

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	i
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT .....	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟ-ΠΟΙΗΣΗΣ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CCU). .....	6
1.1 Ορισμοί.....	6
1.2 Κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών CCU .....	6
1.2.1 Τεχνολογίες μετασχηματισμού του CO <sub>2</sub> .....	8
1.2.2 Τεχνολογίες μη μετασχηματισμού του CO <sub>2</sub> .....	13
1.3 Η Ευρωπαϊκή πολιτική για τις τεχνολογίες CCU .....	15
2 Το διοξείδιο του άνθρακα ως εργαζόμενο ρευστό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας .....	17
2.1 Πηγές θερμότητας χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας και θερμοδυναμικοί κύκλοι.....	17
2.2 Σύγκριση των εργαζόμενων ρευστών .....	19
2.3 Η Ιστορία του κύκλου παραγωγής ενέργειας διοξειδίου του άνθρακα .	23
2.4 Περιγραφή των κύκλων ενέργειας του διοξειδίου του άνθρακα .....	26
2.4.1 Transcritical κύκλος διοξειδίου του άνθρακα .....	27
2.4.2 Απλός Brayton κύκλος υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα .....	29
2.4.3 Κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπύεση	31
2.4.4 Συνδυασμένος κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.....	32
2.4.5 Συνδυασμένος κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπύεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα. ....	34

3	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ .....	36
3.1	Παράμετροι αξιολόγησης του συστήματος (Μαθηματική Περιγραφή)	36
3.1.1	Transcritical κύκλος διοξειδίου του άνθρακα .....	36
3.1.2	Απλός Brayton κύκλος υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα .....	39
3.1.3	Κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπύεση.....	40
3.1.4	Συνδυασμένος κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.....	40
3.1.5	Συνδυασμένος κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπύεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα. ....	41
3.2	Παραδοχές και Προσομοίωση .....	41
3.2.1	Γενικές παραδοχές όλων των κύκλων .....	42
3.2.2	Transcritical κύκλος διοξειδίου του άνθρακα .....	43
3.2.3	Απλός Brayton κύκλος υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα .....	43
3.2.4	Brayton κύκλος υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπύεση	44
3.2.5	Συνδυασμένοι κύκλοι Brayton κύκλου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα .....	44
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	46
4.1	Transcritical κύκλος διοξειδίου του άνθρακα.....	47
4.2	Απλός Brayton κύκλος υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα.....	52
4.3	Κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπύεση	57
4.4	Συνδυασμένος κύκλος απλού Brayton κύκλου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα .....	60
4.5	Συνδυασμένος κύκλος Brayton διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπύεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα .....	64
4.6	ΣΥΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	68

5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ...	71
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	73
7	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α' .....	78

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Workshop on " CO <sub>2</sub> Re-use Technologies"   SETIS - European Commission [3].....	4
Εικόνα 2: Τρέχουσες και πιθανές χρήσεις του CO <sub>2</sub> [9].....	8
Εικόνα 3: Κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με EU-28 (EU-2014).....	18
Εικόνα 4: Θερμοκρασιακό Προφίλ πηγής θερμότητας και εργαζόμενου ρευστού κατά την προσθήκη θερμότητας. ....	22
Εικόνα 5: Μονογραμμικό διάγραμμα transcritical κύκλου CO <sub>2</sub> .....	27
Εικόνα 6: Μονογραμμικό διάγραμμα transcritical κύκλου CO <sub>2</sub> με αναγεννητή.....	28
Εικόνα 7: Διάγραμμα T-s transcritical κύκλου διοξειδίου του άνθρακα [13]....	29
Εικόνα 8: Μονογραμμικό διάγραμμα απλού κύκλου Brayton.....	30
Εικόνα 9: Μονογραμμικό διάγραμμα κύκλου Brayton με αναγεννητή.....	30
Εικόνα 10: Διάγραμμα T-s κύκλου Brayton [13].....	31
Εικόνα 11: Διάγραμμα κύκλου Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπύεση.....	32
Εικόνα 12: Μονογραμμικό διάγραμμα συνδυασμένου κύκλου Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα. ....	33
Εικόνα 13 Συνδυασμένος κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπύεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.....	35
Εικόνα 14: Διάγραμμα εξεργειακού βαθμού απόδοσης-θερμοκρασίας πηγής θερμότητας εργαζόμενων ρευστών.....	41
Εικόνα 15: Συνολικός θερμικός βαθμός απόδοσης.....	47
Εικόνα 16: Εισαγωγή συνολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης.....	47
Εικόνα 17 Μονογραμμικό διάγραμμα του Transcritical κύκλου CO <sub>2</sub> .....	48
Εικόνα 18 Μονογραμμικό διάγραμμα του Transcritical κύκλου CO <sub>2</sub> με αναγεννητή.....	49
<b>Εικόνα 19: Ροή ενέργειας transcritical κύκλου διοξειδίου του άνθρακα χωρίς αναγεννητή.....</b>	<b>50</b>
Εικόνα 20: Ροή ενέργειας transcritical κύκλου διοξειδίου του άνθρακα με αναγεννητή.....	50
Εικόνα 21: Διάγραμμα Grassmann ροής εξεργειας χωρίς αναγεννητή.....	51
Εικόνα 22: Διάγραμμα Grassmann ροής εξεργειας με αναγεννητή.....	51

Εικόνα 23: Συνολικός θερμικός βαθμός απόδοσης.....	52
Εικόνα 24: Εισαγωγή συνολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης.....	52
Εικόνα 25 Μονογραμμικό διάγραμμα απλού Brayton $SCO_2$ χωρίς αναγεννητή. .....	53
Εικόνα 26 Μονογραμμικό διάγραμμα απλού Brayton $SCO_2$ με αναγεννητή. ...	54
Εικόνα 27: Διάγραμμα Sankey ροής ενέργειας Brayton χωρίς αναγεννητή.....	54
Εικόνα 28: Διάγραμμα Sankey ροής ενέργειας Brayton με αναγεννητή .....	55
Εικόνα 29 Διάγραμμα Grassmann ροής εξέργειας Brayton χωρίς αναγεννητή.	56
Εικόνα 30: Διάγραμμα Grassmann ροής εξέργειας Brayton με αναγεννητή.....	56
Εικόνα 31: Διάγραμμα Συνολικού Θερμικού βαθμού απόδοσης.....	57
Εικόνα 32: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης.....	57
Εικόνα 33: Μονογραμμικό Διαγραμμα Brayton με ανασυμπίεση.....	59
Εικόνα 34: Διάγραμμα Sankey ροής ενέργειας Brayton με ανασυμπίεση.....	59
Εικόνα 35: Διάγραμμα ροής Grassmann εξέργειας Brayton με ανασυμπίεση..	60
Εικόνα 36: Θερμικός βαθμός απόδοσης.....	61
Εικόνα 37: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης.....	61
Εικόνα 38: : Μονογραμμικό Διάγραμμα απλού Brayton κύκλου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.....	62
Εικόνα 39: Διάγραμμα Sankey ροής ενέργειας απλού Brayton κύκλου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.....	63
Εικόνα 40: Διάγραμμα Grassmann ροής εξέργειας απλού Brayton κύκλου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.....	63
Εικόνα 41: Θερμικός βαθμός απόδοσης.....	64
Εικόνα 42: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης.....	65
Εικόνα 43: Μονογραμμικό Διάγραμμα Brayton διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.....	66
Εικόνα 44: Διάγραμμα Sankey ροής ενέργειας Brayton διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.....	67
Εικόνα 45: Διάγραμμα Grassmann ροής εξέργειας Brayton διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.....	67
Εικόνα 46: Συνολικός Θερμικός Βαθμός Απόδοσης όλων των κύκλων Brayton .....	68
Εικόνα 47: Συνολικός Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης όλων των κύκλων Brayton.....	69

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πρώτο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική επισκόπηση των μέχρι πρότινος κατηγοριών επαναχρησιμοποίησης του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα, καθώς και την πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ανάπτυξη των τεχνολογικών αυτών σε διακρατικό επίπεδο (1<sup>ο</sup> Μέρος). Το δεύτερο μέρος εξετάζει το διοξείδιο του άνθρακα ως εργαζόμενο ρευστό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (2<sup>ο</sup> Μέρος). Στην αρχή περιγράφονται οι οργανικοί κύκλοι, με ιδιαίτερη αναφορά στον οργανικό κύκλο Rankine (Organic Rankine Cycle) και Brayton (υποκεφάλαιο 2.1). Στη συνέχεια, επιχειρείται σύγκριση των εργαζόμενων ρευστών, από την οποία προέκυψε ότι το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο εργαζόμενο μέσο (υποκεφάλαιο 2.2). Πριν αναλυθεί η μοντελοποίηση των διεργασιών που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας σε περιβάλλον Aspen Plus V 8.0<sup>1</sup>, παρατίθεται η Ιστορία του κύκλου παραγωγής ενέργειας διοξειδίου του άνθρακα (υποκεφάλαιο 2.3). Τέλος, παρουσιάζονται 5 συστήματα διοξειδίου του άνθρακα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που αξιοποιούν πηγή θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας με τις περιπτώσεις τους (υποκεφάλαιο 2.4). Στο τελευταίο μέρος της εργασίας (3<sup>ο</sup> Μέρος) συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα ενώ ταυτόχρονα προτείνονται και θέματα για μελλοντική εργασία.

## ABSTRACT

The first part of the present thesis includes a literature overview of previously categories of captured CO<sub>2</sub>'s reuse and the EU's policy for the development of these technologies, among members states (1<sup>st</sup> Part). The second part examines CO<sub>2</sub> as working fluid for electricity generation (2<sup>nd</sup> Part). At first, organic cycles are described, with particular reference to the Organic Rankine and Brayton cycles (section 2.1). Continually, the attempted comparison of several working fluids concludes that CO<sub>2</sub> is a very promising working fluid (section 2.2). Before the analysis of modeled processes in Aspen PlusV8.0, the history of carbon dioxide cycle is reported (section 2.3). Lastly, 5 systems of carbon dioxide and their cases are presented, utilizing a low temperature heat source (section 2.4). In the last part (3<sup>rd</sup> Part), the main conclusions are summarized and future work is proposed.

---

<sup>1</sup> Aspen Technology Inc., Aspen One V8.0, Process Optimization for Engineering Manufacturing and Supply Chain, in, Aspen Technology: Burlington, ON, Canada,, 2013.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών της ανθρωπότητας απαιτεί την διαρκή κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, η οικονομική ανάπτυξη και η προστασία του περιβάλλοντος είναι στόχοι που δεν μπορούν να επιτευχθούν ταυτόχρονα, καθώς εξακολουθεί να υπάρχει άμεση σύνδεση της αύξησης των ενεργειακών απαιτήσεων με τη μορφή της σύγχρονης οικονομίας, γεγονός που δε φαίνεται να μεταβάλλεται σύντομα. Σύμφωνα με το New Policies Scenario του world energy outlook 2011 (IEA 2011), οι απαιτήσεις της πρωτογενούς ενέργειας προβλέπεται να αυξηθούν από 12,150 Mtoe<sup>2</sup> το 2009 σε 16,950 Mtoe το 2035, μια αύξηση της τάξεως του 40% ή αλλιώς του 1,3% ανά έτος [1]. Παράλληλα, τα ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) συνεχίζουν να αποτελούν την βασική πρώτη ύλη για την παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας, καθώς συνεισφέρουν το 82% αυτής (IEA, 2014). Ειδικότερα, ο άνθρακας (γαιάνθρακας, λιθάνθρακας, λιγνίτης κλπ.) καλύπτει το 25% της παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας, ενώ στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στις ΗΠΑ το ποσοστό αυτό ανέρχεται στο 30% και 50% αντίστοιχα. Η Ελλάδα εξορύσσει 70 εκατομμύρια τόνους λιγνίτη ετησίως για ηλεκτροπαραγωγή, καλύπτοντας περίπου το 60% των απαιτήσεων της σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ως εκ τούτου, η αυξανόμενη ζήτηση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει δημιουργήσει σοβαρά περιβαλλοντικά ζητήματα, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση και η κλιματική αλλαγή. Βασικός παράγοντας που συντελεί στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη είναι η αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου, στα οποία συμπεριλαμβάνεται και το διοξείδιο του άνθρακα (στο εξής CO<sub>2</sub>). Η σταθεροποίηση της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα -στην τιμή των 450ppm CO<sub>2</sub>- απαιτεί τη μείωση των εκπομπών σε επίπεδο σημαντικά χαμηλότερο από το σημερινό, με χρήση ενός πακέτου μέτρων που περιλαμβάνουν:

- τη μείωση της ζήτησης σε ενέργεια και αύξηση του βαθμού απόδοσης των ενεργειακών εγκαταστάσεων,
- την αύξηση της χρήσης του φυσικού αερίου,
- την αύξηση της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και της πυρηνικής ενέργειας,
- τη χρήση τεχνολογιών δέσμευσης του CO<sub>2</sub> και
- την αναδάσωση [2].

---

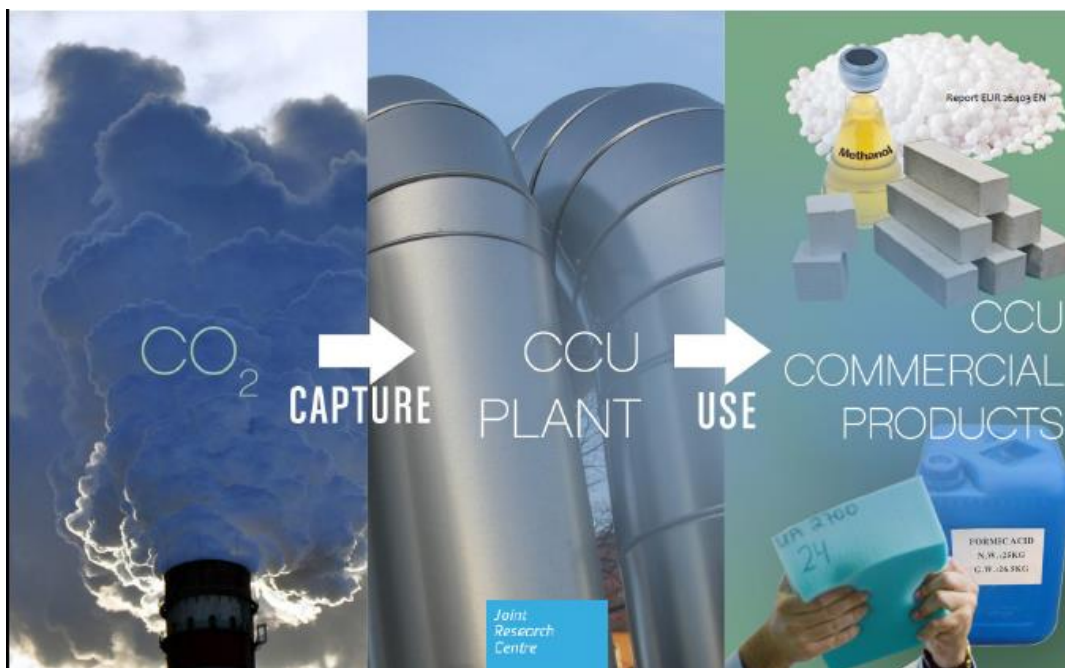
<sup>2</sup> Όπου Mtoe ορίζεται ο μεγατόνος ισοδύναμος πετρελαίου

Παρά λοιπόν τις αξιόλογες προσπάθειες και επενδύσεις, από πολλά κράτη, για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την εξοικονόμηση των ορυκτών καυσίμων, για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων, θα χρειαστεί σημαντική συμβολή από τις τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> (Carbon Capture & Storage, CCS). [2]

Στη σημερινή εποχή επιταχύνεται σημαντικά η αναζήτηση νέων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και μεθόδων οι οποίες θα βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος και θα μειώσουν το αρνητικό αντίκτυπο των καυσαερίων, προερχόμενων από μηχανές ορυκτών καυσίμων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τεχνολογίες δέσμευσης του CO<sub>2</sub>, οι οποίες επιτρέπουν την χρήση ορυκτών καυσίμων, με παράλληλη μείωση των εκπομπών του CO<sub>2</sub> και αναμένεται να συνεισφέρουν σημαντικά στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής σε παγκόσμια κλίμακα. Ωστόσο, η τεχνολογία Δέσμευσης και Αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (**Carbon Capture and Storage-CCS**) από μόνη της είναι μία τεχνολογία που, ενώ αποσκοπεί στην μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, αδυνατεί να το αξιοποιήσει ως πηγή χρηματικών απολαβών. Αυτή η δυνατότητα αξιοποίησης του διοξειδίου του άνθρακα σε οικονομικό επίπεδο επιτυγχάνεται μέσω των τεχνολογιών Δέσμευσης και Χρησιμοποίησης του διοξειδίου του άνθρακα (**Carbon Capture & Utilization-CCU**).

Ως επαναχρησιμοποίηση του CO<sub>2</sub> νοείται η πρακτική εφαρμογή του δεσμευμένου και συμπυκνωμένου CO<sub>2</sub> από την οποία αποκομίζονται οφέλη τόσο σε οικονομικό επίπεδο με την αντιστάθμιση του κόστους δέσμευσης του CO<sub>2</sub>, όσο και σε περιβαλλοντικό / οικολογικό επίπεδο, με τη μείωση της συγκέντρωσης του εν λόγω αερίου στην ατμόσφαιρα. Επιγραμματικά, διότι κατωτέρω γίνεται εκτενής περιγραφή, οι μορφές των CCU τεχνολογιών είναι οι εξής: CO<sub>2</sub> για χρήση σε βελτιωμένη άντληση υδρογονανθράκων, CO<sub>2</sub> ως πρώτη ύλη για τη βελτιστοποίηση παραγωγής ουρίας, CO<sub>2</sub> ως ρευστό εργασίας για βελτιωμένα γεωθερμικά συστήματα (EGS), CO<sub>2</sub> ως πρώτη ύλη για τη σύνθεση πολυμερών, CO<sub>2</sub> στην καλλιέργεια φυκιών, CO<sub>2</sub> για χρήση στην σκλήρυνση σκυροδέματος, για χρήση σε ενανθράκωση ορυκτών, CO<sub>2</sub> ως πρώτη ύλη για την παραγωγή υγρών καυσίμων, καθώς και η χρήση του ως εργαζόμενο ρευστό σε κύκλους παραγωγής ενέργειας. Συγκεκριμένα το διοξείδιο του άνθρακα έχει μελετηθεί ευρέως ως εργαζόμενο ρευστό για χρήση σε κύκλους ψύξης, εξαιτίας των ιδιαίτερων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του.





**Εικόνα 1: Workshop on " CO<sub>2</sub> Re-use Technologies" | SETIS - European Commission [3]**

Σήμερα οι πηγές θερμότητας χαμηλής και μέτριας θερμοκρασίας βρίσκονται στο επίκεντρο του ερευνητικού ενδιαφέροντος, καθώς εντοπίζονται σε όλα τα επίπεδα της βιομηχανικής παραγωγής με τη μορφή θερμικών απωλειών. Η μελέτη των πηγών αυτών πραγματοποιείται μέσω διαφόρων κύκλων παραγωγής ενέργειας. Δυο από τους σημαντικότερους είναι ο οργανικός κύκλος Rankine και ο κύκλος Brayton. Αρκετές έρευνες προβλέπουν ότι οι οργανικοί κύκλοι Rankine (Organic Rankine Cycle-ORC) είναι καταλληλότεροι για πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας από ότι οι συμβατικοί κύκλοι ενέργειας με ατμό. Βασικό όμως μειονέκτημα του κύκλου ORC αποτελεί η συνεχής θερμοκρασία εξάτμισης, η οποία δεν καθίσταται κατάλληλη για πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας. Συνεπώς, προτείνεται η χρήση διμερών μιγμάτων ή υπερκρίσιμης πίεσης, γιατί κατά την θέρμανσή τους ακολουθούν το θερμοκρασιακό προφίλ της πηγής θερμότητας [4]. Όμως, σε αυτήν την περίπτωση το διοξείδιο του άνθρακα ίσως μπορεί να δώσει ώθηση στη βελτιστοποίηση της ήδη υπάρχουσας τεχνολογίας εξαιτίας των ιδιαίτερων ιδιοτήτων του στο κρίσιμο σημείο και κυρίως επειδή επιτρέπει την καλύτερη αντιστοίχιση της θερμοκρασίας του με αυτή της πηγής θερμότητας στην υπερκρίσιμη περιοχή.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας λοιπόν είναι η μελέτη και βελτιστοποίηση των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εργαζόμενο ρευστό το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) για πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας. Ως εργαλείο αξιολόγησής τους χρησιμοποιήθηκε ο συνολικός θερμικός και εξεργειακός βαθμός απόδοσής τους. Παράλληλα, λήφθηκαν υπ' όψιν τεχνικές παράμετροι, όπως οι στροφές λειτουργίας του στροβίλου  $n$ , το VFR και το UA για κάθε εναλλάκτη θερμότητας (θερμαντήρα/ατμοποιητή, αναγεννητή, συμπυκνωτή/ψύκτη). Τα τελικά συμπεράσματα προκύπτουν από τη συγκριτική επισκόπηση των αποτελεσμάτων των ανωτέρω εργαλείων.

# 1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CCU).

Οι προσπάθειες της τεχνολογίας χρησιμοποίησης του διοξειδίου του άνθρακα επικεντρώνονται σε μια άλλη προσέγγιση για την μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>: την ανάπτυξη επωφελών χρήσεων για το CO<sub>2</sub> σε περιοχές που δεν ενδείκνυται η γεωλογική αποθήκευσή του. Οι εναλλακτικές αυτές εφαρμογές στοχεύουν είτε στο να χρησιμοποιήσουν το δεσμευμένο CO<sub>2</sub>, είτε να το μετατρέψουν σε χρήσιμα προϊόντα όπως καύσιμα, τσιμέντο ή πλαστικό και θα μπορούσαν να αποφέρουν σημαντικά οφέλη. Η χρησιμοποίηση του διοξειδίου του άνθρακα ως εργαζόμενο ρευστό ή ως πρώτη ύλη σε χημικές διεργασίες και σε βιοτεχνολογικές εφαρμογές έχει τη δυναμική να αποτελέσει ουσιαστική λύση στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, όταν συνδυάζεται με την ανάπτυξη καινοτόμων και δυναμικά εφικτών τεχνολογιών οι οποίες είναι λιγότερο ενεργοβόρες και σχετίζονται με μειωμένη κατανάλωση πρώτων υλών και την ικανότητα προσωρινής ή ακόμη και μόνιμης αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα

## 1.1 Ορισμοί

Ο ορισμός της επαναχρησιμοποίησης CO<sub>2</sub> που χρησιμοποιείται για την παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως εξής:

*Οποιαδήποτε πρακτική εφαρμογή του δεσμευμένου, συμπυκνωμένου CO<sub>2</sub> που προσθέτει αξία (όπως η παραγωγή εσόδων, ή περιβαλλοντικό όφελος), και η οποία μπορεί εν μέρει να αντισταθμίσει το κόστος της δέσμευσης CO<sub>2</sub>, ως μεταβατικό μέτρο για να βοηθήσει την ταχύτερη υιοθέτηση της CCS.*

Ο ορισμός αυτός μπορεί να περιγραφεί καλύτερα ως μια δήλωση για το τι θα αποτελούσε «ιδανική» τεχνολογία επαναχρησιμοποίησης CO<sub>2</sub>. Ως δεύτερος ευρύτερος ορισμός της επαναχρησιμοποίησης CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται εναλλακτικά και ο εξής:

*Οποιαδήποτε πρακτική εφαρμογή του συλληφθέντος, συμπυκνωμένου CO<sub>2</sub> που προσθέτει οικονομικά (π.χ. δημιουργία εσόδων) ή παρέχει περιβαλλοντικά, κοινωνικά ή άλλα οφέλη [8].*

## 1.2 Κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών CCU

Το ομολογουμένως εκτεταμένο φάσμα των CCU εφαρμογών μπορεί σε πρώτη φάση να ταξινομηθεί με βάση τις διαφοροποιήσεις που εμφανίζουν στον λειτουργικό

και όχι στον τεχνολογικό χαρακτήρα τους. Αντίστοιχη προσέγγιση χρησιμοποίησαν οι ερευνητές του Ecofys and Carbon Counts (Ecofys and Carbon Counts Summary, 2013). Η συνήθης κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών χρησιμοποίησης του διοξειδίου του άνθρακα βασίζεται στη χρησιμοποίηση του είτε για τον μετασχηματισμό της χημικής σύστασης του διοξειδίου του άνθρακα είτε όχι, και τα αποτελέσματά της είναι τα εξής:

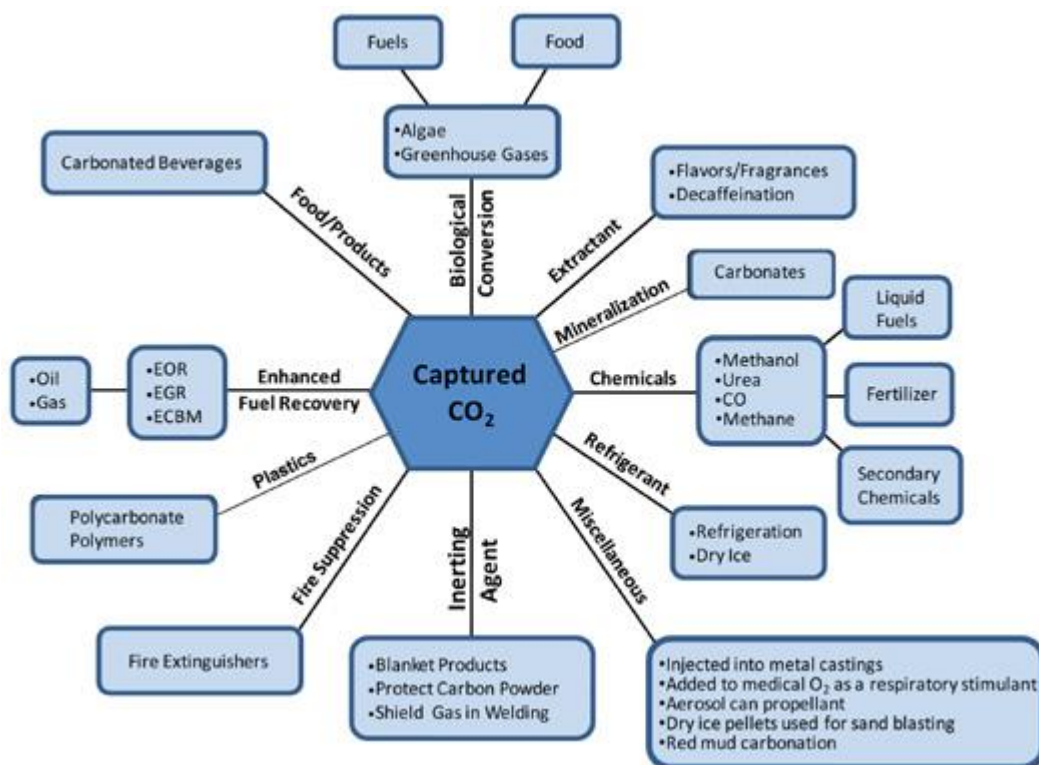
1. Τεχνολογίες μετασχηματισμού του CO<sub>2</sub>:

- 1) παραγωγή υλικών (ουρία, πολυμερή, καρβαμικά, ανθρακικά άλατα)
- 2) παραγωγή ενέργειας (καύσιμα, συνθετικό αέριο/ μεθάνιο, μυρμηκικό οξύ, ανανεώσιμη μεθανόλη)

2. Τεχνολογίες μη μετασχηματισμού του CO<sub>2</sub>:

- 1) χρήση ως διαλύτης (ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου, φυσικού αερίου και μεθανίου από κοιτάσματα άνθρακα)
- 2) χρήση ως εργαζόμενο ρευστό ( γεωθερμικά συστήματα EGS, κύκλων ισχύος υπερκρίσιμου CO<sub>2</sub>)

Το κάτωθι σχήμα απεικονίζει τις περισσότερες από τις τρέχουσες και πιθανές χρήσεις του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα (Εικόνα 2). Πάντως, πολλές από τις παρακάτω χρήσεις είναι μικρής κλίμακας και συνήθως εκπέμπουν το διοξείδιο του άνθρακα πίσω στην ατμόσφαιρα μετά την χρήση, με αποτέλεσμα τη μη μείωση των συνολικών εκπομπών του CO<sub>2</sub> [9].



Εικόνα 2: Τρέχουσες και πιθανές χρήσεις του CO<sub>2</sub> [9]

Αξίζει σε αυτό το σημείο να αναφερθώ σε ορισμένες από τις πιο σημαντικές και υποσχόμενες CCU τεχνολογίες, ακολουθώντας την παραπάνω κατηγοριοποίηση. Εξαιρείται η χρήση του διοξειδίου του άνθρακα ως εργαζόμενο ρευστό σε κύκλους ισχύος, διότι αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

## 1.2.1 Τεχνολογίες μετασχηματισμού του CO<sub>2</sub>

### 1.2.1.1 CO<sub>2</sub> ως πρώτη ύλη για τη βελτιστοποίηση παραγωγής ουρίας

Η ουρία αντιπροσωπεύει σχεδόν το 50% της παραγωγής αζωτούχων λιπασμάτων παγκοσμίως και παράγεται από την αντίδραση αμμωνίας και διοξειδίου του άνθρακα σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Κανονικά, το CO<sub>2</sub> προέρχεται από την επεξεργασία φυσικού αερίου (ή παρόμοιας πρώτης ύλης) για την παραγωγή αμμωνίας. Σε αυτή την περίπτωση, οι απαραίτητες ποσότητες CO<sub>2</sub> παράγονται και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται εντός της ίδιας βιομηχανικής διεργασίας (“captive” use). Ωστόσο, όταν το φυσικό αέριο είναι η πρώτη ύλη για την παραγωγή ουρίας, υπάρχει συνήθως ένα μικρό πλεόνασμα αμμωνίας (περίπου 5 έως 10%), η οποία θα μπορούσε να αντιδράσει με εξωτερικά παρεχόμενο (non-captive)

CO<sub>2</sub> για την παραγωγή επιπλέον ουρίας. Το προϊόν της παραπάνω αντίδρασης έχει τη μορφή κοκκοποιημένου στερεού το οποίο, μόλις εφαρμοστεί σε γεωργική γη, αντιδρά με το νερό απελευθερώνοντας αέριο CO<sub>2</sub> και αμμωνία. Το CO<sub>2</sub> προφανώς επιστρέφει στην ατμόσφαιρα και η αμμωνία αποσυντίθεται περαιτέρω προμηθεύοντας άζωτο στις καλλιέργειες. Χρήσιμες πληροφορίες παρέχουν οι Pérez-Fortes, Bocin-Dumitriu και Τζίμας, οι οποίοι ασχολήθηκαν με τη συγκριτική μελέτη της σύνθεσης της ουρίας και της παραγωγής μεθανόλης. Με τη μοντελοποίηση ροής της εκάστοτε διεργασίας ανέλυσαν τις τεχνολογικές επιδόσεις τους, με στόχο να θέσουν ένα κοινό πλαίσιο αξιολόγησης και σύγκρισης των μεθόδων CCUS, το οποίο μπορεί να επεκταθεί πέραν των δύο περιπτώσεων που ανέλυσαν στη συγκεκριμένη μελέτη [14].

Εναλλακτικά, η ουρία μπορεί με κατάλληλη επεξεργασία να μετατραπεί σε διάλυμα εναμμωνίας νιτρικής ουρίας (UAN), ένα σύνηθες υγρό λίπασμα. Συστήματα ανασύνθεσης καυσαερίων για τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα έχουν ενσωματωθεί σε αρκετά εργοστάσια παραγωγής ουρίας, ιδιαίτερα από την Mitsubishi Heavy Industries [5] [15]. Η τεχνολογία μπορεί να θεωρηθεί ώριμη, καθώς χρησιμοποιείται τα τελευταία 40 χρόνια.

