



ΔΠΜΣ

Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία

Διπλωματική Εργασία

“Ενεργειακή, Εξεργειακή, Οικονομική και Περιβαλλοντική
Ανάλυση Ναυτικής Μονάδας Συμπααραγωγής”

Ιωάννης Βήχος

MNΣΝΔ20012

Επιβλέπων:

Θεόδωρος Ζάννης

Πειραιάς

Φεβρουάριος 2022

ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ / ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT

Το άτομο το οποίο εκπονεί την Διπλωματική Εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (εμπορικός, μη κερδοσκοπικός ή εκπαιδευτικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας των πιθανών συνεπειών αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΜΕΛΟΣ Α΄: Θεόδωρος Ζάννης

ΜΕΛΟΣ Β΄: Ιωάννης Κατσάνης

ΜΕΛΟΣ Γ΄: Ευθύμης Παριώτης



*“Ιωάννης Βήχος”,
“Ενεργειακή, Εξεργειακή, Οικονομική και Περιβαλλοντική Ανάλυση
Ναυτικής Μονάδας Συμπαραγωγή”*

“Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Θ. Ζάννη για την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας, το υλικό που μου παρείχε και την καθοδήγηση που μου έδινε για την ομαλή εκπόνηση της καθώς και τις υποδείξεις του σχετικά με την οργάνωση και συγκρότησή της.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την αγάπη μου και τις ευχαριστίες μου στην οικογένεια μου η οποία με στηρίζει και με βοηθάει να ξεπερνάω κάθε δυσκολία που αντιμετωπίζω στην πορεία μου και σε κάθε νέα αρχή που κάνω στη ζωή· επειδή, ότι έχω καταφέρει μέχρι τώρα το οφείλω σε μεγάλο βαθμό σε αυτούς.”



Περίληψη

Τα συστήματα πολύ-παραγωγής έχουν χρησιμοποιηθεί τα τελευταία χρόνια σε διάφορες εφαρμογές και κερδίζουν συνεχώς έδαφος αφού είναι εκ του αποτελέσματος πιο αποδοτικά από πιο απλά συμβατικά ενεργειακά συστήματα. Δύο κύριοι στόχοι για το υπό μελέτη σύστημα είναι η παραγωγή καθορισμένων ενεργειακών προϊόντων με ταυτόχρονη βελτίωση της απόδοσης του ίδιου του συστήματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζεται ένας νέος υβριδικός κύκλος συμπαραγωγής, ο οποίος παράγει ηλεκτρική ενέργεια και ουρία. Το εν λόγω σύστημα περιλαμβάνει κύκλο αεριοστροβίλου, κύκλο ατμού, σύστημα ανάκτησης άνθρακα, κυσέλη καυσίμου βασισμένη σε μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων, ηλεκτρολύτη, κρυογονική μονάδα διαχωρισμού αέρα και αντιδραστήρες σύνθεσης ουρίας και αμμωνίας, ενώ έχει γίνει η ενεργειακή, οικονομική, εξεργειακή, περιβαλλοντική ανάλυση με βάση εξεργειακούς δείκτες και συμβατική περιβαλλοντική ανάλυση του. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας καταδεικνύουν την δυνατότητα παραγωγής 689 GW h ηλεκτρικής ενέργειας και 1.323 εκατομμύριων τόνων ουρίας ετησίως. Η ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση αυτού του υβριδικού συστήματος είναι 31,8% και 53,3% αντιστοίχως, ενώ η υψηλότερη και χαμηλότερη τιμή διανομής εξέργειας σχετίζεται με τον αντιδραστήρα σύνθεσης ουρίας και την κρυογονική μονάδα διαχωρισμού αέρα. Στον οικονομικό υπολογισμό, έχει συνυπολογιστεί και το κοινωνικό κόστος του διοξειδίου του άνθρακα, ενώ οι τέσσερις κύριοι οικονομικοί παράγοντες που εξετάζονται είναι: η καθαρή παρούσα αξία, η σύνθετη και η απλή περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης και ο εσωτερικός ρυθμός απόσβεσης. Λαμβάνοντας υπόψιν το κοινωνικό κόστος της μονάδας διαχωρισμού διοξειδίου του άνθρακα, οι οικονομικοί παράγοντες βελτιώνονται. Η εξεργο-περιβαλλοντική και περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα ως προς τη ζημιά και οι παράγοντες εξεργειακής σταθερότητας είναι ίσοι με 1.64, 3.1, και 0.76, αντίστοιχα.

Λέξεις – Κλειδιά

Ναυτική Μονάδα Συμπαραγωγής, πολύ-παραγωγικό σύστημα, ενεργειακή ανάλυση, ουρία.



Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Περιεχόμενα	vi
Κατάλογος Σχημάτων	vii
Κατάλογος Πινάκων	viii
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	ix
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Καινοτομικά στοιχεία της παρούσας εργασίας.....	4
2. Μαθηματική μοντελοποίηση.....	6
2.1 Περιγραφή της διαδικασίας.....	6
2.2 Ισορροπία ενέργειας και μάζας	9
2.2.1 Κύκλος αεριοστροβίλου.....	9
2.2.2 Κύκλος ατμού.....	10
2.2.3 Συλλογή διοξειδίου του άνθρακα.....	10
2.2.4 Ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων	11
2.2.5 Κρυογονική μονάδα διαχωρισμού αέρα	11
2.2.6 Αντιδραστήρας σύνθεσης αμμωνίας.....	11
2.2.7 Αντιδραστήρας σύνθεσης ουρίας.....	12
2.2.8 Συνολικό σύστημα	12
2.3 Εξεργειακή ανάλυση	12
2.4 Οικονομική ανάλυση.....	14
2.5 Εξεργο-περιβαλλοντική ανάλυση	16
3. Αποτελέσματα και συμπεράσματα.....	16
3.1 Επικύρωση του μοντέλου.....	17
3.2 Αποτελέσματα ενεργειακής και εξεργειακής ανάλυσης	19
3.3 Εξεργο-περιβαλλοντική ανάλυση	21
3.4 Οικονομική ανάλυση.....	22
3.5 Περιβαλλοντική ανάλυση	23
3.6 Παραμετρική μελέτη	26
4. Συμπεράσματα	33
Βιβλιογραφία.....	34
Παράρτημα Α: “Αεριοστρόβιλος GE LM2500-30”	38



*“Ιωάννης Βήχος”,
“Ενεργειακή, Εξεργειακή, Οικονομική και Περιβαλλοντική Ανάλυση
Ναυτικής Μονάδας Συμπαραγωγή”*

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση του κύκλου του υπο-μελέτη συστήματος	6
Σχήμα 2. Το διάγραμμα Grassman του υπό-μελέτη κύκλου.....	8



Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Οι σχέσεις ισορροπίας ενέργειας και μάζας του κύκλου αεριοστροβίλου.....	9
Πίνακας 2. Η περιεκτικότητα των συστατικών του φυσικού αερίου (mole/mole).....	10
Πίνακας 3. Οι σχέσεις ισορροπίας ενέργειας και μάζας του κύκλου ατμού.....	10
Πίνακας 4. Ρυθμός καταστροφής της εξέργειας για κάθε συνιστώσα του συστήματος.....	13
Πίνακας 5. Το ειδικό κόστος των προϊόντων και του καυσίμου	14
Πίνακας 6. Οι σχέσεις υπολογισμού κόστους αγοράς του κάθε υποσυστήματος	16
Πίνακας 7. Τα εισαγμένα δεδομένα-σταθερές στο EES	17
Πίνακας 8. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ των δεδομένων από τις πηγές και των δεδομένων που προκύπτουν από την προσομοίωση	18
Πίνακας 9. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες καθενός εκ των σημείων του κύκλου του υπό μελέτη συστήματος	19
Πίνακας 10. Ρυθμός καταστροφής εξέργειας κάθε υποσυστήματος	20
Πίνακας 11. Οι τέσσερις κύριες οικονομικές παραμέτροι του υπό μελέτη συστήματος.....	22
Πίνακας 12. Επιδόσεις LM2500-30	38



Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Η ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση του συστήματος.....	20
Διάγραμμα 2. Ποσοστό ρυθμού καταστροφής εξέργειας για κάθε υποσύστημα	21
Διάγραμμα 3. Ο παράγοντας εξεργο-περιβάλλοντος (f_{ei}), ο παράγοντας απόδοσης περιβαλλοντικής ζημιάς (θ_{ei}) και ο παράγοντας ευστάθειας της εξέργειας (f_{es})	22
Διάγραμμα 4. Οι τέσσερις βασικές οικονομικοί παράμετροι (NPV, SPP, PP, IRR) με ή χωρίς τον συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα	24
Διάγραμμα 5. Οι τέσσερις βασικές οικονομικοί παράμετροι (NPV, SPP, PP, IRR) με ή χωρίς τον συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα για τον κύκλο αεριοστρόβιλου	25
Διάγραμμα 6. Οι τέσσερις βασικές οικονομικοί παράμετροι (NPV, SPP, PP, IRR) με ή χωρίς τον συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα για τον συνδυασμένο κύκλο αεριοστρόβιλου και κύκλου ατμού.....	26
Διάγραμμα 7. Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος του συστήματος σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου	26
Διάγραμμα 8. Ο εξεργειακός και ενεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου	27
Διάγραμμα 9. Ο ρυθμός καταστροφής εξέργειας σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου	28
Διάγραμμα 10. Ο εξεργο-περιβαλλοντικός παράγοντας (f_{ei}) και ο παράγοντας εξεργειακής σταθερότητας (f_{es}) σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου (ra)....	29
Διάγραμμα 11. Ο παράγοντας απόδοσης περιβαλλοντικής ζημιάς σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου	29
Διάγραμμα 12. Οι οικονομικοί δείκτες PP και SPP με η χωρίς το συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου ra	30
Διάγραμμα 13. Ο οικονομικός δείκτης NPV με ή χωρίς το συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου ra	31
Διάγραμμα 14. Ο οικονομικός δείκτης IRR με ή χωρίς το συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου ra	32
Διάγραμμα 15. Ειδική κατανάλωση καυσίμου $sfc(kg/kWh)$ σαν συνάρτηση της ισχύος (kW) του αεριοστρόβιλου LM2500-30.....	39



Εισαγωγή

Η οικονομική ανάπτυξη και η αύξηση του πληθυσμού καθιστούν απαραίτητη την απόκτηση πρόσβασης σε περισσότερους ενεργειακούς πόρους. Μέχρι σήμερα, τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν την πιο συνηθισμένη συμβατική πηγή ενέργειας, τα οποία ωστόσο έχουν τις χειρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα [1].

Για να οριστεί η σχέση μεταξύ της περιβαλλοντικής μόλυνσης και των οικονομικών παραγόντων, χρησιμοποιείται ο όρος του κοινωνικού κόστους. Το κοινωνικό κόστος της μόλυνσης του αέρα είναι αυτό που σχετίζεται με τις συνέπειες που επιφέρει στο κοινωνικό σύνολο, όπως για παράδειγμα ασθένειες, θάνατοι κλπ., ενώ αλλάζει από περιοχή σε περιοχή, αφού αλλάζουν και τα εκάστοτε πρότυπα ζωής [2,3].

Συνεπώς, είναι απαραίτητο να ληφθούν μέτρα ώστε η χρήση των ορυκτών καυσίμων να γίνεται με πιο αποδοτικό τρόπο, ώστε να μειωθεί ο αντίκτυπος που έχει στο περιβάλλον και οι ενεργειακές απώλειες [4]. Επίσης, για να αυξηθεί η παραγωγικότητα των ενεργειακών συστημάτων, πρέπει να ενταχθούν σε ευρεία χρήση συστήματα που παράγουν πολλά προϊόντα με διαφορετικές δυνατότητες εκμετάλλευσης και που καλύπτουν διαφορετικές ανάγκες, όπως η ηλεκτρική ενέργεια, η θέρμανση, η ψύξη, το υδρογόνο, η αμμωνία, η ουρία κλπ. [5,6]. Επιπροσθέτως, τα παράγωγα καύσης των ορυκτών καυσίμων όπως το CO_2 εγείρουν πληθώρα ανησυχιών σχετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας παγκοσμίως, λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου [7]. Μια από τις πιο γνωστές μεθόδους μείωσης της ρύπανσης, που προκύπτει από τη χρήση ορυκτών καυσίμων, είναι το σύστημα συλλογής και αποθήκευσης εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (carbon capture and storage – CCS) το οποίο μετατρέπει τα παράγωγα επιβλαβή αέρια σε άλλα ουδέτερα [8]. Μεταξύ των διαφορετικών τύπων σταθμών παραγωγή ενέργειας που χρησιμοποιούνται σήμερα, οι αεριοστρόβιλοι έχουν γίνει ιδιαίτερα δημοφιλείς λόγω της υψηλής τους συγκέντρωσης ισχύος τους [9]. Επιπροσθέτως, με σκοπό την βελτίωση του συνολικού βαθμού απόδοσης μιας θερμικής εγκατάστασης χρησιμοποιούνται ευρέως πλέον σήμερα ατμογεννήτριες ανάκτησης θερμότητας (heat recovery steam generators – HRSG) με σκοπό την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από τα καυσαέρια του αεριοστροβίλου και την παραγωγή υδρατμού [10,11]

Σε ένα παράδειγμα μιας τέτοιας εφαρμογής, το συλλεγμένο διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να συμμετέχει σαν αντιδρών σε συνδυασμό με αμμωνία σε μια διεργασία παραγωγής ουρίας, η οποία είναι μια ιδιαίτερα σημαντική χημική ένωση. Η διαδικασία διαχωρισμού



του διοξειδίου του άνθρακα από τα καυσαέρια και στη συνέχεια η διαδικασία παραγωγής ουρίας με τον αποδοτικότερο και οικονομικότερο δυνατό τρόπο είναι ιδιαίτερα απαιτητική [12,13].

Ο διαχωρισμός του διοξειδίου του άνθρακα από τα καυσαέρια είναι ιδιαίτερα ενεργειακά απαιτητική διεργασία. Ο βασικός στόχος είναι η επίτευξη αυτής μέσω της εφαρμογής ενός συστήματος αποκόμισης θερμικής ενέργειας με το ελάχιστο κόστος. Το σύστημα αυτό έχει εξεταστεί, από οικονομικής άποψης, με τη χρήση των απωλειών θερμότητας από τις βιομηχανίες τσιμέντου, σιλικόνης, ατσαλιού και χαρτιού. Τα αποτελέσματα αυτής της οικονομικής διερεύνησης απεκάλυψαν ότι το κόστος της μονάδας διαχωρισμού ατμού για CO₂ το οποίο παρέχεται από απορριπτόμενη θερμότητα αυτών των βιομηχανιών μπορεί να μεταβάλλεται από 1.1 ως 1.4 €/τόνο [14].

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε επίσης η θερμοδυναμική απόδοση και η παραγωγή ουρίας ενός συστήματος που αποτελείται από συνδυασμένο κύκλο παραγωγής ισχύος και κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (solid oxide fuel cells - SOFC). Τα αποτελέσματα της μελέτης αποκαλύπτουν ότι η θερμοδυναμική απόδοση των κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων τροφοδοτούμενων από αμμωνία ήταν υψηλότερη από εκείνη των κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων όταν αυτές τροφοδοτούνταν με ουρία. Επίσης, η θερμική απόδοση του συνδυασμένου συστήματος με κυψέλες καυσίμων στερεών οξειδίων τροφοδοτούμενο με αμμωνία ήταν περίπου 85% και η εξεργειακή απόδοση περίπου 75%. Συμπερασματικά η απόδοση του συνδυασμού ενός συστήματος τροφοδοτούμενο με αμμωνία με κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων ήταν λιγότερο από 10% [15].

Σε έρευνα που διενεργήθηκε [16], ένας ηλεκτροπαραγωγικός σταθμός που χρησιμοποιούσε ως καύσιμο άνθρακα εξετάστηκε ως προς την εκμετάλλευση των καυσαερίων του προς παραγωγή ενέργειας και ουρίας. Εν των μεταξύ, υδρογόνο που παράγεται σε συνθετικό αέριο από εξαερίωση άνθρακα χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή αμμωνίας. Έπειτα, η αμμωνία χρησιμοποιήθηκε στη παραγωγή ουρίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μια εγκατάσταση συλλογής διοξειδίου του άνθρακα και παραγωγής ουρίας κατανάλωσαν βοηθητική ισχύ περίπου στο 19% της βασικής υπόθεσης. Λαμβάνοντας υπόψιν την συγκεκριμένη βοηθητική ισχύ, το συγκεκριμένο σύστημα σύλλεξε το 25% του συνολικού διοξειδίου του άνθρακα.

Μια τεχνική, περιβαλλοντική και οικονομική έρευνα για τις κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων με σκοπό τη μελέτη της ισχύος και της θερμότητας που παράγουν αποκάλυψε ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τις κυψέλες στερεών οξειδίων που



βασίζονται σε υβριδικά συστήματα συμπαραγωγής ήταν 60% λιγότερες ανά έτος από άλλα συμβατικά συστήματα [17].

