



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**Χρήση υπολογιστικών φύλλων με σκοπό την επίλυση ασκήσεων
για κύκλους παραγωγής ισχύος με ατμό και για καύση
υδρογονανθράκων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παυλίδου Άντρεα

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Επίκουρος Καθηγητής, Ιψάκης Δημήτριος

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2023



TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

DEPARTMENT OF PRODUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT

**Using spreadsheets for solving exercises related to steam power
generation cycles and hydrocarbons' combustion**

DIPLOMA THESIS

Pavlidou Antrea

Supervisor

Assistant Professor, Ipsakis Dimitrios

CHANIA, OCTOBER 2023

Copyright © 2023, Άντρεα Παυλίδου

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιθυμώ να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Δημήτριο Ιψάκη, για την καθοδήγηση του, την άμεση επικοινωνία και τον χρόνο που αφιέρωσε στην υλοποίηση της εργασίας μέχρι την ολοκλήρωσή της.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της Επιτροπής, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Γεώργιο Αραμπατζή και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ελευθέριο Σίσκο για την ανάγνωση και διόρθωση της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένεια μου για την στήριξη και αγάπη που μου πρόσφερε ώστε να εκπληρώσω τους στόχους μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και τους συμφοιτητές και φίλους που στάθηκαν δίπλα μου.

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως κύριο στόχο την μελέτη προβλημάτων κύκλου παραγωγής ισχύος (Rankine Cycles) και την μελέτη της καύσης σε εσωτερικές μηχανές με χρήση υπολογιστικών φύλλων Excel.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται η μελέτη της συμπεριφοράς ενός απλού ιδανικού κύκλου Rankine, ο οποίος βασίζεται στην θεωρία του Carnot. Αρχικά, αναφέρονται τα κύρια στοιχεία ενός απλού ιδανικού κύκλου Rankine καθώς και η ενεργειακή ανάλυση των διατάξεων του κύκλου. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο πραγματικός κύκλος Rankine και η απόκλιση του από τον ιδανικό κύκλο. Επιπλέον, συναντάμε τους βελτιωμένους κύκλους, οι οποίοι αποτελούνται από τον ιδανικό κύκλο Rankine με αναθέρμανση και με απομάστευση ατμού, μαζί με τις ανάλογες αλληλεπιδράσεις θερμότητας και έργου. Παράλληλα, πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά στον οργανικό κύκλο Rankine και την αρχή λειτουργίας του. Τέλος, εφαρμόζονται ασκήσεις με σκοπό την μελέτη της συμπεριφοράς του κύκλου Rankine, για κάθε μια από τις περιπτώσεις τις οποίες έχουν αναλυθεί. Μέσω των ασκήσεων, εξετάζεται η ενεργειακή ανάλυση για την κάθε κατάσταση του κύκλου, με αποτέλεσμα να βρούμε το καθαρό ειδικό έργο, την προσδιδόμενη ειδική θερμότητα και τελικά τον θερμικό βαθμό απόδοσης του κύκλου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η ανάπτυξη υπολογιστικού εργαλείου για τα προβλήματα κύκλου Rankine. Για κάθε ένα από τα προβλήματα που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, δίνεται η εκφώνηση της άσκησης και περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν, έτσι ώστε να γίνει η επίλυση των ασκήσεων. Για τις ασκήσεις, χρησιμοποιήθηκε το MS Excel και για κάθε άσκηση δίνονται λεπτομερείς οδηγίες επίλυσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο, μελετάται η καύση υδρογονανθράκων. Αρχικά, εξηγείται τι ονομάζεται καύσιμο, δίνεται ο ορισμός της καύσης και οι εφαρμογές της. Ακολούθως, αναφέρονται οι πέντε τύποι καύσης με τα κύρια χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια, περιγράφεται αναλυτικά η στοιχειομετρία των αντιδράσεων της καύσης και άλλοι ορισμοί που χρησιμοποιούνται συνήθως σε ένα μείγμα αέρα – καυσίμου, το οποίο συναντάται σε μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ). Στα πλαίσια αυτά, παρουσιάζεται το ενεργειακό ισοζύγιο, δηλαδή ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος, και έπειτα η ενθαλπία σχηματισμού και η ενθαλπία καύσης. Σημαντική είναι επιπλέον, η έννοια της θερμογόνου δύναμης (ΘΔ) και η διαφοροποίηση της από την θερμότητα καύσης. Επίσης, περιγράφεται η προσέγγιση της θερμοκρασίας αδιαβατικής φλόγας και της απόδοσης γεννήτριας θερμότητας. Τέλος, εφαρμόζονται ασκήσεις που αφορούν την μελέτη της καύσης υδρογονανθράκων (υπολογισμός στοιχειομετρικής αναλογίας αέρα – καυσίμου). Μέσω των κατάλληλων δεδομένων, μπορούν να γίνει και ο υπολογισμός άλλων ορισμών που έχουν αναπτυχθεί, καθώς και η εύρεση της θερμογόνου δύναμης και της απόδοσης γεννήτριας θερμότητας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η ανάπτυξη υπολογιστικού εργαλείου για τα προβλήματα της καύσης υδρογονανθράκων. Για κάθε ένα από τα προβλήματα που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, δίνεται η εκφώνηση της άσκησης και περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα που έχουν ακολουθηθεί, έτσι ώστε να γίνει η επίλυση των ασκήσεων μέσω υπολογιστικών φύλλων Excel.

Λέξεις κλειδιά: κύκλοι παραγωγής ενέργειας, απλός ιδανικός κύκλος Rankine, Rankine με αναθέρμανση, Rankine με απομάστευση ατμού, καύση, υδρογονάνθρακες, στοιχειομετρική ανάλυση, θερμογόνος δύναμη, ενθαλπία, βαθμός απόδοσης, υπολογιστικά φύλλα Excel.

Abstract

The main objective of this Diploma Thesis is the study of power generation cycle problems (Rankine Cycles) and combustion in internal engines using Excel spreadsheets.

In the first chapter, is studied the behaviour of a simple ideal Rankine cycle, which is based on Carnot's theorem. Firstly, is recognised the main elements of a simple ideal Rankine cycle as well as the energy analysis of the cycle arrangements. Also, are presented the actual Rankine cycle and its deviation from the ideal cycle. In addition, we encounter the improved cycles, which consist of the ideal Rankine cycle with reheat and regenerative Rankine cycle, including with the corresponding heat and work interactions. Moreover, is made a brief reference to the organic Rankine cycle and its operating principle. Finally, exercises are applied in order to study the behavior of the Rankine cycle, for each of the cases that have been analyzed. Through the exercises, the energy analysis is examined for each state of the cycle, resulting in finding the net specific work, the given specific heat and therefore the thermal efficiency of the cycle.