### **1.2.1.2 CO<sub>2</sub> ως πρώτη ύλη για τη σύνθεση πολυμερών**

Το CO<sub>2</sub> μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη σύνθεση μιας σειράς ενδιάμεσων προϊόντων για χρήση στην χημική και φαρμακευτική παραγωγή. Η χημική βιομηχανία σήμερα βασίζεται σε ενδιάμεσα προϊόντα που προέρχονται από πετροχημικές πηγές, με ένα μικρό ποσοστό να προέρχεται από φυσικά προϊόντα. Είναι μια κατηγορία που εμπεριέχει πολλές υποσχόμενες τεχνολογίες σχετικές με την επαναχρησιμοποίηση του διοξειδίου του άνθρακα, όπως η δημιουργία πολυμερών (π.χ. πολυκαρβονικών), ανθρακικού νατρίου. Η σημασία του ενδιάμεσου σχηματισμού θα γίνεται ολοένα και πιο σαφής όταν τα ορυκτά καύσιμα εξαντληθούν περαιτέρω. Η παραγωγή ενδιάμεσων προϊόντων από το CO<sub>2</sub> θα βασιστεί στις υπάρχουσες χημείες, αλλά αναγνωρίζεται επίσης ότι οι νέες, αποδοτικές χημείες C11 θα πρέπει να αναπτυχθούν.[7], [6],[20]. Οι μέθοδοι μετατροπής απαιτούν τη χρήση των καταλυτών, θερμότητα ή/και πίεση για να σπάσουν τη σταθερή δομή του CO<sub>2</sub>, και περιλαμβάνουν τις διαδικασίες φωτοκατάλυσης ή ηλεκτροχημικής αναγωγής, όπως μελέτησαν οι Aresta, M & Dibenedetto(2007)[21]. Η εταιρεία Novomer παρέχει μια νέα προσέγγιση για την επεξεργασία πολυμερών, καθώς συνδυάζει τις παραδοσιακές πρώτες ύλες με CO<sub>2</sub> για να συνθέσει πολυμερή και χημικές ουσίες

υψηλής αξίας. Η τεχνολογία μετατρέπει το διοξείδιο του άνθρακα σε πολυανθρακικά πολυμερή όπως ανθρακικό πολυπροπυλένιο και ανθρακικό πολυαιθυλένιο, χρησιμοποιώντας έναν καταλύτη με βάση τον ψευδάργυρο. Οι χημικές ουσίες και τα υλικά που παράγονται να περιέχουν έως 50 % διοξείδιο του άνθρακα ή μονοξείδιο του άνθρακα και βρίσκουν εφαρμογή σε πλήθος καθημερινών χρήσεων [22].

### 1.2.1.3 CO<sub>2</sub> στην καλλιέργεια φυκιών

Τα συστήματα μικροφυκών για την παγίδευση του διοξειδίου του άνθρακα και την παραγωγή χημικών προϊόντων είναι ένας αναδυόμενος και πολλά υποσχόμενος τομέας για βιομηχανική εφαρμογή. Αρκετές τεχνολογίες εφαρμόστηκαν ως επί το πλείστον στις βιομηχανίες τροφίμων και ζωοτροφών, παράγοντας χρωστικές και πρόσθετα, όπως επίσης και στις βιομηχανίες καλλυντικών. Παρόλο που η αρχική έρευνα αναπτύχθηκε για περισσότερα από 50 χρόνια, τα συστήματα αυτά έχουν ωφέλιμο αποτέλεσμα τα τελευταία 20 χρόνια στη βιομηχανική σύνθεση μορίων υψηλής αξίας και την παραγωγή βασικών προϊόντων και βιοκαυσίμων σύμφωνα με τον van Beilen [23]. Τα συστήματα μικροφυκών θεωρούνται μια επιθυμητή πηγή ανανεώσιμης ενέργειας, η οποία μπορεί να συσχετιστεί με την μείωση του διοξειδίου του άνθρακα και με τη λιγότερο επιθετική χρήση μη γεωργικής γης. Βιομηχανικές επιχειρήσεις και ακαδημαϊκές ομάδες ανέφεραν ότι τα κύρια εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν σχετίζονται με την παροχή φωτός, τα οικονομικά μέσα καλλιέργειας, τις πηγές διοξειδίου του άνθρακα, τη διαμόρφωση του αντιδραστήρα και την συλλογή των μικροφυκών. [7]

Καθώς το κόστος των μέσων καλλιέργειας είναι ένας περιοριστικός παράγοντας για την εμπορευματοποίηση της παραγωγής βιομάζας από μικροφύκια και η απαίτηση για νερό είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα στην παραγωγή βιοκαυσίμων, είναι επιθυμητή η χρήση υγρών βιομηχανικών αποβλήτων για τα συστήματα μικροφυκών. Ταυτόχρονα, είναι δυνατή για αυτό το σκοπό και η χρήση βιομηχανικών καυσαερίων. Η καθαρότητα και η υψηλή θερμοκρασία σταθερών βιομηχανικών εκπομπών μπορούν να αποτρέψουν την εμφάνιση βιολογικών διαδικασιών και οι οποίες σχετίζονται με την παρουσία άλλων αερίων που αναστέλλουν την κυτταρική ανάπτυξη των μικροφυκών. Η εργασία των Jacob-Lopes και Teixeira-Franco [24] αναδεικνύει ένα βιώσιμο τρόπο σύνδεσης των λυμάτων και ενός αερίου εκροής ενός διωλιστηρίου πετρελαίου για την καλλιέργεια μικροφυκών.

Επί του παρόντος υπάρχει σημαντικό ενδιαφέρον για το δυναμικό των φυκιών για την παραγωγή πετρελαίου (ως επί το πλείστον με σκοπό την υποκατάσταση

υγρών καυσίμων) σε μια τιμή που είναι ανταγωνιστική με αργό πετρέλαιο. Η παραγόμενη βιομάζα μπορεί να υποστεί επεξεργασία με αντίστοιχο οικονομικό όφελος, ανάλογα με το επιθυμητό προϊόν εξόδου. Συνήθως, το φυσικό έλαιο που παράγεται ως υποπροϊόν ζητείται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοντίζελ, προϊόντα διατροφής, φαρμακευτικά προϊόντα διατροφής ή άλλες χημικές ουσίες που συμμετέχουν στην παραγωγή ευρέος φάσματος άλλων προϊόντων[8].

#### **1.2.1.4 CO<sub>2</sub> για χρήση σε ενανθράκωση ορυκτών**

Μια ακόμη αναγνωρισμένη επιλογή επαναχρησιμοποίησης του διοξειδίου του άνθρακα (Styring, 2011) είναι η επιταχυνόμενη ορυκτοποίηση μέσω ανθρακοποίησης πετρωμάτων, περιλαμβάνει την αντίδραση ορυκτών (κυρίως πυριτικά άλατα ασβεστίου ή μαγνησίου) με διοξείδιο του άνθρακα, ενώ το τελικό προϊόν είναι αδρανή ανθρακικά άλατα τα οποία αποτελούν εξαιρετικά οικοδομικά υλικά- πυριτικά άλατα. Το διοξείδιο του άνθρακα αποθηκεύεται μόνιμα με ταυτόχρονη παραγωγή θερμότητας και ως εκ τούτου δεν απαιτείται περαιτέρω ενέργεια καθώς η ενεργειακή κατάσταση του μαγνησίου και του ασβεστίου είναι χαμηλότερη του CO<sub>2</sub>. Ωστόσο υπάρχει ένα μειονέκτημα, ο αργός ρυθμός ενανθράκωσης προκειμένου να επιτευχθεί μια βιώσιμη διαδικασία ενανθράκωσης σε βιομηχανική κλίμακα. Επιπλέον, μπορεί να εφαρμοστεί και μηχανική επεξεργασία του ορυκτού προκειμένου να ενισχυθούν οι ρυθμοί αντίδρασης των χημικών διαδικασιών. Ωστόσο, αυτές οι επεξεργασίες είναι πολύ ακριβές, το ενεργειακό κόστος είναι μεγάλο και αυξάνονται οι περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις.

Η βασική ιδέα αυτών των τεχνολογιών βασίζεται στην ιδιότητα ορισμένων ορυκτών να διαβρώνονται εσπευσμένα, όταν έρθουν σε επαφή με το διοξείδιο του άνθρακα. Η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα σε ανθρακικά άλατα μπορεί να επιτευχθεί μέσω διαφόρων οδών της διαδικασίας και κυμαίνονται από τη πιο βασική επιταχυνόμενη διάβρωση των ασβεστόλιθων μέχρι πιο προηγμένες πολύπλοκες διαδικασίες. Υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι για την ενανθράκωση ορυκτών, ήτοι η απευθείας διαδρομή και η έμμεση διαδρομή.

Η άμεση δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα (direct carbonation) είναι η απλούστερη προσέγγιση για την ενανθράκωση των ορυκτών και η κύρια προσέγγιση είναι ότι μια κατάλληλη πρώτη ύλη, π.χ. σερπεντίνη ή στερεά πλούσια σε υπολείμματα ασβεστίου και μαγνησίου, ενανθρακώνεται σε ένα μοναδικό στάδιο της διαδικασίας.



Έμμεση ενανθράκωση σημαίνει ότι το αντιδραστικό συστατικό (συνήθως Mg ή Ca) σε πρώτο στάδιο εξάγεται από την πρώτη ύλη (όπως οξείδιο ή υδροξείδιο) και, στη συνέχεια, σε ένα άλλο βήμα, αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα για να σχηματίσουν τα επιθυμητά ανθρακικά άλατα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, που κατά κανόνα συνεπάγεται οικοδομικά υλικά, όπως παραγωγή τσιμέντου, σκλήρυνση σκυροδέματος μέσω CO<sub>2</sub>, ενανθράκωση υπολειμμάτων βωξίτη και ανθρακική ανοργανοποίηση ή σε εξειδικευμένες περιστάσεις σταθεροποίηση σωρών απορριμμάτων [8].

Ειδική μνεία γίνεται στην σκλήρυνση σκυροδέματος με CO<sub>2</sub>, , διότι το σκυρόδεμα αποτελεί το βασικό δομικό υλικό της πλειοψηφίας των κατασκευαστικών έργων στην Ελλάδα. Στοχεύει στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> από αυτή του συμβατικού τσιμέντου Portland. Τεχνολογίες όπως η διαδικασία Calera [25], παράγουν πρώτες ύλες προσανατολισμένες σ' αυτήν την κατεύθυνση[26]. Υψηλής τεχνολογίας επιχειρήσεις, όπως Novacem (Λονδίνο)[27], TecEco (Αυστραλία)[28], C-Fix (Ολλανδία) και Calix (Αυστραλία) είναι νέες αναδυόμενες ανταγωνιστικές επιχειρήσεις που εστιάζουν στην παραγωγή τσιμέντου εξαλείφοντας ή περιορίζοντας τις εκπομπές CO<sub>2</sub> συγκριτικά με την κατασκευή του συμβατικού τσιμέντου Portland ή/και με απορρόφηση του CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα κατά την διάρκεια της διαδικασίας σκλήρυνσης. Ωστόσο, η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο και δεν μπορεί να ανταγωνιστεί τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής τσιμέντου. Επιπλέον, η έρευνα δείχνει ότι με τις τρέχουσες δαπάνες της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, η τεχνολογία δεν αποφέρει κέρδος[8].

#### **1.2.1.5 CO<sub>2</sub> ως πρώτη ύλη για την παραγωγή υγρών καυσίμων**

Το CO<sub>2</sub> είναι ένα άμεσο προϊόν από την καύση του καυσίμου, έτσι πρέπει να μετατραπεί σε μια υψηλότερη μορφή ενέργειας, αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί εκ νέου ως ένα συνθετικό υγρό καύσιμο. Επομένως, συνθετικά προϊόντα των καυσίμων από το CO<sub>2</sub> θα πρέπει να θεωρηθούν ως φορείς ενέργειας ή αποθηκευτικοί χώροι ενέργειας, χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με τοπική προσωρινή αποθήκευση του CO<sub>2</sub>. Το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή υγρών συνθετικών καυσίμων υπερβαίνει το ανακτήσιμο ενέργειας, ωστόσο, είναι ένας τρόπος για την αποθήκευση πλεονάζουσας ενέργειας σε μια πιο χρησιμοποιήσιμη μορφή. Η γενική κατηγορία των αντιδράσεων είναι γνωστές ως αντιδράσεις αναμόρφωσης και περιλαμβάνουν υδρογονάνθρακες, αντιδράσεις αναμόρφωσης του άνθρακα και αντιδράσεις μεταρρύθμισης του υδρογόνου (υδρογόνωση). Οι

τεχνολογίες αυτές παρέχουν ένα νέο μέσο για την εύρεση νέων τύπων ενεργειακών φορέων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα εξής: ανανεώσιμη μεθανόλη, formic acid, μέθοδοι φωτοκατάλυσης, για επικείμενη χρήση βιοκαυσίμων και καταλύτες νανοϋλικών.

Ένα σημαντικό ενδιάμεσο προϊόν των χημικών βιομηχανιών είναι το αέριο σύνθεσης (μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο, επίσης γνωστή ως αέριο σύνθεσης), το οποίο μπορεί να διαχωριστεί ή να χρησιμοποιηθεί απευθείας στην σύνθεση των καυσίμων υδρογονανθράκων. Ενδεικτικά αναφέρουμε την εργασία των Torrente -Murciano, Mattia, Jones και Plucinski, οι οποίοι μελέτησαν τις θεωρητικές βέλτιστες συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας σύνθεσης υδρογονανθράκων μέσω διάσπασης του CO<sub>2</sub> και της διεργασίας Fischer-Tropsch (FT)[29].

## 1.2.2 Τεχνολογίες μη μετασχηματισμού του CO<sub>2</sub>

### 1.2.2.1 CO<sub>2</sub> για χρήση σε βελτιωμένη άντληση υδρογονανθράκων

Η συγκεκριμένη ομάδα τεχνολογιών περιλαμβάνει τη χρήση του διοξειδίου του άνθρακα ως διαλύτη προκειμένου να αυξηθεί η εξόρυξη υδρογονανθράκων από το υπέδαφος. Τέτοιες τεχνολογίες είναι οι παρακάτω: Η τεχνολογία βελτιωμένης άντλησης πετρελαίου (EOR), ενισχυμένη άντληση φυσικού αερίου (EGR) και μεθανίου από κοιτάσματα άνθρακα (ECBM).

Η βελτιωμένη άντληση πετρελαίου (**Enhanced Oil Recovery-EOR**) είναι η μέθοδος με την οποία εγχέεται συμπιεσμένο CO<sub>2</sub> σε δυσπρόσιτα αποθέματα πετρελαίου που δεν ανακτώνται από την πρωτογενή παραγωγή ή την κατάκλυση με νερό. Η μέθοδος EOR αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στη δεκαετία του 1970 και πλέον θεωρείται μία εμπορικώς «ώριμη» τεχνολογία. Εδώ, το CO<sub>2</sub> ενεργεί ως διαλύτης, μειώνοντας το ιξώδες του πετρελαίου (υπερχείλιση με αναμίξιμο CO<sub>2</sub>), ενώ διαχωρίζεται από το πετρέλαιο στην επιφάνεια και δύναται να επανεγχυθεί. Επίσης, μετά το πέρας της διαδικασίας, μεγάλες ποσότητες του CO<sub>2</sub> μπορούν να αποθηκευτούν στις θέσεις των κοιτασμάτων. Με όμοιο τρόπο λειτουργεί και η EGR με την μόνη διαφορά ότι βασίζεται στην φυσική μετατόπιση του φυσικού αερίου προς τα πάνω, καθώς είναι ελαφρύτερο από το διοξείδιο του άνθρακα

Η επιλογή αυτής της μεθόδου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε κοιτάσματος (π.χ. μέγεθος, πίεση, θερμοκρασία, κλπ), καθιστώντας την κατά περίπτωση οικονομικά ασύμφορη. Οι Azzolina, Nakles, Gorecki, Peck, Ayash, Melzer και Chatterjee, ανέλυσαν μια βάση δεδομένων από 31

υφιστάμενα έργα EOR και παρείχαν χρήσιμες στατιστικές πληροφορίες για την εκτίμηση αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> σε επιχειρήσεις EOR [8]. Επίσης, οι Gupta, Paul, Cumming, Place και Mannes παρουσίασαν τα αποτελέσματα δεκαετούς έρευνας δέσμευσης και αποθήκευσης CO<sub>2</sub> που έλαβε χώρα σε 9 πολιτείες των ΗΠΑ, καθώς και μίας μεγάλης κλίμακας δοκιμής της μεθόδου EOR[11]. Έμφαση στη μοντελοποίηση των αποτελεσμάτων των ερευνών τους και στον καθορισμό κριτηρίων για την ορθότερη επιλογή των κοιτασμάτων στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί η παραπάνω μέθοδος έδωσαν οι D.F. Zhao, X.W. Liao, D.D. Yin , οι οποίοι μελέτησαν τα κοιτάσματα του Yanchang στην Κίνα[12]. Οι John Frederick D. Tapia, Judi-Yuan Lee, Raymond E.H. Ooi, Dominic C.Y. Food εργάστηκαν για την κατασκευή ενός μοντέλου κατανομής που θα βοηθούσε στην εκτίμηση του οικονομικού οφέλους ενός έργου EOR και γεωλογικής αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>, με μεταβλητές όπως ο ρυθμός ροής του ρευστού[13]. Ωστόσο, για το βαρύ αργό πετρέλαιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η υπερχείλιση με μη αναμίξιμο CO<sub>2</sub>, μηχανισμός ανάκτησης πετρελαίου ο οποίος συνδέεται περισσότερο με βαρυτική μετατόπιση.

Η βελτιωμένη άντληση πετρελαίου CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>-EOR) έχει αναδειχθεί ως μια σημαντική επιλογή για την παραγωγική αξιοποίηση των εκπομπών CO<sub>2</sub> που έχει δεσμευθεί από ηλεκτρική ενέργεια και άλλα βιομηχανικά εργοστάσια. Τα κοιτάσματα πετρελαίου μπορούν να παρέχουν όχι μόνο ασφαλείς τοποθεσίες για την αποθήκευση του CO<sub>2</sub> (CCS), αλλά μπορούν επίσης να παρέχουν έσοδα για να αντισταθμιστεί το κόστος της δέσμευσης του CO<sub>2</sub>. Αν και η χρησιμοποίηση των συλληφθέντων εκπομπών CO<sub>2</sub> για αύξηση της άντλησης πετρελαίου βρίσκεται σε εξέλιξη εδώ και αρκετό καιρό, η περαιτέρω πρόοδος στην τεχνολογία CO<sub>2</sub>-EOR θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά την εφαρμοσιμότητα της τεχνολογίας ως γεννήτορα εσόδων για τη δέσμευση CO<sub>2</sub> και μεγάλης κλίμακας επιλογή αποθήκευσης CO<sub>2</sub>. Με την εφαρμογή της «επόμενης γενιάς» CO<sub>2</sub>-EOR τεχνολογίες σε γεωλογικά ευνοϊκές συνθήκες, ο όγκος του CO<sub>2</sub> που αποθηκεύεται μπορεί να υπερβαίνει την περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> του παραγόμενου πετρελαίου.

#### **1.2.2.2 CO<sub>2</sub> ως ρευστό εργασίας για βελτιωμένα γεωθερμικά συστήματα (EGS)**

Τα βελτιωμένα γεωθερμικά συστήματα (Enhanced Geothermal Systems-EGS), επίσης γνωστά ως θερμά διασπασμένα πετρώματα (Hot Fractures Rocks - HFR) ή θερμά ξηρά πετρώματα (Hot Dry Rocks - HDR), αποτελούν μια νέα γεωθερμική τεχνολογία με την οποία υπόγεια θερμά πετρώματα ακατάλληλα για παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας μετατρέπονται σε κατάλληλα. Η απαίτηση για σημαντικό

μηχανικό έργο πριν από την εξαγωγή θερμότητας διαχωρίζει τη διεργασία EGS από συμβατικές γεωθερμικές εφαρμογές. Επί του παρόντος εξετάζεται μια νέα προσέγγιση πάνω στην ιδέα αυτή, σύμφωνα με την οποία υπερκρίσιμο CO<sub>2</sub> κυκλοφορεί ως ρευστό εναλλαγής θερμότητας (ή εργαζόμενο ρευστό) αντί του νερού ή ρευστού χαμηλού σημείου τήξης (πχ. άλμη) για να εξάγει τη γεωθερμική θερμότητα από το κοίτασμα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως ρευστό εργασίας του κύκλου ισχύος σε ένα υπερκρίσιμο CO<sub>2</sub> στρόβιλο. Πρωτοπόρος αυτής της μεθόδου υπήρξε ο D. W. Brown το 2000, ο οποίος επιχειρηματολογεί υπέρ της χρήσης υπερκρίσιμου CO<sub>2</sub> αντί για νερό επισημαίνοντας τρία βασικά σημεία υπεροχής του CO<sub>2</sub> και θέτοντας τις βάσεις για περαιτέρω έρευνα [16]. Έως τώρα οι μελέτες συνεχίζονται για τη βελτίωση αυτής της ιδέας, αναφέροντας ενδεικτικά αυτές των Pruess (2006) και των J. Biagi, R. Agarwal, Z. Zhang (2015) [17],[18].

Μετά την παρουσίαση των διαφορετικών εφαρμογών, προκύπτουν εύλογα ερωτήματα σχετικά με τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματά τους, που αποτελούν ευρύ αντικείμενο μελέτης που ξεπερνά τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Ενδεικτικά αναφέρω την πρόσφατη εργασία των Cuellar-Franca και Azaragic, η οποία παρουσιάζει μια πρώτη συγκριτική ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τεχνολογιών της δέσμησης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (CCS) και δέσμησης και επαναχρησιμοποίησης του (CCU), λαμβάνοντας υπ' όψιν 27 προγενέστερες μελέτες[30].

### 1.3 Η Ευρωπαϊκή πολιτική για τις τεχνολογίες CCU

Η Ευρωπαϊκή Ένωση πλέον επιδιώκει την ανάπτυξη και την δημιουργία ενός «χαρτοφυλακίου» ενεργειακών τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες μπορούν να αποδεσμεύσουν την ευρωπαϊκή οικονομία από την εξάρτηση της σε υδρογονάνθρακες, όπως συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (**Renewable Energy Systems - RES**), ενεργειακή αποδοτικότητα και δέσμηση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα (**Carbon Capture & Storage - CCS**). Ειδικά η CCS έχει ιδιαίτερη σημασία δεδομένου ότι τα ορυκτά καύσιμα θα παραμείνουν ως βασικό καύσιμο βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα, οπότε προσωρινά η ατμόσφαιρα δεν θα επιβαρύνεται με τον ίδιο ρυθμό όπως παλαιότερα.

Αυτή η αλλαγή πολιτικής εκφράζεται με διάφορες δράσεις- πρωτοβουλίες της Ευρωπαϊκής ένωσης. Ήδη από το 2008 η Ευρωπαϊκή Ένωση υιοθέτησε το **European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan)**, το οποίο ενθαρρύνει την

επιταχυνόμενη ανάπτυξη και εγκατάσταση τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Τον Ιούλιο του 2009, ανακοινώθηκε η προοπτική της να μειώσει τις εκπομπές αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου (Green House Gas - GHG) έως και 80% κάτω από τα επίπεδα του 1990, στόχος ο οποίος θα πρέπει να έχει επιτευχθεί έως το 2050. Τον Οκτώβριο του 2009, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο δέσμευσε την ευρωπαϊκή οικονομία στην πορεία για την επίτευξη του σκοπού μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, οπότε και αποτελεί βασικό άξονα της ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής. Μια άλλη κίνηση αποτελεί το **EU Roadmap 2050** [9], το οποίο βασίζεται σε ένα μεγάλο αριθμό σεναρίων αποδέσμευσης από τον άνθρακα και προτείνει αποτελεσματικούς και οικονομικά αποδοτικούς τρόπους μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου για διάφορους παραγωγικούς τομείς ανάλογα με το εκάστοτε τεχνολογικό και οικονομικό δυναμικό. Ανάμεσα σε αυτούς τους τομείς, ο τομέας της ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει τις μεγαλύτερες δυνατότητες βελτίωσης, με τη CCS να μπορεί να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο σε αυτή την κατεύθυνση. Άλλα μέτρα με αυτόν τον προσανατολισμό περιλαμβάνονται στην **Directive 2009/31/EC (CCS Directive)**[5] και στο **EU Emissions Trading System (EU-ETS)** (Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών E.E). Το επερχόμενο ευρωπαϊκό πρόγραμμα EU Framework Program for Research and Innovation (**Horizon 2020**) [10] προωθεί την ανάπτυξη τεχνολογιών μεγάλης κλίμακας επαναχρησιμοποίησης του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα προκειμένου να επιτευχθεί μείωση των αερίων θερμοκηπίου και την προώθηση της καινοτομίας.

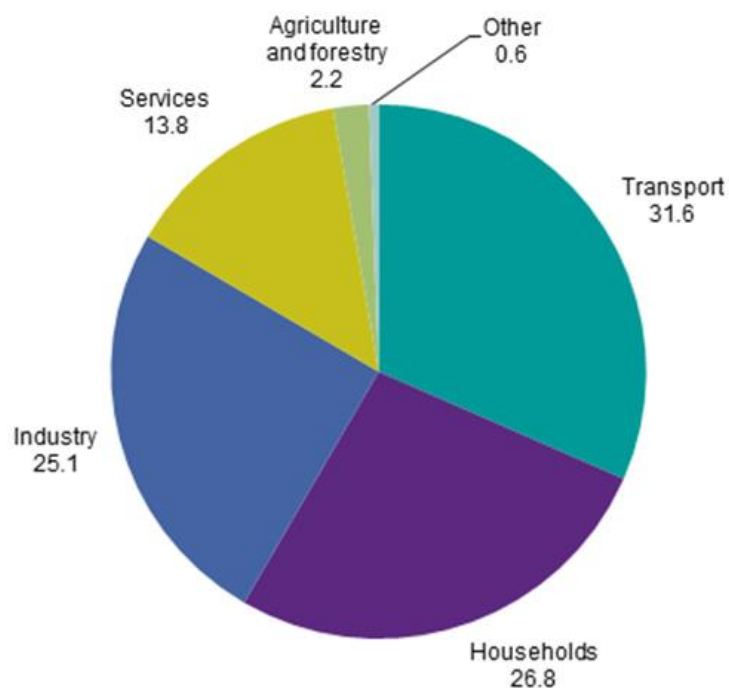
Ως εκ τούτου, υπάρχει η ανάγκη για λεπτομερή ενημέρωση επί των δυνατοτήτων χρήσης του διοξειδίου του άνθρακα που έχουν την δυνατότητα να δώσουν μια σημαντική, καθαρή μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε βαθμό επαρκή για να κάνει μια σημαντική συμβολή στους ευρωπαϊκούς στόχους για το κλίμα. Απαιτείται η εκτίμηση των επιπτώσεων των διαφορετικών επιλογών επαναχρησιμοποίησης του διοξειδίου του άνθρακα στο ευρωπαϊκό ενεργειακό σύστημα, καθώς και η ανάπτυξη μια σταθερής αγοράς των προϊόντων τους, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη το ενεργειακό ισοζύγιο, την σχέση κόστους - αποτελεσματικότητας, τον προϋπολογισμό του διοξειδίου του άνθρακα και την διαθεσιμότητα του υδρογόνου (όπου εφαρμόζεται)[7].

## **2 Το διοξείδιο του άνθρακα ως εργαζόμενο ρευστό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας**

### **2.1 Πηγές θερμότητας χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας και θερμοδυναμικοί κύκλοι**

Η αναζήτηση νέων πηγών θερμότητας, καθώς και μεθόδων βελτίωσης των ήδη υπαρχόντων ενεργειακών συστημάτων καθίσταται σήμερα αναγκαία. Η ανάκτηση θερμότητας, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία και η βιομάζα έχουν αναδειχθεί ως εναλλακτικές πηγές θερμότητας. Παράλληλα, σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς και στα καυσάερια από τις βιομηχανίες και τα αυτοκίνητα δύναται να δοθεί ο χαρακτηρισμός πηγών θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, αφού η διαθέσιμη θερμοκρασία είναι σαφώς μικρότερη αυτής των ορυκτών καυσίμων[31].

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάκτηση θερμότητας στην βιομηχανία, καθώς η ενεργειακή κατανάλωση στον βιομηχανικό τομέα αποτελεί το 25% της συνολικής παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας (Εικόνα 3). Βιομηχανικές διεργασίες, όπως διύλιση πετρελαίου και φυσικού αερίου, παραγωγή πετροχημικών, χημικών, μεταλλικών και χαλύβδινων προϊόντων, δημιουργία γυαλιού, τσιμέντου, ασβέστη και χαρτιού, είναι κύριες πηγές απορριπτόμενης θερμότητας. Σε γενικές γραμμές, απορριπτόμενη θερμότητα του θερμοκρασιακού εύρους 300-400 °C εντοπίζεται στις βιομηχανίες γυαλιού, χάλυβα και τσιμέντου, αλλά και στις διαδικασίες επεξεργασίας κεραμικών και μη σιδηρούχων μετάλλων. Απορριπτόμενη θερμότητα μέτριων θερμοκρασιών μπορούμε να βρούμε κατά την επεξεργασία τροφίμων χημικών, καθώς και κατά την διύλιση και την οικοδόμηση. Πρακτικά, απορριπτόμενη θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας μπορούμε να βρούμε σε όλα τα επίπεδα της βιομηχανίας. Επομένως, η ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας αντιπροσωπεύει την μεγαλύτερη ευκαιρία μείωσης της ενεργειακής απώλειας στην βιομηχανία, ενώ ταυτόχρονα μειώνει το αποτύπωμα άνθρακα και των αερίων θερμοκηπίου με παράλληλη βελτίωση του συνολικού βαθμού απόδοσης των συστημάτων[31].



Εικόνα 3: Κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με EU-28 (EU-2014)

Επομένως, η αξιοποίηση πηγών θερμότητας χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου καθώς και της απορριπτόμενης θερμότητας συμβάλλει καταλυτικά στην σταθεροποίηση του ενεργειακού περιβάλλοντος, αλλά και στην επίλυση καίριων ενεργειακών προβλημάτων. Η μετατροπή απορριπτόμενης θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια έχει μελετηθεί ευρέως μέσω διαφόρων θερμοδυναμικών κύκλων, όπως Kalina, Goswami Trilateral Flash, Organic Rankine Cycle (subcritical και supercritical), Brayton. Δύο από τις παραπάνω τεχνολογίες που έχουν διερευνηθεί συστηματικά είναι ο κύκλος Rankine και ο κύκλος Brayton.

Ο **οργανικός κύκλος Rankine (ORC)** χρησιμοποιεί ένα οργανικό μέσο με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το εργαζόμενο ρευστό θερμαίνεται σε κορεσμένο ατμό και στη συνέχεια εκτονώνεται σε μηχανή εκτόνωσης (στρόβιλος). Ένα βασικό πλεονέκτημα του ORC είναι το γεγονός ότι για κύρια οργανικά συστατικά δεν καθίσταται αναγκαία η υπερθέρμανση του εργαζόμενου ρευστού. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η αποφυγή διάβρωσης της εξόδου της τουρμπίνας από υγρασία και η βελτίωση του βαθμού απόδοσης του κύκλου. Ωστόσο, η αλλαγή φάσης των οργανικών ουσιών κατά την θέρμανση (evaporation) μπορεί να προκαλέσει το λεγόμενο “pinching”, δηλαδή την μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά

στα δυο ρεύματα του εναλλάκτη θερμότητας. Η ύπαρξη του pinchpoint προσδίδει μη αναστρεψιμότητα στον κύκλο, μειώνοντας τον βαθμό απόδοσης του κύκλου από θερμοδυναμική άποψη [32].

Ο κύκλος **Brayton** διέπει τις αρχές των αεριοστροβίλων. Το εργαζόμενο μέσο συμπιέζεται μέσω του συμπιεστή σε υψηλή πίεση, στην συνέχεια οδηγείται στον θάλαμο καύσης όπου θερμαίνεται. Ακολουθεί εκτόνωση στην αρχική πίεση στον στρόβιλο ,ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τον συμπιεστή και με μια γεννήτρια μέσω της ατράκτου. Τέλος, το ρευστό ψύχεται στην αρχική του κατάσταση με την χρήση ενός ψύκτη.