Η παραγωγή ουρίας μέσω αντίδρασης αζώτου και διοξειδίου του άνθρακα που προέρχεται από τα καυσαέρια μηχανών εσωτερικής καύσης εξετάστηκε από μελέτη, στην οποία η σύνθεση της ουρίας και της αμμωνίας διενεργήθηκε βασιζόμενη στη καύση με καθαρό οξυγόνο (oxy-fuel combustion) και συνεπώς CO_2 , N_2 και H_2O χρησιμοποιήθηκαν ως τα κύρια συστατικά της διαδικασίας [18]. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι με τη κατανάλωση των 2036 kg/h προϊόντων καύσης με καθαρό οξυγόνο υπάρχει δυνατότητα παραγωγής 1700kg/h CO_2 και 2856 kg/h ουρίας. Τέλος, η αξία της παραγωγής ουρίας μέσω αυτής της διαδικασίας ανέρχεται περίπου στα 3.500.000 δολάρια ετησίως.

Μια ενεργειακή-εξεργειακή μελέτη του συνδυασμού κυψελών στερεών οξειδίων τροφοδοτούμενων από φυσικό αέριο, συστήματος εξαερίωσης άνθρακα, μονάδας διαχωρισμού αέρα (Air separation Unit – ASU), κύκλων διοξειδίου του άνθρακα και ατμού και μονάδας επανεξάτμισης υγροποιημένου φυσικού αερίου ως μια σύνθετη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έδειξε ότι η ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση ήταν 56,4 % και 57,9% αντιστοίχως [19].

Στην εργασία τους οι Hou et al. [20] διερεύνησαν υπολογιστικά ένα σύστημα κατανομημένης ενέργειας το οποίο αποτελούνταν από συνδυασμένους θερμοδυναμικούς κύκλους αεριοστροβίλου και ατμοστροβίλου, κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων με αναμορφωμένη μεθανόλη που λειτουργούσαν με ηλιακή ενέργεια, με αντλία θερμότητας απορρόφησης και συστήματα ψύξης με απορρόφηση.

Η ενεργειακή απόδοση της κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων υπολογίστηκε περίπου στο 35%, η απόδοση παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος 66% και η συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος ήταν 90%.

Σε προηγούμενη ερευνητική εργασία [21] παρουσιάστηκε ένα νέο ολοκληρωμένο ενεργειακό σύστημα το οποίο αποτελούνταν από ηλιακό συλλέκτη με συγκεντρωτικούς δίσκους, ανεμογεννήτριες, έναν ψύκτη απορρόφησης, έναν οργανικό κύκλο Rankine και μια μονάδα παραγωγής μεθανίου. Το συγκεκριμένο σύνθετο ενεργειακό σύστημα εξετάστηκε για παραγωγή ισχύος, ψύξης και για παραγωγή μεθανίου. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης [21] έδειξαν ότι ο ρυθμός παραγωγής του μεθανίου έφτασε τα 140 Nm^3 /μήνα εξαιτίας της κατανάλωσης 144 Nm^3 /μήνα διοξειδίου του άνθρακα. Επιπρόσθετα, η ενέργεια αυτού του υβριδικού συστήματος μεταβλήθηκε από περίπου 24% ως 9% από



την μια πλευρά και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης κυμάνθηκε από 23% ως 8% από την άλλη πλευρά.

Σε προηγούμενη εργασία [22] επίσης πραγματοποιήθηκε μια σύνθετη ενεργειακή, εξεργειακή, εξεργο-οικονομική και εξεργο-περιβαλλοντική μελέτη ενός υβριδικού συστήματος το οποίο περιλαμβάνει τρεις θερμοδυναμικούς κύκλους (θερμοδυναμικό κύκλο αεριοστρόβιλου, θερμοδυναμικό κύκλο Rankine για παραγωγή υδρατμού και οργανικό κύκλο Rankine – ORC) και ένα σύστημα δέσμευσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τα καυσαέρια των μηχανών. Ο ενεργειακός και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του ολοκληρωμένου συστήματος είναι 72% και 73% αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, η μονάδα δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα κατάφερε να δεσμεύσει περίπου 620,000 τόνους εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κάθε έτος [22]. Εξετάστηκε ένας υβριδικός συνδυασμός για μετατροπή του φυσικού αερίου σε υγρά με παραγωγή αμμωνίας και ουρίας. Μια διαδικασία πολύ-παραγοντικής βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό των βέλτιστων τιμών απόδοσης δέσμευσης του άνθρακα και παραγωγής παραφίνης κατά την διεργασία μετατροπής του αερίου σε υγρό (Gas to Liquid Process – GTL). Τα αποτελέσματα από αυτή την διαδικασία φανέρωσαν την παραγωγή 434,000 περίπου τόνων/έτος ουρίας από τα παραγόμενο CO₂ κατά την διεργασία μετατροπής αερίου σε υγρό. Εν τω μεταξύ, η κερδοφορία αυτής της σύνθετης διεργασίας έφθασε το 8% [23].

1.1 Καινοτομικά στοιχεία της παρούσας εργασίας

Το υπό μελέτη σύστημα, στο οποίο συλλέγεται διοξείδιο του άνθρακα από τα καυσαέρια ενός αεριοστρόβιλου με σκοπό τη παραγωγή ουρίας, δεν έχει μελετηθεί στο παρελθόν. Συνεπώς, η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει να ερευνήσει ένα νέο τύπο συστήματος συμπαραγωγής ενέργειας, το οποίο περιλαμβάνει επτά βασικά υποσυστήματα κύκλο αεριοστρόβιλου, κύκλο ατμού, σύστημα ανάκτησης άνθρακα, αντιδραστήρα παραγωγής αμμωνίας, αντιδραστήρα παραγωγής ουρίας, ηλεκτρολύτη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων και κρυογονική μονάδα διαχωρισμού αέρα. Τα προϊόντα του συστήματος είναι ηλεκτρική ενέργεια και ουρία.

Στη παραπάνω διάταξη το διοξείδιο του άνθρακα που συλλέγεται από τα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου αντιδρούν με αμμωνία στον αντίστοιχο αντιδραστήρα και παράγεται η ουρία. Για την παραγωγή αμμωνίας, το υδρογόνο παράγεται στον ηλεκτρολύτη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων αντιδρά με άζωτο το οποίο διαχωρίζεται από τον αέρα στην



*“Ιωάννης Βήχος”,
“Ενεργειακή, Εξεργειακή, Οικονομική και Περιβαλλοντική Ανάλυση
Ναυτικής Μονάδας Συμπαρογωγή”*

αντίστοιχη μονάδα διαχωρισμού (κρυογονική μονάδα διαχωρισμού αέρα). Επιπλέον, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τον κύκλο του αεριοστροβίλου και τον κύκλο ατμού καλύπτει τις ενεργειακές απαιτήσεις των παραπάνω συστημάτων (αντιδραστήρας παραγωγής ουρίας, ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων και κρυογονική μονάδα διαχωρισμού αέρα), ενώ η περίσσεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άλλα συστήματα. Η παραπάνω διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί οπουδήποτε υπάρχουν επαρκή αποθέματα φυσικού αερίου όπως για παράδειγμα οι χώρες της μέσης ανατολής. Τα προϊόντα του εν λόγω συστήματος είναι η ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε ηλεκτρική κατανάλωση και η ουρία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αγροτική, την ιατρική, την φαρμακευτική βιομηχανία, ως καθαριστικό, ως βάση για την παραγωγή πλαστικών κλπ.

Συνεπώς, η παρούσα εργασία είναι πρωτοποριακή διότι:

- Προτείνει μια νέα διάταξη για την παραγωγή ουρίας και ηλεκτρικής ενέργειας
- Η πρόταση που γίνεται εξετάζεται ενεργειακά, εξεργειακά, οικονομικά καθώς και από εξεργο-περιβαλλοντική και περιβαλλοντικής άποψης
- Καταδεικνύει τα κοινωνικά κόστη που προκύπτουν από το διοξείδιο του άνθρακα από οικονομική άποψη

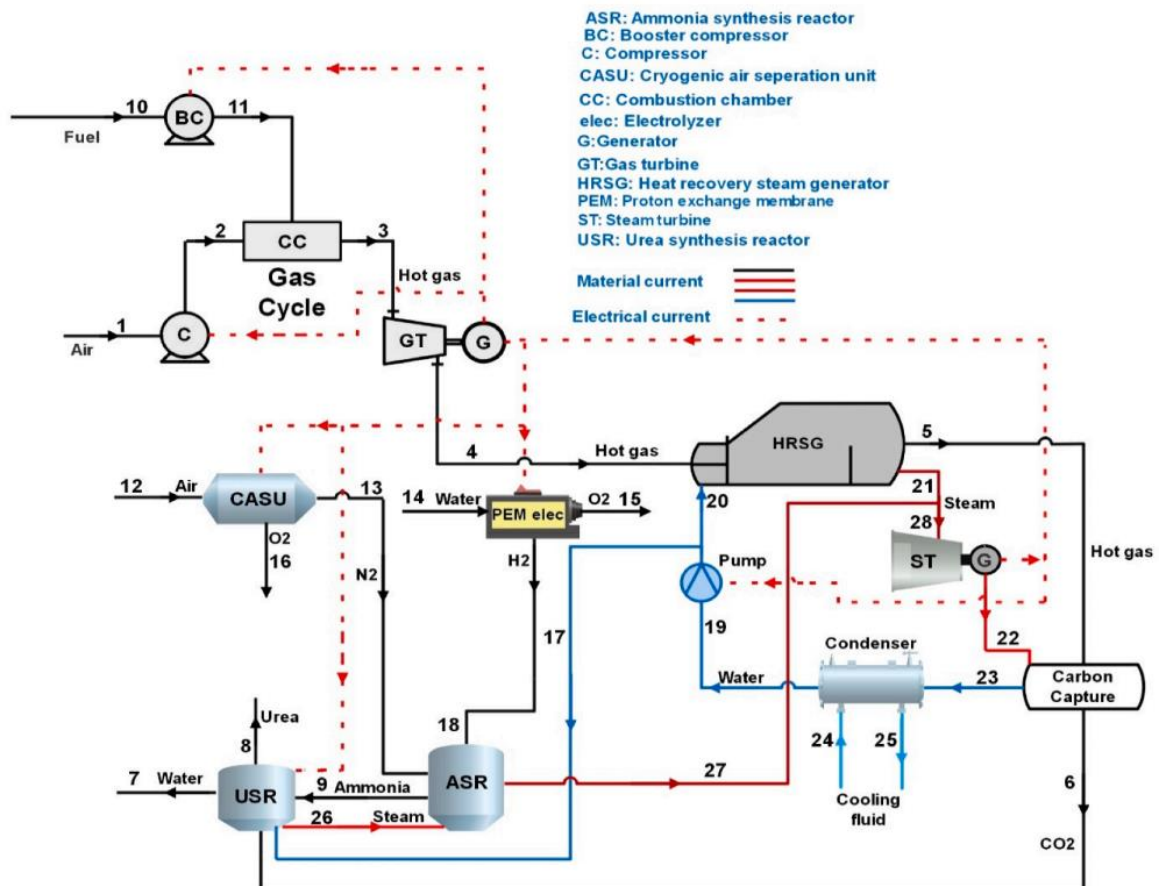


Μαθηματική μοντελοποίηση

2.1 Περιγραφή της διαδικασίας

Το Σχήμα 1 δείχνει ένα διαγραμματικό σχήμα του συστήματος, που όπως προαναφέρθηκε περιλαμβάνει επτά υποσυστήματα:

- α) Κύκλος αεριοστροβίλου
- β) Κύκλος ατμού
- γ) Συλλογή διοξειδίου του άνθρακα
- δ) Ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων
- ε) Κρυογονική μονάδα διαχωρισμού αέρα
- στ) Αντιδραστήρας παραγωγής αμμωνίας
- ζ) Αντιδραστήρας παραγωγής ουρίας



Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση του κύκλου του υπο-μελέτη συστήματος



*“Ιωάννης Βήχος”,
“Ενεργειακή, Εξεργειακή, Οικονομική και Περιβαλλοντική Ανάλυση
Ναυτικής Μονάδας Συμπαραγωγή”*

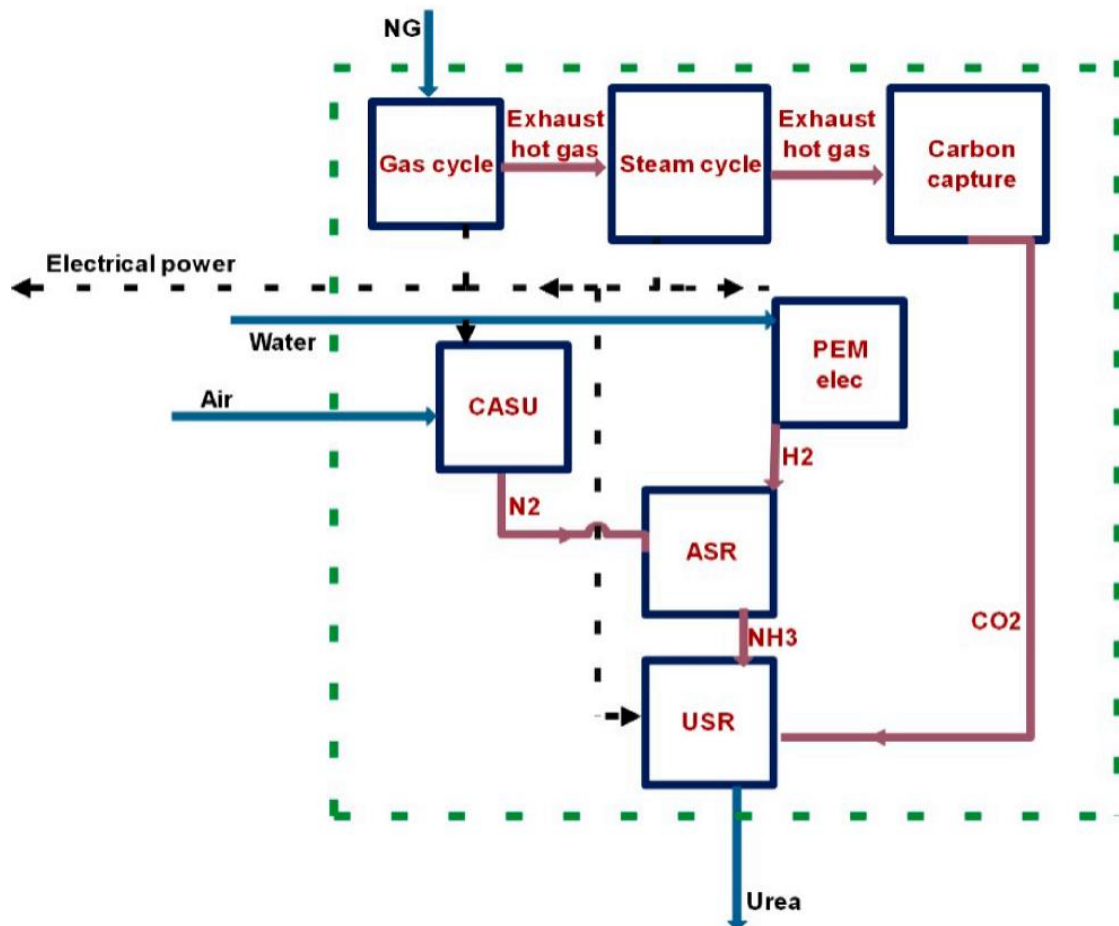
Σε αυτό το σύστημα ο αέρας εισαγωγής συμπιέζεται στον συμπιεστή (Σ) (Σημεία 1 και 2) και στη συνέχεια αντιδράει με το καύσιμο (φυσικό αέριο) στο θάλαμο καύσης (ΘΚ) (Σημεία 2, 3). Το καύσιμο (φυσικό αέριο) συμπιέζεται σε κατάλληλο συμπιεστή (Σημεία 10, 11) για να αποκτήσει την πίεση που απαιτείται για τον θάλαμο καύσης. Τα καυσαέρια περιστρέφουν τον αεριοστρόβιλο (Α) ο οποίος παράγει ηλεκτρική ενέργεια (Σημεία 3, 4) και στη συνέχεια διέρχονται από ένα σύστημα ανακόμισης θερμότητας το οποίο παράγει ατμό υψηλής πίεσης (ΠΑ) (Σημεία 4, 5, 20, 21). Στο υποσύστημα δέσμευσης εκπομπών CO₂, το ποσοστό CO₂ του καυσαερίου διαχωρίζεται (Σημείο 6) στο σύστημα δέσμευσης άνθρακα μονοαιθυλαμίνης (monoethanolamine - MEA) και αυτό αντιδρά με την αμμωνία στον αντιδραστήρα σύνθεσης ουρίας (urea synthesis reactor – USR) με στόχο την παραγωγή ουρίας και νερού (Σημεία 7 και 8).