In the second chapter, is presented the development tool for Rankine cycle problems. For each of the problems developed in the previous chapter, is given the exercise pronunciation and the steps followed, hence the exercises can be solved. For the exercises, MS Excel was used and detailed solution instructions are given for each exercise.

In the third chapter, is studied the hydrocarbon combustion. Firstly, is explained what is called a fuel, the definition of combustion and its applications are also given. Subsequently, the five types of combustion are listed with their main characteristics. Additionally, is described the stoichiometry of the combustion reactions and other definitions that are usually presented in an air-fuel mixture, which is found in internal combustion engines. The description of the energy balance, i.e. the first law of thermodynamics is introduced too, as well as the enthalpy of formation and the enthalpy of combustion. Also important, is the concept of calorific value (or heating value, HV) and its differentiation from combustion heat. Furthermore, is described the approximation of the adiabatic flame temperature and the heat generator efficiency. In conclusion, exercises related to the study of hydrocarbon combustion (calculation of stoichiometric air-fuel ratio) are applied. Through the appropriate data, can also be calculated the definitions that were developed, as well as the calorific value and efficiency of the heat generator.

The fourth chapter, presents the development of a computational tool for hydrocarbon combustion problems. For each of the problems developed in the previous chapter, is given the exercise pronunciation and the steps followed, hence the exercises can be solved through Excel spreadsheets.

Key words: production cycles, simple ideal Rankine cycle, Rankine with reheat, regenerative Rankine cycle, combustion, hydrocarbons, stoichiometric analysis, calorific value, enthalpy, efficiency, Excel spreadsheets.

Περιεχόμενα

1	Κύκλοι Παραγωγής Ενέργειας Rankine	1
1.1	Εισαγωγή – Σκοπός	1
1.2	Ιδανικός Κύκλος Carnot	1
1.3	Κύκλος Rankine	2
1.3.1	Απλός Ιδανικός Κύκλος Rankine	2
1.3.2	Πραγματικός Κύκλος Rankine	5
1.3.3	Απόκλιση Πραγματικού από Ιδανικού Κύκλου.....	6
1.4	Βελτιωμένοι Κύκλοι Rankine	7
1.4.1	Rankine με Αναθέρμανση.....	7
1.4.2	Rankine με Απομάστευση Ατμού.....	8
1.5	Οργανικοί Κύκλοι Rankine	10
1.6	Ασκήσεις	12
1.6.1	Άσκηση 1. Απλός Ιδανικός Κύκλος Rankine	12
1.6.2	Άσκηση 2. Ιδανικός Κύκλος Rankine με Αναθέρμανση	14
1.6.3	Άσκηση 3. Ιδανικός Κύκλος Rankine με Απομάστευση Ατμού	19
2	Ανάπτυξη Υπολογιστικού Εργαλείου Για Προβλήματα Κύκλου Rankine	24
2.1	Εισαγωγή – Σκοπός	24
2.2	Επίλυση Ασκήσεων με Χρήση Εργαλείου Excel.....	24
2.2.1	Άσκηση 1. Απλός Ιδανικός Κύκλος Rankine	24
2.2.2	Άσκηση 2. Ιδανικός Κύκλος Rankine με Αναθέρμανση	27
2.2.3	Άσκηση 3. Ιδανικός Κύκλος Rankine με Απομάστευση Ατμού	31
3	Καύση Υδρογονανθράκων σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης.....	37
3.1	Εισαγωγή – Σκοπός	37
3.2	Καύσιμα & Καύση	37
3.2.1	Καύσιμα	37
3.2.2	Καύση.....	37
3.3	Τύποι καύσης.....	38
3.3.1	Πλήρης Καύση.....	38
3.3.2	Ατελής Καύση.....	38
3.3.3	Ταχεία Καύση.....	38
3.3.4	Αυτανάφλεξη	39
3.3.5	Εκρηκτική Καύση.....	39
3.4	Στοιχειομετρία Αντιδράσεων.....	39
3.5	Ενεργειακό Ισοζύγιο	41
3.6	Ενθαλπία Σχηματισμού και Ενθαλπία Καύσης.....	42

3.7	Θερμογόνος Δύναμη.....	44
3.7.1	Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (ΑΘΔ).....	44
3.7.2	Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη (ΚΘΔ)	44
3.7.3	Θερμότητα Καύσης και Θερμογόνος Δύναμη	45
3.8	Θερμοκρασία Αδιαβατικής Φλόγας	45
3.9	Απόδοση Γεννήτριας Θερμότητας	46
3.10	Ασκήσεις	47
3.10.1	Άσκηση 1. Καύση Οκτανίου με Αέρα.....	47
3.10.2	Άσκηση 2. Καύση Φυσικού Αερίου με Θεωρητική Ποσότητα Αέρα	48
4	Ανάπτυξη Υπολογιστικού Εργαλείου Για Προβλήματα Καύσης Καυσίμων	51
4.1	Εισαγωγή – Σκοπός	51
4.2	Επίλυση Ασκήσεων με Χρήση Εργαλείου Excel.....	51
4.2.1	Άσκηση 1. Καύση Οκτανίου με Αέρα.....	51
4.2.2	Άσκηση 2. Καύση Φυσικού Αερίου με Θεωρητική Ποσότητα Αέρα	54
	Συμπεράσματα – Επόμενα Βήματα	59
	Βιβλιογραφία	60
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	63

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Διάγραμμα $T-s$ κύκλου Carnot με ατμό.....	1
Σχήμα 1-2: Απλός ιδανικός κύκλος Rankine.....	2
Σχήμα 1-3: Διάγραμμα $T-s$ απλού ιδανικού κύκλου Rankine.....	3
Σχήμα 1-4: Διάγραμμα $T-s$ πραγματικού κύκλου Rankine.....	5
Σχήμα 1-5: Διάγραμμα $T-s$ απόκλισης πραγματικού από τον ιδανικό κύκλο Rankine.....	6
Σχήμα 1-6: Ιδανικός κύκλος Rankine με αναθέρμανση και διάγραμμα $T-s$	7
Σχήμα 1-7: Ιδανικός κύκλος Rankine με απομάστευση ατμού με ανοικτό θερμαντήρα και διάγραμμα $T-s$	8
Σχήμα 1-8: Ιδανικός κύκλος Rankine με απομάστευση ατμού με κλειστό θερμαντήρα και διάγραμμα $T-s$	9
Σχήμα 1-9: Ιδανικός κύκλος Rankine με απομάστευση ατμού με έναν ανοικτό και τρεις κλειστούς θερμαντήρες.....	10
Σχήμα 1-10: Διάγραμμα $T-s$ για τον ιδανικό και πραγματικό ORC.....	10
Σχήμα 1-11: Διάταξη μηχανής ORC.....	11
Σχήμα 3-1: Διάγραμμα θερμοκρασία αδιαβατικής φλόγας προς αναλογία ισοδυναμίας για διαφορετικά σύνολα χημικών ειδών.....	46

