charlie Currie, JCB to unveil brand new hydrogen combustion engine, Jan 20, 2023
- 16) K. E. Mentch, G. M. Kemper, “Challenges of a New Quarry Five Miles from a Plant”, 2018
- 17) James Baraza World’s First Hydrogen-Powered Artic Dump Truck, June 27, 2022
- 18) Researchdive, Dump Trucks And Mining Trucks Market Report, Feb 2023
- 19) <https://ecochain.com/blog/life-cycle-assessment-software-overview-comparison/>
- 20) <https://deiso.co.jp/deiso-training/gabi-lca-training-programs/>
- 21) Arjun Ram, Piyush Sharma : A study on Life Cycle Assessment, February 24-25, 2017, Madhav University, Sirohi (Rajasthan), India
- 22) Krozer, J. & Vis J.C. (1998). How to get LCA in the right direction? *Journal of Cleaner Production*, 6, 53-61
- 23) Huijbregts, M.A.J., Gilijamse, W., Ragas, A.M.J. & Reijnders, L. (2003). Evaluating uncertainty in environmental Life-Cycle Assessment, *Environmental Science and Technology*, 37, 2600-2608.
- 24) Acero, A. A. P., Rodríguez, C., & Cirot, A. (2015). LCIA methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories, (February 2014), 1–22
- 25) Sala, S., Crenna, E., Secchi, M. and Pant, R., Global normalisation factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment, EUR 28984 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-77214-6 (print), 978-92-79-77213-9 (pdf), doi:10.2760/88930 (online), 10.2760/775013 (print), JRC109878
- 26) Review of hydrogen fuel for internal combustion engines, M. Faizal, L. S. Chuah, C. Lee, A. Hameed, J. Lee, M. Shankar, 10 April 2019
- 27) A Comprehensive Overview of Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines: Achievements and Future Challenges, Zbigniew Stępień, 11 October 2021
- 28) Hydrogen Production: Fundamentals and Case Study Summaries, K.W. Harrison, R. Remick, and G.D. Martin, National Renewable Energy Laboratory, January 2010

- 29) Hosseini, S.E.; Butler, B. An overview of development and challenges in hydrogen-powered vehicles. *Int. J. Green Energy* **2020**, *17*, 13–37
- 30) Faizal, M.; Chuah, L.S.; Lee, C.; Hameed, A.; Lee, J.; Shankar, M. Review of hydrogen fuel for internal combustion engines. *J. Mech. Eng. Res. Dev. (JMERC)* 2019, *42*, 35–46
- 31) Saravanan, N.; Nagarajan, G. Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with Diesel as an ignition source. *Appl. Energy* 2010, *87*, 2218–2229
- 32) Stockhausen, W.F.; Natkin, R.J.; Kabat, D.M.; Reams, L.; Tang, X.; Hashemi, S.; Szwabowski, S.J.; Zanardelli, V.P. Ford P2000 Hydrogen Engine Design and Vehicle Development Program; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2002; SAE paper 2002-01-0240.
- 33) Ikegami, M.; Miwa, K.; Shioji, M. A study of hydrogen-fueled compression ignition engines. *Int. J. Hydrogen Energy* 1982, *7*, 341–353
- 34) Maccarley, C.A.; Van Vorst, W.D. Electronic fuel injection techniques for hydrogen-powered I.C. engines. *Int. J. Hydrogen Energy* 1980, *5*, 179–203
- 35) Kufferath, A.; Schünemann, E.; Krüger, M.; Krüger, M.; Jianye, S.; Eichlseder, H.; Koch, T. H₂ ICE Powertrains for future on-road mobility. In Proceedings of the 42nd International Vienna Motor Symposium, Vienna, Austria, 29–30 April 2021
- 36) Welch, A.; Mumford, D.; Munshi, S.; Holbery, J.; Boyer, B. Hydrogen direct injection technology—challenges and opportunities. In Proceedings of the NHA Annual Hydrogen Conference 2008, Sacramento, CA, USA, 31 March–4 April 2008
- 37) Sun, B.-G.; Zhang, D.-S.; Liu, F.-S. Cycle variations in a hydrogen internal combustion engine. *Int. J. Hydrogen Energy* 2013, *38*, 3778–3783
- 38) Salazar, V.; Kaiser, S. Interaction of Intake-Induced Flow and Injection Jet in a Direct-Injection Hydrogen-Fueled Engine Measured by PIV; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2011; No. 2011-01-0673
- 39) Chand, M.A.; Monga, R. Optimization of hydrogen direct injection engine to reduce NO_x emissions. *Int. J. Innov. Sci. Res.* 2014, *1*, 63–66
- 40) Pauer, T.; Weller, H.; Schünemann, E.; Eichlseder, H.; Grabner, P.; Schaffer, K. H₂ ICE for future passenger cars and light commercial vehicles. In Proceedings of the 41st International Vienna Motor Symposium, Vienna, Austria, 22–24 April 2020