Στον κύκλο ατμού (ΚΑ), η πίεση του νερού αυξάνεται στην αντλία (Σημεία 19, 20) και εισέρχεται στο σύστημα ανακόμισης θερμότητας όπου αυξάνεται η θερμοκρασία του και τελικά μετατρέπεται σε ατμό υψηλής πίεσης (Σημείο 21). Επιπλέον, σε αυτόν προστίθεται και ο ατμός που έχει παραχθεί στους αντιδραστήρες παραγωγής ουρίας και αμμωνίας (Σημεία 17, 26, 27, 28). Στη συνέχεια, ο ατμός υψηλής πίεσης περιστρέφει τον ατμοστρόβιλο, ο οποίος παράγει ηλεκτρική ενέργεια (Σημεία 28, 22).

Ο χαμηλής πίεσης εξερχόμενος ατμός από τον ατμοστρόβιλο (Σημείο 22) καλύπτει της ενεργειακές απαιτήσεις του συλλέκτη διοξειδίου (Σημείο 23) και στη συνέχεια μετατρέπεται σε νερό απορρίπτοντας την εναπομένουσα θερμότητα στο ψυκτικό υγρό του συμπυκνωτή (Σημεία 19, 23, 24, 25).

Το υδρογόνο που παράγεται από τον ηλεκτρολύτη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Σημεία 14, 15, 18) αντιδρά με το άζωτο που παράγεται στη κρυογονική μονάδα διαχωρισμού αέρα (Σημεία 12, 13, 16), στον αντιδραστήρα παραγωγής αμμωνίας με σκοπό την παραγωγή αμμωνίας (Σημείο 9).

Στο εν λόγω σύστημα, οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο κύκλος του αεριοστροβίλου, ο κύκλος ατμού ενώ οι καταναλωτές είναι όλα τα υπόλοιπα υποσυστήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, ενώ τα προϊόντα όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι ηλεκτρική ενέργεια και ουρία. Συνεπώς, το σύστημα είναι επωφελές στο περιβάλλον εφόσον για την παραγωγή αυτών των προϊόντων συλλέγει διοξείδιο του άνθρακα από τα καυσαέρια όπως φαίνεται στο Σχήμα 2 (κύκλος Grassman).



Σχήμα 2. Το διάγραμμα Grassman του υπό-μελέτη κύκλου

Στο πλαίσιο μοντελοποίησης του συστήματος έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές [24-29]:

- α) Η πίεση και η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 101,3 kPa και 15 °C.
- β) Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή, του συμπιεστή φυσικού αερίου και του στροβίλου θεωρούνται ίσοι με 85%, 85% και 78% αντίστοιχα.
- γ) Το σύστημα λειτουργεί σε σταθερές συνθήκες περιβάλλοντος.
- δ) Η θερμοδυναμική διεργασία για την τουρμπίνα και τους συμπιεστές θεωρείται πολυτροπική.
- ε) Η μείωση πίεσης θεωρείται ότι είναι 2%.
- στ) Η κινητική και άλλες μορφές ενέργειας αγνοούνται.
- ζ) Στον κύκλο ατμού θεωρήθηκε ότι ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης της αντλίας και του αμοστροβίλου είναι 85%.
- η) Η απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας είναι ίση με 85%



2.2 Ισορροπία ενέργειας και μάζας

2.2.1 Κύκλος αεριοστροβίλου

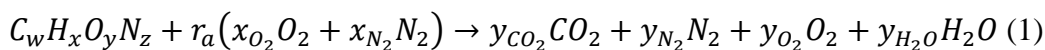
Οι εξισώσεις ισορροπίας μάζας και ενέργειας του κύκλου του αεριοστροβίλου απεικονίζονται στον Πίνακα 1.

Στον Πίνακα 1, ως \dot{m} , h και η ορίζουμε την παροχή μάζας, την ειδική ενθαλπία και την απόδοση. Τα C, BC, GT και CC αντιπροσωπεύουν τον συμπιεστή, τον συμπιεστή καυσίμου, τον αεριοστροβίλο και τον θάλαμο καύσης.

A/A	Υποσύστημα	Ισορροπία μάζας	Ισορροπία ενέργειας
1	Συμπιεστής	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$\dot{W}_C = \frac{\dot{m}_1(h_2 - h_1)}{\eta_C}$
2	Συμπιεστής καυσίμου (φυσικό αέριο)	$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}$	$\dot{W}_{BC} = \frac{\dot{m}_{10}(h_{11} - h_{10})}{\eta_{BC}}$
3	Θάλαμος καύσης	$\dot{m}_2 + \dot{m}_{11} = \dot{m}_3$	$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 LHV) \eta_{CC} = \dot{m}_3 h_3$
4	Στρόβιλος	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$	$\dot{W}_C = \frac{\dot{m}_1(h_2 - h_1)}{\eta_C}$

Πίνακας 1. Οι σχέσεις ισορροπίας ενέργειας και μάζας του κύκλου αεριοστροβίλου

Η αντίδραση καύσης μπορεί να αναλυθεί με τις εξισώσεις ως ακολούθως:



$$y_{CO_2} = w \quad (2)$$

$$y_{N_2} = r_a x_{N_2} + \frac{z}{2} \quad (3)$$

$$y_{H_2O} = \frac{x}{2} \quad (4)$$

$$y_{O_2} = r_a x_{O_2} + \frac{y}{2} - y_{CO_2} - \frac{y_{H_2O}}{2} \quad (5)$$

$$r_a = \frac{n_{Air}}{n_{Fuel}} \quad (6)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, τα x_i και y_i συμβολίζουν τις ποσότητες σε mole των αντιστοίχων χημικών ενώσεων και στοιχείων, ενώ το r_a καταδεικνύει την αναλογία αέρα-καυσίμου. Η σύσταση του φυσικού αερίου όπως θεωρήθηκε παρουσιάζεται στον Πίνακα 2 [30].



Σύνθεση	Περιεκτικότητα (mole%)
CH_4	81,0
C_2H_6	7,9
C_3H_8	4,2
C_4H_{10}	4,7
CO_2	1,2
N_2	1,0

Πίνακας 2. Η περιεκτικότητα των συστατικών του φυσικού αερίου (mole/mole)

2.2.2 Κύκλος ατμού

Οι εξισώσεις ισορροπίας ενέργειας και μάζας για τον κύκλο ατμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Τα ΗΧ (Heat Exchanger – Εναλλάκτης), ST (Steam Turbine – Ατμοστρόβιλος) και Ρ (Pump – αντλία) αντιπροσωπεύουν τον εναλλάκτη θερμότητας, τον ατμοστρόβιλο και την αντλία.

A/A	Υποσύστημα	Ισορροπία μάζας	Ισορροπία ενέργειας
1	Αντλία	$\dot{m}_{19} = \dot{m}_{20}$	$\dot{w}_P = \dot{m}_{19}(h_{20} - h_{19})$
2	Σύστημα ανακόμισης θερμότητας- παραγωγής ατμού	$\dot{m}_{20} = \dot{m}_{21}, \dot{m}_4 = \dot{m}_5$	$\dot{m}_{20}(h_{21} - h_{20}) = n_{HX}\dot{m}_4(h_4 - h_5)$
3	Ατμοστρόβιλος	$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{22}$	$\dot{w}_{ST} = \dot{m}_{28}(h_{28} - h_{22})$
4	Συμπυκνωτής	$\dot{m}_{23} = \dot{m}_{19}, \dot{m}_{24} = \dot{m}_{25}$	$\dot{m}_{24}(h_{25} - h_{24})n_{HX} = \dot{m}_{23}(h_{23} - h_{19})$

Πίνακας 3. Οι σχέσεις ισορροπίας ενέργειας και μάζας του κύκλου ατμού

2.2.3 Συλλογή διοξειδίου του άνθρακα

Για το σύστημα συλλογής διοξειδίου του άνθρακα χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω εξισώσεις [22,31,32]:

$$mw_{lean} = 16,907 + 2,33\varphi_{icon} + 0,204C_{MEA} \quad (7)$$

$$\frac{L}{G} = \exp(-1,4352 + 0,1239y_{CO_2} + 3,4863\varphi_{icon} + 0,0174\eta_{CO_2} - 0,0397C_{MEA} + 0,0027T_5) \quad (8)$$

$$T_6 = 41,15 + 0,062T_5 - 18,872\varphi_{icon} + 0,270C_{MEA} \quad (9)$$

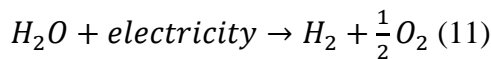
$$\frac{Q}{L} = \exp(-2,4452 - 0,0037y_{CO_2} - 6,2743\varphi_{icon} + 0,0254C_{MEA}) * 100 \quad (10)$$



Όπου $m_{w_{lean}}$, L , G , y_{CO_2} , ϕ_{lean} , T_{fg} , Q και C_{MEA} αντιπροσωπεύουν το μοριακό βάρος του φτωχού διαλύτη, την παροχή μάζας του φτωχού διαλύτη, την παροχή μάζας εισόδου, την συγκέντρωση CO_2 στο καυσαέριο, το φορτίο του φτωχού διαλύτη CO_2 , την θερμοκρασία του καυσαερίου, την απαίτηση θερμότητας αναγέννησης για το συνολικό διαλύτη και την συγκέντρωση της μονοαιθυλαμίνης (MEA).

2.2.4 Ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

Η αντίδραση που διενεργείται στο εσωτερικό του ηλεκτρολύτη είναι η ακόλουθη [33,34]:



Η απόδοση της τάσης του ηλεκτρολύτη υπολογίζεται ως ακολούθως [33,34]:

$$\eta_V = \frac{1,25}{V_{elec}} \quad (12)$$

Η απόδοση της τάσης (η_V) θεωρείται ότι είναι 74% [33,34], ενώ συμβολισμός $elec$ συμβολίζει τον ηλεκτρολύτη.

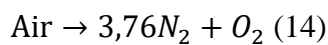
Η παραγωγή του ηλεκτρολύτη σε υδρογόνο δίνεται στον παρακάτω τύπο [33,34]:

$$\dot{M}_{H_2} = \frac{\dot{W}_{PEM,elec}}{2V_{elec}F} \quad (13)$$

όπου \dot{M}_{H_2} η παραγωγή του υδρογόνου σε mole και F η σταθερά Faraday.

2.2.5 Κρυογονική μονάδα διαχωρισμού αέρα

Η κρυογονική μονάδα διαχωρισμού αέρα χρησιμοποιείται για την παραγωγή καθαρού αζώτου, οξυγόνου και άλλων αερίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άλλες βιομηχανίες. Η μονάδα αυτή είναι χωρισμένη σε κρυογονικές και μη κρυογονικές υπομονάδες. Η αντίδραση που περιγράφει τις αντίστοιχες διεργασίες είναι η παρακάτω [35,36]:

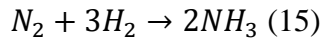


Η συνολική ηλεκτρική ενέργεια που δαπανάται σε αυτό το στάδιο είναι 992,13 kW ανά κιλό παραγόμενου οξυγόνου, το οποίο είναι βασισμένο σε πειραματικά δεδομένα με σφάλμα μικρότερο από 2% [35].

2.2.6 Αντιδραστήρας σύνθεσης αμμωνίας

Στον αντιδραστήρα σύνθεσης αμμωνίας, το υδρογόνο που παράγεται από την ηλεκτρόλυση αντιδράσει με το άζωτο που διαχωρίζεται από τον αέρα στην αντίστοιχη μονάδα, με αποτέλεσμα την παραγωγή αμμωνίας. Η αντίδραση αυτή είναι εξώθερμη και επομένως παράγεται θερμότητα η οποία ανακτάται από τον χαμηλής πίεσης ατμό ώστε να επιστρέψει στην κατάσταση της υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Το εύρος θερμοκρασιών αυτής της αντίδρασης κυμαίνεται από 450 °C έως 500 °C.

Η αντίδραση του αζώτου με το υδρογόνο είναι η εξής [29]:



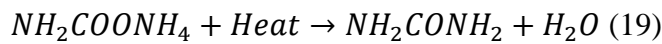
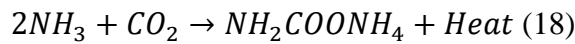
Οι σχέσεις που εκφράζουν την ενεργειακή ισορροπία στον αντιδραστήρα είναι οι εξής [29,37]:

$$\dot{m}_{13}h_{13} + \dot{m}_{18}h_{18} = \dot{m}_9h_9 + \dot{Q}_{ASR} \quad (16)$$

$$\dot{Q}_{ASR} = \dot{m}_{27}h_{27} - \dot{m}_{26}h_{26} \quad (17)$$

2.2.7 Αντιδραστήρας σύνθεσης ουρίας

Η ουρία παράγεται από την αντίδραση διοξειδίου του άνθρακα και αμμωνίας σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Στο πρώτο βήμα παράγεται το καρβαμικό αμμώνιο (NH_2COONH_4) και ύστερα αφυδατώνεται με αποτέλεσμα τη παραγωγή ουρίας (NH_2CONH_2). Οι δύο αυτές αντιδράσεις φαίνονται παρακάτω [29]:



Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του αντιδραστήρα παραγωγής ουρίας ισούται με 625,3 kW ανά κιλό ουρίας. Ο υπολογισμός αυτός βασίζεται σε δεδομένα που έχουν ληφθεί από άλλους όμοιους ίδιου τύπου αντιδραστήρες με σφάλμα μικρότερο από 2,5 % [38,39].

Οι σχέσεις που εκφράζουν την ενεργειακή ισορροπία στον αντιδραστήρα είναι οι εξής [29,37]:

$$\dot{m}_6h_6 + \dot{m}_9h_9 = \dot{m}_8h_8 + \dot{m}_7h_7 + \dot{Q}_{USR} \quad (20)$$

$$\dot{Q}_{USR} = \dot{m}_{26}h_{26} - \dot{m}_{17}h_{17} \quad (21)$$

2.2.8 Συνολικό σύστημα

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος μπορεί να υπολογιστεί με την παρακάτω εξίσωση:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{GT} + \dot{W}_{ST} - \dot{W}_P - \dot{W}_C - \dot{W}_{BC} - \dot{W}_{PEM,elec} - \dot{W}_{USR} - \dot{W}_{CASU} \quad (22)$$

Η ενεργειακή απόδοση του συστήματος υπολογίζεται ως εξής:

$$n_{en} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{m}_8h_8}{\dot{m}_{10}LHV} \quad (23)$$

2.3 Εξεργειακή ανάλυση

Η Εξεργειακή ανάλυση πραγματοποιείται θεωρώντας την κατανομή της εξέργειας σε φυσική εξέργεια, σε χημική εξέργεια, σε εξέργεια λόγω δυναμική ενέργειας και σε εξέργεια λόγω κινητικής ενέργειας. Η ειδική συνολική εξέργεια ανά μονάδα μάζας μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση [40,41]:



$$e = \sum x_i e_{chi} + \frac{V^2}{2} + gz + (h - h_0) - T_0(s - s_0) + T_0 \sum x_i R_i \ln y_i \quad (24)$$

όπου x και e είναι κλάσματα μάζας και ειδική εξέργεια, ενώ τα V , z και g εκφράζουν ταχύτητα, ύψος και επιτάχυνση λόγω της βαρύτητας αντίστοιχα. Επιπλέον τα h , s , T και y συμβολίζουν την ειδική ενθαλπία, την εντροπία, τη θερμοκρασία και το γραμμομοριακό κλάσμα. Οι συντομογραφίες ch , i και 0 αντιστοιχούν στην χημική εξέργεια, στα συστατικά και στην κατάσταση αναφοράς (πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος). Στον Πίνακα 4 παρουσιάζεται ο ρυθμός καταστροφής της εξέργειας για κάθε συνιστώσα

Η εξεργειακή απόδοση του συστήματος υπολογίζεται ως εξής:

$$n_{ex} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{m}_8 h_8}{\dot{m}_{10} e_{10}} \quad (25)$$

A/A	Υποσύστημα	\dot{E}_D (kW)
1	Συμπιεστής καυσίμου	$\dot{m}_{10} e_{10} - \dot{m}_{11} e_{11} + \dot{W}_{BC}$
2	Συμπιεστής	$\dot{m}_1 e_1 - \dot{m}_2 e_2 + \dot{W}_C$
3	Θάλαμος καύσης	$\dot{m}_2 e_2 + \dot{m}_{11} e_{11} - \dot{m}_3 e_3$
4	Στρόβιλος	$\dot{m}_3 e_3 - \dot{m}_4 e_4 - \dot{W}_{GT}$
5	Σύστημα ανακόμισης θερμότητας-παραγωγής ατμού	$\dot{m}_{20} e_{20} - \dot{m}_{21} e_{21} + \dot{m}_4 e_4 - \dot{m}_5 e_5$
6	Αντλία	$\dot{m}_{19} e_{19} - \dot{m}_{20} e_{20} + \dot{W}_P$
7	Ατμοστρόβιλος	$\dot{m}_{28} e_{28} - \dot{m}_{22} e_{22} - \dot{W}_{ST}$
8	Συμπυκνωτής	$\dot{m}_{23} e_{23} + \dot{m}_{24} e_{24} - \dot{m}_{25} e_{25} - \dot{m}_{19} e_{19}$
9	Σύστημα ανάκτησης άνθρακα	$\dot{m}_{22} e_{22} + \dot{m}_5 e_5 - \dot{m}_{23} e_{23} - \dot{m}_6 e_6$
10	Ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων	$\dot{m}_{14} e_{14} - \dot{m}_{15} e_{15} - \dot{m}_{18} e_{18} + \dot{W}_{PEM,elec}$
11	Κρυογονική μονάδα διαχωρισμού αέρα	$\dot{m}_{12} e_{12} - \dot{m}_{13} e_{13} - \dot{m}_{16} e_{16} + \dot{W}_{CASU}$
12	Αντιδραστήρας σύνθεσης αμμωνίας	$\dot{m}_{18} e_{18} + \dot{m}_{13} e_{13} + \dot{m}_{26} e_{26} - \dot{m}_{27} e_{27} - \dot{m}_9 e_9$
13	Αντιδραστήρας σύνθεσης ουρίας	$\dot{m}_6 e_6 + \dot{m}_{17} e_{17} + \dot{m}_9 e_9 - \dot{m}_{26} e_{26} - \dot{m}_7 e_7 - \dot{m}_8 e_8 + \dot{W}_{USR}$

Πίνακας 4. Ρυθμός καταστροφής της εξέργειας για κάθε συνιστώσα του συστήματος



2.4 Οικονομική ανάλυση

Το ετήσιο κέρδος CF του υπό μελέτη συστήματος υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [42,43]:

$$CF = Y_{power}k_{power} + Y_{Urea}k_{Urea} - Y_{NG}k_{NG} \quad (26)$$

όπου το k εκφράζει το ειδικό κόστος των προϊόντων τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 και το Y δείχνει την ετήσια δυναμικότητα του προτεινομένου συστήματος [43-45].