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1-1: Το ενεργειακό ισοζύγιο για τον πραγματικό κύκλο Rankine.....	4
Πίνακας 3-1: Τύπος φλόγας/είδος μείγματος.....	41
Πίνακας Α-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης).....	63
Πίνακας Α-2: Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού.....	64
Πίνακας Α-3: Μοριακή μάζα, σταθερά αερίου και ιδιότητες κρίσιμου σημείου.....	67
Πίνακας Α-4: Ενθαλπία σχηματισμού, συνάρτηση Gibbs σχηματισμού και απόλυτη εντροπία στους 25°C, 1atm.....	68
Πίνακας Α-5: Ιδιότητες ορισμένων κοινών καυσίμων και υδρογονανθράκων.....	69

1 Κύκλοι Παραγωγής Ενέργειας Rankine

1.1 Εισαγωγή – Σκοπός

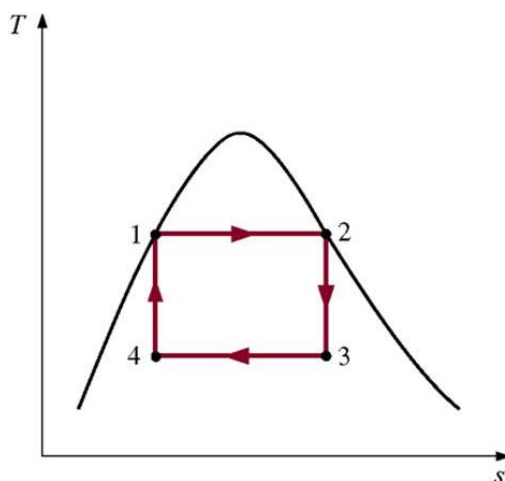
Σκοπός του κεφαλαίου είναι η μελέτη της συμπεριφοράς ενός απλού ιδανικού κύκλου Rankine ο οποίος βασίζεται στην θεωρία του Carnot, καθώς και οι παραλλαγές που μπορούν να εφαρμοστούν για την βελτίωση του κύκλου. Οι βελτιώσεις που παρουσιάζονται είναι ο ιδανικός κύκλος Rankine με αναθέρμανση και με απομάστευση ατμού. Γίνεται μελέτη για την επίδραση της πίεσης και της θερμοκρασίας του κύκλου και αναφορά στον οργανικό κύκλο Rankine.

Στο υπό-κεφάλαιο 1.6, εφαρμόζονται αντίστοιχες ασκήσεις που παρουσιάζουν αναλυτικά την συμπεριφορά του κύκλου Rankine για κάθε περίπτωση, με την παρουσία πραγματικών αποτελεσμάτων.

1.2 Ιδανικός Κύκλος Carnot

Ένας αναστρέψιμος (ιδανικός) κύκλος Carnot είναι ο πλέον αποδοτικός κύκλος λειτουργίας μεταξύ δύο δεδομένων θερμοκρασιών ορίων. Η θεωρία βασίζεται σε έναν κύκλο Carnot σταθεροποιημένης ροής που εκτελείται εντός του θόλου κορεσμού, μιας καθαρής ουσίας (Σχήμα 1-1), στην οποία η πηγή θερμότητας είναι τόσο μεγάλη, έτσι ώστε η θερμοκρασία της να παραμένει σταθερή, και όλες οι διεργασίες του κύκλου είναι αντιστρεπτές.

Το διάγραμμα (Σχήμα 1-1) θερμοκρασίας-εντροπίας ($T-s$) παρουσιάζει τη καμπύλη κορεσμού του εργαζόμενου μέσου και τη διεργασία του κύκλου Carnot.



Σχήμα 1-1: Διάγραμμα $T-s$ κύκλου Carnot με ατμό (Cengel & Boles, 2014).

Το ρευστό θερμαίνεται αντιστρεπτά και ισόθερμα σε έναν λέβητα (διεργασία 1-2), εκτονώνεται ισεντροπικά σε έναν στρόβιλο και παράγει έργο (διεργασία 2-3), συμπυκνώνεται αντιστρεπτά και ισόθερμα σε ένα συμπυκνωτή (διεργασία 3-4) και τέλος συμπιέζεται ισεντροπικά από έναν συμπιεστή έως την αρχική κατάσταση (διεργασία 4-1) (Cengel & Boles, 2014 [3]).

1.3 Κύκλος Rankine

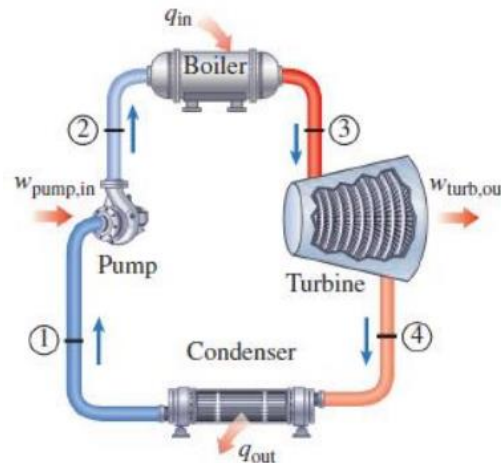
Ο κύκλος Rankine είναι ένας μηχανικός θερμοδυναμικός κύκλος που χρησιμοποιείται συνήθως σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας για τη μετατροπή της ενέργειας (λόγω υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας) του ατμού σε μηχανική ενέργεια μέσω θερμικών μηχανών, όπως οι ατμοστρόβιλοι ή οι παλινδρομικές ατμομηχανές.