## 2.2 Σύγκριση των εργαζόμενων ρευστών

Η επιλογή του εργαζόμενου ρευστού διαδραματίζει θεμελιώδη ρόλο στην λειτουργία του κύκλου. Οι ιδιότητες των εργαζόμενων ρευστών έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση και στις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος, στο περιβάλλον και στην οικονομική βιωσιμότητα. Συγκεκριμένα, η κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση μπορεί να δείξει τον τρόπο λειτουργίας του κύκλου (transcritical ή υποκρίσιμος κύκλος), αλλά και την πιθανότητα συμπίκνωσης και το σύστημα λειτουργίας πίεσης. Ακόμη, η τιμή της  $C_p$  επηρεάζει την μορφή των θερμοκρασιακών προφίλ του εναλλάκτη θερμότητας. Ο ειδικός όγκος και η ειδική πυκνότητα ισχύος μπορούν να καθορίσουν τα μεγέθη των εξαρτημάτων του συστήματος για συγκεκριμένες εφαρμογές, ενώ η τιμή του  $dS/dT$  προσδιορίζει την δυνατότητα ύπαρξης υγρασίας στην έξοδο του στροβίλου. Παράλληλα, το εργαζόμενο ρευστό μπορεί να καθοριστεί από τη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας, τη θερμοκρασία ψυκτικού μέσου και άλλων κριτηρίων, όπως περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια. Σε βιβλιογραφικό επίπεδο, έχουν προταθεί περισσότερα από 50 εργαζόμενα μέσα, χωρίς ωστόσο κανένα ρευστό να συγκεντρώνει όλα τα κριτήρια. Ο παρακάτω πίνακας παραθέτει τις ιδιότητες τυπικών εργαζόμενων ρευστών που υπάρχουν στην βιβλιογραφία.

**Πίνακας 1: Ιδιότητες οργανικών μέσων[15]**

ΡΕΥΣΤΟ	No	$T_{crit}(^{\circ}C)$	$P_{crit}(Bar)$	Επίπεδο Ασφάλειας	ODP	GWP 100yr	$dS/dT$
Trifluoromethane	R23	26.29	48.3	A1	0	11700	-6.49
Difluoromethane	R32	78.26	57.8	A2	0	580	-4.33



2.2-Dichloro-1.1.1-Trifluoroethane	R123	183.83	36.6	B1	0.02	93	0.26
Pentafluoroethane	R123	66.17	36.2	A1	0	2800	-1.08
Hydroflorocarbon	R134a	101.1	40.7	A1	0	1300	-0.39
1.1.1-Trifluoroethane	R143a	72.86	37.6	A2	0	3900	-1.49
1.1-Difluoroethane	R152a	113.41	45.2	A2	0	140	-1.14
Octafluoropropane	R218	72.02	36.4	A1	0	7000	0.45
Propane	R290	369.8	42.47	A3	0	<10	-0.79
Zeotropicmixture	R407C	87.3	48.2	A1	0	1525	?
Azeotropicmixture	R500	102.1	41.7	A1	0.74	6310	?
Butane	R600	151.98	37.35	A3	0	3.3	1.03
Isobutane	R600a	134.7	36.4	A3	0	<10	1.03
Ammonia	R717	132.89	112.8	B2	0	0	-10.48
Water	R718	373.89	22.1	A1	0	0	-17.78
Carbon dioxide	R744	31.1	73.8	A1	0	1	-8.27
Propylene	R1270	92.57	46.6	A3	0	0	-1.77
MM							
Cyclonpentane		238.6	44.4	-	0	<25	
Cyclonexane		280.5	40.75	A3	n.a	n.a	
R245fa		154.1	36.4	A1	0	950-1020	
Pentane		196.55	33.42	A3	0	<25	
Exane		234.5	30.2	-	0	3	

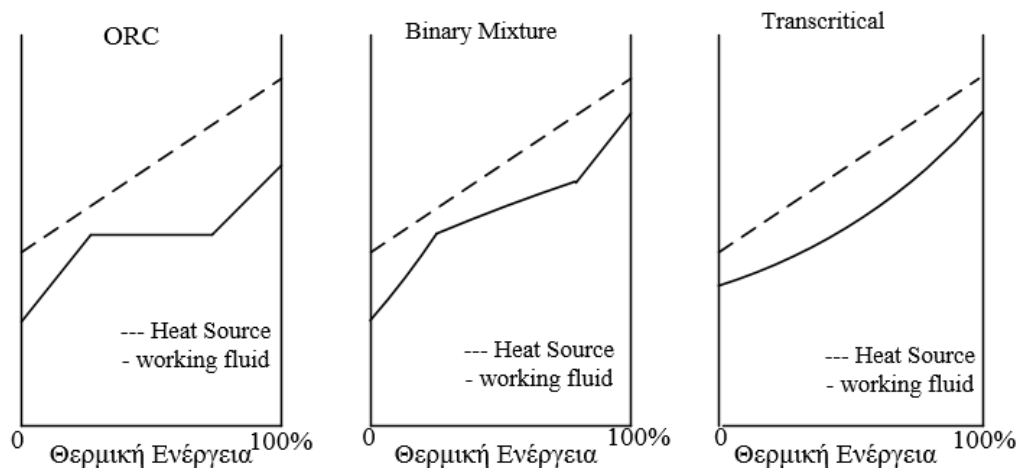
Εάν ληφθεί υπόψη η τοξικότητα και αναφλεξιμότητα του εργαζόμενου ρευστού, μέσο τύπου A1 ASHRAE είναι το ασφαλέστερο που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Παράλληλα, εργαζόμενα ρευστά με το χαμηλότερο δυναμικό καταστροφής του όζοντος και δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη είναι δόκιμο να επιλεγθούν. Επιπλέον σημαντικό κριτήριο αποτελεί η ύπαρξη υγρασίας στην έξοδο της τουρμπίνας. Εργαζόμενα ρευστά με αρνητικές τιμές  $dS/dT$  μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία υγρασίας στην έξοδο του στροβίλου χωρίς κατάλληλη υπερθέρμανση και επομένως δεν είναι επιθυμητή. Επιπρόσθετα, εργαζόμενα ρευστά με υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία δύσκολα χρησιμοποιούνται σε transcritical κύκλους, στις περιπτώσεις που θα χρησιμοποιηθούν πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας.

Στην περίπτωση αυτής της διπλωματικής σαν εργαζόμενο μέσο εξετάζεται μόνο το διοξείδιο του άνθρακα, για περιβαλλοντικούς αρχικά λόγους. Το διοξείδιο του

άνθρακα όμως παρουσιάζει γενικά πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα οργανικά ρευστά και καλύπτει τις προαναφερθείσες απαιτήσεις. Συγκεκριμένα:

- Έχει χαμηλή κρίσιμη θερμοκρασία και σχετικά υψηλή κρίσιμη πίεση (31,1 0C και 7.38MPa)
- Είναι οικονομικό, μη τοξικό, μη εύφλεκτο και άφθονο στην φύση.
- Αποτελεί μη διαβρωτικό ψυκτικό μέσο.
- Είναι ρευστό φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς έχει χαμηλό δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential, GWP=1) και μηδενικό δυναμικό καταστροφής της στοιβάδας του όζοντος (Ozone Depleting Potential, ODP=0).
- Παρουσιάζει συμβατότητα με πρότυπα υλικά και λιπαντικά, χωρίς να επιβαρύνει το περιβάλλον.
- Οι θερμοδυναμικές του ιδιότητες είναι πλήρως γνωστές στην υπερκρίσιμη περιοχή.

Εξαιτίας της χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας, η διαδικασία θέρμανσης του διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να προσδιοριστεί στην υπερκρίσιμη περιοχή. Ανάλογα λοιπόν με την θέση στην οποία βρίσκεται η διαδικασία ψύξης, ο κύκλος παραγωγής ενέργειας μπορεί να ονομαστεί **transcritical** ή υπερκρίσιμος κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διοξειδίου του άνθρακα. Βασικό πλεονέκτημα του transcritical κύκλου παραγωγής ενέργειας του διοξειδίου του άνθρακα είναι το θερμοκρασιακό προφίλ του υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα κατά την θέρμανση. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία εξάτμισης διμερών μιγμάτων και οργανικών μέσων χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας ακολουθεί το προφίλ μείωσης της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας, ενώ στα καθαρά οργανικά μέσα η θερμοκρασία εξάτμισης παραμένει σταθερή. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται ολίσθηση θερμοκρασίας (temperature glide)[32] και συμβαίνει εξαιτίας της δυνατής και απευθείας συμπίεσης και θέρμανσης σε υπερκρίσιμες πιέσεις πριν από την εκτόνωση[33]. Η ολίσθηση θερμοκρασίας οδηγεί στην αποφυγή του σημείου ανάσχεσης (pinch point), το οποίο υπάρχει στην περίπτωση των καθαρών ρευστών (Εικόνα 4). Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται σημαντικά οι απώλειες εξέργειας, δηλαδή το μέγιστο ωφέλιμο έργο που παράγεται από ένα σύστημα το οποίο βρίσκεται σε συγκεκριμένη κατάσταση και περιβάλλον, και εν συνεχεία επιτυγχάνεται καλύτερος βαθμός απόδοσης του συστήματος.



**Εικόνα 4: Θερμοκρασιακό Προφίλ πηγής θερμότητας και εργαζόμενου ρευστού κατά την προσθήκη θερμότητας.**

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, το διοξείδιο του άνθρακα αποδείχθηκε ένα πολλά υποσχόμενο εργαζόμενο μέσο για την χρησιμοποίηση της ενέργειας σε πηγές θερμότητας χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας και απορριπτόμενης θερμότητας σε transcritical κύκλους με καλό θερμοκρασιακό matching. Συγκεκριμένα, συγκρίνοντάς το με άλλα εργαζόμενα μέσα που αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε ότι το διοξείδιο του άνθρακα έχει χαμηλή κρίσιμη θερμοκρασία και σχετικά υψηλή κρίσιμη πίεση (31,1 0C / 87.98 oF και 7,38 MPa/ 1070.38 psi). Αυτές οι ιδιότητές του σε σχέση με την επιλογή του ή όχι ως εργαζόμενο μέσο, ερμηνεύονται ως εξής:

- 1) Χάρη στην χαμηλή κρίσιμη θερμοκρασία, το υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμοδυναμικούς κύκλους με πηγές θερμότητας μετρίων θερμοκρασιών. Ωστόσο, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή καθώς αποτελεί μειονέκτημα για τη διαδικασία της συμπίκνωσης.
- 2) Επιπλέον, δεδομένου ότι η διαδικασία θέρμανσης λαμβάνει χώρα στην υπερκρίσιμη περιοχή, μπορεί να αποφευχθεί κάποια πολυπλοκότητα που σχετίζεται με μια διαδικασία αλλαγής φάσης.
- 3) Παρά το γεγονός ότι η υψηλή πίεση μπορεί να δημιουργούσε κάποια προβλήματα κατά το παρελθόν στον σχεδιασμό του συστήματος, αυτός ο τομέας έχει εξελιχθεί με γοργούς ρυθμούς τα τελευταία χρόνια με όλο και

ταχύτερες τεχνικές βελτιώσεις, άρα δεν αποτελεί πλέον ανασταλτικό παράγοντα για την επιλογή του.

- 4) Εξαιτίας της υψηλής ειδικής ισχύος, το σύστημα με το διοξείδιο του άνθρακα είναι πιο συμπαγές από άλλα συστήματα που χρησιμοποιούν άλλα εργαζόμενα ρευστά.
- 5) Στη συνέχεια, η ενέργεια κατά την εκτόνωση του διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να ανακτηθεί μέσω ενός κύκλου με αναγεννητή.
- 6) Η υψηλή πίεση λειτουργίας είναι χρήσιμη για την μείωση του μεγέθους του αναγεννητή και τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας του διοξειδίου του άνθρακα βοηθούν στην ελαχιστοποίηση της επίδρασης της πτώσης πίεσης στην απόδοση του κύκλου.

### **2.3 Η Ιστορία του κύκλου παραγωγής ενέργειας διοξειδίου του άνθρακα**

Ο κύκλος παραγωγής ενέργειας διοξειδίου του άνθρακα προτάθηκε για πρώτη φορά το 1948 από τους αδελφούς Seltzer [11] και στη συνέχεια αρκετές χώρες όπως η Ρωσία, η Ιταλία και οι Η.Π.Α ασχολήθηκαν με την έρευνα ενός τέτοιου κύκλου (Fehr, 1962 και 1967, Dekhtiarev, 1962, Angelino, 1966)[35],[36],[37],[38]. Ωστόσο, μετά το μεγάλο ενδιαφέρον κατά την δεκαετία του εξήντα, η έρευνα πάνω σε αυτούς τους κύκλους μειώθηκε δραματικά μέχρι την δεκαετία του ενενήντα, κυρίως εξαιτίας της περιορισμένης ποσότητας κατάλληλων πηγών θερμότητας καθώς και της περιορισμένης γνώσης κατάλληλων εναλλακτών θερμότητας και μηχανών εκτόνωσης (Dostal, 2004)[39]. Μετά την δεκαετία του ενενήντα και την ανάπτυξη κατάλληλων εναλλακτών θερμότητας και υλικών, οι κύκλοι ενέργειας με διοξείδιο του άνθρακα επανήλθαν στο προσκήνιο και διεξάχθηκε περαιτέρω έρευνα (Dostal, 2004, Chang, 2004). [12] [13]

Ειδικότερα, εκτεταμένη έρευνα πραγματοποιήθηκε όσον αφορά τον κλειστό κύκλο Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα σε προηγμένους πυρηνικούς αντιδραστήρες, εξαιτίας του υψηλού βαθμού απόδοσης που παρουσιάζει σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 550 C°. Οι Dostal και Hejzlarl παρουσίασαν μια λεπτομερή θερμοδυναμική μελέτη των Brayton κύκλων υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα, υποστηρίζοντας ότι ο κύκλος υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα είναι ικανός να πετύχει όμοιο βαθμό απόδοσης με Brayton κύκλους ηλίου που λειτουργούν

σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (Dostal, 2002 και 2004; Hejzlar, 2006). [12],[34]. Ο Ishiyama συνέκρινε συστήματα παραγωγής ενέργειας που περιλαμβάνουν κύκλο ατμοστροβίλου, κύκλο στροβίλου με ήλιο και κύκλο υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) (Ishiyama, 2008). Ο Linares εξέτασε κύκλους Brayton με εργαζόμενα ρευστά He και  $\text{CO}_2$  για πυρηνικούς αντιδραστήρες, δημιουργώντας μία εφαρμογή και των δύο κύκλων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι διπλοί κύκλοι επιτυγχάνουν θερμικούς βαθμούς απόδοσης γύρω στο 42,8% όταν χρησιμοποιούμε ήλιο, ενώ ο θερμικός βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου  $\text{CO}_2$ -  $\text{H}_2\text{O}$  μπορεί να φτάσει ακόμη υψηλότερα(46,7%) (Linares,2011).

Οι Moisseytsev και Sienicki μελέτησαν εναλλακτικές πορείες για τον Brayton κύκλο υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα για ένα λειτουργικά γρήγορο αντιδραστήρα νατρίου με χαμηλή θερμοκρασία εξόδου πυρήνα (Moisseytsev και Sienicki 2009). Παράλληλα, οι Bryant ,Saari και Zangemeh παρουσίασαν μια συγκριτική μελέτη του απλού και με ανασυμπίεση Brayton κύκλου υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα για διάφορες λειτουργικές συνθήκες, ενώ ο Sarkar παρουσίασε εξεργειακές αναλύσεις και πρότεινε τρόπους βελτιστοποίησης του κύκλου με ανασυμπίεση (Bryant, Saari και Zangemeh, 2011,Sarkar,2009). Ο Yannle Moullec παρουσίασε μια εργασία που εστιάζει στη δημιουργία μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας καιόμενου κονιοποιημένου άνθρακα με δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα και περαιτέρω αξιοποίησή του μέσω ενός απλού Brayton κύκλου υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα. Ο συνδυασμός του κύκλου Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα, του λέβητα και της διαδικασίας δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα επιτρέπει σημαντική αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης του σταθμού.

Η ανάγκη επίτευξης υψηλότερου βαθμού απόδοσης του κύκλου υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα οδήγησε τους ερευνητές στη μελέτη και δημιουργία διάφορων παραλλαγών και συνδυασμών των βασικών κύκλων. Ο Jeong επιχείρησε να αλλάξει το κρίσιμο σημείο του εργαζόμενου ρευστού με ανάμιξη του  $\text{CO}_2$  με άλλα αέρια στους γρήγορους αντιδραστήρες που ψύχονται με νάτριο. Με αυτόν τον τρόπο, απέδωσε ένα Brayton κύκλο υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα που βασίζεται σε διμερές μείγμα (Jeong, 2011 και 2013). Ο Kato εξέτασε ένα αεριοστροβιλικό αντιδραστήρα διοξειδίου του άνθρακα με μερικό προ-ψυκτικό κύκλο σε μια μέτρια θερμοκρασία ( $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Kato,2004). Ο Chacartegui πρότεινε ένα απλό κύκλο υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα , συνδυασμένος με οργανικούς Rankine

bottoming cycles με διαφορετικά εργαζόμενα ρευστά για θερμοηλεκτρικούς ηλιακούς πύργους. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης του  $\text{SCO}_2$  βελτιώθηκε κατά 7%-12%, ανάλογα με την θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο (Chacartegui, 2011). Ο Sanchez και οι συνεργάτες του ερεύνησαν ένα συνδυασμένο κύκλο  $\text{SCO}_2$ -ORC, ο οποίος ήταν βασικά ο απλός κύκλος υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα αλλά στον bottoming cycle<sup>3</sup> χρησιμοποιήθηκαν μείγματα υδρογονανθράκων. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι η συμπεριφορά του κύκλου επηρεαζόταν άμεσα από την σύνθεση του μίγματος (Sanchez, 2013). Οι Beserati και Goswami εξέτασαν πρόσφατα τρεις διαφορετικούς κύκλους Brayton, δηλαδή έναν απλό, έναν με ανασυμπίεση και ένα συνδυασμένο κύκλο ψύξης με οργανικό κύκλο Rankine. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο συνδυασμένος κύκλος  $\text{SCO}_2$ -ORC με ανασυμπίεση παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τις άλλες διαμορφώσεις (Beserati και Goswami, 2014).

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια όλο και μεγαλύτερο είναι το ενδιαφέρον για τους transcritical κύκλους με διοξείδιο του άνθρακα. Ο transcritical κύκλος διοξειδίου του άνθρακα ενδείκνυται για εφαρμογές ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας, εξαιτίας της καλύτερης προσαρμογής της θερμοκρασιακής πτώσης μεταξύ του εργαζόμενου ρευστού και των πηγών θερμότητας στον ατμολέβητα ανάκτησης θερμότητας.

Ειδικότερα, ο Zhang και οι συνεργάτες του εξέτασαν τις δυνατότητες του κύκλου ενέργειας με διοξείδιο του άνθρακα χρησιμοποιώντας ηλιακή ενέργεια τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά (Zhang, 2005, 2006 και 2007)[42],[43]. Ο Chen και οι συνεργάτες του διερεύνησαν την απόδοση του κύκλου με εργαζόμενο ρευστό διοξείδιο του άνθρακα χρησιμοποιώντας πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας και τον συνέκριναν με ORCs (Chen, 2005, 2006 και 2010)[44],[45]. Πιο συγκεκριμένα, ο Chen διεξήγαγε μια συγκριτική ανάλυση στον  $\text{TCO}_2$  κύκλο και στον ORC με R123 ως εργαζόμενο ρευστό σε ανάκτηση θερμότητας. Βρήκαν ότι ο transcritical κύκλος του διοξειδίου του άνθρακα δίνει ελαφρώς υψηλότερη παραγόμενη ισχύ από ότι ο ORC. Επιπρόσθετα, ο Cayer και οι συνεργάτες του μελέτησαν τον κύκλο  $\text{CO}_2$  κάτω από σταθερές συνθήκες και πρότειναν βελτιστοποιήσεις του συστήματος, παρουσιάζοντας λεπτομερή ανάλυση δύο διαφορετικών διαμορφώσεων του transcritical κύκλου του διοξειδίου του άνθρακα

---

<sup>3</sup>bottoming cycle: κύκλος παραγωγής ενέργειας κατά τον οποίο η απορριπτόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας “ wasteheattopower”

(Cayer, 2009). Στη συνέχεια, παρουσίασαν μια παραμετρική ανάλυση και βελτιστοποίηση χρησιμοποιώντας έξι διαφορετικούς δείκτες απόδοσης (Cayer, 2010). Επιπρόσθετα, ο Bail συγκρίνει την απόδοση των transcritical κύκλων ενέργειας του διοξειδίου του άνθρακα και του R124. Ο Song θεώρησε ένα transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα κινούμενος με ηλιακή ενέργεια με υγροποιημένο φυσικό αέριο ως ψυχρή πηγή. Αυτό έδειξε ότι η απόδοση όλου του κύκλου ήταν περίπου 6,51% κάτω από την συγκεκριμένη κατάσταση.

Ο Wang προσπάθησε να προσομοιώσει τις παραμέτρους λειτουργίας του κύκλου ενέργειας υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα κάτω από σταθερές συνθήκες πηγής θερμότητας χρησιμοποιώντας ένα γενετικό αλγόριθμο και ένα τεχνητό νευρωνικό σύστημα, δεχόμενος ότι οι εναλλάκτες θερμότητας του συστήματος θα παρέχουν επαρκή θέρμανση/ ψύξη με τις επιθυμητές συνθήκες εργασίας του κύκλου (Wang, 2010). Ο Wang μελέτησε την αποδοτικότητα του κύκλου  $\text{TCO}_2$ . Στη συνέχεια, η βελτιστοποίηση των παραμέτρων έγινε με την βοήθεια ενός γενετικού αλγορίθμου για μεγιστοποίηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης. Επιπρόσθετα, μελετήθηκε ένα σύστημα για συνδυασμένη παραγωγή ενέργειας, θερμότητας και ψύξης με πηγή θερμότητας τον ήλιο και συσκευή εκτόνωσης με εκτόξευση. Γνωστοποιήθηκε ότι η αύξηση της πίσω πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου στην τουρμπίνα μπορούν να αυξήσουν τον βαθμό απόδοσης του συστήματος. Τέλος ο Wang μελέτησε τον συνδυασμό ενός transcritical και ενός υπερκρίσιμου κύκλου παραγωγής ενέργειας με διοξείδιο του άνθρακα για εφαρμογή σε εξελιγμένους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Συνέκρινε θερμοδυναμικά του συνδυασμένους κύκλους  $\text{SCO}_2\text{-TCO}_2$  με τους αντίστοιχους Brayton κύκλους διοξειδίου του άνθρακα κάτω από τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας [14].

## **2.4 Περιγραφή των κύκλων ενέργειας του διοξειδίου του άνθρακα**

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται τα εξής συστήματα παραγωγής ενέργειας διοξειδίου του άνθρακα, αξιοποιώντας πηγή θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας  $300\text{ }^\circ\text{C}$ :

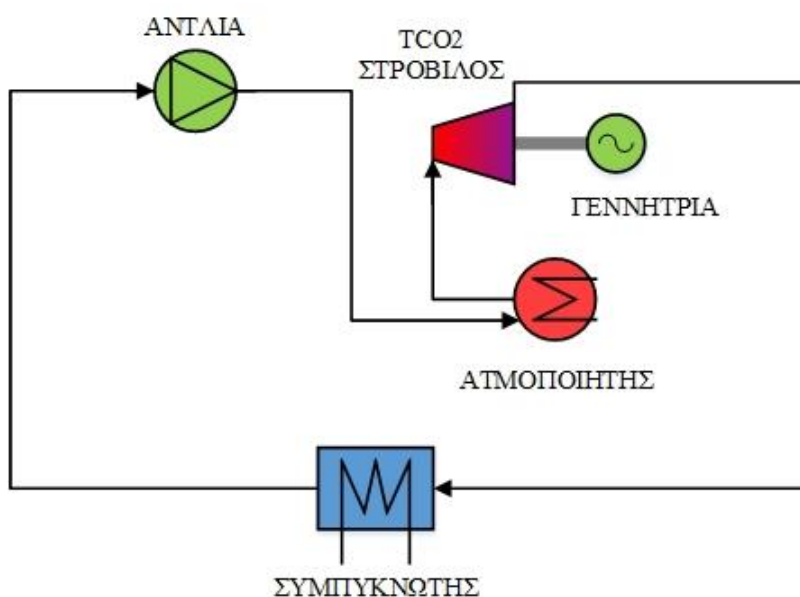
- 1) Transcritical κύκλος διοξειδίου του άνθρακα (Carbon dioxide transcritical power cycle)
- 2) Απλός Brayton κύκλος υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα (Carbon dioxide simple Brayton cycle)

- 3) Brayton κύκλος υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση (Carbon dioxide Brayton cycle with recompression)
- 4) Συνδυασμένος κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα
- 5) Συνδυασμένος κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα

### 2.4.1 Transcritical κύκλος διοξειδίου του άνθρακα

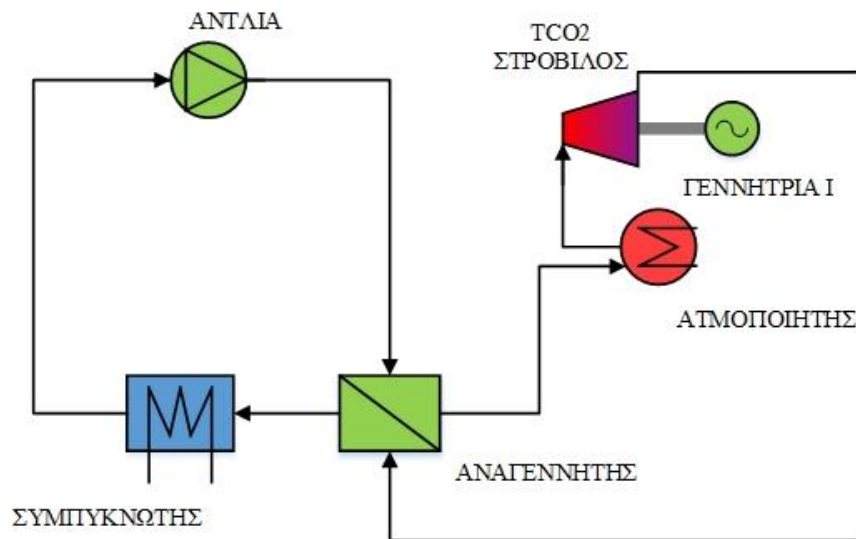
Όσον αφορά τον transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα (Carbon dioxide transcritical power cycle), στην παρούσα εργασία μελετώνται δύο διαμορφώσεις με μόνη διαφορά την ύπαρξη ενός αναγεννητή (εσωτερικός εναλλάκτης θερμότητας). Οι συσκευές οι οποίες απαρτίζουν τον απλό κύκλο είναι (Εικόνα 5):

- 1) Αντλία
- 2) Ατμοποιητής (εναλλάκτης θερμότητας)
- 3) Στρόβιλος
- 4) Συμπυκνωτής



Στη δεύτερη διαμόρφωση υπάρχει και ένας αναγεννητής μετά την αντλία (Εικόνα 6).

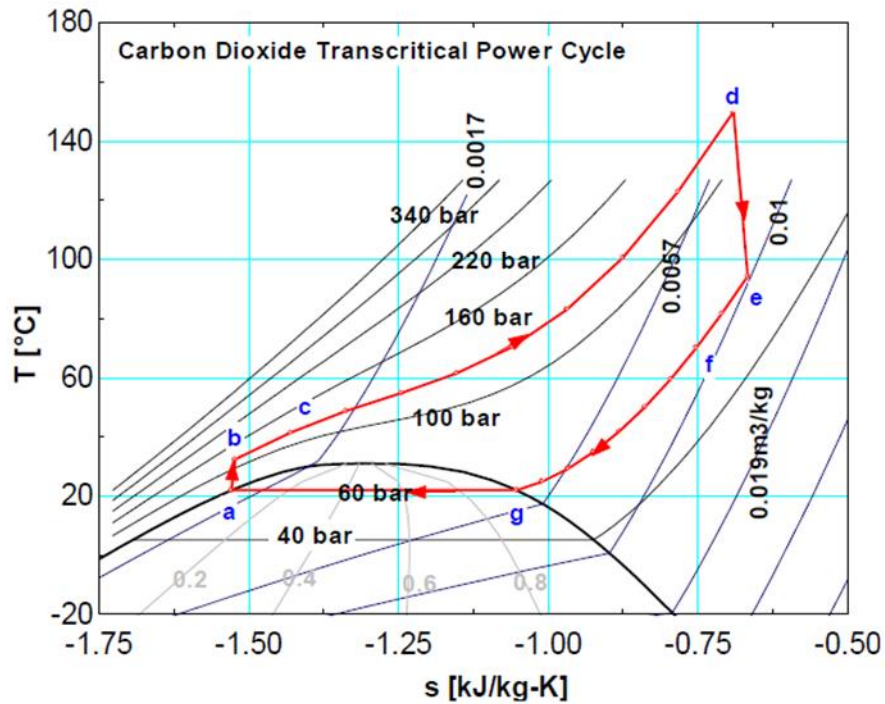




Εικόνα 6: Μονογραμμικό διάγραμμα transcritical κύκλου CO<sub>2</sub> με αναγεννητή

Στο διάγραμμα κατωτέρω (Εικόνα 7) απεικονίζεται η ροή του εργαζόμενου μέσου κατά την transcritical κυκλική μεταβολή. Στα δύο αυτά συστήματα, κεκορεσμένο διοξείδιο του άνθρακα συμπιέζεται αρχικά σε υπερκρίσιμη πίεση (θέση a) και στη συνέχεια θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία (θέση b) μέσω του εναλλάκτη θερμότητας. Σε όλες τις περιπτώσεις, το διοξείδιο του άνθρακα θερμαίνεται έως ότου η εντροπία του εργαζόμενου ρευστού μεγιστοποιηθεί. (42) Το θερμό υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα θα εκτονωθεί στον στρόβιλο (θέση d) και ακολούθως το αέριο θα οδηγηθεί στον συμπυκνωτή (θέση e), όπου ψύχεται και συμπυκνώνεται στην αρχική του κατάσταση (επιστροφή στη θέση a). Οι τέσσερις διαδικασίες που παρουσιάζονται στο διάγραμμα T-s (Εικόνα 7) είναι οι ακόλουθες:

1. Συμπύεση (a-b)
2. Ισοβαρής θέρμανση (b-d)
3. Εκτόνωση (d-e)
4. Ισοβαρής ψύξη (e-a)

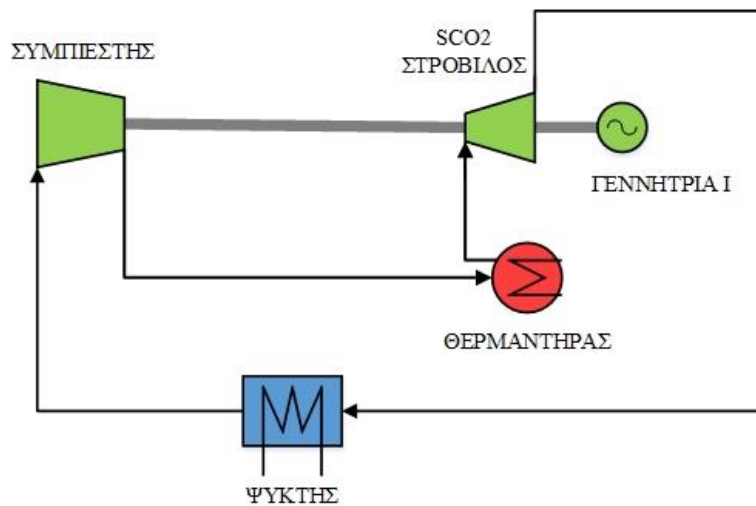


Εικόνα 7: Διάγραμμα T-transcritical κύκλου διοξειδίου του άνθρακα [15]

## 2.4.2 Απλός Brayton κύκλος υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα

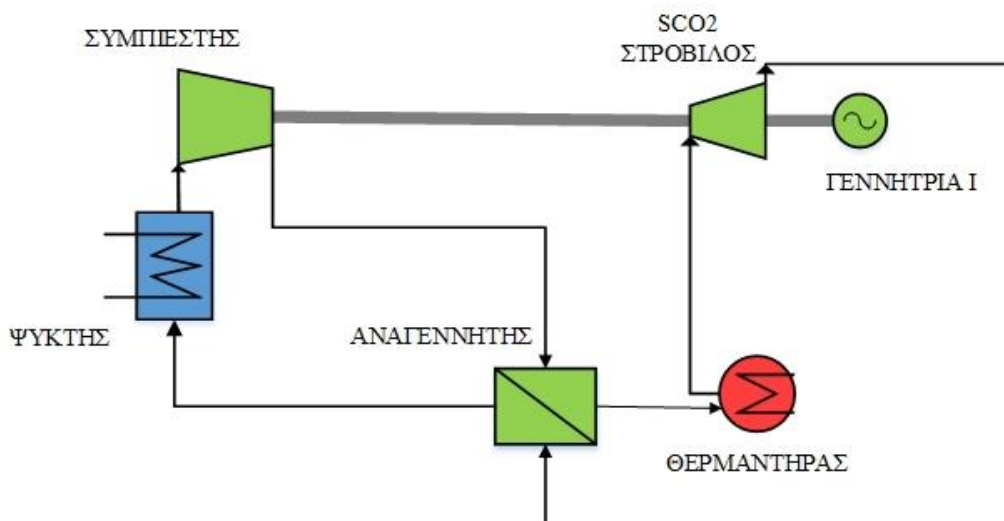
Και στην περίπτωση του κύκλου Brayton (Carbon dioxide simple Brayton cycle) θα μελετηθεί ο βασικός κύκλος και ο κύκλος με αναγεννητή. Ο βασικός κύκλος αποτελείται από τα εξής μέρη-συσκευές (Εικόνα 8):

- 1) Συμπιεστής
- 2) Εναλλάκτης θερμότητας- Θερμαντήρας (Heater)
- 3) Στρόβιλος
- 4) Συσκευή ψύξης- Ψύκτης (Cooler)



Εικόνα 8: Μονογραμμικό διάγραμμα απλού κύκλου Brayton

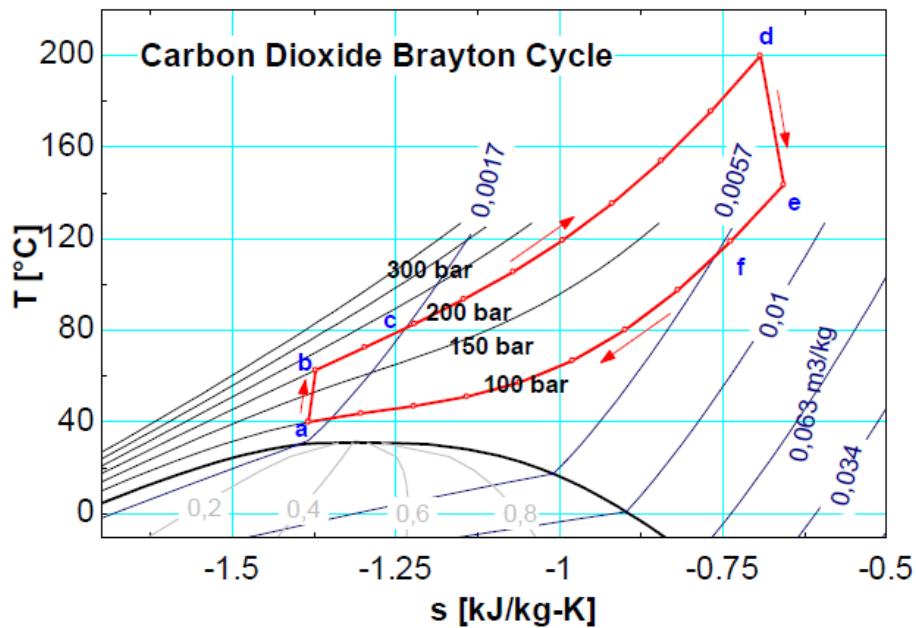
Στην περίπτωση του κύκλου με αναγεννητή, ο αναγεννητής βρίσκεται ανάμεσα στην αντλία και τον θερμαντήρα ( Εικόνα 9).



