



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Ανάλυση Κύκλου Ζωής Μονάδας Επεξεργασίας Υδατικών Αποβλήτων Ανθρακωρυχείου

Γιουρούκος Δημήτριος

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Αικατερίνη Χαραλάμπος

Αθήνα, Ιούλιος 2020

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Αξιολόγηση Ανάλυσης Κύκλου Ζωής Μονάδας Επεξεργασίας Υδατικών Αποβλήτων Ανθρακωρυχείου» εκπονήθηκε στην Μονάδα Περιβαλλοντική Επιστήμης και Τεχνολογίας του τομέα Ι της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια της παρούσας διπλωματικής εργασίας κα Αικατερίνη Χαραλάμπους για την ευκαιρία να εργαστώ πάνω στο συγκεκριμένο θέμα και για τις καίριες συμβουλές της κατά τη διεξαγωγή της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την υποψήφιο διδάκτορα Δέσποινα Μπακογιάννη, για την πολύτιμη καθοδήγησή της, το ενδιαφέρον και τις χρήσιμες συμβουλές και παρατηρήσεις της σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Κωνσταντίνα Κόλλια και τον κο Επαμεινώνδα Βουτσά για το χρόνο τους και τις παρατηρήσεις τους.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της απόρριψης αλατούχων αποβλήτων ανθρακωρυχείων σε υδάτινους αποδέκτες. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η περίπτωση ανθρακωρυχείου της Πολωνίας, περιγράφοντας τις αιτίες, τις επιπτώσεις και τους τρόπους αντιμετώπισης του συγκεκριμένου περιβαλλοντικού προβλήματος. Επίσης, διεξήχθη Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ) πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας υδατικών αποβλήτων ανθρακωρυχείου και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα της, παρέχοντας προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Αρχικά, γίνεται μια ανασκόπηση της χρήσης και εξόρυξης άνθρακα στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Η ΕΕ βρίσκεται στην τέταρτη θέση παγκοσμίως στη χρήση άνθρακα. Ετησίως εξορύσσονται στην ΕΕ περίπου 400 εκατομμύρια τόνοι άνθρακα και εισάγονται άλλα 200 εκατομμύρια. Το 2015 ο άνθρακας αποτελούσε το 24% του μίγματος παραγωγής ενέργειας. Το 2016 λειτουργούσαν 207 μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα. Το 2015 βρίσκονταν σε λειτουργία 128 ανθρακωρυχεία σε όλη την ΕΕ, με τα περισσότερα να βρίσκονται στην Πολωνία. Η Πολωνία συγκεκριμένα, είναι μία από τις πιο εξαρτημένες από τον άνθρακα χώρες στον κόσμο. Λόγω των υψηλών αποθεμάτων σε άνθρακα και των σχετικά χαμηλών δυνατοτήτων αντικατάστασής του με άλλες πηγές ενέργειας, οι τρέχουσες προβλέψεις δείχνουν ότι ο άνθρακας θα διατηρήσει τον κύριο ρόλο του στο πολωνικό ενεργειακό μείγμα για πολλά ακόμη χρόνια.

Ακολουθεί μια εκτενής περιγραφή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούνται από την εξόρυξη άνθρακα με έμφαση στην απόρριψη των υδατικών αποβλήτων της διαδικασίας. Η Πολωνία αντιμετωπίζει δύο μεγάλες προκλήσεις όσον αφορά τη διαχείριση των υδάτων και την προστασία των υδάτων: (1) η χώρα διαθέτει λιγότερους υδάτινους πόρους και (2) τα επιφανειακά ύδατα είναι ιδιαίτερα ρυπασμένα. Το μεγαλύτερο πρόβλημα των επιφανειακών υδάτινων σωμάτων της Πολωνίας είναι η υφαλμύριση που προκαλείται ανθρωπογενώς κυρίως από την απόρριψη υδατικών αποβλήτων εξόρυξης άνθρακα με υψηλή αλατότητα. Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο στους ποταμούς Wisła και Odra. Οι συνέπειες της αλατότητας μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: (1) υποβάθμιση του υδάτινου οικοσυστήματος, (2) αύξηση του κόστους επεξεργασίας για την παραγωγή του πόσιμου νερού και (3) αύξηση κόστους συντήρησης των υποδομών.

Στη συνέχεια περιγράφεται η νομοθεσία που θέτει όρια στη συγκέντρωση αλάτων των αποβλήτων που απορρίπτονται σε επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες. Το σύστημα της Πολωνίας για τη διαχείριση και την προστασία των υδάτων βασίζεται σε ένα συνδυασμό νομοθετικών και οικονομικών μέσων και έχει τρεις συνιστώσες: (1) πρότυπα ποιότητας και σύστημα αδειοδότησης, (2) μέτρα επιβολής των νομοθετικών διατάξεων και (3) περιβαλλοντικά τέλη και επιχορηγήσεις. Τα τέλη εισπράττονται από τις περιβαλλοντικές αρχές και αποτελούν σημαντική πηγή εισοδήματος για τα περιβαλλοντικά κονδύλια. Τα εν λόγω κονδύλια χρηματοδοτούν, σχεδόν το 50% των ετήσιων επενδύσεων για την προστασία του περιβάλλοντος. Στις εταιρίες εξόρυξης

των οποίων τα απόβλητα δεν πληρούν τις προδιαγραφές συγκέντρωσης αλάτων για ασφαλή απόρριψη επιβάλλονται πρόστιμα.

Για να επιτευχθούν οι συγκεκριμένες προδιαγραφές για την απόρριψη των υδατικών αποβλήτων είναι απαραίτητη η δημιουργία μονάδων επεξεργασίας. Στην παρούσα εργασία δίνεται κυρίως βάση στην αφαλάτωση και στις διάφορες μεθόδους εφαρμογής της. Στην συνέχεια μελετήθηκε η περίπτωση της μονάδας επεξεργασίας Dębieńsko, η οποία επεξεργάζεται 14.280 m³ αποβλήτων ημερησίως, παράγοντας 9.690 m³ πόσιμου νερού.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η περιγραφή της πιλοτικής μονάδας για την επεξεργασία των υδατικών αποβλήτων από το ανθρακωρυχείο Bolesław Śmiały. Προς το παρόν τα απόβλητα από αυτό το ορυχείο απορρίπτονται στο γειτονικό ποταμό χωρίς επεξεργασία. Για τη λειτουργία της μονάδας εκτελέστηκε μελέτη AKZ, της οποίας τα αποτελέσματα αξιολογούνται στην παρούσα εργασία. Η ανάλυση κύκλου ζωής είναι ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την εκτίμηση και την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας και αποτελείται από τα εξής στάδια: (1) προσδιορισμός σκοπού και αντικειμένου, (2) απογραφή δεδομένων, (3) εκτίμηση επιπτώσεων και (4) ερμηνεία αποτελεσμάτων. Η AKZ οδήγησε σε θετικά αποτελέσματα όσον αφορά την περιβαλλοντική επίδοση της μονάδας. Όμως, υστερεί στη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της συγκεκριμένης μεθόδου επεξεργασίας με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διάθεσης των αποβλήτων στο γειτονικό ποταμό. Στη συνέχεια περιγράφονται οι λόγοι για τους οποίους η AKZ παρουσιάζει αδυναμία στην εκτίμηση των επιπτώσεων από την υφαλμύριση των υδάτων καθώς και οι προσεγγίσεις οι οποίες ακολουθούνται για την αντιμετώπιση του εν λόγω προβλήματος.

Τέλος, γίνεται μια ανασκόπηση όλων των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη βιβλιογραφία και παρέχονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα σχετικά με την AKZ και τις επιπτώσεις της υφαλμύρισης, καθώς και προτάσεις για τη βελτίωση του σχεδιασμού της πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας στο Bolesław Śmiały.

Abstract

In the present work the environmental impacts of coalmine wastewater discharges of high salinity to surface water recipients were studied. In particular, the case of a Polish coalmine was studied, describing the causes, impacts and ways of addressing this particular environmental problem. Also, a Life Cycle Analysis (LCA) of a pilot coalmine wastewater treatment plant was conducted and its results were evaluated, providing suggestions for further research.

Initially, there is a review of the consumption and mining of coal in the European Union. The EU is the world's fourth largest coal consuming region. About 400 million tons of coal are mined annually in the EU and another 200 million are imported. In 2015 coal accounted for 24% of the energy mix. In 2016, there were 207 coal-fired power plants operating. In 2015, 128 coal mines were in operation across the EU, with most of them being in Poland. Poland in particular is one of the most carbon-dependent countries in the world. Due to the high coal reserves and the relatively low potential of replacing coal with other energy sources, current forecasts indicate that coal will retain its main role in the Polish energy mix for many years to come.

A detailed description of the environmental impacts of coal extraction with a focus on saline wastewater follows. Poland faces two major challenges in terms of water management and water protection: (1) the country has scarce water resources and (2) surface water is highly polluted. The major problem of Poland's surface water bodies is the anthropogenic salinization caused by the discharge of saline coalmine wastewater. The phenomenon is particularly pronounced in the Wisła and Odra rivers. The effects of salinization can be classified into three categories: (1) damage to the aquatic ecosystem, (2) increased costs for drinking water treatment, and (3) increased maintenance costs for infrastructure.

The following is the description of legislation that sets limits on the concentration of salts of the wastewater discharged to surface water recipients. Poland's water management and protection system is based on a combination of legislative and economic instruments and has three components: (1) standards and permits, (2) enforcement and (3) fees and financing. The fees are collected by the environmental authorities and are an important source of income for environmental funds. These funds finance almost 50% of the annual investment for environmental protection. Mining companies whose wastewater discharges do not meet the standards for safe disposal must pay fines.

In order to meet the specific requirements for wastewater discharge it is necessary to establish treatment plants. The present work mainly focuses on the process of desalination and its various methods of application. The case of the Dębnie treatment plant, which processes 14,280 m³ of waste daily, producing 9,690 m³ of potable water was then studied.

Following the reference to the measures taken to tackle pollution, is the case study of the pilot plant for the treatment of saline wastewater from the Bolesław Śmiały coal mine. A LCA study was conducted on the function of this plant, the results of which are evaluated in the present work. Life cycle assessment is a methodological framework for assessing and evaluating the environmental impacts of a product or process and consists of the following steps: (1) goal and scope definition, (2) inventory analysis, (3) impact assessment and (4) interpretation of results. While the LCA provides positive results for the environmental performance of the plant, it is lagging behind in comparing this particular treatment method with the wastewater discharge in the nearby river. Then, the reasons why the LCA is unable to assess the impacts of salinization and the approaches used to address this problem are described.

Finally, all findings from the bibliography are reviewed and suggestions are made for further research on LCA weaknesses and the effects of salinization, as well as suggestions for improving the design of the pilot treatment plant at Bolesław Śmiały coal mine.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	2
Περίληψη	3
Abstract.....	5
Κατάλογος πινάκων	9
Κατάλογος σχημάτων	9
1 Βιομηχανία εξόρυξης άνθρακα	12
1.1 Παραγωγή ενέργειας με καύση άνθρακα στην Ευρωπαϊκή Ένωση.....	12
1.2 Η εξόρυξη του άνθρακα στην Ευρωπαϊκή Ένωση	17
1.3 Ανασκόπηση της εξόρυξης άνθρακα στην Πολωνία	24
2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανθρακωρυχείων στην Πολωνία	29
2.1 Αποξήρανση των πετρωμάτων	31
2.2 Αποθήκευση των εξορυκτικών αποβλήτων.....	32
2.3 Απορρίψεις νερού εξόρυξης.....	33
2.4 Διάθεση πετρωμάτων	39
2.5 Καθίζηση εδάφους.....	40
2.6 Ατμοσφαιρική ρύπανση.....	40
3 Νομοθετικό πλαίσιο διάθεσης υγρών αποβλήτων.....	41
4 Μέτρα για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών επιπτώσεων από ανθρακωρυχεία με έμφαση στην παραγωγή υγρών αλατούχων αποβλήτων	46
4.1 Αποκατάσταση ορυχείων (μετά το κλείσιμό τους).....	46
4.2 Αφαλάτωση	48
4.3 Μέτρα μικρής κλίμακας και χαμηλού κόστους	53
5 Μελέτη περίπτωσης πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ανθρακωρυχείου στην Πολωνία	55
6 Ανάλυση κύκλου ζωής για τη μελέτη περίπτωσης	56
6.1 Εισαγωγή.....	56
6.1.1 Στάδια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.....	59
6.2 Σκοπός και αντικείμενο της ΑΚΖ	66
6.2.1 Σκοπός.....	66
6.2.2 Λειτουργική μονάδα.....	66
6.2.3 Όρια συστήματος.....	67
6.2.4 Παραδοχές	68

6.3	Απογραφή δεδομένων.....	68
6.4	Εκτίμηση Επιπτώσεων.....	71
6.4.1	Διαμόρφωση 1 ^η	72
6.4.2	Διαμόρφωση 2 ^η	77
6.4.3	Διαμόρφωση 3 ^η	80
6.4.4	Διαμόρφωση 4 ^η	84
6.4.5	Σύγκριση των Διαμορφώσεων.....	89
6.5	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	93
7	Συμπεράσματα	102
8	Βιβλιογραφία.....	107

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Ποσοστά των παραγόμενων ειδών λιθάνθρακα σε δύο περιφέρειες της Πολωνίας και μία της Τσεχίας (Dias, et al., 2018)	24
Πίνακας 2: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ανθρακωρυχείων της Πολωνίας που μελετήθηκαν	31
Πίνακας 3: Στατιστικά δεδομένα για το φορτίο ιόντων χλωρίου (mg/έτος) (Gzyl, et al., 2017)	35
Πίνακας 4: Στατιστικά δεδομένα για το φορτίο θειϊκών ιόντων (mg/έτος) (Gzyl, et al., 2017)	36
Πίνακας 5: Στατιστικά δεδομένα για το σύνολο ιόντων χλωρίου και θειϊκών ιόντων (mg/έτος) (Gzyl, et al., 2017)	36
Πίνακας 6: Ποιοτική σύσταση των υδατικών αποβλήτων των ανθρακωρυχείων που μελετήθηκαν	38
Πίνακας 7: Τέλη για τη ρύπανση των υδάτων με άλατα, ανά έτος και σε δολάρια ανά τόνο ιόντων χλωρίου και θειϊκών ιόντων (Andersson, 2004)	42
Πίνακας 8: Μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις ρυπαντών στα επιφανειακά υδάτινα σώματα (Andersson, 2004)	44
Πίνακας 9: Τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά μεθόδων αφαλάτωσης (Xevgenos, et al., 2018)	50
Πίνακας 10: Παραγόμενα προϊόντα από τη μονάδα Dębieńsko με τα αντίστοιχα ύψη παραγωγής	51
Πίνακας 11: Σύσταση των υδατικών αποβλήτων του ανθρακωρυχείου Bolesław Śmiały (Bakogianni, 2019)	66
Πίνακας 12: Απογραφή δεδομένων κύκλου ζωής, για λειτουργική μονάδα 1 m ³ υδατικού αποβλήτου (Bakogianni, 2019)	70
Πίνακας 13: Σύσταση υδατικών αποβλήτων από την ανάκτηση μαγνησίου για κάθε διαμόρφωση (Bakogianni, 2019)	71
Πίνακας 14: Σύσταση υδατικών αποβλήτων από την κρυστάλλωση για κάθε διαμόρφωση (Bakogianni, 2019)	71

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Τοποθεσίες των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα στις περιφέρειες της ΕΕ με δεδομένα για τη ισχύ, τον τύπο άνθρακα και τις εκπομπές CO ₂ (Dias, et al., 2018)	13
Σχήμα 2: Αριθμός μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα ανά κράτος μέλος (Dias, et al., 2018)	14
Σχήμα 3: Ισχύς των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα ανά κράτος μέλος (Dias, et al., 2018)	14

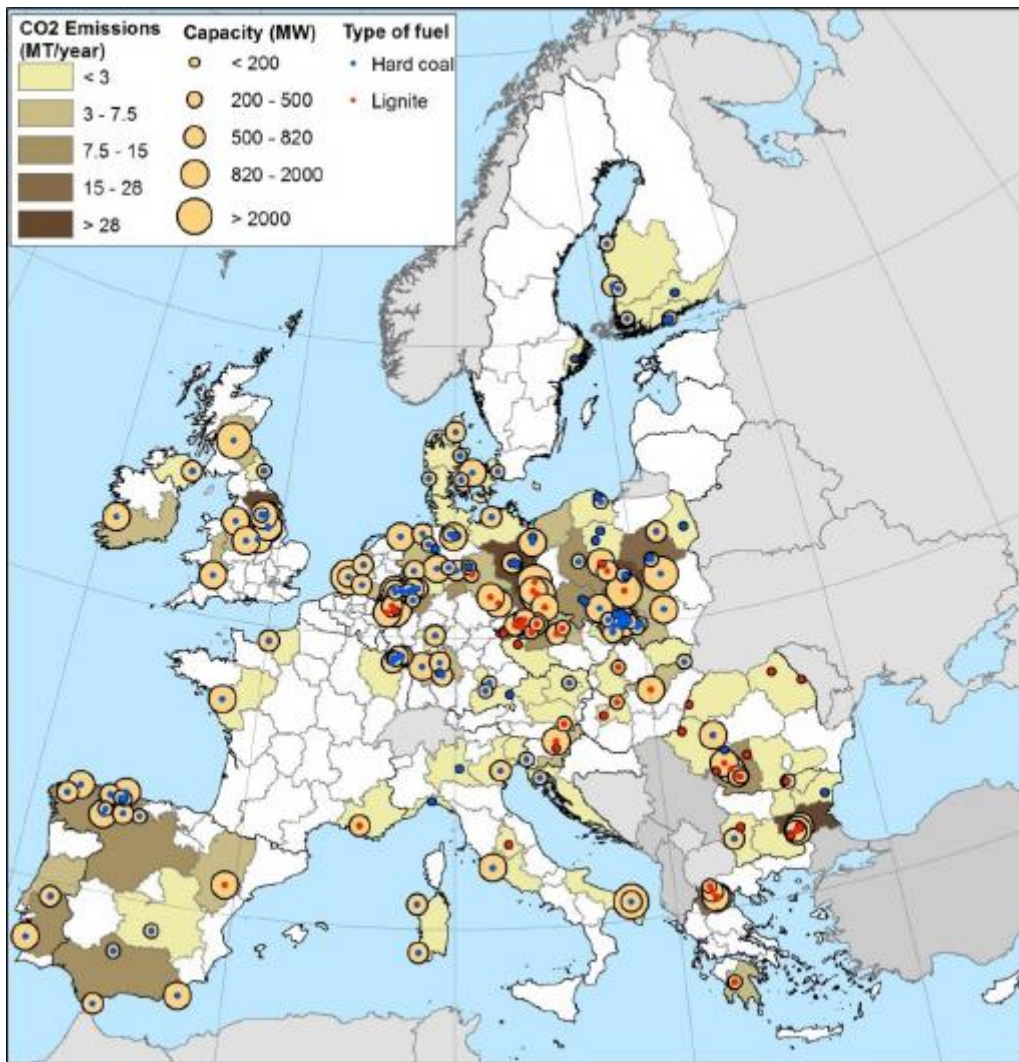
Σχήμα 4: Εύρη αποδοτικότητας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα στην ΕΕ (Dias, et al., 2018)	15
Σχήμα 5: Ισχύς των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα σε επίπεδο NUTS-2 (Dias, et al., 2018)	16
Σχήμα 6: Μέση αποδοτικότητα των ενεργών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα το 2016, σε επίπεδο περιφερειών (Dias, et al., 2018)	17
Σχήμα 7: Αριθμός ανθρακωρυχείων ανά κράτος μέλος (Dias, et al., 2018)	18
Σχήμα 8: Ποσοστό παραγωγής άνθρακα ανά κράτος μέλος (Dias, et al., 2018)	18
Σχήμα 9: Παραγωγή λιγνίτη και λιθάνθρακα και εισαγωγές στην Ευρώπη (EURACOAL, 2017)	19
Σχήμα 10: Τοποθεσίες, παραγωγή και είδος παραγόμενου άνθρακα στα εν λειτουργία ανθρακωρυχεία της ΕΕ (Dias, et al., 2018)	20
Σχήμα 11: Πληροφορίες για το είδος και το βάθος εξόρυξης των εν λειτουργία ορυχείων στην ΕΕ (Dias, et al., 2018)	21
Σχήμα 12: Ετήσια παραγωγή ανθρακωρυχείων σε επίπεδο περιφερειών (Dias, et al., 2018)	22
Σχήμα 13: Μέση παραγωγικότητα των ανθρακωρυχείων ανά περιφέρεια (Dias, et al., 2018)	23
Σχήμα 14: Χάρτης με τις τοποθεσίες των κοιτασμάτων λιγνίτη και λιθάνθρακα στην Πολωνία (EURACOAL, τελευταία προσπέλαση 2019)	26
Σχήμα 15: Θέση της λεκάνης απορροής άνθρακα της Άνω Σιλεσίας με τα ορυχεία και την κατάστασή τους (Gzyl, et al., 2017)	28
Σχήμα 16: Αναπαράσταση των ροών και του ισοζυγίου μάζας της μονάδας Dębieńsko	51
Σχήμα 17: Διάγραμμα ροής της μονάδας. (Α) Προεπεξεργασία, (Β) Συγκεντρωτήρας Άλμης, (Γ) Κρυσταλλωτήρας	52
Σχήμα 18: Χάρτης με την τοποθεσία του Dębieńsko στη λεκάνη απορροής άνθρακα της Άνω Σιλεσίας, μαζί με την ημερήσια παραγωγή προϊόντων	53
Σχήμα 19: Όρια του συστήματος (Bakogianni, 2019).....	67
Σχήμα 20: Διάγραμμα ροής της 1 ^{ης} διαμόρφωσης (Bakogianni, 2019)	69
Σχήμα 21: Διάγραμμα ροής 2 ^{ης} διαμόρφωσης (Bakogianni, 2019).....	69
Σχήμα 22: Διάγραμμα ροής 3 ^{ης} διαμόρφωσης (Bakogianni, 2019).....	70
Σχήμα 23: Διάγραμμα ροής 4 ^{ης} διαμόρφωσης (Bakogianni, 2019).....	70
Σχήμα 24: Χαρακτηρισμός	73
Σχήμα 25: Κανονικοποίηση.....	74
Σχήμα 26: Στάθμιση	74
Σχήμα 27: Χαρακτηρισμός	75
Σχήμα 28: Κανονικοποίηση.....	76
Σχήμα 29: Στάθμιση	76
Σχήμα 30: Χαρακτηρισμός	77
Σχήμα 31: Κανονικοποίηση.....	78
Σχήμα 32: Στάθμιση	78
Σχήμα 33: Χαρακτηρισμός	79
Σχήμα 34: Κανονικοποίηση.....	79

Σχήμα 35: Στάθμιση	80
Σχήμα 36: Χαρακτηρισμός	81
Σχήμα 37: Κανονικοποίηση.....	82
Σχήμα 38: Στάθμιση	82
Σχήμα 39: Χαρακτηρισμός	83
Σχήμα 40: Κανονικοποίηση.....	83
Σχήμα 41: Στάθμιση	84
Σχήμα 42: Χαρακτηρισμός	85
Σχήμα 43: Κανονικοποίηση.....	86
Σχήμα 44: Στάθμιση	86
Σχήμα 45: Χαρακτηρισμός	87
Σχήμα 46: Κανονικοποίηση.....	88
Σχήμα 47: Στάθμιση	88
Σχήμα 48: Χαρακτηρισμός	89
Σχήμα 49: Κανονικοποίηση.....	90
Σχήμα 50: Στάθμιση	90
Σχήμα 51: Χαρακτηρισμός	91
Σχήμα 52: Κανονικοποίηση.....	91
Σχήμα 53: Στάθμιση	92
Σχήμα 54: Σύγκριση της κατανάλωσης ηλεκτρισμού κάθε διαμόρφωσης.....	93

1 Βιομηχανία εξόρυξης άνθρακα

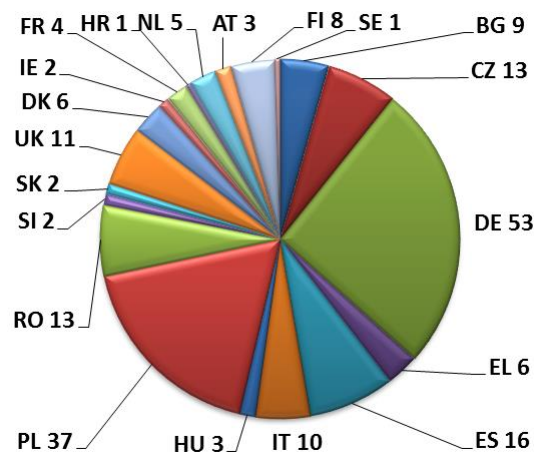
1.1 Παραγωγή ενέργειας με καύση άνθρακα στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Η Ευρωπαϊκή Ένωση βρίσκεται στην τέταρτη θέση παγκοσμίως στην χρήση άνθρακα, μετά την Κίνα, την Ινδία και τη Βόρεια Αμερική (Xevgenos, et al., 2019). Ιστορικά ο άνθρακας ήταν μία από τις κύριες πηγές ενέργειας για την Ευρώπη και κατ' επέκταση κινητήριος δύναμη της ευρωπαϊκής οικονομίας. Το 1990 ο άνθρακας αναλογούσε στο 41% της ακαθάριστης κατανάλωσης και το 39% της παραγωγής ενέργειας. Το 2015 αφορούσε το 16% της ακαθάριστης εσωτερικής κατανάλωσης ενέργειας στην ΕΕ και το 24% του μίγματος παραγωγής ενέργειας, ενώ έξι χώρες (Βουλγαρία, Τσεχία, Γερμανία, Ελλάδα, Πολωνία και Σλοβακία) εξαρτώνται ακόμα από τον άνθρακα για να καλύψουν τουλάχιστον το 20% των αναγκών τους (Dias, et al., 2018). Το 2016 λειτουργούσαν 207 μονάδες παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούσαν άνθρακα σε 21 κράτη μέλη και 108 περιφέρειες, με συνολική ισχύ πάνω από 150 GW, καθώς και 128 ανθρακωρυχεία σε 12 κράτη μέλη και περιφέρειες με συνολική ετήσια παραγωγή περίπου 500 εκατομμυρίων τόνων (Dias, et al., 2018). Η πλειοψηφία των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση του άνθρακα λειτουργούν εδώ και πάνω από 30 χρόνια και η εκτιμώμενη απόδοσή τους αγγίζει το 35% κατά μέσο όρο.

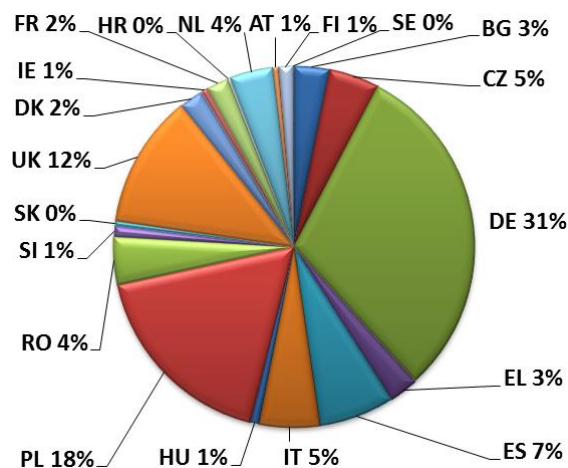


Σχήμα 1: Τοποθεσίες των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα στις περιφέρειες της ΕΕ με δεδομένα για τη ισχύ, τον τύπο άνθρακα και τις εκπομπές CO₂ (Dias, et al., 2018)

Σύμφωνα με το χάρτη του Σχήματος 1 οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής εμφανίζουν μεγαλύτερη συγκέντρωση στην περιοχή μεταξύ Ολλανδίας, Γερμανίας, Πολωνίας, Τσεχίας και Σλοβακίας. Όσον αφορά τον τύπο του άνθρακα, ο λιγνίτης χρησιμοποιείται κυρίως στη Γερμανία, την ανατολική Ευρώπη και τη Βαλκανική χερσόνησο, ενώ ο λιθάνθρακας είναι το κύριο καύσιμο στη Γερμανία, την Πολωνία, το Ηνωμένο Βασίλειο, την Ισπανία, και πολλές παράκτιες περιοχές. Οι περισσότερες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής βρίσκονται στη Γερμανία, την Πολωνία και την Ισπανία – 53, 37 και 16 μονάδες αντίστοιχα. Όσον αφορά την ισχύ, την υψηλότερη την κατέχει η Γερμανία με 45 GW και ακολουθούν η Πολωνία με 26 GW και το Ηνωμένο Βασίλειο με 18 GW, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 2 και 3 (Dias, et al., 2018).



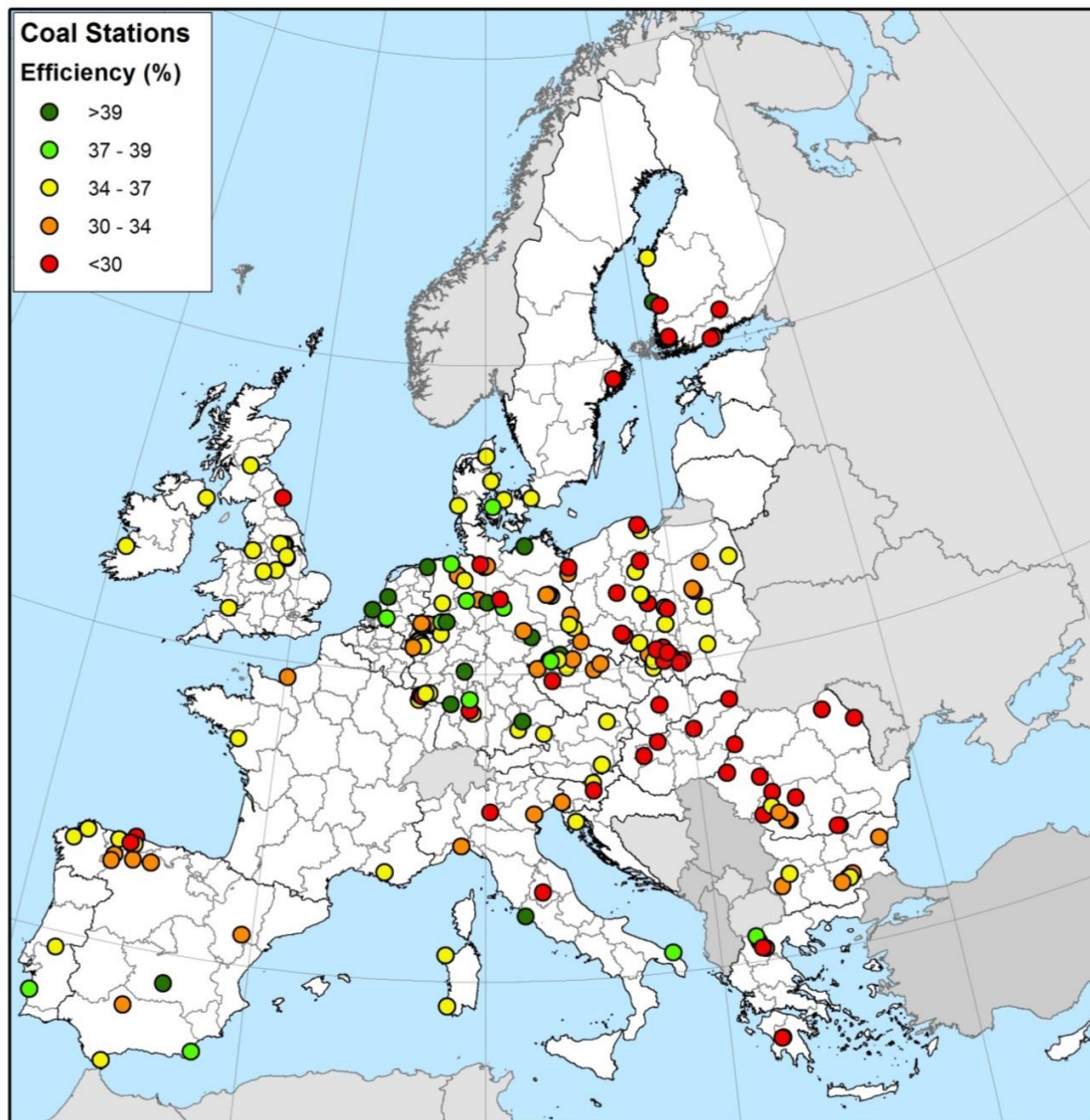
Σχήμα 2: Αριθμός μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα ανά κράτος μέλος (Dias, et al., 2018)



Σχήμα 3: Ισχύς των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα ανά κράτος μέλος (Dias, et al., 2018)

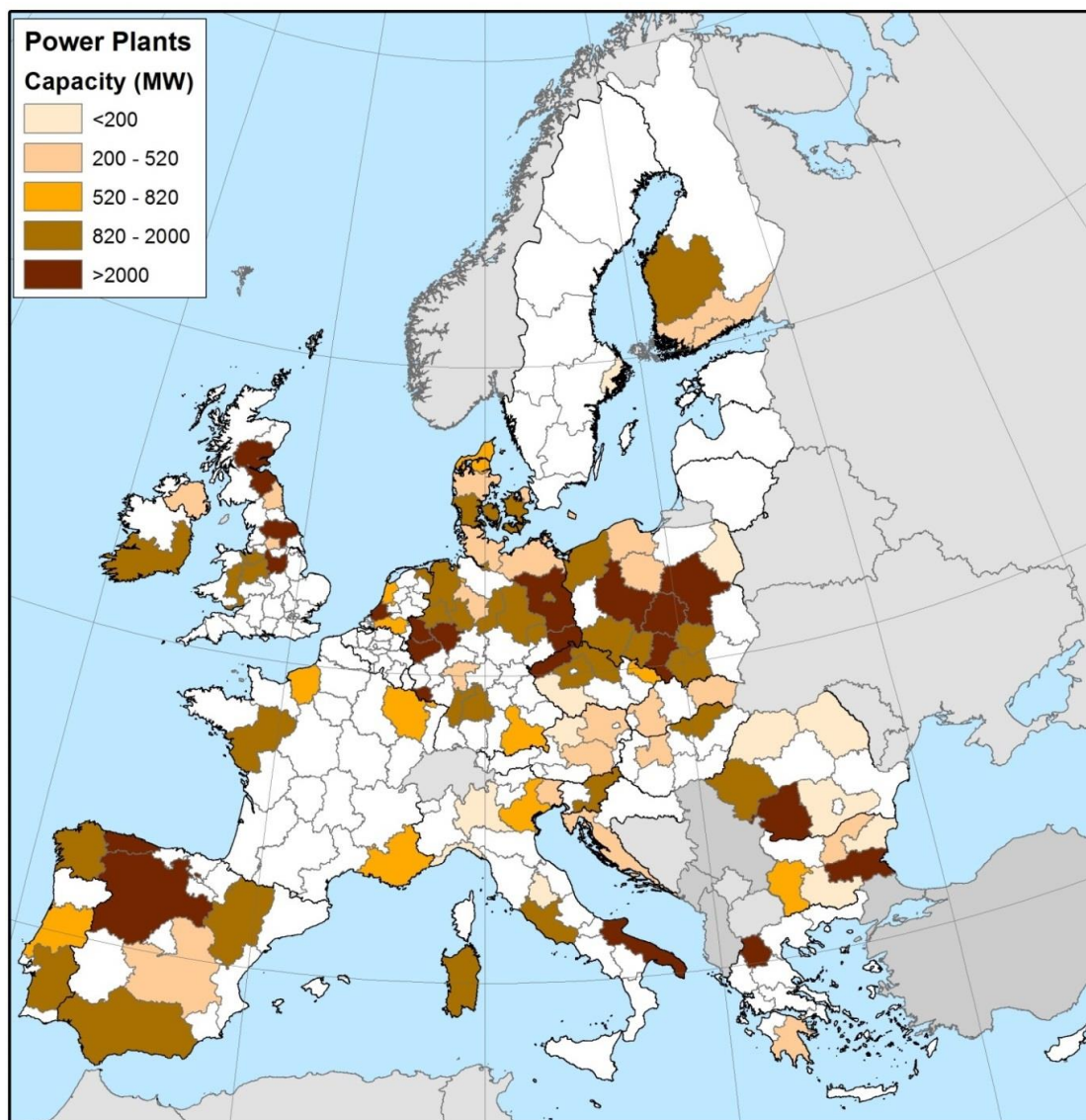
Η τοποθεσία μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής εξαρτάται από την τοποθεσία εξόρυξης ή το σημείο εισόδου, αν πρόκειται για εισαγόμενο άνθρακα. Γενικά οι μονάδες οι οποίες χρησιμοποιούν ως καύσιμο λιγνίτη βρίσκονται κοντά στα λιγνιτωρυχεία, ενώ οι μονάδες οι οποίες χρησιμοποιούν λιθάνθρακα βρίσκονται είτε κοντά σε ανθρακωρυχεία είτε κοντά σε υδάτινες οδούς από τις οποίες εισάγεται ο λιθάνθρακας.

Η αποδοτικότητα μίας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής συνδέεται με την ανταγωνιστικότητα, για αυτό και αποτελεί ένα από τους πιο σημαντικούς τεχνικούς παράγοντες για την αξιολόγηση της επίδοσής της. Όσο χαμηλότερη η αποδοτικότητα τόσο υψηλότερη είναι η κατανάλωση καυσίμου και κατ' επέκταση τόσο υψηλότερα τα λειτουργικά κόστη και οι εκπομπές CO₂. Παράγοντες σαν τους παραπάνω επηρεάζουν τα έσοδα και τα κέρδη των εν λόγω εγκαταστάσεων. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η αποδοτικότητα των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα σύμφωνα με το Joint Research Centre Power Plant Database (JRC-PPDB).



Σχήμα 4: Εύρη αποδοτικότητας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα στην ΕΕ (Dias, et al., 2018)

Η μέση αποδοτικότητα των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα στην Ευρώπη είναι 35%. Οι περισσότερες μονάδες χαμηλής αποδοτικότητας (κάτω του 30%) είναι συγκεντρωμένες στις χώρες της ανατολικής Ευρώπης. Οι πιο αποδοτικές μονάδες (με αποδοτικότητα άνω του 39%) βρίσκονται κυρίως στην Ολλανδία και τη Γερμανία (Dias, et al., 2018).

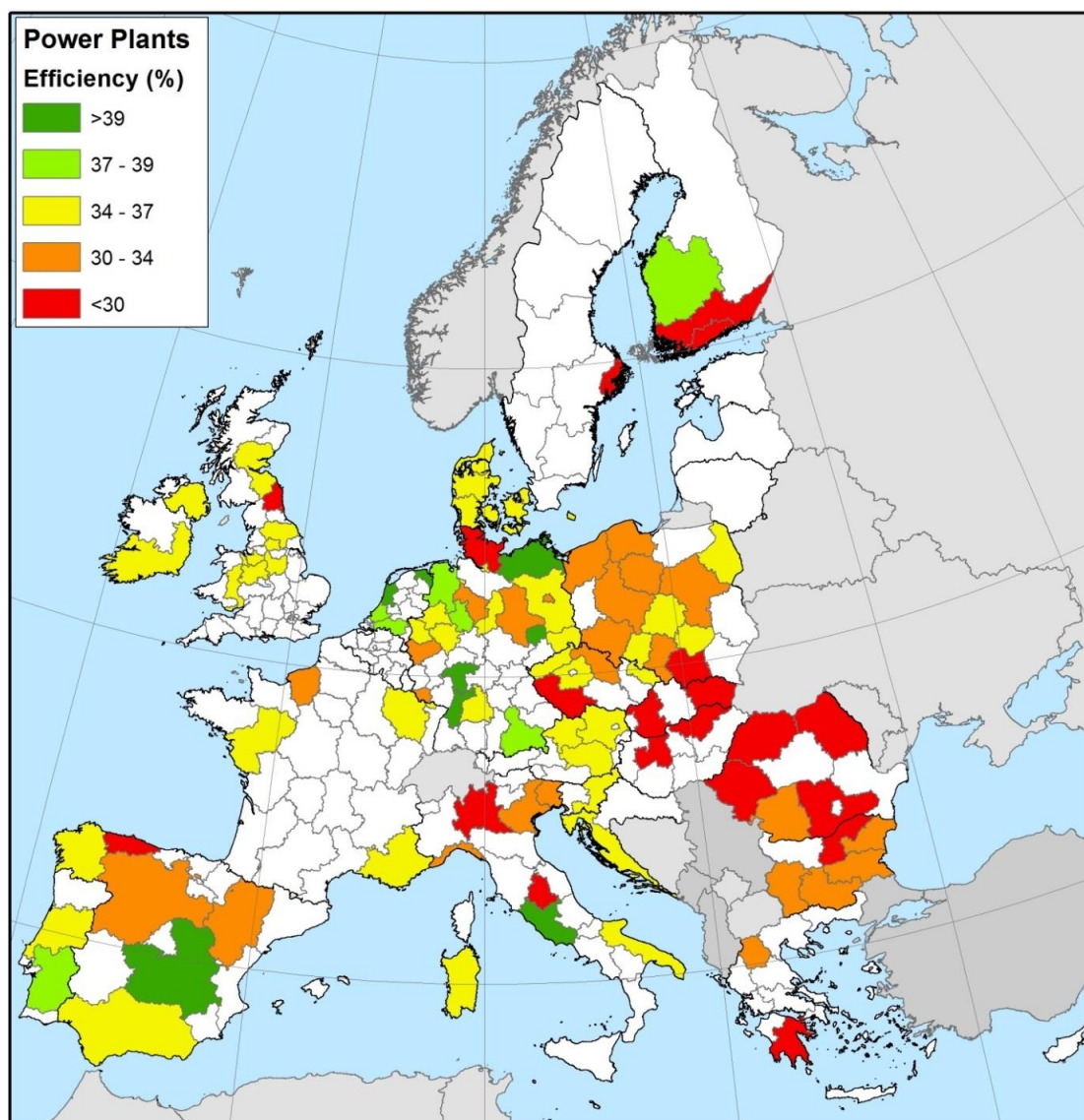


Σχήμα 5: Ισχύς των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα σε επίπεδο NUTS-2 (Dias, et al., 2018)

Στο Σχήμα 5 φαίνεται η ισχύς των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής στις 103 περιφέρειες της ΕΕ. Σύμφωνα με τα στοιχεία του χάρτη, εκτός από την περιοχή μεταξύ Ολλανδίας και Πολωνίας, όπου παρουσιάζεται και η μεγαλύτερη συγκέντρωση μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, υπάρχουν και άλλες περιοχές όπου η ισχύς των μονάδων ξεπερνά τα 2000 MW. Αυτές οι περιοχές βρίσκονται στη Βουλγαρία, την Τσεχία, τη Γερμανία, την Ελλάδα, την Ισπανία, την Ιταλία, τη Ρουμανία και το Ηνωμένο Βασίλειο (Dias, et al., 2018).

Η μέση αποδοτικότητα των ενεργών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα το 2016, σε επίπεδο περιφέρειας φαίνεται στο Σχήμα 6. Τα συμπεράσματα είναι παρόμοια με αυτά του Σχήματος 4, μόνο που αυτή τη φορά αναφέρονται σε μέση αποδοτικότητα κάθε περιφέρειας και όχι σε κάθε επιμέρους μονάδα. Σύμφωνα με το χάρτη, οι περιοχές υψηλής αποδοτικότητας είναι 15. Οι οχτώ από αυτές έχουν αποδοτικότητα πάνω από 39% και οι εφτά πάνω από 37%. Από την άλλη οι περιοχές με

χαμηλή μέση αποδοτικότητα είναι σημαντικά περισσότερες. Είκοσι από αυτές παρουσιάζουν μέση αποδοτικότητα κάτω του 30% και 25 παρουσιάζουν κάτω από 34%.

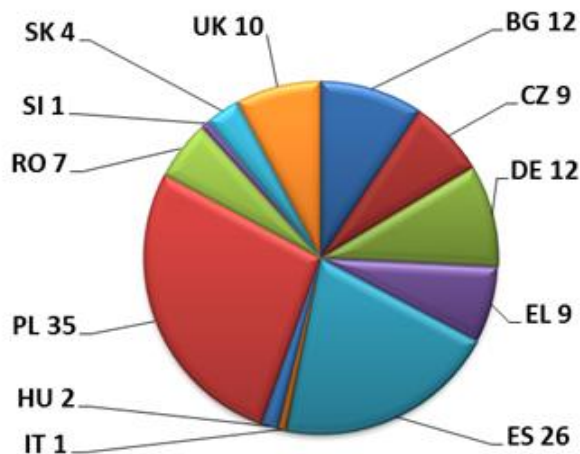


Σχήμα 6: Μέση αποδοτικότητα των ενεργών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα το 2016, σε επίπεδο περιφερειών (Dias, et al., 2018)

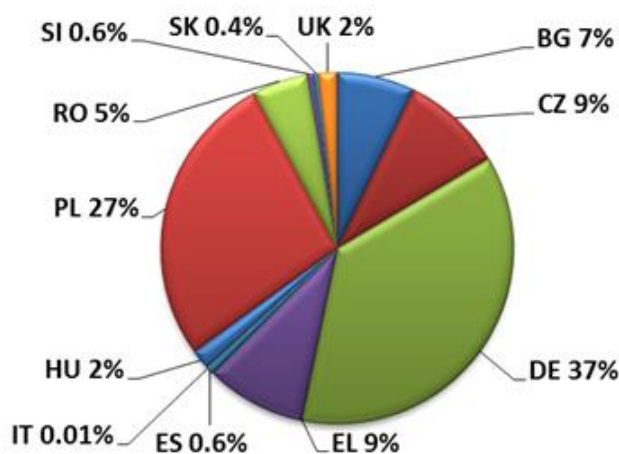
1.2 Η εξόρυξη του άνθρακα στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση εξορύσσονται περίπου 100 εκατομμύρια τόνοι λιθάνθρακα ετησίως και εισάγονται άλλοι 200, καθιστώντας την ΕΕ το μεγαλύτερο εισαγωγέα παγκοσμίως βάσει αξίας (Xenogenos, et al., 2019). Το 2015 βρίσκονταν σε λειτουργία 128 ανθρακωρυχεία σε 12 κράτη μέλη, με τη δυνατότητα μιας ετήσιας παραγωγής που έφτανε τους 498 εκατομμύρια τόνους. Η **Πολωνία** διαθέτει το μεγαλύτερο αριθμό ανθρακωρυχείων (35) και ακολουθούν η Ισπανία (26), η Γερμανία (12) και η Βουλγα-

ρία (12). Την υψηλότερη παραγωγή πραγματοποιεί η Γερμανία (184 εκατομμύρια τόνοι ετησίως) και ακολουθούν η Πολωνία (135 εκατομμύρια τόνοι ετησίως), η Ελλάδα (46 εκατομμύρια τόνοι ετησίως) και η Τσεχία (46 εκατομμύρια τόνοι ετησίως) (Dias, et al., 2018). Τα δεδομένα φαίνονται λεπτομερώς στα Σχήματα 7 και 8.



