



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων

Τομέας Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάλυση Κύκλου Ζωής και Κοστολόγηση Κύκλου Ζωής του λιγνίτη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: Εφαρμογή στην Ελληνική περίπτωση»

«Life Cycle Analysis and Life Cycle Costing of lignite for power generation: Applied case study in Greece»

Σταματίου Γεώργιος

Επιβλέπων

Καρέλλας Σωτήριος, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2015

Πρόλογος

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Δρ. Σωτήριο Καρέλλα για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το θέμα της εργασίας, που τυγχάνει του άμεσου ενδιαφέροντός μου.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον MSc Μηχανολόγο Μηχανικό κ. Δημήτριο Κουρκούμπα, Επιστημονικό Συνεργάτη του ΕΚΕΤΑ/ΙΔΕΠ και Υπ. Διδάκτορα του ΕΜΠ, για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας και την άψογη συνεργασία μας, καθώς και για τις γνώσεις που αποκόμισα μέσα από τις συζητήσεις μας σχετικά με το θέμα αυτό.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την υποστήριξη που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και για το δώρο που μου χάρισε ώστε να φτάσω μέχρι εδώ.

*Γιώργος Διαματίου
Αθήνα 5 Ιουλίου 2015*

Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος πινάκων	8
Κατάλογος σχημάτων	10
Κατάλογος εικόνων	11
Κατάλογος διαγραμμάτων	12
Περίληψη.....	15
Abstract	17
Κεφάλαιο 1 ^ο	19
Γενικά Στοιχεία	19
1.1 Εισαγωγή	19
1.2 Ταξινόμηση γαιανθράκων	19
1.3 Αποθέματα	20
1.4 Εξέλιξη λιγνιτικής δραστηριότητας	22
1.5 Συνεισφορά του λιγνίτη στον ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας – Μελλοντική εξέλιξη.....	28
1.6 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	29
Κεφάλαιο 2 ^ο	31
Μηχανολογικός εξοπλισμός ορυχείων	31
2.1 Μηχανολογικός εξοπλισμός ορυχείων	31
2.2 Πάγιος μηχανολογικός εξοπλισμός ορυχείων	33
2.3 Έκτακτος μηχανολογικός εξοπλισμός ορυχείων	37
2.4 Οργάνωση εργασιών λιγνιτωρυχείων	47
2.5 Ανάλυση διαδοχής εργασιών και ροής υλικών λιγνιτωρυχείου	50
Κεφάλαιο 3 ^ο	53
Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA).....	53
3.1 Εισαγωγή στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής-ΑΚΖ (Life Cycle Analysis-LCA) για τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη	53
3.2 Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής-ΑΚΖ	53
3.3 Ανάλυση Κύκλου Ζωής συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη	54
3.4 Ανάλυση Κύκλου Ζωής συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιβλιογραφικές πηγές	58
Κεφάλαιο 4 ^ο	69
Ανάλυση διαδικασιών SimaPro v.7.3.3.....	69
4.1 Γενικά για το SimaPro	69
4.2 Μοντελοποίηση διαδικασιών εξόρυξης λιγνίτη στο SimaPro v.7.3.3	69
4.3 Μοντελοποίηση θερμοηλεκτρικού σταθμού στο SimaPro v.7.3.3	80

4.4 Μοντελοποίηση διαδικασιών συλλογής βιομάζας στο SimaPro v.7.3.3.....	92
4.5 Σενάρια εφοδιαστικής αλυσίδας βιομάζας.....	98
Κεφάλαιο 5°	103
Κοστολόγηση Κύκλου Ζωής (LCC).....	103
5.1 Εισαγωγή στην Κοστολόγηση Κύκλου Ζωής-ΚΚΖ (Life Cycle Costing-LCC) για τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη	103
5.2 Κατηγορίες Κόστους.....	103
5.3 Προσδιορισμός ιδιωτικού (εσωτερικού) κόστους (Internal Cost)	107
5.4 Προσδιορισμός Εξωτερικό Κόστος (External Cost).....	115
5.5 Βιβλιογραφική διερεύνηση	118
Κεφάλαιο 6°	123
Αποτελέσματα – Περιβαλλοντική αποτίμηση	123
6.1 Γενικά.....	123
6.2 Καύση φυσικού λιγνίτη (Περίπτωση αναφοράς).....	124
6.3 Μικτή καύση φυσικού λιγνίτη, με 30% θερμική υποκατάσταση με προ-ξηραμένο λιγνίτη	126
6.4 Μικτή καύση φυσικού λιγνίτη, με 6% θερμική υποκατάσταση με βιομάζα	129
6.5 Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος εξεταζόμενων περιπτώσεων καύσης	133
6.6 Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος διαφόρων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	135
Κεφάλαιο 7°	137
Αποτελέσματα – Οικονομική Αξιολόγηση	137
7.1 Γενικά.....	137
7.2 Καύση φυσικού λιγνίτη	137
7.4 Μικτή καύση φυσικού λιγνίτη, με 6% θερμική υποκατάσταση με βιομάζα	141
7.5 Σύγκριση συνολικού κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας εξεταζόμενων περιπτώσεων καύσης	143
7.6 Συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από διαφορετικά συστήματα παραγωγής.....	144
Κεφάλαιο 8°	145
Ανάλυση Ευαισθησίας	145
8.1 Γενικά – Παράμετροι ευαισθησίας	145
8.2 Ανάλυση ευαισθησίας περιβαλλοντικών παραμέτρων.....	145
8.3 Ανάλυση ευαισθησίας οικονομικών παραμέτρων	148
Κεφάλαιο 9°	155
Συμπεράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	155
9.1 Συμπεράσματα	155

9.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	156
Βιβλιογραφία.....	159

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1	Σύγκριση χαρακτηριστικών λιγνίτη και λιθάνθρακα
Πίνακας 1.2	Βασικά χαρακτηριστικά λιγνιτικών κοιτασμάτων της Ελλάδας
Πίνακας 1.3	Μέθοδος επιφανειακής εκμετάλλευσης συνεχούς εξόρυξης, μεταφοράς και απόθεσης με ανάπτυξη συστήματος βαθμίδων
Πίνακας 1.4	Εκτάσεις των μεγαλύτερων ορυχείων (km ²)
Πίνακας 1.5	Στοιχεία εκμεταλλεύσεων λιγνίτη και αντιστοίχων ατμοηλεκτρικών σταθμών (ΑΗΣ)
Πίνακας 2.1	Χαρακτηριστικά πάγιου εξοπλισμού ορυχείων
Πίνακας 2.2	Πάγιος εξοπλισμός λιγνιτωρυχείων ΔΕΗ
Πίνακας 2.3	Χαρακτηριστικά έκτακτου εξοπλισμού ορυχείων
Πίνακας 3.1	Γεωγραφική θέση και μέγεθος εγκατάστασης των μελετών που εξετάζονται
Πίνακας 3.2	Όρια συστήματος των μελετών που εξετάζονται
Πίνακας 3.3	Επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου ανά είδος τεχνολογίας (kg CO ₂ /MWh)
Πίνακας 3.4	Επίδραση στο φαινόμενο της οξίνισης ανά είδος τεχνολογίας (kg SO ₂ /MWh)
Πίνακας 3.5	Επίδραση στο φαινόμενο του ευτροφισμού ανά είδος τεχνολογίας (kg NO _x /MWh)
Πίνακας 4.1	Χαρακτηριστικά έκτακτου εξοπλισμού
Πίνακας 4.2	Χαρακτηριστικά έκτακτου και πάγιου εξοπλισμού
Πίνακας 4.3	Χαρακτηριστικά έκτακτου και πάγιου εξοπλισμού
Πίνακας 4.4	Χαρακτηριστικά έκτακτου εξοπλισμού
Πίνακας 4.5	Βασικές παράμετροι λειτουργίας της νέας μονάδας Πτολεμαΐδα V
Πίνακας 4.6	Ενδεικτικές τιμές θερμοκρασιών κατά την ξήρανση φαιανθράκων και λιθανθράκων
Πίνακας 4.7	Βασικά τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά περιστροφικών ξηραντήρων με αυλούς
Πίνακας 4.8	Σύσταση φυσικού λιγνίτη ως έχει (μέση σύσταση λιγνίτη Δυτικής Μακεδονίας)
Πίνακας 4.9	Σύσταση προ-ξηραμένου λιγνίτη και ισοδύναμου καυσίμου (μικτή καύση φυσικού με προ-ξηραμένο λιγνίτη από 30% θερμική υποκατάσταση)
Πίνακας 4.10	Ενδεικτικά μεγέθη εφοδιαστικής αλυσίδας αχύρου σε μπάλες για διάφορες περιοχές προμήθειας
Πίνακας 4.11	Σύσταση βιομάζας και ισοδύναμου καυσίμου (μικτή καύση φυσικού λιγνίτη με βιομάζα αχύρου σιτηρών (straw) από 6% θερμική υποκατάσταση)
Πίνακας 5.1	Κατηγορίες κόστους Βιομηχανικής Βάσης
Πίνακας 5.2	Κόστος Έρευνας, Ανάπτυξης, Δοκιμών και Αξιολόγησης
Πίνακας 5.3	Κόστος Απόκτησης
Πίνακας 5.4	Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης
Πίνακας 5.5	Κόστος Επένδυσης (CAPEX) λιγνιτωρυχείου σε (€/kWe _{inst})
Πίνακας 5.6	Κόστος Επένδυσης (CAPEX) μονάδας παραγωγής και τεχνολογίας αντιρρύπανσης σε (€/kWe _{inst})
Πίνακας 5.7	Κόστος Επένδυσης (CAPEX) θερμοηλεκτρικού σταθμού σε (€/kWe _{inst})
Πίνακας 5.8	Σταθερό Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης (OPEX) μονάδας παραγωγής και τεχνολογίας αντιρρύπανσης σε (€/kWe _{inst} year)
Πίνακας 5.9	Μεταβλητό Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης (OPEX) μονάδας παραγωγής και τεχνολογίας αντιρρύπανσης σε (€/MWh)
Πίνακας 5.10	Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης (OPEX) θερμοηλεκτρικού σταθμού σε (€/kWe _{inst} year)
Πίνακας 5.11	Κόστος Επένδυσης (CAPEX) περιστροφικού ξηραντήρα αυλών σε (€ ₂₀₁₅)
Πίνακας 5.12	Πίνακας 5.12: Σταθερό Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης (O&M Cost) περιστροφικού ξηραντήρα αυλών σε (€ ₂₀₁₅)
Πίνακας 5.13	Μεταβλητό Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης (O&M Cost) περιστροφικού ξηραντήρα αυλών σε (€ ₂₀₁₅)

Πίνακας 5.14	Εξωτερικό κόστος ρύπων σε επιλεγμένες κατηγορίες ζημιών σε (€ ₂₀₁₄ /tn)
Πίνακας 5.15	Κοστολόγηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη (€ ₂₀₁₄ /MWh)
Πίνακας 5.16	Κοστολόγηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη (€ ₂₀₁₄ /MWh)
Πίνακας 6.1	Παράμετροι λειτουργίας λιγνιτωρυχείου
Πίνακας 6.2	Παράμετροι λειτουργίας θερμοηλεκτρικού σταθμού
Πίνακας 6.3	Εκπομπές ρύπων στην περίπτωση καύσης φυσικού λιγνίτη
Πίνακας 6.4	Παράμετροι λειτουργίας λιγνιτωρυχείου
Πίνακας 6.5	Παράμετροι λειτουργίας θερμοηλεκτρικού σταθμού
Πίνακας 6.6	Εκπομπές ρύπων στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού και προ-ξηραμένου λιγνίτη
Πίνακας 6.7	Παράμετροι λειτουργίας λιγνιτωρυχείου
Πίνακας 6.8	Παράμετροι λειτουργίας θερμοηλεκτρικού σταθμού
Πίνακας 6.9	Εκπομπές ρύπων στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη και βιομάζας
Πίνακας 6.10	Εκπομπές ρύπων από τις εφοδιαστικές αλυσίδες της βιομάζας στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη και βιομάζας
Πίνακας 6.11	Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις καύσης (kgCO _{2eq} /kWh)
Πίνακας 6.12	Χώρος προέλευσης στοιχείων εξεταζόμενων τεχνολογιών
Πίνακας 7.1	Κόστος επένδυσης και κόστος λειτουργίας και συντήρησης στην περίπτωση καύσης φυσικού λιγνίτη
Πίνακας 7.2	Εξωτερικό κόστος λιγνιτωρυχείου
Πίνακας 7.3	Εξωτερικό κόστος θερμοηλεκτρικού σταθμού
Πίνακας 7.4	Κόστος επένδυσης και κόστος λειτουργίας και συντήρησης
Πίνακας 7.5	Εξωτερικό κόστος λιγνιτωρυχείου
Πίνακας 7.6	Εξωτερικό κόστος θερμοηλεκτρικού σταθμού
Πίνακας 7.7	Κόστος επένδυσης και κόστος λειτουργίας και συντήρησης
Πίνακας 7.8	Εξωτερικό κόστος λιγνιτωρυχείου και θερμοηλεκτρικού σταθμού
Πίνακας 7.9	Εξωτερικό κόστος εναλλακτικών εφοδιαστικής αλυσίδας της βιομάζας
Πίνακας 8.1	Μέση σύσταση φυσικού λιγνίτη στις περιπτώσεις της Ελλάδας και της Γερμανίας

Κατάλογος σχημάτων

- Σχήμα 1.1 Διασπορά εκμεταλλεύσιμων λιγνιτικών κοιτασμάτων στον ελληνικό χώρο
- Σχήμα 1.2 Στάδια εκμετάλλευσης ορυχείου με επιφανειακή μέθοδο εξόρυξης
- Σχήμα 1.3 Εκμετάλλευση κοιτασμάτων μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης με τη μέθοδο επιφανειακής εκμετάλλευσης συνεχούς εξόρυξης, μεταφοράς και απόθεσης με σύστημα βαθμίδων - Κάτοψη
- Σχήμα 1.4 Ενδεικτική διάταξη εξοπλισμού για την εκμετάλλευση κοιτασμάτων μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης με τη μέθοδο επιφανειακής εκμετάλλευσης συνεχούς εξόρυξης και απόθεσης με σύστημα πολλαπλών βαθμίδων-Τομή
- Σχήμα 2.1 Διαδοχή εργασιών λιγνιτωρυχείου
- Σχήμα 2.2 Συνήθης συνεργασία Καδοφόρου Εκσκαφέα-Ταινιόδρομου-Αποθέτη σε λιγνιτωρυχείο
- Σχήμα 2.3 Διάγραμμα εργασιών και ροής υλικών λιγνιτωρυχείου
- Σχήμα 3.1 Στάδια μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής
- Σχήμα 3.2 Όρια συστήματος που περιλαμβάνονται στην ανάλυσης κύκλου ζωής για το λιγνίτη
- Σχήμα 4.1 Κατανομή ντιζελοκίνητων μηχανημάτων στο ορυχείο για την εργασία της αφαίρεσης του επιφανειακού στρώματος του εδάφους
- Σχήμα 4.2 Κατανομή ντιζελοκίνητων μηχανημάτων στο ορυχείο για την εργασία της περιβαλλοντικής αποκατάστασης
- Σχήμα 4.3 Κλειστός κύκλος κονιοποίησης με θερμά καυσαέρια θαλάμου καύσης
- Σχήμα 4.4 Ανοικτός κύκλος κονιοποίησης με θερμά καυσαέρια λέβητα
- Σχήμα 4.5 Τυπική διάταξη περιστροφικού ξηραντήρα αυλών
- Σχήμα 4.6 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας ξηραντήρα
- Σχήμα 4.7 Χάρτης περιοχών με υψηλή παραγωγή αχύρου σιτηρών
- Σχήμα 4.8 Διάγραμμα εφοδιαστικής αλυσίδας βιομάζας αχύρου σιτηρών (straw)
- Σχήμα 5.1 Συσχέτιση ανάμεσα σε AKZ και KKZ
- Σχήμα 5.2 Βασικές κατηγορίες κόστους της μεθόδου KKZ
- Σχήμα 5.3 Σύγκριση τιμών εξωτερικού κόστους βιβλιογραφίας και CASES, 2008

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1.1	Μέθοδος συνεχούς εξόρυξης με χρήση καδοφόρων εκσκαφών
Εικόνα 1.2	Στρωματογραφία μετώπου εκσκαφής σε λιγνιτωρυχείο
Εικόνα 2.1	Καδοφόρος εκσκαφέας
Εικόνα 2.2	Συμβολισμός καδοτροχού
Εικόνα 2.3	Εκσκαφέας με συρόμενο κάδο
Εικόνα 2.4	Ηλεκτροκίνητο πτύο
Εικόνα 2.5	Τμήμα δικτύου ταινιοδρόμων
Εικόνα 2.6	Αποθέτης υπερκειμένων
Εικόνα 2.7	Όχημα μεταφοράς προσωπικού
Εικόνα 2.8	Ερπυστριοφόρος μπολτόζα
Εικόνα 2.9	Μηχάνημα απομάκρυνσης επιφανειακού στρώματος εδάφους
Εικόνα 2.10	Μπολτόζα
Εικόνα 2.11	Τροχομπολτόζα
Εικόνα 2.12	Μηχάνημα απόξεσης εδάφους
Εικόνα 2.13	Μηχάνημα πλανίσματος εδάφους
Εικόνα 2.14	Ισοπεδωτής
Εικόνα 2.15	Μηχάνημα αναμόρφωσης δρόμων
Εικόνα 2.16	Φορτωτής-Εργαλειοφορέας
Εικόνα 2.17	Αρθρωτό Φορτηγό
Εικόνα 2.18	Φορτηγό χωματουργικών εργασιών
Εικόνα 2.19	Θραυστήρας ή Σπαστήρας
Εικόνα 2.20	Φορτωτής-Εκσκαφέας
Εικόνα 2.21	Πρόσθιο Πτύο
Εικόνα 2.22	Φορτωτής
Εικόνα 2.23	Εκσκαφέας
Εικόνα 2.24	Οδοστρωτήρας
Εικόνα 2.25	Γεωτρύπανο
Εικόνα 4.1	Σείριασμα αχύρου
Εικόνα 4.2	Δεματοποίηση αχύρου
Εικόνα 4.3	Αποθήκευση σε σωρούς για μεγάλες τετράγωνες μπάλες κάτω από λινάτσα, σε εξωτερικούς χώρους

Κατάλογος διαγραμμάτων

- Διάγραμμα 1.1 Συνολικές εκσκαφές (Mm^3), παραγωγή λιγνίτη ορυχείων (Mt) και εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς των λιγνιτικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ΔΕΗ για τη περίοδο 2006-2043
- Διάγραμμα 1.2 Ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας για το έτος 2013
- Διάγραμμα 3.1 Σύγκριση βιβλιογραφικών αναφορών σχετικά με την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου
- Διάγραμμα 3.2 Σύγκριση βιβλιογραφικών αναφορών σχετικά με την επίδραση στο φαινόμενο της οξίνισης
- Διάγραμμα 3.3 Σύγκριση βιβλιογραφικών αναφορών σχετικά με την επίδραση στο φαινόμενο του ευτροφισμού
- Διάγραμμα 4.1 Εξάρτηση του συντελεστή C από την απόσταση μεταφοράς L (m)
- Διάγραμμα 4.2 Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις εναλλακτικές εξόρυξης υπερκειμένων υλικών (Greenhouse Gas Protocol v1.01)
- Διάγραμμα 4.3 Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις εναλλακτικές εξόρυξης λιγνίτη (Greenhouse Gas Protocol v1.01)
- Διάγραμμα 4.4 Περιοχές χρησιμοποίησης ανοικτού ή κλειστού κύκλου ξήρανσης και κονιοποίησης
- Διάγραμμα 4.5 Σύσταση ισοδύναμου καυσίμου σε κάθε μία από τις εναλλακτικές περιπτώσεις καύσης
- Διάγραμμα 4.6 Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις εναλλακτικές εφοδιαστικών αλυσίδων βιομάζας (Greenhouse Gas Protocol v1.01)
- Διάγραμμα 4.7 Ποσοστιαία συμμετοχή των επιμέρους διαδικασιών στις συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για τις περιπτώσεις A και B εφοδιαστικών αλυσίδων βιομάζας
- Διάγραμμα 5.1 Συντελεστής Marshall and Swift
- Διάγραμμα 5.2 Σύγκριση βιβλιογραφικών αναφορών σχετικά με την κοστολόγηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη
- Διάγραμμα 6.1 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην περίπτωση της καύσης φυσικού λιγνίτη (Impact 2002+)
- Διάγραμμα 6.2 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού και προ-ξηραμένου λιγνίτη (Impact 2002+)
- Διάγραμμα 6.3 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη και βιομάζας, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές εναλλακτικές εφοδιαστικής αλυσίδας της βιομάζας (Impact 2002+)
- Διάγραμμα 6.4 Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος εξεταζόμενων περιπτώσεων καύσης (Impact 2002+)
- Διάγραμμα 6.5 Σύγκριση επιδράσεως στο φαινόμενο του θερμοκηπίου των εξεταζόμενων περιπτώσεων καύσης (Greenhouse Gas Protocol v1.01)
- Διάγραμμα 6.6 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων διαφόρων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Greenhouse Gas Protocol v1.01)
- Διάγραμμα 7.1 Κατανομή συνολικού κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην περίπτωση της καύσης φυσικού λιγνίτη
- Διάγραμμα 7.2 Κατανομή συνολικού κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού και προ-ξηραμένου λιγνίτη
- Διάγραμμα 7.3 Κατανομή συνολικού κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη και βιομάζας, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές εναλλακτικές εφοδιαστικής αλυσίδας της βιομάζας
- Διάγραμμα 7.4 Κατανομή συνολικού κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στις εξεταζόμενες περιπτώσεις καύσης
- Διάγραμμα 8.1 Παράμετρος ευαισθησίας – καθαρός συνολικός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (Impact 2002+)

- Διάγραμμα 8.2 Παράμετρος ευαισθησίας – στοιχειακή σύσταση φυσικού λιγνίτη (Impact 2002+)
- Διάγραμμα 8.3 Παράμετρος ευαισθησίας – συντελεστής ασφαλείας λιγνιτωρυχείου (Impact 2002+)
- Διάγραμμα 8.4 Παράμετρος ευαισθησίας – άμεσο κόστος λιγνίτη
- Διάγραμμα 8.5 Παράμετρος ευαισθησίας – επιτόκιο αναγωγής
- Διάγραμμα 8.6 Παράμετρος ευαισθησίας – κόστος επένδυσης και κόστος λειτουργίας και συντήρησης θερμοηλεκτρικού σταθμού
- Διάγραμμα 8.7 Παράμετρος ευαισθησίας – εξωτερικό κόστος CO₂
- Διάγραμμα 8.8 Παράμετρος ευαισθησίας – ετήσιες ώρες λειτουργίας θερμοηλεκτρικού σταθμού

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την αξιολόγηση τριών εναλλακτικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τον λιγνίτη: α) καύση φυσικού λιγνίτη, β) μικτή καύση φυσικού και προξηραμένου λιγνίτη από 30% θερμική υποκατάσταση και γ) μικτή καύση φυσικού λιγνίτη και βιομάζας αχύρου σιτηρών από 6% θερμική υποκατάσταση. Στα πλαίσια της αξιολόγησης, προσδιορίζεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βάσει των αρχών της μεθόδου ανάλυσης κύκλου ζωής, ενώ παράλληλα εκτιμάται και το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη σύμφωνα με τις αρχές της μεθόδου κοστολόγησης κύκλου ζωής, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το ιδιωτικό κόστος, όσο και το εξωτερικό κόστος των ρύπων που υφίστανται σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής του λιγνίτη.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται εισαγωγή στα βασικά χαρακτηριστικά των λιγνιτοφόρων λεκανών της Ελλάδας, περιγράφεται η μέθοδος εξόρυξης των κοιτασμάτων στα κυριότερα λιγνιτικά κέντρα, ενώ δικαιολογείται και η υψηλή συνεισφορά του λιγνίτη στο ενεργειακό μείγμα της χώρας.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφεται ο μηχανολογικός εξοπλισμός των λιγνιτωρυχείων και ο τρόπος συνεργασίας μεταξύ των μηχανημάτων με σκοπό τη διεκπεραίωση των εργασιών του ορυχείου. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται διάκριση του μηχανολογικού εξοπλισμού σε πάγιο και έκτακτο και δίνονται στοιχεία που αφορούν την κατανάλωση καυσίμου/ενέργειας και τη δυναμικότητα διαχείρισης υλικών, ενώ επίσης περιγράφεται ο τρόπος διαδοχής και διεκπεραίωσης των εργασιών του λιγνιτωρυχείου.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα βήματα εφαρμογής της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ). Ειδικότερα, καθορίζονται οι συνιστώσες εφαρμογής της μεθόδου αναφορικά με την εξέταση του κύκλου ζωής του λιγνίτη που πραγματοποιείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ενώ επιπλέον παρουσιάζεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση σε μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη.

Στο κεφάλαιο 4 συγκεντρώνεται το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά τη μοντελοποίηση των συστημάτων μελέτης στο λογισμικό SimaPro v.7.3.3. Περιγράφεται ο τρόπος μοντελοποίησης της εφοδιαστικής του λιγνίτη, της λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού σταθμού, καθώς επίσης και των τεσσάρων εναλλακτικών εφοδιαστικής αλυσίδας για τη βιομάζα στην αντίστοιχη περίπτωση μικτής καύσης. Επιπλέον, συγκρίνονται η ποιότητα και η σύσταση του καυσίμου που καίγεται εντός του λέβητα της μονάδας για κάθε περίπτωση καύσης που εξετάζεται.

Στο κεφάλαιο 5 προσδιορίζονται λεπτομερώς τα είδη κόστους που λαμβάνονται υπόψη στην εφαρμογή της μεθόδου Κοστολόγησης Κύκλου Ζωής (ΚΚΖ). Συγκεκριμένα, αποδίδονται χρηματικές αξίες στις επιμέρους κατηγορίες ιδιωτικού κόστους, ενώ επιπλέον συγκρίνονται οι τιμές του εξωτερικού κόστους των ρύπων που προκύπτουν από τη βιβλιογραφία, με αυτές που παρέχονται σε σχετικές βάσεις δεδομένων. Τέλος, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση με στόχο τον προσδιορισμό του εύρους διακύμανσης του συνολικού κόστους των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη που εξετάζονται.

Στο κεφάλαιο 6 εκτιμάται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των εξεταζόμενων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη με εφαρμογή της μεθόδου της ανάλυσης κύκλου ζωής. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους με στόχο τον προσδιορισμό του συστήματος παραγωγής με το μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο, ενώ η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται και σε σύγκριση με συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση άλλου είδους ορυκτά ή και ανανεώσιμα καύσιμα.

Στο κεφάλαιο 7 εφαρμόζεται, βάσει των δεδομένων των δύο προηγούμενων κεφαλαίων, το οικονομικό μοντέλο σύμφωνα με τη μέθοδο της κοστολόγησης κύκλου ζωής. Στόχος είναι ο προσδιορισμός του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη από τα διάφορα συστήματα που εξετάζονται. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους έτσι ώστε να προκύψει το σύστημα με το ελάχιστο συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η σύγκριση εκτείνεται και σε συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση άλλου είδους ορυκτά ή και ανανεώσιμα καύσιμα.

Στο κεφάλαιο 8 πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας των εξεταζόμενων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη, εξετάζοντας διαφορετικά σενάρια ευαισθησίας σχετικά με τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές και οικονομικές παραμέτρους. Στόχος είναι ο προσδιορισμός της μεταβολής που προκαλείται στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα ή στο συνολικό κόστος των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη, εξαιτίας της μεταβολής στην τιμή κάποιας σημαντικής περιβαλλοντικής ή οικονομικής παραμέτρου.

Τέλος, στο κεφάλαιο 9 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και δίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Abstract

The scope of the present thesis is the evaluation of three alternative power generation systems based on lignite with: a) raw lignite firing, b) 30% thermal substitution with pre-dried lignite and c) 6% thermal substitution with biomass from cereal straw. Within the evaluation, the environmental footprint of the power generation systems is determined based on the principles of the life cycle analysis methodology, while the total electricity generation cost based on lignite is estimated according to the principles of the life cycle costing methodology, considering both the private cost and the external cost of pollutants that emerge from the complete life cycle of lignite.

Chapter 1 is the introduction to the basic characteristics of the lignite basins in Greece. The extraction method of lignite in Greek major lignite mining centers is described, while the high contribution of lignite to the energy mix of the country is justified.

Chapter 2 presents the mechanical equipment of the mine, as well as the cooperation between the machinery in order to accomplish the works at the mine. In particular, a distinction in fixed and temporary mechanical equipment is made, extra information about the fuel/energy consumption and materials handling capacity of the machines is given, while the order and the accomplishment way of the operations at the mine are also described.

Chapter 3 describes the fundamental principles of the Life Cycle Analysis (LCA) methodology. Specifically, the methodology components are defined in order to examine the life cycle of lignite that takes place in the present study, while a literature review about the LCA application on power generation systems is also presented.

Chapter 4 includes the necessary theoretical background for the modeling of the system of study in the software platform of SimaPro v.7.3.3. It describes the modeling of the lignite supply chain, the lignite power plant operation, as well as the four alternative supply chains of biomass at the respective co-firing case. Moreover, the quality and the composition of the fuel that is burned in each firing case are compared.

Chapter 5 determines the cost types that are taken into account in the application of the Life Cycle Costing (LCC) methodology. Particularly, monetary values are assigned to the individual cost categories, while the external cost values acquired from the literature are compared with those provided in relevant databases. Finally, a literature review is taking place in order to identify the fluctuation range of the total generation cost from power generation systems based on lignite.

In Chapter 6 the environmental footprint of the lignite firing cases under examination is estimated according to the principles of the LCA methodology. The results are compared in order to identify the lignite power generation system with the smallest environmental impact, while the same procedure is carried out for the comparison between power generation systems based on different fossil or renewable fuels.

In Chapter 7 the economic model is applied according to the principles of the LCC methodology, taking into consideration the data of chapters 5 and 6. The goal is to determine the total generation cost of the lignite firing cases under examination. The results are compared in order to define the minimum total generation cost case, while the comparison is extended in order to include power generation systems based on different fossil or renewable fuels.

In Chapter 8 the sensitivity analysis of the lignite power generation systems was carried out by investigating different sensitivity scenarios that are based on the most crucial environmental and economic parameters. The aim is to identify the change of the environmental footprint or the total

generation cost of the lignite power generation systems, while changing the value of an important environmental or economic parameter.

Finally, the conclusions of the above study and the proposals for further study and research are summarized in Chapter 9.

Κεφάλαιο 1^ο

Γενικά Στοιχεία

1.1 Εισαγωγή

Οι λιγνίτες ανήκουν στις στερεές ορυκτές καύσιμες ύλες με τη γενική ονομασία γαιάνθρακες και σχηματίστηκαν σε όλες τις γεωλογικές περιόδους. Η μεγαλύτερή τους όμως ανάπτυξη σε παγκόσμια κλίμακα παρατηρείται κατά την περίοδο του Λιθανθρακοφόρου (πριν 180 εκατομμύρια χρόνια) και την Καινοζωική περίοδο (πριν 60 εκατομμύρια χρόνια), που συνεχίζεται μέχρι σήμερα (Δ. Ανδρονικήδης, 2009).

Η ηλικία του ελληνικού λιγνίτη σχετίζεται με την γεωλογική ιστορία και την παλαιογραφική εξέλιξη της Ελλάδας. Κατά τη διάρκεια της Καινοζωικής περιόδου και συγκεκριμένα κατά το τέλος της Νεογενούς περιόδου (Μειόκαινο – Πλειόκαινο) και στην αρχή της Τεταρτογενούς (Πλειστόκαινο), οι επικρατούσες συνθήκες για τη δημιουργία των λιγνιτών ήταν ευνοϊκές. Την περίοδο αυτή διακρίνουμε δύο κατηγορίες λεκανών μέσα στις οποίες σχηματίστηκαν και αναπτύχθηκαν τα ελληνικά κοιτάσματα: τις παράκτιες και τις ηπειρωτικές λεκάνες (Κ. Kavouridis, 2008).

Οι παράκτιες λεκάνες αποτελούσαν αβαθή παράκτια έλη, τα οποία δημιουργήθηκαν από την απόσυρση της θάλασσας. Μέσα στα αβαθή αυτά έλη αναπτυσσόταν η λιγνιτοφορία υπό μορφή στρωμάτων. Πολλές φορές η θάλασσα επίκλυε και πάλι τις περιοχές, με αποτέλεσμα να σταματάει η λιγνιτοφορία και να αποτίθενται θαλάσσια ιζήματα. Το φαινόμενο της απόκλισης και της επίκλησης της θάλασσας επαναλήφθηκε πολλές φορές και αυτό είχε σαν συνέπεια τη συχνή εναλλαγή λιγνιτοφόρων ιζημάτων με στείρα ιζήματα θαλάσσιας προέλευσης. Τέτοιες παράκτιες λεκάνες είναι οι λεκάνες της Πρέβεζας, της Πελοποννήσου, της Ακαρνανίας, κ.ά.

Σε αντίθεση με τις παράκτιες λεκάνες, οι ηπειρωτικές λιμναίες λεκάνες βρίσκονταν στο εσωτερικό της χώρας. Οι λεκάνες αυτές σχηματίστηκαν σαν τεκτονικές τάφροι με μήκος πολλές φορές δεκάδων και εκατοντάδων χιλιομέτρων (τάφρος Μοναστηρίου – Φλώρινας – Κοζάνης – Ελασσόνας), εξαιτίας της ρηξιγενούς τεκτονικής που επηρέασε τον Ελληνικό χώρο κατά την περίοδο εκείνη. Είναι γεγονός, ότι τα περισσότερα από τα πλέον σημαντικά λιγνιτικά κοιτάσματα δημιουργήθηκαν στις ενδότερες ηπειρωτικές λεκάνες όπως η Πτολεμαΐδα, η Δράμα και η Μεγαλόπολη, ενώ μικρότερα λιγνιτικά αποθέματα δημιουργήθηκαν και σε άλλες περιοχές όπως την Ορεστιάδα, τον Πύργο, την Ολυμπία κ.ά.

Γεωλογικές έρευνες έχουν αποδείξει ότι μεταξύ των 43 περίπου λιγνιτοφόρων λεκανών της Ελλάδας, το 75% κατατάσσεται χρονολογικά στη Νεογενή περίοδο (Φλώρινα, Πτολεμαΐδα, Αμύνταιο, Ελασσόνα κ.ά.), το 16% στη Τεταρτογενή περίοδο (Μεγαλόπολη, Δράμα, Φίλιπποι κ.ά.) και το 9% στον Ηώκαινο – Ολιγόκαινο (Ορεστιάδα κ.ά.). Σε κάθε λεκάνη ο αριθμός και το πάχος των στρωμάτων λιγνίτη διαφέρουν σημαντικά. Ενδεικτικά, στις λιγνιτοφόρες λεκάνες της εποχής του Ηώκαινου, συναντώνται λεπτά στρώματα λιγνίτη, σε αντίθεση με νεότερες λεκάνες όπου το πάχος των στρωμάτων είναι μεγαλύτερο (Κ. Kavouridis, 2008).

1.2 Ταξινόμηση γαιανθράκων

Οι ορυκτοί άνθρακες, με βάση το βαθμό ενανθράκωσης τους διακρίνονται σε τύρφη, λιγνίτη, λιθάνθρακα, ανθρακίτη και γραφίτη. Η μετατροπή των φυτών σε τύρφη και η μετάβαση από την τύρφη, στο αρχικό στάδιο της ενανθράκωσης, στον ανθρακίτη, στο τελικό στάδιο ενανθράκωσης, είναι συνάρτηση της επίδρασης του χρόνου, της θερμοκρασίας και της πίεσης. Η αύξηση του βαθμού ενανθράκωσης επηρεάζει τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των γαιανθράκων.

Ο όρος «λιγνίτης» δεν αποδίδεται με την ίδια έννοια σε όλες τις χώρες, δεν υπάρχει δηλαδή αντιστοιχία όρου που να αποδίδει επακριβώς και να προσδιορίζει γαιάνθρακα με συγκεκριμένες

φυσικοχημικές ιδιότητες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο όρος Braunkohle (φαιάνθρακας) που για τους Γερμανούς χαρακτηρίζει πολύ καλής ποιότητας λιγνίτες, ενώ ο ίδιος όρος (Brown coal) στις ΗΠΑ χαρακτηρίζει τους κατώτερης ποιότητας λιγνίτες.

Ανάλογα με τις μακροσκοπικές λιθοτυπικές διαφορές τους, τις φυσικοχημικές ιδιότητες, την ποιότητα, την ηλικία, τις συνθήκες σχηματισμού και τη συνεκτικότητά τους, οι λιγνίτες διακρίνονται σε μαλακούς, γαιώδεις λιγνίτες (χρώματος σκούρου καστανού έως καστανόμαυρου) και σε σκληρούς, συμπαγείς, αλαμπείς ή σιλιπνούς (χρώματος καφέ έως μαύρου). Έχουν μεγάλο ποσοστό υγρασίας σε φυσική κατάσταση που φτάνει μέχρι και 60% όπως φαίνεται και στον πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1: Σύγκριση χαρακτηριστικών λιγνίτη και λιθάνθρακα (A. Παπαγιάννης et al., 2012)

	Λιγνίτης	Λιθάνθρακας
Ηλικία δημιουργίας	40-60 εκατ. έτη	270-350 εκατ. έτη
Περιεκτικότητα σε νερό	15-65%	1-4%
Περιεκτικότητα σε τέφρα	1-15%	1-30%
Περιεκτικότητα σε άνθρακα	60-75%	75-92%
Περιεκτικότητα σε υδρογόνο	5-9%	4-6%
Περιεκτικότητα σε οξυγόνο	15-25%	2-10%
Περιεκτικότητα σε θείο	0,2%	0,5-1,5%
Περιεκτικότητα σε άζωτο	0,5-2%	1-2%
Θερμογόνος δύναμη	5-10 MJ/kg	28-35 MJ/kg

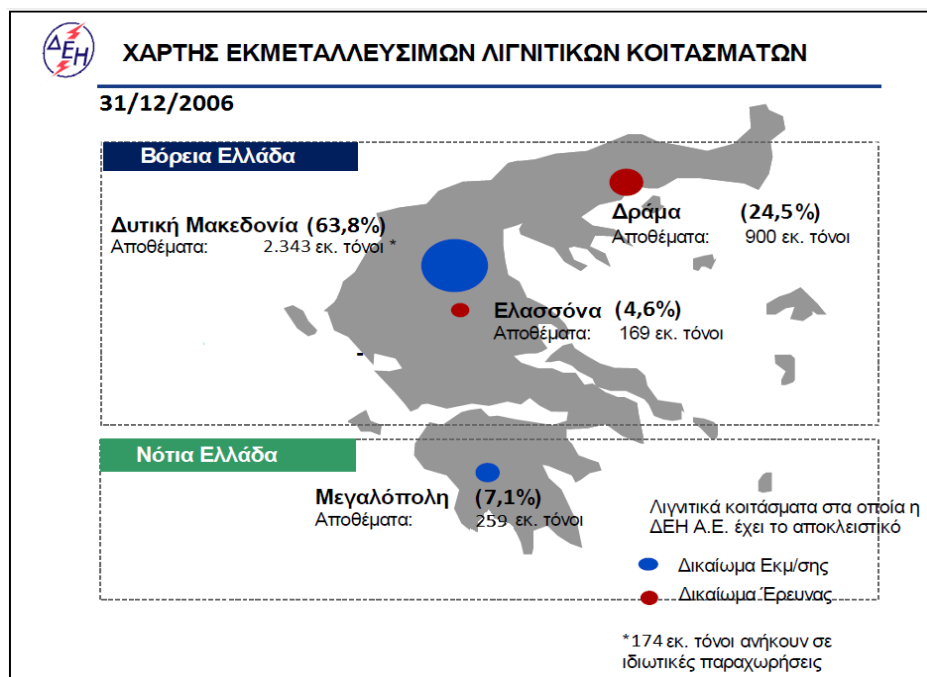
Γενικά, για το σχηματισμό ενός κυβικού μέτρου λιγνίτη, απαιτείται χρονικό διάστημα 1000 έως 4000 ετών. Η θερμογόνος ισχύς των λιγνιτών είναι από 3 ως 7 φορές χαμηλότερη από αυτή του λιθάνθρακα και 5 ως 10 φορές μικρότερη από αυτή του πετρελαίου (A. Παπαγιάννης et al., 2012).

1.3 Αποθέματα

Στην Ελλάδα τα συνολικά βεβαιωμένα γεωλογικά αποθέματα λιγνίτη ανέρχονται σε περίπου 5 δισεκατομμύρια τόνους. Τα κοιτάσματα αυτά παρουσιάζουν αξιοσημείωτη γεωγραφική διασπορά στον ελληνικό χώρο.

Με τα σημερινά τεχνικο-οικονομικά δεδομένα τα κοιτάσματα που είναι κατάλληλα για ενεργειακή εκμετάλλευση, ανέρχονται σε περίπου 3,671 δισεκατομμύρια τόνους και ισοδυναμούν με 450 εκατομμύρια τόνους πετρελαίου.

Τα κυριότερα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα λιγνίτη, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1, βρίσκονται στις περιοχές Πτολεμαΐδας, Αμυνταίου και Φλώρινας με υπολογισμένο απόθεμα 2,343 δισεκατομμύρια τόνους, στην περιοχή της Δράμας με απόθεμα 900 εκατομμύρια τόνους και στην περιοχή Ελασσόνας με 169 εκατομμύρια τόνους. Επίσης στην Πελοπόννησο, περιοχή Μεγαλόπολης, υπάρχει λιγνιτικό κοιτάσμα με απόθεμα περίπου 259 εκατομμύρια τόνους.



Σχήμα 1.1: Διασπορά εκμεταλλεύσιμων λιγνιτικών κοιτασμάτων στον ελληνικό χώρο (ΔΕΗ, 2006)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, το μεγαλύτερο λιγνιτικό δυναμικό της χώρας βρίσκεται συγκεντρωμένο στη Δυτική Μακεδονία και συγκεκριμένα στον άξονα Φλώρινα – Πτολεμαΐδα – Κοζάνη – Ελασσόνα.

Με βάση τα συνολικά εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη της χώρας και τον προγραμματιζόμενο ρυθμό κατανάλωσης στο μέλλον, υπολογίζεται ότι τα αποθέματα αυτά επαρκούν για 40 περίπου χρόνια στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας και 20 περίπου χρόνια στην περιοχή της Μεγαλόπολης.

Οι λιγνίτες των κοιτασμάτων Δυτικής Μακεδονίας και Μεγαλόπολης, που βρίσκονται υπό εκμετάλλευση ανήκουν στην κατηγορία των φτωχών στερεών καυσίμων. Η ποιότητά τους διαφοροποιείται όχι μόνο από ορυχείο σε ορυχείο, αλλά και μεταξύ στρωμάτων του ίδιου ορυχείου. Η θερμογόνος ικανότητα του ελληνικού λιγνίτη κυμαίνεται μεταξύ 4,4-4,6 MJ/kg (1050-1100 Kcal/Kg) στα κοιτάσματα της Μεγαλόπολης, μεταξύ 7,5-9,6 MJ/kg (1800-2300 Kcal/Kg) στα κοιτάσματα της Φλώρινας, μεταξύ 5,5-5,9 MJ/kg (1300-1400 Kcal/Kg) στα κοιτάσματα της Πτολεμαΐδας (Κυρίου Πεδίου, Νότιου Πεδίου και Καρδιάς) και μεταξύ 4,4-5,5 MJ/kg (1050-1300 Kcal/Kg) στα κοιτάσματα του Αμυνταίου. Στον πίνακα 1.2 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των λιγνιτικών κοιτασμάτων της Ελλάδας. Σημειώνεται ότι ο λιγνίτης που εξορύσσεται στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας όπου βρίσκονται τα μεγαλύτερα ορυχεία της εταιρείας, περιέχει χαμηλά ποσοστά θείου και υψηλά ποσοστά οξειδίων του ασβεστίου (φυσική αποθείωση), με αποτέλεσμα να είναι λιγότερο επιβαρυντικός για το περιβάλλον (Κ. Καβουρίδης et al., 2005).

Πίνακας 1.2: Βασικά χαρακτηριστικά λιγνιτικών κοιτασμάτων της Ελλάδας (Κ. Kavouridis, 2008)

Περιοχή	Εκμεταλλεύσιμα αποθέματα (Μtn)	Σχέση εκμετάλλευσης (m ³ ανόμων/tn λιγνίτη)	Περιεκτικότητα σε τέφρα (επί ξηρού %)	Θερμογόνος ικανότητα (MJ/kg)
Πτολεμαΐδα-Αμύνταιο	1865	5,3	29,2	5650
Φλώρινα	478	7,8	39,6	8180
Μεγαλόπολη	259	2,3	32,6	4350
Ελασσόνα	169	5,0	34,8	8300
Δράμα	900	6,0	39,0	4370

1.4 Εξέλιξη λιγνιτικής δραστηριότητας

1.4.1 Ιστορική αναδρομή

Η συστηματική εκμετάλλευση του λιγνίτη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αρχίζει από το υπόγειο λιγνιτωρυχείο Αλιβερίου το 1951.

Η προσπάθεια σε μεγάλη κλίμακα συνεχίσθηκε με το επιφανειακό λιγνιτωρυχείο της ΛΙΠΤΟΛ (εταιρεία ΜΠΟΔΟΣΑΚΗ) στη λεκάνη Πτολεμαΐδας το 1955. Το 1975 αποφασίσθηκε, με νομοθετική ρύθμιση, η πλήρης ενσωμάτωση της ΛΙΠΤΟΛ στη Δ.Ε.Η. Σήμερα η εκμετάλλευση του λιγνίτη στην ευρύτερη λεκάνη Πτολεμαΐδας ανήκει στην αρμοδιότητα του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας (ΛΚΔΜ) που αποτελεί με βάση το προσωπικό την μεγαλύτερη Υπηρεσιακή Μονάδα της ΔΕΗ (ΒΟΚ).

Το 1969 ξεκίνησε η ανάπτυξη του ενεργειακού Κέντρου Μεγαλόπολης, όπου εξορύσσεται και αξιοποιείται ο πιο φτωχός λιγνίτης σε παγκόσμιο επίπεδο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Κ. Καβουρίδης et al., 2005).

1.4.2 Μέθοδος εξόρυξης λιγνιτικών κοιτασμάτων

Τα κοιτασματολογικά χαρακτηριστικά των πολυστρωματικών κοιτασμάτων της λιγνιτοφόρου λεκάνης Πτολεμαΐδας, που αποτελούνται από εναλλασσόμενες στρώσεις λιγνίτη και αγόνων ποικίλου πάχους, απαιτούν για την εκμετάλλευσή τους εκλεκτική εξόρυξη του λιγνίτη. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τους αναγκαίους υψηλούς ρυθμούς παραγωγής, επέβαλε από την έναρξη της εξορυκτικής δραστηριότητας στην περιοχή της Πτολεμαΐδας, την επιλογή της μεθόδου επιφανειακής εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων με την εφαρμογή της συνεχούς εξόρυξης, μεταφοράς και απόθεσης με σύστημα πολλαπλών βαθμίδων. Στην εικόνα 1.1 απεικονίζεται καδοφόρος εκσκαφέας κατά τη λειτουργία συνεχούς εξόρυξης.



Εικόνα 1.1: Μέθοδος συνεχούς εξόρυξης με χρήση καδοφόρων εκσκαφών (Tenova, 2011)

Η μέθοδος αυτή συνδυάζει τη χρησιμοποίηση ηλεκτροκίνητων μηχανημάτων μεγάλης δυναμικότητας και συνεχούς λειτουργίας, τόσο κατά την εκσκαφή (καδοφόροι εκσκαφείς), όσο και κατά τη μεταφορά (ταινιόδρομοι) και την απόθεση (αποθέτες) τόσο του λιγνίτη όσο και των αγόνων (υπερκειμένων και ενδιάμεσων αγόνων στρώσεων). Η μέθοδος εφαρμόζεται με επιτυχία για περισσότερα από 50 έτη στα ορυχεία της περιοχής. Η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή, συστηματικά

και σε ευρεία κλίμακα, στις εκμεταλλεύσεις λιγνιτών της Γερμανίας, αλλά και άλλων χωρών της Ευρώπης (N. Τερεζόπουλος, 2001). Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος συνεχούς εξόρυξης αναπτύχθηκε στα ορυχεία της Γερμανίας και για αυτό είναι γνωστή και ως «Γερμανική μέθοδος».

Το πεδίο εφαρμογής της είναι οι επιφανειακές εκμεταλλεύσεις μαλακών πολυστρωματικών κοιτασμάτων, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.2, μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης, πολύ μικρής κλίσης και μεγάλου πάχους, που καλύπτονται από νεότερους γεωλογικά υπερκείμενους σχηματισμούς μεγάλου πάχους, ενώ παράλληλα, οι σχηματισμοί αυτοί είναι χαλαρά συνδεδεμένοι, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εξόρυξή τους με μηχανικά μέσα (καδοφόρους εκσκαφείς) και η μεταφορά τους με ταινιοδρόμους. Στις περιπτώσεις αυτές τα άγονα υπερκείμενα και ενδιάμεσα μεταφέρονται και αποτίθενται είτε σε εξωτερικό χώρο (εξωτερική απόθεση) κατά τα πρώτα χρόνια λειτουργίας του ορυχείου ή στον εξοφλημένο κενό χώρο του ορυχείου (εσωτερική απόθεση αγόνων σε κοιλότητες) όταν έχει δημιουργηθεί επαρκής χώρος για την υποδοχή τους (W. Hustrulid et al., 1998). Εφόσον τα χαρακτηριστικά του κοιτάσματος το επιτρέπουν, είναι δυνατή η απευθείας μεταφορά των στερίων στην απόθεση χρησιμοποιώντας ταινιογέφυρες ή αποθέτες μεγάλου αναπτύγματος σε συνεργασία με τους καδοφόρους εκσκαφείς.



Εικόνα 1.2: Στρωματογραφία μετώπου εκσκαφής σε λιγνιτωρυχείο (X. Κολοβός, 2007)

Η απόθεση των αγόνων διενεργείται μέσω των αποθετών, με κατάλληλο σχεδιασμό, έτσι ώστε να εναρμονίζεται με το γενικότερο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής. Αρχικά, κατά την απόθεση αγόνων εκτός του ορυχείου, επιλέγονται κενοί χώροι (κοιλότητες) άλλων εξοφλημένων ορυχείων ή άλλες κατάλληλες περιοχές, ενώ στη συνέχεια, όταν δημιουργείται κενός χώρος εντός του ορυχείου, η απόθεση διενεργείται εσωτερικά, έτσι ώστε η απόσταση μεταξύ εκσκαφής και απόθεσης να είναι η ελάχιστη δυνατή. Η εσωτερική απόθεση αγόνων ακολουθεί τις εκσκαφές του ορυχείου για λόγους ευστάθειας των πρανών, αλλά και για λόγους κατάλληλης περιβαλλοντικής αποκατάστασης παράλληλα με την εξέλιξη της εκμετάλλευσης.

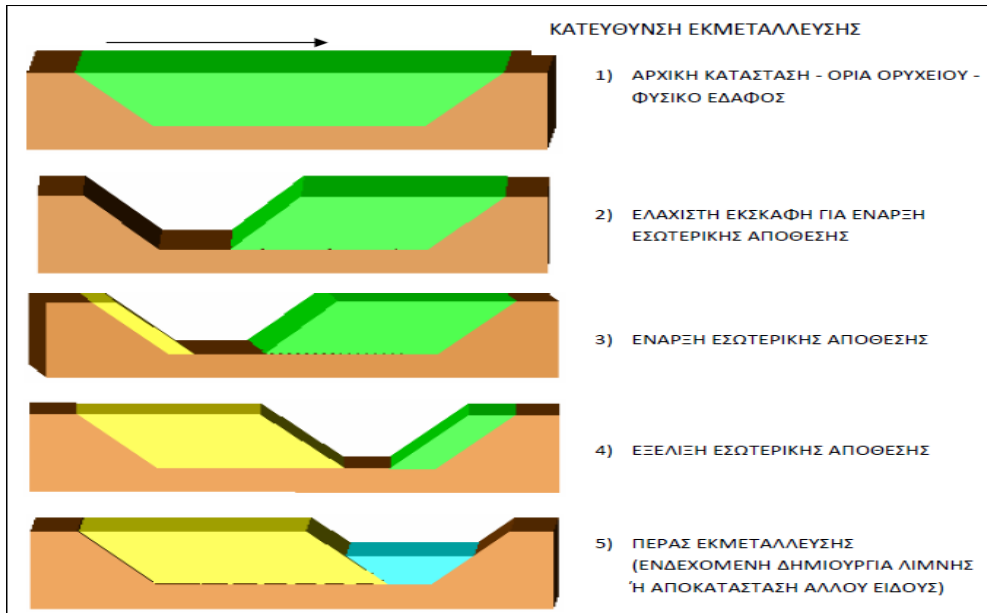
Τα κύρια βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου εκμετάλλευσης είναι:

- Η εκλεκτική απόληψη του κοιτάσματος
- Η συνεχής ροή των εξορυσσόμενων υλικών

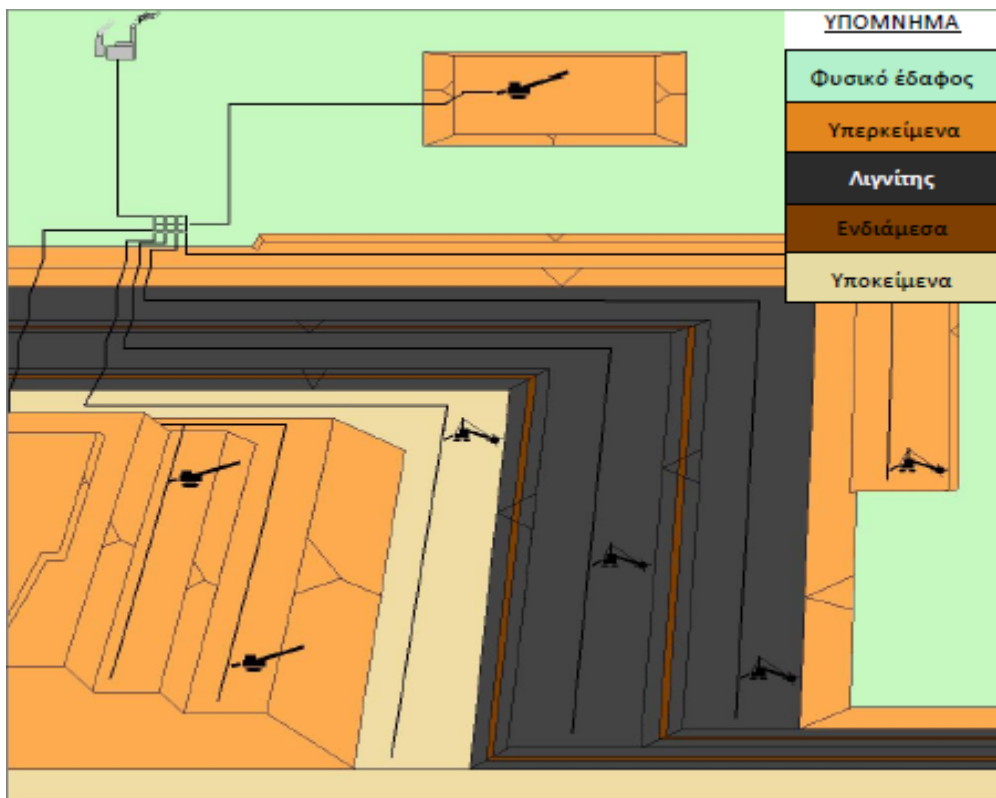
Ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε κοιτάσματος μιας εκμετάλλευσης, εφαρμόζεται στροφική ή παράλληλη προχώρηση των μετώπων εκσκαφής. Σε εκτεταμένα, επιμήκη

πεδία χρησιμοποιείται συνήθως η παράλληλη λειτουργία. Συχνά χρησιμοποιείται συνδυασμός παράλληλης και στροφικής λειτουργίας, προκειμένου η εκμετάλλευση να προσαρμοστεί στην μορφή του κοιτάσματος.

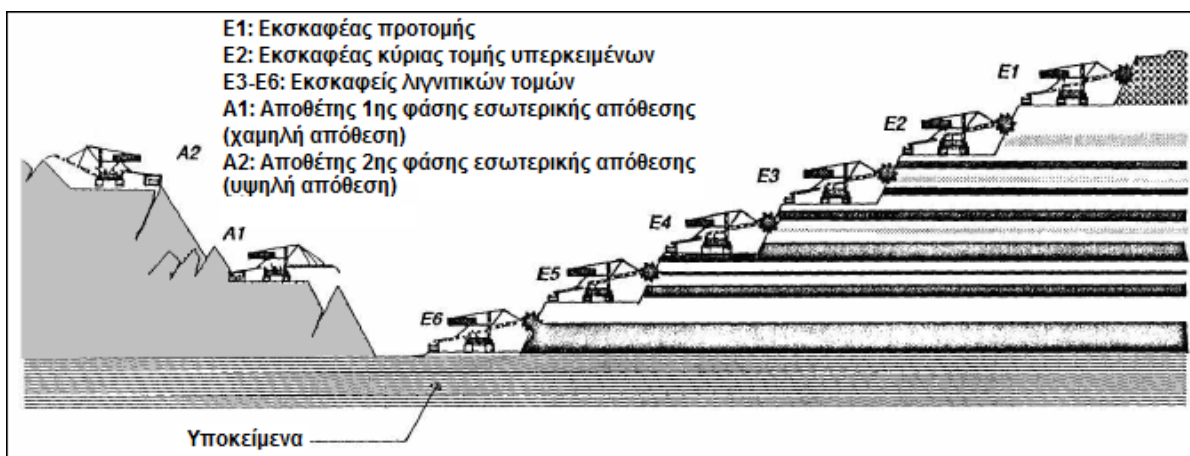
Στο σχήμα 1.2 εμφανίζονται τα διαδοχικά στάδια της εκμετάλλευσης ενός ορυχείου με τη μέθοδο της επιφανειακής εκμετάλλευσης συνεχούς εξόρυξης, μεταφοράς και απόθεσης (δεν απεικονίζεται η εξωτερική απόθεση). Στα σχήματα 1.3 και 1.4 παρουσιάζεται σχηματικά ο τρόπος εφαρμογής της μεθόδου σε κάτοψη και σε τομή, αντίστοιχα.



Σχήμα 1.2: Στάδια εκμετάλλευσης ορυχείου με επιφανειακή μέθοδο εξόρυξης (Χ. Ρούμπος, 2009)



Σχήμα 1.3: Εκμετάλλευση κοιτασμάτων μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης με τη μέθοδο επιφανειακής εκμετάλλευσης συνεχούς εξόρυξης, μεταφοράς και απόθεσης με σύστημα βαθμίδων - Κάτοψη (Χ. Ρούμπος, 2009)



Σχήμα 1.4: Ενδεικτική διάταξη εξοπλισμού για την εκμετάλλευση κοιτασμάτων μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης με τη μέθοδο επιφανειακής εκμετάλλευσης συνεχούς εξόρυξης και απόθεσης με σύστημα πολλαπλών βαθμίδων-Τομή (Χ. Ρούμπος, 2009)

Παράλληλα με τη λειτουργία του πάγιου (βασικού) αυτού εξοπλισμού (εκσκαφείς, ταινιοδρόμοι και αποθέτες), χρησιμοποιείται και έκτακτος (βοηθητικός) εξοπλισμός που περιλαμβάνει μηχανικά και υδραυλικά πτύα, φορτωτές, φορτηγά αυτοκίνητα μεταφοράς, αποξεστήρες, κλπ. Ο βοηθητικός εξοπλισμός χρησιμοποιείται όπου κρίνεται αναγκαίο, για την εξόρυξη και μεταφορά μέρους των αγόνων υλικών και του λιγνίτη.

Σημειώνεται ότι η μεταφορά των εξορυσσόμενων υλικών με ταινιοδρόμους αποτελεί τη Βέλτιστη Διαθέσιμη Τεχνική (Best Available Technique - BAT) σύμφωνα με το εγχειρίδιο Βέλτιστων Διαθέσιμων Τεχνικών για τις μεγάλες εγκαταστάσεις καύσης (BREF – LCP) .

Σε περιπτώσεις όπου η εξόρυξη των σκληρών υπερκείμενων σχηματισμών καθιστούν την εκμετάλλευση του λιγνίτη με τη μέθοδο της συνεχούς λειτουργίας δυσχερή ή/και αδύνατη, όπως στη περίπτωση του Ορυχείου Νοτίου Πεδίου, εφαρμόζονται μέθοδοι ασυνεχούς λειτουργίας, με τη χρήση συμβατικού εξοπλισμού (φορτωτών, μηχανικών ή υδραυλικών πτύων (shovels), φορτηγών αυτοκινήτων, ανατρεπόμενων οχημάτων (dumpers) κλπ.) με την χρήση ή μη εκρηκτικών υλών.

Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τον επιτυχή προγραμματισμό και εκτέλεση του συνολικού έργου της εκμετάλλευσης ενός ορυχείου είναι:

- Ο επιτυχής σχεδιασμός του ορυχείου
- Η πιστή εφαρμογή του ως άνω σχεδιασμού
- Η βελτίωση και ο εκσυγχρονισμός του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού
- Η άρτια συντήρηση του μηχανικού εξοπλισμού
- Η κατάλληλη εκπαίδευση του προσωπικού

Τελικός δείκτης της επιτυχούς υλοποίησης των παραπάνω αποτελεί ο βαθμός αξιοποίησης του εξοπλισμού που εντάσσεται στο ορυχείο. Έτσι, η επιλογή των καδοφόρων εκσκαφέν γίνεται με κριτήρια που σχετίζονται με τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες των εκσκαφέν, καθώς και με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος. Επισημαίνεται ότι διεθνώς, κατά τον σχεδιασμό των ορυχείων, θεωρείται ικανοποιητικός, από οικονομική άποψη, ένας βαθμός απόδοσης (για εξοπλισμό παρόμοιου τύπου) μεγαλύτερος του 70% της μέγιστης εκσκαπτικής δυναμικότητας, κατά τη φάση της πλήρους ένταξης του εξοπλισμού.

Οι εκτάσεις γης που δεσμεύονται για την ανάπτυξη του ορυχείου ελευθερώνονται σταδιακά με την πρόοδο της εκμετάλλευσης. Η διαδικασία αποκατάστασης και αναδιαμόρφωσης του αναγλύφου με την πλήρωση των κοιλοτήτων που δημιουργούνται από την εξόρυξη με άγονα, και την αναδιαμόρφωση των εσωτερικών και των εξωτερικών αποθέσεων, καθώς και των κενών που

αναπόφευκτα θα απομείνουν μετά την ολοκλήρωση της εκμετάλλευσης, αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα των λιγνιτικών εκμεταλλεύσεων. Οι νέες εκτάσεις που προκύπτουν είτε αποδίδονται για γεωργικές ή κτηνοτροφικές εκμεταλλεύσεις, είτε αποτελούν τον βασικό χώρο για την ανάπτυξη δασών και λιμνών σε μεγάλη κλίμακα.

Τέλος, στον πίνακα 1.3 συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της επιφανειακής μεθόδου εκμετάλλευσης συνεχούς εξόρυξης, μεταφοράς και απόθεσης με σύστημα πολλαπλών βαθμίδων.

Πίνακας 1.3: Μέθοδος επιφανειακής εκμετάλλευσης συνεχούς εξόρυξης, μεταφοράς και απόθεσης με ανάπτυξη συστήματος βαθμίδων (Σ. Παπαδόπουλος, 2009)	
Πεδίο εφαρμογής	Κοιτάσματα πολυστρωματικά μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης, για τα οποία απαιτείται εκλεκτική εξόρυξη Μετατόπιση της τάφρου εκμετάλλευσης διαχρονικά
Ανάπτυξη ορυχείου – διακινήσεις υλικών	Μετά το στάδιο της απόθεσης σε κοιλάτητες εξοφλημένων ορυχείων ή σε περιοχές εξωτερικής απόθεσης, πραγματοποιείται απόθεση των αγόνων εσωτερικά, παράλληλα προς την τάφρο εκμετάλλευσης Ο εξοπλισμός θα πρέπει να εξασφαλίζει :
Χαρακτηριστικά ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού	<ul style="list-style-type: none"> · Την εκλεκτική απόληψη των κοιτασμάτων · Τη συνεχή ροή του εξορυσσόμενου υλικού · Καδοφόρος Εκσκαφέας (εξόρυξη και φόρτωση αγόνων και λιγνίτη)
Πάγιος (Βασικός) εξοπλισμός ορυχείου	<ul style="list-style-type: none"> · Ταινιόδρομοι (μεταφορά αγόνων και λιγνίτη) · Αποθέτης (απόθεση αγόνων)

1.4.3 Κυριότερα λιγνιτικά κέντρα της Ελλάδας

Ο λιγνίτης που χρησιμοποιείται στην ηλεκτροπαραγωγή εξορύσσεται στα λιγνιτωρυχεία της ΔΕΗ στην περιοχή της Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου και στη Μεγαλόπολη. Σήμερα λειτουργούν τα παρακάτω μεγάλα συγκροτήματα ορυχείων (Κ. Καβουρίδης et al., 2005; Α. Παπαγιάννης et al., 2012).

Ορυχεία Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας (ΛΚΔΜ) (τακτικό προσωπικό: 4735 άτομα)

➤ **Ορυχείο Κυρίου Πεδίου:** Περιλαμβάνει τις εκμεταλλεύσεις των κοιτασμάτων Βορείου Πεδίου, Κομάνου και Μαυροπηγής, έχει ετήσια παραγωγή λιγνίτη 6-8 εκατομμύρια τόνους και καλύπτει τις ανάγκες του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας και του Βιομηχανικού Συγκροτήματος της τέως ΛΙΠΤΟΛ, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 663 MW.

➤ **Ορυχείο Πεδίου Καρδιάς:** Περιλαμβάνει την εκμετάλλευση του κοιτάσματος του Τομέα 6, έχει ετήσια παραγωγή λιγνίτη 15-23 εκατομμύρια τόνους και καλύπτει τις ανάγκες του ΑΗΣ Καρδιάς, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1.250 MW. Συμπληρωματικά συμμετέχει στην ισοσκέλιση του ισοζυγίου των ΑΗΣ της περιοχής Πτολεμαΐδας.

➤ **Ορυχείο Νοτίου Πεδίου:** Περιλαμβάνει την εκμετάλλευση του λιγνιτικού κοιτάσματος Νοτίου Πεδίου, έχει ετήσια παραγωγή λιγνίτη 18-22 εκατομμύρια τόνους και καλύπτει τις ανάγκες των 5 Μονάδων του ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1.595 MW.

➤ **Ορυχείο Πεδίου Αμυνταίου:** Περιλαμβάνει την εκμετάλλευση του κοιτάσματος Αμυνταίου και Αναργύρων, έχει ετήσια παραγωγή λιγνίτη 8-9 εκατομμύρια τόνους και καλύπτει τις ανάγκες του ΑΗΣ Αμυνταίου- Φιλώτα, με εγκατεστημένη ισχύ 600 MW.

➤ **Ορυχείο Αχλάδας (Φλώρινα):** Το Νοέμβριο του 2001, η ΔΕΗ ξεκίνησε τη διάνομιξη του πρώτου της ορυχείου στο μικρό κοιτάσμα Αχλάδας του Νομού Φλώρινας. Το ορυχείο αυτό (απόθεμα 2,5 εκατομμύρια τόνους) μαζί με τα ιδιωτικά λιγνιτωρυχεία της λεκάνης της Φλώρινας καλύπτουν τις ανάγκες του νέου ΑΗΣ Μελίτης ισχύος 330 MW που ξεκίνησε τη λειτουργία του το έτος 2003. Διοικητικά το ορυχείο Αχλάδας ανήκει στο ορυχείο Αμυνταίου.

Συνολικά, στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας (ΛΚΔΜ) η παραγωγή λιγνίτη και στείρων/αγόνων υλικών ανήλθε το έτος 2012 σε 52,1 εκατομμύρια τόνους και 236,2 εκατομμύρια κυβικά μέτρα αντιστοίχως, έχοντας μέση σχέση εκμετάλλευσης $4,53 \text{ m}^3_{\text{αγόνων}}/\text{tn}_{\text{λιγνίτη}}$ και τροφοδοτώντας τους ΑΗΣ Δυτικής Μακεδονίας, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 4.438 MW. Για την επίτευξη του έργου αυτού χρησιμοποιούνται 42 καδοφόροι εκσκαφείς, 16 αποθέτες, 248 km περίπου ταινιόδρομοι (με πλάτος 1,0 - 2,4 μέτρα) και 1.100 περίπου ντιζελοκίνητα μηχανήματα ().

Ορυχεία Λιγνιτικού Κέντρου Μεγαλόπολης (ΛΚΜ) (τακτικό προσωπικό: 1002 άτομα)

➤ **Ορυχείο Χωρεμίου:** Ετήσια παραγωγή λιγνίτη 9-12 εκατομμύρια τόνους.

➤ **Ορυχείο Μαραθούσας:** Ετήσια παραγωγή λιγνίτη 1-2 εκατομμύρια τόνους.

➤ **Ορυχείο Κυπαρισσίας:** Ετήσια παραγωγή λιγνίτη 2-4 εκατομμύρια τόνους.

Συνολικά, στο Λιγνιτικό Κέντρο Μεγαλόπολης (ΛΚΜ) η παραγωγή λιγνίτη και στείρων/αγόνων υλικών ανήλθε το έτος 2012 σε 9,6 εκατομμύρια τόνους και 21,1 εκατομμύρια κυβικά μέτρα αντιστοίχως, έχοντας μέση σχέση εκμετάλλευσης $2,2 \text{ m}^3_{\text{αγόνων}}/\text{tn}_{\text{λιγνίτη}}$, τροφοδοτώντας τον ΑΗΣ Μεγαλόπολης, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 850 MW. Για την επίτευξη του έργου αυτού χρησιμοποιούνται 10 καδοφόροι εκσκαφείς, 6 αποθέτες αγόνων/στείων υλικών, 4 αποθέτες λιγνίτη, 43,1 km περίπου ταινιόδρομοι (με πλάτος 1,2 – 1,6 μέτρα) και 400 περίπου ντιζελοκίνητα μηχανήματα (Euracoal, 2013; ΔΕΗ, 2006).

Στον πίνακα 1.4 παρουσιάζονται τοπογραφικά χαρακτηριστικά των δύο μεγάλων λιγνιτικών κέντρων της Ελλάδας.

Πίνακας 1.4: Εκτάσεις των μεγαλύτερων ορυχείων (km^2) (Κ. Kavouridis, 2008)

Περιοχή	Πτολεμαΐδα	Αμύνταιο	Φλώρινα	Μεγαλόπολη	Σύνολο
Εκσκαφή	23,0	10,0	0,2	19,0	52,2
Απόθεση	25,0	14,0	0,1	7,0	46,1
Περιβαλλοντική αποκατάσταση	31,3	8,7	0,0	7,1	47,1
Κτίρια, Αποθήκες, Αυλές, Απαλλοτριωθείσες εκτάσεις	30,1	12,7	1,2	8,6	52,6
Σύνολο	109,4	45,4	1,5	41,7	198,0

Συνολικά, από τα δύο μεγάλα λιγνιτικά κέντρα το έτος 2012, η παραγωγή λιγνίτη από τα ορυχεία της Δ.Ε.Η. ανέρχεται σε 61,7 εκατομμύρια τόνους, ενώ η παραγωγή αγόνων/στείων υλικών είναι της τάξης των 257,3 εκατομμυρίων τόνων. Η μέση σχέση εκμετάλλευσης για το ίδιο έτος κυμαίνεται

περίπου στα 5-6 m³_{αγόνων}/τη_{λιγνίτη} και η συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς των έξι θερμοηλεκτρικών σταθμών που τροφοδοτούνται με καύσιμο λιγνίτη είναι περίπου 5.288 MW. Στον πίνακα 1.5 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά στοιχεία των εκμεταλλεύσεων λιγνίτη από τα μεγάλα συγκροτήματα ορυχείων της Ελλάδας και οι αντίστοιχοι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί (ΑΗΣ) τους οποίους τροφοδοτούν με λιγνίτη.

Πίνακας 1.5: Στοιχεία εκμεταλλεύσεων λιγνίτη και αντιστοίχων ατμοηλεκτρικών σταθμών (ΑΗΣ) (Euracoal, 2013; ΔΕΗ, 2006)

Στοιχεία Εκμεταλλεύσεων Λιγνίτη		Στοιχεία τροφοδοτούμενων ΑΗΣ	
Ορυχεία	Παραγωγή 2012 (Mt)	ΑΗΣ	Εγκατεστημένη ισχύς 2006 (MW)

Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας (ΛΚΔΜ)

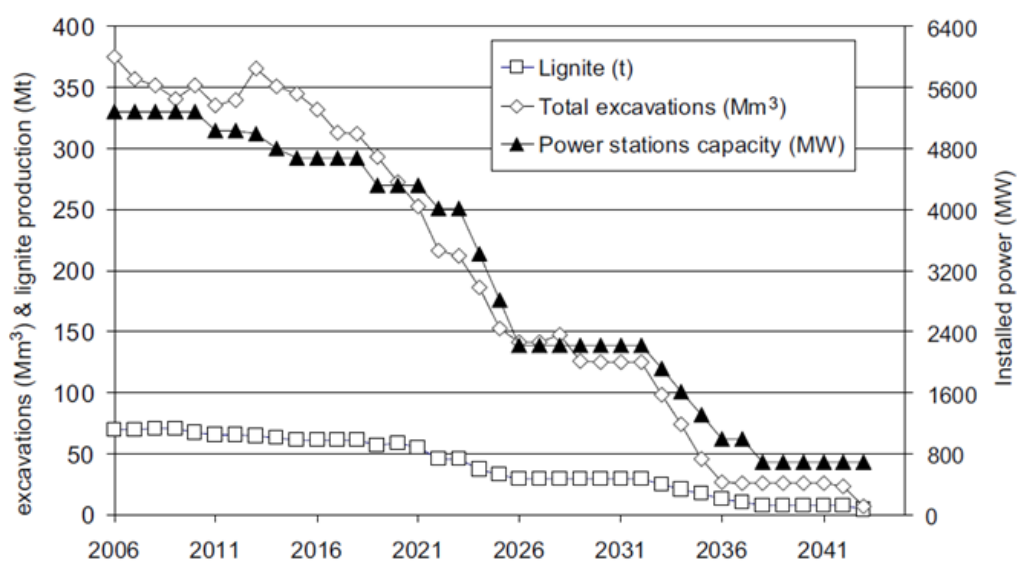
Ορυχείο Κυρίου Πεδίου	6,2	ΛΙΠΤΟΛ Πτολεμαΐδας	663
Ορυχείο Καρδιάς	18	Καρδιάς	1.250
Ορυχείο Νοτίου Πεδίου	19	Αγίου Δημητρίου	1.595
Ορυχείο Αμυνταίου	8	Αμυνταίου-Φιλώτα	600
Ορυχείο Φλώρινας	0,9	Μελίτη-Αχλάδα	330
ΣΥΝΟΛΟ	52,1	ΣΥΝΟΛΟ	4.438

Λιγνιτικό Κέντρο Μεγαλόπολης (ΛΚΜ)

Ορυχείο Χωρέμι, Μαραθούσα, Κυπαρισσία	9,6	Μεγαλόπολη (Α και Β)	850
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ	61,7	ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ	5.288

1.5 Συνεισφορά του λιγνίτη στον ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας – Μελλοντική εξέλιξη

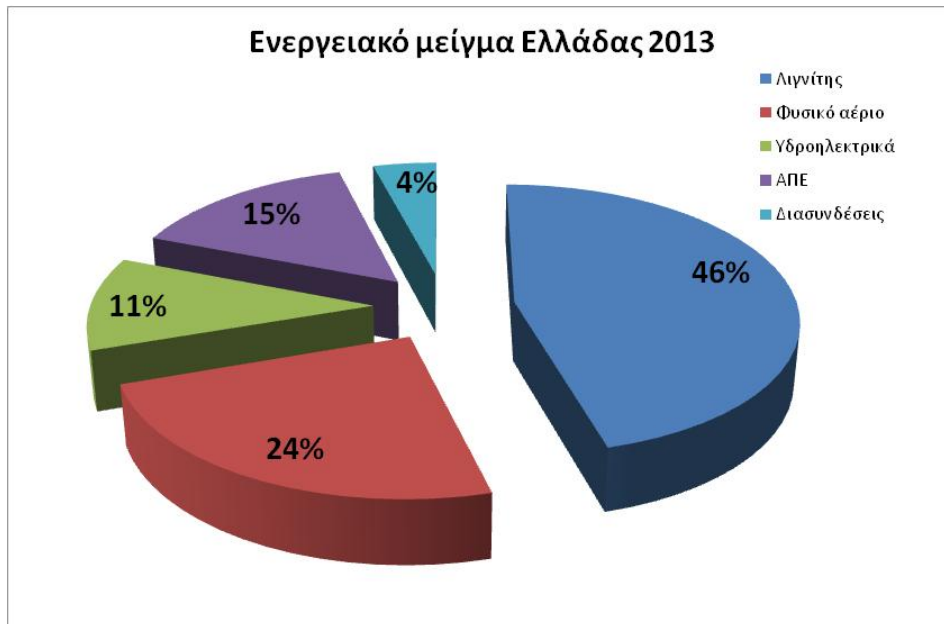
Ο λιγνίτης αποτελεί για την Ελλάδα τη σημαντικότερη πηγή ενέργειας και όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1.1, έως και το έτος 2014 τα λιγνιτωρυχεία της ΔΕΗ είχαν μέσο ετήσιο ρυθμό παραγωγής περίπου 60-70 εκατομμύρια τόνους και αντίστοιχες συνολικές εκσκαφές 340-370 εκατομμύρια κυβικά μέτρα. Με την παραγωγή αυτή η Ελλάδα κατατάσσεται η 2^η λιγνιτοπαραγωγός χώρα στην Ευρωπαϊκή Ένωση και η 6^η σε παγκόσμια κλίμακα.



