



ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΣΤΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟΝ ΚΛΑΔΟ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ
ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

του:

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΥ

Αριθμός Μητρώου : mba23026

Επιβλέπων: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ Κ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ

Υποβλήθηκε ως απαιτούμενο για την απόκτηση του μεταπτυχιακού διπλώματος στη
Διοίκηση Επιχειρήσεων

Ιανουάριος 2024



Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία δε θα παρουσίαζε αυτό το άρτιο αποτέλεσμα, χωρίς τη συμβολή ορισμένων ανθρώπων. Αρχικά λοιπόν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Ανδρέα Κ. Γεωργίου και τον Επίκουρο Καθηγητή Κωνσταντίνο Καπάρη για τις αμέτρητες συμβουλές και την αμέριστη καθοδήγηση που μου παρείχαν σε όλη τη διάρκεια συγγραφής της συγκεκριμένης εργασίας. Επιπλέον, ευχαριστίες οφείλονται στα άτομα του οικογενειακού μου περιβάλλοντος, και ιδιαίτερα στους γονείς μου και τον αδερφό μου, η συμπαράσταση και η υποστήριξη των οποίων ήταν καθοριστική. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τους φίλους που βρίσκονται δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και μου προσφέρουν κίνητρο για συνεχή βελτίωση. Σε αυτή την κατηγορία, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στον φίλο μου Γεώργιο Λαζόπουλο, η συνεισφορά του οποίου ήταν απεριόριστη. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου στο MBA, με τους οποίους, τόσο κατά τη συγγραφή της διπλωματικής μου εργασίας όσο και σε όλη τη διάρκεια του Δ.Π.Μ.Σ., ανταλλάξαμε ιδέες, απόψεις και προτάσεις, γεγονός καθοριστικό για την επιτυχή ολοκλήρωση των σπουδών μου.

«Οὐδὲν γὰρ ἄλλο ἔχουσα εἰς Ἄιδου ἢ ψυχὴ
ἔρχεται πλὴν τῆς παιδείας τε καὶ τροφῆς»

Πλάτων, 427-347 π.Χ.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου μικτού-ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP), μέσω του οποίου βελτιστοποιείται η διαχείριση ενέργειας της βιομηχανίας παραγωγής χάλυβα *Daewoo Steel Co. Ltd* στη Νότια Κορέα, που λαμβάνεται ως μελέτη περίπτωσης. Αντικειμενικός στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η διαμόρφωση του βέλτιστου ενεργειακού μίγματος, μέσω του οποίου μεγιστοποιούνται τα έσοδα της βιομηχανίας, καλύπτοντας ταυτόχρονα τις ενεργειακές της απαιτήσεις. Ως πιθανές πηγές ενέργειας ορίζονται ο άνθρακας, το φυσικό αέριο, η ηλιακή και αιολική ενέργεια, ενώ λαμβάνεται υπόψη και η δυνατότητα πώλησης της πλεονάζουσας ενέργειας στο τοπικό δίκτυο. Αρχικά, έλαβε χώρα η βιβλιογραφική ανασκόπηση γύρω από τον κλάδο του χάλυβα, αναφέροντας οικονομικά, ενεργειακά και περιβαλλοντικά στοιχεία, καθώς και αντίστοιχα μαθηματικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί. Στη συνέχεια, συλλέχθηκαν και επεξεργάστηκαν τα απαραίτητα δεδομένα που σχετίζονται με την ενεργειακή κατανάλωση της βιομηχανίας και τη δυναμικότητα ΑΠΕ στην περιοχή που αυτή βρίσκεται. Ακολούθησε η ανάπτυξη του μοντέλου (μεταβλητές απόφασης, αντικειμενική συνάρτηση, περιορισμοί) και η μετατροπή του σε κώδικα *Python*. Κατά την επίλυση του μοντέλου, εξετάστηκαν 4 διαφορετικά σενάρια. Στο αρχικό σενάριο (21,65% άνθρακας, 58,35% φυσικό αέριο, 2,22% ηλιακή ενέργεια, 17,78% αιολική ενέργεια) τα έσοδα της βιομηχανίας ήταν 101.353,29 €. Στο δεύτερο σενάριο (27,86% άνθρακας, 37,5% φυσικό αέριο, 3,84% ηλιακή ενέργεια, 30,8% αιολική ενέργεια), προστέθηκαν επιπλέον περιορισμοί για τη χρήση άνθρακα και φυσικού αερίου και τα έσοδα της βιομηχανίας ανήλθαν σε 2.220,30€. Στο τρίτο σενάριο (38,63% άνθρακας, 13,36% φυσικό αέριο, 5,32% ηλιακή ενέργεια, 42,69% αιολική ενέργεια) εξετάστηκε η κάλυψη των αναγκών της χαλυβουργίας μόνο από συμβατικά καύσιμα και προέκυψαν ζημίες ίσες με 31.975,67 €. Ως τελευταίο σενάριο μελετήθηκε η περίπτωση μετατροπής του μοντέλου από MILP σε απλό γραμμικού προγραμματισμού, αφαιρώντας όλες τις δυαδικές μεταβλητές από το αρχικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου είναι παρόμοια με του αρχικού, λόγω της φύσης των περιορισμών που ορίστηκαν. Τέλος, σε κάθε σενάριο έλαβε χώρα η ανάλυση ευαισθησίας ως προς το πως μεταβάλλονται το ενεργειακό μίγμα και τα έσοδα, όταν αλλάζουν οι διάφοροι παράμετροι του μοντέλου.

Λέξεις κλειδιά: *Χάλυβας, διαχείριση ενέργειας, μαθηματική μοντελοποίηση, MILP, ανάλυση ευαισθησίας.*

Abstract

The scope of this master's thesis is the development of a mathematical mixed-integer linear programming (MILP) model in order to optimize the energy management of *Daewoo Steel Co. Ltd* industry in South Korea (case study). The objective of this study is to formulate the optimal energy mix to maximize the company's revenue while meeting its energy demands. Possible energy sources are coal, natural gas, solar and wind energy, with the possibility of selling surplus energy to the local grid also taken into account. Initially, a literature review was conducted on the steel industry, covering economic, energy and environmental aspects, as well as corresponding mathematical models that have been developed. Subsequently, necessary data related to the energy consumption of the industry and the potential of renewable energy sources in the region were collected and processed. The model then was developed (decision variables, objective functions, constraints) and converted into *Python* code. Four different scenarios were examined during the model's solution. In the initial scenario (21,65% coal, 58,35% natural gas, 2,22% solar energy, 17,78% wind energy), the company's revenue was 101.353,29 €. In the second scenario (27,86% coal, 37,5% natural gas, 3,84% solar energy, 30,8% wind energy), additional constraints on coal and natural gas usage were added, resulting in revenue of 2.220,30 €. The third scenario (38,63% coal, 13,36% natural gas, 5,32% solar energy, 42,69% wind energy) examined covering the steelwork's need only from conventional fuels, resulting in losses of 31.975,67 €. As a final scenario, the conversion of the model from MILP to simple linear programming, by eliminating binary variables, was studied. The results in this case were similar to the initial scenario, due to the nature of the defined constraints. Finally, sensitivity analysis was conducted in each scenario to examine the variability of the energy mix and revenues under various alternations of model parameters.

Key-words: *Steel, energy management, mathematical modelling, MILP, sensitivity analysis.*

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
2	Θεωρητικό μέρος.....	3
2.1	Γενικά για το χάλυβα	3
2.2	Ιστορική αναδρομή του κλάδου του χάλυβα	7
2.3	Παρούσα κατάσταση του κλάδου του χάλυβα	8
2.3.1	Η περίπτωση της Κίνας	10
2.3.2	Η περίπτωση της Νότιας Κορέας	11
2.3.3	Η περίπτωση της Ελλάδας.....	13
2.4	Χρήση ενέργειας στη βιομηχανία χάλυβα	14
2.4.1	Χρησιμοποιούμενα καύσιμα	15
2.4.2	Ενεργειακή κατανάλωση ανά διεργασία	17
2.5	Εκπομπές CO ₂ στη βιομηχανία του χάλυβα	18
2.6	Δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης του αποτυπώματος άνθρακα	21
2.6.1	Αύξηση ενεργειακής απόδοσης.....	21
2.6.2	Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ)	22
2.6.3	Εισαγωγή Υδρογόνου (H ₂).....	23
2.6.4	Δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂)	24
2.6.5	Βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας.....	24
3	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	26
4	Μεθοδολογία	35
4.1	Συλλογή δεδομένων	36
4.1.1	Ενεργειακή κατανάλωση DAEWOO Steel	36
4.1.2	Δυναμικότητα ηλιακής και αιολικής ενέργειας.....	39
4.2	Διαμόρφωση μαθηματικού μοντέλου	41
4.2.1	Μεταβλητές απόφασης.....	41
4.2.2	Αντικειμενική συνάρτηση	41
4.2.3	Περιορισμοί.....	42
4.2.4	Παραδοχές μοντέλου	46
5	Αποτελέσματα	47
5.1	Αρχικό σενάριο	47
5.2	Δεύτερο σενάριο	54
5.3	Τρίτο σενάριο.....	62

5.4	Τέταρτο σενάριο	69
6	Συμπεράσματα.....	77
7	Βιβλιογραφία.....	81
8	Προσάρτημα.....	88
8.1	Υπολογισμός συντελεστών αντικειμενικής συνάρτησης.....	88
8.2	Κώδικας μοντέλου σε Python.....	91

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Παραγωγή χάλυβα ανά μέθοδο παραγωγής το 2018.	4
Πίνακας 2.2: Παραγωγή χάλυβα ανά χώρα για το έτος 2022.	9
Πίνακας 2.3: Συνεισφορά (%) της χαλυβουργίας στην οικονομία της Ν. Κορέας.	12
Πίνακας 2.4: Κατανάλωση ενέργειας ανά διεργασία.	17
Πίνακας 2.5: Ποσοστά χρήσης πηγών ενέργειας ανά διεργασία παραγωγής χάλυβα. ..	18
Πίνακας 2.6: Χρήσεις ενεργειακών πηγών στη χαλυβουργία.	18
Πίνακας 2.7: Δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας στη χαλυβουργία.	21
Πίνακας 3.1: Μελέτες βελτιστοποίησης στη βιομηχανία σιδήρου-χάλυβα.	33
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά συνόλου δεδομένων.	37
Πίνακας 4.2: Μεταβλητές συνόλου δεδομένων.	37
Πίνακας 4.3: Μηνιαία κατανάλωση ενέργειας στη Daewoo Steel το έτος 2018.	39
Πίνακας 4.4: Μέσος όρος προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στη Νότια Κορέα κατά τα έτη 1982-2005.	40
Πίνακας 4.5: Μέσος όρος ταχύτητας αέρα στη Νότια Κορέα κατά τα έτη 2012-2022.	40
Πίνακας 4.6: Τιμές αντικειμενικών συντελεστών μοντέλου.	42
Πίνακας 4.7: Τιμές παραμέτρων μοντέλου.	45
Πίνακας 5.1: Βέλτιστη λύση αρχικού σεναρίου (kWh).	47
Πίνακας 5.2: Μεταβολές στους περιορισμούς του αρχικού σεναρίου για το δεύτερο σενάριο.	54
Πίνακας 5.3: Βέλτιστη λύση δεύτερου σεναρίου (kWh).	55
Πίνακας 5.4: Μεταβολές στους περιορισμούς του αρχικού σεναρίου για το τρίτο σενάριο.	62
Πίνακας 5.5: Βέλτιστη λύση τρίτου σεναρίου (kWh).	62
Πίνακας 5.6: Μεταβολές στους περιορισμούς του αρχικού σεναρίου για το τέταρτο σενάριο.	69
Πίνακας 5.7: Βέλτιστη λύση τέταρτου σεναρίου (kWh).	70
Πίνακας 5.8: Συνοπτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων όλων των σεναρίων.	76

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Διεργασίες παραγωγής χάλυβα.....	3
Σχήμα 2: Τύποι χάλυβα.....	6
Σχήμα 3:Κατανομή της τελικής χρήσης χάλυβα ανά κλάδο για το 2021.....	6
Σχήμα 4: Παγκόσμια παραγωγή χάλυβα τα έτη 1900-2020.....	8
Σχήμα 5: Παγκόσμιος χάρτης παραγωγής χάλυβα το 2022.....	9
Σχήμα 6: Φάσεις ανάπτυξης του κλάδου του χάλυβα στην Κίνα.....	11
Σχήμα 7: Σχέση παραγωγής χάλυβα και κινεζικού ΑΕΠ.....	11
Σχήμα 8: Ετήσια παραγωγή χάλυβα στη Νότια Κορέα.....	12
Σχήμα 9: Κατανάλωση ενέργειας στη βιομηχανία σιδήρου και χάλυβα.....	15
Σχήμα 10: Δείκτης παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας ανά τόνο παραγωγής ακατέργαστου χάλυβα.....	15
Σχήμα 11: Συγκριτική απεικόνιση των πηγών παραγωγής ενέργειας στη βιομηχανία χάλυβα το 2013 και το 2019.....	16
Σχήμα 12: Παγκόσμιες εκπομπές CO ₂ τα έτη 1990-2020.....	19
Σχήμα 13: Σχέση μεταξύ εκπομπών CO ₂ και παραγωγής χάλυβα.....	20
Σχήμα 14: Εκπεμπόμενο CO ₂ ανά παραγόμενο τόνο χάλυβα.....	20
Σχήμα 15: Μονοπάτια εκμετάλλευσης των ΑΠΕ στη βιομηχανία σιδήρου-χάλυβα.....	23
Σχήμα 16: Μεθοδολογία παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	36
Σχήμα 17: Μηνιαία κατανάλωση ενέργειας στην Daewoo Steel το έτος 2018.....	38
Σχήμα 18: Ενεργειακό μίγμα ανά μήνα (αριστερά) και ανά έτος (δεξιά) στο αρχικό σενάριο.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Σχήμα 19: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς το ενεργειακό μίγμα για το αρχικό σενάριο.....	49
Σχήμα 20: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς το ενεργειακό μίγμα για το αρχικό σενάριο.....	50
Σχήμα 21: Επίδραση της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών και του αριθμού των ανεμογεννητριών στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στο αρχικό σενάριο.....	51
Σχήμα 22: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς τα έσοδα για το αρχικό σενάριο.....	52
Σχήμα 23: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς τα έσοδα για το αρχικό σενάριο.....	53
Σχήμα 24: Ανάλυση ευαισθησίας ελάχιστου ποσοστού ενσωμάτωσης ΑΠΕ ως προς τα έσοδα για το αρχικό σενάριο.....	53
Σχήμα 25: Ενεργειακό μίγμα ανά μήνα (αριστερά) και ανά έτος (δεξιά) στο δεύτερο σενάριο.....	56
Σχήμα 26: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς το ενεργειακό μίγμα για το δεύτερο σενάριο.....	57
Σχήμα 27: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς το ενεργειακό μίγμα για το δεύτερο σενάριο.....	59
Σχήμα 28: Επίδραση της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών και του αριθμού των ανεμογεννητριών στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στο δεύτερο σενάριο.....	59
Σχήμα 29: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς τα έσοδα για το δεύτερο σενάριο.....	60

Σχήμα 30: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς τα έσοδα για το δεύτερο σενάριο.	61
Σχήμα 31: Ανάλυση ευαισθησίας ελάχιστου ποσοστού ενσωμάτωσης ΑΠΕ ως προς τα έσοδα για το δεύτερο σενάριο.	61
Σχήμα 32: Ενεργειακό μίγμα ανά μήνα (αριστερά) και ανά έτος (δεξιά) στο τρίτο σενάριο.	63
Σχήμα 33: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς το ενεργειακό μίγμα για το τρίτο σενάριο.	64
Σχήμα 34: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς το ενεργειακό μίγμα για το τρίτο σενάριο.	66
Σχήμα 35: Επίδραση της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών και του αριθμού των ανεμογεννητριών στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στο τρίτο σενάριο.	67
Σχήμα 36: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς τα έσοδα για το τρίτο σενάριο.	67
Σχήμα 37: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς τα έσοδα για το τρίτο σενάριο.	68
Σχήμα 38: Ανάλυση ευαισθησίας ελάχιστου ποσοστού ενσωμάτωσης ΑΠΕ ως προς τα έσοδα για το τρίτο σενάριο.	69
Σχήμα 39: Ενεργειακό μίγμα ανά μήνα (αριστερά) και ανά έτος (δεξιά) στο τέταρτο σενάριο.	71
Σχήμα 40: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς το ενεργειακό μίγμα για το τέταρτο σενάριο.	71
Σχήμα 41: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς το ενεργειακό μίγμα για το τέταρτο σενάριο.	73
Σχήμα 42: Επίδραση της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών και του αριθμού των ανεμογεννητριών στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στο τέταρτο σενάριο.	73
Σχήμα 43: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς τα έσοδα για το τέταρτο σενάριο.	74
Σχήμα 44: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς τα έσοδα για το τέταρτο σενάριο.	75
Σχήμα 45: Ανάλυση ευαισθησίας ελάχιστου ποσοστού ενσωμάτωσης ΑΠΕ ως προς τα έσοδα για το τέταρτο σενάριο.	75
Σχήμα 46: Τιμή προμήθειας άνθρακα στη Νότια Κορέα	88
Σχήμα 47: Τιμή προμήθειας φυσικού αερίου στη Νότια Κορέα.	89
Σχήμα 48: Οριακή τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στη Νότια Κορέα το 2023	91

1 Εισαγωγή

Ο χάλυβας (ατσάλι-steel) είναι υλικό (κράμα), αποτελούμενο κυρίως από σίδηρο και άνθρακα, που βρίσκει μεγάλη εφαρμογή σε διάφορους κλάδους, όπως μεταφορές, κατασκευές κλπ. Η παραγωγή και η κατεργασία του ξεκίνησε από την προϊστορική εποχή, φτάνοντας στο σήμερα όπου παράγονται σχεδόν 2.000 εκατομμύρια τόνοι παγκοσμίως (Edward F., et al., 2023; World Steel Association, 2023). Η βιομηχανία σιδήρου-χάλυβα (*iron & steel industry*) παίζει καθοριστικό ρόλο στην παγκόσμια οικονομία και θεωρείται δείκτης-κλειδί για την ευημερία μιας χώρας. Λόγω της φύσης των διεργασιών που συμμετέχουν στην παραγωγή χάλυβα, ο συγκεκριμένος κλάδος καταναλώνει υψηλές ποσότητες ενέργειας, εκπέμποντας ταυτόχρονα μεγάλο όγκο αερίων του θερμοκηπίου, με σημαντικότερο το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) (Wang, et al., 2020). Είναι χαρακτηριστικό πως η συγκεκριμένη βιομηχανία είναι από τις περισσότερο ενεργοβόρες, καθώς καταναλώνει περίπου το 8% της ενέργειας που παράγεται παγκοσμίως, ενώ ευθύνεται για το 7% των συνολικών εκπομπών CO₂ (Zhang, et al., 2022). Σύμφωνα με την Παγκόσμια Ένωση Χάλυβα, το πιο χρησιμοποιούμενο καύσιμο στη χαλυβουργία είναι ο άνθρακας με ποσοστό 74,3%, ενώ η συμμετοχή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο ενεργειακό μίγμα είναι περιορισμένη (World Steel Association, 2021). Στο πλαίσιο αυτό, η ιδέα ενός περισσότερο «πράσινου» χάλυβα έχει αποτυπωθεί στην κοινή γνώμη, αυξάνοντας τις απαιτήσεις για καλύτερη διαχείριση της ενέργειας και χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα από τις βιομηχανίες του κλάδου. Τα τελευταία χρόνια διεξάγονται ολοένα και περισσότερες μελέτες ενεργειακής βελτιστοποίησης που αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση του ενεργειακού κόστους και των εκπομπών CO₂, χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα (Shen, et al., 2018).

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου μικτού-ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Programming-MILP), μέσω του οποίου βελτιστοποιείται η διαχείριση ενέργειας της βιομηχανίας παραγωγής χάλυβα *Daewoo Steel Co. Ltd* στη Νότια Κορέα, που λαμβάνεται ως μελέτη περίπτωσης (*case study*). Αντικειμενικός στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η διαμόρφωση του βέλτιστου ενεργειακού μίγματος, μέσω του οποίου μεγιστοποιούνται τα έσοδα της βιομηχανίας, καλύπτοντας ταυτόχρονα τις ενεργειακές της απαιτήσεις. Ως πιθανές πηγές ενέργειας ορίζονται ο άνθρακας, το φυσικό αέριο, η ηλιακή και αιολική ενέργεια, ενώ λαμβάνεται επίσης υπόψη και η δυνατότητα πώλησης της πλεονάζουσας ενέργειας στο τοπικό δίκτυο. Ποια είναι η βέλτιστη ποσότητα ενέργειας που πρέπει παραχθεί από κάθε πηγή, ώστε να μεγιστοποιηθούν τα

έσοδα της επιχείρησης υπό τους περιορισμούς του μοντέλου; Πόσο θα αλλάξει η άριστη λύση αν μεταβληθεί κάποιος παράγοντας, όπως για παράδειγμα το ποσοστό ενσωμάτωσης των ΑΠΕ ή το κόστος των ενεργειακών πηγών; Σε αυτά τα ερωτήματα επιδιώκεται να δοθεί απάντηση μέσω της επίλυσης του μαθηματικού μοντέλου και της ανάλυσης ευαισθησίας.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας περιλαμβάνει, αρχικά, τον καθορισμό του προβλήματος και του πλαισίου της έρευνας, καθώς και τη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με αυτό. Στη συνέχεια, λαμβάνει χώρα η συλλογή και η επεξεργασία των απαραίτητων δεδομένων που σχετίζονται με την ενεργειακή κατανάλωση της βιομηχανίας που χρησιμοποιείται ως μελέτη περίπτωσης και τη δυναμικότητα παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ στην περιοχή που βρίσκεται αυτή. Έπειτα, αναπτύσσεται το μαθηματικό μοντέλο MILP σε κώδικα *Python*. Ακολουθεί η επίλυσή του, η ανάλυση ευαισθησίας και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την συγκεκριμένη μελέτη.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται σε έξι κύρια κεφάλαια:

- Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται το πλαίσιο της έρευνας, ο σκοπός και οι αντικειμενικοί στόχοι της εργασίας
- Στο δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνονται στοιχεία που αφορούν το χάλυβα και τα χαρακτηριστικά του, οικονομικές πληροφορίες για τον κλάδο, καθώς και δεδομένα για τη χρήση της ενέργειας σε αυτόν
- Στο τρίτο κεφάλαιο περιέχεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας στη χαλυβουργία
- Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματεύεται η μεθοδολογία που ακολουθείται για τη διαμόρφωση του μαθηματικού μοντέλου MILP
- Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα από τη βελτιστοποίηση και την ανάλυση ευαισθησίας
- Στο έκτο κεφάλαιο διατυπώνονται τα συμπεράσματα από την παρούσα εργασία και αναφέρονται οι περιορισμοί της μελέτης, αλλά και προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη του συγκεκριμένου θέματος
- Στο Προσάρτημα εντοπίζεται ο τρόπος υπολογισμού των αντικειμενικών συντελεστών και ο κώδικας *Python* που αναπτύχθηκε.

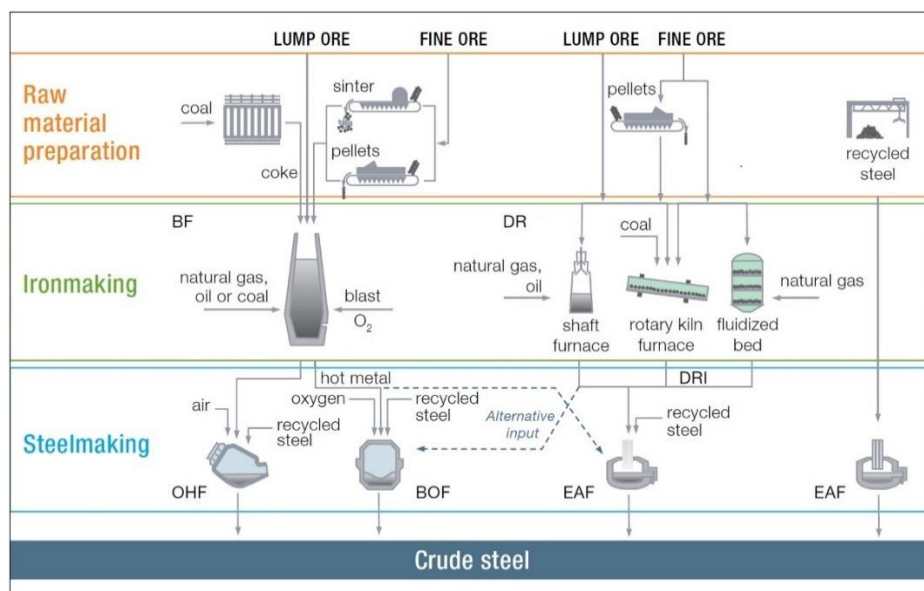
2 Θεωρητικό μέρος

2.1 Γενικά για το χάλυβα

Ο χάλυβας (κοινώς ατσάλι-steel) είναι ένα κράμα σιδήρου-άνθρακα, που περιέχει άνθρακα σε ποσοστό έως 2% κατά βάρος, λιγότερο από 1% μαγγάνιο και σε πολύ μικρότερα ποσοστά πυρίτιο, φώσφορο, θείο και οξυγόνο (World Steel Association, 2023). Πρόκειται για το πιο διαδεδομένο και σημαντικό υλικό στη βιομηχανία, μετά την πέτρα και το ξύλο, καθώς χρησιμοποιείται για την κατασκευή πληθώρας εργαλείων, συσκευών, υποδομών κλπ., από βελόνες ραπτικής μέχρι και πετρελαιοφόρα οχήματα (Edward F., et al., 2023).

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι παραγωγής χάλυβα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1 (World Steel Association, 2023):

- Με αναγωγή των σιδηρομεταλλευμάτων σε υψικάμινο για την παραγωγή χυτοσιδήρου και στη συνέχεια με μετατροπή του χυτοσιδήρου σε χάλυβα μέσα σε μεταλλάκτη με εμφύσηση οξυγόνου (Blast Furnace/Basic Oxygen Furnace-BF-BOF).
- Με ανάτξη παλαιοσιδήρου-ανακυκλωμένου χάλυβα (iron scrap-recycled steel) σε κλίβανο ηλεκτρικού τόξου (Electric Arc Furnace-EAF).



Σχήμα 1: Διεργασίες παραγωγής χάλυβα. Πηγή: Kim, et al., 2022.

Η βασική διαφορά ανάμεσα στους δύο τρόπους παραγωγής χάλυβα είναι οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται. Στην πρώτη περίπτωση (BF-BOF) χρησιμοποιείται κυρίως σιδηρομετάλλευμα, άνθρακας και ανακυκλωμένος χάλυβας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση

(EAF) η βασική πρώτη ύλη είναι ο παλαιοσίδηρος και ο ανακυκλωμένος χάλυβας. Ανάλογα με τη μορφή της βιομηχανίας και τη διαθεσιμότητα των πρώτων υλών, στις παραπάνω διεργασίες μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθούν και άλλες πηγές σιδηρομεταλλευμάτων, όπως ο σίδηρος άμεσης αναγωγής ή σπογοσίδηρος (Direct Reduce Iron-DRI) (He & Wang, 2017). Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής χάλυβα μέσω μιας ακόμα μεθόδου, με χρήση κλιβάνου ανοιχτής εστίας (Open Hearth Furnace-OHF). Ο συγκεκριμένος κλίβανος λαμβάνει ως τροφοδοσία χυτοσίδηρο από την υψηλάμμο (BF) ή/και ανακυκλωμένο χάλυβα. Ωστόσο, η διαλείπουσα (batch) λειτουργία του (απαιτεί περίπου 8 ώρες για κάθε παρτίδα) έχει μειώσει τη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου σε βαθμό που ελάχιστες βιομηχανίες πλέον τη χρησιμοποιούν (Ruth, 2004). Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η παραγωγή χάλυβα ανά μέθοδο για τις πρωταθλήτριες χώρες στο συγκεκριμένο κλάδο.

Πίνακας 2.1: Παραγωγή χάλυβα ανά μέθοδο παραγωγής το 2018.

Χώρες	Παραγωγή χάλυβα (εκατ. τόνοι)				Ποσοστό παραγωγής (%)			
	BOF	EAF	OHF	Συν.	BOF	EAF	OHF	Συν.
Κίνα	893,3	103,2	-	996,5	89,6	10,4	-	100
Ινδία	48,7	62,7	-	111,4	43,7	56,3	-	100
Ιαπωνία	75	24,3	-	99,3	75,5	24,5	-	100
ΗΠΑ	26,6	61,2	-	87,8	30,3	69,7	-	100
Ρωσία	45,9	24,1	1,7	71,7	64	33,7	2,3	100
Νότια Κορέα	48,7	22,7	-	71,4	68,2	31,8	-	100
Γερμανία	27,7	11,9	-	39,6	70	30	-	100
Σύνολο	1165,9	310,1	1,7	1477,7	78,9	21	0,1	100

Πηγή: World Steel Association, 2023.

Παρατηρείται ότι η διεργασία BF-BOF έχει επικρατήσει στην παγκόσμια χαλυβουργία και ακολουθεί η EAF, ωστόσο στην Ινδία και στις ΗΠΑ η παραγωγή μέσω EAF είναι υψηλότερη. Επιπλέον, η παραγωγή χάλυβα με τη μέθοδο OHF έχει σχεδόν εγκαταλειφθεί, καθώς από τις κυριότερες παραγωγικές χώρες μόνο η Ρωσία την έχει διατηρήσει.

Ο χάλυβας δεν είναι ένα μοναδικό προϊόν. Υπάρχουν περισσότεροι από 3.500 διαφορετικοί τύποι (grades) χάλυβα, ο καθένας με διαφορετικές φυσικοχημικές και περιβαλλοντικές ιδιότητες. Είναι άξιο αναφοράς ότι το 75% των σύγχρονων τύπων

χάλυβα έχουν αναπτυχθεί την τελευταία εικοσαετία (World Steel Association, 2023). Οι χάλυβες ταξινομούνται σε πολλές κατηγορίες, με τις δύο πιο σημαντικές να είναι ανάλογα με τη χημική τους σύσταση και την τελική τους χρήση. Με βάση τη χημική σύσταση οι χάλυβες διακρίνονται σε κοινούς ή ανθρακούχους χάλυβες (carbon steels) και σε κραματωμένους χάλυβες (alloy steels) (Noor, 2011).

Οι κοινόι χάλυβες ταξινομούνται περαιτέρω σε υποκατηγορίες, ανάλογα με την περιεκτικότητα άνθρακα που περιέχουν σε:

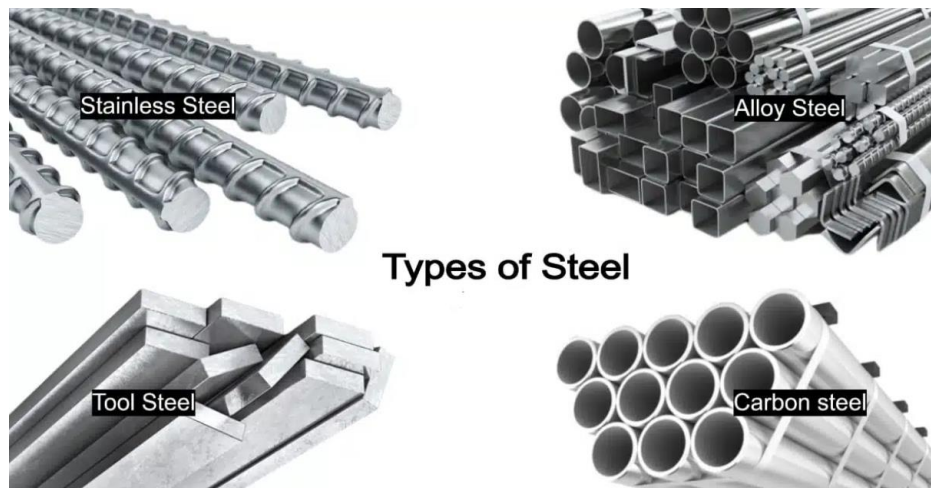
- Χάλυβες χαμηλού άνθρακα ή μαλακοί χάλυβες ($C < 0.30\%$), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή καλωδίων, ράβδων, σωλήνων κλπ.
- Χάλυβες μετρίου άνθρακα ($0.30\% < C < 0.45\%$), που βρίσκουν εφαρμογή για τη δημιουργία βιδών και άλλων εξαρτημάτων όπως μπουλόνια, πριτσίνια κλπ.
- Χάλυβες υψηλού άνθρακα ($0.45\% < C < 0.75\%$), οι οποίοι αξιοποιούνται για την κατασκευή αξόνων, γραναζιών, σκληρότερων βιδών κλπ.
- Χάλυβες πολύ υψηλού άνθρακα ($C > 0.75\%$), που χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες εφαρμογές για τη δημιουργία κοπτικών εργαλείων, εξοπλισμού υλοτομίας και γεωτρήσεων κλπ.

Οι κραματωμένοι χάλυβες είναι υλικά στα οποία προστίθενται ένα ή περισσότερα στοιχεία εκτός του άνθρακα, με στόχο την επίτευξη μιας συγκεκριμένης ιδιότητας ή ενός χαρακτηριστικού. Τα συνηθέστερα στοιχεία που εισάγονται είναι μέταλλα όπως νικέλιο, χρώμιο, μολυβδαίνιο, βανάδιο κλπ. Οι κραματωμένοι χάλυβες ταξινομούνται σε:

- Ελαφρά κραματωμένους χάλυβες ή χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης, οι οποίοι περιέχουν προσμίξεις μετάλλων σε ποσοστό χαμηλότερο από 10% κατά βάρος
- Ισχυρά κραματωμένους χάλυβες ή χάλυβες υψηλής κραμάτωσης, στους οποίους τα προστιθέμενα στοιχεία υπερβαίνουν το 10% της κατά βάρους συνολικής σύστασης.

Όσον αφορά την τελική τους χρήση, οι χάλυβες διακρίνονται σε ανοξείδωτους χάλυβες (stainless steels) και εργαλειοχάλυβες (tool steels). Ο ανοξείδωτος χάλυβας είναι ένα κράμα σιδήρου-άνθρακα που περιέχει τουλάχιστον 10% χρώμιο. Αυτή η χημική σύσταση οδηγεί στην αυξημένη ανθεκτικότητα του συγκεκριμένου υλικού στη διάβρωση, στη σκουριά και γενικά στις συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος. Συνεπώς, ο ανοξείδωτος χάλυβας χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή εξοπλισμού στη βιομηχανία τροφίμων, στην αεροναυπηγική, στη ναυτιλία κλπ. Όσον αφορά τους εργαλειοχάλυβες, πρόκειται για κράματα με υψηλό ποσοστό άνθρακα (ανθρακούχους ή

κραματωμένους) και χαρακτηρίζονται για την υψηλή σκληρότητα και την αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, φθορά και τριβή. Όπως προκύπτει και από το όνομά τους, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κοπτικών και διατρητικών εργαλείων, από απλά πριόνια έως και γεωτρώπανα (Noor, 2011). Στο Σχήμα 2 απεικονίζονται οι 4 διαφορετικοί τύποι χάλυβα που αναφέρθηκαν, ενώ στο Σχήμα 3 η κατανομή της τελικής χρήσης του χάλυβα ανά κλάδο για το 2021.



Σχήμα 2: Τύποι χάλυβα. Πηγή: Engineeringlearn, 2023.



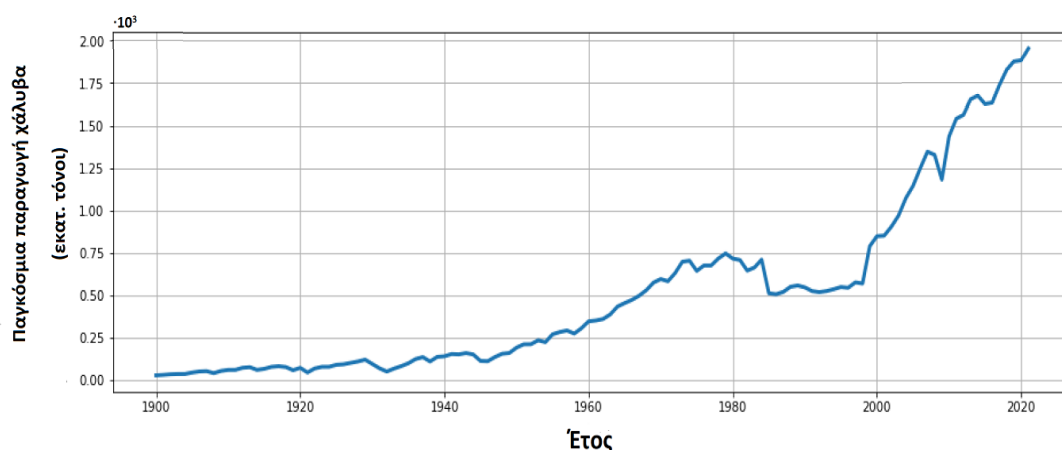
Σχήμα 3: Κατανομή (%) της τελικής χρήσης χάλυβα ανά κλάδο για το 2021. Πηγή: Statista, 2023.

2.2 Ιστορική αναδρομή του κλάδου του χάλυβα

Ο φλοιός της γης περιέχει περίπου 5% σίδηρο, ο οποίος, όπως αναφέρθηκε, αποτελεί τη βασική πρώτη ύλη για την παραγωγή του χάλυβα. Βρίσκεται κυρίως υπό τη μορφή χημικών ενώσεων (οξειδίων του σιδήρου) και συνεπώς ακολουθείται μια συγκεκριμένη διαδικασία επεξεργασίας του σιδηρομεταλλεύματος (αναγωγή του σιδήρου από κάποιο αναγωγικό μέσο) για την λήψη στοιχειακού (μεταλλικού-καθαρού) σιδήρου. Ο σίδηρος ήταν γνωστός στους ανθρώπους από την προϊστορική εποχή, με το πρώτο δείγμα που υπάρχει διαθέσιμο σε μουσείο να χρονολογείται περί το 3500-4000 π.Χ., ενώ γύρω στο 1500 π.Χ. εντοπίζονται τα πρώτα στοιχεία επεξεργασίας του σιδήρου σε μικρούς φούρνους. Εκείνη την εποχή, ξεκίνησε και η προσθήκη διαφόρων άλλων μετάλλων στους φούρνους, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κραμάτων σιδήρου, όπως ο χάλυβας. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνταν κυρίως για την κατασκευή εργαλείων (Ghosh & Chatterjee, 2008). Η παραγωγή σιδήρου και χάλυβα άρχισε να αυξάνεται κατά τη βιομηχανική επανάσταση του 1750 κι έπειτα, στην οποία τα μέταλλα αυτά είχαν σημαντικό ρόλο, καθώς χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή εξοπλισμού σε βιομηχανίες και σιδηροδρομικές γραμμές. Καθοριστική συμβολή σε αυτό είχαν δύο γεγονότα: πρώτον η χρήση ατμομηχανών στην επεξεργασία του σιδηρομεταλλεύματος και δεύτερον η ανακάλυψη μιας νέας τεχνικής παραγωγής χάλυβα από τον Henry Bessemer το 1856 (διεργασία Bessemer), που μειώνει τόσο τη θερμότητα όσο και το χρόνο που απαιτείται για τη μετατροπή του σιδήρου σε χάλυβα (Dutta & Chokshi, 2020). Η συγκεκριμένη διεργασία περιλαμβάνει την εισαγωγή αέρα σε ένα ειδικό δοχείο (μετατροπέα), το οποίο τροφοδοτείται με τηγμένο σίδηρο. Το οξυγόνο που περιέχεται στον αέρα αντιδρά με άλλα στοιχεία που περιέχονται στο μίγμα (πυρίτιο, άνθρακας κλπ.) και έτσι εκλύεται θερμότητα που διατηρεί το χάλυβα λιωμένο και έτοιμο για επεξεργασία, χωρίς την ανάγκη χρήσης εξωτερικού καυσίμου (πνευματική διεργασία). Η μέθοδος αυτή άνοιξε το δρόμο για τη μαζική παραγωγή χάλυβα, προσφέροντας οικονομικό πλεονέκτημα, και έδωσε τη δυνατότητα χρήσης του σε πιο σύνθετες κατασκευές (Ghosh & Chatterjee, 2008).