Εικόνα 9: Μονογραμμικό διάγραμμα κύκλου Brayton με αναγεννητή

Το υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα αρχικά συμπιέζεται αρχικά και οδηγείται στον εναλλάκτη θερμότητας όπου υπερθερμαίνεται. Στην συνέχεια εκτονώνεται στον στρόβιλο και ακολούθως ψύχεται, παραμένοντας καθ' όλη τη διάρκεια στην υπερκρίσιμη περιοχή. Στο κάτωθι διάγραμμα απεικονίζονται οι προαναφερθείσες διαδικασίες (Εικόνα 10):

- 1) Συμπίεση (a-b)
- 2) Ισοβαρής θέρμανση (b-d)
- 3) Εκτόνωση (d-e)
- 4) Ισοβαρής ψύξη (d-e) φαίνονται.



Εικόνα 10: Διάγραμμα T-s κύκλου Brayton [15]

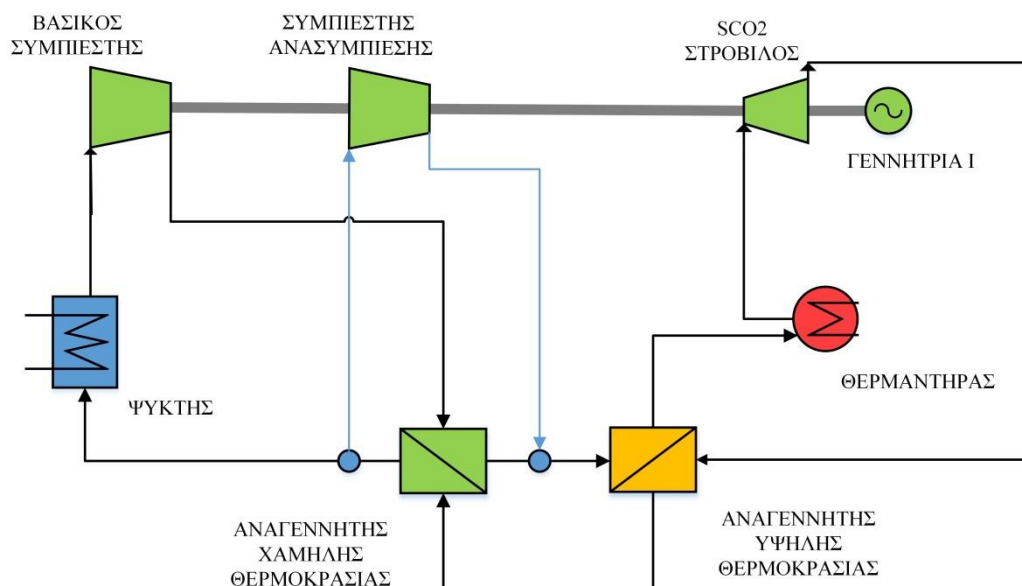
### 2.4.3 Κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση

Ο κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση αποτελεί μια εξελιγμένη μορφή του απλού κύκλου Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με αναγεννητή. Συγκεκριμένα ένα τμήμα του εργαζόμενου ρευστού ανασυμπιέζεται με την προσθήκη ενός δεύτερου συμπιεστή στην πίεση λειτουργίας προτού ψυχθεί. Ο ενιαίος αναγεννητής χωρίζεται σε δύο ξεχωριστά τμήματα, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα του συστήματος. Ο κύκλος απαρτίζεται από τις παρακάτω συσκευές:

- 1) Κεντρικός συμπιεστής
- 2) Αναγεννητής, ο οποίος χωρίζεται σε δύο ξεχωριστά τμήματα
- 3) Θερμαντήρας (εναλλάκτης θερμότητας – Heater)
- 4) Στρόβιλος
- 5) Συμπιεστής ανασυμπίεσης
- 6) Συσκευή ψύξης – Ψύκτης (Cooler)

Αρχικά, τμήμα του υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα συμπιέζεται σε υψηλή πίεση στον κεντρικό συμπιεστή. Στην συνέχεια, οδηγείται στον αναγεννητή χαμηλής θερμοκρασίας όπου προθερμαίνεται. Αφού ενωθεί με το τμήμα του εργαζόμενου ρευστού που προέρχεται από τον συμπιεστή ανασυμπίεσης, θερμαίνεται

περαιτέρω στον αναγεννητή και οδηγείται στον θερμαντήρα. Το υπέρθερμο διοξείδιο του άνθρακα που βρίσκεται σε υψηλή πίεση εκτονώνεται στον στρόβιλο. Μετά τον αναγεννητή των δύο τμημάτων, τμήμα του διοξειδίου του άνθρακα διοχετεύεται στον συμπιεστή ανασυμπίεσης και το υπόλοιπο στην συσκευή ψύξης, όπου ψύχεται στην πρότερη κατάσταση (Εικόνα 11).



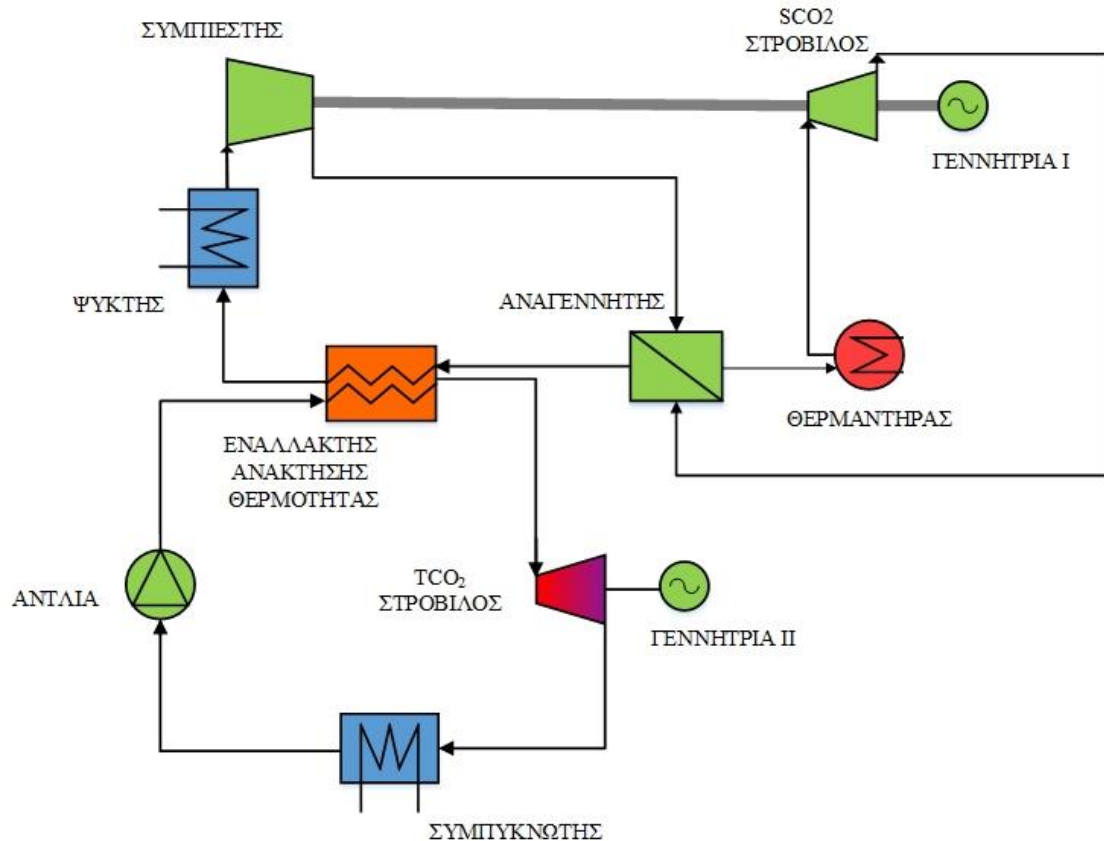
Εικόνα 11: Διάγραμμα κύκλου Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση

#### 2.4.4 Συνδυασμένος κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.

Στην παρούσα διαμόρφωση χρησιμοποιείται ένας απλός κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα ως ο βασικός κύκλος (topping cycle) και ένας transcritical κύκλος διοξειδίου του άνθρακα κατά τον οποίο παράγεται περαιτέρω ηλεκτρική ενέργεια από απορριπτόμενη θερμότητα (bottoming cycle). Ο κύκλος αυτός αποτελείται από τα εξής εξαρτήματα:

- Κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα:
  - 1) Συμπιεστής
  - 2) Αναγεννητής
  - 3) Θερμαντήρας
  - 4) Στρόβιλος
  - 5) Εναλλάκτης ανάκτησης θερμότητας
  - 6) Εναλλάκτης ψύξης
- Transcritical κύκλος διοξειδίου του άνθρακα:
  - 1) Αντλία

- 2) Εναλλάκτης ανάκτησης θερμότητας
- 3) Στρόβιλος
- 4) Συμπυκνωτής.



**Εικόνα 12: Μονογραμμικό διάγραμμα συνδυασμένου κύκλου Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.**

Αρχικά το υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα συμπιέζεται στην υψηλή πίεση και μετά τον αναγεννητή οδηγείται στον θερμαντήρα όπου θερμαίνεται στη θερμοκρασία μέγιστης εντροπίας. Στη συνέχεια εκτονώνεται στον στρόβιλο και διοχετεύεται, αφού ενδιάμεσα ψυχθεί μερικώς στον αναγεννητή, στον εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας για περαιτέρω ψύξη. Τέλος, ψύχεται και επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση μέσω του εναλλάκτη ψύξης. Ο εναλλάκτης ανάκτησης θερμότητας αποτελεί τον συνδετικό κρίκο των δύο ξεχωριστών κύκλων, καθώς το θερμό ρεύμα του θερμαίνει το διοξείδιο του άνθρακα του transcritical κύκλου διοξειδίου του άνθρακα. Συγκεκριμένα, στον transcritical κύκλο κεκορεσμένο διοξείδιο του άνθρακα συμπιέζεται μέσω της αντλίας σε υπερκρίσιμη πίεση. Ακολούθως θερμαίνεται στον εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας και οδηγείται στον στρόβιλο όπου εκτονώνεται. Τέλος συμπυκνώνεται στην πρότερη κατάσταση μέσω του συμπυκνωτή (Εικόνα 12).

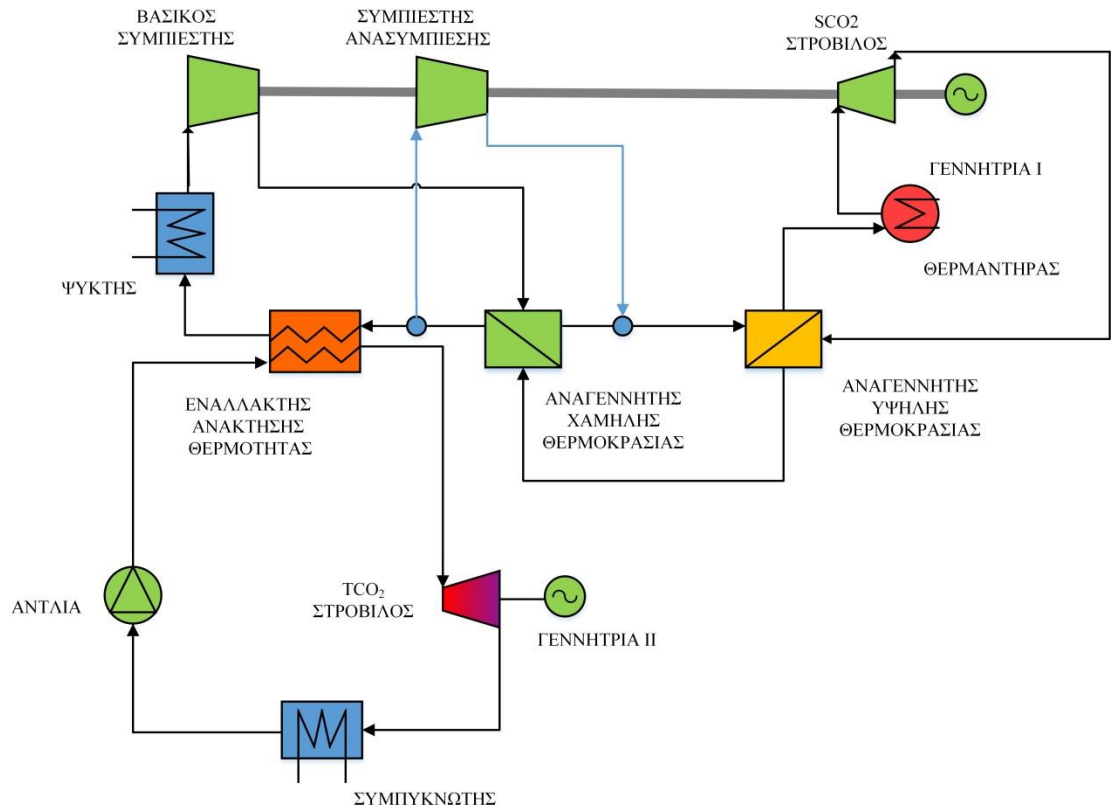
#### 2.4.5 Συνδυασμένος κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.

Το παρόν σύστημα αποτελεί τον συνδυασμό ενός κύκλου Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση (bottoming cycle) και ενός transcritical κύκλου διοξειδίου του άνθρακα (topping cycle). Ο συγκεκριμένος κύκλος αποτελείται από τα παρακάτω εξαρτήματα:

- Κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση
  - 1) Κεντρικός συμπιεστής
  - 2) Αναγεννητής, ο οποίος χωρίζεται σε δύο ξεχωριστά τμήματα
  - 3) Θερμαντήρας (εναλλάκτης θερμότητας –Heater)
  - 4) Στρόβιλος
  - 5) Συμπιεστής ανασυμπίεσης
  - 6) Συσκευή ψύξης – Ψύκτης (Cooler)
  
- Transcritical κύκλος διοξειδίου του άνθρακα:
  - 1) Αντλία
  - 2) Εναλλάκτης ανάκτησης θερμότητας
  - 3) Στρόβιλος
  - 4) Συμπυκνωτής

Αρχικά, τμήμα του υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα συμπιέζεται σε υψηλή πίεση στον κεντρικό συμπιεστή. Στην συνέχεια, οδηγείται στον αναγεννητή χαμηλής θερμοκρασίας όπου προθερμαίνεται. Αφού ενωθεί με το τμήμα του εργαζόμενου ρευστού που προέρχεται από τον συμπιεστή ανασυμπίεσης, θερμαίνεται περαιτέρω στον αναγεννητή και οδηγείται στον θερμαντήρα. Το υπέρθερμο διοξείδιο του άνθρακα που βρίσκεται σε υψηλή πίεση εκτονώνεται στον στρόβιλο. Μετά τον αναγεννητή των δύο τμημάτων, τμήμα του διοξειδίου του άνθρακα διοχετεύεται στον συμπιεστή ανασυμπίεσης και το υπόλοιπο οδηγείται στον εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας για περαιτέρω ψύξη. Τέλος, ψύχεται και επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση μέσω του εναλλάκτη ψύξης. Ο εναλλάκτης ανάκτησης θερμότητας συνδέει τους δύο κύκλους μεταξύ τους, καθώς το θερμό ρεύμα του εναλλάκτη θερμαίνει το διοξείδιο του άνθρακα του transcritical κύκλου διοξειδίου του άνθρακα. Συγκεκριμένα, στον transcritical

κύκλο κεκορεσμένο διοξείδιο του άνθρακα συμπιέζεται μέσω της αντλίας σε υπερκρίσιμη πίεση. Στη συνέχεια θερμαίνεται στον εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας και οδηγείται στον στρόβιλο όπου εκτονώνεται. Τέλος, συμπυκνώνεται στην πρότερη κατάσταση μέσω του συμπυκνωτή. (Εικόνα 13)



**Εικόνα 13** Συνδυασμένος κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.



### 3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

#### 3.1 Παράμετροι αξιολόγησης του συστήματος (Μαθηματική Περιγραφή)

##### 3.1.1 Transcritical κύκλος διοξειδίου του άνθρακα

###### 3.1.1.1 Παράμετροι αξιολόγησης των επιδόσεων

Μετά την ποιοτική περιγραφή του κύκλου είναι σκόπιμο να καθοριστούν οι μαθηματικές σχέσεις που θα συμβάλλουν στην αξιολόγηση των επιδόσεών του. Για την αξιολόγηση λοιπόν του συστήματος, κρίνεται απαραίτητη η ανάλυση του θερμικού και του εξεργειακού βαθμού απόδοσης, όπως επίσης και άλλων παραμέτρων που ποσοτικοποιούν το σύστημα από οικονομική και τεχνική σκοπιά.

###### 3.1.1.1.1 Ενεργειακή ανάλυση του κύκλου

Σε αυτό το σημείο θα παραθέσουμε κάποιες βασικές σχέσεις για τον transcritical κύκλο, οι οποίες θα βοηθήσουν στην κατανόηση των διάφορων υπολογισμών που θα ακολουθήσουν στις επόμενες ενότητες.

Σύμφωνα με το διάγραμμα T-s (Εικόνα 7), η μεταβολή a-b (συμπύεση) πραγματοποιείται στην αντλία και απαιτεί να προσδώσουμε έργο σε αυτήν. Το απαιτούμενο έργο που πρέπει να δοθεί υπολογίζεται από τη σχέση:

$$W_p = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$$

Κατά τη μεταβολή b-d (ισοβαρής θέρμανση) προσδίδεται θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο. Η ενέργεια που απορροφά το ρευστό ισούται με:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2)$$

Η μεταβολή d-e (εκτόνωση) είναι η μεταβολή που πραγματοποιείται μέσα στο στρόβιλο. Ο στρόβιλος απορροφά ενέργεια από το ρευστό, την οποία προσδίδει στη γεννήτρια. Για την ενέργεια που απορροφά ο στρόβιλος προκύπτει ότι:

$$W_T = \dot{m} \cdot (h_3 - h_4)$$

Η μεταβολή e-a(ισοβαρής ψύξη) είναι η αποβολή θερμότητας στον συμπυκνωτή. Ο συμπυκνωτής στην περίπτωσή μας είναι υδρόψυκτος. Η θερμότητα που απορρίπτεται στο περιβάλλον είναι η εξής:

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_1)$$

Η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα ισούται με τη διαφορά της μικτής ηλεκτρικής ενέργειας από την γεννήτρια, η οποία είναι συνδεδεμένη με τον στρόβιλο, και της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται για την συμπίεση του εργαζόμενου ρευστού στην αντλία:

$$P_{el,net} = P_{el,gross} - P_{el,pump} = \eta_m \eta_G P_{exp} - \left( \frac{P_{pump}}{\eta_{motor}} \right)$$

Στην παραπάνω σχέση, οι παράγοντες  $\eta_m$ ,  $\eta_G$  και  $\eta_{motor}$  είναι ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του στρόβιλου και οι βαθμοί απόδοσης της γεννήτριας και της αντλίας, αντίστοιχα. Η θερμότητα που μεταφέρεται από την πηγή θερμότητας στο εργαζόμενο ρευστό μέσα στον ατμοποιητή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\dot{Q}_{HS} = \dot{m}_{H,S}(h_{HS,in} - h_{HS,out}), \quad \text{με } \dot{Q}_{HS} = \dot{Q}_{in}$$

Δύο από τις δημοφιλέστερες χρησιμοποιούμενες παράμετροι αξιολόγησης των θερμοδυναμικών κύκλων είναι ο θερμικός (πρώτος θερμοδυναμικός νόμος) και ο εξεργειακός (δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος) βαθμός απόδοσης. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης χρησιμοποιείται για να δείξει το ποσοστό μετατροπής της θερμότητας που εισάγεται στο σύστημα σε ηλεκτρική ενέργεια:

$$\eta_{th} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{HS}}$$

Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος ορίζεται ως το γινόμενο του θερμικού βαθμού απόδοσης  $\eta_{th}$  με τον βαθμό μετάδοσης θερμότητας του συστήματος  $\eta_{HT}$ . Ο βαθμός μετάδοσης του συστήματος ισούται με το λόγο της θερμότητας που απορρόφησε το εργαζόμενο μέσο προς τη μέγιστη θερμότητα που δύναται να δώσει η πηγή.

### 3.1.1.1.2 Εξεργειακή ανάλυση του κύκλου

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι ένας δείκτης που λαμβάνει υπόψη μόνο τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο (ισοζύγιο ενέργειας), χωρίς να εξετάζει την ουσιώδη διαφορά μεταξύ θερμότητας και μηχανικής ενέργειας. Η εξέργεια ενός θερμοδυναμικού συστήματος ορίζεται ως το μέγιστο θεωρητικό έργο, με βάση τον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, που θα μπορούσε να παραχθεί εάν το σύστημα βρισκόταν σε ισορροπία με το περιβάλλον.

Η εξέργεια κάθε σημείου μπορεί να υπολογιστεί από την εξής σχέση:

$$\dot{E}_i = \dot{m}_i[(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)],$$

όπου ο δείκτης 0 αναφέρεται στις συνθήκες περιβάλλοντος ( $T_0=15\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_0=1.013\text{ bar}$ ).

Στον εναλλάκτη θερμότητας, το ποσοστό εξέργειας της πηγής θερμότητας και των καυσαερίων υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\dot{E}_{HS} = \dot{m}_{HS}[(h_{HS,in} - h_{HS,0}) - T_0(s_{HS,in} - s_{HS,0})]$$

$$\dot{E}_{HS,out} = \dot{m}_{HS}[(h_{HS,out} - h_{HS,0}) - T_0(s_{HS,out} - s_{HS,0})]$$

Οι εξεργειακές απώλειες των συσκευών του κύκλου υπολογίζονται από την  $I = \sum E_{in} - \sum E_{out}$ , όπως φαίνεται και στις κάτωθι εξισώσεις:

1) Για την αντλία:

$$I_{pump} = E_{in} - E_{out} + \dot{W}_{in}$$

2) Για τον ατμοποιητή:

$$I_{evap} = E_{HS} + E_{in} - E_{out}$$

3) Για τον στρόβιλο:

$$I_{turb} = E_{in} - E_{out} - \dot{W}_{out}$$

4) Για τον συμπυκνωτή:

$$I_{cond} = E_{in} - E_{out}$$

5) Και για τον αναγεννητή:

$$I_{IHx} = E_{in,hotside} - E_{out,hotside} + E_{in,coldside} - E_{out,coldside}$$

Η συνολική ισορροπία εξέργειας και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης δίνονται από τους εξής τύπους:

$$\dot{E}_{HS} = P_{net} + I + \dot{E}_{HS,out} + P_{loss}$$

$$\eta_{ex} = \frac{P_{net}}{\dot{E}_{HS}}$$

### 3.1.1.1.3 Τεχνικοοικονομικές παράμετροι

Εκτός από τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, ο οποίος χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του συστήματος από θερμοδυναμική άποψη, υπάρχουν και άλλοι παράμετροι που ελέγχουν το σύστημα από τεχνική και οικονομική πλευρά. Αυτές είναι:

1. η ταχύτητα περιστροφής  $n$ :  $n = \frac{\Delta h_{T,is}^{0.75}}{10 \sqrt{\dot{V}_{T,out}}}$

2. ο λόγος ροής VFR στον στρόβιλο:  $VFR = \frac{\dot{V}_{T,out}}{\dot{V}_{T,in}}$

3. και οι τιμές UA στον ατμοποιητή, συμπυκνωτή και στον αναγεννητή:

$$UA = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_{lm}}$$

όπου  $\Delta h_{T,is}$  είναι η πτώση της ισεντροπικής ειδικής ενθαλπίας στο στρόβιλο,  $\dot{V}_{T,in}$  και  $\dot{V}_{T,out}$  η παροχή όγκου του εργαζόμενου ρεστού στον στρόβιλο στην είσοδο και στην έξοδο αντίστοιχα,  $\dot{Q}$  η ροή θερμότητας του εναλλάκτη θερμότητας και  $\Delta T_{lm}$  η λογαριθμική μέση διαφορά θερμοκρασίας που προκύπτει από την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ των ρευστών.

Οι δύο πρώτες παράμετροι αφορούν στην λειτουργία της τουρμπίνας και σχετίζονται με το κόστος της. Εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες περιστροφής  $n$  του στρόβιλου ( $>100.000$  rpm) οδηγούν σε πολύ ακριβή κατασκευή στρόβιλου. Παράλληλα, η αύξηση του VFR και SP συνδέεται με αύξηση του μεγέθους του στρόβιλου και της τεχνικής πολυπλοκότητάς του. Πιο συγκεκριμένα, το μέγεθος ως βασική παράμετρος για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των στρόβιλων με μη συμβατικά υγρά, επηρεάζει πραγματικές διαστάσεις του στρόβιλου, όπως για παράδειγμα το ύψος της λεπίδας. Επιπλέον, η VFR συσχετίζεται αντίστροφα με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης. Έχει αναφερθεί ότι για την επίτευξη, για παράδειγμα, για ισεντροπικούς βαθμούς απόδοσης υψηλότερων από 80%, η τιμή του VFR πρέπει να είναι χαμηλότερη από 50.

Χαρακτηριστική είναι η τιμή της UA, καθώς καταδεικνύει το απαιτούμενο μέγεθος του εναλλάκτη θερμότητας. Μια υψηλή τιμή UA σημαίνει ότι χρειάζεται να μεταφερθεί περισσότερη θερμότητα μεταξύ των ρευμάτων του εναλλάκτη, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή αύξηση της θερμοκρασίας του εργαζόμενου ρεστού. Αυτό όμως έχει επιπτώσεις επί της συνολικής επιφάνειας του εναλλάκτη θερμότητας αλλά και επί του κόστους του(14).

### **3.1.2 Απλός Brayton κύκλος υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα**

#### **3.1.2.1 Παράμετροι αξιολόγησης των επιδόσεων**

Στον κύκλο Brayton εξετάζονται οι ίδιες παράμετροι που αναφέρθηκαν ανωτέρω, στον transcritical κύκλο, με την εξής διαφορά: η συμπίεση του ρεστού πραγματοποιείται στον συμπιεστή του συστήματος αεριοστρόβιλου και επομένως

ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό της καθαρής ισχύος και των εξεργειακών απωλειών του συμπιεστή.

Η ενέργεια που καταναλώνεται για την συμπίεση του υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα στον στρόβιλο είναι  $P_{comp}$  και συνεπώς η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στην γεννήτρια υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_{el,net} = \eta_G * (\eta_M P_{exp} - \left(\frac{P_{comp}}{\eta_M}\right)),$$
 όπου  $\eta_M$  και  $\eta_G$  ο βαθμός απόδοσης των στροβιλομηχανών και της γεννήτριας, αντίστοιχα.

Επιπλέον, οι εξεργειακές απώλειες στον συμπιεστή δίνονται από την κάτωθι σχέση:

$$I_{comp} = E_{in} - E_{out} + \dot{W}_{in}$$

### 3.1.3 Κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση.

Οι παράμετροι αξιολόγησης του συστήματος αυτού είναι ίδιες με αυτές του απλού κύκλου Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με αναγεννητή. Ωστόσο στον υπολογισμό της καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας προστίθεται και η ενέργεια που καταναλίσκεται στον συμπιεστή ανασυμπίεσης.

$$P_{el,net} = \eta_G * (\eta_M P_{exp} - \left(\frac{P_{Mcomp}}{\eta_M}\right) - \left(\frac{P_{Rcomp}}{\eta_M}\right))$$

Τέλος, προστίθενται και οι απώλειες εξέργειας στον δεύτερο συμπυκνωτή.