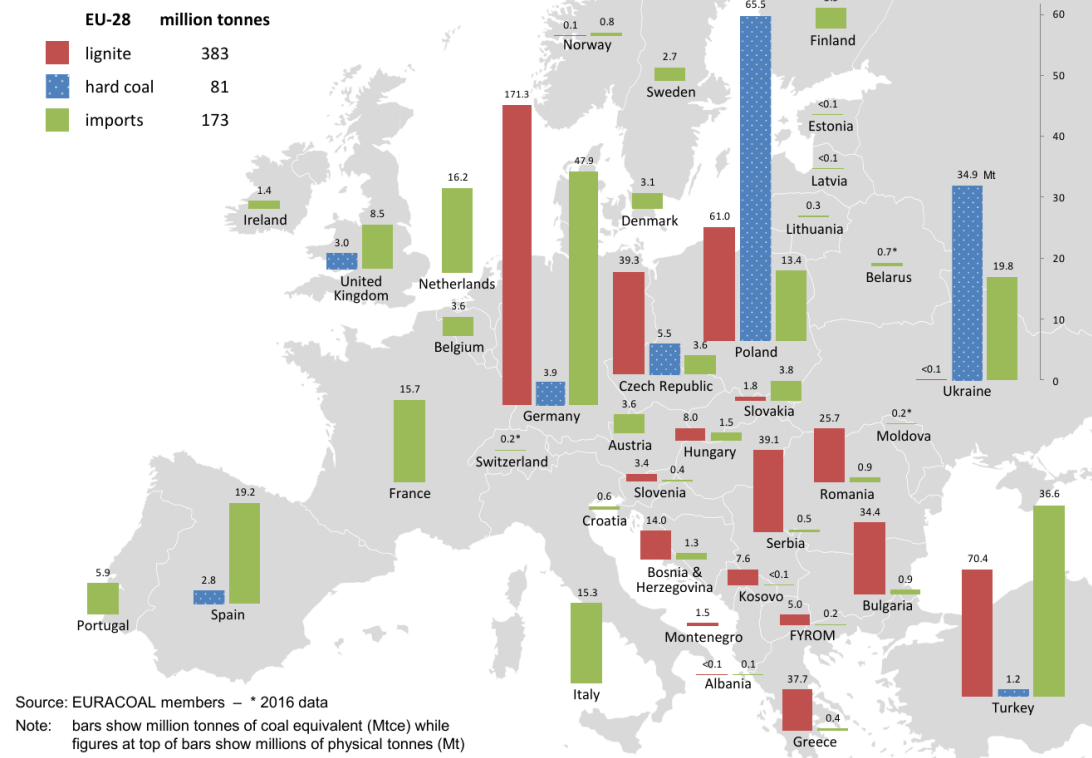
Σχήμα 7: Αριθμός ανθρακωρυχείων ανά κράτος μέλος (Dias, et al., 2018)



Σχήμα 8: Ποσοστό παραγωγής άνθρακα ανά κράτος μέλος (Dias, et al., 2018)

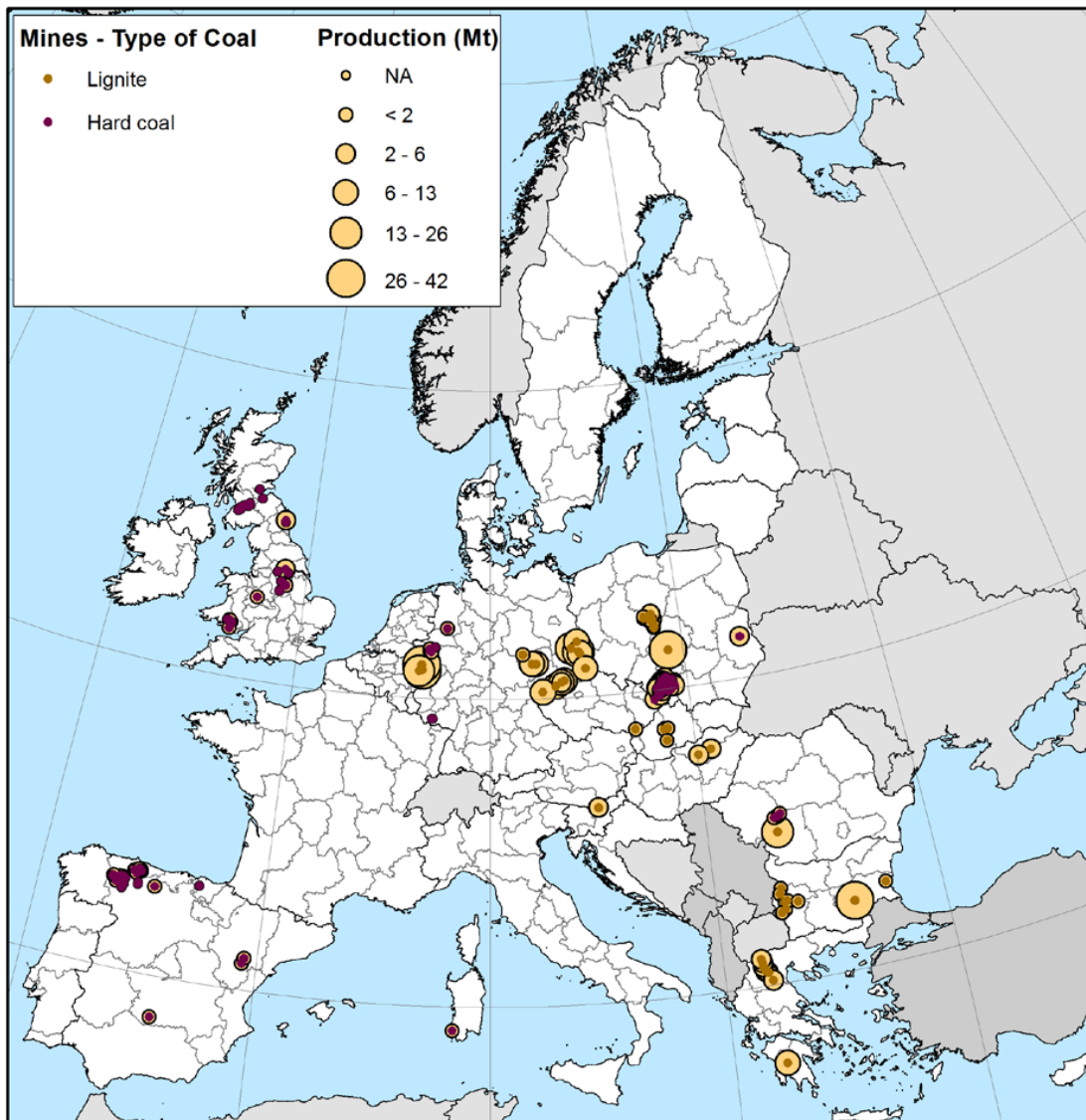
Coal in Europe 2017

lignite production, hard coal production & imports



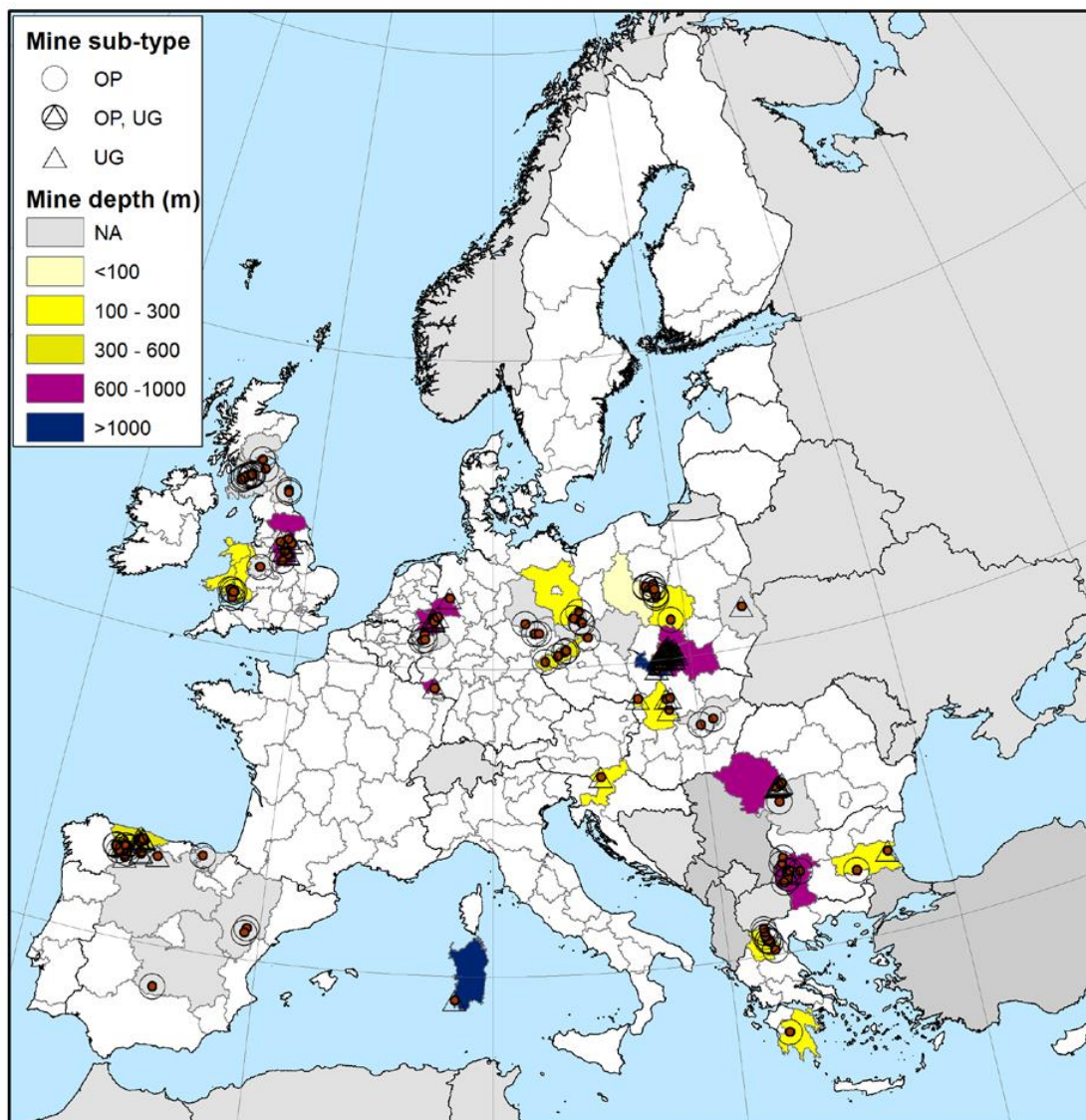
Σχήμα 9: Παραγωγή λιγνίτη και λιθάνθρακα και εισαγωγές στην Ευρώπη (EURACOAL, 2017)

Τα δύο τρίτα των ανθρακωρυχείων στην ΕΕ (79 ορυχεία) είναι ορυχεία λιθάνθρακα. Από αυτά περίπου το 25% καλύπτουν τις ανάγκες της βιομηχανίας χάλυβα, παράγοντας άνθρακα για τη μεταλλουργία και ανθρακίτη. Τα υπόλοιπα παράγουν διάφορες ποιότητες λιθάνθρακα, όπως για την παραγωγή ατμού και κοκ. Λιγνίτης παράγεται σε 49 ορυχεία. Η Ισπανία και το Ηνωμένο Βασίλειο παράγουν αποκλειστικά λιθάνθρακα, ενώ η Σλοβακία, η Σλοβενία, η Ουγγαρία, η Βουλγαρία και η Ελλάδα παράγουν μόνο λιγνίτη. Τα μεγαλύτερα λιγνιτωρυχεία βρίσκονται στην Πολωνία, τη Γερμανία, τη Βουλγαρία και τη Ρουμανία. Τα μεγαλύτερα ορυχεία λιθάνθρακα βρίσκονται στην Πολωνία και την Τσεχία (Dias, et al., 2018). Το 2015 στην ΕΕ παρήχθησαν περίπου 100 εκατομμύρια τόνοι λιθάνθρακα. Εξ αυτών οι 72,2 εξορύχθησαν στην Πολωνία (Xenogenos, et al., 2019). Στο Σχήμα 10 παρουσιάζονται οι τοποθεσίες των εν λειτουργία ανθρακωρυχείων το 2015, μαζί με τα ύψη παραγωγής και το είδος του παραγόμενου άνθρακα.



Σχήμα 10: Τοποθεσίες, παραγωγή και είδος παραγόμενου άνθρακα στα εν λειτουργία ανθρακωρυχεία της ΕΕ (Dias, et al., 2018)

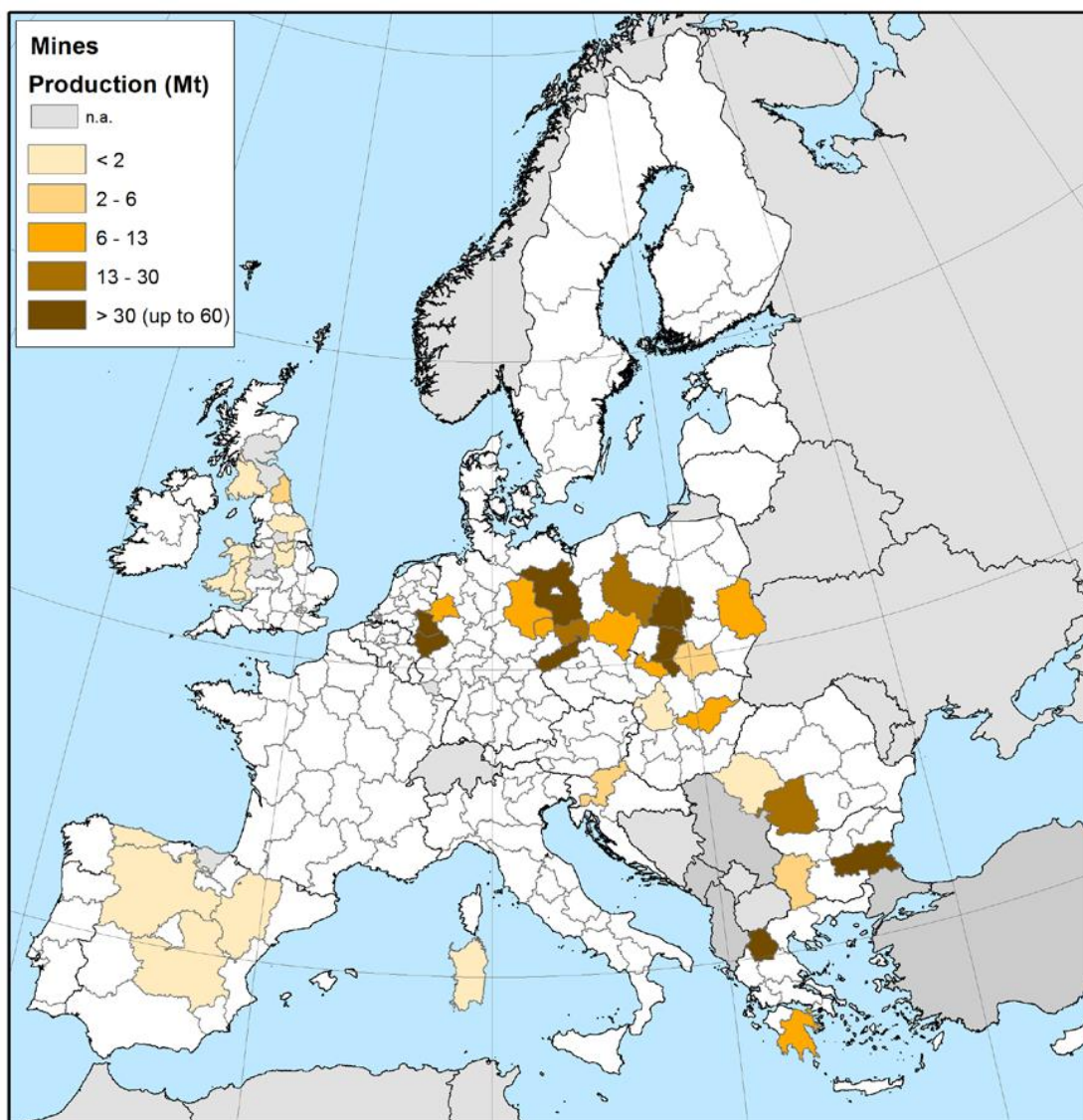
Σχεδόν τα μισά από τα ανθρακωρυχεία είναι υπαίθρια. Ο λιγνίτης εξορύσσεται κυρίως σε υπαίθρια ορυχεία (open-pit), ενώ ο λιθάνθρακας σε υπαίθρια και υπόγεια. Τα βαθύτερα ορυχεία (πάνω από 800 μέτρα) βρίσκονται στην Πολωνία, τη Γερμανία, την Τσεχία και την Ιταλία. Στη Γερμανία συγκεκριμένα, το βαθύτερο ορυχείο αγγίζει τα 1800 μέτρα, παρόλο που τα περισσότερα ορυχεία της περιοχής (Rhur) έχουν βάθη της τάξης των 500 – 1000 μέτρων. Το συγκεκριμένο κοίτασμα βρίσκεται σε 800 μέτρα βάθος κατά μέσο όρο. Παράλληλα στην Πολωνία το μέσο βάθος εξόρυξης είναι τα 770 μέτρα (Dias, et al., 2018). Στον χάρτη του Σχήματος 11 φαίνεται το είδος και το βάθος εξόρυξης των ανθρακωρυχείων στην ΕΕ. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την ανταγωνιστικότητα του ανθρακωρυχείου αλλά και την ένταση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως θα αναλυθεί στα επόμενα κεφάλαια.



Σχήμα 11: Πληροφορίες για το είδος και το βάθος εξόρυξης των εν λειτουργία ορυχείων στην ΕΕ¹ (Dias, et al., 2018)

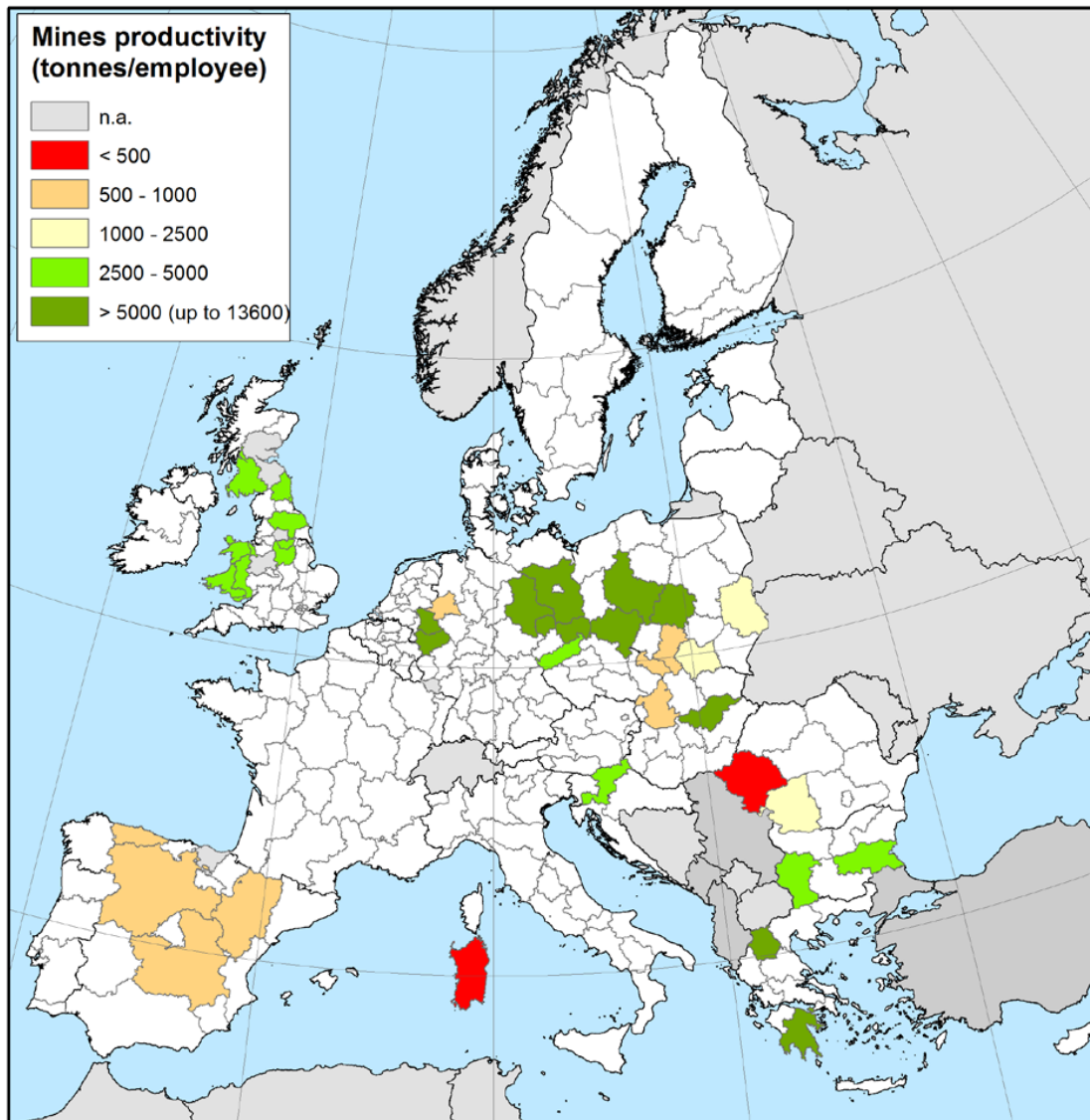
Στον χάρτη του Σχήματος 12 φαίνεται η ετήσια παραγωγή των ανθρακωρυχείων σε κάθε περιφέρεια της ΕΕ το 2015. Από όλες τις περιφέρειες, 41 διαθέτουν ανθρακωρυχεία. Σύμφωνα με το χάρτη, οι περιοχές με την υψηλότερη παραγωγή (άνω των 30 εκατομμυρίων τόνων) βρίσκονται στη Γερμανία, την Πολωνία, την Τσεχία, την Ελλάδα και τη Βουλγαρία. Ακολουθεί η Ρουμανία με παραγωγή ανά περιοχή άνω των 13 εκατομμυρίων τόνων. Οι περιφέρειες με την υψηλότερη παραγωγή είναι η PL22 Śląskie στην Πολωνία (59 εκατομμύρια τόνοι από 28 ορυχεία) και η DEA2 Köln στη Γερμανία (60 εκατομμύρια τόνοι από 2 ορυχεία) (Dias, et al., 2018).

¹ Τα υπαίθρια ορυχεία αναφέρονται ως OP (open-pit) και τα υπόγεια ως UG (underground)



Σχήμα 12: Ετήσια παραγωγή ανθρακωρυχείων σε επίπεδο περιφερειών (Dias, et al., 2018)

Η βιωσιμότητα ενός ανθρακωρυχείου εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες, ένας από τους οποίους είναι η παραγωγικότητα (productivity), η οποία ορίζεται ως η ετήσια παραγωγή ανά εργαζόμενο. Μέσες τιμές παραγωγικότητας των ανθρακωρυχείων ανά περιφέρεια φαίνονται στο Σχήμα 13. Τα ανθρακωρυχεία στην ΕΕ με τη μεγαλύτερη παραγωγικότητα, με παραγωγή πάνω από 10000 τόνους ανά εργαζόμενο βρίσκονται στη Γερμανία και την Ελλάδα, όπου λειτουργούν υπαίθρια λιγνιτωρυχεία. Τα λιγότερο παραγωγικά ορυχεία, με παραγωγή κάτω από 500 τόνους ανά εργαζόμενο βρίσκονται στην Ιταλία και τη Ρουμανία (Dias, et al., 2018). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η παραγωγικότητα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η μορφολογία του εδάφους και το βάθος εξόρυξης.



Σχήμα 13: Μέση παραγωγικότητα των ανθρακωρυχείων ανά περιφέρεια² (Dias, et al., 2018)

Ο λιγνίτης χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ενίοτε θερμότητας, σε μονάδες που βρίσκονται πολύ κοντά στο σημείο εξόρυξης. Πάνω από το 95% του παραγόμενου λιγνίτη καταναλώνεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Dias, et al., 2018). Τα χαρακτηριστικά του λιγνίτη τον καθιστούν ακατάλληλο για μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις. Αποσυντίθεται γρήγορα και εξαιτίας της υψηλής του περιεκτικότητας σε νερό το κόστος μεταφοράς του είναι ιδιαίτερα υψηλό.

Αντίθετα, ο λιθάνθρακας μεταφέρεται σε όλο τον κόσμο και ικανοποιεί ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως για παράδειγμα στη βιομηχανία χάλυβα. Τα κοιτάσματα λιθάνθρακα παράγουν διάφορες ποιότητες, οι οποίες στη συνέχεια ικανοποιούν διαφορετικές ανάγκες. Οι κυριότερες από αυτές είναι ο άνθρακας για την παραγωγή ατμού ή θερμότητας (thermal coal), ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως για θέρμανση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ο άνθρακας για παραγωγή κοκ (coking coal),

² Στις περιοχές της Βουλγαρίας, της Ισπανίας και του Ηνωμένου Βασιλείου έχει αποδοθεί η μέση παραγωγικότητα της χώρας λόγω έλλειψης επιμέρους δεδομένων.

ο οποίος χρησιμοποιείται για την παραγωγή χάλυβα. Η διάκριση του εξορυχθέντος άνθρακα σε έναν από τους δύο τύπους λαμβάνει χώρα σε μονάδες προετοιμασίας και σύμφωνα με ποιοτικές παραμέτρους. Παρ' όλα αυτά, οι απαραίτητες ιδιότητες που διαθέτουν και οι περισσότερες ποικιλίες λιθάνθρακα για χρήση στη βιομηχανία χάλυβα, δεν επαρκούν πάντα για την παραγωγή κοκ της επιθυμητής ποιότητας. Οι ιδιότητες του άνθρακα ο οποίος χρησιμοποιείται για την παραγωγή χάλυβα πρέπει να ελέγχονται αυστηρά, καθώς η ποιότητά του επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του παραγόμενου χάλυβα (Dias, et al., 2018).

Πίνακας 1: Ποσοστά των παραγόμενων ειδών λιθάνθρακα σε δύο περιφέρειες της Πολωνίας και μία της Τσεχίας (Dias, et al., 2018)

Περιφέρεια	Άνθρακας θέρμανσης (%)	Άνθρακας μεταλλουργίας (%)	Άλλα είδη (%)
Lubelskie	100	-	-
Śląskie	71.0	27	1.4
Moravskoslezsko	11	89	-

Στον Πίνακα 1 φαίνονται τα ποσοστά παραγωγής των δύο κύριων ειδών λιθάνθρακα (thermal και coking) σε τρεις περιφέρειες. Δύο στην Πολωνία και μία στην Τσεχία. Η περιοχή Śląskie βρίσκεται στην Άνω Σιλεσία και έχει ταυτοποιηθεί ως μία από τις περιοχές με τις σημαντικότερες επιπτώσεις από την εξόρυξη του άνθρακα (Dias, et al., 2018).

1.3 Ανασκόπηση της εξόρυξης άνθρακα στην Πολωνία

Η Πολωνία διαθέτει μεγάλα αποθέματα λιθάνθρακα και είναι μία από τις πιο εξαρτημένες από τον άνθρακα χώρες στον κόσμο. Χωρίς την πρόσβαση στον άνθρακα, είναι απίθανο ότι η πρώιμη εκβιομηχάνιση της Πολωνίας κατά τον δέκατο ένατο αιώνα θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί. Στις τρεις δεκαετίες της μεταπολεμικής περιόδου, η παραγωγή άνθρακα, που λαμβάνει χώρα κυρίως στην βιομηχανική καρδιά της Πολωνίας, την Άνω Σιλεσία, υπερδιπλασιάστηκε. Πριν η ετήσια παραγωγή φθάσει τους 201 εκατομμύρια τόνους το 1979, η Πολωνία είχε ήδη γίνει ο σημαντικότερος παραγωγός άνθρακα στην Ευρώπη (εξαιρουμένης της πρώην Σοβιετικής Ένωσης). Μετά την πτώση της ΕΣΣΔ, η Πολωνία συνέχισε να βασίζεται στον άνθρακα. Το 1992 περίπου τα δύο τρίτα του συνολικού πρωτογενούς ενεργειακού εφοδιασμού της Πολωνίας καλύπτονταν από εγχώριο άνθρακα. Το 1993, ο άνθρακας συνέβαλε σε περισσότερο από το 80% της θερμότητας που παρήχθη στην Πολωνία. Συγκριτικά, το 1993, το μερίδιο του άνθρακα στην πρωτογενή αγορά ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση ήταν 13% (Andersson, 2004). Η σημασία του λιθάνθρακα για την πολωνική οικονομία υπογραμμίζεται επίσης από το γεγονός ότι παραδοσιακά αποτελεί σημαντικό προϊόν εξαγωγής. Η Πολωνία ενδέχεται να παραμείνει σε μεγάλο βαθμό εξαρτημένη από τον άνθρακα τα επόμενα χρόνια για δύο λόγους. Πρώτον, δεν υπάρχουν

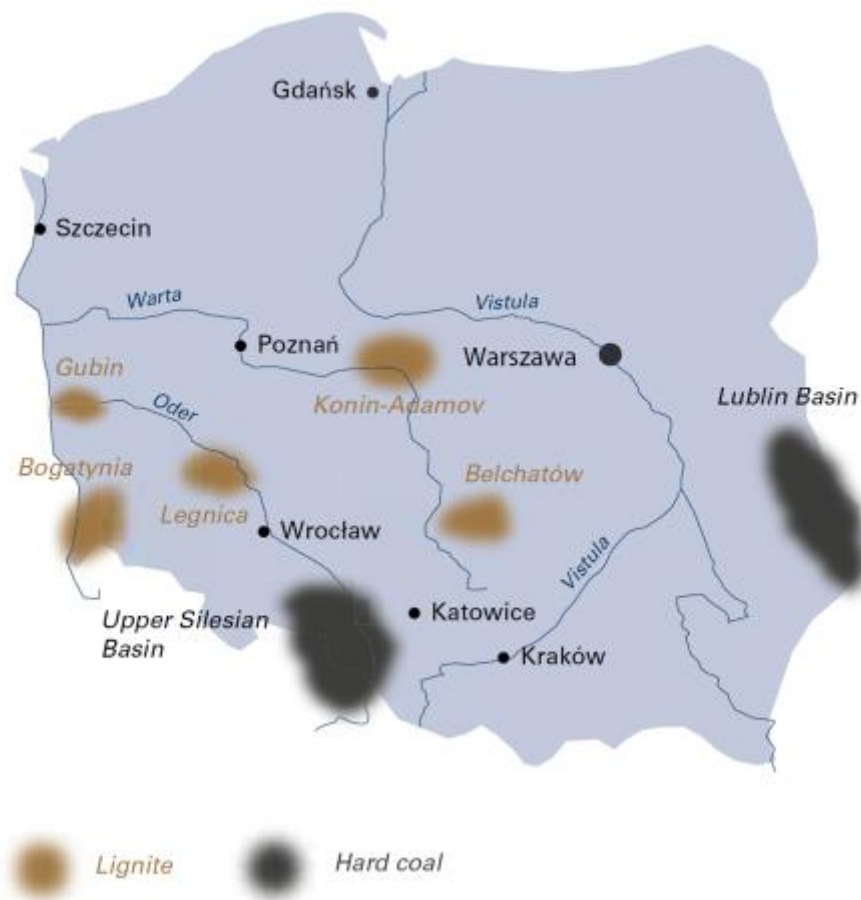
πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής και δεύτερον, ως επίπεδη γη με μικρή ποσότητα νερού, η πιθανότητα παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι σχεδόν αμελητέα.

Από τη συστημική αλλαγή το 1989, η παραγωγή λιθάνθρακα μειώθηκε απότομα. Η μείωση αυτή οφείλεται σε διάφορους παράγοντες. Οι κυριότεροι ήταν η οικονομική ύφεση κατά τα πρώτα έτη της μετάβασης, η αύξηση των τιμών του άνθρακα και η απώλεια της εξαγωγικής αγοράς στις πρώην χώρες της Κομεκόν. Άλλες κινητήριες δυνάμεις πίσω από τη μείωση της παραγωγής άνθρακα είναι η βιομηχανική αναδιάρθρωση, ο ανταγωνισμός από άλλα καύσιμα, η εξοικονόμηση ενέργειας και η περιβαλλοντική πολιτική.

Τα πρώτα βήματα προς την αναδιάρθρωση του τομέα του λιθάνθρακα λήφθηκαν το 1990 όταν καταργήθηκε το σύστημα κεντρικής διαχείρισης και τα 70 περίπου ορυχεία μετατράπηκαν σε ανεξάρτητες επιχειρήσεις, αν και εξακολουθούν να ανήκουν στο κράτος. Την ίδια χρονιά η κυβέρνηση άρχισε να ελευθερώνει τις τιμές και να μειώνει τις επιδοτήσεις για ορυχεία που δεν καλύπτουν το κόστος τους. Οι επιδοτήσεις άνθρακα μειώθηκαν από 2.294 το 1989 σε 134 εκατομμύρια δολάρια το 1993. Το 1992, επιδοτήθηκε μόνο το 1,1% των πωλήσεων άνθρακα (Andersson, 2004).

Κάθε έτος της δεκαετίας του 1990 ο τομέας του λιθάνθρακα βυθιζόταν όλο και πιο βαθιά στο χρέος. Διάφοροι παράγοντες είχαν αρνητικές επιπτώσεις στην οικονομική επίδοση του τομέα κατά τη δεκαετία του 1990. Πρώτον, η ζήτηση άνθρακα στην Πολωνία οδήγησε σε δυσμενείς τιμές πώλησης του άνθρακα. Τα ανθρακωρυχεία προσπάθησαν να αντισταθμίσουν τις απώλειες στην εγχώρια αγορά αυξάνοντας τις εξαγωγές. Ωστόσο, η τιμή εξαγωγής ήταν χαμηλότερη από την τιμή πώλησης στην εγχώρια αγορά και πολύ χαμηλότερη από το κόστος παραγωγής. Δεύτερον, οι μισθοί αυξήθηκαν περισσότερο από το αναμενόμενο. Τρίτον, η τιμή του άνθρακα αυξήθηκε βραδύτερα από τον πληθωρισμό. Τέλος, οι τιμές της ενέργειας αυξήθηκαν πολύ περισσότερο από τις τιμές του άνθρακα. Αυτό ωφέλησε τον τομέα της παραγωγής ενέργειας εις βάρος του τομέα του λιθάνθρακα (Andersson, 2004).

Ο λιθάνθρακας και ο λιγνίτης έχουν στρατηγική σημασία για την Πολωνία. Σε σύγκριση με τα άλλα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η Πολωνία διαθέτει σημαντικά μεγαλύτερα αποθέματα λιθάνθρακα και λιγνίτη και αξιοποιεί τους ενεργειακούς της πόρους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποθέματα λιθάνθρακα ανέρχονται συνολικά σε 21,1 δισεκατομμύρια τόνους, τα οποία βρίσκονται κυρίως στις λεκάνες απορροής της Άνω Σιλεσίας και την περιοχή του Lublin, ενώ τα αποθέματα λιγνίτη ανέρχονται σε 1,4 δισεκατομμύρια τόνους. Λόγω των σχετικά χαμηλών δυνατοτήτων αντικατάστασης του άνθρακα με άλλες πηγές ενέργειας, οι τρέχουσες προβλέψεις δείχνουν ότι ο άνθρακας θα διατηρήσει τον κύριο ρόλο του στο πολωνικό ενεργειακό μείγμα για πολλά ακόμη χρόνια.



Σχήμα 14: Χάρτης με τις τοποθεσίες των κοιτασμάτων λιγνίτη και λιθάνθρακα στην Πολωνία (EURACOAL, τελευταία προσπέλαση 2019)

Η εξάρτηση της Πολωνίας από εισαγωγές ενέργειας είναι πολύ χαμηλότερη από τον μέσο όρο της ΕΕ: 28,6% έναντι 53,5%. Μόνο τρία κράτη μέλη έχουν μικρότερη εξάρτηση από εισαγωγές. Ο συνολικός ενεργειακός εφοδιασμός της χώρας το 2015 κυριαρχούταν από τον άνθρακα (50,8%), ενώ το πετρέλαιο (24,5%) και το φυσικό αέριο (14,6%) παίρνουν επίσης σημαντικά μερίδια ακολουθούμενα από τον άνεμο (1,0%) και το υδρογόνο (0,2%). Το 2015, η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Πολωνία έφτασε τις 164,8 TWh. Οι εισαγωγές και οι εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας ήταν σε μεγάλο βαθμό ισορροπημένες. Σχεδόν το ήμισυ της παραγωγής ηλεκτρισμού της Πολωνίας, 79,9 TWh (48,4%), παρήχθησαν σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση λιθάνθρακα, ενώ 52,9 TWh (32,1%) σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση λιγνίτη. Η παραγόμενη ενέργεια από τον άνεμο έφτασε τις 11,0 TWh (6,7%), με την ηλιακή ενέργεια να αναλογεί μόλις στο 0,04% του ενεργειακού μείγματος. Τα βιοκαύσιμα και τα απόβλητα (6,1%), το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο (5,1%) και η υδροηλεκτρική (1,5%) ήταν οι υπόλοιπες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας το 2015 (EURACOAL, τελευταία προσπέλαση 2019).

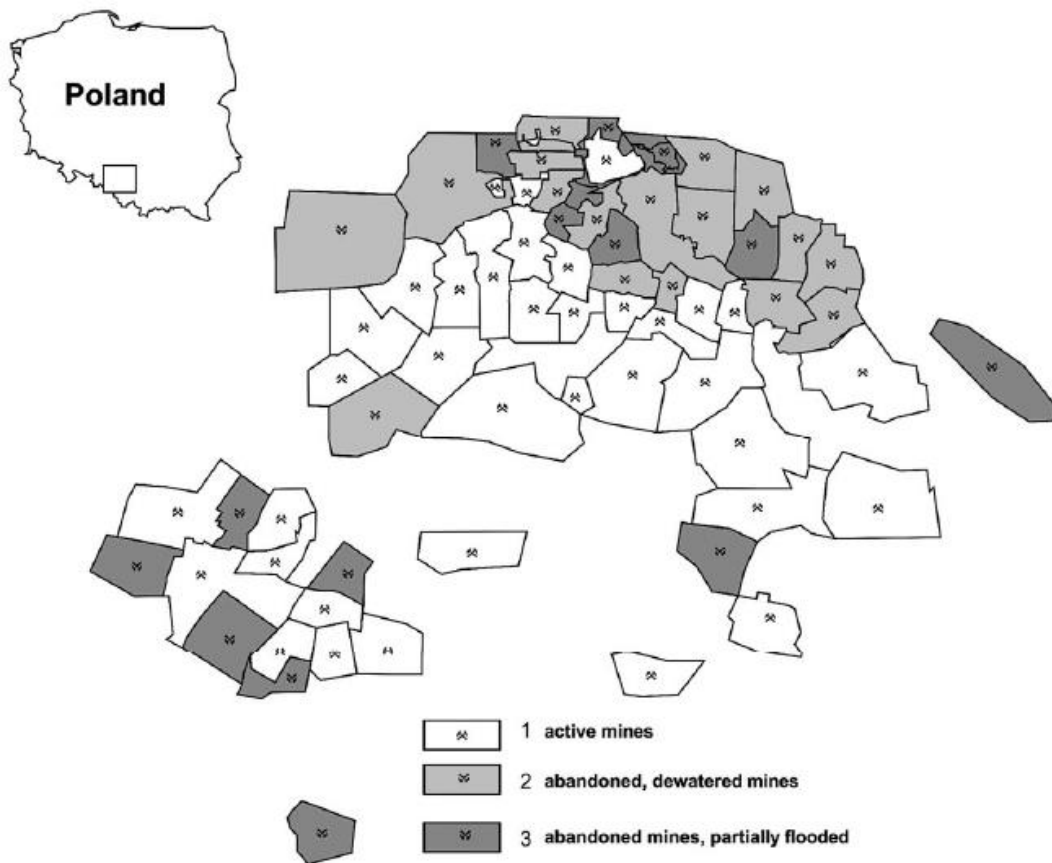
Η μέση ηλικία των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα στην Πολωνία είναι περίπου σαράντα έτη. Μόνο το 10% των μονάδων είναι ηλικίας μικρότερης των

δέκα ετών. Οι μονάδες που λειτουργούν με λιγνίτη είναι μεταξύ των νεότερων και ανακαινίζονται για να πληρούν τα περιβαλλοντικά πρότυπα της ΕΕ (EURACOAL, τελευταία προσπέλαση 2019).

Η αστικοβιομηχανική συσσώρευση στην Άνω Σιλεσία είναι μία από τις πιο μετασχηματισμένες περιοχές στην Ευρώπη. Η έντονη εκβιομηχάνιση οφείλεται κυρίως στην παρουσία κοιτασμάτων άνθρακα και άλλων ορυκτών και την εξόρυξή τους. Οι περιοχές εξόρυξης λιθάνθρακα αποτελούν περίπου το 25% της συνολικής έκτασης της λεκάνης απορροής των υδατορευμάτων στην Λεκάνη Απορροής Άνθρακα της Άνω Σιλεσίας (ΛΑΑΑΣ), η οποία περιλαμβάνει τις λεκάνες απορροής των ποταμών Άνω Odra (Oder) και Μικρό Βιστούλα (Wisła) (Gzyl, et al., 2017).

Η εξόρυξη λιθάνθρακα είναι η κύρια δραστηριότητα της πολωνικής εξορυκτικής βιομηχανίας. Ο πολωνικός λιθάνθρακας συνδέεται αποκλειστικά με τη Λιθανθρακοφόρο περίοδο. Τρία είδη σχηματισμών υπάρχουν σε αντιστοιχία με τις τρεις πολωνικές λεκάνες απορροής άνθρακα: (α) Λεκάνη απορροής της Κάτω Σιλεσίας, (β) Λεκάνη απορροής της Άνω Σιλεσίας, (γ) Λεκάνη απορροής του Lublin. Στο Σχήμα 15 φαίνεται η τοποθεσία των ορυχείων της Άνω Σιλεσίας με την πρόσφατη κατάστασή τους.

Η λεκάνη απορροής άνθρακα της Άνω Σιλεσίας είναι η μεγαλύτερη από τις τρεις. Βρίσκεται στο νότιο κομμάτι της Πολωνίας, όπου ιστορικά η εξάρτηση από τη βιομηχανία έχει διαμορφώσει το χαρακτήρα ολόκληρης της περιοχής. Η εξόρυξη άνθρακα είναι ο κύριος κλάδος της βιομηχανίας ο οποίος έχει επηρεάσει κάθε πτυχή της κοινωνίας, του περιβάλλοντος και της οικονομίας στην περιοχή για πάνω από δύο αιώνες. Η ΛΑΑΑΣ καλύπτει την περιοχή κατά μήκος των συνόρων μεταξύ της Πολωνίας και της Τσεχίας. Καλύπτει μια έκταση 7400 τετραγωνικών χιλιομέτρων από τα οποία τα 5800 περίπου βρίσκονται εντός πολωνικού εδάφους. (Gzyl, et al., 2017)



Σχήμα 15: Θέση της λεκάνης απορροής άνθρακα της Άνω Σιλεσίας με τα ορυχεία και την κατάσταση τους (Gzyl, et al., 2017)

2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανθρακωρυχείων στην Πολωνία

Η έντονη εκμετάλλευση συνδυάζεται με τις έντονες απορροές και απορρίψεις υδατικών αποβλήτων από την εξορυκτική βιομηχανία. Οι απορρίψεις υδατικών αποβλήτων εξόρυξης επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα και ποσότητα των επιφανειακών υδάτων στη Λεκάνη Απορροής Άνθρακα της Άνω Σιλεσίας – ΛΑΑΑΣ (Upper Silesian Coal Basin – USBC). Στην περιοχή εξόρυξης βρίσκονται πολλοί μικροί ποταμοί και χείμαρροι, παραπόταμοι των δύο κυριότερων ποταμών της Πολωνίας, του Wisła και του Odra στο άνω τμήμα των λεκανών απορροής τους που ονομάζονται Μικρός Βιστούλας και Άνω Odra.

Η Πολωνία αντιμετωπίζει δύο μεγάλες προκλήσεις όσον αφορά τη διαχείριση των υδάτων και την προστασία των υδάτων: (1) η χώρα διαθέτει λιγιστούς υδάτινους πόρους και (2) τα επιφανειακά ύδατα είναι ιδιαίτερα ρυπασμένα.

Τα ύδατα των ποταμών της Πολωνίας χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: Κατηγορία I – νερό κατάλληλο για πόση, Κατηγορία II - νερό κατάλληλο για γεωργικούς σκοπούς, Κατηγορία III - νερό κατάλληλο για βιομηχανικούς σκοπούς και κατηγορία IV - νερό ακατάλληλο για οποιονδήποτε σκοπό. Η Πολωνία δεν έχει μεγάλους ποταμούς στην Κατηγορία καταλληλότητας I και τα κριτήρια για την Κατηγορία καταλληλότητας III δεν καλύπτονται από σχεδόν το 70% του μήκους των κύριων ποταμών. Ωστόσο, η κατάσταση είναι κάπως καλύτερη σήμερα από ό,τι στη δεκαετία του 1980. Μεταξύ 1989 και 1995 παρατηρήθηκε μείωση κατά 12% της ποσότητας των υδατικών αποβλήτων που απορρίπτονται στα επιφανειακά ύδατα, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης κατά περισσότερο από 30% των μη επεξεργασμένων απορρίψεων (Andersson, 2004).

Το μεγαλύτερο πρόβλημα των επιφανειακών υδατινων σωμάτων της Πολωνίας είναι η υφαλμύριση. Ως υφαλμύριση ορίζεται η αύξηση της συνολικής συγκέντρωσης ανόργανων ιόντων στο νερό ή στο έδαφος και συνεπώς αποτελεί συστατικό στοιχείο όλων των υδατινων σωμάτων. Τα άλατα είναι ευδιάλυτα και ευκίνητα, οπότε μπορούν είτε να παραμείνουν στο έδαφος σε μια δεδομένη τοποθεσία είτε να μεταφερθούν με το νερό (Payen, et al., 2016). Η συγκέντρωση των διαλυμένων ιόντων εκφράζεται και μέσω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του διαλύματος, σε Siemens ανά μέτρο. Η σχέση μεταξύ συγκέντρωσης ιόντων και αγωγιμότητας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Τα επιφανειακά ύδατα ταξινομούνται βάσει της περιεκτικότητας τους σε άλατα ως εξής: (1) γλυκό νερό με συγκέντρωση κάτω από 0,5 g/L, (2) υφάλμυρο νερό με συγκέντρωση 0,5-30 g/L, (3) αλμυρό νερό με συγκέντρωση 30-50 g/L και (4) άλμη με συγκέντρωση πάνω από 50 g/L. Εξ ορισμού η αλατότητα οφείλεται κυρίως στα: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} και HCO_3^- (Cañedo-Argüelles, et al., 2012). Η διαδικασία της υφαλμύρισης κατηγοριοποιείται συνήθως στην πρωτογενή και τη δευτερογενή υφαλμύριση. Η πρωτογενής (φυσική) υφαλμύριση αναφέρεται σε διαδικασίες μεταφοράς αλάτων με φυσικό τρόπο, ενώ η δευτερογενής (ανθρωπογενής) υ-

φαλμύριση αναφέρεται σε διαδικασίες υφαλμύρισης που αυξάνονται ή προκαλούνται από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Το πρόβλημα της υφαλμύρισης επηρεάζει διάφορες χρήσεις γης (Payen, et al., 2016).

Ελλείπει ανθρωπογενών επιδράσεων, η αλατότητα και οι αναλογίες των παραπάνω ιόντων μεταβάλλονται από τρεις μηχανισμούς: (1) Φθορά της λεκάνης απορροής, η οποία εξαρτάται τόσο από τη γεωλογία της λεκάνης απορροής όσο και από τις βροχοπτώσεις. (2) Μεταφορά αλάτων από τη θάλασσα, αν και αυτός ο μηχανισμός είναι σημαντικός μόνο σε παράκτιες περιοχές. (3) Μικρές ποσότητες αλάτων που διαλύονται σε όμβρια ύδατα ως συνέπεια της εξάτμισης του θαλασσινού νερού. Επιπλέον, τα άλατα μπορούν να αποθηκευτούν στο έδαφος και τα υπόγεια ύδατα ως αποτέλεσμα προηγούμενων περιόδων ξηρασίας και στη συνέχεια να απελευθερωθούν. Ειδικά σε περιοχές με επίπεδη τοπογραφία, τα αποθηκευμένα άλατα κινούνται πολύ αργά ή παραμένουν στη συγκεκριμένη τοποθεσία για παρατεταμένο χρονικό διάστημα (Cañedo-Argüelles, et al., 2012). Αυτό ισχύει και στην περίπτωση της Πολωνίας, όπου η επίπεδη μορφολογία του εδάφους δυσχεραίνει τη φυσική μεταφορά των αλάτων από τα ρεύματα των ποταμών.

Η δευτερογενής υφαλμύριση των ποταμών και των ρευμάτων είναι μια παγκόσμια και αυξανόμενη απειλή που μπορεί να ενισχυθεί από την κλιματική αλλαγή. Μία από τις αιτίες της είναι οι εξορυκτικές δραστηριότητες. Οι οργανισμοί γλυκού νερού (ασπόνδυλα, ψάρια, άλγη και βακτήρια) ανέχονται μόνο ορισμένες περιοχές αλατότητας του νερού. Επομένως η δευτερογενής υφαλμύριση έχει αντίκτυπο σε επίπεδο ατόμου, πληθυσμού, κοινότητας και οικοσυστήματος, το οποίο τελικά οδηγεί σε μείωση της υδατικής βιοποικιλότητας και θέτει σε κίνδυνο τα αγαθά και τις υπηρεσίες που παρέχουν τα ποτάμια και τα ρέματα. Επίσης, η ανθρωπογενής υφαλμύριση έχει κηρυχθεί ως μία από τις σημαντικότερες απειλές για τα οικοσυστήματα γλυκού νερού. Η διαχείριση της δευτερογενούς υφαλμύρισης πρέπει να κατευθύνεται προς στρατηγικές ενσωματωμένων λεκανών απορροής (επωφελούμενη από την ικανότητα αραίωσης των ποταμών) και ταυτοποίηση των κατώτατων συγκεντρώσεων αλάτων με σκοπό τη διατήρηση της ακεραιότητας του οικοσυστήματος (Cañedo-Argüelles, et al., 2012).

Πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες δημιουργούν υδατικά απόβλητα υψηλής αλατότητας, όπως στην προκειμένη περίπτωση η εξόρυξη του άνθρακα που απαιτεί άντληση υδάτων με υψηλή αλατότητα από τον υδροφόρο ορίζοντα. Στις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης στις ακτές, η άλμη συνήθως απορρίπτεται στο θαλασσινό νερό (επηρεάζοντας το θαλάσσιο οικοσύστημα), ενώ στις ηπειρωτικές περιοχές η απόρριψη άλμης είναι πιο προβληματική επειδή η αραίωση της άλμης σε επιφανειακά υδάτινα σώματα οδηγεί στην υφαλμύριση των υδάτινων πόρων και του εδάφους (Payen, et al., 2016). Η απόρριψη αποβλήτων υψηλής αλατότητας αποτελεί μείζονα αιτία υδροβίων οικοτοξικών επιπτώσεων και το θέμα σήμερα παρουσιάζει αυξημένο ερευνητικό ενδιαφέρον (Zhou, et al., 2014). Αυτός ο τύπος υφαλμύρισης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συγκέντρωση των αλάτων στο απόβλητο που απορρίπτεται, αλλά και από τη θέση απόρριψης (Payen, et al., 2016).