Ο κύκλος Rankine κάνει πρακτική χρήση της αύξησης της πίεσης που συμβαίνει όταν ένα συμπυκνωμένο ρευστό αναγκάζεται να εξατμιστεί μέσα σε ένα δοχείο. Ο κύκλος ξεκινά όταν ένα υγρό, όπως το νερό, συμπιέζεται και τίθεται υπό υψηλή πίεση. Όταν το υγρό θερμαίνεται, το συμπιεσμένο ρευστό γίνεται ατμός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας. Όταν η θερμότητα μειώνεται, ο ατμός ψύχεται και συμπυκνώνεται και πάλι σε υγρή μορφή. Τότε ο κύκλος ξεκινά ξανά.

1.3.1 Απλός Ιδανικός Κύκλος Rankine

Τα κύρια στοιχεία του κύκλου Rankine περιλαμβάνουν έναν περιστρεφόμενο ατμοστρόβιλο (turbine), μια αντλία (pump), έναν συμπυκνωτή (condenser) και έναν λέβητα (Boiler). Προφανώς, και ο λέβητας μπορεί να αναφέρεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας (heat exchanger).

Η αντλία παρέχει υγρό στο λέβητα. Ένας λέβητας χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του υγρού και να το μετατρέψει σε ατμό, στην απαιτούμενη πίεση και θερμοκρασία σύμφωνα με τις απαιτήσεις του στρόβιλου για παραγωγή ενέργειας. Στη συνέχεια, ο ατμός χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία ενός στρόβιλου και την παραγωγή έργου (ή προφανώς ενέργειας). Η έξοδος του στρόβιλου ψύχεται στον συμπυκνωτή ακτινικής ή αξονικής ροής και ο κύκλος συνεχίζεται.



Σχήμα 1-2: Απλός ιδανικός κύκλος Rankine (Cengel & Boles, 2014).

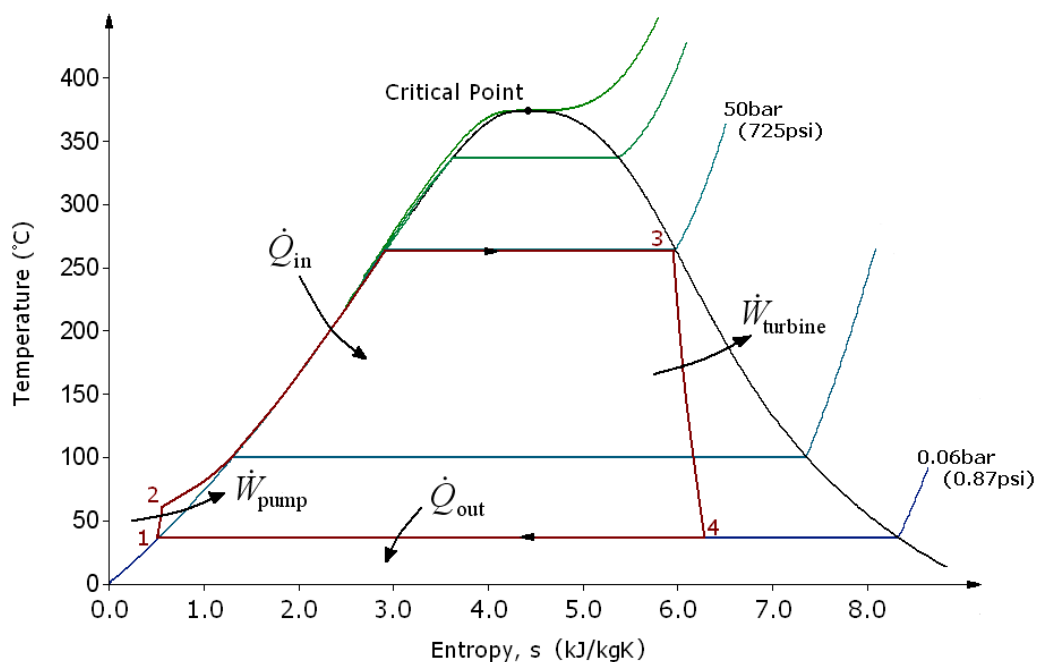
1 → 2: Ισεντροπική Συμπίεση. Το υγρό αναφοράς ή διεργασίας (reference or working fluid) αντλείται από χαμηλή σε υψηλή πίεση στην αντλία τροφοδοσίας. Καθώς το ρευστό είναι υγρό σε αυτό το στάδιο, η αντλία απαιτεί λίγη ενέργεια εισόδου και η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται, εξαιτίας της μείωσης του ειδικού όγκου.

2 → 3: Ισοβαρής Μεταφορά Θερμότητας. Υγρό υψηλής πίεσης εισέρχεται στο λέβητα ως συμπιεσμένο υγρό από την αντλία τροφοδοσίας, θερμαίνεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από την θερμοκρασία κορεσμού και εξέρχεται ως υπέρθερμος ατμός. Ο λέβητας είναι ένας μεγάλος

εναλλάκτης θερμότητας όπου μεταφέρει θερμότητα (προσθήκη ενέργειας) στο υγρό, υπό σταθερή πίεση και συχνά αποκαλείται ατμογεννήτρια.

3 → 4: Ισεντροπική Εκτόνωση. Ο υπέρθερμος ατμός εισέρχεται στο στρόβιλο, εκτονώνεται ισεντροπικά και παράγει έργο, περιστρέφοντας τον άξονα που συνδέεται με μια ηλεκτρογεννήτρια. Η θερμοκρασία και η πίεση του ατμού μειώνονται κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας στις τιμές κατάστασης, όπου ο υδρατμός εισέρχεται στον συμπυκνωτή.

4 → 1: Ισοβαρής Απόρριψη Θερμότητας. Από τον στρόβιλο εξέρχεται το μίγμα ατμού-υγρού υψηλής ποιότητας και εισέρχεται στον συμπυκνωτή, όπου συμπυκνώνεται σε σταθερή πίεση για να γίνει κορεσμένο υγρό. Πρόκειται δηλαδή, για ένα μεγάλο εναλλάκτη θερμότητας όπου απορρίπτεται θερμότητα προς ένα ψυκτικό μέσο ή την ατμόσφαιρα.



Σχήμα 1-3: Διάγραμμα T – s απλού ιδανικού κύκλου Rankine (Wikipedia, 2007 [15]).