### 3.1.4 Συνδυασμένος κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.

#### 3.1.4.1 Παράμετροι αξιολόγησης επιδόσεων.

Οι παράμετροι αξιολόγησης του συστήματος είναι ο συνδυασμός των παραμέτρων του απλού κύκλου Brayton με αναγεννητή και του transcritical κύκλου διοξειδίου του άνθρακα. Επομένως η καθαρή ισχύς του συστήματος αποτελεί το άθροισμα της καθαρής ισχύος που παράγουν τα δύο συστήματα.

$$P_{el,net} = P_{el,net1} + P_{el,net2} = \eta_G * \left( \eta_M P_{exp} - \left(\frac{P_{comp}}{\eta_M}\right) \right) + (\eta_m \eta_G P_{exp} - \left(\frac{P_{pump}}{\eta_{motor}}\right))$$

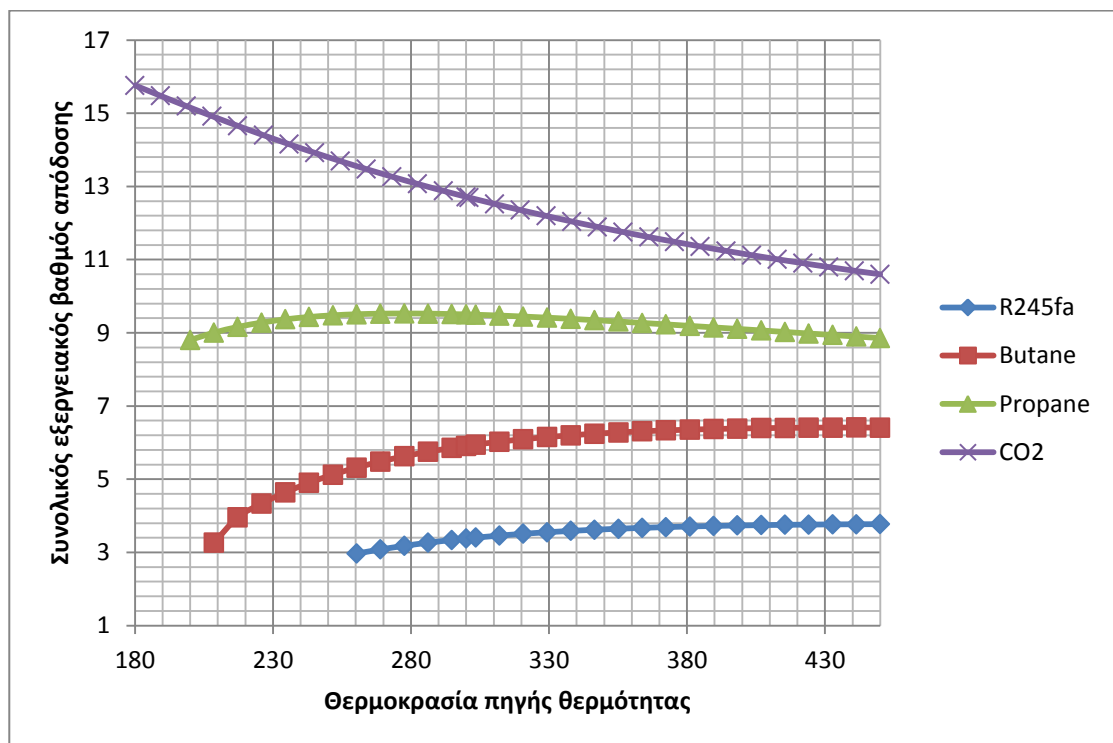
### 3.1.5 Συνδυασμένος κύκλος Brayton υπερκρίσιμο διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.

#### 3.1.5.1 Παράμετροι αξιολόγησης επιδόσεων.

Οι παράμετροι αξιολόγησης του συστήματος είναι ο συνδυασμός των παραμέτρων του κύκλου Brayton με ανασυμπίεση και του transcritical κύκλου διοξειδίου του άνθρακα. Επομένως η καθαρή ισχύς του συστήματος αποτελεί το άθροισμα της καθαρής ισχύος που παράγουν τα δύο συστήματα.

$$P_{el,net} = P_{el,net1} + P_{el,net2} =$$
$$= \eta_G * \left( \eta_M P_{exp} - \left( \frac{P_{Mcomp}}{\eta_M} \right) - \left( \frac{P_{Rcomp}}{\eta_M} \right) \right) + \left( \eta_m \eta_G P_{exp} - \left( \frac{P_{pump}}{\eta_{motor}} \right) \right)$$

## 3.2 Παραδοχές και Προσομοίωση



Εικόνα 14: Διάγραμμα εξεργειακού βαθμού απόδοσης-θερμοκρασίας πηγής θερμότητας εργαζόμενων ρευστών

Στο παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 14) παρουσιάζεται ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του διοξειδίου του άνθρακα, του R245fa, προπανίου και βουτανίου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία της πηγής θερμότητας για οργανικό κύκλο Rankine.

Για την δημιουργία του διαγράμματος, μέσω του προγράμματος Aspen Plus V8.0, λήφθηκαν οι εξής παραδοχές:

1. Η θερμοκρασία πηγής θερμότητας κυμαίνεται μεταξύ των 180-450 °C.
2. Ως μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου θεωρήθηκε η θερμοκρασία του κορεσμένου ατμού, όπου παρατηρείται μέγιστη εντροπία και μέγιστη πίεση λειτουργίας του κύκλου  $p_{\text{uma}}=1.3 \cdot p_{\text{rint}}$ .
3. Τέλος λαμβάνεται σημείο ανάσχεσης του ατμοποιητή και του συμπυκνωτή στα 35 K και 10 K αντιστοίχως.

Παρατηρείται λοιπόν, η μείωση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης του διοξειδίου του άνθρακα, ενώ για τα υπόλοιπα ρευστά αυξάνεται. Ωστόσο, είναι εμφανές ότι ο βαθμός απόδοσης του διοξειδίου του άνθρακα είναι μεγαλύτερος των άλλων οργανικών μέσων και επομένως δύναται να χρησιμοποιηθεί σε κύκλους με πηγές θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών.

Σαν εργαλείο προσομοίωσης των θερμοδυναμικών κύκλων και υπολογισμού των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε το πρόγραμμα Aspen Plus V 8.0.

### 3.2.1 Γενικές παραδοχές όλων των κύκλων

Όπως έχει αναφερθεί ανωτέρω, στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η συμπεριφορά του διοξειδίου του άνθρακα σε Transcritical και Brayton (απλός και με ανασυμπίεση) κύκλους παραγωγής ενέργειας. Για την καλύτερη αποτύπωση των αποτελεσμάτων, λήφθηκαν κάποιες γενικές παραδοχές που ισχύουν για το σύνολο των κύκλων. Οι κοινές παραδοχές που λήφθηκαν για όλα τα συστήματα είναι οι εξής:

1. Κάθε εξάρτημα θεωρείται ως σύστημα σταθερής κατάστασης-σταθερής ροής. Η δυναμική και κινητική ενέργεια του συστήματος παραλείπονται.
2. Αμελείται η πτώση πίεσης στους σωλήνες και στους εναλλάκτες θερμότητας (ατμοποιητής, αναγεννητής, συμπυκνωτής).
3. Η θερμοκρασία του υπέρθερμου διοξειδίου του άνθρακα, πριν από τον στρόβιλο, προσδιορίζεται από την μέγιστη εντροπία του κορεσμένου ατμού. Ειδικότερα, καθώς η εντροπία αυξάνεται συνεχώς, λαμβάνεται ως μέγιστη τιμή αυτή των 0 °C.
4. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της τουρμπίνας θεωρείται 0,89.

5. Το σημείο ανάσχεσης (PinchPoint, PP) του ατμοποιητή / θερμαντήρα, του αναγεννητή και του συμπυκνωτή/ψύκτη λαμβάνουν την τιμή των 35,10,10 K αντίστοιχα. Η επιλογή αυτής της παραμέτρου ενδείκνυται σε σχέση, με το βαθμό απόδοσης των εναλλακτών, διότι η αύξηση της θερμοκρασίας του ρεύματος, είναι πιθανό να μεταβάλει το βαθμό απόδοσής τους.
6. Η θερμοκρασία και η πίεση της πηγής θερμότητας είναι 300 °C και 2 bar αντιστοίχως, ενώ η παροχή πηγής θερμότητας ορίζεται στα 10 kg/sec.
7. Η θερμοκρασία και πίεση του νερού στην είσοδο του ψυχρού ρεύματος στον συμπυκνωτή και του ψύκτη είναι 10 °C και 2 bar.

Οι διαφορετικές παράμετροι για κάθε κύκλο περιγράφονται κατωτέρω αντιστοίχως.

### **3.2.2 Transcritical κύκλος διοξειδίου του άνθρακα**

Όπως έχει αναφερθεί ανωτέρω, στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται δύο διαμορφώσεις του Transcritical κύκλου παραγωγής ενέργειας διοξειδίου του άνθρακα (TCO<sub>2</sub> και TCO<sub>2</sub> με αναγεννητή). Οι βασικές παραδοχές που λήφθηκαν υπ' όψιν είναι οι εξής:

1. Στον κύκλο εισέρχεται κεκορεσμένο διοξείδιο του άνθρακα στα 60 bar (vapor fraction =0).
2. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της αντλίας θεωρείται 0,8.
3. Ο ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης ατράκτου-στροβίλου και ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα της αντλίας ορίζεται 0,95 και 0,85, αντίστοιχα.
4. Το σημείο ανάσχεσης (PinchPoint, PP) του ατμοποιητή, του αναγεννητή και του συμπυκνωτή λαμβάνουν την τιμή των 35,10,10 K αντίστοιχα.

### **3.2.3 Απλός Brayton κύκλος υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα**

Στην παρούσα εξετάστηκαν δύο εκδοχές του απλού Brayton κύκλου παραγωγής ενέργειας διοξειδίου του άνθρακα (SCO<sub>2</sub> και SCO<sub>2</sub> με αναγεννητή). Οι βασικές παραδοχές που λήφθηκαν υπ' όψιν είναι οι εξής:



1. Στον κύκλο εισέρχεται υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα πίεσης 100 bar και θερμοκρασίας 32 °C .
2. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της τουρμπίνας και του συμπιεστή θεωρείται 0,89 και 0,87, αντίστοιχα .
3. Ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας και ο μηχανικός βαθμός απόδοσης των στροβιλομηχανών λαμβάνεται 0,98.
4. Το σημείο ανάσχεσης (PinchPoint, PP) του θερμαντήρα, του αναγεννητή και του ψύκτη λαμβάνουν την τιμή των 35,10,10 K αντίστοιχα.

### **3.2.4 Brayton κύκλος υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση**

Στη συνέχεια απεικονίζεται ο κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση και παρατίθενται οι βασικές παραδοχές λειτουργίας του κύκλου:

1. Στον κύκλο εισέρχεται υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα πίεσης 100bar και θερμοκρασίας 32 °C.
2. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της τουρμπίνας και των δύο συμπιεστών θεωρείται 0,89 και 0,87, αντίστοιχα .
3. Ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας και ο μηχανικός βαθμός απόδοσης των στροβιλομηχανών λαμβάνεται 0,98.
4. Το σημείο ανάσχεσης (PinchPoint, PP) του θερμαντήρα, του αναγεννητή και του ψύκτη λαμβάνουν την τιμή των 35,10,10 K αντίστοιχα.
5. Το ποσό της παροχής μάζας που απομαστεύεται πριν τον ψύκτη και οδηγείται στο συμπιεστή ανασυμπίεσης θεωρείται 0,1 της αρχικής μάζας.

### **3.2.5 Συνδυασμένοι κύκλοι Brayton κύκλου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα**

Μελετώνται στη συνέχεια, δύο μορφές συνδυασμένων κύκλων Brayton κύκλου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical, δηλαδή ο απλός και αυτός με ανασυμπίεση.

Αναφορικά με τις συνθήκες λειτουργίας των συνδυασμένων κύκλων Brayton με αυτόν του transcritical κύκλου διοξειδίου του άνθρακα προκύπτουν τα εξής: Οι παραδοχές που διέπουν το σύστημα είναι αυτές του Brayton κύκλου με ανασυμπίεση και αυτές του transcritical κύκλου διοξειδίου του άνθρακα, με τις αντίστοιχες ποσοτικές διαφοροποιήσεις. Όσον αφορά τον transcritical κύκλο, το

κεκορεσμένο διοξείδιο εισέρχεται στα 65 bar και παροχή μάζας 10 kg/sec, ενώ αυτό συμπιέζεται στα 85 bar. Το σημείο ανάσχεσης του εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας λαμβάνεται 10 K, ενώ στο συνδυασμένο κύκλο με ανασυμπίεση το σημείο ανάσχεσης του αναγεννητή υψηλής θερμοκρασίας λαμβάνεται 5 K.

Στο Παράρτημα Α' παρατίθεται ο συγκεντρωτικός πίνακας των παραδοχών που αναλύθηκαν ανά κύκλο.

## 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ανακεφαλαιώνοντας, για την αξιολόγηση των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίστηκαν οι εξής παράμετροι:

- Ο θερμικός βαθμός απόδοσης
- Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης και
- Οι τεχνικές παράμετροι  $\eta$ , VFR και UA.

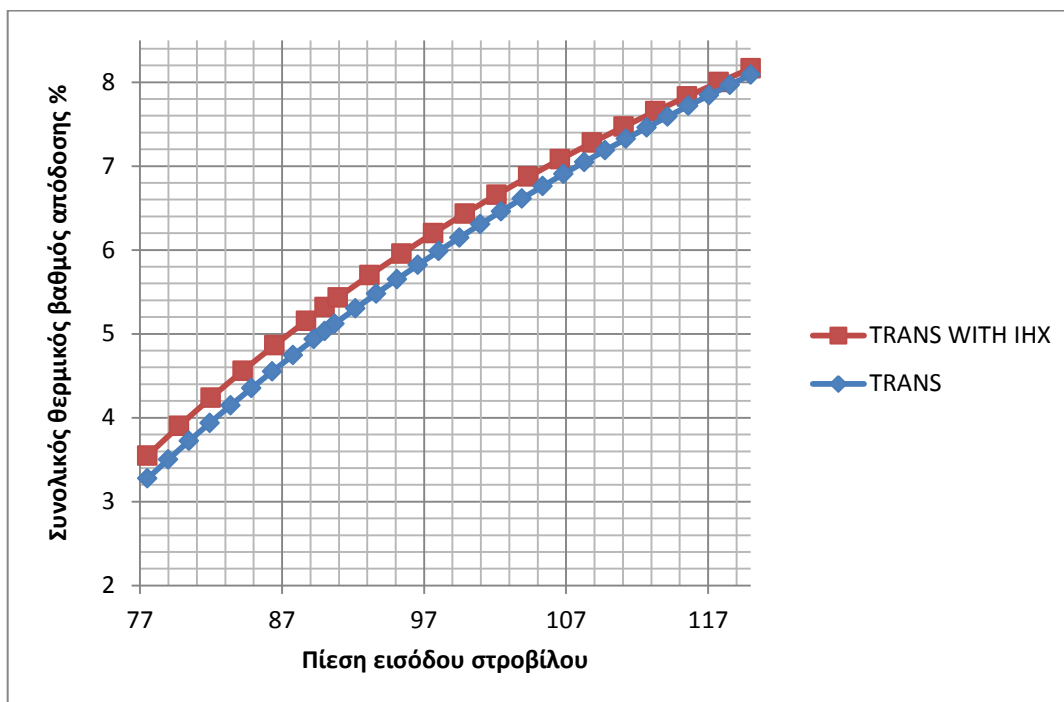
Ως υπολογιστικά βοηθήματα χρησιμοποιήθηκαν το πρόγραμμα Aspen Plus V8.0, με το οποίο προσομοιώθηκε κάθε κύκλος και υπολογίστηκαν οι παραπάνω παράμετροι, καθώς και το Microsoft Excel 2010. Οι βαθμοί απόδοσης απεικονίζονται με τη μορφή διαγραμμάτων, ενώ οι παράμετροι  $\eta$ , VFR και UA επισυνάπτονται συγκεντρωτικά στο Παράρτημα Α.

Οι ιδιότητες του ρευστού (θερμοκρασία- πίεση-παροχή) στις συνθήκες προσομοίωσης του εκάστοτε κύκλου που υπολογίστηκαν με το πρόγραμμα Aspen, παρουσιάζονται σε κάθε θέση του συστήματος με μονογραμμικά διαγράμματα. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων για τα χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων.

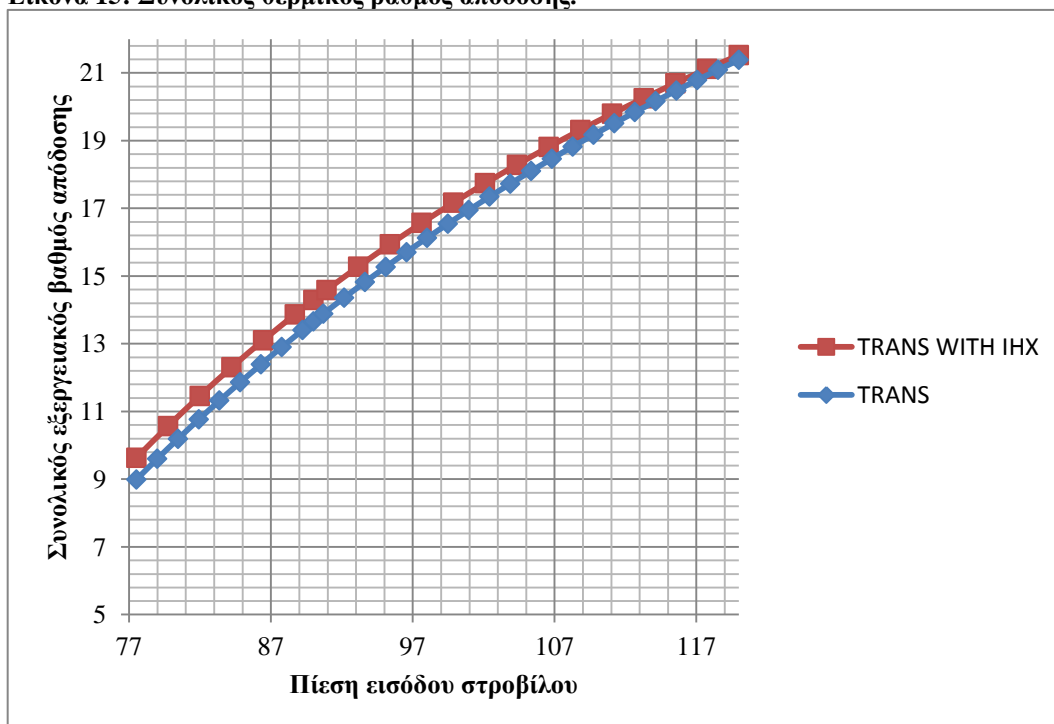
Από την άλλη, τα ενεργειακά ισοζύγια των τεχνικών συστημάτων παραστάθηκαν με διαγράμματα ροής Sankey. Τα διαγράμματα αυτά επιτρέπουν την ποσοτική περιγραφή διεργασιών του συστήματος για μετατροπή και χρήση ενέργειας και δίνουν μια καλή σύνοψη της τελικής επιθυμητής ενέργειας, με τη γραφική παρουσίαση των εμφανιζόμενων ροών ενέργειας καθώς και των ροών απώλειας ενέργειας που παρατηρούνται στο σύστημα. Είναι, επομένως, κατάλληλα για τη σύγκριση των ενεργειακών συστημάτων της παρούσας διπλωματικής. Σκοπός των διαγραμμάτων αυτών, όπως άλλωστε και των ενεργειακών ισοζυγίων γενικότερα, είναι να διευκολύνουν τη βελτιστοποίηση της σχέσης τελικής επιθυμητής και χρησιμοποιούμενης ενέργειας με τις ροές ενέργειας, τις απώλειες και τις δυνατότητες εξοικονόμησης, ώστε να μπορέσουμε να βελτιστοποιήσουμε ένα τεχνικό σύστημα. Η παραστατική παρουσίαση των διαγραμμάτων Sankey και των μονογραμμικών των κύκλων έγινε με το πρόγραμμα Visio 2013.

## 4.1 Transcritical κύκλος διοξειδίου του άνθρακα

Στα κάτωθι διαγράμματα, απεικονίζονται ο θερμικός και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης των δύο transcritical συστημάτων συναρτήσει της πίεσης εισόδου του στροβίλου.



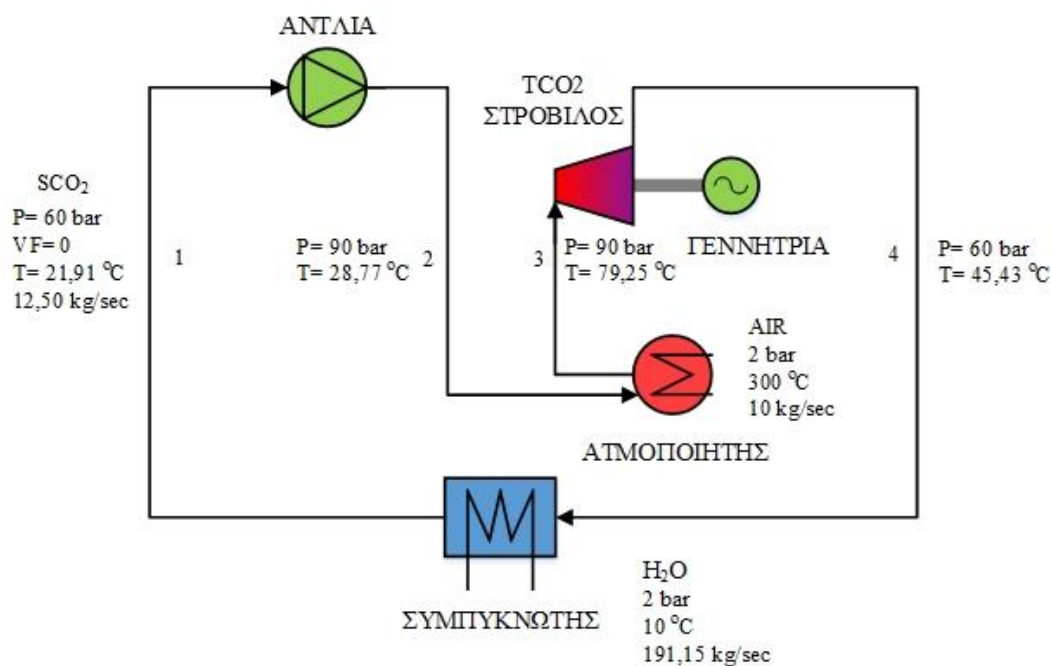
Εικόνα 15: Συνολικός θερμικός βαθμός απόδοσης.



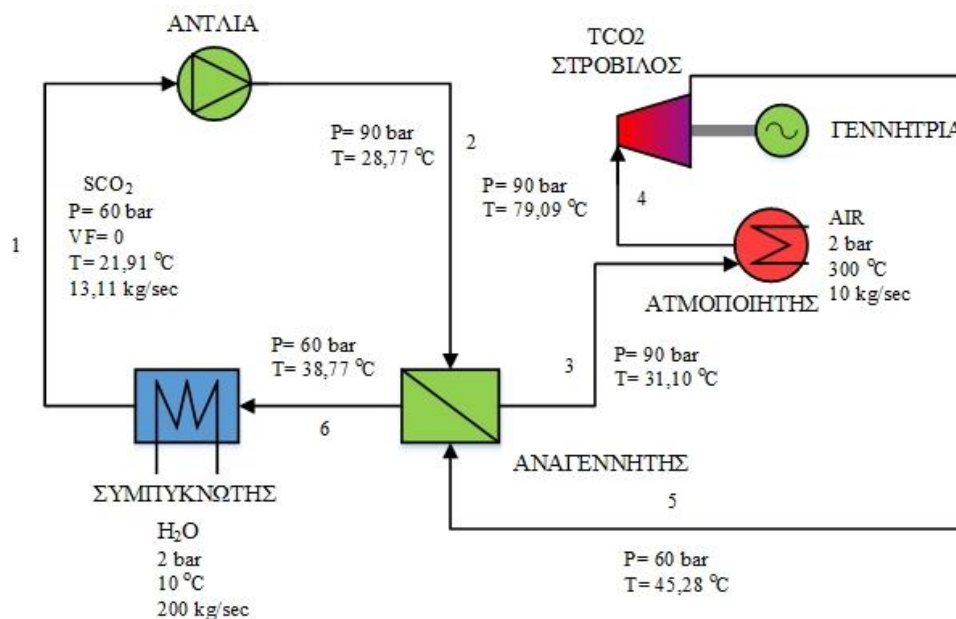
Εικόνα 16: Εισαγωγή συνολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης

Αυξάνοντας την πίεση του ρεύματος του διοξειδίου του άνθρακα πριν από τον στρόβιλο παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του συνολικού θερμικού και του εξεργειακού βαθμού απόδοσης και των δύο συστημάτων. Στο διάγραμμα αποτυπώνεται η θετική συμβολή του αναγεννητή στην απόδοση του κύκλου. Ωστόσο σε μεγαλύτερες πιέσεις η διαφορά τείνει να γίνει αμελητέα. Ειδικότερα, στην αρχική πίεση των 77,5 bar η διαφορά είναι της τάξης του 9,23% για τον θερμικό και 7,12% για τον εξεργειακό βαθμό, ενώ στην μέγιστη πίεση των 120 bar είναι 1,00% και 0,65% αντίστοιχα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα μονογραμμικά διαγράμματα των δύο κύκλων για πίεση λειτουργίας 90 bar. Το εύρος που μελετήθηκε για τους βαθμούς απόδοσης είναι 77,5bar έως 120 bar. Στα 120 bar παρατηρείται μέγιστος θερμικός βαθμός απόδοσης 8,16 % και 8,09% για τον κύκλο με αναγεννητή και τον απλό αντίστοιχα. Αντίστοιχα οι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης είναι 21,53 % και 21,39%. Το εύρος αυτό επιλέχθηκε προκειμένου να μπορεί να γίνει αξιολόγηση και με τους παρακάτω κύκλους.



Εικόνα 17 Μονογραμμικό διάγραμμα του Transcritical κύκλου CO<sub>2</sub>

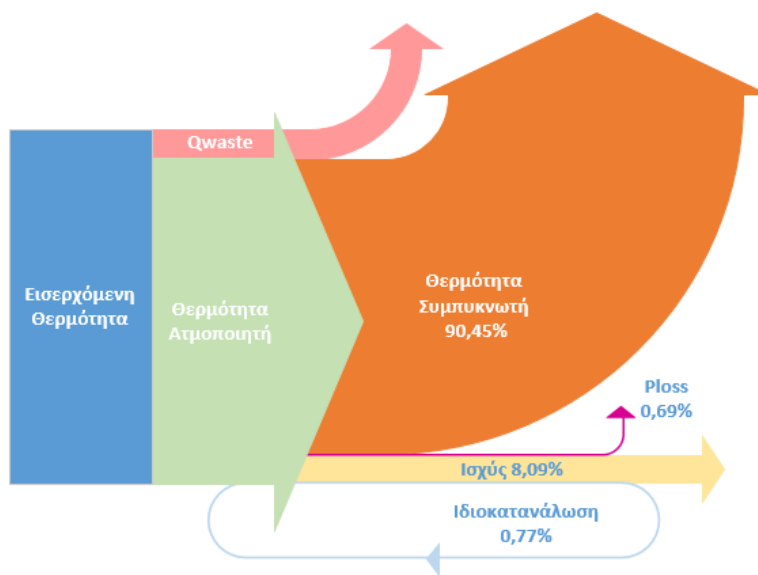


**Εικόνα 18 Μονογραμμικό διάγραμμα του Transcritical κύκλου CO<sub>2</sub> με αναγεννητή**

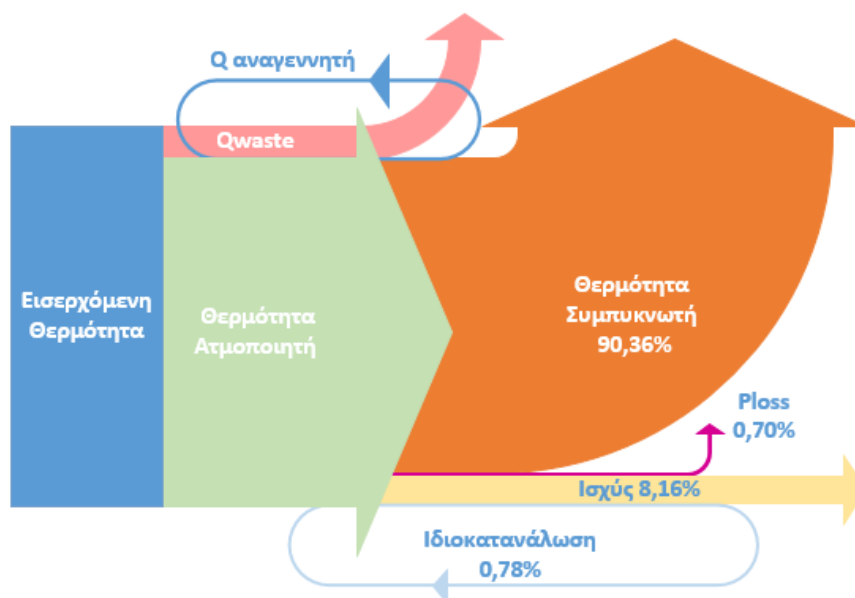
Ο θερμικός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης των δύο συστημάτων παρουσιάζει μικρή απόκλιση, ενώ η ύπαρξη του αναγεννητή βελτιώνει ελάχιστα και τον συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η επίδραση του recuperator σε transcritical κύκλους διοξειδίου του άνθρακα φαίνεται να είναι αμελητέα. Παράλληλα, διαπιστώνουμε χαμηλή τιμή UA στον αναγεννητή ( $UA_{rec}=2,38 \text{ kW/m}^2$ ), και με αυτόν τον τρόπο μειώνεται το μέγεθός του.. Ακόμη, παρατηρούμε ότι η παροχή μάζας στον συμπυκνώτη είναι πολύ μεγάλη (191 και 200 Kg/sec, αντίστοιχα) και επομένως επηρεάζεται σημαντικά το μέγεθός του, το οποίο διαφαίνεται και από την τιμή του UA του συμπυκνωτή, η οποία είναι  $175 \text{ kW/m}^2$ . Ο VFR και το  $\eta$  επηρεάζουν το μέγεθος και λειτουργία του στροβίλου, στα πλαίσια του αποδεκτού. Συγκεκριμένα ο VFR υπολογίζεται 1,33 (μικρότερος από 50) και στις δύο περιπτώσεις, ενώ το  $\eta$  υπολογίζεται 510 rpm στα 90 bar.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα Sankey ροής ενέργειας και εξεργειας των δύο transcritical κύκλων. Τα δύο διαγράμματα ροής ενέργειας είναι παρεμφερή. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το μεγαλύτερο μέρος της εισερχόμενης ενέργειας και στις δύο περιπτώσεις δαπανάται για την ψύξη του εργαζόμενου ρευστού (91,07% και 90,3% αντίστοιχα), ενώ ηλεκτρομηχανικές απώλειες και η ιδιοκατανάλωση του συστήματος δεν ξεπερνούν συνολικά το 1,5% σε κάθε περίπτωση.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα Sankey ροής ενέργειας και εξέργειας των δύο transcritical κύκλων. Τα δύο διαγράμματα ροής ενέργειας είναι παρεμφερή. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το μεγαλύτερο μέρος της εισερχόμενης ενέργειας και στις δύο περιπτώσεις δαπανάται για την ψύξη του εργαζόμενου ρευστού (90.45% και 90,36% αντίστοιχα), ενώ ηλεκτρομηχανικές απώλειες και η ιδιοκατανάλωση του συστήματος δεν ξεπερνούν συνολικά το 1,5% σε κάθε περίπτωση.