Στη λεκάνη απορροής άνθρακα της Άνω Σιλεσίας η απόρριψη των αποβλήτων εξόρυξης επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα και την ποσότητα των επιφανειακών υδάτων. Ο αντίκτυπος των εξορυκτικών δραστηριοτήτων στα υπόγεια και τα επιφανειακά υδάτινα σώματα στη ΛΑΑΑΣ οφείλεται κυρίως στην αποξήρανση των πετρωμάτων εξαιτίας της αποστράγγισης των ορυχείων και την απόρριψη του νερού υψηλής αλατότητας στα επιφανειακά ύδατα. Παρ' όλα αυτά, στην περιοχή της ΛΑΑΑΣ παρατηρούνται όλες οι ενδεχόμενες συνέπειες της εξόρυξης άνθρακα στο υδάτινο περιβάλλον. Η εξόρυξη, το πεδίο εφαρμογής και το βάθος της, η διάρκεια των εργασιών, τα συστήματα εξαγωγής που χρησιμοποιούνται και ο συνολικός όγκος απορροών επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων της περιοχής. Σε μεγάλες περιοχές στη ΛΑΑΑΣ λαμβάνουν χώρα μετασχηματισμοί στην επιφάνεια λόγω της απόρριψης εξορυκτικών αποβλήτων και υποβάθμιση τους εδάφους. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται στην αποξήρανση των πετρωμάτων σαν επακόλουθο της αποστράγγισης των ορυχείων, στην απόρριψη νερού από τα ορυχεία σε επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες, στην καθίζηση του εδάφους λόγω της εξόρυξης, καθώς και στην αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων που επηρεάζουν την ποιότητα του εδάφους (Gzyl, et al., 2017).

Οι διεργασίες της αποξήρανσης των πετρωμάτων και της απόρριψης υδάτων ορυχείων σε επιφανειακά ύδατα επηρεάζουν όχι μόνο το υδάτινο περιβάλλον αλλά και κάθε άλλο στοιχείο το οποίο σχετίζεται με αυτό, όπως το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα. Σε περίπτωση ύπαρξης γειτονικών ορυχείων οι επιπτώσεις μεγεθύνονται καθώς πολλαπλές απορρίψεις νερού από τα ορυχεία καταλήγουν στον ίδιο αποδέκτη. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι εν λόγω απορρίψεις δεν υφίστανται καμία επεξεργασία ή αυτή είναι μόνο μηχανική με αποτέλεσμα να προκαλείται σημαντική ρύπανση των επιφανειακών υδάτων λόγω της μεγάλης περιεκτικότητάς τους σε άλατα, κυρίως χλωριούχα και θειικά (Gzyl, et al., 2017).

Πίνακας 2: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ανθρακωρυχείων της Πολωνίας που μελετήθηκαν

Ανθρακωρυχείο	Επιπτώσεις	Πηγή
Czczott, Katowice	Διάθεση πετρωμάτων, καθίζηση εδάφους, ατμοσφαιρική ρύπανση, απορρίψεις υδατικών αποβλήτων υψηλής αλατότητας	(Andersson, 2004)
Piast, Katowice	Διάθεση πετρωμάτων, καθίζηση εδάφους, ατμοσφαιρική ρύπανση, απορρίψεις υδατικών αποβλήτων υψηλής αλατότητας	(Andersson, 2004)
Ziemowit, Katowice	Διάθεση πετρωμάτων, καθίζηση εδάφους, ατμοσφαιρική ρύπανση, απορρίψεις υδατικών αποβλήτων υψηλής αλατότητας	(Andersson, 2004)
Barbara, Mikołów	Ρύπανση επιφανειακών υδάτων, καθίζηση εδάφους	(Lewin & Smoliński, 2006)
Murcki, Czułów	Διάθεση πετρωμάτων, καθίζηση εδάφους, απορρίψεις υδατικών αποβλήτων υψηλής αλατότητας	(Blanchette & Lund, 2016)

2.1 Αποξήρανση των πετρωμάτων

Η αποξήρανση των πετρωμάτων προκαλείται από την αποστράγγιση των ορυχείων και οδηγεί σε διαταραχή της υδάτινης ισορροπίας της επηρεαζόμενης λεκάνης απορροής. Οι πιθανές επιπτώσεις είναι η μείωση των φυσικών απορροών καθώς και η μεταβολή της γενικότερης κατάστασης του ποταμού (αποστράγγιση, διείδυση). Οι μεταβολές στη βαθμίδα της πίεσης και την ταχύτητα ροής των υπόγειων υδάτων και η μείωση των υπόγειων υδάτινων πόρων οφείλονται κυρίως στα συστήματα αποστράγγισης των ορυχείων. Η συνολική περιοχή μειωμένης πιεζομετρικής πίεσης κάλυπτε περίπου 2000 km² πριν από 20 χρόνια (Gzyl, et al., 2017).

Με την παύση της λειτουργίας των ορυχείων, παύει και κάθε διαδικασία συντήρησης όπως και η αποστράγγιση. Κατά συνέπεια, με τα χρόνια οι σήραγγες των ορυχείων πλημμυρίζουν με νερό που περιέχεται στα πετρώματα ή και το έδαφος. Κατόπιν της πλημμύρισης τα προϊόντα οξείδωσης του σιδηροπυρίτη από την κύρια μάζα των βράχων υδρολύονται και μεταφέρονται στα υπόγεια, προκαλώντας οξίνιση του υδροφόρου ορίζοντα. Η διαδικασία της αποστράγγισης ενός πλημμυρισμένου ορυχείου προκαλεί μεταβολές στη χημική κατάσταση των υδάτων αυτού (Gzyl, et al., 2017).

2.2 Αποθήκευση των εξορυκτικών αποβλήτων

Τα πετρώματα που εξάγονται από τα ορυχεία εναποτίθενται στην επιφάνεια με τη μορφή σωρών αποβλήτων ορυχείων. Τα ιζήματα τα οποία συλλέγονται σε δεξαμενές και δεξαμενές καθίζησης οι οποίες σχετίζονται με τις διαδικασίες μεταβολής και εμπλουτισμού του εξορυχθέντος υλικού αντιμετωπίζονται επίσης ως απόβλητα. Οι αποθέσεις υλικών αποτελούνται κατά δύο τρίτα από χονδρόκοκκα απόβλητα ψαμμίτη και άλλων πυριτικών και αργιλικών ορυκτών με μέγεθος 30-50 mm. Με την τοποθέτηση των αποβλήτων στην επιφάνεια ξεκινά η διαδικασία της έκλυσης (leaching), κυρίως ιόντων χλωρίου, θειικών ιόντων, βαρέων μετάλλων και ενώσεων αλουμινίου, σιδήρου και μαγγανίου, καθώς και άλλων ενώσεων που προκύπτουν από τα νερά κατακρημνίσεων τα οποία διεισδύουν στους σωρούς. Η διείδυση των στραγγισμάτων στους υπόγειους υδάτινους αποδέκτες κάτω από τους σωρούς και στα επιφανειακά ύδατα προκαλούν μεταβολές στη χημική σύσταση των υδάτων. Οι παραπάνω διαδικασίες έχουν ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων. Επίσης, η αποθήκευση των εξορυκτικών αποβλήτων προκαλεί διαταράξεις στις επιφανειακές απορροές με αποτέλεσμα την κάλυψη με νερό των γειτονικών περιοχών και το σχηματισμό υγροτόπων. Παράλληλα οι εν λόγω διαδικασίες οδηγούν και στον υποβιβασμό του εδάφους. Στην περιοχή της λεκάνης απορροής άνθρακα της Άνω Σιλεσίας οι εξορύξεις έχουν προκαλέσει ρύπανση σε υδάτινα σώματα χωρίς να υπάρχουν άμεσες απορρίψεις αποβλήτων σε αυτά. Στα συγκεκριμένα υδάτινα σώματα έχουν παρατηρηθεί αυξημένες συγκεντρώσεις χλωριούχων και θειικών αλάτων. Υπάρχουν δύο κατηγορίες επιπτώσεων από τα εξορυκτικά απόβλητα στα επιφανειακά ύδατα. Η πρώτη προκαλείται από τους χώρους απόρριψης, οι οποίοι στραγγίζονται από τάφρους. Τα στραγγίσματα οδηγούνται στα ποτάμια ρυπαίνοντας το νερό, όπως για παράδειγμα τον ποταμό Jamna στη λεκάνη απορροής

του Odra. Η δεύτερη κατηγορία επιπτώσεων αφορά τις περιοχές όπου τα πετρώματα από τις εξορύξεις χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση της γης. Καθώς το νερό της βροχής εκπλένει τις εν λόγω περιοχές προκαλεί ρύπανση του εδάφους και των γειτονικών υδάτινων σωμάτων. Ένα παράδειγμα της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι η περιοχή Potok Szczygłowski στη λεκάνη απορροής του Odra (Gzyl, et al., 2017).

Η εξόρυξη άνθρακα στη λεκάνη απορροής της Άνω Σιλεσίας έχει και άλλη μία επίπτωση στο έδαφος. Οι παλιές σήραγγες ενδέχεται να καταρρεύσουν, με αποτέλεσμα να καταστραφούν τα στρώματα του υπεδάφους. Στις περισσότερες τοποθεσίες απόρριψης λαμβάνουν χώρα ενδόθερμες διεργασίες, οι οποίες ως αποτέλεσμα παράγουν μια ποικιλία από αέριους, υγρούς και στερεούς ρύπους σε αναερόβιες συνθήκες, όπως η πίσσα (bitumen) με παρόμοιες χημικές ιδιότητες με τις πίσσες άνθρακα. Τα θερμά σημεία επιφάνειας που σχηματίζονται χαρακτηρίζονται από υψηλή υγρασία, ισχυρή οσμή πίσσας, κρούστα αποτελούμενη από ορυκτά και απουσία βλάστησης. Άλλη μία επίπτωση της εξόρυξης στο έδαφος στη λεκάνη απορροής άνθρακα της Άνω Σιλεσίας είναι η αύξηση της περιεκτικότητας ραδονίου στα αέρια εδάφους (soil gas). Είχε υποτεθεί ότι οι μεταβολές στις συγκεντρώσεις ραδονίου στο υπέδαφος σχετίζονται με σεισμικά φαινόμενα μικρής έκτασης που προκαλούνται από τη βιομηχανία εξόρυξης και προγραμματίστηκαν μετρήσεις ώστε να βρεθεί η πιθανή σχέση μεταξύ τους. Μετά από ανάλυση γύρω από τους χώρους εξόρυξης αποδείχθηκε από τους Wysocka και Chalupnik η εν λόγω συσχέτιση (Gzyl, et al., 2017).

2.3 Απορρίψεις νερού εξόρυξης

Κατά την εξόρυξη του άνθρακα πολλά ορυχεία απορρίπτουν υδατικά απόβλητα υψηλής συγκέντρωσης σε ορυκτά άλατα. Η αλατότητα των υδάτων μετράται με τις συγκεντρώσεις των ιόντων χλωρίου (Cl^-) και των θειϊκών ιόντων (SO_4^{2-}). Κατά κανόνα, οι συγκεντρώσεις αλάτων στο ακατέργαστο νερό υπολογίζεται ως ολικά διαλυμένα στερεά (TDS) σε g/L νερού. Ανάλογα με το βαθμό αλατότητας το ακατέργαστο νερό ταξινομείται σε 4 κατηγορίες: (1) γλυκό νερό συγκέντρωσης 0,5-3 g/L, (2) υφάλμυρο νερό συγκέντρωσης 3-20 g/L, αλμυρό νερό συγκέντρωσης 20-50 g/L και άλμη με συγκέντρωση άνω των 50 g/L.

Όλα τα ορυχεία λιθάνθρακα στην περιοχή του Katowice, στην Άνω Σιλεσία, απορρίπτουν το νερό από το υπέδαφος στους ποταμούς. Από 32 ανθρακωρυχεία το νερό οδηγείται στη λεκάνη απορροής του ποταμού Wisła. Τα μισά από αυτά τα ορυχεία απορρίπτουν αλμυρό νερό (1.8-42 g/L). Άλλα 36 ανθρακωρυχεία απορρίπτουν στη λεκάνη απορροής του Odra. Από αυτά 31 απορρίπτουν αλμυρό νερό. Από τα 400 εκατομμύρια κυβικά μέτρα νερού που αντλήθηκε από τα ανθρακωρυχεία το 1989, περίπου τα δύο τρίτα θεωρήθηκαν κατάλληλα για χρήση, με το υπόλοιπο ένα τρίτο να έχει θεωρηθεί εξαιρετικά υψηλής αλατότητας (Andersson, 2004). Το πρόβλημα με την περιοχή του Katowice οφείλεται στο γεγονός ότι οι φλέβες του κοιτάσματος άνθρακα βρίσκονται πλησίον υδάτινων σωμάτων μεταξύ στρωμάτων ψαμμίτη και με

την αύξηση του βάθους αυξάνεται και η αλατότητα. Σε ορισμένα από τα βαθύτερα ορυχεία το νερό είναι τρεις φορές πιο αλμυρό από το θαλασσινό. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 η ημερήσια απόρριψη αλάτων έφτανε τους 7000 τόνους. Το 1992 οι απορρίψεις περιορίστηκαν στους 4800 τόνους. Το μεγαλύτερο ποσοστό του αλμυρού νερού (περίπου τα δύο τρίτα) καταλήγει στο ποταμό Wisła, το υπόλοιπο στον Odra. Η αλατότητα του νερού στα νότια τμήματα αυτών των δύο ποταμών είναι υψηλότερη από την αλατότητα της Βαλτικής Θάλασσας³ (Andersson, 2004).

Οι απορρίψεις νερού εξόρυξης επιδρούν σημαντικά στην ποιότητα και την ποσότητα των επιφανειακών υδάτων στη λεκάνη απορροής της Άνω Σιλεσίας. Τα σημεία απόρριψης συνήθως βρίσκονται πλησίον πηγών μικρών ποταμών και χειμάρρων, όπου παρατηρούνται έντονες εισροές νερού στα υπόγεια ορυχεία. Οι απορρίψεις νερών εξόρυξης επηρεάζουν την ποσότητα και την ποιότητα των επιφανειακών υδάτων και κυρίως τα μικρά ρεύματα, στα οποία σημαντικές μεταβολές στην υδρολογική τους κατάσταση προκαλούνται από μεγάλες ποσότητες ρυπαντών σε μεγάλο όγκο απορρίψεων. Οι επιπτώσεις περιλαμβάνουν τη διαταραχή του φυσικού υδατικού περιβάλλοντος και σε ακραίες περιπτώσεις την καταστροφή της χλωρίδας και της πανίδας στους ποταμούς. Η αλατότητα των επιφανειακών υδάτων περιορίζει τη δυνατότητα χρήσης του νερού των ποταμών για ύδρευση, άρδευση και βιομηχανικές δραστηριότητες (Gzyl, et al., 2017).

Η αστικοποίηση της λεκάνης απορροής σε συνδυασμό με το μικρό μέγεθος και τη χαμηλή φυσική ροή των ρευμάτων καθιστούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες στα ποτάμια εξαιρετικά ασταθείς. Οι μεταβολές στην υδρολογική κατάσταση αφορούν τη μείωση της μέσης και ελάχιστης ροής και την αύξηση της μέγιστης. Από τις διάφορες χημικές παραμέτρους των νερών εξόρυξης, η πιο σημαντική για την περίπτωση της λεκάνης απορροής άνθρακα της Άνω Σιλεσίας είναι η αλατότητα, καθώς είναι ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επίδραση στην επιφάνεια των επιφανειακών υδάτων. Για αυτό το λόγο τα ορυχεία δεν έχουν την υποχρέωση να αναφέρουν σε σταθερή βάση όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν την ποιότητα των υδάτων, αλλά υποχρεώνονται να ελέγχουν και να αναφέρουν σε σταθερή βάση τις συγκεντρώσεις θεϊκών ιόντων και ιόντων χλωρίου, καθώς και τη ροή του νερού που απορρίπτεται. Αυτές οι παράμετροι είναι και οι πιο σημαντικές για τα ίδια τα ορυχεία καθώς από τις τιμές τους υπολογίζονται τα περιβαλλοντικά τέλη, τα οποία είναι ανάλογα του φορτίου αλάτων. Οι περισσότερες εταιρίες απορρίπτουν νερά εξόρυξης με υψηλή περιεκτικότητα σε θεϊκά ιόντα και ιόντα χλωρίου και το επίπεδο της αλατότητας καθιστά αδύνατη την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων (σύμφωνα με την Οδηγία Πλαίσιο για το Νερό της ΕΕ) των επιφανειακών υδάτων χωρίς τη θέσπιση κατάλληλης απαλλαγής. Στην πραγματικότητα το επίπεδο ιόντων χλωρίου και θεϊκών ιόντων από μόνο του είναι λιγότερο επιβλαβές για το υδάτινο περιβάλλον από ότι οι απότομες μεταβολές στις συγκεντρώσεις τους. Αυτό οφείλεται στα βαθμιαία φαινόμενα προσαρμογής βακτηρίων, άλγης, ασπόνδυλων και ψαριών και ολόκληρων μικτών κοινοτήτων οργανισμών στην αυξημένη αλατότητα. Άλλη μία σημαντική παράμετρος είναι το pH

³ Κατά μέσο όρο η αλατότητα του νερού της Βαλτικής Θάλασσας δεν ξεπερνά τα 10 g/L.

του απορριπτόμενου νερού εξόρυξης, καθώς η ευαισθησία του υδάτινου περιβάλλοντος αυξάνεται όσο αυξάνεται η οξύτητα του νερού (Gzyl, et al., 2017).

Οι συνέπειες της αλατότητας μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: (1) υποβάθμιση του υδάτινου οικοσυστήματος, (2) αύξηση του κόστους επεξεργασίας για την παραγωγή πόσιμου νερού και (3) αύξηση του κόστους συντήρησης των υποδομών. Οι συνέπειες που εμπίπτουν στη δεύτερη κατηγορία οφείλονται και στην έλλειψη υδάτινων πόρων, όσον αφορά το γλυκό νερό, η οποία χαρακτηρίζει την Πολωνία καθώς το ποσοστό των διαθέσιμων υδάτινων πόρων της χώρας είναι από τα χαμηλότερα στην Ευρώπη. Τα επιφανειακά υδάτινα σώματα είναι η μόνη πηγή πόσιμου νερού για πολλές πόλεις, γεγονός που καθιστά την Πολωνία ευάλωτη στη ρύπανση των επιφανειακών υδάτων. Σχετικά με τη φθορά των υποδομών υπολογίζεται ότι η οικονομική ζημία λόγω της διάβρωσης από το νερό υψηλής αλατότητας μπορεί να φτάνει τα 100 εκατομμύρια δολάρια. Το συγκεκριμένο ποσό αποτελεί και τη μεγαλύτερη συνιστώσα των συνολικών ζημιών λόγω της ρύπανσης των υδάτων στην Πολωνία (0,5-0,8% του ΑΕΠ) (Andersson, 2004). Στην πόλη Kraków η υφαλμύριση των υδάτων προκαλεί σημαντικά προβλήματα σε μεγάλο αριθμό τοπικών επιχειρήσεων. Καθώς αυτές οι επιχειρήσεις εξαρτώνται από το νερό του Wisła για την κάλυψη των λειτουργικών αναγκών τους, αναγκάζονται σε όλο και συχνότερη αλλαγή των σωληνώσεων λόγω της φθοράς που προκαλείται. Η υφαλμύριση του Wisła αποτελεί πρόβλημα και για την πόλη Warszawa (Andersson, 2004).

Ακολουθούν πίνακες και διαγράμματα με τις σημαντικότερες ποιοτικές και ποσοτικές παραμέτρους του νερού εξόρυξης από 53 ορυχεία (σε λειτουργία και εγκαταλειμμένα με συνεχή αποξήρανση) στη λεκάνη απορροής άνθρακα της Άνω Σιλεσίας σε διάστημα 11 ετών.

Πίνακας 3: Στατιστικά δεδομένα για το φορτίο ιόντων χλωρίου (mg/έτος) (Gzyl, et al., 2017)

Έτη	Εκατοστημόρια				
	5°	25°	50° (Διάμεσος)	75°	95°
2002	0	739	5321	17830	222241
2003	1,1	593	5106	17120	251113
2004	0,3	976	4531	18957	221872
2005	2,4	809	7196	15892	221816
2006	14,4	799	6351	19232	210386
2007	41,5	957	6017	16830	222518
2008	7,5	725	6829	16987	158973
2009	10,3	615	6391	18726	141153
2010	3,1	843	7210	19395	179675
2011	3,7	815	7515	19473	111491
2012	2,2	937	7426	19485	149270
2002-2012	3,8	813	6362	18335	134786

Πίνακας 4: Στατιστικά δεδομένα για το φορτίο θειϊκών ιόντων (mg/έτος) (Gzyl, et al., 2017)

Έτη	Εκατοστημόρια				
	5°	25°	50° (Διάμεσος)	75°	95°
2002	0,0	118	1054	3.113	13.634
2003	0,3	105	1329	3.779	14.585
2004	0,1	121	1040	3.672	13.167
2005	20,1	185	966	3.603	14.055
2006	23,0	266	951	3.292	13.284
2007	29,9	265	974	3.096	14.368
2008	27,1	255	710	2.867	13.378
2009	25,8	252	840	3.071	12.823
2010	12,4	292	1036	3.829	15.404
2011	27,1	298	924	4.061	11.841
2012	22,6	314	996	2.938	13.866
2002-2012	28,4	247	986	3.290	11.470

Πίνακας 5: Στατιστικά δεδομένα για το σύνολο ιόντων χλωρίου και θειϊκών ιόντων (mg/έτος) (Gzyl, et al., 2017)

Έτη	Εκατοστημόρια				
	5°	25°	50° (Διάμεσος)	75°	95°
2002	0,0	2.061	7.708	20.614	233.448
2003	1,4	2.509	7.847	21.739	262.389
2004	0,4	2.307	8.088	21.154	232.672
2005	36,2	2.182	8.333	18.049	233.419
2006	45,4	2.446	8.406	19.785	222.326
2007	100,5	2.035	8.337	17.040	234.218
2008	39,0	2.263	9.309	18.555	165.682
2009	31,9	1.996	11.011	21.684	146.691
2010	16,8	2.478	8.936	21.055	187.975
2011	37,6	3.081	10.055	20.625	118.936
2012	28,4	2.253	9.281	21.720	158.361
2002-2012	39,8	2.403	8.936	19.864	139.814

Πλέον στη ΛΑΑΑΣ βρίσκονται εν λειτουργία 18 ορυχεία και αρκετά εκτός λειτουργίας, στα περισσότερα εξ αυτών εξακολουθεί η άντληση νερού. Οι συνολικές απορρίψεις υδατικών αποβλήτων ανθρακωρυχείων στη ΛΑΑΑΣ είναι περίπου 350.000 m³ την ημέρα, με την ποσότητα των ιόντων χλωρίου και θειϊκών ιόντων να ανέρχεται σε περίπου 4.000 τόνους ημερησίως. Από τα 18 ορυχεία τα 16 απορρίπτουν τα απόβλητά τους χωρίς να τα υποβάλλουν σε επεξεργασία. Τα υδατικά απόβλητα από αυτά τα ορυχεία απορρίπτονται κυρίως στα άνω τμήματα των ποταμών Wisła και Odra (Xevgenos, et al., 2019).

Όσον αφορά τις επικείμενες μεταβολές στο φορτίο των ιόντων χλωρίου και των θειϊκών ιόντων στα επιφανειακά ύδατα, πρέπει να ληφθούν υπ' όψη δύο γενικότερα φαινόμενα: ο αριθμός των ενεργών ορυχείων μειώνεται με τη πάροδο του χρόνου, ενώ το βάθος συγκεκριμένων ορυχείων αυξάνεται όσο προχωρούν οι εργασίες. Το πρώτο οδηγεί στη μείωση του φορτίου όλων των ρυπαντών, ενώ το δεύτερο προκαλεί αύξηση, κυρίως στο φορτίο των ιόντων χλωρίου. Παρ' όλα αυτά το συνολικό φορτίο διατηρεί σχετικά σταθερές τιμές καθ' όλη την περίοδο των 11 χρόνων. Συνεπώς, το συνολικό φορτίο των αλάτων στο νερό εξόρυξης που απορρίπτεται στους επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες σε όλη τη λεκάνη απορροής άνθρακα της Άνω Σιλεσίας μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μια σχετικά σταθερή τιμή, παρά τις τοπικές διακυμάνσεις οι οποίες θα πρέπει να αντιμετωπιστούν μεμονωμένα. Σε αντίθεση με τις χρονικές, οι χωρικές διακυμάνσεις είναι πολύ σημαντικές. Δύο υδρολογικές περιοχές μπορούν να διακριθούν στη λεκάνη απορροής άνθρακα της Άνω Σιλεσίας και το όριο μεταξύ αυτών των δύο υποπεριοχών ακολουθεί την έκταση των συνεχών κοιτασμάτων του Μειόκαινου. Στο βορειοανατολικό τμήμα της λεκάνης απορροής άνθρακα της Άνω Σιλεσίας, όπου τα μειοκαινή αργιλικά ορυκτά απουσιάζουν, η διείδυση λόγω της καθίζησης είναι σημαντική. Ως αποτέλεσμα, στα ορυχεία παρατηρείται υψηλή υγρασία, αλλά η αλατότητα των νερών εξόρυξης είναι χαμηλή, καθώς τα ανθρακοφόρα πετρώματα έχουν ήδη εκπλυθεί από τα συνεχώς κυκλοφορόντα νερά, ακόμα και πριν από δραστηριότητες εξόρυξης. Κατ' επέκταση το φορτίο αλάτων στο νερό εξόρυξης είναι σχετικά χαμηλό. Στο νοτιοανατολικό τμήμα, όπου τα μειοκαινή αργιλικά πετρώματα σχηματίζουν ένα αδιαπέραστο στρώμα, η αρχική αλατότητα των υδάτων λόγω του ανθρακοφόρου υδροφόρου ορίζοντα παρέμεινε σταθερή (Gzyl, et al., 2017).

Το 2014 έγινε μια λεπτομερής αξιολόγηση του αντίκτυπου των απορρίψεων νερού υψηλής αλατότητας στις περιοχές του Μικρού Βιστούλα και του Άνω Odra. Μελετήθηκαν 177 επιφανειακά υδάτινα σώματα. Η αξιολόγηση του αντίκτυπου της εξόρυξης στη φυσική και χημική κατάσταση των επιφανειακών υδάτινων σωμάτων βασίστηκε σε δεδομένα της Κρατικής Περιβαλλοντικής Παρακολούθησης για τα έτη 2010 – 2012. Οι συγκεντρώσεις ιόντων χλωρίου και θειϊκών ιόντων για κάθε επιφανειακό υδάτινο σώμα (ΕΥΣ) αναφέρονται σε σχέση με τις παραμέτρους οι οποίες περιγράφονται ως «καλές» συνθήκες: 300 mg/L για τα ιόντα χλωρίου και 250 mg/L για τα θειϊκά ιόντα. Είναι σημαντικό να ληφθεί υπ' όψη η έλλειψη δεδομένων σε 25 ΕΥΣ στην περιοχή του Μικρού Βιστούλα και 42 ΕΥΣ στην περιοχή του Άνω Odra, τα οποία αποτελούν και το 37.8% των ΕΥΣ που μελετήθηκαν. Τα περισσότερα από τα ΕΥΣ που μελετήθηκαν με τα υπάρχοντα δεδομένα είχαν χαμηλότερη συγκέντρωση ιόντων χλωρίου από αυτή που ενδείκνυται (78 από τα 110 ΕΥΣ). Το ισχύει και για τη συγκέντρωση θειϊκών ιόντων, η οποία βρέθηκε χαμηλότερη από αυτή που ενδείκνυται σε 83 από τα 110 ΕΥΣ. Οι συγκεντρώσεις και των δύο τύπων ιόντων που απαιτούνται για την ύπαρξη καλών συνθηκών παρατηρήθηκαν σε 76 από τα 110 ΕΥΣ (Gzyl, et al., 2017).

Όπως υποδεικνύεται από την ανάλυση, ο αντίκτυπος των δραστηριοτήτων εξόρυξης στις φυσικές και χημικές παραμέτρους των ΕΥΣ ταυτοποιήθηκε σε 22 από τα 85 ΕΥΣ στην περιοχή του Μικρού Βιστούλα και σε 15 από τα 92 ΕΥΣ στην περιοχή του Άνω

Odra. Παράλληλα, τα όρια συγκεντρώσεων των ιόντων χλωρίου και των θειϊκών ιόντων, τα οποία υποδεικνύονται για την καλή κατάσταση ξεπεράστηκαν σε 19 ΕΥΣ στην περιοχή του Μικρού Βιστούλα και 12 στην περιοχή του Άνω Odra. Αυτό σημαίνει ότι το 15% των ΕΥΣ στις προαναφερθείσες περιοχές βρίσκεται σε δυσμενή κατάσταση λόγω της απόρριψης νερού από εξορύξεις (Gzyl, et al., 2017).

Το μέγιστο επιτρεπτό όριο συγκέντρωσης θειϊκών ιόντων στο νερό των ποταμών είναι 0,4 g/L. Στον ποταμό Wisła η συγκεκριμένη συγκέντρωση είναι άνω του ορίου μέχρι και την πόλη Kazimierz, η οποία απέχει πάνω από 300 χιλιόμετρα από τα αντίστοιχα ανθρακωρυχεία. Η πόλη Κρακόβ βρίσκεται εκατοντάδες χιλιόμετρα ανατολικά του Katowice, αλλά η συγκέντρωση των θειϊκών ιόντων αγγίζει τα 2,2 g/L. Επίσης, στο ένα τρίτο της συνολικής έκτασης του ποταμού Odra (280 χιλιόμετρα) παρατηρείται αυξημένη αλατότητα⁴. Η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου στον ποταμό Wisła κοντά στα ορυχεία Piast, Ziemowit και Czczott⁵ αγγίζει τα 5,55 g/L. Η μέση συγκέντρωση στην πόλη Bierń Nowy, που βρίσκεται πλησίον αυτών των ορυχείων είναι 7,3 g/L (Andersson, 2004).

Πίνακας 6: Ποιοτική σύσταση των υδατικών αποβλήτων των ανθρακωρυχείων που μελετήθηκαν

Ανθρακωρυχείο	Ποιοτική σύσταση	Πηγή
Czczott, Katowice	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	(Andersson, 2004)
Piast, Katowice	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Ράδιο	(Chalupnik, et al., 2001)
Ziemowit, Katowice	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	(Andersson, 2004)
Barbara, Mikołów	Οργανικές ενώσεις, NH ₄ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	(Kapusta, et al., 2013)
Murcki, Czulów	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , βαρέα μέταλλα	(Lewin & Smoliński, 2006)

Γενικά, προβλέπεται ότι στο μέλλον ο συνολικός όγκος του νερού που αντλείται από τα ορυχεία θα μειωθεί, ενώ οι συγκεντρώσεις των ιόντων χλωρίου και θειϊκών ιόντων θα αυξηθούν. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του μέσου βάθους εξόρυξης. Η εμπειρία δείχνει ότι καθώς το βάθος αυξάνεται, αυξάνεται και η αλατότητα, ενώ η ροή του νερού προς τα χαμηλότερα στρώματα είναι πολύ μικρότερη. Αυτές οι δύο δράσεις καθιστούν τη σταθερή αύξηση της αλατότητας στο μέλλον το πιο πιθανό σενάριο (Gzyl, et al., 2017). Επίσης, καθώς αυξάνονται οι ανάγκες της κοινωνίας για ενέργεια αναμένεται να αυξηθεί και η εξορυκτική δραστηριότητα και σα συνέπεια αυτού και η υφαλμύριση των υδάτων (Cañedo-Argüelles, et al., 2012).

Ένα πρόσθετο πρόβλημα είναι τα υψηλά επίπεδα ραδίου που παρουσιάζονται στα κοιτάσματα άνθρακα. Κατά την άντληση το ράδιο περνά στα υδατικά απόβλητα. Σε ορισμένα ορυχεία η συγκέντρωση του ραδίου μπορεί να αγγίζει τα 17000 Bq ανά κυβικό μέτρο νερού. Συγκριτικά το πόσιμο νερό στην Πολωνία εμφανίζει συγκέντρωση 110 Bq κατά μέσο όρο. Αρνητικό είναι το γεγονός ότι ο χρόνος ημιζωής του ραδίου

⁴ Το συνολικό μήκος του ποταμού Odra είναι 840 χιλιόμετρα. Από αυτά τα 726 βρίσκονται εντός πολωνικού εδάφους.

⁵ Πρόκειται για τα ορυχεία με τις μεγαλύτερες απορρίψεις νερού υψηλής αλατότητας σύμφωνα με τον (Andersson, 2004).

είναι μερικές χιλιάδες χρόνια. Το 1994 τα επίπεδα ραδίου ξεπερνούσαν το επιτρεπτό όριο σε 26 ορυχεία (Andersson, 2004).

Πολλές εργαστηριακές έρευνες, πειράματα πεδίου και μελέτες οικολογικής παρακολούθησης υποδεικνύουν ότι η υψηλή αλατότητα μπορεί να προκαλέσει μειωμένη ανάπτυξη ή ακόμα και αυξημένη θνησιμότητα στη χλωρίδα και τη πανίδα. Η αλατότητα του εδάφους επηρεάζει όχι μόνο τα χερσαία οικοσυστήματα και την ανάπτυξη των καλλιεργειών, αλλά και το έδαφος μόνιμα. Τα εδάφη που επηρεάζονται από τα άλατα έχουν χαμηλότερη γονιμότητα μέσω τριών πιθανών επιδράσεων στα φυτά: (1) μείωση της πρόσληψης νερού λόγω της μείωσης του ωσμωτικού δυναμικού, (2) τοξική επίδραση από διαφορετικά ιόντα ανάλογα με το pH του εδάφους και (3) δυσκολία πρόσληψης θρεπτικών συστατικών. Η αύξηση της αλατότητας του εδάφους θεωρείται επίσης αιτία ερημοποίησης (Payen, et al., 2016). Η έλλειψη αρκετής ποσότητας γλυκού νερού δυσχεραίνει την αντιστροφή των επιπτώσεων στο έδαφος. Η αύξηση της αλατότητας του νερού προκαλεί αλλαγή στη σύνθεση των ειδών των φυκών και του ζωοπλαγκτόν και οδηγεί στην εξαφάνιση διαφόρων ειδών χλωρίδας στο νερό και την ακτή. Επιπροσθέτως, η υφαλμύριση μπορεί να ενισχύσει την ανάπτυξη ξένων ειδών, ενώ παράλληλα να εμποδίσει την ανάπτυξη των τοπικών (Cañedo-Argüelles, et al., 2012). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα οικοσυστήματα μακροπρόθεσμα προσαρμόζονται και εξελίσσονται σε είδη ανθεκτικά στις συνθήκες υψηλής αλατότητας. Επηρεάζονται όμως και οι ανθρώπινες δραστηριότητες καθώς η ρύπανση των υδάτινων σωμάτων γλυκού νερού με άλατα τα καθιστά ακατάλληλα για ύδρευση, άρδευση και άλλες δραστηριότητες. Αυτή η ποιοτική αλλοίωση των υδάτινων πόρων μπορεί να είναι μη αναστρέψιμη, για παράδειγμα, για έναν υδροφόρο ορίζοντα που χαρακτηρίζεται μόνιμα από υψηλή αλατότητα, επηρεάζοντας έτσι τη χρήση των υδάτινων πόρων από τις μελλοντικές γενιές (Payen, et al., 2016). Υπάρχουν επίσης ανησυχίες σχετικά με την απελευθέρωση μετάλλων που προέρχονται από τη διάβρωση και τη χρήση ορισμένων προσθέτων (Zhou, et al., 2012). Σύμφωνα με μελέτες η απόρριψη αποβλήτων εξόρυξης στα επιφανειακά υδάτινα σώματα έχει τη δυνατότητα να βλάψει τις βιολογικές κοινότητες και ακόμη και να προκαλέσει τη συσσώρευση τοξικών χημικών ουσιών σε μακροάλη, μύδια κλπ.

2.4 Διάθεση πετρωμάτων

Κάθε τόνος παραγόμενου λιθάνθρακα συνοδεύεται από την παραγωγή περίπου μισού τόνου αποβλήτων πετρωμάτων και άλλων υλικών. Μεγάλες ποσότητες αποβλήτων προκύπτουν επίσης κατά την προετοιμασία του άνθρακα. Το 1989, το μεγαλύτερο μέρος των αποβλήτων διατέθηκε σε ισοπέδωση και ανάκτηση γης (43%) και σε χωματερές (38%). Περίπου το 12% αποθηκεύτηκε υπογείως. Ο τομέας του λιθάνθρακα έχει προβλήματα με την εξεύρεση πρόσθετου χώρου απόθεσης (Andersson, 2004).

2.5 Καθίζηση εδάφους

Κάθε μορφή κίνησης υπογείως εντός των ορυχείων προκαλεί σοβαρές φθορές και στην επιφάνεια της Άνω Σιλεσίας. Αποτελέσματα αυτών των κινήσεων είναι ρωγμές σε κτήρια και φθορές σε υποδομές, όπως δρόμους, σωληνώσεις, καλώδια παροχής ηλεκτρικού ρεύματος και σιδηροδρομικές γραμμές. Στα μέσα της δεκαετίας του 1980 υπέστησαν φθορές 34000 διαμερίσματα. Μεταξύ 1980 και 1986 σημειώθηκαν πάνω από 700 σεισμοί στην Άνω Σιλεσία (Andersson, 2004).

2.6 Ατμοσφαιρική ρύπανση

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 στην Πολωνία καίγονταν 150 εκατομμύρια τόνοι άνθρακα ετησίως, προκαλώντας εκπομπές διοξειδίου του θείου, αιωρούμενων σωματιδίων και διοξειδίου του άνθρακα. Ένα μικρό ποσοστό (περίπου 1%) αυτών των εκπομπών προερχόταν από την παραγωγή ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών των ανθρακωρυχείων (Andersson, 2004).

3 Νομοθετικό πλαίσιο διάθεσης υγρών αποβλήτων

Στην Ευρώπη δεν έχουν θεσπιστεί ενιαίες ποιοτικές προδιαγραφές για τη συγκέντρωση αλάτων νερού εξόρυξης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης η υφαλμύριση δε θεωρείται σημαντικό πρόβλημα, παρά μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές. Συνήθως, όπου εντοπίζεται πρόβλημα λόγω απορρίψεων νερού υψηλής αλατότητας, εφαρμόζονται μεθοδολογίες εκτίμησης επιπτώσεων από τους αρμόδιους φορείς, σε τοπικό επίπεδο (Cañedo-Argüelles, et al., 2012).

Το κυριότερο νομοθετικό εργαλείο προστασίας και διαχείρισης των υδάτων στην ΕΕ είναι η Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα (ΟΠΥ) (Οδηγία 2000/60/ΕΚ). Στόχος της Οδηγίας Πλαισίου για τα Ύδατα είναι η επίτευξη της «καλής» κατάστασης όλων των υδάτων στην Ευρώπη.

Η Πολωνία έχει σχετικά μεγάλη παράδοση στον τομέα της διαχείρισης των υδάτων. Το πρώτο νομικό πλαίσιο για τη δραστηριότητα αυτή καθορίστηκε στον Νόμο περί Υδάτων (Water Law Act) του 1922. Σήμερα ισχύει ο Νόμος περί Υδάτων του 1974. Έχει τροποποιηθεί πολλές φορές στη δεκαετία του 1990.

Το σύστημα της Πολωνίας για τη διαχείριση και την προστασία των υδάτων βασίζεται σε ένα συνδυασμό νομοθετικών και οικονομικών μέσων και έχει τρεις συνιστώσες: (1) πρότυπα ποιότητας και σύστημα αδειοδότησης, (2) μέτρα επιβολής των νομοθετικών διατάξεων και (3) περιβαλλοντικά τέλη και επιχορηγήσεις. Τα τμήματα προστασίας του περιβάλλοντος στο επαρχιακό επίπεδο επιτρέπουν τη χρήση νερού για οικονομικούς σκοπούς. Οι άδειες για ιδιαίτερη χρήση του νερού καθορίζουν τις επιτρεπόμενες ποσότητες υδροληψίας, καθορίζουν ποιοτικές παραμέτρους για τα υδατικά απόβλητα που απορρίπτονται στα επιφανειακά ύδατα ή στο έδαφος και εισάγουν περιορισμούς στη χρήση ύδατος που προβλέπεται από το νόμο. Περιβαλλοντικά τέλη πληρώνονται τόσο για τη χρήση του νερού όσο και για τις απορρίψεις των υδατικών αποβλήτων. Τα τέλη εισπράττονται από τις περιβαλλοντικές αρχές και αποτελούν σημαντική πηγή εισοδήματος για τα περιβαλλοντικά κονδύλια: το Εθνικό Ταμείο Προστασίας του Περιβάλλοντος και τη Διαχείριση των Υδάτων (National Fund for Environmental Protection and Water Management), τα επαρχιακά Ταμεία για την Προστασία του Περιβάλλοντος και τη Διαχείριση των Υδάτων (Funds for Environmental Protection and Water Management) (16) και τα δημοτικά περιβαλλοντικά ταμεία (2460). Τα εν λόγω κονδύλια χρηματοδοτούν, μέσω soft-loans ή επιχορηγήσεων, σχεδόν το 50% των ετήσιων επενδύσεων για την προστασία του περιβάλλοντος στην Πολωνία. Η ιδέα πίσω από τη δημιουργία των συγκεκριμένων ταμείων ήταν να υποχρεωθεί η βιομηχανία εξόρυξης άνθρακα να εξοικονομήσει χρήματα για μελλοντικές επενδύσεις πάνω στην προστασία των υδάτων από ρύπανση. Για παράδειγμα η κατασκευή της μονάδας αφαλάτωσης των υδατικών αποβλήτων από τα ορυχεία Piast, Ziemowit και Czczott είχε υπολογιστεί ότι θα κόστιζε 500 εκατομμύρια δολάρια στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Ωστόσο θα αποτελούσε μια οικονομικά βιώσιμη επένδυση,

λόγω της αποφυγής τελών και προστίμων. Συγκεκριμένα, με τη συμπερίληψη των εξόδων που θα αποφεύγονταν, ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης της επένδυσης αυξήθηκε από 8% σε 23,1%. Μέχρι το 1989 το τέλος ήταν ένα συμβολικό ποσό. Το 1989 αυξήθηκε σε 0,53 δολάρια ανά τόνο⁶. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, το τέλος αυξήθηκε περισσότερο από 1000% και έφτασε τα 7,89 δολάρια ανά τόνο. Ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι δεν υπήρξε καμία αντίδραση από τις βιομηχανίες για αυτή τη μεγάλη αύξηση. Αυτό οδήγησε σε δραστική αύξηση των εισοδημάτων των περιβαλλοντικών ταμείων. Χάρη σε αυτό, τα περιβαλλοντικά ταμεία θα μπορούσαν να αφιερώσουν πολύ περισσότερα χρήματα στις επενδύσεις για τη διαχείριση και την προστασία των υδάτων από ό,τι είχαν στη δεκαετία του 1980. Τα τέλη συνέχιζαν να αυξάνονται ανάλογα με τον πληθωρισμό. Στις αρχές του 1996 το τέλος έφτασε τα 55,15 δολάρια ανά τόνο. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η ύπαρξη των τελών επηρεάζει την τιμή του άνθρακα και κατ' επέκταση την οικονομική επίδοση των βιομηχανιών. Το 1996 τα τέλη αποτελούσαν το 13,6% της τιμής του άνθρακα. Την ίδια χρονιά ολοκληρώθηκαν περισσότερες από 400 μονάδες επεξεργασίας υδατικών αποβλήτων. Αυτό θα μπορούσε να συγκριθεί με το 1980 όταν τέθηκαν σε λειτουργία 56 τέτοια εργοστάσια. Πολλά νέα εργοστάσια βρίσκονται υπό κατασκευή στη χώρα (Andersson, 2004).

Πίνακας 7: Τέλη για τη ρύπανση των υδάτων με άλατα, ανά έτος και σε δολάρια ανά τόνο ιόντων χλωρίου και θειϊκών ιόντων (Andersson, 2004)

Έτος	Τέλος (USD/τόνο)	Έτος	Τέλος (USD/τόνο)
1989	0,53	1993	30,31
1990	7,89	1994	39,61
1991	23,62	1995	45,37
1992	40,35	1996	55,15

Μέχρι το 1992 το Εθνικό Ταμείο είχε συγκεντρώσει περίπου το 5-10% των τελών που όφειλαν να πληρώσουν τα ανθρακωρυχεία για της απορρίψεις αλατούχων αποβλήτων. Το 1996 το χρέος των βιομηχανιών εξόρυξης από τα απλήρωτα τέλη άγγιξε τα 300 εκατομμύρια δολάρια. Υπάρχουν ενδείξεις ότι το έτος 1992-1993 η κυβέρνηση είχε απαλλάξει ανεπίσημα τις βιομηχανίες εξόρυξης λιθάνθρακα από τα περιβαλλοντικά τέλη. Τον Ιούλιο του 1996 ξεκίνησαν διαπραγματεύσεις μεταξύ του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Φυσικών Πόρων και Δασοκομίας με το Υπουργείο Βιομηχανίας και Εμπορίου για την επίλυση του προβλήματος του χρέους των ανθρακωρυχείων. Μετά από συμβιβασμό κατέληξαν στη μείωση των τελών για την απόρριψη αλατούχων υδατικών αποβλήτων κατά 50%.

Οι οικονομικές οντότητες που δεν πληρούν τις περιβαλλοντικές τους υποχρεώσεις όπως ορίζονται στις άδειες πρέπει να πληρώνουν πρόστιμα. Τα πρόστιμα είναι έως δέκα φορές υψηλότερα από τα τέλη. Τα πρόστιμα επιβάλλονται από την Κρατική Ε-

⁶ Τα τέλη επιβάλλονται ανά τόνο ιόντων χλωρίου και θειϊκών ιόντων.

πιθεώρηση για την Περιβαλλοντική Προστασία (SIEP) και συγκεντρώνονται στα περιβαλλοντικά κονδύλια. Η SIEP έχει το δικαίωμα να επιθεωρεί τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις και να μετρά ή να ελέγχει την ποιότητα των υδατικών αποβλήτων που απορρίπτονται στα επιφανειακά ύδατα. Η λειτουργία των ανθρακωρυχείων που δε συμμορφώνονται με τις περιβαλλοντικές υποχρεώσεις τους μπορεί να τερματιστεί προσωρινά από τη SIEP.

Η SIEP έχει λιγότερη επιρροή στον τομέα του άνθρακα από ότι σε άλλους τομείς. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο γεγονός ότι η Περιβαλλοντική Επιθεώρηση είναι υπεύθυνη μόνο για την επιβολή μέτρων προστασίας του περιβάλλοντος πάνω από την επιφάνεια και όχι εντός των ανθρακωρυχείων. Υπάρχει ένας ειδικός νόμος εξόρυξης ο οποίος ορίζει ότι στο εσωτερικό των ανθρακωρυχείων η Υψηλότερη Μεταλλευτική Αρχή (Wyższy Urząd Górniczy ή WUG) είναι υπεύθυνη για κάθε είδους επιθεωρήσεις, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος. Η WUG εκδίδει άδειες λειτουργίας για τα ανθρακωρυχεία και είναι το κύριο όργανο για την εποπτεία των ανθρακωρυχείων. Βασικά, όλες οι αποφάσεις που αφορούν τη λειτουργία ενός ανθρακωρυχείου πρέπει να συμφωνηθούν από μια Περιφερειακή Αρχή Μεταλλείων (Okręgowy Urząd Górniczy ή ΟΥΓ). Ένα ανθρακωρυχείο μπορεί να κλείσει μόνο κατόπιν συμφωνίας με το ΟΥΓ. Κατά συνέπεια, το νερό υψηλής αλατότητας γίνεται προβληματισμός για τη SIEP μόνο όταν αντληθεί από τα ανθρακωρυχεία. Επιπροσθέτως, η επιρροή των αρχών της περιφέρειας είναι περιορισμένη όσον αφορά δραστηριότητες που πραγματοποιούνται υπογείως διότι οι περιβαλλοντικές αρχές δεν μπορούν να απαιτήσουν αλλαγές στην τεχνολογία. Ο περιορισμός αυτός ορίζεται στον νόμο περί ορυχείων. Η αποτυχία της επιβολής κυρώσεων πρέπει επίσης να εξεταστεί υπό το πρίσμα ορισμένων χαρακτηριστικών που καθιστούν τον τομέα της εξόρυξης άνθρακα μοναδικό σε σύγκριση με πολλούς άλλους βιομηχανικούς τομείς. Τα παρακάτω παραδείγματα δείχνουν ότι η προστασία του περιβάλλοντος είναι πιο περίπλοκη στην περίπτωση των ανθρακωρυχείων.

- Το νερό πρέπει να αντλείται από τα ανθρακωρυχεία συνεχώς αλλιώς θα πλημμυρίσουν.
- Ένα ανθρακωρυχείο είναι ένας επικίνδυνος χώρος εργασίας. Όταν πρέπει να γίνει επιλογή μεταξύ προστασίας του περιβάλλοντος και ασφάλειας του προσωπικού, η τελευταία έχει πάντα προτεραιότητα.
- Τα υπόγεια υδάτινα σώματα εντός πολλών ορυχείων συνδέονται μεταξύ τους. Εάν ένα ορυχείο βρίσκεται εκτός λειτουργίας και ένα άλλο κοντά στην περιοχή λειτουργεί, το νερό από το κλειστό ορυχείο είναι πιθανό να ρέει σε εκείνο που είναι ακόμα σε λειτουργία. Κάθε απόφαση αλλαγής του συστήματος διαχείρισης των υδάτων ενός ανθρακωρυχείου απαιτεί προσεκτική ανάλυση του πιθανού κινδύνου για τα γειτονικά ανθρακωρυχεία.