Το κόστος της συνολικής επένδυσης του συστήματος υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$C_0 = K_{Gascycle} + K_{Streamcycle} + K_{PEMelectrolyzer} + K_{CASU} + K_{ASR} + K_{USR} + K_{Carboncapture} \quad (27)$$

Όπου K το κόστος του κάθε υποσυστήματος. Για το κόστος λειτουργίας και συντήρησης έχεις συνυπολογιστεί επιπλέον το 3% του αρχικού κόστους [42,43].

Η επιρροή του πληθωρισμού στο κόστος υπολογίζεται ως εξής [49]:

$$C_n = C_0(1 + i)^n \quad (28)$$

όπου n είναι ο αριθμός των ημερολογιακών ετών και i η τιμή του πληθωρισμού η οποία θεωρείται ίση με 3,11% [50].

Ο δείκτης απλής περιόδου αποπληρωμής (SPP) υπολογίζεται ως εξής [42,43]:

$$SPP = \frac{C_n}{CF} \quad (29)$$

Ο δείκτης περιόδου αποπληρωμής (PP) υπολογίζεται με τον εξής τύπο [42,43]:

$$PP = \frac{\ln\left(\frac{CF}{CF-rC_n}\right)}{\ln(1+r)} \quad (30)$$

Όπου το r δείχνει τον παράγοντα έκπτωσης (3%).

Ειδικό κόστος προϊόντων	Μονάδα μέτρησης	Τιμή	Πηγή
k_{power}	US\$/kWh	0,22	[46]
k_{Urea}	US\$/kg	13,99	[47]
k_{NG}	US\$/kWh	0,07	[48]

Πίνακας 5. Το ειδικό κόστος των προϊόντων και του καυσίμου



Η καθαρή παρούσα αξία (NPV) υπολογίζεται ως εξής [42,43]:

$$NPV = CF \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} - C_n \quad (31)$$

Όπου το N συμβολίζει το χρόνο ζωής του συστήματος, που θεωρείται ότι ισούται με 25 έτη.

Ο εσωτερικός ρυθμός απόσβεσης (IRR) υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο [42,43,51]:

$$IRR = \frac{CF}{C_n} \left[1 - \frac{1}{(1+IRR)^N} \right] \quad (32)$$

Όπου το κόστος αγοράς των υλικών απεικονίζεται στον Πίνακα 6.

Υποσύστημα	Συνάρτηση κόστους (\$)	Πηγή
Κύκλος αεριοστροβίλου		
Συμπιεστής	$\frac{44,71\dot{m}_1}{0,95 - n_{com}} \left(\frac{P_2}{P_1}\right) \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$	[52]
Συμπιεστής καυσίμου	$\frac{44,71\dot{m}_{10}}{0,95 - n_{BC}} \left(\frac{P_{11}}{P_{10}}\right) \ln\left(\frac{P_{11}}{P_{10}}\right)$	[52]
Θάλαμος καύσης	$\frac{28,98\dot{m}_2}{0,995 - \frac{P_3}{P_2}} (1 + \exp(0,015(T_3 - 1540)))$	[52]
Αεριοστρόβιλος	$\frac{301,45\dot{m}_3}{0,94 - n_{GT}} \ln\left(\frac{P_3}{P_4}\right) (1 + 0,025(T_3 - 1570))$	[52]
Κύκλος ατμού		
Ατμοστρόβιλος	$\frac{301,45\dot{m}_{28}}{0,94 - n_{ST}} \ln\left(\frac{P_{28}}{P_{22}}\right) (1 + 0,025(T_{28} - 1570))$	[52,53]
Σύστημα ανακόμισης θερμότητας-παραγωγής ατμού	$4745 \left(\frac{\dot{m}_{20} h_{19}}{\log(T_4 - T_5)}\right)^{0,8} + 11820\dot{m}_{20} + 685\dot{m}_4$	[52,53]
Συμπυκνωτής	$1773\dot{m}_{23}$	[52,53]
Αντλία	$3540(\dot{W}_p)^{0,71}$	[52,53]
Σύστημα ανάκτησης άνθρακα	$75 * 45 * 10^6 \left(\frac{\dot{m}_6}{2,808 * 10^6}\right)^{0,65}$	[54]
Ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων	$1000\dot{W}_{PEM,electrolyzer}$	[55-57]



Κρυογονική μονάδα διαχωρισμού αέρα	$350\dot{W}_{CASU}$	[58,59]
Αντιδραστήρας σύνθεσης αμμωνίας	$40,26\dot{m}_9h_9$	[60]
Αντιδραστήρας σύνθεσης ουρίας	$1,6917 * 8000 * 3600 * \dot{m}_8$	[61]

Πίνακας 6. Οι σχέσεις υπολογισμού κόστους αγοράς του κάθε υποσυστήματος

2.5 Εξεργο-περιβαλλοντική ανάλυση

Η εξεργο-περιβαλλοντικός παράγοντας υπολογίζεται ως εξής [62-64]:

$$f_{ei} = \frac{\dot{E}_D}{\sum \dot{E}x_{in}} \quad (33)$$

Στην εξίσωση Νο. 33, οι δείκτες tot, des και in αντιστοιχούν σε ολικά μεγέθη, μεγέθη καταστροφής και μεγέθη εισόδου.

Ο παράγοντας απόδοσης της περιβαλλοντικής ζημίας υπολογίζεται με την κάτωθι εξίσωση [62-64]:

$$\theta_{ei} = f_{ei}C_{ei} \quad (34)$$

Όπου C_{ei} , ένας συντελεστής της εξεργο-περιβαλλοντικής επιρροής η οποία υπολογίζεται ως κάτωθι [62-64]:

$$C_{ei} = \frac{1}{\eta_{ex}} \quad (35)$$

Όπου η_{ex} , η εξεργειακή απόδοση του συστήματος όπως αναλύθηκε προηγουμένως.

Η εξεργο-περιβαλλοντική επιρροή εκφράζεται ως εξής [62-64]:

$$\theta_{eii} = \frac{1}{\theta_{ei}} \quad (36)$$

Ο παράγοντας εξεργειακής σταθερότητας υπολογίζεται με την εξής σχέση [62-64]:

$$f_{es} = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}x_{tot,out} + \dot{E}_D + 1} \quad (37)$$



Αποτελέσματα και συμπεράσματα

Η ενεργειακή, οικονομική, εξεργειακή και εξεργο-περιβαλλοντική προσομοίωση του προτεινόμενου συστήματος έγινε μέσω του προγράμματος Engineering Equation Software (EES). Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες των υποσυστημάτων μπορούν να βρεθούν προ-αποθηκευμένες στις βιβλιοθήκες του προγράμματος EES. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επί μέρους αναλύσεων, ενώ τα δεδομένα που εισάχθηκαν στο πρόγραμμα EES παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

A/A	Παραμετρική σταθερά	Μονάδα μέτρησης	Τιμή
1	r_C	-	11,1
2	r_{BC}	-	11,1
3	n_C	-	0,85
4	n_P	-	0,85
5	n_{GT}	-	0,78
6	n_{HX}	-	0,85
7	n_{ST}	-	0,85
8	\dot{m}_f	kg/s	9,316
9	r_a	-	2,6
10	P_{20}	kPa	2026
11	P_{19}	kPa	101,3
12	T_{19}	K	318,15
13	T_{16}	K	321,1
14	T_6	K	321,1
15	T_{24}	K	283,15
16	P_{24}	kPa	101,3

Πίνακας 7. Τα εισαγμένα δεδομένα-σταθερές στο EES

3.1 Επικύρωση του μοντέλου

Εφόσον η συγκεκριμένη διάταξη δεν έχει μελετηθεί στο παρελθόν, η πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων ή επιβεβαίωση με βάση αποτελέσματα της βιβλιογραφίας του συστήματος σαν σύνολο είναι αδύνατη. Για τον λόγο αυτό, τα βασικά υποσυστήματα



επαληθεύονται με βάση δεδομένα της βιβλιογραφίας ξεχωριστά. Θεωρούνται τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τον κύκλο αεριοστροβίλου GE-F5 τα οποία έχουν ληφθεί από την αναφορά [65].

Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει την σύγκριση των δεδομένων που προκύπτουν από τους υπολογισμούς της προσομοίωσης με τα δεδομένα που παρουσιάζονται στις αναφορές.

A/A	r_c	T_3	Specific work output			$n_{exe}(\%)$		
			Ref[66]	Model	Error(%)	Ref[66]	Model	Error
1	8,31	1103	50	56,5	13	26,7	24	11,2
2	8,78	1208	100	108,7	8,7	28,2	25,1	12,3
3	8,33	1320	145	153,7	6	29,3	26,9	9,1

Πίνακας 8. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ των δεδομένων από τις πηγές και των δεδομένων που προκύπτουν από την προσομοίωση

Για την επικύρωση του συστήματος ανακόμισης θερμότητας-παραγωγής ατμού χρησιμοποιήθηκε η αναφορά [67]. Σε αυτόν τον κύκλο συνδυάζονται κύκλος αεριοστροβίλου και το ίδιο το σύστημα ανακόμισης θερμότητας-παραγωγής ατμού. Η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας εναλλάκτη (pinch point temperature) είναι περίπου 30 K. Η πίεση του λέβητα και του συμπυκνωτή είναι 16 και 0,03 bar αντίστοιχα. Η υψηλότερη θερμοκρασία του ατμού είναι 923 K. Για το υπό μελέτη σύστημα, η ενεργειακή αποδοτικότητα θεωρείται 25% με θερμοκρασία καύσης στα 1375 K [67]. Καθώς η τιμή υπολογίζεται από το πρόγραμμα 24,1%, το σφάλμα είναι μόλις 3,6% το οποίο είναι αποδεκτό.

Για την μοντελοποίηση του ηλεκτρολύτη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, λήφθηκαν δεδομένα από τις πηγές [33,34] και από τη σύγκριση αυτών με το αποτέλεσμα που προκύπτει από το υπολογιστικό πρόγραμμα, το σφάλμα σε αυτό το υποσύστημα υπολογίζεται περίπου στο 1,5%. Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της κρυογονικής μονάδας διαχωρισμού αέρα, χρησιμοποιήθηκε η πηγή [35], ενώ για τον αντιδραστήρα παραγωγής ουρίας οι πηγές [38,39].



3.2 Αποτελέσματα ενεργειακής και εξεργειακής ανάλυσης

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες σε κάθε σημείο του κύκλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 9. Το υπό μελέτη σύστημα παράγει 689 GWh ηλεκτρικής ενέργειας και 1,323 τόνους ουρίας ετησίως.

A/A	\dot{m} (kg/s)	P (kPa)	T (K)	h (kJ/kg)	e (kJ/kg)
1	512,1	101,3	288,2	288,5	5,951
2	512,1	1124	665,2	676,3	350
3	521,4	1102	1276	1613	930,8
4	521,4	106	589,9	1012	328,9
5	521,4	103,8	526	574,4	95,43
6	33,67	101,8	321,1	-8921	444,5
7	13,78	101,3	323,2	209,4	536
8	45,95	101,3	323,2	506,9	3286
9	26,06	101,3	318,2	1590	19880
10	9,316	101,3	283,2	554,9	47721
11	9,316	1124	544,7	1574	48210
12	27,13	101,3	288,2	288,5	5,951
13	21,43	101,3	288,2	-10,38	25,71
14	41,35	101,3	288,2	63,01	0
15	36,72	101,3	288,2	-9,126	0
16	5,697	101,3	288,2	-9,126	124,1
17	47,05	2026	318,2	190,2	8,029
18	4,627	101,3	288,2	-143,3	0
19	121,5	101,3	318,2	188,5	6,111
20	74,49	2026	318,2	190,2	8,029
21	74,49	2026	506	2855	998,8
22	121,5	150	410	2746	628
23	121,5	101,3	373,1	1860	372,3
24	1000	101,3	283,2	42,09	0,1837
25	1000	101,3	340,2	280,8	17,59
26	47,05	2026	486,2	1399	404,7
27	47,05	2026	506	2855	998,8
28	121,5	2026	506	2855	998,8

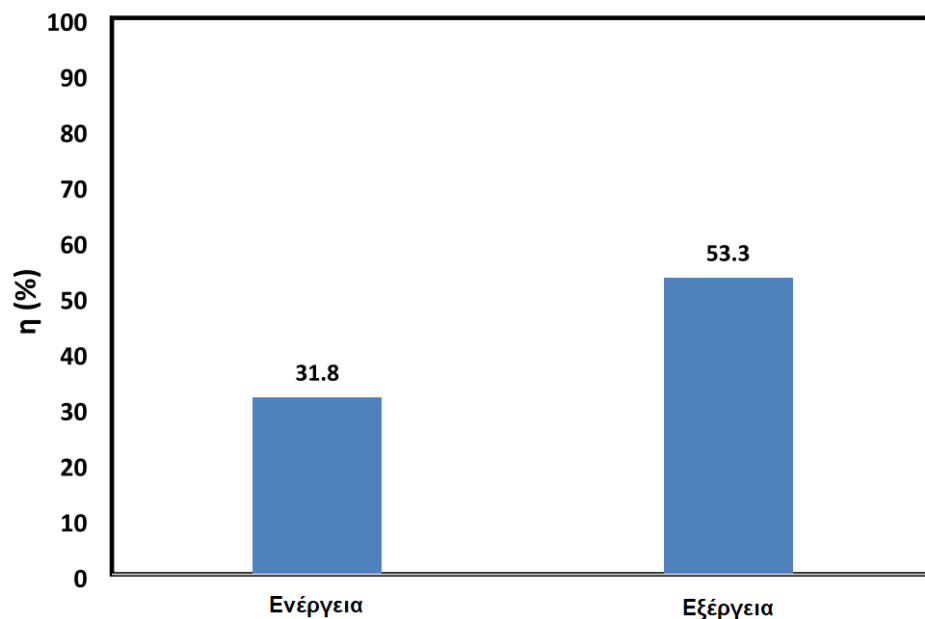
Πίνακας 9. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες καθενός εκ των σημείων του κύκλου του υπό μελέτη συστήματος



Η ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση του συστήματος παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 1, από όπου φαίνεται ότι είναι 31,7% και 53,3% αντιστοίχως. Ο λόγος που η εξεργειακή απόδοση είναι μεγαλύτερη είναι ότι ο ρυθμός εξέργειας της ουρίας ($\dot{m}_8 e_8$) είναι αρκετά υψηλότερο από τον ρυθμό ενέργειας της αμμωνίας ($\dot{m}_8 h_8$) στις Εξισώσεις (23) και (25). Ο Ρυθμός καταστροφής εξέργειας για κάθε συνιστώσα παρουσιάζεται στον Πίνακα 10.