- 41) Sens, M.; Danzer, C.; von Essen, C.; Brauer, M.; Wascheck, R.; Seebode, J.; Kratzsch, M. Hydrogen powertrains in competition to fossil fuel-based internal combustion engines and battery electric powertrains. In Proceedings of the 42nd International Vienna Motor Symposium, Vienna, Austria, 29–30 April 2021
- 42) Combustion and Sustainable Energy Laboratory (ComSEL), Department of Mechanical Engineering, Arkansas Tech University, 1811 N Boulder Ave, Russellville, AR 72801, USA , 30 March 2019
- 43) Jian-guo Li, “Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment”, 3, Pages 381-391, June 2018
- 44) O. Faye, “A critical review on the current technologies for the generation, storage, and transportation of hydrogen”, Pages 13771-13802, 5 April 2022
- 45) Zhengkai Tu, Lixin Fan, “Recent development of hydrogen and fuel cell technologies”, Pages 8421-8446, November 2021
- 46) R. Broekens, M. Escarameia, C. Cantelmo, G. Woolhouse “Quantifying the carbon footprint of coastal construction – a new tool HRCAT” 15-17 November 2011, Belfast
- 47) Chunna Liu, “Carbon emission evaluation of heavy equipment on dam construction site using discrete event simulation”, 2021
- 48) B. Bossi, M. L. Trani, “Predicting fuel energy consumption during earthworks” , Pages 3798-3809 , 20 January 2016
- 49) SAE Media group <https://www.mobilityengineeringtech.com/>
- 50) A. S. E. Ekberg “Hydrogen – the future fuel for construction equipment” Malardalen University Sweden
- 51) M. Yu, K. Wang, H. Vredenburg, “Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen”, 2 May 2021
- 52) “The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen”, Vienna University of Technology (TU WIEN), Vienna, Austria, 4 March 2022
- 53) C. Koroneos, A. Dompros, G. Roumbas, N. Moussiopoulos, “Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes”, 21 January 2004
- 54) Y. Zhou, S. Searle, “Cost of renewable hydrogen produced onsite at hydrogen refueling stations in europe” 2022

- 55) IEA, “The Future of Hydrogen”, June 2019, https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf
- 56) Y. Li, F. Taghizadeh-Hesary, Energy prices and the economic feasibility of using hydrogen energy for road transport in the people’s republic China, September 2020
- 57) R. Caponi¹, A. M. Ferrario, L. Del Zotto, E. Bocci¹, “Hydrogen refueling station cost model applied to five real case studies for fuel cell buses”, 2021
- 58) W. Aayers, J. Schmuecker, D. L. Toyne, Comparison of hydrogen fueled power sources, 29 September 2015
- 59) L. Fan, Z. Tu, “Recent development of hydrogen and fuel cell technologies”, Pages 8421-8446, November 2021
- 60) Y. Manoharan, S. E. Hosseini, B. Butler, H. Alzahrani, B. T. F. Senior, T. Ashuri, J. Krohn John, “Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect”, 4 June 2019
- 61) K.W. Harrison, R. Remick,, G.D. Martin, “Hydrogen Production: Fundamentals and Cas Study Summaries” , 2010
- 62) G. Barjoveanu, F. Dinita C. Teodosiu, “Aging Passenger Car Fleet Structure, Dynamics, and Environmental Performance Evaluation at the Regional Level by Life Cycle Assessment”, 2022
- 63) K. A. Ali, M. I. Ahmad, “Issues, Impacts, and Mitigations of Carbon Dioxide Emissions in the Building Sector”, 2020
- 64) EODev, <https://www.eo-dev.com/>
- 65) K. J. Krishnan, “Experimental Investigation of H₂ Generator and PEM Fuel Cell as a Remote Area Back-Up Power”, Pages 66-73, 2012
- 66) H. Voss , J. Huff, “Portable fuel cell power generator”, 24 December 1996
- 67) A. Boretti, “Hydrogen internal combustion engines to 2030” , 3 June 2020
- 68) B. Sun, D. Zhang, F. Liu, “Cycle variations in a hydrogen internal combustion engine”, 8 February 2013
- 69) CMB.TECH, <https://cmb.tech/business-units/industry>