Οι κρατικές υδρολογικές και μετεωρολογικές υπηρεσίες πραγματοποιούν συστηματική παρακολούθηση και μετρήσεις των βροχοπτώσεων, των σταδίων και ροών των υδάτων σε ποτάμια και λίμνες. Οι υπηρεσίες παρακολουθούν επίσης την κατάσταση

των υπόγειων υδάτων. Τα συλλεγμένα δεδομένα χρησιμοποιούνται στην προετοιμασία ετήσιων υδατικών ισοζυγίων για επιφανειακά ύδατα για ολόκληρη τη χώρα και ιδιαίτερα για λεκάνες απορροής ποταμών.

Το 1991, δημιουργήθηκαν επτά Περιφερειακά Συμβούλια Διαχείρισης των Υδάτων (Regional Water Management Boards) με στόχο την προετοιμασία για την εισαγωγή της διαχείρισης των υδάτινων πόρων των λεκανών απορροής ποταμών. Το 1997, το σύστημα αυτό εγκρίθηκε από το κοινοβούλιο σε μια τροποποίηση του Νόμου περί Υδάτων. Οι επτά διοικητικές επιτροπές ποταμών, που υπάγονται στο Υπουργείο Προστασίας του Περιβάλλοντος, των Φυσικών Πόρων και της Δασοκομίας, θα είναι οι κύριοι παράγοντες όσον αφορά τα θέματα της διαχείρισης και της ποιότητας των υδάτων. Σημαντικό ρόλο θα διαδραματίσει και το Υπουργείο Γεωργίας και Οικονομίας Τροφίμων, του οποίου οι τομείς εποπτείας θα περιλαμβάνουν αγροτικά συστήματα ύδρευσης και αποχέτευσης, αντιπλημμυρικές επιχωματώσεις, ρύθμιση μικρότερων ποταμών και αλιεία σε γλυκά ύδατα (Andersson, 2004).

Στην Πολωνία, όπως και σε κάθε άλλη χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ισχύουν οι απαιτήσεις της Οδηγίας Πλαίσιο για το Νερό (Water Framework Directive) που έχουν μεταφερθεί στην εθνική νομοθεσία. Σύμφωνα με αυτές τις απαιτήσεις οι απορρίψεις υδατικών αποβλήτων στα επιφανειακά ύδατα δεν πρέπει να προκαλεί επιδείνωση της κατάστασης ή της δυναμικής τους. Τα όρια συγκεντρώσεων των ρυπαντών στα ποτάμια αντιστοιχούν σε 300 mg/L για ιόντα χλωρίου και 250 mg/L για θειϊκά ιόντα (Gzyl, et al., 2017). Υψηλότερες συγκεντρώσεις, όπως και αγωγιμότητα πάνω από 2,5 mS/cm καθιστούν το νερό ακατάλληλο για κατανάλωση (Cañedo-Argüelles, et al., 2012). Τα συγκεκριμένα όρια, όπως φαίνονται και στον Πίνακα 8, προτάθηκαν το 1975 και παρέμειναν ίδια από τότε (Andersson, 2004). Σύμφωνα με την πολωνική νομοθεσία είναι δυνατό να απορριφθούν υδατικά απόβλητα με περιεκτικότητα ιόντων χλωρίου μεγαλύτερη της κανονικής σε ορισμένες περιπτώσεις, αν συγκέντρωση 1 g/L ιόντων χλωρίου και θειϊκών ιόντων επιτευχθεί κατόπιν της απόρριψης και κατόπιν πλήρους ανάδευσης (Gzyl, et al., 2017). Για να διαπιστωθεί αν η συγκέντρωση έχει υπερβεί την προαναφερθείσα τιμή λαμβάνουν χώρα αναλύσεις χρησιμοποιώντας δεδομένα σχετικά με τις απορρίψεις και τις ροές στους αποδέκτες. Συγκεκριμένα τα ορυχεία Czczott και Piast δεν έχουν λειτουργήσει ποτέ εντός ορίων συγκέντρωσης για τα υδατικά απόβλητα. Μαζί με το ορυχείο Ziemowit απορρίπτουν το μεγαλύτερο ποσοστό αποβλήτων και υποχρεώθηκαν σε μείωση του συνολικού φορτίου το 1990. Ωστόσο το κλείσιμο των Piast και Ziemowit έχει ανασταλεί λόγω της υψηλής ανταγωνιστικότητάς τους, η οποία αναμένεται να διατηρηθεί και στον μέλλον. Το Ziemowit είναι το μεγαλύτερο ανθρακωρυχείο της Ευρώπης με παραγωγή 30.000 τόνων ημερησίως και το Piast είναι το δεύτερο μεγαλύτερο της Πολωνίας. Παράλληλα, διαθέτουν υψηλά αποθέματα, σύγχρονες υποδομές και το χαμηλότερο κόστος παραγωγής ανά τόνο άνθρακα στην Πολωνία (Andersson, 2004).

Πίνακας 8: Μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις ρυπαντών στα επιφανειακά υδάτινα σώματα (Andersson, 2004)

Ιόντα	Μονάδα	Κατηγορία ποιότητας νερού
--------------	---------------	----------------------------------

		I	II	III
Χλωρίου	mg Cl ⁻ /L	250	300	400
Θειϊκά	mg SO ₄ ²⁻ /L	150	200	250

Σύμφωνα με τα δεδομένα συγκεντρώσεων από τους αποδέκτες σε 28 περιπτώσεις η συγκέντρωση αλάτων υπερέβη την τιμή του 1 g/L. Σε επτά περιπτώσεις η επίδραση των απορρίψεων στο ποτάμι εκτείνεται κατάντη του σημείου συρροής. Μόνο σε τέσσερις περιπτώσεις οι συγκεντρώσεις ξεπέρασαν το όριο του 1 g/L σε έκταση μεγαλύτερη του 10% του μήκους του συγκεκριμένου ποταμού. Συνεπώς, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις που οι συγκεντρώσεις υπερβαίνουν το 1 g/L, η συγκεκριμένη συγκέντρωση διατηρείται σε έκταση η οποία δε μπορεί να χαρακτηριστεί «μικρή». Σε 21 περιπτώσεις η συγκέντρωση στον αποδέκτη δεν ξεπερνά το 1 g/L (Gzyl, et al., 2017).

Σύμφωνα με δεδομένα από τις απορρίψεις, το όριο του 1 g/L ξεπεράστηκε μόνο κατάντη 16 απορρίψεων, ενώ σε τέσσερις περιπτώσεις συγκέντρωση μεγαλύτερη του ορίου εντοπίστηκε και στους συγκεκριμένους αποδέκτες. Σε έξι περιπτώσεις με συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του ορίου του 1 g/L, η εκάστοτε συγκέντρωση δεν παραμένει σε έκταση μεγαλύτερη του 10% του ποταμού. Αυτό σημαίνει ότι σε αυτές τις περιπτώσεις οι συγκεντρώσεις άνω του ορίου παραμένουν σε μια έκταση του υδατορεύματος η οποία δε μπορεί να χαρακτηριστεί «μικρή». Σε 29 περιπτώσεις η συγκέντρωση στον αποδέκτη δεν ξεπερνά το 1 g/L.

Η έλλειψη σαφούς ορισμού του όρου «μικρή» έκταση στην πολωνική νομοθεσία δίνει τη δυνατότητα στις εταιρίες εξόρυξης να αποκτήσουν άδειες για απόρριψη του νερού εξόρυξης με σημαντική επίδραση στους ποταμούς. Αυτή η επίδραση γίνεται ιδιαίτερα αισθητή τους ξηρούς χρόνους με βροχόπτωση μικρότερη της μέσης και αντίστοιχα μικρότερη ροή ποταμών. Παράλληλα, δεν υπάρχουν φθηνές και αποτελεσματικές μέθοδοι για τη μείωση των συγκεντρώσεων ιόντων χλωρίου και θειϊκών ιόντων στα νερά εξόρυξης. Αυτό σημαίνει πως όσο συνεχίζεται η εξόρυξη άνθρακα, τόσο θα απορρίπτεται ένα μεγάλο φορτίο αλάτων στα επιφανειακά ύδατα και η μόνη λογική επιλογή είναι η ορθή διαχείριση της συγκεκριμένης διεργασίας.

Από τη συστημική αλλαγή του 1989 η Πολωνία έχει βελτιώσει σε μεγάλο βαθμό την περιβαλλοντική της απόδοση. Οι μηχανισμοί χρηματοδότησης των μέτρων περιβαλλοντικής προστασίας και επιβολής του περιβαλλοντικού νόμου έχουν σχεδόν εξαλείψει την ανεπάρκεια εφαρμογής τους κατά τη δεκαετία του 1980. Ωστόσο, αυτοί οι δύο μηχανισμοί δεν έχουν δουλέψει σωστά και έχει εμφανιστεί μικρή πρόοδος αν ληφθούν υπόψη οι απορρίψεις υδατικών αποβλήτων από την εξορυκτική βιομηχανία στην περιοχή του Katowice (Andersson, 2004).

4 Μέτρα για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών επιπτώσεων από ανθρακωρυχεία με έμφαση στην παραγωγή υγρών αλατούχων αποβλήτων

Πολλές στρατηγικές έχουν υιοθετηθεί για τη διαχείριση της υφαλμύρινσης των επιφανειακών υδάτινων σωμάτων. Μερικές έχουν ως στόχο να αποτρέψουν την περαιτέρω υφαλμύριση και να μειώσουν τις απορρίψεις αλάτων, ενώ άλλες αποσκοπούν στη μείωση της αλατότητας του ποταμού και στην ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στο οικοσύστημα και στα παραγόμενα αγαθά και υπηρεσίες του. Η πρώτη απόφαση για τη διαχείριση που πρέπει να ληφθεί είναι σε ποιο βαθμό μπορεί να αποφευχθεί η απόρριψη αποβλήτων υψηλής αλατότητας και ποια είναι τα μειονεκτήματα (π.χ. βελτίωση της ποιότητας του ποταμού έναντι της μείωσης της εξορυκτικής δραστηριότητας που θα μπορούσε να συνδεθεί με την απώλεια οικονομικής δραστηριότητας). Εάν δεν μπορεί να αποφευχθεί η απόρριψη, υπάρχουν ορισμένες τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν (π.χ. αφαλάτωση) για να μειωθεί η αλατότητα του απορριπτόμενου αποβλήτου, αλλά πρέπει να είναι αποτελεσματικές, τεχνικά και νομικά εφικτές και να μην οδηγούν σε δυσανάλογες περιβαλλοντικές (παραγωγή αποβλήτων, κατανάλωση ενέργειας) ή οικονομικές επιπτώσεις (Cañedo-Argüelles, et al., 2012).

Το πρόβλημα της υφαλμύρινσης των υδάτων λόγω των εξορυκτικών δραστηριοτήτων ήταν γνωστό ήδη από τις δεκαετίες του 1960 και 1970. Αρχικά οι περιφέρειες αναγνώρισαν τις επιπτώσεις που είχε η αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων στο νερό των ποταμών στην ποιότητα του πόσιμου νερού και τις βιομηχανίες. Στη συνέχεια αιτήθηκαν στην κυβέρνηση να αναλάβει δράση. Ακόμα, η Ανατολική Γερμανία απαίτησε οικονομικές αποζημιώσεις από την Πολωνία λόγω της οικονομικής ζημίας που υπέστησαν οι βιομηχανίες της. Οι πλέον σημαντικές προτάσεις έγιναν το 1987 και αφορούσαν την εξόρυξη σε στρώματα χαμηλότερης περιεκτικότητας σε άλατα και την κατασκευή μονάδων αφαλάτωσης. Το 1987 το εθνικό περιβαλλοντικό πρόγραμμα για το έτος 2010 αναγνώρισε τις απορρίψεις αλατούχων υδατικών αποβλήτων ως ένα από τα πιο επείγοντα περιβαλλοντικά προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν (Andersson, 2004). Ο σκοπός του συγκεκριμένου προγράμματος ήταν η μετατροπή των υδάτων του Wisła και του Odra σε νερό κατηγορίας III (κατάλληλο για βιομηχανική χρήση). Το πρόγραμμα περιλάμβανε την κατασκευή μικρών μονάδων αφαλάτωσης και αγωγού για την μεταφορά και απόρριψη των σε βορειότερα τμήματα των δύο ποταμών. Η χρηματοδότηση θα καλυπτόταν από τέλη. Κατά τη δεκαετία του 1990 η προσοχή που δόθηκε στο συγκεκριμένο πρόβλημα από ΜΚΟ και το υπουργείο ήταν ελάχιστη.

4.1 Αποκατάσταση ορυχείων (μετά το κλείσιμό τους)

Η εξόρυξη άνθρακα από υπόγεια και επιφανειακά ορυχεία προκαλεί μεταβολές στο φυσικό τοπίο. Κυρίως στην περίπτωση των επιφανειακών ορυχείων, λόγω και της μεγάλης επιφάνειας τα οποία καταλαμβάνουν, απαιτούνται παρεμβάσεις μεγάλης κλίμακας μετά το κλείσιμο ώστε να επαναφερθεί το τοπίο κοντά στην αρχική του κατάσταση.

Συνεπώς η αποκατάσταση της γης αποτελεί απαραίτητο κομμάτι κάθε δραστηριότητας εξόρυξης. Η αποκατάσταση ενός ορυχείου περιλαμβάνει μια σειρά δραστηριοτήτων που αποσκοπούν στην επιστροφή της γης και των υδατορευμάτων σε αποδεκτή περιβαλλοντική κατάσταση και παραγωγική χρήση. Αυτές οι δραστηριότητες συνήθως ξεκινούν με δράσεις καθαρισμού/αποκατάστασης για απομάκρυνση ή απομόνωση ρυπαντών σε ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις αποθήκευσης αποβλήτων, τη συλλογή και επεξεργασία οποιωνδήποτε μολυσμένων εκροών ορυχείων (συμπεριλαμβανομένων των όξινων απορροών από ορυχεία σε περιπτώσεις μεγάλης περιεκτικότητας του κοιτάσματος του άνθρακα σε θειικά ιόντα) αποτρέποντας τις αρνητικές επιπτώσεις στα ρεύματα και στα υπόγεια ύδατα, τη φυσική σταθεροποίηση του εδάφους και των δομών (σήραγγες ορυχείων, εγκαταστάσεις αποθήκευσης ορυχείων, κ.λπ.) και την αποκατάσταση του ανώτερου στρώματος του εδάφους. Στην περίπτωση των υπόγειων ανθρακωρυχείων, ενδέχεται να απαιτηθούν συμπληρωματικές εργασίες για τον έλεγχο της καθίζησης του εδάφους καθώς και των κινδύνων που συνδέονται με την απελευθέρωση μεθανίου. Στη φάση μετά το κλείσιμο εφαρμόζονται προγράμματα παρακολούθησης για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων αποκατάστασης και για τον εντοπισμό τυχόν διορθωτικών ενεργειών που μπορεί να χρειαστούν (Dias, et al., 2018).

Οι ρυθμιστικοί οργανισμοί κάθε κράτους μέλους απαιτούν για κάθε ορυχείο. Αυτά τα σχέδια περιλαμβάνουν τις προαναφερθείσες δράσεις, οι οποίες αποτελούν συστατικό στοιχείο της διαδικασίας εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων και υποβάλλονται προς έγκριση για την απόκτηση δικαιωμάτων εξόρυξης.

Στην ΕΕ, η μεταλλευτική βιομηχανία υπόκειται στην Οδηγία περί Περιβαλλοντικής Ευθύνης (Environmental Liability Directive), η οποία βασίζεται στην αρχή "ο ρυπαίνων πληρώνει". Η οδηγία ισχύει από το 2004 και ενσωματώθηκε βαθμιαία στις εθνικές νομοθεσίες έως το 2007 (Dias, et al., 2018). Στο παρελθόν, λόγω της έλλειψης αυστηρών κανονισμών, τα ορυχεία συχνά εγκαταλείπονταν χωρίς να έχει προηγηθεί αποκατάσταση.

Μολονότι οι ιδιοκτήτες ορυχείων έχουν νομική υποχρέωση να διαχειρίζονται τους κινδύνους και τις περιβαλλοντικές συνέπειες της παύσης των δραστηριοτήτων εξόρυξης, πολλές ευρωπαϊκές εταιρείες εξόρυξης άνθρακα δεν μπόρεσαν να διαχειριστούν μόνες τους το κοινωνικό και περιβαλλοντικό κόστος, κλείνοντας ένα ορυχείο. Από το 2010, οι εθνικές αρχές σε πολλές χώρες της ΕΕ έχουν αναφέρει στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή τα μέτρα κρατικών ενισχύσεων που χορηγούνται στις εταιρείες εξόρυξης για κάλυψη έκτακτων εξόδων (συμπεριλαμβανομένων εκείνων που σχετίζονται με την αποκατάσταση) που προκύπτουν από το κλείσιμο μη ανταγωνιστικών ορυχείων (Dias, et al., 2018).

Μετά την αποκατάσταση, τα σημεία εξόρυξης έχουν κατά κανόνα επιστρέψει στις προ εξόρυξης χρήσεις τους (π.χ. εκ νέου καλλιέργεια, δασοκομία, γεωργία). Η δημιουργία ενός λειτουργικού/βιώσιμου οικοσυστήματος (χρησιμοποιώντας, για παράδειγμα, τα εγγενή είδη δασών), όχι απαραίτητα αυτό που υπήρχε πριν ξεκινήσει η εξόρυξη, αποτελεί πλέον προτεραιότητα (Dias, et al., 2018). Πολλά έργα αποκατάστασης έχουν εκτιμήσει τη δημιουργία χώρων αναψυχής και πάρκων αναψυχής ως μέσο αναζωογόνησης των κοινωνικοοικονομικών δομών μιας περιοχής εξόρυξης. Τέτοια έργα υπάρχουν στη Γερμανία, την Ισπανία, την Πολωνία και τη Τσεχία.

4.2 Αφαλάτωση

Η διαχείριση των υγρών αλατούχων αποβλήτων που παράγονται από τις εξορυκτικές δραστηριότητες αποτελεί συστατικό στοιχείο των δραστηριοτήτων εξόρυξης άνθρακα. Λόγω της επιβολής συγκεκριμένων ορίων στις συγκεντρώσεις αλάτων των υδατικών αποβλήτων εξόρυξης είναι αναγκαία η ύπαρξη μονάδων διαχείρισης αυτών των αποβλήτων, ώστε κατόπιν της απόρριψής τους στο περιβάλλον να περιοριστούν οι περιβαλλοντικές τους συνέπειες. Οι διεργασίες οι οποίες εφαρμόζονται για τη μετατροπή του υφάλμυρου και αλμυρού νερού σε πόσιμο ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: (1) τις θερμικές διεργασίες ή αλλαγής φάσης, (2) τις διεργασίες μεμβράνης ή μίας φάσης, (3) και τις υβριδικές διεργασίες όπως αναφέρονται παρακάτω (Xevgenos, et al., 2018):

1. Θερμικές διεργασίες ή αλλαγής φάσης

Οι θερμικές διεργασίες εκμεταλλεύονται το φυσικό κύκλο εξάτμισης και συμπύκνωσης για την παραγωγή νερού με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε άλατα.

Πολυβάθμια απόσταξη με εκτόνωση (Multistage flash evaporation/distillation - MSF): Πρόκειται για θερμική απόσταξη, δηλαδή εξάτμιση και στη συνέχεια συμπύκνωση του αλμυρού νερού. Αρχικά το νερό θερμαίνεται σε δοχείο όπου αυξάνονται συνεχώς η θερμοκρασία και η πίεση. Στη συνέχεια το θερμό νερό μεταφέρεται στον επόμενο θάλαμο και λόγω της χαμηλότερης πίεσης που επικρατεί, βράζει ταχύτατα. Οι ατμοί του συμπυκνώνονται από εναλλάκτες θερμότητας παράγοντας νερό καθαρό από άλατα. Ως ψυκτικό υγρό χρησιμοποιείται το νερό της τροφοδοσίας.

Πολυβάθμια απόσταξη/εξάτμιση (Multiple-effect evaporation/distillation - MED): Η απόσταξη πολλών θαλάμων είναι διεργασία παρόμοια με την προηγούμενη. Αρχικά η τροφοδοσία αλμυρού νερού διανέμεται σε διαφορετικούς θαλάμους. Στον πρώτο θάλαμο το νερό θερμαίνεται μέσω σωλήνων εξατμιστήρα με ατμό και οι ατμοί οι οποίοι προκύπτουν συμπυκνώνονται στους αντίστοιχους σωλήνες εξατμιστήρα του επόμενου θαλάμου, όπου παράγονται οι αντίστοιχοι ατμοί κοκ. Η πίεση κάθε επόμενου θαλάμου είναι χαμηλότερη από την πίεση του προηγούμενου επιτρέποντας στο νερό να εξατμιστεί χωρίς να είναι αναγκαία περαιτέρω θέρμανση.

Εξάτμιση με επανασυμπύεση ατμών (Vapor compression - VC): Στη συγκεκριμένη διεργασία το αλμυρό νερό εξατμίζεται και στη συνέχεια συμπυκνώνεται, με την ενέργεια που παράγεται κατά το στάδιο της συμπύκνωσης να χρησιμοποιείται για την εκ νέου εξάτμιση του νερού της τροφοδοσίας. Η διεργασία διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: (α) τη μηχανική συμπύκνωση ατμών (MVC), κατά την οποία η θερμοκρασία και η πίεση του νερού αυξάνονται με τη χρήση μηχανικού συμπιεστή και (β) τη θερμική συμπύκνωση ατμών (TVC), όπου η συμπύκνωση των ατμών επιτυγχάνεται με τη χρήση εκτοξευτή ατμού (steam ejector).

Ηλιακή απόσταξη (Solar distillation - SD): Στα συστήματα ηλιακής απόσταξης η τροφοδοσία βρίσκεται κάτω από ένα γυάλινο κάλυμμα και θερμαίνεται από τον ήλιο. Οι ατμοί που δημιουργούνται συμπυκνώνονται πάνω στο κάλυμμα και τα σταγονίδια συλλέγονται στις άκρες του. Στη συνέχεια οδηγούνται σε δεξαμενές για αποθήκευση.

Eutectic freeze crystallization - EFC: Στη συγκεκριμένη διεργασία η τροφοδοσία ψύχεται διαρκώς μέχρι να φτάσει την ευτηκτική θερμοκρασία. Περεταίρω ψύξη οδηγεί στη δημιουργία κρυστάλλων πάγου και αλατιού ταυτοχρόνως.

2. Διεργασίες μεμβράνης ή μονοφασικές

Οι διεργασίες διαχωρισμού με μεμβράνες λειτουργούν εμποδίζοντας ή επιτρέποντας τη διέλευση συγκεκριμένων ιόντων αλάτων.

Αντίστροφη ώσμωση (Reverse osmosis - RO): Κατά τη διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης, στο αλμυρό νερό εφαρμόζεται πίεση μεγαλύτερη της ωσμωτικής για το διαχωρισμό του νερού από τα άλατα. Το νερό διέρχεται από ημιδιαπερατές μεμβράνες από τις οποίες τα άλατα είναι αδύνατο να διέλθουν. Το αποτέλεσμα είναι νερό με πολύ χαμηλή συγκέντρωση διαλυμένων στερεών και άλμη με υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένα και αιωρούμενα στερεά. Είναι απαραίτητα η προεπεξεργασία της τροφοδοσίας λόγω της ευαισθησίας των μεμβρανών στο pH, οξειδωτικές ουσίες, πολλές οργανικές ενώσεις, άλγη, βακτήρια, εναπόθεση σωματιδίων και ρύπανση (fouling).

Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis - ED): Η ηλεκτροδιάλυση είναι μια ηλεκτροχημική διεργασία διαχωρισμού, κατά την οποία χρησιμοποιούνται εκατοντάδες μεμβράνες διαπερατές είτε μόνο από θετικά, είτε μόνο από αρνητικά φορτισμένα ιόντα σε εναλλαγή. Για το διαχωρισμό των ιόντων από το υπόλοιπο υδατικό διάλυμα στοιχείων μηδενικού φορτίου και τη συγκέντρωσή τους μεταξύ των μεμβρανών, εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού.

3. Υβριδικές διεργασίες

Οι υβριδικές μέθοδοι αφαλάτωσης χρησιμοποιούνται για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού. Συνδυάζοντας διεργασίες αφαλάτωσης και από τις δύο κατηγορίες, θερμικές και μεμβράνης, καθώς και παραγωγή ενέργειας, επιτυγχάνεται ευελιξία στη λειτουργία, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, χαμηλό κόστος κατασκευής, υψηλή διαθεσιμότητα των εγκατα-

στάσεων και καλύτερη αντιστοίχιση ισχύος και νερού. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διεργασία αφαλάτωσης είναι η αντίστροφη ώσμωση με ποσοστό 53%. Ακολουθούν η πολυβάθμια απόσταξη με εκτόνωση, η πολυβάθμια εξάτμιση και η ηλεκτροδιάλυση.

Πίνακας 9: Τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά μεθόδων αφαλάτωσης (Xevgenos, et al., 2018)

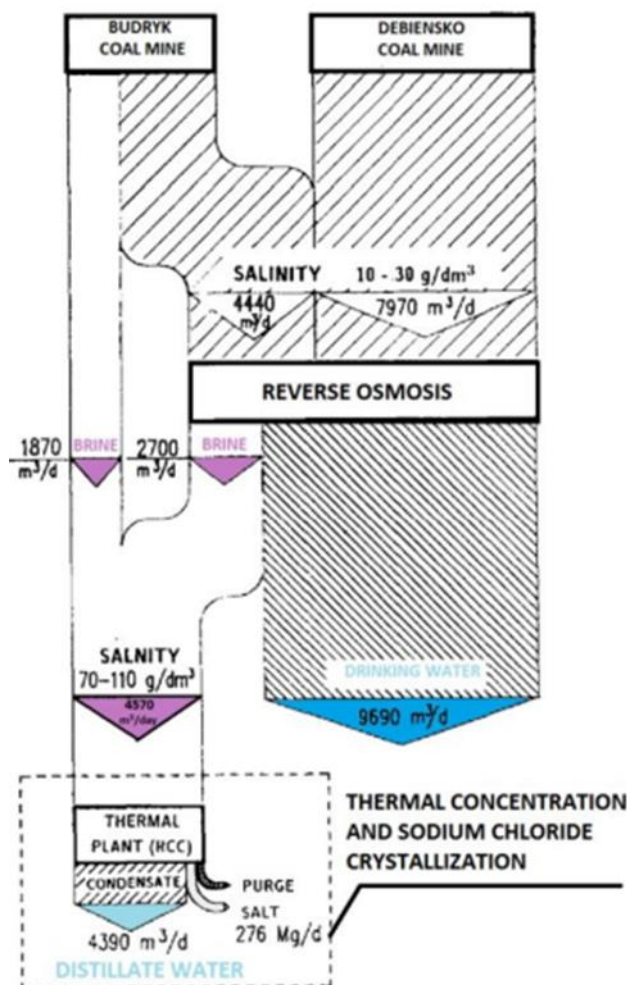
Διεργασία αφαλάτωσης	RO	MSF	MED-TVC	MVC
Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	<45	<120	<70	<70
Ανάγκη προεπεξεργασίας Ενέργεια	Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Κατανάλωση θερμότητας (kJ/kg)	Ηλεκτρική	Θερμική	Θερμική	Ηλεκτρική
Κατανάλωση ηλεκτρισμού (kWh/m ³)	-	250-330	145-390	-
Δυναμικότητα (m ³)	2,5-7	3-5	1,5-2,5	8-15
Ποιότητα παραγόμενου νερού	<20000	<76000	<36000	<3000
Βαθμός ανάκτησης νερού	200-500	<10	<10	<10
Αξιοπιστία	35-50%	35-45%	35-45%	23-41%
	Μέτρια	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή	Υψηλή

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά λειτουργίας και τεχνικά χαρακτηριστικά ορισμένων μεθόδων αφαλάτωσης. Γενικά οι μέθοδοι αφαλάτωσης χαρακτηρίζονται από σημαντική κατανάλωση ενέργειας. Η αντίστροφη ώσμωση αποτελεί την πιο αποδοτική ενεργειακά μέθοδο, παράλληλα όμως είναι και η πιο ενεργοβόρος (Xevgenos, et al., 2018).

Πρότυπη μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων ανθρακωρυχείου Dębieńsko

Το 1975 λειτούργησε για πρώτη φορά μια μικρή πιλοτική μονάδα αφαλάτωσης μέσω εξάτμισης στο ορυχείο Dębieńsko. Ωστόσο, η δημιουργία μονάδων αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας θεωρήθηκε τότε ασύμφορη και η προσοχή στράφηκε στην απομάκρυνση των υδατικών αποβλήτων από την περιοχή του Katowice. Το αρχικό σύστημα κυκλικής επεξεργασίας του Dębieńsko είχε αναπτυχθεί από το Ινστιτούτο Μεταλλευτικών Ερευνών της Πολωνίας (GIG). Είχε δυναμικό παραγωγής 120 τόνων αλατιού ημερησίως. Το 1995, μία δεύτερη μονάδα αφαλάτωσης η Dębieńsko II τέθηκε σε λειτουργία για την επεξεργασία των υδατικών αποβλήτων από τα ορυχεία Dębieńsko και Budryk. Η επένδυση κόστισε 60 εκατομμύρια δολάρια το 1993. Η συγκεκριμένη μονάδα εφαρμόζοντας αντίστροφη ώσμωση, εξάτμιση και μηχανική συμπύκνωση ατμών έχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται 14280 κυβικά μέτρα υδατικών αποβλήτων ημερησίως. Η σύσταση αυτών των αποβλήτων κυμαίνεται μεταξύ 8.000 και 115.000 mg/l TDS.

Στο Σχήμα 16 παρατίθεται το ισοζύγιο μάζας των ρών υδατικών αποβλήτων και προϊόντων από την εν λόγω μονάδα. Αξίζει να παρατηρηθεί πως στο σύστημα εισέρχονται τόσο τα υδατικά απόβλητα της εξόρυξης που λαμβάνει χώρα στο Dębieńsko, όσο και αυτά της εξόρυξης από το Budryk. Τα ρεύματα του νερού υψηλής αλατότητας που εισέρχονται στο σύστημα επεξεργασίας αποτελούν τις συνολικές απορροές των υδατικών αποβλήτων των δύο ορυχείων, όπως τουλάχιστον είχαν καταγραφεί το 1993.



Σχήμα 16: Αναπαράσταση των ροών και του ισοζυγίου μάζας της μονάδας Debieńsko

Το σύστημα αποτελείται από δύο εξατμιστήρες και ένα κρυσταλλωτήρα αλάτων (Xenogenos, et al., 2019). Συνολικά στη διάταξη εισέρχονται $12.410 \text{ m}^3/\text{μέρα}$ από τα οποία παράγονται $9.690 \text{ m}^3/\text{μέρα}$ πόσιμου νερού. Ένα δευτερεύον ρεύμα αποβλήτου υψηλής αλατότητας από το Budryk και τον ωσμοτήρα ($1.870 \text{ m}^3/\text{μέρα} + 2.700 \text{ m}^3/\text{μέρα} = 4.570 \text{ m}^3/\text{μέρα}$) καταλήγει σε εργοστάσιο θερμικής επεξεργασίας από το οποίο τελικά παράγονται 4.390 m^3 απιονισμένου νερού και 276 τόνοι χλωριούχου νατρίου ημερησίως.

Πίνακας 10: Παραγόμενα προϊόντα από τη μονάδα Debieńsko με τα αντίστοιχα ύψη παραγωγής

Προϊόν	Ύψος παραγωγής
Πόσιμο νερό	$9.690 \text{ m}^3/\text{μέρα}$
Απιονισμένο νερό	$4.570 \text{ m}^3/\text{μέρα}$
Χλωριούχο νάτριο	276 τόνοι/μέρα
Θειικό ασβέστιο	28 τόνοι/μέρα

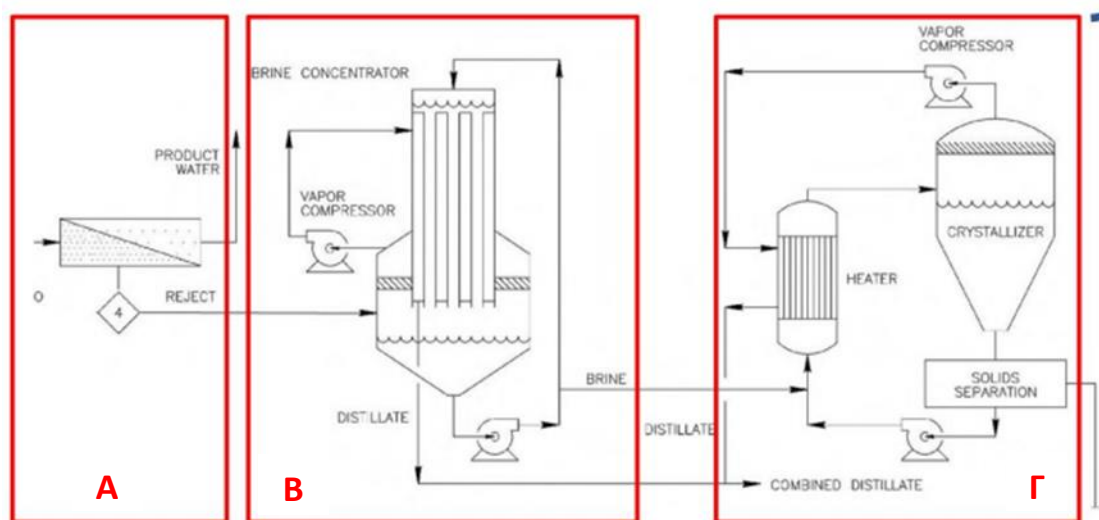
Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανέρχονται σε 852 τόνους ετησίως. Η ενεργειακή κατανάλωση της μονάδας είναι 975 kWh/τόνο ανακτώμενου αλατιού και περιλαμβάνει:

Προεπεξεργασία: $\approx 5 \text{ kWh/m}^3$

Συμπυκνωτήρας άλμης: $\approx 44 \text{ kWh/m}^3$

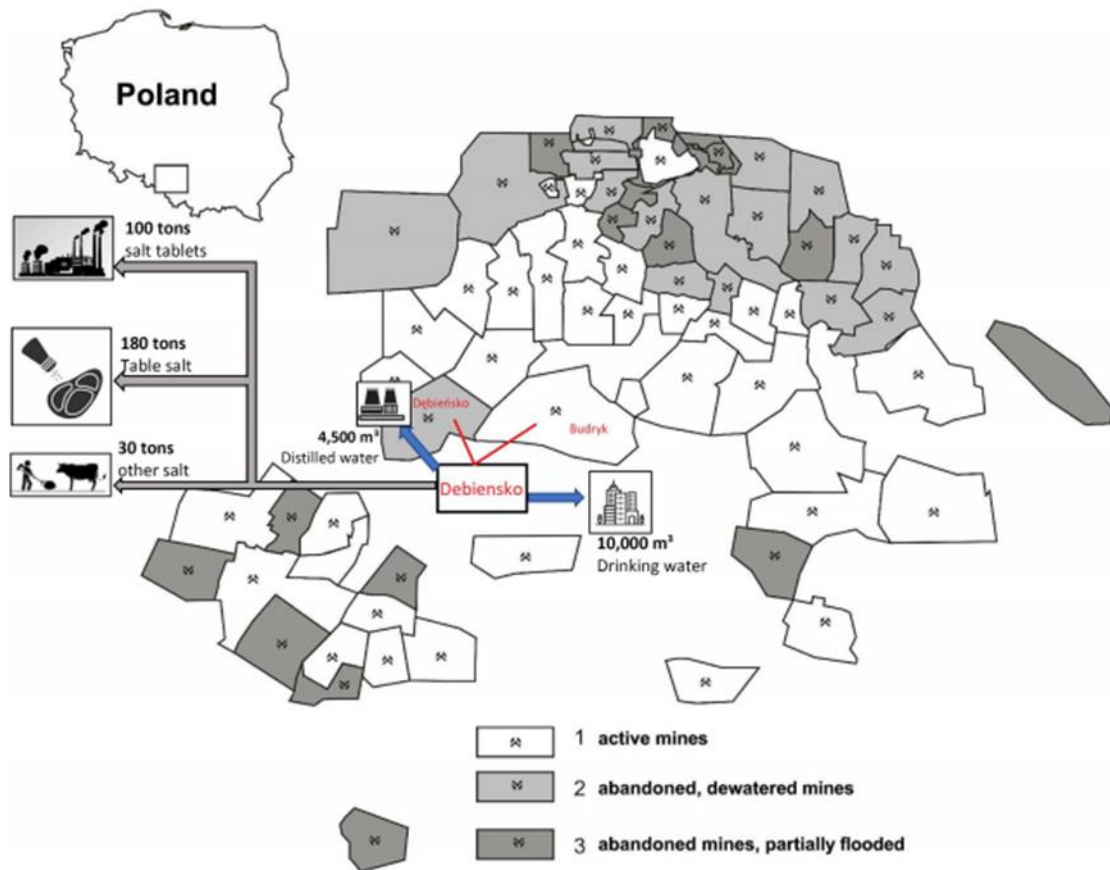
Κρυσταλλωτήρας: $\approx 65 \text{ kWh/m}^3$

Το διάγραμμα ροής της μονάδας ανάκτησης των αλάτων απεικονίζεται στο Σχήμα 17, όπου σημειώνονται και τα επιμέρους στάδια τα οποία λαμβάνουν χώρα και για τα οποία έχει αναφερθεί η κατανάλωση ενέργεια παραπάνω. Τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει ο κρυσταλλωτήρας.



Σχήμα 17: Διάγραμμα ροής της μονάδας. (Α) Προεπεξεργασία, (Β) Συγκεντρωτήρας Άλμης, (Γ) Κρυσταλλωτήρας

Ακολουθεί ο χάρτης με τις περιοχές εξόρυξης στη λεκάνη απορροής άνθρακα της Άνω Σιλεσίας, όπου απεικονίζονται τα ορυχεία Dębieńsko και Budryk. Στο Σχήμα 18 φαίνεται επίσης η ημερήσια παραγωγή προϊόντων από τη μονάδα Dębieńsko, καθώς και οι χρήσεις των προϊόντων αυτών. Πάνω από το μισό αλάτι που παράγεται καταλήγει στην αγορά τροφίμων (180 τόννοι) σαν επιτραπέζιο άλας, ενώ το υπόλοιπο στη βιομηχανία με τη μορφή ταμπλετών (100 τόννοι). Τα υπόλοιπα άλατα που παράγονται χρησιμοποιούνται ως λίπασμα για τις καλλιέργειες. Το απιονισμένο νερό που παράγεται χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία και το πόσιμο νερό, φυσικά, για ύδρευση.



Σχήμα 18: Χάρτης με την τοποθεσία του Debieńsko στη λεκάνη απορροής άνθρακα της Άνω Σιλεσίας, μαζί με την ημερήσια παραγωγή προϊόντων

Η υδρογεωλογική περιοχή στην οποία βρίσκεται το Debieńsko χαρακτηρίζεται από την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων νερού με υψηλή συγκέντρωση σε άλατα, ανοίγοντας το δρόμο για την αναπαραγωγή της περίπτωσης της μονάδας Debieńsko και σε άλλα ορυχεία (Xevgenos, et al., 2019).

Την ίδια δεκαετία αποφασίστηκε η κατασκευή μιας μονάδας αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας για την επεξεργασία των αποβλήτων από τα ορυχεία Piast, Ziemowit και Czczott. Η εν λόγω μονάδα επεξεργασίας υδατικών αποβλήτων χρησιμοποιώντας θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης θα έπρεπε να είναι σε θέση να επεξεργαστεί 32.680 κυβικά μέτρα αλμυρού νερού ημερησίως. Το κόστος κατασκευής είχε υπολογιστεί στα 500 εκατομμύρια δολάρια και η προβλεπόμενη μείωση της αλατότητας του Wisła ξεπερνούσε το 40% (Andersson, 2004).

4.3 Μέτρα μικρής κλίμακας και χαμηλού κόστους

Τη δεκαετία του 1990 ερευνήθηκαν διάφορα μέτρα χαμηλού κόστους για τη μείωση της υφαλμύρινσης των νερών των ποταμών και ορισμένα από αυτά εφαρμόστηκαν μερικώς. Ένα από αυτά τα μέτρα ήταν ο περιορισμός του νερού υψηλής αλατότητας

που εισέρχεται στις σήραγγες των ορυχείων. Αυτή η μέθοδος εφαρμόστηκε με τη μεγαλύτερη επιτυχία στο ορυχείο Silesia, σφραγίζοντας τις εκτός λειτουργίας σήραγγες και επιβραδύνοντας τη ροή του νερού μέσω φραγμάτων. Παρόμοιες μέθοδοι δοκιμάστηκαν σε άλλα 13 ορυχεία, συμπεριλαμβανομένων των Piast, Ziemowit και Czczott.

Έχουν προταθεί και υλοποιηθεί εν μέρει άλλα μέτρα μικρής κλίμακας κατά τη δεκαετία του 1990. Τα πιο σημαντικά είναι (Andersson, 2004):

- Μείωση των απορρίψεων αλατούχων υδατικών αποβλήτων μέσω δράσεων στο ορυχείο. Η ποσότητα του νερού ποικίλλει ανάλογα με τα εκτεθειμένα τμήματα του γαιάνθρακα. Η συγκέντρωση της παραγωγής σε λιγότερες και πιο παραγωγικές φλέβες μπορεί να μειώσει τα απόβλητα κατά 10-15%.
- Εξόρυξη σε χαμηλότερα βάθη, πάνω από 500 μέτρα, καθώς σε μεγαλύτερα βάθη η συγκέντρωση αλάτων στο νερό είναι υψηλότερη.
- Διαχείριση των αποβλήτων μεσαίας αλατότητας κατά τη μηχανική επεξεργασία του άνθρακα. Αυτή η μέθοδος, βασιζόμενη στην κυκλοφορία νερού-ιλύος σε εγκαταστάσεις μηχανικής επεξεργασίας άνθρακα, κατέστησε εφικτή τη διαχείριση περίπου 5.400 κυβικών μέτρων αλατούχων αποβλήτων ημερησίως σε 14 ανθρακωρυχεία (π.χ. ορυχείο Czczott).

5 Μελέτη περίπτωσης πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ανθρακωρυχείου στην Πολωνία

Στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος H2020 ZERO BRINE (<https://zerobriner.eu/>) αναπτύχθηκε μια πρότυπη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ανθρακωρυχείου στην Πολωνία. Η διαδικασία χρησιμοποιεί ένα ενσωματωμένο σύστημα μεμβρανών για την επεξεργασία των υδατικών αποβλήτων σε αποδεκτά πρότυπα απόρριψης ενώ ανακτά προϊόντα αξίας από αυτά τα απόβλητα, όπως χλωριούχο νάτριο, υδροξείδιο του μαγνησίου, χλωριούχο ασβέστιο, καθαρό νερό και γύψο (Bakogianni, 2019).

Η επιτυχής αντιμετώπιση των υδατικών αποβλήτων των ανθρακωρυχείων αποτελεί σημαντική πρόκληση καθώς οι δραστηριότητες εξόρυξης του άνθρακα παράγουν μεγάλες ποσότητες αποβλήτων υψηλής αλατότητας. Η άμεση απόρριψή τους σε επιφανειακά υδάτινα σώματα οδηγεί σε υφαλμύριση, που μπορεί να προκαλέσει σημαντική βλάβη στα οικοσυστήματα και τους υδρόβιους οργανισμούς και να καταστήσει αδύνατη τη χρήση του νερού από τις κοινότητες (Gzyl, et al., 2017). Η Πολωνία είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός άνθρακα στην ΕΕ (EURACOAL, τελευταία προσπέλαση 2019). Επί του παρόντος, οι απορροές από το πολωνικό ανθρακωρυχείο υφίστανται μια βασική διεργασία επεξεργασίας δύο σταδίων. Αρχικά, τροφοδοτείται σε δεξαμενές καθίζησης όπου αφαιρούνται τα αιωρούμενα στερεά. Τα εναπομείναντα απόβλητα κατόπιν αραιώνονται έτσι ώστε οι συγκεντρώσεις των υπολοίπων συστατικών τους να συμμορφώνονται με τα πρότυπα απόρριψης στα επιφανειακά υδάτινα σώματα.

Η πιλοτική μονάδα επεξεργασίας θα βρίσκεται στο ZG Bolesław Śmiały στην Πολωνία - ένα ανθρακωρυχείο που ανήκει στην PGG (Polska Grupa Górnicza S.A.), τη μεγαλύτερη εταιρεία εξόρυξης λιθάνθρακα στην ΕΕ, η οποία παράγει περίπου 30 εκατομμύρια τόνους λιθάνθρακα ετησίως⁷. Το ανθρακωρυχείο "Bolesław Śmiały" παράγει σήμερα πάνω από 730.000 m³ αλατούχων αποβλήτων ετησίως (Bakogianni, 2019). Προκειμένου να συμμορφωθεί με τα όρια απόρριψης, το ρεύμα αυτό αντιμετωπίζεται επί του παρόντος με αραιώση της ροής με βιομηχανικά υδατικά απόβλητα από τη γειτονική μονάδα παραγωγής ενέργειας. Δε λαμβάνει χώρα προς το παρόν περαιτέρω επεξεργασία πριν από την απόρριψη των αποβλήτων στο γειτονικό ποταμό. Ωστόσο, λόγω των όλο και αυστηρότερων περιβαλλοντικών κανονισμών, η εταιρεία αναζητά νέες μεθόδους για τη μείωση του φορτίου των αλάτων στα απόβλητα.

⁷ Συγκριτικά η συνολική ετήσια παραγωγή λιθάνθρακα της ΕΕ ανέρχεται σε 100 εκατομμύρια τόνους.

6 Ανάλυση κύκλου ζωής για τη μελέτη περίπτωσης

Η επίτευξη της «βιώσιμης ανάπτυξης» απαιτεί μεθόδους και εργαλεία που θα βοηθήσουν στην ποσοτικοποίηση και σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παροχή αγαθών και υπηρεσιών στις κοινωνίες μας. Κάθε προϊόν έχει «ζωή», ξεκινώντας από το σχεδιασμό/ανάπτυξη του προϊόντος, συνεχίζοντας με την εξόρυξη πόρων, την παραγωγή (παραγωγή υλικών, καθώς και κατασκευή/παροχή του προϊόντος), τη χρήση/κατανάλωση και τέλος ζωής (συλλογή/διαλογή, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, διάθεση αποβλήτων). Όλες οι δραστηριότητες ή οι διαδικασίες στη ζωή ενός προϊόντος έχουν ως αποτέλεσμα περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω κατανάλωσης πόρων, εκπομπών ουσιών στο φυσικό περιβάλλον και άλλων περιβαλλοντικών ανταλλαγών (π.χ. ακτινοβολία) (Rebitzer, et al., 2003).

Η αύξηση της συνειδητοποίησης της σημασίας της προστασίας του περιβάλλοντος και των πιθανών επιπτώσεων που σχετίζονται με τα προϊόντα που παράγονται και καταναλώνονται, έχει αυξήσει το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη μεθόδων για την καλύτερη κατανόηση και μείωση αυτών των επιπτώσεων (Technical Committee ISORC 207, Environmental management, Subcommittee SC 5, Life cycle assessment, 1997). Μια από τις τεχνικές που αναπτύσσονται για αυτό το σκοπό είναι η Ανάλυση (ή Αξιολόγηση) Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ). Η ανάλυση κύκλου ζωής είναι ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την εκτίμηση και την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που οφείλονται στον κύκλο ζωής ενός προϊόντος, όπως η κλιματική αλλαγή, η εξάντληση του στρατοσφαιρικού όζοντος, η δημιουργία του τροποσφαιρικού όζοντος, ο ευτροφισμός, η οξίνιση, η τοξικολογική φόρτιση στην υγεία και τα οικοσυστήματα, η εξάντληση των φυσικών πόρων, η χρήση των υδάτων, η χρήση γης κ.α. (Rebitzer, et al., 2003).

Αν και η αφαλάτωση είναι μια σχετικά ώριμη τεχνολογία και συμβάλλει θετικά στην αντιμετώπιση της έλλειψης νερού, πολλά περιβαλλοντικά ζητήματα συνδέονται με τις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης (Zhou, et al., 2012). Η ΑΚΖ είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την ποσοτικοποίηση και τη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παροχής πόσιμου νερού από τη μονάδα επεξεργασίας στις κοινωνίες μας. Η ΑΚΖ εφαρμόζεται στην αφαλάτωση από τη δεκαετία του 1990. Μία από τις πιο σημαντικές εφαρμογές της ΑΚΖ ήταν η εξέταση και η σύγκριση διαφόρων τεχνολογιών αφαλάτωσης. Επιπλέον, η ΑΚΖ χρησιμοποιήθηκε για να διερευνήσει τις λύσεις για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της αφαλάτωσης με διάφορους τρόπους, όπως με τη μείωση της αλατότητας του ύδατος τροφοδοσίας, εφαρμόζοντας αποτελεσματική προεπεξεργασία ή με τη χρήση καθαρότερων πηγών ενέργειας (Zhou, et al., 2012).