Σε έναν ιδανικό κύκλο Rankine, η αντλία και ο στρόβιλος λειτουργούν υπό ισεντροπικές συνθήκες, άρα δεν παράγουν εντροπία και ως εκ τούτου μεγιστοποιούν την καθαρή απόδοση εργασίας. Οι διεργασίες 1–2 και 3–4 αντιπροσωπεύονται από κάθετες γραμμές στο διάγραμμα T–s και μοιάζουν περισσότερο με αυτή του κύκλου Carnot. Ο κύκλος Rankine που παρουσιάζεται εμποδίζει την κατάσταση του ρευστού εργασίας να εισέλθει στην περιοχή στην περιοχή υπερθερμασμένου ατμού μετά τη εκτόνωση στον στρόβιλο, μειώνοντας την ενέργεια που καταναλώνεται από τον συμπυκνωτή.

Ενεργειακή Ανάλυση Ιδανικού Κύκλου Rankine

Οι τέσσερις διατάξεις που συνδέονται στον κύκλο Rankine, μπορούν να αναλυθούν ως διεργασίες σταθεροποιημένης ροής. Η εξίσωση της ενέργειας ανά μονάδα μάζας υδρατμού έχει την εξής μορφή [3]:

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_e - h_i \quad (1.1)$$

Όπου:

q_{in} η θερμότητα εισόδου στον Λέβητα (Boiler), kJ/kg

q_{out} η θερμότητα εξόδου από τον Συμπυκνωτή (Condenser), kJ/kg

w_{in} το έργο εισόδου στην Αντλία (Pump), kJ/kg

w_{out} το έργο εξόδου από τον Στρόβιλο (Turbine), kJ/kg

Πίνακας 1-1: Το ενεργειακό ισοζύγιο για τον πραγματικό κύκλο Rankine.

<u>Διατάξεις Κύκλου Rankine</u>	<u>Θερμότητα</u>	<u>Έργο</u>	
Αντλία	$q = 0$	$w_{pump,in} = h_2 - h_1 = v(P_2 - P_1)$	(1.2)
Λέβητας	$q_{in} = h_3 - h_2$	$w = 0$	(1.3)
Στρόβιλος	$q = 0$	$w_{turb,out} = h_3 - h_4$	(1.4)
Συμπυκνωτής	$q_{out} = h_4 - h_1$	$w = 0$	(1.5)

Η ξηρότητα (ποιότητα) του ατμού x ορίζεται ως ο λόγος της μάζας ατμού προς τη συνολική μάζα του μείγματος υγρού και ατμού. Εάν είναι γνωστή η ξηρότητα και η πίεση (ή η θερμοκρασία), τότε η κατάσταση είναι πλήρως καθορισμένη εντός της διφασικής περιοχής και οι θερμοδυναμικές ιδιότητες οι οποίες μεταφέρονται με τη μάζα του εργαζόμενου μέσου στην περιοχή του υγρού ατμού βρίσκονται ως άθροισμα των αντίστοιχων ποσοτήτων της κάθε φάσης, άρα ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$s \text{ η εντροπία, } kJ/kg \cdot K \quad s = s_f + x \cdot s_{fg} \quad (1.6)$$

$$h \text{ η ενθαλπία, } kJ/kg \quad h = h_f + x \cdot h_{fg} \quad (1.7)$$

$$u \text{ η εσωτερική ενέργεια, } kJ/kg \quad u = u_f + x \cdot u_{fg} \quad (1.8)$$

$$v \text{ ο ειδικός όγκος, } m^3/kg \quad v = v_f + x \cdot v_{fg} \quad (1.9)$$

Όπου τα σύμβολα f και g αναφέρονται αντίστοιχα στην υγρή και στην αέρια φάση σε κατάσταση κορεσμού στην ίδια πίεση και θερμοκρασία με το εν λόγω σημείο.

Το καθαρό ειδικό έργο του κύκλου υπολογίζεται από την σχέση:

$$w_{net} = w_{turb,out} - w_{pump,in} \quad (1.10)$$

$$w_{net} = q_{in} - q_{out} \quad (1.11)$$

Η θερμική απόδοση του κύκλου προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} \quad (1.12)$$

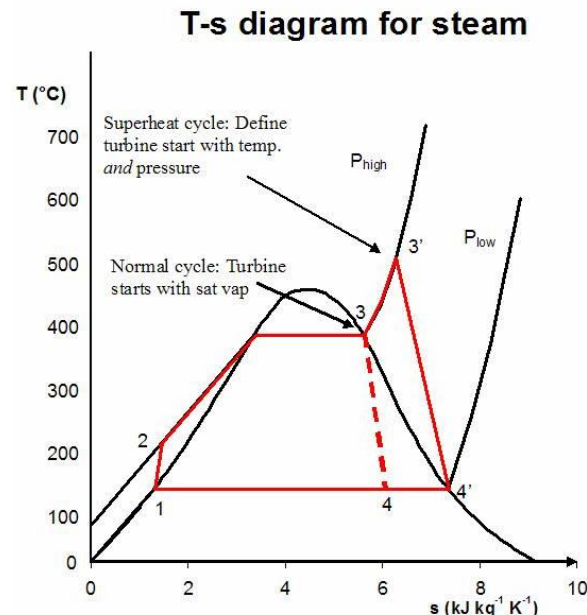
Η απόδοση του ιδανικού κύκλου Rankine είναι κοντά στην απόδοση του κύκλου Carnot και περιορίζεται από την υψηλή θερμότητα εξάτμισης από το υγρό. Το υγρό πρέπει να ανακυκλώνεται και να επαναχρησιμοποιείται συνεχώς, επομένως, το νερό είναι το πιο πρακτικό υγρό για αυτόν τον κύκλο.

1.3.2 Πραγματικός Κύκλος Rankine

Στην ανάλυση του κύκλου Rankine, δεν λαμβάνονται καθόλου υπόψιν οι απώλειες, γι' αυτό χαρακτηρίζεται ως ιδανικός. Σε έναν πραγματικό κύκλο, η διαδικασία εκτόνωσης του στροβίλου και η διαδικασία συμπίεσης της αντλίας δεν μπορούν να εκτελεστούν υπό ισεντροπικές συνθήκες. Πρόκειται δηλαδή, για μη αναστρέψιμες διαδικασίες και η εσωτερική ενέργεια (εντροπία) του υγρού αυξάνεται κατά τη διάρκεια αυτών των διεργασιών. Αυτό αυξάνει σε κάποιο βαθμό την ισχύ που απαιτείται από την αντλία και μειώνει την ισχύ που παράγεται από τον στρόβilo.