A/A	Υποσύστημα	$\dot{E}_D (kW)$
1	Συμπιεστής	17695
2	Booster compressor	4937
3	Θάλαμος καύσης	143006
4	Αεριοστρόβιλος	414
5	Σύστημα ανακόμισης θερμότητας-παραγωγής ατμού	47935
6	Αντλία	7,32
7	Ατμοστρόβιλος	33759
8	Συμπυκνωτής	27101
9	Σύστημα ανάκτησης άνθρακα	65877
10	Ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων	570,3
11	Κρυογονική μονάδα διαχωρισμού αέρα	4556
12	Αντιδραστήρας σύνθεσης αμμωνίας	781,6
13	Αντιδραστήρας σύνθεσης ουρίας	384692

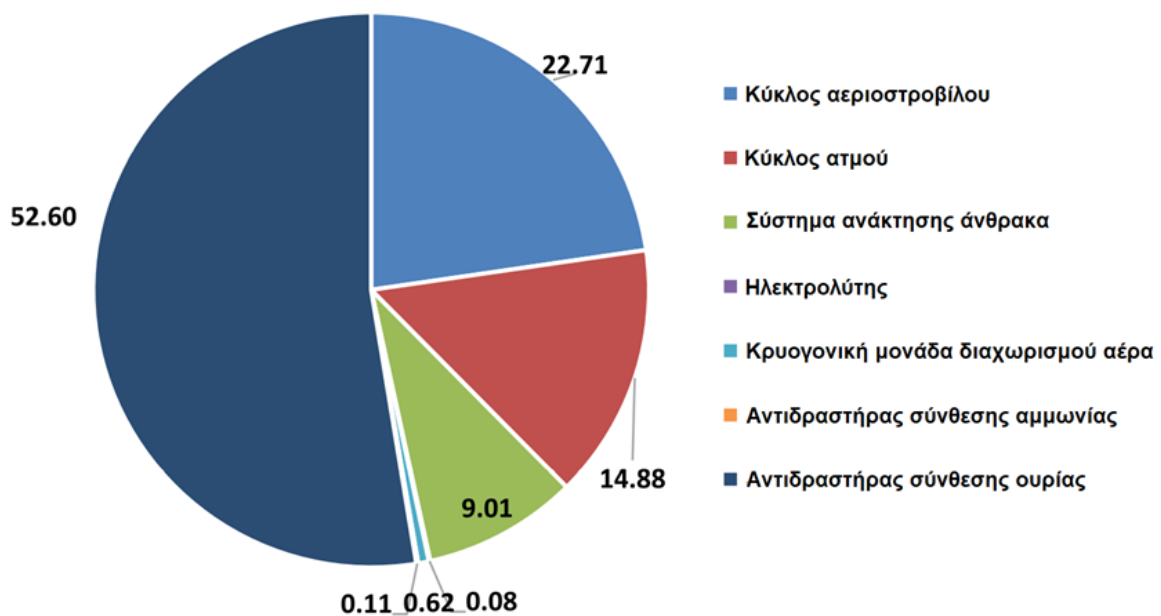
Πίνακας 10. Ρυθμός καταστροφής εξέργειας κάθε υποσυστήματος



Διάγραμμα 1. Η ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση του συστήματος



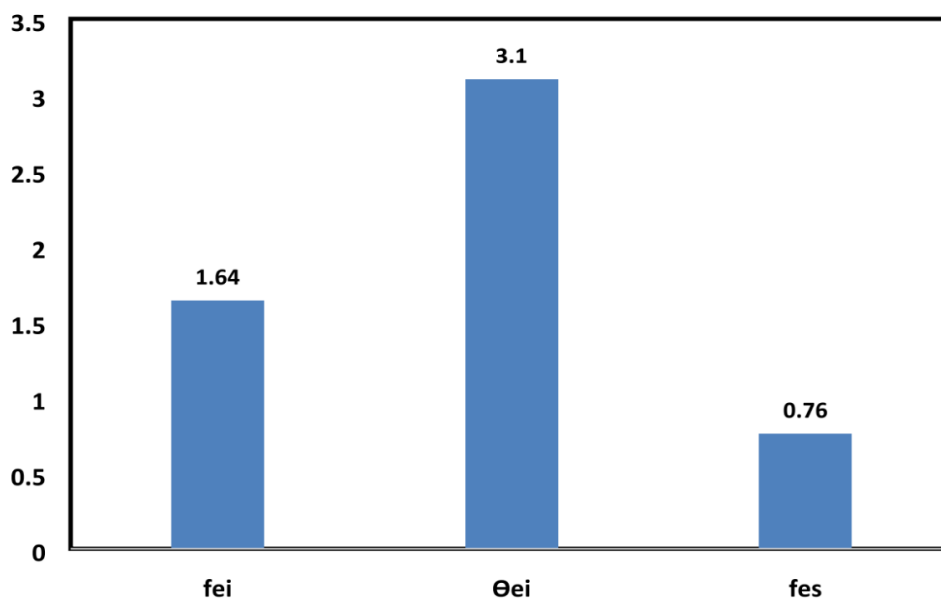
Στο διάγραμμα 2 παρουσιάζονται τα ποσοστά του ρυθμού καταστροφής εξέργειας κάθε υποσυστήματος. Το μέγιστο ποσοστό του ρυθμού καταστροφής εξέργειας σχετίζεται με τον αντιδραστήρα σύνθεσης ουρίας εξαιτίας της χημικής αντίδρασης που εκτελείτε στο συγκεκριμένο υποσύστημα καθώς και με την υψηλή θερμοκρασία της διεργασίας αυτής. Ο επόμενος μέγιστος ρυθμός καταστροφής εξέργειας ανήκει στον κύκλο του αεριοστροβίλου εξαιτίας του μεγάλου αριθμού υποσυστημάτων που τον αποτελούν, την υψηλή παροχή μάζας των ρευστών και την αντίδραση της καύσης στο εσωτερικό του καυστήρα. The minimum value of exergy destruction rate σχετίζεται με τον ηλεκτρολύτη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων εξαιτίας της χαμηλής παροχής νερού καθώς και λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας της αντίδρασης που διενεργείται εσωτερικά του.



Διάγραμμα 2. Ποσοστό ρυθμού καταστροφής εξέργειας για κάθε υποσύστημα

3.3 Εξεργο-περιβαλλοντική ανάλυση

Το Διάγραμμα 3 δείχνει τους παράγοντες εξεργο-περιβάλλοντος (f_{ei}), απόδοσης περιβαλλοντικής ζημίας (θ_{ei}), και ευστάθειας εξέργειας (f_{es}) του συστήματος. Όπως φαίνεται οι τιμές του παράγοντα εξεργο-περιβάλλοντος (f_{ei}), του παράγοντα απόδοσης περιβαλλοντικής ζημίας (θ_{ei}), και του παράγοντα ευστάθειας της εξέργειας (f_{es}) είναι ίσες με 1.64, 3.1 και 0.76, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 3. Ο παράγοντας εξεργο-περιβάλλοντος (f_{ei}), ο παράγοντας απόδοσης περιβαλλοντικής ζημιάς (θ_{ei}) και ο παράγοντας ευστάθειας της εξέργειας (f_{es})

Ο Παράγοντας εξεργο-περιβάλλοντος (f_{ei}), ορίζεται ως ο ρυθμός καταστροφής της εξέργειας προς τον ρυθμό της εισερχόμενης εξέργειας. Ο παράγοντας απόδοσης περιβαλλοντικής ζημιάς (θ_{ei}) ορίζεται ως ο παράγοντας εξεργο-περιβάλλοντος διαιρούμενος από τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης. Ο παράγοντας ευστάθειας της εξέργειας ορίζεται ως ο ρυθμός καταστροφής της εξέργειας διαιρούμενος με το άθροισμα των εξερχόμενων ρυθμών εξέργειας. Με βάση τους ορισμούς τους, οι παράγοντες αυτοί είναι ευνοϊκοί όταν έχουν την ελάχιστη δυνατή τιμή.

3.4 Οικονομική ανάλυση

Οι τέσσερις κύριοι οικονομικού παράμετροι (PP, SPP, NPV και IRR) παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.

A/A	Οικονομική παράμετρος	Μονάδα	Τιμή
1	NPV (Καθαρή παρούσα αξία)	US\$	$7,29 \cdot 10^9$
2	PP (Περίοδος αποπληρωμής)	Έτη	7,2
3	SPP (Απλή περίοδος αποπληρωμής)	Έτη	6,4
4	IRR (Εσωτερικός ρυθμός απόσβεσης)	-	0,15

Πίνακας 11. Οι τέσσερις κύριες οικονομικές παραμέτροι του υπό μελέτη συστήματος



Όσον αφορά τον δείκτη περιόδου αποπληρωμής (PP), είναι ξεκάθαρο ότι είναι πιο ωφέλιμο αν ο δείκτης αυτός λαμβάνει την ελάχιστη τιμή. Ωστόσο, ο PP για το υπό μελέτη σύστημα είναι πολύ υψηλότερος από αυτό για ένα απλό σύστημα κύκλου αεριοστρόβιλου (GC) (2,9 έτη [68]), από το συνδυασμό κύκλου αεριοστρόβιλου με δευτερεύοντες κύκλου αέρα (GC + ABC) (2,4 έτη [68]), αλλά και από το συνδυασμό κύκλου αεριοστρόβιλου με σύστημα ανακόμισης θερμότητας-παραγωγής ατμού και κύκλο ατμού (GC + SC) (4,8 έτη [69]).

Εφόσον το αρχικό κόστος του υπό μελέτη συστήματος είναι πολύ υψηλότερο από τα προαναφερθέντα συστήματα (δηλαδή τα GC, GC + ABC, GC + SC) εξαιτίας ορισμένων υποσυστημάτων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα ετήσια κέρδη του προτεινόμενου συστήματος δεν είναι αρκετά για να καλύψουν το επιπλέον κόστος.

Ο δείκτης απλής περιόδου αποπληρωμής (SPP) έχει όμοια συμπεριφορά με τον δείκτη περιόδου αποπληρωμής (PP). Συγκεκριμένα, στο εν λόγω σύστημα η τιμή του SPP είναι 6,4 έτη, το οποίο είναι πολύ υψηλότερο από τον αντίστοιχο του GC (2,7 έτη [68]), του GC + ABC (2,1 έτη [68]), καθώς και του GC + SC (4,4 έτη [69]), αντίστοιχα.

Η καθαρή παρούσα αξία (NPV) του συνόλου του υπό μελέτη συστήματος είναι 7,29 δισεκατομμύρια δολάρια Αμερικής (US\$). Ο συγκεκριμένος οικονομικός παράγοντας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επαληθεύσει την ωφέλεια του συστήματος. Σε σύγκριση με τον αντίστοιχο δείκτη του GC (0,21 δισεκατομμύρια US\$), του GC + ABC (0,28 δισεκατομμύρια US\$) και του GC + SC (0,283 δισεκατομμύρια US\$), το υπό μελέτη σύστημα είναι πιο επικερδές παρόλο με οι παράμετροι PP και SPP δείχνουν το αντίθετο.

Τέλος, με βάση την παράμετρο του εσωτερικού ρυθμού απόσβεσης (IRR) το υπό μελέτη σύστημα εξακολουθεί να υστερεί έναντι των άλλων, αφού η τιμή του IRR είναι 0.15, ενώ των GC, GC + ABC και GC + SC είναι 0.37, 0.47 και 0.22, αντίστοιχα.

3.5 Περιβαλλοντική ανάλυση

Το κοινωνικό κόστος της μόλυνσης του αέρα πρέπει να συμπεριληφθεί στην ανάλυση για να συσχετίσει μεταξύ του τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο κοινωνικό σύνολο. Αυτές οι επιπτώσεις μπορεί να προκαλέσουν ασθένειες, θανάτους, αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου κλπ. [2,3]. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στο προτεινόμενο σύστημα το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) ανακτάται στο αντίστοιχο σύστημα με σκοπό να παραχθεί ουρία στον αντίστοιχο αντιδραστήρα



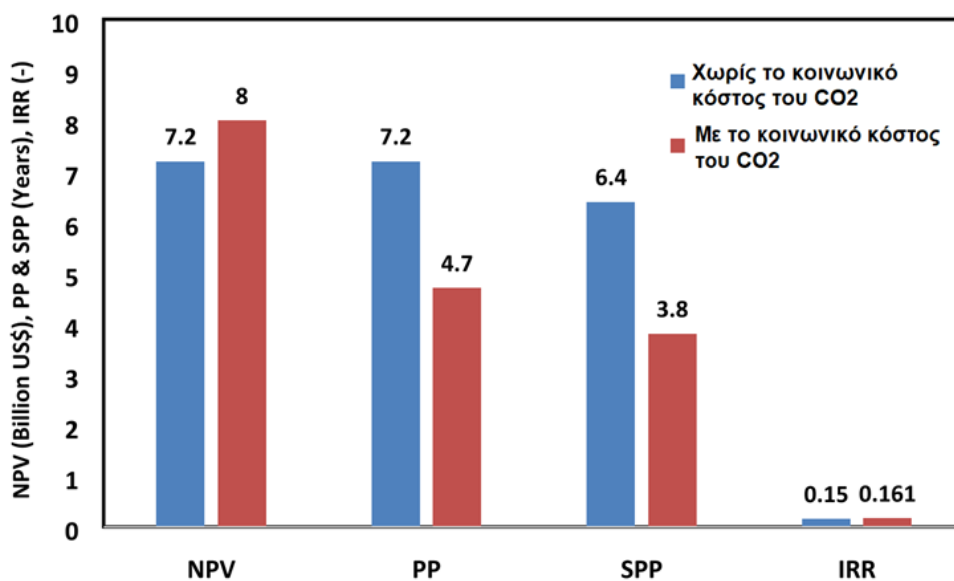
παραγωγής. Συνεπώς, το κοινωνικό κόστος του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) χρήζει περαιτέρω οικονομικής αξιολόγησης και ανάλυσης.

Τα αέρια που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4) και το οξείδιο του αζώτου (N_2O) διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην κλιματική αλλαγή και στο φαινόμενο της αύξησης της θερμοκρασίας παγκοσμίως. Επομένως, το μερίδιο ευθύνης του διοξειδίου του άνθρακα σε αυτά τα φαινόμενα δεν είναι αμελητέο. Αυτά τα αέρια απορροφούν περισσότερη θερμότητα λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας της γης [70].

Είναι ξεκάθαρο ότι στα καυσαέρια του κύκλου του αεριοστρόβιλου θα υπάρχουν και άλλα επιβλαβή για το περιβάλλον αέρια όπως οξείδια του αζώτου (NO_x) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Αφού το διοξείδιο του άνθρακα ανακτάται στην συγκεκριμένη διάταξη, η διαφορά που επέρχεται στο κοινωνικό κόστος πρέπει να συνυπολογιστεί. Για τον υπολογισμό αυτό η Εξίσωση (26) αλλάζει ως εξής:

$$CF = Y_{power}k_{power} + Y_{urea}k_{urea} + Y_{CO_2}k_{CO_2} - Y_{NG}k_{NG} \quad (38)$$

Όπου k_{CO_2} είναι το κοινωνικό κόστος του CO_2 , το οποίο ισούται με 0,042 US\$/kg [2,3]. Το Διάγραμμα 4 απεικονίζει τις τέσσερις βασικές οικονομικές παραμέτρους (NPV, SPP, PP, IRR) με ή χωρίς τον συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα.

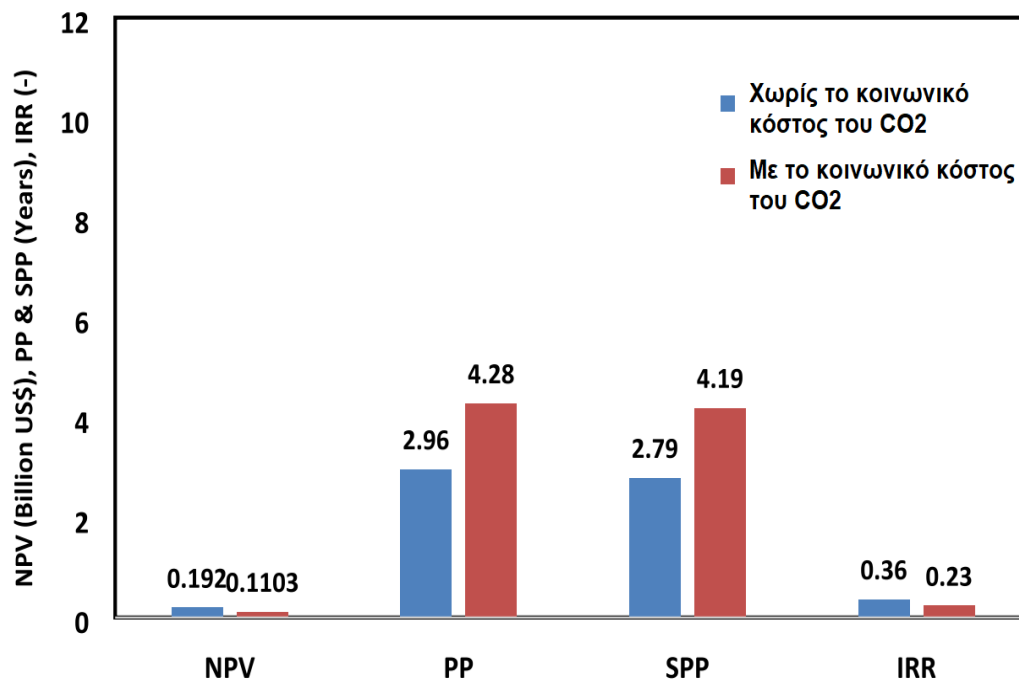


Διάγραμμα 4. Οι τέσσερις βασικές οικονομικοί παράμετροι (NPV, SPP, PP, IRR) με ή χωρίς τον συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα



Συνυπολογίζοντας το κοινωνικό κόστος του CO_2 ο δείκτης NPV αυξάνεται από 7,2 δισεκατομμύρια δολάρια σε 8,1 με συνολική αύξηση περίπου 11%. Ο δείκτης PP και SPP πέφτει από 7,2 και 6,4 έτη σε 4,7 και 3,8 έτη, δηλαδή περίπου 34% πτώση του PP και 40% πτώση του SPP. Η τιμή του IRR αυξάνεται περίπου κατά 7,3% ανεβαίνοντας από 0,15 σε 0,161. Συμπερασματικά, ο συνυπολογισμός του κοινωνικού κόστους του CO_2 έχει μεγάλη επίδραση σε όλες τις οικονομικές παραμέτρους.