Διάγραμμα 1.1: Συνοπτικές εκσκαφές (Mm³), παραγωγή λιγνίτη ορυχείων (Mt) και εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς των λιγνιτικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ΔΕΗ για τη περίοδο 2006-2043 (K. Kavouridis, 2008)

Η παρατηρούμενη μείωση της παραγόμενης ποσότητας λιγνίτη και κατά συνέπεια των εκσκαφών αγόνων/στείρων υλικών από το έτος 2011 και μετά οφείλεται στην ολοένα αυξανόμενη διείσδυση των τεχνολογιών αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα της χώρας και στη μελλοντική εξάντληση των αποθεμάτων λιγνίτη. Αντίστοιχα, η μειούμενη εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς των θερμοηλεκτρικών σταθμών με βάση το λιγνίτη οφείλεται στη στροφή των επενδύσεων σε τεχνολογίες ανανεώσιμων μορφών ενέργειας και την βαθμιαία υποκατάσταση του λιγνίτη με άλλου είδους καύσιμο.

Στο διάγραμμα 1.2 εμφανίζεται η συνεισφορά κάθε παραγωγικού τομέα στο ενεργειακό μείγμα της χώρας για το έτος 2013 και αποδεικνύεται η σημαντική συνεισφορά του λιγνίτη στην κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων.



Διάγραμμα 1.2: Ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας για το έτος 2013 (ΔΕΗ, 2013α)

Τα πλεονεκτήματα του μέχρι σήμερα λιγνιτικού προσανατολισμού της ενεργειακής πολιτικής της Ελλάδας είναι:

- α) οι χαμηλές τιμές στο παραγόμενο ρεύμα,
- β) η ασφάλεια ανεφοδιασμού, που αποτελεί βασικό παράγοντα για χάραξη μακροπρόθεσμης ενεργειακής πολιτικής και
- γ) η χρήση του λιγνίτη υποκαθιστά εισαγόμενα καύσιμα ή εισαγόμενη ηλεκτρική ενέργεια με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χρημάτων καθώς και την σχετική ενεργειακή ανεξαρτησία της χώρας.

1.6 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι ο προσδιορισμός του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη και η εκτίμηση του συνολικού κόστους παραγωγής ενέργειας. Συγκεκριμένα, εξετάζονται λεπτομερώς οι εκπομπές ρύπων που προκύπτουν από ολόκληρο τον κύκλο ζωής του λιγνίτη σύμφωνα με τις αρχές της μεθόδου της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), λαμβάνοντας υπόψη στα όρια του συστήματος τις φάσεις της κατασκευής, της λειτουργίας και της αποσυναρμολόγησης τόσο του θερμοηλεκτρικού σταθμού όσο και του αντίστοιχου λιγνιτωρυχείου. Για την εκτίμηση του συνολικού κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, εφαρμόζεται η μέθοδος της Κοστολόγησης Κύκλου Ζωής (ΚΚΖ) λαμβάνοντας υπόψη τόσο το εσωτερικό, όσο και το εξωτερικό κόστος ολόκληρου του κύκλου ζωής του λιγνίτη. Με αυτό τον τρόπο, εξασφαλίζεται ότι οι εκπομπές που υφίστανται κατά τη διάρκεια ολόκληρου του

κύκλου ζωής συμπεριλαμβάνονται στην αποτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του συστήματος και συνυπολογίζονται στην τελική τιμή του εξωτερικού κόστους. Επιπλέον, η εκτίμηση του συνολικού ιδιωτικού κόστους που υφίσταται σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής του λιγνίτη, συμβάλλει καταλυτικά στην εξαγωγή ρεαλιστικών συμπερασμάτων σχετικά με την τιμή του συνολικού κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη, μέσω του οποίου σκιαγραφείται η πρωτοτυπία της παρούσας έρευνας.

Κεφάλαιο 2^ο

Μηχανολογικός εξοπλισμός ορυχείων

2.1 Μηχανολογικός εξοπλισμός ορυχείων

Ο μηχανολογικός εξοπλισμός που είναι απαραίτητος για την εκμετάλλευση των λιγνιτικών κοιτασμάτων κατηγοριοποιείται ανάλογα με τον τρόπο χρήσης του κατά τη διάρκεια του κύκλου εργασιών του ορυχείου σε:

- Πάγιο (βασικό) εξοπλισμό
- Έκτακτο (βοηθητικό) εξοπλισμό

Ο πάγιος εξοπλισμός εξασφαλίζει τη συνεχή εξόρυξη των αγόνων υλικών και του λιγνίτη, τη μεταφορά του λιγνίτη στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς για ενεργειακή αξιοποίηση και τη μεταφορά και απόθεση των αγόνων υλικών σε κατάλληλα σημεία υποδοχής. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του συνίσταται στο ότι είναι κατά βάση ηλεκτροκίνητος και έχει υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια, ενώ η ογκώδης κατασκευή υπαγορεύεται από τον ρυθμό εκσκαφής, ο οποίος πρέπει να είναι σημαντικά μεγάλος εξαιτίας του υψηλού δείκτη παραγωγικότητας που απαιτείται στα λιγνιτωρυχεία. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζεται ο πάγιος εξοπλισμός των λιγνιτωρυχείων και τα βασικότερα χαρακτηριστικά του.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά πάγιου εξοπλισμού ορυχείων

Τύπος μηχανήματος	Δυναμικότητα (m ³ /h)	Ηλεκτρική ισχύς (kWe)	References
Καδοφόρος εκσκαφέας	600-10.000	160-3.800	<ul style="list-style-type: none"> · FAM, 2000 · SANDVIK, 2010 · Tenova, 2011 · SKW, 2012 · Δ. Ζαραφίδης et al., 2008
Εκσκαφέας με συρόμενο κάδο	1.350-1.800	1.500-4.500	<ul style="list-style-type: none"> · CAT, 2013
Ηλεκτροκίνητο πτύο	425-900	1.000-2.200	<ul style="list-style-type: none"> · CAT, 2011b
Ταινιόδρομος	Ανάλογα με τον συνεργαζόμενο εξοπλισμό	Ανάλογα με το φορτίο που μεταφέρεται	<ul style="list-style-type: none"> · D.D. Gallagher et al., 2000
Αποθέτης	600-10.000	160-3.800	<ul style="list-style-type: none"> · FAM, 2000 · SANDVIK, 2010 · Tenova, 2011 · SKW, 2012

Το πλήθος των μηχανημάτων πάγιου εξοπλισμού που έχει στην ιδιοκτησία της η ΔΕΗ φαίνεται στον πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Πάγιος εξοπλισμός λιγνιτωρυχείων ΔΕΗ (Κ. Kavouridis, 2008)

Καδοφόροι εκσκαφείς		Αποθέτες		Ταινιόδρομοι	
Ρυθμός εκσκαφής (m ³ /h)	Πλήθος	Ρυθμός απόθεσης (m ³ /h)	Πλήθος	Πλάτος (mm)	Μήκος (km)
11000-11100	4	11.000	6	2.400	44,0
5750-6100	11	6.500-6.700	6	1.800	99,0
2800	12	5.600	4	1.600	11,3
2070-2230	13	4.800	8	1.400	37,6
1500-2000	12	4.200-4.500	2	1.200	98,7

				1.000	0,5
ΣΥΝΟΛΟ	52	ΣΥΝΟΛΟ	26	ΣΥΝΟΛΟ	291,1

Πέραν του πάγιου εξοπλισμού συνεχούς λειτουργίας, χρησιμοποιείται και ένας μεγάλος αριθμός βοηθητικών οχημάτων και μηχανημάτων, ως έκτακτος εξοπλισμός. Τα χωματουργικά αυτά μηχανήματα κινούνται κατά βάση με συμβατικά καύσιμα και κυρίως πετρέλαιο (diesel), ενώ ο ρυθμός εκσκαφής τους εξαρτάται από τις απαιτήσεις του λιγνιτωρυχείου σε παραγωγή. Στον πίνακα 2.3 φαίνεται το είδος και η δυναμικότητα των βασικότερων χωματουργικών οχημάτων που υπάρχουν σε ένα λιγνιτωρυχείο.

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά έκτακτου εξοπλισμού ορυχείων

Τύπος μηχανήματος	Δυναμικότητα (m ³ /10min)	Κατανάλωση καυσίμου (lt _{diesel} /h)	References
Όχημα μεταφοράς προσωπικού	-	10-15	· I.S. University, 2012 · EPA, 2005
Ερπυστριοφόρος μπολτόζα	1,53-45	14,975-124,1	· Komatsu, 2006 · CAT, 2006
Μηχάνημα απομάκρυνσης επιφανειακού στρώματος εδάφους	2,66-17	7,5-14	· CATERPILLAR, website · CAT, 2006
Μπολτόζα	1,6-20	14,975-124,1	
Τροχομπολτόζα	7,9-45	33,8-73	· CAT, 2014e · CAT, 2006
Μηχάνημα απόξεσης εδάφους	38-56	40-130	· CATERPILLAR, website
Μηχάνημα πλανίσματος εδάφους	20-30	49-95	· CAT, 2006
Ισοπεδωτής	3,7-5	15,7-50	· Komatsu, 1997 · CAT, 2006
Μηχάνημα αναμόρφωσης δρόμων	10-15	34,1-85	· CATERPILLAR, website
Φορτωτής-Εργαλειοφορέας	1,2-2	7-130	· CAT, 2006
	(tn/20min)	(lt/h)	
Αρθρωτό φορτηγό	20-40	17-40	
Φορτηγό χωματουργικών εργασιών	52-65	36-250	· CATERPILLAR, website · CAT, 2006
	(tn/h)	(lt/h)	
Θραυστήρας ή Σπαστήρας	300-500	2,5-3	· KPI-JCI, 2007 · CATERPILLAR, website
	(m³/h)	(lt/h)	
Φορτωτής-Εκσκαφέας	11,4-13,2	13-17	· Komatsu, 2008
Πρόσθιο πτύο	45,6-91,2	48-130	· CAT, 2006
Φορτωτής	24-48	20-35	· CATERPILLAR, website
Εκσκαφέας	40,8-80,4	5,5-50	
Εξοπλισμός αποκατάστασης φυσικού περιβάλλοντος	-	12-14	· CAT, 2006

	(Km ² /h)	(lt/h)	
Οδοστρωτήρας	0,01312-0,015	10,93-21	<ul style="list-style-type: none"> · CATERPILLAR, website · CAT, 2006
Γεωτρύπανο	2,835-3	12,1-14	<ul style="list-style-type: none"> · A. Corco, 2009d · A. Corco, 2009b · A. Corco, 2009a · A. Corco, 2009c

2.2 Πάγιος μηχανολογικός εξοπλισμός ορυχείων

Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικότερα καθένα μηχάνημα του πάγιου εξοπλισμού των ορυχείων, που είναι κατά βάση ηλεκτροκίνητος.

2.2.1 Καδοφόρος Εκσκαφέας (Bucket Wheel Excavator)

Ο Καδοφόρος Εκσκαφέας (ΚΕ) είναι ένα σύνθετο αυτοκινούμενο μηχάνημα συνεχούς εξόρυξης που χρησιμοποιείται σε υπαίθρια ορυχεία και χωματουργικά έργα. Η δομή και λειτουργία του βασίζεται στην ιδέα της περιστροφής ενός τροχού μεγάλης διαμέτρου, στην περιφέρεια του οποίου βρίσκονται τοποθετημένοι κάδοι (εξ' ου και καδοφόρος), υποδοχείς δηλαδή του υλικού που εξορύσσεται. Χαρακτηρίζεται ως «σύνθετο» επειδή εκτελεί συγχρόνως και τις τρεις βασικές φάσεις της εξόρυξης, δηλαδή την εκσκαφή του πετρώματος, τη φόρτωση του εξορυγμένου υλικού και τη μεταφόρτωσή του σε άλλο μέσο αποκομιδής. Οι καδοφόροι εκσκαφείς κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη, με δυναμικότητες που κυμαίνονται από 1.700 έως 240.000 κυβικά μέτρα συμπαγούς πετρώματος ανά ημέρα και με βάρος λειτουργίας από 23 έως 13.000 τόνους αντίστοιχα (D. Milcic et al., 2002). Οι μικρής δυναμικότητας καδοφόροι εκσκαφείς παράγονται στα εργοστάσια κατασκευής τους ως μηχανήματα μαζικής παραγωγής, ενώ οι μεγαλύτεροι καδοφόροι εκσκαφείς κατασκευάζονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του αγοραστή-χρηστή, ούτως ώστε αυτοί να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις μιας συγκεκριμένης εκμετάλλευσης.

Ο σπουδαίος ρόλος αυτών των μηχανημάτων καταδεικνύεται και από το γεγονός ότι η απόδοση του όλου συστήματος εξόρυξης εξαρτάται κυρίως από τη λειτουργία των καδοφόρων εκσκαφών.

Το σχήμα και το μέγεθος των επιμέρους δομών του καδοφόρου εκσκαφέα καθώς και οι διαστάσεις τους, εξαρτώνται από την απαιτούμενη παραγωγικότητα, τον τρόπο φόρτωσης του υλικού, όπως επίσης και από τις συγκεκριμένες συνθήκες του εδάφους όπως παραδείγματος χάρη τη σταθερότητα της όλης έκτασης, τη σκληρότητα του υλικού και το μέγεθος του επιτρεπομένου φορτίου που μπορεί να υποστηρίξει.

Γενικότερα, υπάρχει μια σειρά από πλήθος των μηχανημάτων αυτών, που οι διαφορές τους εστιάζονται σε σημεία όπως η διάμετρος των καδοτροχών τους, ο αριθμός και το σχήμα των κάδων κλπ. Οι καδοφόροι εκσκαφείς παράγονται κυρίως ως μοναδικά προϊόντα σύμφωνα με τις συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος στο οποίο πρόκειται να τεθούν σε λειτουργία. Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζεται καδοφόρος εκσκαφέας μεγάλης δυναμικότητας κατά την λειτουργία του.



Εικόνα 2.1: Καδοφόρος εκσκαφέας

Για τους καδοφόρους εκσκαφείς χρησιμοποιούνται οι εξής συντομογραφίες, που υποδηλώνουν τον τύπο του μηχανήματος (Κ. Καβουρίδης, 1992):

$$\text{Sch } s \frac{J}{t} h - u \quad \text{ή} \quad \text{SchR } s \frac{J}{t} h - u \quad \text{ή απλά} \quad \text{CJ}$$

Όπου:

- Sch = καδοφόρος εκσκαφέας κινούμενος επί σιδηροτροχιών
- SchR = καδοφόρος εκσκαφέας κινούμενος επί ερπυστριών
- s = περιστρεφόμενη ανωδομή
- J = ονομαστική χωρητικότητα ενός κάδου, σε L
- t = βάθος εκσκαφής κάτω από το επίπεδο των ερπυστριών, σε m
- h = ύψος πάνω από το δάπεδο πορείας που δύναται να εξορύξει, σε m
- u = μήκος επιμήκυνσης βραχίονα καδοτροχού καδοφόρου εκσκαφέα με επιμηκυνόμενο βραχίονα καδοτροχού (Crowd type), σε m
- C = καδοφόρος εκσκαφέας τύπου «Compact»

Για παράδειγμα, στα σύγχρονα υπαίθρια ορυχεία για την εκμετάλλευση λιγνίτη, ένας καδοφόρος εκσκαφέας με τον συμβολισμό SRs(H) 1050, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.2, κινείται επί ερπυστριών, έχει περιστρεφόμενη ανωδομή και οι κάδοι του έχουν ονομαστική χωρητικότητα 1.050 L ο καθένας.



Εικόνα 2.2: Συμβολισμός καδοτροχού

2.2.2 Εκσκαφέας με Συρόμενο Κάδο (Dragline Excavator)

Ο Εκσκαφέας με Συρόμενο Κάδο είναι ένα σύνθετο αυτοκινούμενο μηχάνημα συνεχούς εξόρυξης που χρησιμοποιείται σε υπαίθρια ορυχεία και χωματοουργικά έργα, παίζοντας το ρόλο του «αντικαταστάτη» σε περιπτώσεις που η χρήση του καδοφόρου εκσκαφέα δεν ενδείκνυται. Η φιλοσοφία λειτουργίας του βασίζεται στη χρήση ενός κάδου μεγάλης χωρητικότητας για την εξόρυξη και φόρτωση του υλικού με τη βοήθεια ατσάλινων συρματόσχοινων. Ως «σύνθετο» μηχάνημα, βασικές του λειτουργίες είναι η εκσκαφή του πετρώματος, η φόρτωση του εξορυγμένου υλικού και η μεταφόρτωσή του σε άλλο μέσο αποκομιδής. Οι Εκσκαφείς με Συρόμενο Κάδο κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη, με χωρητικότητες κάδου που κυμαίνονται από 46 έως 124 κυβικά μέτρα και με βάρος λειτουργίας από 8.000 έως 13.000 τόνους αντίστοιχα (CAT, 2013). Συνήθως, οι εκσκαφείς με συρόμενο κάδο κατασκευάζονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του αγοραστή-χρηστή, ούτως ώστε αυτοί να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις μιας συγκεκριμένης εκμετάλλευσης. Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζεται εκσκαφέας με συρόμενο κάδο μεγάλης δυναμικότητας κατά τη λειτουργία του.



Εικόνα 2.3: Εκσκαφέας με συρόμενο κάδο

2.2.3 Ηλεκτροκίνητο Πτύο (Electric Rope Shovel)

Το Ηλεκτροκίνητο Πτύο είναι ένα σύνθετο αυτοκινούμενο μηχάνημα συνεχούς εξόρυξης που χρησιμοποιείται σε υπαίθρια ορυχεία και χωματοουργικά έργα, σε μικρότερη όμως κλίμακα από ότι οι καδοφόροι εκσκαφείς και οι εκσκαφείς με συρόμενο κάδο. Η κατασκευή του προέκυψε από την ανάγκη εξόρυξης ορυκτών σε ορυχεία όπου ο δείκτης παραγωγικότητας είναι τόσο χαμηλός, ώστε η χρήση και λειτουργία μεγαλύτερου εξοπλισμού, όπως αυτά των παραπάνω κατηγοριών να κρίνεται ασύμφορη. Η «σύνθετη» λειτουργία του καλύπτει τις φάσεις της εκσκαφής του πετρώματος, της φόρτωσης του εξορυγμένου υλικού και της μεταφόρτωσής του σε άλλο μέσο αποκομιδής, με τη χρήση ενός κάδου μεγάλης χωρητικότητας. Ανάλογα με το μέγεθός τους, τα ηλεκτροκίνητα πτύα έχουν βάρος λειτουργίας από 780 έως 1400 τόνους και με χωρητικότητες κάδου που κυμαίνονται από 18,4 έως 62,7 κυβικά μέτρα (CAT, 2011a, 2011b). Συνήθως, τα ηλεκτροκίνητα πτύα παράγονται στα εργοστάσια κατασκευής τους ως μηχανήματα μαζικής παραγωγής, ενώ σε περιπτώσεις που απαιτούνται μεγάλες δυναμικότητες και άρα κατασκευές, οι προδιαγραφές του αγοραστή-χρηστή είναι αυτές που καθορίζουν και τον τρόπο κατασκευής, ούτως ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις μιας συγκεκριμένης εκμετάλλευσης. Στην εικόνα 2.4 παρουσιάζεται ηλεκτροκίνητο πτύο μεγάλης δυναμικότητας κατά τη λειτουργία του.



Εικόνα 2.4: Ηλεκτροκίνητο πτύο

2.2.4 Ταινιόδρομος (Conveyor Belt)

Στα λιγνιτωρυχεία και γενικότερα στις εκμεταλλεύσεις με υψηλούς ρυθμούς παραγωγής, η μεταφορά του υλικού γίνεται με ηλεκτροκίνητες μεταφορικές ταινίες. Το συγκρότημα της μεταφορικής ταινίας (ιμάντας) μαζί με όλες τις κατασκευές που χρειάζεται για την έδραση και τη λειτουργία του ονομάζεται ταινιόδρομος (Τ/Δ) ή απλά ταινία. Στην εικόνα 2.5 παρατηρείται τμήμα του δικτύου ταινιοδρόμων Πτολεμαΐδας σε λειτουργία. Η μεταφορά του υλικού από τον χώρο εκσκαφής μέχρι την απόθεση γίνεται συνήθως με μία σειρά διαδοχικών ταινιοδρόμων, σε απόλυτη λειτουργική συνεργασία μεταξύ τους, που ονομάζεται κλάδος ταινιοδρόμων. Ένας κλάδος, ανάλογα με την τομή που είναι εγκατεστημένος, χαρακτηρίζεται ως κλάδος υπερκειμένων ή κλάδος λιγνίτη.

Ένας ταινιόδρομος αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Την κεφαλή
- Τον κατά μήκος ταινιοδρομικό εξοπλισμό
- Τον σταθμό επιστροφής ή τέρμα ταινιοδρόμου

Το βασικό πλεονέκτημα των ταινιοδρόμων, ως συστήματος μεταφοράς, είναι ο υψηλός βαθμός λειτουργικότητας, δεδομένου ότι η λειτουργία τους δεν επηρεάζεται από τις καιρικές και εδαφολογικές συνθήκες, το χαμηλό κόστος συντήρησής τους και το σχετικά λίγο προσωπικό, που απαιτείται για την επιτήρηση της λειτουργίας τους.

Το μειονέκτημά τους είναι η έλλειψη ευελιξίας και η δυσκολία προσαρμογής στις μεταβαλλόμενες συνθήκες των εργοταξίων. Οι διάφοροι κλάδοι ταινιοδρόμων που είναι εγκατεστημένοι στα διάφορα μέτωπα εκσκαφής καταλήγουν συνήθως στον κόμβο του Ορυχείου (σύμπλεγμα) και, με προωθούμενες κεφαλές, το υλικό από κάθε κλάδο μπορεί να οδηγηθεί είτε στην απόθεση αν είναι άγονο είτε στην αποθήκη μεταλλεύματος ή κατευθείαν στο εργοστάσιο επεξεργασίας (Σ. Παπαδόπουλος, 2010).



Εικόνα 2.5: Τμήμα δικτύου ταινιοδρόμων

2.2.5 Αποθέτης (Spreader)

Στη μέθοδο επιφανειακής εκμετάλλευσης συνεχούς λειτουργίας, έχουν αναπτυχθεί μεγάλοι αποθέτες για την απόθεση των υπερκειμένων και ενδιάμεσων στείρων υλικών. Τα μηχανήματα αυτά λειτουργούν συνήθως σε σειρά με τους καδοφόρους εκσκαφείς και ταινιοδρόμους και είναι σε θέση να παραλάβουν και αποθέσουν την παραγωγή των εκσκαφών, η οποία φθάνει μέχρι και 240000 κυβικά μέτρα συμπαγούς πετρώματος ανά ημέρα. Για λόγους ασφάλειας, συνήθως η δυναμικότητα του αποθέτη εκλέγεται περίπου τριπλάσια αυτής του καδοφόρου εκσκαφέα ούτως ώστε να δύναται να καλύψει και την εξαιρετική περίπτωση της συνεργασίας δύο ή και περισσότερων μηχανημάτων με αυτόν. Στην εικόνα 2.6 παρατηρείται αποθέτης σε λειτουργία.

Ο αποθέτης είναι ένα αυτοκινούμενο μηχάνημα και έχει τη δυνατότητα να αποθέσει το υλικό με ομοιόμορφη διασπορά. Κατά τη λειτουργία του κινείται κατά μήκος των ταινιοδρόμων και με περιστροφή του βραχίονα απόρριψης κάνει εκλεκτική απόθεση των διαφόρων ποιοτήτων αγόνων με τρόπο ώστε να διαμορφώνεται μια ευσταθής απόθεση. Το υλικό που φτάνει στην τομοταινία απόθεσης μεταφέρεται στον αποθέτη με τη βοήθεια αναδιπλωτών, οι οποίοι συνήθως διαθέτουν περιστρεφόμενο βραχίονα, που τροφοδοτεί τον βραχίονα παραλαβής του αποθέτη. Οι αναδιπλωτές κινούνται κατά μήκος της τομοταινίας, είτε επί των σιδηροτροχιών, είτε με ερπύστριες, όπως και ο αποθέτης (Σ. Παπαδόπουλος, 2010).



Εικόνα 2.6: Αποθέτης υπερκειμένων

2.3 Έκτακτος μηχανολογικός εξοπλισμός ορυχείων

Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικότερα καθένα μηχάνημα του έκτακτου εξοπλισμού των ορυχείων, που είναι κατά βάση ντιζελοκίνητος.

2.3.1 Όχημα μεταφοράς προσωπικού (Workforce Carrier)

Για την ασφαλή μεταφορά του εργατικού δυναμικού στο χώρο του ορυχείου χρησιμοποιούνται λεωφορεία τύπου Pullman, η χωρητικότητα των οποίων ποικίλει από 50-70 άτομα, ενώ η ισχύς του κινητήρα τους κυμαίνεται από 300-500 hp. Η μέση ταχύτητα πορείας δεν ξεπερνά τα 70 km/h και κατά συνέπεια η ειδική κατανάλωση καυσίμου είναι της τάξης των 0,3-0,8 lt/km (EPA, 2010). Στην εικόνα 2.7 εμφανίζεται όχημα που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του προσωπικού στο ορυχείο.



Εικόνα 2.7: Όχημα μεταφοράς προσωπικού

2.3.2 Ερπυστριοφόρος Μπολτόζα (Crawler Dozer)

Βασική λειτουργία της ερπυστριοφόρου μπολτόζας είναι η εκκαθάριση του επιφανειακού στρώματος του εδάφους από τυχόν ανωμαλίες ή αντικείμενα και η δημιουργία ενός επίπεδου κατά το δυνατόν τοπίου. Κύριο χαρακτηριστικό του είναι η χωρητικότητα του πρόσθιου πτερυγίου του, που ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος του μηχανήματος από 1,53-45 m³. Η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 14,975-124,1 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί, ενώ το μέγιστο βάθος εκσκαφής κάτω από το επίπεδο λειτουργίας είναι της τάξης των 215-312 mm (Komatsu, 2006). Στην εικόνα 2.8 παρουσιάζεται ερπυστριοφόρος μπολτόζα σε λειτουργία.



Εικόνα 2.8: Ερπυστριοφόρος μπολτόζα

2.3.3 Μηχάνημα απομάκρυνσης επιφανειακού στρώματος εδάφους (Skid Steer Loader)

Βασική λειτουργία του μηχανήματος αυτού, όπως και της ερπυστριοφόρου μπολτόζας, είναι η εκκαθάριση του επιφανειακού στρώματος του εδάφους από τυχόν ανωμαλίες ή αντικείμενα και η δημιουργία ενός επίπεδου κατά το δυνατόν τοπίου. Η λειτουργία του είναι συμπληρωματική με αυτή της ερπυστριοφόρου μπολτόζας, αλλά πλεονεκτεί στο ότι δύναται να μεταβάλει τη λειτουργία

του σε εντελώς διαφορετικό είδος, απλώς με την αλλαγή του εργαλείου που φέρει συναρμολογημένο στους δύο βραχίονές του. Στη συνηθέστερη περίπτωση που φέρει πτερύγιο στους βραχίονές του, η χωρητικότητά του ποικίλει από 2,66-17 m³. Η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 7,5-14 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί, ενώ το μέγιστο βάθος εκσκαφής κάτω από το επίπεδο λειτουργίας είναι της τάξης των 225-263 mm (CAT, 2014d). Στην εικόνα 2.9 παρουσιάζεται μηχάνημα απομάκρυνσης επιφανειακού στρώματος εδάφους



Εικόνα 2.9: Μηχάνημα απομάκρυνσης επιφανειακού στρώματος εδάφους

2.3.4 Μπολτόζα (Track Type Tractor)

Η μορφολογία αυτού του είδους μπολτόζας προσομοιάζει με αυτή των παραπάνω μηχανημάτων, ωστόσο κύρια λειτουργία του είναι η διαχείριση χωματουργικών υλικών που στοιβάζονται σε σωρούς. Η χωρητικότητα του πρόσθιου πτερυγίου του ποικίλει από 1,6-20 m³ και η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 14,975-124,1 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί, ενώ το μέγιστο βάθος εκσκαφής κάτω από το επίπεδο λειτουργίας είναι της τάξης των 200-500 mm (CAT, 2011c). Στην εικόνα 2.10 παρουσιάζεται μπολτόζα σε λειτουργία.



Εικόνα 2.10: Μπολτόζα

2.3.5 Τροχομπολτόζα (Wheel Dozer)

Η μορφολογία αυτού του είδους μπολτόζας προσομοιάζει με αυτή του παραπάνω μηχανήματος, με κύρια λειτουργία τη διαχείριση χωματουργικών υλικών που στοιβάζονται σε σωρούς, αλλά συνδυάζοντας τη δυνατότητα διαχείρισης μεγαλύτερων ποσοτήτων μιας ερπυστριοφόρου μπολτόζας, με την ευελιξία μιας τροχοφόρου μπολτόζας. Η χωρητικότητα του πρόσθιου πτερυγίου

του ποικίλει από 7,9-45 m³ και η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 33,8-73 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί, ενώ το μέγιστο βάθος εκσκαφής κάτω από το επίπεδο λειτουργίας είναι της τάξης των 215-351 mm (CAT, 2014e). Στην εικόνα 2.11 παρουσιάζεται τροχοπολτόζα σε λειτουργία.



Εικόνα 2.11: Τροχοπολτόζα

2.3.6 Μηχάνημα απόξεσης εδάφους (Wheel Tractor Scraper)

Η λειτουργία του μηχανήματος αυτού καλύπτει την απόξεση του επιφανειακού στρώματος του εδάφους, τη φόρτωση των υλικών στον ειδικά διαμορφωμένο χώρο του μηχανήματος, γνωστό και ως «κύπελλο», τη μεταφορά τους και εν τέλει την εξωτερική απόθεσή τους σε άλλη περιοχή. Η χωρητικότητα του χώρου αποθήκευσης των υλικών ποικίλει από 38-56 m³. Η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 40-130 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί, ενώ το μέγιστο βάθος εκσκαφής κάτω από το επίπεδο λειτουργίας είναι της τάξης των 200-300 mm (CAT, 2011d). Στην εικόνα 2.12 παρουσιάζεται μηχανήμα απόξεσης εδάφους σε λειτουργία.



Εικόνα 2.12: Μηχάνημα απόξεσης εδάφους

2.3.7 Μηχάνημα πλανίσματος εδάφους (Cold Planer)

Η λειτουργία του μηχανήματος αυτού είναι συμπληρωματική με αυτή του παραπάνω μηχανήματος, δηλαδή η απόξεση (πλάνισμα) του επιφανειακού στρώματος του εδάφους, με τη διαφορά ωστόσο ότι τα εξορυσσόμενα υλικά μεταφορτώνονται απευθείας σε κάποιο φορτηγό για τη μεταφορά τους σε άλλο σημείο. Η δυναμικότητα απόξεσης υλικών ποικίλει από 20-30 m³ ανά δεκάλεπτο λειτουργίας. Η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 49-95 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί, ενώ το μέγιστο βάθος εκσκαφής κάτω από το επίπεδο λειτουργίας είναι της τάξης των 200-300 mm (CAT, 2010a). Στην εικόνα 2.13 παρουσιάζεται μηχανήμα πλανίσματος εδάφους σε λειτουργία.



Εικόνα 2.13: Μηχάνημα πλανίσματος εδάφους

2.3.8 Ισοπεδωτής (Motor Grader)

Η λειτουργία του ισοπεδωτή προσομοιάζει με αυτή των άλλων ειδών μπολτόζας, ιδιαίτερως δε της τροχομπολτόζας και είναι η εκκαθάριση του επιφανειακού στρώματος του εδάφους από τυχόν ανωμαλίες ή αντικείμενα και η δημιουργία ενός επίπεδου κατά το δυνατόν τοπίου. Βασικό χαρακτηριστικό του είναι η χωρητικότητα του περυγίου του, που ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος του μηχανήματος από 3,7-5 m³. Η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 15,7-50 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί, ενώ το μέγιστο βάθος εκσκαφής κάτω από το επίπεδο λειτουργίας είναι της τάξης των 100-200 mm (Komatsu, 1997). Στην εικόνα 2.14 παρουσιάζεται ισοπεδωτής σε λειτουργία.



Εικόνα 2.14: Ισοπεδωτής

2.3.9 Μηχάνημα αναμόρφωσης δρόμων (Road Reclaimer)

Η λειτουργία του μηχανήματος αυτού εξασφαλίζει την απομάκρυνση του επιφανειακού (σκληρού) στρώματος της ασφάλτου, με στόχο την αναμόρφωση απροσπέλαστων δρόμων εξαιτίας κακοτεχνιών ή φθορών. Η δυναμικότητα απομάκρυνσης υλικών ποικίλει από 10-15 m³ ανά δεκάλεπτο λειτουργίας και η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 34,1-85 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί. Το μέγιστο βάθος εκσκαφής κάτω από το επίπεδο λειτουργίας είναι της τάξης των 100-150 mm (CAT, 2007). Στην εικόνα 2.15 παρουσιάζεται μηχανήμα αναμόρφωσης δρόμων σε λειτουργία.



Εικόνα 2.15: Μηχάνημα αναμόρφωσης δρόμων

2.3.10 Φορτωτής-Εργαλειοφορέας (Wheel Loader and Integrated Toolcarrier)

Βασική λειτουργία του μηχανήματος αυτού είναι η φόρτωση υλικών και η μεταφόρτωσή τους σε άλλο μηχάνημα, συνήθως φορτηγό, για περαιτέρω μεταφορά. Σημαντικό πλεονέκτημά του, που το καθιστά ιδιαίτερα εύχρηστο σε κάθε είδους χωματουργική εργασία, αποτελεί η δυνατότητα αλλαγής του εργαλείου που φέρει στους μπροστινούς του βραχίονες και η εκτέλεση εντελώς διαφορετικής εργασίας. Στη συνηθέστερη περίπτωση που φέρει κάδο στους βραχίονές του, η χωρητικότητά του ποικίλει από 1,2-2 m³, ενώ η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 7-130 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί (Komatsu, 2000). Στην εικόνα 2.16 παρουσιάζεται φορτωτής-εργαλειοφορέας σε λειτουργία.



Εικόνα 2.16: Φορτωτής-Εργαλειοφορέας

2.3.11 Αρθρωτό Φορτηγό (Articulated Truck)

Η λειτουργία αυτού του μηχανήματος καλύπτει τη μεταφορά των εξορυσσόμενων υλικών στους χώρους απόθεσης ή περαιτέρω αξιοποίησης, παρουσιάζοντας μεγάλη ευελιξία κίνησης που προσδίδεται λόγω της άρθρωσης. Έχει δυνατότητα διαχείρισης υλικών από 20-40 tn, ενώ η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 17-40 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί (CAT, 2014a). Ο κύκλος λειτουργίας του, που καλύπτει τις φάσεις φόρτωση-μεταφορά-απόθεση-επιστροφή στην αφετηρία, για τη περίπτωση των λιγνιτωρυχείων θεωρείται ότι διαρκεί περίπου 20 min. Στην εικόνα 2.17 παρουσιάζεται αρθρωτό φορτηγό σε λειτουργία.



Εικόνα 2.17: Αρθρωτό Φορηγό

2.3.12 Φορηγό χωματουργικών εργασιών (Off Highway Truck)

Όπως και στη περίπτωση του αρθρωτού φορηγού, η λειτουργία αυτού του μηχανήματος καλύπτει τη μεταφορά των εξορυσσόμενων υλικών στους χώρους απόθεσης ή περαιτέρω αξιοποίησης, παρουσιάζοντας ωστόσο δυνατότητα διαχείρισης μεγαλύτερης ποσότητας υλικών χάρη στην ενιαία κατασκευή χωρίς άρθρωση, που του προσδίδει σταθερότητα ακόμα και στο πιο ανώμαλο έδαφος όπως αυτό των ορυχείων. Έχει δυνατότητα διαχείρισης υλικών από 52-65 tn σε κύκλο λειτουργίας περίπου 20 min, ενώ η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 36-250 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί (CAT, 2014c). Στην εικόνα 2.18 παρουσιάζεται αρθρωτό φορηγό σε λειτουργία.



Εικόνα 2.18: Φορηγό χωματουργικών εργασιών

2.3.13 Θραυστήρας ή Σπαστήρας (Crusher)

Η λειτουργία αυτού του μηχανήματος εξασφαλίζει τη θραύση του λιγνίτη σε μικρότερα τεμάχια, μεγέθους έως και 40 mm, προτού φτάσει στο θερμοηλεκτρικό σταθμό. Έχει δυνατότητα διαχείρισης από 300-500 tn_{λιγνίτη}/h, ενώ η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 2,5-3 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί (KPI-JCI, 2007). Στην εικόνα 2.19 παρουσιάζεται θραυστήρας σε λειτουργία.



Εικόνα 2.19: Θραυστήρας ή Σπαστήρας

2.3.14 Φορτωτής-Εκσκαφέας (Backhoe Loader)

Η λειτουργία του μηχανήματος αυτού χαρακτηρίζεται ως «σύνθετη» καθώς καλύπτει την εκσκαφή υλικών, τη φόρτωση και τη μεταφόρτωσή τους σε άλλο μέσο (συνήθως φορτηγό). Η χωρητικότητα του κάδου φόρτωσης υλικών ποικίλει από 11,4-13,2 m³, ενώ η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 13-17 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί (Komatsu, 2008). Στην εικόνα 2.20 παρουσιάζεται φορτωτής-εκσκαφέας σε λειτουργία.



Εικόνα 2.20: Φορτωτής-Εκσκαφέας

2.3.15 Πρόσθιο Πτύο (Front Shovel)

Όπως και στη περίπτωση του φορτωτή-εκσκαφέα, η λειτουργία του πρόσθιου πτύου χαρακτηρίζεται ως «σύνθετη» καθώς καλύπτει την εκσκαφή υλικών, τη φόρτωση και τη μεταφόρτωσή τους σε άλλο μέσο (συνήθως φορτηγό). Η χωρητικότητα του κάδου φόρτωσης υλικών ποικίλει από 45,6-91,2 m³, ενώ η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 48-130 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί (CAT, 2005). Στην εικόνα 2.21 παρουσιάζεται πρόσθιο πτύο σε λειτουργία.



Εικόνα 2.21: Πρόσθιο Πτύο

2.3.16 Φορτωτής (Track Loader)

Η λειτουργία του φορτωτή είναι πιο απλή σε σχέση με αυτή του φορτωτή-εκσκαφέα καθώς περιορίζεται μόνο στη φόρτωση υλικών σε κάποιο μέσο μεταφοράς (συνήθως φορτηγό). Η χωρητικότητα του κάδου φόρτωσης υλικών ποικίλει από 24-48 m³, ενώ η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 20-35 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί (CAT, 2010b). Στην εικόνα 2.22 παρουσιάζεται φορτωτής σε λειτουργία.



Εικόνα 2.22: Φορτωτής

2.3.17 Εκσκαφέας (Excavator)

Η λειτουργία του εκσκαφέα χαρακτηρίζεται ως «σύνθετη» και προσομοιάζει με αυτή του πρόσθιου πτύου καθώς καλύπτει την εκσκαφή υλικών, τη φόρτωση και τη μεταφόρτωση τους σε άλλο μέσο (συνήθως φορτηγό). Η χωρητικότητα του κάδου φόρτωσης υλικών ποικίλει από 40,8-80,4 m³ και η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 5,5-50 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί (CAT, 2009). Στην εικόνα 2.23 παρουσιάζεται εκσκαφέας σε λειτουργία.



Εικόνα 2.23: Εκσκαφέας

2.3.18 Οδοστρωτήρας (Compactor)

Το μηχάνημα αυτό είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο κατά την οδοποιία, καθώς προσδίδει επίπεδη μορφή στο δρόμο, χάρη στη κύλιση ενός κυλίνδρου που φέρει στο πρόσθιο τμήμα του αντί για τροχούς. Η δυναμικότητα οδόστρωσης ποικίλει από 0,01312-0,015 km²/h και η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 10,93-21 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί, ενώ το μέγιστο βάθος εκσκαφής κάτω από το επίπεδο λειτουργίας είναι της τάξης των 100-150 mm (CAT, 2014b). Στην εικόνα 2.24 παρουσιάζεται οδοστρωτήρας σε λειτουργία.



Εικόνα 2.24: Οδοστρωτήρας

2.3.19 Γεωτρύπανο (Blasthole drill-Surface drill rig)

Το μηχάνημα αυτό είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο για τη διάνοιξη οπών σε κάθε είδους ορυχείο. Η λειτουργία τους συχνά είναι προαπαιτούμενη για τη χρήση εκρηκτικών υλών και τη πραγματοποίηση των ανατινάξεων σκληρών πετρωμάτων, προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία της εξόρυξης. Η δυνατότητα διάνοιξης οπών του μηχανήματος μπορεί να καλύψει μία έκταση 2,835-3 km²/h και η κατανάλωση καυσίμου κυμαίνεται από 12,1-14 lt/h ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και το φορτίο εργασίας το οποίο επιτελεί (A. Corco, 2009a, 2009b, 2009c, 2009d). Στην εικόνα 2.25 παρουσιάζεται γεωτρύπανο σε λειτουργία.



Εικόνα 2.25: Γεωτρύπανο

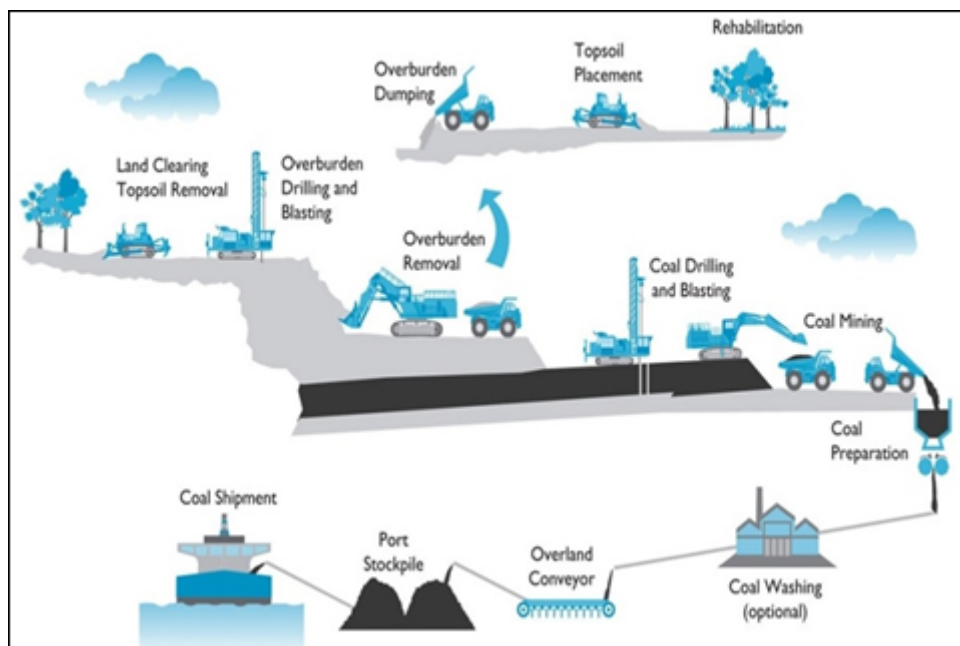
Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τα παραπάνω μηχανήματα, χρησιμοποιούνται ακόμα και ένας μικρός αριθμός βυτιοφόρων οχημάτων πετρελαίου (Fuel Tankers) και νερού (Water Tankers), για τον ανεφοδιασμό των μηχανημάτων με καύσιμα και τη διαβροχή του ορυχείου αντίστοιχα, ούτως ώστε να ελαχιστοποιείται η ποσότητα αιωρούμενης σκόνης στον αέρα εξαιτίας της κίνησης των μηχανημάτων. Επιπλέον, για λόγους πληρότητας, θεωρείται ότι χρησιμοποιείται και ένας είδος έκτακτου εξοπλισμού για την αποκατάσταση του φυσικού περιβάλλοντος (Rehabilitation of natural environment equipment) με μια τυπική κατανάλωση καυσίμου 14 lt/h.

2.4 Οργάνωση εργασιών λιγνιτωρυχείων

Οι βασικές προϋποθέσεις που εξασφαλίζουν την αποδοτική λειτουργία ενός λιγνιτωρυχείου είναι ο καταμερισμός των επιμέρους εργασιών εξόρυξης και η συνεργασία μεταξύ των μηχανημάτων του πάγιου και έκτακτου εξοπλισμού. Θεωρώντας ότι πρόκειται να αξιοποιηθούν λιγνιτικά κοιτάσματα νέου ορυχείου, που δεν έχει δηλαδή λειτουργήσει ποτέ στο παρελθόν, ο συνήθης τρόπος καταμερισμού των εργασιών εξόρυξης έχει ως εξής:

- Εκχέρωση-Αφαίρεση του επιφανειακού στρώματος του εδάφους (Land clearing-Topsoil removal)
- Γεώτρηση και ανατίναξη των υπερκειμένων-αγόνων υλικών του εδάφους (Overburden drilling and blasting)
- Γεώτρηση και ανατίναξη του λιγνιτικού κοιτάσματος (Lignite drilling and blasting)
- Αφαίρεση-Εξόρυξη των υπερκειμένων και μεταφορά (Overburden removal)
- Εξόρυξη του λιγνιτικού κοιτάσματος και μεταφορά (Lignite mining)
- Απόθεση των υπερκειμένων (Overburden dumping)
- Περιβαλλοντική αποκατάσταση (Rehabilitation-Topsoil placement)

Για την επίτευξη των παραπάνω διαδοχικών εργασιών που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.1, καταλυτική είναι η συνεργασία των μηχανημάτων που αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους και μάλιστα με τρόπο συστηματικό. Παρακάτω αναλύεται η σημασία της κάθε εργασίας και ο τύπος των μηχανημάτων που συμβάλουν στην επίτευξή της.



Σχήμα 2.1: Διαδοχή εργασιών λιγνιτωρυχείου (G. Godwin et al., 2008)

2.4.1 Εκχέρωση-Αφαίρεση επιφανειακού στρώματος εδάφους, Γεώτρηση και ανατίναξη υπερκειμένων και λιγνιτικού κοιτάσματος (Land clearing-Topsoil removal, Overburden-Lignite drilling and blasting)

Οι τρεις αυτές εργασίες μελετώνται ενιαία διότι λαμβάνουν χώρα κυρίως κατά την έναρξη της λειτουργίας του λιγνιτωρυχείου, ενώ δεν αποκλείεται να συμβαίνουν και σε μικρότερη κλίμακα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του λιγνιτωρυχείου. Πρόκειται δηλαδή για τις προκαταρκτικές ενέργειες που είναι απαραίτητες για την περαιτέρω αξιοποίηση του λιγνιτικού κοιτάσματος σε μεγάλη κλίμακα. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται η εκκαθάριση του τοπίου από τυχόν φυτική κάλυψη ή άλλου είδους φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, η εκσκαφή και αφαίρεση του επιφανειακού

στρώματος του εδάφους με στόχο την ομαλοποίησή του, η διάνοιξη οπών στο έδαφος και η χρήση εκρηκτικών υλών για την εύκολη απομάκρυνση των σκληρών σχηματισμών υπερκειμένων και την εξόρυξη του λιγνίτη.

Τα είδη των μηχανημάτων που συμβάλλουν στις εργασίες αυτές είναι ερπυστριοφόρες μπολτόζες, οδοστρωτήρες, γεωτρύπανα, μηχανήματα απομάκρυνσης επιφανειακού στρώματος εδάφους, μπολτόζες, τροχομπολτόζες, μηχανήματα απόξεσης εδάφους, μηχανήματα πλανίσματος εδάφους, ισοπεδωτές και μηχανήματα αναμόρφωσης δρόμων. Το πλήθος τους υπαγορεύεται από το όγκο των υλικών που πρέπει να εξορυχθούν και από τη δυναμικότητα του κάθε μηχανήματος.

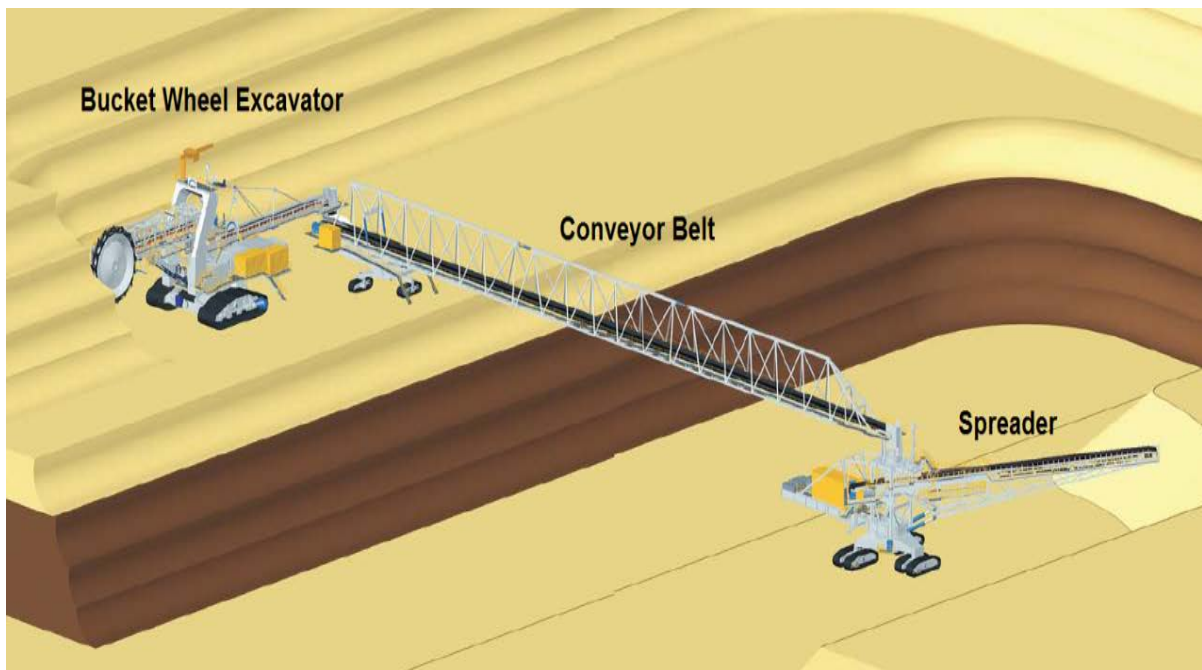
2.4.2 Αφαίρεση-Εξόρυξη υπερκειμένων υλικών, μεταφορά και απόθεση (Overburden removal and dumping)

Η εργασία αυτή προηγείται της βασικότερης λειτουργίας του ορυχείου που είναι η εξόρυξη του λιγνίτη. Θα μπορούσε ίσως να χαρακτηριστεί ως η πλέον απαιτητική και κοπιώδης εργασία σε ένα λιγνιτωρυχείο από άποψη φόρτου εργασίας και ποσότητας υλικών που αναλαμβάνει να διαχειριστεί, θεωρώντας μάλιστα αυξημένη τη μέση σχέση εκμετάλλευσης λιγνιτικών κοιτασμάτων για το έτος 2015, περίπου $5,9 \text{ m}^3_{\text{αγόνων}}/\text{τη}_{\text{λιγνίτη}}$. Πρόκειται για την εξόρυξη των υπερκειμένων ή αγόνων/στείρων σχηματισμών που καλύπτουν το λιγνιτικό κείτασμα ή εναλλάσσονται με αυτό σε στρώσεις, με πυκνότητα περίπου ίση με 1.600 kg/m^3 , ενώ δεν παρουσιάζουν καμία εμπορεύσιμη αξία. Επιπλέον, στα πλαίσια των εργασιών αυτής της κατηγορίας συμπεριλαμβάνονται η μεταφορά και η απόθεση των υλικών αυτών σε κατάλληλες περιοχές εντός ή και εκτός των ορίων του ορυχείου, ανάλογα με το αν η απόθεση είναι εσωτερική ή εξωτερική αντίστοιχα.

Υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές για την επίτευξη των παραπάνω εργασιών που απαιτούν τη συνεργασία μηχανημάτων, τόσο του πάγιου όσο και του έκτακτου εξοπλισμού του ορυχείου, οι κυριότερες εκ των οποίων είναι:

- 1) Εξόρυξη με καδοφόρο εκσκαφέα, μεταφορά με ταινιόδρομο και απόθεση με αποθέτη
- 2) Εξόρυξη με εκσκαφέα συρόμενου κάδου, μεταφορά με ταινιόδρομο και απόθεση με αποθέτη
- 3) Εξόρυξη με εκσκαφέα συρόμενου κάδου, μεταφορά και απόθεση με αρθρωτά φορτηγά και φορτηγά χωματοουργικών εργασιών
- 4) Εξόρυξη με ηλεκτροκίνητο πτύο, μεταφορά με ταινιόδρομο και απόθεση με αποθέτη
- 5) Εξόρυξη με φορτωτή εκσκαφέα, πρόσθιο πτύο, φορτωτή, φορτωτή-εργαλειοφορέα, μεταφορά και απόθεση με αρθρωτά φορτηγά και φορτηγά χωματοουργικών εργασιών

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι η πλέον εφαρμοζόμενη εναλλακτική εξόρυξης είναι αυτή της πρώτης περίπτωσης, όπου η συνεχής λειτουργία του καδοφόρου εκσκαφέα εξασφαλίζει υψηλό δείκτη παραγωγικότητας στο ορυχείο, ενώ η συνεργασία με ταινιόδρομο και αποθέτη επιβάλλεται εξαιτίας της συνεχούς ροής εξορυσσόμενων υλικών όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Συνήθης συνεργασία Καδοφόρου Εκσκαφέα-Ταινιόδρομου-Αποθήτη σε λιγνιτωρυχείο (Tenova, 2011)

2.4.3 Εξόρυξη λιγνίτη και μεταφορά (Lignite mining)

Η εξόρυξη του λιγνίτη αποτελεί την «καρδιά» του κύκλου εργασιών του ορυχείου, αφού σε αυτήν οφείλει την ύπαρξη και λειτουργία του. Όπως και στην περίπτωση των υπερκειμένων, έτσι και εδώ, υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές εξόρυξης του λιγνίτη όπου και πάλι απαιτείται συνεργασία μηχανημάτων του πάγιου και έκτακτου εξοπλισμού, με τις συνηθέστερα εφαρμοζόμενες να είναι:

- 1) Εξόρυξη με καδοφόρο εκσκαφέα και μεταφορά με ταινιόδρομο
- 2) Εξόρυξη με υδραυλικό εκσκαφέα και μεταφορά με ταινιόδρομο
- 3) Εξόρυξη με φορτωτή εκσκαφέα, πρόσθιο πτύο, φορτωτή, φορτωτή-εργαλειοφορέα και μεταφορά με αρθρωτά φορτηγά και φορτηγά χωματοουργικών εργασιών
- 4) Εξόρυξη με ηλεκτροκίνητο πτύο και μεταφορά με ταινιόδρομο

Η εξόρυξη συνοδεύεται σχεδόν πάντα από την θραύση και άλεση του λιγνίτη σε μικρότερα τεμάχια, μεγέθους έως και 40 mm στους θραυστήρες, πριν από τη μεταφορά του στους χώρους αποθήκευσης (σιλό) των θερμοηλεκτρικών σταθμών. Η εναλλακτική εξόρυξης της πρώτης περίπτωσης, με καδοφόρο εκσκαφέα, είναι η πλέον εφαρμοζόμενη στα περισσότερα λιγνιτωρυχεία, ενώ η συνεργασία με ταινιόδρομο επιβάλλεται εξαιτίας της συνεχούς εξόρυξης λιγνίτη.

2.4.4 Περιβαλλοντική αποκατάσταση (Rehabilitation-Topsoil placement)

Με την εργασία αυτή ολοκληρώνεται ο κύκλος εξορύξεων του ορυχείου. Όπως αναλύθηκε και στην παράγραφο 1.4.2, όταν δημιουργηθούν κενοί χώροι (κουιότητες) εντός του ορυχείου εξαιτίας της εξόρυξης, τότε διενεργείται εσωτερική απόθεση των αγόνων υλικών που εξορύχθηκαν κατά τις εργασίες της εκχέρωσης-αφαίρεσης του επιφανειακού στρώματος του εδάφους και της εξόρυξης των υπερκειμένων. Η απόθεση ακολουθεί τις εκσκαφές του ορυχείου για λόγους ευστάθειας των πρανών, αλλά και για λόγους κατάλληλης περιβαλλοντικής αποκατάστασης παράλληλα με την εξέλιξη της εκμετάλλευσης. Στα πλαίσια της περιβαλλοντικής αποκατάστασης περιλαμβάνονται οι εργασίες διαμόρφωσης του εδάφους και πιθανής δενδροφύτευσης με τη βοήθεια μηχανημάτων διαμόρφωσης του επιφανειακού στρώματος εδάφους, τροχομπολτόζες, μολτόζες, φορτωτές-εργαλειοφορείς και ισοπεδωτές.

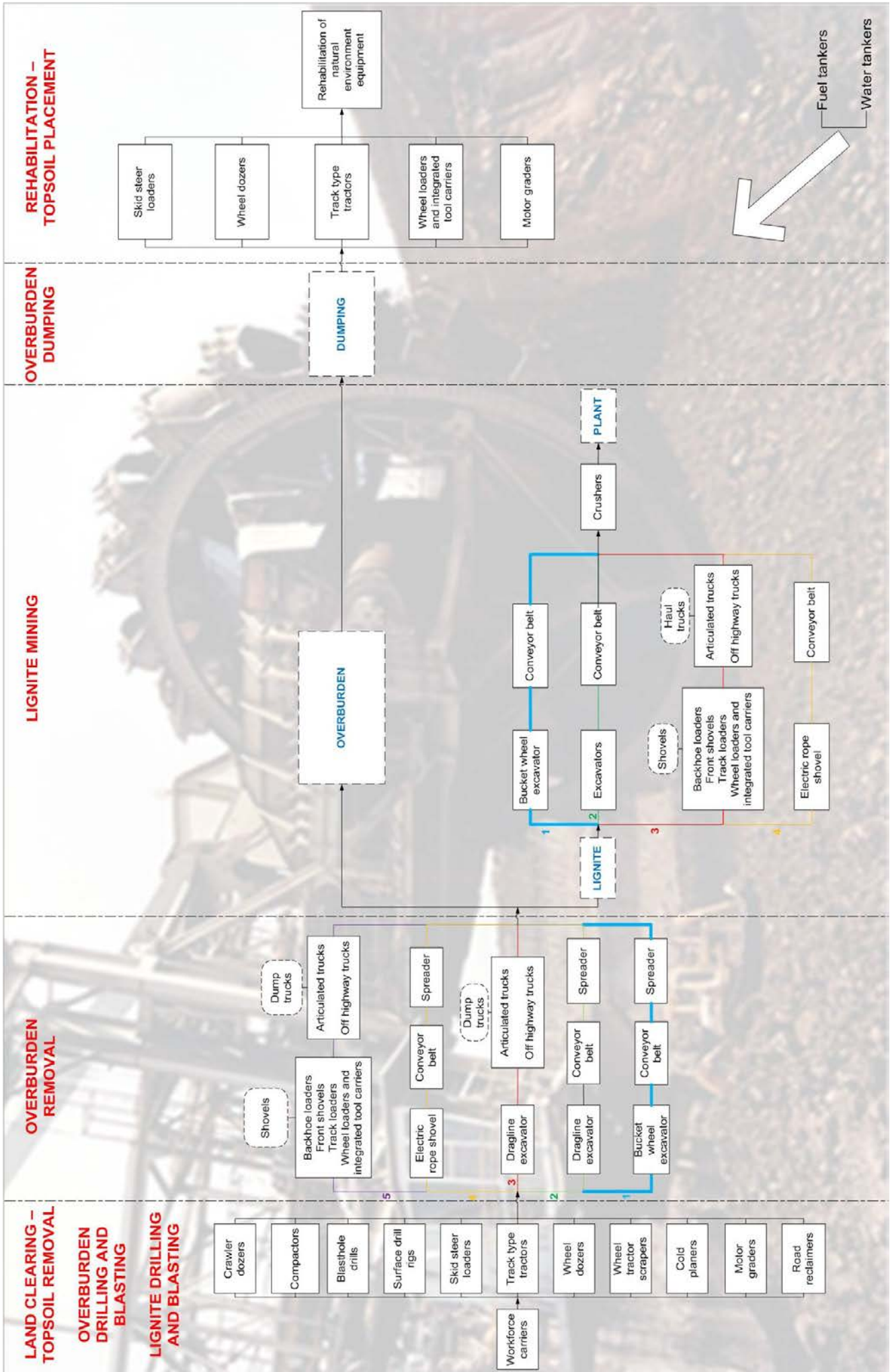
2.5 Ανάλυση διαδοχής εργασιών και ροής υλικών λιγνιτωρυχείου

Στο σχήμα 2.3 της επόμενης σελίδας εμφανίζεται το διάγραμμα εργασιών και ροής υλικών σε λιγνιτωρυχείο, καθώς επίσης και η συνεργασία μεταξύ των μηχανημάτων του πάγιου και έκτακτου εξοπλισμού.

Όπως ήδη αναφέρθηκε στις παραγράφους 2.4.1 έως 2.4.4, πριν αλλά και μετά από την εξόρυξη του βασικού λιγνιτικού κοιτάσματος ενός ορυχείου πρέπει να προηγηθούν άλλου είδους εργασίες. Καταρχάς, πρέπει να διευκολύνεται η μαζική μετακίνηση του εργατικού δυναμικού στο λιγνιτωρυχείο μέσω επιβατηγών αυτοκινήτων (πούλμαν). Μέσω της εργασίας του έκτακτου εξοπλισμού του λιγνιτωρυχείου (11 διαφορετικοί τύποι μηχανημάτων) απομακρύνεται το επιφανειακό στρώμα του εδάφους μέσου πάχους περίπου 0,2-0,4 mm. Παράλληλα, αφού πραγματοποιηθεί γεώτρηση σε επιλεγμένα σημεία του λιγνιτωρυχείου με τη βοήθεια των μηχανημάτων γεώτρησης (Blasthole drills, Surface drill rigs), επόμενο βήμα είναι η ανατίναξη των υπερκειμένων σκληρών σχηματισμών τη με χρήση εκρηκτικών υλών, ούτως ώστε να ξεκινήσει η απομάκρυνσή τους σε μεγάλη πλέον κλίμακα από τα ηλεκτροκίνητα μηχανήματα μεγάλης δυναμικότητας εξόρυξης.

Η απομάκρυνση των υπερκειμένων υλικών είναι δυνατόν να επιτευχθεί με 5 διαφορετικούς τρόπους. Γενικότερα, εκτός από τον συνήθη τρόπο απομάκρυνσης (διαδρομή 1) που αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.4.2, η συνεργασία ηλεκτροκίνητων μηχανημάτων μεγάλης δυναμικότητας (διαδρομή 2, 4) είναι επίσης εφαρμοζόμενη στην πράξη, ενώ η συνεργασία μηχανημάτων μεγάλης δυναμικότητας με συμβατικό ντιζελοκίνητο εξοπλισμό (διαδρομή 3) είναι λιγότερο συνήθης. Τέλος, η αποκλειστική συνεργασία ντιζελοκίνητων μηχανημάτων για την εξόρυξη, μεταφορά και απόθεση των υπερκειμένων (διαδρομή 5) είναι πολύ σπάνια, κυρίως λόγω της μικρής ποσότητας που εξορύσσεται στη μονάδα του χρόνου, ενώ τείνει να εφαρμόζεται σε περιπτώσεις μεγάλης ανομοιομορφίας του εδάφους του ορυχείου ή τουλάχιστον σε συνδυασμό με άλλους τρόπους εξόρυξης. Αφού πλέον ολοκληρωθεί η απόθεση των υπερκειμένων, με τη χρήση 5 διαφορετικών τύπων συμβατικού ντιζελοκίνητου εξοπλισμού, που είναι ήδη διαθέσιμος από την εργασία της αφαίρεσης του επιφανειακού στρώματος του εδάφους, πραγματοποιείται η αποκατάσταση του φυσικού τοπίου που με πιθανή δενδροφύτευση για λόγους κυρίως κοινωνικούς (οπτική όχληση κτλ.).

Τέλος, εφόσον η πρόσβαση στα λιγνιτικά κοιτάσματα είναι πλέον εφικτή, διενεργείται η εξόρυξη του λιγνίτη συνήθως με τον ίδιο ηλεκτροκίνητο εξοπλισμό που είναι διαθέσιμος από τις εργασίες της εξόρυξης των υπερκειμένων (διαδρομή 1). Οι λόγοι επιβολή αυτής της τεχνικής είναι κυρίως οικονομοτεχνικοί όπως αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο (παράγραφος 4.2.3). Όπως και στην περίπτωση της εξόρυξης των υπερκειμένων, η συνεργασία ηλεκτροκίνητων μηχανημάτων μεγάλης δυναμικότητας (διαδρομή 4) είναι επίσης εφαρμοζόμενη στην πράξη, ενώ σπανιότερη είναι η συνεργασία μηχανημάτων μεγάλης δυναμικότητας με συμβατικό ντιζελοκίνητο εξοπλισμό (διαδρομή 2) ή η αποκλειστική συνεργασία ντιζελοκίνητων μηχανημάτων (διαδρομή 3).



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα εργασιών και ροής υλικών λιγνιτωρυχείου

Κεφάλαιο 3^ο

Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA)

3.1 Εισαγωγή στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής-AKZ (Life Cycle Analysis-LCA) για τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη

Η ανάλυση κύκλου ζωής (AKZ) είναι μια μέθοδος, η οποία ποσοτικοποιεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με ολόκληρο τον κύκλο ζωής κάποιου προϊόντος, υπηρεσίας ή τεχνολογικού συστήματος. Ένας αποδεκτός ορισμός που μπορεί να αποδοθεί είναι ο ακόλουθος: «Η AKZ είναι ένας συστηματικός τρόπος αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από μία μεμονωμένη δραστηριότητα ή μία πλήρη διαδικασία παραγωγής, ακολουθώντας μια συγκεκριμένη προσέγγιση. Αυτή η προσέγγιση συνεπάγεται την αναγνώριση και την ποσοτικοποίηση της εκπομπής ρύπων και την κατανάλωση υλικών που επηρεάζουν το περιβάλλον σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του προϊόντος» (ISO:14040, 2006). Συνεπώς, η ανάλυση περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες που συνδέονται με την παραγωγή αυτού του προϊόντος, από την εξαγωγή των πρώτων υλών μέχρι την τελική διάθεση των αποβλήτων, ή όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία «from-cradle-to-grave».

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ως «προϊόν» μπορεί να θεωρηθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με την εφαρμογή της μεθόδου AKZ εξασφαλίζεται ότι οι εκπομπές ρύπων που προκύπτουν από όλες τις διαδικασίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και συμβάλουν στις διάφορες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, περιλαμβάνονται στο τελικό αποτέλεσμα και οδηγούν έτσι στην εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

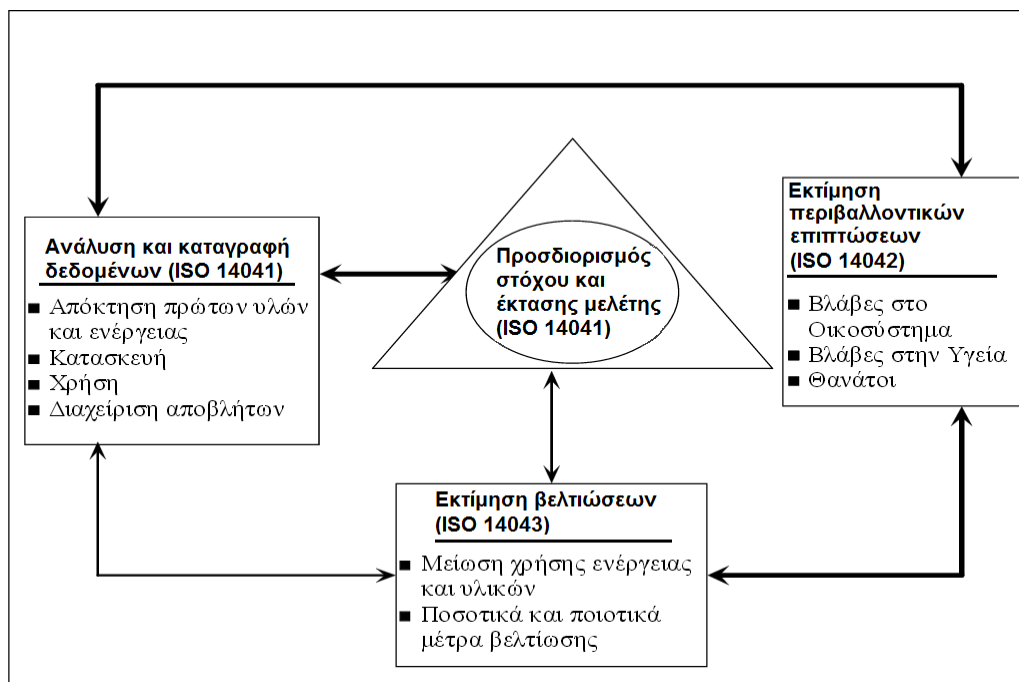
Στις επόμενες παραγράφους, αρχικά αναπτύσσονται τα βήματα εφαρμογής της μεθόδου AKZ για την περίπτωση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται μία ανασκόπηση της πιο αντιπροσωπευτικής βιβλιογραφίας (δημοσιευμένης στο χρονικό διάστημα 1997-2014) που μελετήθηκε με θέμα την ανάλυση κύκλου ζωής συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

3.2 Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής-AKZ

Η διαδικασία της ανάλυσης του κύκλου ζωής σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14044:2006 μπορεί να διεξαχθεί ακολουθώντας τέσσερα βασικά βήματα, τα οποία είναι τα εξής (ISO 2006):

- 1) Προσδιορισμός στόχου και έκτασης της μελέτης (ISO:14041, 2006)
- 2) Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα (ISO:14041, 2006)
- 3) Εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη λειτουργία του συστήματος (ISO:14042, 2006)
- 4) Εκτίμηση βελτιώσεων του συστήματος (ISO:14043, 2006)

Στο σχήμα 3.1 φαίνεται ο συσχετισμός των συνιστωσών αυτών, με τον καθορισμό του στόχου και της έκτασης της μελέτης να σχετίζεται άμεσα με όλες τις άλλες συνιστώσες.



Σχήμα 3.1: Στάδια μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (X. Κορωναίος, 2000)

3.3 Ανάλυση Κύκλου Ζωής συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη

3.3.1 Προσδιορισμός στόχου και έκτασης μελέτης

Με τον καθορισμό του σκοπού και της μεθόδου ανάλυσης που θα εφαρμοστεί, προσδιορίζεται η έκταση της μελέτης από τεχνική και οικονομική πλευρά. Επιπλέον, σημειώνεται ότι οι όποιες παραδοχές ληφθούν υπόψη κατά τη διάρκεια της μοντελοποίησης της διαδικασίας, θεωρείται ότι δεν παρεκκλίνουν το τελικό αποτέλεσμα από τον αρχικό στόχο. Τα όρια του συστήματος καθορίζονται ανάλογα με το σκοπό της μελέτης που έχει προσδιοριστεί προηγουμένως και υποδεικνύουν τις διεργασίες που συμπεριλαμβάνονται και εξετάζονται στο σύστημα. Συγκεκριμένα, καθορίζονται οι εισοδοί (ενέργεια, υλικά) και οι έξοδοι (ενέργεια, υλικά, εκπομπές) του συστήματος, ενώ ο χρόνος, η γεωγραφική θέση της εξεταζόμενης περιοχής και οι διεργασίες και τα υλικά που προκύπτουν από ανθρώπινο ή μη παράγοντα, αποτελούν βασικές παραμέτρους για τον καθορισμό των ορίων του συστήματος. Τέλος, η λειτουργική μονάδα του συστήματος μελέτης αποτελεί τη μονάδα βάσης των αποτελεσμάτων, αλλά και των δεδομένων της, συμβάλλοντας στη σύγκριση των διαφορετικών δυνατικών σεναρίων που εξετάζονται μέσω της ΑΚΖ (E. Κακαράς et al., 2013).