6.1 Εισαγωγή

AKZ είναι η τεχνική για την ανάλυση των περιβαλλοντικών πτυχών και πιθανών επιπτώσεων που συνδέονται με ένα προϊόν, μέσω:

- απογραφής των σχετικών εισροών και εκροών ενός συστήματος προϊόντων
- αξιολόγησης των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με αυτές τις εισροές και προϊόντα
- ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του καταλόγου και των φάσεων αξιολόγησης των επιπτώσεων σε σχέση με τους στόχους της μελέτης.

Η AKZ είναι ένα περιεκτικό εργαλείο αξιολόγησης που εξετάζει όλες τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, από την απόκτηση πρώτων υλών, κατά τη διάρκεια της παραγωγής και της χρήσης έως την απόρριψή του και διαχείριση των αποβλήτων. Οι γενικές κατηγορίες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που λαμβάνονται υπόψη περιλαμβάνουν τη χρήση των πόρων, την ανθρώπινη υγεία και τις οικολογικές συνέπειες. Η AKZ μπορεί να βοηθήσει:

- στον εντοπισμό ευκαιριών βελτίωσης των περιβαλλοντικών πτυχών των προϊόντων σε διάφορα σημεία του κύκλου ζωής
- στη λήψη αποφάσεων στη βιομηχανία, στις κυβερνητικές ή μη κυβερνητικές οργανώσεις (π.χ. στρατηγικός προγραμματισμός, ρύθμιση προτεραιοτήτων, σχεδιασμός ή επανασχεδιασμός προϊόντων ή διεργασιών)
- στην επιλογή σχετικών δεικτών περιβαλλοντικής επίδοσης, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών μέτρησης
- στο marketing (π.χ. περιβαλλοντική απαίτηση, σχέδιο οικολογικής σήμανσης ή περιβαλλοντική δήλωση προϊόντος).

Το Διεθνές Πρότυπο ISO 14040 αναγνωρίζει ότι η AKZ βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Μερικές φάσεις της τεχνικής AKZ, όπως η εκτίμηση των επιπτώσεων, εξακολουθούν να βρίσκονται σε σχετικά βρεφική ηλικία. Σημαντική δουλειά μένει να γίνει και να αποκτηθεί πρακτική εμπειρία προκειμένου να αναπτυχθεί περαιτέρω το επίπεδο της πρακτικής της AKZ. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό τα αποτελέσματα της AKZ να ερμηνευθούν και να εφαρμοστούν κατάλληλα. Εάν η AKZ αποδειχθεί επιτυχής στην υποστήριξη της περιβαλλοντικής κατανόησης των προϊόντων, είναι σημαντικό να διατηρήσει την τεχνική αξιοπιστία της, παρέχοντας παράλληλα ευελιξία, πρακτικότητα και αποδοτικότητα κόστους στην εφαρμογή της. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα εάν η AKZ πρόκειται να εφαρμοστεί σε μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις.

Ο σκοπός, τα όρια και το επίπεδο λεπτομέρειας μιας μελέτης AKZ εξαρτώνται από το αντικείμενο και την αποσκοπούμενη χρήση της μελέτης. Το βάθος και το εύρος των μελετών AKZ μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με το στόχο της συγκεκριμένης μελέτης. Ωστόσο, σε όλες τις περιπτώσεις, οι αρχές και το πλαίσιο που καθορίζονται σε αυτό θα πρέπει να ακολουθούν το Διεθνές Πρότυπο. Η AKZ είναι μία από τις διάφορες τεχνικές περιβαλλοντικής διαχείρισης (π.χ. αξιολόγηση κινδύνου, αξιολόγηση περιβαλλοντικής επίδοσης, περιβαλλοντικός έλεγχος και εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων) και μπορεί να μην είναι η πιο κατάλληλη τεχνική που μπορεί να

χρησιμοποιηθεί σε όλες τις περιπτώσεις. Η ΑΚΖ συνήθως δεν αντιμετωπίζει τις οικονομικές ή κοινωνικές πτυχές ενός προϊόντος. Επειδή όλες οι τεχνικές έχουν περιορισμούς, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε αυτούς που υπάρχουν στην ΑΚΖ. Ο περιορισμοί περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Η φύση των επιλογών και των υποθέσεων που έγιναν στην ΑΚΖ (π.χ. ρύθμιση ορίων συστήματος, επιλογή πηγών δεδομένων και κατηγορίες επιπτώσεων) μπορεί να είναι υποκειμενική.
- Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της απογραφής εισροών και εκροών ή για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων περιορίζονται από τις υποθέσεις τους και ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμα για όλες τις πιθανές επιπτώσεις ή εφαρμογές.
- Τα αποτελέσματα των μελετών ΑΚΖ που επικεντρώνονται σε παγκόσμια και περιφερειακά ζητήματα μπορεί να μην είναι κατάλληλα για τοπικά εφαρμογές, δηλαδή οι τοπικές συνθήκες ενδέχεται να μην αντιπροσωπεύονται επαρκώς από περιφερειακές ή παγκόσμιες συνθήκες.
- Η ακρίβεια των μελετών ΑΚΖ μπορεί να περιορίζεται από την προσβασιμότητα ή τη διαθεσιμότητα των σχετικών δεδομένων ή από την ποιότητα δεδομένων, π.χ. κενά, τύπους δεδομένων, συγκέντρωση, μέσο όρο, συγκεκριμένη τοποθεσία.
- Η έλλειψη χωρικών και χρονικών διαστάσεων στα δεδομένα απογραφής που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των επιπτώσεων εισάγει αβεβαιότητα στα αποτελέσματα των επιπτώσεων. Αυτή η αβεβαιότητα ποικίλλει ανάλογα με τα χωρικά και τα χρονικά χαρακτηριστικά κάθε κατηγορίας επιπτώσεων.

Γενικά, οι πληροφορίες που αναπτύσσονται σε μια μελέτη ΑΚΖ θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως μέρος μιας περισσότερο κατανοητής διαδικασίας λήψης αποφάσεων ή για την κατανόηση των ευρέων ή γενικών συμβιβασμών. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφορετικών μελετών ΑΚΖ είναι δυνατή μόνο εάν οι υποθέσεις και το πλαίσιο κάθε μελέτης είναι οι ίδιοι. Αυτές οι υποθέσεις θα πρέπει επίσης να δηλώνονται ρητά για λόγους διαφάνειας (Technical Committee ISORC 207, Environmental management, Subcommittee SC 5, Life cycle assessment, 1997).

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040 τα σημαντικά στοιχεία της μεθοδολογίας ΑΚΖ είναι:

- Οι μελέτες ΑΚΖ οφείλουν να καλύψουν τις περιβαλλοντικές απόψεις των υπό μελέτη συστημάτων, μεθοδικά και επαρκώς, από την απόκτηση των πρώτων υλών μέχρι και την τελική απόρριψη.
- Ο βαθμός λεπτομέρειας και το χρονικό πλαίσιο μιας μελέτης ΑΚΖ μπορούν να διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με τον προσδιορισμό του σκοπού και του αντικειμένου.

- Το αντικείμενο, οι παραδοχές, η περιγραφή της ποιότητας των δεδομένων, οι μεθοδολογίες και το τελικό αποτέλεσμα των μελετών AKZ πρέπει να χαρακτηρίζονται από διαφάνεια. Οι μελέτες AKZ πρέπει να αναφέρουν και να καταγράφουν τις πηγές δεδομένων με ξεκάθαρο και θεμιτό τρόπο.
- Πρέπει να προβλεφθούν διατάξεις, ανάλογα με την αποσκοπούμενη εφαρμογή της μελέτης AKZ, για την τήρηση της εμπιστευτικότητας και των δικαιωμάτων ιδιοκτησίας.
- Η μεθοδολογία AKZ θα πρέπει να είναι ικανή να συμπεριλάβει νέα επιστημονικά ευρήματα και βελτιώσεις στην καινοτομία της τεχνολογίας.
- Ειδικές απαιτήσεις εφαρμόζονται στις μελέτες AKZ οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη συγκριτική διαπίστωση που δημοσιεύεται.
- Δεν υπάρχει επιστημονική βάση για τη μείωση των αποτελεσμάτων AKZ σε ένα ενιαίο συνολικό αριθμό, καθώς η ανάλυση συστημάτων τα οποία βρίσκονται σε διάφορα στάδια του κύκλου ζωής τους είναι πολύπλοκη και απαιτεί συμβιβασμούς.
- Δεν υπάρχει μία μοναδική μέθοδος για τη διεξαγωγή μελετών AKZ. Οι οργανισμοί θα πρέπει να έχουν την ευελιξία να εφαρμόζουν την AKZ πρακτικά όπως ορίζεται στο ISO 14040, βάσει της συγκεκριμένης εφαρμογής και των απαιτήσεων του χρήστη.

6.1.1 Στάδια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Το διεθνές πρότυπο ISO 14040 καθορίζει τις φάσεις μιας AKZ, οι οποίες είναι (JRC European commission, 2011b; Ristimäki, Säynäjoki, Heinonen, & Junnila, 2013) και αναλύονται λεπτομερώς στις επόμενες παραγράφους:

- 1) Προσδιορισμός του σκοπού και του αντικειμένου
- 2) Απογραφή δεδομένων
- 3) Εκτίμηση των επιπτώσεων
- 4) Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα μιας μελέτης AKZ μπορούν να είναι χρήσιμα σε διάφορες διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Οι άμεσες εφαρμογές μιας μελέτης AKZ μπορούν να περιλαμβάνουν:

- Ανάπτυξη και βελτίωση προϊόντων
- Στρατηγικό σχεδιασμό
- Χάραξη πολιτικής
- Μάρκετινγκ
- Κ.λπ.

Ενώ συνεχίζεται η πρόοδος στη βελτίωση των μεθόδων εφαρμογής της AKZ, τα διεθνή πρότυπα ISO 14000 είναι γενικώς αποδεκτά για την παροχή ενός συνεκτικού

πλαίσιου για την ΑΚΖ. Τα πλαίσια αυτά περιγράφουν καθεμία φάση της ΑΚΖ και είναι τα εξής (Rebitzer, et al., 2003):

- Διεθνές πρότυπο ISO 14040 (1997) για τις αρχές και το πλαίσιο
- Διεθνές πρότυπο ISO 14041 (1998) για το στόχο, το αντικείμενο και την απογραφή δεδομένων
- Διεθνές πρότυπο ISO 14042 (2000) για την εκτίμηση των επιπτώσεων
- Διεθνές πρότυπο ISO 14043 (2000) για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

6.1.1.1 Προσδιορισμός του σκοπού και του αντικειμένου

Ο σκοπός και το αντικείμενο μιας μελέτης ΑΚΖ πρέπει να είναι σαφώς ορισμένα και σε συνοχή με την αποσκοπούμενη εφαρμογή.

Ο σκοπός της μελέτης

Ο σκοπός πρέπει να δηλώνει με σαφήνεια τη συγκεκριμένη εφαρμογή, τους λόγους διεξαγωγής της μελέτης και το κοινό προς το οποίο θα δημοσιευτούν τα αποτελέσματα.

Αντικείμενο της μελέτης

Για τον προσδιορισμό του αντικειμένου μιας μελέτης ΑΚΖ θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να περιγράφονται με σαφήνεια τα παρακάτω (Technical Committee ISORC 207, Environmental management, Subcommittee SC 5, Life cycle assessment, 1997):

- Οι λειτουργίες του συστήματος, ή στην περίπτωση συγκριτικών μελετών, των συστημάτων
- Η λειτουργική μονάδα
- Το σύστημα που μελετάται
- Τα όρια του συστήματος
- Διαδικασίες κατανομής
- Τύποι επιπτώσεων και μεθοδολογία εκτίμησης των επιπτώσεων, καθώς και μεταγενέστερη ερμηνεία που πρέπει να χρησιμοποιείται
- Απαιτήσεις δεδομένων
- Παραδοχές
- Περιορισμοί
- Αρχικές απαιτήσεις ποιότητας δεδομένων
- Τύπος κριτικής αναθεώρησης, εάν υπάρχει
- Τον τύπο και τη μορφή της έκθεσης που απαιτείται για τη μελέτη

Το αντικείμενο πρέπει να είναι επαρκώς καθορισμένο ώστε να διασφαλίζεται ότι το βάθος και οι λεπτομέρειες της μελέτης είναι συμβατά και επαρκή για την αντιμετώπιση του αντίστοιχου στόχου. Η ΑΚΖ είναι μια επαναληπτική τεχνική. Επομένως, το αντικείμενο της μελέτης μπορεί να χρειαστεί να τροποποιηθεί ενώ η μελέτη διεξάγεται καθώς συλλέγονται πρόσθετες πληροφορίες.

Ο ορισμός του στόχου και του αντικειμένου μιας μελέτης ΑΚΖ παρέχει μια περιγραφή του συστήματος του προϊόντος όσον αφορά τα όρια του συστήματος και μια λειτουργική μονάδα. Η λειτουργική μονάδα είναι η σημαντική βάση που επιτρέπει τη σύγκριση και την ανάλυση εναλλακτικών αγαθών ή υπηρεσιών (Rebitzer, et al., 2003).

Λειτουργίες και λειτουργική μονάδα

Το αντικείμενο της μελέτης ΑΚΖ πρέπει να προσδιορίζει με σαφήνεια τις λειτουργίες του συστήματος που μελετάται. Μια λειτουργική μονάδα είναι ένα μέτρο της απόδοσης των λειτουργικών εξόδων του συστήματος του προϊόντος. Ο πρωταρχικός σκοπός μιας λειτουργικής μονάδας είναι να παράσχει μια αναφορά στην οποία σχετίζονται οι εισροές και οι εκροές. Αυτή η αναφορά είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων της ΑΚΖ. Η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων της ΑΚΖ είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν αξιολογούνται διαφορετικά συστήματα για να διασφαλιστεί ότι οι συγκρίσεις αυτές θα γίνονται σε κοινή βάση.

Ένα σύστημα μπορεί να έχει πολλές πιθανές λειτουργίες και αυτή που επιλέγεται για μια μελέτη εξαρτάται από τους στόχους και το αντικείμενο της μελέτης. Η σχετική λειτουργική μονάδα πρέπει να είναι ορισμένη και μετρήσιμη.

Όρια συστήματος

Τα όρια του συστήματος καθορίζουν ποιες διεργασίες της μονάδας πρέπει να συμπεριληφθούν στην ΑΚΖ. Διάφοροι παράγοντες καθορίζουν τα όρια του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της αποσκοπούμενης εφαρμογής της μελέτης, των παραδοχών που έγιναν, των κριτηρίων αποκοπής, των περιορισμών των δεδομένων και του κόστους και του κοινού στο οποίο απευθύνεται.

Η επιλογή των εισροών και εκροών, το επίπεδο συγκέντρωσης σε μια κατηγορία δεδομένων και η μοντελοποίηση του συστήματος πρέπει να συνάδουν με το σκοπό της μελέτης. Η μοντελοποίηση του συστήματος πρέπει να γίνεται έτσι ώστε οι εισροές και οι εκροές στα όριά του να αποτελούν στοιχειώδεις ροές. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των ορίων του συστήματος πρέπει να προσδιορίζονται και να αιτιολογούνται στο αντικείμενο της μελέτης. Οι μελέτες ΑΚΖ που χρησιμοποιούνται για την εκπόνηση ενός συγκριτικού ισχυρισμού που αποκαλύπτεται στο κοινό πρέπει να πραγματοποιούν ανάλυση των ροών μάζας και ενέργειας για να προσδιοριστεί η συμπερίληψή τους στο αντικείμενο της μελέτης.

Απαιτήσεις ποιότητας δεδομένων

Οι απαιτήσεις για την ποιότητα των δεδομένων προσδιορίζουν γενικά τα χαρακτηριστικά των δεδομένων που χρειάζονται για τη μελέτη. Οι απαιτήσεις ποιότητας δεδομένων πρέπει να ορίζονται ώστε να μπορούν να ικανοποιηθούν οι στόχοι και το αντικείμενο της μελέτης ΑΚΖ. Οι απαιτήσεις ποιότητας δεδομένων πρέπει να αφορούν:

- Χρονική κάλυψη
- Γεωγραφική κάλυψη
- Τεχνολογική κάλυψη

- Ακρίβεια, πληρότητα και αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων
- Συνέπεια και επαναληψιμότητα των μεθόδων που χρησιμοποιούνται σε ολόκληρη την ΑΚΖ
- Τις πηγές των δεδομένων και την αντιπροσωπευτικότητά τους
- Αβεβαιότητα των πληροφοριών

Όταν χρησιμοποιείται μελέτη για την υποστήριξη συγκριτικού ισχυρισμού που γνωστοποιείται στο κοινό, πρέπει να ικανοποιούνται οι προαναφερόμενες απαιτήσεις.

Συγκρίσεις μεταξύ συστημάτων

Σε συγκριτικές μελέτες, η ισοδυναμία των συγκρινόμενων συστημάτων αξιολογείται πριν από την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Τα συστήματα συγκρίνονται χρησιμοποιώντας την ίδια λειτουργική μονάδα και ισοδύναμες μεθοδολογικές εκτιμήσεις, όπως είναι οι επιδόσεις, τα όρια του συστήματος, η ποιότητα των δεδομένων, οι διαδικασίες κατανομής, οι κανόνες απόφασης για την αξιολόγηση των εισροών και των εκροών και η εκτίμηση των επιπτώσεων. Όλες οι διαφορές μεταξύ των συστημάτων σχετικά με αυτές τις παραμέτρους πρέπει να προσδιορίζονται και να αναφέρονται.

Κρίσιμη αξιολόγηση

Η κρίσιμη αξιολόγηση είναι μια τεχνική για να εξακριβωθεί αν μια μελέτη ΑΚΖ έχει εκπληρώσει τις απαιτήσεις του διεθνούς προτύπου ISO 14040 για τη μεθοδολογία, τα δεδομένα και την αναφορά. Το ζήτημα του κατά πόσον και πώς να διενεργηθεί κριτική εξέταση, καθώς και ποιος διεξάγει την επανεξέταση, ορίζεται στο αντικείμενο της μελέτης. Γενικά, οι κρίσιμες αναθεωρήσεις μιας ΑΚΖ είναι προαιρετικές.

6.1.1.2 Απογραφή δεδομένων

Η απογραφή δεδομένων είναι μια μεθοδολογία για την εκτίμηση της κατανάλωσης πόρων, των ποσοτήτων των ροών αποβλήτων και των εκπομπών που προκαλούνται από τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος ή που μπορούν να αποδοθούν με αυτόν τον τρόπο. Περιλαμβάνει διαδικασίες συλλογής δεδομένων και υπολογισμού για τον ποσοτικό προσδιορισμό των σχετικών εισροών και εκροών ενός συστήματος. Αυτές οι εισροές και εκροές ενδέχεται να περιλαμβάνουν τη χρήση πόρων και εκλύσεων στον αέρα, το νερό και τη γη που σχετίζονται με το σύστημα (Technical Committee ISORC 207, Environmental management, Subcommittee SC 5, Life cycle assessment, 1997). Οι φορείς που εφαρμόζουν την ΑΚΖ καταγράφουν τις εκπομπές και την κατανάλωση πόρων, καθώς και άλλες περιβαλλοντικές ανταλλαγές σε κάθε κρίσιμο στάδιο (φάση) του κύκλου ζωής του προϊόντος, συμπεριλαμβανομένων της παραγωγής των πρώτων υλών, κατανάλωσης ενέργειας, παραγωγής υλικών, κατασκευής, χρήσης, ανακύκλωσης, απόρριψης κλπ. (Rebitzer, et al., 2003). Πρόκειται για μια μεθοδολογία για την εκτίμηση της κατανάλωσης πόρων και των ποσοτήτων των ροών αποβλήτων και των εκπομπών που προκαλούνται από ή μπορούν να αποδοθούν με τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος. Οι διαδικασίες στο πλαίσιο του κύκλου ζωής και οι σχετικές ροές μάζας

και ενέργειας καθώς και άλλες ανταλλαγές διαμορφώνονται έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν το σύστημα του προϊόντος και τις συνολικές εισροές και εκροές του από και προς το φυσικό περιβάλλον, αντίστοιχα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα μοντέλο συστήματος προϊόντος και όλα τα δεδομένα των περιβαλλοντικών ανταλλαγών που σχετίζονται με τη λειτουργική μονάδα (Rebitzer, et al., 2003).

Μετά την απογραφή και την προκαταρκτική ανάλυση όλων των περιβαλλοντικών ανταλλαγών (εκπομπές, κατανάλωση πόρων κ.λπ.), είναι συχνά απαραίτητο για τους φορείς να υπολογίζουν, καθώς και να ερμηνεύουν, δείκτες για τις πιθανές επιπτώσεις που συνδέουν αυτές τις ανταλλαγές με το φυσικό περιβάλλον (εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής) (Rebitzer, et al., 2003). Μπορούν να αντληθούν ερμηνείες από αυτά τα δεδομένα, ανάλογα με τους στόχους και το αντικείμενο της ΑΚΖ. Αυτά τα δεδομένα αποτελούν επίσης την εισροή στην αξιολόγηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής.

Η διαδικασία διεξαγωγής μιας απογραφής αποθεμάτων είναι επαναληπτική. Καθώς προχωρά η συλλογή των δεδομένων και αυξάνεται η γνώση σχετικά με το σύστημα, ενδέχεται να εντοπιστούν νέες απαιτήσεις ή περιορισμοί δεδομένων που απαιτούν αλλαγή στις διαδικασίες συλλογής δεδομένων, έτσι ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι της μελέτης. Ενίοτε μπορεί να εντοπιστούν ζητήματα που απαιτούν αναθεώρηση του στόχου ή του αντικειμένου της μελέτης.

Διαδικασίες συλλογής δεδομένων και υπολογισμών

Τα ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα για την καταχώριση στο απόθεμα συλλέγονται για κάθε μονάδα που περιλαμβάνεται στα όρια του συστήματος. Οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων ενδέχεται να ποικίλλουν ανάλογα με το αντικείμενο, τη διεργασία της μονάδας ή την προβλεπόμενη εφαρμογή της μελέτης. Η συλλογή δεδομένων μπορεί να είναι μια διαδικασία έντασης πόρων. Οι πρακτικοί περιορισμοί στη συλλογή δεδομένων θα πρέπει να εξετάζονται στο αντικείμενο και να τεκμηριώνονται στην έκθεση της μελέτης. Ορισμένοι σημαντικοί υπολογισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη περιγράφονται παρακάτω.

- Απαιτούνται διαδικασίες κατανομής όταν πρόκειται για συστήματα που περιλαμβάνουν πολλαπλά προϊόντα (π.χ. πολλαπλά προϊόντα από τη διύλιση πετρελαίου). Οι ροές μάζας και ενέργειας, καθώς και οι σχετικές περιβαλλοντικές εκλύσεις, κατανέμονται στα διάφορα προϊόντα σύμφωνα με σαφώς καθορισμένες διαδικασίες, οι οποίες τεκμηριώνονται και αιτιολογούνται.
- Ο υπολογισμός της ροής ενέργειας θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα διαφορετικά καύσιμα και τις πηγές ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται, την αποδοτικότητα της μετατροπής και της διανομής της ροής ενέργειας, καθώς και τις εισροές και εκροές που συνδέονται με την παραγωγή και τη χρήση αυτής της ροής ενέργειας.

6.1.1.3 Εκτίμηση των επιπτώσεων

Η φάση της εκτίμησης των επιπτώσεων της ΑΚΖ στοχεύει στην αξιολόγηση της σημαντικότητας των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της απογραφής δεδομένων του κύκλου ζωής. Σε γενικές γραμμές, αυτή η διαδικασία συνεπάγεται τη συσχέτιση δεδομένων απογραφής με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την προσπάθεια κατανόησης αυτών των επιπτώσεων.

Η εκτίμηση των επιπτώσεων κύκλου ζωής παρέχει τους δείκτες και τη βάση για την ανάλυση των δυνητικών συνεισφορών της κατανάλωσης πόρων και απόρριψης αποβλήτων σε ένα αριθμό πιθανών επιπτώσεων. Το αποτέλεσμα της εκτίμησης επιπτώσεων είναι μια αξιολόγηση ενός κύκλου ζωής του προϊόντος, σε βάση λειτουργικών μονάδων, με βάση διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων (όπως κλιματική αλλαγή, τοξικολογική φόρτιση, χρήση γης κλπ.) και σε ορισμένες περιπτώσεις σε χρόνια ζωής που χάθηκαν λόγω κλιματικής αλλαγής, καρκινογόνων επιδράσεων κα (Rebitzer, et al., 2003).

Το επίπεδο λεπτομέρειας, η επιλογή των επιπτώσεων που αξιολογούνται και οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται εξαρτώνται από το στόχο και το αντικείμενο της μελέτης. Η εκτίμηση αυτή μπορεί να περιλαμβάνει την επαναληπτική διαδικασία ανασκόπησης του στόχου και του αντικειμένου της μελέτης ΑΚΖ προκειμένου να προσδιοριστεί τότε έχουν επιτευχθεί οι στόχοι της μελέτης ή να τροποποιηθεί ο στόχος και το αντικείμενο εάν η αξιολόγηση υποδεικνύει ότι δεν μπορούν να επιτευχθούν (Technical Committee ISORC 207, Environmental management, Subcommittee SC 5, Life cycle assessment, 1997). Αυτή η φάση μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερα στάδια, εκ των οποίων τα δύο πρώτα είναι υποχρεωτικά και τα επόμενα δύο προαιρετικά. Κατηγοριοποίηση (Classification), Χαρακτηρισμός (Characterization), Κανονικοποίηση (Normalization), Στάθμιση (Weighting):

- Κατηγοριοποίηση είναι η ανάθεση δεδομένων απογραφής σε κατηγορίες επιπτώσεων
- Χαρακτηρισμός είναι η μοντελοποίηση των δεδομένων απογραφής σε κατηγορίες επιπτώσεων. Το στάδιο χαρακτηρισμού αξιολογεί τον αντίκτυπο σε διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων (όπως κλιματική αλλαγή, τοξικολογική φόρτιση, χρήση ύδατος, χρήση γης κ.λπ.) και σε ορισμένες περιπτώσεις με συγκεντρωτικό τρόπο (όπως τα χρόνια ανθρώπινης ζωής που χάνονται λόγω της κλιματικής αλλαγής, καρκινογόνες επιδράσεις κλπ.) (Zhou, et al., 2014)
- Με την κανονικοποίηση φαίνεται ο βαθμός στον οποίο το αποτέλεσμα μιας κατηγορία επιπτώσεων έχει μια σχετικά μεγάλη ή μικρή τιμή συγκριτικά. Η κανονικοποίηση ξεπερνά την ασυμβατότητα των μονάδων, καθώς κάθε κατηγορία επιπτώσεων έχει τις δικές της μονάδες και τα αποτελέσματα δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα.
- Στάθμιση είναι η συγκέντρωση των αποτελεσμάτων σε πολύ συγκεκριμένες περιπτώσεις και μόνο όταν έχουν νόημα. Τα δεδομένα προ της στάθμισης πρέπει να παραμείνουν διαθέσιμα.

Το μεθοδολογικό και επιστημονικό πλαίσιο για την εκτίμηση των επιπτώσεων εξακολουθεί να αναπτύσσεται. Τα μοντέλα για τις κατηγορίες επιπτώσεων βρίσκονται σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης. Δεν υπάρχουν γενικά αποδεκτές μεθοδολογίες για τη συστηματική και ακριβή συσχέτιση των δεδομένων απογραφής με συγκεκριμένες πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Κατά συνέπεια υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις.

Οι προσεγγίσεις εκτίμησης των επιπτώσεων κύκλου ζωής αποσκοπούν στην αντιστοίχιση (χαρακτηρισμό) των εκπομπών και των εκροών του κύκλου ζωής (αποτελέσματα απογραφής δεδομένων), ανάλογα με τις επιπτώσεις, στις πιθανές περιβαλλοντικές τους ζημιές. Το αποτέλεσμα της εκτίμησης επιπτώσεων είναι μια αξιολόγηση ενός κύκλου ζωής του προϊόντος, σε βάση λειτουργικών μονάδων, από πλευράς αρκετών κατηγοριών επιπτώσεων (όπως η κλιματική αλλαγή, η τοξικολογική φόρτιση, η οξίνιση, ο ευτροφισμός κλπ.).

Υπάρχει υποκειμενικότητα στη φάση εκτίμησης των επιπτώσεων του κύκλου ζωής, όπως η επιλογή, η μοντελοποίηση και η αξιολόγηση των κατηγοριών επιπτώσεων. Ως εκ τούτου, η διαφάνεια είναι κρίσιμη για την εκτίμηση των επιπτώσεων, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι οι παραδοχές περιγράφονται σαφώς και αναφέρονται.

Οι περισσότερες μελέτες ΑΚΖ για την αφαλάτωση διεξάγονται με εμπορικά πακέτα λογισμικού. Γενικά χρησιμοποιούνται οι προκαθορισμένες μέθοδοι εκτίμησης επιπτώσεων που παρέχονται στο εκάστοτε πακέτο λογισμικού ΑΚΖ. Πολλές πρακτικές ΑΚΖ αφαλάτωσης χρησιμοποιούν την προσέγγιση που προτείνει το Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Επιστημών του Πανεπιστημίου του Leiden (CML) (Zhou, et al., 2014). Υπάρχουν διαθέσιμες και άλλες προκαθορισμένες προσεγγίσεις, όπως οι Eco Indicator 99, Eco Points 97, IMPACT 2002, και TRACI, ανάλογα με το σκοπό και τη γεωγραφική κάλυψη της έρευνας.

Το ISO 14044 συνιστά πολλούς ελέγχους για τον προσδιορισμό του βαθμού εμπιστοσύνης στα τελικά αποτελέσματα, συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης συμβολής, της ανάλυσης αβεβαιότητας, της ανάλυσης ευαισθησίας κλπ.

6.1.1.4 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι η φάση της ΑΚΖ στην οποία τα αποτελέσματα από την απογραφή δεδομένων και την εκτίμηση των επιπτώσεων συνδυάζονται μαζί ή, στην περίπτωση μελετών απογραφής κύκλου ζωής, μόνο τα συμπεράσματα της απογραφής δεδομένων, σύμφωνα με τον καθορισμένο στόχο και αντικείμενο, προκειμένου να καταλήξουν σε συμπεράσματα και συστάσεις.

Τα συμπεράσματα αυτής της ερμηνείας μπορούν να λάβουν τη μορφή συμπερασμάτων και συστάσεων προς τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, σύμφωνα με το στόχο και το αντικείμενο της μελέτης. Η φάση της ερμηνείας μπορεί να περιλαμβάνει την επαναληπτική διαδικασία της αναθεώρησης του αντικειμένου της ΑΚΖ, καθώς και τη

φύση και την ποιότητα των δεδομένων που συλλέγονται σύμφωνα με τον καθορισμένο στόχο. Τα συμπεράσματα της φάσης της ερμηνείας θα πρέπει να αντανακλούν τα αποτελέσματα οποιασδήποτε ανάλυσης ευαισθησίας που εκτελείται.

Αν και οι επακόλουθες αποφάσεις και ενέργειες ενδέχεται να περιλαμβάνουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις που εντοπίζονται στα συμπεράσματα της ερμηνείας των αποτελεσμάτων, βρίσκονται εκτός του πεδίου εφαρμογής της μελέτης ΑΚΖ, δεδομένου ότι εξετάζονται επίσης άλλοι παράγοντες όπως η τεχνική επίδοση και οι οικονομικές και κοινωνικές πτυχές.

6.2 Σκοπός και αντικείμενο της ΑΚΖ

6.2.1 Σκοπός

Σκοπός αυτής της μελέτης ΑΚΖ είναι η αξιολόγηση ενός πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας αλατούχου απόβλητου ανθρακωρυχείου σε σχέση με την υφιστάμενη μέθοδο επεξεργασίας (αραίωση με βιομηχανικά απόβλητα και διάθεση στο γειτονικό ποταμό) καθώς και τη σύγκριση μεταξύ τεσσάρων εναλλακτικών σεναρίων επεξεργασίας. Τα τέσσερα διαφορετικά εναλλακτικά σενάρια βασίζονται σε δεδομένα προσομοίωσης και αποτελούνται από τα ίδια στάδια επεξεργασίας τα οποία αναλύονται στη συνέχεια. Τα αποτελέσματα της ΑΚΖ θα χρησιμοποιηθούν κυρίως για την υποβοήθηση της διαδικασίας του σχεδιασμού ενός πιλοτικού συστήματος, παρέχοντας δεδομένα αξιολόγησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων για το σχεδιασμό και τη λειτουργία της μονάδας. Θα εξεταστεί ποια στάδια του κύκλου ζωής της επεξεργασίας των αποβλήτων συμβάλλουν περισσότερο στις συνολικές επιπτώσεις της επεξεργασίας και πως μπορεί να βελτιωθεί η απόδοσή της.

6.2.2 Λειτουργική μονάδα

Η **λειτουργική μονάδα** που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη είναι «η επεξεργασία 1 m³ υδατικού αποβλήτου ανθρακωρυχείου». Συγκεκριμένα, το υδατικό απόβλητο αναφέρεται στην τυπική σύσταση του ρεύματος αποβλήτων του ανθρακωρυχείου «Bolesław Śmiały». Η λειτουργική μονάδα και η σύστασή της περιγράφονται στον Πίνακα 11.

Πίνακας 11: Σύσταση των υδατικών αποβλήτων του ανθρακωρυχείου Bolesław Śmiały (Harris, et al., 2019)

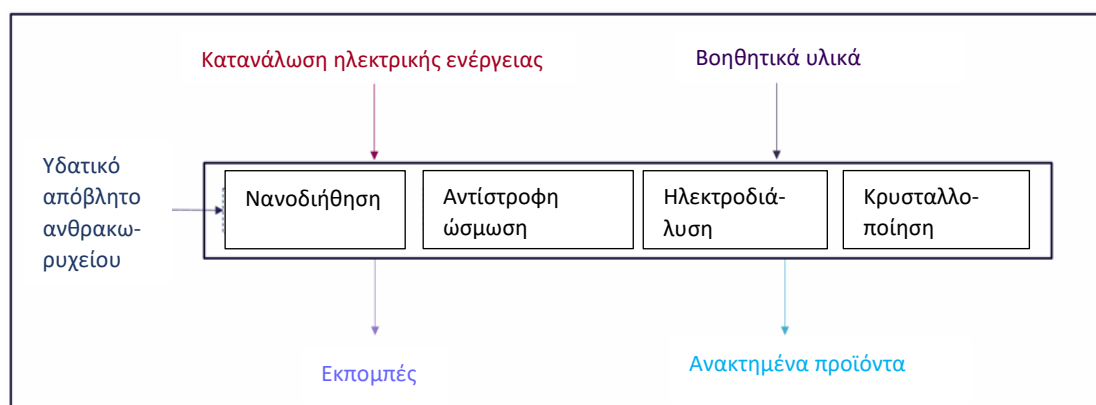
Ιόν	Μέση συγκέντρωση (g/m ³)
Li ⁺	< 2,5
Na ⁺	8191,67
NH ₄ ⁺	< 2,5

K ⁺	120,42
Mg ₂ ⁺	284,92
Ca ²⁺	342,67
Cl ⁻	13450
NO ³⁻	< 2,5
SO ₄ ²⁻	809,83
B	2,32
HCO ₃	301,08

Η επεξεργασία των υδατικών αποβλήτων ανθρακωρυχείου με την πιλοτική μονάδα ZERO BRINE είναι μια σύνθετη διαδικασία που οδηγεί στην ανάκτηση τελικών προϊόντων προστιθέμενης αξίας από υγρά απόβλητα. Η πιλοτική μονάδα αξιολογείται με έμφαση στην επεξεργασία των υδατικών αποβλήτων. Στην AKZ, επιλέχθηκε να γίνει επέκταση των ορίων του συστήματος που περιλαμβάνει την παραγωγή των αποφευγόντων προϊόντων: χλωριούχο νάτριο, γύψος, υδροξείδιο του μαγνησίου και καθαρό νερό (προϊόν αντίστροφης ώσμωσης).

6.2.3 Όρια συστήματος

Τα όρια του συστήματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 19. Τα όρια του συστήματος περιλαμβάνουν την είσοδο του αλατούχου υδατικού αποβλήτου και τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την επεξεργασία του. Τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στα όρια του συστήματος είναι οι μονάδες λειτουργίας (νανοδιήθηση, αντίστροφη ώσμωση, ηλεκτροδιάλυση και κρυσταλλοποίηση), οι απαραίτητες ροές ηλεκτρικού ρεύματος και βοηθητικών υλικών, τα παραγόμενα προϊόντα (χλωριούχο νάτριο, γύψος, υδροξείδιο του μαγνησίου και καθαρό νερό) και οι εκπομπές προς το περιβάλλον.



Σχήμα 19: Όρια του συστήματος (Harris, et al., 2019)

6.2.4 Παραδοχές

Τα πρωτογενή δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα ανάλυση, αντλήθηκαν από τη μελέτη «D7.3 Preliminary LCA and LCC of the Demonstration Projects» με σκοπό να εξυπηρετούν τους σκοπούς της παρούσας μελέτης. Πρωτογενή δεδομένα είναι κυρίως αποτελέσματα εργαστηριακών αναλύσεων σε συνδυασμό με δεδομένα προσομοίωσης.

- Η παρούσα μελέτη διεξήχθη με τη χρήση πειραματικών δεδομένων και προσομοιώσεων με αποτέλεσμα ορισμένους περιορισμούς που θα επηρεάσουν τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης.
- Η κατασκευή των επιμέρους μονάδων δεν λαμβάνεται υπόψη.
- Η υφιστάμενη πρακτική η οποία είναι η απόρριψη του αποβλήτου στο ποτάμι δεν αναλύεται στα επόμενα κεφάλαια. Ο λόγος για τον οποίο γίνεται αυτό, αναλύεται εκτενώς στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

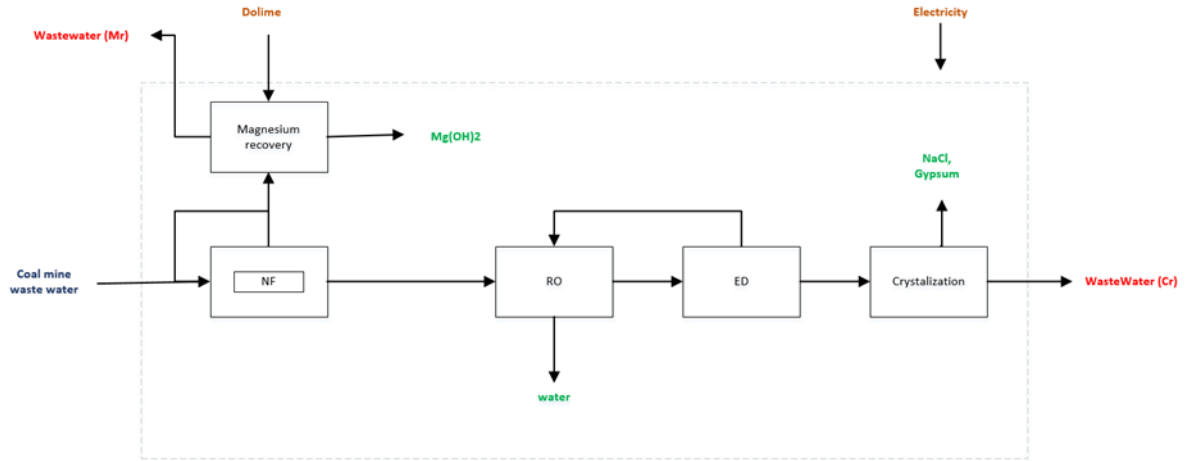
Η μελέτη AKZ διεξήχθη με τη χρήση του λογισμικού SimaPro 9.1 και της βάσης δεδομένων Ecoinvent 3.6.

6.3 Απογραφή δεδομένων

Η απογραφή των δεδομένων του κύκλου ζωής διεξήχθη για την επεξεργασία 1 m³ υδατικού αποβλήτου ανθρακωρυχείου σε πιλοτική κλίμακα.

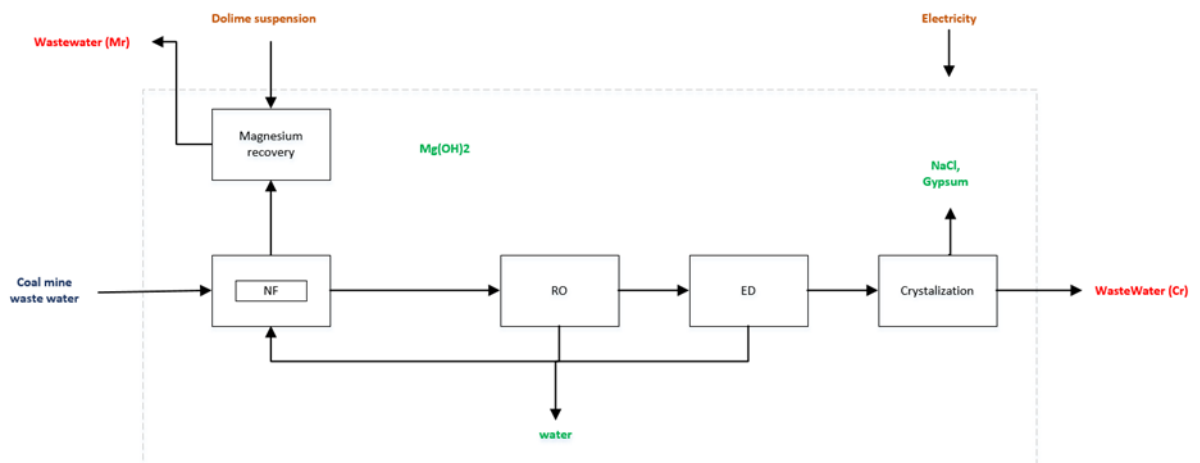
Τέσσερις διαφορετικές εναλλακτικές διαμορφώσεις για την επεξεργασία 1 m³ υδατικού αποβλήτου αξιολογήθηκαν και συγκρίθηκαν. Τα στοιχεία της απογραφής δεδομένων περιλαμβάνουν: την κατανάλωση ενέργειας της πιλοτικής μονάδας, χημικά αντιδραστήρια για τη λειτουργία και τον καθαρισμό και προϊόντα ανάκτησης. Ωστόσο, η χρήση ανταλλακτικών δεν περιλαμβάνεται στην παρούσα μελέτη, καθώς δεδομένα για την κατανάλωση ενέργειας των επιμέρους μονάδων δεν είναι ακόμη διαθέσιμα. Ακολουθούν τα διαγράμματα ροής για κάθε μία από τις τέσσερις διαμορφώσεις καθώς και πίνακες με όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.

1^η διαμόρφωση: νανοδιήθηση ενός σταδίου, το αραιωμένο διάλυμα από την ηλεκτροδιάλυση ανακυκλώνεται πριν την αντίστροφη ώσμωση



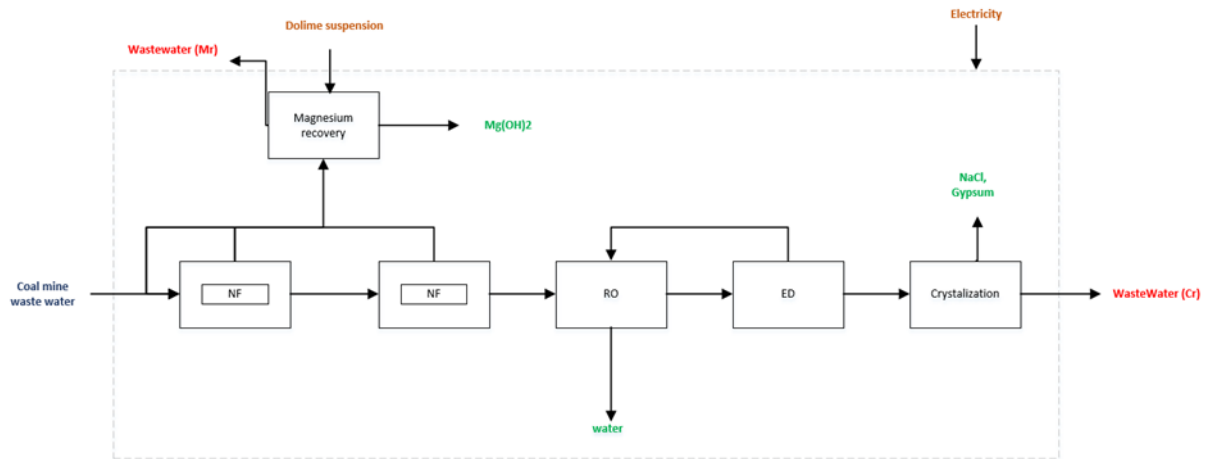
Σχήμα 20: Διάγραμμα ροής της 1^{ης} διαμόρφωσης (Harris, et al., 2019)

2^η διαμόρφωση: νανοδιήθηση ενός σταδίου, το αραιωμένο διάλυμα από την ηλεκτροδιάλυση ανακυκλώνεται πριν τη νανοδιήθηση



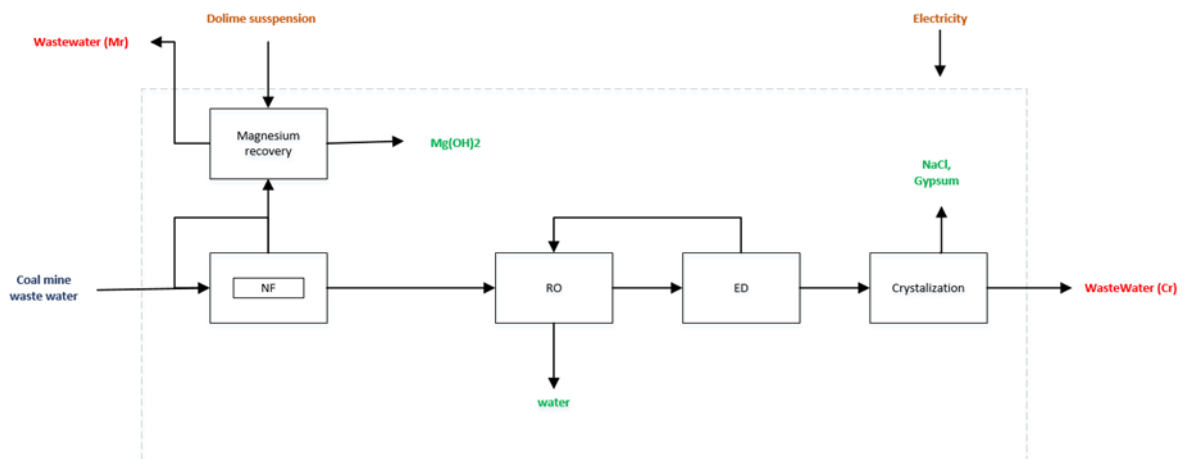
Σχήμα 21: Διάγραμμα ροής 2^{ης} διαμόρφωσης (Harris, et al., 2019)

3^η διαμόρφωση: νανοδιήθηση δύο σταδίων, το 75% του συμπυκνώματος της νανοδιήθησης ανακυκλώνεται, το αραιωμένο διάλυμα από την ηλεκτροδιάλυση ανακυκλώνεται πριν την αντίστροφη ώσμωση



Σχήμα 22: Διάγραμμα ροής 3^{ης} διαμόρφωσης (Harris, et al., 2019)

4^η διαμόρφωση: νανοδιήθηση ενός σταδίου, το 75% του κατακρατήματος της νανοδιήθησης ανακυκλώνεται, το αραιωμένο διάλυμα από την ηλεκτροδιάλυση ανακυκλώνεται πριν την αντίστροφη ώσμωση



Σχήμα 23: Διάγραμμα ροής 4^{ης} διαμόρφωσης (Harris, et al., 2019)

Πίνακας 12: Απογραφή δεδομένων κύκλου ζωής, για λειτουργική μονάδα 1 m³ υδατικού αποβλήτου (Harris, et al., 2019)

		Μονάδα	Διαμ. 1	Διαμ.2	Διαμ. 3	Διαμ. 4
Κατανάλωση ενέργειας						
Παραγωγή dolime		kWh	1.067	0.832	2.176	0.451
Στάδια διεργασιών		kWh	6.4	8.2	8.875	11.425
Βοηθητικά υλικά						
Υλικό	Στάδιο					

Δολομίτης	Ανάκτηση μαγνησίου	kg	21.610	16.866	44.083	9.152
Τριφωσφορικό νάτριο	νανοδιήθηση	kg	0.0008	0.0004	0.0008	0.0004
EDTA		kg	0.01	0.005	0.01	0.005
Υδροξείδιο του νατρίου	Αντίστροφη ώσμωση	kg	0.00058	0.00058	0.00058	0.00058
Υδροχλωρικό οξύ		kg	0.00006	0.00006	0.00006	0.00006
EDTA		kg	0.006	0.006	0.006	0.006
Εκροές υδατικών αποβλήτων						
Ανάκτηση μαγνησίου		m ³	0.42325	0.289	0.2915	0.080425
Κρυστάλλωση		m ³	0.00042	0.005515	0.0022175	0.0128225
Ανακτώμενα προϊόντα						
Απιονισμένο νερό		m ³	0.56625	0.67525	0.69575	0.855
Χλωριούχο νάτριο		kg	3.425	6.525	5.125	9.425
Γύψος		kg	<0.025	0.025	1.025	0.825
Υδροξείδιο του μαγνησίου		kg	1.3625	1.065	2.7775	0.5775

Πίνακας 13: Σύσταση υδατικών αποβλήτων από την ανάκτηση μαγνησίου για κάθε διαμόρφωση (Harris, et al., 2019)

Συγκέντρωση ιόντων (g/m ³)	Διαμ. 1	Διαμ. 2	Διαμ. 3	Διαμ.4
Cl ⁻	23370	19900	15470	16600
SO ₄ ²⁻	1912	2736	1370	3990
Mg ²⁺	0	0	0	0
Ca ²⁺	1897	2102	5404	1850
Ca ²⁺	23370	19900	15470	16600

Πίνακας 14: Σύσταση υδατικών αποβλήτων από την κρυστάλλωση για κάθε διαμόρφωση (Harris, et al., 2019)

Συγκέντρωση ιόντων (g/m ³)	Διαμ. 1	Διαμ. 2	Διαμ. 3	Διαμ.4
Cl ⁻	200000	200000	200000	200000
SO ₄ ²⁻	376	455	291	1608
Mg ²⁺	7545	11700	4477	12890
Ca ²⁺	22210	17390	27700	15490
Ca ²⁺	200000	200000	200000	200000

6.4 Εκτίμηση Επιπτώσεων

Οι επιπτώσεις του κύκλου ζωής εκτιμήθηκαν με τη χρήση των μεθόδων ILCD 2011 Midpoint+ και IMPACT 2002+, προκειμένου να επιτευχθούν όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Σημαντικές κατηγορίες επιπτώσεων για την εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής στα υδατικά απόβλητα περιλαμβάνουν όσες σχετίζονται με την

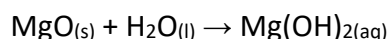
τοξικότητα, τον ευτροφισμό (θαλάσσια και γλυκά ύδατα), την υπερθέρμανση του πλανήτη, την όξυνση, την ιονίζουσα ακτινοβολία και σε ορισμένες περιπτώσεις τη χρήση νερού, γης και τη μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος.