Η τριβή του ρευστού, προκαλεί πτώση πίεσης στο λέβητα, στον συμπυκνωτή και στις σωληνώσεις που έχει ως αποτέλεσμα ο ατμός να εξέρχεται από το λέβητα σε χαμηλότερη πίεση. Επίσης η πίεση στην είσοδο του στροβίλου είναι χαμηλότερη από την πίεση στην έξοδο του λέβητα εξαιτίας της πτώσης πίεσης στις σωληνώσεις που συνδέουν αυτές τις δυο συνιστώσες. Η πτώση πίεσης στο συμπυκνωτή είναι συνήθως πολύ μικρή. Για να αντισταθμιστούν οι πτώσεις πίεσης, απαιτείται μια αντλία μεγαλύτερου μεγέθους, καθώς και μεγαλύτερο έργο εισόδου σε αυτήν.

Μια επιπλέον σημαντική πηγή μη-αντιστρεπτών διεργασιών είναι οι απώλειες θερμότητας του ατμού με το περιβάλλον, οπότε για να διατηρηθεί το παραγόμενο έργο απαιτείται η πρόσδοση μεγαλύτερης ποσότητας θερμότητας στον ατμό (εντός του λέβητα), συνεπώς ο βαθμός απόδοσης μειώνεται.



Σχήμα 1-4: Διάγραμμα $T-s$ πραγματικού κύκλου Rankine (Wikipedia, 2007 [16]).

Στο παραπάνω διάγραμμα $T-s$, η κατάσταση 3 βρίσκεται στο όριο της διφασικής περιοχής ατμού και νερού, επομένως μετά την εκτόνωση, ο ατμός αλλάζει σε υγρή μορφή. Με την υπερθέρμανση του ατμού, η κατάσταση 3 θα μετακινηθεί προς τα δεξιά (και πάνω) στο διάγραμμα και ως εκ τούτου θα παράγει έναν πιο ξηρό ατμό μετά τη εκτόνωση.

1.3.3 Απόκλιση Πραγματικού από Ιδανικού Κύκλου

Ειδικής σημασίας είναι οι μη αναστρεπτές μεταβολές που λαμβάνουν χώρα στην αντλία και το στρόβιλο. Η αντλία απαιτεί μεγαλύτερο έργο εισόδου, ενώ ο στρόβιλος παράγει μικρότερο έργο εξόδου.

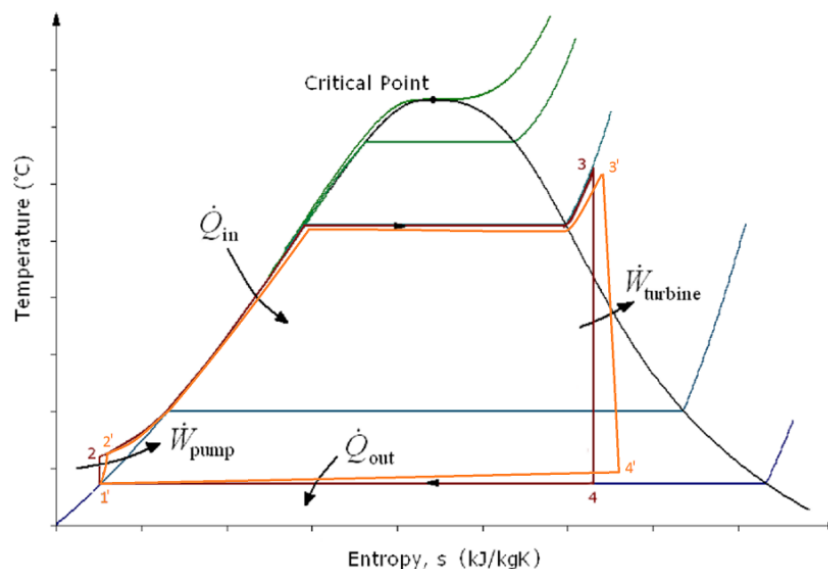
Οι αποκλίσεις των πραγματικών αντλιών και στροβίλων από τις αντίστοιχες ισεντροπικές διατάξεις μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας ισεντροπικές αποδόσεις, ως εξής:

$$\eta_P = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (1.13)$$

$$\eta_T = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad (1.14)$$

Όπου 2a και 4a συμβολίζονται οι πραγματικές καταστάσεις εξόδου στην αντλία και στο στρόβιλο αντίστοιχα, και 2s και 4s οι ισεντροπικές μεταβολές (Cengel & Boles, 2014 [3]).

Ο βαθμός απόδοσης της αντλίας είναι συνήθως κοντά στο 0.8 ενώ για την ιδανική είναι 1.



Σχήμα 1-5: Διάγραμμα T – s απόκλισης πραγματικού από τον ιδανικό κύκλο Rankine (Παπαδόπουλου, 2011).

Τρόποι Βελτίωσης της Απόδοσης του Κύκλου Rankine

Οι ατμοπαραγωγοί παράγουν τη μεγαλύτερη ποσότητα ηλεκτρικής ισχύος παγκοσμίως. Οπότε ακόμα και μια μικρή αύξηση στο βαθμό απόδοσής τους μπορεί να σημάνει την εξοικονόμηση μεγάλων ποσοτήτων καυσίμου. Πίσω απ' όλες τις δυνατές τροποποιήσεις είναι η ιδέα της αύξησης της θερμοκρασίας που μεταδίδεται η θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο στο λέβητα, ή η μείωση της θερμοκρασίας στην οποία απορρίπτεται η θερμότητα στο συμπυκνωτή. Οι βασικές παρεμβάσεις είναι οι εξής (Cengel & Boles, 2014 [3]):

1. Μείωση της πίεσης συμπύκνωσης
2. Υπερθέρμανση ατμού σε υψηλότερες θερμοκρασίες
3. Αύξηση της πίεσης στο λέβητα
4. Υπερκρίσιμος κύκλος