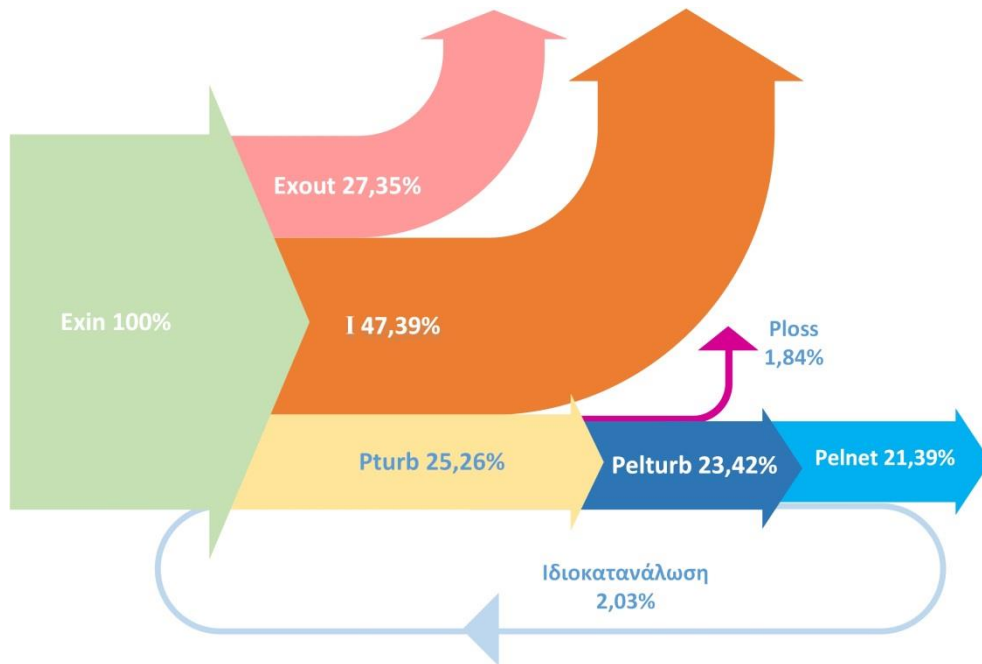


Εικόνα 19: Ροή ενέργειας transcritical κύκλου διοξειδίου του άνθρακα χωρίς αναγεννητή

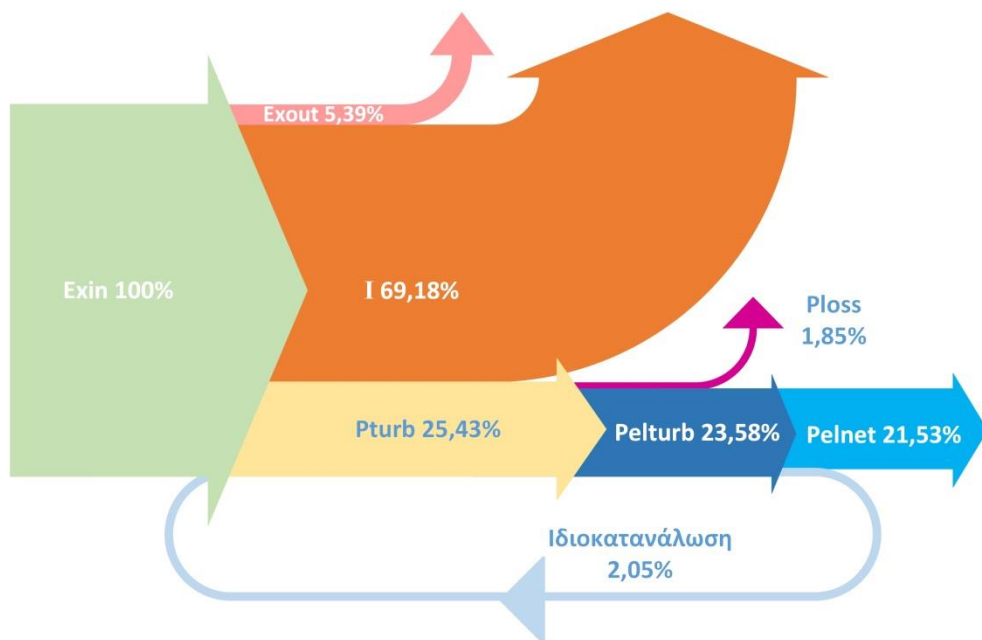


Εικόνα 20: Ροή ενέργειας transcritical κύκλου διοξειδίου του άνθρακα με αναγεννητή

Ωστόσο, τα διαγράμματα ροής εξέργειας παρουσιάζουν ουσιαστικές αλλαγές με την προσθήκη του αναγεννητή. Παρατηρούμε ότι η παρουσία του αναγεννητή αυξάνει τις απώλειες εξέργειας του ατμοποιητή κρατώντας σχεδόν σταθερό τον βαθμό απόδοσης του συνολικού συτήματος.ενώ



Εικόνα 21: Διάγραμμα Grassmann ροής εξέργειας χωρίς αναγεννητή

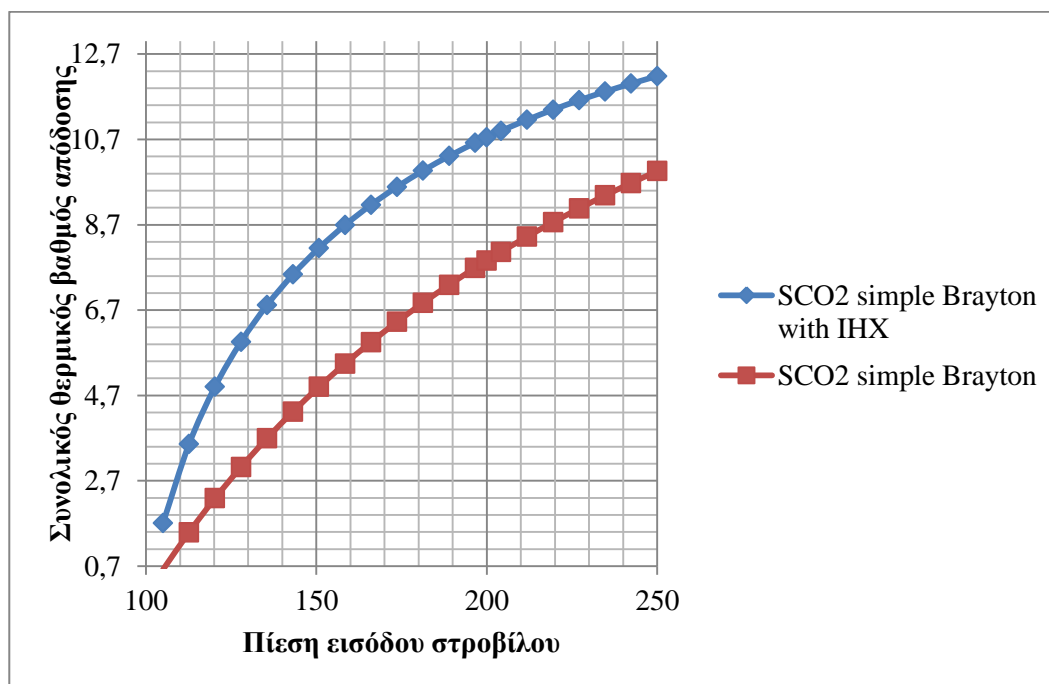


Εικόνα 22: Διάγραμμα Grassmann ροής εξέργειας με αναγεννητή

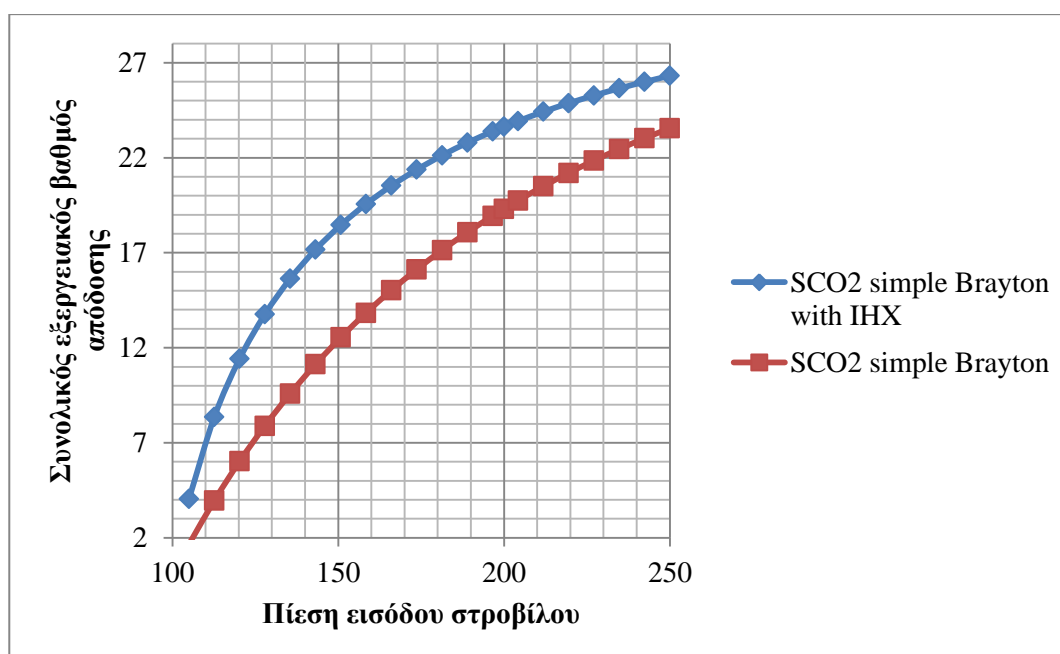


## 4.2 Απλός Brayton κύκλος υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα

Στα κάτωθι διαγράμματα, απεικονίζονται ο θερμικός και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης των δύο συστημάτων αεροστοβίλου συναρτήσει της πίεσης εισόδου του στροβίλου.



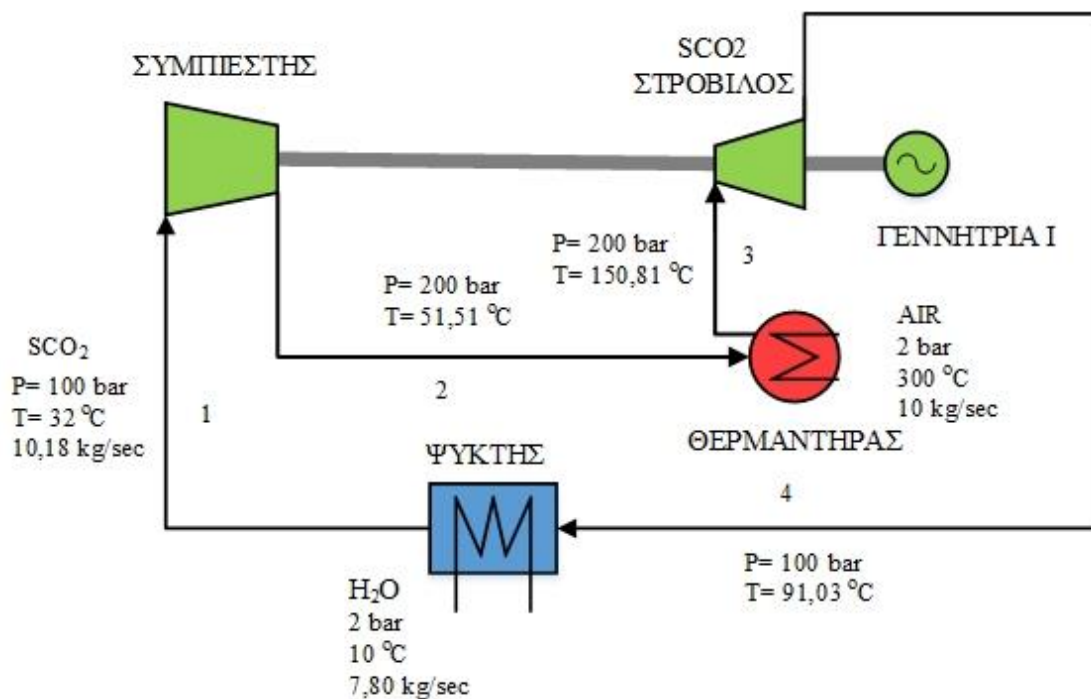
Εικόνα 23: Συνολικός θερμικός βαθμός απόδοσης



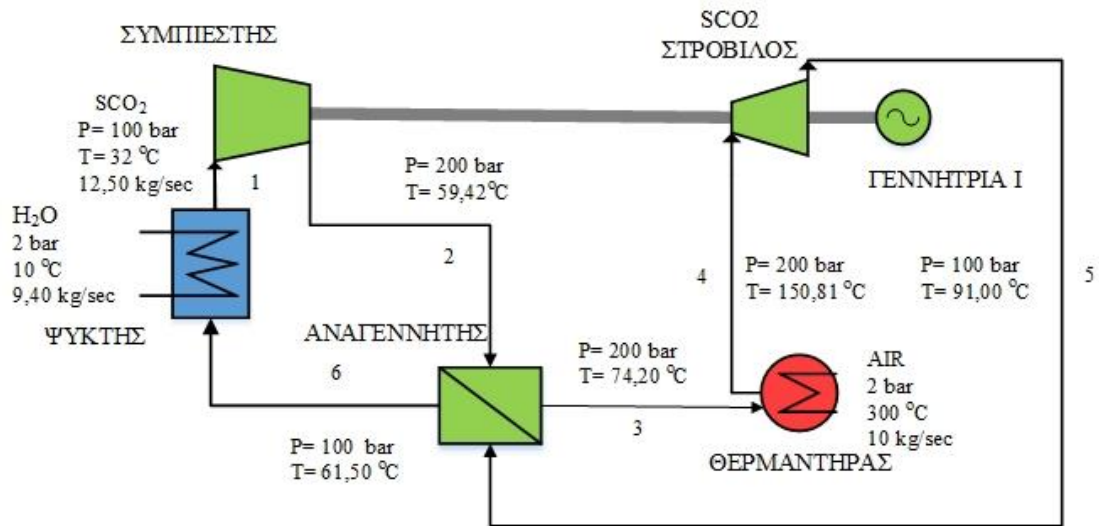
Εικόνα 24: Εισαγωγή συνολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης

Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις του απλού κύκλου Brayton, παρατηρούμε ότι και ο θερμικός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης αυξάνονται. Διαπιστώνουμε ότι η ύπαρξη του αναγεννητή βελτιώνει εμφανώς τους βαθμούς απόδοσης, ενώ στα 200 bar οι τιμές διαμορφώνονται ως εξής: χωρίς αναγεννητή στο 7,86 ενώ με αναγεννητή 10,75. Σύμφωνα με τα άνωθεν διαγράμματα, βέλτιστη πίεση λειτουργίας του συστήματος είναι τα 250 bar και για τους δυο κύκλους. Ο αναγεννητής κρίνεται απαραίτητος για τη βέλτιστη λειτουργία των κύκλων αυτών προσθέτοντας σταθερότητα στο σύστημα. Ο μέγιστος θερμικός βαθμός απόδοσης είναι 9,95 % και ο εξεργειακός 23,55% για τον απλό κύκλο χωρίς αναγεννητή και παρατηρείται στα 250 bar. Ενώ για τον απλό κύκλο με αναγεννητή οι τιμές αυξάνονται και διαμορφώνονται στα 12,18% και 26,31% αντίστοιχα. Όσον αφορά τις τιμές των τεχνικών παραμέτρων, οι στροφές και ο VFR παρουσιάζουν αρκετά χαμηλές τιμές. Ωστόσο, παρατηρούμε υψηλή τιμή στον συμπυκνωτή και τον αναγεννητή.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα μονογραμμικά διαγράμματα των δύο κύκλων για πίεση λειτουργίας 200 bar.



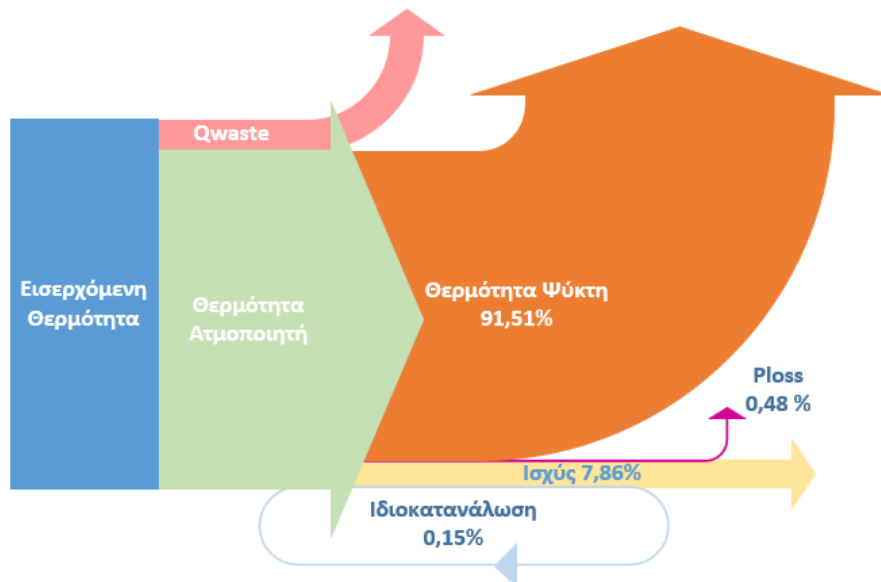
Εικόνα 25 Μονογραμμικό διάγραμμα απλού Brayton SCO<sub>2</sub> χωρίς αναγεννητή.



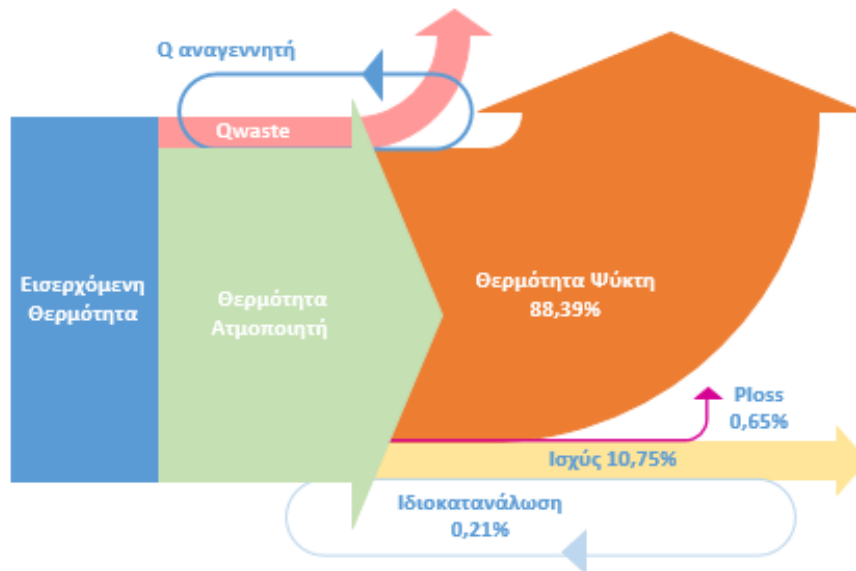
Εικόνα 26 Μονογραμμικό διάγραμμα απλού Brayton  $\text{SCO}_2$  με αναγεννητή.

Τα υπόλοιπα μεγέθη, σύμφωνα με τις παραδοχές και τον συγκεντρωτικό πίνακα είναι μέσα σε αποδεκτά όρια.

Αντίστοιχα και με τους κύκλους transcritical παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της θερμότητας που εισάγεται στο σύστημα, οδηγείται στο συμπυκνωτή. Οι ηλεκτρομηχανικές απώλειες συνεχίζουν να είναι μικρές, ενώ παρατηρούμε μεγαλύτερο βαθμό στον κύκλο με αναγεννητή.

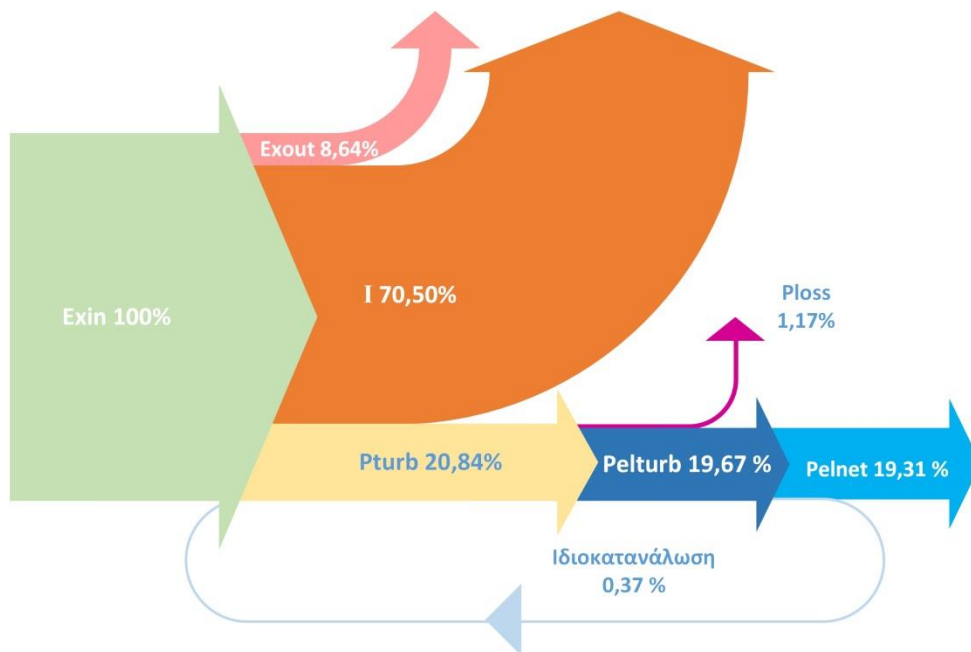


Εικόνα 27: Διάγραμμα Sankey ροής ενέργειας Brayton χωρίς αναγεννητή.

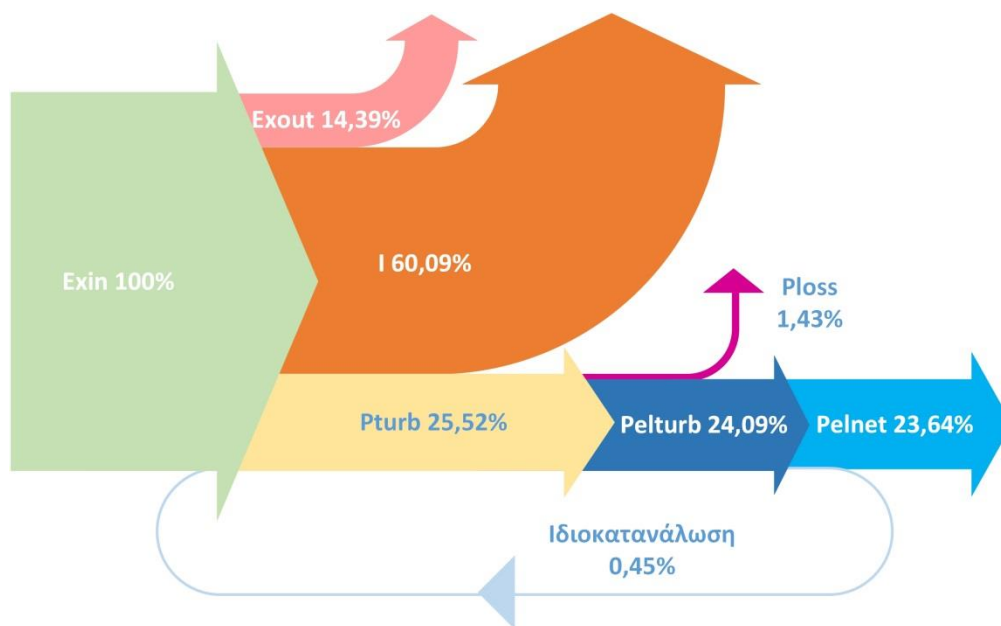


**Εικόνα 28: Διάγραμμα Sankey ροής ενέργειας Brayton με αναγεννητή**

Ακολουθούν τα διαγράμματα ροής εξέργειας, όπου παρατηρούμε ότι ο αναγεννητής βελτιώνει σημαντικά το βαθμό απόδοσης του συστήματος ενώ ταυτόχρονα, μειώνει την εξέργεια στα καυσαέρια καθώς και τις συνολικές απώλειες εξέργειας των συσκευών. Από τον ΠΙΝΑΚΑ 3 παρατηρούμε ότι μειώνεται το ποσοστό στον ατμοποιητή και στον ψύκτη, ενώ το ποσοστό της τουρμπίνας παρουσιάζει μικρή αύξηση, κατά 0,33%.



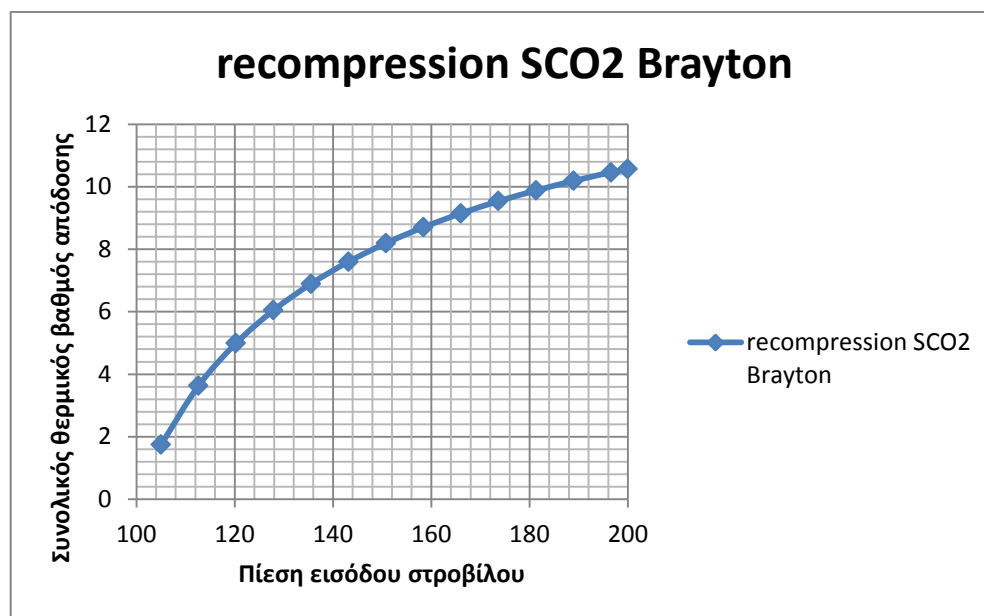
Εικόνα 29 Διάγραμμα Grassmann ροής εξέργειας Brayton χωρίς αναγεννητή.



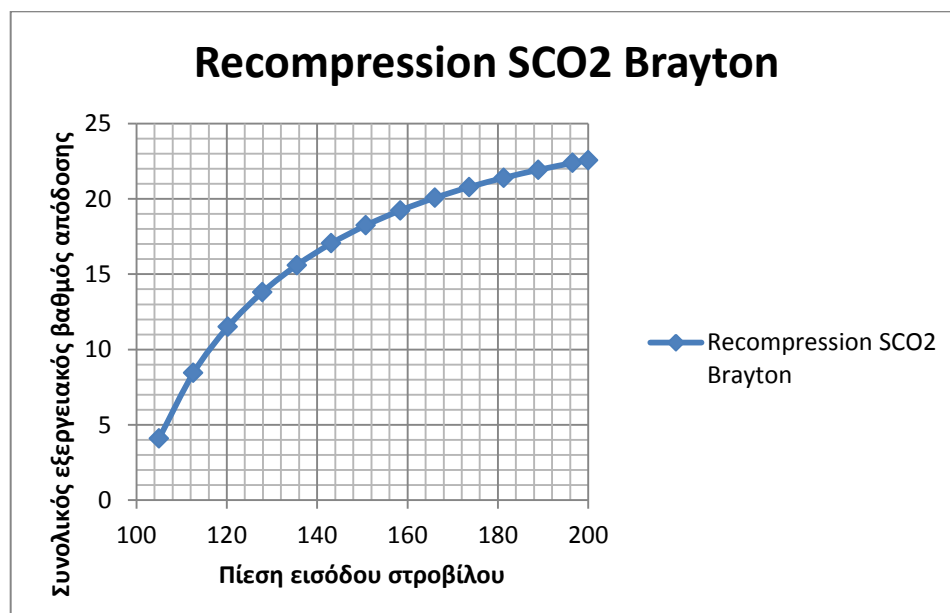
Εικόνα 30: Διάγραμμα Grassmann ροής ενέργειας Brayton με αναγεννητή

### 4.3 Κύκλος Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση

Στα κάτωθι διαγράμματα, απεικονίζονται ο θερμικός και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του κύκλου Brayton υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση.



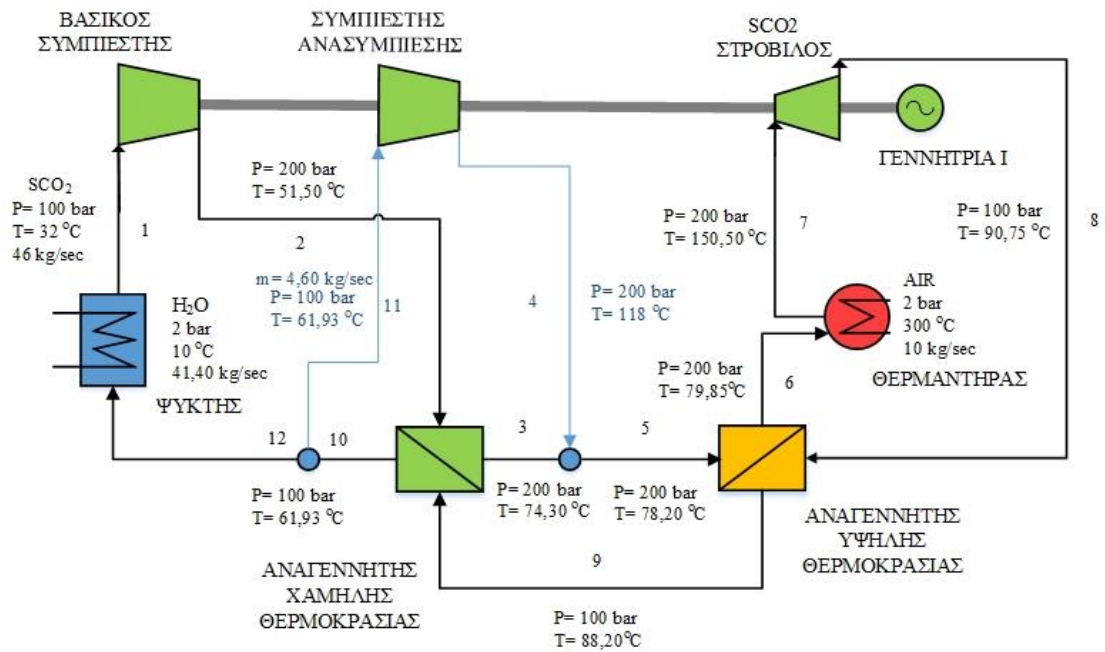
Εικόνα 31: Διάγραμμα Συνολικού Θερμικού βαθμού απόδοσης



Εικόνα 32: Διάγραμμα Συνολικού Εξεργειακού βαθμού απόδοσης

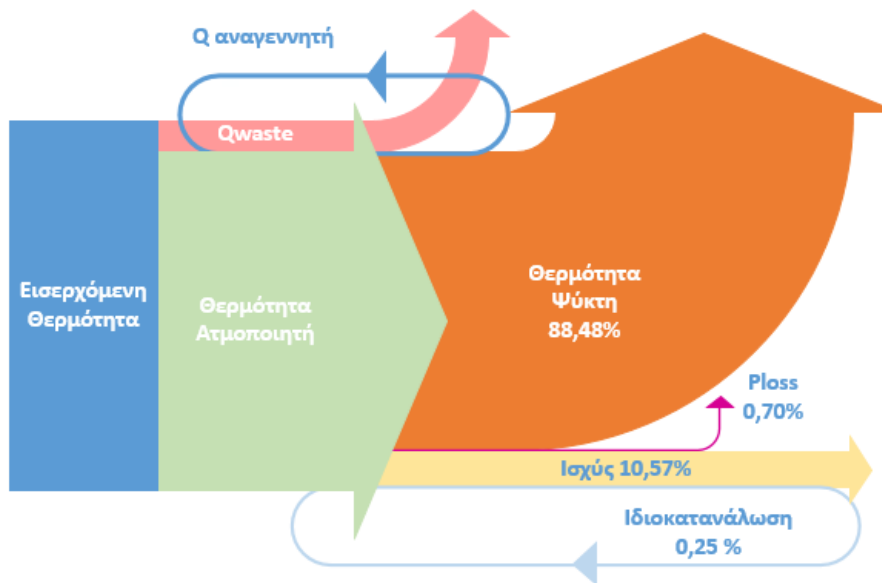
Αυξάνοντας την πίεση του ρεύματος του διοξειδίου του άνθρακα πριν από τον στρόβιλο παρατηρούμε ότι ο θερμικός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης του κύκλου με ανασυμπίεση αυξάνεται μέχρι την τιμή των 204 bar. Για μεγαλύτερες πιέσεις ο κύκλος δεν δύναται να λειτουργήσει για την δεδομένη θερμοκρασία πηγής θερμότητας βαθμός απόδοσης των δυο κύκλων συγκλίνει μέχρι τα 200 bar καθώς μετά δε δύναται να λειτουργήσει ο κύκλος με ανασυμπίεση σε χαμηλές θερμοκρασίες πηγής θερμότητας. Συγκεκριμένα, πρόβλημα στην λειτουργία του παρουσιάζει ο αναγεννητής υψηλής πίεσης, καθώς αδυνατεί να εντοπίσει το δοθέν σημείο ανάσχεσης. Περαιτέρω μείωση, του σημείου ανάσχεσης οδηγεί στην χρήση πολύ μεγάλου εναλλάκτη, γεγονός καθιστά μη σκόπιμη την χρήση του. αδυνατεί να λειτουργήσει ο αναγεννητής υψηλής θερμοκρασίας στο ορισμένο σημείο ανάσχεσης. Παράλληλα για του εύρωστη λειτουργία του κύκλου μπορώ να ανασυμπίεσω μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής παροχής, το οποίο δεν ξεπερνά το 0,1%. Οι τιμές του  $\eta$  και του VFR είναι στο σύνολο του αποδεκτές, καθώς και οι τιμές του UA του κάθε εναλλάκτη. Συνεπώς δεν επηρεάζεται το μέγεθος τους. Το  $\eta$  και το VFR είναι αποδεκτές οι τιμές τους. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι εμφανώς χαμηλότερος από αυτόν του απλού και επομένως για τις θερμοκρασίες αυτές είναι καταλληλότερο να χρησιμοποιήσουμε τον απλό. Υπολογίσαμε μέγιστο θερμικό βαθμό απόδοσης 10,7% και μέγιστο εξεργειακό 22,78% στα 204 bar.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μονογραμμικό διάγραμμα αυτού του κύκλου για πίεση λειτουργίας 200 bar.