Η ανάπτυξη του κλάδου του χάλυβα κατά τα έτη 1900-2020 απεικονίζεται στο Σχήμα 4. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, η ετήσια παγκόσμια παραγωγή χάλυβα δεν ήταν παρά λίγοι εκατομμύρια τόνοι. Το 1927 η παραγωγή χάλυβα ανήλθε σε 100 εκατ. τόνους, ενώ το 1951 διπλασιάστηκε σε 200 εκατ. τόνους. Τα επόμενα 30 χρόνια από τη λήξη του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου, χαρακτηρίζονται ως μια περίοδος «νέας βιομηχανικής επανάστασης», κατά την οποία αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν διάφορες καινοτόμες

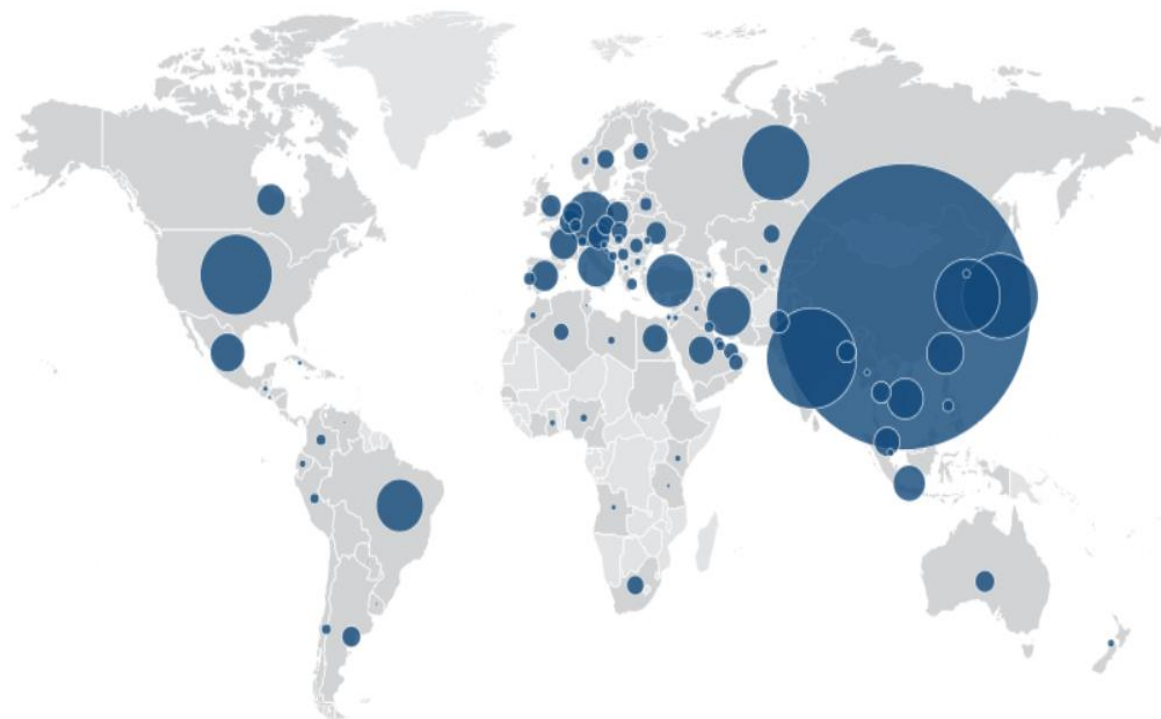
διεργασίες στη βιομηχανία. Χώρες όπως η Ιαπωνία, η Σοβιετική Ένωση, οι ΗΠΑ και η Νότια Κορέα, είχαν την πρωτοκαθεδρία στις νέες επενδύσεις. Η ετήσια παγκόσμια παραγωγή χάλυβα ξεπέρασε τους 700 εκατ. τόνους κατά τη δεκαετία του 1970, αγγίζοντας τους 749 εκατ. τόνους το 1979. Τα χρόνια που ακολούθησαν, η παραγωγή χάλυβα έμεινε στάσιμη, εξαιτίας της γενικότερης οικονομικής και πολιτικής αστάθειας που υπήρχε εκείνο το διάστημα. Γρήγορα, ωστόσο, η ανάπτυξη ήλθε πάλι στις αρχές της δεύτερης χιλιετίας, με την παραγωγή χάλυβα να φτάνει τους 850 εκατ. τόνους το 2000. Ύστερα ακολούθησε η είσοδος της Κίνας στη βιομηχανία χάλυβα, κάτι που είχε ως αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση της παραγωγής. Είναι χαρακτηριστικό ότι από τα επόμενα 20 χρόνια η παραγωγή χάλυβα υπερδιπλασιάστηκε, αγγίζοντας τους 2.000 εκατ. τόνους το 2020 (Holappa, 2020).



Σχήμα 4: Παγκόσμια παραγωγή χάλυβα τα έτη 1900-2020. Πηγή: Mateus, et al., 2022.

2.3 Παρούσα κατάσταση του κλάδου του χάλυβα

Η παραγωγή χάλυβα το 2022 ανήλθε στους 1.885 εκατ. τόνους, παρουσιάζοντας πτώση κατά 4% συγκριτικά με το προηγούμενο έτος. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 5, η Ασία είναι η ήπειρος με τη μεγαλύτερη παραγωγή χάλυβα, με την Κίνα, την Ινδία και την Ιαπωνία να βρίσκονται στις τρεις πρώτες θέσεις παγκοσμίως. Οι 10 χώρες με το υψηλότερο μερίδιο στον κλάδο παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.



Σχήμα 5: Παγκόσμιος χάρτης παραγωγής χάλυβα το 2022. Πηγή: World Steel Association, 2023.

Πίνακας 2.2: Παραγωγή χάλυβα ανά χώρα για το έτος 2022.

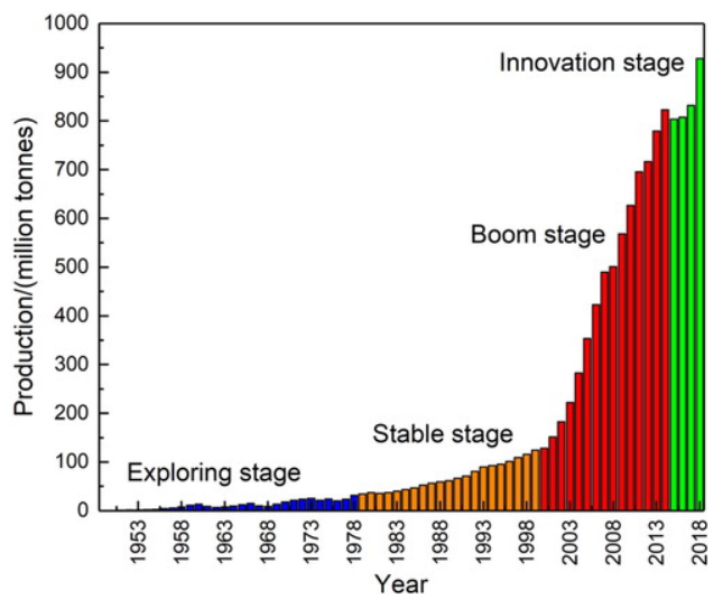
Χώρα	Παραγωγή χάλυβα (εκατ. τόνοι)	Μερίδιο (%)
Κίνα	1.017.959	53,98
Ινδία	125.377	7,73
Ιαπωνία	89.227	6,65
ΗΠΑ	80.535	4,27
Ρωσία	71.469	3,79
Νότια Κορέα	65.846	3,49
Γερμανία	36.849	1,95
Τουρκία	35.134	1,86
Βραζιλία	34.089	1,81
Ιράν	30.593	1,62
Υπολ. κόσμος	298.660	15,84
Σύνολο	1.885.738	100

Πηγή: World Steel Association, 2023.

2.3.1 Η περίπτωση της Κίνας

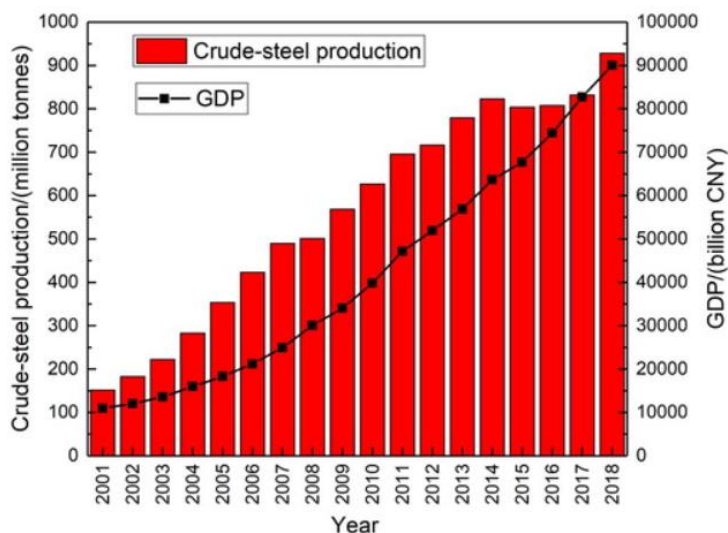
Το παράδειγμα της Κίνας αποτελεί μοναδικό φαινόμενο στην παγκόσμια αγορά χάλυβα. Η ανάπτυξη του κλάδου τα τελευταία 70 περίπου χρόνια, οδήγησε τη χώρα να έχει τη μεγαλύτερη παραγωγή παγκοσμίως, με μερίδιο αγοράς περισσότερο από 50% το 2022, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.2. Η παραγωγή χάλυβα στην Κίνα χωρίζεται σε 4 φάσεις (Σχήμα 6): διερεύνηση (exploring stage), σταθεροποίηση (stable stage), εκρηκτική ανάπτυξη (boom stage), καινοτομία (innovation stage). Κατά τη πρώτη φάση (1949-1978), η εγχώρια παραγωγή χαρακτηριζόταν από ιδιαίτερη αστάθεια, καθώς λάμβαναν χώρα διάφορες δοκιμές όσον αφορά τη χρήση και τη συντήρηση του εξοπλισμού, καθώς και τις διεργασίες παραγωγής. Το ίδιο διάστημα κατασκευάστηκαν και εγκαταστάθηκαν αρκετές χαλυβουργίες, ενώ ιδρύθηκαν και ινστιτούτα έρευνας και ανάπτυξης, τα οποία μελετούσαν νέες μεθόδους παραγωγής χάλυβα και δρούσαν ως ένα σχετικά πλήρες σύστημα R&D. Στη δεύτερη φάση της σταθεροποίησης (1978-2000), η συσσωρευμένη εμπειρία από τα προηγούμενα έτη, καθώς και η μετάβαση της Κίνας από οικονομία κεντρικής διαχείρισης (planned economy) σε οικονομία της αγοράς (market economy), έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην αύξηση της ζήτησης και στον τετραπλασιασμό της παραγωγής αυτό το διάστημα. Είναι χαρακτηριστικό ότι το 1996, η Κίνα έγινε η πρώτη χώρα σε παραγωγή χάλυβα παγκοσμίως. Κατά τη φάση της εκρηκτικής ανάπτυξης (2000-2014), παρατηρείται εκθετική αύξηση της παραγωγής χάλυβα. Καθοριστικό ρόλο σε αυτό έπαιξαν δύο πράγματα: πρώτον, η εισαγωγή της Κίνας στον Παγκόσμιο Οργανισμό Εμπορίου (World Trade Organization), η οποία οδήγησε σε μια χρυσή εποχή τη παγκόσμια χαλυβουργία, και δεύτερον η υιοθέτηση καινοτόμων πρακτικών, μεθόδων και διεργασιών παραγωγής, αλλά και συστημάτων διαχείρισης-βελτιστοποίησης στον τομέα της ενέργειας, των αποβλήτων και της κυκλικής οικονομίας. Στη φάση της καινοτομίας (2013-σήμερα), με την παραγωγή χάλυβα να έχει σταθεροποιηθεί και την Κίνα να έχει εδραιωθεί στην πρώτη θέση στον κλάδο παγκοσμίως, η χώρα έχει να αντιμετωπίσει αρκετές προκλήσεις. Συγκεκριμένα, να διαχειριστεί το πρόβλημα της πλεονάζουσας προσφοράς προϊόντος, κάτι που απαιτεί μακροπρόθεσμο κεντρικό σχεδιασμό, αλλά και τα σύγχρονα θέματα της βιώσιμης ανάπτυξης, της ορθής διαχείρισης των πόρων, της έξυπνης μετάβασης στη χρήση πληροφοριακών συστημάτων και τεχνητής νοημοσύνης, της ποιότητας στην παραγωγή κλπ (Hongbaio, et al., 2019). Σήμερα στη χώρα δραστηριοποιούνται περίπου 500 χαλυβουργικές βιομηχανίες, μεταξύ των οποίων η *China Baowu Group* (1^η παγκοσμίως ως προς τον όγκο παραγωγής), η *Ansteel Group* (3^η παγκοσμίως ως προς τον όγκο

παραγωγής) και η *HBIS Group* (6^η παγκοσμίως ως προς τον όγκο παραγωγής) (Statista, 2023).



Σχήμα 6: Φάσεις ανάπτυξης του κλάδου του χάλυβα στην Κίνα. Πηγή: Hongbaio, et al., 2019.

Στο Σχήμα 7 απεικονίζεται η σύνδεση της παραγωγής χάλυβα με την αύξηση του κινεζικού ΑΕΠ και την ανάπτυξη της εγχώριας οικονομίας γενικότερα.

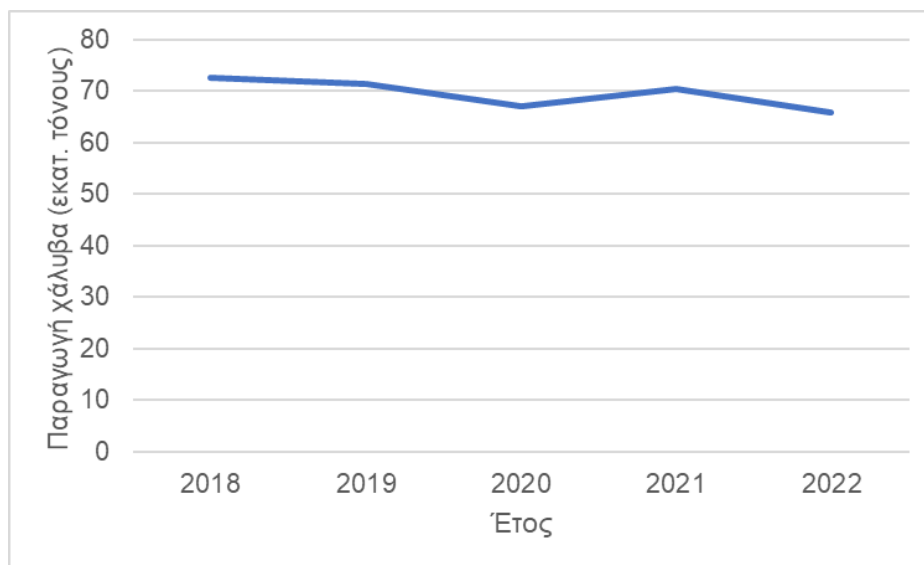


Σχήμα 7: Σχέση παραγωγής χάλυβα και κινεζικού ΑΕΠ. Πηγή: Hongbaio, et al., 2019.

2.3.2 Η περίπτωση της Νότιας Κορέας

Η Νότια Κορέα παρήγαγε 65,8 εκατομμύρια τόνους ακατέργαστου χάλυβα, κάτι που την κατατάσσει στην έκτη θέση παγκοσμίως. Παρά το γεγονός ότι δε διαθέτει φυσικό ορυκτό πλούτο, όπως ορυχεία σιδήρου, η βιομηχανία χάλυβα βρίσκεται σε άνθιση τα τελευταία χρόνια. Η μαζική παραγωγή στη χώρα ξεκίνησε το 1970. Καθοριστικό ρόλο στην

ανάπτυξη της χαλυβουργίας στη χώρα, τόσο από άποψη ποσότητας όσο και ποιότητας παραγωγής, έπαιξε η υιοθέτηση νέων τεχνολογιών από την Ιαπωνία. Έτσι, σε συνδυασμό με το χαμηλό εργατικό κόστος, απέκτησε ανταγωνιστικό πλεονέκτημα και κατάφερε να βρίσκεται, ως προς τη χαλυβουργία, στο ίδιο επίπεδο ή ακόμα και ψηλότερα με χώρες όπως οι ΗΠΑ και η Ρωσία (Won & Choi, 2003). Στο Σχήμα 8 απεικονίζεται η ετήσια παραγωγή χάλυβα της Νότιας Κορέας για τα τελευταία 5 χρόνια.



Σχήμα 8: Ετήσια παραγωγή χάλυβα στη Νότια Κορέα. Πηγή: KOSA, 2023.

Η χαλυβουργία χαρακτηρίζεται ως η βιομηχανία-κλειδί της χώρας, καθώς είναι καθοριστική για την οικονομική της ανάπτυξη, ενώ έχει υψηλή επιρροή και σε άλλες βιομηχανίες, τις οποίες τροφοδοτεί με πρώτες ύλες, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η ναυπηγική βιομηχανία και οι κατασκευές. Είναι ενδεικτικό ότι το ΑΕΠ της χαλυβουργίας αποτελεί το 1,5% του συνολικού βιομηχανικού κλάδου και το 4,5% του κλάδου των κατασκευών. Η συνολική συνεισφορά της βιομηχανίας χάλυβα στην οικονομία της Νότιας Κορέας παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Συνεισφορά (%) της χαλυβουργίας στην οικονομία της Ν. Κορέας.

Μέγεθος	1995	2000	2005	2010	2016
ΑΕΠ	2,0	1,7	2,1	2,2	1,5
Εξαγωγές	4,4	4,1	5,1	6,0	4,9
Εργασία (χιλιάδες)	2,1 (79)	2,8 (94)	2,4 (81)	2,7 (92)	2,6

Πηγή: KOSA, 2023.

Το γεγονός ότι η χώρα δε διαθέτει δικό της ορυκτό πλούτο, έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή πρώτων υλών από το εξωτερικό. Για το 2021, οι εισαγωγές στον κλάδο

σιδήρου-χάλυβα ανήλθαν σε αξία στα 18,1 δισ. δολάρια, κάνοντας την Νότια Κορέα τον έκτο μεγαλύτερο εισαγωγέα παγκοσμίως. Η προέλευση των πρώτων υλών είναι κυρίως από την Κίνα, την Ιαπωνία, την Ινδονησία και την Ρωσία. Ωστόσο, αρκετά υψηλότερες είναι οι εξαγωγές χάλυβα, οι οποίες κατά το ίδιο έτος έφτασαν τα 28 δισ., μετατρέποντας σε θετικό το εμπορικό ισοζύγιο της χώρας και οδηγώντας τη στην πέμπτη θέση των μεγαλύτερων εξαγωγών χάλυβα στον κόσμο. Οι κυριότεροι προορισμοί των εξαγωγικών προϊόντων είναι η Κίνα, η Ιαπωνία, η Ινδία, το Μεξικό και οι ΗΠΑ (OEC, 2023).

Η ανάπτυξη της χαλυβουργίας στη Νότια Κορέα έχει ως αποτέλεσμα τη δραστηριοποίηση μιας πληθώρας εταιριών γύρω από αυτή, μεταξύ των οποίων η ηγέτιδα στη χώρα και έβδομη παγκοσμίως ως προς τον όγκο παραγωγής η *POSCO* (Pohang Iron and Steel Company). Στην κατάταξη ακολουθούν, η *Hyundai Steel Company* και η *Dongkuk Steel Mill*, οι οποίες είναι εταιρίες με μικρότερο παγκόσμιο εκτόπισμα, αλλά σημαντική συνεισφορά στην οικονομία της χώρας (Statista, 2023).

2.3.3 Η περίπτωση της Ελλάδας

Στη χώρα μας, η παραγωγή χάλυβα το 2022 ανήλθε σε 1.543 χιλιάδες τόνους, βρισκόμενη αρκετά χαμηλά και συγκεκριμένα στη 48^η θέση στη λίστα με τις χώρες που έχουν την μεγαλύτερη παραγωγή παγκοσμίως (World Steel Association, 2023). Είναι χαρακτηριστικό πως ύστερα από τη χρεοκοπία της Χαλυβουργικής, στην Ελλάδα δραστηριοποιούνται μόνο δύο βιομηχανίες παραγωγής χάλυβα, η *ΣΙΔΕΝΟΡ Βιομηχανική Χάλυβα ΑΕ* και η *Χαλυβουργία Ελλάδος ΑΕ*.

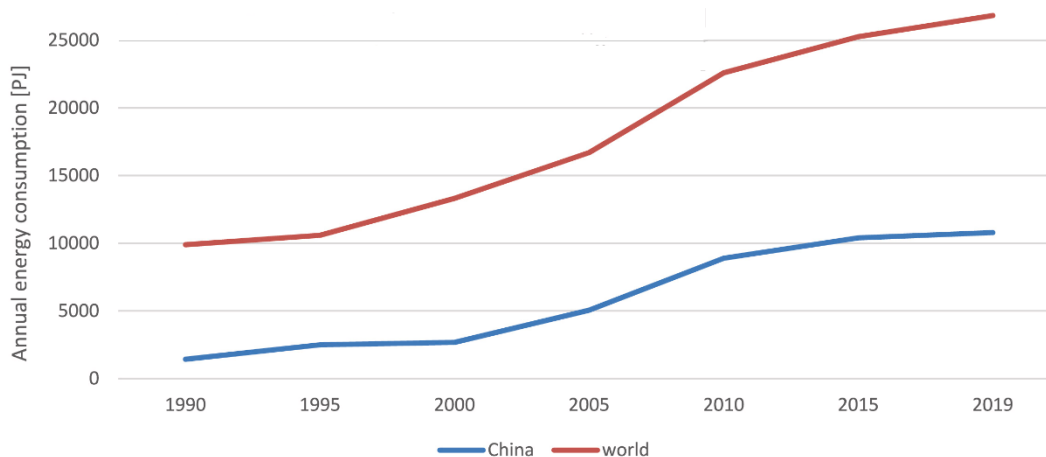
Η *ΣΙΔΕΝΟΡ* είναι μέλος του ομίλου *ΒΙΟΧΑΛΚΟ* και αποτελεί τη μεγαλύτερη ελληνική βιομηχανία παραγωγής, μεταποίησης και πώλησης προϊόντων χάλυβα. Ιδρύθηκε το 1962 και σήμερα συνιστά έναν καθετοποιημένο όμιλο εταιριών, με θυγατρικές εταιρίες που δραστηριοποιούνται στην Ελλάδα και στο εξωτερικό, σε χώρες όπως η Βουλγαρία, η Βόρεια Μακεδονία, η Σερβία κλπ. Ο κύκλος εργασιών της εταιρίας για την οικονομική χρήση του 2022 ανήλθε σε περίπου 647 εκατομμύρια ευρώ, παρουσιάζοντας αύξηση 44% συγκριτικά με το προηγούμενο έτος. Αξίζει επίσης να αναφερθεί το επενδυτικό πρόγραμμα της εταιρίας σε παραγωγικές εγκαταστάσεις, το οποίο την περίοδο 1998-2018 άγγιξε το 1 δισ. ευρώ (ΣΙΔΕΝΟΡ, 2023).

Από την άλλη μεριά, η *Χαλυβουργία Ελλάδος* είναι η παλαιότερη βιομηχανία χάλυβα στη χώρα, καθώς ξεκίνησε την παραγωγική της δραστηριότητα το 1938, όταν ιδρύθηκε ως *Ελληνική Χαλυβουργία*. Είναι χαρακτηριστικό ότι χρησιμοποιώντας πρώτες ύλες της εταιρίας ανεγέρθηκε το οχυρό Ρούπελ στη Μακεδονία. Μερικά χρόνια αργότερα και

συγκεκριμένα το 1963 ιδρύθηκε η *Χαλυβουργία Βόλου*, η οποία ύστερα μετονομάστηκε σε *Χαλυβουργία Θεσσαλίας*. Η βιομηχανία μπήκε γρήγορα σε σταθερή τροχιά ανάπτυξης, συμμετέχοντας σε μεγάλα έργα υποδομής, όπως η κατασκευή της γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου. Το 2006, η δύο εταιρίας ένωσαν τις δυνάμεις τους και από τη συγχώνευση προέκυψε η *Χαλυβουργία Ελλάδος*. Παρά τα οικονομικά προβλήματα που αντιμετώπισε κατά την περίοδο της κρίσης στη χώρα μας, από το 2008 κι έπειτα, το 2021 κατάφερε να έρθει σε συμφωνία εξυγίανσης με τους πιστωτές της, κάτι που άνοιξε το δρόμο της επιστροφής της βιομηχανίας στην ανάπτυξη. Μάλιστα, ο κύκλος εργασιών της εταιρίας για την οικονομική χρήση του 2021, ανήλθε σε περίπου 284 εκατομμύρια ευρώ, παρουσιάζοντας αύξηση κατά 54% σε σχέση με το προηγούμενο έτος (Χαλυβουργία Ελλάδος, 2023).

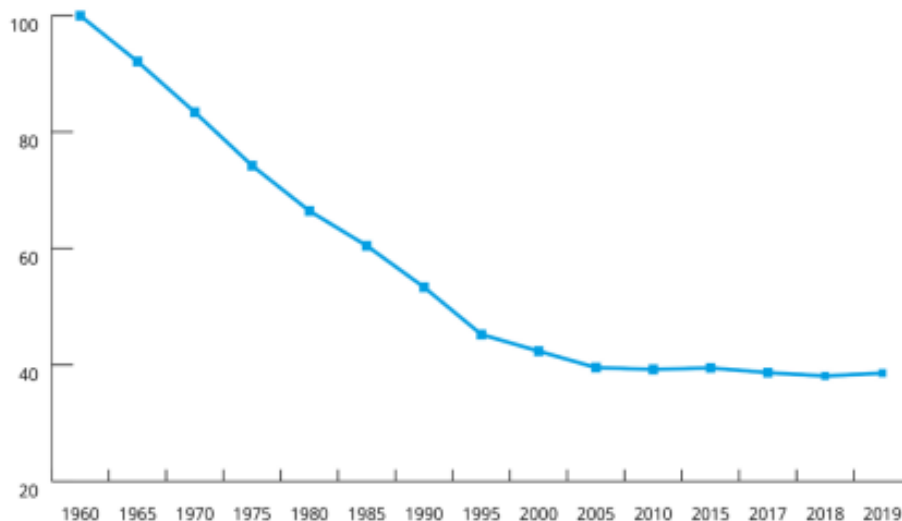
2.4 Χρήση ενέργειας στη βιομηχανία χάλυβα

Η βιομηχανία του σιδήρου και του χάλυβα είναι μια από τις περισσότερο ενεργοβόρες βαριές βιομηχανίες. Είναι χαρακτηριστικό ότι καταναλώνει περίπου το 8% της ενέργειας που παράγεται παγκοσμίως, ενώ ευθύνεται για το 7% των εκπομπών CO₂ της βιομηχανίας ενέργειας (Zhang, et al., 2022). Το ενεργειακό κόστος έχει υψηλό μερίδιο στο συνολικό κόστος παραγωγής χάλυβα, καταλαμβάνοντας ένα ποσοστό μεταξύ 20-40%. Γενικά, στη χαλυβουργία, η κατανάλωση ενέργειας είναι συνάρτηση του όγκου παραγωγής, του είδους των παραγόμενων προϊόντων, της χρησιμοποιούμενης μεθόδου παραγωγής (BF-BOF ή EAF), του είδους και της ποιότητας των πρώτων υλών, του συστήματος ελέγχου της διεργασίας, αλλά και της απόδοσης της βιομηχανικής μονάδας. Επιπλέον, ενέργεια καταναλώνεται και στις έμμεσες διεργασίες, όπως η εξόρυξη, η μεταφορά και η προετοιμασία των σιδηρομεταλλευμάτων. Στη BF-BOF διεργασία, αυτό το έμμεσο κόστος αποτελεί το 9% του συνολικού, ενώ στην EAF το 6% (World Steel Association, 2021). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 9, η ενέργεια που καταναλώνεται στο συγκεκριμένο βιομηχανικό κλάδο έχει σχεδόν τριπλασιαστεί τα τελευταία 30 χρόνια (Zhang, et al., 2022).



Σχήμα 9: Κατανάλωση ενέργειας στη βιομηχανία σιδήρου και χάλυβα. Πηγή: Zhang, et al., 2022.

Ωστόσο, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 10, η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή ενός τόνου ακατέργαστου χάλυβα έχει μειωθεί κατά 60% από το 1960. Αυτό οφείλεται στην εξέλιξη της τεχνολογίας και στη δημιουργία ενεργειακά αποδοτικότερου εξοπλισμού (καυστήρες, αντλίες κλπ.), αλλά και στην ανάπτυξη εξελιγμένων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας που περιλαμβάνουν την ανάκτηση και της ενέργειας που παράγεται μέσα στη βιομηχανία (πχ χρήση των -υψηλής θερμοκρασίας- ρευμάτων απαερίων ως μέσο θέρμανσης στους εναλλάκτες θερμότητας) (World Steel Association, 2021).

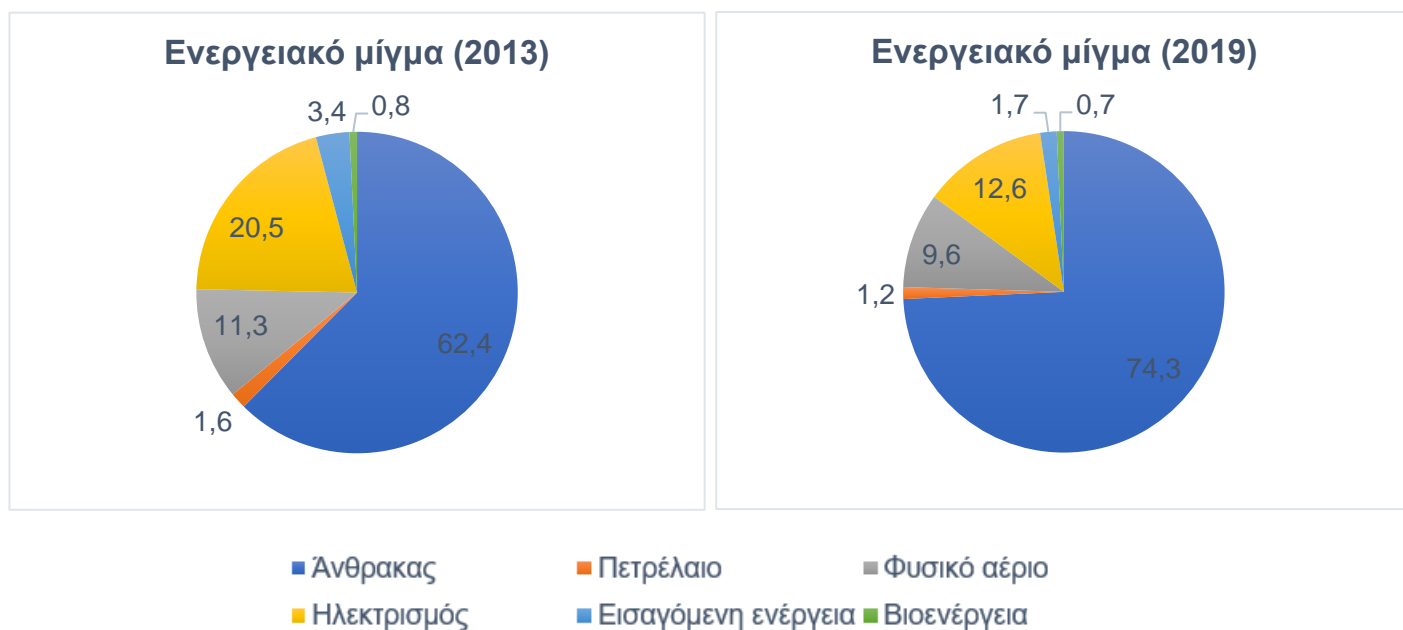


Σχήμα 10: Δείκτης παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας ανά τόνο παραγωγής ακατέργαστου χάλυβα. Πηγή: World Steel Association, 2021.

2.4.1 Χρησιμοποιούμενα καύσιμα

Στη χαλυβουργία, η παραγωγή λαμβάνει χώρα με τη χρήση 6 διαφορετικών πηγών ενέργειας: άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ηλεκτρισμός, εισαγόμενη ενέργεια,

βιοενέργεια. Το ποσοστό χρήσης κάθε πηγής για τα έτη 2013 και 2019 απεικονίζεται στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11: Συγκριτική απεικόνιση των πηγών παραγωγής ενέργειας στη βιομηχανία χάλυβα το 2013 και το 2019. Πηγή: IEA, 2020; He & Wang, 2017.

Προκύπτει λοιπόν πως ο άνθρακας είναι, δυστυχώς, με διαφορά το πιο χρησιμοποιούμενο καύσιμο στην παγκόσμια χάλυβουργία με ποσοστό 74,3%, στη δεύτερη θέση βρίσκεται ο ηλεκτρισμός με ποσοστό 12,6% και ακολουθεί το φυσικό αέριο με ποσοστό 9,6%. Στις τρεις τελευταίες θέσεις με πολύ μικρότερα ποσοστά βρίσκονται η εισαγόμενη ενέργεια, το πετρέλαιο και η βιοενέργεια αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω δεδομένα, προκύπτει ότι υπάρχει αύξηση στο ποσοστό του άνθρακα στο μίγμα ενέργειας κατά 11,9%. Το αντίθετο συμβαίνει με τη συμμετοχή της ηλεκτρικής ενέργειας και του φυσικού αερίου, τα ποσοστά των οποίων μειώθηκαν κατά 7,9 % και 1,7% αντίστοιχα. Η άνοδος στη χρήση άνθρακα οφείλεται στην ανάγκη κάλυψης της υψηλής ζήτησης χάλυβα, καθώς πρόκειται για φθηνό καύσιμο με σταθερή δυναμικότητα και σχετικά μεγάλη διαθεσιμότητα (FIMI, 2023). Επίσης, η αύξηση του ποσοστού της ηλεκτρικής ενέργειας οφείλεται στην ολοένα και αυξανόμενη τάση χρήσης της παραγωγής χάλυβα μέσω EAF τα τελευταία χρόνια, της οποίας η βασική πηγή ενέργειας είναι ο ηλεκτρισμός, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 2.5 (Yang, et al., 2021). Η χρήση των υπολοίπων πηγών ενέργειας παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη. Παρατηρείται, επίσης από το Σχήμα 10, ότι συνολικά, το 2013 καταναλώθηκαν περίπου 24.000 PJ στη συγκεκριμένη βιομηχανία, όταν το 2019 το αντίστοιχο ποσό ανήλθε στα

26000 PJ. Δηλαδή, μέσα σε ένα διάστημα 6 ετών, η ποσότητα ενέργειας που χρησιμοποιείται στον κλάδο παρουσίασε μια μικρή αύξηση της τάξης του 10%.

Η συμβολή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στη χαλυβουργία προκύπτει ως μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται με βιώσιμο τρόπο (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, βιομάζα κλπ.). Ωστόσο, είναι δύσκολο να υπολογιστεί το ακριβές ποσοστό των ΑΠΕ στη βιομηχανία χάλυβα, καθώς η συμμετοχή τους παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις ανάλογα με τη χώρα και τη μέθοδο παραγωγής που χρησιμοποιεί η εκάστοτε εταιρία. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται στο 12,6% για το έτος 2018, όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 11, εύκολα, πάντως, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η συμμετοχή των ΑΠΕ είναι αρκετά χαμηλότερη. Συνεπώς, υπάρχουν πολλές επιπλέον δυνατότητες περαιτέρω ενσωμάτωσής τους στο ήδη χρησιμοποιούμενο μίγμα ενέργειας. Είναι χαρακτηριστικό πως μέσα στο 2023 θα τεθούν σε λειτουργία τα πρώτα πάρκα παραγωγής ΑΠΕ, τα οποία θα είναι άμεσα συνδεδεμένα με τις βιομηχανίες χάλυβα (World Steel Association, 2022).

2.4.2 Ενεργειακή κατανάλωση ανά διεργασία

Παρακάτω παρουσιάζεται η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται από τις κυριότερες διεργασίες παραγωγής χάλυβα (Πίνακας 2.4), ο καταμερισμός της κατανάλωσης κάθε τύπου καυσίμου στις μεθόδους παραγωγής BF-BOF και EAF (Πίνακας 2.5), καθώς και ο τρόπος χρήσης των ενεργειακών πηγών αυτών στο συγκεκριμένο βιομηχανικό κλάδο (Πίνακας 2.6).

Πίνακας 2.4: Κατανάλωση ενέργειας ανά διεργασία.

Διεργασία	Κατανάλωση Ενέργειας (GJ/t ακατέργαστου χάλυβα)
Υψικάμινος (BF)	10-13
Πυροσυσσωμάτωση (sintering)	2-3
Παρασκευή κωκ	0,75-2
Ελασματοποίηση χάλυβα	1,5-3
Παραγωγή σπογγοσιδήρου (DRI) με χρήση φυσικού αερίου	12
Κλίβανος ηλεκτρικού τόξου (EAF)	1-1,5

Πηγή: He & Wang, 2017.

Πίνακας 2.5: Ποσοστά χρήσης πηγών ενέργειας ανά διεργασία παραγωγής χάλυβα.

Πηγή Ενέργειας	BF-BOF	EAF
Άνθρακας	89%	11%
Ηλεκτρισμός	7%	50%
Φυσικό Αέριο	1%	38%
Άλλες Πηγές	1%	1%

Πηγή: World Steel Association, 2021.

Πίνακας 2.6: Χρήσεις ενεργειακών πηγών στη χαλυβουργία.

Πηγή Ενέργειας	Χρήση
Άνθρακας	Υψικάμινος, πυροσυσσωμάτωση (sintering), οπτανθρακοποίηση
Ηλεκτρισμός	Κλίβανος ηλεκτρικού τόξου (EAF), ελασματοουργεία, κινητήρες
Φυσικό Αέριο	Φούρνοι, γεννήτριες
Πετρέλαιο	Παραγωγή ατμού, αντλίες

Πηγή: World Steel Association, 2021.

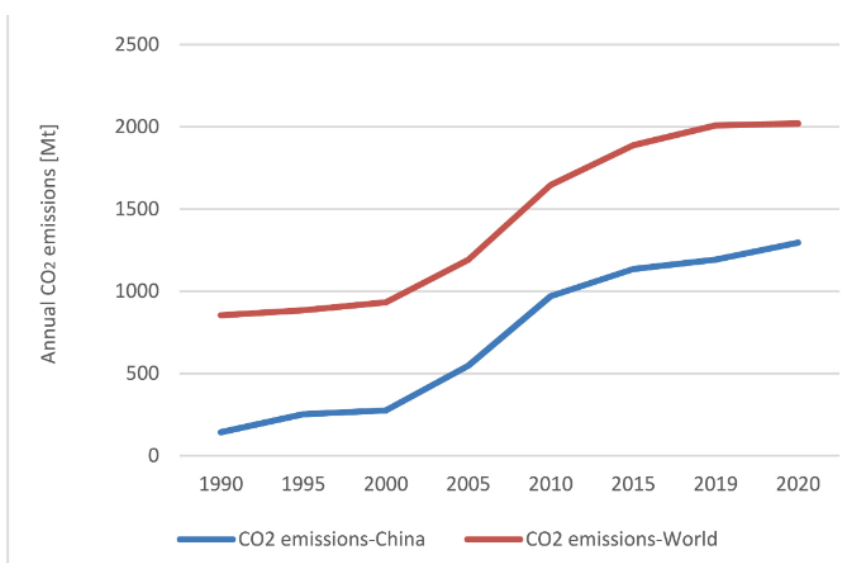
Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μέθοδος παραγωγής EAF είναι λιγότερο ενεργοβόρα, διότι όπως παρατηρείται, η ενέργεια που απαιτεί ο κλίβανος ηλεκτρικού τόξου είναι περίπου 10 φορές χαμηλότερη από την ενέργεια που απαιτεί η υψικάμινος. Επιπλέον, η παραγωγή χάλυβα μέσω EAF έχει χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα συγκριτικά με την παραγωγή με BF-BOF, καθώς στο ενεργειακό μίγμα συμμετέχει σε μικρότερο ποσοστό ο άνθρακας, ενώ είναι μεγαλύτερη η συμβολή ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου. Η φύση της EAF επιτρέπει την ευκολότερη διεύθυνση των ΑΠΕ στη συγκεκριμένη διεργασία. Ο φιλικότερος προς το περιβάλλον χαρακτήρας της EAF αποδεικνύεται και από το γεγονός πως ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται παλαιοσίδηρος, δηλαδή ανακυκλώσιμο υλικό και όχι νέο σιδηρομετάλλευμα, η εξόρυξη του οποίου έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

2.5 Εκπομπές CO₂ στη βιομηχανία του χάλυβα

Η βιομηχανία σιδήρου και χάλυβα είναι μια από τις μεγαλύτερες πηγές ρύπανσης της ατμόσφαιρας. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών στη χαλυβουργία λαμβάνει χώρα σε μεγάλο βαθμό από ορυκτά καύσιμα, με κυριότερο τον άνθρακα. Η καύση ορυκτών καυσίμων έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση μεγάλων

ποσοτήτων CO₂ στο εξωτερικό περιβάλλον. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο συγκεκριμένος κλάδος ευθύνεται για το 25% των απευθείας εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου της παγκόσμιας βιομηχανίας (Ren, et al., 2021).

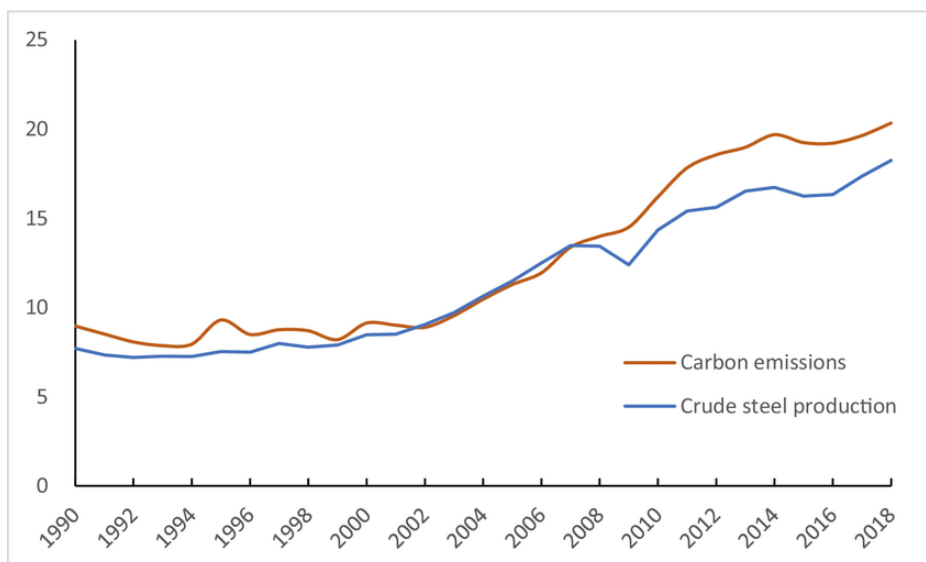
Τα αέρια του θερμοκηπίου, με κυριότερο το CO₂, είναι υπεύθυνα για την κλιματική αλλαγή και την υπερθέρμανση του πλανήτη. Μάλιστα, αν δεν αλλάξει κάτι δραστικά και συνεχιστεί η εκπομπή αερίων με τον ίδιο ρυθμό, τότε προβλέπεται αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας κατά 3-5 °C έως το 2100 (Holappa, 2020). Στο Σχήμα 12 παρουσιάζονται οι εκπομπές CO₂ σε παγκόσμια κλίμακα κατά τα τελευταία 30 περίπου χρόνια.