1.4 Βελτιωμένοι Κύκλοι Rankine

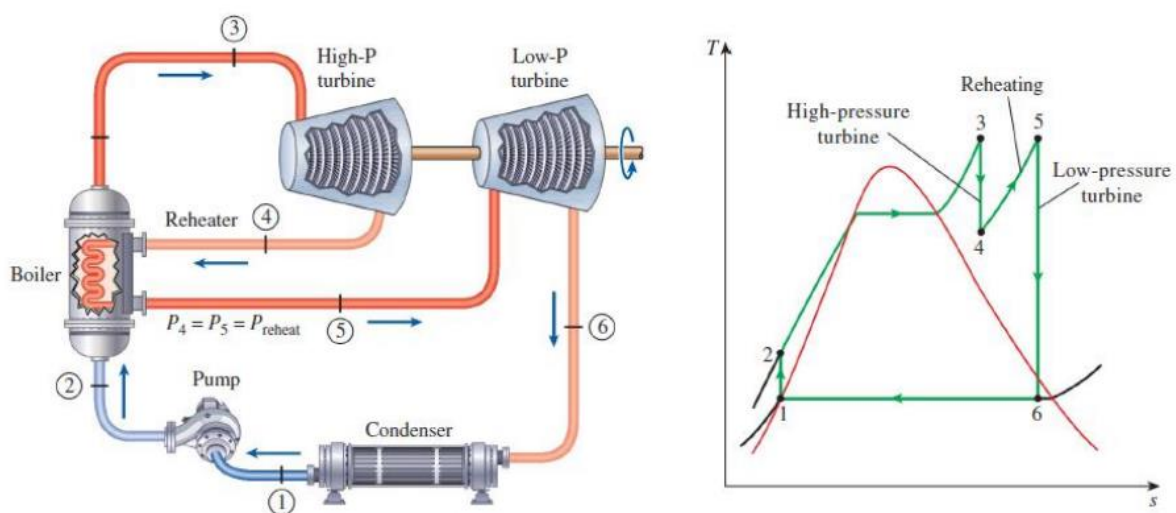
Η βελτίωση των κύκλων Rankine οποιασδήποτε διαδικασίας επιτυγχάνεται εάν εκτελεστεί όσο το δυνατόν πιο κοντά στις θερμοκρασίες των δεξαμενών υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη λειτουργία του συμπυκνωτή σε υποατμοσφαιρική πίεση. Η θερμοκρασία στο λέβητα περιορίζεται από την πίεση κορεσμού. Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας είναι δυνατή με υπερθέρμανση του κορεσμένου ατμού. Αυτό έχει ως πλεονέκτημα ότι η ποιότητα των ατμών μετά τον στρόβιλο αυξάνεται, επομένως μειώνεται η διάβρωση των πτερυγίων του στροβίλου.

1.4.1 Rankine με Αναθέρμανση

Η αναθέρμανση είναι μια πρακτική λύση στο πρόβλημα της υπερβολικής υγρασίας που εμφανίζεται στους στρόβιλους και χρησιμοποιείται συχνά στις συχνότερες μονάδες παραγωγής ισχύος με υδρατμό.

Σε αυτή την περίπτωση, η διαφορά του ιδανικού κύκλου Rankine με αναθέρμανση από τον απλό κύκλο είναι στο ότι η διεργασία εκτόνωσης λαμβάνει χώρα σε δύο βαθμίδες, δηλαδή περιλαμβάνει δύο ατμοστρόβιλους (υψηλής και χαμηλής πίεσης), στους οποίους γίνεται διαδοχικά η εκτόνωση του ατμού σε δύο στάδια.

Στην πρώτη βαθμίδα (στον στρόβιλο υψηλής πίεσης), ο υδρατμός εκτονώνεται ισεντροπικά σε μια ενδιάμεση πίεση και αποστέλλεται ξανά στον λέβητα (διεργασία 3-4), όπου αναθερμαίνεται υπό σταθερή πίεση, συνήθως στη θερμοκρασία του σημείου εισόδου του στροβίλου της πρώτης βαθμίδας (διεργασία 4-5), ενώ η βέλτιστη πίεση αναθέρμανσης που απαιτείται είναι μόνο το ένα τέταρτο της αρχικής πίεσης του λέβητα. Στη συνέχεια, ο υδρατμός εκτονώνεται ισεντροπικά την δεύτερη βαθμίδα (στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης) στην πίεση του συμπυκνωτή για να ολοκληρωθεί η διεργασία της εκτόνωσης (διεργασία 5-6).



Σχήμα 1-6: Ιδανικός κύκλος Rankine με αναθέρμανση και διάγραμμα T- s (Cengel & Boles, 2014).

Για ένα κύκλο με αναθέρμανση, η συνολική προσθήκη θερμότητας είναι:

$$q_{in} = q_{primary} + q_{reheat} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \quad (1.15)$$

Το συνολικό έργο εξόδου των στροβίλων είναι:

$$w_{turb,out} = w_{turb,I} + w_{turb,II} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) \quad (1.16)$$

Το μίγμα στην έξοδο της βαθμίδας χαμηλής πίεσης του στροβίλου έχει υψηλότερη ποιότητα ενώ βελτιώνεται και ο βαθμός απόδοσης κατά 4% έως 5%, μέσω της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας στην οποία η θερμότητα μεταφέρεται στον υδρατμό (Cengel & Boles, 2014 [3]).

1.4.2 Rankine με Απομάστευση Ατμού

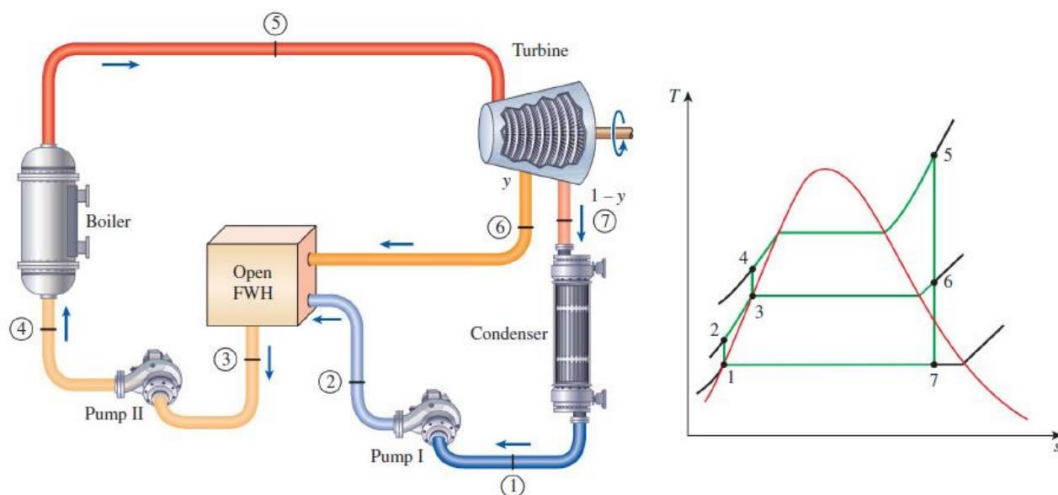
Περαιτέρω βελτίωση του βαθμού απόδοσης του κύκλου Rankine μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, στην οποία γίνεται η θέρμανση του εργαζόμενου μέσου. Με βάση αυτήν την παρατήρηση, εισήχθη μια βελτιωμένη παραλλαγή του κύκλου, η οποία χρησιμοποιεί απομάστευση ατμού για προθέρμανση του νερού πριν εισέλθει στο λέβητα. Ποσοστό του υδρατμού αφαιρείται (απομαστεύεται) από το στρόβιλο σε διάφορα σημεία της εκτόνωσης και χρησιμοποιείται για την θέρμανση του νερού τροφοδοσίας. Η συσκευή αυτή όπου το νερό τροφοδοσίας θερμαίνεται, ονομάζεται **θερμαντήρας του νερού τροφοδοσίας (ΘΝΤ)**.