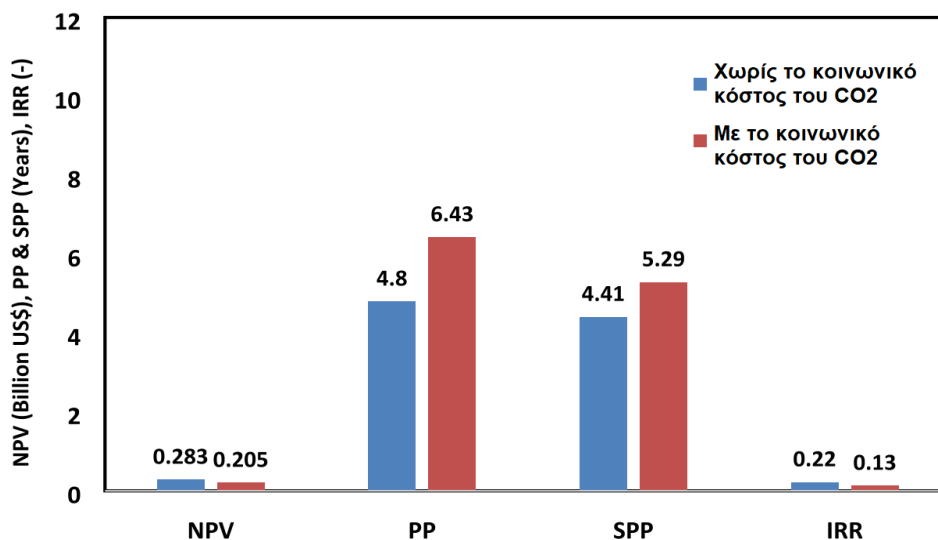
Στο Διάγραμμα 5 παρουσιάζονται με όμοιο τρόπο οι οικονομικοί παράμετροι που αφορούν τον κύκλο αεριοστρόβιλου.



Διάγραμμα 5. Οι τέσσερις βασικές οικονομικοί παράμετροι (NPV, SPP, PP, IRR) με ή χωρίς τον συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα για τον κύκλο αεριοστρόβιλου

Είναι ξεκάθαρο ότι σε αυτή τη περίπτωση, εφόσον δεν υπάρχει κάποιο μέσο ανάκτησης διοξειδίου του άνθρακα, το κοινωνικό κόστος συνυπολογίζεται και τελικά αυξάνει τους δείκτες PP και SPP, ενώ μειώνει τους NPV και IRR.

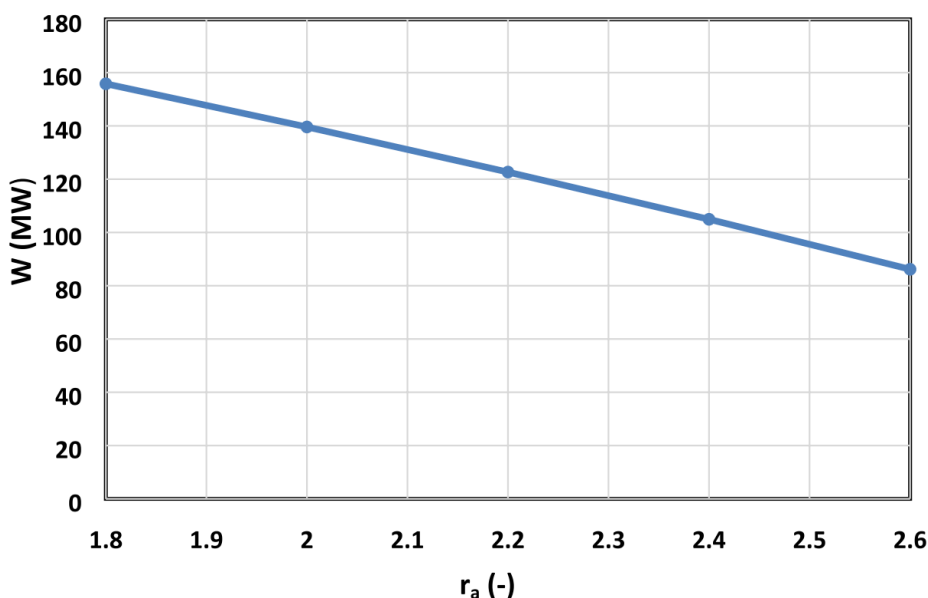
Στο Διάγραμμα 6 διαφαίνεται ότι το συμπέρασμα μπορεί να εφαρμοστεί και σε ένα συνδυασμένο κύκλο αεριοστρόβιλου με κύκλο ατμού.



Διάγραμμα 6. Οι τέσσερις βασικές οικονομικοί παράμετροι (NPV, SPP, PP, IRR) με ή χωρίς τον συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα για τον συνδυασμένο κύκλο αεριοστρόβιλου και κύκλου ατμού

3.6 Παραμετρική μελέτη

Το εύρος της αναλογίας αέρα/καυσίμου (r_a) θεωρείται ότι είναι από 1,8 έως 2,6. Ο λόγος του ότι το κατώτατο όριο είναι 1,8 είναι ότι σε αυτό το σημείο, η θερμοκρασία της καύσης θα πρέπει να αυξηθεί με αποτέλεσμα την αναγκαία αύξηση της αντοχής των υλικών του θαλάμου καύσης. Επιπλέον, αν η μοριακή αναλογία αέρα/καυσίμου (r_a) είναι άνω του ορίου του 2,6 τότε η αντίδραση της καύσης δεν μπορεί να εκτελεστεί ολοκληρωτικά.



Διάγραμμα 7. Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος του συστήματος σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου



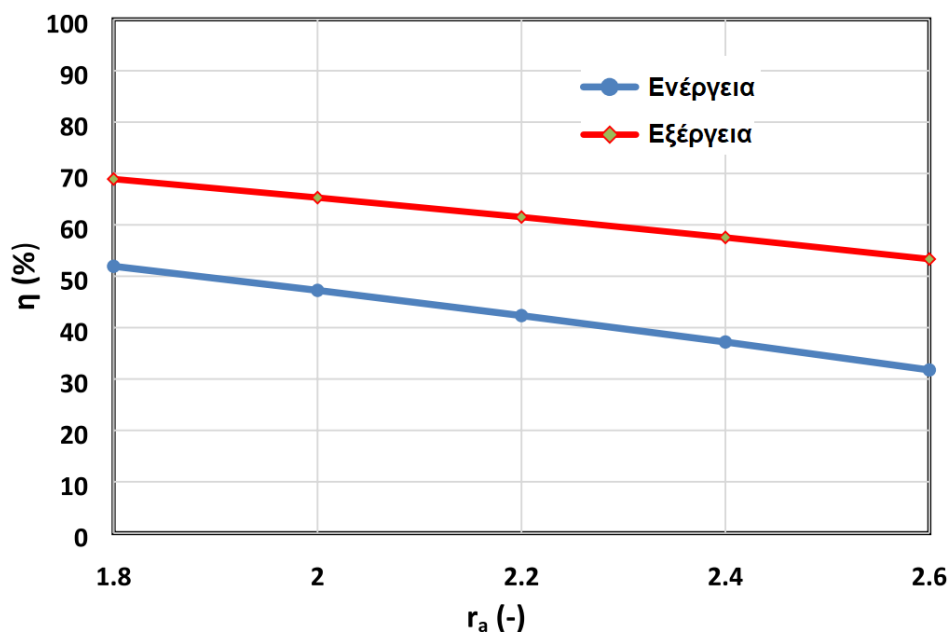
Λαμβάνοντας υπόψιν το διάγραμμα 7, είναι ξεκάθαρο ότι με την αύξηση της αναλογίας αέρα/καυσίμου από το 1,8 στο 2,6, η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μειώνεται από 155,81 στα 86,17 MW, αντίστοιχα.

Γενικότερα, με την αύξηση της αναλογίας r_a , τα ακόλουθα μπορούν να συμβούν:

- Αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος του συστήματος λόγω της αύξησης της εισερχόμενης παροχής μάζας στον αεριοστρόβιλο.
- Αύξηση της παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα και κατά επέκταση αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τον ηλεκτρολύτη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, την κρυογονική μονάδα διαχωρισμού αέρα, τον αντιδραστήρα σύνθεσης αμμωνίας και τον αντιδραστήρα σύνθεσης ουρίας με σκοπό την εκπλήρωση των απαιτήσεων για την παραγωγή ουρίας.
- Αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στον κύκλο ατμού.
- Μείωση της θερμοκρασίας κατά την καύση και συνεπώς μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τον κύκλο του αεριοστρόβιλου.

Τα ανωτέρω συμβάντα a και c μειωνεκτούν έναντι των b και d και συνολικά η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος μειώνεται.

Στο Διάγραμμα 8 απεικονίζεται η διαφορά μεταξύ του ενεργειακού και εξεργειακού βαθμού απόδοσης σε συνάρτηση με την μοριακή αναλογία αέρα/καυσίμου (r_a).

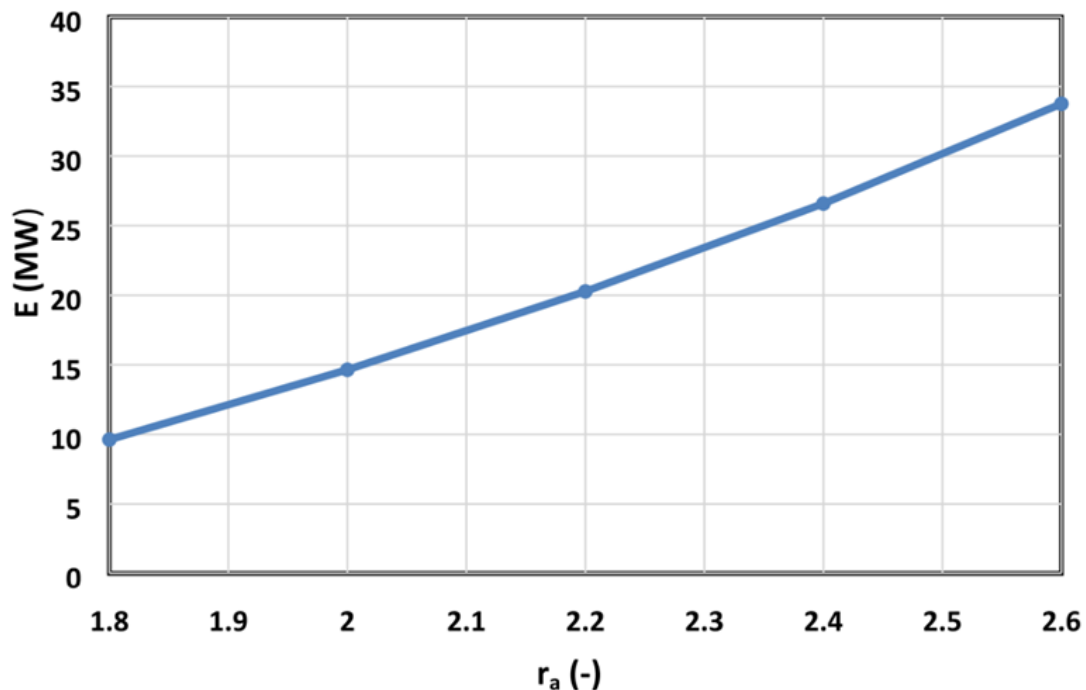


Διάγραμμα 8. Ο εξεργειακός και ενεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου



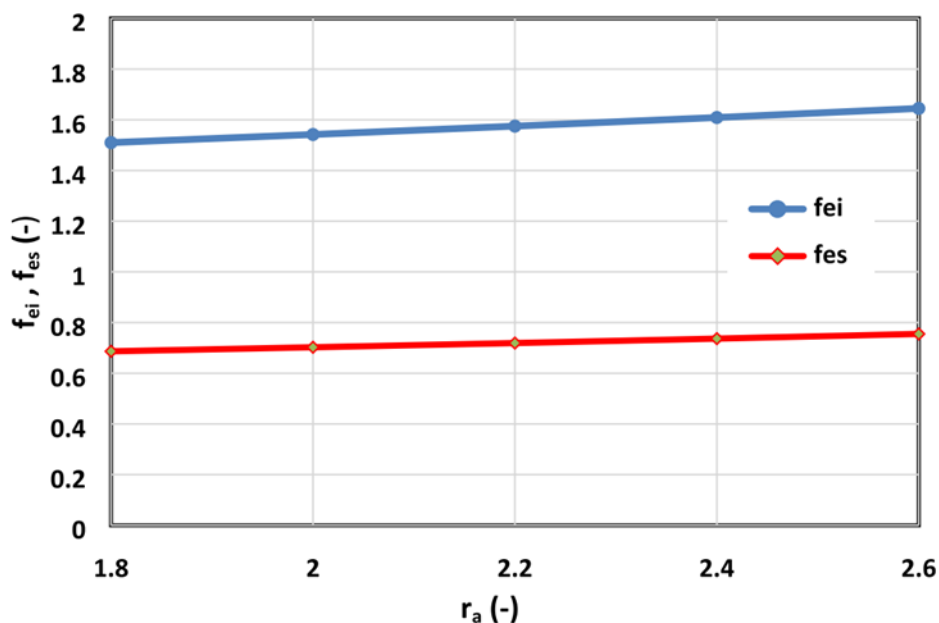
Με την αύξηση της αναλογίας r_a , η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος μειώνεται, ενώ η παραγωγή ουρίας αυξάνεται. Το πρώτο (η μείωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας) υπερτερεί του δεύτερου (αύξηση της παραγωγής ουρίας)

Οι μεταβολές του ρυθμού της καταστροφής της εξέργειας σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου (r_a) απεικονίζεται στο Διάγραμμα 9. Η αύξηση της αναλογίας r_a από 1,8 σε 2,8 προκαλεί μεταβολή του ρυθμού καταστροφής εξέργειας από 9,62 σε 33,8 MW.



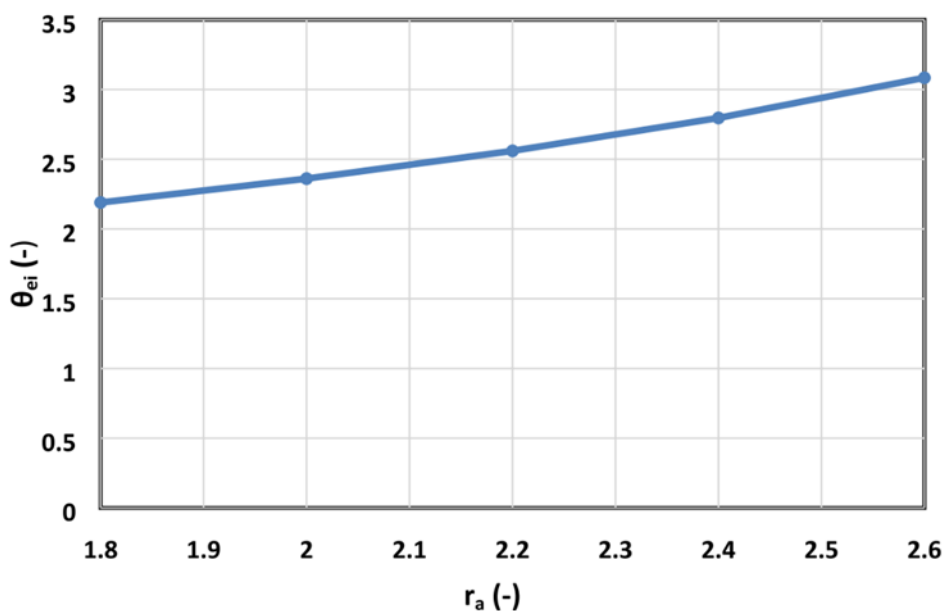
Διάγραμμα 9. Ο ρυθμός καταστροφής εξέργειας σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου

Η διαφορά μεταξύ του εξεργο-περιβαλλοντικού παράγοντα (f_{ei}) και παράγοντα εξεργειακής σταθερότητας (f_{es}) σε συνάρτηση με την σύσταση αέρα/καυσίμου παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 10. Και οι δύο αυτοί παράμετροι αυξάνονται κατά την αύξηση της αναλογίας r_a , ο ρυθμός αύξησης τους δε είναι παρόμοιος και για τις δυο. Ο εξεργο-περιβαλλοντικός παράγοντας (f_{ei}) βελτιώνεται περίπου κατά 8,9% ενώ ο έτερος (f_{es}) κατά 10%. Σύμφωνα με την Εξίσωση (33) και το Διάγραμμα 7, με την αύξηση της αναλογίας r_a , ο παράγοντας f_{ei} αυξάνεται.