Σχήμα 12: Παγκόσμιες εκπομπές CO₂ τα έτη 1990-2020. Πηγή: Zhang, et al., 2022.

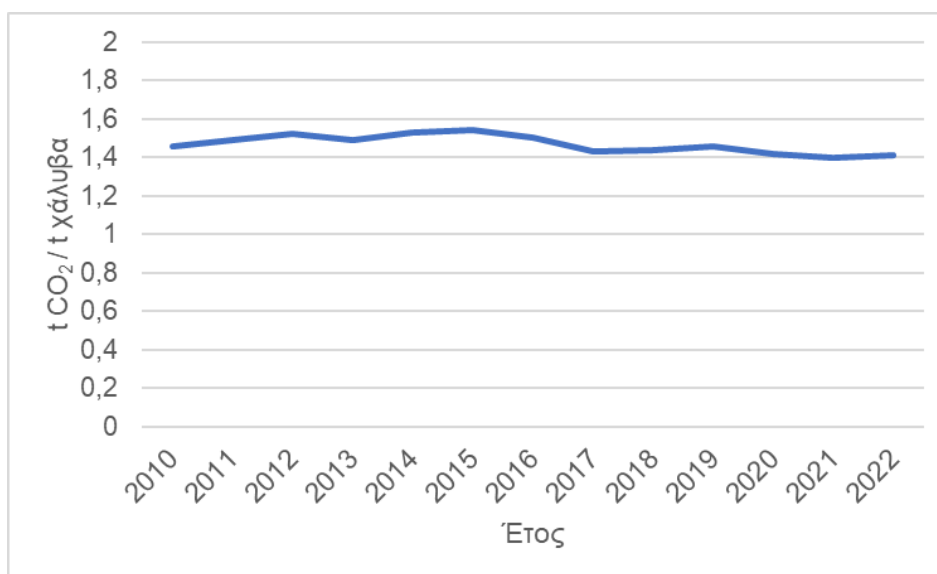
Είναι εμφανές ότι οι παραγόμενοι τόνοι του συγκεκριμένου αερίου έχουν υπερδιπλασιαστεί και μόνο τα τελευταία 2 χρόνια εμφανίζουν μια σταθεροποιητική τάση. Ο άνθρακας είναι ο βασικός υπεύθυνος για αυτές τις εκπομπές CO₂, καθώς το 65% αυτών, το 2019, προήλθαν από τη χρήση του συγκεκριμένου καυσίμου. Το αντίστοιχο ποσοστό το 1990 ανέρχεται σε 54%, κάτι που καθιστά σαφές την αύξηση της χρήσης άνθρακα για παραγωγή ενέργειας (Zhang, et al., 2022).

Στον κλάδο του χάλυβα, υπάρχει υψηλή συσχέτιση μεταξύ της παραγωγής χάλυβα και των εκπομπών CO₂ από τη συγκεκριμένη βιομηχανία, όπως προκύπτει από το Σχήμα 13, καθώς αύξηση του ενός μεγέθους οδηγεί σε αύξηση του άλλου, και το αντίστροφο. Είναι χαρακτηριστικό επίσης πως και οι δύο καμπύλες ακολουθούν αυξητική τάση, καθώς και ότι η χαλυβουργία βρίσκεται υπό μεγάλη πίεση για την επίτευξη της ανθρακικής ουδετερότητας (Shao, et al., 2022).



Σχήμα 13: Σχέση μεταξύ εκπομπών CO₂ και παραγωγής χάλυβα. Πηγή: Shao, et al., 2022.

Σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (International Energy Agency-IEA), η αύξηση των συνολικών εκπομπών CO₂ στη βιομηχανία σιδήρου-χάλυβα την τελευταία δεκαετία, οφείλεται στην ανάγκη κάλυψης της ολοένα και αυξανόμενης ζήτησης για χάλυβα. Άλλωστε, εξετάζοντας τις εκπομπές CO₂ ανά τόνο παραγόμενου χάλυβα (Σχήμα 14), διαπιστώνεται ότι παραμένουν πρακτικά σταθερές. Έτσι, ο μόνος τρόπος μείωσης των συνολικών εκπομπών του κλάδου είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των διεργασιών που συμμετέχουν στην παραγωγή, καθώς και η υιοθέτηση πηγών ενέργειας με χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα (IEA, 2023).



Σχήμα 14: Εκπεμπόμενο CO₂ ανά παραγόμενο τόνο χάλυβα. Πηγή: IEA, 2023.

2.6 Δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης του αποτυπώματος άνθρακα

Σε παγκόσμια κλίμακα, η βιομηχανία σιδήρου-χάλυβα έχει επιτύχει σημαντική αύξηση της ενεργειακής απόδοσης τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Είναι χαρακτηριστικό πως όλες οι χώρες που δραστηριοποιούνται στον κλάδο έχουν αυξήσει την ενεργειακή τους απόδοση. Ωστόσο, ο συνολικός μέσος όρος δεν έχει φτάσει ακόμα σε τέτοιο επίπεδο ώστε η κατανάλωση ενέργειας να είναι βιώσιμη. Υπάρχουν πολλές δυνατότητες μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας στη χαλυβουργία, διατηρώντας ταυτόχρονα ίδια ή ακόμα και αυξάνοντας την παραγωγικότητα. Σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας, υπάρχει δυνατότητα μείωσης της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης κατά 5,4 EJ, κάτι που αντιστοιχεί στο 20% περίπου της κατανάλωσης ενέργειας του κλάδου, εφαρμόζοντας την καλύτερη διαθέσιμη τεχνολογία (Best Available Technology-BAT) (He & Wang, 2017). Στον Πίνακα 2.7 παρουσιάζεται η δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας των σημαντικότερων παραγωγών χάλυβα.

Πίνακας 2.7: Δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας στη χαλυβουργία.

Περιοχή	Δυνατότητα Εξοικονόμησης Ενέργειας (GJ/t ακατέργαστου χάλυβα)
Ιαπωνία	1
Ευρώπη	1,6
ΗΠΑ	2,3
Κίνα	6,4
Παγκόσμια	4,4

Πηγή: He & Wang, 2017.

Όσον αφορά το ενεργειακό αποτύπωμα του κλάδου, αυτό αυξάνεται συνεχώς, όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 13. Επίσης, παρά τις προσπάθειες, το εκπεμπόμενο CO₂ ανά τόνο ακατέργαστου χάλυβα παραμένει σταθερό την τελευταία δεκαετία (Σχήμα 14). Η ενεργειακή απόδοση είναι στενά συνδεδεμένη με το αποτύπωμα άνθρακα, καθώς αύξησή της σημαίνει λιγότερη κατανάλωση καυσίμων άρα και λιγότερες εκπομπές CO₂ (Hassan, et al., 2022). Παρακάτω αναλύονται οι σημαντικότεροι τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος στη χαλυβουργία.

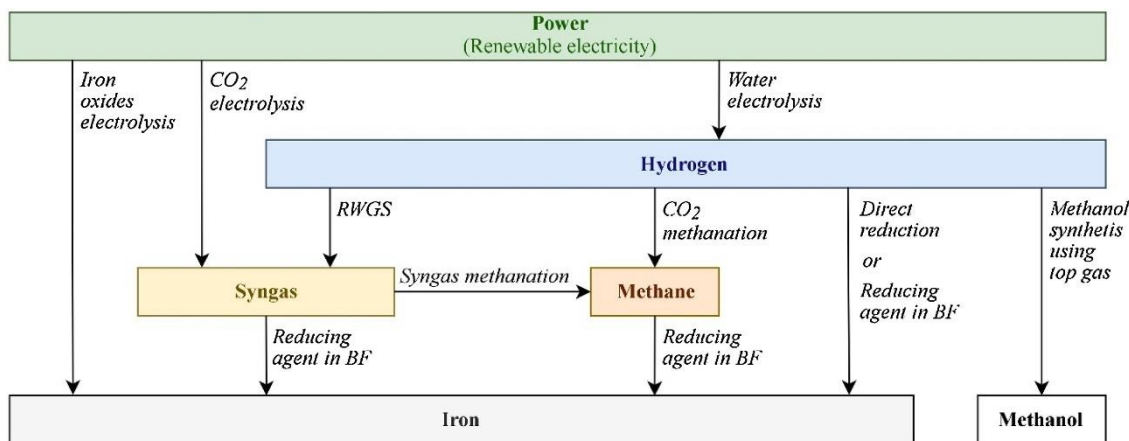
2.6.1 Αύξηση ενεργειακής απόδοσης

Η ενεργειακή απόδοση δύναται να αυξηθεί με την υιοθέτηση σύγχρονων τεχνολογιών που καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια κατά τη λειτουργία τους. Όπως αναφέρθηκε στον

Πίνακα 2.4, η περισσότερη ενέργεια στη χαλυβουργία καταναλώνεται από την υψικάμινο, όπου το σιδηρομετάλλευμα ανάγεται και μετατρέπεται σε θερμό υγρό. Οι ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες εστιάζουν στη μείωση του καταναλωμένου καυσίμου με πρακτικές όπως έγχυση πετρελαίου/φυσικού αερίου, η προθέρμανση της πρώτης ύλης κλπ. Επίσης, άλλες τεχνολογίες έχουν ως στόχο την ανάκτηση της θερμότητας των καυσαερίων και την επαναχρησιμοποίηση των υπολειμμάτων σιδήρου. Όσον αφορά τις διεργασίες της πυροσυσσωμάτωσης και της παρασκευής κωκ, εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί μέσω αύξησης του μήκους της κλίνης της πυροσυσσωμάτωσης και μείωσης των διαρροών αέρα, καθώς και μέσω μείωσης της απαιτούμενης θερμότητας-ατμού από ανακύκλωση των θερμών ρευμάτων. Τέλος, αν και ο κλίβανος ηλεκτρικού τόξου (EAF) είναι η τεχνολογία με το χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, εντούτοις υπάρχουν δυνατότητες περαιτέρω αύξησης της ενεργειακής της απόδοσης με μετασχηματιστές εξαιρετικά υψηλής ισχύος, ταυτόχρονη εμφύσηση οξυγόνου, χρήση εκκεντρικού πυθμένα κλιβάνου κλπ. (Holappa, 2020).

2.6.2 Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ)

Η εισαγωγή των ΑΠΕ σε βιομηχανικές διεργασίες είναι σημαντική για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Απαιτείται, όμως, δραματική αύξηση των υποδομών που συλλέγουν την ηλιακή, αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια (Flores-Granobles & Saeys, 2020). Ενέργεια, επίσης, μπορεί να παραχθεί και από βιομάζα, η οποία είτε χρησιμοποιείται απευθείας ως εναλλακτικό καύσιμο είτε μετατρέπεται, μετά από κατάλληλη επεξεργασία, σε βιοκαύσιμα (βιοαέριο, βιοντίζελ κλπ.) (Hoffmann, et al., 2020). Στο πλαίσιο αυτό, το σχέδιο *Power-to-X* (PtX concept) περιλαμβάνει όλες εκείνες τις διεργασίες που μετατρέπουν τον ηλεκτρισμό προερχόμενο από ΑΠΕ σε προϊόντα με αξία. Στο Σχήμα 15 απεικονίζονται οι τρόποι χρήσης της ενέργειας από ΑΠΕ στη βιομηχανία σιδήρου-χάλυβα.



Σχήμα 15: Μονοπάτια εκμετάλλευσης των ΑΠΕ στη βιομηχανία σιδήρου-χάλυβα. Πηγή: Bailera, et al., 2021.

Η ενέργεια από ΑΠΕ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απευθείας ηλεκτρόλυση των οξειδίων του σιδήρου με στόχο την παραγωγή σιδήρου στην υψικάμινο, είτε να αποτελέσει το μέσο για την παραγωγή εναλλακτικών καυσίμων, όπως υδρογόνο (H_2) και αέριο σύνθεσης (syngas), τα οποία μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στην υψικάμινο. Επιπλέον, από το υδρογόνο είναι δυνατό να παραχθεί «πράσινο» μεθάνιο, καθώς και μεθανόλη, η οποία προκύπτει από την αντίδραση του υδρογόνου με τα απαέρια της υψικάμινου. Βασικός στόχος όλων αυτών των διεργασιών είναι η μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και των εκπομπών καυσαερίων, ταυτόχρονα (Bailera, et al., 2021).

2.6.3 Εισαγωγή Υδρογόνου (H_2)

Η βασική αρχή της χρήσης υδρογόνου στη βιομηχανία χάλυβα είναι η αντικατάσταση του άνθρακα ως αναγωγικό μέσο κατά την παραγωγή σιδήρου. Πρόκειται για μια από τις αποτελεσματικότερες τεχνολογίες μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στο συγκεκριμένο κλάδο, ενώ πιστεύεται ακόμα ότι η χρήση υδρογόνου μπορεί ακόμα και να τις εξαλείψει (Ren, et al., 2021). Είναι χαρακτηριστικό ότι σε παγκόσμιο επίπεδο το υδρογόνο θα μπορούσε να μειώσει τις εκπομπές CO_2 κατά 2,3 Gt/έτος. Ωστόσο, ο βαθμός ελάττωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, εξαρτάται από τον τρόπο παραγωγής του υδρογόνου. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί μέσω ηλεκτρόλυσης (πράσινο υδρογόνο), λαμβάνοντας την απαραίτητη ενέργεια από ΑΠΕ, αλλά και μέσω αναμόρφωσης του φυσικού αερίου και αεριοποίηση άνθρακα (μπλε/γκρι υδρογόνο).

Το υδρογόνο χρησιμοποιείται στην παραγωγή σιδήρου με δύο κυρίως τρόπους. Ο πρώτος είναι η απευθείας αναγωγή του σιδηρομεταλλεύματος (DRI-μερική ή ολική χρήση υδρογόνου), από την οποία προκύπτει σπογγοσίδηρος. Ο δεύτερος τρόπος περιλαμβάνει

την απευθείας εισαγωγή υδρογόνου στην υψικάμινο, με αποτέλεσμα το σχηματισμό λιωμένου ακατέργαστου σιδήρου, με υψηλότερο περιεχόμενο άνθρακα (Bailera, et al., 2021). Αν και μέχρι σήμερα, σε βιομηχανική χρήση στον κλάδο σιδήρου-χάλυβα υπάρχουν μονάδες που παράγουν υδρογόνο μόνο από ορυκτά καύσιμα (συνήθως μέσω αναμόρφωσης του φυσικού αερίου), πολλές χώρες, όπως η Σουηδία, η Αυστρία και η Ιαπωνία, ερευνούν εδώ και αρκετά χρόνια την παραγωγή και την ενσωμάτωση πράσινου υδρογόνου (Ren, et al., 2021).

2.6.4 Δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂)

Η ιδέα της δέσμευσης CO₂ έχει γίνει γνωστή από το 1930 ως μέθοδος καθαρισμού-αναβάθμισης του φυσικού αερίου, του υδρογόνου ή άλλων αερίων ρευμάτων (πχ βιοαέριο) σε βιομηχανική κλίμακα. Το 1972, τέθηκε σε λειτουργία η πρώτη μονάδα δέσμευσης CO₂ με ταυτόχρονη υπόγεια αποθήκευσή του. Η δέσμευση και αποθήκευση του CO₂ αποτελεί σήμερα συνήθη πρακτική, κυρίως στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου και για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, με τις πιο συνηθισμένες να είναι:

- Φυσική ή χημική απορρόφηση με χρήση κατάλληλου διαλύτη (πχ αμίνες)
- Προσρόφηση με χρήση προσροφητικών υλικών (πχ ενεργός άνθρακας)
- Διαχωρισμός με χρήση ειδικών μεμβρανών
- Διαχωρισμός με κρυογονική

Στη βιομηχανία σιδήρου-χάλυβα, η δέσμευση CO₂, αν και έχει μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό, εντούτοις δεν έχει βρει εφαρμογή ευρέως. Έχουν ερευνηθεί διάφορες τεχνικές δέσμευσης του εκπεμπόμενου CO₂ από την υψικάμινο, χρησιμοποιώντας κυρίως απορρόφηση ή προσρόφηση. Επίσης, είναι δυνατή η δέσμευση των συνολικών εκπομπών μιας βιομηχανίας. Σε κάθε περίπτωση, το πρόβλημα με αυτές τις τεχνολογίες είναι οι μεγάλες απαιτήσεις τους σε ενέργεια. Επομένως, για να είναι η δέσμευση CO₂ βιώσιμη, πρέπει ένα μέρος της απαιτούμενης ενέργειας να προέρχεται από ανάκτηση θερμότητας των ρευμάτων απαερίων της βιομηχανίας (Holappa, 2020).

2.6.5 Βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας

Στον κλάδο του χάλυβα, οι τεχνολογίες διαχείρισης και βελτιστοποίησης της παραγωγικής διαδικασίας έχουν τη δυνατότητα να επιτύχουν εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση των αερίων εκπομπών. Η διαχείριση και η βελτιστοποίηση λαμβάνει χώρα με χρήση συστημάτων τεχνολογίας πληροφοριών (IT systems). Οι τεχνολογίες αυτές διακρίνονται σε 4 κατηγορίες:

- Συστήματα για τον προγραμματισμό των επιχειρησιακών πόρων (ERP systems)
- Επίβλεψη και έλεγχος της παραγωγικής διαδικασίας
- Συστήματα αυτόματης διαχείρισης των πρώτων υλών
- Συστήματα βελτιστοποίησης της διαχείρισης ενέργειας

Οι πρώτες 3 κατηγορίες συνεισφέρουν στη μείωση της κατανάλωσης πρώτων υλών/ενέργειας προς τη θεωρητική τιμή, ενώ η 4^η κατηγορία μπορεί να επιτύχει εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 1-3% έως τώρα.

Οι παραπάνω προσεγγίσεις διαχείρισης και βελτιστοποίησης της παραγωγικής διαδικασίας έχουν χρησιμοποιηθεί στη χαλυβουργία, κυρίως στις μεθόδους παραγωγής BF-BOF και EAF. Συγκεκριμένα, κατά τη μέθοδο παραγωγής BF-BOF, οι τεχνολογίες διαχείρισης και βελτιστοποίησης εστιάζουν στο έλεγχο τελικού σημείου (endpoint control), στην εφαρμογή μοντέλων στατικού ελέγχου (static control models), καθώς και στην ανάλυση και στον έλεγχο των αερίων ρευμάτων που παράγονται από τον κλίβανο. Αντίστοιχα, στη μέθοδο παραγωγής χάλυβα μέσω EAF, στόχος των τεχνολογιών αυτών είναι η αυτοματοποίηση της τροφοδοσίας ανακυκλωμένου χάλυβα και η «έξυπνη» τροφοδοσία ενέργειας (smart power supply).

Γενικά, η Κίνα, η οποία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι ο παγκόσμιος ηγέτης στη βιομηχανία σιδήρου-χάλυβα, έχει μεταβεί από τη διαχείριση της παραγωγής με βάση την εμπειρία στη σύγχρονη και καινοτόμο διαχείριση. Πλέον, τα ερευνητικά projects σχετικά με την εξοικονόμηση ενέργειας/πρώτων υλών και η διαχείριση αυτών δεν είναι αρμοδιότητα ενός μόνο τμήματος, αλλά αποτελεί κομμάτι της συνολικής επιχειρηματικής στρατηγικής των χαλυβουργικών βιομηχανιών. Στόχος είναι τα επόμενα χρόνια να υπάρχει «έξυπνη» αλληλεπίδραση ανθρώπου-υπολογιστικού συστήματος σε ζωντανό χρόνο και συνέργεια μεταξύ των ροών πρώτων υλών-ενέργειας, ώστε να ενσωματωθούν περαιτέρω τα υπολογιστικά συστήματα στις διαδικασίες παραγωγής της βιομηχανία του χάλυβα (Ren, et al., 2021).

3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Τα προηγούμενα χρόνια, ο σχεδιασμός και η λειτουργία των ενεργειακών συστημάτων, είτε πρόκειται για μεγάλους σταθμούς παραγωγής ενέργειας και συστήματα συμπαραγωγής θερμότητας-ηλεκτρισμού είτε για απλούς κινητήρες οχημάτων, βασιζόταν κυρίως στην εμπειρία. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα της λειτουργίας αυτών των συστημάτων, καθώς και οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις επίτευξης συγκεκριμένων στόχων, συχνά αλληλοσυγκρουόμενων μεταξύ τους (για παράδειγμα χαμηλό ενεργειακό κόστος με ταυτόχρονα μικρές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου), οδήγησε στην ανάπτυξη τεχνικών μαθηματικής μοντελοποίησης που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας στο συγκεκριμένο τομέα.

Η βελτιστοποίηση των ενεργειακών συστημάτων πραγματοποιείται σε τρία επίπεδα (Frangopoulos, 2009):

- Βελτιστοποίηση σύνθεσης (synthesis optimization), στην οποία ορίζονται τα συστατικά του προβλήματος, καθώς και οι επιμέρους αλληλεπιδράσεις τους
- Βελτιστοποίηση σχεδιασμού (design optimization), όπου εισάγονται οι λειτουργικοί περιορισμοί για κάθε συστατικό (πχ προδιαγραφές εξοπλισμού)
- Βελτιστοποίηση λειτουργίας (operation optimization), κατά την οποία για ένα δεδομένο σύστημα (ορισμένο από τα δύο προηγούμενα βήματα) αναζητείται η βέλτιστη λύση βάσει κάποιων κριτηρίων

Στη βιομηχανία σιδήρου-χάλυβα, η έρευνα σχετικά με τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας με χρήση μοντέλων βελτιστοποίησης διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: βελτιστοποίηση εξοπλισμού και βελτιστοποίηση διεργασίας. Στην πρώτη κατηγορία στόχος είναι η αύξηση της αποδοτικότητας των βιομηχανικών συσκευών, μέσω ανάλυσης των αντιδράσεων και των φυσικοχημικών μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα στην εκάστοτε συσκευή. Η βελτιστοποίηση αυτή περιλαμβάνει κυρίως την αύξηση του μεγέθους του εξοπλισμού, εκμεταλλευόμενη το φαινόμενο της κλίμακας, αλλά και την ενσωμάτωση των κατάλληλων τεχνολογιών, προκειμένου να μειωθεί η ενεργειακή κατανάλωση της βιομηχανίας. Για παράδειγμα, έχει βρεθεί ότι η κατασκευή δύο μεγάλων υψικαμίνων έχει καλύτερη ενεργειακή απόδοση από την κατασκευή τριών μικρότερου μεγέθους. Όσον αφορά τη βελτιστοποίηση της διεργασίας, αυτή αφορά το συντονισμό μεταξύ των επιμέρους διαδικασιών, ώστε να επιτυγχάνεται συνεχής παραγωγή με την ελάχιστη δυνατή χρήση ενέργειας. Περιλαμβάνει τη βελτίωση της διεργασίας με ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας, τη δομική ανάλυση με χρήση μοντέλων προσομοίωσης και

γενικά τη βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας. Είναι χαρακτηριστικό ότι από το 1990 έως το 2016, το 48% της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας στον συγκεκριμένο κλάδο στην Κίνα οφείλεται στη βελτιστοποίηση των διεργασιών (Lu, et al., 2016).

Η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, στη βάση της ρύθμισης και ανάλυσης της ενεργειακής κατανάλωσης του συνολικού συστήματος παραγωγής ξεκινά με την αξιολόγηση της απόδοσης κάθε διεργασίας, μονάδας και συσκευής ξεχωριστά. Στη συνέχεια, λαμβάνονται αποφάσεις σχετικά με τις συστηματικές λύσεις που θα εφαρμοστούν, με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, την εξοικονόμηση ενέργειας και τη βιώσιμη ανάπτυξη της παραγωγής χάλυβα.

Προκειμένου η διαχείριση ενέργειας και η βελτιστοποίησή της να έχει επιτυχές αποτέλεσμα, πρέπει στηρίζεται σε δύο βασικές αρχές (Tang, et al., 2014):

- *Ορθολογική αντιστοίχιση ενεργειακής ποιότητας και ποσότητας.* Παρά το γεγονός ότι πολλές βιομηχανίες ανακτούν υψηλές ποσότητες ενέργειας (πχ από τα απαέρια), τη διανέμουν με λάθος τρόπο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μη πλήρη αξιοποίησή της και την εκ νέου δημιουργία ενεργειακής σπατάλης. Για το σκοπό κρίνεται σκόπιμη η πραγματοποίηση μιας αρχικής ανάλυσης της χρήσης ενέργειας στη βιομηχανία πριν τη βελτιστοποίηση.
- *Διαχείριση της ενεργειακής απόδοσης σε ένα ενεργειακά προσανατολισμένο σύστημα.* Οι περισσότερες χαλυβουργίες έχουν υιοθετήσει ένα σύστημα επικεντρωμένο πάνω στην παραγωγή (production-oriented) και όχι στην ενέργεια (energy-oriented), με αποτέλεσμα υψηλές καταναλώσεις και σπατάλες. Είναι αναγκαία, λοιπόν η εγκατάσταση ενός συστήματος διαχείρισης της ενέργειας (σε ποσότητα και ποιότητα), μέσω του οποίου θα βελτιστοποιούνται οι ροές ενέργειας στο δίκτυο των διεργασιών και θα προκύπτει η σωστή αντιστοίχισή τους.

Η βελτιστοποίηση των ροών ενέργειας στον κλάδο του χάλυβα (αλλά και γενικότερα), που έχει ως στόχο τη βέλτιστη αντιστοίχιση προσφοράς-ζήτησης ενέργειας με το μέγιστο δυνατό οικονομικό όφελος, λαμβάνει χώρα σε πέντε βήματα (Inayat, 2023):

- Συλλογή δεδομένων για το συνολικό σύστημα, δηλαδή συγκέντρωση στοιχείων που αφορούν θερμοκρασία, πίεση, ογκομετρική παροχή για κάθε ρεύμα, απαιτούμενη απόσταση για τη μεταφορά θερμότητας κλπ.
- Ταυτοποίηση όλων των ενεργειακών πηγών, ώστε να προσδιοριστεί το δυναμικό σε ενέργεια

- Προσδιορισμός όλων των συνδέσεων μεταξύ των ρευμάτων και των βοηθητικών παροχών, λαμβάνοντας υπόψη και πιθανές νέες ροές που θα προκύψουν
- Καθορισμός του μέγιστου δυναμικού ενέργειας βάσει των παραπάνω
- Σχεδιασμός του βέλτιστου συστήματος διαχείρισης ενέργειας

Τα πιο συνήθη εργαλεία ενεργειακής βελτιστοποίησης που βρίσκουν εφαρμογή στη βιομηχανία σιδήρου-χάλυβα είναι η ανάλυση της διαθέσιμης ενέργειας (εξέργεια-exergy analysis), η ανάλυση σύγκλισης (pinch analysis) και η μαθηματική μοντελοποίηση. Η ανάλυση της εξέργειας χρησιμοποιείται για τη σύγκριση μεταξύ δύο διαφορετικών τρόπων παραγωγής που δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα (πχ παραγωγή χάλυβα με BF-BOF ή EAF) ως προς τη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας. Χρησιμοποιείται επίσης για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης της βιομηχανίας, καθώς μέσα από τη συγκεκριμένη ανάλυση μπορούν να προσδιοριστούν οι πηγές απώλειας ενέργειας. Όσον αφορά την ανάλυση σύγκλισης, πρόκειται για μια συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδο που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, βελτιστοποιώντας τη λειτουργία τόσο των συσκευών όσο και των συστημάτων ανάκτησης θερμότητας. Τέλος, σε περιπτώσεις όπου η δομή του δικτύου των θερμών και ψυχρών ρευμάτων της βιομηχανίας είναι άγνωστη, τότε χρησιμοποιείται η μαθηματική μοντελοποίηση, ώστε να διαμορφωθεί ένα δίκτυο με όλες τις πιθανές σχέσεις μεταξύ των ρευμάτων.

Τα μαθηματικά μοντέλα έχουν συγκεκριμένη δομή, η οποία αποτελείται από 4 κύρια χαρακτηριστικά: μεταβλητές απόφασης, περιορισμοί, αντικειμενική συνάρτηση και παράμετροι (MirHassani & Hooshmand, 2019). Κατά τη μαθηματική μοντελοποίηση, αρχικά ορίζεται το κατάλληλο σετ εξισώσεων, το οποίο περιλαμβάνει όλους τους περιορισμούς, τις παραμέτρους, καθώς και την αντικειμενική συνάρτηση, από το οποίο προκύπτει η βέλτιστη λύση. Ο στόχος (ή οι στόχοι) της βελτιστοποίησης είναι αυτοί που καθορίζουν τι είδους μαθηματικό μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Programming-MILP) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση της ανάκτησης θερμότητας από τα ρεύματα των απαερίων. Επιπλέον, είναι δυνατή η χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου που συνδυάζει γραμμικό και μη γραμμικό προγραμματισμό προκειμένου να υπολογίζονται οι βέλτιστες παράμετροι λειτουργίας, για παράδειγμα στην υψικάμινο. Για την ανάλυση των ροών ενέργειας σε μια χαλυβουργία, μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν γενετικοί αλγόριθμοι (Wang, et al., 2020).

Τα τελευταία χρόνια, ο γραμμικός προγραμματισμός βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στον κλάδο της παραγωγής-διαχείρισης ενέργειας, μέσω της δημιουργίας μαθηματικών μοντέλων βελτιστοποίησης, τα οποία ενδεικτικά λαμβάνουν υπόψη το κόστος παραγωγής, τους διάφορους περιβαλλοντικούς περιορισμούς, τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας κλπ. (Rabe, et al., 2022). Διάφορες έρευνες έχουν εστιάσει στην ανάπτυξη μονοκριτηριακών (single-objective) ή πολυκριτηριακών (multi-objective) μοντέλων βελτιστοποίησης για τη βιομηχανία του χάλυβα. Τα μοντέλα αυτά μπορεί να αφορούν είτε μια συγκεκριμένη διεργασία είτε ολόκληρο το σύστημα παραγωγής και στοχεύουν κυρίως στην ελαχιστοποίηση (Shen, et al., 2018):

- της κατανάλωσης ενέργειας της βιομηχανίας
- των εκπομπών CO₂
- του συνολικού κόστους
- των απωλειών διαθέσιμης ενέργειας (εξέργεια)

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μελέτη των Hu et al. (2019), οι οποίοι δημιούργησαν ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού, που στοχεύει στη μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους από την αγορά και πώληση ενέργειας κατά το σχεδιασμό μιας βιομηχανίας χάλυβα. Το συγκεκριμένο μοντέλο περιλαμβάνει διάφορες διεργασίες παραγωγής, συσκευές και πηγές ενέργειας (άνθρακας, ατμός κλπ.) και χρησιμοποιείται για να αποφασιστεί η βέλτιστη διανομή της ενέργειας μεταξύ αυτών, υπό τους περιορισμούς προσφοράς-ζήτησης, τεχνικών προδιαγραφών και θερμοδυναμικών ισοζυγίων. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε από μια κινεζική βιομηχανία χάλυβα. Η βέλτιστη λύση που προέκυψε, έδειξε πως το κέρδος της βιομηχανίας μπορεί να αυξηθεί κατά περίπου 23 € ανά τόνο χάλυβα. Οι Grip et al. (2013) ακολούθησαν μια πιο σύνθετη προσέγγιση στην εργασία τους, κατασκευάζοντας διάφορα μοντέλα MILP, με χρήση του μαθηματικού εργαλείου *reMIND* και της γλώσσας προγραμματισμού *Java*. Συνδυάζοντας δεδομένα από τη βιομηχανία χάλυβα *SSAB EMEA* στη Σουηδία, από την τοπική μονάδα συμπαραγωγής θερμότητας-ηλεκτρισμού, αλλά και το δίκτυο διανομής θερμότητας, στόχος τους ήταν να βελτιστοποιήσουν τη ροή των υλικών, την ανακύκλωση του χάλυβα και τις εκπομπές CO₂, προκειμένου να αναβαθμιστεί η λειτουργία της μονάδας σε θέματα απόδοσης και περιβαλλοντικού αντίκτυπου. Η δημιουργία των μοντέλων έγινε με χρήση των αντίστοιχων ισοζυγίων μάζας και ενέργειας, προκειμένου να προσομοιωθούν οι διεργασίες της χαλυβουργίας. Το σημαντικότερο αποτέλεσμα από τη μελέτη τους είναι η εύρεση του βέλτιστου λόγου εισαγωγής ανακυκλωμένου χάλυβα (scrap steel) στην υψικάμινο, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι εκπομπές CO₂.

Κατά τη διαδικασία παραγωγής χάλυβα, εκλύονται αυθόρμητα μεγάλες ποσότητες απαερίων, η θερμότητα των οποίων μπορεί να ανακτηθεί και να παραχθεί ατμός ή ηλεκτρική ενέργεια, μειώνοντας έτσι το ενεργειακό κόστος. Αυτό ακριβώς μελέτησαν οι Kong et al. (2010), κατασκευάζοντας ένα μοντέλο MILP που ελαχιστοποιεί το λειτουργικό κόστος μιας βιομηχανίας χάλυβα, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος των εκπομπών CO₂, την προμήθεια καυσίμου και τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα απαέρια. Η μοντελοποίηση του συνολικού συστήματος (ισοζύγια μάζας, ζήτηση ενέργειας, δυαδικές μεταβλητές για τη λειτουργία ή όχι ορισμένων συσκευών κλπ.) στο λογισμικό *Lingo* έδειξε ότι με τη κατάλληλη διαχείριση ενέργειας, το λειτουργικό κόστος της μονάδας αναφοράς μπορεί να μειωθεί 7,5%. Παρόμοια έρευνα που αφορά επίσης τη διαχείριση των απαερίων πραγματοποίησαν οι García et al. (2020), οι οποίοι έλαβαν δεδομένα από μια χαλυβουργία στη περιοχή της βόρειας Ισπανίας, με απαιτήσεις σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια 95.000 MWh και 525.000 MWh, αντίστοιχα. Στο μοντέλο περιλαμβάνεται η λειτουργία μιας μονάδας συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού από τα ρεύματα ατμού. Στόχος είναι η μεγιστοποίηση των εσόδων από την πώληση πλεονάζουσας ενέργειας, καθώς και η ελαχιστοποίηση τόσο της κατανάλωσης καυσίμων όσο και του κόστους εκπομπών CO₂. Το μαθηματικό μοντέλο που διαμορφώθηκε είναι MILP και η επίλυσή του μέσω *CPLEX* έδωσε μια βέλτιστη λύση, η οποία προσδίδει κέρδη σε ένα σενάριο που σε πραγματικές συνθήκες δημιουργεί ζημίες, αυξάνοντας το όφελος της βιομηχανίας κατά 16,9%. Μια περισσότερο «πράσινη» προσέγγιση είχε στη μελέτη του ο Kong (2015), ο οποίος δημιούργησε ένα μοντέλο MILP για τη διαχείριση της ενέργειας των απαερίων της χαλυβουργίας, στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, συμπεριλαμβανομένου του λειτουργικού και του περιβαλλοντικού. Όμως, στο περιβαλλοντικό κόστος περιλαμβάνονται όχι μόνο οι εκπομπές CO₂, αλλά και διοξειδίου του θείου (SO₂), οξειδίων του αζώτου (NO_x) και μονοξειδίου του άνθρακα (CO). Λαμβάνοντας δεδομένα από μια βιομηχανία χάλυβα στην Κίνα, προέκυψε ότι η εφαρμογή της βέλτιστης λύσης του μοντέλου οδηγεί σε μείωση του συνολικού κόστους κατά 2,2%.

Αντίστοιχη δουλειά, αλλά αυτή τη φορά μελετώντας τις απώλειες ενέργειας στο σύστημα παραγωγής και διάθεσης ατμού σε μια βιομηχανία χάλυβα έκαναν οι Yan et al. (2022). Συγκεκριμένα, ανέπτυξαν με χρήση του λογισμικού *Pyomo* (*Python optimization modeling objects*) ένα μαθηματικό μοντέλο MILP, το οποίο στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της εξέργειας του συστήματος του ατμού της χαλυβουργίας. Με τον τρόπο αυτό παρήγαγαν μια βέλτιστη λύση λειτουργίας, στην οποία η ενεργειακή

απόδοση του συστήματος αυξάνεται κατά 10,568%, ενώ η απαίτηση σε εισροή ενέργειας είναι μειωμένη κατά 84,3 MJ ανά τόνο ακατέργαστου χάλυβα.

Κοινό χαρακτηριστικό των παραπάνω ερευνών είναι ότι επικεντρώνονται σε ένα μόνο στόχο, όπως η μείωση του ενεργειακού κόστους ή η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Αυτό σημείωσαν και οι Hu et al. (2023) στην εργασία τους, οι οποίοι δημιούργησαν ένα πολυκριτηριακό μαθηματικό μοντέλο, που έχει ως στόχο την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του ενεργειακού κόστους και την μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. Στο ενεργειακό κόστος περιλαμβάνεται το κόστος προμήθειας ενέργειας-καυσίμων, καθώς και το περιβαλλοντικό κόστος από τις εκπομπές αερίων. Η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου βελτιστοποίησης έδειξε ότι το ενεργειακό κόστος μπορεί να μειωθεί κατά 22,81% και η ενεργειακή απόδοση να αυξηθεί κατά 7,71% συγκριτικά με το αν εφαρμοζόταν βελτιστοποίηση για κάθε κριτήριο ξεχωριστά. Ένα αντίστοιχο, αλλά περισσότερο περίπλοκο, πολυκριτηριακό μοντέλο κατασκεύασαν οι Maddaloni et al. (2015), το οποίο έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση των εκπομπών CO₂ και τη μεγιστοποίηση του κέρδους από την πώληση καθαρού φυσικού αερίου και αερίων ως πηγή ενέργειας. Καθώς οι δύο στόχοι είναι συχνά αλληλοσυγκρουόμενοι, η επίλυση αυτού του μοντέλου λαμβάνει χώρα με τη τεχνική *ε-approximation* σε συνδυασμό με κλασικό MILP. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου με τα δεδομένα της έρευνας έδειξαν κέρδη που προσεγγίζουν τα 5.000.000 € από την εκμετάλλευση των αερίων και χαμηλότερες εκπομπές CO₂ έως και κατά 13.665 τόνους ανά έτος.

Ένα πιο πλήρες και καινοτόμο μαθηματικό μοντέλο παρουσίασαν στην εργασία τους οι Gan et al. (2022), οι οποίοι συνδύασαν το πολυενεργειακό σύστημα (multienergy system) της βιομηχανίας και το χρονοπρογραμματισμό των διεργασιών παραγωγής της βιομηχανίας σιδήρου-χάλυβα. Δηλαδή, στο μοντέλο MILP που κατασκεύασαν, συμπεριέλαβαν τόσο την παροχή ενέργειας από διάφορες πηγές (άνθρακας, τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, φωτοβολταϊκά, σύστημα ανάκτησης θερμότητας από τα αερία, σύστημα παραγωγής ατμού κλπ.) όσο και τη δυνατότητα επιλογής της ώρας και της διάρκειας λειτουργίας του εξοπλισμού της βιομηχανίας. Η βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού σχετίζεται άμεσα με τη διαχείριση ενέργειας, καθώς έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας παραγωγής και κατά συνέπεια τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Το συγκεκριμένο μοντέλο περιλαμβάνει δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, που σχετίζονται με τη δυνατότητα ρύθμισης της δυναμικότητας ενέργειας και την ταυτόχρονη αξιολόγηση της χρονικής διάρκειας παραγωγής που προκύπτει από

αυτή. Η επίλυση έγινε μέσω *CPLEX* και ως βασικό συμπέρασμα προέκυψε πως η συνδυαστική βελτιστοποίηση παράγει μια λύση της οποίας η δυναμικότητα προγραμματισμού της διαχείρισης ενέργειας είναι 150% και 54% υψηλότερη συγκριτικά με τα πιο απλά μοντέλα που βελτιστοποιούν μόνο τη χρήση της ενέργειας και μόνο το χρονοπρογραμματισμό της παραγωγής, αντίστοιχα.