Όσον αφορά την εισαγωγή των δεδομένων εισροών και εκροών στο λογισμικό έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Το απιονισμένο νερό θεωρήθηκε ότι θα χρησιμοποιηθεί σαν πρώτη ύλη από τη βιομηχανία και έχει τις ανάλογες προδιαγραφές.
- Ομοίως για το χλωριούχο νάτριο, οι προδιαγραφές του είναι οι αντίστοιχες για βιομηχανική χρήση.
- Όσον αφορά το γύψο, καθώς οι προδιαγραφές για τη βιομηχανική χρήση δεν υπάρχουν στη βάση δεδομένων θεωρήθηκε ότι έχει τις προδιαγραφές του ορυκτού γύψου, ο οποίος αποτελεί ούτως ή άλλως βιομηχανική πρώτη ύλη.
- Η ένωση dolime δεν περιλαμβάνεται στη βάση δεδομένων. Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε η διεργασία παραγωγής του σύμφωνα με τα εξής:
Ο dolime (CaO·MgO) είναι το προϊόν της διάσπασης του δολομίτη (CaCO₃·MgCO₃) όταν αυτός θερμαίνεται σε θερμοκρασία άνω των 900°C και απαιτεί ενέργεια 2.935 GJ/t CaO·MgO, σύμφωνα με την αντίδραση: (Lhoist, Τελευταία προσπέλαση 2020).



- Ο ηλεκτρισμός που χρησιμοποιείται από όλη τη διεργασία είναι υψηλής τάσης.
- Η πυκνότητα του απιονισμένου νερού θεωρήθηκε ίση με 1 kg/L για διευκόλυνση των υπολογισμών.
- Το υδροξείδιο του μαγνησίου δεν υπάρχει στη βάση δεδομένων. Οι υπολογισμοί έγιναν με βάση το οξείδιο του μαγνησίου μετά από κατάλληλο υπολογισμό της μάζας σύμφωνα με τη στοιχειομετρία της αντίδρασης:

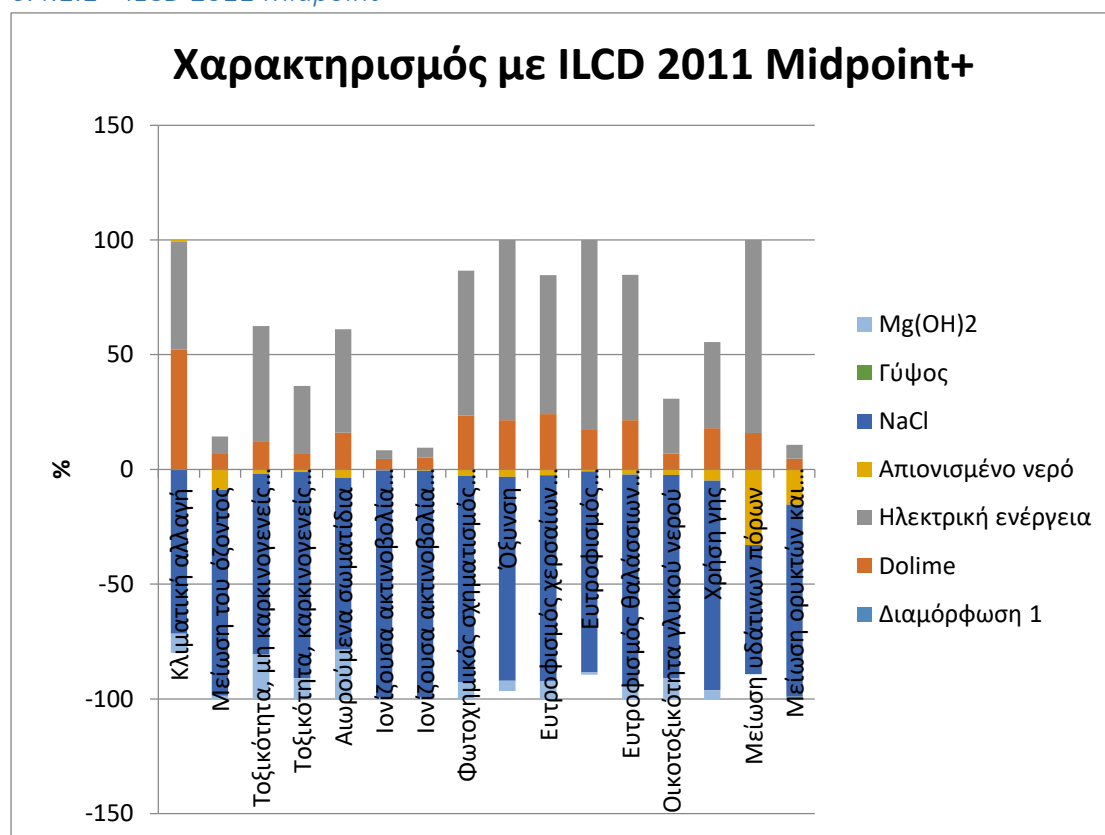


Στην πορεία, εξετάστηκαν οι συνεισφορές των επιμέρους διεργασιών στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος επεξεργασίας. Ωστόσο, η συμβολή κάθε επιμέρους διεργασίας δεν είναι αντιπροσωπευτική, καθώς αξιόπιστα δεδομένα για την κατανάλωση ενέργειας αφορούν μόνο ολόκληρη τη διαδικασία. Τα αποφεύγοντα (ανακτημένα) τελικά προϊόντα έχουν συμπεριληφθεί στην απογραφή δεδομένων του κύκλου ζωής. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα αποτελέσματα έχουν ληφθεί με τη χρήση του λογισμικού SimaPro 9.1 και της βάσης δεδομένων Ecoinvent 3.6 και παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα (οι κατηγορίες επιπτώσεων με μηδενικές τιμές δεν εμφανίζονται στα σχήματα).

6.4.1 Διαμόρφωση 1^η

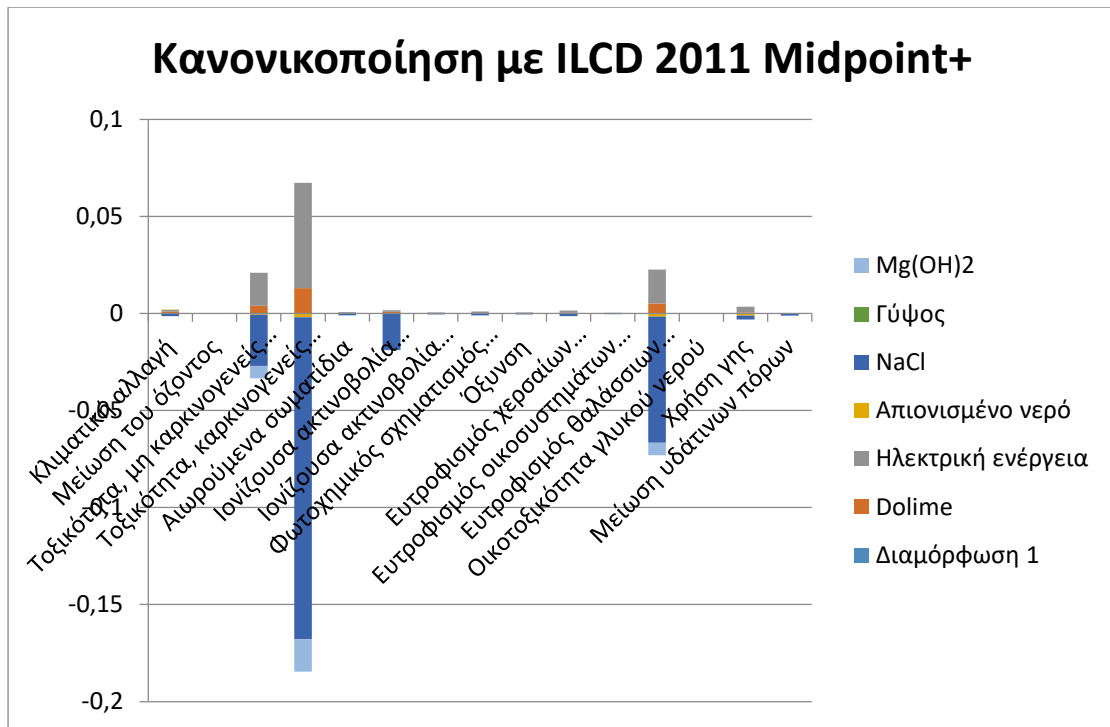
Ακολουθούν τα αποτελέσματα της ΑΚΖ για την 1^η Διαμόρφωση και με τις δυο μεθόδους, σε μορφή διαγραμμάτων.

6.4.1.1 ILCD 2011 Midpoint+

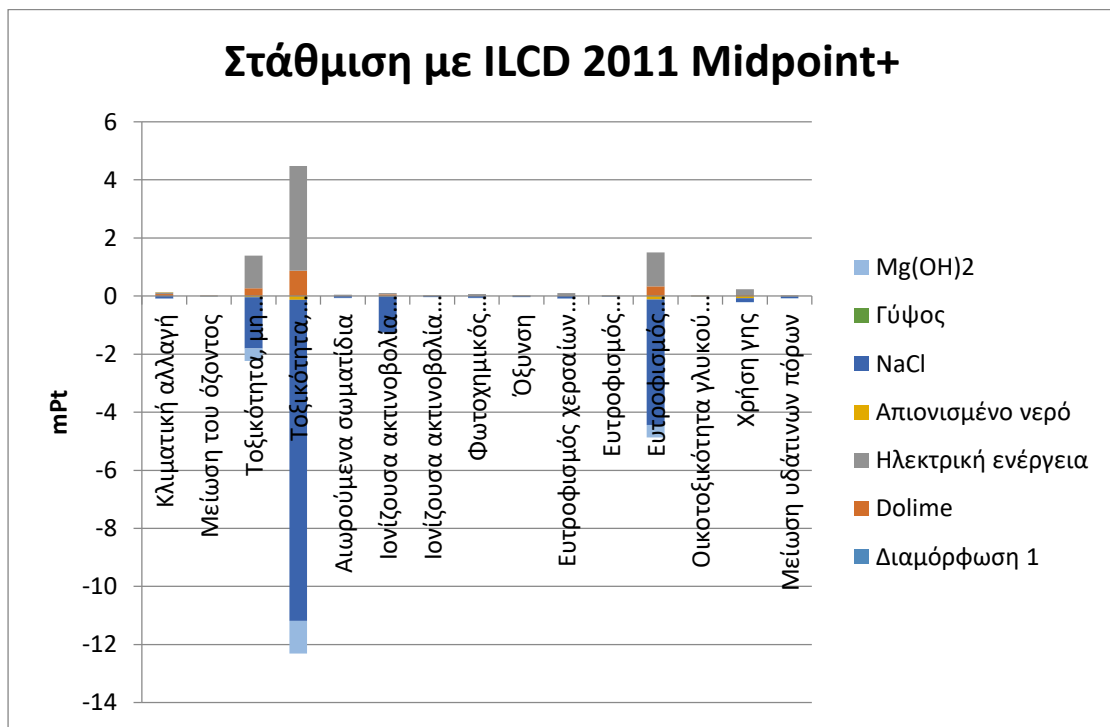


Σχήμα 24: Χαρακτηρισμός

Όπως ήταν αναμενόμενο η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και η χρήση του dolime εντείνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μονάδας, ενώ η παραγωγή και η ανάκτηση χρήσιμων προϊόντων για τη βιομηχανία συμβάλλει στην αντιμετώπισή τους. Το μεγαλύτερο ποσοστό στην πρόκληση περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατέχει η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας και στη συνέχεια η χρήση του dolime, καθώς η παραγωγή του απαιτεί επιπλέον ενέργεια, αλλά στις ποσότητες που χρησιμοποιείται η συνεισφορά του παραμένει χαμηλότερη. Η παραγωγή χλωριούχου νατρίου από την άλλη έχει ακριβώς αντίθετη επίδραση καθώς αποφεύγεται η εκ νέου παραγωγή του με ότι επιπτώσεις αυτή συνεπάγεται. Η παραγωγή απιονισμένου νερού φυσικά αφορά κυρίως την επίπτωση των υδάτινων πόρων.



Σχήμα 25: Κανονικοποίηση

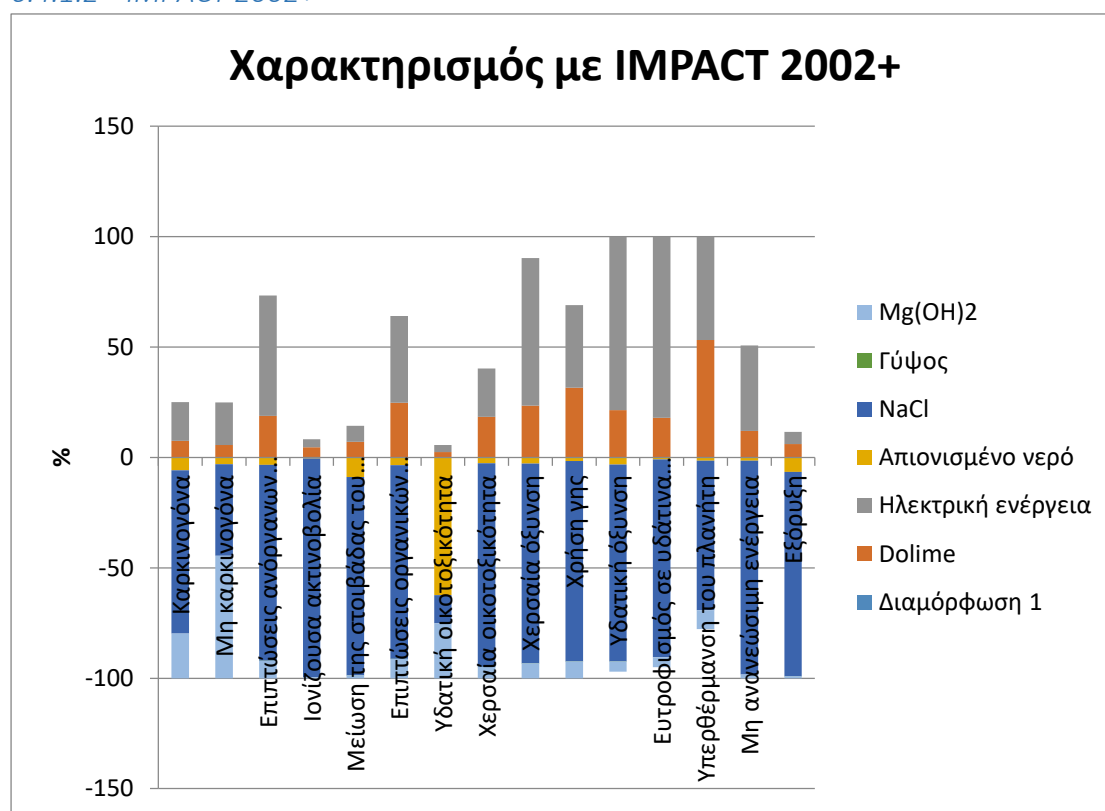


Σχήμα 26: Στάθμιση

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα το στάδιο του Χαρακτηρισμού από μόνο του δεν παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα της Κανονικοποίησης και της Στάθμισης είναι παρόμοια ποιοτικά. Από τα διαγράμματα εξάγονται

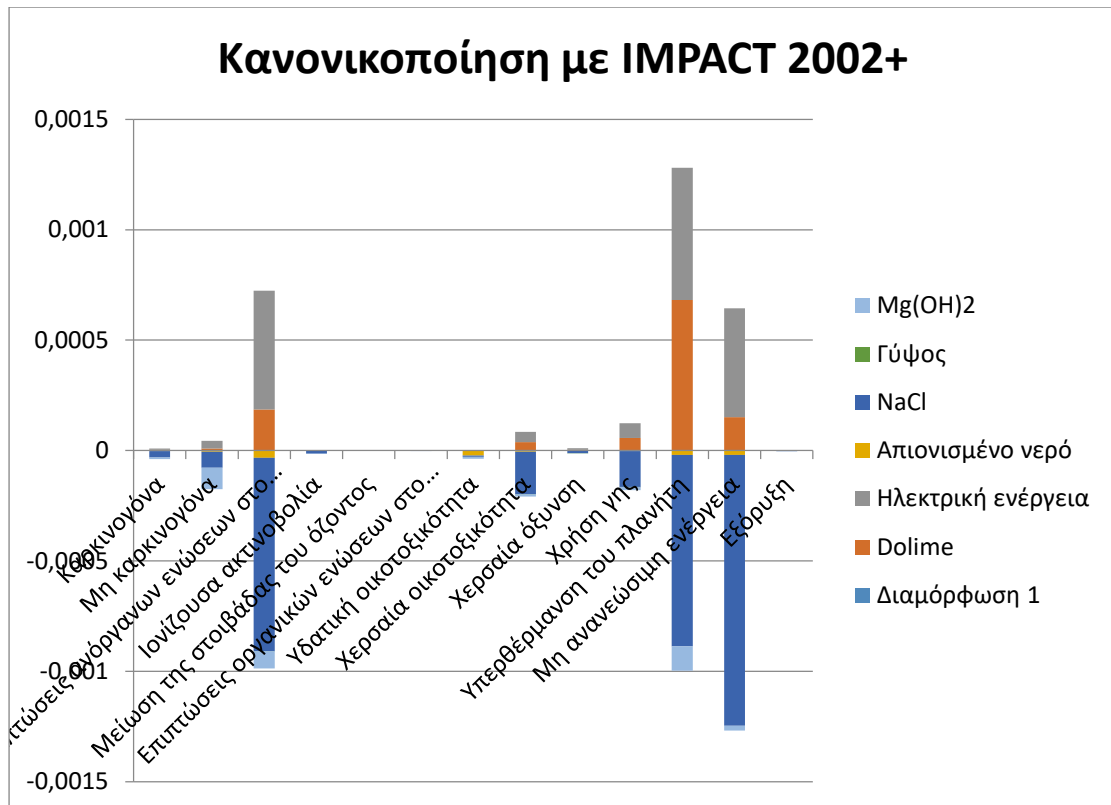
δύο σημαντικά συμπεράσματα. Πρώτον, γίνεται κατανοητό ότι λίγες κατηγορίες επιπτώσεων έχουν πραγματικά σημασία για την εκφορά συμπερασμάτων. Δεύτερον, η συγκεκριμένη διαμόρφωση της μονάδας, αναλυμένη με τη συγκεκριμένη μέθοδο περιορίζει αθροιστικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τουλάχιστον στις σημαντικές κατηγορίες επιπτώσεων.

6.4.1.2 IMPACT 2002+

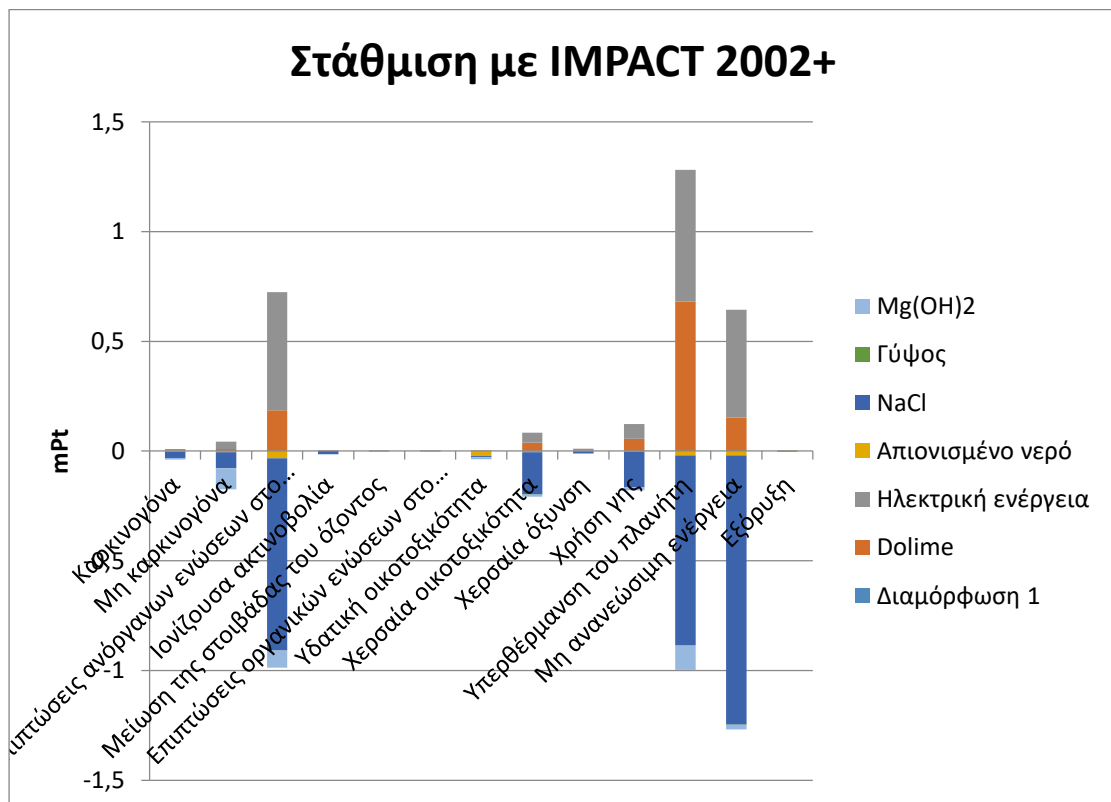


Σχήμα 27: Χαρακτηρισμός

Η μέθοδος IMPACT 2002+ διαφέρει στις κατηγορίες επιπτώσεων που διαθέτει, παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη ανάλυση. Και στην παραπάνω περίπτωση του χαρακτηρισμού φαίνεται ο βαθμός εξάρτησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις εισροές και εκροές της συνολικής διεργασίας. Η παραγωγή χλωριούχου νατρίου συμβάλλει θετικά στη μείωση των επιπτώσεων όλων των κατηγοριών και σε μεγάλο βαθμό, πλην της υδατικής οξυτοξικότητας όπου η παραγωγή απιονισμένου νερό έχει μεγαλύτερη συμμετοχή.



Σχήμα 28: Κανονικοποίηση



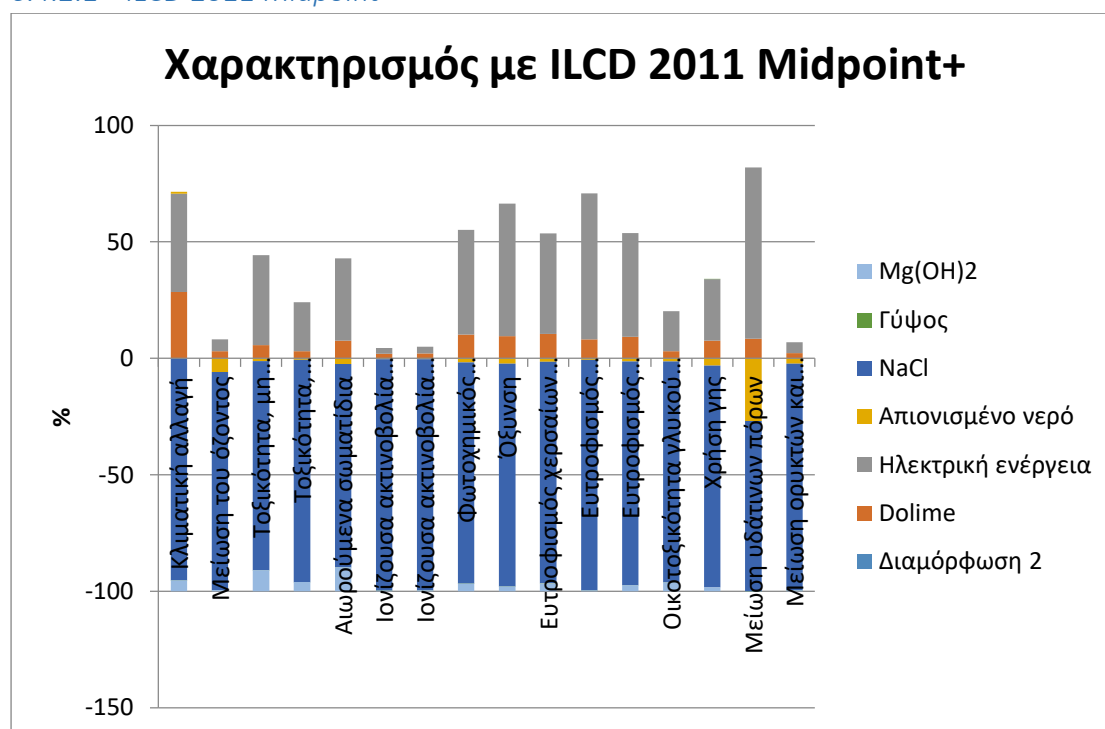
Σχήμα 29: Στάθμιση

Τα αποτελέσματα την Κανονικοποίησης και της Στάθμισης είναι και πάλι παρόμοια, με μια σημαντική όμως διαφορά. Ενώ με την προηγούμενη μέθοδο η 1^η Διαμόρφωση είχε συνολικά καλή περιβαλλοντική επίδοση, με την IMPACT 2002+ φαίνεται ότι συμβάλλει στην ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

6.4.2 Διαμόρφωση 2^η

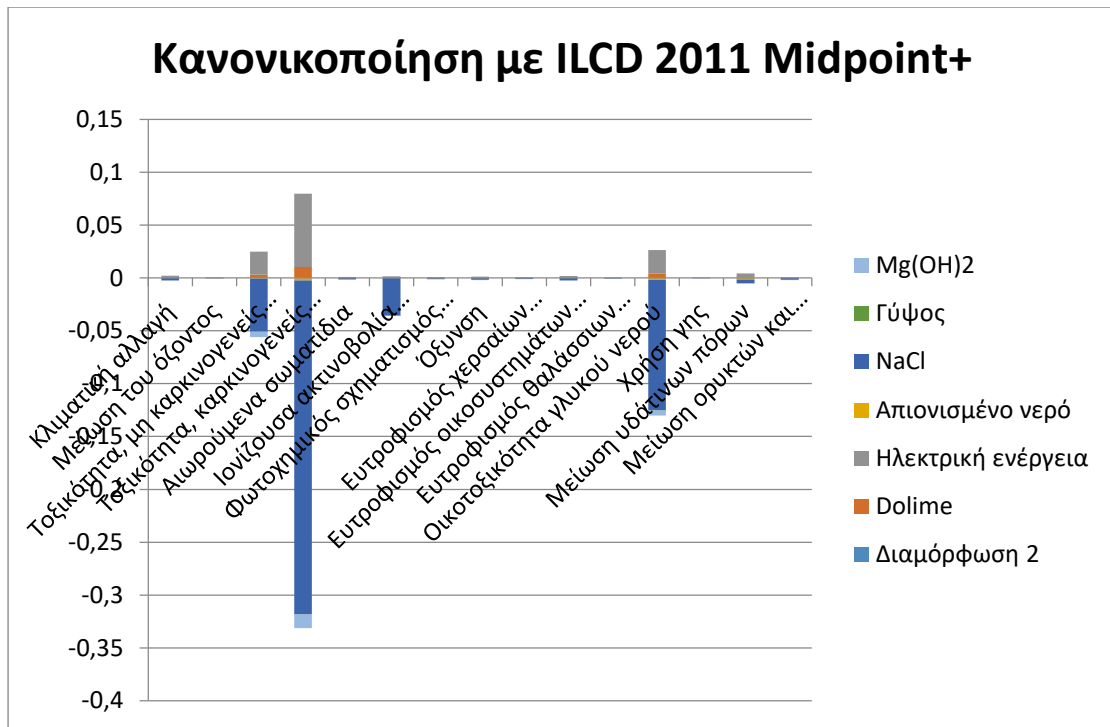
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της 2^{ης} Διαμόρφωσης, με τον ίδιο τρόπο και για τις δύο μεθόδους.

6.4.2.1 ILCD 2011 Midpoint+

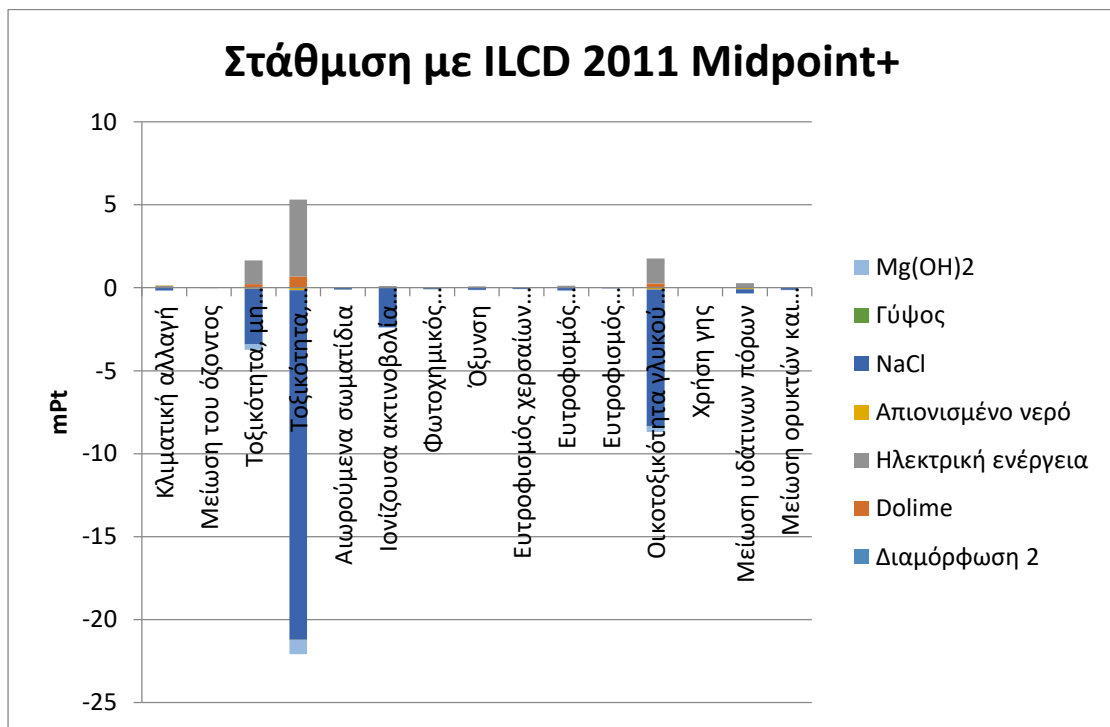


Σχήμα 30: Χαρακτηρισμός

Η 2^η Διαμόρφωση παρέχει παρόμοια αποτελέσματα Χαρακτηρισμού με την 1^η, με τη διαφορά ότι τα ποσοστά της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερα.



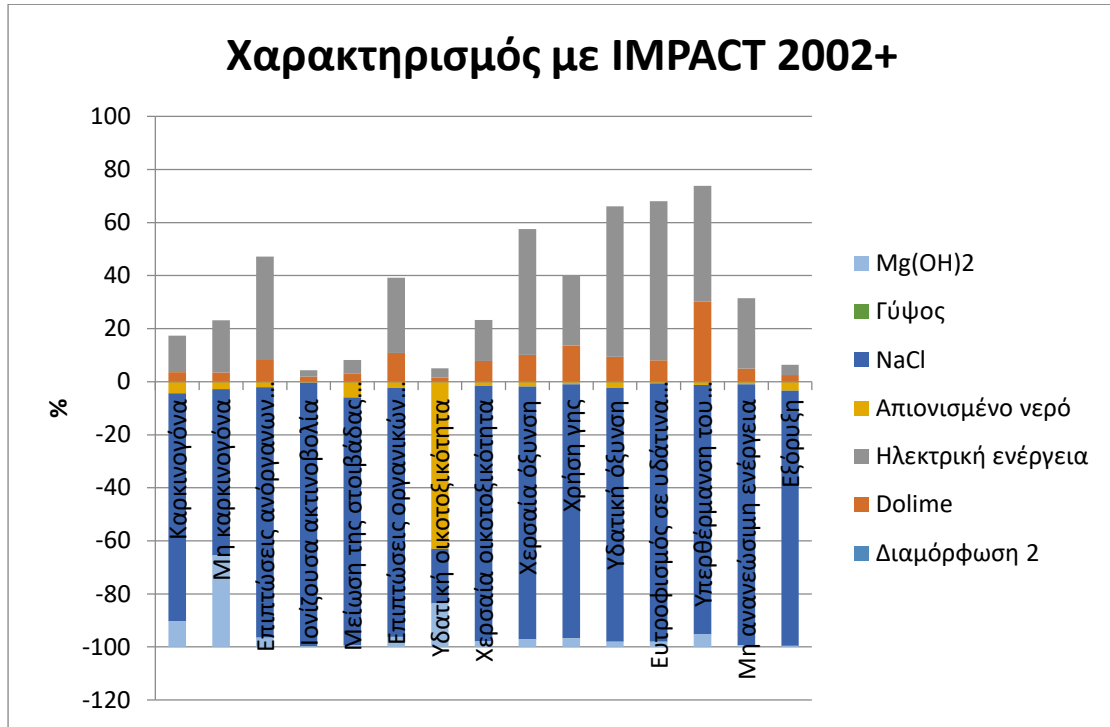
Σχήμα 31: Κανονικοποίηση



Σχήμα 32: Στάθμιση

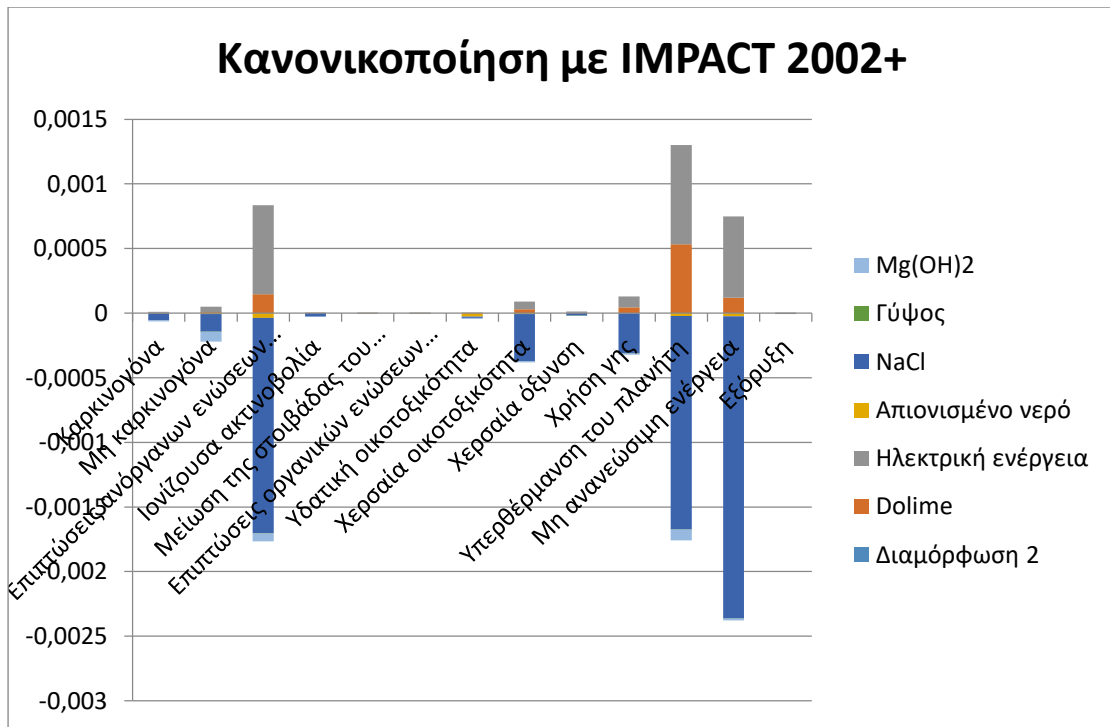
Από τα διαγράμματα Κανονικοποίησης και Στάθμισης η 2^η Διαμόρφωση φαίνεται να παρουσιάζει καλύτερη επίδοση από την 1^η, ενώ οι σημαντικές περιβαλλοντικές απιπτώσεις αφορούν τις ίδιες κατηγορίες όπως είναι λογικό.

6.4.2.2 IMPACT 2002+

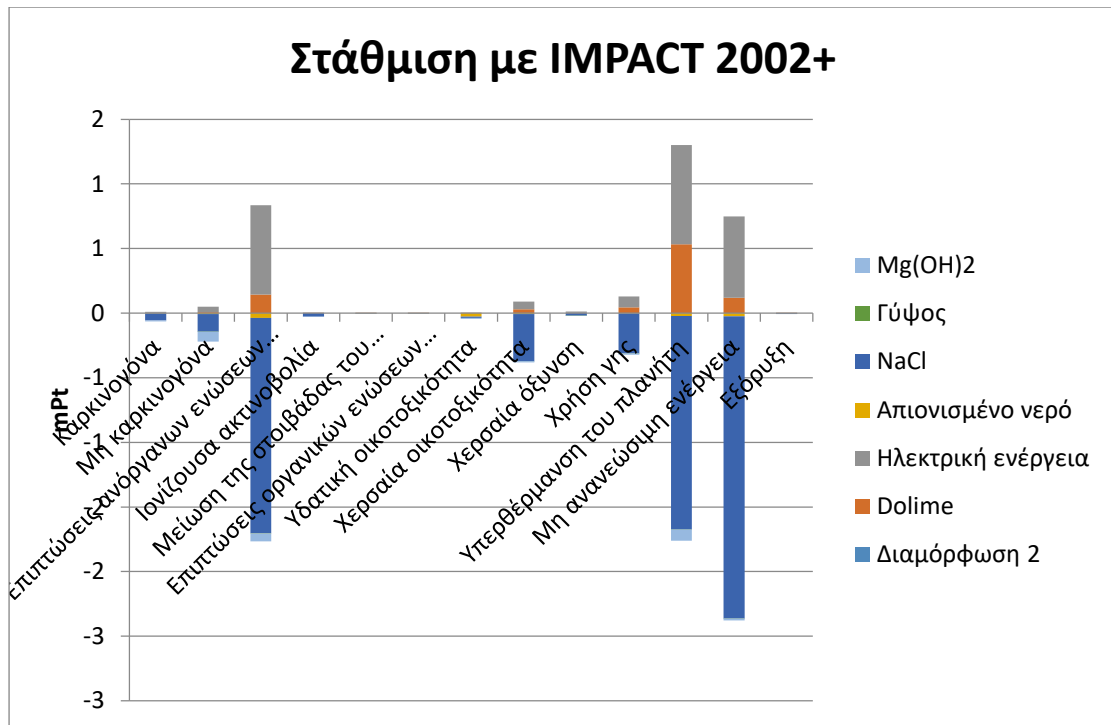


Σχήμα 33: Χαρακτηρισμός

Παρόμοια με τη μέθοδο ILCD 2011 η IMPACT 2002+ υπολογίζει χαμηλότερα ποσοστά για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στις επιμέρους κατηγορίες, σε σχέση με την 1^η Διαμόρφωση.



Σχήμα 34: Κανονικοποίηση



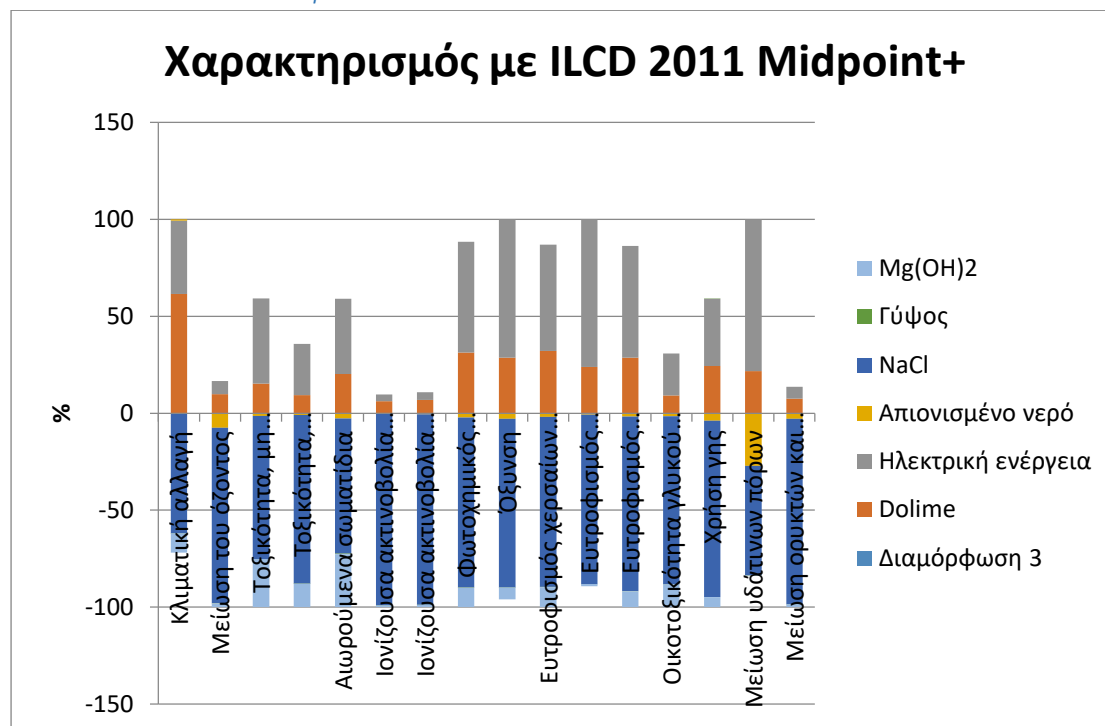
Σχήμα 35: Στάθμιση

Εν τέλει από την εφαρμογή της μεθόδου IMPACT 2002+ προκύπτει μια καλή περιβαλλοντική επίδοση για τη 2^η Διαμόρφωση.

6.4.3 Διαμόρφωση 3^η

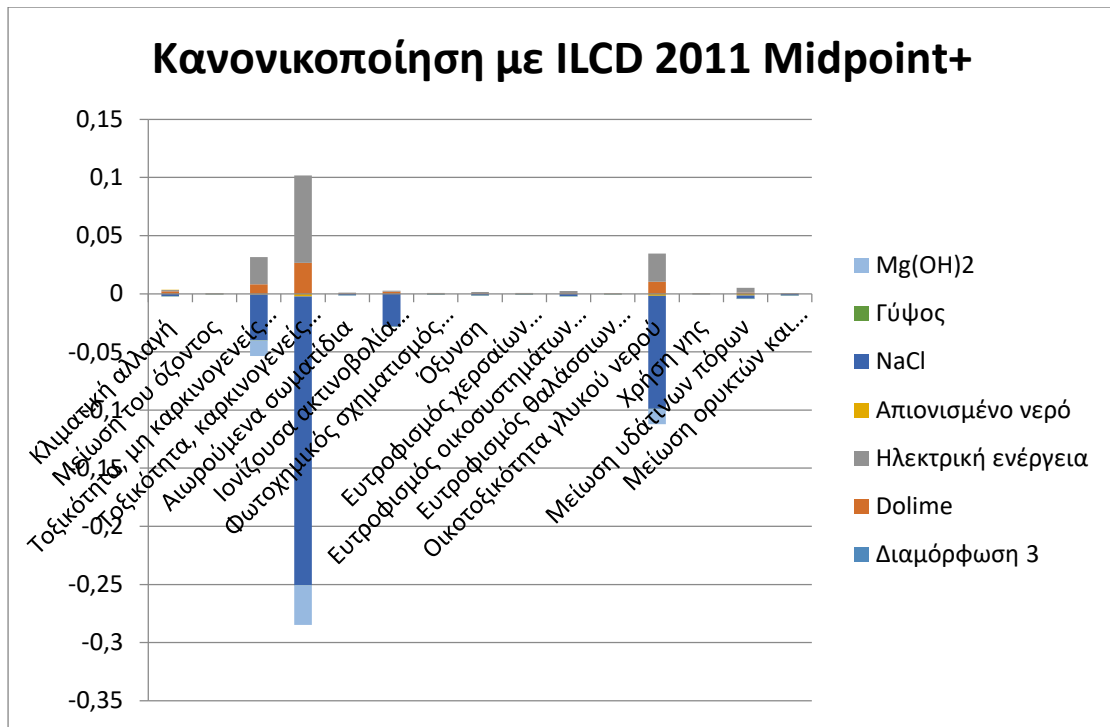
Ακολουθήθηκαν τα ίδια βήματα για την ανάλυση της 3^{ης} Διαμόρφωσης και τα αποτελέσματα αναλύονται παρακάτω.

6.4.3.1 ILCD 2011 Midpoint+

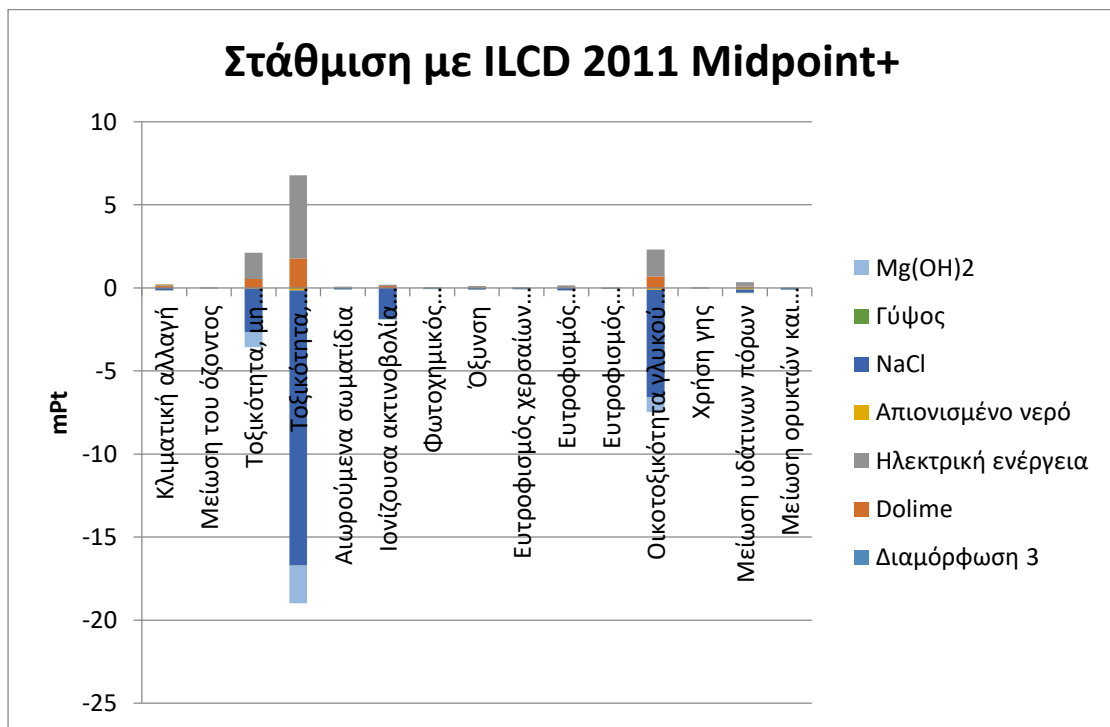


Σχήμα 36: Χαρακτηρισμός

Τα αποτελέσματα του Χαρακτηρισμού για την 3^η Διαμόρφωση είναι παρόμοια με των προηγούμενων, με τη διαφορά ότι τα επιμέρους ποσοστά των εισροών ενέργειας και dolime στις επιπτώσεις να είναι αυξημένα. Αυτό είναι ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα, καθώς η 3^η Διαμόρφωση χαρακτηρίζεται από υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τις δύο προηγούμενες διαμορφώσεις αλλά και τη μεγαλύτερη κατανάλωση dolime γενικά.