Στόχος μελέτης ΑΚΖ

Στόχος εφαρμογής της ΑΚΖ είναι ο προσδιορισμός του περιβαλλοντικού αποτυπώματος ολόκληρου του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη. Για το λόγο αυτό, τρεις εναλλακτικές περιπτώσεις καύσης εξετάζονται και συγκρίνονται ως προς τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις:

- 1) Καύση φυσικού λιγνίτη (Περίπτωση αναφοράς)
- 2) Μικτή καύση φυσικού λιγνίτη, με 30% θερμική υποκατάσταση με προ-ξηραμένο λιγνίτη
- 3) Μικτή καύση φυσικού λιγνίτη, με 6% θερμική υποκατάσταση με βιομάζα άχυρου σιτηρών (straw)

Η καύση γενικά λιγνιτών χαμηλής ποιότητας αποτελεί μία τεχνική δυσκολία που εμφανίζεται στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Η εφαρμογή της τεχνολογίας προξήρανσης θεωρείται μία από τις καταλληλότερες μεθόδους για τη βελτίωση του ενεργειακού περιεχομένου του λιγνίτη. Ειδικότερα, στην Ελλάδα όπου ο λιγνίτης περιέχει υψηλά ποσοστά υγρασίας και τέφρας, η συμβολή της μεθόδου προξήρανσης στη βελτίωση των λειτουργικών παραμέτρων των ατμοπαραγωγών κατά τη διάρκεια της καύσης είναι σπουδαία. Στη περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη με 30% προξηραμένο λιγνίτη, η απαιτούμενη θερμική ισχύς, η οποία παραμένει ίδια με αυτή της περίπτωσης αναφοράς, θεωρείται ότι καλύπτεται κατά 30% από προξηραμένο λιγνίτη. Ομοίως, στην περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη με 6% βιομάζα, η απαιτούμενη θερμική ισχύς θεωρείται ότι καλύπτεται κατά 6% από αγροτικά υπολείμματα και ειδικότερα από το άχυρο σιτηρών.

Γεωγραφική θέση και μέγεθος εγκατάστασης

Στην παρούσα εργασία μελετώνται οι επιπτώσεις που αφορούν τον κύκλο ζωής του λιγνίτη για τα ελληνικά δεδομένα. Ειδικότερα, για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων από τις άμεσες διαδικασίες του κύκλου ζωής (π.χ. παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας), το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη μελέτη νέων λιγνιτικών μονάδων όπως αυτή της Πτολεμαΐδας V, ούτως ώστε να επιτευχθεί μία εκτίμηση της δυνητικής περιβαλλοντικής ζημιάς από μία μελλοντική ηλεκτροπαραγωγική μονάδα. Το μέγεθος της εν λόγω μονάδας πρόκειται να είναι 660 MWe, με καθαρό συνολικό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 41,5% όπως περιγράφεται και στο έντυπο [ΔΕΗ, 2013b](#).

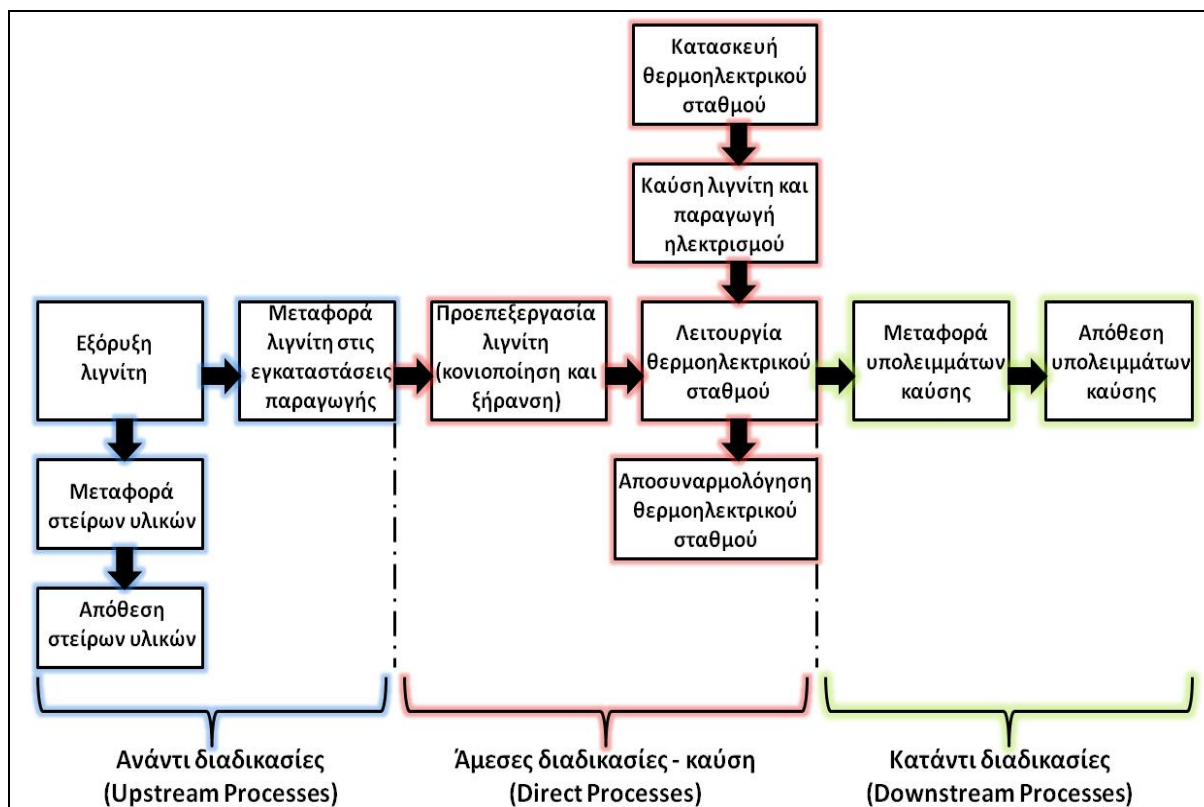
Λειτουργική μονάδα

Ο καθορισμός της λειτουργικής μονάδας του συστήματος είναι μείζονος σημασίας για τη διεξαγωγή και κατανόηση μίας μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής, ούτως ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι εκφρασμένα σε κοινή βάση για την απρόσκοπτη σύγκριση των διαφόρων σεναρίων. Η συνήθης πρακτική που εφαρμόζεται στις περισσότερες περιπτώσεις, υποδεικνύει ότι η λειτουργική μονάδα θα πρέπει να επιλέγεται με τρόπο που να αντιστοιχεί στο σκοπό της ανάλυσης του κύκλου ζωής, όπως αυτός έχει καθοριστεί στο πρώτο βήμα εφαρμογής της μεθόδου. Για παράδειγμα, όταν εφαρμόζεται η μέθοδος ανάλυσης κύκλου ζωής στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως στη παρούσα εργασία, η εκλογή της παραγόμενης ηλεκτρικής μεγαβατώρας (1 MWe) ως λειτουργικής μονάδας του συστήματος χαρακτηρίζεται ιδανική, καθώς επιτρέπει την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφόρων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Όρια συστήματος

Όπως και στην περίπτωση εκλογής της λειτουργικής μονάδας, έτσι και ο καθορισμός των ορίων του συστήματος αποτελεί πολύ σημαντικό κομμάτι μίας μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής. Η σπουδαιότητα αυτή γίνεται κατανοητή αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι με διαφορετικά όρια συστήματος μεταβάλλεται η συνολική επίδρασή του στο περιβάλλον και κατά συνέπεια η ποιότητα των αποτελεσμάτων, ενώ καθίσταται πλέον αδύνατη η σύγκριση με παρόμοιες εργασίες.

Η παρούσα μελέτη που αφορά ανάλυση κύκλου ζωής στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το λιγνίτη, τα όρια του συστήματος περιλαμβάνουν την εξόρυξη και μεταφορά του λιγνίτη προς το εργοστάσιο, τη μεταφορά και απόθεση των αγόνων υλικών (ανάντι διαδικασίες από την καύση – *upstream processes*), την ενεργειακή αξιοποίηση του λιγνίτη στο σταθμό παραγωγής ενέργειας, τη κατασκευή και αποσυναρμολόγηση της μονάδας (καύση – *direct processes*) και τη μεταφορά από το εργοστάσιο και τελική απόθεση των υπολειμμάτων της καύσης (κατάντι διαδικασίες από την καύση – *downstream processes*). Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζονται εποπτικά τα όρια του συστήματος για τη μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το λιγνίτη στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 3.2: Όρια συστήματος που περιλαμβάνονται στην ανάλυση κύκλου ζωής για το λιγνίτη

3.3.2 Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα

Στο στάδιο της ανάλυσης και καταγραφής δεδομένων στον κατάλογο απογραφής της ΑΚΖ, χρησιμοποιούνται ισοζύγια μάζας και ενέργειας των παραγόμενων προϊόντων και ρύπων που εκπέμπονται στον αέρα, στα ύδατα και στο έδαφος (ποσοτικοποιούνται όλες οι εισροές και εκροές), σε όλα τα βήματα επεξεργασίας μια διαδικασίας που περιλαμβάνονται στα όρια του συστήματος.

Η ανάλυση του καταλόγου απογραφής αποτελεί την «καρδιά» της ανάλυσης κύκλου ζωής και το μόνο στάδιο το οποίο είναι καλά ανεπτυγμένο. Η μεθοδολογία του έχει ξεκινήσει να εξελίσσεται από μια μακρά περίοδο 20 ετών. Μόλις ένας κατάλογος απογραφής έχει συμπληρωθεί και έχει κριθεί όσο το δυνατό πιο ακριβής μέσα στη καθορισμένη έκταση και στα όρια του συστήματος, τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατευθείαν για αναγνώριση περιοχών με περισσότερη ή λιγότερη επιβάρυνση του περιβάλλοντος, για την υποστήριξη της αποτίμησης των επιπτώσεων του κύκλου ζωής που ακολουθεί και ως μέρος μιας προκαταρκτικής ανάλυσης για τις πιθανές βελτιώσεις.

3.3.3 Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων που προκύπτουν από το υπό μελέτη σύστημα, πράγμα που απαιτεί το διαχωρισμό και την ομαδοποίηση των ρυπαντών (φορτίων) που καταγράφηκαν στη φάση της συλλογής δεδομένων (Life Cycle Inventory), σε διάφορες κατηγορίες δεικτών. Οι κατηγορίες επιπτώσεων και ζημιών που μελετώνται στα πλαίσια της ανάλυσης κύκλου ζωής του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη είναι οι ακόλουθες.

➤ Κατηγορίες επιπτώσεων

- Εξάντληση ορυκτών πόρων (Mineral extraction)

- Κατανάλωση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Non-renewable energy consumption)
- Φαινόμενο του θερμοκηπίου (Global warming)
- Ευτροφισμός υδάτινων οικοσυστημάτων (Aquatic eutrophication)
- Οξίνιση υδάτινων οικοσυστημάτων (Aquatic acidification)
- Δέσμευση εκτάσεων γης (Land occupation)
- Οξίνιση/Αζωτοποίηση χερσαίων οικοσυστημάτων (Terrestrial acidification/nutritification)
- Τοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων (Terrestrial ecotoxicity)
- Τοξικότητα υδάτινων οικοσυστημάτων (Aquatic ecotoxicity)
- Αναπνεύσιμες οργανικές ουσίες (Respiratory organics)
- Εξάντληση στρώματος του όζοντος (Ozone layer depletion)
- Ιονίζουσα ακτινοβολία (Ionizing radiation)
- Αναπνεύσιμες ανόργανες ουσίες (Respiratory Inorganics)
- Μη καρκινογόνες ουσίες (Non-carcinogens)
- Καρκινογόνες ουσίες (Carcinogens)

➤ Κατηγορίες ζημιών

- Ανθρώπινη υγεία (Human Health)
- Αλλαγή κλίματος (Climate Change)
- Ποιότητα οικοσυστημάτων (Ecosystem Quality)
- Πόροι (Resources)

Κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων των επιπτώσεων

Η κανονικοποίηση (Normalization) επιτρέπει τη ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων σε μια κοινή βάση. Γίνεται μέσω εμπειρικών συντελεστών και είναι πολύ κοινή στις μελέτες ανάλυσης κύκλου ζωής, όπως της προκειμένης περίπτωσης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε κοινά διαγράμματα για λόγους σύγκρισης. Εντούτοις, ο κανονισμός ISO 14040: 2006 αποθαρρύνει τους μελετητές να χρησιμοποιούν αυτή τη πρακτική λόγω του ότι στηρίζεται σε ελλιπές επιστημονικό υπόβαθρο. Ακόμα, ορίζεται από τον κανονισμό πως δεν θα πρέπει να γίνεται κανονικοποίηση σε μελέτες οι οποίες περιέχουν σύγκριση μεθόδων και γνωστοποιούνται στο ευρύ κοινό (J. Cleary, 2009).

Πηγές δεδομένων και χρήση λογισμικών

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης κύκλου ζωής για το υπόψη σύστημα μελέτης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού SimaPro v.7.3.3 και την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων αξιολόγησης, όπως της Impact 2002+ και του Greenhouse Gas Protocol v1.01. Οι πηγές δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για μοντελοποίηση των μηχανημάτων και των διαδικασιών του συστήματος μελέτης, προήλθαν είτε από τη βάση δεδομένων "Ecoinvent" που είναι ενσωματωμένη στο SimaPro v.7.3.3, είτε από εξωτερικές βιβλιογραφικές πηγές που παρέχονται στα κεφάλια 2 και 4.

Ανάλυση ευαισθησίας

Οι αναλύσεις ευαισθησίας γίνονται έτσι ώστε να προσδιορίζονται οι μικρές ή μεγάλες επιδράσεις που μπορεί να εμφανιστούν αλλάζοντας κάποια παράμετρο ή κάποια παραδοχή. Στο κεφάλαιο 8, πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας σχετικά με τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές και οικονομικές παραμέτρους του συστήματος. Τα αποτελέσματα φανερώνουν ότι η μεταβολή παραμέτρων, όπως για παράδειγμα ο βαθμός απόδοσης της μονάδας, επιδρούν σημαντικά στη διαμόρφωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του συστήματος μελέτης.

3.3.4 Εκτίμηση βελτιώσεων του συστήματος

Η αποτίμηση των βελτιώσεων (ή η φάση της ερμηνείας των αποτελεσμάτων) περιλαμβάνει την εξέταση του τρόπου με τον οποίο τα αποτελέσματα μιας ΑΚΖ μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όχι μόνο σε σχέση με τη μείωση των δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων κάποιου συστήματος, αλλά με τρόπο τέτοιο που να γίνεται η ερμηνεία τους σε σχέση με άλλους παράγοντες, όπως για παράδειγμα το κόστος που εξετάζεται και στην παρούσα μελέτη.

Γενικότερα, προτείνεται ότι η αποτίμηση των βελτιώσεων πρέπει να ενσωματώνεται στην ΑΚΖ για να εξασφαλίζεται ότι η ΑΚΖ δεν χρησιμοποιείται μόνο για να δικαιολογηθεί κάποια κατάσταση και για να αναγνωρίζεται ότι όλα τα συστήματα προκαλούν σε κάποιο βαθμό περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οποίες μπορούν πιθανότατα να μειωθούν. Τα πρότυπα ISO και άλλες πηγές ορίζουν το βήμα της ερμηνείας των αποτελεσμάτων, αντί της αποτίμησης των βελτιώσεων, ως την τελική φάση της αποτίμησης των επιπτώσεων (T. Ekvall et al., 1997; G. Huppes, 1996). Ο στόχος της φάσης αυτής της ερμηνείας των αποτελεσμάτων είναι η ανάλυση των αποτελεσμάτων σύμφωνα με τους στόχους και το πλαίσιο της μελέτης, η εξαγωγή συμπερασμάτων και η παροχή εισηγήσεων και προτάσεων (T. Ekvall et al., 1997). Επιπλέον, ο R. Clift, 1998 υποστηρίζει ότι η χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων μιας ΑΚΖ αναφέρεται τώρα συνήθως ως ερμηνεία των αποτελεσμάτων, με την παραδοχή ότι απαιτείται διεξοδικός συνδυασμός ανάμεσα στις κατηγορίες επιπτώσεων ως κομμάτι της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.

3.4 Ανάλυση Κύκλου Ζωής συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιβλιογραφικές πηγές

3.4.1 Προσδιορισμός στόχου και έκτασης μελέτης

Είναι να διευκρινιστεί το γεγονός ότι οι δύο μέθοδοι κύκλου ζωής (Ανάλυση Κύκλου Ζωής και Κοστολόγηση Κύκλου Ζωής) που εφαρμόζονται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι συμπληρωματικές και αλληλοσχετιζόμενες όπως αναφέρεται και σε επόμενο κεφάλαιο (βλέπε παράγραφο 5.1). Αυτό σημαίνει ότι σε αρκετές μελέτες τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της ΑΚΖ (εκπομπές ρύπων) χρησιμοποιούνται σαν δεδομένα εισόδου για την εφαρμογή της μεθόδου ΚΚΖ, ούτως ώστε να εκτιμηθεί το συνολικό κόστος του συστήματος που εξετάζεται λαμβάνοντας μεταξύ άλλων υπόψη και το εξωτερικό κόστος των εκπομπών. Με τον τρόπο αυτό, ο στόχος πλέον εφαρμογής της μεθόδου ΑΚΖ δεν είναι απλώς να προσδιοριστούν οι εκπομπές ρύπων από όλες τις φάσεις του συστήματος, αλλά ακόμα παραπέρα να αξιολογηθούν αυτές οι εκπομπές πάνω σε μια οικονομική βάση.

Στόχος μελέτης ΑΚΖ

Στις εξεταζόμενες βιβλιογραφικές μελέτες αναφέρεται με σαφή τρόπο ο στόχος εφαρμογής της ΑΚΖ. Το κοινό σημείο όλων είναι η σύγκριση της περιβαλλοντικής επίδρασης, είτε διαφόρων εναλλακτικών τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη, είτε διαφορετικών τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικά ή ανανεώσιμα καύσιμα, έτσι ώστε να προκύψει η βέλτιστη με τις χαμηλότερες εκπομπές ρυπαντών. Τέτοιου είδους εργασίες είναι αυτές των P. DiPietro, 2010; R. Dones et al., 2004; W. Stanek et al., 2014; G. Theodosiou et al., 2014; R. Turconi et al., 2013; D. Weisser, 2004; A. Ευθυμιάδης et al., 2009.

Ωστόσο, προχωρώντας ακόμα ένα βήμα παρακάτω οι εργασίες των C. Bauer, 2008; D.A. Georgakellos, 2010, 2012; K. Kavouridis et al., 2007; NTUA, 1997; A. Rentizelas et al., 2014; D. Streimikiene et al., 2009; Γ. Θεοδοσίου, 2008; K. Καβουρίδης et al., 2005, έχουν ως σκοπό, αφού ποσοτικοποιήσουν τις επιπτώσεις στο περιβάλλον διαφόρων τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ανάμεσά τους και λιγνιτικών μονάδων), να κοστολογήσουν αυτές τις επιπτώσεις με

οικονομικούς όρους, έτσι ώστε να υπολογισθεί το συνολικό εξωτερικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Γεωγραφική θέση και μέγεθος εγκατάστασης

Στις περισσότερες εξεταζόμενες βιβλιογραφικές μελέτες, δεν αναφέρεται η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες εξετάζονται ως προς τις εκπομπές ρύπων και τη περιβαλλοντική τους επίδραση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα μεγέθη των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται ανηγμένα στη λειτουργική μονάδα του συστήματος όπως θα εξηγηθεί παρακάτω. Μόνο στις μελέτες των [C. Bauer, 2008](#) και [NTUA, 1997](#) αναφέρεται ότι οι μονάδες που μελετώνται είναι μεγέθους 900 MWe και 366,5 MWe, με καθαρούς συνολικούς ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης 43,2% και 34% αντίστοιχα.

Ως προς τη γεωγραφική θέση, οι παραπάνω μελέτες αναπτύσσονται κυρίως στον Ευρωπαϊκό χώρο και κυρίως στην Ελλάδα, με εξαίρεση αυτή του [P. DiPietro, 2010](#) που αναφέρεται στα αμερικάνικα δεδομένα. Ως συστάσεις για το λιγνίτη και τα άλλα ορυκτά καύσιμα λαμβάνονται οι μέσες συστάσεις της εκάστοτε χώρας. Στον πίνακα 3.1 δίνονται συγκεντρωμένες οι πηγές, η γεωγραφική θέση μελέτης και το μέγεθος της εγκατάστασης που μελετάται (όπου είναι διαθέσιμη).

Πίνακας 3.1: Γεωγραφική θέση και μέγεθος εγκατάστασης των μελετών που εξετάζονται

Μελέτη	Γεωγραφική θέση	Μέγεθος εγκατάστασης
NTUA, 1997	Ελλάδα	366,5 MWe, 34%
D. Weisser, 2004	Αυστρία	n.a.
R. Dones et al., 2004	Ελβετία	n.a.
K. Καβουρίδης et al., 2005	Ελλάδα	n.a.
K. Kavouridis et al., 2007	Ελλάδα	n.a.
C. Bauer, 2008	Ελβετία	900 MWe, 43,2%
Γ. Θεοδοσίου, 2008	Ελλάδα	n.a.
A. Ευθυμιάδης et al., 2009	Ελλάδα	n.a.
D. Streimikiene et al., 2009	Λιθουανία	n.a.
P. DiPietro, 2010	Η.Π.Α.	n.a.
D.A. Georgakellos, 2010	Ελλάδα	n.a.
D.A. Georgakellos, 2012	Ελλάδα	n.a.
R. Turconi et al., 2013	Δανία	n.a.
W. Stanek et al., 2014	Πολωνία	n.a.
G. Theodosiou et al., 2014	Ελλάδα	n.a.
A. Rentizelas et al., 2014	Ελλάδα	n.a.

Λειτουργική μονάδα

Όλες οι μελέτες είναι συγκριτικές αναλύσεις του κύκλου ζωής, οι οποίες εκτιμούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τον τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την εφαρμογή διαφόρων τεχνολογιών ορυκτών καυσίμων ή/και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι περισσότερες από αυτές συγκρίνουν τις τεχνολογίες ορυκτών καυσίμων, κυρίως του άνθρακα και του λιγνίτη λόγω της μεγάλης εμπειρίας που έχει αποκομιστεί από τη χρήση τους τον τελευταίο αιώνα σε παγκόσμια κλίμακα, με αυτές ανανεώσιμων μορφών ενέργειας (ηλιακή, αιολική, υδροηλεκτρική) και σε μερικές περιπτώσεις με αυτές άλλου είδους καυσίμου (βιομάζα, RDF). Όπως αναλύθηκε και στην παράγραφο 3.3.1, για τη διευκόλυνση της σύγκρισης ανάμεσα σε συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ως λειτουργική μονάδα χρησιμεύει να εκλεχθεί η παραγόμενη ηλεκτρική μεγαβατώρα (1 MWh).

Πράγματι, στις μελέτες των [C. Bauer, 2008](#); [P. DiPietro, 2010](#); [R. Dones et al., 2004](#); [D.A. Georgakellos, 2010, 2012](#); [K. Kavouridis et al., 2007](#); [A. Rentizelas et al., 2014](#); [D. Streimikiene et al., 2009](#); [G. Theodosiou et al., 2014](#); [R. Turconi et al., 2013](#); [D. Weisser, 2004](#); [A. Ευθυμιάδης et al.,](#)

2009; Γ. Θεοδοσίου, 2008; Κ. Καβουρίδης et al., 2005, ως λειτουργική μονάδα χρησιμοποιείται η 1 MWh. Ωστόσο, δεν είναι ελάχιστες και οι περιπτώσεις, όπως οι μελέτες των W. Stanek et al., 2014 και NTUA, 1997, όπου αναφέρεται ως λειτουργική μονάδα το 1 TJ καυσίμου και το 1 έτος αντίστοιχα, καθώς τα αποτελέσματα αφορούν ετήσιες εκπομπές ρύπων από τις υπό μελέτη μονάδες.

Όρια συστήματος

Τα όρια του συστήματος για την κάθε βιβλιογραφική μελέτη δίνονται στον πίνακα 3.2.

Μελέτη	Όρια συστήματος
NTUA, 1997	Εξόρυξη και μεταφορά λιγνίτη στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μεταφορά και απόθεση αγόνων υλικών, κατασκευή-λειτουργία-αποσυναρμολόγηση σταθμού
D. Weisser, 2004	Εξόρυξη και μεταφορά λιγνίτη στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, λειτουργία σταθμού
R. Dones et al., 2004	Εξόρυξη λιγνίτη, λειτουργία σταθμού
Κ. Καβουρίδης et al., 2005	Λειτουργία σταθμού
Κ. Kavouridis et al., 2007	Λειτουργία σταθμού
C. Bauer, 2008	Εξόρυξη και μεταφορά λιγνίτη στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κατασκευή-λειτουργία-αποσυναρμολόγηση σταθμού
Γ. Θεοδοσίου, 2008	Εξόρυξη και μεταφορά λιγνίτη στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μεταφορά και απόθεση αγόνων υλικών, κατασκευή-λειτουργία-αποσυναρμολόγηση σταθμού
A. Ευθυμιάδης et al., 2009	Λειτουργία σταθμού
D. Streimikiene et al., 2009	Λειτουργία σταθμού
P. DiPietro, 2010	Εξόρυξη και μεταφορά λιγνίτη στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, λειτουργία σταθμού
D.A. Georgakellos, 2010	Λειτουργία σταθμού
D.A. Georgakellos, 2012	Εξόρυξη και μεταφορά λιγνίτη στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κατασκευή-λειτουργία σταθμού
R. Turconi et al., 2013	Εξόρυξη και μεταφορά λιγνίτη στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κατασκευή-λειτουργία σταθμού
W. Stanek et al., 2014	Εξόρυξη και μεταφορά άνθρακα στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, λειτουργία σταθμού
G. Theodosiou et al., 2014	Εξόρυξη και μεταφορά λιγνίτη στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μεταφορά και απόθεση αγόνων υλικών, μεταφορά κατασκευαστικών υλικών κατασκευή-λειτουργία-αποσυναρμολόγηση σταθμού
A. Rentizelas et al., 2014	Εξόρυξη και μεταφορά λιγνίτη στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κατασκευή-λειτουργία σταθμού

3.4.2 Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα

Αρκετές μελέτες κύκλου ζωής σταματούν στο στάδιο της ανάλυσης του καταλόγου απογραφής, όπως αυτές των A. Ευθυμιάδης et al., 2009 και P. DiPietro, 2010 και συνήθως βασίζονται τα συμπεράσματα και τις εισηγήσεις τους, στον τρόπο με τον οποίο μπορούν να ελαχιστοποιηθούν οι εισροές και εκροές αυτές στον κατάλογο απογραφής. Παρόλα αυτά, το σημαντικότερο μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής (δηλαδή να σταματήσει η ανάλυση στο στάδιο καταλόγου απογραφής) είναι ότι δεν λαμβάνονται υπόψη πληροφορίες σχετικά με το αν ορισμένες από τις κατηγορίες στην ανάλυση του καταλόγου απογραφής είναι πιο επικίνδυνες από κάποιες άλλες.

Μερικοί κατάλογοι απογραφής μπορεί να έχουν πιο περιορισμένα όρια λόγω της σκοπούμενης χρήσης τους, όπως οι μελέτες των R. Dones et al., 2004; W. Stanek et al., 2014; R. Turconi et al., 2013; D. Weisser, 2004 που στόχο έχουν τη σύγκριση διαφόρων τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ως προς τις εκπομπές ρύπων (και κυρίως CO₂) στο περιβάλλον. Ωστόσο, οι περισσότερες εργασίες που ασχολούνται με εφαρμογή της μεθόδου AKZ, δεν σταματούν μόνο στο στάδιο του καταρτισμού του καταλόγου απογραφής, αλλά συνεχίζουν στον προσδιορισμό των επιπτώσεων στο περιβάλλον και στην εκτίμηση βελτιώσεων για τα συστήματα που εξετάζουν.

3.4.3 Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Εκτός από κατηγορίες επιπτώσεων και ζημιών που παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.3.3, μία επίσης κοινή κατηγορία ζημιών είναι και αυτή της επίδρασης στα υλικά (Impact on Materials) που συναντάται στις μελέτες των NTUA, 1997 και D. Streimikiene et al., 2009. Στις μελέτες των C. Bauer, 2008 και NTUA, 1997 έχουν ληφθεί υπόψη έως και 11 κατηγορίες επιπτώσεων. Από την άλλη, οι μελέτες των P. DiPietro, 2010; R. Dones et al., 2004; D.A. Georgakellos, 2010, 2012; K. Kavouridis et al., 2007; W. Stanek et al., 2014; R. Turconi et al., 2013; D. Weisser, 2004; A. Ευθυμιάδης et al., 2009; K. Καβουρίδης et al., 2005, λαμβάνουν υπόψη μόνο την επίπτωση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Global Warming), δεδομένου ότι αποτελεί και τον πιο συχνά μελετώμενο δείκτη σε σχέση με τους υπόλοιπους, κυρίως λόγω της ραγδαίας κλιματικής αλλαγής (στο πρωτόκολλο του Κγγο καθορίζονται και τα διεθνή όρια εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου).

Στη συνέχεια, συγκρίνονται ποιοτικά και ποσοτικά τα αποτελέσματα των βιβλιογραφικών αναφορών όσον αφορά την επίπτωση στις κατηγορίες των φαινομένων του θερμοκηπίου, της οξίνισης και του ευτροφισμού. Αξίζει στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι η σύγκριση των επιπτώσεων για τις παραπάνω κατηγορίες στηρίζεται στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), διοξειδίου του θείου (SO₂) και οξειδίων του αζώτου (NO_x) αντιστοίχως, αφού αυτά είναι τα βασικά αέρια που επιδρούν στην κάθε κατηγορία.

Ποιοτική σύγκριση

Εξετάζοντας την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Global Warming), όλες οι μελέτες συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι από την τεχνολογία καύσης λιγνίτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτουν οι περισσότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες αξιοποίησης ορυκτών ή ανανεώσιμων μορφών ενέργειας. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι για την τεχνολογία καύσης λιγνίτη, τις περισσότερες εκπομπές παρουσιάζουν οι ήδη υπάρχοντες παλαιοί, υποκρίσιμοι σταθμοί, ενώ βελτίωση παρατηρείται στη περίπτωση λειτουργίας υπερκρίσιμων σταθμών και σταθμών συνδυασμένου κύκλου ή συμπαραγωγής. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, κοινό σημείο αποτελεί το γεγονός ότι από όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής των ορυκτών καυσίμων και άρα του λιγνίτη, οι περισσότερες εκπομπές εκλύονται στη φάση λειτουργίας του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς εδώ κατεξοχήν λαμβάνει χώρα η αξιοποίηση του καυσίμου, με την καύση και όλα τα παρελκόμενα φαινόμενα. Συγκεκριμένα, οι K. Kavouridis et al., 2007; A. Ευθυμιάδης et al., 2009 και P. DiPietro, 2010 μελετούν διάφορα σενάρια τεχνολογιών καύσης του λιγνίτη, όπως υποκρίσιμους και υπερκρίσιμους σταθμούς, συνδυασμένου κύκλου ή συμπαραγωγής, ενώ οι D. Streimikiene et al., 2009; K. Καβουρίδης et al., 2005 και D.A. Georgakellos, 2010 συγκρίνουν τη καύση λιγνίτη με άλλου είδους τεχνολογίες καυσίμων όπως άνθρακα, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, βιομάζα, ή ανανεώσιμων μορφών ενέργειας όπως υδροηλεκτρική, ηλιακή, αιολική και γεωθερμική. Σαν αποτέλεσμα φαίνεται ότι από τις τεχνολογίες καύσης λιγνίτη, και κυρίως τις παλαιότερες (υποκρίσιμοι λιγνιτικοί σταθμοί), προκύπτουν οι περισσότερες εκπομπές CO₂ με αποτέλεσμα να συμβάλλουν ως επί το πλείστον στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Ωστόσο, οι παραπάνω μελέτες παρουσιάζοντας συγκριτικές αξιολογήσεις για την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου μόνο από τη φάση της καύσης, αδυνατούν να αποδώσουν μια ολοκληρωμένη εικόνα για το σύνολο των εκπομπών από όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των

τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας τις οποίες εξετάζουν. Τούτο γίνεται στις μελέτες των R. Dones et al., 2004; D.A. Georgakellos, 2012; NTUA, 1997; W. Stanek et al., 2014; G. Theodosiou et al., 2014; R. Turconi et al., 2013; D. Weisser, 2004; Γ. Θεοδοσίου, 2008 και A. Rentizelas et al., 2014 όπου η σύγκριση των εκπομπών CO₂ από όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των διαφόρων τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, υποδεικνύει τη περίπτωση της καύσης λιγνίτη να έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Με την επίδραση στο φαινόμενο της οξίνισης (Acidification) ασχολούνται οι μελέτες των C. Bauer, 2008; D.A. Georgakellos, 2010; NTUA, 1997; D. Streimikiene et al., 2009; G. Theodosiou et al., 2014; R. Turconi et al., 2013; Γ. Θεοδοσίου, 2008 και A. Rentizelas et al., 2014. Γενικότερα αποδεικνύεται ότι οι τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη έχουν περιβαλλοντικά οφέλη σε σύγκριση με αυτές του άνθρακα ή του πετρελαίου, σχετικά με το συγκεκριμένο φαινόμενο. Το γεγονός αυτό οφείλεται εν μέρει στο ότι οι λιγνιτικοί σταθμοί τροφοδοτούνται με καύσιμο (λιγνίτη) από τα ορυχεία παραπλήσιων περιοχών, για το λόγο αυτό στη διεθνή βιβλιογραφία χαρακτηρίζονται και ως «mine-mouth power plants», με αποτέλεσμα η μεταφορά λιγνίτη να επιτυγχάνεται με ηλεκτροκίνητους ταινιόδρομους χωρίς ή με ελάχιστη χρήση βαρέων οχημάτων που καταναλώνουν ως καύσιμο πετρέλαιο (diesel) και άρα έχουν υψηλές εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO₂) και ισοδυνάμων του (A. Rentizelas et al., 2014; G. Theodosiou et al., 2014; R. Turconi et al., 2013). Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζουν και οι C. Bauer, 2008; D.A. Georgakellos, 2010; NTUA, 1997; D. Streimikiene et al., 2009; Γ. Θεοδοσίου, 2008 καταδεικνύοντας την ελάχιστη, έως αμελητέα, συμβολή των διαδικασιών του κύκλου ζωής του λιγνίτη πριν (upstream processes) και μετά την καύση (downstream processes) στις συνολικές εκπομπές SO₂ και σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από τη διαδικασία της καύσης (direct processes).

Ως προς την επίδραση στο φαινόμενο του ευτροφισμού (Eutrophication), οι μελέτες των G. Theodosiou et al., 2014; R. Turconi et al., 2013 και A. Rentizelas et al., 2014 παρουσιάζουν μειωμένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) για την περίπτωση τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη σε σύγκριση με αυτές του άνθρακα ή του πετρελαίου κυρίως για τους λόγους που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Επιπροσθέτως, οι C. Bauer, 2008; D.A. Georgakellos, 2010; NTUA, 1997; D. Streimikiene et al., 2009; Γ. Θεοδοσίου, 2008 αποδεικνύουν την ελάχιστη, έως αμελητέα, συμβολή των διαδικασιών του κύκλου ζωής του λιγνίτη πριν (upstream processes) και μετά την καύση (downstream processes) στις συνολικές εκπομπές NO_x, σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από τη διαδικασία της καύσης (direct processes).

Ποσοτική σύγκριση

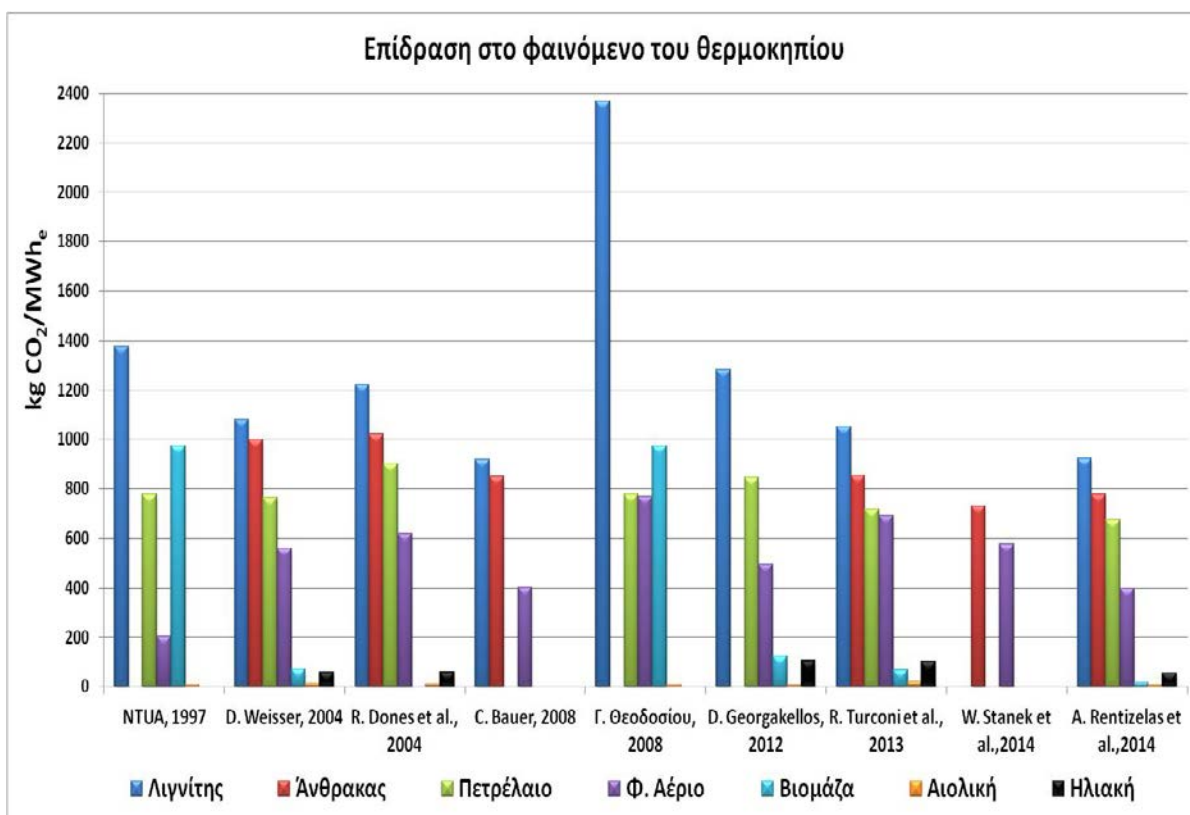
Για την ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων των βιβλιογραφικών αναφορών, εξετάζονται οι τρεις βασικότεροι ρύποι (CO₂, SO₂ και NO_x) που συνεισφέρουν περισσότερο στα φαινόμενα του θερμοκηπίου, της οξίνισης και του ευτροφισμού αντίστοιχα. Οι μελέτες που εξετάστηκαν είναι αυτές των C. Bauer, 2008; R. Dones et al., 2004; D.A. Georgakellos, 2012; NTUA, 1997; W. Stanek et al., 2014; R. Turconi et al., 2013; D. Weisser, 2004; Γ. Θεοδοσίου, 2008 και G. Theodosiou et al., 2014. Ο λόγος είναι πως η μονάδα στην οποία εκφράζονται οι δείκτες εκπομπής είναι ή μπορούν να μετατραπούν άμεσα σε (kg CO₂/MWh) ή (kg SO₂/MWh) ή (kg NO_x/MWh), μονάδες δηλαδή που είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες και κατανοητές σε αυτό το είδος μελετών.

Επιπλέον, στις μελέτες αυτές συγκρίνονται διάφορες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ως προς τις εκπομπές των παραπάνω ρύπων, όχι μόνο στο το στάδιο της λειτουργίας τους, αλλά από ολόκληρο το κύκλο ζωής, γεγονός που βοηθάει στην δημιουργία μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας για τα περιβαλλοντικά οφέλη ή επιπτώσεις της κάθε τεχνολογίας, ενώ παράλληλα καταδεικνύει και τη μειονεκτική θέση της χρήσης του λιγνίτη στην ηλεκτροπαραγωγή ως προ τις άλλες τεχνολογίες, σχετικά με την απαξίωση του περιβάλλοντος. Ορισμένες ωστόσο μελέτες, όπως των R. Dones et al., 2004; D.A. Georgakellos, 2012; D. Weisser, 2004 και W. Stanek et al., 2014 ασχολούνται μόνο την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, εξετάζοντας τις εκπομπές CO₂ και παραλείποντας την επίδραση στα φαινόμενα της οξίνισης και του ευτροφισμού. Στους πίνακες

3.3-3.5 παρατίθενται οι τιμές των επιπτώσεων από συγκεκριμένα είδη τεχνολογίας, ενώ στα διαγράμματα 3.1-3.3 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των βιβλιογραφικών αναφορών.

Πίνακας 3.3: Επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου ανά είδος τεχνολογίας (kg CO₂/MWh)

Μελέτη	Λιγνίτης	Άνθρακας	Πετρέλαιο	Φ. Αέριο	Βιομάζα	Αιολική	Ηλιακή
NTUA, 1997	1373,88	-	776,89	202,73	974,11	8,2	-
D. Weisser, 2004	1080	1000	765	560	70	12	57
R. Dones et al., 2004	1220	1020	900	620	-	10	60
C. Bauer, 2008	920	850	-	400	-	-	-
Γ. Θεοδοσίου, 2008	2364,78	-	778,95	768,13	974,11	9,65	-
D.A. Georgakellos, 2012	1280	-	844,23	496,69	124,70	8,20	104
R. Turconi et al., 2013	1050	855	715	690	69,25	22	101,5
W. Stanek et al., 2014	-	731,52	-	576	-	-	-
A. Rentizelas et al., 2014	921	776	674	398	18	9,56	55,2



Διάγραμμα 3.1: Σύγκριση βιβλιογραφικών αναφορών σχετικά με την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου

Σχόλια διαγράμματος 3.1

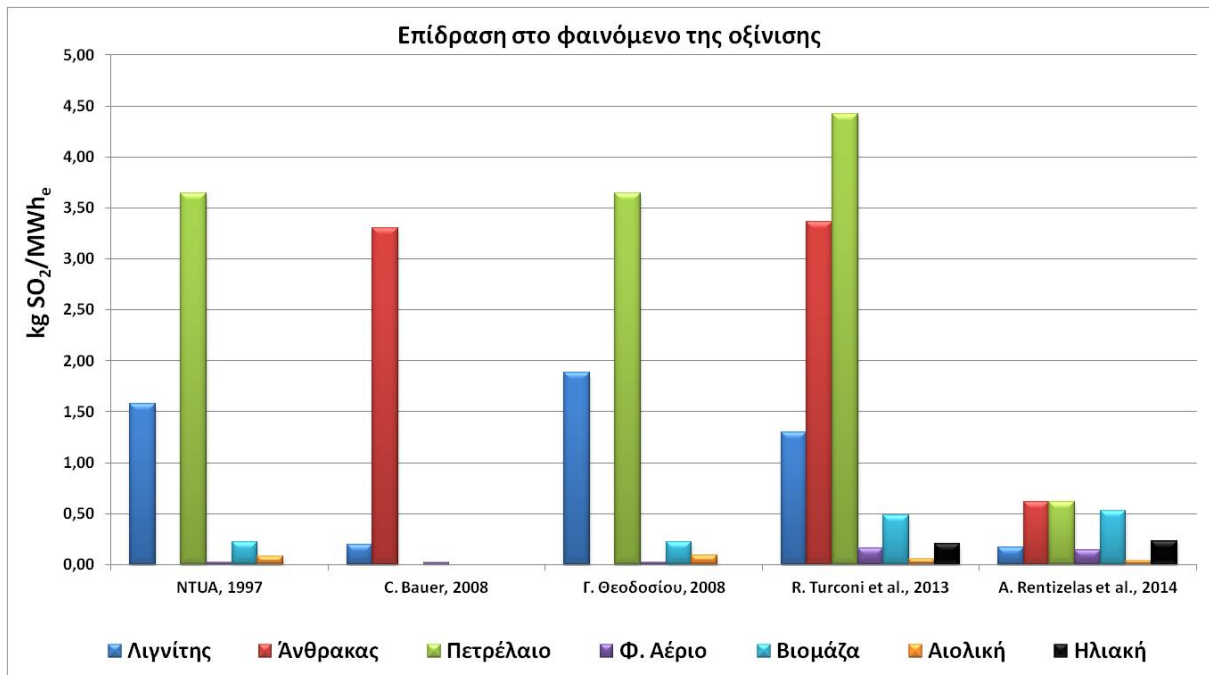
Παρατηρώντας το παραπάνω ραβδόγραμμα, γίνεται κατανοητός ο λόγος που οι τεχνολογίες λιγνίτη αποτελούν πλέον την έσχατη λύση ανάμεσα στις εναλλακτικές για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, από περιβαλλοντική άποψη και στη περίπτωση βέβαια που όλοι οι πόροι (π.χ. λιγνίτη, άνθρακας, Φ.Α. κτλ.) είναι εξίσου διαθέσιμοι. Η μεγάλη διαφορά στην εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες έγκειται στην ιδιαίτερα χαμηλή ποιότητα του λιγνίτη και κυρίως στη θερμογόνο ικανότητά του, που όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1 κυμαίνεται γύρω στα 5,5 MJ/kg. Αυτό που αξίζει να τονιστεί είναι η κατακόρυφη μείωση της επίδρασης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου των τεχνολογιών αξιοποίησης ανανεώσιμων μορφών ενέργειας και ιδιαίτερως της αιολικής, γεγονός που δικαιολογεί απόλυτα τη στροφή της επιχειρηματικότητας προς αυτό τον κλάδο επενδύσεων, ή τουλάχιστον την αύξηση ανησυχίας που οδηγεί στην εφαρμογή μεθόδων βελτίωσης των τεχνικών αξιοποίησης του λιγνίτη (π.χ. προξήρανση).

Στη περίπτωση των [NTUA, 1997](#) και [Γ. Θεοδοσίου, 2008](#) υπάρχει διαφορά στη σύσταση της βιομάζας που χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή σε σχέση με τις υπόλοιπες μελέτες. Επίσης, πρόκειται για βιομάζα που έχει προέλθει από ενεργειακές καλλιέργειες και όχι από αγροτικά υπολείμματα, με αποτέλεσμα οι εκπομπές ισοδυνάμων διοξειδίου του άνθρακα να παρουσιάζονται αυξημένες από ότι στις υπόλοιπες μελέτες, ενώ σε όλες δεν λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά τη φάση της καύσης, εξαιτίας του υψηλού βιογενούς κλάσματος της βιομάζας (δηλαδή οι εκπομπές CO₂ που προκύπτουν από τη καύση, θεωρούνται ακριβώς ίσες με αυτές που απορροφήθηκαν από το περιβάλλον κατά τη φάση δημιουργίας της βιομάζας, μέσω του φαινομένου της φωτοσύνθεσης).

Τέλος, σε όλες τις μελέτες η τεχνολογία του φυσικού αερίου παρουσιάζεται ως η βέλτιστη από τη σκοπιά της επίδρασης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου ανάμεσα στις υπόλοιπες ορυκτών καυσίμων, ωστόσο είναι η μοναδική που παρουσιάζει τόσο μεγάλη διακύμανση ως προς τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαφορετική γεωγραφική θέση του συστήματος μελέτης των παραπάνω εργασιών και μάλιστα στην απόστασή του από τους προμηθευτές φυσικού αερίου, ενώ σημαντικό ρόλο παίζει και η ποιότητα του φυσικού αερίου που έχει επιλεγεί. Έτσι, γνωρίζοντας ότι οι δύο σημαντικότερες χώρες-προμηθευτές φυσικού αερίου για την Ευρώπη είναι η Ρωσία και η Αλγερία, παρατηρούμε ότι οι μελέτες των [R. Dones et al., 2004](#); [D. Weissner, 2004](#) που αφορούν τις γειτονικές χώρες Αυστρία και Ελβετία αντίστοιχα, παρουσιάζουν παραπλήσιες εκπομπές σε CO₂ για το φυσικό αέριο. Όσο για τους [NTUA, 1997](#); [Γ. Θεοδοσίου, 2008](#) και [D.A. Georgakellos, 2012](#) αν και μελετούν τις εκπομπές φυσικού αερίου στην Ελλάδα, εντούτοις οι διαφορετικές παραδοχές σχετικά με τη προμήθεια καυσίμου κατά ένα ποσοστό από τη Ρωσία και κατά ένα άλλο από την Αλγερία και η σύσταση και θερμογόνο δύναμη που έχουν ληφθεί υπόψη, οδηγούν σε αρκετά διαφορετικά αποτελέσματα ως προς τις εκπομπές CO₂.

Πίνακας 3.4: Επίδραση στο φαινόμενο της οξίνισης ανά είδος τεχνολογίας (kg SO₂/MWh)

Μελέτη	Λιγνίτης	Άνθρακας	Πετρέλαιο	Φ. Αέριο	Βιομάζα	Αιολική	Ηλιακή
NTUA, 1997	1,58	-	3,64	0,025	0,22	0,079	-
C. Bauer, 2008	0,20	3,30	-	0,020	-	-	-
Γ. Θεοδοσίου, 2008	1,89	-	3,64	0,025	0,22	0,093	-
R. Turconi et al., 2013	1,30	3,37	4,43	0,17	0,49	0,055	0,21
A. Rentizelas et al., 2014	0,17	0,62	0,62	0,15	0,53	0,038	0,23



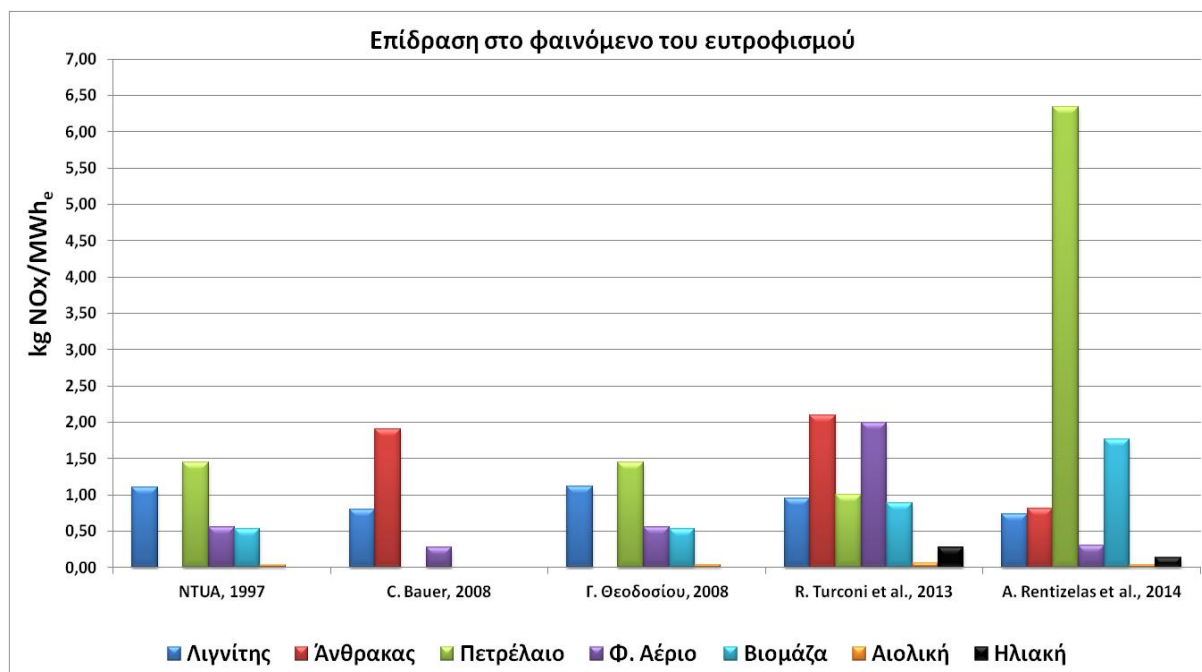
Διάγραμμα 3.2: Σύγκριση βιβλιογραφικών αναφορών σχετικά με την επίδραση στο φαινόμενο της οξίνισης

Σχόλια διαγράμματος 3.2

Από το παραπάνω ραβδόγραμμα εξάγεται το περιβαλλοντικό όφελος της τεχνολογίας του λιγνίτη σε σχέση με αυτές του άνθρακα και του πετρελαίου, για την επίδραση στο φαινόμενο της οξίνισης. Το πλεονέκτημα αυτό αποδίδεται κυρίως στη χαμηλή περιεκτικότητα του λιγνίτη σε θείο (S) που συνδυάζεται συγχρόνως και με τα φαινόμενα της φυσικής αποθείωσης εξαιτίας των μεγάλων ποσοτήτων ιπτάμενης τέφρας που παράγονται στη φάση της καύσης του κονιοποιημένου λιγνίτη. Από τις μελέτες των [NTUA, 1997](#) και [Γ. Θεοδοσίου, 2008](#) διαπιστώνεται το χαρακτηριστικό της χαμηλής περιεκτικότητας του ελληνικού λιγνίτη σε θείο, ενώ η αμελητέα συνεισφορά του φυσικού αερίου στο φαινόμενο της οξίνισης όπως διαπιστώνεται από όλες τις μελέτες, το καθιστά βέλτιστη εναλλακτική λύση στη κατηγορία τεχνολογιών αξιοποίησης ορυκτών καυσίμων.

Πίνακας 3.5: Επίδραση στο φαινόμενο του ευτροφισμού ανά είδος τεχνολογίας (kg NO_x/MWh_e)

Μελέτη	Λιγνίτης	Άνθρακας	Πετρέλαιο	Φ. Αέριο	Βιομάζα	Αιολική	Ηλιακή
NTUA, 1997	1,11	-	1,45	0,56	0,53	0,032	-
C. Bauer, 2008	0,80	1,90	-	0,28	-	-	-
Γ. Θεοδοσίου, 2008	1,12	-	1,45	0,56	0,53	0,038	-
R. Turconi et al., 2013	0,95	2,10	1	2	0,89	0,065	0,28
A. Rentizelas et al., 2014	0,74	0,81	6,34	0,31	1,76	0,039	0,14



Διάγραμμα 3.3: Σύγκριση βιβλιογραφικών αναφορών σχετικά με την επίδραση στο φαινόμενο του ευτροφισμού

Σχόλια διαγράμματος 3.3

Όπως και στη προηγούμενη περίπτωση, το ραβδόγραμμα 3.3 αναδεικνύει το περιβαλλοντικό όφελος της τεχνολογίας του λιγνίτη σε σχέση με αυτές του άνθρακα και του πετρελαίου, για την επίδραση στο φαινόμενο του ευτροφισμού. Το πλεονέκτημα αυτό αποδίδεται στη χαμηλή περιεκτικότητα του λιγνίτη σε άζωτο (N) και κυρίως στην υψηλή περιεκτικότητά του σε υγρασία (H₂O), γεγονός που δεν επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών εντός του θαλάμου καύσης του λέβητα και κατά συνέπεια το σχηματισμό θερμικών NO_x. Η διαφοροποίηση που εμφανίζεται από τους [A. Rentizelas et al., 2014](#) οφείλεται σε διαφορές που αφορούν την εφοδιαστική αλυσίδα του πετρελαίου, καθώς επίσης και στο βαθμό απόδοσης της πετρελαϊκής μονάδας που έχει ληφθεί υπόψη. Γενικά, από τη κατηγορία των ορυκτών καυσίμων μόνο το φυσικό αέριο παρουσιάζει τη μικρότερη συνεισφορά στο φαινόμενο του ευτροφισμού, ενώ η απόκλιση που παρουσιάζεται από τους [R. Turconi et al., 2013](#) έγκειται στο ότι έχουν ληφθεί υπόψη οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου, όχι μόνο από τις μονάδες βάσης ηλεκτρικού φορτίου με υψηλούς θερμικούς βαθμούς απόδοσης, αλλά και από τις εφεδρικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με πολύ χαμηλούς θερμικούς βαθμούς απόδοσης.

Κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων των επιπτώσεων

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.3.3, η κανονικοποίηση επιτρέπει τη ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων σε μια κοινή βάση και είναι πολύ συνηθής πρακτική σε μελέτες ανάλυσης κύκλου ζωής, όπως αυτές των [C. Bauer, 2008](#); [Γ. Θεοδοσίου, 2008](#) και [G. Theodosiou et al., 2014](#) που εξετάζονται εδώ.

Ανάλυση ευαισθησίας

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ανάλυσης ευαισθησίας αποτελεί η μελέτη των [R. Turconi et al., 2013](#) όπου εξετάζεται η επίδραση που έχει ο βαθμός απόδοσης των μεγάλων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, λιγνίτης, φυσικό αέριο, πετρέλαιο) στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το συμπέρασμα είναι ότι με βελτίωση του βαθμού απόδοσης του σταθμού, επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών ισοδυνάμων διοξειδίου του άνθρακα και άρα μείωση της επίδρασης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, ιδιαιτέρως δε στη περίπτωση λιγνιτικών

σταθμών όπου με μικρή βελτίωση στο βαθμό απόδοσης, για παράδειγμα 3%, είναι εφικτή η μείωση έως και κατά 100 kg CO_{2eq}/MWh.

Ωστόσο, αναλύσεις ευαισθησίας πραγματοποιούνται και σε άλλες μελέτες, όπως αυτές των [D.A. Georgakellos, 2010, 2012](#) και [A. Rentizelas et al., 2014](#), όπου εξετάζεται η επίδραση διαφόρων οικονομικών παραμέτρων, κυρίως στο εξωτερικό κόστος (βλέπε κεφάλαιο 8).

3.4.4 Εκτίμηση βελτιώσεων του συστήματος

Στις μελέτες των [C. Bauer, 2008](#); [D.A. Georgakellos, 2010, 2012](#); [K. Kavouridis et al., 2007](#); [NTUA, 1997](#); [A. Rentizelas et al., 2014](#); [D. Streimikiene et al., 2009](#); [Γ. Θεοδοσίου, 2008](#); [Κ. Καβουρίδης et al., 2005](#), οι εκπομπές ρύπων που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου AKZ ερμηνεύονται σε τιμές εξωτερικού κόστους που σύμφωνα με την παράγραφο 3.3.4 είναι ένας τρόπος που οδηγεί στη βελτίωση των εξεταζόμενων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Κεφάλαιο 4^ο

Ανάλυση διαδικασιών SimaPro v.7.3.3

4.1 Γενικά για το SimaPro

Το λογισμικό SimaPro αποτελεί το κατεξοχήν εργαλείο για την εφαρμογή της μεθοδολογίας ανάλυσης κύκλου ζωής (AKZ) και χρησιμοποιείται ευρέως από βιομηχανίες, εταιρείες που παρέχουν συμβουλευτικές υπηρεσίες και ερευνητικά ιδρύματα σε περισσότερες από 80 χώρες. Ως επαγγελματικό εργαλείο, προσφέρει τις δυνατότητες της συλλογής, ανάλυσης και παρακολούθησης των περιβαλλοντικών επιδόσεων των προϊόντων και των υπηρεσιών ([EarthShift, website](#)).

4.2 Μοντελοποίηση διαδικασιών εξόρυξης λιγνίτη στο SimaPro v.7.3.3

Η μοντελοποίηση των διαδικασιών της εξόρυξης του λιγνίτη βασίζεται στο σχήμα 2.3 (Κεφάλαιο 2^ο) και προϋποθέτει τη μοντελοποίηση των μηχανημάτων του πάγιου και έκτακτου εξοπλισμού του ορυχείου που συμμετέχουν σε αυτές. Η βάση δεδομένων από την οποία αντλήθηκαν στοιχεία για τη μοντελοποίηση των μηχανημάτων είναι η Ecoinvent Database, η οποία είναι ενσωματωμένη στο SimaPro v.7.3.3 (βλέπε παράγραφο 3.3.3), ενώ επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν και εξωτερικές βιβλιογραφικές πηγές που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 2. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται και οι παραδοχές που έγιναν σε κάθε στάδιο της εξόρυξης.

4.2.1 Εκχέρωση-Αφαίρεση επιφανειακού στρώματος εδάφους, Γεώτρηση και ανατίναξη υπερκειμένων και λιγνιτικού κοιτάσματος (Land clearing-Topsoil removal, Overburden-Lignite drilling and blasting)

Οι προκαταρκτικές αυτές εργασίες που είναι απαραίτητες για την περαιτέρω αξιοποίηση του λιγνιτικού κοιτάσματος, απαιτούν τη συνεργασία των μηχανημάτων του έκτακτου εξοπλισμού που παρουσιάζεται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά έκτακτου εξοπλισμού (CAT, 2006)

Τύπος Μηχανήματος	Ισχύς Μηχανής <i>hp</i>	Φορτίο					
		LOW		MEDIUM		HIGH	
		<i>Lt/h</i>	<i>m³/10min</i>	<i>Lt/h</i>	<i>m³/10min</i>	<i>Lt/h</i>	<i>m³/10min</i>
Workforce carrier	200-400	12,5		12,5		12,5	
Crawler dozer	81-185	14,975	1,53	15,2	1,6	24,725	1,9
	185-200	21,717	2	28,217	2,5	34,817	3
	200-448	36,267	2,66	43,2	2,7	53,25	3
	448-928	77,033	27	100,77	30	124,1	45
Sid steer loader	61-84	7,5	2,66	10,5	2,66	13,5	2,66
	84-94	8,9	17	11,5	17	14	17
Track type tractor	81-185	14,975	1,6	15,2	1,6	24,725	1,6
	185-200	21,717	8,43	28,217	8,43	34,817	8,43
	200-448	36,267	18,5	43,2	18,5	53,25	18,5
	448-928	77,033	20	100,77	20	124,1	20

Wheel dozer	253-354	33,8	7,9	42	15,05	51	22,2
	354-500	40	16,1	57	23,4	70	30,7
	500-800	51	25	62	35	73	45
Wheel tractor scraper	193-500	40	38	49	38	65	38
	500-600	70	56	95	56	130	56
Cold planer	500-625	49	20	53,5	20	81	20
	625-650	56	30	75	30	95	30
Motor grader	158-268	15,7	3,7	19	3,7	24,5	3,7
	268-294	17,8	5	24	5	31	5
	294-533	30	5	35	5	50	5
Road reclaimer	335-500	34,1	10	41,6	10	53	10
	500-548	60	15	75	15	85	15
		Lt/h	Km²/h	Lt/h	Km²/h	Lt/h	Km²/h
Compactor	83-145	10,93	0,01312	13,97	0,01312	17,23	0,01312
	145-180	16	0,015	17	0,015	21	0,015
Blasthole drill	400-600	12,1	2,835	12,1	2,835	12,1	2,835
Surface drill rig	400-600	12,1	2,835	12,1	2,835	12,1	2,835

Παρατηρούμε ότι τα μηχανήματα ανάλογα με το φορτίο εργασίας που επιτελούν κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες: χαμηλού φορτίου (Low), μέσου φορτίου (Medium) και υψηλού φορτίου (High) και κατά συνέπεια, για το κάθε είδος εργασίας η κατανάλωση καυσίμου είναι άμεσα συναρτώμενη της δυναμικότητας του κάθε μηχανήματος και της ισχύος του κινητήρα του.

Η μοντελοποίηση των ντιζελοκίνητων μηχανημάτων βασίστηκε στο «process» που αφορά τη μοντελοποίηση του μηχανήματος απομάκρυνσης του επιφανειακού στρώματος του εδάφους (Skid steer loader) και βρίσκεται ήδη ενσωματωμένο στη βάση δεδομένων Ecoinvent του SimaPro v.7.3.3. Ωστόσο, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, το έτοιμο αυτό «process» τροποποιήθηκε, καθώς ο τρόπος μοντελοποίησης που εφαρμόστηκε ήταν ο ακόλουθος:

1. Υπολογισμός της ωριαίας δυναμικότητας εκσκαφής σε $m^3_{exc.}/h$, ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα και για κάθε φορτίο εργασίας
2. Υπολογισμός της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου (diesel) σε kg_{diesel}/h , θεωρώντας μέση τυπική πυκνότητα του καυσίμου ίση με $850 kg_{diesel}/m^3_{diesel}$ (I. Staffell, 2011; N. Μαμάσης et al., 2011)
3. Υπολογισμός της ωριαίας εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) σε kg_{CO_2}/h , θεωρώντας ότι κατά τη καύση $1 lt_{diesel}$ παράγονται περίπου $2,66 kg_{CO_2}$, για μέση τυπική σύσταση καυσίμου και υπό τη παραδοχή ότι αποτελείται κυρίως από δεκαεξάνιο ($C_{16}H_{34}$) (U.S._Energy_Information_Administration, (EIA))
4. Υπολογισμός της ωριαίας εκπομπής διοξειδίου του θείου (SO_2) σε kg_{SO_2}/h , θεωρώντας ότι κατά τη καύση $1 lt_{diesel}$ παράγονται περίπου $8,5 \cdot 10^{-4} kg_{SO_2}$, με τις ανωτέρω παραδοχές (U.S._Energy_Information_Administration, (EIA))
5. Αναγωγή των παραπάνω ωριαίων μεγεθών στη μονάδα αναφοράς για τη μοντελοποίηση των μηχανημάτων που είναι το $1 m^3_{exc.}$

Παρατήρηση

Στη περίπτωση μηχανημάτων που η ωριαία δυναμικότητά τους εκφράζεται σε Km^2/h (Compactor, Blasthole drill, Surface drill rig), γίνεται φανερό ότι τα παραπάνω υπολογιζόμενα μεγέθη θα αναχθούν στη μονάδα αναφοράς που είναι το 1 Km^2 .

Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται όλα τα «processes» στο λογισμικό SimaPro v.7.3.3 που αφορούν τα μηχανήματα του έκτακτου ντιζελοκίνητου εξοπλισμού, με μόνη εξαίρεση το όχημα μεταφοράς προσωπικού (Workforce carrier) που ήταν ήδη μοντελοποιημένο σε ξεχωριστό «process» της Ecoinvent, με μονάδα αναφοράς το $1 \text{ person}\cdot\text{km}$ (μεταφορά ενός ατόμου κατά 1 χιλιόμετρο).

Αξίζει να σημειωθεί, ότι το σημαντικότερο πλεονέκτημα που προσφέρει η μοντελοποίηση στο συγκεκριμένο λογισμικό SimaPro v.7.3.3 είναι η ενσωμάτωση ολόκληρου του κύκλου ζωής των μηχανημάτων στα όρια της μελέτης. Δηλαδή, εκτός των παραπάνω υπολογιζόμενων μεγεθών που συμπεριλαμβάνονται στη δημιουργία του βασικού «process» του εκάστοτε μηχανήματος, επιπλέον στοιχεία από ήδη μοντελοποιημένα «processes» που αφορούν τη χρήση υλικών και ενέργειας για τη κατασκευή των μηχανημάτων, λιπαντικά έλαια απαραίτητα για τη λειτουργία του κινητήρα, καθώς επίσης και στοιχεία διαχείρισης/απόθεσης των παραπάνω λιπαντικών μετά την ολοκλήρωση της ωφέλιμης ζωής τους, ενσωματώνονται ως «sub-processes» στο βασικό «process» και συμπληρώνουν τον κύκλο ζωής των μηχανημάτων, προσδίδοντας μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τις πραγματικές εκπομπές που υφίστανται από ολόκληρο το συγκεκριμένο στάδιο της εξόρυξης.

Αφού πλέον μοντελοποιηθούν τα μηχανήματα σε διαφορετικά «processes», επόμενο βήμα είναι η μοντελοποίηση ολόκληρης της εργασίας της Εκχέρσωσης-Αφαίρεσης του επιφανειακού στρώματος εδάφους και της γεώτρησης και ανατίναξης των υπερκειμένων και του λιγνιτικού κοιτάσματος. Για το σκοπό αυτό, τα παραπάνω μηχανήματα συνδυάζονται σε ένα καινούργιο «process», υπό τη παραδοχή ότι κάθε είδος μηχανήματος αναλαμβάνει την εκσκαφή σε ένα μέρος της συνολικής έκτασης του ορυχείου που προκύπτει από το πλήθος των διαφορετικών ειδών εκσκαπτικών μηχανημάτων που συνεργάζονται. Στην προκειμένη περίπτωση, θεωρείται ότι καθένα από τα 9 διαφορετικά είδη μηχανημάτων που συμβάλλουν στη συγκεκριμένη εργασία, εργάζονται στο $1/9$ της συνολικής έκτασης του ορυχείου όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.1. Εξαίρεση από την παραδοχή αυτή αποτελούν τα δύο είδη γεωτρήσεων (Blasthole drill και Surface drill rig), τα οποία δεν λαμβάνονται υπόψη στη κατανομή του χώρου εργασίας, καθώς δεν συμβάλλουν στις συνολικές εκσκαφές. Τέλος, οι οδοστρωτήρες αν και δεν συμμετέχουν στις εκσκαφές, εντούτοις λαμβάνονται υπόψη στη κατανομή του χώρου εργασίας, θεωρώντας ότι καλύπτουν με την εργασία τους ένα μικρό κομμάτι της έκτασης του ορυχείου (το $1/9$) το οποίο δεν προβλέπεται να εκσκαφθεί.



Σχήμα 4.1: Κατανομή ντιζελοκίνητων μηχανημάτων στο ορυχείο για την εργασία της αφαίρεσης του επιφανειακού στρώματος του εδάφους

Για τη μοντελοποίηση ολόκληρης της εργασίας της Εκχέρωσης-Αφαίρεσης του επιφανειακού στρώματος εδάφους, ως μονάδα αναφοράς στο συγκεκριμένο «process» θεωρείται το $1 \text{ kg}_{\text{exc}}$. και όχι το $1 \text{ m}^3_{\text{exc}}$, γεγονός που συνεπάγεται την αναγκαιότητα αναγωγής της δυναμικότητας των μηχανημάτων στο $1 \text{ kg}_{\text{exc}}$. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η εύρεση του ρυθμού απομάκρυνσης της μάζας του επιφανειακού στρώματος του εδάφους, έτσι ώστε να προκύψουν οι συντελεστές $\text{m}^3_{\text{exc}}/\text{kg}_{\text{exc}}$ για κάθε «process» μοντελοποιημένου μηχανήματος.

Έστω λοιπόν ότι η έκταση εκσκαφών του ορυχείου είναι $X \text{ km}^2$ και το συνολικό βάθος εκσκαφής των μηχανημάτων είναι $A \text{ m}$. Επίσης, θεωρείται ότι η πυκνότητα του εδάφους ισούται με αυτή των υπερκειμένων (overburden), δηλαδή $1.600 \text{ kg}_{\text{overburden}}/\text{m}^3_{\text{overburden}}$ και ότι οι ώρες λειτουργίας του ορυχείου είναι $B \text{ hours}$. Τότε, η μάζα του επιφανειακού στρώματος του εδάφους (Y) που πρέπει να εκσκαφθεί από τα μηχανήματα είναι ίση με:

$$X \text{ Km}^2 \cdot A \cdot 10^{-3} \text{ Km} \cdot \frac{1600 \text{ kg}_{\text{overburden}}}{10^{-9} \text{ Km}^3} = Y \text{ kg}_{\text{overburden}}$$

Ωστόσο, θεωρώντας ότι η παραπάνω μάζα εκσκάπτεται από τα μηχανήματα κατά τη διάρκεια ολόκληρης της ωφέλιμης ζωής του λιγνιτωρυχείου, έστω C έτη (years), τότε η ωριαία μάζα που απομακρύνεται από τα ντιζελοκίνητα μηχανήματα θα είναι:

$$\frac{Y}{C \cdot B} \frac{\text{kg}_{\text{overburden}}}{\text{years} \cdot \frac{h}{\text{year}}} = Y', \frac{\text{kg}_{\text{overburden}}}{h}$$

Επομένως, οι ζητούμενοι συντελεστές θα προκύψουν από το πηλίκο της διαίρεσης της ωριαίας δυναμικότητας των μηχανημάτων με την ωριαία μάζα του επιφανειακού στρώματος του εδάφους που πρέπει να εκσκαφθεί από τα μηχανήματα όπως υπολογίστηκε παραπάνω.

4.2.2 Αφαίρεση-Εξόρυξη υπερκειμένων υλικών, μεταφορά και απόθεση (Overburden removal and dumping)

Το συγκεκριμένο στάδιο της εξόρυξης προηγείται της βασικής λειτουργίας του ορυχείου που είναι η εξόρυξη του λιγνίτη και δύναται να πραγματοποιηθεί με 5 διαφορετικούς εναλλακτικούς τρόπους

(παράγραφος 2.4.2), που απαιτούν όμως τη συνεργασία μηχανημάτων τόσο του πάγιου, όσο και του έκτακτου εξοπλισμού του ορυχείου. Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των απαραίτητων μηχανημάτων για τη συγκεκριμένη φάση εξόρυξης.