Οι Wang et al. (2020) σημείωσαν πως τα περισσότερα μαθηματικά μοντέλα διαχείρισης ενέργειας στον κλάδο του χάλυβα είναι αιτιοκρατικά, δηλαδή δε λαμβάνουν υπόψη τους παράγοντες αβεβαιότητας που υπάρχουν μέσα σε ένα τόσο περίπλοκο περιβάλλον, όπως τα βιομηχανικά συστήματα. Στο πλαίσιο αυτό, μελέτησαν και δημιούργησαν ένα πολυκριτηριακό μοντέλο το οποίο στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της ενεργειακής έντασης και του οικονομικού κόστους, αλλά και στη μεγιστοποίηση της μείωσης των εκπομπών CO₂. Η έρευνα στηρίζεται σε 4 πυλώνες: διαχείριση του εξοπλισμού των διεργασιών, εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών, επαναχρησιμοποίηση-ανάκτηση θερμότητας απαερίων και χρήση ΑΠΕ. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα, εισάγονται ορισμένοι παράγοντες αβεβαιότητας, στους οποίους περιλαμβάνεται η δομή της χαλυβουργίας και ο τρόπος λειτουργίας της, η ενεργειακή απόδοση βάσει του εξοπλισμού και της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται, οι μέθοδοι διαχείρισης του εκπεμπόμενου CO₂, καθώς και το είδος των καυσίμων που καταναλώνεται. Ως μέθοδος δειγματοληψίας για τη διαχείριση της αβεβαιότητας στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται η *Latin Hypercube Sampling*, ενώ για την επίλυση ο γενετικός αλγόριθμος *NSGA-II*. Με την εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου παρατηρήθηκε ότι η μέση διατήρηση ενέργειας και η μείωση εκπομπών CO₂ σε συνθήκες αβεβαιότητας είναι 6,3% και 7,6% χαμηλότερη σε σχέση με τις συνθήκες βεβαιότητας, αντίστοιχα.

Μια διαφορετική προσέγγιση ακολούθησαν οι Shen et al. (2018), οι οποίοι στο μοντέλο που ανέπτυξαν συνδύασαν γραμμικό και μη γραμμικό προγραμματισμό, καθώς ορισμένες φυσικοχημικές εξισώσεις στη χαλυβουργία έχουν μη γραμμικό χαρακτήρα. Στόχος αποτέλεσε η ελαχιστοποίηση του ενεργειακού κόστους και τον εκπομπών CO₂ στο τμήμα μιας χαλυβουργίας που σχετίζεται με τη λωρίδα θερμής έλασης. Η επίλυση του μοντέλου παρήγαγε μια βέλτιστη λύση που μειώνει την κατανάλωση ενέργειας ανά τόνο παραγόμενου χάλυβα κατά 3,4%.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι παραπάνω επιλεγμένες περιπτώσεις βελτιστοποίησης της διαχείρισης ενέργειας με χρήση μαθηματικών μοντέλων που βρίσκουν εφαρμογή στη βιομηχανία σιδήρου-χάλυβα.

Πίνακας 3.1: Μελέτες βελτιστοποίησης στη βιομηχανία σιδήρου-χάλυβα.

Εύρος μελέτης	Χρησιμοποιούμενη μέθοδος	Αποτέλεσμα	Πηγή
Χαλυβουργία στην Κίνα	LP	Αύξηση ενεργειακού κέρδους κατά 23 €/ τόνο χάλυβα	Hu et al. (2019)
Βιομηχανία SSAB EMEA	MILP	Βέλτιστο ποσοστό scrap steel για ελαχιστοποίηση CO ₂	Grip et al. (2013)
Σύστημα διαχείρισης απαερίων χαλυβουργίας	MILP	Το συνολικό ενεργειακό κόστος μπορεί να μειωθεί κατά 7,5%	Kong et al. (2010)
Σύστημα διαχείρισης απαερίων χαλυβουργίας	MILP	Αύξηση οικονομικού οφέλους της βιομηχανίας κατά 16,9%	García et al. (2020)
Σύστημα διαχείρισης απαερίων χαλυβουργίας	MILP	Μείωση του συνολικού κόστους κατά 2,2%	Kong (2015)
Σύστημα παραγωγής-διανομής ατμού	MILP	Αύξηση ενεργειακής απόδοσης κατά 10,568%, μείωση ενέργειας κατά 84,3 MJ/τόνο ακατ. χάλυβα	Yan et al. (2022)
Χαλυβουργία στην Κίνα	Multi-objective optimization	Μείωση ενεργειακού κόστους κατά 22,81%, αύξηση ενεργειακής απόδοσης κατά 7,71%	Hu et al. (2023)
Μια βιομηχανία χάλυβα	Multi-objective optimization, ε-approximation, MILP	Κέρδη 5000000 € από την εκμετάλλευση των αερίων, λιγότερο CO ₂ κατά 13665 τόνους/έτος	Maddaloni et al. (2015)
Χαλυβουργία στην Κίνα	Multi-objective optimization, MILP	Υψηλότερη δυναμικότητα προγραμματισμού της διαχείρισης ενέργειας	Gan et al. (2022)

		συγκριτικά με μοντέλα που βελτιστοποιούν ένα κριτήριο	
Κλάδος σιδήρου-χάλυβα στην Κίνα	NSGA-II, Latin Hypercube Sampling	Εξοικονόμηση ενέργειας κατά 6,3%, μείωση εκπομπών CO ₂ κατά 7,6% σε συνθήκες αβεβαιότητας σε σχέση με συνθήκες βεβαιότητας	Wang et al. (2020)
Λωρίδα θερμής έλασης μιας βιομηχανίας	Συνδυασμός γραμμικού-μη γραμμικού προγραμματισμού	Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί κατά 3,4%	Shen et al. (2018)

Παρατηρείται πως η μεγάλη πλειοψηφία των μαθηματικών μοντέλων που αναπτύσσονται για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας στον κλάδο του χάλυβα, επικεντρώνεται στον καλύτερο σχεδιασμό του συστήματος, στη μείωση της σπατάλης ενέργειας και στην εύρεση των άριστων τιμών λειτουργίας των συσκευών. Επιπλέον, λίγες έρευνες περιλαμβάνουν τη δυνατότητα κάλυψης ενός μέρους των ενεργειακών απαιτήσεων με «πράσινη» ενέργεια από ΑΠΕ. Υπάρχει δηλαδή ένα «κενό» στη βιβλιογραφία, όσον αφορά την επιλογή του βέλτιστου ενεργειακού μίγματος που μπορεί να επιλέξει να καταναλώνει μια βιομηχανία, προκειμένου να ελαχιστοποιήσει το ενεργειακό της κόστος ή να μεγιστοποιήσει τα έσοδά της από τη σωστή διαχείριση της ενέργειας. Κρίνεται, λοιπόν, σκόπιμη η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης, το οποίο θα καθορίζει ποια πηγή ενέργειας (άνθρακας, φυσικό αέριο κλπ.) είναι περισσότερο συμφέρουσα να χρησιμοποιηθεί για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (πχ κάθε μήνα), λαμβάνοντας υπόψη και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης ΑΠΕ (ηλιακή, αιολική), έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται/μεγιστοποιείται το κόστος/κέρδος της και να πληρούνται όλοι οι περιορισμοί (περιβαλλοντικοί, τεχνικοί, δυναμικότητας, ζήτησης κλπ.).

4 Μεθοδολογία

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι η δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης της διαχείρισης ενέργειας της χαλυβουργίας *Daewoo Steel Co. Ltd* στη Νότια Κορέα, το οποίο μεγιστοποιεί τα έσοδα της βιομηχανίας σε ετήσια βάση, προσδιορίζοντας το κατάλληλο ενεργειακό μίγμα ανάμεσα σε άνθρακα, φυσικό αέριο, ηλιακή και αιολική ενέργεια, καθώς και την ποσότητα πλεονάζουσας ενέργειας που μπορεί να πωληθεί, υπό συγκεκριμένους περιορισμούς. Το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη ενός οποιοδήποτε μοντέλου είναι ο καθορισμός του προβλήματος και του πλαισίου της έρευνας. Αρχικά λοιπόν, λαμβάνει χώρα βιβλιογραφική ανασκόπηση γύρω από τον κλάδο του χάλυβα τόσο ως προς τις μεθόδους παραγωγής και την τρέχουσα ενεργειακή κατάσταση του κλάδου, όσο και ως προς τα μοντέλα βελτιστοποίησης της διαχείρισης ενέργειας που έχουν αναπτυχθεί. Έπειτα, συλλέγονται και επεξεργάζονται τα απαραίτητα δεδομένα, τα οποία περιλαμβάνουν την ενεργειακή κατανάλωση της βιομηχανίας που χρησιμοποιείται ως μελέτη περίπτωσης, καθώς και τη μέση μηνιαία προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και τη μέση μηνιαία ταχύτητα του αέρα στη συγκεκριμένη περιοχή, προκειμένου να υπολογιστεί η δυναμικότητα παραγωγής ηλιακής και αιολικής ενέργειας. Στη συνέχεια, αφού έχει διατυπωθεί ο σκοπός και οι στόχοι της εργασίας, διαμορφώνεται το μαθηματικό μοντέλο, ορίζοντας αρχικά την τεχνική βελτιστοποίησης που θα εφαρμοστεί (στη συγκεκριμένη περίπτωση MILP) και έπειτα την αντικειμενική συνάρτηση, τις μεταβλητές, τους περιορισμούς και τις παραμέτρους. Ακολουθεί η μετατροπή του προβλήματος σε γλώσσα προγραμματισμού *Python* και η επίλυσή του. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει η βέλτιστη λύση, ενώ πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας σε ορισμένες τιμές, έτσι ώστε να εξεταστούν διάφορα εναλλακτικά σενάρια. Έτσι, λαμβάνονται τα συνολικά αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, τα οποία αναλύονται και βάσει των οποίων εξάγονται τα συμπεράσματα της μελέτης. Συνοπτικά, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζεται στο Σχήμα 16.



Σχήμα 16: Μεθοδολογία παρούσας διπλωματικής εργασίας.

4.1 Συλλογή δεδομένων

4.1.1 Ενεργειακή κατανάλωση Daewoo Steel

Ο καθορισμός του προβλήματος και η βιβλιογραφική ανασκόπηση, αναπτύσσεται στις προηγούμενες ενότητες της διπλωματικής εργασίας. Όσον αφορά την συλλογή και επεξεργασία δεδομένων, αρχικά λαμβάνονται τα δεδομένα της ενεργειακής κατανάλωσης της βιομηχανίας χάλυβα *Daewoo Steel Co. Ltd*. Πρόκειται για μια εταιρία που εδρεύει στη Νότια Κορέα και ασχολείται με την παραγωγή διαφόρων ειδών χαλύβδινων προϊόντων έλασης, καθώς και πλακών σιδήρου και χάλυβα (Sathishkumar, et al., 2020). Σήμερα αποτελεί μέλος του ομίλου *POSCO (Pohang Iron and Steel Company)*, που όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.3.2, είναι ηγέτης στη χώρα, καθώς και 7^η στον κόσμο ως προς τον όγκο παραγωγής.

Τα δεδομένα που αφορούν την κατανάλωση ενέργειας της συγκεκριμένης βιομηχανίας, το διάστημα 01/01/2018-31/12/2018 συλλέγονται από αντίστοιχο σύνολο δεδομένων (dataset) (Sathishkumar, 2021), τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά συνόλου δεδομένων.

Χαρακτηριστικό	Αποτέλεσμα
Αριθμός παρατηρήσεων	35.041
Αριθμός μεταβλητών	10
Ημερομηνία και ώρα πρώτης μέτρησης	01/01/2018 00:00
Ημερομηνία και ώρα τελευταίας μέτρησης	31/12/2018 23:59
Χρονικό διάστημα μεταξύ των μετρήσεων	15 min

Το γεγονός ότι το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων βρίσκεται αναρτημένο στις βάσεις δεδομένων της εταιρίας *KEPCO* (Korea Electric Power Corporation), καθώς και ότι σε αυτό στηρίχθηκαν αρκετές επιστημονικές εργασίες (Mubarak, et al., 2023; Oh & Ahn, 2023; Sathishkumar, et al., 2020; Al-shaibani, et al., 2023) το καθιστούν αξιόπιστο για περαιτέρω μελέτη.

Η περιγραφή και η ταξινόμηση των μεταβλητών του συνόλου δεδομένων παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.2 που ακολουθεί.

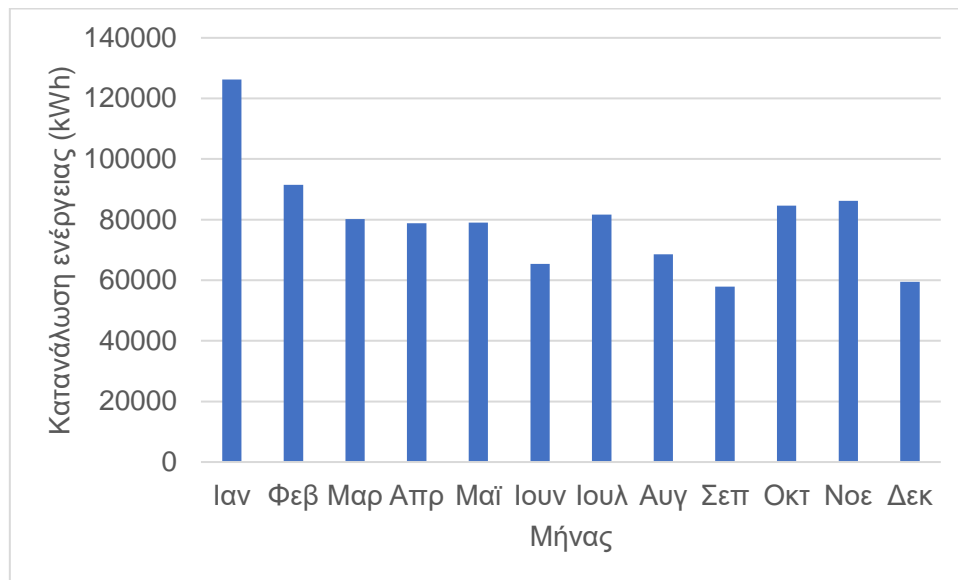
Πίνακας 4.2: Μεταβλητές συνόλου δεδομένων.

A/A	Μεταβλητή	Είδος μεταβλητής	Περιγραφή
1	Usage kWh	Ποσοτική-αναλογίας	Κατανάλωση ενέργειας σε kWh
2	Lagging Current (reactive power)	Ποσοτική-αναλογίας	Ρεύμα καθυστέρησης σε kVarh
3	Leading Current (reactive power-kVarh)	Ποσοτική-αναλογίας	Ρεύμα προπορείας σε kVarh
4	CO ₂	Ποσοτική-αναλογίας	Εκπομπές CO ₂ σε τόνους
5	Lagging Current Power Factor	Ποσοτική-αναλογίας	Συντελεστής ρεύματος καθυστέρησης (%)
6	Leading Current Power Factor	Ποσοτική-αναλογίας	Συντελεστής ρεύματος προπορείας (%)

7	NSM	Ποσοτική-αναλογίας	Δευτερόλεπτα που πέρασαν από τα μεσάνυχτα
8	Week status	Κατηγορική-διχοτομική	Καθημερινή (0) ή σαββατοκύριακο (1)
9	Day of week	Κατηγορική-ονομαστική	Ημέρα της εβδομάδας (Δευτέρα-Κυριακή)
10	Load type	Κατηγορική-ονομαστική	Είδος ενεργειακού φορτίου (light, medium, maximum)

Πηγή: Sathishkumar, et al., 2020.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην ενεργειακή κατανάλωση σε kWh της βιομηχανίας *Daewoo Steel*, δηλαδή στην πρώτη μεταβλητή του συνόλου δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά επεξεργάστηκαν και κατανεμήθηκαν σε ένα συγκεντρωτικό πίνακα, ώστε να προκύψει η αθροιστική μηνιαία κατανάλωση, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 17 και στον Πίνακα 4.3.



Σχήμα 17: Μηνιαία κατανάλωση ενέργειας στην *Daewoo Steel* το έτος 2018.

Πίνακας 4.3: Μηνιαία κατανάλωση ενέργειας στη Daewoo Steel το έτος 2018.

Μήνας	Κατανάλωση ενέργειας (kWh)
Ιανουάριος	126.238,29
Φεβρουάριος	91.497,34
Μάρτιος	80.230,41
Απρίλιος	78.769,80
Μάιος	79.059,28
Ιούνιος	65.404,64
Ιούλιος	81.674,41
Αύγουστος	68.559,43
Σεπτέμβριος	57.883,07
Οκτώβριος	84.665,65
Νοέμβριος	86.217,61
Δεκέμβριος	59.436,78
ΣΥΝΟΛΟ	959.636,71

4.1.2 Δυναμικότητα ηλιακής και αιολικής ενέργειας

Για τον υπολογισμό της δυναμικότητας παραγωγής ηλιακής και αιολικής ενέργειας στη Νότια Κορέα, είναι απαραίτητη η χρήση δεδομένων σχετικά με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και την ταχύτητα του αέρα στην περιοχή αυτή. Αυτό συμβαίνει διότι η παραγωγή ηλιακής ενέργειας είναι συνάρτηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ενώ η παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι συνάρτηση της ταχύτητας του αέρα. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.4 και 4.5, αντίστοιχα.

Πίνακας 4.4: Μέσος όρος προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στη Νότια Κορέα κατά τα έτη 1982-2005.

Μήνας	Ηλιακή ακτινοβολία S_i (kWh/m ²)
Ιανουάριος	69,85
Φεβρουάριος	83,19
Μάρτιος	115,70
Απρίλιος	139,86
Μάιος	155,11
Ιούνιος	140,24
Ιούλιος	128,02
Αύγουστος	128,92
Σεπτέμβριος	112,60
Οκτώβριος	102,66
Νοέμβριος	70,87
Δεκέμβριος	62,43

Πηγή: Jo, et al., 2008.

Πίνακας 4.5: Μέσος όρος ταχύτητας αέρα στη Νότια Κορέα κατά τα έτη 2012-2022.

Μήνας	Ταχύτητα αέρα U_i (m/s)
Ιανουάριος	2,53
Φεβρουάριος	5,35
Μάρτιος	2,85
Απρίλιος	5,44
Μάιος	2,70
Ιούνιος	5,11
Ιούλιος	2,68
Αύγουστος	5,69
Σεπτέμβριος	2,57
Οκτώβριος	5,20
Νοέμβριος	2,54
Δεκέμβριος	5,30

Πηγή: Windy, 2023.

4.2 Διαμόρφωση μαθηματικού μοντέλου

4.2.1 Μεταβλητές απόφασης

Στο ενεργειακό μίγμα, αποφασίστηκε να συμμετέχουν τα δύο πιο χρησιμοποιούμενα συμβατικά καύσιμα στη βιομηχανία χάλυβα (άνθρακας και φυσικό αέριο), καθώς και οι δύο πιο κοινές μορφές ΑΠΕ (ηλιακή, αιολική). Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψη και η πλεονάζουσα ενέργεια, η οποία σε περίπτωση που παραχθεί, μπορεί να πωληθεί στο τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, ορίζονται οι παρακάτω μεταβλητές απόφασης:

$X_{1,j}$ → Ποσότητα ενέργειας (kWh) που παράγεται από άνθρακα το μήνα j

$X_{2,j}$ → Ποσότητα ενέργειας (kWh) που παράγεται από φυσικό αέριο το μήνα j

$X_{3,j}$ → Ποσότητα ενέργειας (kWh) που παράγεται από φωτοβολταϊκά το μήνα j

$X_{4,j}$ → Ποσότητα ενέργειας (kWh) που παράγεται από ανεμογεννήτριες το μήνα j

$X_{5,j}$ → Πλεονάζουσα ποσότητα ενέργειας (kWh) που πωλείται το μήνα j

$$Y_{1,j} = \begin{cases} 1, & \text{αν ο άνθρακας χρησιμοποιείται το μήνα } j \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

$$Y_{2,j} = \begin{cases} 1, & \text{αν το } \Phi. A. \text{ χρησιμοποιείται το μήνα } j \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

$$Y_{3,j} = \begin{cases} 1, & \text{αν η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται το μήνα } j \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

$$Y_{4,j} = \begin{cases} 1, & \text{αν η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται το μήνα } j \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

$$Y_{5,j} = \begin{cases} 1, & \text{αν πωλείται ενέργεια το μήνα } j \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

4.2.2 Αντικειμενική συνάρτηση

Στόχος είναι η μεγιστοποίηση των εσόδων της βιομηχανίας χάλυβα από τη διαχείριση ενέργειας, μέσω της επιλογής του πιο συμφέροντος ενεργειακού μίγματος και της πώλησης της πλεονάζουσας ενέργειας:

$$\max Z = \sum_{j=1}^{12} (P_5 X_{5,j} - C_1 X_{1,j} - C_2 X_{2,j} - C_3 X_{3,j} - C_4 X_{4,j}) \quad (4.1)$$

όπου C_1, C_2, C_3, C_4 και P_5 οι αντικειμενικοί συντελεστές της παραγωγής ενέργειας από άνθρακα, φυσικό αέριο, φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, καθώς και της πώλησης ενέργειας, αντίστοιχα. Οι τιμές των συγκεκριμένων αντικειμενικών συντελεστών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6. Ο τρόπος υπολογισμού καθενός από αυτούς αναφέρεται αναλυτικά στο Προσάρτημα.

Πίνακας 4.6: Τιμές αντικειμενικών συντελεστών μοντέλου.

Συντελεστής	Τιμή (€/kWh)
Κόστος χρήσης άνθρακα (C_1)	0,02925
Κόστος χρήσης φυσικού αερίου (C_2)	0,06704
Κόστος παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά (C_3)	0,1
Κόστος παραγωγής ενέργειας από ανεμογεννήτριες (C_4)	0,11
Έσοδα από πώληση ενέργειας (P_5)	0,115

4.2.3 Περιορισμοί

Στη διαμόρφωση που προβλήματος περιλαμβάνονται οι εξής περιορισμοί:

- 1) Ισορροπία παραγόμενης-ζητούμενης ενέργειας: Η παραγόμενη ενέργεια πρέπει να καλύπτει τις ενεργειακές απαιτήσεις της βιομηχανίας χάλυβα, δηλαδή:

$$X_{1,j} + X_{2,j} + X_{3,j} + X_{4,j} \geq D_j \quad (4.2)$$

για κάθε $j = 1, 2, \dots, 12$. Ως D_j ονομάζεται η μηνιαία ζήτηση ενέργειας της βιομηχανίας, που εντοπίζεται στον Πίνακα 4.3.

Η ενέργεια προς πώληση ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της παραγόμενης και της καταναλισκόμενης ενέργειας:

$$X_{5,j} = (X_{1,j} + X_{2,j} + X_{3,j} + X_{4,j}) - D_j \quad (4.3)$$

για κάθε $j = 1, 2, \dots, 12$.

Από το συνδυασμό των σχέσεων (4.2) και (4.3) προκύπτει ο παρακάτω περιορισμός ισορροπίας:

$$X_{1,j} + X_{2,j} + X_{3,j} + X_{4,j} = D_j + X_{5,j} \quad (4.4)$$

- 2) Περιορισμός ενσωμάτωσης ΑΠΕ: Η ετήσια παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ πρέπει να καταλαμβάνει τουλάχιστον το 20% της συνολική παραγωγής, προκειμένου η βιομηχανία να συμβαδίζει με τους στόχους ενσωμάτωσης των ΑΠΕ στη Νότια Κορέα για το 2030 (GGGI, 2018):

$$\sum_{j=1}^{12} (X_{3,j} + X_{4,j}) \geq 0,2 \sum_{j=1}^{12} (X_{1,j} + X_{2,j} + X_{3,j} + X_{4,j}) \quad (4.5)$$

- 3) Περιορισμός χρήσης άνθρακα (1): Στο θεωρητικό μέρος αναφέρεται ότι η συμμετοχή του άνθρακα στο ενεργειακό μίγμα της παγκόσμιας χαλυβουργίας ανέρχεται σε 74,3%. Προκειμένου να μην αυξηθεί η χρήση του συμβατικού αυτού καυσίμου, η παραγωγή ενέργειας από άνθρακα δε πρέπει να υπερβαίνει το ποσοστό αυτό:

$$\sum_{j=1}^{12} X_{1,j} \leq 0,743 \sum_{j=1}^{12} (X_{1,j} + X_{2,j} + X_{3,j} + X_{4,j}) \quad (4.6)$$

- 4) Περιορισμός χρήσης άνθρακα (2): Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι δε θα παράγεται επιπλέον ενέργεια από άνθρακα με σκοπό την πώληση και άρα την περιβαλλοντική επιβάρυνση (εφόσον επιλεγεί η χρήση του συγκεκριμένου καυσίμου για κάποιο μήνα), ορίζεται η παραγόμενη ενέργεια από άνθρακα κάθε μήνα να μην υπερβαίνει τη μηνιαία ζήτηση ενέργειας από τη βιομηχανία:

$$X_{1,j} \leq D_j \cdot Y_{1,j} \quad (4.7)$$

για κάθε $j = 1, 2, \dots, 12$.

- 5) Περιορισμός χρήσης φυσικού αερίου (1): Προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του εξοπλισμού, είναι απαραίτητο να οριστεί ένα ελάχιστο ποσοστό χρήσης φυσικού αερίου (Larsson & Dahl, 2003). Δηλαδή, αν επιλεγεί το συγκεκριμένο καύσιμο σε κάποιο μήνα, η συμμετοχή του στο ενεργειακό μίγμα δε μπορεί να είναι χαμηλότερη από 5% για το μήνα αυτό:

$$X_{2,j} + M(1 - Y_{2,j}) \geq 0,05 \cdot (X_{1,j} + X_{2,j} + X_{3,j} + X_{4,j}) \quad (4.8)$$

για κάθε $j = 1, 2, \dots, 12$. Ο περιορισμός αυτός χρησιμοποιεί τη μέθοδο του μεγάλου M (big-M), το οποίο ορίζεται ως ένας πολύ μεγάλος θετικός αριθμός.

- 6) Περιορισμός χρήσης φυσικού αερίου (2): Για να εξασφαλιστεί ότι η μεταβλητή $X_{2,j}$ θα μηδενίζει σε περίπτωση που η $Y_{2,j}$ ισούται με μηδέν, εισάγεται ο παρακάτω βοηθητικός περιορισμός. Στο αρχικό σενάριο δεν υπάρχει κάποιο ανώτερο όριο χρήσης της συγκεκριμένης πηγής ενέργειας.

$$X_{2,j} \leq M \cdot Y_{2,j} \quad (4.9)$$

- 7) Περιορισμός δυναμικότητας ηλιακής ενέργειας: Η μηνιαία παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά (εφόσον επιλεγεί η πηγή αυτή για κάποιο μήνα) δεν πρέπει να ξεπερνάει τη δυναμικότητα παραγωγής από τη συγκεκριμένη ΑΠΕ. Η

ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{sun} = A \cdot \eta \cdot SI_j \quad (4.10)$$

όπου A η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών σε m^2 , η ο συντελεστής απόδοσης και SI_j ο μέσος όρος της ηλιακής ακτινοβολίας σε kWh/m^2 που προσπίπτει σε αυτά κατά το μήνα j και εντοπίζεται παραπάνω στον Πίνακα 4.4 (Ullah, et al., 2021). Η τυπική τιμή του συντελεστή απόδοσης είναι $\eta = 0,75$, λαμβάνοντας υπόψη και τις διακυμάνσεις της παραγωγής ενέργειας ανάμεσα στις ώρες ημέρας και νύχτας (Ren, et al., 2021). Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η μέση συνολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες δύναται να θεωρηθεί σταθερή (Schmutz, 2021). Επομένως:

$$X_{3,j} \leq A \cdot \eta \cdot SI_j \cdot Y_{3,j} \quad (4.11)$$

για κάθε $j = 1,2, \dots 12$.

- 8) Περιορισμός δυναμικότητας αιολικής ενέργειας: Η παραγωγή ενέργειας από ανεμογεννήτριες κάθε μήνα (εφόσον επιλεγεί η συγκεκριμένη πηγή) δε πρέπει να ξεπερνάει τη δυναμικότητα παραγωγής ενέργειας από αυτές, που δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{wind} = 0,36 \cdot N \cdot C_p \cdot \rho_{air} \cdot \pi R^2 \cdot U_j^3 \quad (4.12)$$

όπου N ο αριθμός των ανεμογεννητριών, C_p ο συντελεστής απόδοσης, ρ_{air} η πυκνότητα του αέρα, R το μήκος των πτερυγίων και U_i η μέση ταχύτητα του αέρα κατά το μήνα j που αναφέρεται στον Πίνακα 4.5. Ο συντελεστής απόδοσης λαμβάνεται ίσος με $C_p = 0,4$, η πυκνότητα του αέρα $\rho_{air} = 1,2 \frac{kg}{m^3}$ και η ακτίνα των πτερυγίων $R = 37,5 m$ (Thunder Said Energy, 2023; Huang, et al., 2021; EERE, 2023). Άρα ισχύει ότι:

$$X_{4,j} \leq 0,36 \cdot N \cdot C_p \cdot \rho_{air} \cdot \pi R^2 \cdot U_j^3 \cdot Y_{4,j} \quad (4.13)$$

για κάθε $j = 1,2, \dots 12$.

- 9) Περιορισμός ενέργειας προς πώληση: Στη συγκεκριμένη μελέτη θεωρείται πως δεν υπάρχει κάποιο ανώτατο όριο στην ποσότητα της πλεονάζουσας ενέργειας που μπορεί να πωληθεί στο τοπικό δίκτυο, αν επιλεγεί η πώληση ενέργειας για κάποιο μήνα. Αυτό εκφράζεται μέσω της εξίσωσης:

$$X_{5,j} \leq M \cdot Y_{5,j} \quad (4.14)$$

- 10) Μη-αρνητικές μεταβλητές: Οι μεταβλητές απόφασης ορίζονται ως μη αρνητικές (θετικές ή μηδέν):

$$X_{1,j} \geq 0 \quad (4.15)$$

$$X_{2,j} \geq 0 \quad (4.16)$$

$$X_{3,j} \geq 0 \quad (4.17)$$

$$X_{4,j} \geq 0 \quad (4.18)$$

$$X_{5,j} \geq 0 \quad (4.19)$$

- 11) Δυαδικές μεταβλητές: Οι συγκεκριμένες μεταβλητές μπορούν να λάβουν μόνο δύο τιμές (0 και 1), δηλαδή:

$$Y_{1,j} \in \{0,1\} \quad (4.20)$$

$$Y_{2,j} \in \{0,1\} \quad (4.21)$$

$$Y_{3,j} \in \{0,1\} \quad (4.22)$$

$$Y_{4,j} \in \{0,1\} \quad (4.23)$$

$$Y_{5,j} \in \{0,1\} \quad (4.24)$$

Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται συνοπτικά οι τιμές όλων των παραμέτρων που περιλαμβάνονται στις εξισώσεις των περιορισμών. Η κωδικοποίηση σε γλώσσα προγραμματισμού *Python* που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου μαθηματικού μοντέλου MILP παρουσιάζεται στο Προσάρτημα. Η επίλυση πραγματοποιείται με χρήση της βιβλιοθήκης *PuLP* της γλώσσας *Python*.

Πίνακας 4.7: Τιμές παραμέτρων μοντέλου.

Παράμετρος	Τιμή
Επιφάνεια φωτοβολταϊκών (A)	100 m ²
Συντελεστής απόδοσης φωτοβολταϊκών (η)	0,75
Αριθμός ανεμογεννητριών (N)	1
Συντελεστής απόδοσης ανεμογεννητριών (C_p)	0,4
Πυκνότητα αέρα (ρ_{air})	1,2 $\frac{kg}{m^3}$
Ακτίνα πτερυγίων ανεμογεννητριών (R)	37,5 m
Μεγάλο M (big-M)	999.999.999

4.2.4 Παραδοχές μοντέλου

Η ανάπτυξη του συγκεκριμένου μαθηματικού μοντέλου έγινε βάσει ορισμένων παραδοχών και υποθέσεων, οι οποίες είναι οι εξής:

- ❖ Η κατανάλωση ενέργειας της βιομηχανίας παραμένει σταθερή και ίση με την τιμή D_j κάθε μήνα.
- ❖ Στο ενεργειακό μίγμα συμμετέχουν μόνο 4 πηγές (άνθρακας, φυσικό αέριο, ηλιακή ενέργεια, αιολική ενέργεια).
- ❖ Η παραγωγή ηλιακής ενέργειας είναι συνάρτηση μόνο της μέσης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και δε λαμβάνονται υπόψη άλλοι παράγοντες (θερμοκρασία, γωνία πρόσπτωσης κλπ.).
- ❖ Η παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι συνάρτηση μόνο της μέσης ταχύτητας του αέρα και δε λαμβάνονται υπόψη άλλοι παράγοντες, όπως ατμοσφαιρικές συνθήκες, υψόμετρο κλπ.
- ❖ Υπάρχει διαθέσιμη η απαραίτητη έκταση για την εγκατάσταση των μονάδων αξιοποίησης ΑΠΕ.
- ❖ Ως περιβαλλοντικό κόστος λαμβάνεται υπόψη μόνο το κόστος εκπομπών CO_2 .
- ❖ Το κόστος προμήθειας των πηγών ενέργειας, το κόστος εκπομπών CO_2 , καθώς και η τιμή πώλησης της πλεονάζουσας ενέργειας παραμένουν αμετάβλητα στη διάρκεια του έτους.
- ❖ Δεν υπάρχει κάποιο ανώτατο όριο της ενέργειας που μπορεί να πωληθεί στο τοπικό δίκτυο.

5 Αποτελέσματα

5.1 Αρχικό σενάριο

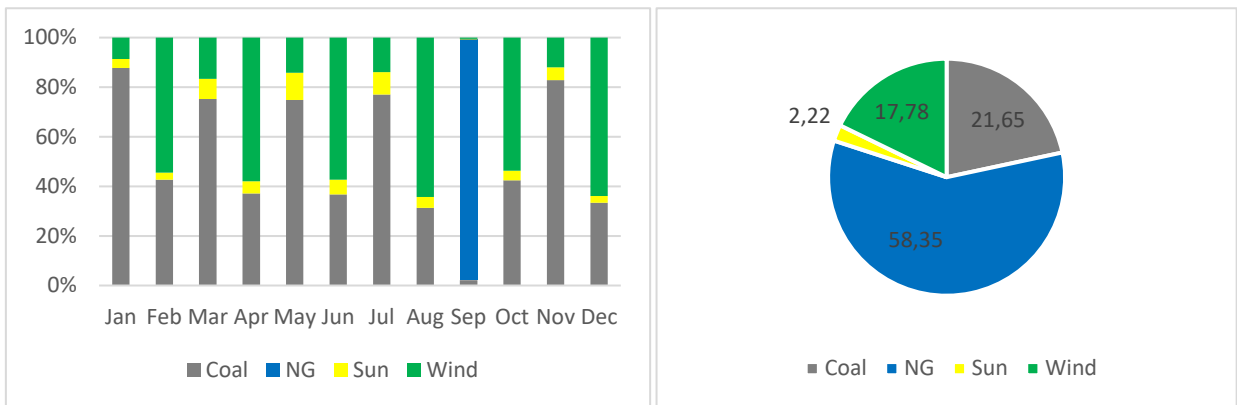
Η βέλτιστη λύση που προέκυψε από την επίλυση του παραπάνω μοντέλου παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Βέλτιστη λύση αρχικού σεναρίου (kWh).

Πηγή	Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απρ.	Μάι.	Ιουν.
Άνθρακας	126.238,29	91.497,34	80.230,41	78.769,80	79.059,28	65.404,64
Φυσικό αέριο	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ηλιακή	5.238,75	6.239,25	8.677,50	10.489,50	11.633,25	10.518,00
Αιολική	12.356,56	116.841,54	17.663,24	122.837,97	15.018,52	101.811,92
Σύνολο	143.833,60	214.578,13	106.571,15	212.097,27	105.711,05	177.734,56
Ζήτηση	126.238,29	91.497,34	80.230,41	78.769,80	79.059,28	65.404,64
Πώληση	17.595,31	123.080,79	26.340,74	133.327,47	26.651,77	112.329,92

Πηγή	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπ.	Οκτ.	Νοε.	Δεκ.
Άνθρακας	81.674,41	68.559,43	57.883,07	84.665,65	86.217,61	59.436,78
Φυσικό αέριο	0,00	0,00	2.585.674,30	0,00	0,00	0,00
Ηλιακή	9.601,50	9.669,00	8.445,00	7.699,50	5.315,25	4.682,25
Αιολική	14.687,24	140.563,55	12.951,95	107.286,72	12.503,66	113.596,13
Σύνολο	105.963,15	218.791,98	2.664.954,32	199.651,87	104.036,52	177.715,16
Ζήτηση	81.674,41	68.559,43	57.883,07	84.665,65	86.217,61	59.436,78
Πώληση	24.288,74	150.232,55	2.607.071,20	114.986,22	17.818,91	118.278,38

Στο συγκεκριμένο σενάριο παράγονται ετησίως 4.431.638,76 kWh, με τη συνολική ζήτηση ενέργειας από τη βιομηχανία να ανέρχεται σε 959.636,71 kWh, δηλαδή παράγεται περίπου η πενταπλάσια ενέργεια από την απαιτούμενη. Τα έσοδα της βιομηχανίας στην περίπτωση αυτή ανέρχονται σε 101.353,29 €. Το ενεργειακό μίγμα ανά μήνα και σε ετήσια βάση απεικονίζεται στο Σχήμα 18.

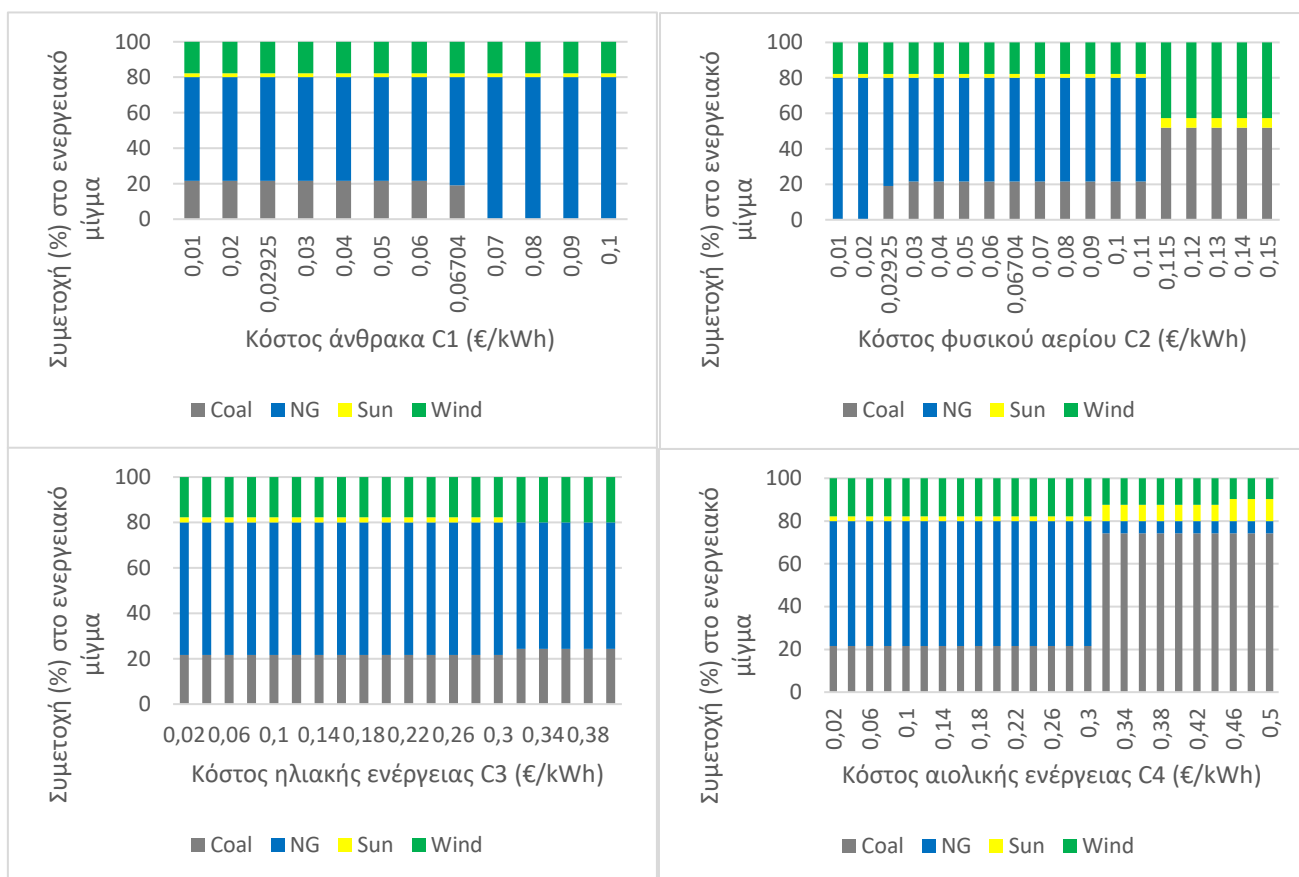


Σχήμα 18: Ενεργειακό μίγμα ανά μήνα (αριστερά) και ανά έτος (δεξιά) στο αρχικό σενάριο.

Παρατηρείται ότι το φυσικό αέριο κατέχει τη μερίδα του λέοντος με ποσοστό 58,35% και ακολουθούν ο άνθρακας με 21,65%, η αιολική ενέργεια με 17,78% και η ηλιακή ενέργεια με 2,22%. Η χρήση άνθρακα, αιολικής και ηλιακής ενέργειας επιλέγεται και για τους 12 μήνες του έτους, σε αντίθεση με το φυσικό αέριο, το οποίο επιλέγεται να χρησιμοποιείται μόνο για ένα μήνα (Σεπτέμβριο). Η ενσωμάτωση ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα ανέρχεται στο ελάχιστο ποσοστό (20%). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τις ενεργειακές απαιτήσεις της βιομηχανίας, προκύπτει ότι στο συγκεκριμένο σενάριο, αυτές καλύπτονται πλήρως από τον άνθρακα, με την παραγωγή από τις υπόλοιπες πηγές ενέργειας να χρησιμοποιείται μόνο για πώληση. Επιπλέον, παρά το γεγονός ότι το φυσικό αέριο καταλαμβάνει το υψηλότερο μερίδιο στο ενεργειακό μίγμα, στη βέλτιστη λύση επιλέγεται η χρήση του μόνο σε ένα μήνα.