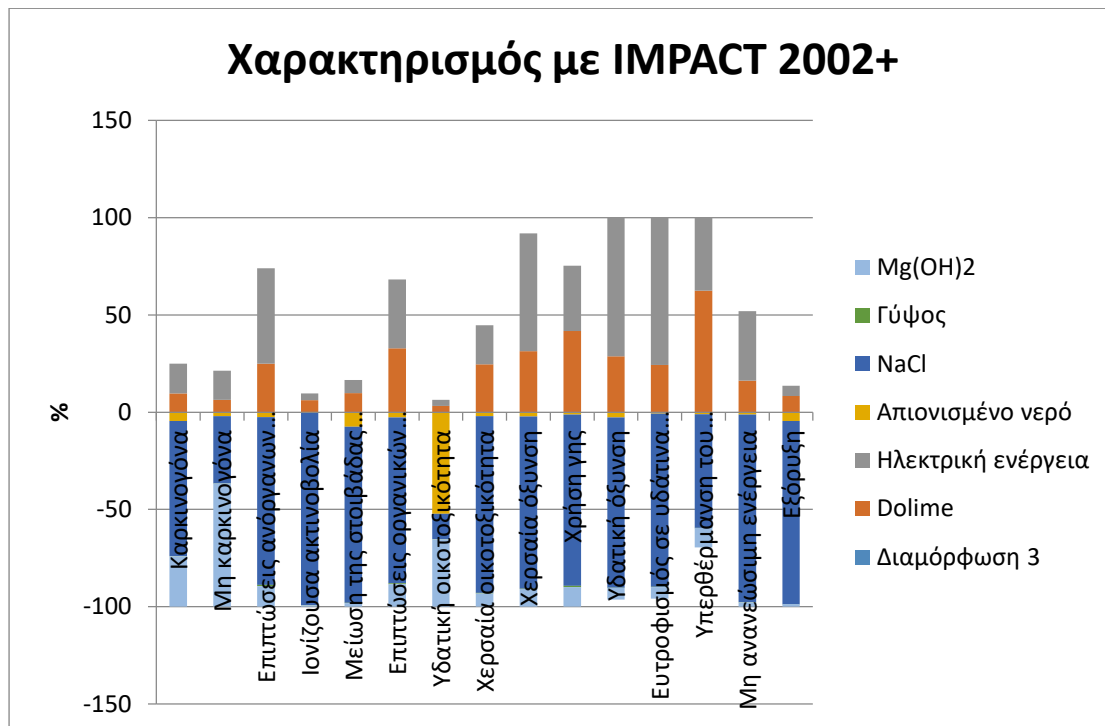
Σχήμα 37: Κανονικοποίηση



Σχήμα 38: Στάθμιση

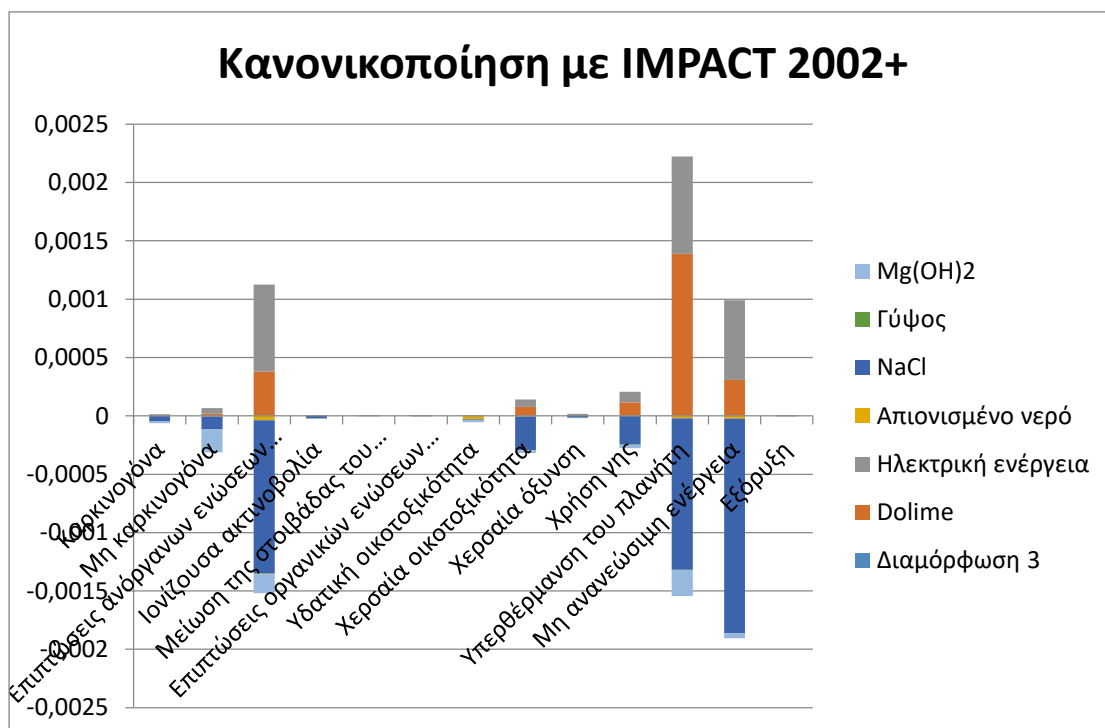
Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η 3^η Διαμόρφωση παρουσιάζει περιβαλλοντικές επιπτώσεις με μεγαλύτερη ένταση σε σχέση με τις προηγούμενες δύο διαμορφώσεις. Ωστόσο, οι επιπτώσεις μετριάζονται σε μεγαλύτερο βαθμό από τα αποφεύγοντα προϊόντα.

6.4.3.2 IMPACT 2002+

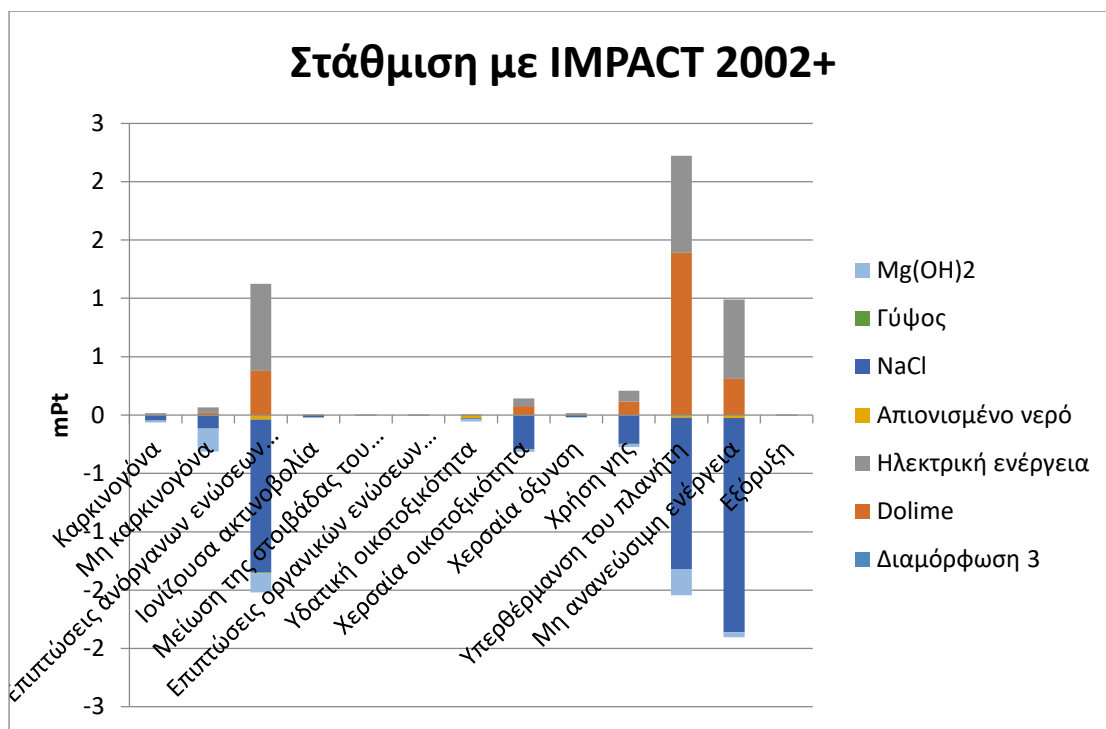


Σχήμα 39: Χαρακτηρισμός

Τα αποτελέσματα του Χαρακτηρισμού για την 3^η Διαμόρφωση είναι αρκετά παρόμοια με αυτά της 1^{ης} για τη συγκεκριμένη μέθοδο.



Σχήμα 40: Κανονικοποίηση



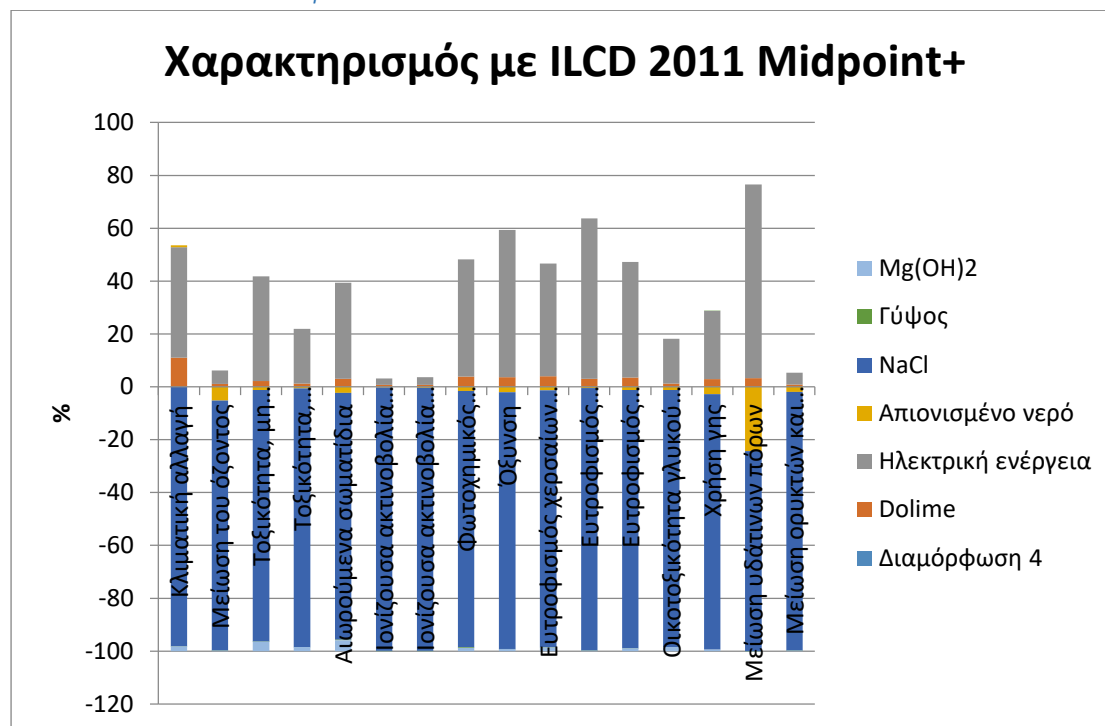
Σχήμα 41: Στάθμιση

Τα επόμενα στάδια της ανάλυσης υποδεικνύουν περιβαλλοντική επίδοση παρόμοια με αυτή της 1^{ης} Διαμόρφωσης αλλά με μεγαλύτερες περιβαλλοντικές συνέπειες όσον αφορά την υπερθέρμανση του πλανήτη. Αυτό φυσικά οφείλεται στη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και dolime.

6.4.4 Διαμόρφωση 4^η

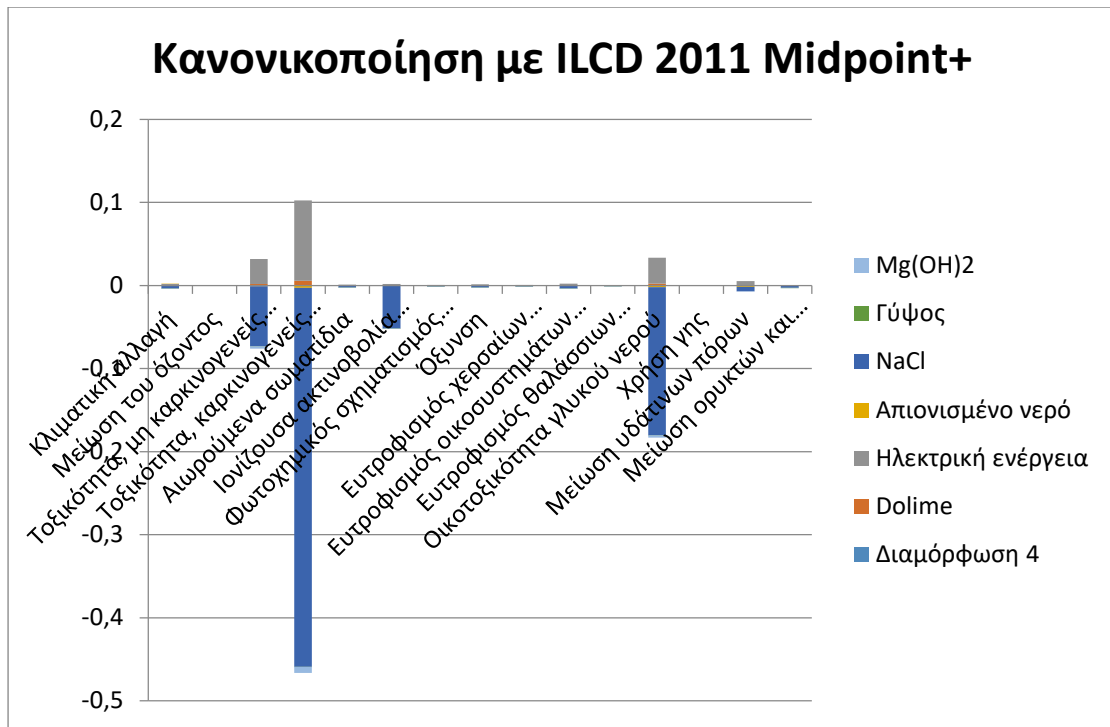
Τέλος, αναλύθηκε με τις ίδιες μεθόδους και η 4^η Διαμόρφωση και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

6.4.4.1 ILCD 2011 Midpoint+

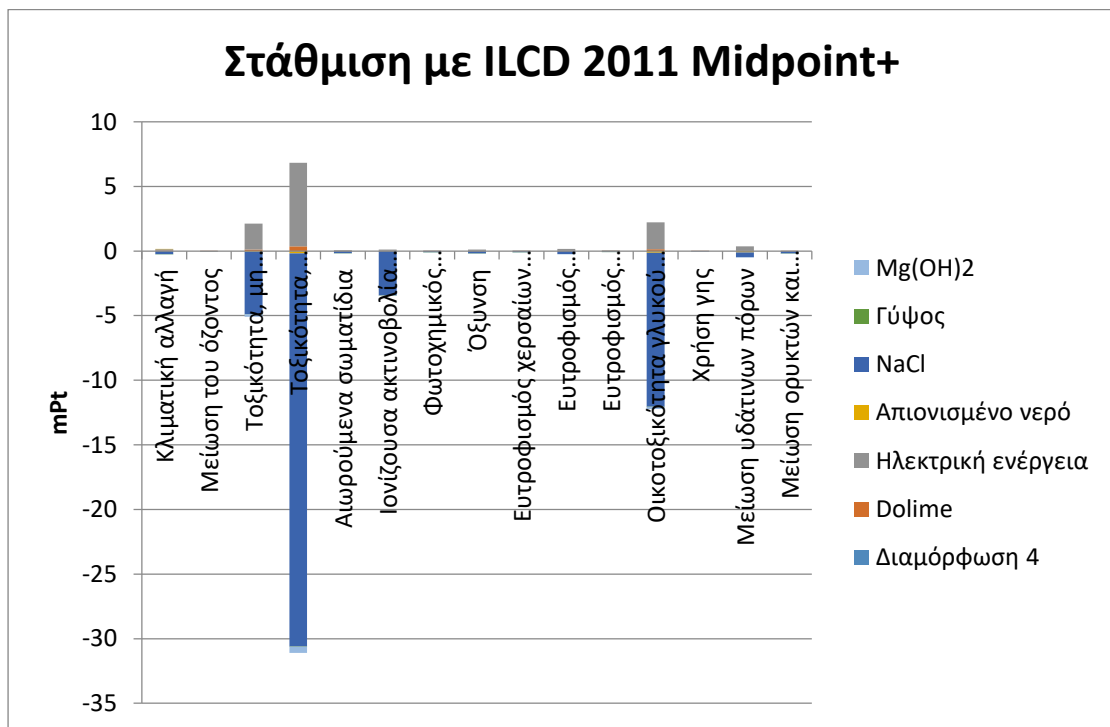


Σχήμα 42: Χαρακτηρισμός

Τα αποτελέσματα του Χαρακτηρισμού για την 4^η Διαμόρφωση είναι αρκετά παρόμοια με αυτά της 2^{ης}. Σημαντική διαφορά της 4^{ης} Διαμόρφωσης σε σχέση με τις υπόλοιπες είναι ότι χαρακτηρίζεται από τη μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και ταυτόχρονα από τη χαμηλότερη κατανάλωση dolime. Αυτό είναι εμφανές και από τα επιμέρους ποσοστά της ηλεκτρικής ενέργειας και του dolime στο διάγραμμα.



Σχήμα 43: Κανονικοποίηση

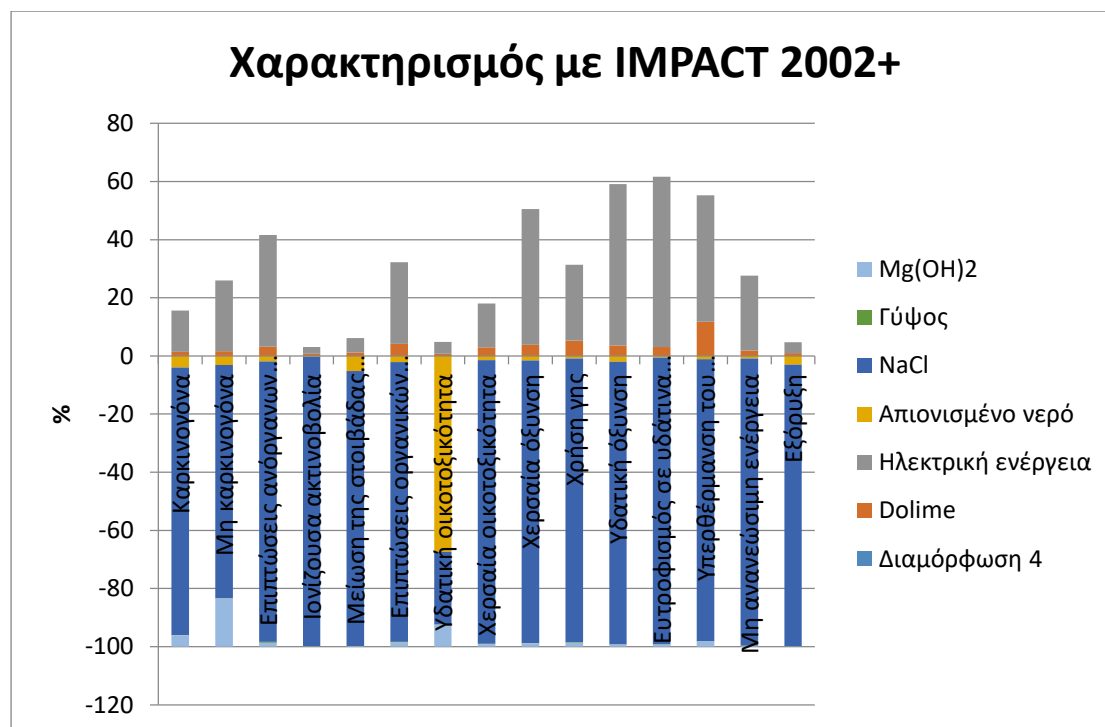


Σχήμα 44: Στάθμιση

Από τα ανωτέρω διαγράμματα φαίνεται ότι η 4^η Διαμόρφωση παρουσιάζει μια πολύ καλή περιβαλλοντική επίδοση. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά της 2^{ης} Δια-

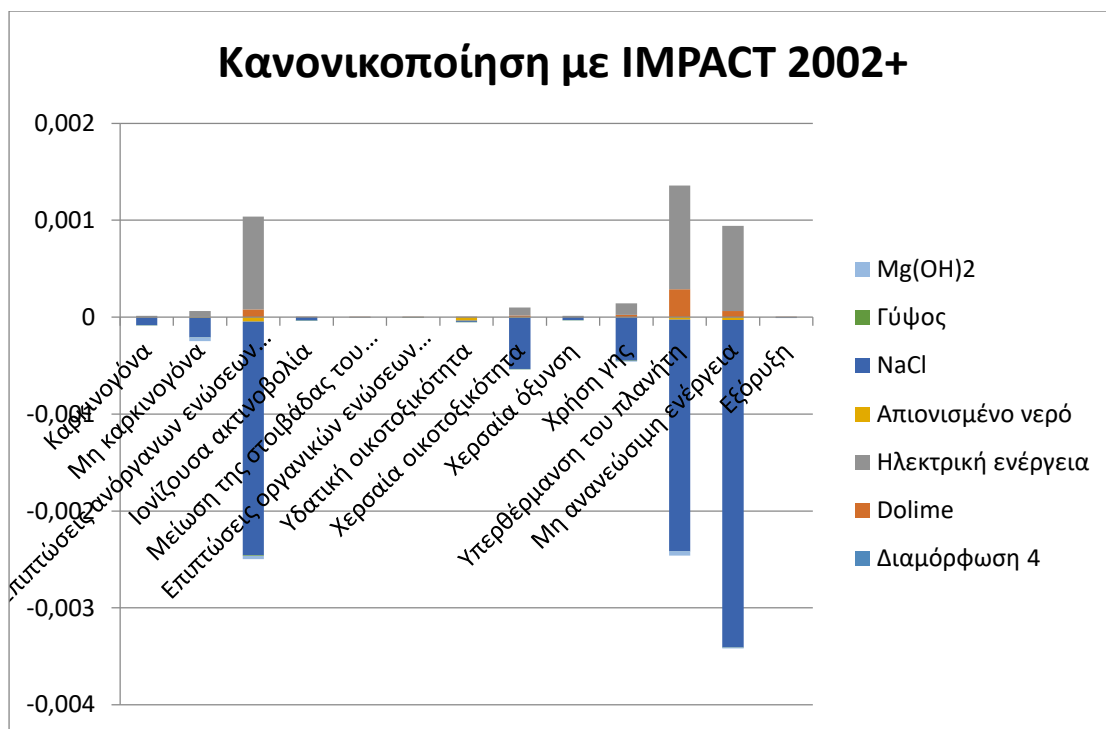
μόρφωσης, αλλά καθώς η 4^η χαρακτηρίζεται από τη μεγαλύτερη παραγωγή χλωριούχου νατρίου από όλες τις υπόλοιπες, περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εκ νέου παραγωγή του.

6.4.4.2 IMPACT 2002+

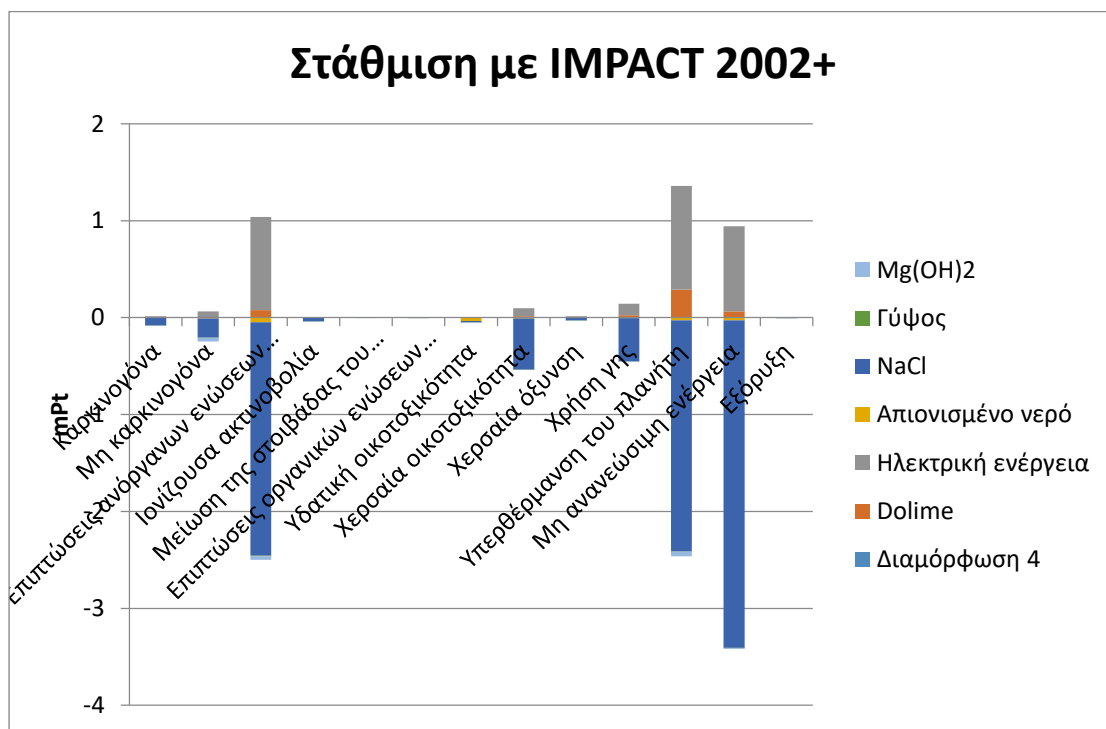


Σχήμα 45: Χαρακτηρισμός

Παρόμοια με την προηγούμενη μέθοδο εξάγονται παρόμοια συμπεράσματα από το Χαρακτηρισμό για την 4^η Διαμόρφωση.



Σχήμα 46: Κανονικοποίηση



Σχήμα 47: Στάθμιση

Και πάλι η 4^η Διαμόρφωση χαρακτηρίζεται από πολύ καλή περιβαλλοντική επίδοση, όπως γίνεται σαφές από τα παραπάνω διαγράμματα.

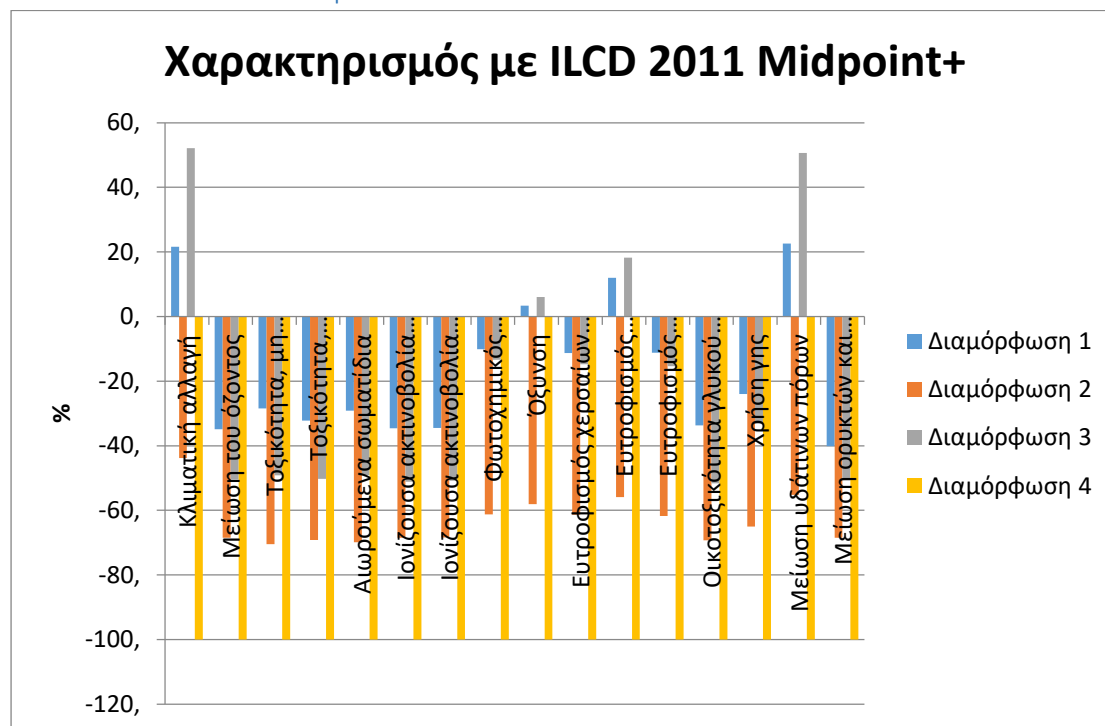
6.4.5 Σύγκριση των Διαμορφώσεων

Για πιο αξιόπιστη σύγκριση και καλύτερη αναπαράσταση των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαμορφώσεων έγινε και συγκριτική ανάλυση μεταξύ τους.

6.4.5.1 Με Ανάλυση Κύκλου Ζωής

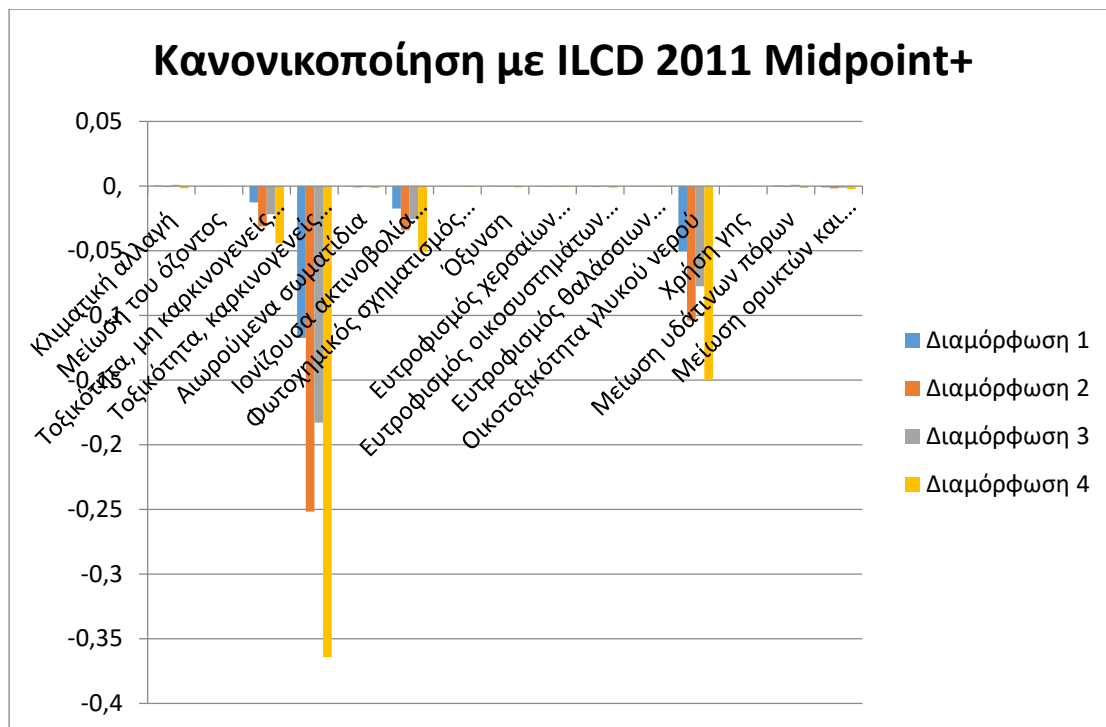
Αρχικά έγινε σύγκριση των τεσσάρων διαμορφώσεων με ΑΚΖ με τις ίδιες δύο μεθόδους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω.

6.4.5.1.1 ILCD 2011 Midpoint+

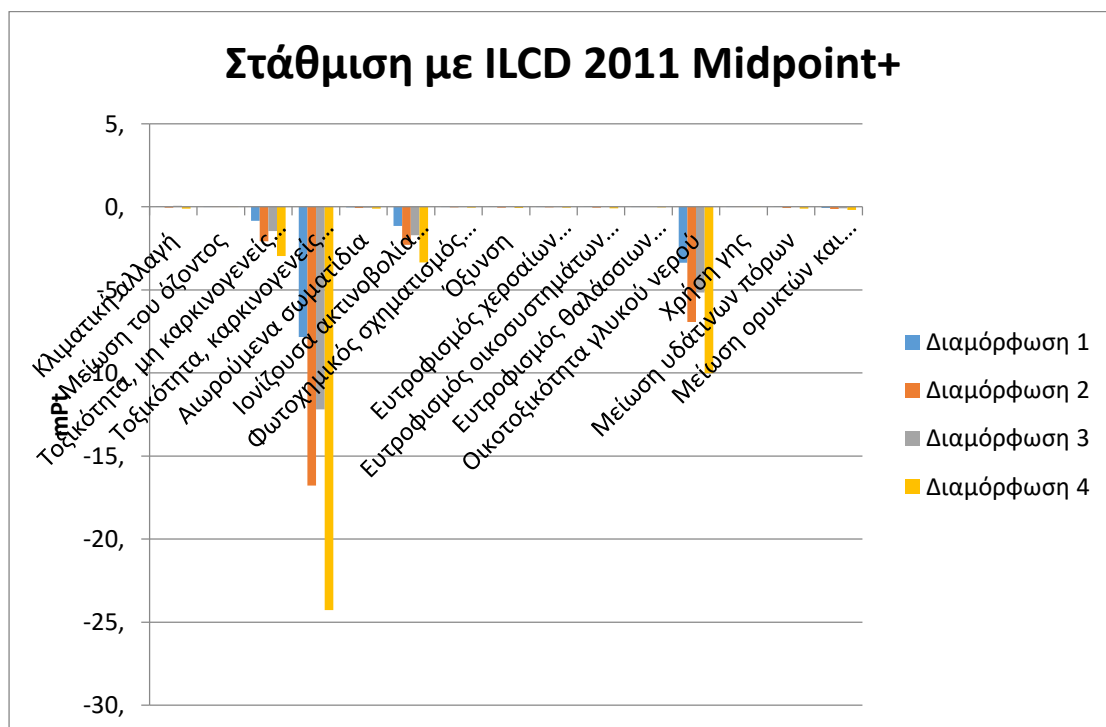


Σχήμα 48: Χαρακτηρισμός

Από το άνω σχήμα φαίνεται ότι οι διαμορφώσεις 2 και 4 έχουν καλύτερη επίδοση από τις υπόλοιπες σε κάθε κατηγορία, με την Διαμόρφωση 4 να έχει την καλύτερη επίδοση γενικά. Αυτό φαίνεται και από τα επόμενα σχήματα.



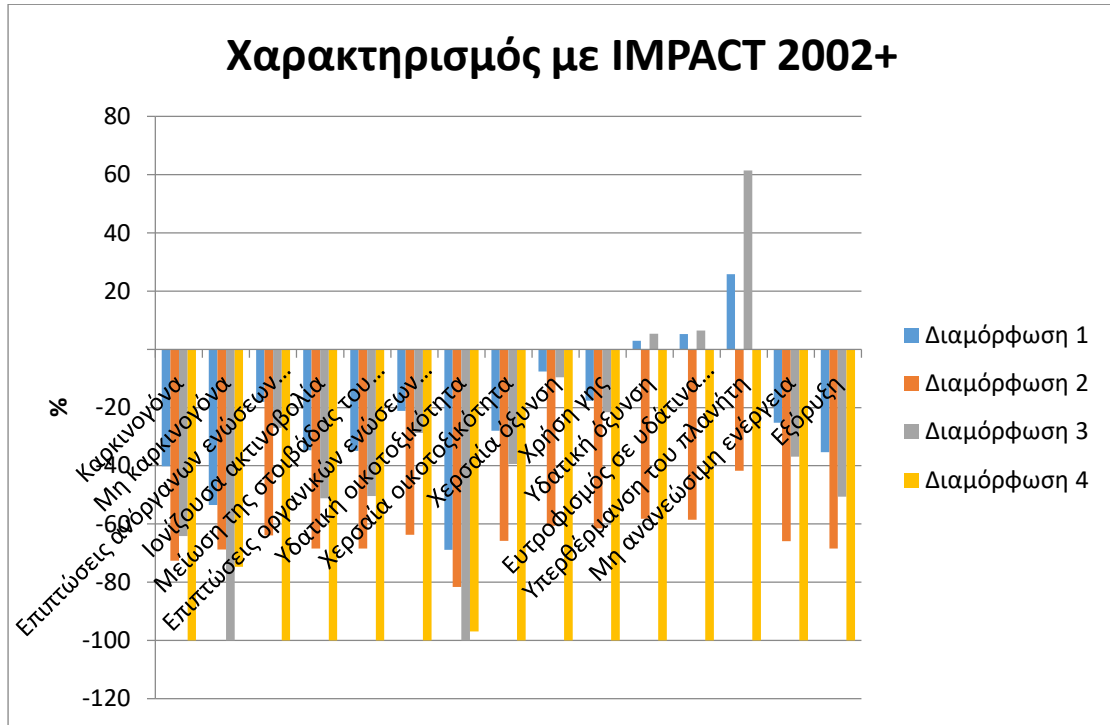
Σχήμα 49: Κανονικοποίηση



Σχήμα 50: Στάθμιση

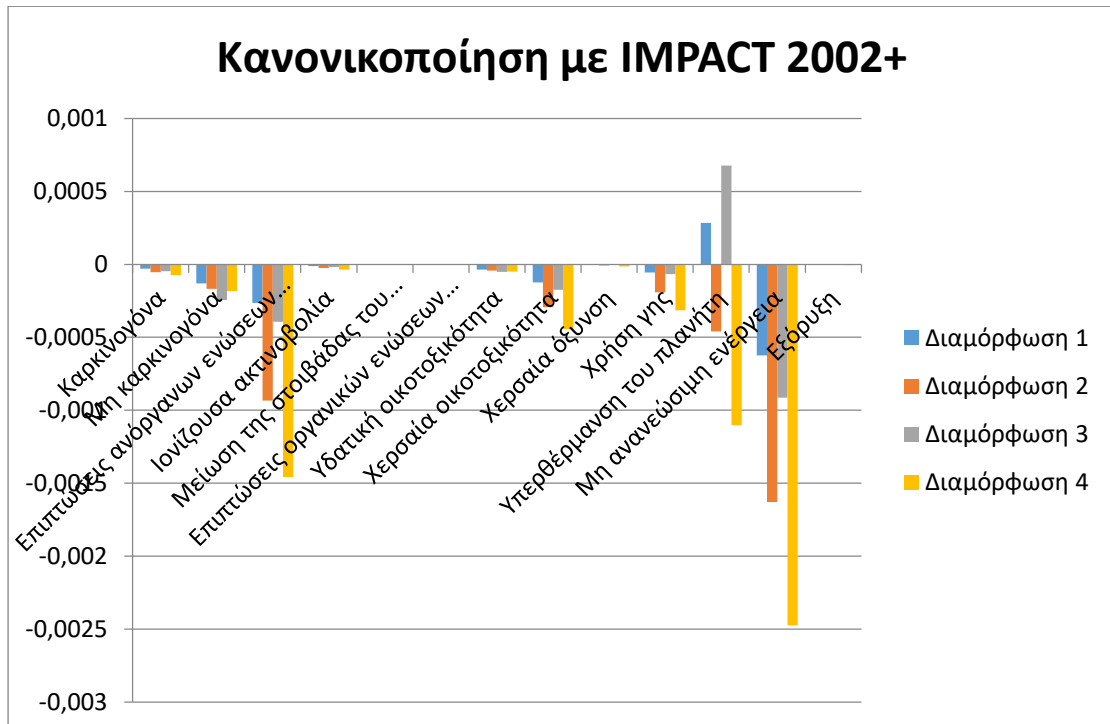
Από τα σχήματα της Κανονικοποίησης και της Στάθμισης προκύπτει ότι την καλύτερη περιβαλλοντική επίδοση και από τις τέσσερις διαμορφώσεις έχει η 4^η Διαμόρφωση. Ακολουθεί η 2^η. Αυτό ήταν αναμενόμενο σύμφωνα με τα συμπεράσματα από τις μεμονωμένες αναλύσεις.

6.4.5.1.2 IMPACT 2002+

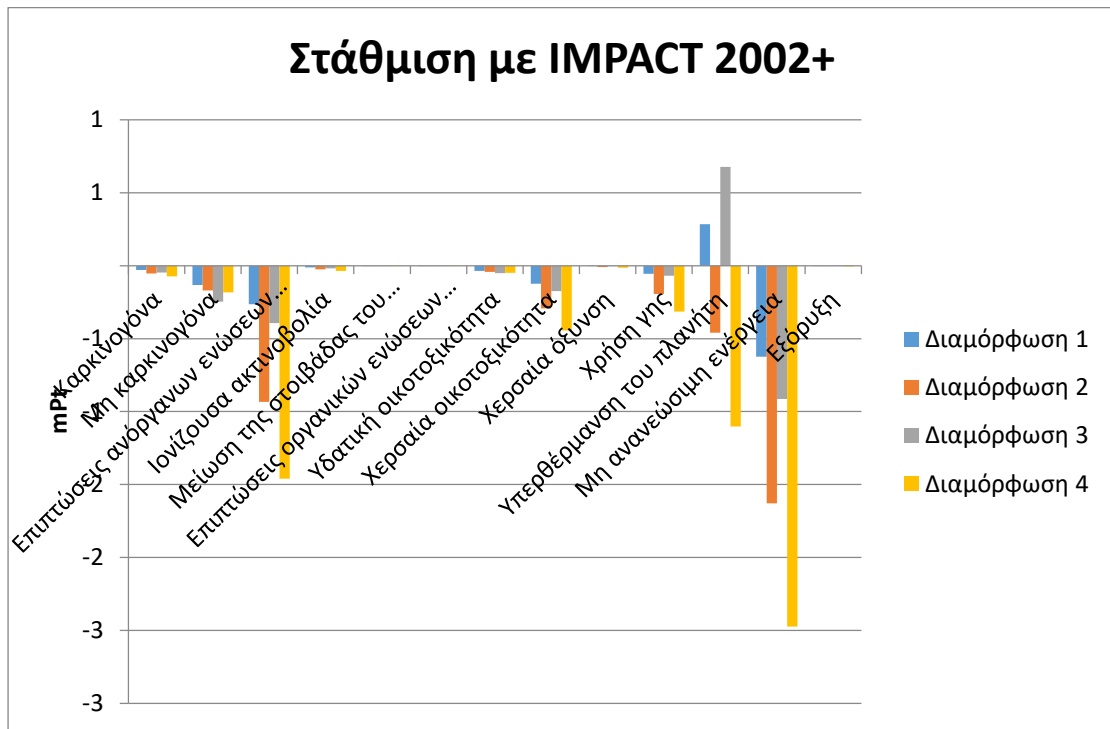


Σχήμα 51: Χαρακτηρισμός

Ο χαρακτηρισμός με τη μέθοδο IMPACT 2002+ δίνει ελαφρώς διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο. Καθώς καμία διαμόρφωση δεν παρουσιάζει ξεκάθαρα ανώτερα αποτελέσματα σε όλες τις κατηγορίες τα απόμενα στάδια είναι απαραίτητα.



Σχήμα 52: Κανονικοποίηση

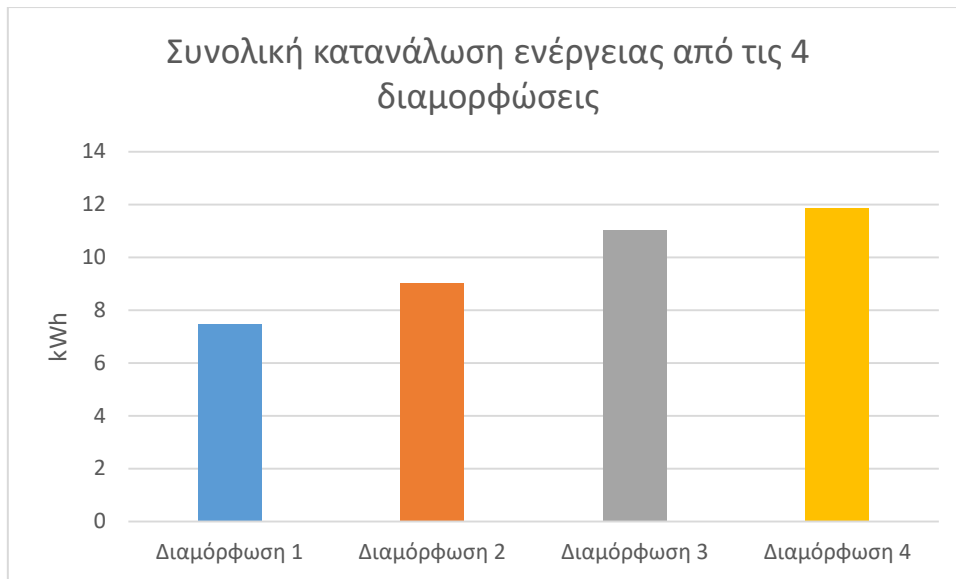


Σχήμα 53: Στάθμιση

Με τα στάδια της Κανονικοποίησης και Στάθμισης γίνεται ξεκάθαρο πλέον ότι οι διαμορφώσεις 3 και 4 έχουν την καλύτερη επίδοση, με τη Διαμόρφωση 4 να είναι η καθολικά ανώτερη. Αυτό βέβαια ισχύει μόνο για τις κατηγορίες μεγάλης βαρύτητας στις οποίες οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι σημαντικότερες. Όπως και στις μεμονωμένες αναλύσεις οι διαμορφώσεις 1 και 2 φαίνεται να ενισχύουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

6.4.5.2 Με βάση την κατανάλωση ενέργειας

Οι Διαμορφώσεις 3 και 4 έχουν τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα. Παράλληλα όμως, χαρακτηρίζονται και από μεγαλύτερη ανάκτηση προϊόντων.



Σχήμα 54: Σύγκριση της κατανάλωσης ηλεκτρισμού κάθε διαμόρφωσης

6.5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που αντλήθηκαν από τη μέθοδο εκτίμησης επιπτώσεων συμπεραίνεται πως παρόμοια αποτελέσματα ελήφθησαν και από τις δύο μεθόδους αξιολόγησης των επιπτώσεων (ILCD 2011 Midpoint+ και IMPACT 2002+).

Η σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων πιθανών διαμορφώσεων έδειξε ότι η Διαμόρφωση 4 έχει την καλύτερη περιβαλλοντική επίδοση. Ακολουθεί η 2^η Διαμόρφωση. Η 4^η Διαμόρφωση μπορεί να παρουσιάζει σοβαρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όμως η μεγαλύτερη ανάκτηση προϊόντων από το απόβλητο ενισχύει την καλή περιβαλλοντική της επίδοση και σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με τη 2^η Διαμόρφωση, με την οποία τα αποτελέσματα είναι σχετικά παρόμοια.

Από την άλλη οι διαμορφώσεις 1 και 3 δε χαρακτηρίζονται από καλή περιβαλλοντική επίδοση. Η ανάκτηση των προϊόντων δεν είναι αρκετή για να εξισορροπήσει τις συνέπειες από το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη κατανάλωση dolime για ανάκτηση του μαγνησίου και στη χαμηλότερη ανάκτηση χλωριούχου νατρίου. Όπως φάνηκε από το στάδιο του χαρακτηρισμού για όλες τις διαμορφώσεις η ανάκτηση του χλωριούχου νατρίου οφελεί περισσότερο περιβαλλοντικά από ότι η ανάκτηση μαγνησίου.