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά έκτακτου και πάγιου εξοπλισμού (CAT, 2006)

Τύπος Μηχανήματος	Ισχύς Μηχανής <i>hp</i>	Φορτίο					
		LOW		MEDIUM		HIGH	
		<i>Lt/h</i>	<i>tn/20min</i>	<i>Lt/h</i>	<i>tn/20min</i>	<i>Lt/h</i>	<i>tn/20min</i>
Articulated truck	600-700	17	40	26	40	40	40
Off highway truck	511-787	36	65	49	65	60	65
	787-1450	60	65	75	65	95	65
	1450-4000	150	65	200	65	250	65
		<i>Lt/h</i>	<i>m³/h</i>	<i>Lt/h</i>	<i>m³/h</i>	<i>Lt/h</i>	<i>m³/h</i>
Backhoe loader	80-180	13	12	14	12	17	12
Front shovel	500-600	48	70	125	70	130	70
Track loader	250-290	20	35	25	35	35	35
		<i>Lt/h</i>	<i>m³/10 min</i>	<i>Lt/h</i>	<i>m³/10 min</i>	<i>Lt/h</i>	<i>m³/10 min</i>
Wheel loader	52-217	7	1,2	9	1,2	13	1,2
and integrated tool carrier	217-393	16	1,534	21	1,534	26	1,534
	393-500	80	2	110	2	130	2
		<i>kWh</i>	<i>m³/h</i>	<i>kWh</i>	<i>m³/h</i>	<i>kWh</i>	<i>m³/h</i>
Bucket Wheel Excavator		1200	900	1200	900	1200	900
Spreader		1200	900	1200	900	1200	900
Dragline Excavator		1900	1800	1900	1800	1900	1800
Electric Rope Shovel		1500	900	1500	900	1500	900
Conveyor Belt		Εξίσωση 4.1		Εξίσωση 4.1		Εξίσωση 4.1	

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μόνο για την περίπτωση των ντιζελοκίνητων μηχανημάτων η κατανάλωση καυσίμου είναι άμεσα συναρτώμενη της δυναμικότητας του κάθε μηχανήματος, της ισχύος του κινητήρα του και του φορτίου εργασίας το οποίο επιτελεί. Δεν ισχύει όμως το ίδιο και στη περίπτωση των μεγάλων ηλεκτροκίνητων μηχανημάτων, όπου η κατανάλωση σε ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ του εξοπλισμού τους. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας οι δυναμικότητες και η ηλεκτρική κατανάλωση των ηλεκτροκίνητων μηχανημάτων εκλέχθηκαν με τρόπο ώστε να αντικατοπτρίζουν τη πραγματικότητα των ορυχείων, ενώ ειδικά για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ισχύος των ταινιοδρόμων (Conveyor Belt) χρησιμοποιήθηκε η σχέση 4.1 (A. Βλάχου, 2012).

$$N_a = \left\{ \frac{C \cdot f \cdot L}{270} \cdot (3,6 \cdot G_m \cdot v + Q_t) \pm \frac{Q_t \cdot H}{270} \right\} \cdot 0,746 \quad (4.1)$$

Όπου,

N_a , η ισχύς στον άξονα του τυμπάνου κίνησης σε kW κατόπιν μετατροπής από hp με χρήση του συντελεστή 0,746

C, συντελεστής εξαρτώμενος από το μήκος μεταφοράς (διάγραμμα 4.1), στην προκειμένη περίπτωση λαμβάνεται $C = 1$ καθώς το μήκος μεταφοράς των ταινιοδρόμων στα υπάρχοντα λιγνιτωρυχεία ποικίλει από 500 m έως 99 km (Πίνακας 2.2)

f, συντελεστής αντιστάσεων λόγω τριβών στα έδρανα των ραούλων (για έδρανα ολίσθησης λαμβάνει τιμές 0,050-0,060 και για ένσφαιρους τριβείς 0,025-0,030), στην προκειμένη περίπτωση λαμβάνεται 0,028

L, το μήκος μεταφοράς σε m, λαμβάνεται ίσο με 4000 m (για ταινιοδρόμους μεγαλύτερου μήκους, η ισχύς προκύπτει αναλογικά)

H, η υψομετρική διαφορά του αρχικού και τελικού σημείου του ταινιοδρόμου σε m, στη προκειμένη περίπτωση λαμβάνεται 1 m απλώς και μόνο για λόγους πληρότητας, μιας και δεν υπάρχουν τα απαραίτητα τοπογραφικά στοιχεία της εκάστοτε περιοχής λειτουργίας των ταινιοδρόμων

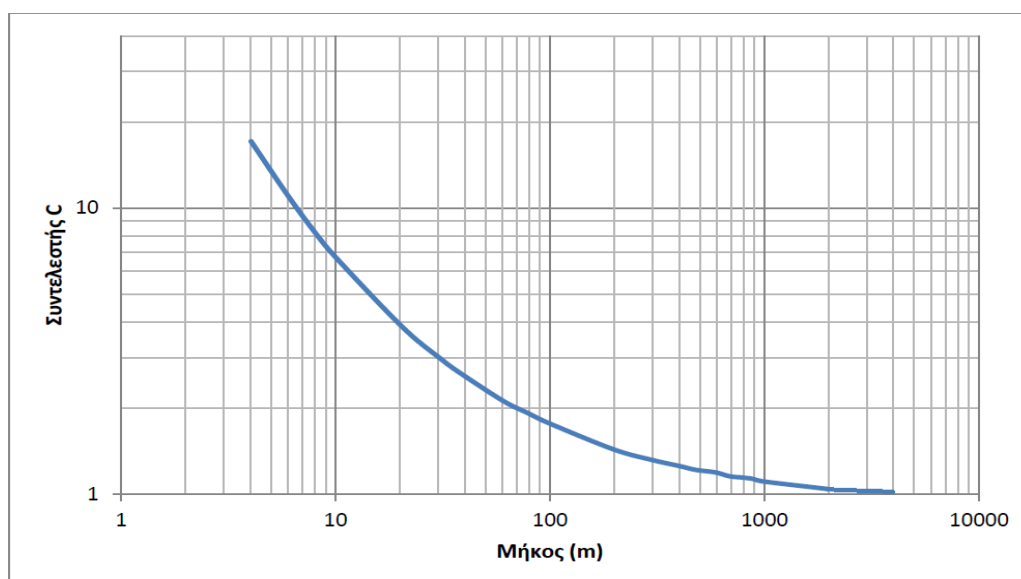
G_m , το φορτίο του μεταφορέα σε kp ανά τρέχον μέτρο μεταφοράς (αφορά το άθροισμα των βαρών όλων των κινούμενων στοιχείων του μεταφορέα: ράουλα και ιμάντας στον άνω και τον κάτω κλάδο του ταινιοδρόμου, χωρίς το βάρος του μεταφερόμενου υλικού), στην προκειμένη περίπτωση λαμβάνεται $G_m = 100 \text{ kp/m}$

Q_t , η μεταφερόμενη ποσότητα υλικού σε Mp/h (=tn/h), η οποία λαμβάνεται ίση με την παροχή υλικών του συνεργαζόμενου μηχανήματος με τον ταινιοδρόμο

v, η ταχύτητα του ταινιοδρόμου σε m/s, στην προκειμένη περίπτωση λαμβάνεται $v = 5,4 \text{ m/s}$

Η ταχύτητα των ταινιοδρόμων εξαρτάται από παράγοντες όπως: α) το πλάτος του ιμάντα, β) το αν ο ιμάντας είναι επίπεδος ή σκαφιδωτός, γ) το μήκος των ταινιοδρόμων και δ) τη γωνία κλίσης των ταινιοδρόμων.

Η τιμή της ισχύος που υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση επαυξάνεται κατά 20-40% για μεγάλες και μικρές εγκαταστάσεις αντίστοιχα, προκειμένου να καλυφθούν τυχόν απρόβλεπτες αντιστάσεις (δυνάμεις αδράνειας, κατά την εκκίνηση, υπερφορτώσεις, κτλ.).



Διάγραμμα 4.1: Εξάρτηση του συντελεστή C από την απόσταση μεταφοράς L (m)

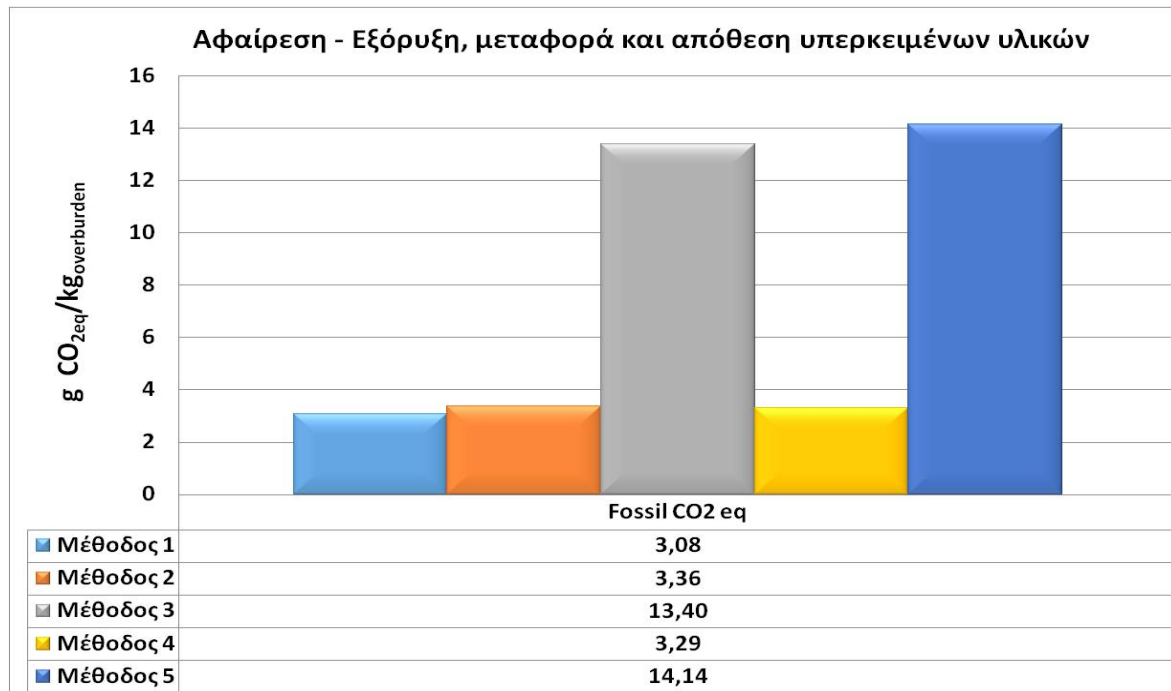
Τα βήματα που ακολουθούνται για τη μοντελοποίηση των μηχανημάτων του έκτακτου εξοπλισμού, καθώς και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το λογισμικό SimaPro v.7.3.3 στη περίπτωση αυτή, αναλύθηκαν στην παράγραφο 4.2.1. Μικρή εξαίρεση αποτελούν τα φορτηγά μεταφοράς υλικών (Articulated Truck και Off highway Truck), τα οποία μοντελοποιήθηκαν με μονάδα αναφοράς το 1 t \cdot km (μεταφορά 1 τόνου υλικού κατά 1 χιλιόμετρο) και βασίστηκαν στο «process» άλλου είδους φορτηγών που είναι ενσωματωμένα στην Ecoinvent.

Όσον αφορά τον πάγιο ηλεκτροκίνητο εξοπλισμό του ορυχείου (εκτός από τον ταινιόδρομο), στη μοντελοποίηση δεν λήφθηκαν υπόψη στοιχεία που αφορούν τη κατασκευή των μηχανημάτων (υλικά και ενέργεια), λόγω έλλειψης βιβλιογραφικής έρευνας στον τομέα αυτό, παρά μόνο δεδομένα που σχετίζονται με τη λειτουργία τους και κυρίως την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας η οποία προμηθεύεται από το δίκτυο μέσης τάσης της Ελλάδας και είναι μοντελοποιημένη σε ξεχωριστό «process» της Ecoinvent με μονάδα αναφοράς την 1 kWh. Για τη δημιουργία των «processes» αυτού του είδους των μηχανημάτων, τα δεδομένα («sub-processes») ανάγονται στη μονάδα αναφοράς, που θεωρείται το εκσκαπτόμενο κυβικό μέτρο (1 m³_{exc.}), λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμικότητα του κάθε μηχανήματος.

Η μοντελοποίηση του ταινιόδρομου (Conveyor belt) βασίστηκε στο έτοιμο «process» για αυτού του είδους το μηχάνημα, που είναι ενσωματωμένο στην Ecoinvent. Σε αυτό συμπεριλαμβάνεται ένα «sub-process» που αφορά την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς επίσης και ένα δεύτερο «sub-process» που αφορά την κατασκευή του ταινιόδρομου. Ως μονάδα αναφοράς για τη μοντελοποίηση θεωρείται το 1 km ταινιοδρόμου.

Για τη μοντελοποίηση ολόκληρης της εργασίας Αφαίρεσης-Εξόρυξης των υπερκειμένων υλικών, μεταφοράς και απόθεσης (Overburden removal and dumping), συνδυάζονται τα processes των παραπάνω μηχανημάτων με 5 διαφορετικούς εναλλακτικούς τρόπους όπως περιγράφονται στην παράγραφο 2.4.2. Ως μονάδα αναφοράς θεωρείται το αδιάστατο μέγεθος 1p (point) και συνεπώς οι δυναμικότητες όλων των μηχανημάτων ανάγονται στη μονάδα αυτή.

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.4.2, ο συνηθέστερος τρόπος που εφαρμόζεται στη πράξη για την επίτευξη της εν λόγω εργασίας, βασίζεται στη συνεργασία καδοφόρου εκσκαφέα, με ταινιόδρομο και αποθέτη. Οι λόγοι που υποδεικνύουν αυτή την εναλλακτική ως τη βέλτιστη, είναι κυρίως οικονομοτεχνικοί και συναρτώνται άμεσα και με τοπικούς παράγοντες του εκάστοτε ορυχείου, όπως είναι η κλίση της επιφάνειας, η επιθυμητή παραγωγικότητα του ορυχείου κτλ. Εξάλλου, και τα αποτελέσματα της περιβαλλοντικής αξιολόγησης των μεθόδων εξόρυξης, με βάση τις εκπομπές CO_{2eq} (φαινόμενο του θερμοκηπίου), επαληθεύουν την επικράτηση της συγκεκριμένης εναλλακτικής, εξαιτίας της μικρότερης περιβαλλοντικής ζημιάς που παρουσιάζει σε σύγκριση με τις υπόλοιπες, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 4.2.



Διάγραμμα 4.2: Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις εναλλακτικές εξόρυξης υπερκειμένων υλικών (Greenhouse Gas Protocol v1.01)

Η σύγκριση των εναλλακτικών πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή της μεθόδου Greenhouse Gas Protocol v1.01 στις διαδικασίες εξόρυξης υπερκειμένων που μοντελοποιήθηκαν στο λογισμικό SimaPro v.7.3.3, με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω.

Όπως είναι φανερό, οι μέθοδοι εξόρυξης υπερκειμένων υλικών που πραγματοποιούνται με τη χρήση αποκλειστικά ηλεκτροκίνητου μηχανολογικού εξοπλισμού, όπως οι μέθοδοι 1, 2 και 4 (σχήμα 2.28), επιφέρουν τη μικρότερη επιβάρυνση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι μικρές διαφορές που εντοπίζονται μεταξύ τους οφείλονται στις διαφορετικές απαιτήσεις ενέργειας (και άρα διαφορετικές εκπομπές) που έχει το κάθε είδος μηχανήματος (πίνακας 4.2). Όσον αφορά τις μεθόδους 3 και 5, η σημαντική επιβάρυνση που επιφέρουν οφείλεται στη χρήση ντιζελοκίνητων μηχανημάτων με υψηλό δείκτη εκπομπών CO₂, τόσο για την εξόρυξη των υπερκειμένων (μέθοδος 5), όσο και για τη μεταφορά και απόθεση στους κατάλληλους χώρους (μέθοδοι 3 και 5).

4.2.3 Εξόρυξη λιγνίτη και μεταφορά (Lignite mining)

Το στάδιο της εξόρυξης του λιγνίτη, που αποτελεί το βασικό αίτιο λειτουργίας του ορυχείου, δύναται να πραγματοποιηθεί με 4 διαφορετικούς εναλλακτικούς τρόπους (παράγραφος 2.4.3), που απαιτούν τη συνεργασία μηχανημάτων τόσο του πάγιου, όσο και του έκτακτου εξοπλισμού του ορυχείου, ίδιου τύπου όπως και στην περίπτωση εξόρυξης των υπερκειμένων υλικών. Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των απαραίτητων μηχανημάτων για τη συγκεκριμένη φάση εξόρυξης.

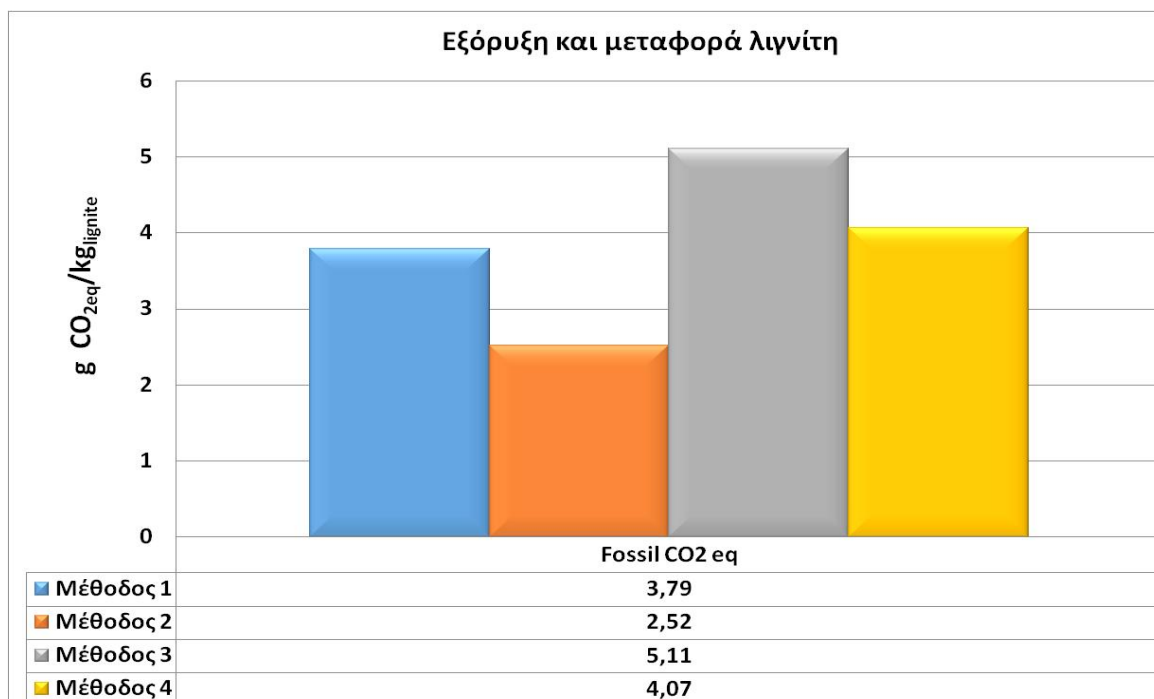
Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά έκτακτου και πάγιου εξοπλισμού (CAT, 2006)

Τύπος Μηχανήματος	Ισχύς Μηχανής hp	Φορτίο					
		LOW		MEDIUM		HIGH	
		Lt/h	tn/20min	Lt/h	tn/20min	Lt/h	tn/20min
Articulated truck	600-700	17	40	26	40	40	40

Off highway truck	511-787	36	65	49	65	60	65
	787-1450	60	65	75	65	95	65
	1450-4000	150	65	200	65	250	65
		Lt/h	m³/h	Lt/h	m³/h	Lt/h	m³/h
Backhoe loader	80-180	13	12	14	12	17	12
Front shovel	500-600	48	70	125	70	130	70
Track loader	250-290	20	35	25	35	35	35
Excavator	18,4-122	5,5	70	6	70	8	70
	122-203,8	13	70	19	70	25	70
	203,8-321	22	70	30	70	50	70
	321-513	29	70	35	70	55	70
		Lt/h	m³/10 min	Lt/h	m³/10 min	Lt/h	m³/10 min
Wheel loader and integrated tool carrier	52-217	7	1,2	9	1,2	13	1,2
	217-393	16	1,534	21	1,534	26	1,534
	393-500	80	2	110	2	130	2
		Lt/h	tn/h	Lt/h	tn/h	Lt/h	tn/h
Crusher		2,86	500	2,86	500	2,86	500
		kWh	m³/h	kWh	m³/h	kWh	m³/h
Bucket Wheel Excavator		1200	900	1200	900	1200	900
Spreader		1200	900	1200	900	1200	900
Dragline Excavator		1900	1800	1900	1800	1900	1800
Electric Rope Shovel		1500	900	1500	900	1500	900
Conveyor Belt		Σχέση 4.1		Σχέση 4.1		Σχέση 4.1	

Όπως φαίνεται, τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για την εξόρυξη του λιγνίτη είναι ίδιου τύπου με αυτά της εξόρυξης των υπερκειμένων, η μοντελοποίηση των οποίων περιγράφηκε αναλυτικά παραπάνω. Μόνο ο τύπος του εκσκαφέα (Excavator) είναι το μηχανήμα που εμφανίζεται επιπλέον στην εξόρυξη του λιγνίτη και αυτός του θραυστήρα (Crusher), που όμως μοντελοποιούνται όπως και τα υπόλοιπα ντιζελοκίνητα μηχανήματα σε ξεχωριστά «processes», με μονάδες αναφοράς το $1 \text{ m}^3_{\text{exc}}$ και τον 1 tn αντίστοιχα. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση ολόκληρης της εργασίας της Εξόρυξης του λιγνίτη και μεταφοράς (Lignite mining) για τους 4 διαφορετικούς εναλλακτικούς τρόπους, αυτή πραγματοποιείται όπως και παραπάνω θεωρώντας ως μονάδα αναφοράς το αδιάστατο μέγεθος 1p (point) με τις δυναμικότητες όλων των μηχανημάτων να ανάγονται στη μονάδα αυτή. Η πυκνότητα του φυσικού λιγνίτη που εξορύσσεται θεωρείται περίπου ίση με $1.263 \text{ kg}_{\text{lignite}}/\text{m}^3_{\text{lignite}}$.

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.4.2, ο συνηθέστερος τρόπος που εφαρμόζεται στη πράξη για την επίτευξη της εν λόγω εργασίας, βασίζεται στη συνεργασία καδοφόρου εκσκαφέα, με ταινιόδρομο. Όπως και στην περίπτωση της εξόρυξης υπερκειμένων, οι λόγοι επικράτησης αυτής της εναλλακτικής ως βέλτιστης, είναι κυρίως οικονομοτεχνικοί και σχετικοί με τοπικούς παράγοντες του εκάστοτε ορυχείου, όπως είναι η κλίση της επιφάνειας, ο δείκτης παραγωγικότητας του ορυχείου κτλ. Ωστόσο, η περιβαλλοντική αξιολόγηση υποδεικνύει ότι στη μέθοδο 2, όπου πραγματοποιείται εξόρυξη του λιγνίτη με ντιζελοκίνητο εκσκαφέα, επιτυγχάνεται μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 4.3.



Διάγραμμα 4.3: Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις εναλλακτικές εξόρυξης λιγνίτη (Greenhouse Gas Protocol v1.01)

Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή της μεθόδου Greenhouse Gas Protocol v1.01 στις διαδικασίες εξόρυξης λιγνίτη που μοντελοποιήθηκαν στο λογισμικό SimaPro v.7.3.3, με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω.

Δεν είναι παράδοξο το γεγονός ότι η χρήση ντιζελοκίνητου εξοπλισμού για την εξόρυξη του λιγνίτη (μέθοδος 2) επιφέρει λιγότερες περιβαλλοντικές συνέπειες από τη χρήση ηλεκτροκίνητου εξοπλισμού και συγκεκριμένα του καδοφόρου εκσκαφέα. Το γεγονός οφείλεται στον ιδιαίτερα χαμηλό δείκτη εκπομπών CO₂ που έχει ληφθεί υπόψη για τους ντιζελοκίνητους εκσκαφείς (πίνακας 4.3) στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Ωστόσο, παρά το πλεονέκτημα αυτό που παρουσιάζει η συγκεκριμένη μέθοδος, στην πράξη εφαρμόζεται εξόρυξη του λιγνίτη σύμφωνα με τη μέθοδο 1 για δύο σημαντικούς λόγους:

α) Διότι υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης των ίδιων καδοφόρων εκσκαφών που είναι ήδη διαθέσιμοι από τη φάση της εξόρυξης-αφαίρεσης των υπερκειμένων, αποφεύγοντας έτσι την επένδυση για την αγορά επιπλέον εξοπλισμού

β) Διότι η δυναμικότητα εξόρυξης του καδοφόρου εκσκαφέα είναι κατά πολύ μεγαλύτερη (σχεδόν 13 φορές) από την αντίστοιχη του ντιζελοκίνητου εκσκαφέα, γεγονός που σημαίνει ότι στον ίδιο χρόνο η ποσότητα λιγνίτη που εκσκάπτεται από τον καδοφόρο εκσκαφέα είναι πολλαπλάσια από αυτή του ντιζελοκίνητου εκσκαφέα

Τέλος, όσον αφορά τις μεθόδους 3 και 4, ισχύουν τα αντίστοιχα όπως και στην περίπτωση της εξόρυξης των υπερκειμένων. Η χρήση του ντιζελοκίνητου εξοπλισμού για την εξόρυξη και μεταφορά του λιγνίτη επιφέρει τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική ζημιά (μέθοδος 3), ενώ η εξόρυξη με άλλου είδους ηλεκτροκίνητο εξοπλισμό (μέθοδος 4) προκαλεί παραπλήσια επίπτωση με αυτή της χρήσης καδοφόρου εκσκαφέα (μέθοδος 1).

4.2.4 Περιβαλλοντική αποκατάσταση (Rehabilitation-Topsoil placement)

Για την επίτευξη αυτής της εργασίας, που ολοκληρώνει τον κύκλο εξορύξεων του ορυχείου, απαιτείται η συνεργασία των ντιζελοκίνητων μηχανημάτων του πίνακα 4.4 στον οποίο

παρουσιάζονται και τα βασικά χαρακτηριστικά για τη μοντελοποίησή τους, η οποία πραγματοποιείται σύμφωνα με τα βήματα της παραγράφου 4.2.1.

Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά έκτακτου εξοπλισμού (CAT, 2006)

Τύπος Μηχανήματος	Ισχύς Μηχανής hp	Φορτίο					
		LOW		MEDIUM		HIGH	
		Lt/h	m ³ /10min	Lt/h	m ³ /10min	Lt/h	m ³ /10min
Sid steer loader	61-84	7,5	2,66	10,5	2,66	13,5	2,66
	84-94	8,9	17	11,5	17	14	17
Track type tractor	81-185	14,975	1,6	15,2	1,6	24,725	1,6
	185-200	21,717	8,43	28,217	8,43	34,817	8,43
	200-448	36,267	18,5	43,2	18,5	53,25	18,5
	448-928	77,033	20	100,77	20	124,1	20
Wheel dozer	253-354	33,8	7,9	42	15,05	51	22,2
	354-500	40	16,1	57	23,4	70	30,7
	500-800	51	25	62	35	73	45
Motor grader	158-268	15,7	3,7	19	3,7	24,5	3,7
	268-294	17,8	5	24	5	31	5
	294-533	30	5	35	5	50	5
Wheel loader and integrated tool carrier	52-217	7	1,2	9	1,2	13	1,2
	217-393	16	1,534	21	1,534	26	1,534
	393-500	80	2	110	2	130	2
Rehabilitation of natural environment equipment	-	14	10	14	10	14	10

Η μοντελοποίηση ολόκληρης της εργασίας της Περιβαλλοντικής αποκατάστασης (Rehabilitation-Topsoil placement) υλοποιείται με τον ίδιο τρόπο όπως και στην περίπτωση της Εκχέρωσης-Αφαίρεσης του επιφανειακού στρώματος εδάφους και της γεώτρησης και ανατίναξης των υπερκειμένων και του λιγνιτικού κοιτάσματος. Ωστόσο, στην προκειμένη περίπτωση, θεωρείται ότι καθένα από τα 6 διαφορετικά είδη μηχανημάτων που συμβάλλουν στη συγκεκριμένη εργασία, εργάζονται στο 1/6 της συνολικής έκτασης του ορυχείου όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2.

Επιπλέον, επειδή στη συγκεκριμένη εργασία ως μονάδα αναφοράς θεωρείται το ένα κιλό υλικών (overburden) που εναποτίθεται στο έδαφος (1 kg_{dump.}) και όχι το 1 m³_{exc.}, η δυναμικότητα των μηχανημάτων πρέπει να αναχθεί στο 1 kg_{dump.}. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η εύρεση του ρυθμού απόθεσης των υλικών που προκύπτει από το άθροισμα του ρυθμού Εκχέρωσης-Αφαίρεσης του επιφανειακού στρώματος εδάφους και του ρυθμού Αφαίρεσης-Εξόρυξης των υπερκειμένων υλικών, έτσι ώστε να προκύψουν οι συντελεστές m³_{exc.}/kg_{dump.} των μηχανημάτων.



Σχήμα 4.2: Κατανομή ντιζελοκίνητων μηχανημάτων στο ορυχείο για την εργασία της περιβαλλοντικής αποκατάστασης

4.3 Μοντελοποίηση θερμοηλεκτρικού σταθμού στο SimaPro v.7.3.3

Η μοντελοποίηση του θερμοηλεκτρικού σταθμού στο λογισμικό SimaPro v.7.3.3 βασίζεται στα στοιχεία που αφορούν τη νέα μονάδα V του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας (ΔΕΗ, 2013b), αλλά και στο ήδη υπάρχον «process» που αφορά ελληνικούς λιγνιτικούς σταθμούς και είναι ενσωματωμένο στην βάση δεδομένων Ecoinvent του SimaPro v.7.3.3 με μονάδα αναφοράς την 1kWe. Η εγκατάσταση προβλέπεται να πραγματοποιηθεί στην εξαντλημένη πλέον, από πλευράς αποθεμάτων, περιοχή του λιγνιτωρυχείου Κομάνου εντός των ευρύτερων ορίων του λιγνιτικού κέντρου Πτολεμαΐδας στη Δυτική Μακεδονία (ΔΕΗ, 2013b).

Η επιλογή της συγκεκριμένης μονάδας για ανάλυση, οφείλεται στην προοπτική αξιολόγησης των δυνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που πρόκειται να επιφέρει μία μελλοντική εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κυριότερες παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη στη μοντελοποίηση είναι ο καθαρός συνολικός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της μονάδας, η ποιότητα του καυσίμου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, καθώς επίσης και οι αποδόσεις της τεχνολογίας αντιρρύπανσης (H. Nguyen et al., 2008; E. Κακαράς et al., 2013) που πρόκειται να εγκατασταθεί και να λειτουργήσει παράλληλα με τη νέα μονάδα, όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Βασικές παράμετροι λειτουργίας της νέας μονάδας Πτολεμαΐδα V (ΔΕΗ, 2013b)

Όνομαστική ισχύς (MWe)	660	
Καθαρά παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (MWe)	615,7	
Καθαρός συνολικός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (%)	41,5	
	Διάμετρος Σωματιδίων	Βαθμός απόδοσης
Βαθμός απόδοσης ηλεκτροστατικών φίλτρων (ESP) (%)	>10 μm	99,9
	2,5-10 μm	99,3
	<2,5 μm	98,7
Βαθμός απόδοσης εκλεκτικής καταλυτικής αντίδρασης (SCR) (%)	90	
Βαθμός απόδοσης αποθείωσης καυσαερίων (FGD) (%)	98	
Ετήσιες ώρες λειτουργίας (h)	7800	

Έτη ωφέλιμης ζωής (γ)	40
Επιτόκιο αναγωγής (Κόστος κεφαλαίου) (%)	6

Σχετικά με τη μοντελοποίηση των συστημάτων SCR και FGD που ενσωματώνονται ως «sub-processes» στο βασικό «process» της μονάδας, πρέπει να αναφερθεί ότι λήφθηκαν έτοιμα από την Ecoinvent. Σε αυτά τα «sub-processes» περιλαμβάνεται η κατασκευή των συστημάτων αντιρρύπανσης, η καταναλισκόμενη ενέργεια κατά τη λειτουργία τους, καθώς επίσης και η διαχείριση του κατακρατούμενου ρύπου (συνήθως σε ένυδρο διάλυμα). Ως μονάδα αναφοράς για τη μοντελοποίηση των συστημάτων αυτών λαμβάνεται το $1 \text{ kg}_{\text{pollutant retained}}$ (κιλό ρύπου που κατακρατείται). Όσον αφορά το σύστημα κατακράτησης της ιπτάμενης τέφρας (ESP), λόγω έλλειψης δεδομένων σχετικά την κατασκευή του, τόσο στη βιβλιογραφία όσο και στη βάση δεδομένων Ecoinvent του SimaPro v.7.3.3, λήφθηκε υπόψη μόνο το αποτέλεσμα της λειτουργίας του (μείωση εκπομπή μικροσωματιδίων), η οποία ενσωματώνεται στο βασικό «process» της μονάδας που εξετάζεται.

4.3.1 Η σημασία της ξήρανσης και της κονιοποίησης του καυσίμου

Όπως είναι γνωστό, ο φυσικός λιγνίτης προερχόμενος από τους χώρους εναπόθεσης των ορυχείων υφίσταται ένα πρώτο στάδιο κατεργασίας σε ειδικούς σπαστήρες, όπου επιτυγχάνονται μέσες διάμετροι μικρότερες των 50mm. Η διαδικασία της κονιοποίησης καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική, προκειμένου να πραγματοποιείται όσο το δυνατό ομοιόμορφη ανάμιξη κατά την καύση, αφού έχουμε κοκκομετρία μικρότερη του 1mm και μέσες διαμέτρους περίπου της τάξης των 200 μm , με αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλότερων θερμοκρασιών στο εσωτερικό της εστίας και τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου καύσης. Βασικά στοιχεία ενός κύκλου κονιοποίησης είναι ο μύλος κονιοποίησης, ο διανομέας του καυσίμου, ο διαχωριστής του κονιοποιημένου καυσίμου και ο φυσητήρας (ή ανεμιστήρας). Ανάλογα με το είδος και την απαραίτητη τελική κοκκομετρία του καυσίμου, τις προσμίξεις και τα αδρανή συστατικά, επιλέγεται αντίστοιχος τύπος μύλου, ώστε να επιτυγχάνεται ο απαιτούμενος βαθμός κονιοποίησης, καθώς και η ομοιόμορφη ανάμιξη του καυσίμου. Οι συνήθεις τύποι μύλων περιλαμβάνουν σύστημα διαχωρισμού με το οποίο ρυθμίζεται το μέγεθος του κόκκου, με την επαναφορά του καυσίμου στο μύλο. Ο μηχανικός διαχωρισμός με τη συνεχή επαναφορά των βαρύτερων κλασμάτων καυσίμου έχει ως αποτέλεσμα, τη λεπτότερη κονιοποίηση αυτού. Η έξοδος του κονιοποιημένου καυσίμου γίνεται εφαιπτομενικά και με προσαγωγή κατάλληλων αγωγών είναι δυνατόν να γίνεται τροφοδοσία του καυσίμου σε διαφορετικά επίπεδα στο λέβητα (Δ.Μ. Σταμάτη, 2007).

Η ξήρανση (προξηρανση) είναι με τη σειρά της μια εξίσου σημαντική διεργασία, κυρίως σε περιπτώσεις καυσίμων με υψηλό ποσοστό υγρασίας, όπως οι φαιάνθρακες, όπου η περιεχόμενη υγρασία είναι της τάξης του 50-60%, με αποτέλεσμα η ξήρανση να επιβάλλεται για την καλύτερη απόδοση της καύσης. Πραγματοποιείται συνήθως, με θερμό αέρα ή καυσαέριο, είτε σε περιστρεφόμενα τύμπανα, είτε, όπως συμβαίνει στις περισσότερες των περιπτώσεων, κατά τη διαδρομή του καυσίμου από το σιλό στο μύλο κονιοποίησης και κατά τη διάρκεια παραμονής του σε αυτόν. Εάν το ποσοστό υγρασίας είναι έως της τάξεως του 40%, γίνεται ξήρανση με αέρα, ενώ για μεγαλύτερες περιεκτικότητες υγρασίας, χρησιμοποιούνται καυσαέρια. Στον πίνακα 4.6 δίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές θερμοκρασιών για την ξήρανση φαιανθράκων και λιθανθράκων.

Πίνακας 4.6: Ενδεικτικές τιμές θερμοκρασιών κατά την ξήρανση φαιανθράκων και λιθανθράκων (N. Παπαγεωργίου, 1991)

	Φαιάνθρακες (λιγνίτης)	Λιθάνθρακες
Ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας	>45%	<10%
Θερμοκρασία στην είσοδο του μύλου κονιοποίησης	~ 500 °C	~ 200 °C
Θερμοκρασία μείγματος	100 °C	100÷130 °C

καυσαερίων-υδρατμών μετά το
διαχωριστή (μέσο ξήρανσης
αέρας)

Θερμοκρασία μείγματος
καυσαερίων-υδρατμών μετά το
διαχωριστή (μέσο ξήρανσης
καυσαέριο)

200 °C

200 °C

Η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης μπορεί να φτάσει και τους 360 °C, ειδικά σε περιπτώσεις πολύ μικρής περιεκτικότητας σε πτητικά. Ιδιαίτερη σημασία έχει η θερμοκρασία του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών, γιατί, όταν τα καυσαέρια φτάσουν το σημείο κορεσμού τους σε υδρατμούς, δεν έχουν πια την ικανότητα να απορροφήσουν υγρασία, με αποτέλεσμα η υπόλοιπη υγρασία να παραμένει στον κόκκο του κονιοποιημένου καυσίμου. Γι' αυτό προτιμάται η θερμοκρασία του μείγματος να είναι πάνω από 100 °C, προς αποφυγή υγροποίησης των υδρατμών των καυσαερίων. Συνήθως τα καυσαέρια λαμβάνονται από το ανώτερο σημείο του θαλάμου καύσης, δηλαδή σε θερμοκρασία 800-1100 °C, ώστε ανάλογα με το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας και τη διαθέσιμη επιφάνεια συναλλαγής του καυσίμου να μην έχουμε πτώση της θερμοκρασίας τους κάτω των 100 °C (N. Παπαγεωργίου, 1991).

4.3.2 Περιγραφή τεχνολογιών ξήρανσης

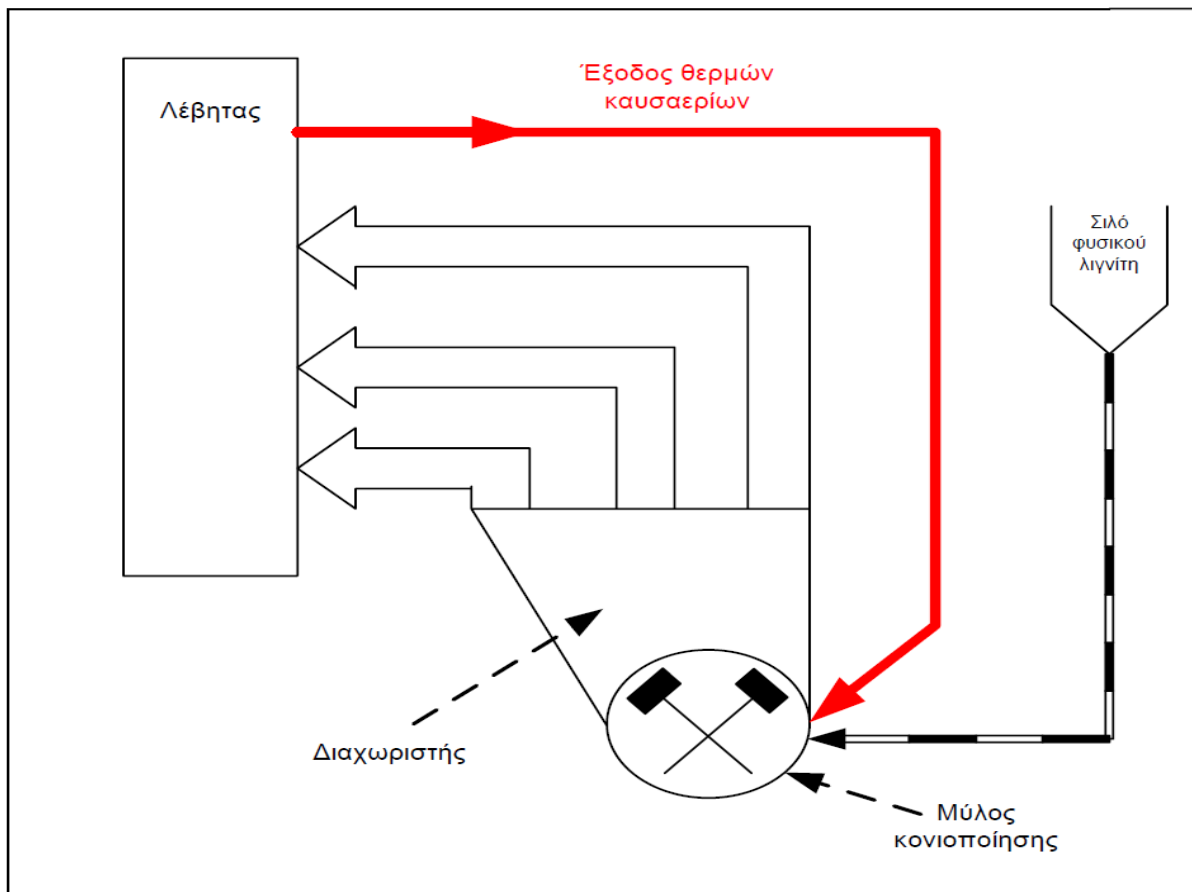
Είναι γεγονός ότι ο τομέας ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα είναι ο κύριος υπεύθυνος για την αύξηση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου κατά τις τελευταίες δεκαετίες και συνεπώς η αύξηση του βαθμού απόδοσης των υφιστάμενων και μελλοντικών ανθρακικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι στόχος πρωταρχικής σημασίας. Μεταξύ των υπό εξέταση τεχνολογιών αναβάθμισης λιγνιτικών σταθμών για την αύξηση του βαθμού απόδοσης και τη μείωση εκπομπών CO₂, σημαντικό δυναμικό έχουν και οι τεχνολογίες προξήρανσης λιγνίτη. Οι τεχνολογίες προξήρανσης αποτελούν επίσης αναπόσπαστο τμήμα σε μελλοντικούς λιγνιτικούς σταθμούς, με τεχνολογία καύσης με καθαρό οξυγόνο και πλήρη δέσμευση των εκπομπών CO₂ (M. Αγρανιώτης, 2010).

Η συμβατική διεργασία ξήρανσης στα σημερινά λιγνιτικά εργοστάσια είναι λειτουργικά ενοποιημένη με τη διεργασία κονιοποίησης και λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό των μύλων κονιοποίησης, συνήθως με την εισαγωγή καυσαερίων προερχόμενων από την εστία. Όπως αναφέρθηκε ήδη, για την περίπτωση του λιγνίτη, τα θερμά αυτά καυσαέρια έχουν θερμοκρασία περίπου 1000 °C κατά την έξοδό τους από τον λέβητα και η θερμοκρασία στην είσοδο του μύλου κονιοποίησης μειώνεται στους 450 °C. Ωστόσο, ανάλογα με το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας, καθώς και την επιφάνεια συναλλαγής του καυσίμου, ενδέχεται να υπάρχουν διαφοροποιήσεις.

Μια ακόμα διάκριση των διαφόρων μεθόδων ξήρανσης μπορεί να γίνει με βάση το μείγμα καυσαερίων-υδρατμών που προκύπτει κατά τη διάρκεια της ξήρανσης-κονιοποίησης. Έτσι υπάρχουν εγκαταστάσεις όπου το μείγμα τροφοδοτείται στο εσωτερικό του λέβητα (κλειστός κύκλος κονιοποίησης) ή σε διαφορετική περίπτωση εξέρχεται στην ατμόσφαιρα (ανοικτός κύκλος κονιοποίησης) (N. Παπαγεωργίου, 1991).

4.3.3 Κλειστός κύκλος κονιοποίησης

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η περίπτωση του κλειστού κύκλου κονιοποίησης με θερμά καυσαέρια. Η ξήρανση του καυσίμου πραγματοποιείται στο εσωτερικό του μύλου κονιοποίησης με καυσαέρια από το ανώτερο σημείο του θαλάμου καύσης. Το μείγμα καυσαερίων-υδρατμού μετά τη ξήρανση τροφοδοτείται στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης, όπως και το καύσιμο, σε διαφορετικά επίπεδα ανάλογα με τη θερμοκρασία αυτών, καθώς και την κοκκομετρία του καυσίμου.

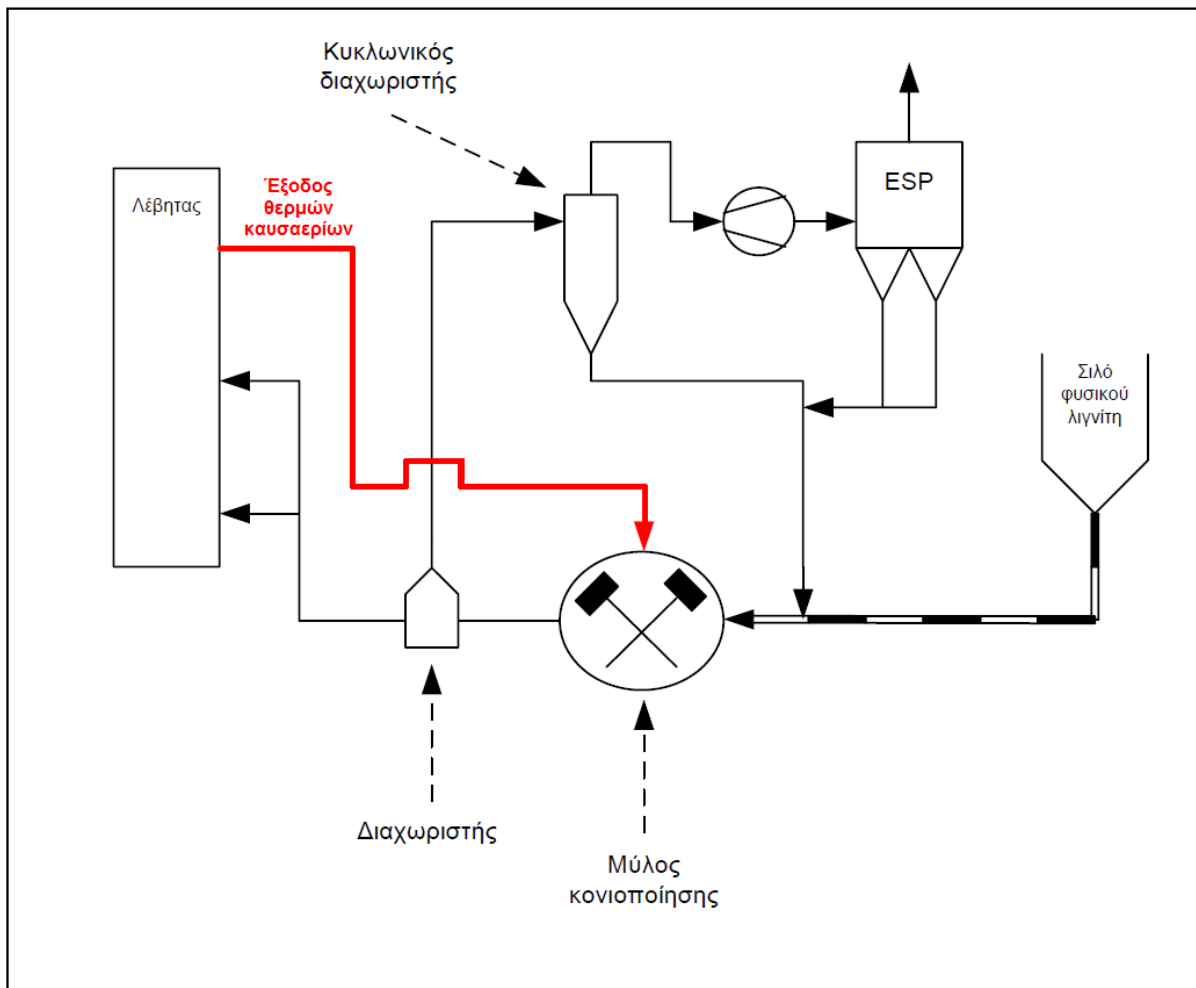


Σχήμα 4.3: Κλειστός κύκλος κονιοποίησης με θερμά καυσαέρια θαλάμου καύσης (Δ.Μ. Σταμάτη, 2007)

4.3.4 Ανοικτός κύκλος κονιοποίησης

Στην περίπτωση του ανοικτού κύκλου κονιοποίησης, το μείγμα υδρατμών-καυσαερίων, που προέρχεται από την ξήρανση του καυσίμου, μετά από μηχανικό καθαρισμό και κατάλληλη αφαίρεση της περιεχόμενης σκόνης σε ηλεκτροστατικά φίλτρα, οδηγείται στην ατμόσφαιρα μέσω της καπνοδόχου όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.4. Ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου ξήρανσης είναι το γεγονός ότι οι υδρατμοί που προέρχονται από την ατμοποίηση της περιεχόμενης υγρασίας στο φυσικό λιγνίτη, δεν προσάγονται στην εστία, όπου απορροφούν θερμότητα, ψύχοντάς την, αλλά εξάγονται στο περιβάλλον. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αποτελεί ο ΑΗΣ Μεγαλόπολης.

Υπάρχουν εγκαταστάσεις όπου το καύσιμο ξηραίνεται από σημαντικό τμήμα των καυσαερίων. Σε αυτή την περίπτωση, τα καυσαέρια λαμβάνονται από τον Ατμοπαραγωγό, με θερμοκρασία 200-300 °C, ανάλογα με την υγρασία του καυσίμου. Αυτό έχει ως συνέπεια, τη μείωση της επιφάνειας του προθερμαντήρα ή ακόμα και την κατάργησή του. Επιπλέον, επειδή η θερμοκρασία λήψης των καυσαερίων είναι ήδη μικρή, η θερμοκρασία τους στην έξοδο από το σύστημα ξήρανσης είναι ακόμα μικρότερη, σχεδόν ίση με τη θερμοκρασία κόρου του περιεχόμενου υδρατμού, κι έτσι οι απώλειες του Ατμοπαραγωγού, λόγω καυσαερίων μειώνονται στο ελάχιστο. Ωστόσο ένα σημείο προς διερεύνηση είναι το ενδεχόμενο ρύπανσης της περιοχής από την απαγωγή στην ατμόσφαιρα ψυχρών καυσαερίων και υδρατμών, με ιδιαίτερα υψηλή περιεκτικότητα σε θείο.



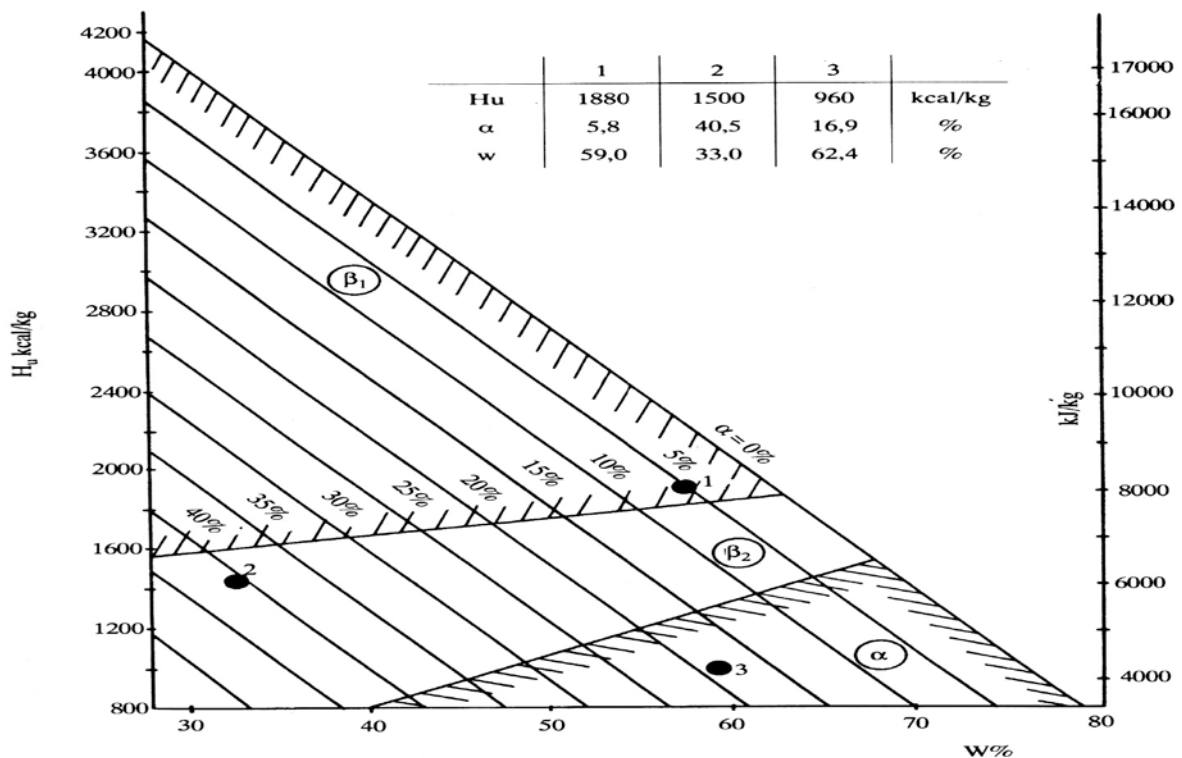
Σχήμα 4.4: Ανοικτός κύκλος κονιοποίησης με θερμά καυσαέρια λέβητα (Δ.Μ. Σταμάτη, 2007)

4.3.5 Εκλογή συστήματος ξήρανσης και κονιοποίησης

Σε καύσιμα τα οποία παρουσιάζουν υψηλή περιεκτικότητα υγρασίας, όπως ο λιγνίτης, η εκλογή του συστήματος ξήρανσης καθώς και το σημείο προσαγωγής του μείγματος καυσαερίων - υδρατμών και σκόνης στην εστία, έχει μεγάλη επίδραση στη διατήρηση της καύσης και τις διαστάσεις των βοηθητικών εξοπλισμών του ατμοπαραγωγού. Αυτό συμβαίνει διότι τόσο το σύστημα ξήρανσης όσο και το σημείο προσαγωγής του μείγματος καυσαερίων - υδρατμών στην εστία, επηρεάζει έντονα τα θερμοκρασιακά πεδία εντός της εστίας, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται η μέγιστη θερμοκρασία καύσης οι επιφάνειες συναλλαγής των προθερμαντήρων και υπερθερμαντήρων με αντίκτυπο στην μέγιστη ατμοπαραγωγή της μονάδας, ειδικά κατά τη λειτουργία της στα μερικά φορτία.

Σε γενικές γραμμές θα μπορούσε να αναφερθεί ότι ο ανοικτός κύκλος ξήρανσης και κονιοποίησης παρουσιάζει πλεονεκτήματα, αναφορικά με τις διαστάσεις του ατμοπαραγωγού, των αγωγών των καυσαερίων και του προθερμαντήρα αέρα. Επίσης πλεονεκτεί λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας των καυσαερίων κατά την απαγωγή τους στην ατμόσφαιρα και της υψηλότερης θερμοκρασίας καύσης που παρουσιάζεται στην εστία του ατμοπαραγωγού, η οποία είναι αναγκαία ειδικά όταν χρησιμοποιούνται καύσιμα μικρής θερμογόνου δύναμης (N. Παπαγεωργίου, 1991).

Στο διάγραμμα 4.4 παρουσιάζονται οι περιοχές στις οποίες είναι σκόπιμη η χρησιμοποίηση του ενός ή του άλλου συστήματος ξήρανσης, αναφορικά με τη θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου καθώς και την περιεκτικότητά του σε υγρασία



Διάγραμμα 4.4: Περιοχές χρησιμοποίησης ανοικτού ή κλειστού κύκλου ξήρανσης και κονιοποίησης
 α) Ανοικτός κύκλος κονιοποίησης: Διαχωρισμός του μείγματος καυσαερίων - υδρατμών και σκόνης καυσίμου
 β) Κλειστός κύκλος κονιοποίησης: (1) Άμεση προσαγωγή του μείγματος καυσαερίων - υδρατμών και σκόνης καυσίμου, (2) Άμεση προσαγωγή με διαχωρισμό του μείγματος καυσαερίων - υδρατμών και προσαγωγή αυτών στο άνω μέρος του ατμοπαραγωγού (N. Παπαγεωργίου, 1991)

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι ο ανοικτός κύκλος ξήρανσης και κονιοποίησης, προτιμάται για καύσιμα με ποσοστό υγρασίας πάνω από 40% και μικρής θερμογόνου δύναμης έως 6280 KJ/kg, ενώ κλειστός κύκλος ξήρανσης με άμεση προσαγωγή του καυσίμου, με διαχωρισμό του μείγματος καυσαερίων - υδρατμών και η προσαγωγή αυτών στο ανώτερο τμήμα της εστίας, χρησιμοποιείται για καύσιμα με ποσοστό υγρασίας μέχρι 70% και θερμογόνου δύναμης από 3347,2 έως 7112,8 KJ/kg. Για καύσιμα με μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη από 6694,4 έως 17572,8 KJ/kg χρησιμοποιείται κλειστός κύκλος ξήρανσης και κονιοποίησης με άμεση προσαγωγή του καυσίμου χωρίς προσαγωγή του μείγματος καυσαερίων - υδρατμών στο ανώτερο τμήμα της εστίας του ατμοπαραγωγού.

Ωστόσο, ο υφιστάμενος τρόπος ξήρανσης έχει δύο σημαντικά μειονεκτήματα από ενεργειακή άποψη:

- Η ανακυκλοφορία θερμού καυσαερίου, σε θερμοκρασία περίπου 1000°C, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στην ξήρανση, οδηγεί σε υψηλές εξεργειακές απώλειες (Εξέργεια = το μέγιστο ποσοστό της ενέργειας που κάτω από δοθείσες συνθήκες μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμο έργο), αφού η απαιτούμενη θερμοκρασία για την ξήρανση είναι περίπου 100°C.
- Η παροχή ατμού που προέρχεται από την υγρασία του λιγνίτη που ατμοποιήθηκε δεν μπορεί να αξιοποιηθεί περαιτέρω ενεργειακά, αφού μεταφέρεται μαζί με τον ξηρό λιγνίτη και εισέρχεται στον λέβητα.

Με σκοπό την βελτίωση του βαθμού απόδοσης των λιγνιτικών μονάδων οι δύο προαναφερόμενες πτυχές πρέπει να εξεταστούν. Η τεχνολογία προξήρανσης λιγνίτη, προβλέπει τη χρήση ατμού χαμηλής θερμοκρασίας που απομαστεύεται από τον ατμοστρόβιλο και την αντικατάσταση αντίστοιχα του συστήματος ξήρανσης με θερμά καυσαέρια. Διάφορες τεχνολογίες προξήρανσης έχουν διερευνηθεί σε πειραματική και ημιβιομηχανική κλίμακα στο παρελθόν οι κυριότερες των

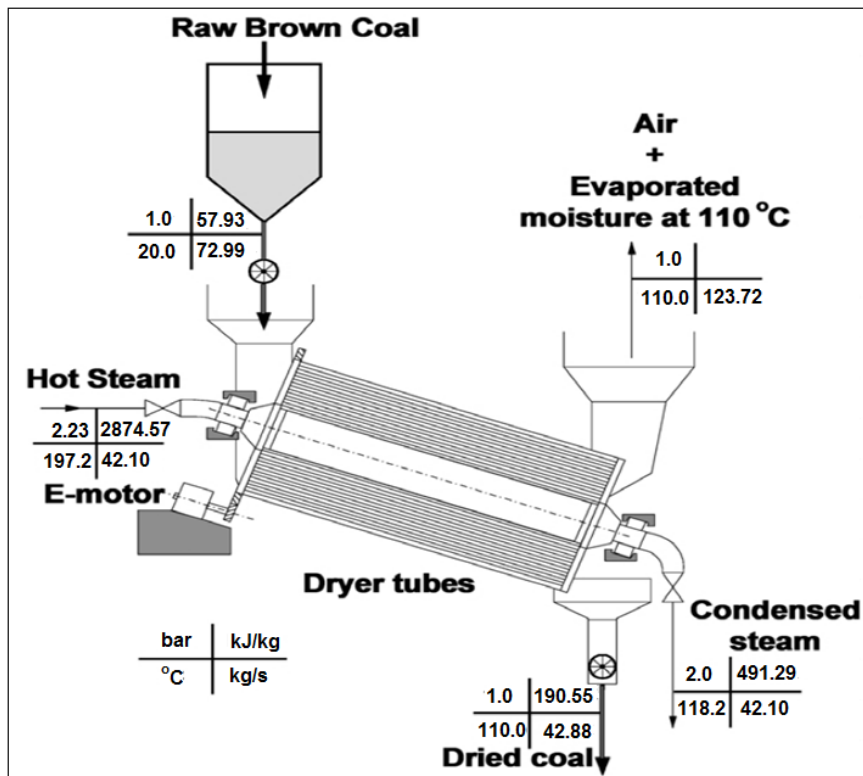
οποίων είναι ή ξήρανση με περιστρεφόμενους ξηραντήρες αυλών, η ξήρανση με μηχανική εν θερμώ συμπίεση και η ξήρανση σε ρευστοποιημένη κλίνη. Από τις παραπάνω, η πλέον ώριμη τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί με μεγάλη επιτυχία στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής είναι η ξήρανση σε ατμοσφαιρική ρευστοποιημένη κλίνη (M. Αγρανιώτης, 2010). Ωστόσο, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετάται η περίπτωση της προξήρανσης σε περιστροφικούς ξηραντήρες αυλών, αν και κατά κύριο λόγο αυτοί απαντώνται σε εφαρμογές της χημικής βιομηχανίας.

4.3.6 Περιστροφικοί ξηραντήρες αυλών

Οι περιστροφικοί ξηραντήρες αυλών έχουν μικρότερο κόστος, ικανοποιητική θερμική απόδοση και ενδείκνυνται κυρίως για στερεά καύσιμα μικρής σχετικά κοκκομετρίας. Βρίσκουν κυρίως εφαρμογή στην παραγωγή μπρικετών που χρησιμοποιούνται σε τιμμεντοβιομηχανίες ή ως καύσιμη ύλη (κωκ). Αποτελούνται από περιστρεφόμενο κεκλιμένο κύλινδρο μήκους $7,5 \div 15\text{m}$, διαμέτρου $2 \div 6\text{m}$, στο εσωτερικό του οποίου βρίσκεται μεγάλος αριθμός σωλήνων (αυλών), μικρής διαμέτρου, στους οποίους ρέει ο κονιοποιημένος φυσικός λιγνίτης. Στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές, υπάρχουν περίπου 1600 σωλήνες στο εσωτερικό του κυλίνδρου, με αποτέλεσμα να μπορούμε να έχουμε μια επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας της τάξης των 4000m^2 . Ο ξηραντήρας τροφοδοτείται με ατμό, συνήθως υπέρθερμο, από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης, που κυκλοφορεί ανάμεσα στους αγωγούς με το φυσικό λιγνίτη επιτυγχάνοντας την ατμοποίηση της περιεχόμενης υγρασίας αυτού, σε συνδυασμό με την πολύ αργή περιστροφική κίνηση του κεκλιμένου κυλίνδρου. Η ύπαρξη κατάλληλων εδράνων για τη στήριξη του κυλίνδρου, καθώς και ενός συστήματος κινητήρα – οδοντωτών τροχών για την επίτευξη της περιστροφικής κίνησης είναι απαραίτητη. Ο υδρατμός που δημιουργείται από την αφύγρανση του λιγνίτη, εξάγεται από το επάνω μέρος του κυλίνδρου, οδηγείται σε ηλεκτροστατικά φίλτρα, όπου καθαρίζεται από τα σωματίδια καυσίμου, και στη συνέχεια απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα (Δ.Μ. Σταμάτη, 2007). Τα σημαντικότερα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των περιστροφικών ξηραντήρων παρουσιάζονται στον πίνακα 4.7, ενώ στο σχήμα 4.5 δίνεται μία τυπική διάταξη αυτών.

Πίνακας 4.7: Βασικά τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά περιστροφικών ξηραντήρων με αυλούς (E. Kakaras et al., 2002)

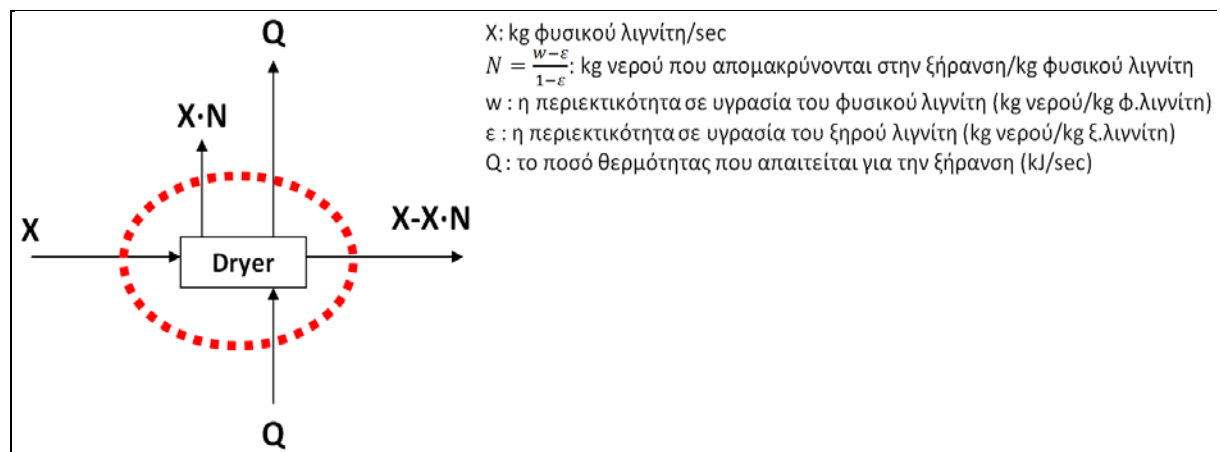
Βάρος ξηραντήρα	280 t
Μήκος τυμπάνου	8 m
Διάμετρος τυμπάνου	5,6 m
Διάμετρος αυλών	100 mm
Ρυθμός περιστροφής	$4 \div 10 \text{ min}^{-1}$
Μέγεθος σωματιδίων φυσικού λιγνίτη	$\leq 10 \text{ mm}$
Ειδική μάζα εξατμιζόμενης υγρασίας	$6,2 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$
Μάζα εξατμιζόμενης υγρασία	25 t/h
Θερμοκρασία ατμού απομάστευσης	180 °C
Πίεση ατμού απομάστευσης	$0,4 \div 0,5 \text{ Mpa}$
Ειδική κατανάλωση θερμικής ενέργειας για ξήρανση	$3000 \text{ kJ/kg H}_2\text{O}$
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας	$50 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Δυναμικότητα ξηραντήρα	21 t/h
Βαθμός απόδοσης ξήρανσης	75%



Σχήμα 4.5: Τυπική διάταξη περιστροφικού ξηραντήρα αυλών (E. Kakaras et al., 2002)

4.3.7 Προσδιορισμός θερμότητας ξήρανσης

Για τον προσδιορισμό της θερμότητας που προσάγεται στον περιστροφικό ξηραντήρα και γενικά σε κάθε σύστημα ξήρανσης, απαιτούνται ισολογισμοί μάζας και ενέργειας. Γενικότερα, η θερμότητα ξήρανσης χρησιμοποιείται για την ατμοποίηση της υγρασίας, την υπερθέρμανση του παραγόμενου ατμού, τη θέρμανση του καυσίμου και της παραμένουσας υγρασίας από τη θερμοκρασία αναγωγής μέχρι τη θερμοκρασία εξόδου από το σύστημα ξήρανσης (N. Παπαγεωργίου, 1991). Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται το τμήμα του ξηραντήρα με τις εισόδους και τις εξόδους του και στη συνέχεια καταγράφονται τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας που ισχύουν.



Σχήμα 4.6: Ισοζύγια μάζας και ενέργειας ξηραντήρα

Ισολογισμός μάζας:

$$X = (X - X \cdot N) + X \cdot N \stackrel{(:X)}{\implies} 1 = (1 - N) + N \quad (4.2)$$

Όμως, η υπόλοιπη ποσότητα του ξηραθέντος καυσίμου (1-N) έχει ακόμα (w-N) kg υγρασία και (1-w) kg ξηρού καυσίμου, δηλαδή (1-N) = (w-N) + (1-w), άρα η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$1 = (w - N) + (1 - w) + N \quad (4.3)$$

Ισολογισμός ενέργειας:

$$Q + X \cdot cp \cdot \theta_1 = X \cdot N \cdot (r + cp_D \cdot \theta_2) + X \cdot (1 - N) \cdot cp \cdot \theta_2 \stackrel{X}{\Rightarrow}$$

$$q + 1 \cdot cp \cdot \theta_1 = N \cdot (r + cp_D \cdot \theta_2) + (1 - N) \cdot cp \cdot \theta_2 \xrightarrow{(4.2) \text{ και } (4.3)}$$

$$q + (w-N) \cdot cp_W \cdot \theta_1 + (1-w) \cdot cp_K \cdot \theta_1 + N \cdot cp_D \cdot \theta_1 = N \cdot (r + cp_D \cdot \theta_2) + (w-N) \cdot cp_W \cdot \theta_2 + (1-w) \cdot cp_K \cdot \theta_2 \Rightarrow$$

$$q = (N \cdot (r + cp_D \cdot (\theta_2 - \theta_1)) + (w-N) \cdot cp_W \cdot (\theta_2 - \theta_1) + (1-w) \cdot cp_K \cdot (\theta_2 - \theta_1)) \cdot (1 + (1-\eta)) \quad (4.4)$$

Όπου,

cp_w : η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού (kJ/kg νερού °C)

cp_k : η ειδική θερμοχωρητικότητα του λιγνίτη (kJ/kg λιγνίτη °C)

cp_D : η ειδική θερμοχωρητικότητα του ατμού (kJ/kg ατμού °C)

η : ο βαθμός απόδοσης της ξήρανσης

θ_2 : η θερμοκρασία εξόδου του λιγνίτη από τον ξηραντήρα

θ_1 : η θερμοκρασία εισόδου του λιγνίτη στον ξηραντήρα

q : το ποσό θερμότητας που απαιτείται για την ξήρανση (kJ/kg φυσικού λιγνίτη)

4.3.8 Εναλλακτικές περιπτώσεις μικτής καύσης

Όπως αναφέρθηκε και στη παράγραφο 3.2.1, τρεις εναλλακτικές περιπτώσεις καύσης εξετάζονται και συγκρίνονται ως προς τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις: α) Καύση φυσικού λιγνίτη, β) Μικτή καύση φυσικού λιγνίτη με 30% θερμική υποκατάστατη με προ-ξηραμένο λιγνίτη και γ) Μικτή καύση φυσικού λιγνίτη με 6% θερμική υποκατάστατη με βιομάζα άχυρου σιτηρών (straw). Επειδή σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις χρησιμοποιείται διαφορετικό καύσιμο, και μάλιστα ανάμειξη διαφορετικών καυσίμων στις περιπτώσεις β και γ, η ποιότητα και η σύσταση του τελικού ισοδύναμου καυσίμου που καίγεται εντός του λέβητα είναι διαφορετική.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι ένα ποσοστό θερμικής υποκατάστασης γύρω στο 25-30% θεωρείται σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία ως το μέγιστο εφικτό ποσοστό θερμικής υποκατάστασης σε έναν ήδη υφιστάμενο λέβητα χωρίς την εφαρμογή εκτεταμένων τροποποιήσεων στη γεωμετρία του ή έστω μόνο με την εγκατάσταση ειδικών καυστήρων για την καύση ξηρού λιγνίτη. Περαιτέρω αύξηση του ποσοστού θερμικής υποκατάστασης ίσως προκαλέσει αστοχία των υλικών της εστίας κοντά στην περιοχή της φλόγας, εξαιτίας της αυξημένης θερμοκρασίας της φλόγας και της αντίστοιχης αυξημένης ροής θερμότητας. Επιπλέον λειτουργικά προβλήματα που μπορεί να ανακύψουν είναι οι επικαθίσεις και η αστοχία των τοιχωμάτων του λέβητα εξαιτίας της αυξημένης θερμοκρασίας της φλόγας και οι αυξημένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx) που ίσως ξεπερνούν τα υπάρχοντα θεσμοθετημένα όρια. Για την εξολοκλήρου καύση προξηραμένου λιγνίτη κατά 100%, απαιτείται εντελώς νέος σχεδιασμός του λέβητα, ο οποίος θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον μειωμένο όγκο των καυσαερίων στην περίπτωση της καύσης του προξηραμένου λιγνίτη και την υψηλότερη αδιαβατική θερμοκρασία της φλόγας. Ως εκ τούτου, ο νέος λέβητας θα πρέπει να έχει μικρότερη εγκάρσια τομή προκειμένου να διατηρηθεί η θερμοκρασία των καυσαερίων στα συνήθη όρια και μεγαλύτερο ύψος ούτως ώστε να είναι εφικτή η απορρόφηση της αυξημένης θερμικής ροής εξαιτίας ακτινοβολίας χωρίς κανέναν επιπλέον κίνδυνο υπερθερμάνσεως ή αστοχίας υλικών του λέβητα (M. Agraniotis et al., 2012).

Αξίζει επιπλέον να επισημανθεί ότι σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, θεωρείται ότι η ποσότητα λιγνίτη που εξορύσσεται στο λιγνιτωρυχείο αντιστοιχεί σε αυτήν ακριβώς που απαιτείται από τον θερμοηλεκτρικό σταθμό, επαυξημένη κατά ένα συντελεστή 20%, έτσι ώστε να υπάρχει ασφάλεια ως προς τη διαθέσιμη ποσότητα λιγνίτη σε περιπτώσεις διακοπής της εφοδιαστικής αλυσίδας. Δηλαδή, θεωρείται ότι το λιγνιτωρυχείο είναι πλήρως σχεδιασμένο για να καλύπτει τις ανάγκες του εξεταζόμενου θερμοηλεκτρικού σταθμού και για να βρίσκεται σε πλήρη αντιστοιχία με αυτόν. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται οι συστάσεις του τελικού ισοδύναμου καυσίμου που χρησιμοποιείται σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις καύσης.

Καύση φυσικού λιγνίτη (Περίπτωση αναφοράς)

Στη περίπτωση αυτή, ο λιγνίτης που εξορύσσεται από το ορυχείο οδηγείται στους μύλους του θερμοηλεκτρικού σταθμού και από εκεί στον λέβητα της μονάδας, χωρίς καμιά επιπλέον προεπεξεργασία. Συνεπώς, δύναται να θεωρηθεί ότι η σύσταση του καυσίμου που καίγεται στη μονάδα της Πτολεμαΐδας V αντιστοιχεί σε αυτή του φυσικού λιγνίτη όπως εξορύσσεται από το λιγνιτωρυχείο. Επιπλέον, επειδή η νέα μονάδα πρόκειται να εγκατασταθεί εντός των ορίων του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας (ΛΚΔΜ), ως σύσταση φυσικού λιγνίτη λαμβάνεται η μέση σύσταση λιγνίτη από την εν λόγω περιοχή όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8: Σύσταση φυσικού λιγνίτη ως έχει (μέση σύσταση λιγνίτη Δυτικής Μακεδονίας)

C	%w.t. (a.r.)	16,80
H	%w.t. (a.r.)	1,30
N	%w.t. (a.r.)	0,60
O	%w.t. (a.r.)	7,02
S	%w.t. (a.r.)	0,35
CO ₂	%w.t. (a.r.)	2,93
Τέφρα	%w.t. (a.r.)	18,00
Υγρασία	%w.t. (a.r.)	53,00
Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα (LHV)	kJ/kg	5087,26

Μικτή καύση φυσικού λιγνίτη με 30% θερμική υποκατάσταση με προ-ξηραμένο λιγνίτη

Στη περίπτωση αυτή, ένα ποσοστό της μάζας του φυσικού λιγνίτη, μετά τη κονιοποίηση του στους μύλους του θερμοηλεκτρικού σταθμού, υφίσταται προξηρανση προκειμένου να ελαττωθεί η περιεκτικότητά του σε υγρασία γύρω στο 20% w.t. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε έναν περιστρεφόμενο αυλωτό ξηραντήρα ατμού (Steam Tube Dryer-STD) που ενσωματώνεται στον κύκλο ατμού της μονάδας. Στόχος της προ-επεξεργασίας του φυσικού λιγνίτη είναι η κάλυψη κατά 30% της απαιτούμενης θερμότητας, για την ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου στη μονάδα, από προ-ξηραμένο λιγνίτη. Στον πίνακα 4.9 φαίνονται οι συστάσεις του προ-ξηραμένου λιγνίτη, καθώς επίσης και του ισοδύναμου καυσίμου στην περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού με προ-ξηραμένο λιγνίτη.

Πίνακας 4.9: Σύσταση προ-ξηραμένου λιγνίτη και ισοδύναμου καυσίμου (μικτή καύση φυσικού με προ-ξηραμένο λιγνίτη από 30% θερμική υποκατάσταση)

	Προ-ξηραμένος λιγνίτης	Ισοδύναμο καύσιμο
C	%w.t. (a.r.)	28,60
H	%w.t. (a.r.)	2,21
N	%w.t. (a.r.)	1,02
O	%w.t. (a.r.)	11,95
S	%w.t. (a.r.)	0,60

CO ₂	%w.t. (a.r.)	4,99	3,29
Τέφρα	%w.t. (a.r.)	30,64	20,19
Υγρασία	%w.t. (a.r.)	20,00	47,27
Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα (LHV)	kJ/kg	10378,67	6005,86

Μικτή καύση φυσικού λιγνίτη με 6% θερμική υποκατάστατη με βιομάζα άχυρου σιτηρών (straw)

Στη περίπτωση αυτή, ο λιγνίτης που εξορύσσεται από το ορυχείο αναμειγνύεται με τη βιομάζα που προκύπτει από τα υπολείμματα των εγγύτερων αγροτικών καλλιεργειών, και μάλιστα με το άχυρο των σιτηρών (straw), και το ισοδύναμο καύσιμο οδηγείται εντός του λέβητα αφού πρωτίστως κονιοποιηθεί. Τα πιο διαδεδομένα σιτηρά στον Ελλαδικό χώρο είναι το μαλακό (*Triticum aestivum*) και το σκληρό σιτάρι (*Triticum durum*). Το σιτάρι καλλιεργείται σε όλη σχεδόν τη Βόρεια Ελλάδα: 1,400,000 στρ. στη Θεσσαλία, 1,100,000 στρ. στη Δυτική Μακεδονία και 2,930,000 στρ. στην Κεντρική Μακεδονία. Αν και υπάρχουν καλλιέργειες και στη εγγύτερη περιοχή του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας, το παραγόμενο άχυρο χρησιμοποιείται κυρίως ως ζωοτροφή και υλικό στρωμνής. Επομένως, για την κάλυψη των αναγκών του σταθμού σε βιομάζα απαιτείται μια ευρύτερη γεωγραφική περιοχή (ENEP-BIO, 2012).

Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζονται οι περιοχές με το υψηλότερο δυναμικό σε άχυρο: η πρώτη Νομαρχία Λάρισας, η πρώτη Νομαρχία Κοζάνης, η πλησιέστερη περιοχή (~70 km) με επαρκή παραγωγή άχυρου και το ανατολικό μέρος της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας (πρώην Νομαρχίες Θεσσαλονίκης, Χαλκιδικής, Κιλκίς και Σερρών), οι οποίες βρίσκονται και στη μεγαλύτερη απόσταση από τον ΑΗΣ, από 100 μέχρι και πάνω από 300 km.



Σχήμα 4.7: Χάρτης περιοχών με υψηλή παραγωγή άχυρου σιτηρών (ENEP-BIO, 2012)

Επομένως, οι αποστάσεις που πρέπει να διανυθούν για τη μεταφορά του άχυρου στον ΑΗΣ Μελίτης είναι αρκετά μεγάλες και ενδεχομένως να απαιτείται ένα στάδιο πελλετοποίησης στην εφοδιαστική αλυσίδα, προκειμένου αυτή να καταστεί οικονομικά βιώσιμη. Στον πίνακα 4.10 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι διαθέσιμες ποσότητες άχυρου για τις βασικές περιοχές παραγωγής της πρώτης ύλης του σχήματος 4.7.

Πίνακας 4.10: Ενδεικτικά μεγέθη εφοδιαστικής αλυσίδας αχύρου σε μπάλες για διάφορες περιοχές προμήθειας (ENEP-BIO, 2012)

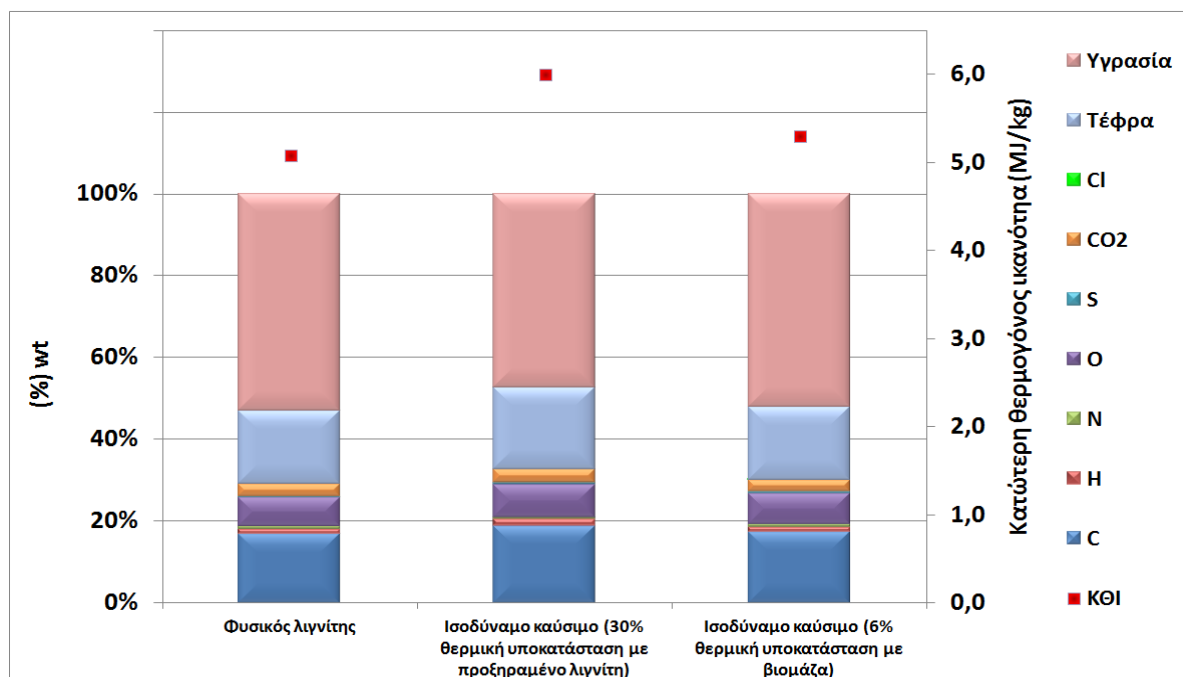
Περιοχή	Ενδεικτικές αποστάσεις (km)	Διαθέσιμες ποσότητες (t ar)
Κοζάνη	25 - 110	16235
Λάρισα	110 - 250	49364
Ανατολική Κεντρική Μακεδονία	120 - 300	91874
Σύνολο		157473

Στην περίπτωση λοιπόν της μικτής καύσης που εξετάζεται, στόχος της ανάμειξης του φυσικού λιγνίτη με τη βιομάζα είναι η κάλυψη κατά 6% της απαιτούμενης θερμότητας, για την ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου από βιομάζα. Όπως γίνεται φανερό και από τον πίνακα 4.10, εκτός των περιορισμών που αναφέρθηκαν παραπάνω σχετικά με το μέγιστο εφικτό ποσοστό θερμικής υποκατάστασης σε υφιστάμενο λέβητα, στην περίπτωση της μικτής καύσης με βιομάζα τίθεται ένας επιπλέον περιορισμός στο ποσοστό αυτό, που έχει να κάνει με τη διαθεσιμότητα της βιομάζας. Έτσι, το χαμηλό ποσοστό θερμικής υποκατάστασης που επιλέχθηκε στην παρούσα περίπτωση έχει να κάνει κυρίως με θέματα διαθεσιμότητας του βιοκαυσίμου. Στον πίνακα 4.11 φαίνονται οι συστάσεις της βιομάζας (τυπική σύσταση αχύρου σιτηρών) όπως λήφθηκε από τη μελέτη [B.M. Jenkins et al., 1985](#), καθώς επίσης και του ισοδύναμου καυσίμου στην περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη με βιομάζα.

Πίνακας 4.11: Σύσταση βιομάζας και ισοδύναμου καυσίμου (μικτή καύση φυσικού λιγνίτη με βιομάζα αχύρου σιτηρών (straw) από 6% θερμική υποκατάσταση)

		Βιομάζα	Ισοδύναμο καύσιμο
C	%w.t. (a.r.)	40,18	17,26
H	%w.t. (a.r.)	4,65	1,37
N	%w.t. (a.r.)	0,57	0,60
O	%w.t. (a.r.)	36,64	7,60
S	%w.t. (a.r.)	0,10	0,35
CO ₂	%w.t. (a.r.)	0	2,87
Cl	%w.t. (a.r.)	0,26	0,01
Τέφρα	%w.t. (a.r.)	10,60	17,85
Υγρασία	%w.t. (a.r.)	7,00	52,10
Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα (LHV)	kJ/kg	16200	5305,63

Στο διάγραμμα 4.5 συγκρίνονται οι συστάσεις του ισοδύναμου καυσίμου που προκύπτει σε κάθε μία από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις μικτής καύσης.



Διάγραμμα 4.5: Σύσταση ισοδύναμου καυσίμου σε κάθε μία από τις εναλλακτικές περιπτώσεις καύσης

4.4 Μοντελοποίηση διαδικασιών συλλογής βιομάζας στο SimaPro v.7.3.3

Η μοντελοποίηση των διαδικασιών της συλλογής της βιομάζας βασίζεται στο σχήμα 4.8, που παρουσιάζεται στο τέλος του κεφαλαίου, και προϋποθέτει τη μοντελοποίηση των φάσεων που την απαρτίζουν και των μηχανημάτων που συμμετέχουν σε αυτή. Η βάση δεδομένων από την οποία αντλήθηκαν στοιχεία σχετικά με τη μοντελοποίηση των μηχανημάτων είναι η Ecoinvent Database, η οποία είναι ενσωματωμένη στο λογισμικό SimaPro v.7.3.3, σε συνδυασμό με την εξωτερική βιβλιογραφική πηγή (ENEP-BIO, 2012). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι κύριες φάσεις που συνιστούν την εφοδιαστική αλυσίδα της βιομάζας από το άχυρο σιτηρών, ενώ παράλληλα δίνονται και στοιχεία για τον μηχανολογικό εξοπλισμό που είναι απαραίτητος για την επίτευξή τους.

Αξίζει επισημανθεί ότι η μοντελοποίηση των μηχανημάτων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα βήματα της παραγράφου 4.2.1 και βασίστηκε στο ήδη υπάρχον «process» που αφορά τη μοντελοποίηση του μηχανήματος απομάκρυνσης του επιφανειακού στρώματος του εδάφους (Skid steer loader), θεωρώντας ως τόνο μονάδα αναφοράς τον 1 t_{a.r.} (τόνος βιομάζας ως έχει). Για τη μοντελοποίηση των φάσεων της εφοδιαστικής αλυσίδας πραγματοποιείται συνδυασμός των ξεχωριστών «processes» των μηχανημάτων σε ένα ενιαίο «process» με μονάδα αναφοράς το 1p. Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη μοντελοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας στο λογισμικό SimaPro v.7.3.3 αναλύθηκαν ήδη στην παράγραφο 4.2.1.

4.4.1 Συλλογή και δεματοποίηση βιομάζας

Το άχυρο σιτηρών συλλέγεται μια φορά το έτος και στις υπό εξέταση περιοχές, η περίοδος συλλογής του είναι η περίοδος Ιουνίου έως αρχές Ιουλίου, μετά το θερισμό του καρπού. Κατά συνέπεια, αν υποθεθεί ότι οι εργασίες συλλογής λαμβάνουν χώρα ακριβώς ένα μήνα και ότι το ωράριο εργασίας είναι οκτώ ώρες ανά ημέρα, τότε οι συνολικά διαθέσιμες ώρες για τη συλλογή της βιομάζας είναι περίπου 240 h/y. Η φάση αυτή συλλογής της βιομάζας διακρίνεται σε δύο επιμέρους στάδια:

α) Το λεγόμενο σείριασμα (windrowing) κατά τη διάρκεια του οποίου το υλικό τοποθετείται σε μακριές σειρές με χρήση ειδικού μηχανήματος όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται αποτελείται από Τρακτέρ John Deere (125 HP) με ενσωματωμένη διάταξη για το σείριασμα Corma GA22-7800. Η καθαρή παραγωγικότητα του μηχανήματος είναι ίση με 13,6

$tn_{a.r.}/h$, ενώ η κατανάλωση σε καύσιμο είναι $0,60 \text{ lt}_{diesel}/tn_{a.r.}$ και για τυπική θερμογόνο δύναμη καυσίμου ίση με $35,4 \text{ MJ}_{diesel}/ \text{lt}_{diesel}$, η κατανάλωση ισοδυναμεί με $21,2 \text{ MJ}_{diesel}/ tn_{a.r.}$.



Εικόνα 4.1: Σείριασμα αχύρου (ENEP-BIO, 2012)

β) Τη δεματοποίηση, μια διαδικασία που υφίστανται τα περισσότερα αγροτικά υπολείμματα τα οποία έχουν ιδιαίτερα χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και που η οικονομική τους μεταφορά στον τόπο επεξεργασίας τους προϋποθέτει κάποια μορφή συμπίεσης. Η συμπίεση αυτή, όχι μόνο αυξάνει την ενεργειακή πυκνότητα, αλλά ελαχιστοποιεί και τις απώλειες υλικού λόγω δυσμενών καιρικών συνθηκών, π.χ. παράσυρση υλικού λόγω δυνατών ανέμων. Στην περίπτωση του αχύρου, όπως και στα περισσότερα ποώδη αγροτικά υπολείμματα, η δεματοποίηση του υλικού αποτελεί το συνηθέστερο τρόπο αρχικής συμπίεσης. Το σύστημα δεματοποίησης που συνήθως χρησιμοποιείται είναι αυτό σε μεγάλες ορθογώνιες μπάλες και επιτυγχάνεται με μηχανολογικό εξοπλισμό που αποτελείται από Τρακτέρ 6830 Premium John Deere (160 HP) με ενσωματωμένο δεματοποιητή Welger D 6050, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2. Η καθαρή παραγωγικότητα του μηχανήματος είναι ίση με $11,6 \text{ tn}_{a.r.}/h$, ενώ η κατανάλωση σε καύσιμο είναι $1,70 \text{ lt}_{diesel}/tn_{a.r.}$ και για τυπική θερμογόνο δύναμη καυσίμου ίση με $35,4 \text{ MJ}_{diesel}/ \text{lt}_{diesel}$, η κατανάλωση ισοδυναμεί με $60,2 \text{ MJ}_{diesel}/ tn_{a.r.}$. Η πυκνότητα των δεματιών είναι κατά προσέγγιση ίση με $145 \text{ kg}/m^3$, ενώ αποτελούν την κύρια μορφή αχύρου που διαχειρίζονται μονάδες βιοενέργειας στη Δανία και σε άλλες χώρες της Ευρώπης.



Εικόνα 4.2: Δεματοποίηση αχύρου (ENEP-BIO, 2012)

4.4.2 Φόρτωση/Εκφόρτωση βιομάζας

Η φόρτωση/εκφόρτωση αφορά διαδικασίες που πραγματοποιούνται πριν το στάδιο της μεταφοράς ή κατά την αποθήκευση (στοίβαξη μπαλών σε σωρό). Για τις διαδικασίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά μηχανήματα, όπως φορτωτές, εκσκαφείς, φορτωτές τρακτέρ, τηλεσκοπικοί φορτωτές ή μίνι-φορτωτές. Οι φορτωτές τρακτέρ με πρόσθιο φορτωτή τύπου πιρουνάς είναι οι πιο διαδεδομένοι καθώς μπορούν να φορτώνουν δυο μπάλες τη φορά μειώνοντας έτσι τον απαιτούμενο χρόνο χειρισμού. Η μικτή δυναμικότητα του μηχανήματος είναι ίση με $25 \text{ tn}_{\text{a.r.}}/\text{h}$, ενώ η κατανάλωση σε καύσιμο είναι $0,08 \text{ lt}_{\text{diesel}}/\text{tn}_{\text{a.r.}}$ και για τυπική θερμογόνο δύναμη καυσίμου ίση με $35,4 \text{ MJ}_{\text{diesel}}/\text{lt}_{\text{diesel}}$, η κατανάλωση ισοδυναμεί με $2,8 \text{ MJ}_{\text{diesel}}/\text{tn}_{\text{a.r.}}$ (ENEP-BIO, 2012).

4.4.3 Μεταφορά βιομάζας

Μετά τη συλλογή, οι μπάλες αχύρου πρέπει να φορτωθούν σε όχημα και να μεταφερθούν στον επόμενο σταθμό της εφοδιαστικής αλυσίδας: έναν χώρο αποθήκευσης, μια μονάδα παραγωγής πελλετών, ή απευθείας στην ενεργειακή μονάδα. Οι μπάλες φορτώνονται σε τρέιλερ τρακτέρ ή σε καρότσες φορτηγών. Τα τρέιλερ των τρακτέρ απαιτούν περισσότερες ανθρωποώρες για το χειρισμό και τη μεταφορά της βιομάζας και η δυναμικότητα είναι χαμηλότερη σε σχέση με τα φορτηγά, ενώ η κατανάλωσή τους σε καύσιμο εκτιμάται περίπου στα $0,053 \text{ lt}_{\text{diesel}}/\text{tn}\cdot\text{km}$. Η διαφορά τείνει να είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η απόσταση μεταφοράς. Ωστόσο, η επιλογή της μεταφοράς με φορτηγά είναι κυρίως διαθέσιμη στις περιπτώσεις όπου η παράδοση του αχύρου οργανώνεται από έναν τρίτο φορέα και όχι από τους αγρότες τους ίδιους.

Η τυπική μεταφορική ικανότητα ενός φορτηγού, μαζί με την καρότσα, είναι περίπου 12 tn σε μπάλες αχύρου, δηλαδή περίπου η μισή από την ονομαστική μεταφορική ικανότητα. Η κατανάλωση σε καύσιμο είναι $0,059 \text{ lt}_{\text{diesel}}/\text{tn}\cdot\text{km}$ και για τυπική θερμογόνο δύναμη καυσίμου ίση με $35,4 \text{ MJ}_{\text{diesel}}/\text{lt}_{\text{diesel}}$, η κατανάλωση ισοδυναμεί με $2,089 \text{ MJ}_{\text{diesel}}/\text{tn}\cdot\text{km}$. Γενικά, η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα των δεματιών αχύρου τείνει να περιορίζει τις εφοδιαστικές αλυσίδες σε αποστάσεις μικρότερες των 100 km , συνήθως στα 50 km . Για μεγαλύτερες αποστάσεις απαιτείται η προσθήκη ενός βήματος συμπίεσης στην εφοδιαστική αλυσίδα, συνήθως πελλετοποίησης (βλέπε παράγραφο 4.4.5) (ENEP-BIO, 2012).

4.4.4 Αποθήκευση βιομάζας

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μετά τη συλλογή, οι μπάλες αχύρου μεταφέρονται είτε σε ένα χώρο ενδιάμεσης αποθήκευσης, είτε σε μια μονάδα πελλετοποίησης είτε απευθείας σε μια ενεργειακή μονάδα. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται κατάλληλος χώρος αποθήκευσης. Ιδιαίτερες απαιτήσεις για τη διαμόρφωση και την έκταση του χώρου αποθήκευσης θέτει το γεγονός ότι η πρώτη ύλη είναι άμεσα «διαθέσιμη» μόνο σε ένα μικρό χρονικό παράθυρο την εποχή του θερισμού, ενώ όμως η λειτουργία των ενεργειακών μονάδων πραγματοποιείται συνήθως σε ετήσια βάση, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί το κόστος επένδυσης και λειτουργίας. Έτσι, η χρονική διάρκεια της αποθήκευσης μπορεί να φτάσει και το χρονικό διάστημα των 12 μηνών.

Η αποθήκευση της πούδρας βιομάζας για τόσο μεγάλες χρονικές περιόδους πρέπει να διασφαλίζει την αποφυγή των απωλειών ξηρής μάζας ή/και αλλαγών της σύστασης που καταλήγουν σε χαμηλότερη θερμογόνο ικανότητα. Οι αιτίες αυτών των απωλειών και αλλαγών μπορεί να είναι καιρικές συνθήκες (έκπλυση, διάβρωση, κτλ) ή βιοχημική αποσύνθεση μέσω μικροβίων και μυκήτων. Η αποφυγή απωλειών μεγάλης κλίμακας μέσω πυρκαγιών ή τρωκτικών πρέπει επίσης να εξετάζονται κατά τη σχεδίαση συστημάτων αποθήκευσης.

Τα περισσότερα συστήματα αποθήκευσης σχεδιάζονται με την υπόθεση ότι η βιομάζα θα είναι διαθέσιμη με τη μορφή μεγάλων ορθογώνιων μπαλών, οι οποίες μπορούν να στοιβαχθούν

ευκολότερα από τις κυλινδρικές. Το χαμηλό ποσοστό υγρασίας κατά το θερισμό του αχύρου λειτουργεί θετικά ως προς την αποφυγή απωλειών ξηρής μάζας κατά την αποθήκευση. Η εξωτερική αποθήκευση μπαλών χωρίς κανένα είδος κάλυψης, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.3, μπορεί να γίνει ανεκτή μόνο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Η δυνατότητα ή η απαιτούμενη έκταση αποθήκευσης στην περίπτωση αυτή είναι περίπου $0,31 \text{ tn}_{a.r.}/\text{m}^2$. Όμως, η διατήρηση της χαμηλής υγρασίας απαιτεί είτε την προστασία τους από τις βροχοπτώσεις και την υγρασία του εδάφους και την αποθήκευση σε εξωτερικούς χώρους κάτω από ένα μετακινούμενο κάλυμμα (λινάτσα) ή την αποθήκευση σε στεγασμένους χώρους.



Εικόνα 4.3: Αποθήκευση σε σωρούς για μεγάλες τετράγωνες μπάλες κάτω από λινάτσα, σε εξωτερικούς χώρους (ENEP-BIO, 2012)

Η αποφυγή της υγρασίας από το έδαφος είναι αρκετά εύκολη με την κατάλληλη διαμόρφωση του πατώματος ή με χρήση υπερυψωμένου εδάφους. Στην περίπτωση πατώματος, αυτό πρέπει να είναι πορώδες και αρκετά ψηλό ώστε να βρίσκεται πάνω από το επίπεδο του νερού και τα νερά της βροχής ή πλημμύρων. Μια κλίση της τάξης του 1,5 % απαιτείται για να μπορεί να νερό να απομακρύνεται εύκολα από το σωρό. Επίσης, το πάτωμα πρέπει να είναι αρκετά δυνατό ώστε να αντέχει την κίνηση βαριών μηχανημάτων φορτωμένων με μπάλες. Μπορεί να κατασκευαστεί είτε με χαλίκι βάρους τουλάχιστον 45 cm ή τσιμέντο πάχους τουλάχιστον 15 cm.

Ωστόσο, η καλύτερη προστασία για τη μακροχρόνια αποθήκευση παρέχεται από μεγάλα μεταλλικά κτίρια με πάτωμα από τσιμέντο ή επίπεδο χαλίκι. Τα μεταλλικά κτίρια πρέπει να είναι αρκετά μεγάλα ώστε να μπορούν να εισέρχονται φορτηγά και άλλα μηχανήματα και να προσφέρουν τη μέγιστη δυνατή προστασία από τις καιρικές συνθήκες, εμπρησμούς και τρωκτικά. Ένα τυπικό κτίριο επιφάνειας 900 m^2 ($20 \text{ m} \times 45 \text{ m}$) και ύψους 8 m μπορεί να αποθηκεύσει $745 \text{ tn}_{a.r.}$ υλικού σε μορφή μεγάλων τετράγωνων μπαλών υποδεικνύοντας μια δυνατότητα αποθήκευσης περίπου $0,83 \text{ tn}_{a.r.}/\text{m}^2$. Ενδιάμεσες λύσεις αποθήκευσης της βιομάζας μπορούν να προσφέρουν επίσης τα ήδη υπάρχοντα κτίσματα όπως σκεπασμένοι, ανοιχτοί από το πλάι αχυρώνες.

Στην περίπτωση που οι μπάλες της βιομάζας μεταφέρονται στον θερμοηλεκτρικό σταθμό χωρίς την παρεμβολή κανενός άλλου σταδίου προεπεξεργασίας (πελλετοποίηση), θεωρείται ότι: α) το 1/12 της απαιτούμενης ποσότητας υλικού μεταφέρεται απευθείας στον ΑΗΣ, χωρίς ενδιάμεση αποθήκευση, β) τα 4/12 του υλικού αποθηκεύονται σε ανοιχτούς χώρους, σε σκεπασμένους σωρούς, γ) τα 7/12 του υλικού αποθηκεύονται σε κλειστά κτίρια (ENEP-BIO, 2012).

Παρατήρηση

Για τη μοντελοποίηση της φάσης αποθήκευσης της βιομάζας σε κλειστά μεταλλικά κτίρια δημιουργείται ένα καινούργιο «process» στο λογισμικό SimaPro v7.3.3, στο οποίο ενσωματώνονται τα «sub-processes» που αφορούν την κατασκευή των μεταλλικών κτιρίων και την κατασκευή του

πατώματος από τσιμέντο. Ως μονάδα αναφοράς για την μοντελοποίηση της κατασκευής των μεταλλικών κτιρίων θεωρείται το 1 m² μετάλλου που χρησιμοποιείται, ενώ για την μοντελοποίηση της κατασκευής του πατώματος από τσιμέντο θεωρείται το 1 m³ τσιμέντου που χρησιμοποιείται.

4.4.5 Πελλετοποίηση βιομάζας

Η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα της βιομάζας τείνει να αυξάνει σημαντικά τα κόστη στα στάδια μεταφοράς και αποθήκευσης. Ήδη, η συμπίεση που πραγματοποιείται στο στάδιο της συλλογής μέσω της δεματοποίησης μπορεί να συνεισφέρει στην αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας και να διευκολύνει το χειρισμό και την αποθήκευση.

Σε περιπτώσεις όπου οι αποστάσεις στις οποίες μεταφέρεται το υλικό είναι αρκετά μεγάλες, ή όπου υπάρχουν άλλοι περιορισμοί στη διαχείριση, απαιτείται πρόσθετη συμπίεση του αχύρου, η οποία πραγματοποιείται μέσω πελλετοποίησης. Γενικά, οι πελλέτες είναι μικρά κυλινδρικά σωματίδια συμπιεσμένης βιομάζας, με τυπικές διαμέτρους 6 – 8 mm και μήκος μέχρι 40 mm. Η πυκνότητα των σωματιδίων είναι συνήθως γύρω στα 1200 kg/m³; ενώ η χύδην πυκνότητα κυμαίνεται μεταξύ 600 – 650 kg/m³, δηλαδή 4 περίπου φορές μεγαλύτερη από τη δεματοποιημένη βιομάζα. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θεωρείται ότι η μονάδα πελλετοποίησης λειτουργεί 5000 h/y παράγοντας κατά μέσο όρο περίπου 3 t_{pellets}/h.

Η παραγωγή πελλετών πραγματοποιείται σε ειδικές μονάδες και περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Υποδοχή, καθαρισμός και άλεση της πρώτης ύλης. Στο στάδιο αυτό απομακρύνονται οι σπάγγοι που κρατούν δεμένες τις μπάλες, μεγάλες πέτρες, μέταλλα και κάθε άλλου είδους ακαθαρσία που μπορεί να περιέχουν τα δεμάτια ώστε να αποφευχθεί η φθορά του εξοπλισμού. Η άλεση πραγματοποιείται με χρήση τεμαχιστών (στα πρώτα στάδια της διεργασίας) ή με σφυρόμυλους (πριν την πελλετοποίηση).
- Ξήρανση. Για την παραγωγή πελλετών καλής ποιότητας (με υψηλή μηχανική αντοχή) είναι σημαντικό η υγρασία να είναι κάτω του 15 % κ.β. Πολλές πρώτες ύλες από ποώδη βιομάζα πληρούν αυτήν την προϋπόθεση κατά την παραλαβή τους στη μονάδα πελλετοποίησης, ιδίως στις χώρες του Ευρωπαϊκού Νότου, και επομένως μπορούν να πελλετοποιηθούν απευθείας χωρίς πρόσθετη ξήρανση. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, και εφόσον η υγρασία της βιομάζας θεωρείται ίση με 7% κ.β., το στάδιο της ξήρανσης αγνοείται. Πολύ ξηρά υλικά πάντως (<5% κ.β.) παράγουν εύθραυστες πελλέτες που εύκολα γίνονται σκόνη. Στις περιπτώσεις αυτές, χρειάζεται η προσθήκη υγρασίας στο καύσιμο πριν την παραγωγή πελλετών.
- Προεπεξεργασία. Σε αυτό το στάδιο, χρησιμοποιείται ατμός ή/και νερό για να μαλακώσουν οι ίνες του υλικού πριν τη συμπίεση, οδηγώντας έτσι στο σχηματισμό ανθεκτικότερων πελλετών και στο σχηματισμό λιγότερων λεπτόκοκκων σωματιδίων. Άλλες ουσίες για αυξημένη συνοχή ή πρόσθετα που βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά καύσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτό το στάδιο – ο τελικός σκοπός είναι η βελτίωση της ποιότητας των πελλετών. Ωστόσο, μερικά πρόσθετα μπορεί να απαγορεύονται σε συγκεκριμένες χώρες ή η προσθήκη τους να περιορίζει τις τελικές χρήσεις των πελλετών. Η προεπεξεργασία θεωρείται ότι δεν ταιριάζει πάντα τόσο καλά με υλικά τύπου αχύρου, ωστόσο αποτελεί σημαντικό μέρος της διεργασίας όταν παράγονται πελλέτες ξύλου ή πελλέτες από αναμειγμένα υλικά.
- Πελλετοποίηση. Αυτό είναι το κύριο βήμα της διεργασίας. Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τύποι μύλων πελλετών – έχουν αναπτυχθεί μέχρι και φορητές μονάδες που επιτρέπουν την άμεση πελλετοποίηση δεματοποιημένης βιομάζας απευθείας στο χωράφι και παρακάμπτουν τις περισσότερες από τις παραπάνω διεργασίες (εκτός της άλεσης). Γενικά, δεν υπάρχουν σημαντικά προβλήματα στην πελλετοποίηση ποώδους βιομάζας, εφόσον ο μύλος πελλετών έχει σχεδιαστεί για τέτοια υλικά. Τα πιο τυπικά προβλήματα είναι το μπλοκάρισμα της πρέσας (αρκετά συχνό

φαινόμενο με υλικά τύπου αχύρου) και η υπερθέρμανση, καθώς και η μεγαλύτερη μηχανική διάβρωση από την υψηλή περιεκτικότητα τέφρας (και ιδίως πυριτίου) των υλικών αυτών.

- Ψύξη. Οι πελλέτες απομακρύνονται από το μύλο πελλετών με θερμοκρασία περίπου 100 °C και πρέπει να κρυσώσουν πριν το πακετάρισμά τους ώστε να μην σπάσουν.
- Πακετάρισμα και απομάκρυνση των λεπτόκοκκων. Τα λεπτόκοκκα σωματίδια που βγαίνουν από την πρέσα παραγωγής πελλετών πρέπει να διαχωριστούν από το τελικό προϊόν και μπορούν να ανακυκλωθούν στη διεργασία. Στην περίπτωση της παραγωγής πελλετών για οικιακούς καταναλωτές, συνήθως οι πελλέτες συσκευάζονται σε μικρούς σάκους των 20-25 kg. Για καταναλωτές με μεγαλύτερες δυναμικότητες οι πελλέτες είτε συσκευάζονται σε μεγάλους σάκους του 1 – 1,5 τόνων ή μεταφέρονται χύδην.

Η προσθήκη ενός σταδίου πελλετοποίησης στην εφοδιαστική αλυσίδα οδηγεί σε σημαντική αύξηση του κόστους καυσίμου, κυρίως εξαιτίας της απαιτούμενης επένδυσης και εν μέρει εξαιτίας των ενεργειακών απαιτήσεων της διεργασίας (ηλεκτρισμός για τη λειτουργία του συστήματος άλεσης και του πελλετοποιητή κτλ) οι οποίες εκτιμώνται περίπου σε 170 kWh_e/tn_{a,r}. Έτσι, το στάδιο της πελλετοποίησης προστίθεται στην εφοδιαστική αλυσίδα κυρίως όταν το πρόσθετο κόστος του μπορεί να αντισταθμιστεί από τη μείωση του κόστους μεταφοράς για μεγάλες αποστάσεις (ENEP-BIO, 2012).

Παρατήρηση

Η μοντελοποίηση της φάσης πελλετοποίησης της βιομάζας βασίστηκε σε ένα υπάρχον «process» της Ecoinvent, στο οποίο ενσωματώνονται τα «sub-processes» που αφορούν την κατανάλωση ενέργειας στη μονάδα πελλετοποίησης και τα κατασκευαστικά στοιχεία της μονάδας. Ωστόσο, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας προστέθηκαν και τα «sub-processes» που αφορούν τη διαχείριση της δεματοποιημένης βιομάζας και των πελλετών από τα μηχανήματα φόρτωσης/εκφόρτωσης που είναι ήδη μοντελοποιημένα με τον τρόπο που περιγράφεται στην παράγραφο 4.4.

4.4.6 Διαχείριση βιομάζας στην ενεργειακή μονάδα

Η διαχείριση του αχύρου στην ενεργειακή μονάδα περιλαμβάνει τις δραστηριότητες: εκφόρτωση του υλικού από το όχημα μεταφοράς, αποθήκευση εντός των ορίων της ενεργειακής μονάδας και «μεταφορά» από το χώρο αυτό στον εξοπλισμό μείωσης μεγέθους και από εκεί στον λέβητα. Όπως μπορεί να περιμένει κανείς, η επιλογή τεχνολογίας, ο βαθμός αυτοματοποίησης και η όλη σχεδίαση του συστήματος χειρισμού εξαρτάται από το μέγεθος της ενεργειακής μονάδας και τη μορφή με την οποία διαχειρίζεται η βιομάζα.

Σε περίπτωση που το άχυρο φτάνει στην ενεργειακή μονάδα με τη μορφή μπάλας, τότε η απλούστερη και φθηνότερη επιλογή εκφόρτωσης είναι η χρήση περονοφόρων ανυψωτές (κλαρκ), οι οποίοι μπορούν να διαχειριστούν 1-2 μπάλες τη φορά. Ωστόσο, για τη ζύγιση και τη μέτρηση της υγρασίας κάθε μπάλας απαιτείται πρόσθετος χρόνος.

Στην περίπτωση παραλαβής πελλετών, το σύστημα υποδοχής περιλαμβάνει συνήθως κλειστά σιλό, στα οποία αποθηκεύονται οι πελλέτες. Η μεταφορά των πελλετών στο σύστημα άλεσης γίνεται συνήθως πνευματικά.

Για τις μπάλες αχύρου η μείωση μεγέθους περιλαμβάνει συνήθως έναν τεμαχιστή. Το τεμαχισμένο υλικό ή αξιοποιείται απευθείας αν υπάρχει τέτοια δυνατότητα, π.χ. σε μονάδες καύσης με εσχάρα, ή μεταφέρεται σε ένα σφυρόμυλο για πρόσθετη μείωση μεγέθους. Σε αυτή την περίπτωση, οι ηλεκτρικές καταναλώσεις για τα πρόσθετα συστήματα (τεμαχιστές, σφυρόμυλοι, κτλ) εκτιμώνται σε 93 MJ_{elec}/tn_{a,r} ή 25,83 kWh_e/tn_{a,r}.

Η μείωση του μεγέθους στην περίπτωση των πελλετών πραγματοποιείται απευθείας με σφυρόμυλους. Σε μονάδες μικτής καύσης και για χαμηλά ποσοστά θερμικής υποκατάστασης, όπως εξετάζεται στα πλαίσια της παρούσα εργασίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι μύλοι του κυρίως καυσίμου, ενώ οι επιπλέον ηλεκτρικές καταναλώσεις θεωρούνται αμελητέες (ENEP-BIO, 2012).

Παρατήρηση

Η μοντελοποίηση της φάσης διαχείρισης της βιομάζας στην ενεργειακή μονάδα βασίστηκε στο ήδη υπάρχον «process» της Ecoinvent που αφορά την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο μέσης τάσης της Ελλάδας. Ως μονάδα αναφοράς θεωρείται η 1 kWh_e.

4.5 Σενάρια εφοδιαστικής αλυσίδας βιομάζας

Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 4.8 της επόμενης σελίδας, τέσσερα διαφορετικά, ενδεικτικά σενάρια για την εφοδιαστική αλυσίδα της βιομάζας εξετάζονται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Για τη μοντελοποίησή τους στο λογισμικό SimaPro v.7.3.3 απλώς συνδυάζονται τα ήδη μοντελοποιημένα «sub-processes» που αφορούν τις διάφορες φάσεις της εφοδιαστικής αλυσίδας της βιομάζας, με τον τρόπο που περιγράφεται παρακάτω:

Περίπτωση Α

Θερισμός αχύρου, φόρτωση δεματιών, μεταφορά δεματιών στη μονάδα πελλετοποίησης (25km), εκφόρτωση δεματιών, αποθήκευση δεματιών, χειρισμός, πελλετοποίηση, χειρισμός και αποθήκευση πελλετών, φόρτωση πελλετών και μεταφορά τους στη μονάδα μικτής καύσης (100 km), εκφόρτωση πελλετών.

Στην περίπτωση αυτή, η μονάδα πελλετοποίησης λειτουργεί και ως τοπικός χώρος αποθήκευσης των πελλετών και των δεματιών. Οι πελλέτες μεταφέρονται στον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας για μια σχετικά μεγάλη απόσταση. Στη μονάδα, οι πρόσθετες ηλεκτρικές καταναλώσεις είναι ελάχιστες, καθώς χρησιμοποιείται το υπάρχον σύστημα άλεσης.

Περίπτωση Β

Θερισμός αχύρου, φόρτωση δεματιών, μεταφορά δεματιών σε ανοικτό χώρο ενδιάμεσης αποθήκευσης με αγροτικό τρέιλερ (5 km), εκφόρτωση και αποθήκευση δεματιών, φόρτωση δεματιών, μεταφορά δεματιών σε μονάδα πελλετοποίησης (25 km), εκφόρτωση δεματιών, αποθήκευση δεματιών, χειρισμός, πελλετοποίηση, χειρισμός και αποθήκευση πελλετών, φόρτωση πελλετών και μεταφορά τους στη μονάδα μικτής καύσης (100 km), εκφόρτωση πελλετών.

Στην περίπτωση αυτή, η εφοδιαστική αλυσίδα περιλαμβάνει έναν ξεχωριστό χώρο ενδιάμεσης αποθήκευσης, ο οποίος ενδεχομένως να διαχειρίζεται από έναν αγροτικό συνεταιρισμό ή μεταπωλητή αχύρου. Το άχυρο μεταφέρεται με τη μορφή δεματιών από το χώρο ενδιάμεσης αποθήκευσης στη μονάδα πελλετοποίησης και από εκεί στον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας. Και σε αυτή την περίπτωση, οι πρόσθετες ηλεκτρικές καταναλώσεις στον ΑΗΣ είναι ελάχιστες.

Περίπτωση Γ

Θερισμός αχύρου, φόρτωση δεματιών, μεταφορά δεματιών στον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας με καρότσες, εκφόρτωση δεματιών και αποθήκευση, χειρισμός εντός του ΑΗΣ. Σε αυτή την περίπτωση, οι ηλεκτρικές καταναλώσεις για τα πρόσθετα συστήματα (τεμαχιστές, σφυρόμυλοι, κτλ) εκτιμώνται σε $93 \text{ MJ}_{\text{elec}}/\text{tn}_{\text{a.r.}}$ ή $25,83 \text{ kWh}_e/\text{tn}_{\text{a.r.}}$, εφόσον πρόκειται για μονάδα καύσης κονιοποιημένου καυσίμου.

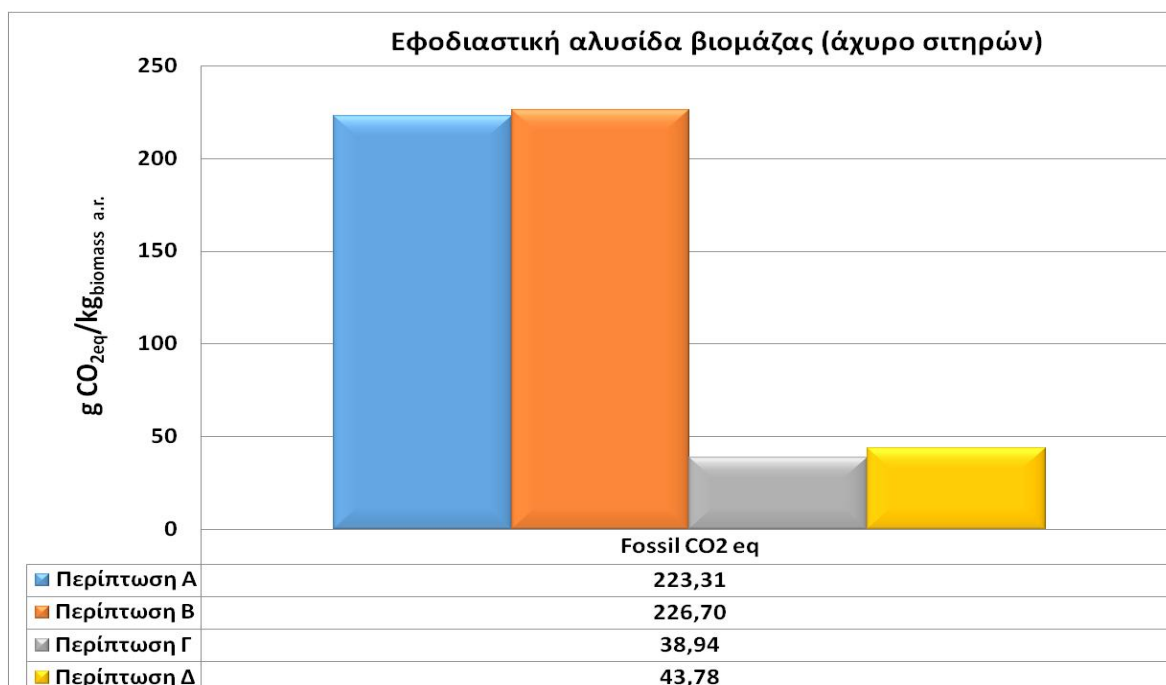
Περίπτωση Δ

Θερισμός αχύρου, φόρτωση δεματιών, μεταφορά δεματιών κατά τα 4/12 σε ανοικτό χώρο και κατά τα 7/12 σε κλειστό χώρο ενδιάμεσης αποθήκευσης με καρότσες (25 km), εκφόρτωση και αποθήκευση δεματιών, φόρτωση δεματιών, μεταφορά δεματιών στον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας με αγροτικό τρέιλερ (0,5 km), εκφόρτωση δεματιών, χειρισμός εντός του ΑΗΣ. Η υπόλοιπη ποσότητα δεματιών (1/12) μεταφέρεται απευθείας στον ΑΗΣ με καρότσες (25 km), εκφορτώνεται και διαχειρίζεται εντός του ΑΗΣ.

Σε αυτή την περίπτωση, οι ηλεκτρικές καταναλώσεις για τα πρόσθετα συστήματα (τεμαχιστές, σφυρόμυλοι, κτλ) εκτιμώνται σε $93 \text{ MJ}_{\text{elec}}/\text{tn}_{\text{a.r.}}$ ή $25,83 \text{ kWh}_e/\text{tn}_{\text{a.r.}}$, εφόσον πρόκειται για μονάδα καύσης κονιοποιημένου καυσίμου, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.4.6.

Μια πολύ σημαντική παράμετρος που πρέπει να εξεταστεί στην ανάλυση αφορά το κατά πόσον τα οχήματα που αναλαμβάνουν τα στάδια μεταφοράς της βιομάζας επιστρέφουν γεμάτα ή άδεια στο σημείο εκκίνησης. Στην περίπτωση που τα οχήματα επιστρέφουν άδεια, τότε το κόστος μεταφοράς και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου του σταδίου μεταφοράς αυξάνονται κατά ένα ποσοστό (στην προκειμένη περίπτωση λαμβάνεται ίσο με 1%), καθώς η επιστροφή των οχημάτων αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της εφοδιαστικής αλυσίδας του καυσίμου. Αν όμως τα οχήματα επιστρέφουν φορτωμένα, τότε η επιστροφή λογίζεται ως μέρος άλλης εφοδιαστικής αλυσίδας και δεν επιβαρύνει με οικονομικό ή περιβαλλοντικό κόστος την εφοδιαστική αλυσίδα της βιομάζας. Η περίπτωση αυτή δεν μελετάται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

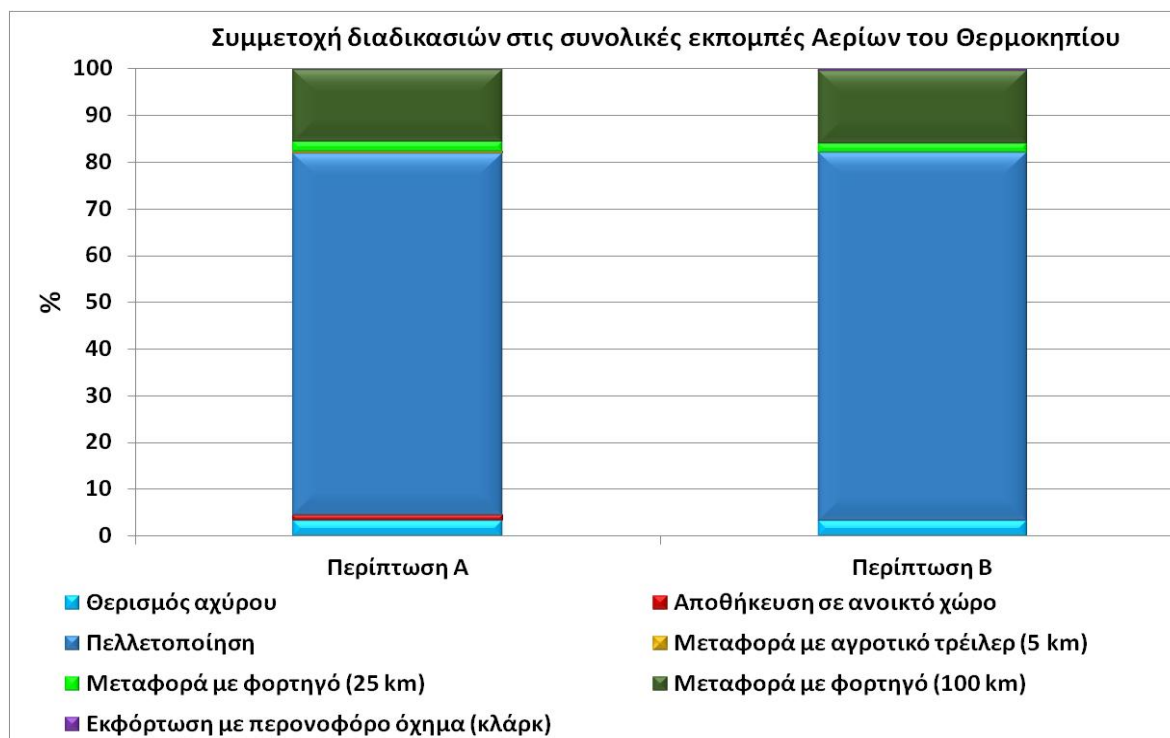
Στο διάγραμμα 4.6 συγκρίνονται οι τέσσερις περιπτώσεις εφοδιαστικών αλυσίδων που μόλις περιγράφηκαν, ως προς τη περιβαλλοντική τους επιβάρυνση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή της μεθόδου Greenhouse Gas Protocol v1.01 στις περιπτώσεις εφοδιαστικών αλυσίδων που μοντελοποιήθηκαν στο λογισμικό SimaPro v.7.3.3, με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω.



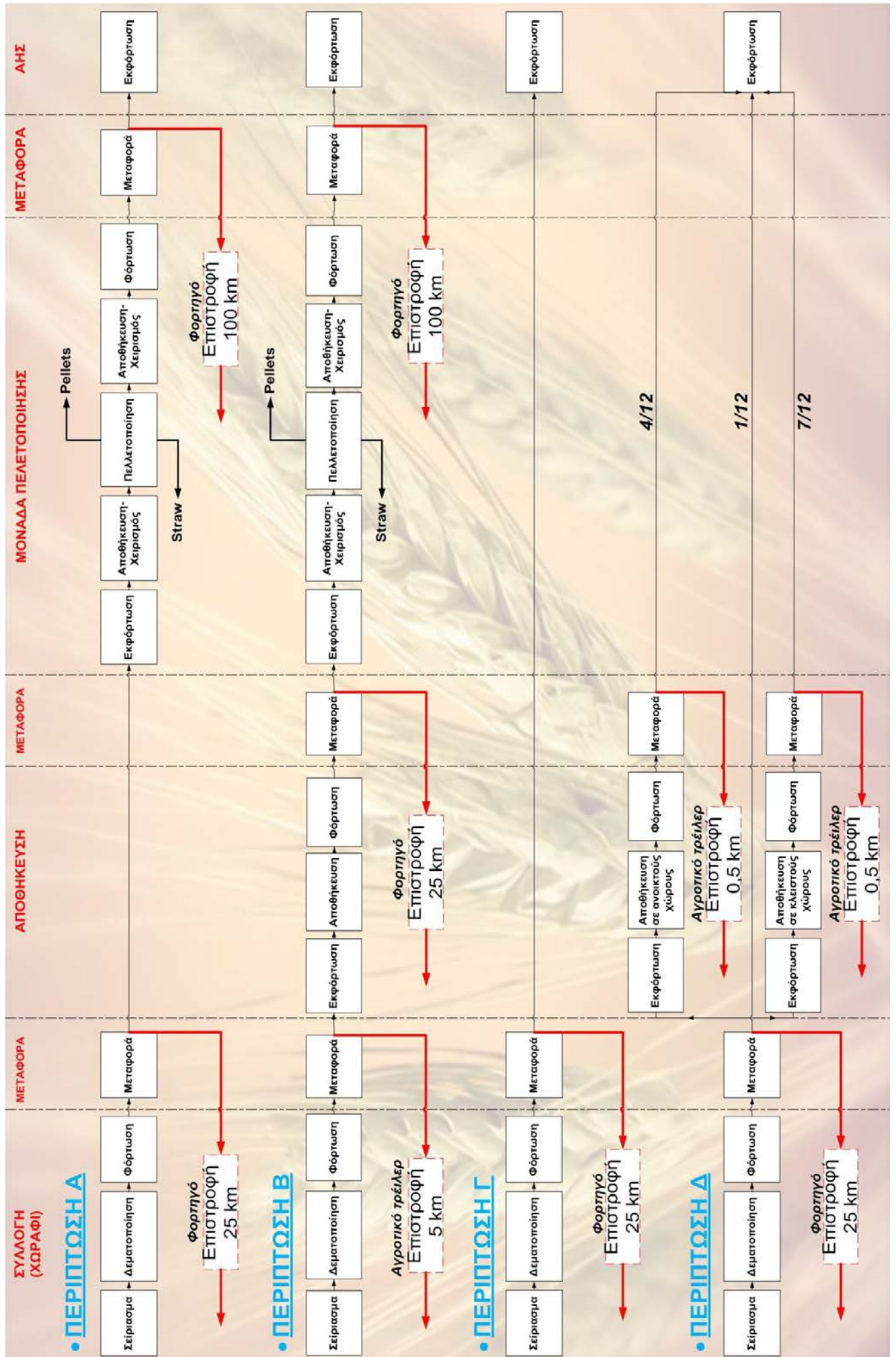
Διάγραμμα 4.6: Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις εναλλακτικές εφοδιαστικών αλυσίδων βιομάζας (Greenhouse Gas Protocol v1.01)

Είναι φανερό ότι η Περίπτωση Γ συνεπάγεται τις χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, καθώς δεν περιλαμβάνει το ενεργοβόρο στάδιο της πελλετοποίησης, ενώ η μεταφορά του υλικού περιορίζεται στη μικρή απόσταση των 25 Km. Οι Περιπτώσεις Α και Β έχουν μικρή διαφορά ως προς

τις εκπομπές CO_{2eq}, ενώ η προσθήκη του σταδίου της ενδιάμεσης αποθήκευσης στις περιπτώσεις Β και Δ έχει κάπως μεγαλύτερη επίδραση στις συνολικές εκπομπές CO_{2eq}. Το στάδιο πελλετοποίησης είναι αυτό που επηρεάζει περισσότερο το περιβαλλοντικό κόστος, καθώς αντιστοιχεί σε περίπου 85% της καταναλισκόμενης ορυκτής ενέργειας και στο 80% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 4.7 (ENEP-BIO, 2012). Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή της μεθόδου Greenhouse Gas Protocol v1.01 στις περιπτώσεις εφοδιαστικών αλυσίδων Α και Β που μοντελοποιήθηκαν στο λογισμικό SimaPro v.7.3.3.



Διάγραμμα 4.7: Ποσοστιαία συμμετοχή των επιμέρους διαδικασιών στις συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για τις περιπτώσεις Α και Β εφοδιαστικών αλυσίδων βιομάζας (Greenhouse Gas Protocol v1.01)



Σχήμα 4-8: Διάγραμμα εφοδιαστικής αλυσίδας βιομάζας αχύρου σιτηρών (straw)

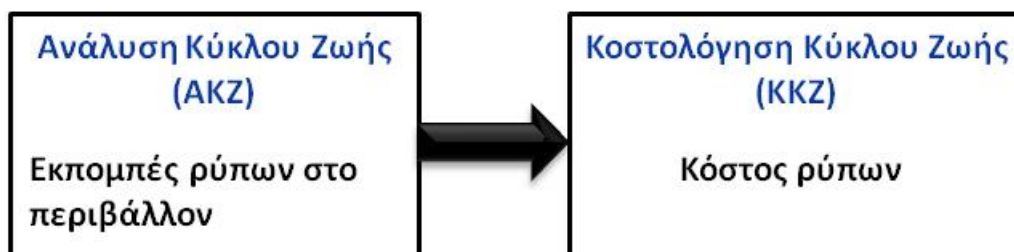
Κεφάλαιο 5^ο

Κοστολόγηση Κύκλου Ζωής (LCC)

5.1 Εισαγωγή στην Κοστολόγηση Κύκλου Ζωής-ΚΚΖ (Life Cycle Costing-LCC) για τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη

Η κοστολόγηση κύκλου ζωής (ΚΚΖ) είναι μια μέθοδος, μέσω της οποίας κοστολογούνται όλες οι διαδικασίες που συνδέονται με ολόκληρο τον κύκλο ζωής κάποιου προϊόντος, υπηρεσίας ή τεχνολογικού συστήματος. Ένας πιο σαφής ορισμός που μπορεί να αποδοθεί είναι: «Η ΚΚΖ είναι μία τεχνική οικονομικής αξιολόγησης, μέσω της οποίας προσδιορίζονται όλα τα κόστη που σχετίζονται με ένα προϊόν, υπηρεσία ή τεχνολογικό σύστημα κατά τη διάρκεια ολόκληρης της ζωής τους» (J. Vail Farr, 2011). Αυτή η προσέγγιση συνεπάγεται την αναγνώριση του άμεσου, έμμεσου, επαναλαμβανόμενου, μη επαναλαμβανόμενου κόστους που πραγματοποιήθηκε ή εκτιμάται ότι πρόκειται να πραγματοποιηθεί, κατά τις φάσεις σχεδίασης, έρευνας και ανάπτυξης, επένδυσης, λειτουργίας, συντήρησης, τερματισμού της λειτουργίας και των σχετικών με την υποστήριξη ενός προϊόντος κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Όλα τα σχετικά κόστη πρέπει να συμπεριληφθούν σε αυτή την αξιολόγηση, ανεξάρτητα από τον φορέα χρηματοδότησης, την επιχειρηματική μονάδα κτλ. Συνεπώς, η ΚΚΖ αποδίδει μια ολοκληρωμένη εικόνα για το συνολικό κόστος του μελετώμενου συστήματος, αφού μόνο το κόστος απόκτησης, που λαμβάνεται συνήθως υπόψη σε ανάλογες μελέτες, αντιπροσωπεύει ένα μικρό κομμάτι του πραγματικού συνολικού κόστους και οδηγεί σε ανασφαλείς εκτιμήσεις.

Στην προκειμένη περίπτωση ως «προϊόν» μπορεί να θεωρηθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αφού η ΚΚΖ που παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη μελέτη αφορά τον προσδιορισμό του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη, ενώ συγχρόνως οι εκπομπές ρύπων που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου ΑΚΖ (κεφάλαιο 3^ο) εκφράζονται σε τιμές οικονομικού κόστους (εξωτερικό κόστος) και συμπεριλαμβάνονται στη ΚΚΖ. Άρα, οι δύο μέθοδοι κύκλου ζωής (ΑΚΖ και ΚΚΖ) είναι συμπληρωματικές και αλληλοσχετιζόμενες, αφού για την ολοκληρωμένη κοστολόγηση ενός ενεργειακού συστήματος, και γενικότερα ενός συστήματος, απαιτούνται ως είσοδοι τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1.



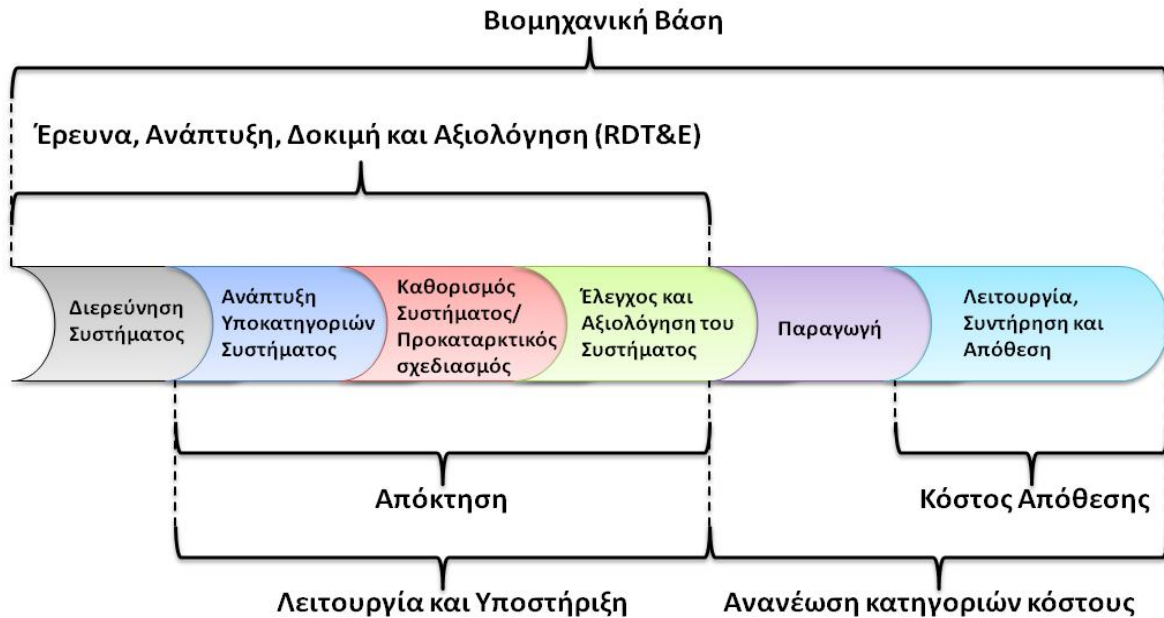
Σχήμα 5.1: Συσχέτιση ανάμεσα σε ΑΚΖ και ΚΚΖ

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία ανασκόπηση της πιο αντιπροσωπευτικής βιβλιογραφίας (δημοσιευμένης στο χρονικό διάστημα 2005-2014) που μελετήθηκε με θέμα την κοστολόγηση κύκλου ζωής της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται και οι βασικές κατηγορίες κόστους που λαμβάνονται υπόψη στη συγκεκριμένη μέθοδο.

5.2 Κατηγορίες Κόστους

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζονται οι βασικότερες κατηγορίες κόστους που πρέπει να συμπεριλαμβάνονται σε κάθε μοντέλο Κοστολόγησης Κύκλου Ζωής, όπως στην περίπτωση του λιγνίτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μέσα από αυτό, διαπιστώνεται η πολυπλοκότητα

της μεθόδου κοστολόγησης και η χρονική στιγμή κατά την οποία εκδηλώνονται τα πραγματικά κόστη. Ωστόσο, τα πράγματα επιδεινώνονται ακόμα περισσότερο, διότι ενώ η παραγωγή του προϊόντος (ηλεκτρική ενέργεια) βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη, ο ακριβής προσδιορισμός του κόστους παραμένει άγνωστος. Για το λόγο αυτό, η μέθοδος ΚΚΖ θα πρέπει να παρουσιάζει δυναμικότητα ώστε να είναι εφικτή η συνεχής ανανέωση των κατηγοριών κόστους που περιλαμβάνει με τα νέα δεδομένα που προκύπτουν κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του προϊόντος (feedback). Στη συνέχεια, περιγράφονται εν συντομία οι βασικές κατηγορίες κόστους της μεθόδου.



Σχήμα 5.2: Βασικές κατηγορίες κόστους της μεθόδου ΚΚΖ (J. Vail Farr, 2011)

5.2.1 Κόστος Βιομηχανικής Βάσης (Industrial Base Cost)

Το κόστος σε επίπεδο βιομηχανικής βάσης συναντάται συνήθως στην περίπτωση εξειδικευμένων προϊόντων που απαιτούν πολύπλοκες και εξαιρετικά μεγάλες εγκαταστάσεις για την παραγωγή τους, όπως για παράδειγμα η ηλεκτρική ενέργεια από έναν συμβατικό θερμοηλεκτρικό σταθμό. Στις περιπτώσεις αυτές, απαιτείται μία αρχική δέσμευση κεφαλαίου (επένδυση) στον τομέα της προετοιμασίας/διαμόρφωσης του χώρου όπου πρόκειται να εγκατασταθεί η μονάδα παραγωγής και της κατασκευής των απαραίτητων φυσικών υποδομών όπου θα στεγαστεί ο μηχανολογικός εξοπλισμός, με στόχο την εξασφάλιση της ποιότητας και της προσδοκώμενης αξίας του προϊόντος. Στον πίνακα 5.1 συνοψίζονται μερικά βασικά είδη κόστους που κατατάσσονται σε αυτή την κατηγορία και αφορούν την εξόρυξη και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με βάση το λιγνίτη.

Πίνακας 5.1: Κατηγορίες κόστους Βιομηχανικής Βάσης
(U.S. Energy Information Administration, 2013; J. Vail Farr, 2011)

Κατηγορία Κόστους	Στοιχεία Κόστους
Έργα πολιτικού μηχανικού και υποδομών	Διάνοιξη δρόμων
	Δίκτυα άρδευσης
	Υπόγειες εγκαταστάσεις
	Σκυρόδεμα εγκαθίδρυσης θεμελίων
	Υλικά δόμησης αποθηκών
	Προμήθεια χάλυβα δόμησης και εγκατάσταση
	Κτίρια
	Κόστος σκαλωσιών
Άλλα κόστη	Κόστος διασύνδεσης υποδομής
	Άλλα κόστη

5.2.2 Κόστος Έρευνας, Ανάπτυξης, Δοκιμών και Αξιολόγησης (Research, Development, Testing and Evaluation Costs – RDT&E)

Η Έρευνα, Ανάπτυξη, Δοκιμές και Αξιολόγηση είναι ο πιο αποδεκτός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει όλες εκείνες τις εργασίες ανάπτυξης που προηγούνται της διαδικασίας παραγωγής. Οι κατηγορίες κόστους σε αυτή τη περίπτωση είναι αρκετά δύσκολο να προσδιοριστούν, αφού το προϊόν δεν έχει ακόμα παραχθεί, ενώ η ωρίμανση της τεχνολογίας παραγωγής είναι συνήθως αδύνατον να προγραμματιστεί και να κοστολογηθεί. Αντιθέτως, μετά την παραγωγή του προϊόντος, αυτού του είδους τα κόστη είναι ευκολότερο να προσδιοριστούν αφού πλέον η δομή του συστήματος είναι ήδη γνωστή. Στον πίνακα 5.2 συνοψίζονται τα βασικά είδη κόστους αυτής της κατηγορίας που αφορούν την εξόρυξη και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με βάση το λιγνίτη.

Πίνακας 5.2: Κόστος Έρευνας, Ανάπτυξης, Δοκιμών και Αξιολόγησης
(U.S. Energy Information Administration, 2013; J. Vail Farr, 2011)

Κατηγορία Κόστους	Στοιχεία Κόστους
Έμμεσα κόστη έργου	Μελέτη έργου Επιμερισμός εργασιών και υλικών Εργατικά, υπερωρίες και κίνητρα Διαχείριση κατασκευαστικών εργασιών Εκκίνησης παραγωγής Επίβλεψη
Κόστος κτήσης	Κόστη ανάπτυξης Προκαταρκτική οικονομοτεχνική μελέτη Τεχνικές μελέτες Περιβαλλοντικές μελέτες και αδειοδοτήσεις Νομικά τέλη Διαχείριση έργου Κόστος ασφάλισης έργου
Άλλα κόστη	Άλλα κόστη

5.2.3 Κόστος Απόκτησης (Acquisition Costs)

Αυτή η κατηγορία κόστους αφορά την επένδυση που πραγματοποιείται για την απόκτηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που είναι απαραίτητος για την παραγωγή του προϊόντος. Αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού κόστους από ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος και είναι πιο εύκολο να προσδιοριστεί από ότι οι παραπάνω κατηγορίες, μιας και αναφέρεται στο κόστος αγοράς των μηχανημάτων που είναι γνωστό από τους κατασκευαστές. Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα κυριότερα είδη κόστους για τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό που αφορά το στάδιο της εξόρυξης και της παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με βάση το λιγνίτη.

Πίνακας 5.3: Κόστος Απόκτησης (U.S. Energy Information Administration, 2013; J. Vail Farr, 2011)

Κατηγορία Κόστους	Στοιχεία Κόστους
Κόστος προμήθειας και εγκατάστασης μηχανολογικού εξοπλισμού	Καδοφόροι εκσκαφείς Αποθέτες Ταινιόδρομοι Ατμοπαραγωγός Ατμοστρόβιλοι Γεννήτριες Αντλίες Συμπυκνωτές

	Εφεδρικός εξοπλισμός μονάδας (π.χ. πυροπροστασία) Βοηθητικός μηχανολογικός εξοπλισμός Πύργος ψύξης Περιστροφικός ξηραντήρας με αυλούς (STD) Ηλεκτροστατικά φίλτρα (ESP) Μονάδα εκλεκτικής καταλυτικής αντίδρασης (SCR) Μονάδα αποθείωσης καυσαερίων (FGD)
Κόστος προμήθειας και εγκατάστασης ηλεκτρολογικού εξοπλισμού	Μετασχηματιστές ηλεκτρικού ρεύματος Διακόπτες Κέντρο ελέγχου κινητήρων Κέντρο ελέγχου ηλεκτρικού ρεύματος Κατανομημένο σύστημα ελέγχου Βοηθητικός ηλεκτρολογικός εξοπλισμός
Άλλα κόστη	Άλλα κόστη

Οι τρεις παραπάνω κατηγορίες κόστους αποτελούν μαζί το Κόστος Επένδυσης (Capital Expenditure – CAPEX) και αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού κόστους του κύκλου ζωής του προϊόντος που μελετάται. Πρόκειται δηλαδή για την αρχική επένδυση (δαπάνη) που πραγματοποιείται κατά την έναρξη της λειτουργίας ενός έργου και περιλαμβάνει την αγορά του εξοπλισμού, την αδειοδότηση και σχεδιασμό του έργου, την εργασία για την εγκατάσταση του εξοπλισμού (άμεσα κόστη εγκατάστασης), την προετοιμασία της περιοχής και την κατασκευή των υποδομών και άλλα έμμεσα κόστη (H. Nguyen et al., 2008).

5.2.4 Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης (Operations and Support/Maintenance Costs)

Το κόστος λειτουργίας και υποστήριξης (ή αλλιώς συντήρησης) (O&M cost) αντιπροσωπεύει τις συνολικές ετήσιες δαπάνες που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία και υποστήριξη/συντήρηση του συστήματος παραγωγής. Διακρίνεται σε δύο βασικές υποκατηγορίες: α) το Σταθερό (ή έμμεσο) λειτουργικό κόστος και β) το Μεταβλητό (ή άμεσο) λειτουργικό κόστος.

Το σταθερό λειτουργικό κόστος (Fixed Operating Cost) είναι ανεξάρτητο του μεγέθους παραγωγής του προϊόντος (π.χ. της ηλεκτρικής ενέργειας - MWh) και αποτελεί το κόστος που αναμένεται να προκύψει ετησίως ακόμα και αν το σύστημα (θερμοηλεκτρικός σταθμός) δεν λειτουργεί. Σε αυτό περιλαμβάνεται το πάγιο κόστος για την ασφάλιση και ενοικίαση του εξοπλισμού, τις αμοιβές του προσωπικού κτλ.

Το μεταβλητό λειτουργικό κόστος (Variable Operating Cost) συνδέεται άμεσα με τη λειτουργία του συστήματος και εξαρτάται από το μέγεθος της παραγωγής. Σε αυτό συμπεριλαμβάνονται τα έκτακτα κόστη για αντιδραστήρια (χημικές ενώσεις που πιθανώς χρησιμοποιούνται στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς π.χ. για καθαρισμό των καυσαερίων από τα NOx), ιδιοκαταναλώσεις ενέργειας, διαχείριση των αποβλήτων (υπολείμματα της καύσης λιγνίτη στην περίπτωση θερμοηλεκτρικών λιγνιτικών σταθμών) και απόθεση, έκτακτες αμοιβές προσωπικού για επίβλεψη και συντήρηση και κυρίως το κόστος λόγω εκπομπών επιβλαβών ουσιών στο περιβάλλον (εξωτερικό κόστος) (H. Nguyen et al., 2008).

Όσον αφορά το κόστος λειτουργίας και υποστήριξης στο στάδιο της εξόρυξης του λιγνίτη στο ορυχείο, αυτό συμπεριλαμβάνεται στο άμεσο κόστος καυσίμου και αφορά αποκλειστικά και μόνο το ελεγχόμενο κόστος των εκσκαφών. Συνεπώς, στο άμεσο κόστος δεν λαμβάνονται υπόψη οι αποσβέσεις του μηχανολογικού εξοπλισμού, το εξωτερικό κόστος ρύπων και άλλου είδους έμμεσες δαπάνες (Booz&Co., 2012).

Στον πίνακα 5.4 παρουσιάζονται τα κυριότερα είδη σταθερού και μεταβλητού λειτουργικού κόστους στην περίπτωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με βάση το λιγνίτη.

Πίνακας 5.4: Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης (U.S. Energy Information Administration, 2013; J. Vail Farr, 2011)

Κατηγορία Κόστους	Στοιχεία Κόστους
Σταθερό λειτουργικό κόστος	Κόστος προσωπικού και πάγια μηνιαία τέλη Επιπλέον επιδόματα Ατμοπαραγωγός Ατμοστρόβιλοι Γεννήτριες Αντλίες Συμπυκνωτές Εφεδρικός εξοπλισμός μονάδας (π.χ. πυροπροστασία) Βοηθητικός μηχανολογικός εξοπλισμός Περιστροφικός ξηραντήρας με αυλούς (STD) Ηλεκτροστατικά φίλτρα (ESP) Μονάδα εκλεκτικής καταλυτικής αντίδρασης (SCR) Μονάδα αποθείωσης καυσαερίων (FGD) Γενικά και διοικητικά έξοδα εγκατάστασης (π.χ. τηλεφωνία) Τακτική προβλέψιμη και προληπτική συντήρηση Συντήρηση υποδομών
Μεταβλητό λειτουργικό κόστος	Εξωτερικό κόστος Ατμοπαραγωγός Ατμοστρόβιλοι Γεννήτριες Αντλίες Συμπυκνωτές Εφεδρικός εξοπλισμός μονάδας (π.χ. πυροπροστασία) Βοηθητικός μηχανολογικός εξοπλισμός Περιστροφικός ξηραντήρας με αυλούς (STD) Ηλεκτροστατικά φίλτρα (ESP) Μονάδα εκλεκτικής καταλυτικής αντίδρασης (SCR) Μονάδα αποθείωσης καυσαερίων (FGD) Νερό για τη λειτουργία του πύργου ψύξης Λιπαντικά έλαια Αναλώσιμα υλικά και προμήθειες
Άλλα κόστη	Άλλα κόστη

5.3 Προσδιορισμός ιδιωτικού (εσωτερικού) κόστους (Internal Cost)

Οι κατηγορίες κόστους που προσδιορίστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους (εκτός από το κόστος λειτουργίας και υποστήριξης) αφορούν τόσο το λιγνιτωρυχείο όσο και τον θερμοηλεκτρικό σταθμό. Οι διαφορές εντοπίζονται στα διαφορετικά στοιχεία κόστους που λαμβάνονται υπόψη σε κάθε φάση (εξόρυξη και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας). Στις επόμενες παραγράφους γίνεται προσπάθεια εκτίμησης των διαφόρων στοιχείων κόστους και των κατηγοριών κόστους για τα στάδια της εξόρυξης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

5.3.1 Λιγνιτωρυχείο-Εφοδιαστική αλυσίδα βιομάζας

Κόστος Επένδυσης (CAPEX)

Για την εκτίμηση του κόστους επένδυσης του ορυχείου, λόγω έλλειψης σχετικών αναφορών στη βιβλιογραφία, λήφθηκαν υπόψη τα στοιχεία που διατίθενται στην ετήσια έκθεση της ΔΕΗ για το λογιστικό έτος 2013. Πιο συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι το συνολικό κόστος επένδυσης των

λιγνιτωρυχείων που έχει στην ιδιοκτησία της η ΔΕΗ είναι κατ' εκτίμηση ίσο με τη λογιστική τους αξία προ αποσβέσεων, η οποία δίνεται ίση με $799.961 \cdot 10^3 \text{ €}$ (ΔΕΗ, 2013a). Επιπλέον, σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 1.4 (Κ. Kavouridis, 2008), η συνολική έκταση των λιγνιτωρυχείων είναι ίση με 198 km^2 . Συνεπώς, το κόστος επένδυσης ανηγμένο στην έκταση του λιγνιτωρυχείου είναι $\frac{799.961 \cdot 10^3 \text{ €}}{198 \text{ km}^2} = 4.040.207 \text{ €/km}^2$, ενώ δύναται επίσης να αναχθεί ανά εγκατεστημένο ηλεκτρικό κιλοβάτ (kWe) της μονάδας την οποία τροφοδοτεί το ορυχείο, αρκεί να είναι γνωστή η έκταση του υπόψη ορυχείου (βλέπε αποτελέσματα κεφαλαίου 6). Θεωρώντας επαύξηση της εξορυσσόμενης μάζας λιγνίτη κατά ένα συντελεστή 20% στα πλαίσια του ορυχείου σε σύγκριση με αυτή που απαιτείται από τον θερμοηλεκτρικό σταθμό (βλέπε παράγραφο 4.3.8), σύμφωνα με τους υπολογισμούς του πίνακα 6.1, εκτιμάται ότι για καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ σταθμού 615,7 MWe, η έκταση του λιγνιτωρυχείου προσδιορίζεται από την εξίσωση 5.1.

$$K = E \cdot \frac{m_{lig} \cdot P_{net} \cdot h}{M_{lig}} \Rightarrow \quad (5.1)$$

$$K = 198 \text{ km}^2 \cdot \frac{2,05 \frac{\text{tn}_{lig}}{\text{MWhe}} \cdot 615,7 \text{ MWe} \cdot 7800 \frac{\text{h}}{\text{y}}}{52,6 \cdot 10^6 \frac{\text{tn}_{lig}}{\text{y}}} \Rightarrow$$

$$K = 37 \text{ km}^2$$

Όπου,

E είναι η συνολική έκταση των λιγνιτωρυχείων της ΔΕΗ

m_{lig} είναι η εξορυσσόμενη μάζα λιγνίτη ανά καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο σταθμό

P_{net} είναι η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του σταθμού

h είναι οι ετήσιες ώρες λειτουργίας του σταθμού

M_{lig} είναι η συνολική εξορυσσόμενη μάζα λιγνίτη από όλα τα λιγνιτωρυχεία της ΔΕΗ (ΔΕΗ, 2013a)

Επομένως, το κόστος επένδυσης του λιγνιτωρυχείου ανηγμένο στην εγκατεστημένη ισχύ του θερμοηλεκτρικού σταθμού που είναι 660 MWe, προκύπτει περίπου ίσο με:

$$K' = \frac{37 \text{ km}^2 \cdot 4.040.207 \frac{\text{€}}{\text{km}^2}}{660.000 \text{ kWe}_{inst}} = 226,44 \text{ €/kWe inst}$$

Στον πίνακα 5.5 παρουσιάζονται σε χρηματικές μονάδες τα στοιχεία και οι κατηγορίες κόστους που αφορούν το κόστος επένδυσης ενός νέου λιγνιτωρυχείου που πρόκειται να εφοδιάζει με καύσιμο τον επίσης νέο θερμοηλεκτρικό σταθμό της Πτολεμαΐδας V. Όπως ήδη αναφέρθηκε, λόγω έλλειψης δεδομένων στη βιβλιογραφία, οι επιμέρους κατηγορίες και τα στοιχεία κόστους για λιγνιτωρυχεία προσδιορίστηκαν κατ' εκτίμηση, αποδίδοντας σε καθένα από αυτά ποσοστιαίους συντελεστές επί του συνολικού κόστους επένδυσης, έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την πραγματικότητα.