Ανάλυση ευαισθησίας αρχικού σεναρίου

Η ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνει χώρα σε δύο στάδια. Αρχικά, μελετάται το πως μεταβάλλεται το ενεργειακό μίγμα, όταν αλλάζουν οι πέντε αντικειμενικοί συντελεστές C_1 , C_2 , C_3 , C_4 και P_5 . Στη συνέχεια, εξετάζεται η επίδραση της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών (A) και του αριθμού των ανεμογεννητριών (N), των πέντε αντικειμενικών συντελεστών C_1 , C_2 , C_3 , C_4 και P_5 , καθώς επίσης και του ελάχιστου ποσοστού (%) ενσωμάτωσης των ΑΠΕ στα έσοδα της βιομηχανίας (δηλαδή στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα Σχήματα 19-24.



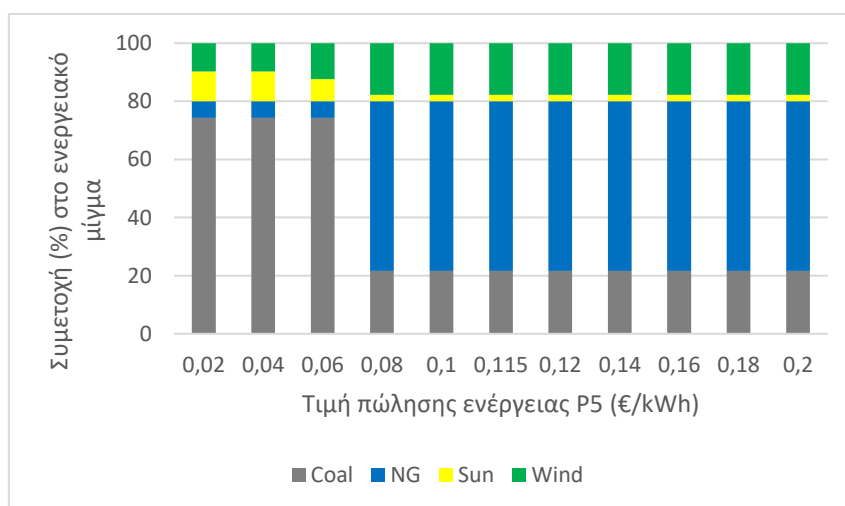
Σχήμα 19: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς το ενεργειακό μίγμα για το αρχικό σενάριο.

Από το Σχήμα 19 προκύπτει ότι:

- ❖ Αν το κόστος του άνθρακα (C_1) είναι χαμηλότερο από 0,06704 €/kWh (τιμή που αντιστοιχεί στο κόστος φυσικού αερίου), τότε το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 21,65% άνθρακα, 58,35% φυσικό αέριο, 2,22% ηλιακή ενέργεια και 17,78% αιολική ενέργεια. Αν ξεπεραστεί η τιμή αυτή, η χρήση άνθρακα παύει να είναι συμφέρουσα και το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 80% φυσικό αέριο 2,22% ηλιακή ενέργεια και 17,78% αιολική ενέργεια
- ❖ Αν το κόστος του φυσικού αερίου (C_2) είναι χαμηλότερο από το κόστος του άνθρακα (0,02925 €/kWh), τότε το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 80% φυσικό αέριο 2,22% ηλιακή ενέργεια και 17,78% αιολική ενέργεια (δε χρησιμοποιείται καθόλου άνθρακας). Στην περίπτωση που το κόστος κυμαίνεται μεταξύ 0,02925-0,115 €/kWh (δηλαδή πάνω από το κόστος άνθρακα και κάτω από την τιμή πώλησης ενέργειας), τότε το ενεργειακό μίγμα γίνεται 19,11% άνθρακας, 60,89% φυσικό αέριο, 2,22% ηλιακή ενέργεια και 17,78% αιολική ενέργεια. Τέλος, αν η τιμή αυξηθεί πάνω από 0,115 €/kWh, τότε η παραγωγή

φυσικού αερίου είναι μη συμφέρουσα, οπότε το ενεργειακό μίγμα γίνεται 51,99% άνθρακας, 2,22% ηλιακή ενέργεια και 17,78% αιολική ενέργεια

- ❖ Αν το κόστος της ηλιακής ενέργειας (C_3) είναι χαμηλότερο από 0,32 €/kWh, τότε το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 21,65% άνθρακα, 58,35% φυσικό αέριο, 2,22% ηλιακή ενέργεια και 17,78% αιολική ενέργεια. Από τη συγκεκριμένη τιμή και πάνω, η ηλιακή ενέργεια δεν είναι συμφέρουσα για παραγωγή και συνεπώς το ενεργειακό μίγμα γίνεται 24,35% άνθρακας, 55,65% φυσικό αέριο και 20% αιολική ενέργεια
- ❖ Για κόστος αιολικής ενέργειας (C_4) κάτω από 0,32 €/kWh, το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 21,65% άνθρακα, 58,35% φυσικό αέριο, 2,22% ηλιακή ενέργεια και 17,78% αιολική ενέργεια. Ξεπερνώντας αυτή τη τιμή και έως τα 0,44 €/kWh, στο ενεργειακό μίγμα συμμετέχουν κατά 74,3% ο άνθρακας, 5,7% το φυσικό αέριο, 7,6% η ηλιακή ενέργεια και 12,4% η αιολική ενέργεια. Πάνω από 0,44 €/kWh, το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 74,3% άνθρακα, 5,7% φυσικό αέριο, 10,23% ηλιακή ενέργεια και 9,77% αιολική ενέργεια. Παρατηρείται ότι όσο κι αν αυξηθεί η τιμή της αιολικής ενέργειας από εδώ και πέρα, το ποσοστό της στο ενεργειακό μίγμα δε μηδενίζεται, διότι υπάρχει το ελάχιστο ποσοστό ενσωμάτωσης ΑΠΕ, το οποίο δε μπορεί να καλυφθεί μόνο μέσω της ηλιακής ενέργειας.

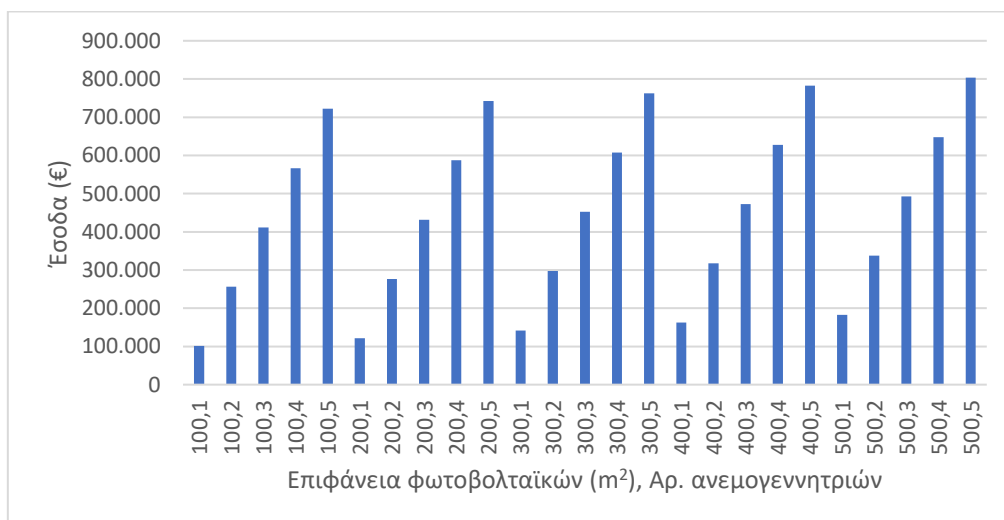


Σχήμα 20: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς το ενεργειακό μίγμα για το αρχικό σενάριο.

Από το Σχήμα 20 παρατηρείται ότι όσο η τιμή πώλησης ενέργειας (P_5) είναι χαμηλότερη από 0,06 €/kWh, τότε το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 74,3% άνθρακα, 5,7% φυσικό αέριο, 10,23% ηλιακή ενέργεια και 9,77% αιολική ενέργεια. Στη συγκεκριμένη τιμή, το ενεργειακό μίγμα γίνεται 74,3% άνθρακας, 5,7% φυσικό αέριο, 7,60% ηλιακή

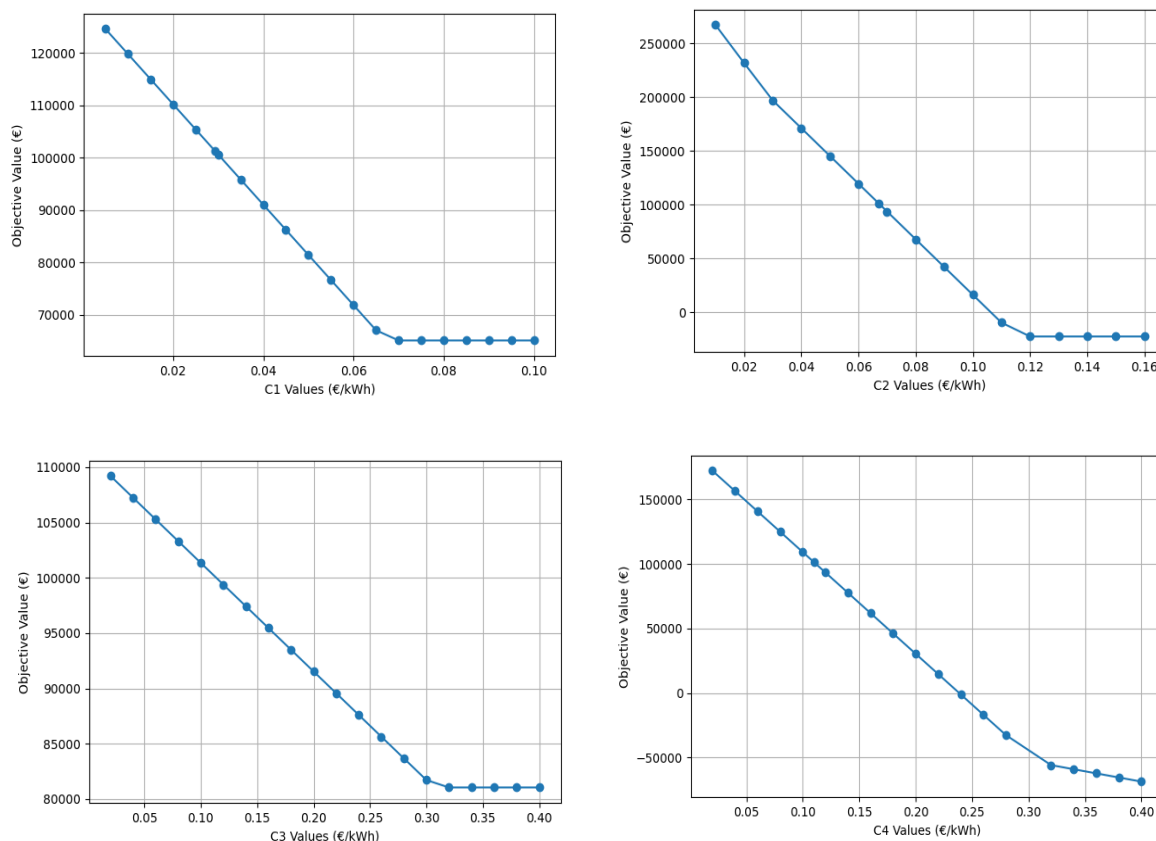
ενέργεια και 12,4% αιολική ενέργεια. Για τιμή πώλησης μεγαλύτερη από 0,06 €/kWh, η πώληση ενέργειας γίνεται περισσότερο ελκυστική με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συμμετοχή του φυσικού αερίου. Έτσι, στην περίπτωση αυτή, το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 21,65% άνθρακα, 58,35% φυσικό αέριο, 2,22% ηλιακή ενέργεια και 17,78% αιολική ενέργεια.

Παρακάτω παρουσιάζεται η δεύτερη φάση της ανάλυσης ευαισθησίας, η οποία επικεντρώνεται στο πώς μεταβάλλονται τα έσοδα, όταν αλλάζουν οι παράμετροι.



Σχήμα 21: Επίδραση της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών και του αριθμού των ανεμογεννητριών στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στο αρχικό σενάριο.

Από το Σχήμα 21 προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών (A) και ο αριθμός των ανεμογεννητριών (N), τόσο αυξάνονται και τα έσοδα της βιομηχανίας, διότι αυξάνεται ταυτόχρονα η δυναμικότητα ΑΠΕ που μπορεί να παραχθεί και να πωληθεί στο τοπικό δίκτυο. Τα υψηλότερα έσοδα προκύπτουν για το μέγιστο συνδυασμό $A - N$, δηλαδή για $A = 500 \text{ m}^2$ και $N = 5$ ανεμογεννήτριες.

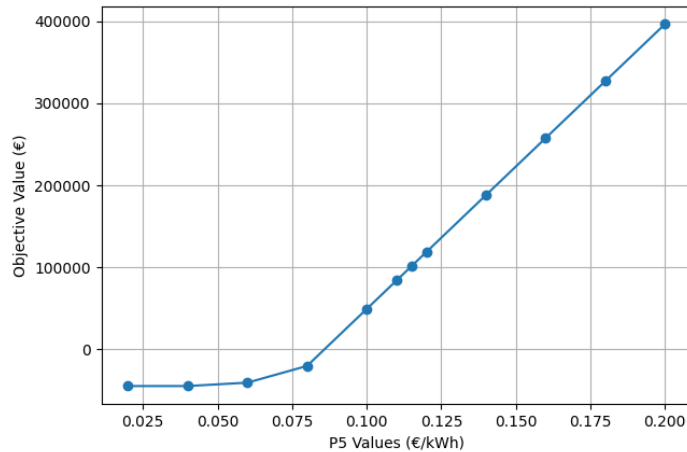


Σχήμα 22: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς τα έσοδα για το αρχικό σενάριο.

Από την ανάλυση του Σχήματος 22 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

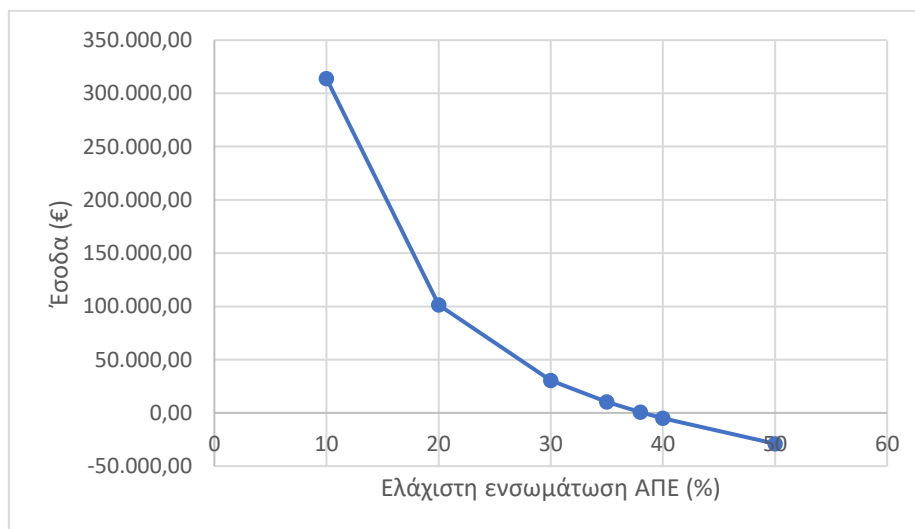
- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος προμήθειας άνθρακα (C_1), μέχρι την τιμή 0,07 €/kWh, τόσο μειώνονται τα έσοδα της βιομηχανίας. Αύξηση πάνω από τη συγκεκριμένη τιμή δε μειώνει περαιτέρω τα έσοδα, διότι καθιστά το συγκεκριμένο καύσιμο ασύμφορο για χρήση (δε χρησιμοποιείται καθόλου άνθρακας για παραγωγή ενέργειας)
- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος προμήθειας φυσικού αερίου (C_2), μειώνονται τα έσοδα της βιομηχανίας. Αύξηση πάνω από την τιμή 0,11 €/kWh έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ζημίας για την επιχείρηση. Επιπλέον, αύξηση πάνω από 0,115 €/kWh, δε μειώνει περαιτέρω τα έσοδα, διότι καθιστά το συγκεκριμένο καύσιμο ασύμφορο για χρήση (δεν χρησιμοποιείται καθόλου φυσικό αέριο)
- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά (C_3), μέχρι την τιμή 0,32 €/kWh, τόσο μειώνονται τα έσοδα της βιομηχανίας. Αύξηση πάνω από τη συγκεκριμένη τιμή δε μειώνει περαιτέρω τα έσοδα, διότι καθιστά τη συγκεκριμένη πηγή ασύμφορη για χρήση (δεν παράγεται καθόλου ηλιακή ενέργεια)

- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος παραγωγής ενέργειας από ανεμογεννήτριες (C_4), μειώνονται τα έσοδα της βιομηχανίας. Αύξηση πάνω από την τιμή 0,24 €/kWh έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ζημίας για την επιχείρηση.



Σχήμα 23: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς τα έσοδα για το αρχικό σενάριο.

Από το Σχήμα 23 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η τιμή πώλησης ενέργειας (P_5), τόσο αυξάνονται τα έσοδα για την επιχείρηση. Η οριακή τιμή για την οποία προκύπτουν μηδενικά έσοδα είναι 0,09 €/kWh.



Σχήμα 24: Ανάλυση ευαισθησίας ελάχιστου ποσοστού ενσωμάτωσης ΑΠΕ ως προς τα έσοδα για το αρχικό σενάριο.

Από το Σχήμα 24 συμπεραίνεται ότι όσο αυξάνεται το ελάχιστο ποσοστό ενσωμάτωσης ΑΠΕ τόσο μειώνονται τα έσοδα της βιομηχανίας. Για ελάχιστο ποσοστό ΑΠΕ ίσο με 38% προκύπτουν μηδενικά έσοδα και από εκεί και πάνω προκαλούνται ζημίες στην επιχείρηση.

5.2 Δεύτερο σενάριο

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα ζητήματα που προέκυψαν από την επίλυση του αρχικού σεναρίου, κρίνεται σκόπιμο στο σενάριο αυτό να πραγματοποιηθούν ορισμένες αλλαγές στους περιορισμούς. Ένας τρόπος προκειμένου να αντιμετωπιστεί το ζήτημα της πλήρους κάλυψης των ενεργειακών αναγκών της βιομηχανίας από άνθρακα, που προέκυψε στο αρχικό σενάριο, είναι να μεταβληθεί ο τρίτος περιορισμός. Συγκεκριμένα, το ανώτερο όριο παραγωγής άνθρακα (74,3%) μπορεί να οριστεί για τη ζητούμενη και όχι την παραγόμενη ενέργεια. Όσον αφορά την επίλυση του προβλήματος της χρήσης φυσικού αερίου σε ένα μόνο μήνα και σε πολύ υψηλή ποσότητα, είναι δυνατή η μεταβολή του έκτου περιορισμού. Αυτό μπορεί να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε να ορίζει ότι η παραγωγή ενέργειας από φυσικό αέριο για ένα μήνα δεν ξεπερνάει τη ζήτηση ενέργειας από τη βιομηχανία για το μήνα αυτό. Οι αλλαγές στους περιορισμούς συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Μεταβολές στους περιορισμούς του αρχικού σεναρίου για το δεύτερο σενάριο.

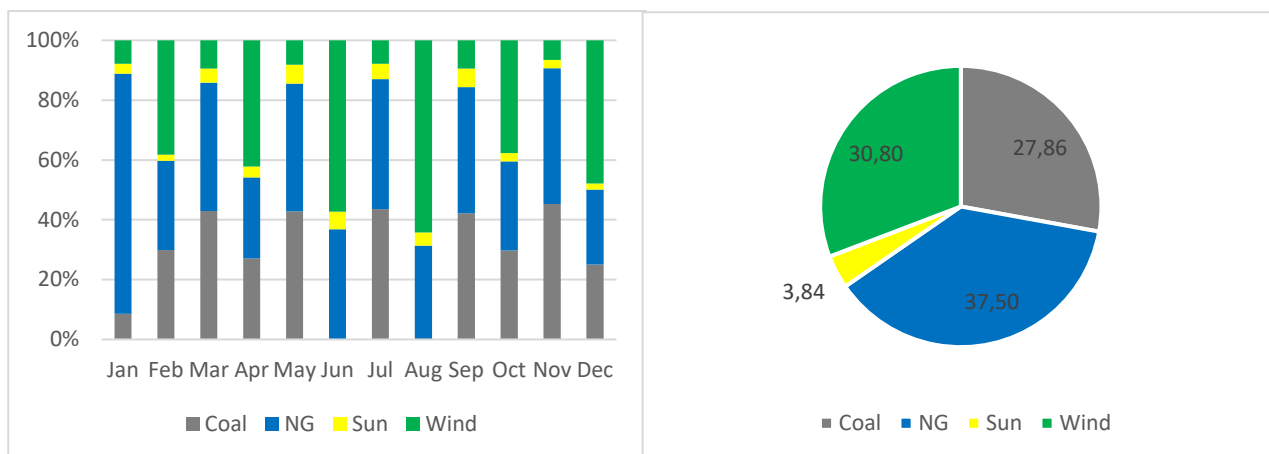
Αρχικοί περιορισμοί	Περιορισμοί δευτέρου σεναρίου
$\sum_{j=1}^{12} X_{1,j} \leq 0,743 \sum_{j=1}^{12} (X_{1,j} + X_{2,j} + X_{3,j} + X_{4,j})$	$\sum_{j=1}^{12} X_{1,j} \leq 0,743 \sum_{j=1}^{12} D_j$
$X_{2,j} \leq M \cdot Y_{2,j}$	$X_{2,j} \leq D_j \cdot Y_{2,j}$

Η βέλτιστη λύση που προέκυψε από την επίλυση του συγκεκριμένου σεναρίου, απεικονίζεται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Βέλτιστη λύση δεύτερου σεναρίου (kWh).

Πηγή	Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απρ.	Μάι.	Ιουν.
Άνθρακας	13.575,73	91.497,34	80.230,41	78.769,80	79.059,28	0,00
Φυσικό αέριο	126.238,29	91.497,34	80.230,41	78.769,80	79.059,28	65.404,64
Ηλιακή	5.238,75	6.239,25	8.677,50	10.489,50	11.633,25	10.518,00
Αιολική	12.356,56	116.841,54	17.663,24	122.837,97	15.018,52	101.811,92
Σύνολο	157.409,33	306.075,47	186.801,56	290.867,07	184.770,33	177.734,56
Ζήτηση	126.238,29	91.497,34	80.230,41	78.769,80	79.059,28	65.404,64
Πώληση	31.171,03	214.578,13	106.571,16	212.097,27	105.711,05	112.329,92
Πηγή	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπ.	Οκτ.	Νοε.	Δεκ.
Άνθρακας	81.674,41	0,00	57.883,07	84.665,65	86.217,61	59.436,78
Φυσικό αέριο	81.674,41	68.559,43	57.883,07	84.665,65	86.217,61	59.436,78
Ηλιακή	9.601,50	9.669,00	8.445,00	7.699,50	5.315,25	4.682,25
Αιολική	14.687,24	140.563,55	12.951,95	107.286,72	12.503,66	113.596,13
Σύνολο	187.637,56	218.791,98	137.163,09	284.317,52	190.254,13	237.151,94
Ζήτηση	81.674,41	68.559,43	57.883,07	84.665,65	86.217,61	59.436,78
Πώληση	105.963,15	150.232,55	79.280,02	199.651,87	104.036,52	177.715,16

Στο συγκεκριμένο σενάριο παράγονται ετησίως 2.558.974,54 kWh, με τη συνολική ζήτηση ενέργειας από τη βιομηχανία να ανέρχεται σε 959.636,71 kWh, δηλαδή παράγεται δύομιση περίπου φορές περισσότερη ενέργεια από την απαιτούμενη. Τα έσοδα της βιομηχανίας στην περίπτωση αυτή, ανέρχονται σε 2.220,30 €. Το ενεργειακό μίγμα ανά μήνα και σε ετήσια βάση απεικονίζεται στο Σχήμα 25.

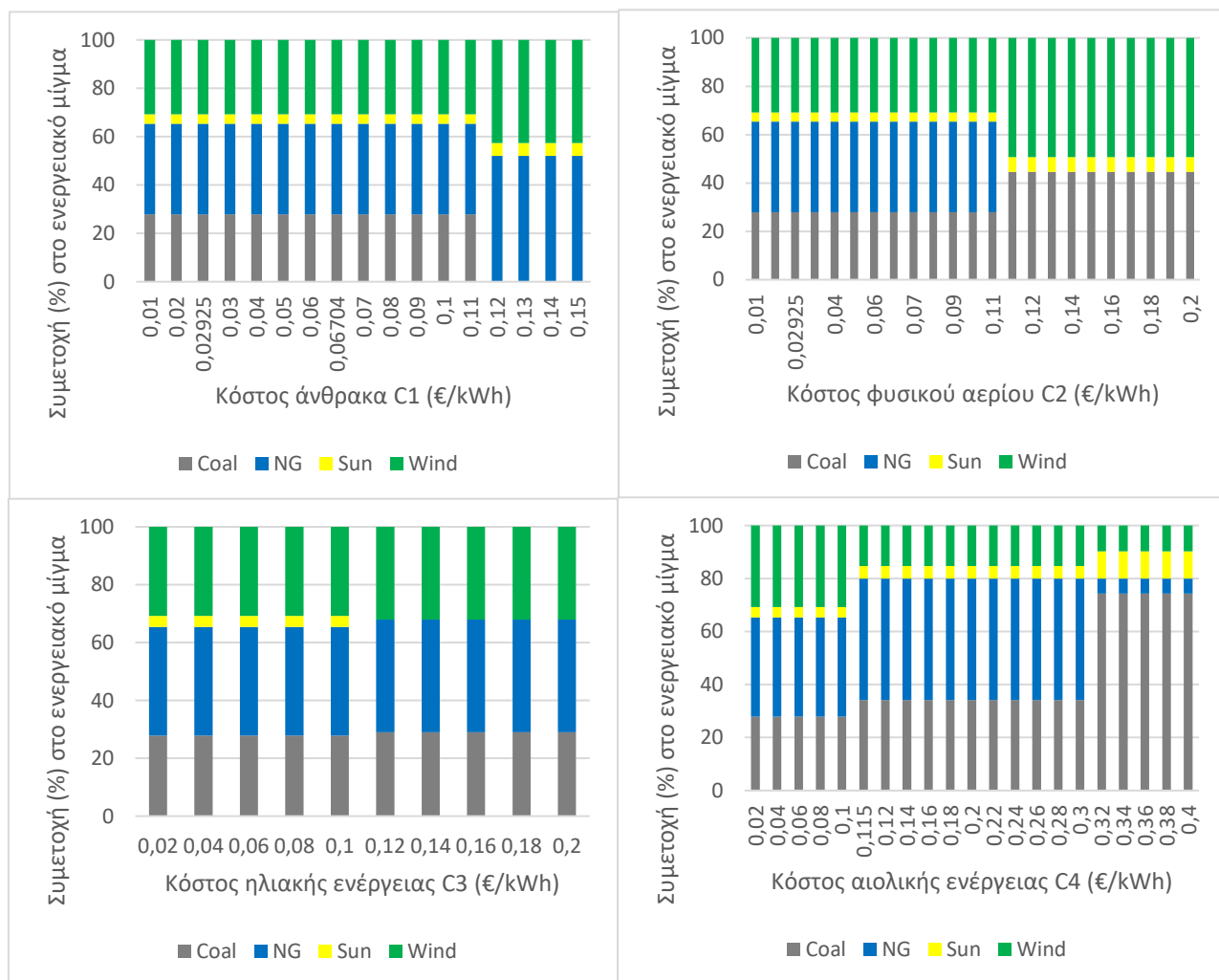


Σχήμα 25: Ενεργειακό μίγμα ανά μήνα (αριστερά) και ανά έτος (δεξιά) στο δεύτερο σενάριο.

Παρατηρείται ότι και σε αυτήν την περίπτωση, το φυσικό αέριο κατέχει το υψηλότερο ποσοστό στο ενεργειακό μίγμα (37,5%), στη δεύτερη θέση βρίσκεται η αιολική ενέργεια με 30,8% και ακολουθούν ο άνθρακας με 27,86% και η ηλιακή ενέργεια με 3,84%. Η χρήση φυσικού αερίου, αιολικής και ηλιακής ενέργειας επιλέγεται και για τους 12 μήνες του έτους, σε αντίθεση με τον άνθρακα, ο οποίος επιλέγεται να χρησιμοποιείται σε 10 μήνες. Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα ανέρχεται σε ποσοστό 34,64%, αρκετά ψηλότερα από το ελάχιστο ποσοστό που ορίζεται στους περιορισμούς (20%). Προκύπτει, επίσης ότι σε αντίθεση με το αρχικό σενάριο, οι ανάγκες της βιομηχανίας καλύπτονται από ένα συνδυασμό όλων των ενεργειακών πηγών. Μάλιστα, όπως αναφέρθηκε, υπάρχουν δύο μήνες (Ιούνιος και Αύγουστος) όπου δε χρησιμοποιείται καθόλου ο άνθρακας, λόγω της υψηλής δυναμικότητας ΑΠΕ τους μήνες αυτούς. Επιπλέον, υπάρχει καλύτερη κατανομή της χρήσης φυσικού αερίου, το οποίο χρησιμοποιείται σε μικρότερες ποσότητες σε όλη τη διάρκεια του έτους. Ωστόσο, τα έσοδα της βιομηχανίας από το συγκεκριμένο ενεργειακό μίγμα είναι αρκετά χαμηλότερα συγκριτικά με τα έσοδα του αρχικού σεναρίου, λόγω της αλλαγής του περιορισμού της ποσότητας φυσικού αερίου που μπορεί να παράγεται κάθε μήνα.

Ανάλυση ευαισθησίας δεύτερου σεναρίου

Όπως και στο αρχικό σενάριο, η ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνει χώρα σε δύο στάδια, μελετώντας τη μεταβολή του ενεργειακού μίγματος και των εσόδων της βιομηχανίας (τιμή αντικειμενικής συνάρτησης), όταν αλλάζουν οι διάφοροι παράμετροι. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα Σχήματα 26-31.

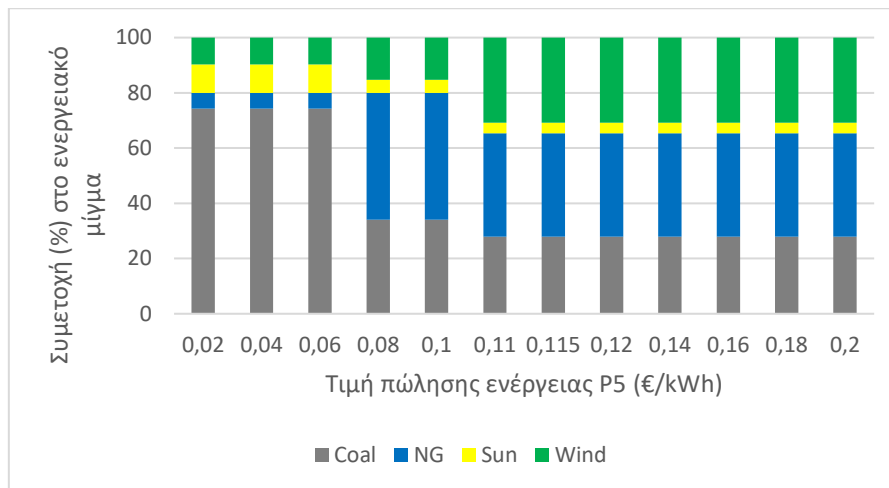


Σχήμα 26: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς το ενεργειακό μίγμα για το δεύτερο σενάριο.

Από το Σχήμα 26 προκύπτει ότι:

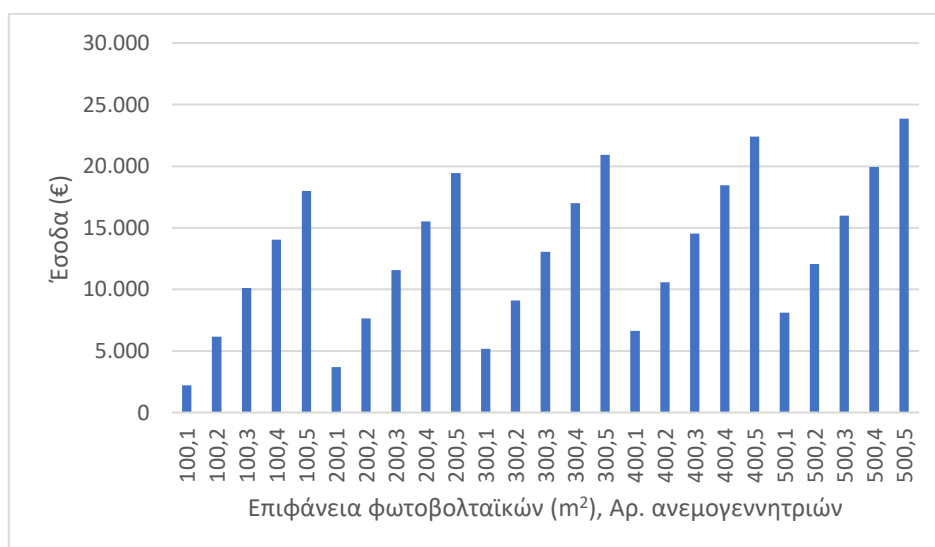
- ❖ Αν το κόστος του άνθρακα (C_1) είναι χαμηλότερο από 0,115 €/kWh (δηλαδή χαμηλότερο από τη τιμή πώλησης ενέργειας), τότε το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 27,86% άνθρακα, 37,5% φυσικό αέριο, 3,84% ηλιακή ενέργεια και 30,8% αιολική ενέργεια. Αν ξεπεραστεί η τιμή αυτή, τότε η χρήση άνθρακα παύει να είναι συμφέρουσα και το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 51,99% φυσικό αέριο 5,32% ηλιακή ενέργεια και 42,69% αιολική ενέργεια

- ❖ Αν το κόστος του φυσικού αερίου (C_2) είναι χαμηλότερο από 0,115 €/kWh, τότε το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 27,86% άνθρακα, 37,5% φυσικό αέριο, 3,84% ηλιακή ενέργεια και 30,8% αιολική ενέργεια. Πάνω από τη τιμή αυτή (δηλαδή πάνω από τη τιμή πώλησης ενέργειας), η χρήση φυσικού αερίου είναι μη συμφέρουσα, οπότε το ενεργειακό μίγμα γίνεται 44,58% άνθρακα, 6,14% ηλιακή ενέργεια και 49,28% αιολική ενέργεια
- ❖ Αν το κόστος της ηλιακής ενέργειας (C_3) είναι χαμηλότερο από την τιμή πώλησης ενέργειας (0,115 €/kWh), τότε το ενεργειακό μίγμα αποτελείται 27,86% άνθρακα, 37,5% φυσικό αέριο, 3,84% ηλιακή ενέργεια και 30,8% αιολική ενέργεια. Από τη συγκεκριμένη τιμή και πάνω, η ηλιακή ενέργεια δεν είναι συμφέρουσα για παραγωγή και συνεπώς το ενεργειακό μίγμα γίνεται 28,98% άνθρακα, 39% φυσικό αέριο και 32,03% αιολική ενέργεια
- ❖ Για κόστος αιολικής ενέργειας (C_4) κάτω από την τιμή πώλησης ενέργειας (0,115 €/kWh), το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 27,86% άνθρακα, 37,5% φυσικό αέριο, 3,84% ηλιακή ενέργεια και 30,8% αιολική ενέργεια. Ξεπερνώντας αυτή τη τιμή και έως τα 0,3 €/kWh, στο ενεργειακό μίγμα συμμετέχουν κατά 34,10% ο άνθρακα, 45,9% το φυσικό αέριο, 4,7% η ηλιακή ενέργεια και 15,3% η αιολική ενέργεια. Πάνω από τη τιμή αυτή, το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 74,3% άνθρακα, 5,7% φυσικό αέριο, 10,23% ηλιακή ενέργεια και 9,77% αιολική ενέργεια. Είναι χαρακτηριστική η αύξηση της συμμετοχής του άνθρακα με ταυτόχρονη μείωση της χρήσης φυσικού αερίου, που προκαλείται από τη μείωση της παραγωγής αιολικής ενέργειας, λόγω αύξησης στο κόστος της. Παρατηρείται επίσης, ότι όσο κι αν αυξηθεί η τιμή της αιολικής ενέργειας από εδώ και πέρα, το ποσοστό της στο ενεργειακό μίγμα δε μηδενίζεται, διότι υπάρχει το ελάχιστο ποσοστό ενσωμάτωσης ΑΠΕ, το οποίο δε μπορεί να καλυφθεί μόνο από τα φωτοβολταϊκά.



Σχήμα 27: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς το ενεργειακό μίγμα για το δεύτερο σενάριο.

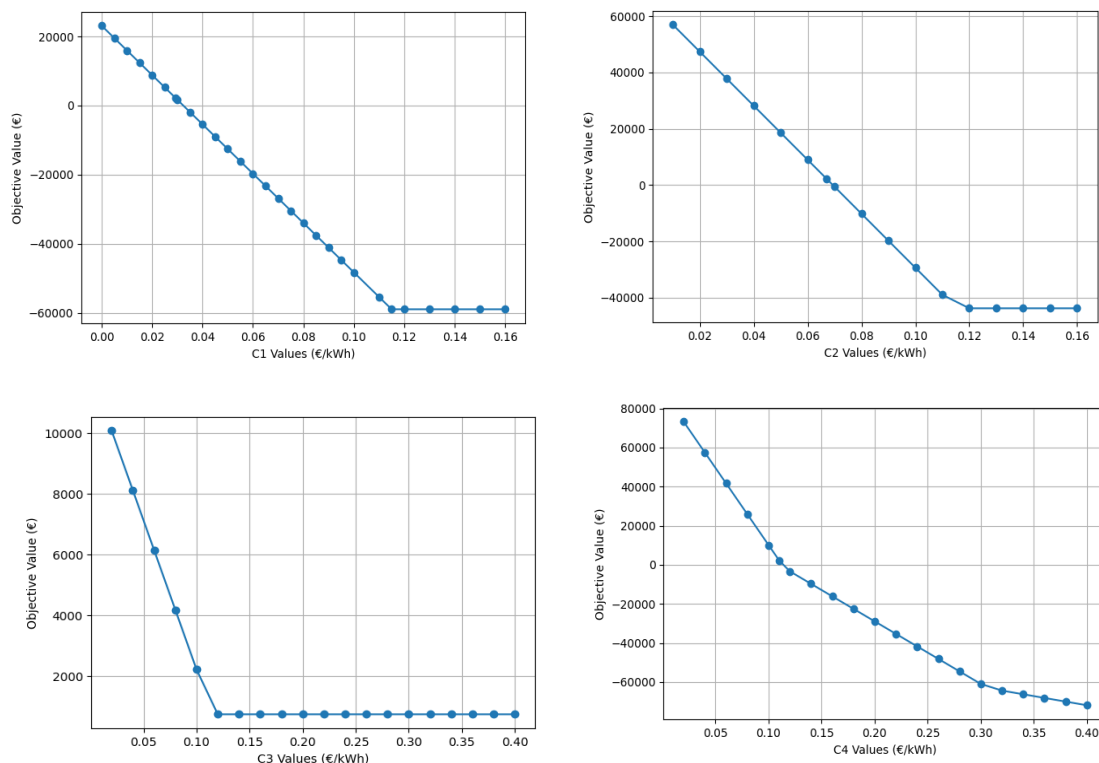
Από το Σχήμα 27 παρατηρείται ότι όσο η τιμή πώλησης ενέργειας (P_5) είναι χαμηλότερη ή ίση με 0,06 €/kWh, τότε το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 74,3% άνθρακα, 5,7% φυσικό αέριο, 10,23% ηλιακή ενέργεια και 9,77% αιολική ενέργεια. Για το διάστημα μεταξύ 0,06-0,11 €/kWh το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 34,10% άνθρακα, 45,9% φυσικό αέριο, 4,7% ηλιακή ενέργεια και 15,3% αιολική ενέργεια. Από 0,11 €/kWh και πάνω (δηλαδή πάνω από το κόστος αιολικής ενέργειας), αυξάνεται η δυναμικότητα πώλησης (συμφέρει να παράγεται επιπλέον αιολική ενέργεια) και το ενεργειακό μίγμα διαμορφώνεται σε 27,86% άνθρακα, 37,5% φυσικό αέριο, 3,84% ηλιακή ενέργεια και 30,8% αιολική ενέργεια.



Σχήμα 28: Επίδραση της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών και του αριθμού των ανεμογεννητριών στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στο δεύτερο σενάριο.

Από το Σχήμα 28 προκύπτει ότι, όπως και στο αρχικό σενάριο, όσο αυξάνεται η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών (A) και ο αριθμός των ανεμογεννητριών (N), τόσο

αυξάνονται και τα έσοδα της βιομηχανίας, διότι αυξάνεται η δυναμικότητα ΑΠΕ που μπορεί να παραχθεί και να πωληθεί στο τοπικό δίκτυο. Τα υψηλότερα έσοδα προκύπτουν για το μέγιστο συνδυασμό $A - N$, δηλαδή για $A = 500 m^2$ και $N = 5$ ανεμογεννήτριες.