Σε όλες τις διαμορφώσεις, η κατανάλωση ενέργειας και η χρήση του dolime στη διαδικασία ανάκτησης μαγνησίου συμβάλλουν περισσότερο στις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διαδικασίας. Από την άλλη, τα ανακτηθέντα υλικά και ιδιαίτερα η ανάκτηση χλωριούχου νατρίου ενισχύουν σημαντικά την καλή περιβαλλοντική επίδοση της διαδικασίας. Κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, θεωρήθηκε ότι τα τελικά προϊόντα (χλωριούχο νάτριο, γύψος, υδροξείδιο του μαγνησίου και καθαρό

νερό) που ανακτήθηκαν από το σύστημα ανθρακωρυχείων ZERO BRINE ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της βιομηχανίας για την τελική τους χρήση. Η χρήση των βοηθητικών υλικών για σκοπούς καθαρισμού και αναγέννησης δεν έχει σημαντικό αντίκτυπο στην συνολική περιβαλλοντική επίδοση της διαδικασίας.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δεν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υφιστάμενης κατάστασης (απόρριψη αλατούχου αποβλήτου στο ποτάμι). Αυτό συμβαίνει γιατί η μέθοδος εκτίμησης επιπτώσεων παρουσιάζει μηδενικές επιπτώσεις στις κατηγορίες επιπτώσεων που μελετά για τη υφιστάμενη κατάσταση. Για το λόγο αυτό έλαβε χώρα βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικών μελετών βάση της οποίας προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για την καθολική αποδοχή της AKZ για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της αφαλάτωσης. Ωστόσο, η ίδια η μεθοδολογία AKZ έχει αρκετά τεχνικά ζητήματα που δεν έχουν ακόμη επιλυθεί πλήρως (Zhou, et al., 2014). Ωστόσο, η υφαλμύριση λείπει από το εύρος των κατηγοριών επιπτώσεων των περισσότερων μελετών AKZ. Πολλές μελέτες AKZ υπογραμμίζουν αυτό το μεθοδολογικό κενό για την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων πολλών τεχνολογικών διεργασιών, όπως διάθεση άλμης από αφαλάτωση νερού, διεργασίες επεξεργασίας νερού και ειδικότερα, καλλιέργεια μικροάλγης και ειδικότερα γεωργικών προϊόντων. Ωστόσο, μόνο τέσσερις μέθοδοι είναι διαθέσιμες για την εκτίμηση των επιπτώσεων της αλάτωσης στην AKZ, οι οποίες είτε επικεντρώνονται σε έναν τύπο υφαλμύρισης είτε σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή (Payen, et al., 2016). Επομένως, υπάρχει έλλειψη καθολικής προσέγγισης για την εκτίμηση των επιπτώσεων της δευτερογενούς υφαλμύρισης στο πλαίσιο της AKZ.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πιλοτικής μονάδας δε συγκρίθηκαν με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της τωρινής μεθόδου μείωσης της αλατότητας του νερού, η οποία αφορά την αραίωση των αποβλήτων με την απόρριψή τους στο γειτονικό ποταμό. Μια τέτοια σύγκριτική μελέτη δεν είναι δυνατό να διεξαχθεί λόγω των περιορισμών των υπαρχόντων μεθόδων εκτίμησης των επιπτώσεων κύκλου ζωής, όσον αφορά την αυξημένη αλατότητα των υδάτων. Μελέτες υποδεικνύουν ότι η απόρριψη αποβλήτων υψηλής αλατότητας είναι μία από τις κύριες αιτίες οικοτοξικών επιπτώσεων (Zhou, et al., 2014), αλλά η συμβολή της αλατότητας δεν λαμβάνεται υπόψη στις μελέτες AKZ διότι οι τωρινές μέθοδοι εκτίμησης επιπτώσεων του κύκλου ζωής δεν μπορούν να αντιστοιχίσουν τα ιόντα άλατος σε υδάτινες οικοτοξικές επιπτώσεις (Zhou, et al., 2012). Επιπλέον, η υφαλμύριση των υδάτων είναι στενά συνδεδεμένη με την αύξηση της αλατότητας του εδάφους. Δεδομένου ότι οι μηχανισμοί υφαλμύρισης σχετίζονται στενά με τον κύκλο του νερού, όλες οι ροές νερού ενδέχεται να συμβάλουν στις επιπτώσεις (Payen, et al., 2016). Για αυτό το λόγο οι μελέτες AKZ θεωρούν ότι τα υδατικά απόβλητα υψηλής αλατότητας αραιώνονται πλήρως κατά την απόρριψή τους στα υδάτινα σώματα. Κατά συνέπεια οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι μηδενικές. Στις περισσότερες περιπτώσεις αξιολογούνται συστήματα αφαλάτωσης όπου το απόβλητο είναι η άλμη και καθώς οι επιπτώσεις του συγκεκριμένου

αποβλήτου δε λαμβάνονται υπόψη, οι μελέτες AKZ αξιολογούν συνήθως την ενεργειακή απόδοση των εν λόγω συστημάτων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση φυσικά οι επιπτώσεις από τα υδατικά απόβλητα των ανθρακωρυχείων δε μπορούν να αγνοηθούν, όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενες ενότητες και οι εταιρίες εξόρυξης, όπως και η PGG στη συγκεκριμένη περίπτωση οφείλουν να συμμορφωθούν με τη νομοθεσία.

Σύμφωνα με τους (Zhou, et al., 2012) υπάρχουν δύο λόγοι που συμβάλλουν στο γεγονός ότι η τρέχουσα έρευνα για την AKZ βρίσκεται πολύ πίσω σε σχέση με την αυξανόμενη ανησυχία για τη διάθεση υδατικών αποβλήτων υψηλής αλατότητας. Πρώτον, η απαίτηση για αυξημένο όγκο δεδομένων. Απαιτούνται σημαντικές προσπάθειες για τη διεξαγωγή της συνολικής ανάλυσης της σύστασης επιτόπου, κυρίως λόγω της πολυπλοκότητας και της μεγάλης μεταβολής της σύνθεσης των αποβλήτων. Δεύτερον, η εσφαλμένη αντίληψη περί της θεώρησης των διαθέσιμων προσεγγίσεων της εκτίμησης επιπτώσεων ως καθολικά αποδεκτών «τυποποιημένων προσεγγίσεων» χωρίς περαιτέρω εξέταση της καταλληλότητας και της δυνατότητας εφαρμογής αυτών των προσεγγίσεων.

Όσον αφορά τις επιπτώσεις την ανθρώπινη υγεία, η μοντελοποίηση της υφαλμύρινσης του νερού απαιτεί μια λειτουργική προσέγγιση η οποία αξιολογεί τις ζημιές από τη μείωση της χρήσης του νερού. Τα ολικά διαλυμένα στερεά, καθώς και τα βασικότερα άλατα, περιλαμβάνονται ήδη στις παραμέτρους της υπάρχουσας μεθόδου εκτίμησης επιπτώσεων. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην παρούσα μορφή της λόγω μιας αστοχίας στη μοντελοποίηση: το νερό υψηλής αλατότητας θα πρέπει να είναι μια ροή (κατά την απογραφή δεδομένων), η οποία είναι το αποτέλεσμα ισοζυγίου μεταξύ εισροής και εκροής νερού (με την ανάλογη αύξηση της αλατότητας). Συνεπώς, αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στην περίπτωση της άρδευσης καλλιεργειών (Payen, et al., 2016). Επίσης, οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, σύμφωνα με τους (Payen, et al., 2016), μπορούν να εκφραστούν ως χρόνος ζωής του ατόμου που παρουσιάζει το αντίστοιχο πρόβλημα υγείας που προκαλείται από αυτές.

Επιπροσθέτως, η σημασία της ποσοτικοποίησης των επιπτώσεων της υφαλμύρινσης στα οικοσυστήματα επισημαίνεται από τους (Cañedo-Argüelles, et al., 2012). Υποστηρίζουν ότι η ανάγκη να ερευνηθεί το πώς η αλατότητα συσχετίζεται με τις λειτουργίες των οικοσυστημάτων είναι επιτακτική. Πρέπει να μελετηθούν και να γνωστοποιηθούν οι οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις ώστε να ξεκινήσουν προσπάθειες διαχείρισης και αποκατάστασης. Τα μελλοντικά σενάρια για την κλιματική αλλαγή και την αύξηση της ζήτησης για το νερό πρέπει να ενσωματωθούν στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Μια πλειονότητα των μελετών AKZ αφαλάτωσης διεξάγονται με εμπορικά πακέτα λογισμικού, με τα πιο δημοφιλή να είναι το SimaPro (PRe Consultants) και το GaBi (PE International). Για τη διεξαγωγή της AKZ χρησιμοποιούνται γενικά οι προκαθορισμένες προσεγγίσεις εκτίμησης επιπτώσεων που παρέχονται στο πακέτο λογισμικού AKZ.

Αν και οι προκαθορισμένες προσεγγίσεις αυξάνονται στην πολυπλοκότητα και χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες μελέτες ΑΚΖ, δεν είναι ακόμα σε θέση να καταγράψουν ορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την αφαλάτωση (Zhou, et al., 2014). Πολλές μελέτες εγείρουν ανησυχίες σχετικά με την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της ΑΚΖ.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, μια μελέτη ΑΚΖ θα πρέπει να καταγράφει όλες τις στοιχειώδεις εισόδους και εξόδους στα όρια του συστήματος. Ωστόσο, οι μελέτες ΑΚΖ συνήθως δεν μπορούν να συμπεριλάβουν ένα τόσο ολοκληρωμένο όριο λόγω των περιορισμών χρόνου και πόρων, ακόμη και με τη βοήθεια διαθέσιμων βάσεων δεδομένων (Zhou, et al., 2014). Αυτό συμβαίνει και στην παρούσα μελέτη. Προκειμένου να μειωθούν οι απαιτήσεις δεδομένων, είναι σύνηθες για μια μελέτη ΑΚΖ να αγνοούνται ορισμένες ροές. Οι μελέτες αφαλάτωσης ΑΚΖ αγνοούν ορισμένες ροές υλικών και ενέργειας από την κατασκευή της εγκατάστασης, την παραγωγή χημικών και την κατασκευή μεμβρανών. Στη συγκεκριμένη μελέτη δεν έχουν συμπεριληφθεί οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την κατασκευή της εγκατάστασης. Οι πτυχές που εξετάζονται στην κατασκευή της εγκατάστασης περιλαμβάνουν εκείνες που σχετίζονται με τα δομικά υλικά και την ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή ενός συστήματος αφαλάτωσης. Ωστόσο, λόγω των δυσκολιών στην απόκτηση δεδομένων που περιγράφουν λεπτομερώς την πλήρη κατασκευαστική διαδικασία, οι περισσότερες εφαρμογές θεωρούν μόνο την παραγωγή ευρέως χρησιμοποιούμενων δομικών υλικών (σκυρόδεμα, τσιμέντο, χάλυβα, PVC, κλπ.) και δείχνουν ότι η κατασκευή της εγκατάστασης συνεισφέρει λιγότερο από το 10% των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ο αποκλεισμός γίνεται με βάση δύο παραδοχές: τη μικρή συνεισφορά τους που προσδιορίστηκε από άλλες προηγούμενες μελέτες και τη μικρή μάζα των δομικών υλικών που θα πρόκυπτε σε σχέση με το μεγάλο χρόνο ζωής της εγκατάστασης. Αποτελέσματα μελετών δείχνουν ότι η κατασκευή της εγκατάστασης συμβάλλει από ένα τρίτο έως το ήμισυ του συνολικού δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη (Zhou, et al., 2014). Τα όρια του συστήματος πρέπει να περιλαμβάνουν την παραγωγή και τη μεταφορά όλων των χημικών ουσιών που απαιτούνται για τη λειτουργία του συστήματος αφαλάτωσης. Στην περίπτωση της μελέτης για την πιλοτική μονάδα στην Πολωνία, η χρήση βοηθητικών υλικών (π.χ. για καθαρισμό, συντήρηση κλπ.) θεωρήθηκε ότι έχει αμελητέες επιπτώσεις. Ενώ πολλές μελέτες υποδεικνύουν ότι μια τέτοια παραδοχή είναι βάσιμη, οι (Zhou, et al., 2014) θεωρούν ότι αυτό δεν είναι απαραίτητο ανάλογα με τις συνθήκες, καθώς οι επιπτώσεις ενδέχεται να ποικίλουν σε μεγάλο βαθμό. Για παράδειγμα, τα χημικά που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό των μεμβρανών συνδέονται με την κλιματική αλλαγή και τη μείωση του όζοντος (Zhou, et al., 2014). Η κατασκευή των μεμβρανών είναι άλλη μία παράμετρος που δε συμπεριλαμβάνεται στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς όλες οι μελέτες αναφέρουν ότι η κατασκευή της μεμβράνης έχει μικρή συμβολή στις συνολικές επιπτώσεις. Ωστόσο, περαιτέρω διερεύνηση των διαδικασιών κατασκευής μεμβράνης δικαιολογείται για τον προσδιορισμό της εγκυρότητας του αποκλεισμού της κατασκευής της μεμβράνης αν ληφθεί υπόψη η συμβολή των διαλυτών και των επικαλύψεων.

Σε μελέτες AKZ αφαλάτωσης, η ανάλυση αβεβαιότητας δεν είναι ακόμα μια κοινή πρακτική. Αν και η εφαρμογή της διευκολύνεται από τον μαθηματικό αλγόριθμο που ενσωματώνεται στο λογισμικό SimaPro και την κατανομή πιθανότητας που τεκμηριώνεται στη βάση δεδομένων Ecoinvent, οι κύριες προκλήσεις στις πρακτικές AKZ αφαλάτωσης μπορεί να βρίσκονται στις ροές αναφοράς, όπως η κατανάλωση ενέργειας, η κατανάλωση χημικών και βοηθητικών υλικών κλπ. Οι ροές αναφοράς προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα επί τόπου. Ωστόσο, είναι γενικά ανέφικτο για τους επαγγελματίες της AKZ να συλλέγουν αρκετά επιτόπου δεδομένα για να εξάγουν την κατανομή πιθανότητας. Για τη διασφάλιση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων μιας μελέτης AKZ, η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να περιλαμβάνει διάφορες επιλογές ενεργειακής αποδοτικότητας και βιώσιμης παραγωγής ενέργειας, διαχείρισης της ζήτησης, διάρκειας ζωής, κ.α.

Τα αποτελέσματα μελετών AKZ δείχνουν ότι η συνολική περιβαλλοντική επιβάρυνση που συνδέεται με την αντίστροφη ώσμωση είναι τυπικά μιας τάξης μεγέθους μικρότερη από αυτή των θερμικών διεργασιών χωρίς να ληφθεί υπόψη η επιπλέον θερμότητα (Zhou, et al., 2014). Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης συγκρίνονται επίσης με εναλλακτικές λύσεις επεξεργασίας του νερού, όπως η ανταλλαγή ιόντων. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι τεχνολογίες αφαλάτωσης απαιτούν περισσότερη ενέργεια, αν και μπορούν να πετύχουν συγκρίσιμη ή ανώτερη ποιότητα στις εκροές τους (Zhou, et al., 2014). Καθώς η τεχνολογία της αντίστροφης ώσμωσης θεωρείται γενικά πιο φιλική προς το περιβάλλον και ανταγωνιστική από οικονομική άποψη, έχουν γίνει περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες για τη διερεύνηση της ενεργειακής της κατανάλωσης. Η ενέργεια διαδραματίζει καίριο ρόλο στην αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση, καθώς πάνω από το 80% των περιβαλλοντικών επιπτώσεων συνδέεται με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της διεργασίας. Δεδομένου ότι οι περισσότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σχετίζονται άκρως με την κατανάλωση ενέργειας κατά την αφαλάτωση, οποιαδήποτε μείωση στη χρήση ενέργειας της διεργασίας μπορεί να είναι επωφελής (Zhou, et al., 2014). Η μείωση της αλατότητας του ύδατος τροφοδοσίας, με αποτελεσματική προεπεξεργασία και η εφαρμογή νέων τεχνολογιών στις μεμβράνες είναι ορισμένες ενέργειες που μπορούν να μειώσουν τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αφαλάτωσης (Zhou, et al., 2014). Μια άλλη μέθοδος είναι να μειωθεί η μεγάλη εξάρτηση από την ενέργεια των ορυκτών καυσίμων, η οποία μπορεί να βελτιώσει έμμεσα τις περιβαλλοντικές επιδόσεις της αφαλάτωσης. Μερικές μελέτες AKZ αφαλάτωσης καταδεικνύουν ότι η μετακίνηση προς καθαρότερες πηγές ενέργειας, όπως το φυσικό αέριο, και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι συμφέρουσα (Zhou, et al., 2014).

Προσεγγίσεις για την εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι μελέτες AKZ δεν ποσοτικοποιούν το υδάτινο οικοτοξικό δυναμικό της απόρριψης νερού υψηλής αλατότητας κυρίως λόγω του περιορισμού των προσεγγίσεων εκτίμησης επιπτώσεων του κύκλου ζωής. Λόγω των σημαντικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων της υφαλμύρισης, η ανάπτυξη μεθόδων εκτίμησης επιπτώσεων κύκλου ζωής θεωρείται υψηλή προτεραιότητα για την έρευνα (Payen, et

al., 2016). Γενικά, δύο διαφορετικές προσεγγίσεις είναι διαθέσιμες για τον προσδιορισμό του παράγοντα χαρακτηρισμού της οικοτοξικότητας του υδάτινου περιβάλλοντος: η χημικά ειδική (chemical specific) προσέγγιση και η προσέγγιση της πλήρους εκροής (whole effluent) (Zhou, et al., 2012). Αυτές οι δύο προσεγγίσεις περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια.

Η χημικά ειδική προσέγγιση

Η χημικά ειδική προσέγγιση, η οποία παραδοσιακά χρησιμοποιείται από την ΑΚΖ, υπολογίζει τις μέσες επιπτώσεις των εκρών ως το άθροισμα των επιπτώσεων που παράγονται από όλες τις αναγνωρισμένες χημικές ουσίες στα απόβλητα βάσει του υδάτινου οικοτοξικού δυναμικού κάθε στοιχειώδους χημικής ουσίας. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα χαρακτηρισμού για τον υπολογισμό του οικοτοξικού παράγοντα χαρακτηρισμού σε διάστημα 15 ετών. Αυτά τα μοντέλα ποικίλλουν ως προς τα πεδία εφαρμογής τους και τις αρχές μοντελοποίησης λόγω ειδικών στόχων και εφαρμογών.

Η χημικά ειδική προσέγγιση είναι μια υψηλής ποιότητας αναλυτική μέθοδος κατάλληλη για την εκτίμηση των εκρών που περιέχουν σχετικά λίγους ρύπους οι οποίοι έχουν καθορισμένες οικοτοξικολογικές ιδιότητες. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η ειδική χημική προσέγγιση παρέχει επίσης πληροφορίες σχετικά με την ανάλυση ευαισθησίας. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτής της προσέγγισης στην απόρριψη νερού υψηλής αλατότητας δεν είναι εύκολη επειδή περιέχει δεκάδες χιλιάδες χημικών υποπροϊόντων και προϊόντων μετασχηματισμού, πολλά από τα οποία παρουσιάζονται σε εξαιρετικά χαμηλές συγκεντρώσεις. Απαιτεί πολύ χρόνο και πόρους για την ανάλυση της οικοτοξικολογικής ιδιότητας για όλες αυτές τις ενώσεις. Επιπλέον, αυτή η προσέγγιση έχει περιορισμένη κάλυψη των υδρόβιων ρύπων οικοτοξικού δυναμικού (Zhou, et al., 2012).

Η προσέγγιση πλήρους εκροής

Οι περιορισμοί της χημικά ειδικής προσέγγισης αναγνωρίζονται όλο και περισσότερο. Κατά συνέπεια, πολλοί ερευνητές διερευνούν πιο ολιστικές τεχνικές, όπως αξιολόγηση πλήρους εκροής. Υπάρχει μια σειρά διαφορετικών ορολογιών για προσεγγίσεις που αφορούν την αξιολόγηση πλήρους εκροής, όπως η τοξικότητα πλήρους εκροής (Whole Effluent Toxicity) που χρησιμοποιείται από τις ΗΠΑ (και ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες), ο έλεγχος τοξικότητας των εκρών (Effluent Toxicity Test) που χρησιμοποιείται από τον Καναδά, ο ολοκληρωμένος έλεγχος των εκρών (Integrating Controlling of Effluents) που χρησιμοποιήθηκε από τη Γερμανία κ.α.. Σε σύγκριση με τη χημικά ειδική προσέγγιση, η προσέγγιση πλήρους εκροής δεν χρειάζεται να χαρακτηρίζει τη σύνθεση των εκρών, αλλά να παρέχει ένα μέτρο των συνδυασμένων επιπτώσεων όλων των συστατικών σε ένα σύνθετο απόβλητο. Τα τυπικά συστήματα αξιολόγησης πλήρους εκροής αξιολογούν μόνο την επίδραση της τοξικότητας στους υδρόβιους οργανισμούς διότι οι τρέχουσες δοκιμές αντοχής και βιοαποικοδόμησης είναι σχεδιασμένες για τη μέτρηση της μεταφοράς και της έκθεσης μεμονωμένων χημικών, όχι μιγμάτων (Zhou, et al., 2012).

Το κυριότερο πλεονέκτημα της προσέγγισης της πλήρους εκροής είναι ότι παρέχει μια καλύτερη εκτίμηση των οικοτοξικολογικών ιδιοτήτων των κακώς χαρακτηρισμένων και σύνθετων εκροών και επομένως μπορεί να βελτιώσει την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων κύκλου ζωής. Ωστόσο, καθώς η προσέγγιση της πλήρους εκροής παρέχει μόνο προσωρινή εκτίμηση των επιπτώσεων, οποιαδήποτε μεταβολή στη σύσταση και την ποιότητα του νερού (π.χ. αλατότητα, pH, σκληρότητα) μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη αβεβαιότητα.

Η προσέγγιση ανά ομάδα

Οι (Zhou, et al., 2012) έχουν προτείνει μία διαφορετική προσέγγιση, που ονομάζεται προσέγγιση ανά ομάδα (group by group) και υπολογίζει το μέσο υδάτινο οικοτοξικό δυναμικό ως το άθροισμα των επιπτώσεων που προκύπτουν από αναγνωρισμένες ομάδες συγκεκριμένων χημικών ουσιών. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, αρχικά προσδιορίζονται χημικές ουσίες οι οποίες προκαλούν περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ανάλογα με τις χημικές ιδιότητες και το μηχανισμό με τον οποίο επιδρούν στο υδάτινο οικοσύστημα, οι συγκεκριμένες χημικές ουσίες ταξινομούνται στη συνέχεια σε ομάδες κάτω από τρεις κατηγορίες. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των καθορισμένων ομάδων, εφαρμόζονται διαφορετικές στρατηγικές για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων κάθε ομάδας. Η προσέγγιση ανά ομάδα βασίζεται στις δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις, τη χημικά ειδική προσέγγιση και την προσέγγιση πλήρους εκροής. Σύμφωνα με τη μελέτη των (Zhou, et al., 2012), τα αποτελέσματα έχουν δείξει ότι η προσέγγιση αυτή καθιστά την πλήρη ανάλυση της χημικής σύστασης και τη μελέτη της μεταβολής αυτής της σύστασης με το χρόνο των αλατούχων υδατικών αποβλήτων μη αναγκαίες. Παρέχει επίσης μια πληρέστερη κάλυψη, λαμβάνοντας υπόψη τον αντίκτυπο των οργανικών χημικών ουσιών και των μετάλλων, καθώς και τη συμβολή των ανόργανων χημικών ουσιών.

Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση αρχικά προσδιορίζονται οι χημικές ουσίες οι οποίες συμβάλλουν στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Δύο αρχές εφαρμόζονται σε αυτό το στάδιο:

- 1) Χημικά προϊόντα με συγκεντρώσεις υψηλότερες από τις προδιαγραφές, εάν υπάρχουν, ή με συγκεντρώσεις πολύ υψηλότερες από τα υπόλοιπα συστατικά του αποβλήτου, εάν δεν υπάρχει διαθέσιμος κανονισμός
- 2) Χημικά με παράγοντες χαρακτηρισμού πολύ υψηλότερους από άλλα συστατικά στο απόβλητο

Οι χημικές ουσίες που πληρούν οποιαδήποτε από τις αρχές θεωρούνται «επιρροές», ενώ οι άλλες χημικές ουσίες θεωρούνται αμελητέες ή ελάχιστης συμβολής. Δεν υπάρχει καθολικά αποδεκτή μέθοδος ομαδοποίησης, ωστόσο, οι (Zhou, et al., 2012) έχουν προτείνει η ομαδοποίηση να βασίζεται είτε στη διαθεσιμότητα των δεδομένων, είτε στο σκοπό και το αντικείμενο της μελέτης. Συνήθη πρακτική αποτελεί ο χωρισμός των ουσιών σε τρεις ομάδες: των μετάλλων, των οργανικών ενώσεων και των ανόργανων ενώσεων. Η ομάδα των μετάλλων είναι γενικά διαχειρίσιμη, σε αντίθεση με την ομάδα των οργανικών ενώσεων που απαιτεί μεγάλο όγκο δεδομένων. Σε αυτή

την περίπτωση είναι συνετό να επιλέγονται οι ουσίες με το σημαντικότερο αντίκτυπο. Τέλος, η ομάδα των ανόργανων ενώσεων χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα. Για αυτό το λόγο υπολογίζεται ο χρόνος παραμονής της σταθερότερης ένωσης. Αν η σύσταση δεν υπόκειται σε μεγάλες διακυμάνσεις είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση πλήρους εκροής.

Σε σύγκριση με την προσέγγιση πλήρους εκροής, η προσέγγιση ανά ομάδα εμφανίζει δύο σημαντικά πλεονεκτήματα: (1) μείωση της εξάρτησης από τις διακυμάνσεις της χημικής σύστασης των αποβλήτων και (2) διευκόλυνση της ερμηνείας των αποτελεσμάτων του χαρακτηρισμού. Τέλος, δύο είναι τα σημαντικά χαρακτηριστικά που καθιστούν αυτή την προσέγγιση ιδανική για τον ποσοτικό προσδιορισμό των επιπτώσεων της απόρριψης υδατικών αποβλήτων υψηλής αλατότητας: (1) απαιτούνται λιγότερα δεδομένα, χωρίς να θίγεται σημαντικά η αξιοπιστία και (2) παρέχεται μια πληρέστερη κάλυψη για τα πιο σύνθετα απόβλητα.

Σύμφωνα με τους (Payen, et al., 2016) οι προαναφερθείσες μέθοδοι, όσο και αν παρουσιάζονται ως πολλά υποσχόμενες δεν έχουν καθολική ισχύ. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη εξάρτηση από τοπικές και χρονικές συνθήκες και τη χημική σύσταση του αποβλήτου που μελετάται. Οποιαδήποτε προσπάθεια μεταφοράς και εφαρμογής τους σε άλλες περιπτώσεις από αυτές στις οποίες δοκιμάστηκαν θα απαιτεί υπερβολικά μεγάλο όγκο δεδομένων, καθιστώντας μια τέτοια ενέργεια ασύμφορη για κάποιο ερευνητή. Σημαντικό στην AKZ είναι να καθοριστούν οι κατηγορίες επιπτώσεων και οι συνιστώσες που τις συνθέτουν. Από τη μία, η μείωση των υδάτινων πόρων αποτελεί μια περιβαλλοντική επίπτωση, ενώ η υφαλμύριση, καθώς εκφράζεται με μονάδες συγκέντρωσης, αποτελεί μετρήσιμη ποσότητα και κομμάτι της μοντελοποίησης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε παρερμηνείες. Επίσης, ενώ η αύξηση της αλατότητας στο νερό και το έδαφος αποτελούν δύο διαφορετικές συνιστώσες με ξεχωριστές επιπτώσεις η καθεμία, εκφράζονται με τις ίδιες μονάδες (TDS), με συνέπεια να συγχωνεύονται. Ακόμα, όπως υπάρχουν μοντέλα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την περιοχή στην οποία εφαρμόζεται η μελέτη και τα αποτελέσματα που δίνουν σε πιθανή επέκταση της περιοχής είναι αναξιόπιστα, έτσι άλλα μοντέλα (π.χ. LULUC (Payen, et al., 2016)) δε λαμβάνουν υπόψη άλλους μηχανισμούς υφαλμύρισης των υδάτων, όπως για παράδειγμα μέσω της υψηλής συγκέντρωσης του εδάφους σε άλατα. Οι (Payen, et al., 2016) προτείνουν να λαμβάνονται υπόψη όλες οι ροές στο σύστημα κατά το στάδιο της απογραφής δεδομένων, καθώς και την ανάπτυξη και εφαρμογή μοντέλων υδρολογικής συμπεριφοράς, για τη σύνδεση των ροών του συστήματος με τους μηχανισμούς μεταφοράς αλάτων στο νερό. Στη συνέχεια, η εκτίμηση των επιπτώσεων και η αντιστοίχισή τους σε κατηγορίες μπορεί να γίνεται βάσει περιβαλλοντικών μηχανισμών, σύμφωνα με το ISO και με τη σχέση αιτίας – αποτελέσματος που προκύπτει. Η συγκεκριμένη διαδικασία θα πρέπει να αποτελείται από τρία στάδια (Payen, et al., 2016): (1) παρακολούθηση όλων των διαδικασιών, από την απόρριψη άλμης μέχρι και τη μεταφορά των αλάτων στο έδαφος, (2) η έκθεση του στόχου στο συγκεκριμένο

ρύπο και (3) οι επιπτώσεις αυτής της έκθεσης στο στόχο. Με αυτό τον τρόπο, λαμβάνονται υπόψη όλες οι επιπτώσεις την απόρριψης αλατούχων αποβλήτων, είτε πρόκειται για το έδαφος, επιφανειακά υδάτινα σώματα ή λεκάνες απορροής. Επίσης, μπορούν να προσδιοριστούν και επιπτώσεις σε περιοχή μεγαλύτερη από αυτή που εντοπίζεται η ρύπανση. Σε αυτό μπορεί να βοηθήσει και η χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δε λαμβάνει υπόψη συνδυασμούς επιπτώσεων.

Μελλοντικές βελτιώσεις των μεθόδων εκτίμησης της οικοτοξικότητας οφείλουν να αναπτύξουν εκδοχές των επιπτώσεων ανάλογα με την περιοχή της ρύπανσης, καθώς οι τωρινές μέθοδοι δεν περιλαμβάνουν καμία χωρική διαφοροποίηση (Payen, et al., 2016). Ομοίως και η αύξηση της αλατότητας του εδάφους θα πρέπει να μοντελοποιηθεί με αντίστοιχη εκτίμηση της οικοτοξικότητας. Αν και η τελευταία αναφέρεται περισσότερο σε περιπτώσεις ρύπανσης από καλλιέργειες λόγω αλατούχων λιπασμάτων. Οι (Payen, et al., 2016) τονίζουν ιδιαίτερα τη σημασία του προσδιορισμού των ορίων του συστήματος, ανάλογα πάντα το σκοπό και το αντικείμενο της μελέτης, καθώς από αυτό θα εξαρτηθούν και όλες οι εισροές και εκροές του συστήματος. Τέλος, τονίζουν τη σημασία της μοντελοποίησης βάσει των περιβαλλοντικών μηχανισμών και της υιοθέτησης μιας καθολικά εφαρμόσιμης προσέγγισης εκτίμησης επιπτώσεων, παρά την έλλειψη δεδομένων σε πολλές περιπτώσεις.

7 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις απόρριψης αλατούχων αποβλήτων ανθρακωρυχείων σε υδάτινους αποδέκτες. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η περίπτωση ανθρακωρυχείου της Πολωνίας, περιγράφοντας τις αιτίες, τις επιπτώσεις και τους τρόπους αντιμετώπισης του συγκεκριμένου περιβαλλοντικού προβλήματος. Επίσης, διεξήχθη μελέτη Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) σε πιλοτική μονάδα επεξεργασίας υδατικών αποβλήτων ανθρακωρυχείου και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματά της παρέχοντας προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Ο άνθρακας αναλογεί ακόμα και σήμερα σε ένα σημαντικό ποσοστό του ενεργειακού μίγματος της ΕΕ, το οποίο βέβαια έχει μειωθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Αυτό αποδεικνύει πως η ζήτηση για το συγκεκριμένο καύσιμο ακόμα υφίσταται, παρά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της καύσης του άνθρακα και κατά πάσα πιθανότητα θα συνεχίσει να υφίσταται για τα επόμενα χρόνια. Η εξάρτηση από τον άνθρακα είναι πολύ πιο έντονη στην περίπτωση της Πολωνίας. Σε σύγκριση με τα άλλα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η Πολωνία διαθέτει σημαντικά μεγαλύτερα αποθέματα λιθάνθρακα και λιγνίτη. Συνεπώς, εξαρτάται σε πολύ μικρό βαθμό από εισαγωγές ενέργειας, καθώς και από άλλες πηγές. Η αύξηση του πληθυσμού οδηγεί στην αύξηση των αναγκών για ενέργεια, ενώ παράλληλα οι περισσότερες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής παρουσιάζουν απόδοση χαμηλότερη από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο (35%). Επίσης, η οικονομία της χώρας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη βιομηχανία εξόρυξης άνθρακα. Καθώς η Πολωνία δε διαθέτει πυρηνικά εργοστάσια και η ενεργειακή μετάβαση από τον άνθρακα σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας απαιτεί σχεδιασμό και χρόνο, η εξόρυξη του άνθρακα αποτελεί μονόδρομο.

Αναπόφευκτα, η εξόρυξη άνθρακα οδηγεί στην παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων υδατικών αποβλήτων υψηλής αλατότητας, τα οποία απορρίπτονται σε γειτονικούς ποταμούς. Τα υδατικά απόβλητα προκύπτουν με την άντληση των υπόγειων υδάτων, ώστε να προχωρήσει η εξόρυξη. Σε βάθος χρόνου λόγω της γεωμορφολογίας της χώρας (επίπεδη τοπογραφία) και των περιορισμένων αποθεμάτων γλυκού νερού ώστε να αραιωθούν τα απόβλητα, το πρόβλημα μεγεθύνεται. Η εξορυκτική δραστηριότητα στην Πολωνία εντοπίζεται κυρίως στη λεκάνη απορροής άνθρακα της Άνω Σιλεσίας. Την περιοχή διαρρέουν και οι δύο κυριότεροι ποταμοί της χώρας, ο Wisła και ο Odra, οι οποίοι φέρουν και το μεγαλύτερο φορτίο ρύπανσης από τα απόβλητα. Το πρόβλημα εντοπίζεται στο γεγονός ότι η υφαλμύριση των υδάτων μειώνει την ποσότητα του νερού που είναι κατάλληλο για χρήση, σε μια χώρα με ήδη λιγοστούς υδάτινους πόρους. Με την αύξηση του πληθυσμού αυξάνονται και οι ανάγκες σε νερό για ύδρευση αλλά και για τη βιομηχανία. Επίσης, η απόρριψη υδατικών αποβλήτων υψηλής αλατότητας προκαλεί βλάβες στο οικοσύστημα, αλλά και υλικές φθορές και κατ'επέκταση οικονομικά προβλήματα. Οι επιπτώσεις της υφαλμύρισης στην Πολωνία είναι τόσο έντονες που σχεδόν το 70% του μήκους των κύριων ποταμών περιέχει νερό ακατάλληλο ακόμα και για βιομηχανική χρήση. Συνεπώς, η μη επεξεργασία των υδάτων κοστίζει εν τέλει, καθώς αυξάνεται σημαντικά το κόστος για την επεξεργασία του

νερού. Γενικά, το βάθος εξόρυξης αυξάνεται. Με την αύξηση του βάθους αυξάνεται η αλατότητα των υδάτων ενώ παράλληλα μειώνεται η ποσότητά τους. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την περεταίρω αύξηση της αλατότητας των υδάτων μακροπρόθεσμα.

Για την προστασία των υδάτινων πόρων, αλλά και του περιβάλλοντος και κατ' επέκταση της ανθρώπινης υγείας, έχει θεσπιστεί νομοθεσία σχετικά με την απόρριψη υδατικών αποβλήτων υψηλής αλατότητας στα επιφανειακά υδάτινα σώματα. Αυτή η νομοθεσία εφαρμόζει οικονομικές κυρώσεις αλλά και κίνητρα ώστε να ωθήσει τις εταιρίες εξόρυξης στη δημιουργία μονάδων επεξεργασίας των αποβλήτων τους. Η ιδέα πίσω από τη θέσπιση της συγκεκριμένης νομοθεσίας είναι να υποχρεωθούν οι επιχειρήσεις του τομέα της εξόρυξης άνθρακα να επενδύσουν στην προστασία των υδάτων. Τα περιβαλλοντικά τέλη τα οποία υποχρεώνονται να πληρώνουν οι επιχειρήσεις εξόρυξης βάσει της συγκέντρωσης αλάτων των αποβλήτων, τους επιστρέφονται με τη μορφή επιχορηγήσεων, ώστε να γίνουν επενδύσεις πάνω στην επεξεργασία των αποβλήτων. Εν τέλει, αν συνυπολογιστούν τα πρόστιμα, η κατασκευή μονάδων επεξεργασίας αποβαίνει οικονομικά συμφέρουσα μακροπρόθεσμα, τουλάχιστον στην περίπτωση των ορυχείων με την υψηλότερη παραγωγή υδατικών αποβλήτων.

Υπάρχουν ορισμένες τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μειωθεί η αλατότητα των απορριπτόμενων αποβλήτων, αλλά πρέπει να είναι αποτελεσματικές, τεχνικά και νομικά εφικτές και να μην οδηγούν σε δυσανάλογες περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις. Καθώς το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα της Πολωνίας είναι η υφαλμύριση των επιφανειακών υδάτινων σωμάτων λόγω της δραστηριότητας των ανθρακωρυχείων, η εφαρμογή της αφαλάτωσης αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο για την επαναφορά των υδάτων σε κατάσταση σύμφωνη με τις προδιαγραφές, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα της μελέτης της περίπτωσης της μονάδας Debieńsko, η οποία είχε σχεδιαστεί με σκοπό την επεξεργασία αλατούχων αποβλήτων ανθρακωρυχείου στην Πολωνία, σύμφωνα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Η συγκεκριμένη προσέγγιση θεωρήθηκε πως μπορεί να αναπαραχθεί και στα υπόλοιπα ανθρακωρυχεία της ίδιας υδρογεωλογικής περιοχής. Ο μεγάλος όγκος εκρών νερού υψηλής αλατότητας παρέχει μια καλή ευκαιρία εφαρμογής της κυκλικής οικονομίας στην περιοχή, από οικονομική άποψη. Συγκεκριμένα, τα ανθρακωρυχεία τα οποία βρίσκονται εντός της εν λόγω υδρογεωλογικής περιοχής είναι τα: Bolesław Śmiały, Knurów-Szczygłowice, Piast-Ziemowit, Mysłowice-Wesoła, Janina και Silesia. Στο Bolesław Śmiały έχει ήδη γίνει μελέτη για τη δημιουργία πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας υδατικών αποβλήτων, αλλά θα πρέπει να διεξαχθούν περαιτέρω μελέτες και για τα υπόλοιπα ανθρακωρυχεία της περιοχής σε συνεργασία με τις επιχειρήσεις που τα λειτουργούν.

Η επίτευξη της «βιώσιμης ανάπτυξης» απαιτεί μεθόδους και εργαλεία που θα βοηθήσουν στην ποσοτικοποίηση και σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παροχή αγαθών και υπηρεσιών στις κοινωνίες μας. Η ανάλυση κύκλου ζωής είναι ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την εκτίμηση και την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών

επιπτώσεων. Καθώς στην περίπτωση της απόρριψης υδατικών αποβλήτων ανθρακωρυχείων μελετώνται περιβαλλοντικές επιπτώσεις η ανάλυση κύκλου ζωής είναι πολύτιμο εργαλείο στα χέρια των ερευνητών για την ποσοτικοποίηση και τη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ανάλυση κύκλου ζωής μέσω της αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων οδηγεί σε συμπεράσματα με σκοπό τη βελτίωση των υπαρχόντων διεργασιών και την ανάπτυξη πρακτικών εξοικονόμησης πόρων και ενέργειας.

Στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου H2020 ZERO BRINE αναπτύχθηκε μια πιλοτική μονάδα επεξεργασίας ανθρακωρυχείου η οποία οδηγεί στην ταυτόχρονη ανάκτηση χρήσιμων πρώτων υλών (αλάτων και νερού).

Η ανάκτηση υλικών από την πιλοτική μονάδα ZERO BRINE μπορεί να συνεισφέρει στην ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας στην περιοχή, ανοίγοντας το δρόμο σε άλλες παρόμοιες εφαρμογές στην επεξεργασία αποβλήτων. Σκοπός είναι αφενός η εξοικονόμηση λειτουργικών εξόδων της μονάδας και αφετέρου η εξοικονόμηση ενέργειας και πρώτων υλών, καθώς τα ανακτημένα υλικά δε χρειάζεται να παραχθούν εκ νέου. Τέλος, μεγάλες ποσότητες αποβλήτων, που σε άλλη περίπτωση θα συνείφεραν στη ρύπανση και την υφαλμύριση, δεν απορρίπτονται στη φύση αλλά αποτελούν αγαθά για τις βιομηχανίες (π.χ. χλωριούχο νάτριο, υδροξείδιο του μαγνησίου, γύψος, απονιμισμένο νερό) και την κοινωνία (καθαρό νερό). Εν τέλει το πρόγραμμα ZERO BRINE, παρέχοντας λύσεις για την επεξεργασία των υδατικών αποβλήτων, ενισχύει την περιβαλλοντικά και οικονομικά βιώσιμη ανάπτυξη.

Έπειτα από ανάλυση των αποτελεσμάτων Ανάλυσης Κύκλου Ζωής που διεξήχθη για τη συγκεκριμένη πιλοτική μονάδα προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Όσον αφορά τη συγκεκριμένη πιλοτική μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων του ορυχείου Bolesław Śmiały, η μονάδα αποτελείται από τις εξής διεργασίες: (1) νανοδιήθηση, (2) αντίστροφη ώσμωση, (3) ηλεκτροδιάλυση και (4) κρυσταλλοποίηση. Σχετικά με αυτή τη μονάδα, μελετήθηκαν τέσσερις εναλλακτικές διαμορφώσεις. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής προέκυψε ότι δύο εξ αυτών έχουν την καλύτερη επίδοση. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις οφείλονται κυρίως στην κατανάλωση ενέργειας. Η βασική πτυχή του σχεδιασμού που πρέπει να βελτιστοποιηθεί είναι η κατανάλωση ενέργειας της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης, όπως προτείνεται από τη βιβλιογραφία για μονάδες αφαλάτωσης. Όσον αφορά τα ανακτημένα υλικά, είναι σημαντικό να διενεργηθούν δοκιμές για να εξασφαλιστεί ότι το ανακτημένο διάλυμα ύδατος και άλμης θα ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των τελικών χρηστών. Η επαναχρησιμοποίηση αυτών των υλικών θα συμβάλει σημαντικά στη θετική περιβαλλοντική επίδοση της διαδικασίας, εξισορροπώντας σε μεγάλο βαθμό τις περιβαλλοντικές της επιπτώσεις. Επίσης σημαντικό είναι να διεξαχθεί και ανάλυση κόστους για τη συγκεκριμένη πιλοτική μονάδα. Η AKZ δεν είναι αρκετή για να αποφασιστεί μια επένδυση. Μια ανάλυση κόστους που θα περιλαμβάνει λειτουργικά έξοδα για υλικά και ενέργεια και έσοδα από την πώληση των ανακτημένων προϊόντων θα οδηγήσει στα απαραίτητα συμπεράσματα για την οικονομική βιωσιμότητα της μονάδας. Τέλος, η αύξηση της ανάκτησης υλικών από τα απόβλητα, σε συνδυασμό με τη κατά

το δυνατόν μείωση της κατανάλωσης ενέργειας θα αποτελούσε το βέλτιστο σενάριο του σχεδιασμού.

Αξίζει να αναφερθεί πως, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας δε συγκρίθηκαν με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της υφιστάμενης κατάστασης η οποία φορά την απόρριψη των αποβλήτων στο γειτονικό ποταμό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει προς το παρόν κάποιος καθολικά αποδεκτός τρόπος εκτίμησης των επιπτώσεων από την υψηλή περιεκτικότητα των υδάτων σε άλατα. Οι περισσότερες μελέτες ΑΚΖ αγνοούν τις επιπτώσεις της υψηλής αλατότητας των υδάτων, λόγω των περιορισμών των υφιστάμενων προσεγγίσεων εκτίμησης επιπτώσεων κύκλου ζωής. Δύο προσεγγίσεις εφαρμόζονται συνήθως στη συγκεκριμένη περίπτωση: (1) η χημικά ειδική προσέγγιση και (2) η προσέγγιση πλήρους εκροής. Η πρώτη υστερεί στην περίπτωση περίπλοκης σύστασης των αποβλήτων, ενώ η δεύτερη σε περίπτωση μεγάλων διακυμάνσεων στη συγκέντρωση των αλάτων με το χρόνο. Η προσέγγιση ανά ομάδα μπορεί να αντιμετωπίσει το πρώτο πρόβλημα καθώς απαιτεί λιγότερα δεδομένα για την εφαρμογή της. Επίσης, μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε περιπτώσεις μικρών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης.

Κατά την εφαρμογή της ΑΚΖ θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η αντιπροσωπευτικότητα της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιείται. Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο, μια μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής θα πρέπει να καταγράφει όλες τις στοιχειώδεις εισόδους και εξόδους στα όρια του συστήματος. Με τη χρήση των κατάλληλων βάσεων δεδομένων μπορούν να ληφθούν υπόψη παράμετροι που συνήθως αγνοούνται. Οι πιο σημαντικές παράμετροι που συνήθως αγνοούνται είναι: (1) η κατασκευή της εγκατάστασης, η οποία συνεισφέρει στην υπερθέρμανση του πλανήτη, κυρίως λόγω της παραγωγής των δομικών υλικών, (2) η παραγωγή των βοηθητικών υλικών (π.χ. για καθαρισμό, συντήρηση, κλπ.), τα οποία συνδέονται με την κλιματική αλλαγή και τη μείωση του όζοντος και (3) η παραγωγή των μεμβρανών, η οποία αν και έχει μικρή συμβολή στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, προτείνεται να διερευνείται κατά πόσο αυτό ισχύει σε κάθε περίπτωση.

Η συμπερίληψη των επιπτώσεων της υφαλμύρισης στην ΑΚΖ είναι μεγάλης σημασίας. Η εκτίμηση των επιπτώσεων λόγω υψηλής αλατότητας θα βρει εφαρμογή και στην περίπτωση της Πολωνίας λόγω των περιορισμένων υδάτινων πόρων της και του μεγάλου αριθμού ανθρακωρυχείων. Παρόλο που οι υπάρχουσες τεχνικές αποτελούν σημαντική συνεισφορά, είναι ελλιπείς όσον αφορά την κάλυψη των περιβαλλοντικών μηχανισμών και την εξάρτηση της εφαρμογής τους από την τοποθεσία για την οποία έχουν σχεδιαστεί. Για την καλύτερη εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων βάσει των περιβαλλοντικών μηχανισμών συνίσταται μια προσέγγιση από τη βάση στην κορυφή, η οποία αφορά: (1) την παρακολούθηση όλων των διαδικασιών, από την απόρριψη άλμης μέχρι και τη μεταφορά των αλάτων στο έδαφος, (2) την έκθεση του στόχου στο συγκεκριμένο ρύπο και (3) τις επιπτώσεις αυτής της έκθεσης στο στόχο.

Η εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με την έρευνα και την απόκτηση νέων δεδομένων. Τα υφιστάμενα μοντέλα αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των επιπτώσεων ενδεχομένως οδηγούν σε

σημαντική υποεκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ενώ οι πρόσφατες μελέτες έχουν αρχίσει να αντιμετωπίζουν αυτήν την πρόκληση, απαιτείται περαιτέρω έρευνα δεδομένων των ανησυχιών που συνδέονται με τις απορρίψεις υδατικών αποβλήτων υψηλής αλατότητας και τον περιορισμό των υφιστάμενων προσεγγίσεων για την αξιολόγηση των υδάτινων οικοτοξικών επιπτώσεων, συμπεριλαμβανομένων της χημικά ειδικής, της πλήρους εκροής και της προσέγγισης ανά ομάδα.

8 Βιβλιογραφία

Andersson, M., 2004. Water Management in the Hard Coal Sector in Poland - A Case Study. pp. 173-180.

Bakogianni, D., 2019. *Preliminary LCA and LCC of the Demonstration Projects (Poland & Turkey)*, s.l.: s.n.

Blanchette, M. L. & Lund, M. A., 2016. Pit lakes are a global legacy of mining: an integrated approach to achieving sustainable ecosystems and value for communities.

Cañedo-Argüelles, M. et al., 2012. Salinisation of rivers: An urgent ecological issue. *Environmental Pollution*.

Chalupnik, S. et al., 2001. Contamination of settling ponds and rivers as a result of discharge of radium-bearing waters from Polish coal mines. *Journal of Environmental Radioactivity*.

Dias, P. A. et al., 2018. *EU coal regions: opportunities and challenges ahead*, Luxembourg: Publications Office of the European Union.

EURACOAL, 2017. *Coal in Europe 2017*, <https://euracoal.eu>, s.l.: s.n.

EURACOAL, τελευταία προσπέλαση 2019. *Poland*, <https://euracoal.eu/info/country-profiles/poland/>, s.l.: s.n.

Gzyl, G., Janson, E. & Łabaj, P., 2017. Chapter 17: Mine Water Discharges in Upper Silesian Coal Basin (Poland). In: *Assessment, Restoration and Reclamation of Mining Influenced Soils*. s.l.:s.n.

Kapusta, K., Stańczyk, K., Wiatowski, M. & Chećko, J., 2013. Environmental aspects of a field-scale underground coal gasification trial in a shallow coal seam at the Experimental Mine Barbara in Poland.

Lewin, I. & Smoliński, A., 2006. Rare and vulnerable species in the mollusc communities in the mining subsidence reservoirs of an industrial area (The Katowicka Upland, Upper Silesia, Southern Poland).

Mitko, K., 2018. *Deliverable 3.3: Report on the preliminary design and the simulation model results*, s.l.: s.n.

Payen, S. et al., 2016. Salinisation impacts in life cycle assessment: a review of challenges and options towards their consistent integration.

Rebitzer, G. et al., 2003. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications.

Technical Committee ISORC 207, Environmental management, Subcommittee SC 5, Life cycle assessment, 1997. *ISO 14040 Environmental management - Life cycle*

assessment - Principles and framework. s.l.:International Organization for Standardization.

Xevgenos, D., Bakogianni, D., Haralambous, K.-J. & Loizidou, M., 2018. Intergrated Brine Management: A Circular Economy Approach. In: *Smart Water Grids: A Cyber-Physical Systems Approach.* s.l.:s.n., pp. 203-229.

Xevgenos, D., Gzyl, G., Mortou, M. & Loizidou, M., 2019. *Coal mining wastewater treatment in Poland in view of circular economy,* s.l.: s.n.

Zhou, J., Chang, V. W.-C. & Fane, A. G., 2012. An improved life cycle impact assessment (LCIA) approach for assessing aquatic eco-toxic impact of brine disposal from seawater desalination plants. *Desalination.*

Zhou, J., Chang, V. W.-C. & Fane, A. G., 2014. Life Cycle Assessment for desalination: A review on methodology feasibility and reliability. *Water Research.*