Διάγραμμα 10. Ο εξεργο-περιβαλλοντικός παράγοντας (f_{ei}) και ο παράγοντας εξεργειακής σταθερότητας (f_{es}) σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου (r_a)

Στο Διάγραμμα 11 παρουσιάζεται ο παράγοντας απόδοσης περιβαλλοντικής ζημίας συναρτηθεί της αναλογίας αέρα/καυσίμου.



Διάγραμμα 11. Ο παράγοντας απόδοσης περιβαλλοντικής ζημίας σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου

Με την μεταβολή της r_a από 1.8 σε 2.6, ο παράγοντας απόδοσης περιβαλλοντικής ζημίας αυξάνεται από 2,2 σε 3,1. Σύμφωνα με τα Διαγράμματα 7, 8, 10, ο εξεργο-περιβαλλοντικός

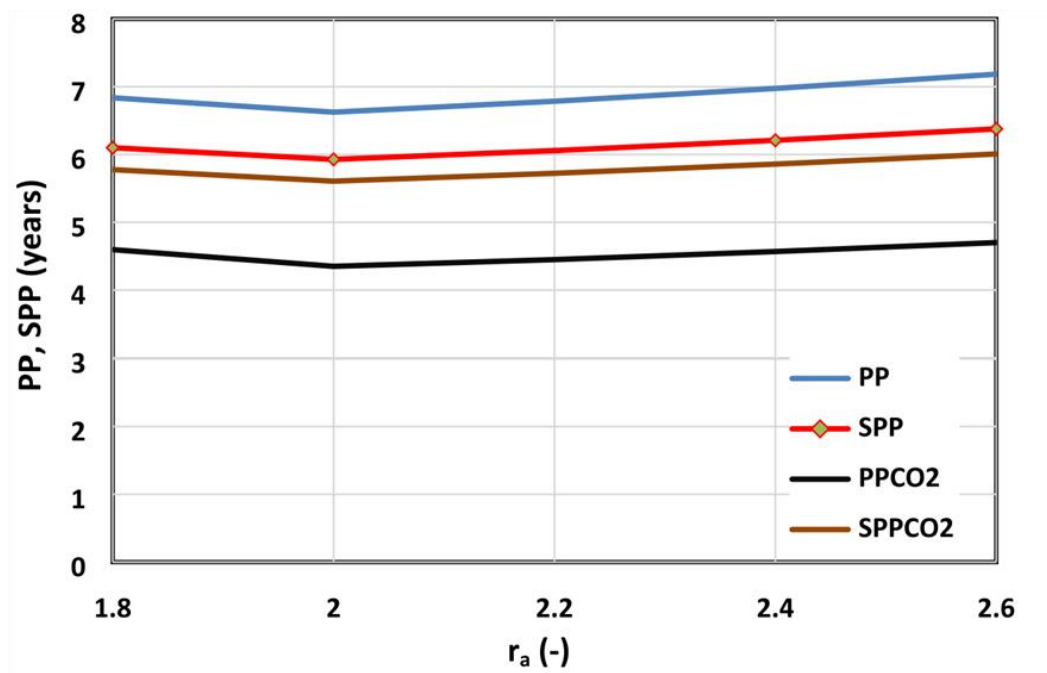


παράγοντας αυξάνεται όσο η εξεργειακή απόδοση μειώνεται. Λαμβάνοντας υπόψιν τις εξισώσεις (34) και (35), ο παράγοντας απόδοσης περιβαλλοντικής ζημίας αυξάνεται κατά την αύξηση της αναλογίας r_a .

Στο Διάγραμμα 12 παρουσιάζεται η αλλαγή των οικονομικών δεικτών PP και SPP με αλλά και χωρίς τον συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα συναρτήσει της αναλογίας r_a . Αυτό το διάγραμμα φαίνεται ότι οι τέσσερις γραμμές είναι όμοιες. Αυτό σημαίνει ότι οι δείκτες PP και SPP (με ή χωρίς το συνυπολογισμό του διοξειδίου του άνθρακα), μειώνονται μέχρι το r_a να λάβει την τιμή 2 και από εκεί και ύστερα αυξάνονται. Γενικότερα, η αύξηση της αναλογίας r_a προκαλεί τα εξής:

- Μείωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του υπό πρόταση συστήματος σύμφωνα με το Διάγραμμα 7. (Αρνητικό)
- Αύξηση της παραγωγής ουρίας. (Θετικό)
- Αύξηση του αρχικού κόστους των υποσυστημάτων, που προκαλείται από την αύξηση του μεγέθους του συστήματος, λόγω της αύξησης της παροχής μάζας στην είσοδο του. (Αρνητικό)

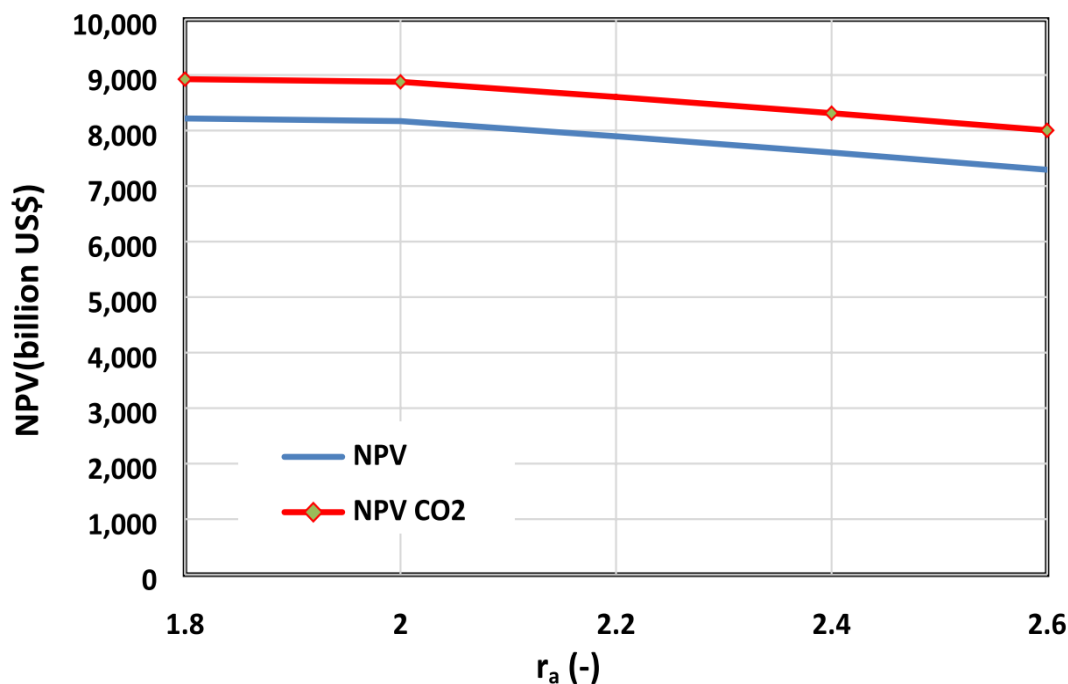
Όταν η τιμή της αναλογίας r_a είναι μικρότερη από 2, τότε το b υπερτερεί των a και c, ενώ όταν είναι μεγαλύτερη από 2 συμβαίνει το αντίθετο.



Διάγραμμα 12. Οι οικονομικοί δείκτες PP και SPP με ή χωρίς το συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου r_a

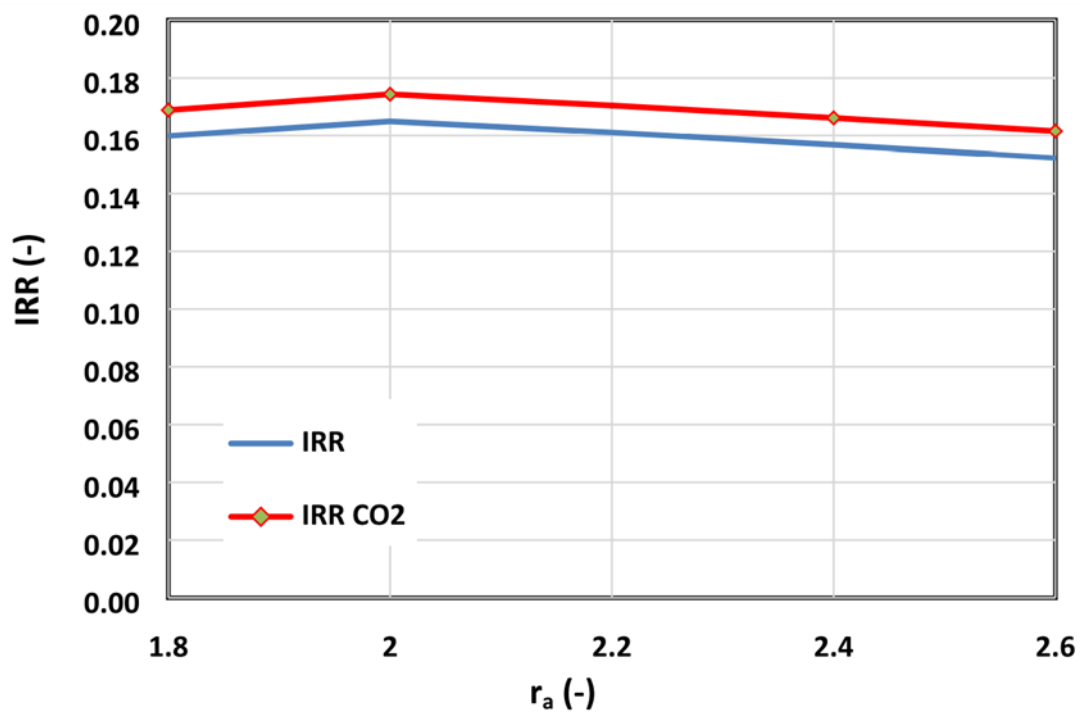


Το Διάγραμμα 13, αντίστοιχα, απεικονίζει την αλλαγή του οικονομικού δείκτη NPV με αλλά και χωρίς τον συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα ανάλογα με την τιμή της αναλογίας r_a . Με την αύξηση της αναλογίας από 1,8 σε 2,8, η τιμή του NPV μειώνεται από 8218 σε 7294 δισεκατομμύρια δολάρια χωρίς το συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου, το οποίο αν ληφθεί υπόψιν, η μεταβολή θα είναι από τα 8926 στα 8004 δισεκατομμύρια δολάρια. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι δύο γραμμές έχουν την ίδια κλίση.



Διάγραμμα 13. Ο οικονομικός δείκτης NPV με ή χωρίς το συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου r_a

Το Διάγραμμα 14, αντίστοιχα παρουσιάζει την αλλαγή του οικονομικού δείκτη IRR με αλλά και χωρίς τον συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με την αναλογία r_a . Οι μέγιστες τιμές του IRR είναι 0,165 και 0,174 όταν η αναλογία r_a είναι ίση με 2.



Διάγραμμα 14. Ο οικονομικός δείκτης IRR με ή χωρίς το συνυπολογισμό του κοινωνικού κόστους του διοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με την αναλογία αέρα/καυσίμου r_a



Συμπεράσματα

Στην εν λόγω εργασία, το υπό μελέτη σύστημα συμπαραγωγής έχει αναλυθεί σε ενεργειακό, οικονομικό, εξεργειακό, εξεργο-περιβαλλοντικό και περιβαλλοντικό επίπεδο. Το σύστημα έχει έξι συνολικά υποσυστήματα, τον κύκλο αεριοστρόβιλου, το κύκλο ατμού, το σύστημα ανάκτησης διοξειδίου του άνθρακα, τη κρυογονική μονάδα διαχωρισμού αέρα και τους αντιδραστήρες παραγωγής αμμωνίας και ουρίας.

Οι αντικειμενικοί στόχοι του συστήματος αυτού είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ουρίας. Τα κύρια αποτελέσματα της εν λόγω έρευνας αναφέρονται παρακάτω:

- Το σύστημα παράγει 689 GWh ηλεκτρικού ρεύματος και 10.323 εκατομμύρια τόνους ουρίας ετησίως.
- Ο ενεργειακός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι 31,8% και 51,3% αντιστοίχως.
- Ο υψηλότερος ρυθμός καταστροφής εξέργειας αφορά τον αντιδραστήρα παραγωγής ουρίας.
- Οι παράγοντες εξεργο-περιβάλλοντος (f_{ei}), απόδοσης περιβαλλοντικής ζημίας (θ_{ei}), και ευστάθειας εξέργειας (f_{es}) του συστήματος είναι 1.64, 3.1, and 0.76, αντίστοιχα.
- Η καθαρή παρούσα αξία, η περίοδος αποπληρωμής, η απλή περίοδος αποπληρωμής και ο εσωτερικός ρυθμός απόσβεσης είναι 7,29 δισεκατομμύρια δολάρια US\$, 7,2 έτη, 6,4 έτη και 0,15 αντίστοιχα αγνοώντας το κοινωνικό κόστος του διοξειδίου του άνθρακα.
- Η καθαρή παρούσα αξία, η περίοδος αποπληρωμής, η απλή περίοδος αποπληρωμής και ο εσωτερικός ρυθμός απόσβεσης είναι 8 δισεκατομμύρια δολάρια US\$, 4,7 έτη, 3,8 έτη και 0,161 αντίστοιχα συνυπολογίζοντας το κόστος του διοξειδίου του άνθρακα.
- Το σύστημα ανάκτησης διοξειδίου του άνθρακα είναι επωφελές για το περιβάλλον σύστημα αφού περιορίζει την εκπομπή CO_2 στην ατμόσφαιρα.



Βιβλιογραφία

- [1] Avtar R, Tripathi S, Aggarwal AK, Kuma Pr. Population–urbanization–energy nexus: a review. *Resources* 2019;8:136.
- [2] David Birchby JS, Sally Whiting, Vedrenne M. Air quality damage cost update 2019; 2019.
- [3] Karkour S, Ichisugi Y, Abeynayaka A, Itsubo N. External-cost estimation of electricity generation in G20 countries: case study using a global life-cycle impact assessment method. *Sustainability* 2020;12:2002.
- [4] Omer AM. Energy, environment and sustainable development. *Renew Sustain Energy Rev* 2008;12(9):2265–300. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.05.001>.
- [5] Dincer I, Zamfirescu C. Renewable-energy-based multigeneration systems. *Int J Energy Res* 2012;36:1403–15.
- [6] Lythcke-Jrgensen C, Ensinas AV, Münster M, Haglind F. A methodology for designing flexible multi-generation systems. *Energy* 2016;110:34–54.
- [7] Yu KMK, Curcic I, Gabriel J, Tsang SCE. Recent advances in CO₂ capture and utilization. *ChemSusChem: ChemSustain Energy Mater* 2008;1:893–9.
- [8] Soltanieh M, Azar KM, Saber M. Development of a zero emission integrated system for co-production of electricity and methanol through renewable hydrogen and CO₂ capture. *Int J Greenhouse Gas Control* 2012;7:145–52.
- [9] Pilavachi P. Mini-and micro-gas turbines for combined heat and power. *Appl Therm Eng* 2002;22:2003–14.
- [10] Balcezak WC, Bauver IWP, Livermore R, Perrin IJ, Yeaton A. Apparatus and method for close coupling of heat recovery steam generators with gas turbines. Google Patents 2018.
- [11] Gibbins J, Chalmers H. Carbon capture and storage. *Energy Policy* 2008;36:4317–22.
- [12] Ishaq H, Dincer I. Development and multi-objective optimization of a newly proposed industrial heat recovery based cascaded hydrogen and ammonia synthesis system. *Sci Total Environ* 2020;743:140671.
- [13] Pan B, Lam SK, Mosier A, Luo Y, Chen D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. *Agric Ecosyst Environ* 2016;232:283–9. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.019>.
- [14] Ali H, Eldrup NH, Normann F, Andersson V, Skagestad R, Mathisen A, et al. Cost estimation of heat recovery networks for utilization of industrial excess heat for carbon dioxide absorption. *Int J Greenhouse Gas Control* 2018;74:219–28.
- [15] Ishak F. Thermodynamic analysis of ammonia and urea fed solid oxide fuel cells. UOIT2012.
- [16] Bose A, Jana K, Mitra D, De S. Co-production of power and urea from coal with CO₂ capture: performance assessment. *Clean Techn Environ Policy* 2015;17:1271–80.
- [17] Roshandel R, Golzar F, Astaneh M. Technical, economic and environmental optimization of combined heat and power systems based on solid oxide fuel cell for a greenhouse case study. *Energy Convers Manage* 2018;164:144–56.
- Fig. 14. The PP and SPP with and without considering the social cost of CO₂ with ra.
- Fig. 15. The trend of NPV with the ra with and without considering the social cost of CO₂.