Πίνακας 5.5: Κόστος Επένδυσης (CAPEX) λιγνιτωρυχείου σε (€/kWe_{inst}) (J. Vail Farr, 2011; ΔΕΗ, 2013a)

Διάνοιξη δρόμων	17,53
Δίκτυα άρδευσης	17,40
Κτίρια	23,06
Έργα πολιτικού μηχανικού και υποδομών	57,99
Μελέτη έργου	0,47
Επιμερισμός εργασιών και υλικών	0,12
Εργατικά, υπερωρίες και κίνητρα	0,83
Διαχείριση κατασκευαστικών εργασιών	0,24
Εκκίνησης παραγωγής	0,24
Επίβλεψη	0,47
Έμμεσα κόστη έργου	2,36
Κόστη ανάπτυξης	0,18
Προκαταρκτική οικονομοτεχνική μελέτη	0,18
Τεχνικές μελέτες	0,22
Περιβαλλοντικές μελέτες και αδειοδοτήσεις	0,36
Νομικά τέλη	1,22
Διαχείριση έργου	0,72
Κόστος ασφάλισης έργου	0,72
Κόστος κτήσης	3,60
Καδοφόροι εκσκαφείς	46,80
Αποθέτες	46,80
Ταινιόδρομοι	37,44
Βοηθητικός μηχανολογικός εξοπλισμός	23,40
Εφεδρικός εξοπλισμός μονάδας (π.χ. πυροπροστασία)	1,56
Κόστος προμήθειας και εγκατάστασης μηχανολογικού εξοπλισμού	155,99
Διακόπτες	2,60
Κέντρο ελέγχου ηλεκτρικού ρεύματος	2,60
Βοηθητικός ηλεκτρολογικός εξοπλισμός	1,30
Κόστος προμήθειας και εγκατάστασης ηλεκτρολογικού εξοπλισμού	6,50
ΣΥΝΟΛΟ	226,44

Άμεσο Κόστος Καυσίμου (Λιγνίτη) (Direct Fuel Cost)

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.2.4, το άμεσο κόστος καυσίμου αντικατοπτρίζει το κόστος λειτουργίας και υποστήριξης του λιγνιτωρυχείου. Σύμφωνα με τα στοιχεία της ετήσιας έκθεση της ΔΕΗ, 2013a, το συνολικό κόστος για την εξόρυξη λιγνίτη το έτος 2013 ανήλθε σε $776,902 \cdot 10^6$ €, ενώ η συνολική παραγωγή λιγνίτη ήταν της τάξεως των $52,6 \cdot 10^6$ tn. Συνεπώς, το ανηγμένο πλήρες κόστος του εκσκαπτόμενου καυσίμου ανήλθε περίπου σε $14,77 \text{ €/tn}_{\text{lig.excavated}}$ (Booz&Co., 2012; M. Leonardos, 2014). Στην τιμή αυτή συμπεριλαμβάνονται και έμμεσες δαπάνες που αντιπροσωπεύουν περίπου το 40% αυτής της τιμής, όπως αποσβέσεις εξοπλισμού, χρηματοοικονομικές δαπάνες κ.ο.κ. (Booz&Co., 2012), συνολικού ύψους περίπου $6 \text{ €/tn}_{\text{lig.excavated}}$ οι οποίες πρέπει να αφαιρεθούν από το πλήρες κόστος, ούτως ώστε να προκύψει

το άμεσο κόστος καυσίμου, το οποίο περιλαμβάνει μόνο ελεγχόμενο κόστος των εκσκαφών λιγνίτη. Δηλαδή, το άμεσο κόστος του εκσκαπτόμενου λιγνίτη είναι ίσο με $8,77 \text{ €/tn}_{\text{lig.excavated}}$.

Άμεσο Κόστος Καυσίμου (Βιομάζας) (Direct Fuel Cost)

Τα ακόλουθα οικονομικά στοιχεία βασίζονται σε δεδομένα που συλλέχθηκαν μετά από επιτόπια έρευνα, συνεντεύξεις με εμπλεκόμενους φορείς της εφοδιαστικής αλυσίδας και βιβλιογραφικά δεδομένα (ENEP-BIO, 2012)

- Η τιμή αγοράς του αχύρου στο χωράφι εκτιμάται ότι θα κυμαίνεται στα $35 \text{ €/tn}_{\text{a.r.}}$ στα πλαίσια μακροχρόνιων συμβάσεων προμήθειας που απαιτούνται για ενεργειακές μονάδες. Το κόστος αυτό περιλαμβάνει τη μίσθωση του χωραφίου από τους αγρότες και το κόστος εργασιών συλλογής (μίσθωση/χρήση μηχανημάτων, εργασία, καύσιμα, αναλώσιμα). Σημειώνεται ότι η τρέχουσα τιμή του αχύρου στην αγορά είναι γύρω στα $70 \text{ €/tn}_{\text{a.r.}}$ και αφορά τη χρήση του αχύρου ως ζωοτροφή και υλικό στρωμνής
- Το κόστος μεταφοράς με αγροτικό τρέιλερ (για την Περίπτωση Β) εκτιμάται στα $0,22 \text{ €/tn}_{\text{a.r.}} \cdot \text{km}$
- Το κόστος μεταφοράς με καρότσες εκτιμάται σε $0,14 \text{ €/tn} \cdot \text{km}$ και εξαρτάται από το είδος του καυσίμου που μεταφέρεται. Αυτό σημαίνει ότι το κόστος μεταφοράς με καρότσες στην περίπτωση της δεματοποιημένης βιομάζας είναι ίσο με $0,14 \text{ €/tn}_{\text{a.r.}} \cdot \text{km}$, ενώ στην περίπτωση των πελλετών είναι ίσο με $0,07 \text{ €/tn}_{\text{a.r.}} \cdot \text{km}$
- Το κόστος αποθήκευσης για τη δεματοποιημένη βιομάζα εκτιμάται σε $5,6 \text{ €/tn}_{\text{a.r.}}$
- Το κόστος για κάθε στάδιο χειρισμού (φόρτωση/εκφόρτωση) εκτιμάται σε $1,0 \text{ €/tn}_{\text{a.r.}}$
- Το κόστος ηλεκτρισμού για την παραγωγή πελλετών εκτιμάται σε $17 \text{ €/tn}_{\text{a.r.}}$, ενώ για τις ηλεκτρικές καταναλώσεις στον ΑΗΣ σε $2,6 \text{ €/tn}_{\text{a.r.}}$ (για την Περίπτωση Γ)

Προκειμένου να γίνουν συγκρίσεις με άλλες εφοδιαστικές αλυσίδες, θεωρείται ποσοστό κέρδους 40% επί της τελικής τιμής του καυσίμου. Οι τιμές βασίζονται σε κόστος πετρελαίου κίνησης περίπου $1,4 - 1,5 \text{ €/lt}_{\text{diesel}}$.

5.3.2 Θερμοηλεκτρικός σταθμός

Κόστος Επένδυσης (CAPEX)

Για την εκτίμηση του κόστους επένδυσης του θερμοηλεκτρικού σταθμού διερευνήθηκε ένα σημαντικό πλήθος σχετικών εκθέσεων που αφορούν το θέμα αυτό. Ειδικότερα, τόσο το κόστος επένδυσης της μονάδας, όσο και το κόστος επένδυσης της αντιρρυπαντικής τεχνολογίας προσδιορίζονται σε αρκετές μελέτες και κυμαίνονται σε ένα ευρύ φάσμα τιμών. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι τιμές για το κόστος επένδυσης που εκλέχθηκαν θεωρούνται ως αντιπροσωπευτικότερες, ενώ στο κεφάλαιο όπου παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας, εξετάζονται και άλλες τιμές.

Στον πίνακα 5.6 εμφανίζονται τα όρια για τα κόστη επένδυσης της μονάδας παραγωγής και της τεχνολογίας αντιρρύπανσης όπως παρουσιάζονται στις σχετικές μελέτες. Το σύμβολο (+) υποδεικνύει ότι στο κόστος της μονάδας παραγωγής συμπεριλαμβάνεται και αυτό της αντιρρυπαντικής τεχνολογίας, ενώ το (n.a.) ότι δεν αναφέρονται στοιχεία.

Πίνακας 5.6: Κόστος Επένδυσης (CAPEX) μονάδας παραγωγής και τεχνολογίας αντιρρύπανσης σε (€/kWe_{inst})

Reference	Μονάδα Παραγωγής	Τεχνολογία Αντιρρύπανσης		
		ESP	FGD	SCR
NETL, 2013	1178-1642	+	+	+
G. Booras, 2004	1022-1181	+	+	+
ETSAP, 2010	1384-1730	n.a.	n.a.	n.a.
Black&Veatch, 2011	2060	+	+	+
U.S. Energy Information Administration, 2013	2524	+	+	+
H. Nguyen et al., 2008	943	33-108	64-105	11-43
E. Κακαράς et al., 2013	1100	30-50	n.a.	5-30
M. Takeshita et al., 1995	872	24-63	103-111	
E. Community, 2013	n.a.	n.a.	100	40

Στον πίνακα 5.7 παρουσιάζονται οι επιμέρους κατηγορίες και τα στοιχεία κόστους επένδυσης για τον θερμοηλεκτρικό σταθμό λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία του πίνακα 5.6 και αποδίδοντας σε καθένα από αυτά ποσοστιαίους συντελεστές επί του συνολικού κόστους επένδυσης.

Πίνακας 5.7: Κόστος Επένδυσης (CAPEX) θερμοηλεκτρικού σταθμού σε (€/kWe_{inst}) (J. Vail Farr, 2011)

Διάνοιξη δρόμων	20,71
Δίκτυα άρδευσης	10,36
Υπόγειες εγκαταστάσεις	20,71
Σκυρόδεμα εγκαθίδρυσης θεμελίων	41,42
Υλικά δόμησης αποθηκών	31,07
Προμήθεια χάλυβα δόμησης και εγκατάσταση	10,36
Κτίρια	41,42
Κόστος σκαλωσιών	10,36
Κόστος διασύνδεσης υποδομής	20,71
Έργα πολιτικού μηχανικού και υποδομών	207,10
Μελέτη έργου	63,08
Επιμερισμός εργασιών και υλικών	15,77
Εργατικά, υπερωρίες και κίνητρα	31,54
Διαχείριση κατασκευαστικών εργασιών	94,62
Εκκίνησης παραγωγής	47,31
Επίβλεψη	63,08
Έμμεσα κόστη έργου	315,40
Κόστη ανάπτυξης	84,84
Προκαταρκτική οικονομοτεχνική μελέτη	19,23
Τεχνικές μελέτες	19,23
Περιβαλλοντικές μελέτες και αδειοδοτήσεις	48,07
Νομικά τέλη	213,19
Διαχείριση έργου	48,07
Κόστος ασφάλισης έργου	48,07
Κόστος κτήσης	480,70
Ατμοπαραγωγός	200,00
Ατμοστρόβιλοι	150,00
Γεννήτριες	100,00
Αντλίες	15,54

Συμπυκνωτές	15,54
Εφεδρικός εξοπλισμός μονάδας (π.χ. πυροπροστασία)	3,89
Βοηθητικός μηχανολογικός εξοπλισμός	0,90
Πύργος ψύξης	120,00
Περιστροφικός ξηραντήρας με αυλούς (STD)	11,24
Ηλεκτροστατικά φίλτρα (ESP)	40,00
Μονάδα εκλεκτικής καταλυτικής αντίδρασης (SCR)	30,00
Μονάδα αποθείωσης καυσαερίων (FGD)	90,00
Κόστος προμήθειας και εγκατάστασης μηχανολογικού εξοπλισμού	777,10
Μετασχηματιστές ηλεκτρικού ρεύματος	29,93
Διακόπτες	5,99
Κέντρο ελέγχου κινητήρων	29,93
Κέντρο ελέγχου ηλεκτρικού ρεύματος	23,94
Καταναμημένο σύστημα ελέγχου	27,53
Βοηθητικός ηλεκτρολογικός εξοπλισμός	2,39
Κόστος προμήθειας και εγκατάστασης ηλεκτρολογικού εξοπλισμού	119,70
ΣΥΝΟΛΟ	1900

Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης (O&M Cost)

Στους πίνακες 5.8 και 5.9 εμφανίζονται τα σταθερά και μεταβλητά κόστη λειτουργίας και υποστήριξης αντιστοίχως της μονάδας παραγωγής και της τεχνολογίας αντιρρύπανσης όπως παρουσιάζονται στις σχετικές μελέτες.

Πίνακας 5.8: Σταθερό Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης (OPEX) μονάδας παραγωγής και τεχνολογίας αντιρρύπανσης σε (€/kWe_{inst} year)

Reference	Μονάδα Παραγωγής	Τεχνολογία Αντιρρύπανσης		
		ESP	FGD	SCR
NETL, 2013	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
G. Booras, 2004	32,6	+	+	+
ETSAP, 2010	45	n.a.	n.a.	n.a.
Black&Veatch, 2011	16,4	+	+	+
U.S. Energy Information Administration, 2013	29,4	+	+	+
H. Nguyen et.al, 2008	29,6	1,6-3	2,1-3,7	1,7-2,8
E. Κακαράς et al., 2013	33	n.a.	n.a.	1,5-7,3
M. Takeshita et al., 1995	21,4	2-4	9,5-10,3	8-19,7
E. Community, 2013	n.a.	n.a.	1,5	7,3

Πίνακας 5.9: Μεταβλητό Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης (OPEX) μονάδας παραγωγής και τεχνολογίας αντιρρύπανσης σε (€/MWh_e)

Reference	Μονάδα Παραγωγής	Τεχνολογία Αντιρρύπανσης		
		ESP	FGD	SCR
NETL, 2013	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
G. Booras, 2004	1,3	+	+	+
ETSAP, 2010	2,2	n.a.	n.a.	n.a.
Black&Veatch, 2011	2,6	+	+	+

U.S. Energy Information Administration, 2013	3,5	+	+	+
H. Nguyen et.al, 2008	8,7	0,07-0,2	0,2-0,5	0,1-0,5
E. Κακαράς et al., 2013	1	n.a.	n.a.	0,2-0,9
M. Takeshita et al., 1995	1,6	0,9-2,4	1,2-1,6	0,15-1
E. Community, 2013	n.a.	n.a.	0,25	0,8

Στον πίνακα 5.10 εμφανίζονται οι κατηγορίες και τα στοιχεία του κόστους λειτουργίας και υποστήριξης του θερμοηλεκτρικού σταθμού λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία της παραγράφου 5.2.4

Πίνακας 5.10: Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης (OPEX) θερμοηλεκτρικού σταθμού σε (€/kWe_{inst} year) (J. Vail Farr, 2011)

Κόστος προσωπικού και μηνιαία πάγια τέλη	0,65
Επιπλέον επιδόματα	0,65
Ατμοπαραγωγός	5,00
Ατμοστρόβιλοι	5,00
Γεννήτριες	5,00
Αντλίες	1,30
Συμπυκνωτές	1,30
Εφεδρικός εξοπλισμός μονάδας (π.χ. πυροπροστασία)	1,30
Βοηθητικός μηχανολογικός εξοπλισμός	1,30
Περιστροφικός ξηραντήρας με αυλούς (STD)	2,70
Ηλεκτροστατικά φίλτρα (ESP)	1,83
Μονάδα εκλεκτικής καταλυτικής αντίδρασης (SCR)	2,91
Μονάδα αποθείωσης καυσαερίων (FGD)	2,50
Γενικά και διοικητικά έξοδα εγκατάστασης (π.χ. τηλεφωνία)	0,33
Τακτική προβλέψιμη και προληπτική συντήρηση	0,33
Συντήρηση υποδομών	0,42
Σταθερό λειτουργικό κόστος	32,50
Ατμοπαραγωγός	0,40
Ατμοστρόβιλοι	0,21
Γεννήτριες	0,20
Αντλίες	0,09
Συμπυκνωτές	0,04
Εφεδρικός εξοπλισμός μονάδας (π.χ. πυροπροστασία)	0,04
Βοηθητικός μηχανολογικός εξοπλισμός	0,04
Περιστροφικός ξηραντήρας με αυλούς (STD)	0,03
Ηλεκτροστατικά φίλτρα (ESP)	0,10
Μονάδα εκλεκτικής καταλυτικής αντίδρασης (SCR)	0,30
Μονάδα αποθείωσης καυσαερίων (FGD)	0,30
Νερό για τη λειτουργία του πύργου ψύξης	0,40
Λιπαντικά έλαια	0,04
Αναλώσιμα υλικά και προμήθειες	0,00
Μεταβλητό λειτουργικό κόστος	2,20
ΣΥΝΟΛΟ	48,51

Κόστος Περιτροφικού Ξηραντήρα Αυλών (Steam Tube Dryer)

Ο προσδιορισμός του κόστους επένδυσης (CAPEX) και του κόστους υποστήριξης και λειτουργίας (O&M Cost) του περιστροφικού ξηραντήρα με αυλούς, που χρησιμοποιείται στην περίπτωση της προξήρανης του καυσίμου και παρουσιάζεται στους πίνακες 5.7 και 5.10, βασίστηκε στη μέθοδο που υποδεικνύεται στη μελέτη [A.S. Mujumdar, 2006](#). Σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία, το κόστος της συσκευής δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P = (M\&S\ Index) \cdot A \cdot V^c \quad (5.2)$$

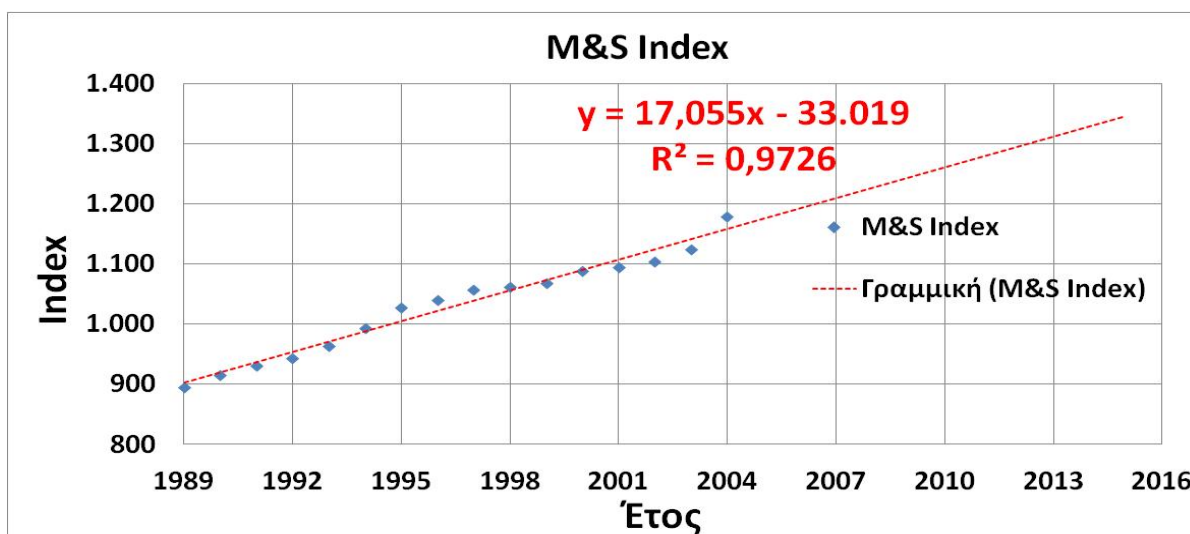
Όπου,

P: το κόστος της συσκευής σε δολάρια ΗΠΑ (\$). Η συναλλαγματική αξία μεταξύ δολαρίου ΗΠΑ (\$) και ευρώ (€) για το έτος 2015 είναι: 1 \$=0,89 €

V: ο όγκος του ξηραντήρα που λαμβάνεται ίσος με 138,5 m³ (διάμετρος: 3 m και μήκος: 19,6 m)

A, c: συντελεστές που για περιστροφικούς ξηραντήρες αυλών με 3<V<300 m³ ισούνται με 55 και 0,58 αντιστοίχως

M&S Index: ο συντελεστής Marshall and Swift που δίνεται στο διάγραμμα 5.1. Αν και η μελέτη παρέχει τιμές για αυτόν τον συντελεστή έως και το έτος 2004, εντούτοις με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίζεται η μαθηματική συνάρτηση που παρεμβάλει τις δοθείσες τιμές και έτσι στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εκτιμάται ότι για το έτος 2015 η τιμή του συντελεστή θα είναι περίπου 1.346,8.



Διάγραμμα 5.1: Συντελεστής Marshall and Swift ([A.S. Mujumdar, 2006](#))

Στους πίνακες 5.11 έως 5.13 εκτιμώνται τα κόστη επένδυσης, λειτουργίας και υποστήριξης του ξηραντήρα σε (€ 2015). Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο θερμοηλεκτρικός σταθμός ο οποίος εξετάζεται έχει εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ 660 MWe και καθαρά παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ 615,7 MWe, τότε είναι εφικτός και ο υπολογίζονται των ανηγμένων μεγεθών κόστους όπως φαίνεται παρακάτω.

Πίνακας 5.11: Κόστος Επένδυσης (CAPEX) περιστροφικού ξηραντήρα αυλών σε (€₂₀₁₅) ([A.S. Mujumdar, 2006](#))

Σειρά	Κόστος	Υπολογισμός	Εκτίμηση (€ 2015)
A	Κόστος συσκευής	Σχέση (5.3)	1.144.376
B	Συναρμολόγηση, σωληνώσεις, καλωδιώσεις, όργανα	99% A	1.132.932

Γ	Μεταφορά	7% (A+B)	159.411
Δ	Κόστος εγκατάστασης	(A+B+Γ)	2.436.720
Ε	Κόστος στέγασης	35% Δ	852.852
ΣΤ	Διαμόρφωση χώρου	35% Δ	852.852
Ζ	Άμεσο κόστος εξοπλισμού	(Δ+Ε+ΣΤ)	4.142.424
Η	Ασφάλιση, φόροι	7% Ζ	289.969
Θ	Αμοιβή αναδόχου του έργου	27% Ζ	1.118.454
Ι	Απρόβλεπτα	30% Ζ	1.242.727
Κ	Προμήθεια, εποπτεία, διοικητικά και άλλα έξοδα	15% Ζ	621.363
Λ	Κόστος Επένδυσης	(Ζ+Η+Θ+Ι+Κ)	7.414.939 € 11,24 €/kWe_{inst}

Πίνακας 5.12: Σταθερό Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης (O&M Cost) περιστροφικού ξηραντήρα αυλών σε (€₂₀₁₅) (A.S. Mujumdar, 2006)

Σειρά	Κόστος	Υπολογισμός	Εκτίμηση (€ 2015)
1	Καταβολή τόκων επένδυσης	5% Λ	370.747
2	Σταθεροί φόροι και ενοικιάσεις	2% Λ	148.298
3	Προστασία εξοπλισμού, ασφάλειες	1% Λ	74.149
4	Συντήρηση	10% Λ	741.493
5	Μισθοί και άλλα πάγια	6% Λ	444.896
6	Σταθερό Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης	(1+2+3+4+5+6+7)	1.779.585 € 2,7 €/kWe_{inst}

Πίνακας 5.13: Μεταβλητό Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης (O&M Cost) περιστροφικού ξηραντήρα αυλών σε (€₂₀₁₅) (A.S. Mujumdar, 2006)

Σειρά	Κόστος	Υπολογισμός	Εκτίμηση (€ 2015)
A	Εργατικά	2 εργάτες x 8760 ώρες/έτος x 23,9 €/ώρα	418.476
B	Συντήρηση κεφαλαίου κινήσεως	4% A	16.739
Γ	Μεταβλητό Κόστος Λειτουργίας και Υποστήριξης	(A+B)	435.216 € 0,71 €/kWe_{inst}

5.4 Προσδιορισμός Εξωτερικό Κόστος (External Cost)

Η ζημιά που προκαλούν στο περιβάλλον οι επιπτώσεις από την εκπομπή ρύπων του τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και η συσχέτιση της με τιμές οικονομικού κόστους (εξωτερικό κόστος) έχει αποτελέσει ένα θέμα το οποίο διερευνήθηκε και διερευνάται σε πολλές μελέτες, ενώ στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές σχετικές αναφορές. Συνεπώς, η οικονομική ανάλυση που γίνεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και αφορά ολόκληρο τον κύκλο ζωής του λιγνίτη, περιλαμβάνει πέραν των προαναφερθέντων ειδών κόστους και το εξωτερικό κόστος το οποίο εκφράζει την απόδοση οικονομικών τιμών στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Γ. Θεοδοσίου, 2008).

Τα εξωτερικά κόστη αφορούν τις ζημιές που υφίστανται σε κοινωνικά αγαθά (ανθρώπινη υγεία) και στο περιβάλλον (κτίρια, καλλιέργειες, δάση και οικοσυστήματα) και δεν λαμβάνονται υπόψη από αμφότερες τις εμπλεκόμενες ομάδες, των παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας και τους καταναλωτές (D.A. Georgakellos, 2010; R. Montanari, 2004). Οι επιπτώσεις που προκαλούνται στην ανθρώπινη υγεία και στην αλλαγή του κλίματος του πλανήτη εξαιτίας της ατμοσφαιρική ρύπανσης από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μερικές από τις πιο σημαντικές κατηγορίες ζημιών που έχουν διερευνηθεί σε βάθος (M. Bozicevic Vrhovcak et al., 2005). Πράγματι, είναι αξιοσημείωτο

το γεγονός ότι παρά την διεθνή οικονομική αστάθεια που κυριαρχεί ως το μείζον θέμα προβληματισμού τα τελευταία χρόνια, η μεταβολή του κλίματος του πλανήτη εξαιτίας ανθρωπογενών παραγόντων παραμένει ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει κάθε σύγχρονη κοινωνία (S. Burandt et al., 2010; N. Zografakis et al., 2010). Σε αυτό το πλαίσιο, και δεδομένων των διεθνών πιέσεων σχετικά με τα περιβαλλοντικά θέματα που αφορούν τον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, καθώς επίσης και της ευρέως αποδεκτής αρχής ότι «αυτός που ρυπαίνει πρέπει να πληρώσει», το ερώτημα που ανακύπτει αφορά το κατά πόσον είναι εφικτή η απαίτηση ιδιωτικοποίησης του εξωτερικού κόστους στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση, το θέμα που πρέπει να διερευνηθεί είναι τι είδους επίδραση μπορεί να έχει μία τέτοια πρακτική στο κόστος παραγωγής ενέργειας και κατ' επέκταση στην τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Όσον αφορά την αποτίμηση του εξωτερικού κόστους σε χρηματικές μονάδες, αυτό είναι αδιαμφισβήτητο το πιο δύσκολο βήμα της μεθοδολογίας αποτίμησης, αφού οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις σχετίζονται με ελεύθερα αγαθά που δεν έχουν εμπορεύσιμη αξία όπως είναι η ανθρώπινη υγεία, η βιοποικιλότητα κ.ο.κ. Για την απόδοση χρηματικής αξίας σε αυτού του είδους τις φυσικές επιδράσεις, χρησιμοποιούνται τεχνικές αξιολόγησης που αφορούν το πεδίο οικονομίας που ασχολείται με την κοινωνική ευημερία. Οι τεχνικές αυτές διακρίνονται στις άμεσες και έμμεσες μεθόδους προσέγγισης (D.W. Pearce et al., 1990). Οι άμεσες μέθοδοι που αναφέρονται και ως Μέθοδοι Αποτίμησης του Ενδεχομένου, συνίστανται στην εκτίμηση της διάθεσης των ατόμων να καταβάλλουν ορισμένα χρηματικά ποσά προκειμένου να αποφύγουν δυσμενή υποθετικά σενάρια και να μειώσουν έτσι τον κίνδυνο και τις επιδράσεις στην υγεία και το περιβάλλον. Οι έμμεσες μέθοδοι επιδιώκουν να αποδώσουν χρηματική αξία σε μη εμπορεύσιμα αγαθά μέσω προσδιορισμού των σχέσεων που τα συνδέουν με άλλα εμπορεύσιμα αγαθά ή με συγκεκριμένες συμπεριφορές οι οποίες έχουν μία πλήρως προσδιοριζόμενη τιμή και ενεργούν ως υποκατάστατα ή συμπληρώματα των εξεταζόμενων αγαθών.

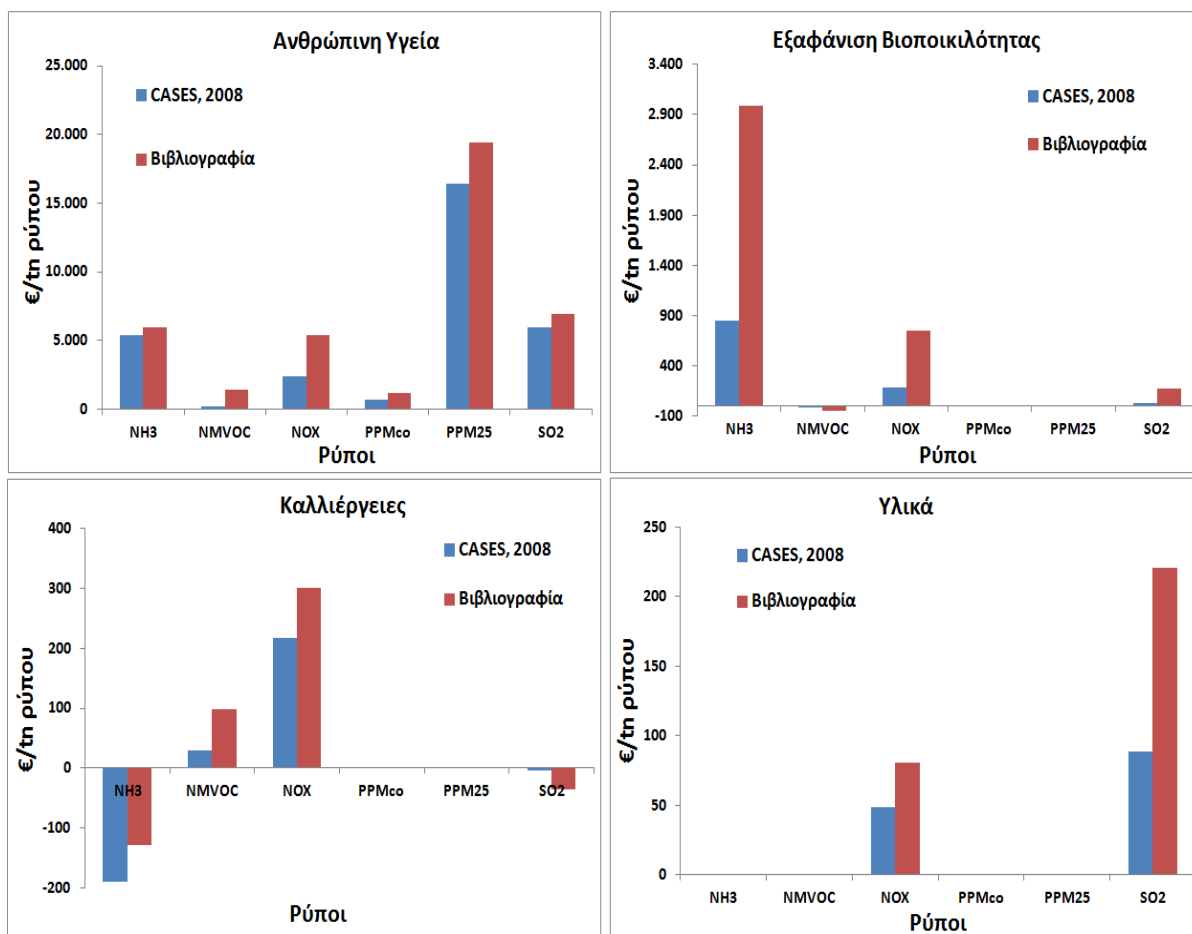
Ωστόσο, είναι ολοφάνερο ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τέτοιου είδους μεθοδολογίες περιέχουν υψηλό ποσοστό αβεβαιότητας εξαιτίας της περιορισμένης γνώσης σχετικά με τις φυσικές διαδικασίες που εμπλέκονται σε τέτοιου είδους εκτιμήσεις και την έλλειψη ή την μεταβλητότητα των δεδομένων και των μοντέλων. Παρά τον παραπάνω περιορισμό, αυτές οι προσεγγίσεις επιτρέπουν μια αξιόλογη εκτίμηση της αξίας των ελεύθερων αγαθών για την κοινωνία, όπως η ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Ως εκ τούτου, το άθροισμα των υπολογιζόμενων τιμών σε συνδυασμό με την αξία εμπορεύσιμων αγαθών που επηρεάζονται από τη μόλυνση του περιβάλλοντος, δίνουν ένα μέτρο των εξωτερικότητων που σχετίζονται με τις υπό εξέταση ρυπογόνες δραστηριότητες.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, το ενδιαφέρον στρέφεται στον προσδιορισμό του εξωτερικού κόστους που σχετίζεται με τις εκπομπές ρύπων οι οποίοι συνεισφέρουν σε επιμέρους κατηγορίες επιπτώσεων και ζημιών. Οι τιμές εξωτερικού κόστους παρουσιάζονται σε ένα πλήθος σχετικών εργασιών (E.B.f.R.a.D. (EBRD), 2014; E.E.A. (EEA), 2014; E. Community, 2013; NTUA, 1997; A. Rentizelas et al., 2014; D. Streimikiene et al., 2014) και βάσεις δεδομένων όπως η ExterneE (E. COMMISSION, 2003) και NEEDS (NEEDS, 2009). Στον πίνακα 5.14 παρουσιάζεται το εξωτερικό κόστος των βασικότερων ρύπων σε ορισμένες κατηγορίες ζημιών όπως προκύπτει από τη μέση τιμή των παραπάνω μελετών, προεξοφλημένων στο έτος 2014. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται και το εξωτερικό κόστος της σκόνης που εκλύεται κατά τη διάρκεια εργασιών του ορυχείου και διερευνάται στην εργασία A. Papagiannis et al., 2014. Σε αυτήν, τα σωματίδια σκόνης μοντελοποιούνται με αυτά των σωματιδίων PM_{co} ($PM_{2.5-10}$) και συνεπώς κοστολογούνται ανάλογα με το εξωτερικό κόστος αυτών. Οι συντελεστές εκπομπής σκόνης σε $kg PM_{co}/tn_{lig.exc}$ για τα βασικά μηχανήματα των λιγνιτωρυχείων παρουσιάζονται στην ίδια εργασία.

Πίνακας 5.14: Εξωτερικό κόστος ρύπων σε επιλεγμένες κατηγορίες ζημιών σε (€₂₀₁₄/tn)

Ρύποι στον αέρα	Μονάδα	Υγεία	Βιοποικιλότητα	Καλλιέργειες	Υλικά	Αλλαγή κλίματος
NM VOC	€/tn	1.444	-45,1	97,7	0	0
NO _x	€/tn	5.354	754,3	301,3	80,3	0
PM _{co} (PM _{2.5-10})	€/tn	1.133	0	0	0	0
PM _{2.5}	€/tn	19.428	0	0	0	0
SO ₂	€/tn	6.904	174,6	-34,8	220,8	0
CO ₂	€/tn	0	0	0	0	5
NH ₃	€/tn	5.929	2.992,5	-127,9	0	0
Cd	€/tn	42.904	-	-	-	-
As	€/tn	266.611	-	-	-	-
Ni	€/tn	2.988	-	-	-	-
Pb	€/tn	699.678	-	-	-	-
Hg	€/tn	5.943.346	-	-	-	-
Cr	€/tn	24.103	-	-	-	-
Cr VI	€/tn	170.772,7	-	-	-	-
Formaldehyde	€/tn	81.076	-	-	-	-
Dioxin	€/tn	1,51E+13	-	-	-	-
Aerosols, radioactive	€/Bq	3,00E-07	-	-	-	-
Carbon-14	€/Bq	2,00E-06	-	-	-	-
Iodine-131	€/Bq	3,00E-06	-	-	-	-
Iodine-133	€/Bq	5,00E-10	-	-	-	-
Krypton-85	€/Bq	3,00E-11	-	-	-	-
Noble gases, radioactive	€/Bq	7,00E-11	-	-	-	-
Thorium-230	€/Bq	5,00E-06	-	-	-	-
Uranium-234	€/Bq	1,00E-06	-	-	-	-
Uranium-235	€/Bq	1,00E-06	-	-	-	-
Uranium-238	€/Bq	1,00E-06	-	-	-	-
Ρύποι στο νερό						
Iodine-131	€/Bq	1,00E-05	-	-	-	-
Uranium-234	€/Bq	3,00E-08	-	-	-	-
Uranium-235	€/Bq	1,00E-07	-	-	-	-
Uranium-238	€/Bq	3,00E-07	-	-	-	-
Σκόνη από το λιγνιτωρυχείο						
PM _{co} (PM _{2.5-10})	€/tn	1.133	-	-	-	-

Επιπλέον, οι τιμές εξωτερικού κόστους συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές που παρέχονται από αναγνωρισμένους φορείς, όπως [CASES, 2008](#), οι οποίοι διεξάγουν αξιολογή έρευνα πάνω στον τομέα προσδιορισμού του εξωτερικού κόστους για διάφορες χώρες της Ευρώπης, ανάλογα με το ύψος έκλυσης των ρύπων, αλλά και για ένα πλήθος επιπτώσεων και ζημιών, παρέχοντας τη δυνατότητα προεξόφλησης των τιμών στα έτη από 2000 έως και 2030. Στο Σχήμα 5.3 συγκρίνονται οι μέσες τιμές εξωτερικού κόστους για τους βασικούς ρύπους που προέκυψαν από τις παραπάνω εργασίες, με αυτές που δίνονται στην βάση δεδομένων [CASES, 2008](#) για άγνωστο ύψος έκλυσης ρύπων (“Unknown Height of Release”) και για το έτος 2014.



Σχήμα 5.3: Σύγκριση τιμών εξωτερικού κόστους βιβλιογραφίας και CASES, 2008

Οι διαφορές που παρατηρούνται στις τιμές του εξωτερικού κόστους που δίνονται από τη βιβλιογραφία και την βάση δεδομένων CASES, 2008 οφείλονται στους παρακάτω λόγους:

1. Στο γεγονός ότι πρόκειται για μεγέθη με μεγάλη στοχαστικότητα, αφού πρόκειται για εκτιμήσεις και όχι ακριβείς τιμές
2. Στις διαφορετικές μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν για τον προσδιορισμό τους. Όπως ήδη αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, στην περίπτωση της βιβλιογραφίας οι τιμές προέκυψαν ως ο μέσος όρος αυτών που δίνονται στις διάφορες μελέτες, ενώ οι αντίστοιχες από τη βάση δεδομένων έχουν προκύψει από μεθόδους οικονομικής ανάλυσης, αποτιμώντας σε χρηματικές μονάδες την πρόθεση των ατόμων να πληρώσουν για αποφυγή προβλημάτων στην υγεία τους ή για τη επέκταση της αναμενόμενης ζωής τους κατά ένα έτος. Ακόμη, οι διαφορετικές υποθέσεις που έχουν ληφθεί υπόψη στις μεθοδολογίες αυτές αποτελούν έναν επιπλέον παράγοντα διαφοροποίησης. Για παράδειγμα, στην βάση δεδομένων CASES, 2008 έχει υποτεθεί άγνωστο ύψος έκλυσης ρύπων (“Unknown Height of Release”), ενώ στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν στοιχεία για το ύψος εκπομπής

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι τιμές του εξωτερικού κόστους που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.14 λαμβάνονται υπόψη για τους υπολογισμούς του συνολικού κόστους.

5.5 Βιβλιογραφική διερεύνηση

Οι αντιπροσωπευτικότερες βιβλιογραφικές μελέτες (δημοσιευμένες στο χρονικό διάστημα 2005-2014) που αφορούν την κοστολόγηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το λιγνίτη, διαφέρουν τόσο ως προς τις κατηγορίες κόστους της μεθόδου Κοστολόγησης Κύκλου Ζωής (ΚΚΖ) που λαμβάνουν υπόψη, όσο και ως προς τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Σε όλες σχεδόν τις μελέτες γίνεται εκτίμηση του εξωτερικού κόστους από την εκπομπή ρύπων στο περιβάλλον που προέκυψαν σε διαφορετικά στάδια του κύκλου ζωής του λιγνίτη. Στη μελέτη του [D.A. Georgakellos, 2010](#) λαμβάνεται υπόψη το εξωτερικό κόστος εξαιτίας του φαινομένου του θερμοκηπίου, εξετάζοντας όμως μόνο τις άμεσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που προκύπτουν από το στάδιο της καύσης του λιγνίτη και συνεισφέρουν ως επί το πλείστον στο φαινόμενο αυτό. Ανάλογη εκτίμηση για το εξωτερικό κόστος πραγματοποιείται στις μελέτες των [D. C. Bauer, 2008](#); [D.A. Georgakellos, 2012](#) και [A. Rentizelas et al., 2014](#) λαμβάνοντας ωστόσο υπόψη τις εκπομπές CO₂ από όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του λιγνίτη.

Επιπλέον, ορισμένοι μελετητές όπως οι [K. Kavouridis et al., 2007](#); [A. Rentizelas et al., 2014](#); [Γ. Θεοδοσίου, 2008](#); [K. Καβουρίδης et al., 2005](#) και [Booz&Co., 2012](#) λαμβάνουν υπόψη και το κόστος δικαιωμάτων εκπομπών CO₂ κατά τη φάση της καύσης του λιγνίτη στον σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι [C. Bauer, 2008](#); [Γ. Θεοδοσίου, 2008](#) και [A. Rentizelas et al., 2014](#) προχωρώντας ακόμη ένα βήμα πιο πέρα, μελετούν το εξωτερικό κόστος των ζημιών που επιφέρουν οι εκπομπές ρύπων από όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής όχι μόνο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, αλλά και στην ανθρώπινη υγεία, στη βιοποικιλότητα, στις αγροτικές καλλιέργειες και στα υλικά. Το ίδιο κάνουν και οι [D. Streimikiene et al., 2009](#), έχοντας όμως δεδομένες τις εκπομπές μόνο από τη φάση της καύσης του λιγνίτη.

Εκτός από τα κόστη εκπομπών, στη μελέτη του [K. Καβουρίδης et al., 2005](#) προσδιορίζεται το συνολικό κόστος εξόρυξης του καυσίμου, ενώ στις μελέτες των [D.A. Georgakellos, 2010](#); [K. Kavouridis et al., 2007](#); [A. Rentizelas et al., 2014](#); [Γ. Θεοδοσίου, 2008](#) και [Booz&Co., 2012](#) υπολογίζεται ακόμα και το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος, αξίζει να επισημανθεί ότι εξετάζοντας αναλυτικά όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του λιγνίτη και εκτιμώντας τόσο το εξωτερικό όσο και το εσωτερικό (ιδιωτικό) κόστος που διέπει την παραγωγή 1 MWh, οι εργασίες των [Γ. Θεοδοσίου, 2008](#) και [A. Rentizelas et al., 2014](#) αποδεικνύονται ως οι πλέον ασφαλείς για την εξαγωγή συμπερασμάτων, αφού εκτιμούν το πραγματικό συνολικό κόστος της διαδικασίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη, συνυπολογίζοντας μάλιστα και το κόστος επένδυσης του θερμοηλεκτρικού σταθμού στο συνολικό κόστος παραγωγής ενέργειας.

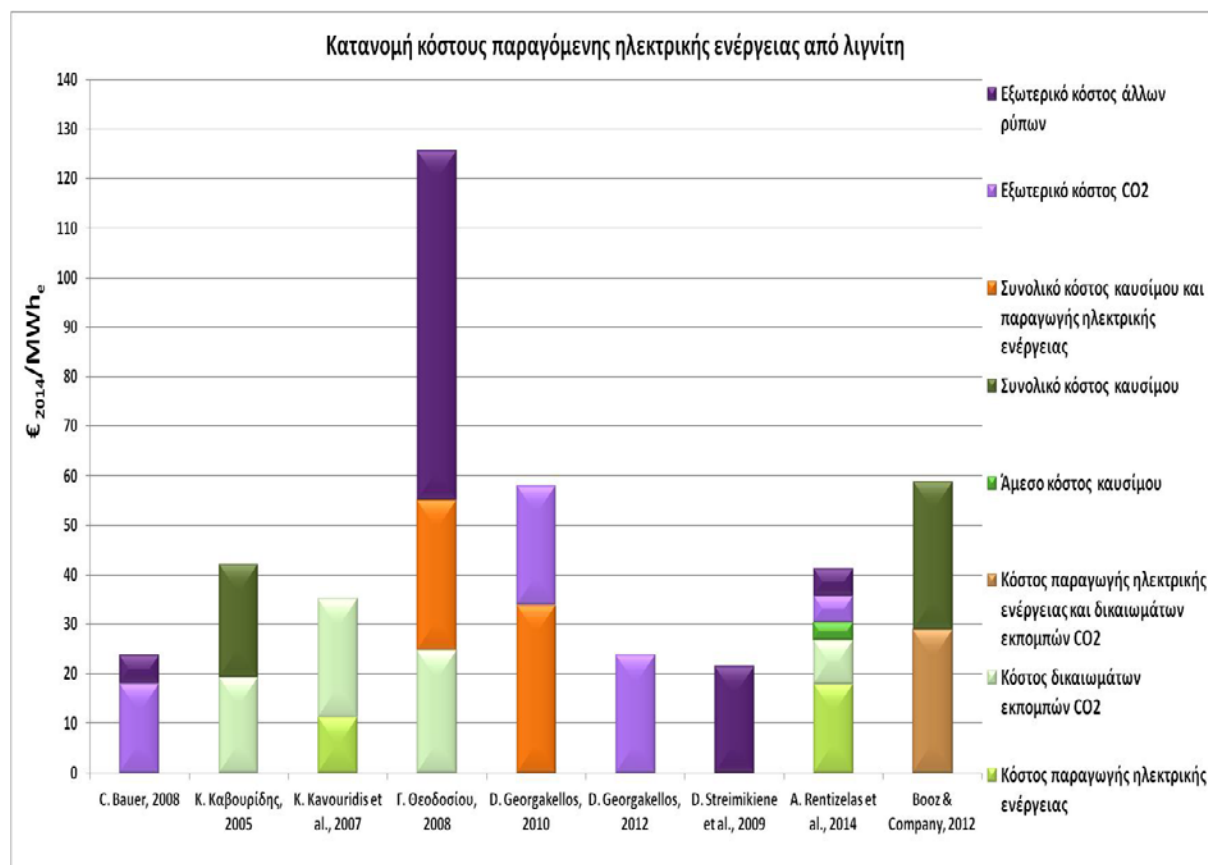
Στους πίνακες 5.15 και 5.16 (λόγω έλλειψης χώρου) παρουσιάζονται οι τιμές της κοστολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ στο διάγραμμα 5.2 συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις παραπάνω μελέτες.

Πίνακας 5.15: Κοστολόγηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη (€₂₀₁₄/MWh)

Μελέτη	Εξωτερικό κόστος		Ιδιωτικό Κόστος		
	CO ₂	Άλλοι ρύποι	Κόστος καυσίμου Άμεσο	Κόστος καυσίμου Συνολικό	Κόστος παραγωγής
C. Bauer, 2008	18,0	5,9	-	-	-
K. Καβουρίδης et al., 2005	-	-	-	22,8	-
K. Kavouridis et al., 2007	-	-	-	-	11,2
Γ. Θεοδοσίου, 2008	-	70,6	-	-	-
D.A. Georgakellos, 2010	23,9	-	-	-	-
D.A. Georgakellos, 2012	23,8	-	-	-	-
D. Streimikiene et al., 2009	-	21,5	-	-	-
A. Rentizelas et al., 2014	5,3	5,7	3,7	-	17,9
Booz&Co., 2012	-	-	-	29,8	-

Πίνακας 5.16: Κοστολόγηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη (€₂₀₁₄/MWh)

Μελέτη	Ιδιωτικό Κόστος		
	Συνολικό κόστος καυσίμου και κόστος παραγωγής	Κόστος δικαιωμάτων εκπομπών CO ₂	Κόστος δικαιωμάτων εκπομπών CO ₂ και κόστος παραγωγής
C. Bauer, 2008	-	-	-
K. Καβουρίδης et al., 2005	-	19,2	-
K. Kavouridis et al., 2007	-	23,9	-
Γ. Θεοδοσίου, 2008	30,2	24,7	-
D.A. Georgakellos, 2010	33,8	-	-
D.A. Georgakellos, 2012	-	-	-
D. Streimikiene et al., 2009	-	-	-
A. Rentizelas et al., 2014	-	8,8	-
Booz&Co., 2012	-	-	28,8



Διάγραμμα 5.2: Σύγκριση βιβλιογραφικών αναφορών σχετικά με την κοστολόγηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη

Σχόλια διαγράμματος 5.2

Παρατηρώντας το παραπάνω ραβδόγραμμα καθίσταται εμφανής η έλλειψη βιβλιογραφικών μελετών (εκτός μερικών εξαιρέσεων) οι οποίες εκτιμούν με τρόπο συστηματικό το συνολικό κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το λιγνίτη. Προς αυτή την κατεύθυνση στρέφεται το ενδιαφέρον στα πλαίσια της παρούσας εργασίας τείνοντας να καλύψει το κενό αυτό. Επιπλέον, η μεγάλη διακύμανση στις διάφορες κατηγορίες κόστους που μελετώνται από τις παραπάνω

εργασίες. Αυτό οφείλεται κυρίως σε δύο λόγους: α) Στο ότι οι παραδοχές και εκτιμήσεις που γίνονται σε κάθε εργασία διαφέρουν και β) στο ότι η χρονική στιγμή διεξαγωγής κάθε μελέτης διαφέρει, με αποτέλεσμα τα στοιχεία κοστολόγησης που είναι δυναμικά σε σχέση με το χρόνο να θεωρούνται ως στατικά. Στις σχετικές μελέτες τα δικαιώματα εκπομπών CO₂ κυμαίνεται στην περιοχή των 20-30 €/tn, με εξαίρεση τη μελέτη των [A. Rentizelas et al., 2014](#) οι οποίοι έχουν θεωρήσει χαμηλότερη τιμή γύρω στα 8,8 €/tn ([Euracoal, 2013](#)). Για την κοστολόγηση των υπόλοιπων ρύπων δεν υπάρχει μία παγιωμένη τεχνική υπολογισμού. Διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την περιοχή και το έτος της μελέτης, ενώ αναγνωρισμένοι οργανισμοί εκδίδουν ανά τακτά χρονικά διαστήματα τεχνικές εκθέσεις στις οποίες προτείνεται η κοστολόγηση των βασικότερων ρύπων ([NEEDS, 2009](#)). Το κόστος εξόρυξης του καυσίμου (λιγνίτη) διαφέρει σημαντικά από περιοχή σε περιοχή και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ορυχείου όπου εξορύσσεται, αλλά και από τη θερμογόνο δύναμή του. Τέλος, το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις που οφείλονται κυρίως στη διαφορετική τεχνολογία αξιοποίησης του καυσίμου και τα χαρακτηριστικά του θερμοηλεκτρικού σταθμού, όπως τον βαθμό απόδοσης και την εγκατεστημένη ισχύ του. Για τη περίπτωση της Ελλάδας το κόστος μόνο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη κυμαίνεται γύρω στα 40-50 €/MWh, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα κόστη καυσίμου και εκπομπής ρύπων.

Κεφάλαιο 6°

Αποτελέσματα – Περιβαλλοντική αποτίμηση

6.1 Γενικά

Όπως ήδη αναφέρθηκε στις παραγράφους 3.2.1 και 4.3.8, προκειμένου να αποτυπωθεί η υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα, όσον αφορά τον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το λιγνίτη, 3 περιπτώσεις καύσης εξετάζονται και συγκρίνονται μεταξύ τους:

- 1) Καύση φυσικού λιγνίτη (Περίπτωση αναφοράς)
- 2) Μικτή καύση φυσικού λιγνίτη, με 30% θερμική υποκατάσταση με προ-ξηραμένο λιγνίτη
- 3) Μικτή καύση φυσικού λιγνίτη, με 6% θερμική υποκατάσταση με βιομάζα (straw)

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την περιβαλλοντική αξιολόγηση του τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού SimaPro v.7.3.3 και την εφαρμογή των μεθόδων Impact 2002+ και Greenhouse Gas Protocol v1.01, που χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι υπολογισμοί αφορούν τόσο τον λιγνιτικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τα χαρακτηριστικά που δίνονται στον πίνακα 4.5 και αφορούν τη νέα μονάδα Πτολεμαΐδα V, όσο και το λιγνιτωρυχείο το οποίο τον τροφοδοτεί με καύσιμο. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται ότι το λιγνιτωρυχείο είναι εξαρχής σχεδιασμένο ούτως ώστε να ανταποκρίνεται στις ανάγκες του συγκεκριμένου σταθμού και κατά συνέπεια οι βασικές παράμετροι λειτουργίας του, όπως ο ρυθμός εξόρυξης λιγνίτη (βλέπε παράγραφο 4.3.8), υπαγορεύονται από τις απαιτήσεις του σταθμού που είναι εγκατεστημένος πλησίον αυτού. Επιπλέον, στην περιβαλλοντική αξιολόγηση λαμβάνεται υπόψη η εφοδιαστική αλυσίδα της βιομάζας όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.5.

Οι συντελεστές εκπομπής για τους βασικούς ρύπους (CO_2 , SO_2 και NO_x) του θερμοηλεκτρικού σταθμού έχουν προσδιοριστεί ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη τη σύσταση του καυσίμου που καίγεται σε κάθε περίπτωση, ενώ για τους υπόλοιπους ρύπους οι συντελεστές εκπομπής λαμβάνονται από τη βάση δεδομένων Ecoinvent και περιέχονται στο «process» λειτουργίας του σταθμού (βλέπε παράγραφο 4.3). Ειδικότερα, οι συντελεστές εκπομπής για τα CO_2 και SO_2 έχουν υπολογιστεί από τη στοιχειομετρία της εξίσωσης καύσης του υπόψη καυσίμου. Στην περίπτωση όμως των NO_x , όπου δεν υφίσταται αναλυτικός υπολογισμός των συντελεστών εκπομπής, ακολουθήθηκε η μέθοδος που περιγράφεται στη μελέτη [M. Dios et al., 2013](#). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, σε περιπτώσεις όπου δεν είναι εφικτός ο πειραματικός προσδιορισμός των συντελεστών εκπομπής NO_x , μία απλή εναλλακτική, με μεγάλα ωστόσο σφάλματα, είναι ο υπολογισμός συντελεστών αναλογίας βάσει των συστάσεων ανάμεσα σε δεδομένα καύσιμα, εκ των οποίων στο ένα είναι γνωστοί οι συντελεστές εκπομπής NO_x από πειραματικές μετρήσεις.

Ένας τρόπος επαλήθευσης της ορθότητας των αποτελεσμάτων σύμφωνα με τη μελέτη [E. Karampinis et al., 2011](#), βασίζεται στην παρατήρηση ότι το ποσοστό μείωσης των εκπομπών NO_x στις περιπτώσεις μικτής καύσης πρέπει να είναι περίπου ίσο με το ποσοστό θερμικής υποκατάστασης. Όπως αναφέρεται στη συγκεκριμένη μελέτη, η παρατήρηση αυτή είναι σύμφωνη και με τα αποτελέσματα της ρευστομηχανικής μοντελοποίησης του λέβητα κατά τη μεθοδολογία CFD.

Τέλος, αξίζει να επισημανθεί ότι οι εκπομπές ρύπων που προκύπτουν κατά τις φάσεις κατασκευής και αποσυναρμολόγησης του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνονται υπόψη αφού αναχθούν στη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής του έργου, βάση της μέσης ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, εξετάζεται κάθε περίπτωση καύσης ξεχωριστά.

6.2 Καύση φυσικού λιγνίτη (Περίπτωση αναφοράς)

Οι βασικές παράμετροι λειτουργίας του λιγνιτωρυχείου και του θερμοηλεκτρικού σταθμού, όπως υπολογίστηκαν με βάση τον καθαρό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης, παρουσιάζονται στους πίνακες 6.1 και 6.2 αντίστοιχα.

Παράμετρος	Μονάδα	Αξία
Έκταση	km ²	37
Αριθμός καδοφόρων εκσκαφών	Number	10
Αριθμός αποθετών	Number	5
Συνολικό μήκος ταινιόδρομων	km	54,4
Αριθμός ντιζελοκίνητων μηχανημάτων	Number	281
Εκσκαφές λιγνίτη	tn _{lig} /MWhe	2,05
Σχέση εκμετάλλευσης	m ³ _{over} /tn _{lig}	5,96
Εκσκαφές υπερκειμένων	m ³ _{over} /MWhe	12,20
Συντελεστής ασφαλείας	%	20

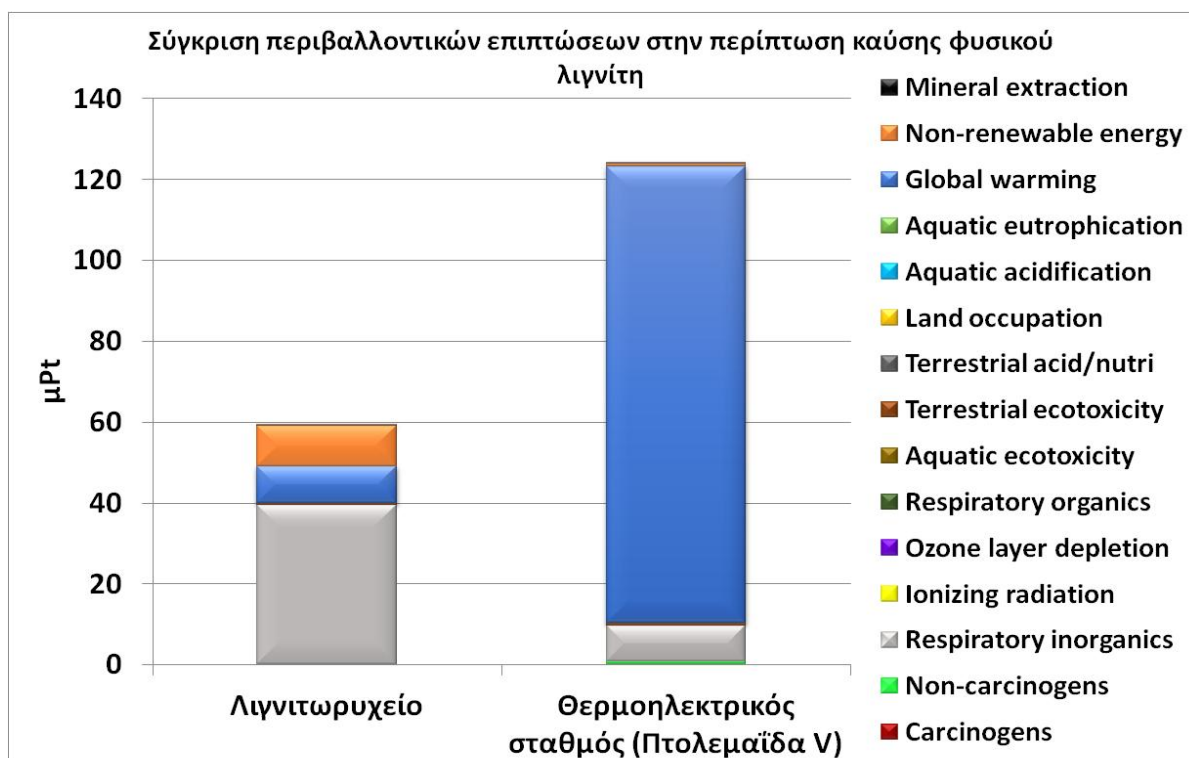
Παράμετρος	Μονάδα	Αξία
Κατανάλωση λιγνίτη	kg _{lig} /s	291,63
Κατανάλωση λιγνίτη	tn _{lig} /MWhe	1,71
Παροχή απαιτούμενου αέρα καύσης	kg _{air} /s	737,73
Παροχή καυσαερίων στους εναλλάκτες θερμότητας	kg _{flue gas, exch} /s	711,43
Παροχή ανακυκλοφορούντων καυσαερίων	kg _{flue gas, recirc} /s	63,95
Λόγος καυσαερίων στους εναλλάκτες προς ανακυκλοφορούντα καυσαέρια	kg _{flue gas, exch} /kg _{flue gas, recirc}	11,12
Προσαγόμενη θερμική ισχύς στο σταθμό	kWth	1.483.614
Μικτή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς	kWe	654.472
Ιδιοκατανάλωση μύλων	kWe	25.152
Ιδιοκατανάλωση αντλιών	kWe	13.620
Καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς	kWe	615.700
Καθαρός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	%	41,5

Στον πίνακα 6.3 παρουσιάζονται οι κυριότερες εκπομπές ρύπων στον αέρα και το νερό όπως προέκυψαν από το λογισμικό SimaPro v.7.3.3 με εφαρμογή της μεθόδου Impact 2002+.

Εκπομπές στον αέρα	Μονάδα	Λιγνιτωρυχείο	Θερμοηλεκτρικός σταθμός
NM VOC	kg/kWhe	5,01E-05	2,33E-06
NO _x	kg/kWhe	1,78E-04	4,38E-04
PM _{co} (PM _{2.5-10})	kg/kWhe	7,50E-06	3,90E-06
PM _{2.5}	kg/kWhe	4,70E-05	1,20E-05
SO ₂	kg/kWhe	3,48E-04	2,51E-04
CO ₂	kg/kWhe	8,87E-02	1,12E+00
NH ₃	kg/kWhe	2,54E-07	1,17E-05
Cd	kg/kWhe	2,15E-09	1,09E-08
As	kg/kWhe	7,25E-09	8,47E-08
Ni	kg/kWhe	7,75E-08	1,29E-07
Pb	kg/kWhe	1,84E-08	7,69E-08
Hg	kg/kWhe	3,97E-09	7,30E-08
Cr	kg/kWhe	2,36E-08	4,00E-08
Cr-VI	kg/kWhe	6,89E-10	3,85E-09

Formaldehyde	kg/kWhe	8,94E-08	5,19E-07
Dioxin	kg/kWhe	8,04E-15	6,46E-14
Aerosols, radioactive	Bq/kWhe	1,65E-05	5,50E-06
Carbon-14	Bq/kWhe	6,69E-02	2,82E-02
Iodine-131	Bq/kWhe	3,37E-03	9,63E-04
Iodine-133	Bq/kWhe	1,49E-07	2,00E-07
Krypton-85	Bq/kWhe	2,66E-02	7,89E-03
Noble gases, radioactive	Bq/kWhe	6,51E+02	2,40E+02
Thorium-230	Bq/kWhe	3,63E-05	1,43E-05
Uranium-234	Bq/kWhe	1,09E-04	4,41E-05
Uranium-235	Bq/kWhe	5,19E-06	2,12E-06
Uranium-238	Bq/kWhe	2,64E-03	5,41E-02
Εκπομπές στο νερό			
Iodine-131	Bq/kWhe	3,27E-06	1,97E-06
Uranium-234	Bq/kWhe	2,04E-04	8,32E-05
Uranium-235	Bq/kWhe	3,36E-04	1,37E-04
Uranium-238	Bq/kWhe	8,36E-04	2,71E-04
Εκπομπές σκόνης στο λιγνιτωρυχείο			
PM _{co} (PM _{2.5-10})	kg/kWhe	1,91E-03	-

Στο διάγραμμα 6.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πίνακα 6.3 για επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων, θεωρώντας αδιάστατη μονάδα σύγκρισης το 1 Pt.



Διάγραμμα 6.1: Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην περίπτωση της καύσης φυσικού λιγνίτη (Impact 2002+)

Είναι φανερό ότι οι διαδικασίες που σχετίζονται με τη λειτουργία του θερμοηλεκτρικού σταθμού συνεισφέρουν σε μέγιστο βαθμό στην συνολική περιβαλλοντική επίπτωση του κύκλου ζωής του λιγνίτη. Επιπλέον, οι διαδικασίες της εξόρυξης (λιγνιτωρυχείο) και της διαχείρισης των παραπροϊόντων της καύσης (που είναι ενσωματωμένες στη λειτουργία του σταθμού)

αντιπροσωπεύουν περίπου το 32% της συνολικής περιβαλλοντικής ζημιάς εξαιτίας της χρήσης του λιγνίτη ή περίπου το 48% της ζημιάς που τίθεται στο περιβάλλον εξαιτίας του θερμοηλεκτρικού σταθμού. Η αξιοσημείωτη αυτή συνεισφορά των διαδικασιών εξόρυξης καταδεικνύει τη σπουδαιότητα συνυπολογισμού τους σε παρόμοιοι είδους περιβαλλοντικές αξιολογήσεις και το σημαντικό σφάλμα πληροφορίας, που επηρεάζει άμεσα και τα συμπεράσματα, σε περιπτώσεις αγνόησης.

Εστιάζοντας το ενδιαφέρον αποκλειστικά στην επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, παρατηρείται ότι κατά τη λειτουργία του θερμοηλεκτρικού σταθμού προκαλείται η μεγαλύτερη ζημιά σε σύγκριση με τις υπόλοιπες φάσεις του κύκλου ζωής του λιγνίτη, σε ποσοστό περίπου 93%. Το γεγονός οφείλεται κατά κύριο λόγο στη διαδικασία της καύσης του λιγνίτη κατά την οποία εκλύονται σημαντικές ποσότητες CO₂ (πίνακας 6.3) που είναι και το κυριότερο αέριο του θερμοκηπίου. Από την άλλη πλευρά, η συνεισφορά των υπόλοιπων φάσεων του κύκλου ζωής στη συγκεκριμένη κατηγορία επίπτωσης είναι σημαντικά μικρότερη και αντιπροσωπεύει σχεδόν το 8% της ζημιάς που προκαλείται εξαιτίας του θερμοηλεκτρικού σταθμού.

Όσον αφορά τις επιπτώσεις που τίθενται από το λιγνιτωρυχείο, η λειτουργία μεγάλου αριθμού ντιζελοκίνητων μηχανημάτων οδηγεί σε αυξημένη επίδραση στο φαινόμενο της χρήσης μη-ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εξαιτίας της κατανάλωσης ορυκτού καυσίμου (ντίζελ), η οποία μάλιστα αντιπροσωπεύει το 94% της συνολική επίπτωσης ολόκληρου του κύκλου ζωής του λιγνίτη σε αυτή την κατηγορία. Τέλος, ο μεγαλύτερος κίνδυνος που προκύπτει από τη λειτουργία του λιγνιτωρυχείου συνίσταται στην εκπομπή ανόργανων αναπνεύσιμων ουσιών που προκύπτουν εξαιτίας της εκπομπής σκόνης και αιωρούμενων σωματιδίων, με μέση αεροδυναμική διάμετρο 2,5-10 μm (PM_{2.5-10}), κατά την διεξαγωγή των εργασιών του ορυχείου από τα μηχανήματα, τα οποία διαχειρίζονται χωματοειδή υλικά. Η συνεισφορά του λιγνιτωρυχείου σε αυτή τη κατηγορία είναι σχεδόν το 82% ολόκληρου του κύκλου ζωής του λιγνίτη.

6.3 Μικτή καύση φυσικού λιγνίτη, με 30% θερμική υποκατάσταση με προ-ξηραμένο λιγνίτη

Οι βασικές παράμετροι λειτουργίας του λιγνιτωρυχείου και του θερμοηλεκτρικού σταθμού, όπως υπολογίστηκαν με βάση τον καθαρό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης, παρουσιάζονται στους πίνακες 6.4 και 6.5 αντίστοιχα.

Πίνακας 6.4: Παράμετροι λειτουργίας λιγνιτωρυχείου

Έκταση	km ²	35,2
Αριθμός καδοφόρων εκσκαφών	Number	10
Αριθμός αποθετών	Number	5
Συνολικό μήκος ταινιόδρομων	km	51,7
Αριθμός ντιζελοκίνητων μηχανημάτων	Number	267
Εκσκαφές λιγνίτη	tn _{lig} /MWhe	1,96
Σχέση εκμετάλλευσης	m ³ _{over} /tn _{lig}	5,96
Εκσκαφές υπερκειμένων	m ³ /MWhe	11,71
Συντελεστής ασφαλείας	%	20

Πίνακας 6.5: Παράμετροι λειτουργίας θερμοηλεκτρικού σταθμού

Κατανάλωση φυσικού λιγνίτη	kg _{raw lig} /s	277,14
Κατανάλωση φυσικού λιγνίτη	tn _{raw lig} /MWhe	1,64
Κατανάλωση ισοδύναμου καυσίμου	kg _{eq} /s	247,03
Κατανάλωση προξηραμένου καυσίμου	kg _{dry lig} /s	42,89
Παροχή απαιτούμενου αέρα καύσης	kg _{air} /s	701,06
Παροχή καυσαερίων στους εναλλάκτες θερμότητας	kg _{flue gas, exch} /s	654,78

Παροχή ανακυκλοφορούντων καυσαερίων	kg _{flue gas, recirc} /s	58,86
Λόγος καυσαερίων στους εναλλάκτες προς ανακυκλοφορούντα καυσαέρια	kg _{flue gas, exch} /kg _{flue gas, recirc}	11,12
Προσαγόμενη θερμική ισχύς στο σταθμό	kW _{th}	1.409.874
Υποκαθιστάμενη θερμική ισχύς	kW _{th}	445.084
Απαιτούμενη θερμότητα προξήρανσης	kJ/kg _{water removed}	3.332,6
Απαιτούμενη μάζα ατμού για προξήρανση	kg _{steam} /s	42,10
Μάζα φυσικού λιγνίτη για προξήρανση	kg _{raw lig} /s	72,99
Εξατμιζόμενη υγρασία κατά την προξήρανση	kg _{water removed} /s	30,11
Μικτή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς	kWe	647.099
Ιδιοκατανάλωση μύλων	kWe	23.901
Ιδιοκατανάλωση αντλιών	kWe	13.620
Ιδιοκατανάλωση ξηραντήρα	kWe	190
Καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς	kWe	609.387
Καθαρός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	%	43,22

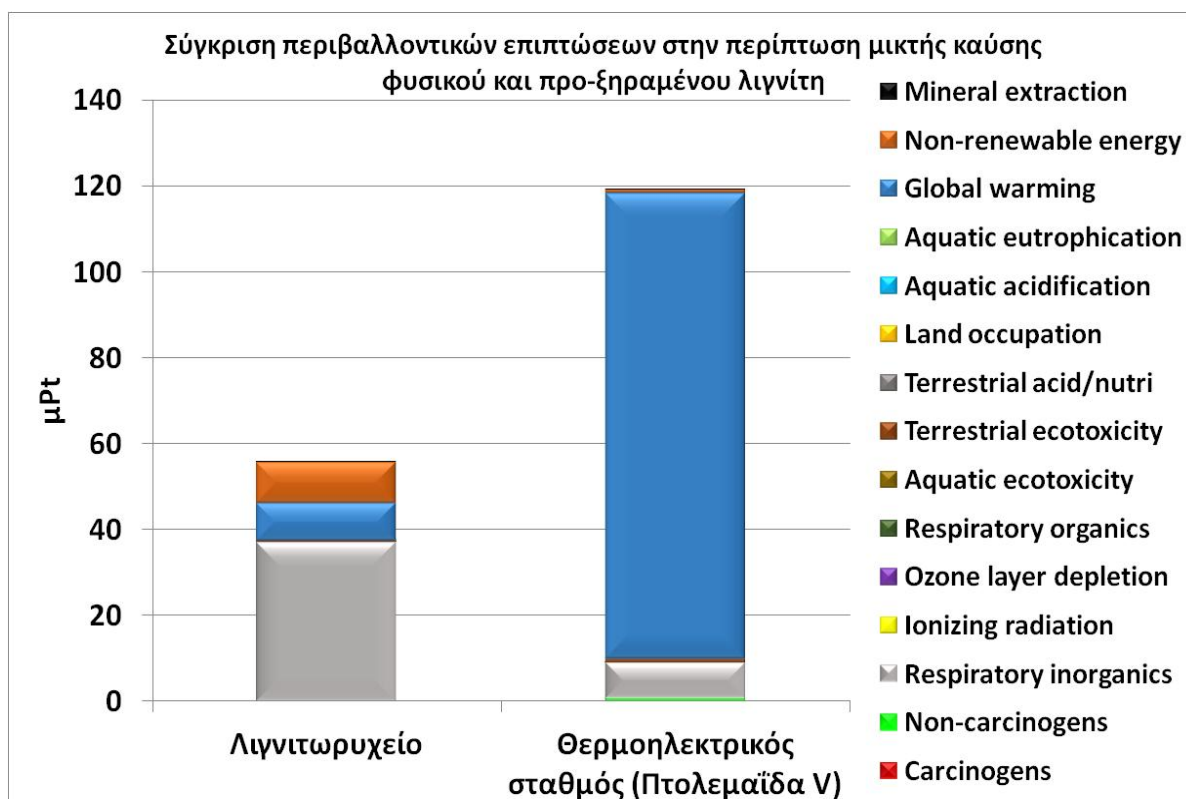
Στον πίνακα 6.6 παρουσιάζονται οι κυριότερες εκπομπές ρύπων στον αέρα και το νερό όπως προέκυψαν από το λογισμικό SimaPro v.7.3.3 με εφαρμογή της μεθόδου Impact 2002+.

Πίνακας 6.6: Εκπομπές ρύπων στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού και προ-ξηραμένου λιγνίτη

Εκπομπές στον αέρα	Μονάδα	Λιγνιτωρυχείο	Θερμοηλεκτρικός σταθμός
NM VOC	kg/kWhe	4,79E-05	2,24E-06
NO _x	kg/kWhe	1,70E-04	4,20E-04
PM _{co} (PM _{2.5-10})	kg/kWhe	7,13E-06	3,75E-06
PM _{2.5}	kg/kWhe	4,46E-05	1,15E-05
SO ₂	kg/kWhe	3,31E-04	2,41E-04
CO ₂	kg/kWhe	8,44E-02	1,07E+00
NH ₃	kg/kWhe	2,43E-07	1,12E-05
Cd	kg/kWhe	2,05E-09	1,04E-08
As	kg/kWhe	6,88E-09	8,13E-08
Ni	kg/kWhe	7,35E-08	1,24E-07
Pb	kg/kWhe	1,75E-08	7,38E-08
Hg	kg/kWhe	3,77E-09	7,01E-08
Cr	kg/kWhe	2,26E-08	3,84E-08
Cr-VI	kg/kWhe	6,58E-10	3,70E-09
Formaldehyde	kg/kWhe	8,48E-08	4,99E-07
Dioxin	kg/kWhe	7,66E-15	6,20E-14
Aerosols, radioactive	Bq/kWhe	1,57E-05	5,29E-06
Carbon-14	Bq/kWhe	6,38E-02	2,70E-02
Iodine-131	Bq/kWhe	3,21E-03	9,25E-04
Iodine-133	Bq/kWhe	1,42E-07	1,92E-07
Krypton-85	Bq/kWhe	2,54E-02	7,57E-03
Noble gases, radioactive	Bq/kWhe	6,21E+02	2,30E+02
Thorium-230	Bq/kWhe	3,46E-05	1,37E-05
Uranium-234	Bq/kWhe	1,04E-04	4,23E-05
Uranium-235	Bq/kWhe	4,95E-06	2,04E-06
Uranium-238	Bq/kWhe	2,50E-03	5,20E-02
Εκπομπές στο νερό			
Iodine-131	Bq/kWhe	3,12E-06	1,89E-06

Uranium-234	Bq/kWhe	1,94E-04	7,99E-05
Uranium-235	Bq/kWhe	3,21E-04	1,32E-04
Uranium-238	Bq/kWhe	7,98E-04	2,60E-04
Εκπομπές σκόνης στο λιγνιτωρυχείο PM _{co} (PM _{2.5-10})	kg/kWhe	1,79E-03	-

Στο διάγραμμα 6.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πίνακα 6.6 για τις ίδιες κατηγορίες επιπτώσεων όπως και στην περίπτωση της καύσης φυσικού λιγνίτη, θεωρώντας και πάλι αδιάστατη μονάδα σύγκρισης το 1 Pt.