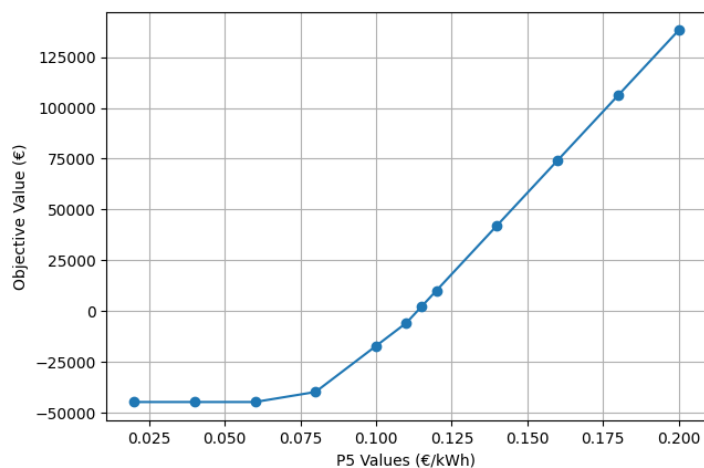
Σχήμα 29: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς τα έσοδα για το δεύτερο σενάριο.

Από την ανάλυση του Σχήματος 29 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος προμήθειας άνθρακα (C_1), τόσο μειώνονται τα έσοδα της βιομηχανίας. Αύξηση πάνω από την τιμή 0,03 €/kWh έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ζημίας για την επιχείρηση. Αύξηση πάνω από την τιμή 0,115 €/kWh δεν αυξάνει περαιτέρω τις ζημίες, διότι καθιστά το συγκεκριμένο καύσιμο ασύμφορο για χρήση (δεν χρησιμοποιείται καθόλου άνθρακας)
- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος προμήθειας φυσικού αερίου (C_2), μειώνονται τα έσοδα της βιομηχανίας. Αύξηση πάνω από την τιμή 0,07 €/kWh έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ζημίας για την επιχείρηση. Επιπλέον, αύξηση πάνω από 0,115 €/kWh, δε μειώνει περαιτέρω τα έσοδα, διότι καθιστά το συγκεκριμένο καύσιμο ασύμφορο για χρήση (δεν χρησιμοποιείται καθόλου φυσικό αέριο)
- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά (C_3), μέχρι την τιμή 0,115 €/kWh, τόσο μειώνονται τα έσοδα της βιομηχανίας. Αύξηση πάνω

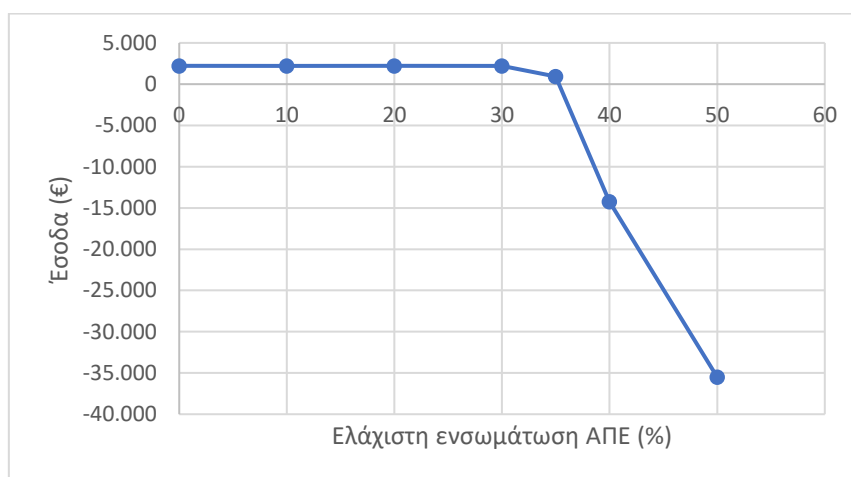
από τη συγκεκριμένη τιμή, δε μειώνει περαιτέρω τα έσοδα, διότι καθιστά τη συγκεκριμένη πηγή ασύμφορη για χρήση (δεν παράγεται καθόλου ηλιακή ενέργεια)

- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος παραγωγής ενέργειας από ανεμογεννήτριες (C_4), μειώνονται τα έσοδα της βιομηχανίας. Αύξηση πάνω από την τιμή 0,115 €/kWh έχει ως αποτέλεσμα τη πρόκληση ζημίας για την επιχείρηση.



Σχήμα 30: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς τα έσοδα για το δεύτερο σενάριο.

Από το Σχήμα 30 προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η τιμή πώλησης ενέργειας, τόσο αυξάνονται τα έσοδα για την επιχείρηση. Η οριακή τιμή για την οποία προκύπτουν μηδενικά έσοδα είναι 0,11 €/kWh.



Σχήμα 31: Ανάλυση ευαισθησίας ελάχιστου ποσοστού ενσωμάτωσης ΑΠΕ ως προς τα έσοδα για το δεύτερο σενάριο.

Από το Σχήμα 31 συμπεραίνεται ότι όσο το ελάχιστο ποσοστό ενσωμάτωσης ΑΠΕ κυμαίνεται μεταξύ 0-30%, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης δε μεταβάλλεται. Για ποσοστό πάνω από 35% προκαλούνται ζημίες στην επιχείρηση.

5.3 Τρίτο σενάριο

Στο συγκεκριμένο σενάριο εξετάζεται η περίπτωση κάλυψη της ζήτησης της βιομηχανίας χάλυβα μόνο από συμβατικά καύσιμα (άνθρακα και φυσικό αέριο) και η διάθεση της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ μόνο προς πώληση. Οι μεταβολές στους περιορισμούς που λαμβάνουν χώρα για το σενάριο αυτό (διατηρούνται οι περιορισμοί από το δεύτερο σενάριο) παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Μεταβολές στους περιορισμούς του αρχικού σεναρίου για το τρίτο σενάριο.

Αρχικοί περιορισμοί	Περιορισμοί τρίτου σεναρίου
$\sum_{j=1}^{12} X_{1,j} \leq 0,743 \sum_{j=1}^{12} (X_{1,j} + X_{2,j} + X_{3,j} + X_{4,j})$	$\sum_{j=1}^{12} X_{1,j} \leq 0,743 \sum_{j=1}^{12} D_j$
$X_{2,j} \leq M \cdot Y_{2,j}$	$X_{2,j} \leq D_j \cdot Y_{2,j}$
-	$X_{1,j} + X_{2,j} \leq D_j$

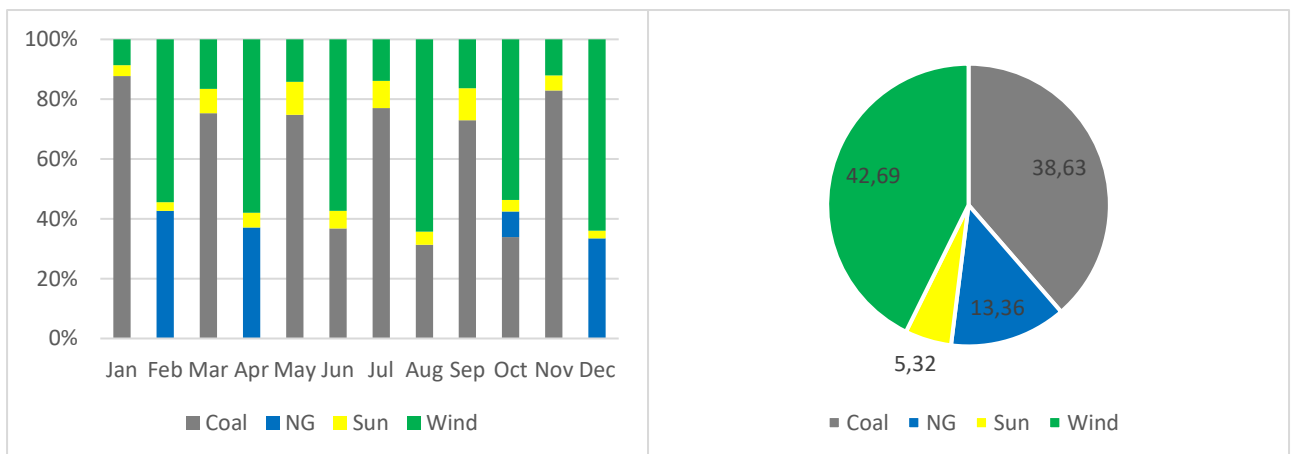
Η βέλτιστη λύση που προέκυψε από την επίλυση του συγκεκριμένου σεναρίου παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Βέλτιστη λύση τρίτου σεναρίου (kWh).

Πηγή	Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απρ.	Μάι.	Ιουν.
Ανθρακας	126.238,29	0,00	80.230,41	0,00	79.059,28	65.404,64
Φυσικό αέριο	0,00	91.497,34	0,00	78.769,80	0,00	0,00
Ηλιακή	5.238,75	6.239,25	8.677,50	10.489,50	11.633,25	10.518,00
Αιολική	12.356,56	116.841,54	17.663,24	122.837,97	15.018,52	101.811,92
Σύνολο	143.833,60	214.578,13	106.571,15	212.097,27	105.711,05	177.734,56
Ζήτηση	126.238,29	91.497,34	80.230,41	78.769,80	79.059,28	65.404,64
Πώληση	17.595,31	123.080,79	26.340,74	133.327,47	26.651,77	112.329,92

Πηγή	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπ.	Οκτ.	Νοε.	Δεκ.
Άνθρακας	81.674,41	68.559,43	57.883,07	67.742,94	86.217,61	0,00
Φυσικό αέριο	0,00	0,00	0,00	16.922,71	0,00	59.436,78
Ηλιακή	9.601,50	9.669,00	8.445,00	7.699,50	5.315,25	4.682,25
Αιολική	14.687,24	140.563,55	12.951,95	107.286,72	12.503,66	113.596,13
Σύνολο	105.963,15	218.791,98	79.280,02	199.651,87	104.036,52	177.715,16
Ζήτηση	81.674,41	68.559,43	57.883,07	84.665,65	86.217,61	59.436,78
Πώληση	24.288,74	150.232,55	21.396,95	114.986,22	17.818,91	118.278,38

Στο συγκεκριμένο σενάριο παράγονται ετησίως 1.845.964,46 kWh, με τη συνολική ζήτηση ενέργειας από τη βιομηχανία να ανέρχεται σε 959.636,71 kWh, δηλαδή παράγεται η διπλάσια περίπου ενέργεια από την απαιτούμενη. Στην περίπτωση αυτή, η βιομηχανία δεν παρουσιάζει έσοδα, αλλά ζημιές ίσες με 31.975,67 €. Το ενεργειακό μίγμα ανά μήνα και σε ετήσια βάση απεικονίζεται στο Σχήμα 32.



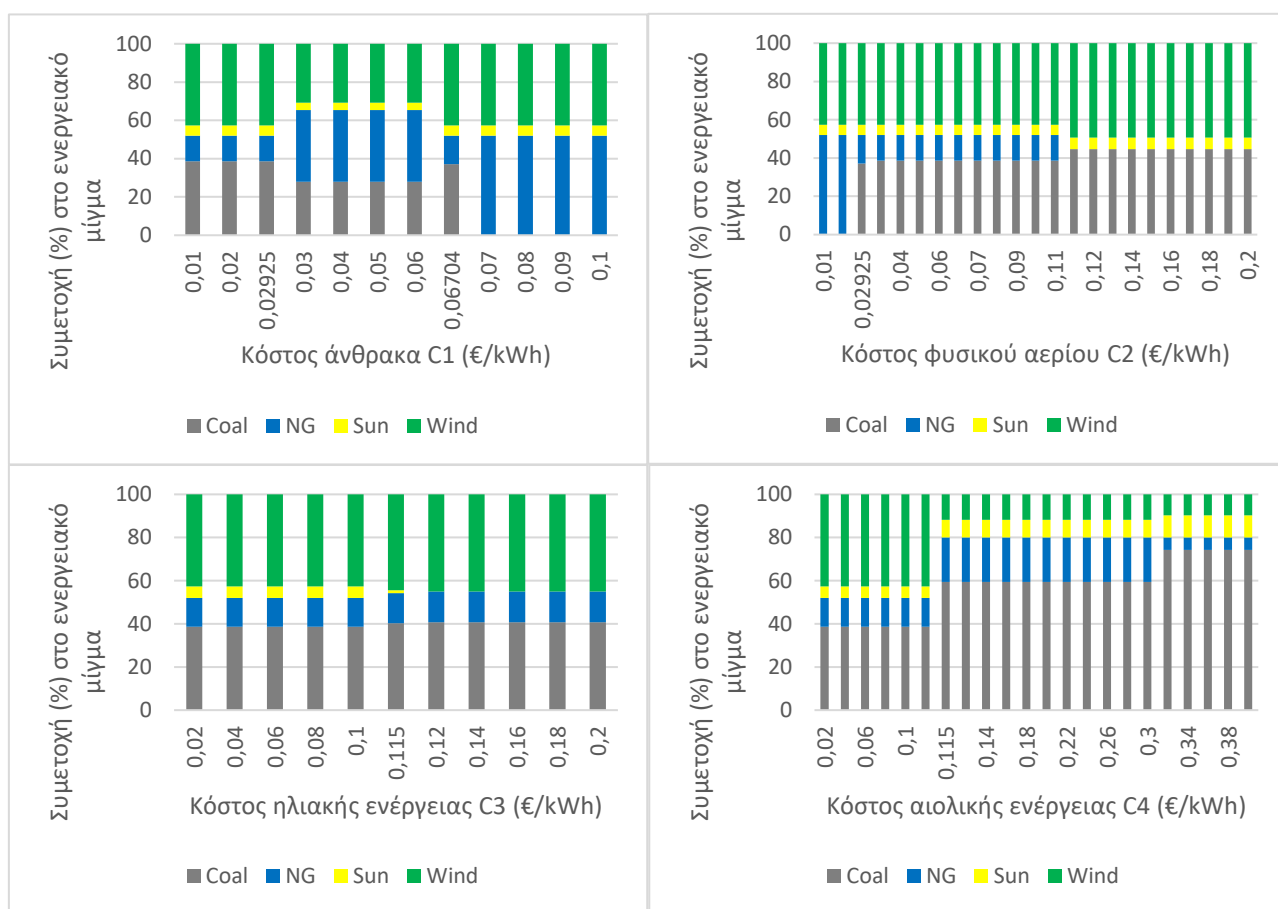
Σχήμα 32: Ενεργειακό μίγμα ανά μήνα (αριστερά) και ανά έτος (δεξιά) στο τρίτο σενάριο.

Παρατηρείται ότι στο συγκεκριμένο σενάριο, η αιολική ενέργεια κατέχει το υψηλότερο ποσοστό στο ενεργειακό μίγμα (42,69%), στη δεύτερη θέση βρίσκεται ο άνθρακας με 38,63% και ακολουθούν το φυσικό αέριο με 13,36% και η ηλιακή ενέργεια με 5,32%. Η χρήση αιολικής και ηλιακής ενέργειας επιλέγεται και για τους 12 μήνες του έτους, σε αντίθεση με τον άνθρακα και το φυσικό αέριο, όπου χρησιμοποιούνται σε 9 και 4 μήνες, αντίστοιχα. Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ καταλαμβάνει σχεδόν το μισό ενεργειακό μίγμα, ανερχόμενη σε ποσοστό 48,01%. Όπως ορίστηκε στους περιορισμούς, οι ανάγκες της βιομηχανίας καλύπτονται από ένα συνδυασμό άνθρακα-φυσικού αερίου, ενώ η ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ πωλείται στο τοπικό δίκτυο. Όμως, η μεταβολή αυτή έχει

σημαντική επίδραση στα έσοδα της επιχείρησης. Το ενεργειακό μίγμα στο συγκεκριμένο σενάριο, αν και είναι το περισσότερο «πράσινο», δεν παράγει κέρδη για τη βιομηχανία-αντίθετα προκαλεί ζημιές.

Ανάλυση ευαισθησίας τρίτου σεναρίου

Όπως και προηγουμένως, η ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνει χώρα σε δύο στάδια, μελετώντας τη μεταβολή του ενεργειακού μίγματος και των εσόδων της βιομηχανίας (τιμή αντικειμενικής συνάρτησης), όταν αλλάζουν οι διάφοροι παράμετροι. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα Σχήματα 33-38.



Σχήμα 33: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς το ενεργειακό μίγμα για το τρίτο σενάριο.

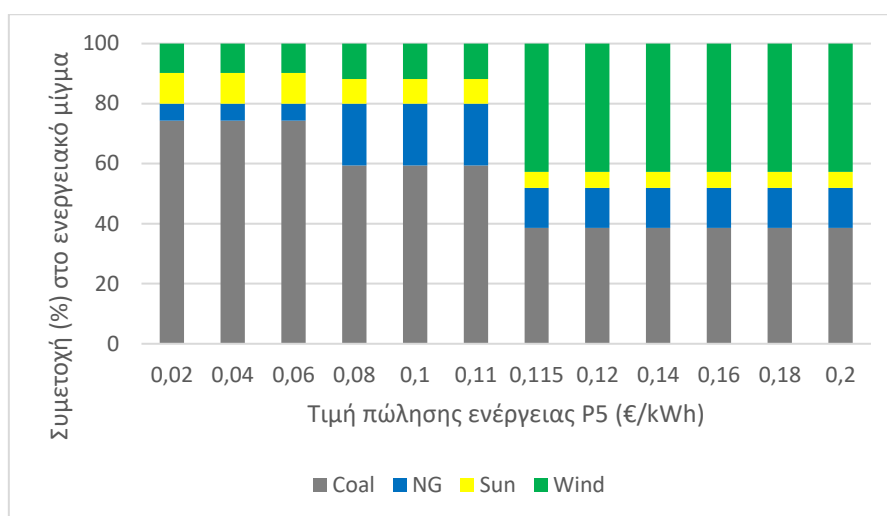
Από το Σχήμα 33 προκύπτει ότι:

- ❖ Αν το κόστος του άνθρακα (C_1) είναι χαμηλότερο ή ίσο με 0,02925 €/kWh, τότε το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 38,63% άνθρακα, 13,36% φυσικό αέριο, 5,32% ηλιακή ενέργεια και 42,69% αιολική ενέργεια. Περαιτέρω αύξηση του κόστους άνθρακα μέχρι τα 0,06704 €/kWh (κόστος φυσικού αερίου), οδηγεί σε ενεργειακό μίγμα με 27,86% άνθρακα, 37,5% φυσικό αέριο, 3,84% ηλιακή ενέργεια και 30,8% αιολική ενέργεια. Στην περίπτωση που το κόστος άνθρακα

εξισωθεί με το κόστος του φυσικού αερίου, τότε λαμβάνεται μίγμα αποτελούμενο από 37,09% άνθρακα, 14,09% φυσικό αέριο 5,32% ηλιακή ενέργεια και 42,69% αιολική ενέργεια. Αν ξεπεραστεί η τιμή αυτή, τότε η χρήση άνθρακα παύει να είναι συμφέρουσα και το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 51,99% φυσικό αέριο 5,32% ηλιακή ενέργεια και 42,69% αιολική ενέργεια

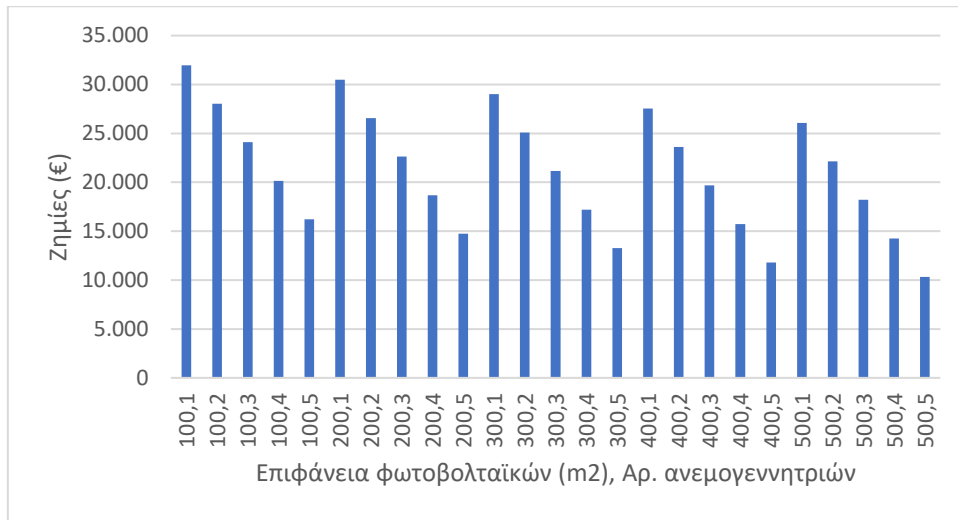
- ❖ Αν το κόστος του φυσικού αερίου (C_2) είναι χαμηλότερο από το κόστος του άνθρακα (δηλαδή χαμηλότερο από 0,02925 €/kWh), τότε το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 51,99% φυσικό αέριο, 5,32% ηλιακή ενέργεια και 42,69% αιολική ενέργεια (δε χρησιμοποιείται καθόλου ο άνθρακας). Για τιμή φυσικού αερίου υψηλότερη από την τιμή του άνθρακα και χαμηλότερη από τη τιμή πώλησης ενέργειας (0,115 €/kWh), το ενεργειακό μίγμα είναι 38,63% άνθρακας, 13,36% φυσικό αέριο, 5,32% ηλιακή ενέργεια και 42,69% αιολική ενέργεια. Αν η τιμή ξεπεράσει την αντίστοιχη της πώλησης ενέργειας, τότε η χρήση φυσικού αερίου είναι μη συμφέρουσα και το ενεργειακό μίγμα γίνεται 44,58% άνθρακας, 6,14% ηλιακή ενέργεια και 49,28% αιολική ενέργεια
- ❖ Αν το κόστος της ηλιακής ενέργειας (C_3) είναι χαμηλότερο από την τιμή πώλησης ενέργειας (0,115 €/kWh), τότε το ενεργειακό μίγμα αποτελείται 38,63% άνθρακα, 13,36% φυσικό αέριο, 5,32% ηλιακή ενέργεια και 42,69% αιολική ενέργεια. Στην περίπτωση που η τιμή της ηλιακής ενέργειας ισούται ακριβώς με την τιμή πώλησης, λαμβάνεται ενεργειακό μίγμα αποτελούμενο από 40,25% άνθρακα, 13,92% φυσικό αέριο, 1,33% ηλιακή ενέργεια και 44,49% αιολική ενέργεια. Περαιτέρω αύξηση πάνω από τη συγκεκριμένη τιμή έχει ως αποτέλεσμα να μη συμφέρει η χρήση της ηλιακής ενέργειας, με το ενεργειακό μίγμα να γίνεται 40,8% άνθρακας, 13,92% φυσικό αέριο και 45,09% αιολική ενέργεια
- ❖ Όσο το κόστος της αιολικής ενέργειας (C_4) είναι χαμηλότερο από την τιμή πώλησης ενέργειας (0,115 €/kWh), το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 38,63% άνθρακα, 13,36% φυσικό αέριο, 5,32% ηλιακή ενέργεια και 42,69% αιολική ενέργεια. Πάνω από αυτή τη τιμή και έως τα 0,3 €/kWh, στο ενεργειακό μίγμα συμμετέχουν κατά 59,44% ο άνθρακας, 20,56% το φυσικό αέριο, 8,19% η ηλιακή ενέργεια και η 11,81% αιολική ενέργεια. Περαιτέρω αύξηση οδηγεί το ενεργειακό μίγμα να αποτελείται από 74,3% άνθρακα, 5,7% φυσικό αέριο, 10,23% ηλιακή ενέργεια και 9,77% αιολική ενέργεια. Όπως και στο προηγούμενο σενάριο, παρατηρείται αύξηση της συμμετοχής του άνθρακα και ταυτόχρονη μείωση της χρήσης φυσικού αερίου εξαιτίας της μείωσης της παραγωγής αιολικής ενέργειας, λόγω αύξησης στο κόστος της. Παρατηρείται επίσης, ότι όσο κι αν αυξηθεί η τιμή

της αιολικής ενέργειας από εδώ και πέρα, το ποσοστό της στο ενεργειακό μίγμα δε μηδενίζεται, διότι υπάρχει το ελάχιστο ποσοστό ενσωμάτωσης ΑΠΕ, το οποίο δε μπορεί να καλυφθεί μόνο από τη χρήση ηλιακής ενέργειας.



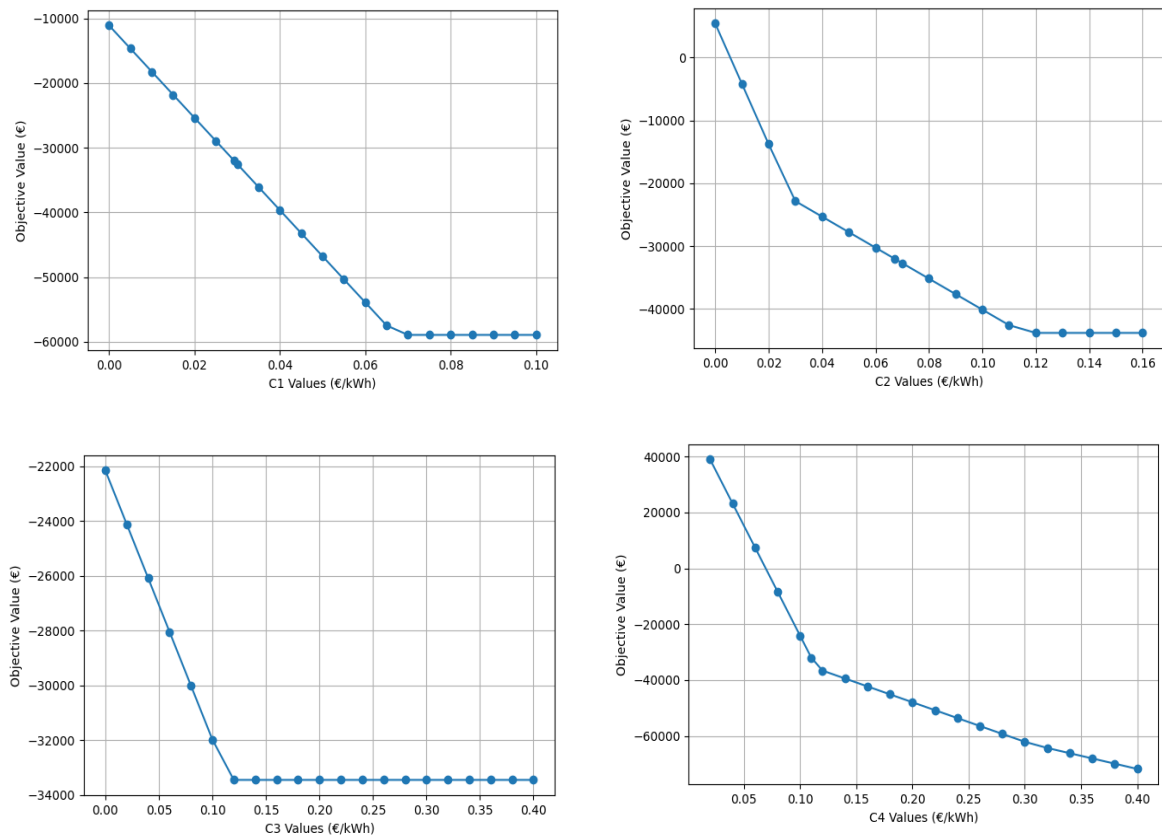
Σχήμα 34: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς το ενεργειακό μίγμα για το τρίτο σενάριο.

Από το Σχήμα 34 παρατηρείται ότι όσο η τιμή πώλησης ενέργειας (P_5) είναι χαμηλότερη ή ίση με 0,06 €/kWh, τότε το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 74,3% άνθρακα, 5,7% φυσικό αέριο, 10,23% ηλιακή ενέργεια και 9,77% αιολική ενέργεια. Για το διάστημα μεταξύ 0,06-0,11 €/kWh το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 59,44% άνθρακα, 20,56% φυσικό αέριο, 8,19% ηλιακή ενέργεια και 11,81% αιολική ενέργεια. Αύξηση πάνω από 0,11 €/kWh (δηλαδή πάνω από το κόστος αιολικής ενέργειας), ωφελεί την πώληση ενέργειας (συμφέρει να παράγεται επιπλέον αιολική ενέργεια) και το ενεργειακό μίγμα διαμορφώνεται σε 38,63% άνθρακα, 13,36% φυσικό αέριο, 5,32% ηλιακή ενέργεια και 42,69% αιολική ενέργεια.



Σχήμα 35: Επίδραση της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών και του αριθμού των ανεμογεννητριών στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στο τρίτο σενάριο.

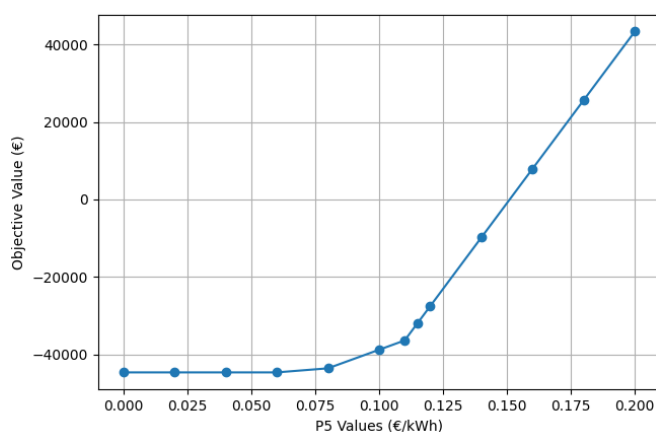
Από το Σχήμα 35 προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών (A) και ο αριθμός των ανεμογεννητριών (N), τόσο μειώνονται οι ζημίες της βιομηχανίας, διότι αυξάνεται η δυναμικότητα ΑΠΕ που μπορεί να παραχθεί και να πωληθεί στο τοπικό δίκτυο. Ωστόσο, ακόμα και για το μέγιστο συνδυασμό $A - N$, δηλαδή για $A = 500 \text{ m}^2$ και $N = 5$ ανεμογεννήτριες, δεν προκύπτουν κέρδη για την επιχείρηση.



Σχήμα 36: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς τα έσοδα για το τρίτο σενάριο.

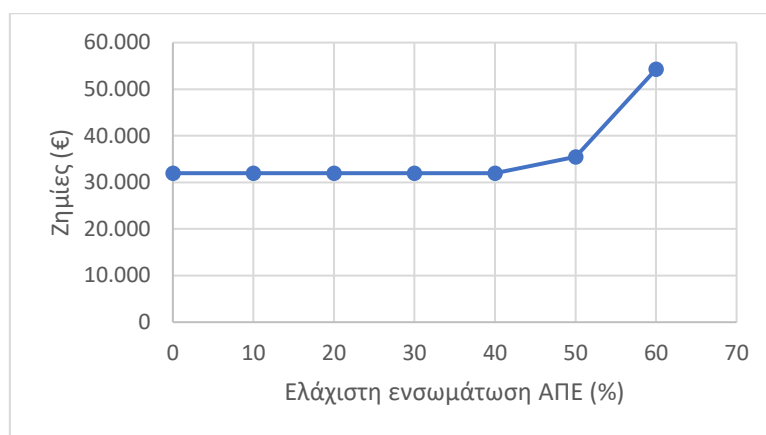
Από την ανάλυση του Σχήματος 36 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος προμήθειας άνθρακα (C_1), τόσο αυξάνονται οι ζημίες της βιομηχανίας. Ακόμα και στην περίπτωση που το καύσιμο αυτό έχει μηδενική τιμή, προκύπτει ζημία για την επιχείρηση, καθώς ορίστηκε στους περιορισμούς ανώτατο ποσοστό χρήσης άνθρακα. Αύξηση πάνω από την τιμή 0,066 €/kWh δεν αυξάνει περαιτέρω τις ζημίες, διότι καθιστά το συγκεκριμένο καύσιμο ασύμφορο για χρήση (δεν χρησιμοποιείται καθόλου άνθρακας)
- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος προμήθειας φυσικού αερίου (C_2), τόσο αυξάνονται οι ζημίες της βιομηχανίας. Η οριακή τιμή κάτω από την οποία προκύπτουν έσοδα είναι 0,005 €/kWh. Επιπλέον, αύξηση πάνω από 0,115 €/kWh, δεν αυξάνει περαιτέρω τις ζημίες, διότι καθιστά το συγκεκριμένο καύσιμο ασύμφορο για χρήση (δεν χρησιμοποιείται καθόλου φυσικό αέριο)
- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά (C_3), τόσο αυξάνονται οι ζημίες της βιομηχανίας. Αύξηση πάνω από 0,115 €/kWh, δεν αυξάνει περαιτέρω τις ζημίες, διότι καθιστά τη συγκεκριμένη πηγή ασύμφορη για χρήση (δεν παράγεται καθόλου ηλιακή ενέργεια)
- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος παραγωγής ενέργειας από ανεμογεννήτριες (C_4), τόσο αυξάνονται οι ζημίες της βιομηχανίας. Η οριακή τιμή κάτω από την οποία προκύπτουν έσοδα είναι 0,07 €/kWh.



Σχήμα 37: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς τα έσοδα για το τρίτο σενάριο.

Από το Σχήμα 37 προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η τιμή πώλησης ενέργειας (P_5), τόσο αυξάνονται τα έσοδα για την επιχείρηση. Η οριακή τιμή για την οποία προκύπτουν μηδενικά έσοδα είναι 0,15 €/kWh.



Σχήμα 38: Ανάλυση ευαισθησίας ελάχιστου ποσοστού ενσωμάτωσης ΑΠΕ ως προς τα έσοδα για το τρίτο σενάριο.

Από το Σχήμα 38 συμπεραίνεται ότι όσο το ελάχιστο ποσοστό ενσωμάτωσης ΑΠΕ κυμαίνεται μεταξύ 0-40%, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης δε μεταβάλλεται και στην επιχείρηση δημιουργούνται ζημίες. Για ποσοστό πάνω από 40% η ζημίες της βιομηχανίας συνεχίζουν να αυξάνονται περαιτέρω.

5.4 Τέταρτο σενάριο

Ως τελευταίο σενάριο αξίζει να μελετηθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μετατροπή του μοντέλου από MILP σε απλού γραμμικού προγραμματισμού (LP). Αυτό μπορεί να συμβεί με αφαίρεση όλων των δυαδικών μεταβλητών από τους περιορισμούς. Οι αλλαγές που πραγματοποιούνται για αυτό το σενάριο παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6: Μεταβολές στους περιορισμούς του αρχικού σεναρίου για το τέταρτο σενάριο.

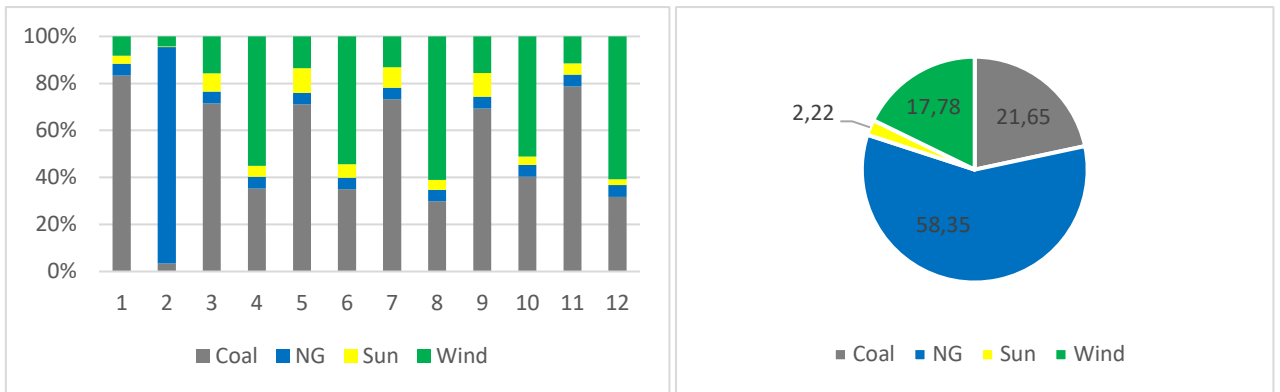
Αρχικοί περιορισμοί	Περιορισμοί τέταρτου σεναρίου
$X_{1,j} \leq D_j \cdot Y_{1,j}$	$X_{1,j} \leq D_j$
$X_{2,j} + M(1 - Y_{2,j}) \geq 0,05 \cdot (X_{1,j} + X_{2,j} + X_{3,j} + X_{4,j})$	$X_{2,j} \geq 0,05 \cdot (X_{1,j} + X_{2,j} + X_{3,j} + X_{4,j})$
$X_{2,j} \leq M \cdot Y_{2,j}$	-
$X_{3,j} \leq A \cdot \eta \cdot SI_j \cdot Y_{3,j}$	$X_{3,j} \leq A \cdot \eta \cdot SI_j$
$X_{4,j} \leq 0,36 \cdot N \cdot C_P \cdot \rho_{air} \cdot \pi R^2 \cdot U_j^3 \cdot Y_{4,j}$	$X_{4,j} \leq 0,36 \cdot N \cdot C_P \cdot \rho_{air} \cdot \pi R^2 \cdot U_j^3$
$X_{5,j} \leq M \cdot Y_{5,j}$	-

Η βέλτιστη λύση που προέκυψε από την επίλυση του συγκεκριμένου σεναρίου παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7: Βέλτιστη λύση τέταρτου σεναρίου (kWh).

Πηγή	Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απρ.	Μάι.	Ιουν.
Άνθρακας	126.238,29	91.497,34	80.230,41	78.769,80	79.059,28	65.404,64
Φυσικό αέριο	7.570,19	2.499.811,90	5.609,01	11.163,01	5.563,74	9.354,45
Ηλιακή	5.238,75	6.239,25	8.677,50	10.489,50	11.633,25	10.518,00
Αιολική	12.356,56	116.841,54	17.663,24	122.837,97	15.018,52	101.811,92
Σύνολο	126.238,29	91.497,34	80.230,41	78.769,80	79.059,28	65.404,64
Ζήτηση	126.238,29	91.497,34	80.230,41	78.769,80	79.059,28	65.404,64
Πώληση	25.165,50	2.622.892,60	31.949,75	144.490,48	32.215,51	121.684,37
Πηγή	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπ.	Οκτ.	Νοε.	Δεκ.
Άνθρακας	81.674,41	68.559,43	57.883,07	84.665,65	86.217,61	59.436,78
Φυσικό αέριο	5.577,01	11.515,37	4.172,63	10.507,99	5.475,61	9.353,43
Ηλιακή	9.601,50	9.669,00	8.445,00	7.699,50	5.315,25	4.682,25
Αιολική	14.687,24	140.563,55	12.951,95	107.286,72	12.503,66	113.596,13
Σύνολο	111.540,16	230.307,35	83.452,65	210.159,86	109.512,13	187.068,59
Ζήτηση	81.674,41	68.559,43	57.883,07	84.665,65	86.217,61	59.436,78
Πώληση	29.865,75	161.747,92	25.569,59	125.494,21	23.294,51	127.631,81

Στο σενάριο αυτό παράγονται ετησίως 4.431.638,76 kWh, με τη συνολική ζήτηση ενέργειας από τη βιομηχανία να ανέρχεται σε 959.636,71 kWh, δηλαδή παράγεται η πενταπλάσια περίπου ενέργεια από την απαιτούμενη. Τα έσοδα της βιομηχανίας στην περίπτωση αυτή, ανέρχονται σε 101.353,29 €. Τα αποτελέσματα αυτά ταυτίζονται σε πολύ υψηλό βαθμό με τα αποτελέσματα του αρχικού σεναρίου. Το ενεργειακό μίγμα ανά μήνα και σε ετήσια βάση απεικονίζεται στο Σχήμα 39.

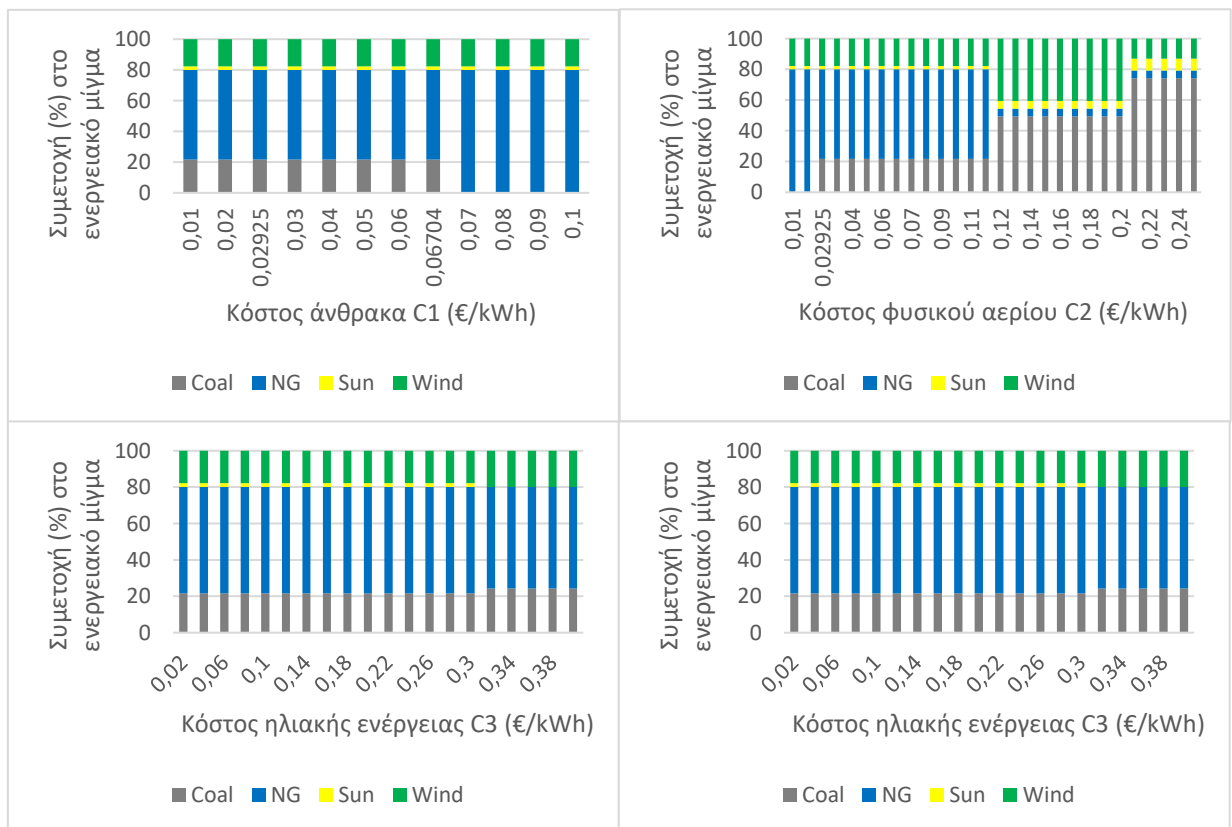


Σχήμα 39: Ενεργειακό μίγμα ανά μήνα (αριστερά) και ανά έτος (δεξιά) στο τέταρτο σενάριο.