Fig. 16. The variation of the internal rate of return (IRR) versus molar air/fuel ratio with and without considering the social cost of carbon dioxide (CO₂).

H. Abbaspour et al.

- [18] Koohestanian E, Sadeghi J, Mohebbi-Kalhari D, Shahraki F, Samimi A. A novel process for CO₂ capture from the flue gases to produce urea and ammonia. *Energy* 2018;144:279–85.
- [19] Mehrpooya M, Sharifzadeh MMM, Mousavi SA. Evaluation of an optimal integrated design multi-fuel multi-product electrical power plant by energy and exergy analyses. *Energy* 2019;169:61–78.
- [20] Hou Q, Zhao H, Yang X. Thermodynamic performance study of the integrated MRSOFC-CCHP system. *Energy* 2018;150:434–50.
- [21] Esfandi S, Baloochzadeh S, Asayesh M, Ehyaei MA, Ahmadi A, Rabanian AA, et al. Energy, exergy, economic, and exergoenvironmental analyses of a novel hybrid system to produce electricity, cooling, and syngas. *Energies* 2020;13:6453.
- [22] Talebizadehsardari P, Ehyaei M, Ahmadi A, Jamali D, Shirmohammadi R, Eyvazian A, et al. Energy, exergy, economic, exergoeconomic, and exergoenvironmental (5E) analyses of a triple cycle with carbon capture. *J CO₂ Util* 2020;41:101258.
- [23] Ziaei M, Panahi M, Fanaei MA, Rafiee A, Khalilpour KR. Maximizing the profitability of integrated Fischer-Tropsch GTL process with ammonia and urea synthesis using response surface methodology. *J CO₂ Util* 2020;35:14–27.
- [24] Ehyaei M, Mozafari A, Alibiglou M. Exergy, economic & environmental (3E) analysis of inlet fogging for gas turbine power plant. *Energy* 2011;36:6851–61.
- [25] Ehyaei M, Hakimzadeh S, Enadi N, Ahmadi P. Exergy, economic and environment (3E) analysis of absorption chiller inlet air cooler used in gas turbine power plants. *Int J Energy Res* 2012;36:486–98.
- [26] Akbari MAER, Shahi Shavvon R. Optimization of solar rankine cycle by exergy analysis and genetic algorithm. *Int J Energy Power Eng* 2019;13:630–7.
- [27] Jia J, Abudula A, Wei L, Sun B, Shi Y. Thermodynamic modeling of an integrated biomass gasification and solid oxide fuel cell system. *Renewable Energy* 2015;81:400–10.
- [28] Ehyaei MA, Rosen MA. Optimization of a triple cycle based on a solid oxide fuel cell and gas and steam cycles with a multiobjective genetic algorithm and energy, exergy and economic analyses. *Energy Convers Manage* 2019;180:689–708.
- [29] Ishaq H, Siddiqui O, Chehade G, Dincer I. A solar and wind driven energy system for hydrogen and urea production with CO₂ capturing. *Int J Hydrogen Energy* 2021.
- [30] Mozafari A, Ahmadi A, Ehyaei M. Optimisation of micro gas turbine by exergy, economic and environmental (3E) analysis. *Int J Exergy* 2010;7:1–19.
- [31] Rao AB, Rubin ES. A technical, economic, and environmental assessment of aminebased CO₂ capture technology for power plant greenhouse gas control. *Environ Sci Technol* 2002;36:4467–75.
- [32] Petrakopoulou F. Comparative evaluation of power plants with CO₂ capture: thermodynamic, economic and environmental performance; 2011.
- [33] Shaygan M, Ehyaei MA, Ahmadi A, Assad MEH, Silveira JL. Energy, exergy, advanced exergy and economic analyses of hybrid polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell and photovoltaic cells to produce hydrogen and electricity. *J Cleaner Prod* 2019;234:1082–93.
- [34] Barbir F, Gmez T. Efficiency and economics of proton exchange membrane (PEM)



- fuel cells. *Int J Hydrogen Energy* 1997;22:1027-37.
- [35] Tesch S, Morosuk T, Tsatsaronis G. Comparative evaluation of cryogenic air separation units from the exergetic and economic points of view. low-temperature technologies. In: *IntechOpen*2019.
- [36] Beysel G. Enhanced cryogenic air separation—a proven process applied to oxyfuel. In: *1st Oxyfuel Combustion Conference*, Cottbus, Germany; 2009.
- [37] Useng W. *Chemical Exergy Analysis on Ammonia Synthesis Reaction*; 2011.
- [38] Kumar B, Das PC. *Manufacture of urea* 2007.
- [39] Fiamelda L. Analysis of water and electricity consumption of urea fertilizer industry: case study PT. X. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing; 2020. p. 012034.
- [40] Lazzaretto A, Tsatsaronis G. SPECO: a systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy* 2006;31:1257–89.
- [41] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. *Thermal Design and Optimization* John Wiley and Sons. Inc New York; 1996.
- [42] Bellos E, Pavlovic S, Stefanovic V, Tzivanidis C, Nakomcic-Smaradgakis BB. Parametric analysis and yearly performance of a trigeneration system driven by solar-dish collectors. *Int J Energy Res* 2019;43:1534–46.
- [43] Tzivanidis C, Bellos E, Antonopoulos KA. Energetic and financial investigation of a stand-alone solar-thermal Organic Rankine Cycle power plant. *Energy Convers Manage* 2016;126:421–33.
- [44] Prebeg P, Gasparovic G, Krajacic G, Duic N. Long-term energy planning of Croatian power system using multi-objective optimization with focus on renewable energy and integration of electric vehicles. *Appl Energy* 2016;184:1493–507.
- [45] Castaneda M, Cano A, Jurado F, Sánchez H, Fernandez LM. Sizing optimization, dynamic modeling and energy management strategies of a stand-alone PV/hydrogen/battery-based hybrid system. *Int J Hydrogen Energy* 2013;38:3830-45.
- [46] Nami H, Ertesvåg IS, Agromayor R, Riboldi L, Nord LO. Gas turbine exhaust gas heat recovery by organic Rankine cycles (ORC) for offshore combined heat and power applications—Energy and exergy analysis. *Energy*. 2018;165:1060–71.
- [47] *Costs and Benefits of LNG*; 2020.
- [48] Nami H, Akrami E. Analysis of a gas turbine based hybrid system by utilizing energy, exergy and exergoeconomic methodologies for steam, power and hydrogen production. *Energy Convers Manage* 2017;143:326–37.
- [49] Shafer T. *Calculating Inflation Factors for Cost Estimates*. City of Lincoln Transportation and Utilities Project Delivery.
- [50] Statista. *Global inflation rate compared to previous year*.
- [51] Edalati S, Ameri M, Iranmanesh M, Tarmahi H, Gholampour M. Technical and economic assessments of grid-connected photovoltaic power plants: Iran case study. *Energy* 2016;114:923–34.
- [52] Roosen P, Uhlenbruck S, Lucas K. Pareto optimization of a combined cycle power system as a decision support tool for trading off investment vs. operating costs. *Int J Therm Sci* 2003;42:553–60.
- [53] Silveira JL, Tuna CE. Thermo-economic analysis method for optimization of combined heat and power systems. Part I. *Prog Energy Combust Sci* 2003;29: 479–85.
- [54] Bellotti D, Rivarolo M, Magistri L, Massardo A. Feasibility study of methanol production plant from hydrogen and captured carbon dioxide. *J CO2 Util* 2017;21: 132–8.



- [55] Zare V, Moalemi A. Parabolic trough solar collectors integrated with a Kalina cycle for high temperature applications: Energy, exergy and economic analyses. *Energy Convers Manage* 2017;151:681–92.
- [56] Zare V, Palideh V. Employing thermoelectric generator for power generation enhancement in a Kalina cycle driven by low-grade geothermal energy. *Appl Therm Eng* 2018;130:418–28.
- [57] Habibollahzade A, Gholamian E, Ahmadi P, Behzadi A. Multi-criteria optimization of an integrated energy system with thermoelectric generator, parabolic trough solar collector and electrolysis for hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy* 2018;43:14140–57.
- [58] Skorek-Osikowska A, Bartela Ł, Kotowicz J. A comparative thermodynamic, economic and risk analysis concerning implementation of oxy-combustion power plants integrated with cryogenic and hybrid air separation units. *Energy Convers Manage* 2015;92:421–30.
- [59] Tafone A, Dal Magro F, Romagnoli A. Integrating an oxygen enriched waste to energy plant with cryogenic engines and Air Separation Unit: Technical, economic and environmental analysis. *Appl Energy* 2018;231:423–32.
- [60] Cloete S, Khan MN, Nazir SM, Amini S. Cost-effective clean ammonia production using membrane-assisted autothermal reforming. *Chem Eng J* 2021;404:126550.
- [61] Edrisi A, Mansoori Z, Dabir B. Urea synthesis using chemical looping process – Techno-economic evaluation of a novel plant configuration for a green production. *Int J Greenhouse Gas Control* 2016;44:42–51.
- [62] Ratlamwala TA, Dincer I, Gadalla MA. Comparative environmental impact and sustainability assessments of hydrogen and cooling production systems. In: *Causes, Impacts and Solutions to Global Warming*. Springer; 2013. p. 389-408.
- [63] Ratlamwala TA, Dincer I, Reddy BV. Exergetic and environmental impact assessment of an integrated system for utilization of excess power from thermal power plant. In: *Causes, Impacts and Solutions to Global Warming*. Springer; 2013. p. 803-24.
- [64] Midilli A, Dincer I. Development of some exergetic parameters for PEM fuel cells for measuring environmental impact and sustainability. *Int J Hydrogen Energy* 2009;34:3858–72.
- [65] Ghazikhani M, Khazaei I, Abdekhodaie E. Exergy analysis of gas turbine with air bottoming cycle. *Energy*. 2014;72:599–607.
- [66] Ghazikhani M, Manshoori N, Tafazoli D. Influence of steam injection on thermal efficiency and operating temperature of GE-F5 gas turbines applying VODOLEY system. In: *ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection; 2005. p. 217-24.
- [67] Polyzakis AL, Koroneos C, Xydis G. Optimum gas turbine cycle for combined cycle power plant. *Energy Convers Manage* 2008;49:551–63.
- [68] Ahmadi A, Ehyaei MA, Jamali DH, Despotovic M, Esmailion F, Abdalisousan A, et al. Energy, exergy, and economic analyses of integration of heliostat solar receiver to gas and air bottom cycles. *J Cleaner Prod* 2021;280:124322.
- [69] Alizadeh S, Ghazanfari A, Ehyaei M, Ahmadi A, Jamali D, Nedaei N, et al. Investigation the integration of heliostat solar receiver to gas and combined cycles by energy, exergy, and economic point of views. *Appl Sci* 2020;10:5307.
- [70] Remeur C. Carbon emissions pricing. Members’ ResearchService PE 649.352, EPRS European Parliamentary Research Service, March 2020.



Παράρτημα Α: “Αεριοστρόβιλος GE LM2500-30”

Ο Αεριοστρόβιλος της εταιρίας General Electric LM2500 αποτελεί τυπικό αεριοστροβίλου που χρησιμοποιείται από τα πολεμικά ναυτικά, ανά τον κόσμο και είναι η βασική προωστήρια μηχανή του Αμερικάνικου Π.Ν. Η έκδοση LM2500-30 χρησιμοποιείται από το Ελληνικό Π.Ν.στις φρεγάτες κλάσης Ύδρα (MEKO 200HN) σε διάταξη CODOG με δύο αεριοστροβίλους για υψηλή ταχύτητα, όπου ο καθένας δίνει ισχύ πρόωσης περί τους 30000 shp. Είναι αεριοστρόβιλος παράγωγος αεροπορικού και έχει βασισθεί στην οικογένεια αεροπορικών κινητήρων CF-6. Ένα βασικό πλεονέκτημα της μηχανής αυτής είναι η αξιοπιστίας της καθώς έχουν παραχθεί πάνω από 6000 μηχανές CF-6 και πάνω από 2000 μηχανές LM2500 για επίγειες και ναυτικές εφαρμογές.

Ο αεριοστρόβιλος LM2500-30 αποτελείται από ένα αξονικό συμπιεστή δεκαέξι (16) βαθμίδων, το στρόβιλο αεριογόνου ο οποίος είναι αξονικός στρόβιλος δύο (2) βαθμίδων και από το στρόβιλο ισχύος, ο οποίος είναι αξονικός στρόβιλος έξι (6) βαθμίδων. Για την εύρυθμη λειτουργία της μηχανής, ειδικά σε χαμηλά φορτία, οι σταθερές πτερυγώσεις (στάτορες) των πρώτων έξι βαθμίδων του συμπιεστή είναι μεταβλητής γεωμετρίας (Variable Stator Vanes), ενώ και τα οδηγά πτερύγια στην είσοδο του συμπιεστή (Inlet Guide Vanes) είναι μεταβλητής γεωμετρίας. Ο θάλαμος καύσης είναι δακτυλιοειδής με 30 εγχυτήρες καυσίμου. Οι επιδόσεις της μηχανής φαίνονται στον πίνακα.

Ισχύς	30466shp
Heat Rate	9311 Btu/kWh
sfc	0.374lb/shp/h
Παροχή Αέρα	153lb/s
Λόγος Πίεσης GG	19.1
Max Στροφές GG	10100rpm
Max Στροφές PT	3600rpm
EGT	535oC
Μήκος Α/Σ	6.52m
Ύψος Α/Σ	2.04m
Βάρος	4.67t

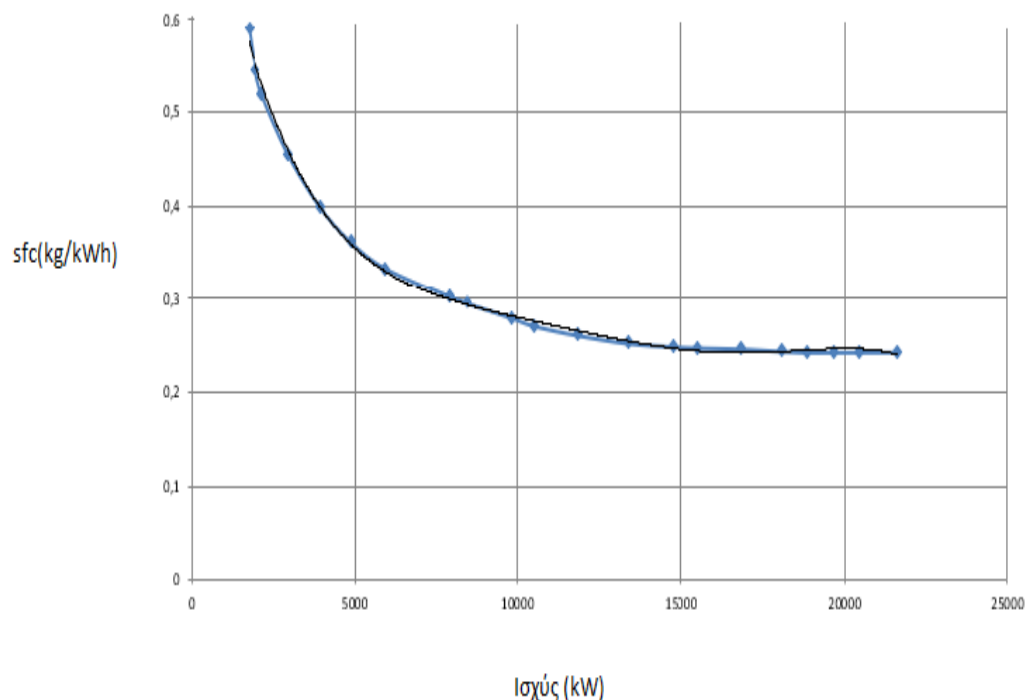
Πίνακας 12. Επιδόσεις LM2500-30



Ο General Electric LM2500-30 είναι ένας βιομηχανικός και θαλάσσιος αεριοστρόβιλος που παράγεται από την GE Aviation. Ο Α/Σ LM2500-30 είναι παράγωγος του κινητήρα αεροσκάφους General Electric CF6 με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Μέγιστη ισχύς εξόδου 33.600 shp (25.060 kW).
- Ελάχιστη ειδική κατανάλωση καυσίμου 0.373 lb/shp-hr (227 g/kWh).
- Ρυθμός θερμότητας 6.860 Btu / shp-hr (9.705 kJ/kWh).
- Ροή καυσαερίων 155 lb/s (70.5 kg/s).
- Θερμοκρασία καυσαερίων στην έξοδο: 1.051 ° F (566°C).
- Ταχύτητα στροβίλου (rpm) 3.600.
- Θερμική απόδοση 36%.
- Βάρος 4.7 τόνοι.

Στο ακόλουθο Διάγραμμα 15 παρουσιάζεται η καμπύλη μεταβολής της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της ισχύος εξόδου του Α/Σ LM2500-30.



Διάγραμμα 15. Ειδική κατανάλωση καυσίμου sfc(kg/kWh) σαν συνάρτηση της ισχύος (kW) του αεριοστρόβιλου LM2500-30