Διάγραμμα 6.2: Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού και προ-ξηραμένου λιγνίτη (Impact 2002+)

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από το παραπάνω διάγραμμα ταυτίζονται με αυτά που περιγράφηκαν στην παράγραφο 6.2. Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων 6.1 και 6.2 παρατηρείται μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (άρα και των εκπομπών) κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του λιγνίτη στην περίπτωση της καύσης φυσικού λιγνίτη με 30% θερμική υποκατάσταση με προ-ξηραμένο λιγνίτη. Συγκεκριμένα, η συνολική περιβαλλοντική επίπτωση του λιγνιτωρυχείου μειώνεται περίπου 5,5% σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, ενώ η αντίστοιχη του θερμοηλεκτρικού σταθμού μειώνεται σχεδόν 4%. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι:

1. Η ποσότητα λιγνίτη που εξορύσσεται στο λιγνιτωρυχείο είναι μειωμένη, ως αποτέλεσμα των μειωμένων απαιτήσεων του θερμοηλεκτρικού σταθμού σε φυσικό λιγνίτη εξαιτίας της προξήρανσης σε ένα ποσοστό του καυσίμου. Συνεπώς, οι εκπομπές ρύπων που οφείλονται στη κατανάλωση ορυκτής ενέργειας (ηλεκτρισμός, diesel) και στη διαχείριση των εξορυσσόμενων υλικών στα πλαίσια του λιγνιτωρυχείου είναι μειωμένες.
2. Ο καθαρός συνολικός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του θερμοηλεκτρικού σταθμού βελτιώνεται εξαιτίας της μείωσης της ποσότητας του φυσικού λιγνίτη που απαιτείται στο σταθμό. Επιπλέον,

η βελτίωση του θερμικού βαθμού απόδοσης του λέβητα εξαιτίας της μείωσης των απωλειών θερμών καυσαερίων που επιτυγχάνεται με τη χρήση βελτιωμένων καυσίμων (π.χ. προ-ξηραμένος λιγνίτη) και η χρήση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας (ατμός) για την προ-ξήρανση του καυσίμου με αποτέλεσμα τις μειωμένες εξεργειακές απώλειες, συμβάλλουν στη βελτίωση του καθαρού συνολικού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης και κατ' επέκταση στη μείωση των εκπομπών ρύπων προς το περιβάλλον.

6.4 Μικτή καύση φυσικού λιγνίτη, με 6% θερμική υποκατάσταση με βιομάζα

Οι βασικές παράμετροι λειτουργίας του λιγνιτωρυχείου και του θερμοηλεκτρικού σταθμού, όπως υπολογίστηκαν με βάση τον καθαρό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης, παρουσιάζονται στους πίνακες 6.7 και 6.8 αντίστοιχα.

Πίνακας 6.7: Παράμετροι λειτουργίας λιγνιτωρυχείου

Έκταση	km ²	34,8
Αριθμός καδοφόρων εκσκαφών	Number	10
Αριθμός αποθετών	Number	5
Συνολικό μήκος ταινιόδρομων	km	51,1
Αριθμός ντιζελοκίνητων μηχανημάτων	Number	264
Εκσκαφές λιγνίτη	tn _{lig} /MWhe	1,92
Σχέση εκμετάλλευσης	m ³ _{over} /tn _{lig}	5,96
Εκσκαφές υπερκειμένων	m ³ /MWhe	11,45
Συντελεστής ασφαλείας	%	20

Πίνακας 6.8: Παράμετροι λειτουργίας θερμοηλεκτρικού σταθμού

Κατανάλωση φυσικού λιγνίτη	kg _{raw lig} /s	274,14
Κατανάλωση φυσικού λιγνίτη	tn _{raw lig} /MWhe	1,60
Κατανάλωση ισοδύναμου καυσίμου	kg _{eq} /s	279,63
Κατανάλωση βιομάζας	kg _{biomass} /s	5,49
Παροχή απαιτούμενου αέρα καύσης	kg _{air} /s	724,31
Παροχή καυσαερίων στους εναλλάκτες θερμότητας	kg _{flue gas, exch} /s	875,33
Παροχή ανακυκλοφορούντων καυσαερίων	kg _{flue gas, recirc} /s	78,68
Λόγος καυσαερίων στους εναλλάκτες προς ανακυκλοφορούντα καυσαέρια	kg _{flue gas, exch} /kg _{flue gas, recirc}	11,12
Προσαγόμενη θερμική ισχύς στο σταθμό	kWth	1.483.614
Υποκαθιστάμενη θερμική ισχύς	kWth	89.017
Μικτή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς	kWe	654.472
Ιδιοκατανάλωση μύλων λιγνίτη	kWe	23.643
Ιδιοκατανάλωση αντλιών	kWe	13.620
Ιδιοκατανάλωση μύλων βιομάζας	kWe	510,96
Καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς	kWe	616.698
Καθαρός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	%	41,57

Στο σημείο αυτό αξίζει να επισημανθεί ότι η καύση βιομάζας συνεπάγεται μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), αφού θεωρείται ότι το βιογενές κλάσμα του εν λόγω καυσίμου είναι 100% (δηλαδή η ποσότητα CO₂ που εκλύεται κατά την καύση του βιοκαυσίμου είναι ίση ακριβώς με αυτή που απορροφήθηκε από το περιβάλλον μέσω του φαινομένου της φωτοσύνθεσης, αποδίδοντας έτσι μηδενικό ισοζύγιο εκπομπών). Για τον προσδιορισμό των βιογενών εκπομπών CO₂ στην περίπτωση μικτής καύσης που εξετάζεται, πραγματοποιείται υπολογισμός των ακόλουθων μεγεθών:

- $$\mu_{\text{CO}_2,\text{fossil}} = 3,667 \cdot \gamma_{\text{C,lignite}} + \gamma_{\text{CO}_2,\text{lignite}} \xrightarrow{\text{πίνακας 4.8}}$$

$$\mu_{\text{CO}_2,\text{fossil}} = 3,667 \cdot \frac{16,8}{100} + \frac{2,93}{100} \Rightarrow$$

$$\mu_{\text{CO}_2,\text{fossil}} = 0,645 \frac{\text{kg}_{\text{CO}_2,\text{fossil}}}{\text{kg}_{\text{lignite}}} \quad (6.1)$$

- $$\mu_{\text{CO}_2,\text{biogenic}} = 3,667 \cdot \gamma_{\text{C,biomass}} + \gamma_{\text{CO}_2,\text{biomass}} \xrightarrow{\text{πίνακας 4.11}}$$

$$\mu_{\text{CO}_2,\text{biogenic}} = 3,667 \cdot \frac{40,18}{100} + 0 \Rightarrow$$

$$\mu_{\text{CO}_2,\text{biogenic}} = 1,473 \frac{\text{kg}_{\text{CO}_2,\text{biogenic}}}{\text{kg}_{\text{biomass}}} \quad (6.2)$$

- $$m_{\text{CO}_2,\text{fossil}} = \mu_{\text{CO}_2,\text{fossil}} \cdot m_{\text{lignite}} \xrightarrow{\text{πίνακας 6.8,εξ.(6.1)}}$$

$$m_{\text{CO}_2,\text{fossil}} = 0,645 \frac{\text{kg}_{\text{CO}_2,\text{fossil}}}{\text{kg}_{\text{lignite}}} \cdot 0,98 \frac{\text{kg}_{\text{lignite}}}{\text{kg}_{\text{equal}}} \Rightarrow$$

$$m_{\text{CO}_2,\text{fossil}} = 0,633 \frac{\text{kg}_{\text{CO}_2,\text{fossil}}}{\text{kg}_{\text{equal}}} \quad (6.3)$$

- $$m_{\text{CO}_2,\text{biogenic}} = \mu_{\text{CO}_2,\text{biogenic}} \cdot m_{\text{biomass}} \xrightarrow{\text{πίνακας 6.8,εξ.(6.2)}}$$

$$m_{\text{CO}_2,\text{biogenic}} = 1,473 \frac{\text{kg}_{\text{CO}_2,\text{biogenic}}}{\text{kg}_{\text{biomass}}} \cdot 0,019 \frac{\text{kg}_{\text{biomass}}}{\text{kg}_{\text{equal}}} \Rightarrow$$

$$m_{\text{CO}_2,\text{biogenic}} = 0,0289 \frac{\text{kg}_{\text{CO}_2,\text{biogenic}}}{\text{kg}_{\text{equal}}} \quad (6.4)$$

- $$\frac{m_{\text{CO}_2,\text{fossil}}}{m_{\text{CO}_2,\text{total}}} = \frac{0,633}{0,633+0,0289} = 95,62\% \quad (6.5)$$

- $$\frac{m_{\text{CO}_2,\text{biogenic}}}{m_{\text{CO}_2,\text{total}}} = \frac{0,0289}{0,633+0,0289} = 4,38\% \quad (6.6)$$

Στον πίνακα 6.9 παρουσιάζονται οι κυριότερες εκπομπές ρύπων στον αέρα και το νερό από το λιγνιτωρυχείο και τον θερμοηλεκτρικό σταθμό, όπως προέκυψαν από το λογισμικό SimaPro v.7.3.3 με εφαρμογή της μεθόδου Impact 2002+. Επιπλέον, στον πίνακα 6.10 παρατίθενται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τα 4 διαφορετικά σενάρια εφοδιαστικής αλυσίδας της βιομάζας όπως περιγράφονται στην παράγραφο 4.5.

Πίνακας 6.9: Εκπομπές ρύπων στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη και βιομάζας			
Εκπομπές στον αέρα	Μονάδα	Λιγνιτωρυχείο	Θερμοηλεκτρικός σταθμός
NM VOC	kg/kWhe	4,55E-05	1,20E-06
NO _x	kg/kWhe	1,59E-04	4,12E-04
PM _{co} (PM _{2.5-10})	kg/kWhe	5,44E-06	2,19E-06
PM _{2.5}	kg/kWhe	4,23E-05	1,07E-05
SO ₂	kg/kWhe	3,18E-04	2,33E-04
CO _{2, fossil}	kg/kWhe	8,06E-02	1,05E+00

CO _{2, biogenic}	kg/kWhe	-	4,74E-02
NH ₃	kg/kWhe	1,21E-07	1,11E-05
Cd	kg/kWhe	1,52E-09	1,02E-08
As	kg/kWhe	5,21E-09	8,18E-08
Ni	kg/kWhe	6,81E-08	1,23E-07
Pb	kg/kWhe	1,09E-08	6,96E-08
Hg	kg/kWhe	3,23E-09	7,13E-08
Cr	kg/kWhe	3,96E-09	2,90E-08
Cr-VI	kg/kWhe	1,96E-10	3,54E-09
Formaldehyde	kg/kWhe	7,94E-08	5,05E-07
Dioxin	kg/kWhe	3,86E-15	5,98E-14
Aerosols, radioactive	Bq/kWhe	1,09E-05	3,19E-06
Carbon-14	Bq/kWhe	4,41E-02	1,78E-02
Iodine-131	Bq/kWhe	2,24E-03	5,24E-04
Iodine-133	Bq/kWhe	8,91E-08	1,53E-07
Krypton-85	Bq/kWhe	1,77E-02	4,36E-03
Noble gases, radioactive	Bq/kWhe	4,30E+02	1,45E+02
Thorium-230	Bq/kWhe	2,28E-05	8,74E-06
Uranium-234	Bq/kWhe	7,09E-05	2,74E-05
Uranium-235	Bq/kWhe	3,43E-06	1,33E-06
Uranium-238	Bq/kWhe	2,39E-03	5,31E-02
Εκπομπές στο νερό			
Iodine-131	Bq/kWhe	2,13E-06	1,36E-06
Uranium-234	Bq/kWhe	1,34E-04	5,21E-05
Uranium-235	Bq/kWhe	2,22E-04	8,59E-05
Uranium-238	Bq/kWhe	4,26E-04	1,48E-04
Εκπομπές σκόνης στο λιγνιτωρυχείο			
PM _{co} (PM _{2.5-10})	kg/kWhe	1,75E-03	-

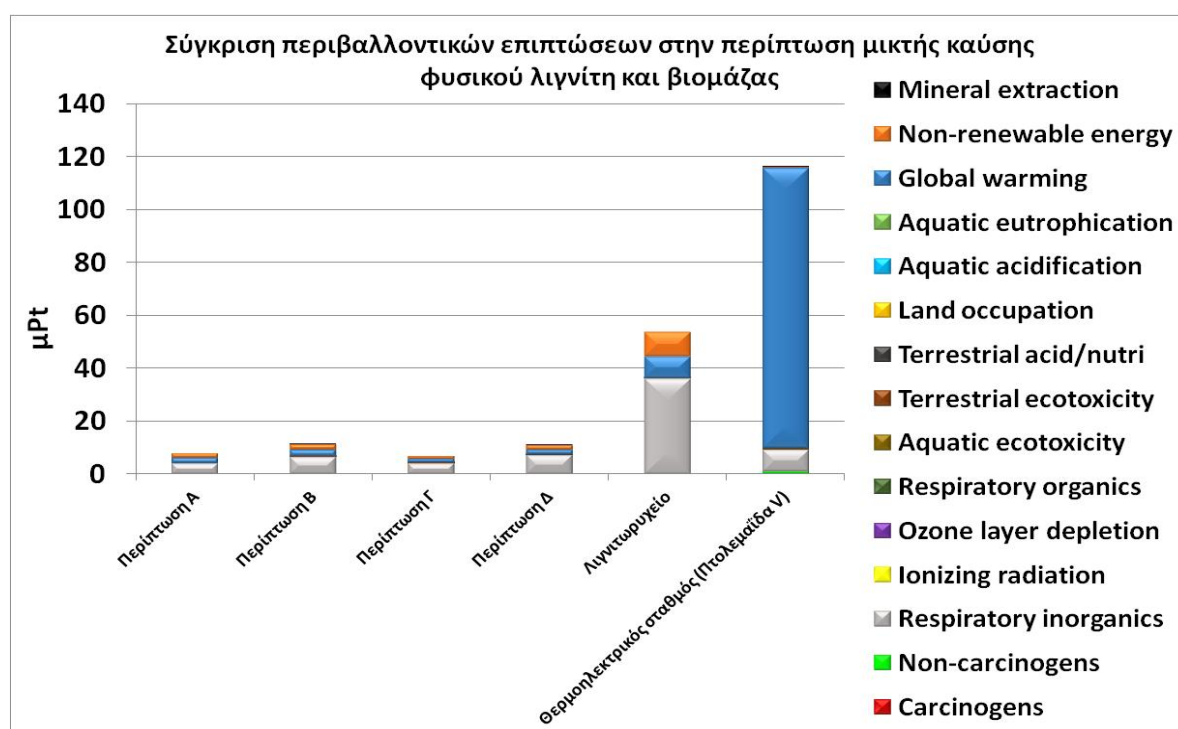
Πίνακας 6.10: Εκπομπές ρύπων από τις εφοδιαστικές αλυσίδες της βιομάζας στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη και βιομάζας

Εκπομπές στον αέρα	Μονάδα	Περίπτωση Α	Περίπτωση Β	Περίπτωση Γ	Περίπτωση Δ
NMVOC	kg/kWhe	2,19E-05	3,37E-05	2,53E-05	4,16E-05
NO _x	kg/kWhe	1,59E-04	2,56E-04	1,85E-04	3,08E-04
PM _{co} (PM _{2.5-10})	kg/kWhe	1,60E-06	2,10E-06	1,26E-06	3,99E-06
PM _{2.5}	kg/kWhe	1,57E-05	2,46E-05	1,60E-05	2,79E-05
SO ₂	kg/kWhe	3,73E-05	4,06E-05	1,56E-05	2,61E-05
CO ₂	kg/kWhe	1,78E-02	2,12E-02	1,26E-02	1,71E-02
NH ₃	kg/kWhe	1,28E-07	2,29E-07	1,32E-07	7,19E-07
Cd	kg/kWhe	2,86E-10	3,42E-10	1,98E-10	3,07E-10
As	kg/kWhe	4,77E-10	5,55E-10	8,78E-11	5,03E-10
Ni	kg/kWhe	7,64E-09	8,41E-09	2,73E-09	4,99E-09
Pb	kg/kWhe	2,13E-09	2,48E-09	1,17E-09	4,80E-09
Hg	kg/kWhe	2,95E-10	3,69E-10	4,83E-11	6,44E-10
Cr	kg/kWhe	8,18E-10	1,12E-09	5,22E-10	2,18E-08
Cr-VI	kg/kWhe	1,74E-11	2,73E-11	2,84E-12	5,30E-10
Formaldehyde	kg/kWhe	7,99E-09	1,14E-08	1,75E-09	1,74E-08
Dioxin	kg/kWhe	7,10E-16	2,80E-15	5,35E-16	5,78E-15
Aerosols, radioactive	Bq/kWhe	1,70E-06	3,50E-06	1,22E-06	8,35E-06
Carbon-14	Bq/kWhe	7,13E-03	2,22E-02	5,17E-03	3,77E-02

Iodine-131	Bq/kWhe	3,45E-04	4,86E-04	2,50E-04	1,30E-03
Iodine-133	Bq/kWhe	2,05E-08	2,38E-07	1,54E-08	1,94E-07
Krypton-85	Bq/kWhe	2,74E-03	4,21E-03	1,99E-03	1,05E-02
Noble gases, radioactive	Bq/kWhe	6,81E+01	1,69E+02	4,93E+01	3,39E+02
Thorium-230	Bq/kWhe	3,72E-06	1,08E-05	2,71E-06	1,99E-05
Uranium-234	Bq/kWhe	1,15E-05	3,38E-05	8,32E-06	6,06E-05
Uranium-235	Bq/kWhe	0,00E+00	1,63E-06	3,99E-07	2,90E-06
Uranium-238	Bq/kWhe	1,96E-04	2,21E-04	1,30E-05	1,03E-04

Εκπομπές στο νερό					
Iodine-131	Bq/kWhe	3,69E-07	1,91E-06	2,69E-07	2,42E-06
Uranium-234	Bq/kWhe	2,16E-05	6,41E-05	1,56E-05	1,14E-04
Uranium-235	Bq/kWhe	3,57E-05	1,06E-04	2,58E-05	1,87E-04
Uranium-238	Bq/kWhe	7,40E-05	1,86E-04	5,58E-05	4,34E-04

Στο διάγραμμα 6.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πινάκων 6.9 και 6.10 για τις ίδιες κατηγορίες επιπτώσεων όπως και στις προηγούμενες παραγράφους, θεωρώντας και πάλι αδιάστατη μονάδα σύγκρισης το 1 Pt.



Διάγραμμα 6.3: Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη και βιομάζας, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές εναλλακτικές εφοδιαστικής αλυσίδας της βιομάζας (Impact 2002+)

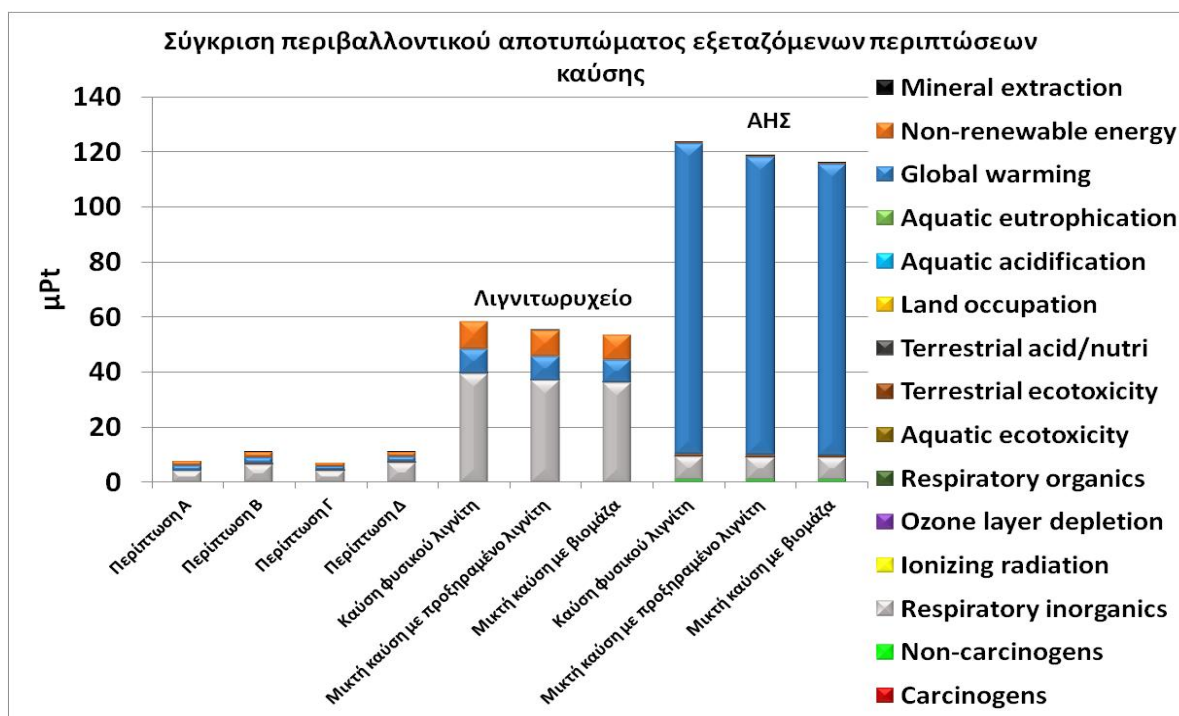
Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι συνολικές εκπομπές του λιγνιτωρυχείου μειώνονται περίπου 9,6%, ενώ επίσης μείωση 6,5% παρατηρείται και στις εκπομπές του θερμοηλεκτρικού σταθμού σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς, εξαιτίας των λόγων περιγράφηκαν στην παράγραφο 6.3.

Ωστόσο, στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη με βιομάζα από θερμική υποκατάσταση 6%, στις συνολικές εκπομπές του κύκλου ζωής του συστήματος μελέτης προστίθενται και αυτές εξαιτίας της εφοδιαστικής αλυσίδας της βιομάζας. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, οι 4 εναλλακτικές εφοδιαστικές αλυσίδες βιομάζας παρουσιάζουν παραπλήσια επίπτωση στο περιβάλλον (βλέπε παράγραφο 4.5) που κυμαίνεται από 5,9% έως 9,5% της ζημιάς που τίθεται στο περιβάλλον εξαιτίας του θερμοηλεκτρικού σταθμού. Συνεπώς, οι συνολικές εκπομπές του κύκλου

ζωής του υπόψη συστήματος μελέτης είναι δυνατόν να εμφανίζουν μείωση έως και 3,3% σε σύγκριση με αυτές της περίπτωσης αναφοράς, αναλόγως με την εναλλακτική εφοδιαστικής αλυσίδας που επιλέγεται κάθε φορά. Ως προς την επίπτωση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, η λειτουργία του θερμοηλεκτρικού σταθμού φέρει αδιαμφισβήτη τη μεγαλύτερη ευθύνη, σύμφωνα και με τα όσα σχολιάστηκαν στην παράγραφο 6.2. Τέλος, η συνεισφορά των εναλλακτικών περιπτώσεων εφοδιαστικής αλυσίδας της βιομάζας στο φαινόμενο αυτό, είναι δυνατόν να κυμαίνεται από 1,2% έως 2,1% αυτής του θερμοηλεκτρικού σταθμού.

6.5 Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος εξεταζόμενων περιπτώσεων καύσης

Στο διάγραμμα 6.4 συγκρίνονται οι περιπτώσεις καύσης που αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, ως προς το συνολικό περιβαλλοντικό του αποτύπωμα στις επιμέρους κατηγορίες επιπτώσεων που μελετήθηκαν και παραπάνω όπως προέκυψε από το λογισμικό SimaPro v.7.3.3 με εφαρμογή της μεθόδου Impact 2002+.



Διάγραμμα 6.4: Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος εξεταζόμενων περιπτώσεων καύσης (Impact 2002+)

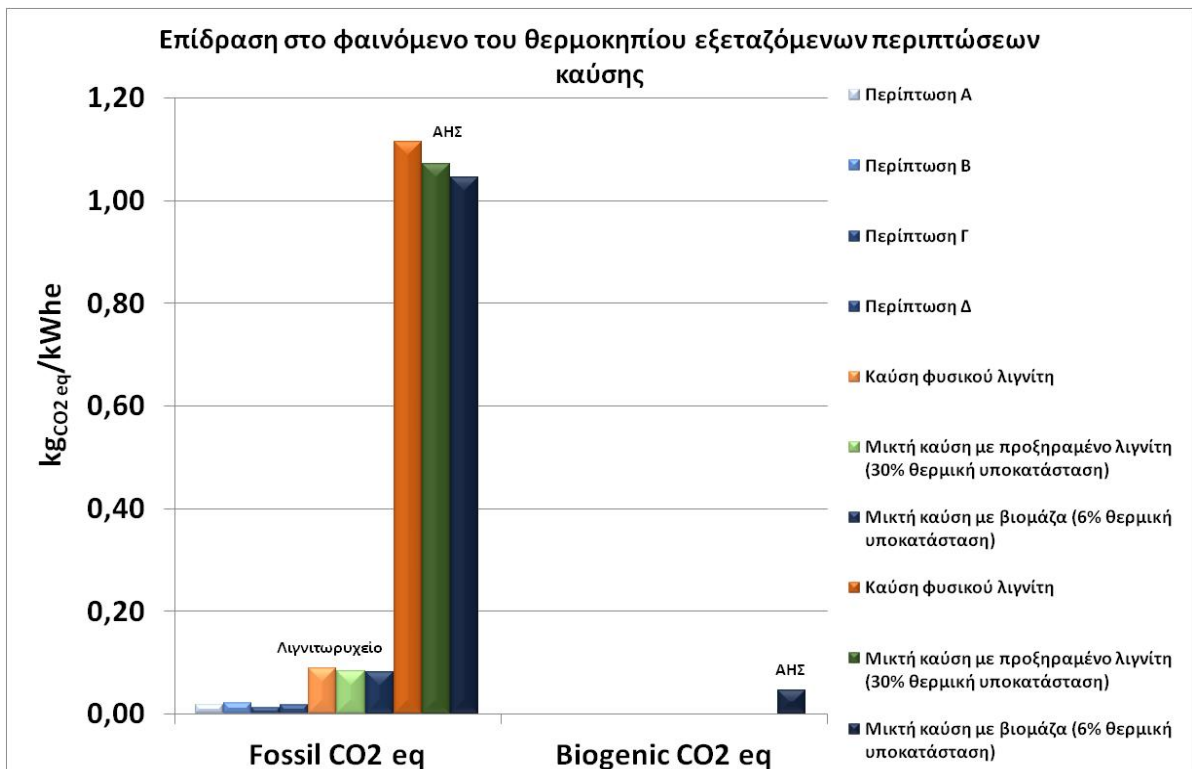
Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του λιγνιτωρυχείου στην περίπτωση μικτής καύσης με προ-ξηραμένο λιγνίτη είναι κατά 5,6% μικρότερο σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς, ενώ στην περίπτωση μικτής καύσης με βιομάζα το αντίστοιχο ποσοστό είναι περίπου 7,9%. Η αιτία βρίσκεται στη μικρότερη εξορυσσόμενη ποσότητα λιγνίτη στις περιπτώσεις μικτής καύσης
2. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του θερμοηλεκτρικού σταθμού στην περίπτωση μικτής καύσης με προ-ξηραμένο λιγνίτη είναι κατά 4% μικρότερο σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς, ενώ στην περίπτωση μικτής καύσης με βιομάζα το αντίστοιχο ποσοστό είναι περίπου 6%. Αυτό οφείλεται κυρίως στη βελτίωση του καθαρού συνολικού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης του σταθμού, καθώς επίσης και στη βελτίωση του καυσίμου που καίγεται εντός του λέβητα στις περιπτώσεις μικτής καύσης, ενώ επιπλέον στην περίπτωση της μικτής καύσης με βιομάζα προκύπτουν εκπομπές CO₂ biogenic, οι οποίες δεν προσμετρώνται στο αποτύπωμα

3. Το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του κύκλου ζωής του συστήματος με μικτή καύση λιγνίτη και βιομάζας σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς, παρουσιάζεται μειωμένο κατά 2,4% όταν ληφθεί υπόψη η εφοδιαστική αλυσίδα βιομάζας της περίπτωση Α, μειωμένο κατά 0,6% όταν ληφθεί υπόψη η εφοδιαστική αλυσίδα βιομάζας της περίπτωση Β, μειωμένο κατά 2,9% όταν ληφθεί υπόψη η εφοδιαστική αλυσίδα βιομάζας της περίπτωση Γ και μειωμένο κατά 0,7% όταν ληφθεί υπόψη η εφοδιαστική αλυσίδα βιομάζας της περίπτωση Δ

Συνεπώς, σε όλες τις περιπτώσεις εφοδιαστικών αλυσίδων βιομάζας, το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συστήματος είναι μικρότερο από αυτό της περίπτωσης αναφοράς. Αντιθέτως, το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συστήματος μικτής καύσης με βιομάζα προκύπτει πάντοτε μεγαλύτερο από αυτό του συστήματος με μικτή καύση προ-ξηραμένου λιγνίτη, ανεξαρτήτως της εφοδιαστικής αλυσίδας βιομάζας που λαμβάνεται υπόψη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην συνεισφορά των επιπλέον «processes» (π.χ. κατασκευή μονάδας πελλετοποίησης, κλειστών κτιρίων αποθήκευσης κτλ.) που έχουν ληφθεί υπόψη στις διάφορες εναλλακτικές εφοδιαστικής αλυσίδας της βιομάζας (βλέπε ενότητα 4.4) και που συνεισφέρουν στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, με αποτέλεσμα η περίπτωση μικτής καύσης με βιομάζα να είναι περιβαλλοντικά πιο επιζήμια από την περίπτωση μικτής καύσης με προξηραμένο λιγνίτη.

Στο διάγραμμα 6.5 συγκρίνονται οι εξεταζόμενες περιπτώσεις καύσης ως προς την επίδρασή τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου όπως προέκυψε από το λογισμικό SimaPro v.7.3.3 με εφαρμογή της μεθόδου Greenhouse Gas Protocol v1.01. Όπως φαίνεται, η περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη με βιομάζα είναι η ιδανικότερη, καθώς παρουσιάζει τις λιγότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ανεξαρτήτως της εφοδιαστικής αλυσίδας βιομάζας που επιλέγεται κάθε φορά. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 6.11, οι αποφευχθείσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου συγκριτικά με την περίπτωση αναφοράς είναι περίπου 0,0538 kgCO_{2eq}/kWh για στην περίπτωση της εφοδιαστικής αλυσίδας βιομάζας Β, που είναι και η δυσμενέστερη από πλευράς εκπομπών.



Διάγραμμα 6.5: Σύγκριση επιδράσεως στο φαινόμενο του θερμοκηπίου των εξεταζόμενων περιπτώσεων καύσης (Greenhouse Gas Protocol v1.01)

Πίνακας 6.11: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις καύσης ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{kWhe}$)

Εφοδιαστική αλυσίδα βιομάζας	
Περίπτωση Α	0,0184
Περίπτωση Β	0,0219
Περίπτωση Γ	0,0131
Περίπτωση Δ	0,0181
Λιγνιτωρυχείο	
Καύση φυσικού λιγνίτη	0,0888
Μικτή καύση με προξηραμένο λιγνίτη (30% θερμική υποκατάσταση)	0,0845
Μικτή καύση με βιομάζα (6% θερμική υποκατάσταση)	0,0825
Θερμοηλεκτρικός σταθμός	
Καύση φυσικού λιγνίτη	1,1165
Μικτή καύση με προξηραμένο λιγνίτη (30% θερμική υποκατάσταση)	1,0720
Μικτή καύση με βιομάζα (6% θερμική υποκατάσταση)	1,0471

Τέλος, είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι παρά το μικρό ποσοστό θερμικής υποκατάστασης στην περίπτωση της μικτής καύσης με βιομάζα (6%), η εναλλακτική αυτή παρουσιάζει τις ελάχιστες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου συγκρινόμενη με τις υπόλοιπες, πιο μικρές ακόμα και από την εναλλακτική μικτής καύσης με προξηραμένο λιγνίτη όπου το ποσοστό θερμικής υποκατάστασης είναι σημαντικά μεγαλύτερο (30%). Τούτο οφείλεται εν πολλοίς στην εκπομπή βιογενούς διοξειδίου του άνθρακα ($\text{CO}_{2\text{biogenic}}$) από τη βιομάζα, και εν γένει τα βιοκαύσιμα, που όπως αναλύθηκε και παραπάνω δεν προσμετρώνται στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 6.5, οι βιογενείς εκπομπές CO_2 είναι ίσες με $0,0474 \text{ kgCO}_{2\text{eq, biogenic}}/\text{kWhe}$ και εκλύονται κατά τη φάση λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού σταθμού όπου λαμβάνει χώρα η καύση της βιομάζας. Περαιτέρω αύξηση του βαθμού θερμικής υποκατάστασης της βιομάζας είναι δυνατόν να οδηγήσει σε ακόμα μικρότερες εκπομπές $\text{CO}_{2\text{eq}}$ και κατά συνέπεια σε βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος ολόκληρου του κύκλου ζωής.

6.6 Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος διαφόρων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

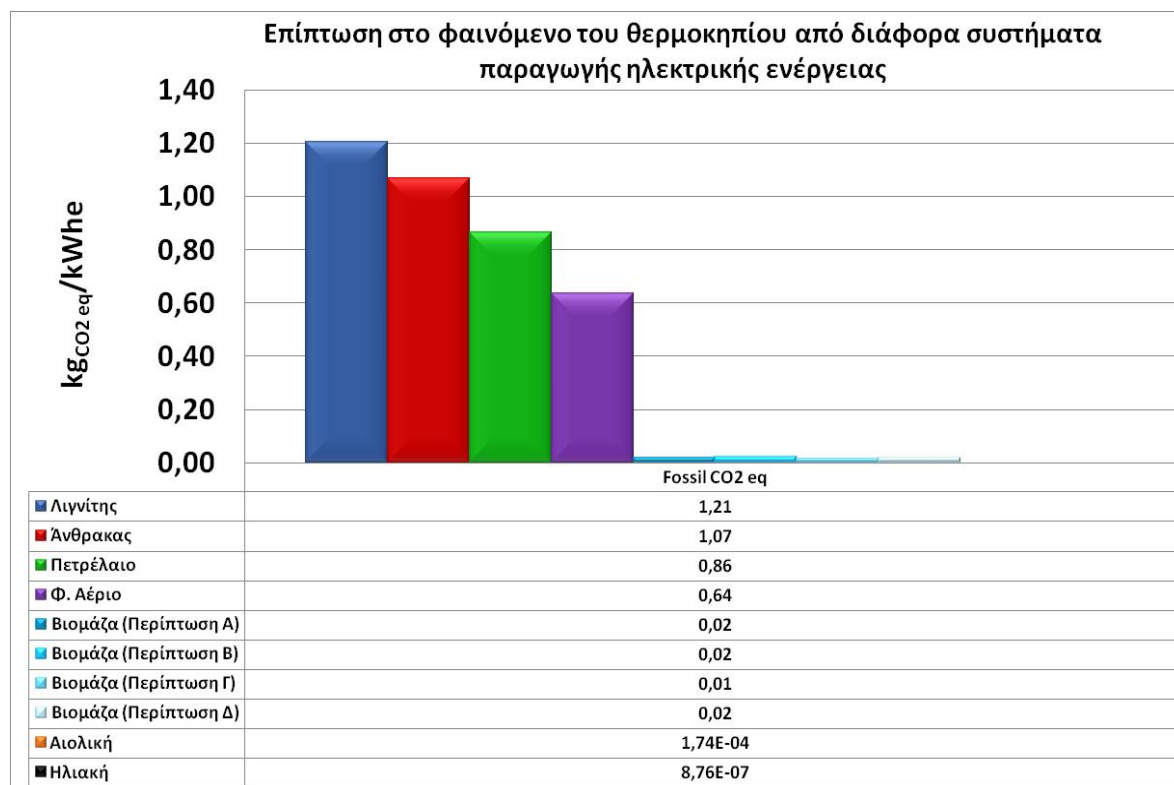
Στην παράγραφο αυτή συγκρίνονται διάφορα συστήματα/τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ως προς το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα σε επιμέρους κατηγορίες επιπτώσεων, λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους. Ειδικότερα, συγκρίνεται η περιβαλλοντική επίπτωση του κύκλου ζωής του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τον φυσικό λιγνίτη, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 6.2, με τους κύκλους ζωής άλλων συστημάτων που έχουν ως βάση τον άνθρακα, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, τη βιομάζα από το άχυρο σιτηρών, την αιολική ενέργεια (ανεμογεννήτριες) και την ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά). Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση του κύκλου ζωής της βιομάζας που εξετάζεται εδώ, δεν λαμβάνεται υπόψη η μικτή καύση με λιγνίτη όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 6.4. Αντίθετα, μελετάται η ιδανική περίπτωση αποκλειστικής καύσης βιομάζας αχύρου σιτηρών (δηλαδή σε ποσοστό 100%) στη νέα μονάδα της Πτολεμαΐδας V, υπό την παραδοχή ότι η ποσότητα που απαιτεί ο σταθμός είναι διαθέσιμη.

Στο διάγραμμα 6.6 συγκρίνεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των διαφόρων τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως προέκυψε από την εφαρμογή της μεθόδου Greenhouse Gas Protocol v1.01 στις διαδικασίες που μοντελοποιήθηκαν στο SimaPro v.7.3.3 στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αλλά και σε αυτές που ήδη ήταν μοντελοποιημένες και λήφθηκαν από την βάση δεδομένων Ecoinvent που είναι ενσωματωμένη στο λογισμικό.

Στον πίνακα 6.12 παρουσιάζεται η πηγή (χώρος) προέλευσης των στοιχείων που αφορούν τις εξεταζόμενες τεχνολογίες. Στην περίπτωση του άνθρακα, του φυσικού αερίου και της αιολικής ενέργειας ως πηγή προέλευσης των στοιχείων εκλέχθηκε ο μέσος όρος των ευρωπαϊκών κρατών, λόγω έλλειψης δεδομένων - μοντελοποιημένων «processes» στο SimaPro v.7.3.3 - για την περίπτωση της Ελλάδας.

Πίνακας 6.12: Χώρος προέλευσης στοιχείων εξεταζόμενων τεχνολογιών

Τεχνολογία	Πηγή προέλευσης
Λιγνίτης	Ελλάδα (GR)
Άνθρακας	Ευρώπη (UCTE)
Πετρέλαιο	Ελλάδα (GR)
Φυσικό αέριο	Ευρώπη (UCTE)
Βιομάζα (Περίπτωση Α)	Ελλάδα (GR)
Βιομάζα (Περίπτωση Β)	Ελλάδα (GR)
Βιομάζα (Περίπτωση Γ)	Ελλάδα (GR)
Βιομάζα (Περίπτωση Δ)	Ελλάδα (GR)
Αιολική	Ευρώπη (RER)
Ηλιακή	Ελλάδα (GR)



Διάγραμμα 6.6: Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων διαφόρων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Greenhouse Gas Protocol v1.01)

Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το λιγνίτη θέτει τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική ζημιά αναφορικά με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, συμφωνώντας με τα στοιχεία του διαγράμματος 3.1. Οι τιμές των διαγραμμάτων 6.6 και 3.1 συμφωνούν μεταξύ τους, με μόνη εξαίρεση αυτές που αφορούν τις τεχνολογίες αιολικής και ηλιακής ενέργειας, κυρίως εξαιτίας της διαφορετικής ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος ή της διαθεσιμότητας των συστημάτων που εξετάζονται, αλλά και των διαφορετικών στοιχείων που λήφθηκαν υπόψη σχετικά με τον κύκλο ζωής τους.

Κεφάλαιο 7^ο

Αποτελέσματα – Οικονομική Αξιολόγηση

7.1 Γενικά

Η περιβαλλοντική αποτίμηση που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο σκοπό έχει τον προσδιορισμό και την ενσωμάτωση του εξωτερικού κόστους στην οικονομική ανάλυση που πραγματοποιείται στο παρόν κεφάλαιο. Στόχος λοιπόν είναι ο προσδιορισμός του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη για τις 3 εναλλακτικές περιπτώσεις καύσης που εξετάζονται.

Για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα είδη κόστους που αφορούν τόσο το λιγνιτωρυχείο, όσο και τον θερμοηλεκτρικό σταθμό, όπως παρουσιάστηκαν στο 5^ο κεφάλαιο: 1) το κόστος επένδυσης (CAPEX), 2) το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (OPEX) και 3) το περιβαλλοντικό (εξωτερικό) κόστος. Στην περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη με βιομάζα, εκτός των παραπάνω πρέπει να ληφθεί υπόψη και το άμεσο κόστος που συνεπάγεται από την εφοδιαστική αλυσίδα της βιομάζας.

Το κόστος επένδυσης επικαιροποιείται ούτως ώστε η δαπάνη που πραγματοποιείται μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή (στην αρχή του έργου) να ισοκατανέμεται σε τόσες χρονικές περιόδους, όσες και η ωφέλιμη ζωή του έργου. Η επικαιροποίηση πραγματοποιείται πολλαπλασιάζοντας το συνολικό κόστος επένδυσης με το συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου (Capital Recovery Factor - CRF), ο οποίος υπολογίζεται βάση της ωφέλιμης ζωής του συστήματος και το κόστος κεφαλαίου (επιτόκιο αναγωγής). Ο τύπος που δίνει το συντελεστή CRF είναι ο ακόλουθος:

$$CRF = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (7.1)$$

Η επικαιροποίηση του κόστους επένδυσης συμβάλλει στον προσδιορισμό του ανηγμένου κόστους ενέργειας, το οποίο εκφράζεται σε «ευρώ ανά καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική μεγαβατώρα» (€/MWh_e -λειτουργική μονάδα του συστήματος) και παρέχει ένα βολικό τρόπο έκφρασης κάθε επιμέρους είδους κόστους που συμβάλλει στη διαμόρφωση της τελικής τιμής του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, διευκολύνει και τη σύγκριση του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από διάφορες τεχνολογίες.

7.2 Καύση φυσικού λιγνίτη

Το κόστος επένδυσης καθώς επίσης και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του λιγνιτωρυχείου και του θερμοηλεκτρικού σταθμού που απαιτούνται για την παραγωγή ενέργειας παρουσιάζονται στον πίνακα 7.1. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται (βλέπε παράγραφο 5.3.1) ότι το άμεσο κόστος καυσίμου κυμαίνεται γύρω στα 8,77 €/tn_{lig} (Booz&Co., 2012; M. Leonardos, 2014), που αντιστοιχεί σε 1,72 €/GJ, και αντικατοπτρίζει το κόστος συντήρησης και λειτουργίας του λιγνιτωρυχείου.

Πίνακας 7.1: Κόστος επένδυσης και κόστος λειτουργίας και συντήρησης στην περίπτωση καύσης φυσικού λιγνίτη

		Κόστος επένδυσης
Θερμοηλεκτρικός σταθμός	€/MWh _e	17,25
Λιγνιτωρυχείο	€/MWh _e	2,07
		Κόστος συντήρησης και λειτουργίας
Θερμοηλεκτρικός σταθμός	€/MWh _e	6,27
Καύσιμο	€/MWh _e	17,95

Στους πίνακες 7.2 και 7.3 παρουσιάζεται το εξωτερικό κόστος ανά κατηγορία ζημιάς που προκύπτει εξαιτίας των εκπομπών από το λιγνιτωρυχείο και το θερμοηλεκτρικό σταθμό αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για την περίπτωση κοστολόγησης των ρύπων με βάση α) τη διεθνή βιβλιογραφία και β) την βάση δεδομένων [CASES, 2008](#).

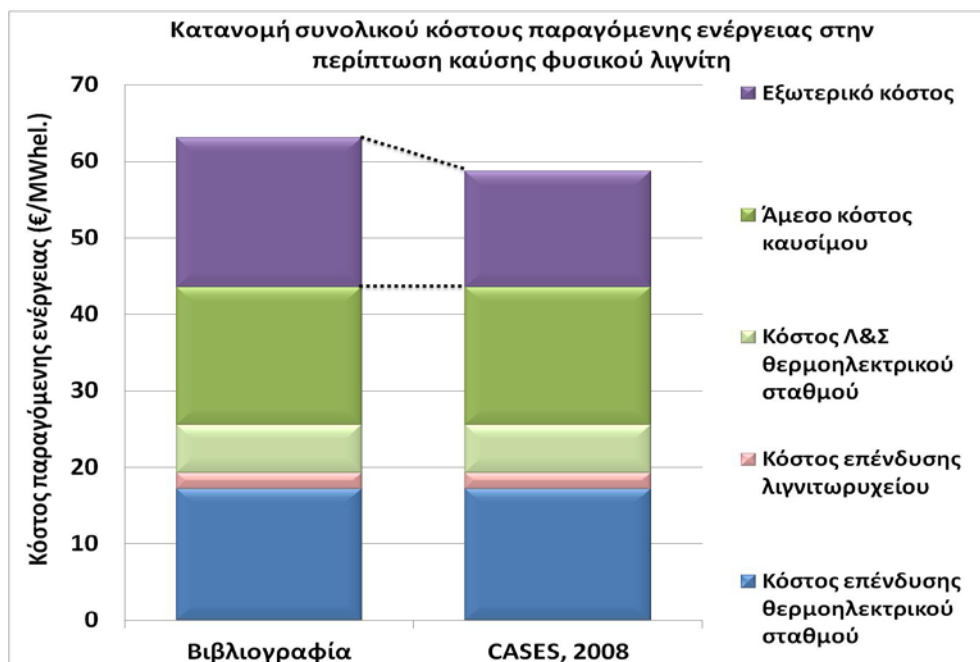
Πίνακας 7.2: Εξωτερικό κόστος λιγνιτωρυχείου

Κατηγορία ζημιάς	Μονάδα	Βιβλιογραφία	CASES, 2008
Ανθρώπινη υγεία	€/MWh	6,67E+00	5,59E+00
Βιοποικιλότητα	€/MWh	1,94E-01	4,22E-02
Καλλιέργειες	€/MWh	4,65E-02	3,86E-02
Υλικά	€/MWh	9,12E-02	4,02E-02
Κλιματική αλλαγή	€/MWh	4,43E-01	4,43E-01
Σύνολο	€/MWh	7,45E+00	6,16E+00

Πίνακας 7.3: Εξωτερικό κόστος θερμοηλεκτρικού σταθμού

Κατηγορία ζημιάς	Μονάδα	Βιβλιογραφία	CASES, 2008
Ανθρώπινη υγεία	€/MWh	5,91E+00	3,20E+00
Βιοποικιλότητα	€/MWh	4,09E-01	1,30E-01
Καλλιέργειες	€/MWh	1,22E-01	3,58E-02
Υλικά	€/MWh	9,06E-02	4,42E-02
Κλιματική αλλαγή	€/MWh	5,58E+00	5,58E+00
Σύνολο	€/MWh	12,10E+00	8,99E+00

Στο διάγραμμα 7.1 παρουσιάζεται η κατανομή του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως παρατίθεται στους πίνακες 7.1, 7.2 και 7.3, με βάση τις δύο εναλλακτικές κοστολόγησης των ρύπων.



Διάγραμμα 7.1: Κατανομή συνολικού κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην περίπτωση της καύσης φυσικού λιγνίτη

Είναι φανερό ότι το κόστος επένδυσης του θερμοηλεκτρικού σταθμού είναι σημαντικό σε σχέση με αυτό του λιγνιτωρυχείου, γεγονός που δικαιολογείται από τις υποδομές και τον απαραίτητο μηχανολογικό εξοπλισμό που είναι απαραίτητα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Παράλληλα, το κόστος συντήρησης και λειτουργίας του λιγνιτωρυχείου, που αντικατοπτρίζεται στο άμεσο κόστος καυσίμου, παρουσιάζει σημαντική συνεισφορά στο συνολικό κόστος, περίπου 28%, γεγονός που οφείλεται σε δύο βασικούς παράγοντες: α) στο υψηλό άμεσο κόστος καυσίμου, στο οποίο περιλαμβάνονται όλα τα σχετικά με την εξόρυξη κόσθη (ενέργεια, υλικά, εργατικά κτλ) και β) στον συντελεστή ασφαλείας που έχει ληφθεί υπόψη, εντείνοντας τις απαιτήσεις εξόρυξης στο λιγνιτωρυχείο και κατά συνέπεια αυξάνοντας το άμεσο κόστος καυσίμου.

Όσον αφορά το εξωτερικό κόστος, αξίζει να επισημανθεί ότι το ποσοστό συμμετοχής του στη διαμόρφωση του συνολικού κόστους είναι σημαντικά υψηλό, γύρω στο 26% (CASES, 2008) με 31% (βιβλιογραφία). Πρέπει δε να τονιστεί ότι το ποσοστό αυτό αν και είναι πράγματι πολύ υψηλό, έχει προκύψει υπό τη θεώρηση χαμηλού εξωτερικού κόστους για τις εκπομπές CO₂, γεγονός που καταδεικνύει τη σπουδαιότητα συνυπολογισμού του εξωτερικού κόστους σε τέτοιου είδους αναλύσεις.

Τέλος, συγκρίνοντας το συνολικό κόστος παραγωγής που προκύπτει από τις δύο εναλλακτικές κοστολόγησης των ρύπων, είναι πασιφανές ότι στην περίπτωση θεώρησης χαμηλότερου εξωτερικού κόστους (CASES, 2008) παρατηρείται σημαντική εξοικονόμηση κατά 4,41 €/MWh όπως παρουσιάζεται και στους πίνακες 7.2 και 7.3. Η σπουδαιότητα αυτής της παρατήρησης έγκειται στο γεγονός ότι καταδεικνύει την αβεβαιότητα που υπάρχει στον προσδιορισμό του εξωτερικού κόστους. Για το λόγο αυτό άλλωστε, τα αποτελέσματα όλων των σχετικών μελετών πάνω στο θέμα αυτό δεν συγκλίνουν σε ακριβείς τιμές εξωτερικού κόστους, αλλά καταλήγουν σε εκτιμήσεις που διαφέρουν ανάλογα με τα χωρικά και χρονικά όρια μελέτης και εξαρτώνται από πλήθος άλλων παραγόντων.

7.3 Μικτή καύση φυσικού λιγνίτη, με 30% θερμική υποκατάσταση με προ-ξηραμένο λιγνίτη

Το κόστος επένδυσης καθώς επίσης και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του λιγνιτωρυχείου και του θερμοηλεκτρικού σταθμού που απαιτούνται για την παραγωγή ενέργειας παρουσιάζονται στον πίνακα 7.4.

Πίνακας 7.4: Κόστος επένδυσης και κόστος λειτουργίας και συντήρησης		
		Κόστος επένδυσης
Θερμοηλεκτρικός σταθμός	€/MWh	17,43
Ξηραντήρας	€/MWh	0,10
Λιγνιτωρυχείο	€/MWh	1,98
Κόστος συντήρησης και λειτουργίας		
Θερμοηλεκτρικός σταθμός	€/MWh	6,31
Ξηραντήρας	€/MWh	0,40
Καύσιμο	€/MWh	17,23

Στους πίνακες 7.5 και 7.6 παρουσιάζεται το εξωτερικό κόστος ανά κατηγορία ζημιάς που προκύπτει εξαιτίας των εκπομπών από το λιγνιτωρυχείο και το θερμοηλεκτρικό σταθμό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για την περίπτωση κοστολόγησης των ρύπων με βάση α) τη διεθνή βιβλιογραφία και β) την βάση δεδομένων CASES, 2008.

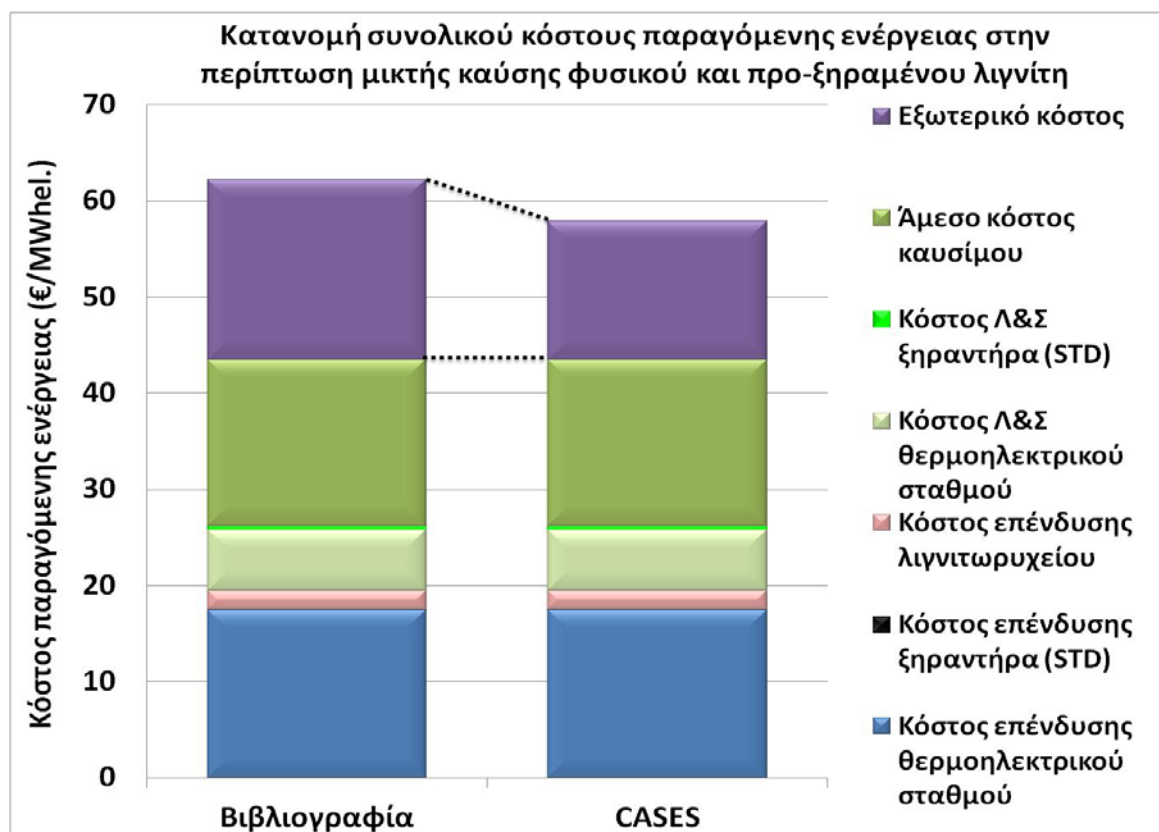
Πίνακας 7.5: Εξωτερικό κόστος λιγνιτωρυχείου			
Κατηγορία ζημιάς	Μονάδα	Βιβλιογραφία	CASES, 2008
Ανθρώπινη υγεία	€/MWh	6,34E+00	5,32E+00
Βιοποικιλότητα	€/MWh	1,85E-01	4,02E-02
Καλλιέργειες	€/MWh	4,44E-02	3,68E-02
Υλικά	€/MWh	8,67E-02	3,82E-02
Κλιματική αλλαγή	€/MWh	4,22E-01	4,22E-01

Σύνολο	€/MWh	7,08E+00	5,86E+00
---------------	--------------	-----------------	-----------------

Πίνακας 7.6: Εξωτερικό κόστος θερμοηλεκτρικού σταθμού

Κατηγορία ζημιάς	Μονάδα	Βιβλιογραφία	CASES, 2008
Ανθρώπινη υγεία	€/MWh	5,68E+00	3,07E+00
Βιοποικιλότητα	€/MWh	3,93E-01	1,25E-01
Καλλιέργειες	€/MWh	1,17E-01	3,44E-02
Υλικά	€/MWh	8,70E-02	4,25E-02
Κλιματική αλλαγή	€/MWh	5,36E+00	5,36E+00
Σύνολο	€/MWh	11,60E+00	8,64E+00

Στο διάγραμμα 7.2 παρουσιάζεται η κατανομή του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως παρατίθεται στους πίνακες 7.4, 7.5 και 7.6, με βάση τις δύο εναλλακτικές κοστολόγησης των ρύπων.



Διάγραμμα 7.2: Κατανομή συνολικού κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην περίπτωση της μικής καύσης φυσικού και προ-ξηραμένου λιγνίτη

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από το παραπάνω διάγραμμα συμφωνούν με αυτά που περιγράφηκαν στην παράγραφο 7.2. Η διαφορά στην προκειμένη περίπτωση έγκειται στην ενσωμάτωση του περιστροφικού ξηραντήρα με αυλούς (STD), για την επίτευξη του επιθυμητού βαθμού προξήρανσης, γεγονός που συνεπάγεται μία ανεπαίσθητη αύξηση στο κόστος επένδυσης της εγκατάστασης κατά 0,6%. Το ίδιο συμβαίνει και με το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του σταθμού που αυξάνεται περίπου 6% σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 7.4.

Ωστόσο, οι επιπλέον δαπάνες που προκύπτουν εξαιτίας της ενσωμάτωσης του περιστροφικού ξηραντήρα υπερκαλύπτονται από την αντίστοιχη μείωση άλλων ειδών κόστους όπως:

α) Του κόστους επένδυσης του λιγνιτωρυχείου κατά 0,08 €/MWh (μείωση 4%) σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, εξαιτίας των μειωμένων απαιτήσεων για εξόρυξη φυσικού καυσίμου και άρα μικρότερης έκτασης λιγνιτωρυχείου, καθώς επίσης και λιγότερου αριθμού μηχανημάτων του έκτακτου εξοπλισμού για την επίτευξη της εξόρυξης

β) Του άμεσου κόστους καυσίμου κατά 0,72 €/MWh (μείωση 4%) σε σχέση με την με την περίπτωση αναφοράς, εξαιτίας των μειωμένων απαιτήσεων για εξόρυξη φυσικού καυσίμου

γ) Του εξωτερικού κόστους κατά 0,84 €/MWh (μείωση 4,3%) σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, εξαιτίας των μειωμένων εκπομπών κατά τη λειτουργία του μηχανολογικού εξοπλισμού του λιγνιτωρυχείου λόγω διαχείρισης μικρότερης μάζας υλικών και των μειωμένων εκπομπών στον θερμοηλεκτρικό σταθμό ως αποτέλεσμα της βελτίωσης του καθαρού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης

Επιπλέον, συγκρίνοντας το συνολικό κόστος παραγωγής που προκύπτει από τις δύο εναλλακτικές κοστολόγησης των ρύπων, παρατηρείται ότι στην περίπτωση θεώρησης χαμηλότερου εξωτερικού κόστους (CASES, 2008) επιτυγχάνεται εξοικονόμηση κατά 4,22 €/MWh όπως φαίνεται και από τα στοιχεία των πινάκων 7.5 και 7.6. Τέλος, συγκριτικά με την περίπτωση αναφοράς (καύση φυσικού λιγνίτη), το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται κατά 0,92 €/MWh (κοστολόγηση εκπομπών με βάση τη βιβλιογραφία), γεγονός που αποδεικνύει ότι η θερμική υποκατάσταση με προξηραμένο λιγνίτη είναι όντως μια επωφελής εναλλακτική λύση, που ήδη εφαρμόζεται με επιτυχία και στην πράξη με στόχο τη μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής ενέργειας.

7.4 Μικτή καύση φυσικού λιγνίτη, με 6% θερμική υποκατάσταση με βιομάζα

Το κόστος επένδυσης καθώς επίσης και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του λιγνιτωρυχείου και του θερμοηλεκτρικού σταθμού που απαιτούνται για την παραγωγή ενέργειας παρουσιάζονται στον πίνακα 7.7. Στον ίδιο πίνακα εμφανίζεται και το άμεσο κόστος βιομάζας σε κάθε μία από τις εξεταζόμενες εναλλακτικές εφοδιαστικής αλυσίδας (βλέπε παράγραφο 4.5), λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές κόστους που δίνονται στην παράγραφο 5.3.1.

Πίνακας 7.7: Κόστος επένδυσης και κόστος λειτουργίας και συντήρησης		
		Κόστος επένδυσης
Θερμοηλεκτρικός σταθμός	€/MWh	17,22
Λιγνιτωρυχείο	€/MWh	1,94
		Κόστος συντήρησης και λειτουργίας
Θερμοηλεκτρικός σταθμός	€/MWh	6,26
Καύσιμο - λιγνίτης	€/MWh	16,84
Καύσιμο – βιομάζα (Περίπτωση Α)	€/MWh	2,54
Καύσιμο – βιομάζα (Περίπτωση Β)	€/MWh	2,72
Καύσιμο – βιομάζα (Περίπτωση Γ)	€/MWh	1,50
Καύσιμο – βιομάζα (Περίπτωση Δ)	€/MWh	1,65

Όπως και στην περίπτωση των εκπομπών που εξετάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, η ενσωμάτωση του ενεργοβόρου σταδίου της πελλετοποίησης στις εναλλακτικές εφοδιαστικής αλυσίδας Α και Β, προκαλεί αύξηση του άμεσου κόστους της βιομάζας, καθώς και σε αύξηση του αντίστοιχου εξωτερικού κόστους. Στον 7.8 παρουσιάζεται το εξωτερικό κόστος ανά κατηγορία ζημιάς που προκύπτει εξαιτίας των εκπομπών από το λιγνιτωρυχείο και το θερμοηλεκτρικό σταθμό, ενώ στον πίνακα 7.9 εμφανίζονται τα ίδια στοιχεία για τις υπό εξέταση εναλλακτικές εφοδιαστικής αλυσίδας της βιομάζας.

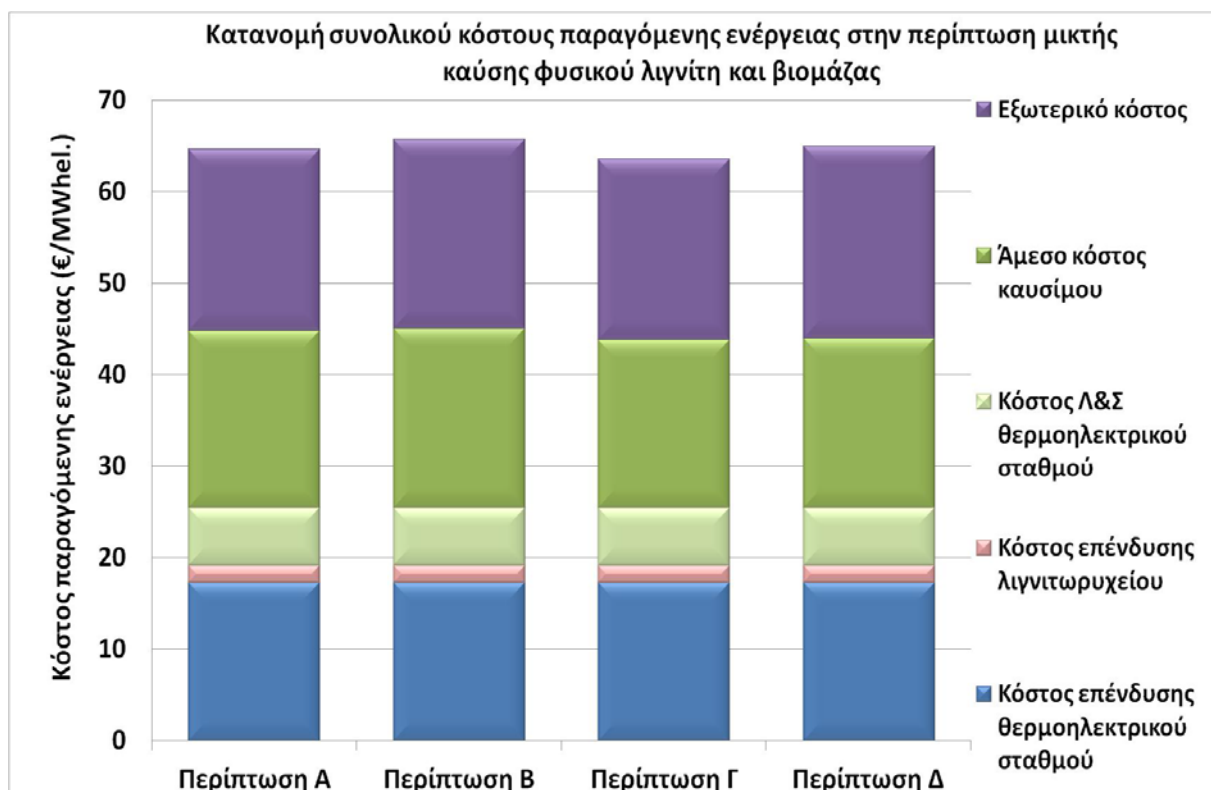
Πίνακας 7.8: Εξωτερικό κόστος λιγνιτωρυχείου και θερμοηλεκτρικού σταθμού

Κατηγορία ζημιάς	Μονάδα	Λιγνιτωρυχείο	Θερμοηλεκτρικός σταθμός
Ανθρώπινη υγεία	€/MWh	6,01E+00	5,53E+00
Βιοποικιλότητα	€/MWh	1,74E-01	3,85E-01
Καλλιέργειες	€/MWh	4,13E-02	1,15E-01
Υλικά	€/MWh	8,29E-02	8,46E-02
Κλιματική αλλαγή	€/MWh	4,03E-01	5,23E+00
Σύνολο	€/MWh	6,71E+00	11,34E+00

Πίνακας 7.9: Εξωτερικό κόστος εναλλακτικών εφοδιαστικής αλυσίδας της βιομάζας

Κατηγορία ζημιάς	Μονάδα	Περίπτωση Α	Περίπτωση Β	Περίπτωση Γ	Περίπτωση Δ
Ανθρώπινη υγεία	€/MWh	1,46E+00	2,23E+00	1,46E+00	2,54E+00
Βιοποικιλότητα	€/MWh	1,26E-01	1,99E-01	1,41E-01	2,37E-01
Καλλιέργειες	€/MWh	4,89E-02	7,90E-02	5,76E-02	9,59E-02
Υλικά	€/MWh	2,10E-02	2,95E-02	1,83E-02	3,05E-02
Κλιματική αλλαγή	€/MWh	8,91E-02	1,06E-01	6,32E-02	8,57E-02
Σύνολο	€/MWh	1,75E+00	2,64E+00	1,74E+00	2,99E+00

Στο διάγραμμα 7.3 συγκρίνεται το συνολικό κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη και βιομάζας, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος καυσίμου και το εξωτερικό κόστος των τεσσάρων εναλλακτικών εφοδιαστικής αλυσίδας για τη βιομάζα. Η κοστολόγηση των ρύπων πραγματοποιήθηκε με βάση τις τιμές που δίνονται στη βιβλιογραφία.



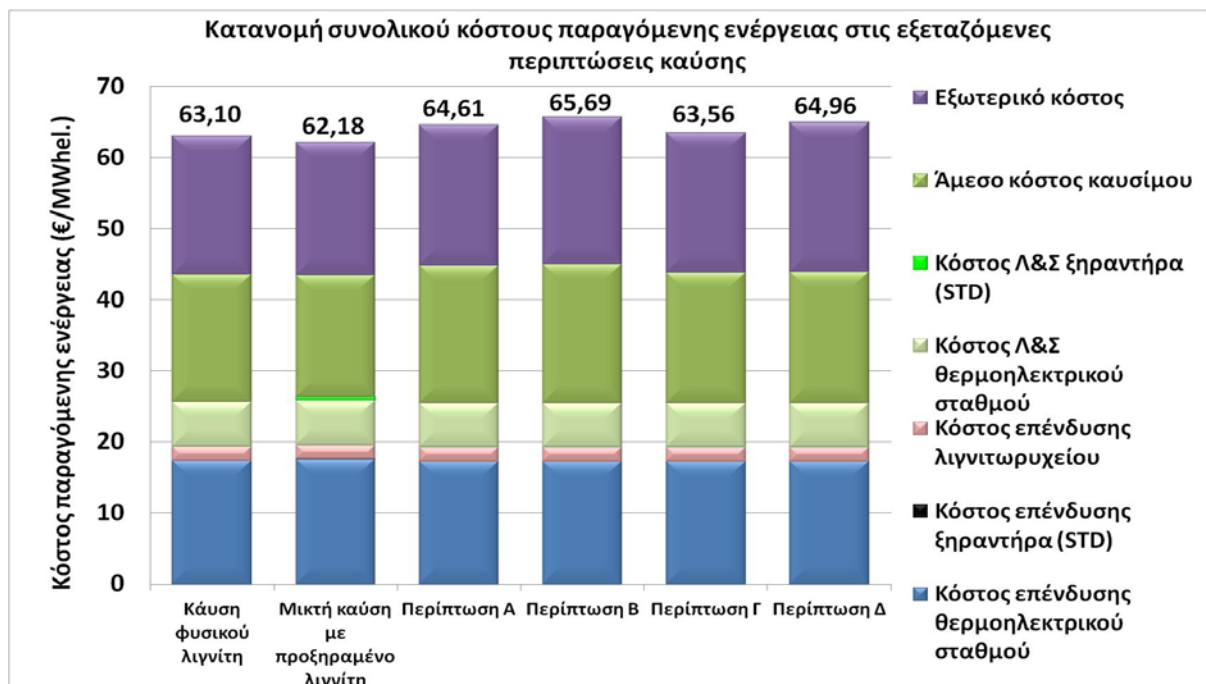
Διάγραμμα 7.3: Κατανομή συνολικού κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη και βιομάζας, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές εναλλακτικές εφοδιαστικής αλυσίδας της βιομάζας

Η διαφορά του συνολικού κόστους που προκύπτει από τις τέσσερις εναλλακτικές όπως φαίνεται από το διάγραμμα 7.3 κυμαίνεται από 0,73 €/MWh (Περίπτωσης Β, Δ) έως και 2,13 €/MWh

(Περιπτώσεις Β, Γ). Η μικρή αυτή διαφορά δικαιολογείται από την επίσης μικρή διαφορά στις τιμές του άμεσου κόστους της βιομάζας, αλλά και του εξωτερικού κόστους, ανάμεσα στις υπόψη εναλλακτικές περιπτώσεις. Ωστόσο, η διαφορά αυτή είναι μεγαλύτερη στην πραγματικότητα αν ληφθούν υπόψη το κόστος επένδυσης και το λειτουργικό κόστος του επιπλέον εξοπλισμού (μηχανήματα, εγκαταστάσεις κτλ.) που είναι απαραίτητος για την επίτευξη των διαδικασιών των εφοδιαστικών αλυσίδων της βιομάζας. Παρόλα αυτά, λόγω ελλείψεως δεδομένων στη βιβλιογραφία, τέτοιου είδους κόστη δεν λαμβάνονται υπόψη στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

7.5 Σύγκριση συνολικού κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας εξεταζόμενων περιπτώσεων καύσης

Στο διάγραμμα 7.4 συγκρίνονται οι περιπτώσεις καύσης που αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, ως προς το συνολικό κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Σε όλες τις περιπτώσεις η κοστολόγηση των ρύπων έγινε με βάση τις τιμές που δίνονται στη βιβλιογραφία.



Διάγραμμα 7.4: Κατανομή συνολικού κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στις εξεταζόμενες περιπτώσεις καύσης

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα το ελάχιστο δυνατό κόστος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στον υπόψη θερμoelectρικό σταθμό (Πτολεμαΐδα V) επιτυγχάνεται με τη μικτή καύση φυσικού και προξηραμένου λιγνίτη από 30% θερμική υποκατάσταση και είναι ίση με 62,18 €/MWh. Το προβάδισμα αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο μικρότερο κόστος καυσίμου της συγκεκριμένης εναλλακτικής καύσης έναντι των υπολοίπων, ενώ σημαντική εξοικονόμηση κόστους επιτυγχάνεται και εξαιτίας του ελάχιστου εξωτερικού κόστους που παρατηρείται (βλέπε συνολικές εκπομπές ρύπων, παράγραφος 6.5).

Τέλος, αξίζει να επισημανθεί ότι η υιοθέτηση της εναλλακτικής μικτής καύσης με βιομάζα από 6% θερμική υποκατάσταση της περίπτωσης Γ, οδηγεί σε μικρή αύξηση του συνολικού κόστους κατά περίπου 0,46 €/MWh σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Το πλεονέκτημα αυτό σε συνδυασμό με την εξοικονόμηση χρημάτων που επιτυγχάνεται στην περίπτωση μικτής καύσης με προξηραμένο λιγνίτη, υποδεικνύει ότι ένας πιθανός συνδυασμός των δύο αυτών εναλλακτικών καύσης μπορεί να επιφέρει ακόμα σημαντικότερη μείωση του συνολικού κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

7.6 Συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από διαφορετικά συστήματα παραγωγής

Στην παράγραφο αυτή στόχος είναι η ποιοτική σύγκριση της κατανομής του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το φυσικό λιγνίτη, όπως προέκυψε από την παράγραφο 7.2 και την βιβλιογραφική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην παράγραφο 5.5, με το συνολικό κόστος άλλων συστημάτων που παρουσιάζεται στις μελέτες των [M. Braun, 2004](#) και [S. Alberici et al., 2014](#) και έχουν ως βάση τον άνθρακα, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, την αιολική ενέργεια (ανεμογεννήτριες) και την ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά). Επιπλέον, στη σύγκριση συμπεριλαμβάνεται και η περίπτωση του συστήματος μικτής καύσης λιγνίτη και βιομάζας που αναλύθηκε στην παράγραφο 7.4. Συνεπώς, τα συστήματα καύσης φυσικού λιγνίτη και μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη με βιομάζα που εξετάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, συγκρίνονται με άλλου είδους συστήματα των οποίων το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παρέχεται άμεσα στις προαναφερθείσες βιβλιογραφικές πηγές χωρίς την εκτέλεση επιπλέον υπολογισμών για αυτές τις τεχνολογίες. Από τη σύγκριση της κατανομής του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των υπόψη συστημάτων εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Το ιδιωτικό κόστος στην περίπτωση του φυσικού λιγνίτη είναι συγκρίσιμο με αυτό του άνθρακα και του πετρελαίου, αλλά οπωσδήποτε χαμηλότερο από αυτό του φυσικού αερίου και της βιομάζας. Η αιτία οφείλεται κυρίως στο χαμηλότερο κόστος καυσίμου στην περίπτωση του λιγνίτη έναντι του φυσικού αερίου και της βιομάζας, ενώ σε σύγκριση με τα συστήματα άνθρακα και πετρελαίου, το υψηλότερο κόστος επένδυσης των λιγνιτικών μονάδων σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος καυσίμου (λιγνίτη) αποτυπώνεται στη μικρή διαφορά του ιδιωτικού κόστους αυτών των συστημάτων παραγωγής.
2. Το ιδιωτικό κόστος των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση συμβατικά καύσιμα (λιγνίτη, άνθρακα, πετρέλαιο, βιομάζα) είναι κατά πολύ μικρότερο του ιδιωτικού κόστους των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση ανανεώσιμα καύσιμα (αιολική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια). Ο λόγος οφείλεται προφανώς στο σημαντικά υψηλό κόστος επένδυσης που απαιτείται για την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων υψηλής τεχνολογίας.
3. Το εξωτερικό κόστος από την εκπομπή ρύπων που προκύπτει στην περίπτωση του λιγνίτη είναι υψηλότερο από αυτό των συστημάτων άνθρακα, φυσικού αερίου και κατά πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των συστημάτων αξιοποίησης ανανεώσιμων μορφών ενέργειας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παραγράφου 7.2, αν στο εξωτερικό κόστος ληφθούν υπόψη οι εκπομπές ρύπων από όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του λιγνίτη, τότε η αύξηση στο συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να φθάσει έως και το 30%. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τη χαμηλή ποιότητα του λιγνίτη, δικαιολογεί το υψηλότερο εξωτερικό κόστος σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Ως προς τα συστήματα ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, οι εκπομπές ρύπων (και άρα το εξωτερικό κόστος) υφίστανται κυρίως από τα στάδια κατασκευής και αποσυναρμολόγησης των συστημάτων αυτών, που όμως είναι αμελητέες σε σύγκριση με τα άλλα συμβατικά συστήματα.
4. Το συνολικό εξωτερικό κόστος στην περίπτωση της καύσης φυσικού λιγνίτη προκύπτει μικρότερο σε σχέση με το αντίστοιχο της βιομάζας γιατί όπως αναλύθηκε και στην παράγραφο 7.4, λαμβάνονται υπόψη και οι εκπομπές ρύπων που προκύπτουν από την εφοδιαστική αλυσίδα της βιομάζας.

Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής του λιγνίτη, επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι εξίσου ακριβό σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα ορυκτών καυσίμων, αλλά σαφώς φθηνότερο από τα συστήματα αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Κεφάλαιο 8^ο

Ανάλυση Ευαισθησίας

8.1 Γενικά – Παράμετροι ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιείται στο παρόν κεφάλαιο εκτυλίσσεται σε δύο επιμέρους άξονες. Ο πρώτος αφορά την ανάλυση ευαισθησίας περιβαλλοντικών παραμέτρων, δηλαδή μεγεθών που η μεταβολή τους επηρεάζει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που εξετάζεται. Ο δεύτερος αφορά την ανάλυση ευαισθησίας οικονομικών παραμέτρων, δηλαδή μεγεθών που η μεταβολή τους έχει αντίκτυπο στο συνολικό κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ανάλυση ευαισθησίας τόσο των περιβαλλοντικών, όσο και των οικονομικών παραμέτρων εφαρμόζεται σε όλες τις περιπτώσεις καύσης που μελετώνται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Ειδικά για την περίπτωση μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη και βιομάζας από 6% θερμική υποκατάσταση, λαμβάνεται υπόψη μόνο η εναλλακτική εφοδιαστικής αλυσίδας της περίπτωσης Γ ως η βέλτιστη τόσο από πλευράς εκπομπής ρύπων, όσο και συνολικού κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από το λογισμικό SimaPro v.7.3.3 με την εφαρμογή της μεθόδου Impact 2002+.

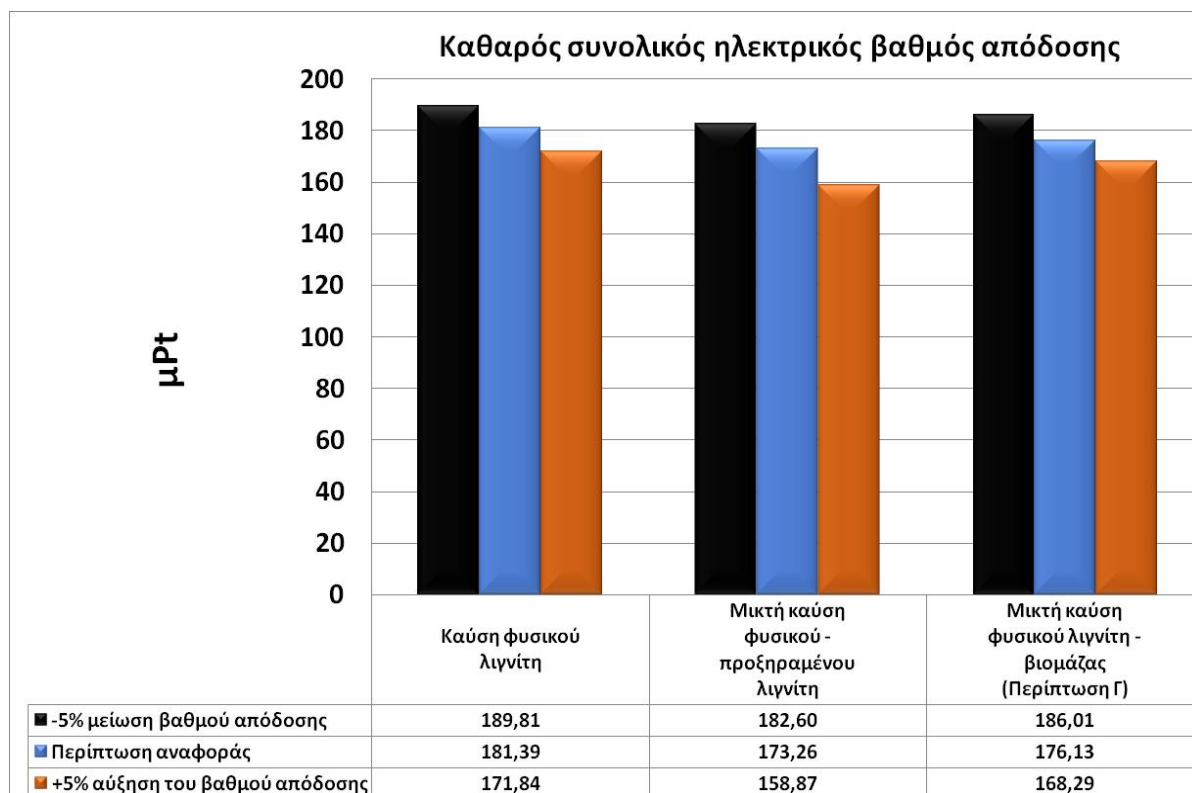
8.2 Ανάλυση ευαισθησίας περιβαλλοντικών παραμέτρων

Στα πλαίσια της ανάλυσης ευαισθησίας περιβαλλοντικών παραμέτρων, τα μεγέθη που επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και εξετάζονται στην παρούσα εργασία είναι:

1. Ο καθαρός συνολικός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
2. Η στοιχειακή σύσταση του φυσικού λιγνίτη
3. Ο συντελεστής ασφαλείας που έχει ληφθεί υπόψη σχετικά με την εξόρυξη καυσίμου στο λιγνιτωρυχείο

8.2.1 Καθαρός συνολικός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης μονάδας

Ο καθαρός συνολικός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συνιστά ίσως την σπουδαιότερη περιβαλλοντική παράμετρο κάθε θερμοηλεκτρικής μονάδας, καθώς επηρεάζει άμεσα το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του σταθμού. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ο καθαρός συνολικός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της μονάδας που εξετάζεται (Πτολεμαΐδα V) θεωρήθηκε ίσος με 41,5% (πίνακας 4.5 – ΔΕΗ, 2013b). Ωστόσο, στην πραγματικότητα η τιμή αυτή δεν είναι σταθερή και παρουσιάζει σημαντική διακύμανση που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως για παράδειγμα το φορτίο του σταθμού. Για το λόγο αυτό, στο παρόν σενάριο ευαισθησίας μελετάται η επίδραση που προκύπτει από τη μεταβολή του καθαρού συνολικού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης κατά $\pm 5\%$ στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του σταθμού. Στο διάγραμμα 8.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των τριών σεναρίων, για τις εναλλακτικές περιπτώσεις καύσης που εξετάζονται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.



Διάγραμμα 8.1: Παράμετρος ευαισθησίας – καθαρός συνολικός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (Impact 2002+)

Το συμπέρασμα που προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα είναι ότι η μείωση του καθαρού συνολικού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης επιφέρει αύξηση στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε όλες τις περιπτώσεις και αντίστροφα, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο. Συγκεκριμένα, η μεταβολή του βαθμού απόδοσης κατά -5% προκαλεί αύξηση, κατά περίπου 5,6%, στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα στην περίπτωση της μικτής καύσης με βιομάζα σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς για τη βιομάζα. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις τα αντίστοιχα ποσοστά αύξησης είναι 4,6% για την καύση φυσικού λιγνίτη και 5,4% για την μικτή καύση με προξηραμένο λιγνίτη. Η μεγαλύτερη αύξηση που παρατηρείται στην περίπτωση της μικτής καύσης με βιομάζα οφείλεται τόσο στη σημαντική μείωση του καθαρού συνολικού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της μονάδας μικτής καύσης με βιομάζα, όσο και στην ενσωμάτωση της συνεισφοράς της εφοδιαστικής αλυσίδας της βιομάζας στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συστήματος.

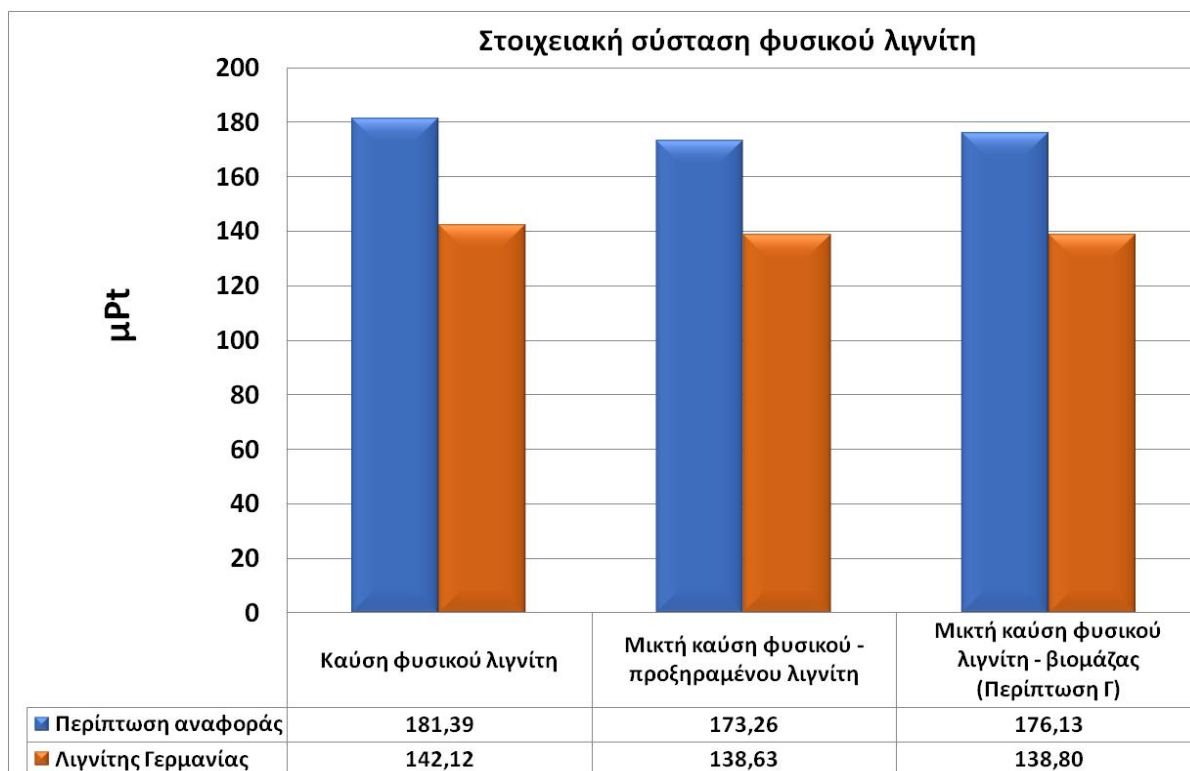
Από την άλλη πλευρά, η μεταβολή του βαθμού απόδοσης κατά +5% προκαλεί μείωση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος σχεδόν 5,3% στην περίπτωση της καύσης φυσικού λιγνίτη και 4,5% στην περίπτωση της μικτής καύσης με βιομάζα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες περιπτώσεις αναφοράς. Ωστόσο, η μεγαλύτερη μείωση επιτυγχάνεται στην περίπτωση της μικτής καύσης με προξηραμένο λιγνίτη, περίπου 8,3%, γεγονός που υποδεικνύει ότι η εναλλακτική αυτή είναι όντως μία επωφελής λύση με στόχο τη μείωση της περιβαλλοντικής ζημιάς του κύκλου ζωής του λιγνίτη.

8.2.2 Στοιχειακή σύσταση φυσικού λιγνίτη

Στόχος είναι ο προσδιορισμός της μεταβολής του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος που προκύπτει από τη μεταβολή της στοιχειακής σύστασης του φυσικού λιγνίτη σε κάθε μία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις καύσης. Η συμβολή της υπόψη παραμέτρου είναι πολύ σημαντική, αν ληφθεί μάλιστα υπόψη η μεγάλη διακύμανση που παρουσιάζει η στοιχειακή σύσταση του φυσικού λιγνίτη τόσο ανάμεσα στα λιγνιτωρυχεία της Ελλάδας, όσο και στα λιγνιτωρυχεία διαφορετικών κρατών.

Για το λόγο αυτό, πέρα από το σενάριο αναφοράς που ήδη εξετάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους με την εκτίμηση μιας μέσης στοιχειακής σύστασης λιγνίτη για την περίπτωση της Ελλάδας, εξετάζεται επιπλέον το σενάριο αξιοποίησης φυσικού λιγνίτη με μέση στοιχειακή σύσταση για την περίπτωση της Γερμανίας που παρουσιάζεται στον πίνακα 8.1. Στο διάγραμμα 8.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο σεναρίων, για τις εναλλακτικές περιπτώσεις καύσης που εξετάζονται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 8.1: Μέση σύσταση φυσικού λιγνίτη στις περιπτώσεις της Ελλάδας και της Γερμανίας		Ελλάδα	Γερμανία
C	%w.t. (a.r.)	16,80	25,2
H	%w.t. (a.r.)	1,30	1,82
N	%w.t. (a.r.)	0,60	0,25
O	%w.t. (a.r.)	7,02	9,68
S	%w.t. (a.r.)	0,35	0,15
CO ₂	%w.t. (a.r.)	2,93	0
Τέφρα	%w.t. (a.r.)	18,00	3,9
Υγρασία	%w.t. (a.r.)	53,00	59
Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα (LHV)	kJ/kg	5087,26	8026,08

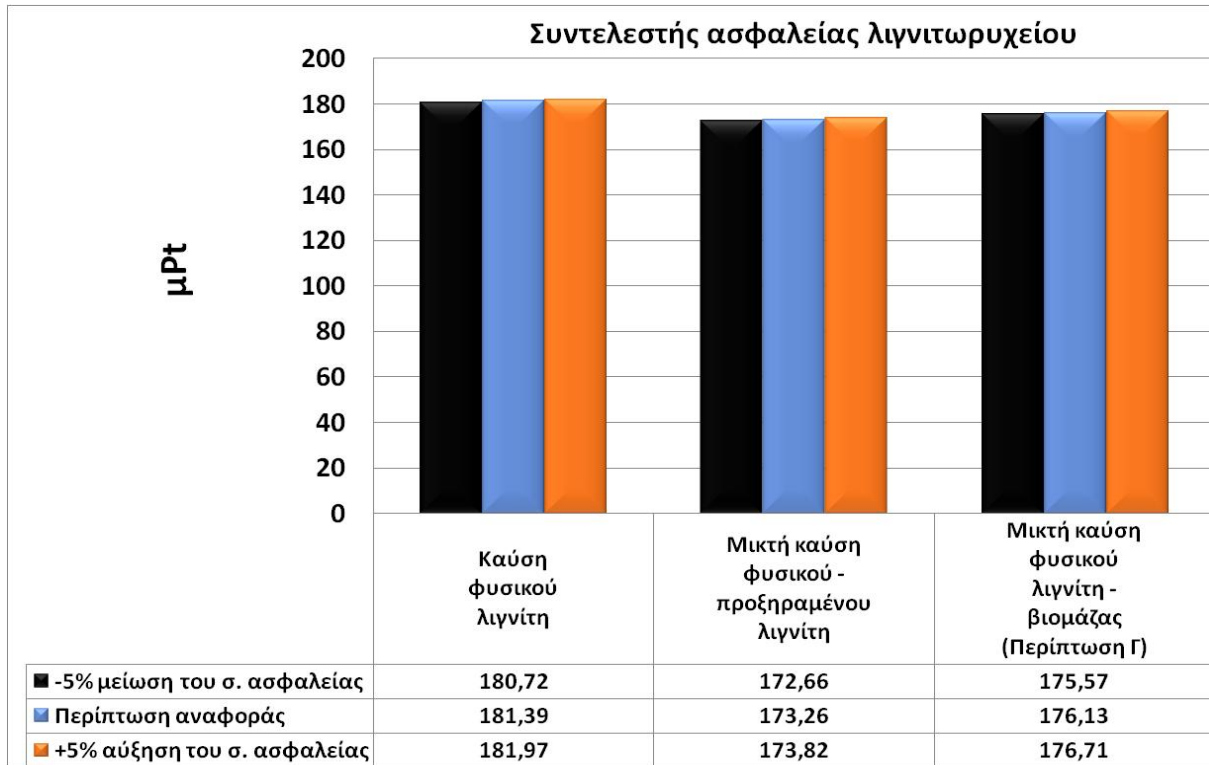


Διάγραμμα 8.2: Παράμετρος ευαισθησίας – στοιχειακή σύσταση φυσικού λιγνίτη (Impact 2002+)

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, σε όλες τις περιπτώσεις καύσης η χρήση φυσικού λιγνίτη με μέση στοιχειακή σύσταση αντίστοιχη των λιγνιτωρυχείων της Γερμανίας επιφέρει μείωση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος, αφού αξιοποιείται καύσιμο καλύτερης ποιότητας. Ειδικότερα, η μείωση που επιτυγχάνεται σε σύγκριση με τις περιπτώσεις αναφοράς είναι περίπου 21,6% στην περίπτωση της καύσης φυσικού λιγνίτη, 20% στην περίπτωση της μικτής καύσης με προξηραμένο λιγνίτη και 21,1% στην περίπτωση της μικτής καύσης με βιομάζα. Η σχετικά μικρή μείωση που παρατηρείται στην περίπτωση της μικτής καύσης με προξηραμένο λιγνίτη σε σύγκριση με τις άλλες περιπτώσεις καύσης οφείλεται στην ταυτόχρονη μείωση του καθαρού συνολικού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση μικτής καύσης.

8.2.3 Συντελεστής ασφαλείας λιγνιτωρυχείου

Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας που λήφθηκε υπόψη στην περιβαλλοντική αξιολόγηση των εναλλακτικών περιπτώσεων καύσης του κεφαλαίου 6, επιλέχθηκε αυθαίρετα. Για το λόγο αυτό, εξετάζεται μεταβολή αυτής της παραμέτρου κατά $\pm 5\%$ για τον προσδιορισμό της επίδρασης στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 8.3.



Διάγραμμα 8.3: Παράμετρος ευαισθησίας – συντελεστής ασφαλείας λιγνιτωρυχείου (Impact 2002+)

Το συμπέρασμα που προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα είναι πως η μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας κατά $\pm 5\%$ στα πλαίσια του λιγνιτωρυχείου επιδρά ελάχιστα στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των εξεταζόμενων περιπτώσεων καύσης, σχεδόν $\pm 0,3\%$. Όπως ήταν αναμενόμενο, η αύξηση του συντελεστή ασφαλείας οδηγεί σε αύξηση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος, εξαιτίας των αυξημένων απαιτήσεων για εξόρυξη λιγνίτη στα όρια του λιγνιτωρυχείου και το αντίστροφο. Αξίζει τέλος να αναφερθεί ότι η μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας προκαλεί μεταβολή μόνο στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του αντίστοιχου λιγνιτωρυχείου, ενώ δεν επιδρά καθόλου στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του θερμοηλεκτρικού σταθμού.

8.3 Ανάλυση ευαισθησίας οικονομικών παραμέτρων

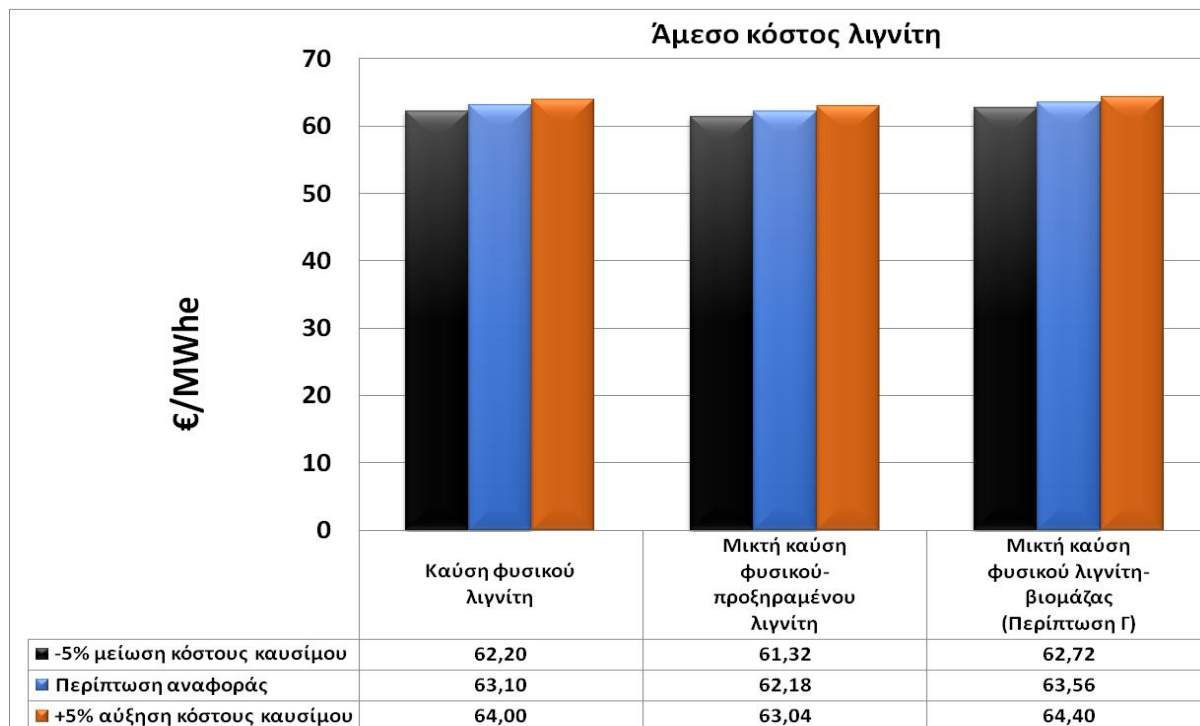
Για την ανάλυση ευαισθησίας οικονομικών παραμέτρων, τα μεγέθη που επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και εξετάζονται είναι:

1. Το άμεσο κόστος του λιγνίτη
2. Το επιτόκιο αναγωγής (κόστος κεφαλαίου)
3. Το κόστος επένδυσης (CAPEX) και το λειτουργικό κόστος (OPEX) του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
4. Το εξωτερικό κόστος διοξειδίου του άνθρακα (CO₂)

5. Οι ετήσιες ώρες λειτουργίας του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

8.3.1 Άμεσο κόστος λιγνίτη

Σε όλες τις εξεταζόμενες εναλλακτικές καύσης το άμεσο κόστος του λιγνίτη λήφθηκε ίσο με 8,77 €/τη_{IG} σύμφωνα τα στοιχεία των Booz&Co., 2012 και M. Leonardos, 2014 (βλέπε παράγραφο 5.3.1). Η μεταβολή αυτού του κόστους κατά ±5% επιφέρει αλλαγή στο συνολικό κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τις διάφορες εναλλακτικές καύσης που φαίνεται στο διάγραμμα 8.4.



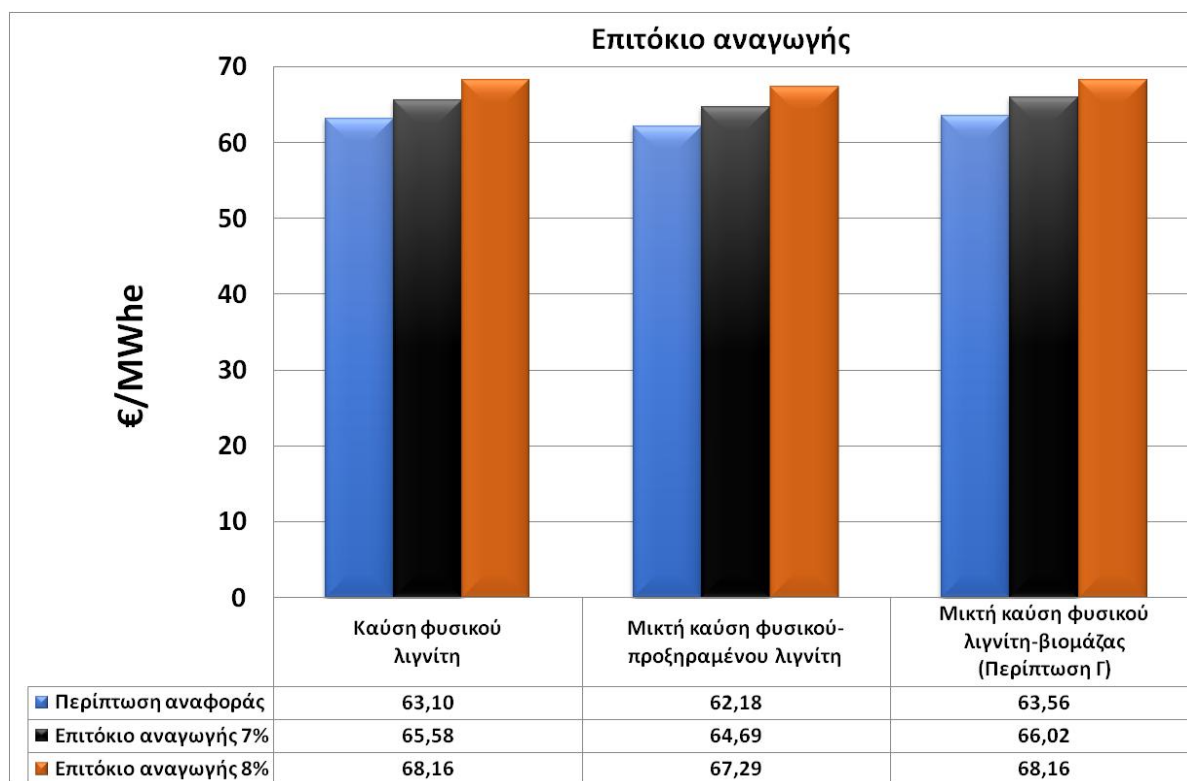
Διάγραμμα 8.4: Παράμετρος ευαισθησίας – άμεσο κόστος λιγνίτη

Το συμπέρασμα που εξάγεται από το παραπάνω διάγραμμα είναι ότι στην περίπτωση της καύσης φυσικού λιγνίτη, η μεταβολή του άμεσου κόστους κατά ±5% οδηγεί σε αύξηση-μείωση του συνολικού κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατά 0,90 €/MWh αντίστοιχα. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις μικτής καύσης, φυσικού λιγνίτη με προξηραμένο λιγνίτη και με βιομάζα, η μεταβολή του συνολικού κόστους ισούται με 0,86 €/MWh και 0,84 €/MWh. Τα αποτελέσματα αυτά είναι απολύτως αναμενόμενα, αφού η συνεισφορά του άμεσου κόστους λιγνίτη στην περίπτωση της καύσης φυσικού λιγνίτη είναι μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση της μικτής καύσης με προξηραμένο λιγνίτη και ακόμα μεγαλύτερη από την περίπτωση της μικτής καύσης με βιομάζα.

Συνεπώς, εξάγεται το συμπέρασμα ότι όσο μικρότερη είναι η εξάρτηση μιας τεχνολογίας καύσης από το λιγνίτη και γενικότερα από ένα συγκεκριμένο είδος καυσίμου (π.χ. όπως στην περίπτωση της μικτής καύσης με βιομάζα), τόσο μικρότερη είναι η συνεισφορά του άμεσου κόστους καυσίμου στη διαμόρφωση του συνολικού κόστους ενέργειας. Σύμφωνα με αυτό το συμπέρασμα, η εκλογή μιας εναλλακτικής καύσης για εφαρμογή σε έναν θερμοηλεκτρικό σταθμό δεν είναι μονόπλευρη, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη μόνο ορισμένες παράμετρος (π.χ. εκπομπές ρύπων). Αντιθέτως, πρέπει να εξετάζονται και άλλες παράμετροι, όπως η δυνατότητα αντικατάστασης του καυσίμου ή μικτής καύσης αυτού με άλλου είδους διαθέσιμα καύσιμα στην εγγύτερη περιοχή του σταθμού παραγωγής, για λόγους ασφαλείας σε περίπτωση διακοπής της εφοδιαστικής αλυσίδας και κυρίως για τη διατήρηση του χαμηλού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε περιπτώσεις ραγδαίας μεταβολής του κόστους καυσίμου.

8.3.2 Επιτόκιο αναγωγής (κόστος κεφαλαίου)

Στην παράγραφο αυτή, εκτός από τις περιπτώσεις αναφοράς με επιτόκιο αναγωγής 6% (πίνακας 4.5) εξετάζονται δύο επιπλέον σενάρια με τιμή επιτοκίου αναγωγής 7% και 8% αντίστοιχα, όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 8.5.



Διάγραμμα 8.5: Παράμετρος ευαισθησίας – επιτόκιο αναγωγής

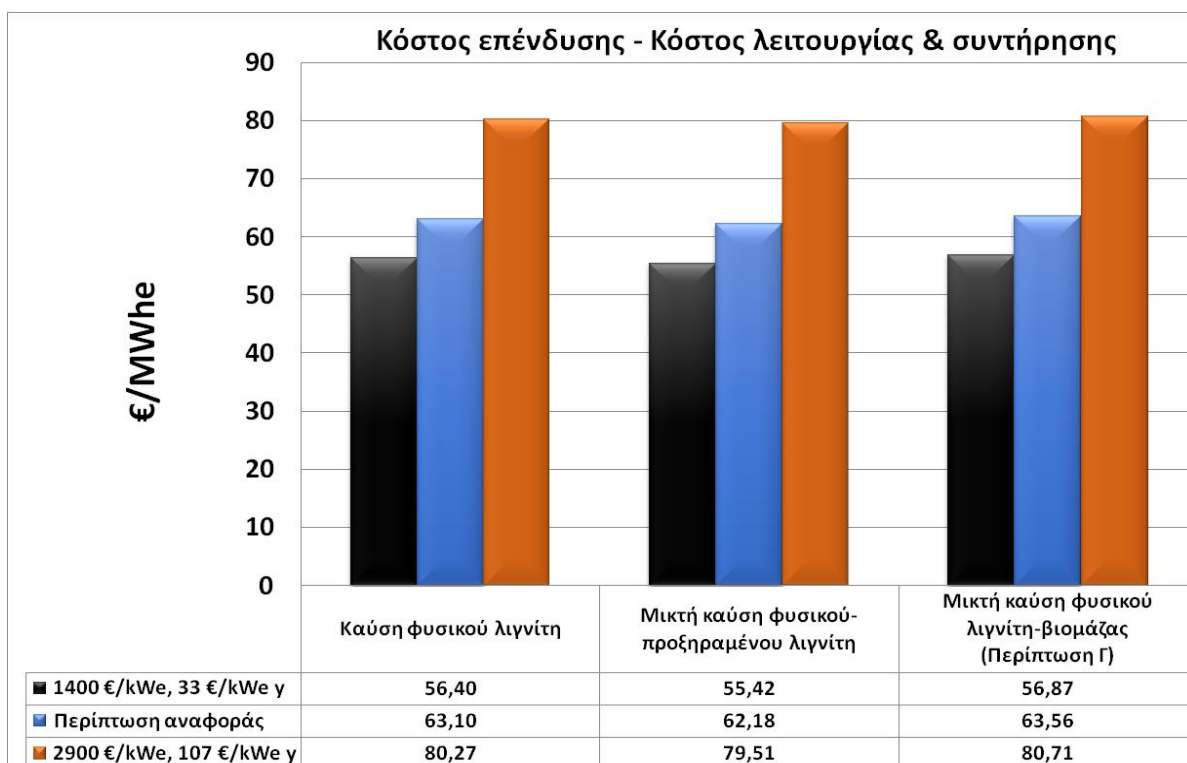
Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα, η αύξηση του συνολικού κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε όλες τις εναλλακτικές περιπτώσεις καύσης ισούται περίπου με 2,5 €/MWh για το σενάριο με επιτόκιο αναγωγής 7% και με 5 €/MWh για το σενάριο με επιτόκιο αναγωγής 8%. Το ισόποσο της μεταβολής δικαιολογείται από το ότι σε όλες τις περιπτώσεις καύσης, το επιτόκιο αναγωγής συμβάλλει με τον ίδιο τρόπο στην επικαιροποίηση του συνολικού κόστους επένδυσης μέσω του συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου (εξίσωση 7.1).

8.3.3 Κόστος επένδυσης (CAPEX) και λειτουργικό κόστος (OPEX) σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Στόχος είναι ο προσδιορισμός της μεταβολής του συνολικού κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτει από τη μεταβολή το κόστους επένδυσης (CAPEX) και του λειτουργικού κόστους του θερμοηλεκτρικού σταθμού. Η εξέταση των υπόψη παραμέτρων σε αυτό το σενάριο ευαισθησίας είναι πολύ σπουδαία, αν ληφθεί μάλιστα υπόψη η μεγάλη διακύμανση που παρουσιάζουν τα συγκεκριμένα είδη κόστους ανάλογα με τη χώρα και την περίοδο μελέτης.

Για το λόγο αυτό, πέρα από το σενάριο αναφοράς που ήδη εξετάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους με την εκτίμηση μιας μέσης τιμής για το κόστος επένδυσης περίπου 1900 €/kWe_{installed} και λειτουργικού κόστους περίπου 48,51 €/kWe_{installed}·γ από τη βιβλιογραφία (βλέπε παράγραφο 5.3.2), επιπλέον δύο σενάρια μελετώνται. Στο πρώτο υποτίθεται μια χαμηλή τιμή για το κόστος επένδυσης του λιγνιτικού σταθμού γύρω στα 1400 €/kWe_{installed}, με αντίστοιχο κόστος λειτουργίας περίπου 33 €/kWe_{installed}·γ, ενώ αντίθετα στο δεύτερο υποτίθεται μια υψηλή τιμή του κόστους επένδυσης της τάξης των 2900 €/kWe_{installed} με αντίστοιχο κόστος λειτουργίας γύρω στα

107 €/kWe_{installed}·γ. Από τη σύγκριση των τριών σεναρίων για τις υπόψη εναλλακτικές καύσης, προέκυψε το διάγραμμα 8.6.



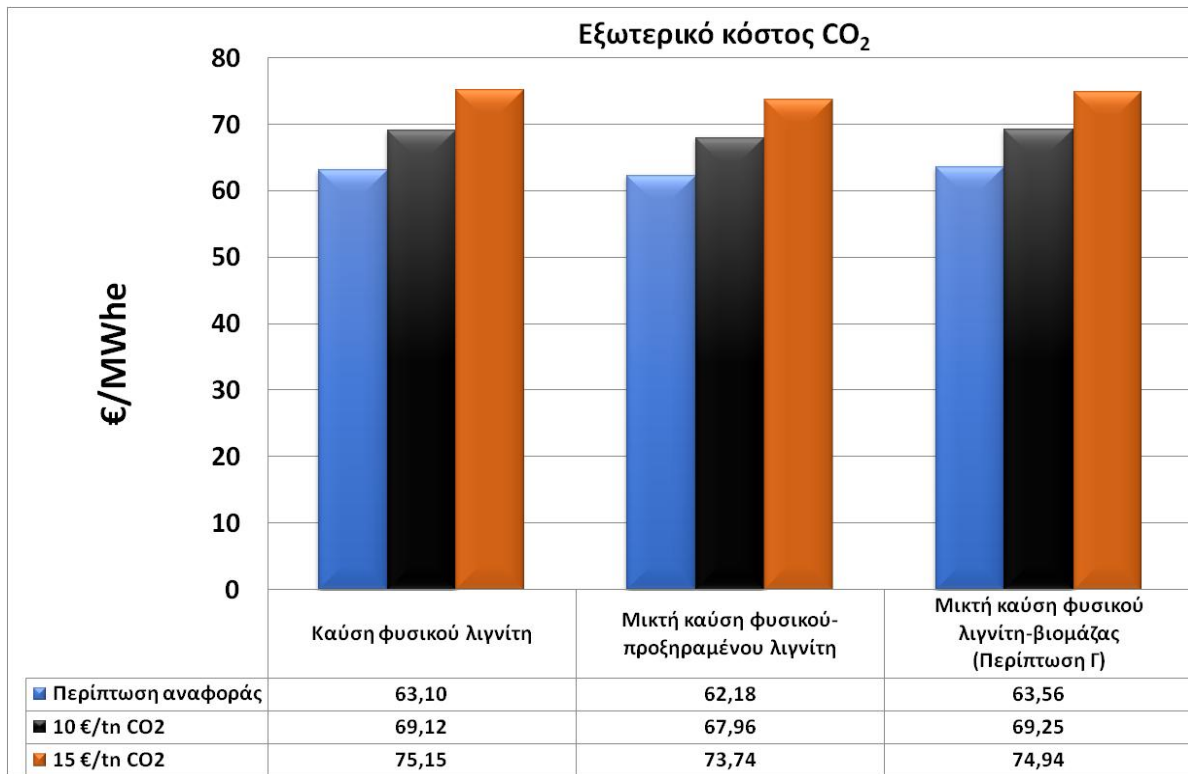
Διάγραμμα 8.6: Παράμετρος ευαισθησίας – κόστος επένδυσης και κόστος λειτουργίας και συντήρησης θερμοηλεκτρικού σταθμού

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η μείωση του συνολικού κόστους ηλεκτροπαραγωγής στο σενάριο θεώρησης χαμηλής τιμής κόστους επένδυσης και λειτουργίας στις περιπτώσεις καύσης φυσικού λιγνίτη και μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη με βιομάζα είναι περίπου 6,7 €/MWh. Η αντίστοιχη μείωση στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού με προξηραμένο λιγνίτη είναι λίγο μεγαλύτερη, σχεδόν 6,76 €/MWh και οφείλεται στη μικρή μείωση της καθαρής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Από την άλλη πλευρά, στο σενάριο θεώρησης υψηλής τιμής κόστους επένδυσης και λειτουργίας, το κόστος αυξάνεται κατά 17,17 €/MWh στις περιπτώσεις καύσης φυσικού λιγνίτη και μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη με βιομάζα, ενώ στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού με προξηραμένο λιγνίτη η αντίστοιχη αύξηση είναι περίπου 17,33 €/MWh.

8.3.4 Εξωτερικό κόστος διοξειδίου του άνθρακα (CO₂)

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 7.2, η οικονομική αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε υπό τη θεώρηση χαμηλού εξωτερικού κόστους για το βασικό αέριο του θερμοκηπίου (CO₂), γύρω στα 5 €/tn_{CO2} σύμφωνα με την τρέχουσα τιμή αγοράς (Euracoal, 2013). Ωστόσο, η τιμή αυτή υπόκειται σε σημαντική μεταβολή με την πάροδο του χρόνου αφού είναι εμπορεύσιμη. Σκοπός της ανάλυσης που πραγματοποιείται εδώ είναι η εύρεση της τιμής του συνολικού κόστους της παραγόμενης ενέργειας για δύο επιπλέον σενάρια (εκτός του σεναρίου αναφοράς) με τιμές εξωτερικού κόστους CO₂ 10 €/tn_{CO2} και 15 €/tn_{CO2} αντίστοιχα. Στο διάγραμμα 8.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των τριών σεναρίων, για τις εναλλακτικές περιπτώσεις καύσης που εξετάζονται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.



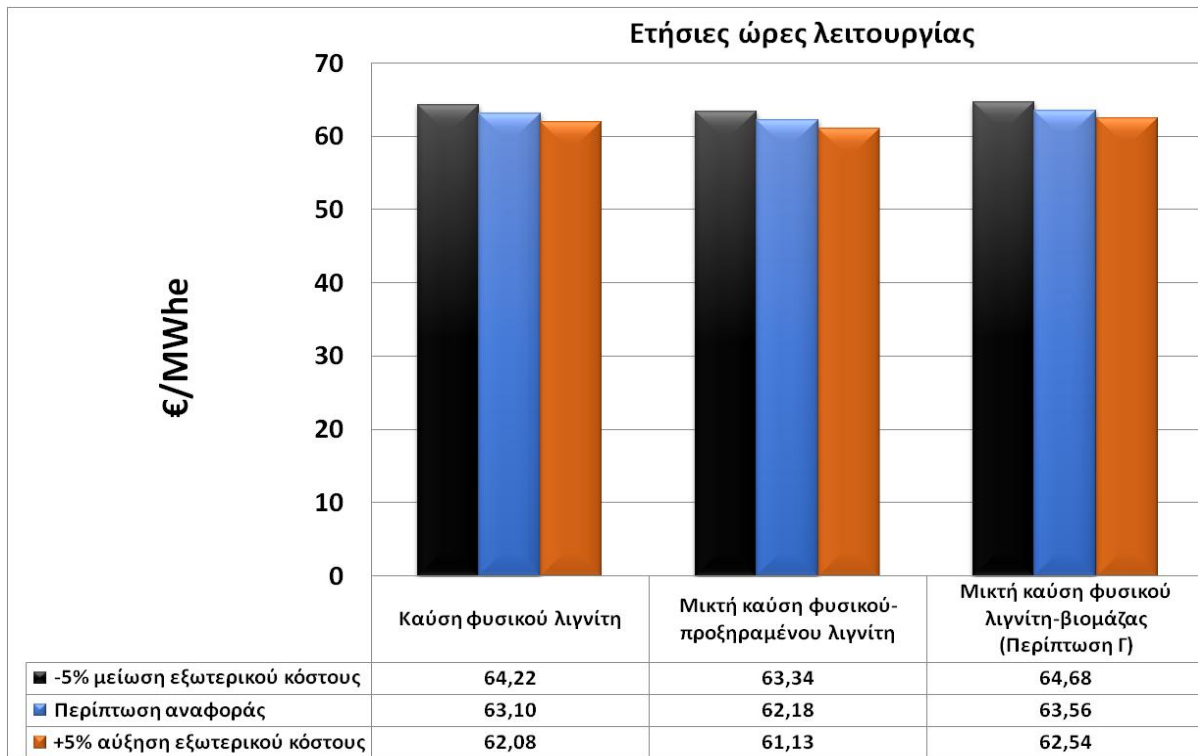
Διάγραμμα 8.7: Παράμετρος ευαισθησίας – εξωτερικό κόστος CO₂

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη αύξηση στο κόστος εμφανίζεται στην περίπτωση της καύσης φυσικού λιγνίτη παρά στις υπόλοιπες εναλλακτικές. Συγκεκριμένα, αν θεωρηθεί εξωτερικό κόστος CO₂ 10 €/tn_{CO₂}, η αύξηση του συνολικού παραγωγής ενέργειας στην περίπτωση καύσης φυσικού λιγνίτη ανέρχεται σε 6,02 €/MWh, στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού με προξηραμένο λιγνίτη σε 5,78 €/MWh και στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη με βιομάζα σε 5,69 €/MWh. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη ποσότητα CO₂ που εκλύεται στην περίπτωση καύσης χαμηλής ποιότητας καυσίμου (φυσικός λιγνίτης) σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις μικτής καύσης, όπου η ποιότητα του ισοδύναμου καυσίμου είναι βελτιωμένη εξαιτίας της ανάμειξης με καλύτερης ποιότητας καύσιμο (προξηραμένος λιγνίτης, βιομάζα).

Σε περίπτωση που το εξωτερικό κόστος CO₂ ανέλθει στα 20 €/tn_{CO₂}, η αύξηση του συνολικού παραγωγής ενέργειας στην περίπτωση καύσης φυσικού λιγνίτη προκύπτει 12,05 €/MWh, στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού με προξηραμένο λιγνίτη 11,56 €/MWh και στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη με βιομάζα 11,38 €/MWh.

8.3.5 Ετήσιες ώρες λειτουργίας σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Οι ετήσιες ώρες λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού σταθμού που λήφθηκαν υπόψη στην οικονομική αξιολόγηση του κεφαλαίου 7 θεωρήθηκαν ίσες με 7800 h/γ. Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει τη μέση εκτίμηση για τη λειτουργία μιας νέας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως στην περίπτωση της Πτολεμαΐδας V που μελετάται, όπου οι απαιτήσεις συντήρησης και συνεπώς η διάρκεια παραμονής εκτός του δικτύου είναι ελάχιστες, ιδιαίτερα κατά τα πρώτα έτη λειτουργίας. Ωστόσο, για τον προσδιορισμό της μεταβολής του συνολικού κόστους στην περίπτωση εμφάνισης απρόβλεπτων καταστάσεων (π.χ. βλάβη ή απότομη αύξηση του φορτίου για τεταμένες χρονικές περιόδους) εξετάζονται δύο επιπλέον σενάρια που αφορούν τη μεταβολή κατά ±5% των ετήσιων ωρών λειτουργίας του σταθμού. Στο διάγραμμα 8.8 συγκρίνεται η μεταβολή του συνολικού κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για τις τρεις εναλλακτικές περιπτώσεις καύσης και για τα υπόψη σενάρια που εξετάζονται.



Διάγραμμα 8.8: Παράμετρος ευαισθησίας – ετήσιες ώρες λειτουργίας θερμοηλεκτρικού σταθμού

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα για όλες τις περιπτώσεις καύσης, η μείωση των ετήσιων ωρών λειτουργίας οδηγεί σε αύξηση του συνολικού κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και το αντίστροφο. Το γεγονός αυτό είναι απολύτως λογικό αφού για δεδομένη καθαρή παραγόμενη ισχύ, η ετήσια καθαρή παραγόμενη ενέργεια είναι μικρότερη στην περίπτωση λιγότερων ωρών λειτουργίας και συνεπώς το ανηγμένο ειδικό κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε €/MWh μεγαλύτερο.

Ειδικότερα, στην περίπτωση που οι ετήσιες ώρες μειθούν κατά 5%, το συνολικό κόστος της παραγόμενης ενέργειας αυξάνεται κατά 1,12 €/MWh στις περιπτώσεις καύσης φυσικού λιγνίτη και μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη με βιομάζα και κατά 1,16 €/MWh στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού με προξηραμένο λιγνίτη. Η μικρή διαφορά οφείλεται στην μικρότερη καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ στην τελευταία περίπτωση. Αντίστοιχα, η μείωση του συνολικού κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι περίπου ίση με 1,02 €/MWh στις περιπτώσεις καύσης φυσικού λιγνίτη και μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη με βιομάζα και 1,05 €/MWh στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού με προξηραμένο λιγνίτη.

Κεφάλαιο 9°

Συμπεράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

9.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αξιολογήθηκε ολόκληρος ο κύκλος ζωής τριών εναλλακτικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση λιγνίτη από περιβαλλοντική και οικονομική σκοπιά: α) καύση φυσικού λιγνίτη, β) μικτή καύση φυσικού και προξηραμένου λιγνίτη από 30% θερμική υποκατάσταση και γ) μικτή καύση φυσικού λιγνίτη και βιομάζας αχύρου σιτηρών από 6% θερμική υποκατάσταση. Σκοπός ήταν να εξετασθεί η συνεισφορά των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος, καθώς και να προσδιοριστεί το συνολικό κόστος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το ιδιωτικό κόστος, όσο και το εξωτερικό κόστος των ρύπων που υφίστανται σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής.

Από το πρώτο σκέλος της εργασίας που αφορά τον προσδιορισμό του περιβαλλοντικού αποτυπώματος βάσει των αρχών της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ), εξάγεται αρχικά το συμπέρασμα ότι για όλα τα συστήματα παραγωγής με βάση το λιγνίτη που εξετάζονται, η μεγαλύτερη επίπτωση στο περιβάλλον προκαλείται εξαιτίας της λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού σταθμού, ενώ σοβαρή είναι επίσης και η επίπτωση κατά τη φάση εξόρυξης εντός των ορίων του λιγνιτωρυχείου η οποία φθάνει το 48% αυτής του θερμοηλεκτρικού σταθμού. Ωστόσο, εξετάζοντας αποκλειστικά την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου παρατηρείται ότι η συνεισφορά του λιγνιτωρυχείου είναι ιδιαίτερα χαμηλή, αντιπροσωπεύοντας μόλις το 7% της συνολικής επίπτωσης.

Στην περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού και προξηραμένου λιγνίτη από 30% θερμική υποκατάσταση, παρατηρείται ότι το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του θερμοηλεκτρικού σταθμού μειώνεται κατά 4% σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς, ενώ του λιγνιτωρυχείου κατά 5,5%. Το γεγονός αποδίδεται στη μείωση της εξορυσσόμενης ποσότητας λιγνίτη στο λιγνιτωρυχείο και στη βελτίωση του ισοδύναμου καυσίμου που καίγεται στον θερμοηλεκτρικό σταθμό με αποτέλεσμα την αύξηση του καθαρού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης.

Επιπλέον, στην περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη και βιομάζας (straw) από 6% θερμική υποκατάσταση, η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του λιγνιτωρυχείου και του θερμοηλεκτρικού σταθμού είναι ακόμα μεγαλύτερη και από την περίπτωση μικτής καύσης με προξηραμένο λιγνίτη, ενώ ανάλογα με την εναλλακτική εφοδιαστικής αλυσίδας που λαμβάνεται κάθε φορά υπόψη, το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα είναι δυνατόν να μειωθεί έως και 3,3% σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς, αλλά προκύπτει σαφώς μεγαλύτερο από την περίπτωση μικτής καύσης με προξηραμένο λιγνίτη.

Ωστόσο, μελετώντας αποκλειστικά τη συνολική επίπτωση των εξεταζόμενων περιπτώσεων καύσης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, προκύπτει ότι στην περίπτωση της μικτής καύσης λιγνίτη και βιομάζας οι εκπομπές CO_{2eq} είναι πάντα μικρότερες από αυτές των άλλων δύο περιπτώσεων ανεξαρτήτως της εφοδιαστικής αλυσίδας για τη βιομάζα που λαμβάνεται υπόψη. Παράλληλα, συγκρίνοντας τις παραπάνω περιπτώσεις καύσης με άλλου είδους συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επαληθεύεται το συμπέρασμα ότι ο λιγνίτης θέτει τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική ζημιά, κυρίως εξαιτίας των σημαντικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη φάση της λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού σταθμού.

Από την ανάλυση ευαισθησίας περιβαλλοντικών παραμέτρων προκύπτει ότι η μεταβολή κατά $\pm 5\%$ στον καθαρό συνολικό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της μονάδας και στον συντελεστή ασφαλείας στα όρια του λιγνιτωρυχείου επιφέρει μεταβολή στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των εξεταζόμενων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά $\mp 5\%$ και $\pm 0,3\%$ αντίστοιχα σε

σύγκριση με τις περιπτώσεις αναφοράς. Τέλος, η μεγάλη διακύμανση που παρουσιάζει η στοιχειακή σύσταση του φυσικού λιγνίτη ανάλογα με τη χώρα μελέτης (π.χ. Ελλάδα-Γερμανία) αποτυπώνεται με επίσης σημαντική μεταβολή στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των εξεταζόμενων συστημάτων έως και 21% σε σύγκριση με τις περιπτώσεις αναφοράς.

Στο οικονομικό σκέλος της εργασίας δόθηκε έμφαση στον προσδιορισμό του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις τρεις εναλλακτικές περιπτώσεις καύσης που εξετάζονται, εκτιμώντας όχι μόνο το ιδιωτικό κόστος, αλλά υπολογίζοντας παράλληλα και το εξωτερικό κόστος των εκπομπών που εκλύονται σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας το άμεσο κόστος του λιγνίτη ίσο με 8,77 €/t_{ηg}, το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περίπτωση της καύσης φυσικού λιγνίτη προέκυψε ίσο με 63,10 €/MWh. Η συνεισφορά του άμεσου κόστους του λιγνίτη στο συνολικό κόστος είναι ίση με 28% γεγονός που αποδίδεται τόσο στην υψηλή τιμή προμήθειας του καυσίμου (περίπου 1,72 €/GJ), όσο και στον συντελεστή ασφαλείας που έχει ληφθεί υπόψη για την εξορυσσόμενη μάζα στο λιγνιτωρυχείο. Παράλληλα, η μεγάλη συνεισφορά του εξωτερικού κόστους στο συνολικό, κατά 31%, καταδεικνύει τη σπουδαιότητα συνυπολογισμού του εξωτερικού κόστους σε παρόμοιου είδους αναλύσεις.

Στην περίπτωση της μικτής καύσης φυσικού και προξηραμένου λιγνίτη, το συνολικό κόστος παραγωγής ενέργειας μειώνεται στα 62,18 €/MWh, γεγονός που οφείλεται στην κάλυψη του ασήμαντου επιπλέον κόστους εξαιτίας της ενσωμάτωσης του περιστροφικού ξηραντήρα από τη μείωση του κόστους επένδυσης του λιγνιτωρυχείου κατά 0,08 €/MWh, του άμεσου κόστους λιγνίτη κατά 0,72 €/MWh και του εξωτερικού κόστους κατά 0,84 €/MWh. Σημειώνεται ότι το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτει από τις παραπάνω περιπτώσεις καύσης, προκύπτει μεγαλύτερο όταν το εξωτερικό κόστος υπολογιστεί με βάση τους συντελεστές κοστολόγησης των ρύπων που δίνονται στη βιβλιογραφία σε σύγκριση με του αντίστοιχους που δίνονται από τη βάση δεδομένων [CASES, 2008](#).

Επιπλέον, στην περίπτωση μικτής καύσης φυσικού λιγνίτη και βιομάζας, το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει πάντα μεγαλύτερο από ότι στις προηγούμενες περιπτώσεις, εξαιτίας του υψηλού άμεσου κόστους της βιομάζας (2,88 – 5,23 €/GJ) και του επιπλέον εξωτερικού κόστους εξαιτίας των εκπομπών από την εφοδιαστική αλυσίδα της βιομάζας (1,74 – 2,99 €/MWh), τα οποία προστίθεται με τα αντίστοιχα κόστη του λιγνίτη. Έτσι, το συνολικό κόστος παραγωγής ενέργειας κυμαίνεται από 63,56 €/MWh (Περίπτωση εφοδιαστικής αλυσίδας Γ) έως και 65,69 €/MWh (Περίπτωση εφοδιαστικής αλυσίδας Β). Συγκρίνοντας τις παραπάνω περιπτώσεις καύσης με άλλου είδους συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι ο λιγνίτης είναι όντως μία ακριβή εναλλακτική για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα ορυκτών καυσίμων.

Τέλος, από την ανάλυση ευαισθησίας οικονομικών παραμέτρων, προκύπτει ότι η μεταβολή κατά ±5% στις ετήσιες ώρες λειτουργίας οδηγεί σε μεγαλύτερη μεταβολή του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κατά ±1,10 €/MWh, από ότι η αντίστοιχη μεταβολή του άμεσου κόστους λιγνίτη. Η αύξηση του επιτοκίου αναγωγής στο 7% και 8% οδηγεί σε αύξηση του συνολικού κόστους κατά 2,5 €/MWh και 5 €/MWh αντίστοιχα, γεγονός που φανερώνει τη σημαντική επίδραση αυτής της παραμέτρου στη διαμόρφωση της τελικής τιμής του συνολικού κόστους. Από τη μεταβολή του κόστους επένδυσης και λειτουργίας της μονάδας ή του εξωτερικού κόστους CO₂ εξάγεται το συμπέρασμα ότι η μεγάλη διακύμανση που παρουσιάζουν τα συγκεκριμένα είδη κόστους ανάλογα με τη χώρα και την περίοδο μελέτης, αποτυπώνεται με επίσης σημαντική μεταβολή στο συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από 6 – 18 €/MWh σε σύγκριση με τις περιπτώσεις αναφοράς.

9.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Ως μελλοντική εργασία προτείνεται αρχικά η εφαρμογή της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σε διαφορετικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λιγνίτη, τα οποία

χρησιμοποιούν άλλες διατάξεις για την αξιοποίηση του καυσίμου. Τέτοιου είδους συστήματα μπορεί να είναι η καύση σε μονάδα συνδυασμένου κύκλου ή συμπαραγωγής και η προξήρανση με άλλου είδους εναλλακτική, όπως για παράδειγμα σε ρευστοποιημένη κλίνη με τη χρήση ατμού ή κάποιου ειδικού ελαίου.

Επιπλέον, δύνανται να εξετασθούν συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αξιοποίηση άλλου είδους ορυκτών καυσίμων ή ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, με σκοπό τον προσδιορισμό και τη σύγκριση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων και ακόμα την πρόκριση της λιγότερο ζημιογόνου τεχνολογίας.

Ως προς την οικονομική αξιολόγηση προτείνεται ο προσδιορισμός του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα συστήματα που περιγράφηκαν παραπάνω, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το ιδιωτικό και το εξωτερικό κόστος που προκύπτουν από όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής των υπόψη συστημάτων, στη βάση ενός ενιαίου τρόπου κοστολόγησης των ρύπων, ούτως ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ τους. Επίσης, η μελέτη της οικονομικής βιωσιμότητας των εξεταζόμενων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να συμβάλλει στη διαμόρφωση μιας πιο ολοκληρωμένης επενδυτικής εικόνας, ούτως ώστε να δοθεί η δυνατότητα σε επενδυτές να διαθέσουν τα κεφάλαιά τους στα βέλτιστα, από οικονομικής αλλά και περιβαλλοντικής πλευράς, συστήματα.

Τέλος, σχετικά με το εξωτερικό κόστος εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα προτείνεται η περαιτέρω ανάλυση βάσει του Εμπορίου Ρύπων-Εκπομπών Αερίων του θερμοκηπίου.

Βιβλιογραφία

- (EBRD), European Bank for Reconstruction and Development. (2014). Methodology for the assessment of coal fired generation projects. 3-4. *Journal Article*
- (EEA), European Environment Agency. (2014). Costs of air pollution from European industrial facilities 2008–2012. *Journal Article*
- Agraniotis, Michalis, KARELLAS, Sotirios , VIOLIDAKIS, Ioannis , DOUKELIS, Aggelos, GRAMMELIS, Panagiotis, & KAKARAS, Emmanuel (2012). Investigation of Pre-Drying Lignite in an Existing Greek Power Plant. *THERMAL SCIENCE*, 16, 283-296. *Journal Article*
- Alberici, Sacha , Boeve, Sil , Breevoort, Pieter van , Deng, Yvonne , Förster, Sonja , Gardiner, Ann , . . . Wouters, Karlien (2014). Subsidies and costs of EU energy. *Journal Article*
- Bauer, Christian (2008). Life Cycle Assessment of Fossil and Biomass Power Generation Chains. *Journal Article*
- Black&Veatch. (2011). Cost and Performance Data for Power Generation Technologies. *Report*
- Booras, G. (2004). Pulverized Coal And IGCC Plant Cost And Performance Estimates. *Journal Article*
- Booz&Co. (2012). Understanding lignite generation costs in Europe. *Electronic Article*
- Bozicevic Vrhovcak, M., Tomsic, Z., & Debrecin, N. (2005). External costs of electricity production: case study Croatia. *Energy Policy*(33), 1385-1395. *Journal Article*
- Braun, Martin. (2004). Environmental External Costs from Power Generation by Renewable Energies. *Journal Article*
- Burandt, S., & Barth, M. (2010). Learning settings to face climate change. *Cleaner Production*(18), 659-665. *Journal Article*
- CASES. (2008). Database of Full Costs for EU, With External and Private Costs, Deliverable D.06.1. CASES (Cost Assessment for Sustainable Energy Systems) Project. Available at: (Publication no. http://www.feem-project.net/cases/downloads_deliverables.php). *Online Database*
- CAT. (2005). Front Shovel 365C-FS. *Electronic Article*
- CAT. (2006). ESTIMATING OWNING & OPERATING COSTS. *Electronic Article*
- CAT. (2007). Road Reclaimer RM500. *Electronic Article*
- CAT. (2009). Hydraulic Excavator 345D L. *Electronic Article*
- CAT. (2010a). Cold Planer PM200. *Electronic Article*
- CAT. (2010b). Track Loader 973D. *Electronic Article*
- CAT. (2011a). Electric Rope Shovel—7295. *Electronic Article*
- CAT. (2011b). Electric Rope Shovel—7495 HF with Rope Crowd. *Electronic Article*
- CAT. (2011c). Track Type Tractor D9R. *Electronic Article*
- CAT. (2011d). Wheel Tractor-Scraper 657G. *Electronic Article*
- CAT. (2013). 8200 Dragline. *Electronic Article*
- CAT. (2014a). Articulated Truck 730C. *Electronic Article*
- CAT. (2014b). COMPACTORS CB14B, CB22B, CB24B, CB24B XT, CB32B, CB34B, CB34B XW, CC24B, CC34B. *Electronic Article*
- CAT. (2014c). Off-Highway Truck 770G. *Electronic Article*
- CAT. (2014d). Skid Steer Loaders 236D/242D/246D/262D. *Electronic Article*
- CAT. (2014e). Wheel Dozer 854 K. *Electronic Article*
- CATERPILLAR. (website). www.cat.com*Electronic Article*
- Cleary, J. (2009). Life cycle assessments of municipal solid waste management systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature. *Environment International*, 35, 1256-1266. *Journal Article*
- Clift, R. (1998). *Life cycle assessment — how to slim down your ecoprofile*. Environmental Protection Bulletin. Institution of Chemical Engineers. *Unpublished Work*
- COMMISSION, EUROPEAN. (2003). External Costs Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport. *Online Database*
- Community, Energy. (2013). Study on the Need for Modernization of Large Combustion Plants in the Energy Community (pp. 41). *Report*
- Copco, Atlas. (2009a). Blasthole Drills DM25-SP/DM30. *Electronic Article*

- Copco, Atlas. (2009b). Blasthole Drills PV-271/PV-275. *Electronic Article*
- Copco, Atlas. (2009c). Surface Drill Rig. *Electronic Article*
- Copco, Atlas. (2009d). Surface Drill Rig CM 470. *Electronic Article*
- Dios, M., Souto, J. A., & Casares, J. J. (2013). Experimental development of CO₂, SO₂ and NO_x emission factors for mixed lignite and subbituminous coal-fired power plant. *Energy*, 53, 40-51. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.043> *Journal Article*
- DiPietro, Phil (2010). Life Cycle Analysis of Coal and Natural Gas-fired Power Plants. *Journal Article*
- Dones, R., Heck, T., & Hirschberg, S. (2004). Greenhouse Gas Emissions from Energy Systems, Comparison and Overview. *Journal Article*
- EarthShift. (website). from <http://www.earthshift.com/Web> *Page*
- Ekvall, T, Rydberg, T, Hedenberg, O, Jacobson, B, Pajula, T, & Wessman, H. (1997). Guidelines on life cycle impact assessment of pulp and paper. *Journal Article*
- EPA. (2005). Fuel Consumption Modeling of Conventional and Advanced Technology Vehicles in the Physical Emission Rate Estimator (PERE). *Journal Article*
- EPA. (2010). Construction Fleet Inventory Guide. *Journal Article*
- ETSAP. (2010). Coal-Fired Power. *Electronic Article*
- Euracoal. (2013). Coal Industry Across Europe. In European Association for Coal and Lignite (Ed.), (5th 2013 ed.). *Report*
- FAM. (2000). Bucket Wheel Excavators. *Electronic Article*
- Gallagher, David D. , & Company, The Goodyear Tire & Rubber. (2000). Low Rolling Resistance for Conveyor Belts. *Journal Article*
- Georgakellos, Dimitrios A. (2010). Impact of a possible environmental externalities internalisation on energy prices: The case of the greenhouse gases from the Greek electricity sector. *Energy Economics*, 32(1), 202-209. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2009.05.010> *Journal Article*
- Georgakellos, Dimitrios A. (2012). Climate change external cost appraisal of electricity generation systems from a life cycle perspective: the case of Greece. *Journal of Cleaner Production*, 32(0), 124-140. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.030> *Journal Article*
- Assignment In Earth Science*, (2008). *Hearing*
- Huppes, G. (1996). *LCA yesterday, today and tomorrow*. Leiden University. *Thesis*
- Hustrulid, W, & Kuchta, M. (1998). Open Pit Mine Planning and Design. *Electronic Article*
- ISO:14040. (2006) Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneva. *Serial*
- ISO:14041. (2006) Environmental management - Life cycle assessment - Goal and scope definition and Inventory analysis. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneva. *Serial*
- ISO:14042. (2006) Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle Impact assessment. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneva. *Serial*
- ISO:14043. (2006) Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle Interpretation. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneva. *Serial*
- Jenkins, Bryan M., & Ebeling, James M. (1985). Thermochemical properties of biomass fuels. *Electronic Article*
- Kakaras, E., Ahladas, P., & Syrmopoulos, S. (2002). Computer simulation studies for the integration of an external dryer into a Greek lignite-fired power plant. *Fuel*, 81(5), 583-593. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00146-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00146-6) *Journal Article*
- Karampinis, Emmanouil, Grammelis, Panagiotis, Aristeidis, Nikolopoulos, Nikos, Nikolopoulos, Emmanuel, Kakaras, Aaron, Fuller, . . . Ioannis, Tsolakidis. (2011). Greek Lignite / Cardoon Co-Firing In Pulverized Fuel Power Plants. *Cleaner Production*(12), 403-414. *Journal Article*
- Kavouridis, Konstantinos. (2008). Lignite industry in Greece within a world context: Mining, energy supply and environment. *Energy Policy*, 36(4), 1257-1272. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.11.017> *Journal Article*
- Kavouridis, Konstantinos , Roumpos, Christos , & Galetakis, Mihail (2007). The effect of power plant efficiency, lignite quality and inorganic matter on CO₂ emissions and competitiveness of Greek lignite. *Journal Article*
- Komatsu. (1997). MOTOR GRADER GD825A-2. *Electronic Article*

- Komatsu. (2000). Wheel Loader and Integrated Toolcarrier. *Electronic Article*
- Komatsu. (2006). CRAWLER DOZER D375A-5 With Tier 3 Engine. *Electronic Article*
- Komatsu. (2008). HYDRAULIC EXCAVATOR, PC2000-8 BACKHOE, PC2000-8 LOADING SHOVEL. *Electronic Article*
- KPI-JCI. (2007). FT2640 Fast Trax Track Mount Jaw Crusher OPERATION & MAINTENANCE MANUAL. *Journal Article*
- Leonardos, Marios. (2014). PPC lignite cost Benchmarking *Report*
- Milcic, D, & Miladinovic, S. (2002). Open Pit Mine Planning and Design *Calculation of the Structural Elements of the Bucket Wheel Excavator Working Wheel Transmission* (Vol. 1, pp. 305-322). *Book Section*
- Montanari, R. (2004). Environmental efficiency analysis for ENEL thermo-power plants. *Cleaner Production*(12), 403-414. *Journal Article*
- Mujumdar, Arun S. . (2006). Handbook of Industrial Drying. *Electronic Article*
- NEEDS. (2009). External costs from emerging electricity generation technologies. *Online Database*
- NETL. (2013). Cost And Performance Baseline For Fossil Energy Plants. *Report*
- Nguyen, Hao, Morisson, Anthony, & Nelson, Peter. (2008). Analysis of pollution control costs in coal based electricity generation. *Cooprative Research Centre for Coal in Sustainable Development (CCSD)*(Technology Assessment Report 68), 43-45. *Journal Article*
- NTUA. (1997). External costs of electricity generation in Greece. *Journal Article*
- Papagiannis, A., Roussos, D., Menegaki, M., & Damigos, D. (2014). Externalities from lignite mining-related dust emissions. *Energy Policy*, 74(0), 414-424. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.026> *Journal Article*
- Pearce, D.W., & Turner , R.K. (1990). Economics of Natural Resources and the Environment, Harvester Wheatsheaf, Hemel Hempstead, Herst. *Journal Article*
- Rentizelas, Athanasios, & Georgakellos, Dimitrios. (2014). Incorporating life cycle external cost in optimization of the electricity generation mix. *Energy Policy*, 65(0), 134-149. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.023> *Journal Article*
- SANDVIK. (2010). Bulk materials handling in mining. *Electronic Article*
- SKW. (2012). BUCKET WHEEL EXCAVATOR KWK-910. *Journal Article*
- Staffell, Iain. (2011). The Energy and Fuel Data Sheet. *Journal Article*
- Stanek, Wojciech, & Bialecki, Ryszard. (2014). Can natural gas warm the climate more than coal? *Fuel*, 136(0), 341-348. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.07.075> *Journal Article*
- Streimikiene, Dalia, & Alisauskaite-Seskiene, Ilona. (2014). External costs of electricity generation options in Lithuania. *Renewable Energy*, 64(0), 215-224. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.012> *Journal Article*
- Streimikiene, Dalia, Roos, Inge, & Rekis, Janis. (2009). External cost of electricity generation in Baltic States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(4), 863-870. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2008.02.004> *Journal Article*
- Takeshita, M, Oskarsson, Karin, Berglund, Anders, Deling, Rolf, Snellman, Ulrika, Stenback, Olle, & Fritz, Jack. (1995). *A Planner's Guide for Selecting Clean-Coal Technologies for Power Plants*. *Book*
- Tenova. (2011). Compact Bucket Wheel Excavator SRs(H)1050.23/2.0. *Electronic Article*
- Theodosiou, Giorgos, Koroneos, Christopher, & Stylos, Nikolaos. (2014). Environmental impacts of the Greek electricity generation sector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 5(0), 19-27. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2013.10.005> *Journal Article*
- Turconi, Roberto, Boldrin, Alessio , & Astrup, Thomas (2013). Life cycle assessment (LCA) o felectricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Journal Article*
- U.S._Energy_Information_Administration. (2013). Updated Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants. *Journal Article*
- U.S._Energy_Information_Administration. ((EIA)). Independent Statistics and Analysis. from <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=307&t=11> *Web Page*
- University, Iowa State. (2012). Evaluation of In-Use Fuel Economy and On-Board Emissions for Hybrid and Regular CyRide Transit Buses. *Journal Article*

- Vail Farr, John. (2011). *Book: Systems Life Cycle Costing: Economic Analysis, Estimation, and Management. Book*
- Weisser, Daniel (2004). A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Journal Article*
- Zografakis, N., Sifaki, E., Pagalou, M., Nikitaki, G., Psarakis, V., & Tsagarakis, K.P. (2010). Assessment of public acceptance and willingness to pay for renewable energy sources in Crete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(14), 1088-1095. *Journal Article*
- Αγρυνιώτης, Μ. (2010). ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΓΑΙΑΝΘΡΑΚΑ ΑΠΟ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΣΕ ΛΕΒΗΤΕΣ ΚΟΝΙΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂. *Journal Article*
- Ανδρονικίδης, Δημοσθένης. (2009). *Ανάκτηση λιγνίτη από απορρίμματα εκσκαφών Μεγαλόπολης. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΧΑΝΙΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2009. Thesis*
- Βλάχου, Αντιγόνη. (2012). ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: Βελτιστοποίηση χωροθέτησης κόμβου ταινιόδρομων σε επιφανειακά λιγνιτωρυχεία συνεχούς λειτουργίας. *Journal Article*
- ΔΕΗ. (2006). www.dei.gr/Electronic Article
- ΔΕΗ. (2013a). Annual Report. www.dei.gr/Electronic Article
- ΔΕΗ. (2013b). Clarifications on the item of the Extraordinary General Meeting of shareholders on 29.3.2013 "Approval for materialization of the investment for the construction of the Plant Ptolemais V and the pertinent contract". www.dei.gr/Electronic Article
- ΕΝΕΡ-ΒΙΟ. (2012). Ενεργειακή Αξιοποίηση Στερεών και Υγρών Βιοκαυσίμων στον Ηλεκτροπαραγωγικό Τομέα. *Report*
- Ευθυμιάδης, Απ., Πορφύρης, Γ., & Γιωτόπουλος, Ν. (2009). *Χρήση πτωχού λιγνίτη σε υφιστάμενες μονάδες και εναλλακτικές τεχνικές βελτίωσης της ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης. Conference Paper*
- Ζαραφίδης, Δημήτριος, & Παυλουδάκης, Φραγκίσκος. (2008). Ο Λιγνίτης της Πτολεμαΐδας. *Journal Article*
- Θεοδοσίου, Γ. (2008). Οικολογικός Σχεδιασμός Μονάδων Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας. *Journal Article*
- Καβουρίδης, Κωνσταντίνος. (1992). *Υπολογισμός απόδοσης καδοφόρου εκσκαφέα (Σημειώσεις). Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά. Thesis*
- Καβουρίδης, Κωνσταντίνος, Χαλούλος, Κωνσταντίνος, Λεοντίδης, Μάρκος, & Ρούμπος, Χρήστος. (2005). *Η εκμετάλλευση του λιγνίτη στην Ελλάδα με οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια. Σημερινή κατάσταση-Προοπτικές. Thesis*
- Κακαράς, Εμμανουήλ, & Καρέλλας, Σωτήριος. (2013). *Αντιρρυπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών. Book*
- Κολοβός, Χρήστος. (2007). Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Ελλάδας - Διεύθυνση Ορυχείων. *Journal Article*
- Κορωναίος, Χρ. (2000). Ανάλυση Κύκλου Ζωής: Η ολοκληρωμένη Περιβαλλοντική Προσέγγιση στην Ολοκληρωμένη Ανάπτυξη. *Journal Article*
- Μαμάσης, Νίκος, & Στεφανάκος, Ιωάννης. (2011). Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία Ορυκτά καύσιμα και ενέργεια. *Journal Article*
- Παπαγεωργίου, Νικόλαος. (1991). *Ατμοπαραγωγοί Ι, Βασικές αρχές. Book*
- Παπαγιάννης, Αλέξανδρος, & Ρούσσο, Δημήτριος. (2012). *Αποτίμηση εξωτερικού κόστους από την εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων κατά την εξόρυξη λιγνίτη. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2012. Thesis*
- Παπαδόπουλος, Στυλιανός. (2009). *Παράμετροι απόδοσης εξοπλισμού συνεχούς λειτουργίας σε επιφανειακά λιγνιτωρυχεία. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΧΑΝΙΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2010. Thesis*
- Παπαδόπουλος, Στυλιανός. (2010). ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΛΙΓΝΙΤΩΡΥΧΕΙΑ. *Journal Article*
- Ρούμπος, Χρήστος. (2009). Τεχνική περιγραφή εκμετάλλευσης ορυχείων Πτολεμαΐδας, έκθεση ΔΕΗ Α.Ε. *Report*
- Σταμάτη, Δημήτριου Μ. (2007). ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΙΚΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΞΗΡΟΥ ΛΙΓΝΙΤΗ ΣΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΟΝΙΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ. *Journal Article*

Τερεζόπουλος, Νικόλαος. (2001). *Μέθοδοι υπαίθριων εκμεταλλεύσεων*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΑΘΗΝΑ, 2009. *Thesis*