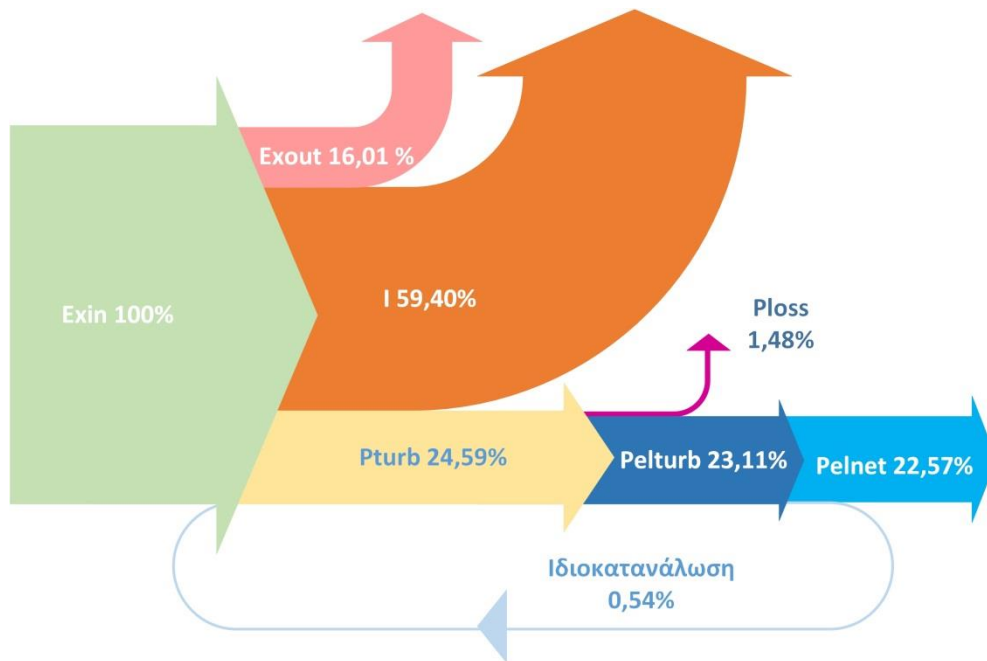
Εικόνα 33: Μονογραμμικό Διαγράμμα Brayton με ανασυμπίεση

Συγκρίνοντας τα προηγούμενα διαγράμματα Sankey ενέργειας και εξέργειας του απλού κύκλου Brayton με αναγεννητή παρατηρούμε ότι οι διαφορές είναι σχεδόν μηδαμινές.



Εικόνα 34: Διάγραμμα Sankey ροής ενέργειας Brayton με ανασυμπίεση

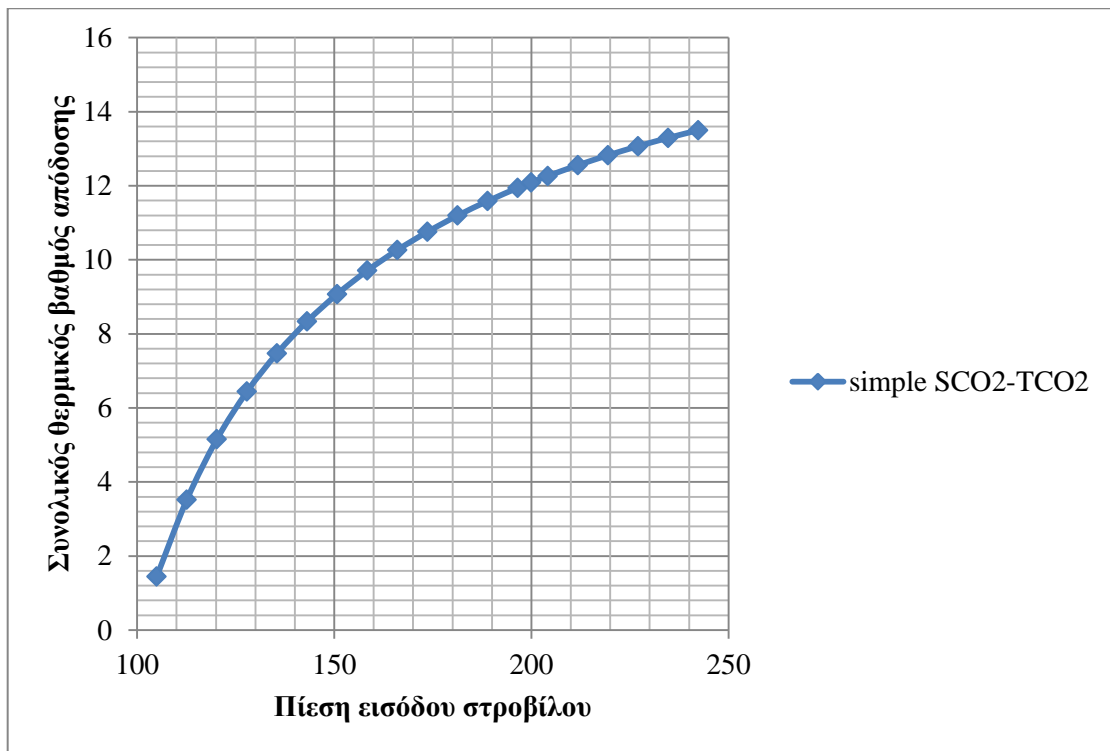




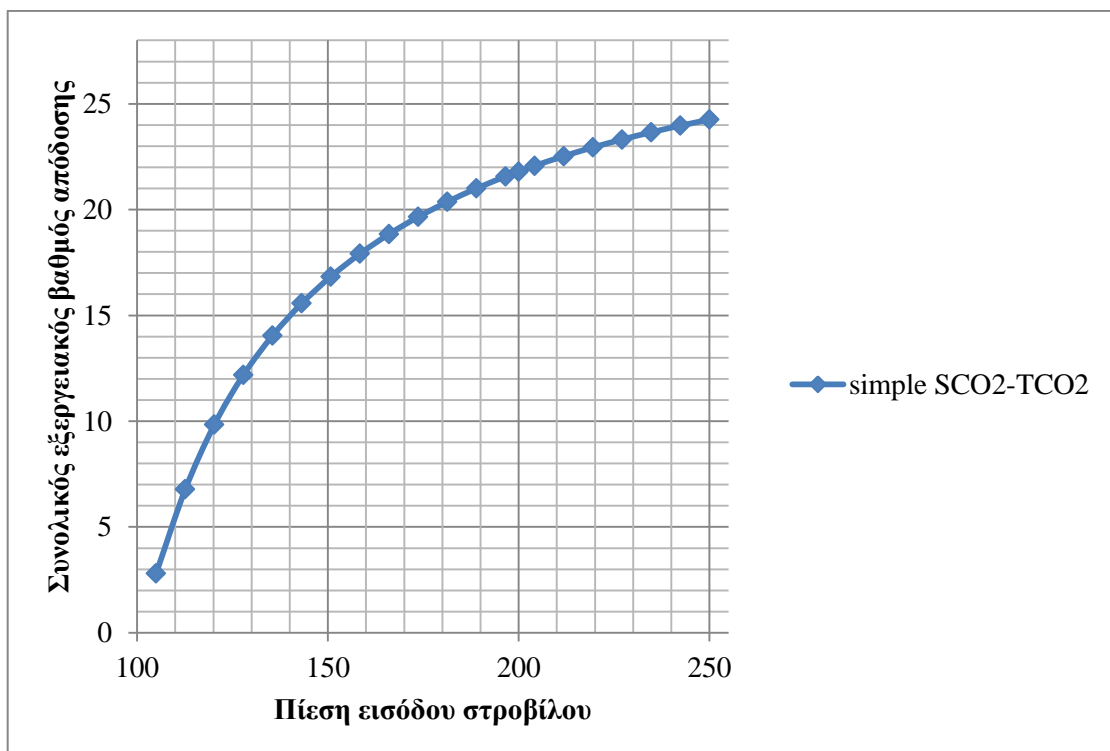
Εικόνα 35: Διάγραμμα Grassmann ροής εξέργειας Brayton με ανασυμπίεση

#### 4.4 Συνδυασμένος κύκλος απλού Brayton κύκλου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα

Στα κάτωθι διαγράμματα, απεικονίζονται ο θερμικός και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του απλού Brayton κύκλου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα.



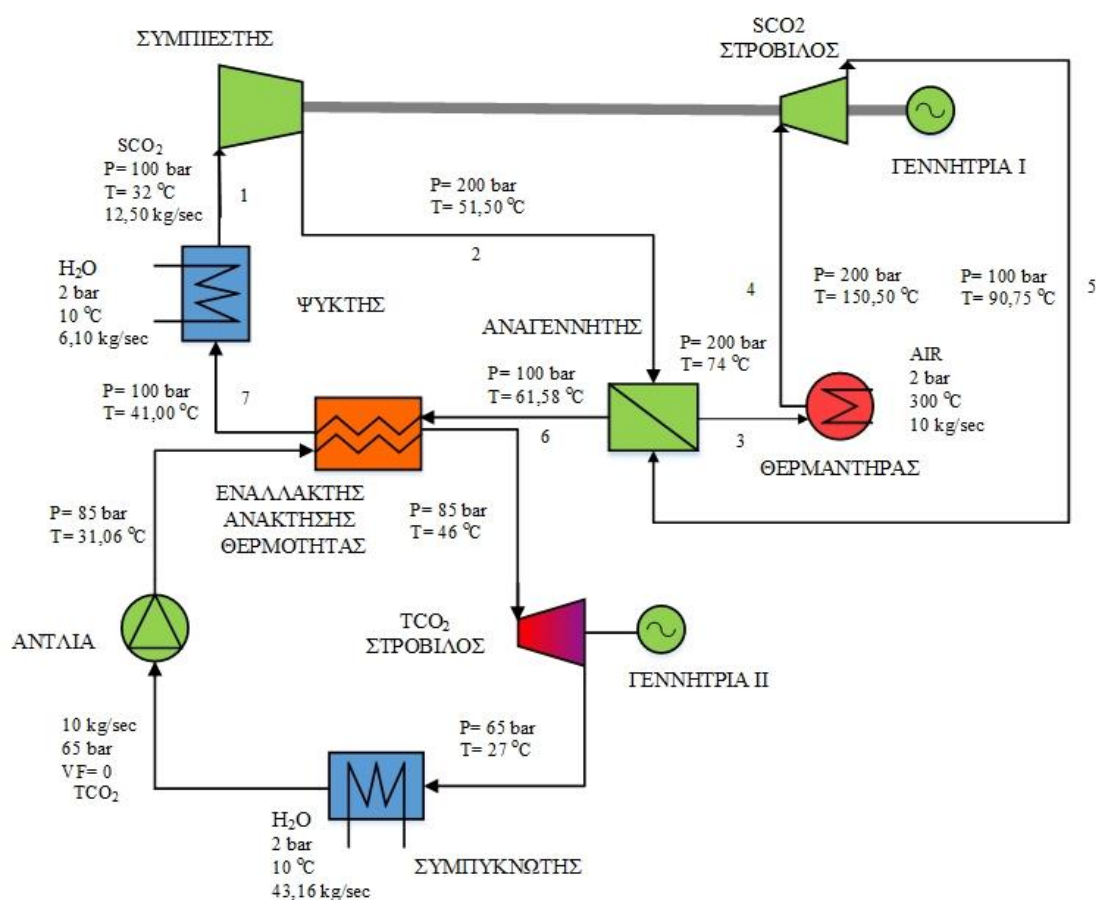
Εικόνα 36: Διάγραμμα συνολικού Θερμικού βαθμού απόδοσης



Εικόνα 37: Διάγραμμα Συνολικού Εξεργειακού βαθμού απόδοσης

Αυξάνοντας την πίεση του ρεύματος του διοξειδίου του άνθρακα πριν από τον στρόβιλο παρατηρούμε ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται. Το σύστημα κάτω των 125 bar Οι τιμές των UA είναι σε πολύ ικανοποιητικό επίπεδο, ενώ τα VFR δεν ξεπερνούν το 1,8. Επομένως, τεχνικές παραμέτρους του κύκλου, αυτές είναι αποδεκτές. Ο κύκλος αυτός δε μπορεί να λειτουργήσει για κάτω από 125 bar καθώς παραβιάζεται η συνθήκη των στροφών στο δεύτερο στρόβιλο. Παρατηρήσαμε μέγιστο θερμικό βαθμό απόδοσης 13,7% και μέγιστο εξεργειακό 24,25%, στα 250 bar.

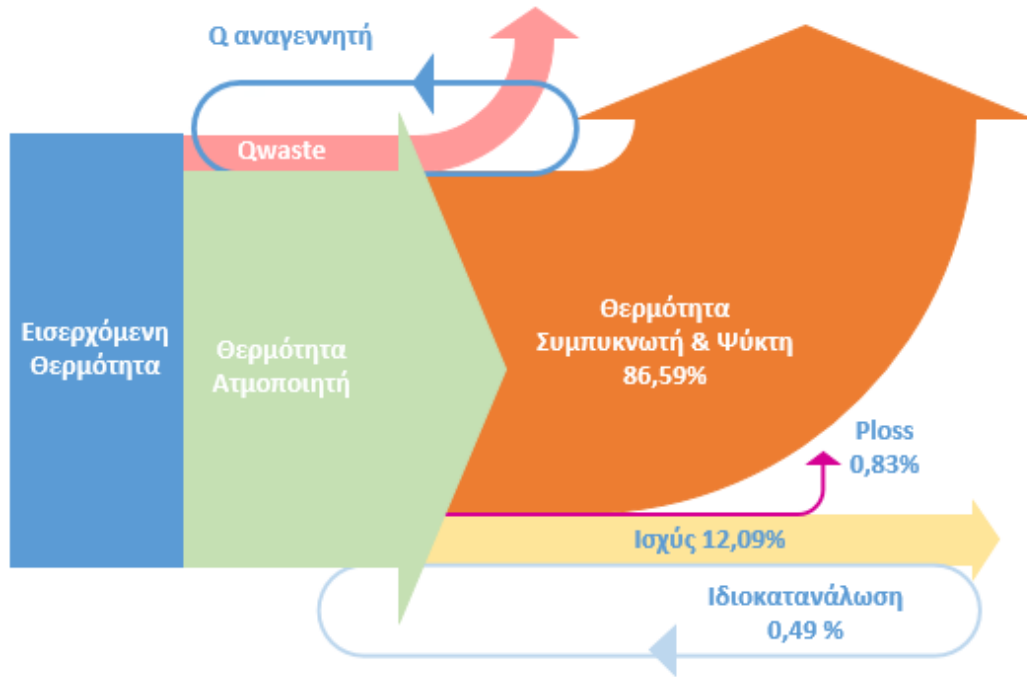
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μονογραμμικό διάγραμμα αυτού του κύκλου για πίεση λειτουργίας 200 bar, όπως ορίσαμε στις συνθήκες προσομοίωσης.



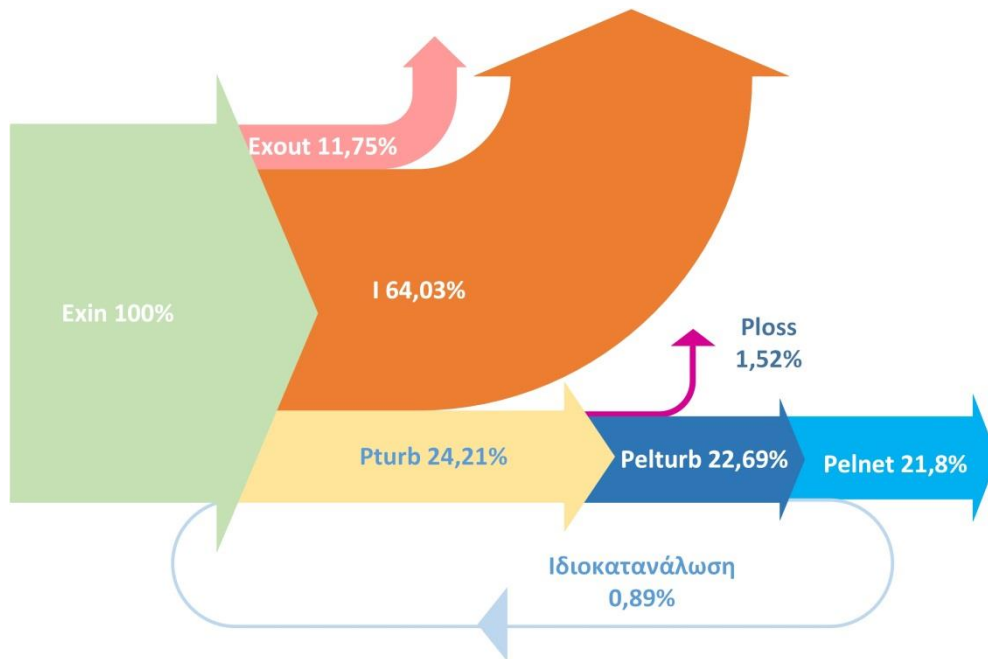
**Εικόνα 38: : Μονογραμμικό Διάγραμμα απλού Brayton κύκλου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα**

Κατωτέρω βρίσκονται τα διαγράμματα Sankey ροής ενέργειας και εξεργειας. Διαπιστώνουμε ότι μεγαλύτερες εξεργειακές απώλειες εντοπίζονται, όπως και στις

προηγούμενες περιπτώσεις, στην κατανάλωση των συσκευών, ενώ τα καυσαέρια παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές με τους προαναφερθέντες κύκλους.



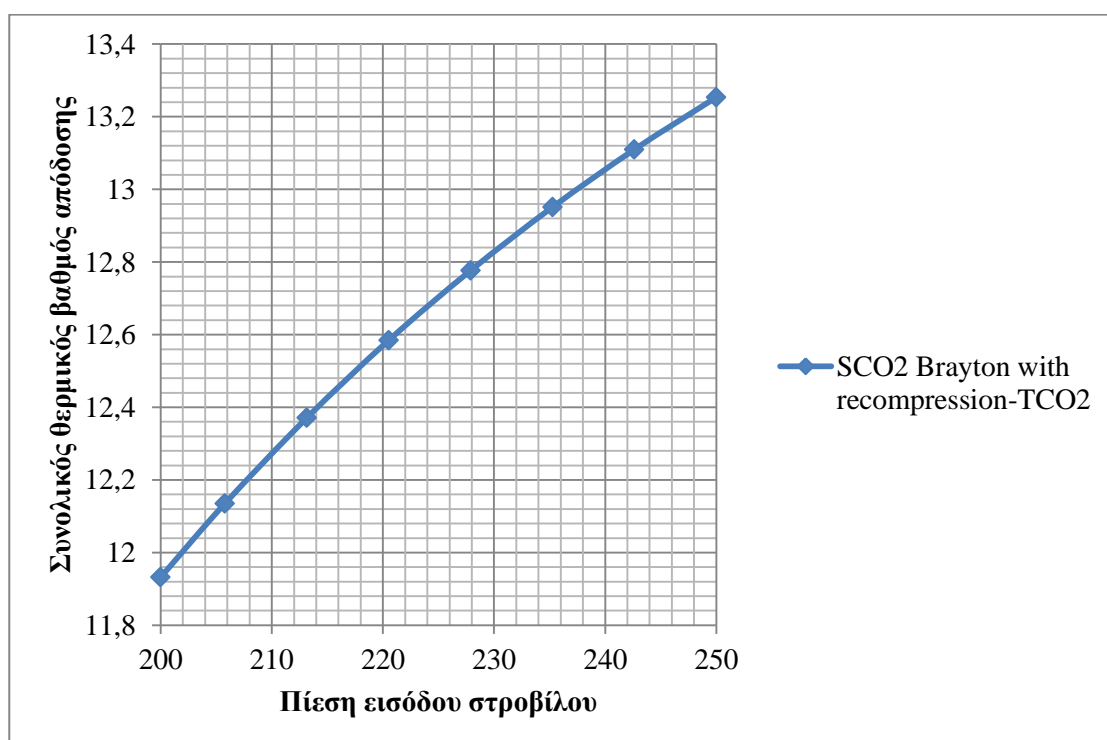
Εικόνα 39: Διάγραμμα Sankey ροής ενέργειας απλού Brayton κύκλου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα



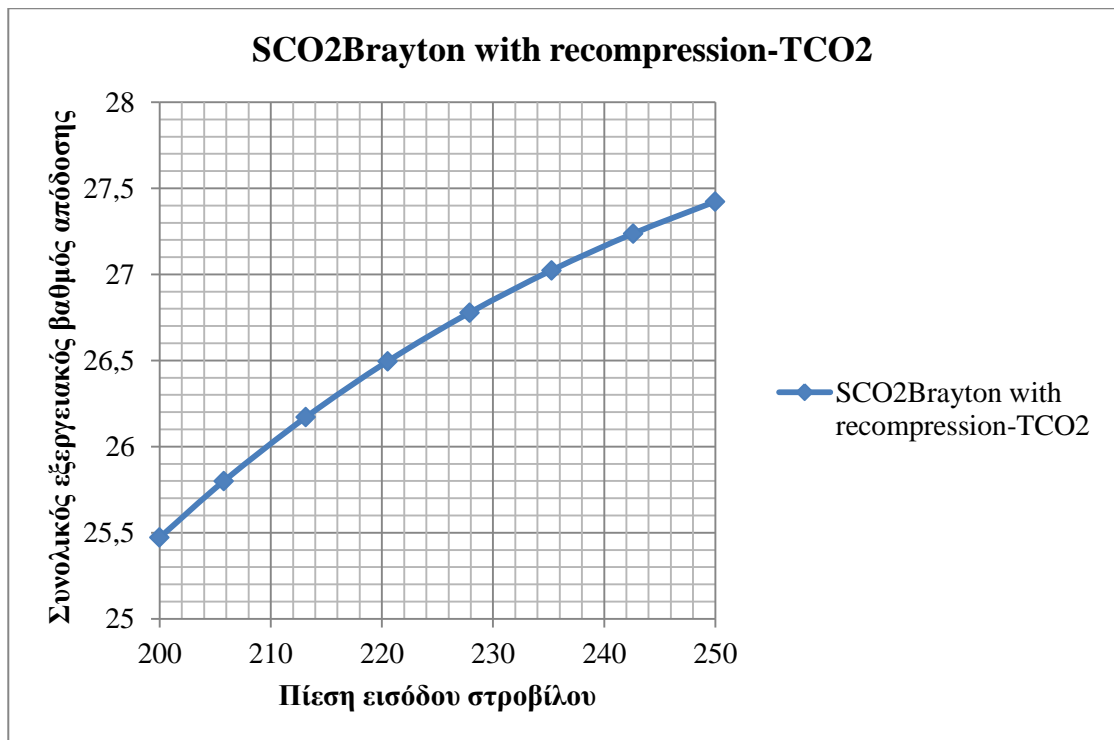
Εικόνα 40: Διάγραμμα Grassmann ροής εξέργειας απλού Brayton κύκλου διοξειδίου του άνθρακα με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα

#### 4.5 Συνδυασμένος κύκλος Brayton διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα

Στα κάτωθι διαγράμματα, απεικονίζονται ο θερμικός και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του κύκλου Brayton διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα και του συνδυασμένου απλού κύκλου Brayton με transcritical.



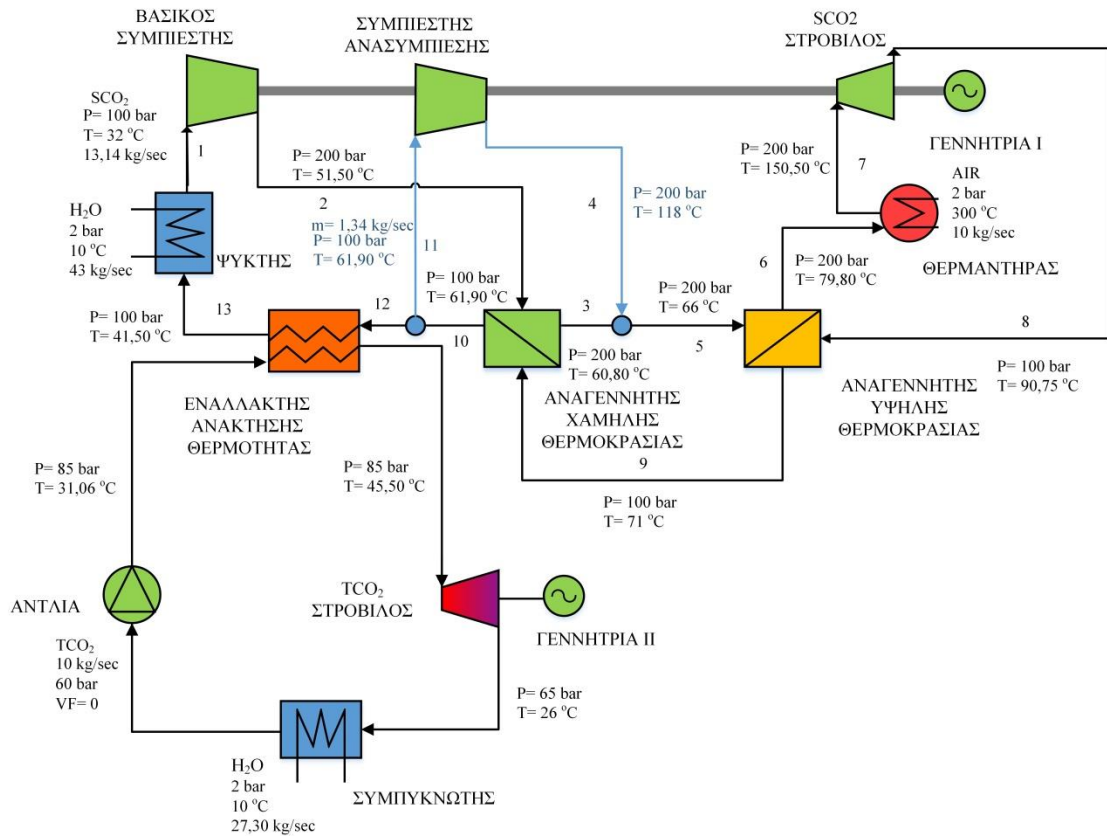
Εικόνα 41: Διάγραμμα Συνολικού Θερμικού βαθμού απόδοσης



Εικόνα 42: Διάγραμμα Συνολικού Εξεργειακού βαθμού απόδοσης

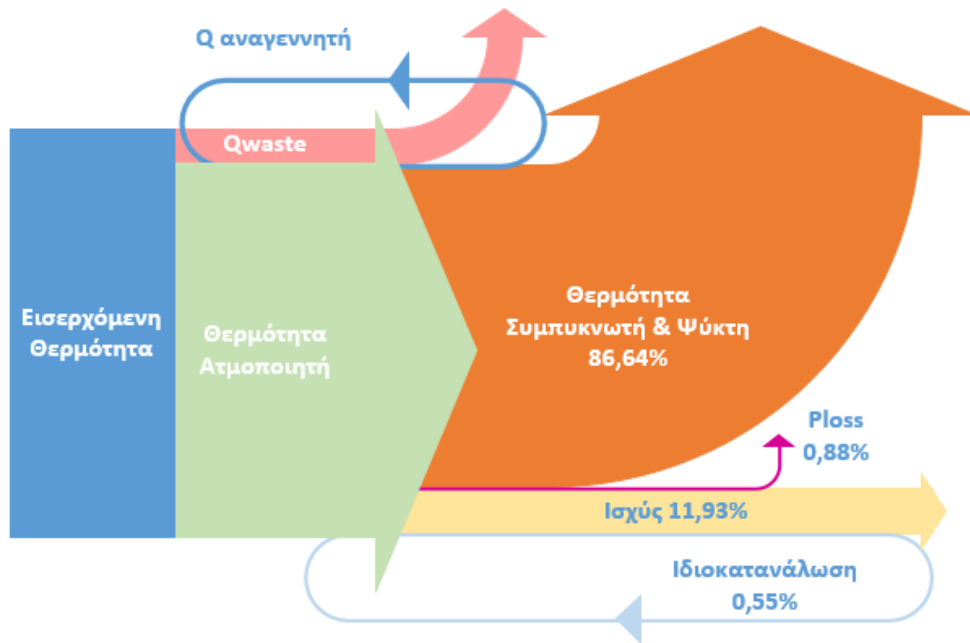
Με βάση την προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας, ο κύκλος αυτός δύναται να λειτουργήσει σε τιμές πίεσης άνω των 200 bar, καθώς κάτω από το σημείο αυτό δε λειτουργεί το υποβοηθούμενο σύστημα transcritical CO<sub>2</sub>. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή θερμοκρασία του διοξειδίου του άνθρακα πριν το στρόβιλο, 150,5 °C. Για τη λειτουργία του αναγεννητή επιλέχθηκε πολύ χαμηλό σημείο ανάσχεσης (5K), το οποίο δεν ενδείκνυται για το σχεδιασμό του συστήματος. Παρ' όλα αυτά οι τιμές του UA του αναγεννητή βρίσκονται σε αρκετά χαμηλό επίπεδο. Υπολογίσαμε μέγιστο θερμικό βαθμό απόδοσης 13,25% και μέγιστο εξεργειακό 27,42% στα 250 bar.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μονογραμμικό διάγραμμα αυτού του κύκλου για πίεση λειτουργίας 200 bar.

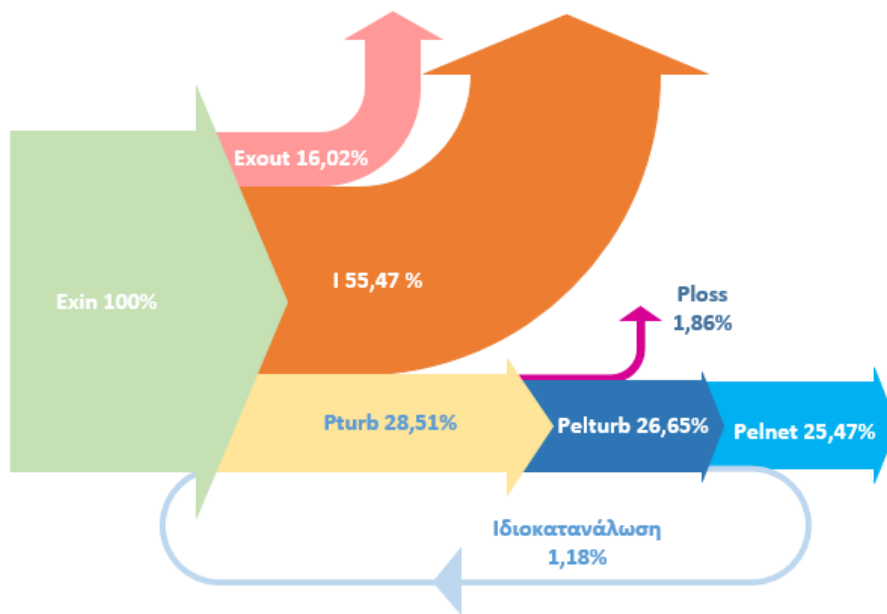


**Εικόνα 43: Μονογραμμικό Διάγραμμα Brayton διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα**

Όσον αφορά τη ροή ενέργειας, παρατηρούμε ότι και εδώ το μεγαλύτερο ποσοστό οδηγείται στον ψύκτη και το συμπυκνωτή. Ενώ ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι της τάξεως του 12%. Οι απώλειες καθώς και η ιδιοκατανάλωση του συστήματος ανέρχονται συνολικά στο 1,43%. Όσον αφορά την εξέργεια, διαπιστώνουμε ότι οι απώλειες των συσκευών κατέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό, ενώ οι απώλειες στα καυσάερια κυμαίνονται στο ίδιο ποσοστό με του κύκλου Brayton με ανασυμπίεση. Περισσότερες είναι οι ηλεκτρομηχανικές απώλειες της ατράκτου και της γεννήτριας, όπως επίσης και της ιδιοκατανάλωσης.