Παρατηρείται ότι το ετήσιο ενεργειακό μίγμα που προκύπτει είναι ίδιο με αυτό στο αρχικό σενάριο. Ωστόσο, το μηνιαίο ενεργειακό μίγμα έχει διαφοροποίηση ως προς την κατανομή του φυσικού αερίου (χρησιμοποιείται κάθε μήνα), διότι έτσι ορίστηκε στους περιορισμούς με την κατάργηση των δυαδικών μεταβλητών.

Ανάλυση ευαισθησίας τέταρτου σεναρίου

Με την ίδια προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε παραπάνω, η ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνει χώρα σε δύο στάδια, μελετώντας τη μεταβολή του ενεργειακού μίγματος και των εσόδων της βιομηχανίας (τιμή αντικειμενικής συνάρτησης), όταν αλλάζουν οι διάφοροι παράμετροι. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα Σχήματα 40-45,

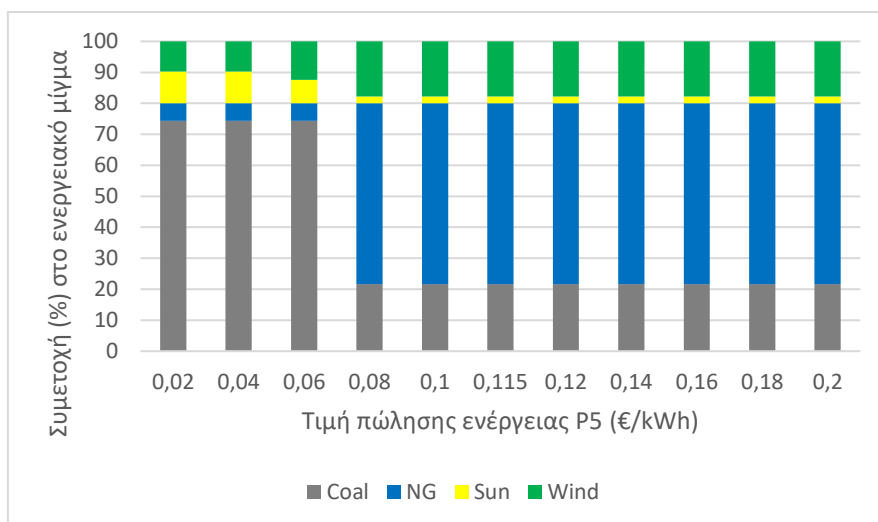


Σχήμα 40: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς το ενεργειακό μίγμα για το τέταρτο σενάριο.

Από το Σχήμα 40 προκύπτει ότι:

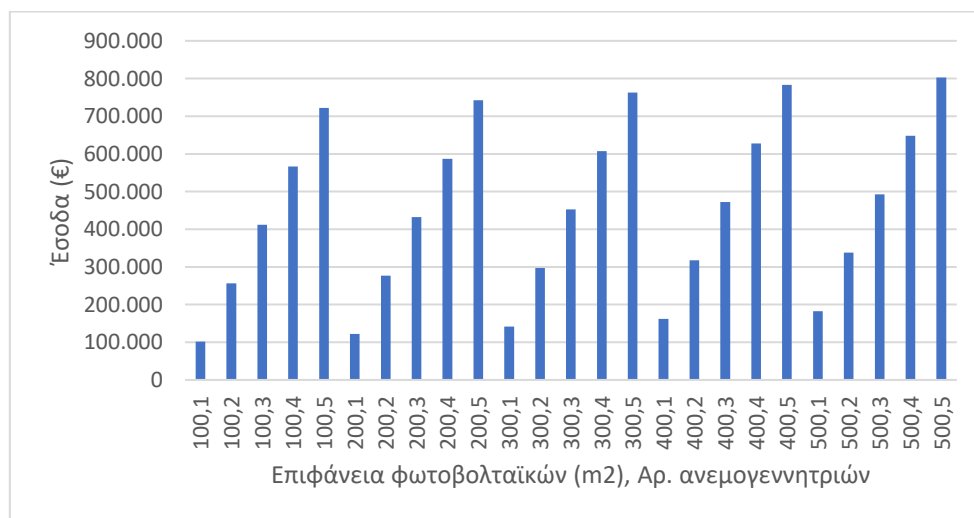
- ❖ Αν το κόστος του άνθρακα (C_1) είναι χαμηλότερο από 0,06704 €/kWh (τιμή που αντιστοιχεί στο κόστος φυσικού αερίου), τότε το ενεργειακό μίγμα είναι 21,65% άνθρακας, 58,35% φυσικό αέριο, 2,22% ηλιακή ενέργεια και 17,78% αιολική ενέργεια. Αν ξεπεραστεί η τιμή αυτή, τότε η χρήση άνθρακα παύει να είναι συμφέρουσα και το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 80% φυσικό αέριο 2,22% ηλιακή ενέργεια και 17,78% αιολική ενέργεια
- ❖ Αν το κόστος του φυσικού αερίου (C_2) είναι χαμηλότερο από το κόστος του άνθρακα (0,02925 €/kWh), τότε το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 80% φυσικό αέριο 2,22% ηλιακή ενέργεια και 17,78% αιολική ενέργεια. Στην περίπτωση που το κόστος αυτό κυμαίνεται μεταξύ 0,02925-0,115 €/kWh (δηλαδή πάνω από το κόστος άνθρακα και κάτω από την τιμή πώλησης ενέργειας, τότε το ενεργειακό μίγμα γίνεται 21,65% άνθρακας, 58,35% φυσικό αέριο, 2,22% ηλιακή ενέργεια και 17,78% αιολική ενέργεια. Επιπλέον, για το διάστημα μεταξύ 0,115-0,2 €/kWh, το ενεργειακό μίγμα είναι 49,39% άνθρακας, 5% φυσικό αέριο, 5,05% ηλιακή ενέργεια και 40,56% αιολική ενέργεια. Τέλος, αύξηση πάνω από 0,2 €/kWh δίνει ενεργειακό μίγμα που αποτελείται από 74,3% άνθρακα, 5% φυσικό αέριο, 7,6% ηλιακή ενέργεια και 13,10% αιολική ενέργεια. Παρατηρείται ότι, σε αντίθεση με τα προηγούμενα σενάρια, όταν το κόστος του φυσικού αερίου ξεπεράσει την τιμή πώλησης ενέργειας, συνεχίζεται να χρησιμοποιείται το καύσιμο στο ελάχιστο δυνατό ποσοστό (5%), καθώς έτσι ορίστηκε στους περιορισμούς με την κατάργηση των δυαδικών μεταβλητών
- ❖ Αν το κόστος της ηλιακής ενέργειας (C_3) είναι χαμηλότερο από 0,32 €/kWh, τότε το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 21,65% άνθρακα, 58,35% φυσικό αέριο, 2,22% ηλιακή ενέργεια και 17,78% αιολική ενέργεια. Από τη συγκεκριμένη τιμή και πάνω, η ηλιακή ενέργεια δεν είναι συμφέρουσα για παραγωγή και συνεπώς το ενεργειακό μίγμα γίνεται 24,35% άνθρακας, 55,65% φυσικό αέριο και 20% αιολική ενέργεια
- ❖ Για κόστος αιολικής ενέργειας (C_4) κάτω από 0,32 €/kWh, το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 21,65% άνθρακα, 58,35% φυσικό αέριο, 2,22% ηλιακή ενέργεια και 17,78% αιολική ενέργεια. Ξεπερνώντας αυτή τη τιμή και έως τα 0,44 €/kWh, στο ενεργειακό μίγμα συμμετέχουν κατά 74,3% ο άνθρακας, 5,7% το φυσικό αέριο, 7,6% η ηλιακή ενέργεια και 12,4% η αιολική ενέργεια. Πάνω από 0,44

€/kWh, το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 74,3% άνθρακα, 5,7% φυσικό αέριο, 10,23% ηλιακή ενέργεια και 9,77% αιολική ενέργεια.



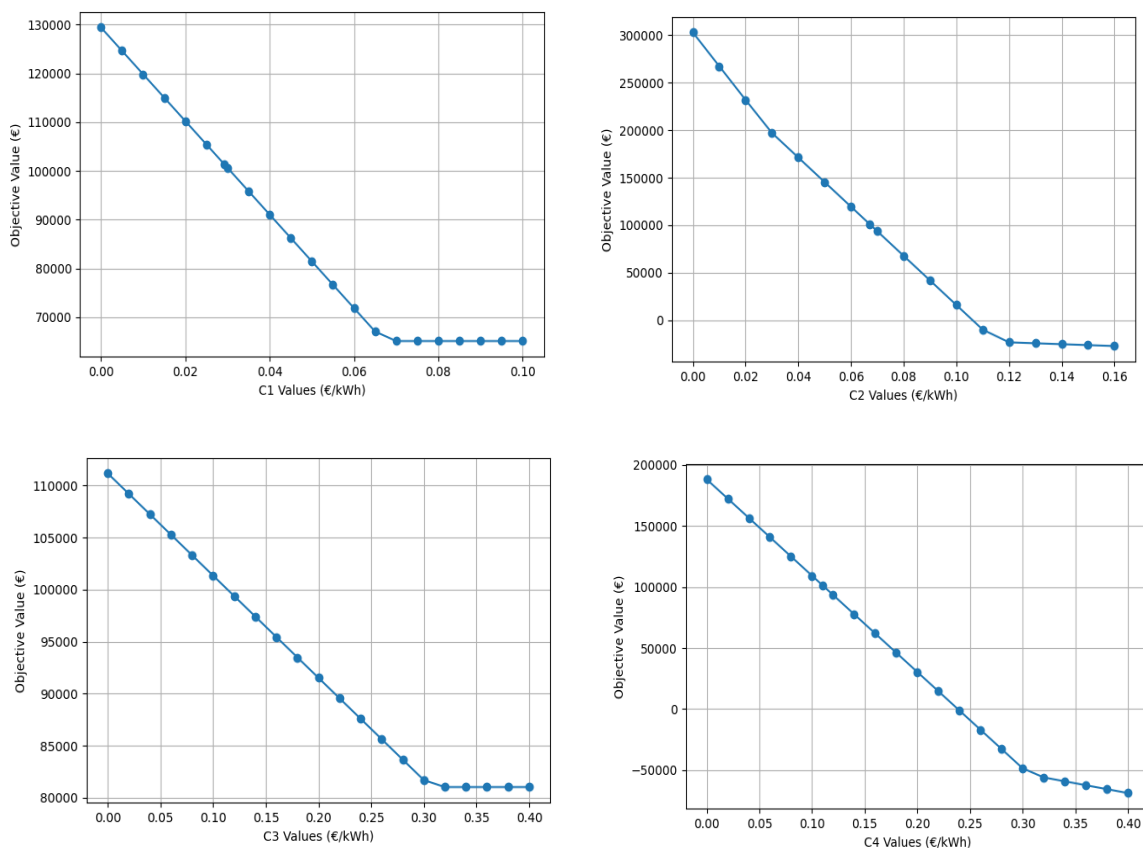
Σχήμα 41: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς το ενεργειακό μίγμα για το τέταρτο σενάριο.

Από το Σχήμα 41 παρατηρείται ότι όσο η τιμή πώλησης ενέργειας (P_5) είναι χαμηλότερη από 0,06 €/kWh, τότε το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 74,3% άνθρακα, 5,7% φυσικό αέριο, 10,23% ηλιακή ενέργεια και 9,77% αιολική ενέργεια. Στη συγκεκριμένη τιμή, το ενεργειακό μίγμα γίνεται 74,3% άνθρακα, 5,7% φυσικό αέριο, 7,60% ηλιακή ενέργεια και 12,4% αιολική ενέργεια. Για τιμή πώλησης μεγαλύτερη από 0,06 €/kWh, η πώληση ενέργειας γίνεται περισσότερο ελκυστική με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συμμετοχή του φυσικού αερίου. Έτσι, στην περίπτωση αυτή, το ενεργειακό μίγμα αποτελείται από 21,65% άνθρακα, 58,35% φυσικό αέριο, 2,22% ηλιακή ενέργεια και 17,78% αιολική ενέργεια.



Σχήμα 42: Επίδραση της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών και του αριθμού των ανεμογεννητριών στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στο τέταρτο σενάριο.

Από το Σχήμα 42 προκύπτει πως όσο αυξάνεται η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών (A) και ο αριθμός των ανεμογεννητριών (N), τόσο αυξάνονται και τα έσοδα της βιομηχανίας, διότι αυξάνεται η δυναμικότητα ΑΠΕ που μπορεί να παραχθεί και να πωληθεί στο τοπικό δίκτυο. Τα υψηλότερα έσοδα προκύπτουν για το μέγιστο συνδυασμό $A - N$, δηλαδή για $A = 500 m^2$ και $N = 5$ ανεμογεννήτριες.



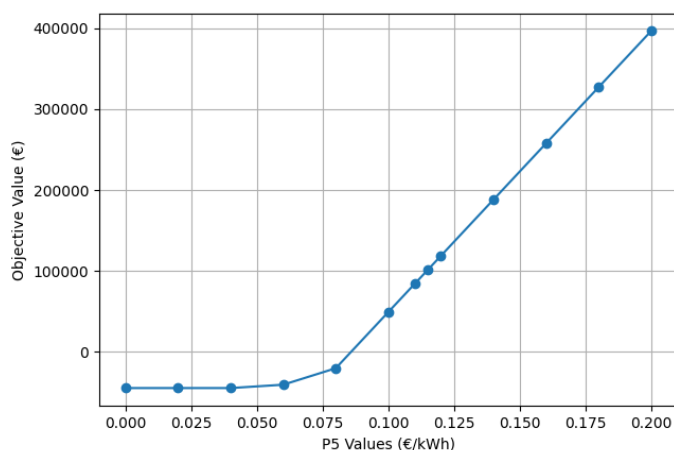
Σχήμα 43: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικών συντελεστών κόστους ως προς τα έσοδα για το τέταρτο σενάριο.

Από την ανάλυση του Σχήματος 43 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος προμήθειας άνθρακα (C_1), μέχρι την τιμή 0,07 €/kWh, τόσο μειώνονται τα έσοδα της βιομηχανίας. Αύξηση πάνω από τη συγκεκριμένη τιμή, δε μειώνει περαιτέρω τα έσοδα, διότι καθιστά το συγκεκριμένο καύσιμο ασύμφορο για χρήση (δε χρησιμοποιείται καθόλου άνθρακας για παραγωγή ενέργειας)
- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος προμήθειας φυσικού αερίου (C_2), μειώνονται τα έσοδα της βιομηχανίας. Αύξηση πάνω από την τιμή 0,0105 €/kWh έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ζημίας για την επιχείρηση
- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά (C_3), μέχρι την τιμή 0,32 €/kWh, τόσο μειώνονται τα έσοδα της βιομηχανίας. Αύξηση πέρα

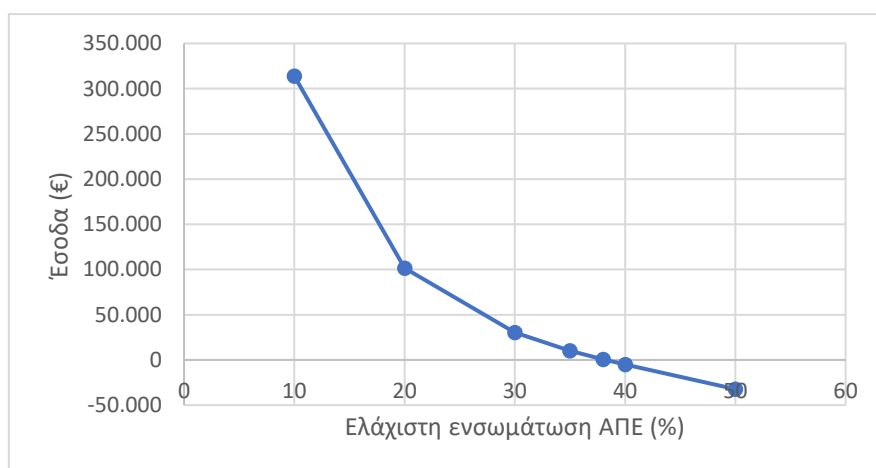
από τη συγκεκριμένη τιμή, δε μειώνει περαιτέρω τα έσοδα, διότι καθιστά τη συγκεκριμένη πηγή ασύφορη για χρήση (δεν παράγεται καθόλου ηλιακή ενέργεια)

- ❖ Όσο αυξάνεται το κόστος παραγωγής ενέργειας από ανεμογεννήτριες (C_4), μειώνονται τα έσοδα της βιομηχανίας. Αύξηση πάνω από την τιμή 0,24 €/kWh έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ζημίας για την επιχείρηση.



Σχήμα 44: Ανάλυση ευαισθησίας αντικειμενικού συντελεστή εσόδων ως προς τα έσοδα για το τέταρτο σενάριο.

Από το Σχήμα 44 συμπεραίνεται ότι όσο αυξάνεται η τιμή πώλησης ενέργειας, τόσο αυξάνονται τα έσοδα για την επιχείρηση. Η οριακή τιμή για την οποία προκύπτουν μηδενικά έσοδα είναι 0,09 €/kWh.



Σχήμα 45: Ανάλυση ευαισθησίας ελάχιστου ποσοστού ενσωμάτωσης ΑΠΕ ως προς τα έσοδα για το τέταρτο σενάριο.

Από το Σχήμα 45 προκύπτει ότι όσο αυξάνεται το ελάχιστο ποσοστό ενσωμάτωσης ΑΠΕ, τόσο μειώνονται τα έσοδα της βιομηχανίας. Για ελάχιστο ποσοστό ΑΠΕ ίσο με 38%

προκύπτουν μηδενικά έσοδα και από εκεί και πάνω προκαλούνται ζημίες στην επιχείρηση.

Είναι σαφές ότι τόσο τα αποτελέσματα όσο και η ανάλυση ευαισθησίας του συγκεκριμένου σεναρίου ταυτίζονται σε αρκετά σημεία με τα αντίστοιχα του αρχικού σεναρίου. Δηλαδή, το μοντέλο είτε ως MILP είτε ως μοντέλο απλού γραμμικού προγραμματισμού παράγει παρόμοια αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει διότι η φύση του προβλήματος (περιορισμοί ζήτησης, κατανάλωσης και δυναμικότητας, σταθερές τιμές αντικειμενικών συντελεστών κόστους και εσόδων σε όλη τη διάρκεια του έτους κλπ.) είναι τέτοια που είτε αφήνεται ελεύθερη η επιλογή της χρήσης των πηγών ενέργειας κάθε μήνα με τον ορισμό δυαδικών μεταβλητών είτε όχι, δε διαφοροποιείται ιδιαίτερα η βέλτιστη λύση.

Τα αποτελέσματα από τα τέσσερα σενάρια που εξετάστηκαν, παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 5.8.

Πίνακας 5.8: Συνοπτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων όλων των σεναρίων.

Σενάριο	Ενεργειακό μίγμα	Βέλτιστη τιμή εσόδων (€)
Αρχικό	Coal 21,65%, NG 58,35%, Sun 2,22%, Wind 17,78%	101.353,29
Δεύτερο (όριο άνθρακα ως προς τη ζητούμενη ενέργεια, περιορισμός στη μηνιαία χρήση Φ.Α.)	Coal 27,86%, NG 37,5%, Sun 3,84%, Wind 30,8%	2.220,30
Τρίτο (κάλυψη των αναγκών μόνο από συμβατικά καύσιμα)	Coal 38,63%, NG 13,36%, Sun 5,32%, Wind 42,69%	-31.975,67
Τέταρτο (μετατροπή σε απλό γραμμικό προγραμματισμό)	Coal 21,65%, NG 58,35%, Sun 2,22%, Wind 17,78%	101.353,29

6 Συμπεράσματα

Ο χάλυβας (κράμα σιδήρου-άνθρακα) είναι ένα αρκετά διαδεδομένο υλικό στη βιομηχανία, το οποίο χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών (κατασκευές, μεταφορές κλπ.). Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι παραγωγής χάλυβα, η BF-BOF και η EAF, με την πρώτη να είναι η περισσότερο διαδεδομένη και να χρησιμοποιείται σε ποσοστό περίπου 80% παγκοσμίως. Η Κίνα είναι η χώρα που έχει την υψηλότερη παραγωγή χάλυβα, με μερίδιο αγοράς περισσότερο από 50% για το έτος 2022.

Η φύση των διεργασιών που συμμετέχουν στην παραγωγή χάλυβα είναι τέτοια που καθιστά τη χαλυβουργία ιδιαίτερα ενεργοβόρα και με υψηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο, λόγω της χρήσης συμβατικών καυσίμων, η οποία απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες CO₂. Στο ενεργειακό μίγμα του κλάδου κυριαρχεί ο άνθρακας με ποσοστό 74,3%, στη δεύτερη θέση βρίσκεται ο ηλεκτρισμός με 12,6%, ακολουθεί το φυσικό αέριο με ποσοστό 9,6%, ενώ στις τελευταίες θέσεις με μικρά μερίδια βρίσκονται άλλες πηγές. Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ σχετίζεται μόνο με την ηλεκτρική ενέργεια και συνεπώς η συμμετοχή τους στο μίγμα είναι περιορισμένη. Στο πλαίσιο αυτό, εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος στη χαλυβουργία μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της ενεργειακής απόδοσης εξοπλισμού και διεργασιών, περαιτέρω ενσωμάτωση ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα, εισαγωγή H₂, δέσμευση CO₂ και βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας.

Όσον αφορά τη βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας και συγκεκριμένα το κομμάτι που αφορά τη διαχείριση ενέργειας στη βιομηχανία χάλυβα, έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα μαθηματικών μοντέλων. Τα συγκεκριμένα μοντέλα βελτιστοποίησης μπορεί να είναι μονοκριτηριακά ή πολυκριτηριακά και στοχεύουν κατά βάση στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, των εκπομπών CO₂, του συνολικού ενεργειακού κόστους, αλλά και των απωλειών ενέργειας. Τα περισσότερα μοντέλα βελτιστοποίησης της διαχείρισης ενέργειας για τον κλάδο του χάλυβα που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία, είναι MILP. Η επίλυση-εφαρμογή τους είναι επωφελής για της βιομηχανίες, καθώς οδηγεί σε μείωση του κόστους και του ενεργειακού αποτυπώματος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε, με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού *Python*, ένα μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης (MILP) της διαχείρισης ενέργειας της χαλυβουργίας *Daewoo Steel Co. Ltd* στη Νότια Κορέα, το οποίο στοχεύει στη μεγιστοποίηση των ετησίων εσόδων της βιομηχανίας, προσδιορίζοντας το κατάλληλο ενεργειακό μίγμα ανάμεσα σε άνθρακα, φυσικό αέριο,

ηλιακή και αιολική ενέργεια, αλλά και την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να πωληθεί. Η επιλογή ή όχι της χρήσης μιας πηγής ενέργειας για ένα συγκεκριμένο μήνα, εξασφαλίστηκε με την εισαγωγή των αντίστοιχων δυαδικών (binary) μεταβλητών στο μοντέλο. Οι περιορισμοί του μοντέλου αφορούν τη διαθεσιμότητα των πηγών ενέργειας, τη μέγιστη δυνατή χρήση άνθρακα (74,3%), την ελάχιστη ενσωμάτωση ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα (20%), καθώς και τεχνικούς περιορισμούς που σχετίζονται με το ελάχιστο ποσοστό φυσικού αερίου.

Συνολικά εξετάστηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια (το αρχικό και τρεις παραλλαγές). Από την επίλυση του αρχικού σεναρίου (21,65% άνθρακα, 58,35% φυσικό αέριο, 2,22% ηλιακή ενέργεια, 17,78% αιολική ενέργεια) προέκυψε παραγωγή 4.431.638,76 kWh ετησίως, με τα έσοδα της βιομηχανίας να ανέρχονται σε 101.353,29 €. Η επιλογή χρήσης φυσικού αερίου μόνο για ένα μήνα σε συνδυασμό με το ότι οι ανάγκες της βιομηχανίας καλύπτονταν πλήρως από τον άνθρακα, οδήγησαν στην ανάπτυξη του δεύτερου σεναρίου. Σε αυτό, το ανώτερο όριο παραγωγής άνθρακα ορίστηκε για τη ζητούμενη και όχι την παραγόμενη ενέργεια, καθώς επίσης τέθηκε όριο στη μηνιαία χρήση φυσικού αερίου, ώστε αυτή να μην ξεπερνάει την αντίστοιχη ζητούμενη ποσότητα. Από την επίλυση του δεύτερου σεναρίου (27,86% άνθρακα, 37,5% φυσικό αέριο, 3,84% ηλιακή ενέργεια, 27,86% αιολική ενέργεια) προέκυψε ετήσια παραγωγή 2.558.974,54 kWh, με τα έσοδα της βιομηχανίας να ανέρχονται σε 2.220,30 €, αρκετά χαμηλότερα συγκριτικά με το αρχικό σενάριο. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχουν δύο μήνες όπου δε χρησιμοποιείται καθόλου ο άνθρακα, ενώ η κατανομή της χρήσης φυσικού αερίου στη διάρκεια του έτος είναι καλύτερη. Ως τρίτο σενάριο εξετάστηκε το ενδεχόμενο κάλυψης της ζήτησης της βιομηχανίας χάλυβα μόνο από συμβατικά καύσιμα (άνθρακα και φυσικό αέριο) και η διάθεση της ενέργειας από ΑΠΕ μόνο προς πώληση. Από την επίλυση του τρίτου σεναρίου (38,63% άνθρακα, 13,36% φυσικό αέριο, 5,32% ηλιακή ενέργεια, 42,69% αιολική ενέργεια) προέκυψε ετήσια παραγωγή 1.845.964,46 kWh, κάτι που οδηγεί στη δημιουργία ζημίας στην επιχείρηση, ίση με 31.975,67 €. Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ καταλαμβάνει σχεδόν το μισό ενεργειακό μίγμα, ανερχόμενη σε ποσοστό 48,01%. Αν και το σενάριο αυτό είναι το περισσότερο «πράσινο», ο περιορισμός πώλησης ενέργειας μόνο από ΑΠΕ οδηγεί σε ζημίες. Τέλος, ως τέταρτο σενάριο μελετήθηκε η περίπτωση μετατροπής του μοντέλου από MILP σε απλού γραμμικού προγραμματισμού, αφαιρώντας όλες τις δυαδικές μεταβλητές από το αρχικό μοντέλο. Στο σενάριο αυτό (21,65% άνθρακα, 58,35% φυσικό αέριο, 2,22% ηλιακή ενέργεια, 17,78% αιολική ενέργεια), προέκυψε παραγωγή 4.431.638,76 kWh ετησίως, με τα έσοδα της βιομηχανίας

να ανέρχονται σε 101.353,29 €. Τα αποτελέσματα αυτά είναι παρόμοια με τα αντίστοιχα του αρχικού σεναρίου, ωστόσο διαφέρουν ως προς την κατανομή του φυσικού αερίου, καθώς με την αφαίρεση των δυαδικών μεταβλητών, η χρήση του έγινε υποχρεωτική κάθε μήνα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη φύση του προβλήματος, όπως αυτό ορίστηκε στους περιορισμούς. Ωστόσο, ένα μοντέλο MILP είναι περισσότερο ευέλικτο και προσφέρει περισσότερες δυνατότητες ως προς τη βελτιστοποίηση.

Για κάθε ένα σενάριο έλαβε χώρα η αντίστοιχη ανάλυση ευαισθησίας. Σε αυτή μελετήθηκε η επίδραση που έχει στο ενεργειακό μίγμα και στα έσοδα της βιομηχανίας η μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων. Συγκεκριμένα, αρχικά αναλύθηκε η μεταβολή του ενεργειακού μίγματος όταν αλλάζουν οι αντικειμενικοί συντελεστές (C_1 , C_2 , C_3 , C_4 και P_5). Στα τρία πρώτα σενάρια παρατηρήθηκε πως όταν οι συντελεστές C_1 , C_2 και C_3 ξεπεράσουν μια συγκεκριμένη τιμή, τότε η χρήση των αντίστοιχων πηγών ενέργειας μηδενίζεται. Αντίθετα, όσο και να αυξηθεί η τιμή του C_4 , η παραγωγή αιολικής ενέργειας δε μηδενίζεται ποτέ, καθώς δεν είναι δυνατή η κάλυψη της απαίτησης για συμμετοχή τουλάχιστον 20% των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα μόνο από ηλιακή ενέργεια. Επιπλέον, όσο αυξάνεται η τιμή πώλησης ενέργειας P_5 , τόσο περισσότερο «πράσινο» γίνεται το ενεργειακό μίγμα. Στο τελευταίο σενάριο, η μη χρήση δυαδικών μεταβλητών είχε ως αποτέλεσμα την υποχρεωτική χρήση φυσικού αερίου σε ποσοστό τουλάχιστον 5% κάθε μήνα. Έτσι, στην περίπτωση αυτή, όσο κι αν αυξηθούν οι συντελεστές C_2 και C_4 , η συμμετοχή των αντίστοιχων πηγών δε μηδενίζεται. Και σε αυτό το σενάριο η αύξηση της τιμής πώλησης ενέργειας P_5 οδηγεί σε περισσότερο «πράσινο» ενεργειακό μίγμα.

Σε δεύτερο στάδιο, μελετήθηκε η επίδραση που έχει στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (δηλαδή στα έσοδα της βιομηχανίας) η μεταβολή της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών (A) και του αριθμού των ανεμογεννητριών (N), των αντικειμενικών συντελεστών C_1 , C_2 , C_3 , C_4 και P_5 , καθώς επίσης και του ελάχιστου ποσοστού (%) ενσωμάτωσης ΑΠΕ. Σε όλα τα σενάρια, τα μέγιστα έσοδα (ή η ελάχιστη ζημία, αναφορικά με το τρίτο σενάριο), επιτυγχάνεται για το μεγαλύτερο δυνατό συνδυασμό $A - N$, διότι έτσι αυξάνεται η δυναμικότητα παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ. Επιπλέον, στα τρία πρώτα σενάρια, αύξηση της τιμής των συντελεστών C_1 , C_2 και C_3 οδηγεί σε μείωση των εσόδων της βιομηχανίας, μέχρι μια ορισμένη τιμή, στην οποία η χρήση της συγκεκριμένης πηγής γίνεται μη συμφέρουσα. Αντίθετα, η συνεχής χρήση αιολικής ενέργειας για την κάλυψη των περιορισμών, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των εσόδων όσο κι αν αυξάνεται το κόστος C_4 . Στο τέταρτο σενάριο, η υποχρεωτική χρήση φυσικού αερίου έχει παρόμοιο αποτέλεσμα στη μεταβολή των εσόδων και για το συντελεστή C_2 .

Ακόμη, βρέθηκε η οριακή τιμή πώλησης ενέργειας για την οποία κάθε σενάριο δίνει μηδενικά έσοδα (0,09, 0,11, 0,15 και 0,09 €/kWh αντίστοιχα). Τέλος, υπολογίστηκε το ελάχιστο ποσοστό ενσωμάτωσης ΑΠΕ για το οποίο κάθε σενάριο είναι οριακά κερδοφόρο (38% για το πρώτο και το τέταρτο σενάριο, 35% για το δεύτερο, ενώ το τρίτο ζημιολόγο για οποιοδήποτε ποσοστό ΑΠΕ).

Οι περιορισμοί (limitations) της παρούσας μελέτης σχετίζονται με τις παραδοχές που έλαβαν χώρα κατά τη δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου. Οι βασικότερες είναι ότι στο ενεργειακό μίγμα συμμετέχουν μόνο 4 ενεργειακές πηγές (άνθρακας, φυσικό αέριο, ηλιακή και αιολική ενέργεια), ότι η δυναμικότητα παραγωγής ηλιακής και αιολικής ενέργειας είναι συνάρτηση μόνο της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητα του αέρα αντίστοιχα, ότι το κόστος προμήθειας των πηγών ενέργειας και η τιμή πώλησής της παραμένουν σταθερά στη διάρκεια του έτους, καθώς επίσης και ότι δεν υπάρχει κάποιο όριο στην ποσότητα πώλησης ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, προτάσεις περαιτέρω μελέτης του συγκεκριμένου θέματος είναι η κατασκευή ενός μαθηματικού μοντέλου, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη περισσότερες πηγές ενέργειας (όπως πετρέλαιο, γεωθερμία κλπ.), αλλά και επιπλέον παράγοντες για τον ακριβέστερο υπολογισμό του δυναμικού των ΑΠΕ (πχ θερμοκρασία, υψόμετρο κλπ.). Ακόμη, στο μοντέλο θα μπορούσαν να προστεθούν επιπλέον περιβαλλοντικά κόστη, όπως αυτό των εκπομπών SO_x και NO_x, αλλά και να ερευνηθεί η πιθανότητα εισαγωγής ενός ορίου ως προς την πώληση ενέργειας στο τοπικό δίκτυο, σύμφωνα με τους περιορισμούς του Net Metering. Επίσης, κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη η εισαγωγή δεδομένων αναφορικά με τις τιμές των πηγών ενέργειας για κάθε μήνα ξεχωριστά, ενώ στο κομμάτι αυτό θα μπορούσαν ακόμα να χρησιμοποιηθούν και μέθοδοι πρόβλεψης του μηνιαίου κόστους. Τέλος, μια επιπλέον πρόταση είναι η ανάπτυξη αντίστοιχων μοντέλων με διαφορετικές μεθόδους βελτιστοποίησης (ή συνδυασμό μερικών από αυτών) προκειμένου να βρεθεί η καλύτερη δυνατή.

7 Βιβλιογραφία

AGI, 2023. *American Geoscience Institute-How much carbon dioxide is produced when different fuels are burned?*. [Ηλεκτρονικό]

Διαθέσιμο σε: <https://www.americangeosciences.org/critical-issues/faq/how-much-carbon-dioxide-produced-when-different-fuels-are-burned>

[Πρόσβαση 20 Νοεμβρίου 2023].

Al-shaibani, W., Babaqi, T. & Alsarori, A., 2023. Power consumption prediction for steel industry. *Proceedings of the IISE Annual Conference & Expo 2023*, pp. 1-7.

Bailera, M., Lisbona, P., Peña, B. & Romeo, L. M., 2021. A review on CO2 mitigation in the Iron and Steel industry through Power to X processes. *Journal of CO2 Utilization*, Volume 46, pp. 1-30, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101456>.

Climatescope, 2023. *All markets: South Korea*. [Ηλεκτρονικό]

Διαθέσιμο σε: <https://climatescope.github.io/climatescope.org/markets/kr/>

[Πρόσβαση 21 Νοεμβρίου 2023].

Dutta, S. & Chokshi, Y., 2020. Historical Steelmaking. In: *Basic Concepts of Iron and Steel Making*. Singapore: Springer, pp. 293-305, https://doi.org/10.1007/978-981-15-2437-0_12.

Edward F., W., Jack, N. & Wondris, E., 2023. *Britannica- Steel*. [Ηλεκτρονικό]

Διαθέσιμο σε: <https://www.britannica.com/technology/steel>

[Πρόσβαση 30 Αυγούστου 2023].

EERE, 2023. *Office of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY- How a Wind Turbine Works - Text Version*. [Ηλεκτρονικό]

Διαθέσιμο σε: <https://www.energy.gov/eere/wind/how-wind-turbine-works-text-version>

[Πρόσβαση 19 Νοεμβρίου 2023].

Engineeringlearn, 2023. *Types of Steel and Their Uses*. [Ηλεκτρονικό]

Διαθέσιμο σε: <https://engineeringlearn.com/types-of-steel-and-their-uses/>

[Πρόσβαση 31 Αυγούστου 2023].

EPSIS, 2024. *Electricity Market-SMP(System Marginal Price)*. [Ηλεκτρονικό]

Διαθέσιμο σε:

<https://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkmaSmpShdGrid.do?menuId=040202&locale=eng>. [Πρόσβαση 5 Ιανουαρίου 2024].

FIMI, 2023. *Coal, iron ore and steel- emerging trends and challenges..* [Ηλεκτρονικό]

Διαθέσιμο σε: https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/en_in/topics/mining-metals/2023/04/ey-steel-coal-and-iron-ore-report.pdf?download

[Πρόσβαση 28 Σεπτεμβρίου 2023].

Flores-Granobles, M. & Saeys, M., 2020. Minimizing CO2 emissions with renewable energy: a comparative study of emerging technologies in the steel industry. *Energy Environ. Sci.*, Volume 19, pp. 1923-1932, DOI: 10.1039/D0EE00787K.

- Forest Research, 2023. *Typical calorific values of fuels*. [Ηλεκτρονικό]
Διαθέσιμο σε: <https://www.forestresearch.gov.uk/tools-and-resources/fthr/biomass-energy-resources/reference-biomass/facts-figures/typical-calorific-values-of-fuels/>
[Πρόσβαση 15 Νοεμβρίου 2023].
- Frangopoulos, C. A., 2009. OPTIMIZATION METHODS FOR ENERGY SYSTEMS. *EXERGY, ENERGY SYSTEM ANALYSIS AND OPTIMIZATION*, Volume 2, pp. 34-45, <http://www.eolss.net/sample-chapters/c08/e3-19-03-03.pdf>.
- Gan, L., Yang, T., Chen, X., Li, G. & Yu, K., 2022. Purchased Power Dispatching Potential Evaluation of Steel Plant With Joint Multienergy System and Production Process Optimization. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(2), pp. 1581-1591, doi: 10.1109/TIA.2022.3144652.
- García, S. G., Montequín, V. R., Palacios, H. M. & Bayo, A. M., 2020. A Mixed Integer Linear Programming Model for the Optimization of Steel Waste Gases in Cogeneration: A Combined Coke Oven and Converter Gas Case Study. *Energies*, 13(15), pp. 3781, <https://doi.org/10.3390/en13153781>.
- GGGI, 2018. *Global Green Growth Institute-Korea's Renewable Energy 3020 Plan*. [Ηλεκτρονικό].
Διαθέσιμο σε: <https://gggi.org/wp-content/uploads/2018/10/Presentation-by-Mr.-Kyung-ho-Lee-Director-of-the-New-and-Renewable-Energy-Policy-Division-MOTIE.pdf>. [Πρόσβαση 21 Νοεμβρίου 2023].
- Ghosh, A. & Chatterjee, A., 2008. *Ironmaking and Steelmaking*. New Delhi: PHI Learning Private Limited.
- Grip, C.-E., Larsson, M., Harvey, S. & Nilsson, L., 2013. Process integration. Tests and application of different tools on an integrated steelmaking site. *Applied Thermal Engineering*, 53(2), pp. 366-372, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.03.040>.
- Hassan, T., Song, H., Khan, Y. & Kirikkaleli, D., 2022. Energy efficiency a source of low carbon energy sources? Evidence from 16 high-income OECD economies. *Energy*, Volume 243, pp. 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123063>.
- He, K. & Wang, L., 2017. A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 70, pp. 1022-1039.
- Hoffmann, C., Van Hoey, M. & Zeumer, B., 2020. *Decarbonization challenge for steel*. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο σε: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Metals%20and%20Mining/Our%20Insights/Decarbonization%20challenge%20for%20steel/Decarbonization-challenge-for-steel.pdf>. [Πρόσβαση 27 Οκτωβρίου 2023].
- Holappa, L., 2020. A General Vision for Reduction of Energy Consumption and CO2 Emissions from the Steel Industry. *Metals*, 10(9), pp. 1117, <https://doi.org/10.3390/met10091117>.