Ελληνική Βιβλιογραφία

- 70) Νικόλαος Βλάχος, Διπλωματική εργασία “Μεθοδολογία ελέγχου και παρακολούθησης περιβαλλοντικών μεταβλητών σε λατομεία αδρανών”, Αθήνα 2011
- 71) Κοσμάς Θεοφάνης, Πτυχιακή εργασία “Συντήρηση Υποσταθμών Μέσης Τάσης” , Αθήνα, 2017
- 72) Β. Παπαδιάς, Κ. Βουρνάς, Κ. Ντελκής “Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας”, Εκδόσεις Συμμετρία, Μάιος 2011
- 73) TiSoft Systems and Software, <https://www.ti-soft.com>
- 74) Μαρία Ν. Θωμά, Διπλωματική εργασία “Μελέτη επίπτωσης σύνδεσης φωτοβολταϊκών στα δίκτυα διανομής μέσης τάσης”
- 75) Δομέτιος Άγγελος, Πτυχιακή εργασία “Συντήρηση υποσταθμού μέσης τάσης”, Ιανουάριος 2018
- 76) Μερζιώτης Ι. Χαράλαμπος, Πτυχιακή εργασία “Συντήρηση υποσταθμού μέσης τάσης”, Μάιος - 2014
- 77) Μαρία Κουνενού, Διπλωματική εργασία “Οικονομοτεχνική και Περιβαλλοντική ανάλυση και αξιολόγηση πράσινης ενέργειας: μελέτη περίπτωσης” 2015
- 78) Ζουμπούλης, Α., Πελέκα, Ε., & Τριανταφυλλίδης, Κ. (2015). Ανάλυση Κύκλου Ζωής [Κεφάλαιο]. Στο Ζουμπούλης, Α., Πελέκα, Ε., & Τριανταφυλλίδης, Κ. 2015. Πράσινη χημεία και τεχνολογία στη βιώσιμη ανάπτυξη [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις
- 79) Αγγελική Μητροπούλου, Ανάλυση του Κύκλου Ζωής για την παραγωγή σκόνης μίγματος άνθου αραβοσίτου, Κεφάλαιο 2, Αθήνα 2016
- 80) Δανάη Ελένη Στρούτζα, Ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) μονάδας επεξεργασίας υδατικών αποβλήτων ορυχείων άνθρακα – Σενάρια βελτίωσης περιβαλλοντικού αποτυπώματος, Κεφάλαιο 2, Αθήνα 2023
- 81) Πανταζή Ελένη, Διπλωματική εργασία με θέμα: Συγκριτική μελέτη μεθόδων εκτίμησης επιπτώσεων κύκλου ζωής, Κεφάλαιο 3, Χανιά 2014
- 82) Ικτίνος: Οι business σε real estate, ΑΠΕ και η αναζήτηση επενδυτών για το project στην Κρήτη <https://www.liberal.gr/> 2021
- 83) Ετήσια Οικονομική έκθεση χρήσης 1η Ιανουαρίου έως 31η Δεκεμβρίου 2022, ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ Α.Ε

- 84) Αντιόπη Σχοινά, “Το σχέδιο της Ικτίνος για επενδύσεις, νέες αγορές και επέκταση λατομείων”, 2022
- 85) Απόστολος Σκουμπούρης, “Στροφή σε νέες αγορές από την Ικτίνος μετά τη μείωση εξαγωγών στην Κίνα”, 2022 <https://www.businessdaily.gr/>
- 86) Δάφνη Γρηγοριάδη, “Χαϊδά – Ικτίνος: Νέες επενδύσεις 15 εκατ. αντίδοτο στην ενεργειακή κρίση”, 2022, <https://www.powergame.gr/>
- 87) Εγκρίθηκε η τεχνική μελέτη για υπόγεια εκμετάλλευση λατομείου μαρμάρου της «ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ ΑΕ» στο Βόλακα Δράμας, 2023, <https://www.oryktosploutos.net/>
- 88) Κωνσταντοπούλου Παναγιώτα, Διπλωματική Εργασία “Ενεργειακή επιθεώρηση και αξιολόγηση δυνατοτήτων εφαρμογής τεχνολογιών ΑΠΕ σε λατομείο εξόρυξης μαρμάρου” ,2003
- 89) Σύνδεσμος μεταλλευτικών επιχειρήσεων ΣΜΕ, Έκθεση δραστηριοτήτων 2020
- 90) Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας “Μεταλλευτική και Λατομική δραστηριότητα στην Ελλάδα”, ετήσια έκθεση, 2021
- 91) Σύνδεσμος μεταλλευτικών επιχειρήσεων ΣΜΕ, Έκθεση δραστηριοτήτων 2021
- 92) Clim pact Εθνικό Δίκτυο Για Την Κλιματική Αλλαγή, “ Έκθεση για τις ευρύτερες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και των μέτρων μείωσης των εκπομπών στην οικονομία, στην κοινωνία και στο περιβάλλον”, Ιούλιος 2022
- 93) Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, ΤΚΜ, “Υπάρχουσες τεχνολογίες και τελικές χρήσεις του "καυσίμου του μέλλοντος" - Η2”, 2010