Εικόνα 44: Διάγραμμα Sankey ροής ενέργειας Brayton διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα



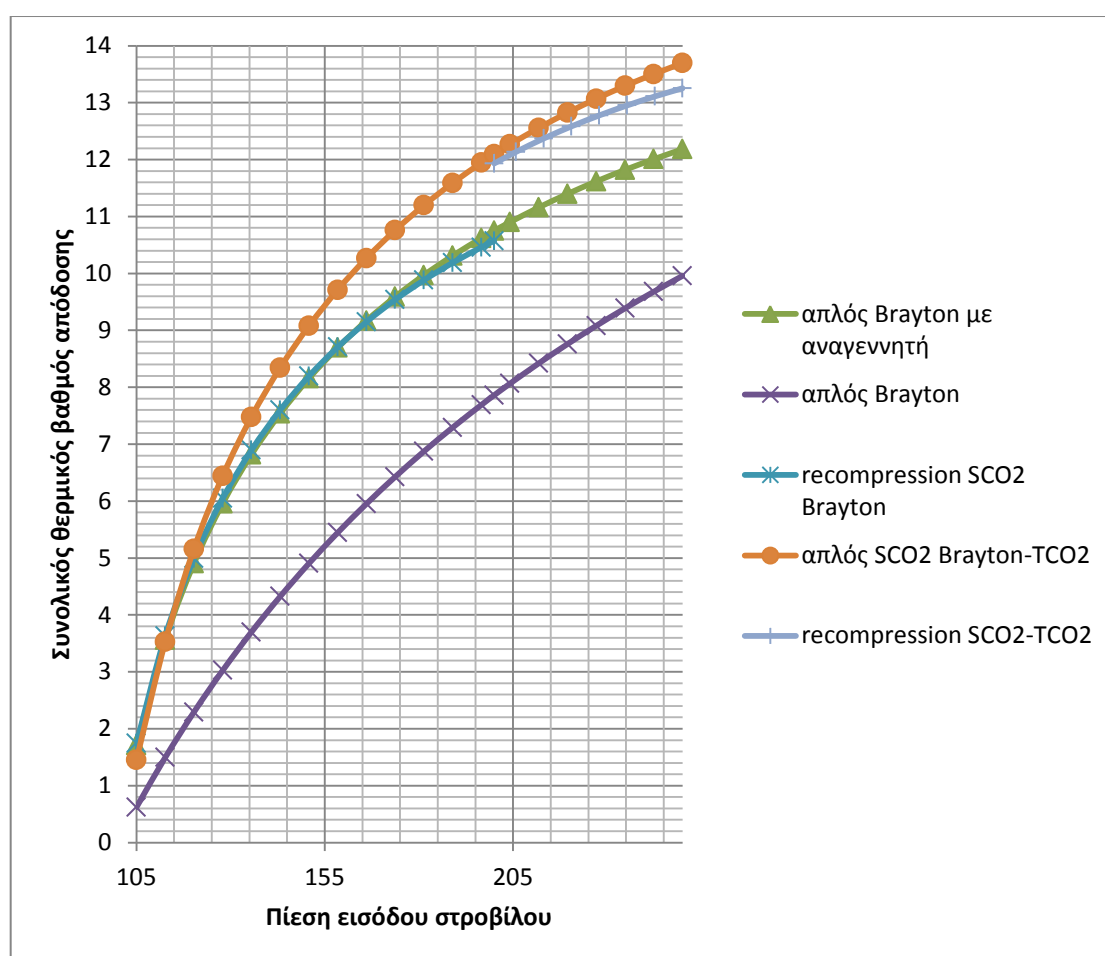
Εικόνα 45: Διάγραμμα Grassmann ροής εξέργειας Brayton διοξειδίου του άνθρακα με ανασυμπίεση με transcritical κύκλο διοξειδίου του άνθρακα



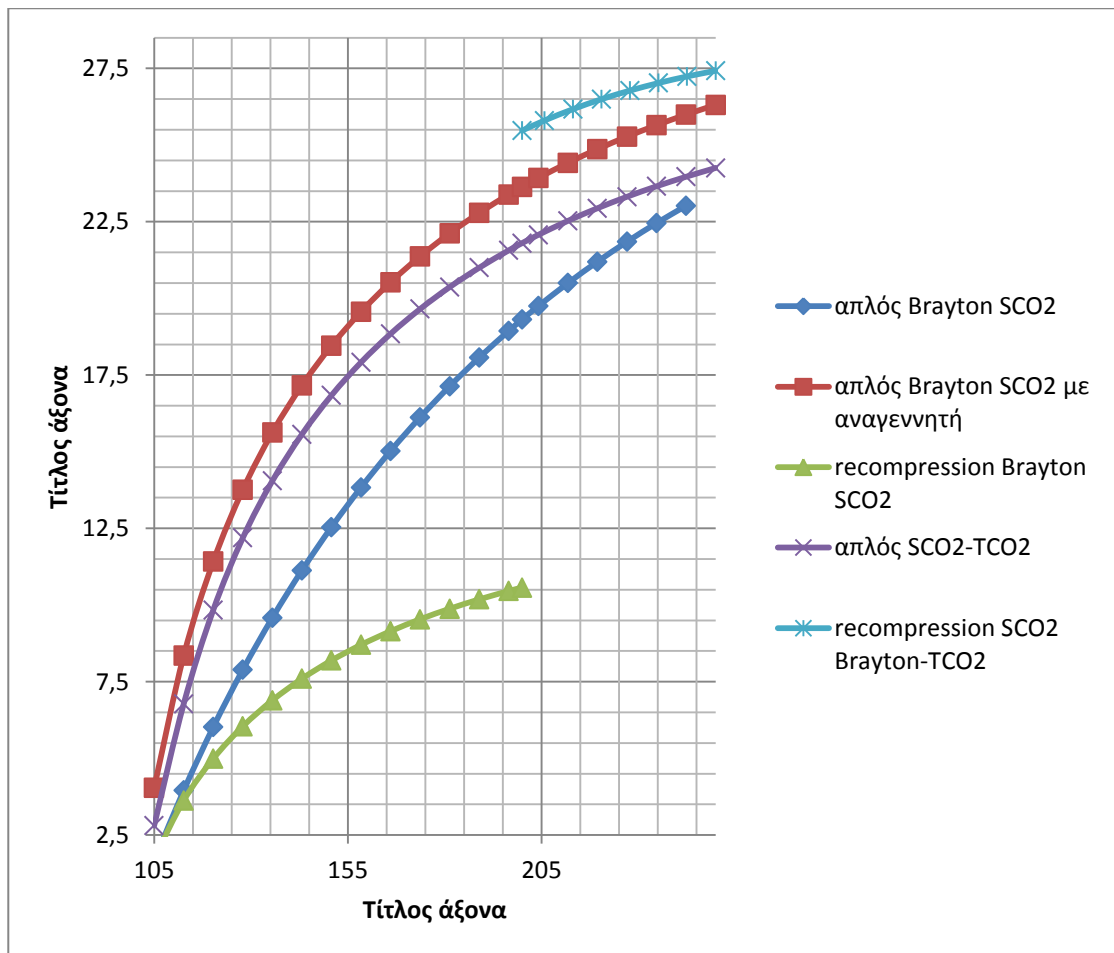
## 4.6 ΣΥΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για την πληρέστερη και ευκρινέστερη αποτύπωση της συγκριτικής μελέτης, είναι δόκιμη η παράθεση των διαγραμμάτων στις ίδιες συνθήκες λειτουργίας, όπως φαίνεται στους Πίνακες 2 και 3 στο Παράρτημα Α'.

Ακολουθούν τα διαγράμματα του θερμικού και εξεργειακού βαθμού απόδοσης όλων των διαμορφώσεων του κύκλου Brayton.



Εικόνα 46: Συνολικός Θερμικός Βαθμός Απόδοσης όλων των κύκλων Brayton



Εικόνα 47: Συνολικός Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης όλων των κύκλων Brayton

Όσον αφορά το θερμικό βαθμό απόδοσης, είναι ορατή η υπεροχή του συνδυασμένου κύκλου Brayton με transcritical. Παράλληλα παρατηρούμε ότι ο αναγεννητής παίζει καθοριστικό ρόλο στην ομαλή λειτουργία και βελτίωση του συστήματος. Επιπλέον, όσο αυξάνεται η πίεση, μεγαλώνει και το εύρος μεταξύ των απλών και των συνδυασμένων κύκλων. Ωστόσο διαπιστώνουμε μια σύγκλιση των τιμών στην περιοχή των 135 bar και σχεδόν ταύτιση του κύκλου Brayton με αναγεννητή και εκείνου με ανασυμπίεση σε όλο το εύρος τιμών. Είναι σωστό να αναφέρουμε ότι σε χαμηλές πιέσεις, από 90 bar έως 120 bar, ο transcritical κύκλος υπερέχει του βαθμού απόδοσης του απλού κύκλου και ενδείκνυται σε αυτό το εύρος πιέσεων η δική του χρήση. Όμως, για υψηλές πιέσεις παρατηρείται μείωση του ρυθμού αύξησης του θερμικού βαθμού απόδοσης.

Όσον αφορά τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, οι μεγαλύτερες τιμές εντοπίζονται στον συνδυασμένο κύκλο Brayton με transcritical και ανασυμπίεση με τον απλό κύκλο Brayton με αναγεννητή να ακολουθεί. Από τους πίνακες και τα

διαγράμματα Sankey παρατηρούμε ότι οι απώλειες εξέργειας των συσκευών αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό. Ειδικότερα, ιδιαίτερα αυξημένος σε σχέση με τους υπόλοιπους συντελεστές είναι ο συντελεστής απωλειών εξέργειας του θερμαντήρα, η οποία κυμαίνεται σε όλους τους κύκλους από 31% έως 56%. Τα υπόλοιπα εξαρτήματα επηρεάζονται σε πολύ μικρό βαθμό, με εξαίρεση τον ψύκτη στους κύκλους Brayton (απλό και με ανασυμπίεση), όπου η τιμή του αντίστοιχου συντελεστή κυμαίνεται μεταξύ 19% και 26,5%.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η αναζήτηση βιώσιμων και αποδοτικών λύσεων για την παραγωγή ενέργειας και δη ηλεκτρικής είναι στο επίκεντρο της επιστημονικής έρευνας, ιδίως στις μέρες μας όπου υπάρχουν αυξημένες ανάγκες προς κάλυψη και το έντονο πρόβλημα της μόλυνσης του περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένου του φαινομένου του θερμοκηπίου. Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην επαναχρησιμοποίηση του CO<sub>2</sub>, ως εργαζόμενου ρευστού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μελετώντας τη συμπεριφορά του σε συνδυαστικές διαδικασίες και μοντέλα.

Οι κύκλοι που επιλέχθηκαν μελετήθηκαν για πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας. Τα συμπεράσματα της συγκριτικής τους ανάλυσης είναι τα ακόλουθα:

1. Σε τιμές πίεσης μέχρι 120 bar, ο transcritical κύκλος παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης συγκριτικά με τον απλό Brayton.
2. Στα 200 bar τον καλύτερο βαθμό απόδοσης του συστήματος, της τάξης του 8,15%, παρουσιάζει ο συνδυασμένος κύκλος απλού Brayton με transcritical, σε σύγκριση με το σύνολο των κύκλων.
3. Οι κύκλοι με ανασυμπίεση δεν αποδίδουν ικανοποιητικά με πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας σε σχέση με τους απλούς κύκλους, γεγονός που αιτιολογείται από την περιορισμένη παροχή μάζας που απομαστεύεται και οδηγείται προς ανασυμπίεση.
4. Οι τιμές των στροφών  $\eta$  διατηρούνται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Ο VFR παρουσιάζει πολύ χαμηλές τιμές σε σχέση με το ανώτατο όριο που έχουμε ορίσει. Οι αυξημένες τιμές του UA στον συμπυκνωτή και τον αναγεννητή, μπορούν να δικαιολογηθούν από την μη ισοθερμική μεταφορά θερμότητας κατά την θέρμανση του διοξειδίου στην υπερκρίσιμη περιοχή, με αποτέλεσμα κατά την ψύξη του να διαπιστώνεται πολύ χαμηλή λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά.
5. Είναι πιθανό στους κύκλους με ανασυμπίεση να παρακάμπτεται τελείως ο αναγεννητής υψηλής θερμοκρασίας, καθώς αυτός αδυνατεί να βρει το σημείο ανάσχεσης που του έχει οριστεί. Μικρότερο σημείο ανάσχεσης οδηγεί στη χρήση μεγαλύτερου εναλλάκτη, η χρήση του οποίου δεν ενδείκνυται.

6. Οι συνδυασμένοι κύκλοι Brayton με τον transcritical κύκλο αλλά και ο κύκλος Brayton με ανασυμπίεση παρουσιάζουν βελτιωμένους βαθμούς απόδοσης, όταν οι θερμοκρασίες πηγής θερμότητας είναι πολύ υψηλές, πχ. πυρηνική ενέργεια.
7. Η προσθήκη του αναγεννητή βελτιώνει σαφώς την απόδοση του συστήματος και προσδίδει σε αυτό σταθερότητα.
8. Η επιλογή της πηγής θερμότητας είναι καθοριστική για την αποδοτικότητα του κύκλου και την επιλογή της βέλτιστης διάταξης. Όπως προαναφέρθηκε, στις χαμηλές θερμοκρασίες, η ανασυμπίεση δεν προσφέρει στο βαθμό απόδοσης, αλλά αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Παρατηρήσαμε ότι το μεγαλύτερο ποσό της εισερχόμενης θερμότητας οδηγείται στο συμπυκνωτή και στον ψύκτη, ανάλογα με το σύστημα. Κρίνεται, λοιπόν, αναγκαία η μελέτη της τεχνολογίας των εναλλακτών θερμότητας προκειμένου να δοθεί ώθηση στις τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από θερμοδυναμικούς κύκλους CO<sub>2</sub>.

Αντικείμενο μελέτης θα μπορούσε να αποτελέσει ο συνδυασμένος κύκλος ψύξης και παραγωγής ενέργειας με εργαζόμενο ρευστό το διοξείδιο του άνθρακα. Μια άλλη πρόταση θα μπορούσε να είναι η δημιουργία συστήματος με ενδιάμεση ψύξη του εργαζόμενου ρευστού μέσω intercooler. Εν κατακλείδι, η μελλοντική έρευνα μπορεί να ακολουθήσει δυο κατευθύνσεις, τόσο ως προς τη βελτίωση των ήδη υπαρχόντων εξαρτημάτων στους κύκλους παραγωγής ενέργειας που μελετήθηκαν, όσο και ως προς το διαφορετικό συνδυασμό συστημάτων.

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. F. V. L. L. A. K. Stéphanie Jumel, Working fluid selection and performance comparison of subcritical and supercritical organic Rankine cycle (ORC) for lowtemperature waste heat recovery, 2012.
- [2] Σ. Κ. Ε. Κακαράς, Αντιρρυπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών, Νοέμβριος 2011.
- [3] M. d. M. P. F. E. T. T. S. Andrei Bocin-Dimitriu, Carbon Capture and Utilisation Workshop-Background and Proceedings, JRC Scientific and Policy Reports, European Commission, 2013.
- [4] N. G. M. D. H. N. P. R. Emmanouel Cayer, Analysis of a carbon dioxide transcritical power cycle using a low temperature source, 2008.
- [5] E. Comission, Directive 2009/31/EC on the geological storage of CO<sub>2</sub>, (CCS Directive), 2009.
- [6] "Carbon Dioxide Utilisation Network," [Online].
- [7] Global CCS Institute and Parsons & Brinckerhoff, Accelerating the uptake of CCS: Industrial use of Captured Carbon Dioxide,, March 2011.
- [8] D. V. N. C. D. G. W. D. P. S. C. A. L. S. M. S. C. Nicholas A. Azzolina, "CO<sub>2</sub> storage associated with CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery: A statistical analysis of historical operations".*International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 37, June 2015, Pages 384-397.*
- [9] European Commission (EC), Energy Roadmap 2050. Impact assessment and scenario analysis; 2011.
- [10] "Horizon 20," [Online].
- [11] G. Sulzer, Process for generating work from heat (in Swiss), Swiss Patent CH 269599, July 1950.
- [12] M. D. P. H. V. D. M. J. H. P. W. Y. V. Dostal, "Supercritical CO<sub>2</sub> cycle for fast gas-cooled reactors.," *ASME Turbo Expo, Power for Land, Sea, and Air.*, 2004.
- [13] H. Chang, "Development of a Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle: Improving PBR Efficiency and Testing Material Compatibility".*Idaho National*

*Engineering and Environmental Laboratory (INEEL). (2002).*

- [14] J. W. Y. D. Xurong Wang, Thermodynamic analysis of supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycles with a bottoming transcritical CO<sub>2</sub> cycle, 2015..
- [15] Yang Chen, Thermodynamic Cycles using Carbon Dioxide as Working Fluid, October 2011.
- [16] " National Energy Technology Laboratory," 2015. [Online].
- [17] D. P. L. C. M. P. R. G. M. Neeraj Gupta, "Testing for Large-scale CO<sub>2</sub>-enhanced Oil Recovery and Geologic Storage in the Midwestern USA,". *Energy Procedia, Volume 63, 2014, Pages 6393-6403* .
- [18] X. L. D. Y. D.F. Zhao, "Evaluation of CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery and sequestration potential in low permeability reservoirs, Yanchang Oilfield, China,".*Journal of the Energy Institute, Volume 87, Issue 4, November 2014, Pages 306-313* .
- [19] J.-Y. L. R. E. O. D. C. F. R. R. T. John Frederick D. Tapia, "CO<sub>2</sub> Allocation for Scheduling Enhanced Oil Recovery (EOR) Operations with Geological Sequestration Using Discrete-time Optimization,".*Energy Procedia, Volume 61, 2014, Pages 595-598*.
- [20] A. B.-D. E. T. Mar Pérez-Fortes, " CO<sub>2</sub> Utilization Pathways: Techno-Economic Assessment and Market Opportunities,".*Energy Procedia, Volume 63, 2014, Pages 7968-7975*.
- [21] Mitsubishi Heavy Industries Ltd 2008, "'Mitsubishi's carbon capture Technology,". *Carbon Capture Journal, January-February 2008, pp. 24–26* .
- [22] Donald W. Brown, "A hot dry rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO<sub>2</sub> instead of water,".*Proceedings of the twenty-fifth workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford, CA, USA (Jan 2000), pp. 233–238* .
- [23] K. Pruess, "Enhanced geothermal systems (EGS) using CO<sub>2</sub> as working fluid – a novel approach for generating renewable energy with simultaneous sequestration of carbon,". *Geothermics, 35 (4) (Aug 2006), pp. 351–367*.
- [24] R. A. Z. Z. James Biagi, "Simulation and optimization of enhanced geothermal systems using CO<sub>2</sub> as a working fluid, Original Research Article,".*Energy, Volume 86, 15 June 2015, Pages 627-637* .
- [25] A. D. A. A. Michele Aresta, " The changing paradigm in CO<sub>2</sub>

utilization". *Journal of CO2 Utilization, Volumes 3–4, December 2013, Pages 65-73*.

- [26] "Novomer website," 2015. [Online].
- [27] J. v. Beilen, "Biofuels, Bioproducts and Biorefining,". *Volume 4, Issue 1, pages 41–52, January/February 2010*.
- [28] T. T. F. Eduardo Jacob-Lopes, From oil refinery to microalgal biorefinery, July 2013.
- [29] "Calera," 2015. [Online].
- [30] D. Biello, "Cement from CO<sub>2</sub>: A Concrete Cure for Global Warming?," *Scientific American*, August 2008.
- [31] "Stuart M Evans, Dr Nikolaos Vlasopoulos, Novacem: Carbon Negative Cement and the Green Cement Bond, CSI Forum 2010 • Warsaw • 14 September 2010".
- [32] "Tececo," 2015. [Online].
- [33] L. Torrente-Murciano, D. Mattia, M.D. Jones, P.K. Plucinski, Formation of hydrocarbons via CO<sub>2</sub> hydrogenation – A thermodynamic study, April 2014.
- [34] Rosa M. Cuellar-Franca, Adisa Azapagic, Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts, *Journal of CO2 Utilization*, Volume 9, March 2015, Pages 82-102.
- [35] J. Sarkar, Review and future trends of supercritical CO<sub>2</sub> Rankine cycle for low-grade heat conversion, April 2015.
- [36] Huijuan Chen, D. Yogi Goswami, Elias K. Stefanakos, A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat, 2010.
- [37] M. P. D. B. S. K. K. P. Konstantinos Braimakis, Low grade waste heat recovery with subcritical and supercritical ORC based on natural refrigerants and their binary mixtures, 2014.
- [38] M. C. M. C. E. F. S. M. S. C. Z. Luca Cecchinato, Thermodynamic analysis of different two-stage transcritical carbon dioxide cycles, 2009..
- [39] J. C. a. S. H. Z. K. Bryant, An Analysis and Comparison of the Simple and Recompression Supercritical CO<sub>2</sub> Cycles, May 2011..
- [40] Y. L. Moullec, Conception of a Pulverized Coal Fired Power Plant with Carbon



Capture around a Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle, 2013..

- [41] H. Y. D. U. K. F. M. E. N. S. X.R. Zhang, Analysis of a novel solar energy-powered Rankine cycle for combined power and heat generation using supercritical carbon dioxide, 2006..
- [42] D. Y. G. Huijuan Chen, Simulation of a thermodynamic cycle with organic absorbents and CO<sub>2</sub> as working fluid., 2007.
- [43] K. S. P. D. a. P. K. P. Garg, Comparison of CO<sub>2</sub> and steam in transcritical Rankine cycles for concentrated solar power, 2014.
- [44] H. Tuo, Parametric analysis of a reheat carbon dioxide transcritical power cycle using a low temperature heat source, 2011.
- [45] W. H. G. T. Zhang Shengjun, Performance comparison and parametric optimization of subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation, 2011.
- [46] C. L. C. H. X. X. S. W. a. Y. L. Hong Gao, Performance Analysis and Working Fluid Selection of a Supercritical Organic Rankine Cycle for Low Grade Waste Heat Recovery, 2012.
- [47] H. Y. D. U. Xin-Rong Zhang, Experimental study on the performance of solar Rankine system using supercritical CO<sub>2</sub>, 2007.
- [48] Dekhtiarev V. L., On designing a large, highly economical carbon dioxide power installation, *Elecrtichenskie Stantskii*, 5: 1-6, May 1962.
- [49] G. Angelino, Perspectives for the Liquid Phase Compression Gas Turbine, ASME Paper No. 66--GT-111, 13-17 March 1966.
- [50] E. G. Feher, Supercritical Thermodynamic Cycles for External and Internal Combustion Engines, Astropower, Inc. Engineering Report May 1962..
- [51] R. L. Sweigert, P. Weber and R. L. Allen, *Ind. Engng. Chem.* 38, 185 (1946).
- [52] G. C. Kennedy, P-V-T relations in CO<sub>2</sub> at elevated temperatures and pressures. *Am. J. Sci.* 252, 225-241 (1954).
- [53] D. Price, The Thermodynamic Properties of Carbon Dioxide up to 1000°C and 1400 bars. Navord Report 3846, Nov. 1954..
- [54] N. V. P. N. R. K. a. J. A. W. H. D. M. Newitt, Thermodynamic Functions of Gases, Vol. 1 (Ed. F. Din). Butterworth, London (1956).

- [55] L. Chela, Thermodynamic and transport properties of gaseous carbon dioxide, in the A.S.M.E. book Thermodynamic and Transport Properties of Gases, Liquids and Solids. McGraw-Hill (1959).
- [56] E. G. Feher, The Supercritical Thermodynamic Power Cycle, 1968, Energy Conversion. Vol. 8, pp. 85-90. Fergamon Press, .
- [57] P. H. a. M. J. D. M. A. Pope, "Thermal Hydraulics of a 2400 MWth Supercritical CO<sub>2</sub>-Direct Cycle GFR," *Advanced Nuclear Power Program*, vol. MIT-ANP-TR-112, September 2006.
- [58] D. Y. G. ., E. K. S. Huijuan Chen, "A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat, 2010".
- [59] "CO<sub>2</sub> reuse," [Online].

## 7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄

<b>ΠΙΝΑΚΑΣΙ</b>							
Παράμετροι προσομοίωσης							
	TCO <sub>2</sub>	TCO <sub>2</sub> με αναγεννητή	Simple Brayton	Simple Brayton με αναγεννητή	Brayton recompression	simple Brayton - TCO <sub>2</sub>	recompression Brayton- TCO <sub>2</sub>
<b>Βαθμοί απόδοσης</b>							
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου (η <sub>is,T</sub> )	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου (bottoming)	-	-	-	-	-	0,89	0,89
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης αντλίας (η <sub>is,pump</sub> )	0,8	0,8	-	-	-	0,8	0,8
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή	-	-	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή ανασυμπίεσης	-	-	-	-	0,87	-	0,87
βαθμός απόδοσης της γεννήτριας	-	-	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβιλομηχανών	-	-	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης (η <sub>μηG</sub> )	0,95	0,95	-	-	-	0,95	0,95
Βαθμός απόδοσης κινητήρα αντλίας (η <sub>M</sub> )	0,85	0,8	-	-	-	0,85	0,85
<b>Εναλλάκτες Θερμότητας</b>							
Σημείο ανάσχεσης Ατμοποιητή (Pinch Point Evaporator) (K)	35	35	-	-	-	-	-
Σημείο ανάσχεσης Θερμαντήρα	-	-	35	35	35	35	35
Σημείο ανάσχεσης Συμπυκνωτή	10	10	-	-	-	10	10
Σημείο ανάσχεσης Ψύκτη (Pinch	-	-	10	10	10	10	10
Σημείο ανάσχεσης Αναγεννητή	-	10	-	10	10	10	5
Σημείο ανάσχεσης δευτερου	-	-	-	-	10	-	10
Σημείο ανάσχεσης εναλλάκτη	-	-	-	-	-	10	10
Θερμοκρασία πηγής θερμότητας	300	300	300	300	300	300	300
Πίεση πηγής θερμότητας (bar)	2	2	2	2	2	2	2
Παροχή μάζας πηγής θερμότητας	10	10	10	10	10	10	10
Θερμοκρασία εισόδου ψυκτικού	10	10	10	10	10	10	10
Πίεση εισόδου ψυκτικού μέσου	2	2	2	2	2	2	2

<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 2</b>								
	TCO2	TCO2 με αναγεννητή	Simple Brayton	Simple Brayton με αναγεννητή	recompression	simple Brayton - TCO2	recompression Brayton- TCO2	
<b>Πίεση (bar)</b>	<b>120,00</b>	<b>120,00</b>	<b>200,00</b>	<b>200,00</b>	<b>200,00</b>	<b>200,00</b>	<b>200,00</b>	<b>200,00</b>
Συνολικός θερμικός βαθμός απόδοσης (%)	8,09	8,16	7,86	10,75	10,57		12,09	11,93
Συνολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης (%)	21,39	21,53	19,31	23,64	22,57		21,80	25,47
<b>Βαθμός απόδοσης του συστήματος (%)</b>	<b>6,55</b>	<b>6,59</b>	<b>5,91</b>	<b>7,24</b>	<b>6,91</b>		<b>8,15</b>	<b>7,80</b>
Καθαρή Ισχύς (kW)	190,62	191,87	209,90	210,69	201,13		237,24	227,02
Ισχύς στροβίλου	327,81	330,25	346,57	424,22	454,15		423,92	454,14
Ισχύς δευτερου στροβίλου	-	-	-	-	-		68,49	67,22
Ισχύς συμπίεστη	-	-	160,73	196,74	189,93		196,99	189,93
Ισχύς συμπίεστη ανασυμπίεσης	-	-	-	-	45,11		-	45,10
Ισχύς αντλίας	102,68	103,59	-	-	-		32,27	32,27
QEVAP	2356,70	2350,41	-	-	-		-	-
QHEAT	-	-	2189,63	1959,91	1902,58		1961,64	1902,56
QLREC	-	-	-	-	699,30		-	282,45
QREC	-	23,97	-	720,32	55,19		715,56	472,02
QCOOL	-	-	2003,78	1732,43	-		595,38	1081,47
QCOND	2131,61	2123,79	-	-	1683,44		1103,17	566,94
QHR	-	-	-	-	-		1139,33	1116,37
Qwaste	448,11	454,39	615,17	844,89	902,22		844,89	902,22
n	835,98	832,07	1220,99	1103,60	1065,15		1103,60	1065,16
nI	-	-	-	-	-		405,36	399,88
VFR	1,62	1,62	1,55	1,55	1,55		1,54	1,55
VFR2	-	-	-	-	-		1,16	1,16
UAEVAP	24,03	23,94	-	-	-		-	-
UA HEATER	-	-	26,42	23,85	23,23		23,73	23,23
UA HREC	-	2,32	-	60,80	5,29		62,65	65,73
UA HR	-	-	-	-	-		96,76	93,43
UA LREC	-	-	-	-	63,78		-	27,94
UA COOL	-	-	140,60	124,12	120,84		30,84	36,35
UA COND	173,99	174,78	-	-	-		88,61	87,09
MCO2	11,60	11,70	10,19	12,47	13,00		12,66	13,38
MICO2	-	-	-	-	12,04		-	12,04
M2CO2	-	-	-	-	1,34		-	1,34
MW	178,09	179,14	7,69	9,41	9,09		6,21	5,84
MHS	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00		10,00	10,00
MW2	-	-	-	-	-		43,19	43,19
MTCO2	-	-	-	-	-		10,00	10,00

<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 3</b>								
ΕΞΕΡΓΕΙΑ (%)	TCO2	TCO2 με αναγεννητή	Simple Brayton	Simple Brayton με αναγεννητή	recompression	simple Brayton - TCO2	recompression Brayton- TCO2	
<b>Πίεση (bar)</b>	<b>120,00</b>	<b>120,00</b>	<b>200,00</b>	<b>200,00</b>	<b>200,00</b>	<b>200,00</b>	<b>200,00</b>	<b>200,00</b>
Exin	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		100,00	100,00
Exout	27,35	5,39	8,64	14,39	16,02		11,75	16,02
Pnet	21,39	21,53	19,31	23,64	22,57		21,80	25,47
Ploss	1,84	1,85	1,17	1,43	1,48		1,52	1,86
Po,c	2,03	2,05	0,37	0,45	0,54		0,89	1,18
I	47,39	69,18	70,50	60,08	59,40		64,03	55,48
ICOMP	-	-	2,08	2,55	2,46		2,09	2,46
IRCOMP	-	-	-	-	0,49		-	0,49
IPUMP	0,39	0,39	-	-	-		0,05	0,06
IREC	-	0,08	-	2,41	0,14		1,96	0,91
ITURB	4,11	4,15	3,82	4,67	3,43		3,83	3,43
ITURB2	-	-	-	-	-		0,75	3,43
ILREC	-	-	-	-	1,77		-	0,69
IHEAT	-	-	38,11	31,94	32,00		44,33	32,00
IEVAP	35,07	56,96	-	-	-		-	-
IHR	-	-	-	-	-		3,62	4,41
ICOND	7,82	7,60	-	-	-		3,50	3,64
ICOOL	-	-	26,49	18,51	19,11		3,91	3,96