- Hongbaio, D., Yang, L., Lijun, W., Xinchuang, L., Zhiling, T., Yixin, H. & McDonald, C., 2019. Roadmap of China steel industry in the past 70 years. *Ironmaking & Steelmaking*, 46(10), pp. 922-927, <https://doi.org/10.1080/03019233.2019.1692888>.
- Hu, Z., He, D. & Zhao, H., 2023. Multi-objective optimization of energy distribution in steel enterprises considering both exergy efficiency and energy cost. *Energy*, Volume 263, part B, pp. 125623, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125623>.
- Huang, Y., Pei, J., Nielsen, P.V., Bonthoux, F., Lechene, S., Keller, F., Wu, S., Xu, C. & Cao, Z., 2021. Chapter 4 - Experimental techniques. In: V. 2. E. D. a. Applications, ed. *Industrial Ventilation Design Guidebook*. Howard D. Goodfellow, Yi Wang, <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00071-7>, pp. 185-277.
- Hu, Z., He, D., Feng, K., Liu, P. & Jia, Y., 2019. Optimal Design Model of the Energy Systems in Iron and Steel Enterprises. *Appl. Sci.*, 9(22), pp. 4778, <https://doi.org/10.3390/app9224778>.
- IEA, 2020. *Energy consumption in the iron and steel sector by scenario*. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο σε: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/energy-consumption-in-the-iron-and-steel-sector-by-scenario>. [Πρόσβαση 20 Σεπτεμβρίου 2023].
- IEA, 2023. *Steel Industry*. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο σε: <https://www.iea.org/energy-system/industry/steel> [Πρόσβαση 30 Σεπτεμβρίου 2023].
- Inayat, A., 2023. Current progress of process integration for waste heat recovery in steel and iron industries. *Fuel*, Volume 338, pp. 127237, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127237>.
- Intratec, 2023. *Coal Price / South Korea*. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο σε: <https://medium.com/intratec-products-blog/coal-price-south-korea-q1-2023-193c3be22a88>. [Πρόσβαση 19 Δεκεμβρίου 2023].
- Intratec, 2023. *Natural Gas Price / South Korea*. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο σε: <https://medium.com/intratec-products-blog/natural-gas-price-south-korea-q1-2023-b106b37de54>. [Πρόσβαση 20 Δεκεμβρίου 2023].
- Jo, D., Heack, Y. & Park, Y., 2008. *Analysis of Solar Radiation Climate in Korea*. Goswami, D.Y., Zhao, Y. (eds)-Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75997-3_460.
- Kim, J., Sovacool, B.K., Bazilian, M., Griffiths, S., Lee, J., Yang, M. & Lee, J., 2022. Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. *Energy Research & Social Science*, Volume 89, pp. 1-32, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102565>.
- Kong, H. N., 2015. A Green Mixed Integer Linear Programming Model for Optimization of Byproduct Gases in Iron and Steel Industry. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 22(8), pp. 681-685, [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(15\)30057-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(15)30057-1).

Kong, H., Qi, E., Li, H., Li, G., & Zhang, X., 2010. An MILP model for optimization of byproduct gases in the integrated iron and steel plant. *Applied Energy*, 87(7), pp. 2156-2163, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.031>.

KOSA, 2023. *Korean Iron & Steel Association- Position in the Korean Economy*. [Ηλεκτρονικό]

Διαθέσιμο σε: <https://www.kosa.or.kr/sub/eng/introduction/sub02.jsp>

[Πρόσβαση 30 Σεπτεμβρίου 2023].

KOSA, 2023. *Korean Iron & Steel Association-Crude Steel Total*. [Ηλεκτρονικό]

Διαθέσιμο σε: <https://www.kosa.or.kr/sub/eng/statistics/production1.jsp>

[Πρόσβαση 30 Σεπτεμβρίου 2023].

Larsson, M. & Dahl, J., 2003. Reduction of the Specific Energy Use in an Integrated Steel Plant—The Effect of an Optimisation Model. *ISIJ International*, Volume 43, p. 1664–1673.

Lu, B., Chen, G., Chen, D. & Yu, W., 2016. An energy intensity optimization model for production system in iron and steel industry. *Applied Thermal Engineering*, Volume 100, pp. 285-295, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.064>.

Maddaloni, A., Porzio, G.F., Nastasi, G., Colla, V. & Branca, T.A., 2015. Multi-objective optimization applied to retrofit analysis: A case study for the iron and steel industry. *Applied Thermal Engineering*, Volume 91, pp. 638-646, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.051>.

Mateus, B., Mendes, M., Farinha, J.T., Cardoso, A.J.M, Assis, R. & Da Costa, L.M., 2022. Forecasting Steel Production in the World—Assessments Based on Shallow and Deep Neural Networks. *Applied Sciences*, 13(1), pp. 178, <https://doi.org/10.3390/app13010178>.

MirHassani, S. & Hooshmand, F., 2019. *Preliminaries*. In: *Methods and Models in Mathematical Programming*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27045-2_1.

Mubarak, H., Sanjari, M., Stegen, S. & Abdellatif, A., 2023. Improved Active and Reactive Energy Forecasting Using a Stacking Ensemble Approach: Steel Industry Case Study. *Energies*, 16(21), pp. 7252, <https://doi.org/10.3390/en16217252>.

Noor, I., 2011. Classification of steel. *Citations to Articles Posted to Academia.edu*, pp. 1-11.

OECD, 2023. *The Observatory of Economic Complexity-Iron&Steel in South Korea*.

[Ηλεκτρονικό]

Διαθέσιμο σε: <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/iron-steel/reporter/kor?redirect=true>.

[Πρόσβαση 30 Σεπτεμβρίου 2023].

OECD, 2022. *Organization for Economic Cooperation and Development-Carbon Pricing in Korea*. [Ηλεκτρονικό]

Διαθέσιμο σε: <https://www.oecd.org/tax/tax-policy/carbon-pricing-korea.pdf>

[Πρόσβαση 20 Νοεμβρίου 2023].

- Oh, S. & Ahn, C. W., 2023. Evolutionary Approach for Interpretable Feature Selection Algorithm in Manufacturing Industry. *IEEE Access*, Volume 11, pp. 46604-46614, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3274490.
- Rabe, M., Bilan, Y., Widera, K. & Vasa, L., 2022. Application of the Linear Programming Method in the Construction of a Mathematical Model of Optimization Distributed Energy. *Energies*, 15(5), pp. 1872, <https://doi.org/10.3390/en15051872>.
- Ragheb, M., 2017. Chapter 25 - Economics of Wind Power Generation. In: *Wind Energy Engineering-A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*. Academic Press, pp. 537-555, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-809451-8.00025-4>.
- Ren, L. , Zhang, S., Li, L., Xu, X., Zhang, Y. & Wang, F., 2021. Efficiency diagnosis and optimization in distributed solar plants. *Energy for Sustainable Development*, Volume 63, pp. 24-32, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.05.001>.
- Ren, L., Zhou, S., Peng, T. & Ou, X., 2021. A review of CO2 emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 143, pp. 1-23, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110846>.
- Ruth, M., 2004. Steel Production and Energy. *Encyclopedia of Energy*, pp. 695-706, <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00371-5>.
- Sathishkumar, V., 2021. *Steel Industry Energy Consumption*. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο σε: <https://www.kaggle.com/datasets/csafrit2/steel-industry-energy-consumption/data>. [Πρόσβαση 2 Νοεμβρίου 2023].
- Sathishkumar, V., Jonghyun, L., Lee, M., Cho, K., Park, J., Shin, C. & Cho, Y., 2020. Industry Energy Consumption Prediction Using Data Mining Techniques. *International Journal of Energy, Information and Communications*, 11(1), pp. 7-14, <http://dx.doi.org/10.21742/ijeic.2020.11.1.02>.
- Schmutz, W. K., 2021. Changes in the Total Solar Irradiance and climatic effects. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 11(40), pp. 1-13, DOI:10.1051/swsc/2021016.
- Shao, Y., Li, J. & Zhang, X., 2022. The impact of financial development on CO2 emissions of global iron and steel industry. *Environ Sci Pollut Res*, Issue 29, pp. 44954-44969, <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18977-7>.
- Shcherbakova, A., Kleit, A. & Cho, J., 2014. The value of energy storage in South Korea's electricity market: A Hotelling approach. *Applied Energy*, Volume 125, pp. 93-102, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.046>.
- Shen, X., Chen, L., Xia, S., Xie, Z. & Qin, X., 2018. Burdening proportion and new energy-saving technologies analysis and optimization for iron and steel production system. *Journal of Cleaner Production*, Volume 172, pp. 2153-2166, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.204>.

- Statista, 2023. *Distribution of steel end-usage worldwide in 2021, by sector*. [Ηλεκτρονικό]
Διαθέσιμο σε: <https://www.statista.com/statistics/1107721/steel-usage-global-segment/>
[Πρόσβαση 3 Σεπτεμβρίου 2023].
- Statista, 2023. *Steel industry in South Korea - statistics and facts*. [Ηλεκτρονικό]
Διαθέσιμο σε: <https://www.statista.com/topics/8500/steel-industry-in-south-korea/#topicOverview>
[Πρόσβαση 2 Οκτωβρίου 2023].
- Statista, 2023. *The world's largest 15 crude steel producers in 2022, by production volume*. [Ηλεκτρονικό]
Διαθέσιμο σε: <https://www.statista.com/statistics/271979/the-largest-steel-producers-worldwide-ranked-by-production-volume>. [Πρόσβαση 2 Οκτωβρίου 2023].
- Tang, E., Shao, Y., Fan, X., Ye, L. & Wang, J., 2014. Application of Energy Efficiency Optimization Technology in Steel Industry. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 21(1), pp. 82-86, [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(14\)60126-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(14)60126-6).
- Thunder Said Energy, 2023. *Windy physics: how is power of a wind turbine calculated?*. [Ηλεκτρονικό]
Διαθέσιμο σε: <https://thundersaidenergy.com/downloads/wind-power-impacts-of-larger-turbines>. [Πρόσβαση 18 Νοεμβρίου 2023].
- Ullah, K., Hafeez, G., Khan, I., Jan, S. & Javaid, N., 2021. A multi-objective energy optimization in smart grid with high penetration of renewable energy sources. *Applied Energy*, Volume 299, pp. 1-20, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117104>.
- Wang, R., Jiang, L., Yang, Y. & Roskilly, A., 2020. Energy saving technologies and mass-thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry: A review. *Journal of Cleaner Production*, Volume 274, pp. 1-28, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122997>.
- Wang, Y., Wen, Z., Yao, J. & Dinga, C. D., 2020. Multi-objective optimization of synergic energy conservation and CO2 emission reduction in China's iron and steel industry under uncertainty. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 134, pp. 110128, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110128>.
- Windy, 2023. *Seoul, South Korea (서울특별시): weather statistics and wind history*. [Ηλεκτρονικό]
Διαθέσιμο σε: <https://windy.app/spots/South%20Korea>
[Πρόσβαση 20 Νοεμβρίου 2023].
- Won, S. & Choi, S.-G., 2003. Development of the Korean Iron and Steel Industry. *IFAC New Technologies for Automation of Metallurgical Industry*, pp. 1-8.
- World Steel Association, 2021. *Energy use in the steel industry*. [Ηλεκτρονικό]
Διαθέσιμο σε: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Energy-use-in-the-steel-industry.pdf>
[Πρόσβαση 22 Σεπτεμβρίου 2023].

- World Steel Association, 2022. *Solar energy is fuelling more sustainable steel production*. [Ηλεκτρονικό]
Διαθέσιμο σε: <https://worldsteel.org/steel-stories/infrastructure/solar-energy-fuels-sustainable-production-of-rails/>
[Πρόσβαση 4 Οκτωβρίου 2023].
- World Steel Association, 2023. *About steel*. [Ηλεκτρονικό]
Διαθέσιμο σε: <https://worldsteel.org/about-steel/about-steel/>
[Πρόσβαση 30 Αυγούστου 2023].
- World Steel Association, 2023. *Total production of crude steel*. [Ηλεκτρονικό]
Διαθέσιμο σε: https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/annual-production-steel-data/?ind=P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND/WORLD_ALL
[Πρόσβαση 3 Σεπτεμβρίου 2023].
- Yang, L., Hu, H., Yang, Z., Xue, B, Guo, Y. & Wang, S., 2021. A review on bath fluid flow stirring technologies in EAF steelmaking. *Journal of Iron and Steel Research International*, Volume 28, pp. 1341-1351, <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00650-x..>
- Yan, T., Sun, J., Qiu, Z., Na, H., Yuan, Y., Che, Z., Du, T. & Song, Y., 2022. Energy Optimization Based on Steam System Analysis and Waste Energy Recovery for Iron and Steel Industry. *Energy Technology*, 10(12), pp. 1-16, <https://doi.org/10.1002/ente.202200191>.
- Zhang, S., Yi, B., Guo, F. & Zhu, P., 2022. Exploring selected pathways to low and zero CO2 emissions in China's iron and steel industry and their impacts on resources and energy. *Journal of Cleaner Production*, Volume 340, pp. 1-18, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130813..>
- ΣΙΔΕΝΟΡ, 2023. *Σχετικά με τη ΣΙΔΕΝΟΡ*. [Ηλεκτρονικό]
Διαθέσιμο σε: <https://sidenor.gr/sxetika-me-tin-sidenor/o-omilos/>
[Πρόσβαση 15 Σεπτεμβρίου 2023].
- Χαλυβουργία Ελλάδος, 2023. *Ιστορικό*. [Ηλεκτρονικό]
Διαθέσιμο σε: <https://www.hlv.gr/index.php/el/company/history/>
[Πρόσβαση 23 Σεπτεμβρίου 2023].

8 Προσάρτημα

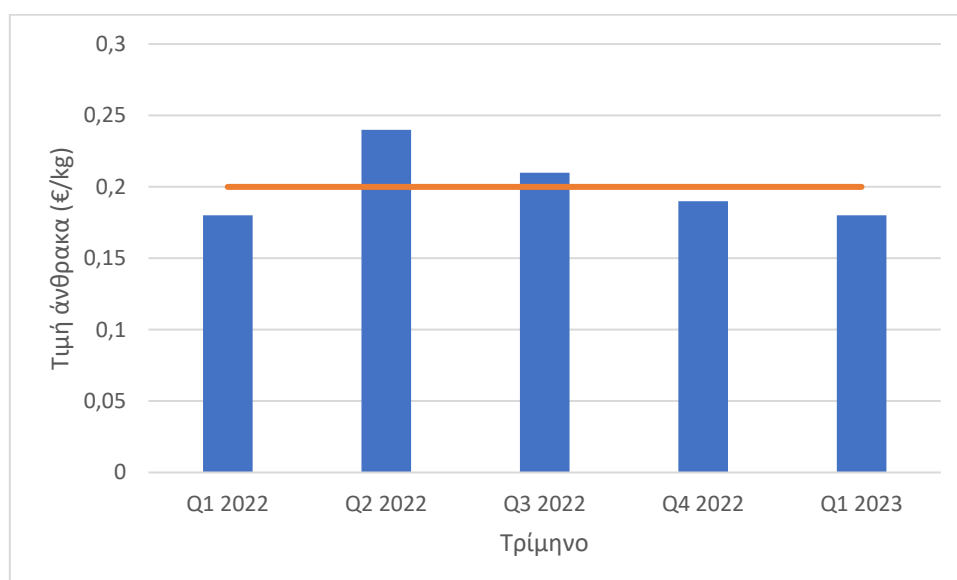
8.1 Υπολογισμός συντελεστών αντικειμενικής συνάρτησης

Κόστος χρήσης άνθρακα

Το κόστος χρήσης του άνθρακα ως καύσιμο περιλαμβάνει τόσο το κόστος αγοράς της πρώτης ύλης όσο και το κόστος εκπομπών CO₂ που παράγονται από την καύση του. Δηλαδή ισχύει:

$$C_1 = C_{1b} + C_{1c} \quad (8.1)$$

όπου C_{1b} το κόστος αγοράς της πρώτης ύλης και C_{1c} το κόστος εκπομπών CO₂. Για τον υπολογισμό του κόστους αγοράς λαμβάνεται υπόψη η τιμή του άνθρακα ανά κιλό και η θερμογόνος του δύναμη. Στο Σχήμα 46 απεικονίζεται η εξέλιξη της τιμής του άνθρακα την περίοδο 2022-23 στη Νότια Κορέα.



Σχήμα 46: Τιμή προμήθειας άνθρακα στη Νότια Κορέα. Πηγή: Intratec, 2023.

Ο μέσος όρος της τιμής αγοράς άνθρακα προκύπτει ίσος με $0,2 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$. Επιπλέον, η θερμογόνος δύναμη είναι ίση με $8,1 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ (Forest Research, 2023), επομένως:

$$C_{1b} = \frac{0,2 \frac{\text{€}}{\text{kg}}}{8,1 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = 0,0247 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \quad (8.2)$$

Αντίστοιχα, για τον υπολογισμό του κόστους εκπομπών CO₂ λαμβάνεται υπόψη η ποσότητα εκπομπών ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας από την καύση του

συγκεκριμένου καυσίμου ($0,35 \frac{kg CO_2}{kWh}$), καθώς και η τιμολόγηση των εκπομπών αυτών στη Νότια Κορέα ($0,013 \frac{\text{€}}{kg CO_2}$) (AGI, 2023; OECD, 2022):

$$C_{1c} = 0,35 \frac{kg CO_2}{kWh} \cdot 0,013 \frac{\text{€}}{kg CO_2} = 0,00455 \frac{\text{€}}{kWh} \quad (8.3)$$

Συνολικά:

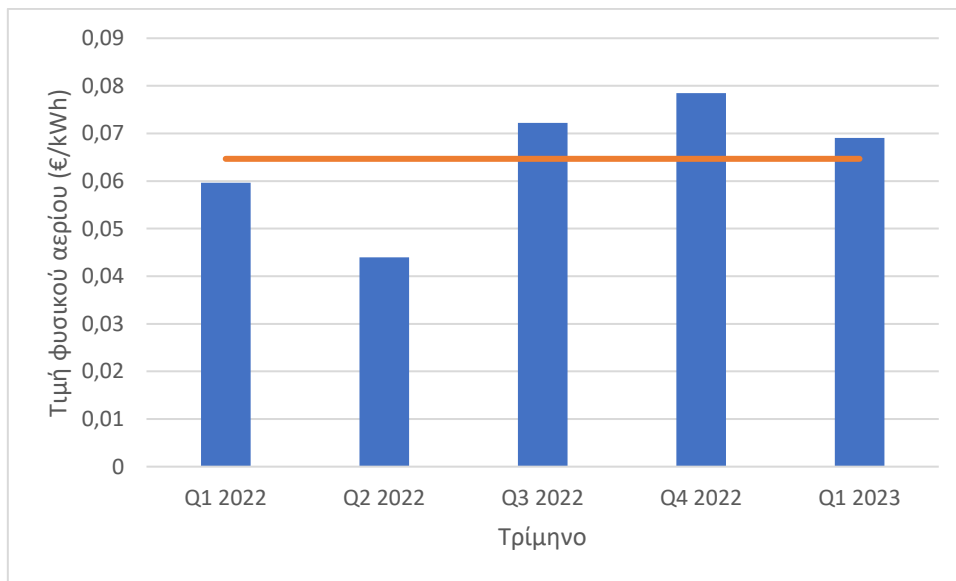
$$C_1 = C_{1b} + C_{1c} = 0,0247 + 0,00455 = 0,02925 \frac{\text{€}}{kWh} \quad (8.4)$$

Κόστος χρήσης φυσικού αερίου

Με αντίστοιχο τρόπο, το κόστος χρήσης του φυσικού αερίου ορίζεται ως:

$$C_2 = C_{2b} + C_{2c} \quad (8.5)$$

όπου C_{2b} το κόστος αγοράς της πρώτης ύλης και C_{2c} το κόστος εκπομπών CO_2 . Η τιμή προμήθειας φυσικού αερίου στη Νότια Κορέα το διάστημα 2022-23 απεικονίζεται στο Σχήμα 47.



Σχήμα 47: Τιμή προμήθειας φυσικού αερίου στη Νότια Κορέα. Πηγή: Intratec, 2023.

Ο μέσος όρος της τιμής του φυσικού αερίου είναι ίσος με $0,0647 \frac{\text{€}}{kWh}$. Για τον υπολογισμό του κόστους εκπομπών CO_2 λαμβάνεται υπόψη η ποσότητα εκπομπών ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας από την καύση αυτού του καυσίμου ($0,18 \frac{kg CO_2}{kWh}$), καθώς και η τιμολόγηση των εκπομπών αυτών στη Νότια Κορέα ($0,013 \frac{\text{€}}{kg CO_2}$) (AGI, 2023; OECD, 2022):

$$C_{2c} = 0,18 \frac{kg CO_2}{kWh} \cdot 0,013 \frac{\text{€}}{kg CO_2} = 0,00234 \frac{\text{€}}{kWh} \quad (8.6)$$

Συνολικά:

$$C_2 = C_{2b} + C_{2c} = 0,0647 + 0,00234 = 0,06704 \frac{\text{€}}{kWh} \quad (8.7)$$

Κόστος παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ

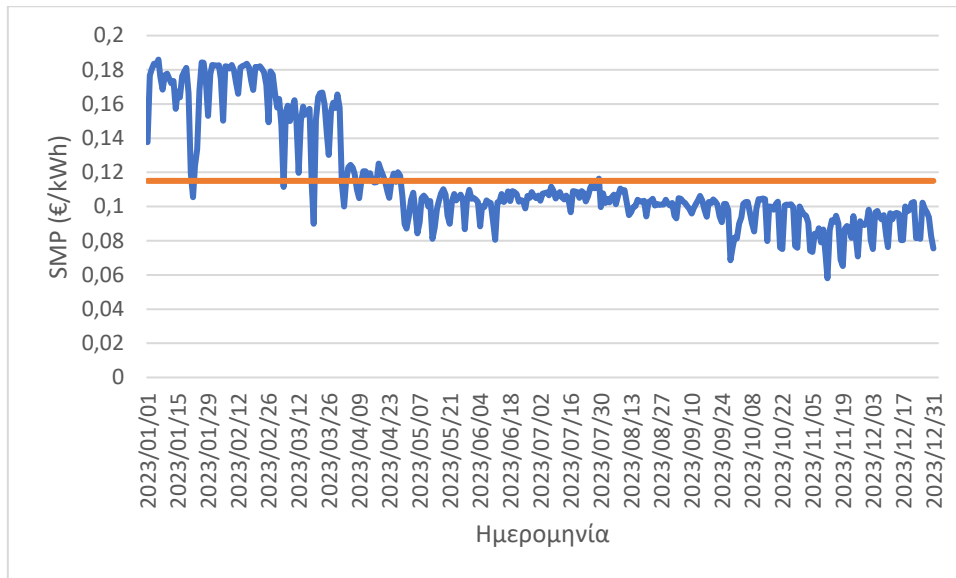
Στη Νότια Κορέα, το μέσο κόστος παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά ανέρχεται σε $0,1 \frac{\text{€}}{kWh}$, ενώ το αντίστοιχο κόστος για παραγωγή ενέργειας από ανεμογεννήτριες είναι $0,11 \frac{\text{€}}{kWh}$ (Climatescope, 2023). Το κόστος αυτό ονομάζεται σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (Levelized Cost of Electricity-LCOE) και εκφράζει την παρούσα αξία της συνολικής επένδυσης που πρέπει να λάβει χώρα προκειμένου να παράγεται μια συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας. Περιλαμβάνει τόσο τα έξοδα εγκατάστασης όσο και τις δαπάνες συντήρησης και λειτουργίας μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρισμού (Ragheb, 2017). Επομένως, ισχύει ότι:

$$C_3 = 0,1 \frac{\text{€}}{kWh} \quad (8.8)$$

$$C_4 = 0,11 \frac{\text{€}}{kWh} \quad (8.9)$$

Έσοδα από πώληση ενέργειας

Όπως ήδη αναφέρθηκε, σε περίπτωση παραγωγής πλεονάζουσας ενέργειας, αυτή μπορεί να πωληθεί στο δίκτυο της χώρας. Η τιμή πώλησης της ενέργειας θεωρείται ότι είναι ίση με την οριακή τιμή (System Marginal Price-SMP) (Shcherbakova, et al., 2014). Στο Σχήμα 48 απεικονίζεται η εξέλιξη της οριακής τιμής ηλεκτρικού ρεύματος στη Νότια Κορέα για το έτος 2023.



Σχήμα 48: Οριακή τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στη Νότια Κορέα το 2023. Πηγή: EPSIS, 2024.

Προκύπτει λοιπόν πως ο μέσος όρος της οριακής τιμής (SMP) και άρα η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για την παρούσα εργασία είναι:

$$P_5 = 0,115 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \quad (8.10)$$

8.2 Κώδικας μοντέλου σε Python

Αρχικό σενάριο:

```
import pulp

# Create a maximization MILP problem
prob = pulp.LpProblem("Thesis_MILP_program", pulp.LpMaximize)

# Define decision variables (5 sets of 12 real variables starting from
x[1, 1]
# and 5 sets of 12 binary variables starting from y[1,1])
sets = 5 # Number of sets
variables = pulp.LpVariable.dicts("x", [(i, j) for i in range(1, sets
+ 1) for j in range(1, 13)], lowBound=0, cat='Real')
binary_variables = pulp.LpVariable.dicts("y", [(i, j) for i in
range(1, sets + 1) for j in range(1, 13)], cat='Binary')

# Define parameters
C1 = 0.02925 # coal cost (€/kWh)
C2 = 0.06704 # NG cost (€/kWh)
C3 = 0.1 # cost of PV energy (€/kWh)
C4 = 0.11 # cost of wind turbines energy (€/kWh)
P5 = 0.115 # price of selling energy (€/kWh)
coal_perc = 0.743 # maximum coal percentage
res_perc = 0.2 # minimum renewable energy sources percentage
A = 100 # PV area (m2)
h = 0.75 # PV performance coefficient
N = 1 # Number of wind turbines
Cp = 0.4 # Wind turbines performance coefficient
dens = 1.2 # Air density (kg/m3)
R = 37.5 # Radius of wind turbines blades (m)
```

```

pi_value = 3.14
M = 999999999 # Big-M

# Define data (first input is set zero)

demand = [0, 126238.29, 91497.34, 80230.41, 78769.8, 79059.28,
65404.64, 81674.41, 68559.43, 57883.07, 84665.65, 86217.61, 59436.78]
solar_ir = [0, 69.85, 83.19, 115.70, 139.86, 155.11, 140.24, 128.02,
128.92, 112.60, 102.66, 70.87, 62.43]
wind_sp = [0, 2.53, 5.35, 2.85, 5.44, 2.70, 5.11, 2.68, 5.69, 2.57,
5.20, 2.54, 5.30]

# Define the objective function
objective_function_terms = []
for j in range(1, 13):
    objective_function_terms.append(P5 * variables[5, j] - C1 *
variables[1, j] - C2 * variables[2, j] - C3 * variables[3, j] - C4 *
variables[4, j])
prob += pulp.lpSum(objective_function_terms), "Objective"

# Define constraints

# constraint 1 (equilibrium constraint)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[1, j] + variables[2, j] + variables[3, j] +
variables[4, j] - variables[5, j] - demand[j] == 0 ,
f"Constraint_x5_{j}"

# constraint 2 (RES integration)
prob += pulp.lpSum([variables[3, j] + variables[4, j] for j in
range(1, 13)]) >= res_perc * pulp.lpSum([variables[i, j] for i in
range(1, 5) for j in range(1, 13)])

# constraint 3 (coal usage first constraint)
prob += pulp.lpSum([variables[1, j] for j in range(1, 13)]) <=
coal_perc * pulp.lpSum([variables[i, j] for i in range(1, 5) for j in
range(1, 13)])

# constraint 4 (coal usage second constraint)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[1, j] <= demand[j] * binary_variables[1, j]

# constraints 5 & 6 (NG usage constraints)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[2, j] <= M * binary_variables[2, j]
    prob += variables[2, j] + M * (1 - binary_variables[2, j]) >= 0.05
* (variables[1, j] + variables[2, j] + variables[3, j] + variables[4,
j])

# constraint 7 (solar energy production capacity)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[3, j] <= A * h * solar_ir[j] *
binary_variables[3, j]

# constraint 8 (wind power production capacity)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[4, j] <= 0.36 * N * Cp * dens * pi_value * (R **
2) * (wind_sp[j] ** 3) * binary_variables[4, j]

# constraint 9 (selling energy limit)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[5, j] <= M * binary_variables[5, j]

```

```

# constraints 10 & 11 (all decision variables are non-negative, binary
variables can take only 0-1 as values)
# are included in variables definition

# Solve the problem
prob.solve()

# Print the status of the solution
print("Status:", pulp.LpStatus[prob.status])
monthlist = ["January", "February", "March", "April", "May", "June",
"July", "August", "September", "October", "November", "December"]
# Print the optimal values of the decision variables
for j in range(1, 13):
    print("The optimal values for", monthlist[j - 1], "are:")
    for i in range(1, sets + 1):      # Start from 1 instead of 0
        print(f"x[{i}, {j}]:", format(variables[i, j].varValue,
".2f"), " kWh")
        print(f"y[{i}, {j}]:", int(binary_variables[i, j].varValue))

# Print the optimal objective value
print("Optimal objective value:",
format(pulp.value(prob.objective), ".2f"), " €")

```

Δεύτερο σενάριο:

```

import pulp

# Create a maximization MILP problem
prob = pulp.LpProblem("Thesis_MILP_program", pulp.LpMaximize)

# Define decision variables (5 sets of 12 real variables starting from
x[1, 1]
# and 5 sets of 12 binary variables starting from y[1,1])
sets = 5 # Number of sets
variables = pulp.LpVariable.dicts("x", [(i, j) for i in range(1, sets
+ 1) for j in range(1, 13)], lowBound=0, cat='Real')
binary_variables = pulp.LpVariable.dicts("y", [(i, j) for i in
range(1, sets + 1) for j in range(1, 13)], cat='Binary')

# Define parameters
C1 = 0.02925 # coal cost (€/kWh)
C2 = 0.06704 # NG cost (€/kWh)
C3 = 0.1 # cost of PV energy (€/kWh)
C4 = 0.11 # cost of wind turbines energy (€/kWh)
P5 = 0.115 # price of selling energy (€/kWh)
coal_perc = 0.743 # maximum coal percentage
res_perc = 0.2 # minimum renewable energy sources percentage
A = 100 # PV area (m2)
h = 0.75 # PV performance coefficient
N = 1 # Number of wind turbines
Cp = 0.4 # Wind turbines performance coefficient
dens = 1.2 # Air density (kg/m3)
R = 37.5 # Radius of wind turbines blades (m)
pi_value = 3.14
M = 999999999 # Big-M

# Define data (first input is set zero)

demand = [0, 126238.29, 91497.34, 80230.41, 78769.8, 79059.28,
65404.64, 81674.41, 68559.43, 57883.07, 84665.65, 86217.61, 59436.78]
solar_ir = [0, 69.85, 83.19, 115.70, 139.86, 155.11, 140.24, 128.02,

```

```

128.92, 112.60, 102.66, 70.87, 62.43]
wind_sp = [0, 2.53, 5.35, 2.85, 5.44, 2.70, 5.11, 2.68, 5.69, 2.57,
5.20, 2.54, 5.30]

# Define the objective function
objective_function_terms = []
for j in range(1, 13):
    objective_function_terms.append(P5 * variables[5, j] - C1 *
variables[1, j] - C2 * variables[2, j] - C3 * variables[3, j] - C4 *
variables[4, j])
prob += pulp.lpSum(objective_function_terms), "Objective"

# Define constraints

# constraint 1 (equilibrium constraint)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[1, j] + variables[2, j] + variables[3, j] +
variables[4, j] - variables[5, j] - demand[j] == 0 ,
f"Constraint_x5_{j}"

# constraint 2 (RES integration)
prob += pulp.lpSum([variables[3, j] + variables[4, j] for j in
range(1, 13)]) >= res_perc * pulp.lpSum([variables[i, j] for i in
range(1, 5) for j in range(1, 13)])

# constraint 3 (coal usage first constraint)
prob += pulp.lpSum([variables[1, j] for j in range(1, 13)]) <=
coal_perc * pulp.lpSum(demand[j] for j in range(1, 13))

# constraint 4 (coal usage second constraint)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[1, j] <= demand[j] * binary_variables[1, j]

# constraints 5 & 6 (NG usage constraints)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[2, j] <= demand[j] * binary_variables[2, j]
    prob += variables[2, j] + M * (1 - binary_variables[2, j]) >= 0.05
* (variables[1, j] + variables[2, j] + variables[3, j] + variables[4,
j])

# constraint 7 (solar energy production capacity)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[3, j] <= A * h * solar_ir[j] *
binary_variables[3, j]

# constraint 8 (wind power production capacity)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[4, j] <= 0.36 * N * Cp * dens * pi_value * (R **
2) * (wind_sp[j] ** 3) * binary_variables[4, j]

# constraint 9 (selling energy limit)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[5, j] <= M * binary_variables[5, j]

# constraints 10 & 11 (all decision variables are non-negative, binary
variables can take only 0-1 as values)
# are included in variables definition

# Solve the problem
prob.solve()

# Print the status of the solution
print("Status:", pulp.LpStatus[prob.status])

```

```

monthlist = ["January", "February", "March", "April", "May", "June",
"July", "August", "September", "October", "November", "December"]
# Print the optimal values of the decision variables
for j in range(1, 13):
    print("The optimal values for", monthlist[j - 1], "are:")
    for i in range(1, sets + 1): # Start from 1 instead of 0
        print(f"x[{i}, {j}]:", format(variables[i, j].varValue,
".2f"), " kWh")
        print(f"y[{i}, {j}]:", int(binary_variables[i, j].varValue))

# Print the optimal objective value
print("Optimal objective value:",
format(pulp.value(prob.objective), ".2f"), " €")

```

Τρίτο σενάριο:

```

import pulp

# Create a maximization MILP problem
prob = pulp.LpProblem("Thesis_MILP_program", pulp.LpMaximize)

# Define decision variables (5 sets of 12 real variables starting from
x[1, 1]
# and 5 sets of 12 binary variables starting from y[1,1])
sets = 5 # Number of sets
variables = pulp.LpVariable.dicts("x", [(i, j) for i in range(1, sets
+ 1) for j in range(1, 13)], lowBound=0, cat='Real')
binary_variables = pulp.LpVariable.dicts("y", [(i, j) for i in
range(1, sets + 1) for j in range(1, 13)], cat='Binary')

# Define parameters
C1 = 0.02925 # coal cost (€/kWh)
C2 = 0.06704 # NG cost (€/kWh)
C3 = 0.1 # cost of PV energy (€/kWh)
C4 = 0.11 # cost of wind turbines energy (€/kWh)
P5 = 0.115 # price of selling energy (€/kWh)
coal_perc = 0.743 # maximum coal percentage
res_perc = 0.2 # minimum renewable energy sources percentage
A = 100 # PV area (m2)
h = 0.75 # PV performance coefficient
N = 1 # Number of wind turbines
Cp = 0.4 # Wind turbines performance coefficient
dens = 1.2 # Air density (kg/m3)
R = 37.5 # Radius of wind turbines blades (m)
pi_value = 3.14
M = 999999999 # Big-M

# Define data (first input is set zero)

demand = [0, 126238.29, 91497.34, 80230.41, 78769.8, 79059.28,
65404.64, 81674.41, 68559.43, 57883.07, 84665.65, 86217.61, 59436.78]
solar_ir = [0, 69.85, 83.19, 115.70, 139.86, 155.11, 140.24, 128.02,
128.92, 112.60, 102.66, 70.87, 62.43]
wind_sp = [0, 2.53, 5.35, 2.85, 5.44, 2.70, 5.11, 2.68, 5.69, 2.57,
5.20, 2.54, 5.30]

# Define the objective function
objective_function_terms = []
for j in range(1, 13):
    objective_function_terms.append(P5 * variables[5, j] - C1 *
variables[1, j] - C2 * variables[2, j] - C3 * variables[3, j] - C4 *

```



```

variables[4, j])
prob += pulp.lpSum(objective_function_terms), "Objective"

# Define constraints

# constraint 1 (equilibrium constraint)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[1, j] + variables[2, j] + variables[3, j] +
variables[4, j] - variables[5, j] - demand[j] == 0 ,
f"Constraint_x5_{j}"

# constraint 2 (RES integration)
prob += pulp.lpSum([variables[3, j] + variables[4, j] for j in
range(1, 13)]) >= res_perc * pulp.lpSum([variables[i, j] for i in
range(1, 5) for j in range(1, 13)])

# constraint 3 (coal usage first constraint)
prob += pulp.lpSum([variables[1, j] for j in range(1, 13)]) <=
coal_perc * pulp.lpSum(demand[j] for j in range(1, 13))

# constraint 4 (coal usage second constraint)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[1, j] <= demand[j] * binary_variables[1, j]

# constraints 5 & 6 (NG usage constraints)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[2, j] <= demand[j] * binary_variables[2, j]
    prob += variables[2, j] + M * (1 - binary_variables[2, j]) >= 0.05
* (variables[1, j] + variables[2, j] + variables[3, j] + variables[4,
j])

# constraint extra (coal+NG usage constraint)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[1, j] + variables[2, j] <= demand[j]

# constraint 7 (solar energy production capacity)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[3, j] <= A * h * solar_ir[j] *
binary_variables[3, j]

# constraint 8 (wind power production capacity)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[4, j] <= 0.36 * N * dens * Cp * pi_value * (R **
2) * (wind_sp[j] ** 3) * binary_variables[4, j]

# constraint 9 (selling energy limit)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[5, j] <= M * binary_variables[5, j]

# constraints 10 & 11 (all decision variables are non-negative, binary
variables can take only 0-1 as values)
# are included in variables definition

# Solve the problem
prob.solve()

# Print the status of the solution
print("Status:", pulp.LpStatus[prob.status])
monthlist = ["January", "February", "March", "April", "May", "June",
"July", "August", "September", "October", "November", "December"]
# Print the optimal values of the decision variables
for j in range(1, 13):
    print("The optimal values for", monthlist[j - 1], "are:")

```

```

        for i in range(1, sets + 1):      # Start from 1 instead of 0
            print(f"x[{i}, {j}]:", format(variables[i, j].varValue,
            ".2f"), " kWh")
            print(f"y[{i}, {j}]:", int(binary_variables[i, j].varValue))

# Print the optimal objective value
print("Optimal objective value:",
format(pulp.value(prob.objective), ".2f"), " €")

```

Τέταρτο σενάριο:

```

import pulp

# Create a maximization MILP problem
prob = pulp.LpProblem("Thesis_MILP_program", pulp.LpMaximize)

# Define decision variables (5 sets of 12 real variables starting from
x[1, 1]
# and 5 sets of 12 binary variables starting from y[1,1])
sets = 5 # Number of sets
variables = pulp.LpVariable.dicts("x", [(i, j) for i in range(1, sets
+ 1) for j in range(1, 13)], lowBound=0, cat='Real')
# no binary variables
# Define parameters
C1 = 0.02925 # coal cost (€/kWh)
C2 = 0.06704 # NG cost (€/kWh)
C3 = 0.1     # cost of PV energy (€/kWh)
C4 = 0.11   # cost of wind turbines energy (€/kWh)
P5 = 0.115  # price of selling energy (€/kWh)
coal_perc = 0.743 # maximum coal percentage
res_perc = 0.2 # minimum renewable energy sources percentage
A = 100     # PV area (m2)
h = 0.75   # PV performance coefficient
N = 1      # Number of wind turbines
Cp = 0.4   # Wind turbines performance coefficient
dens = 1.2 # Air density (kg/m3)
R = 37.5   # Radius of wind turbines blades (m)
pi_value = 3.14
M = 999999999 # Big-M

# Define data (first input is set zero)

demand = [0, 126238.29, 91497.34, 80230.41, 78769.8, 79059.28,
65404.64, 81674.41, 68559.43, 57883.07, 84665.65, 86217.61, 59436.78]
solar_ir = [0, 69.85, 83.19, 115.70, 139.86, 155.11, 140.24, 128.02,
128.92, 112.60, 102.66, 70.87, 62.43]
wind_sp = [0, 2.53, 5.35, 2.85, 5.44, 2.70, 5.11, 2.68, 5.69, 2.57,
5.20, 2.54, 5.30]

# Define the objective function
objective_function_terms = []
for j in range(1, 13):
    objective_function_terms.append(P5 * variables[5, j] - C1 *
variables[1, j] - C2 * variables[2, j] - C3 * variables[3, j] - C4 *
variables[4, j])
prob += pulp.lpSum(objective_function_terms), "Objective"

# Define constraints

# constraint 1 (equilibrium constraint)
for j in range(1, 13):

```

```

    prob += variables[1, j] + variables[2, j] + variables[3, j] +
variables[4, j] - variables[5, j] - demand[j] == 0 ,
f"Constraint_x5_{j}"

# constraint 2 (RES integration)
prob += pulp.lpSum([variables[3, j] + variables[4, j] for j in
range(1, 13)]) >= res_perc * pulp.lpSum([variables[i, j] for i in
range(1, 5) for j in range(1, 13)])

# constraint 3 (coal usage first constraint)
prob += pulp.lpSum([variables[1, j] for j in range(1, 13)]) <=
coal_perc * pulp.lpSum([variables[i, j] for i in range(1, 5) for j in
range(1, 13)])

# constraint 4 (coal usage second constraint)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[1, j] <= demand[j]

# constraints 5 & 6 (NG usage constraints)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[2, j] >= 0.05 * (variables[1, j] +
variables[2, j] + variables[3, j] + variables[4, j])

# constraint 7 (solar energy production capacity)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[3, j] <= A * h * solar_ir[j]

# constraint 8 (wind power production capacity)
for j in range(1, 13):
    prob += variables[4, j] <= 0.36 * N * Cp * dens * pi_value * (R **
2) * (wind_sp[j] ** 3)

# constraint 9 (selling energy limit) was removed

# constraints 10 & 11 (all decision variables are non-negative, binary
variables can take only 0-1 as values)
# are included in variables definition

# Solve the problem
prob.solve()

# Print the status of the solution
print("Status:", pulp.LpStatus[prob.status])
monthlist = ["January", "February", "March", "April", "May", "June",
"July", "August", "September", "October", "November", "December"]
# Print the optimal values of the decision variables
for j in range(1, 13):
    print("The optimal values for", monthlist[j - 1], "are:")
    for i in range(1, sets + 1): # Start from 1 instead of 0
        print(f"x[{{i}}, {{j}}]:", format(variables[i, j].varValue,
".2f"), " kWh")

# Print the optimal objective value
print("Optimal objective value:",
format(pulp.value(prob.objective), ".2f"), " €")

```