Επιπλέον, αυτός ο κύκλος παρέχει έναν εύκολο τρόπο εξαέρωσης του νερού τροφοδοσίας, αφαιρώντας τον αέρα που εισρέει στον συμπυκνωτή, προκειμένου να αποφευχθεί η διάβρωση του λέβητα. Επίσης, βοηθά στον έλεγχο της μεγάλης ογκομετρικής παροχής του υδρατμού στις τελικές βαθμίδες του στροβίλου, εξαιτίας των υψηλών ειδικών όγκων στις χαμηλές πιέσεις.

Ο θερμαντήρας του νερού τροφοδοσίας είναι κατά βάση ένας εναλλάκτης θερμότητας, με τη βοήθεια του οποίου η θερμότητα μεταφέρεται από τον υδρατμό στο νερό τροφοδοσίας, είτε αναμιγνύοντας τις ροές των δύο ρευστών (ανοικτοί θερμαντήρες), είτε χωρίς ανάμιξη (κλειστοί θερμαντήρες).

Ανοικτοί Θερμαντήρας του Νερού Τροφοδοσίας (Open Feed Water Heater)

Ένας θερμαντήρας ανοικτού τύπου αποτελείται από ένα θάλαμο ανάμιξης όπου ο ατμός που εκμαϊεύεται από το στρόβιλο, αναμιγνύεται με το νερό τροφοδοσίας της αντλίας.



Σχήμα 1-7: Ιδανικός κύκλος Rankine με απομάστευση ατμού με ανοικτό θερμαντήρα και διάγραμμα $T - s$ (Cengel & Boles, 2014).

Στον ατμοστρόβιλο η εκτόνωση γίνεται σταδιακά. Μετά την ισηντροπική εκτόνωση, μέρος του ατμού αφαιρείται (απομαστεύεται) από το στρόβιλο, ενώ το υπόλοιπο συνεχίζει την εκτόνωση. Έπειτα, οδηγείται στον συμπυκνωτή και μετά στην αντλία. Μετά την αντλία το νερό δεν οδηγείται

Κατά την ανάλυση, είναι βολικότερο να εργαζόμαστε με ποσότητες ανά μονάδα μάζας του ατμού που ρέει στο λέβητα. Για 1 kg ατμού που εξέρχεται από το λέβητα, γ kg εκτονώνονται μερικώς στο στρόβιλο, στην κατάσταση 6. Το υπόλοιπο $(1-\gamma)$ kg εκτονώνεται στην πίεση του συμπυκνωτή. Συνεπώς η παροχές μάζας είναι διαφορετικές, κι αν υποθέσουμε ότι η παροχή μάζας στο λέβητα είναι m , τότε στο συμπυκνωτή είναι $(1-\gamma)m$.

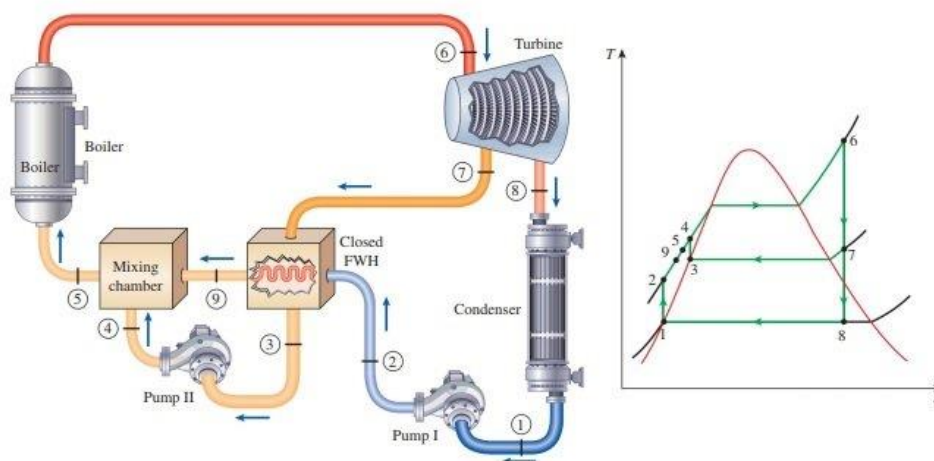
$$q_{in} = h_5 - h_4 \quad (1.17)$$

$$u_t = (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_6 - h_7) \quad (1.19)$$

$$w_{turb,out} = (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_6 - h_7) \quad (1.19)$$

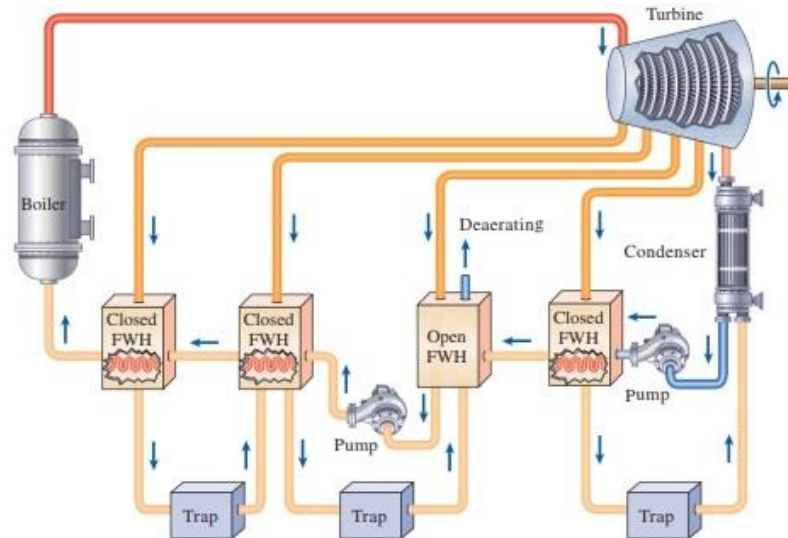
$$w_{pump,in} = (1 - y)w_{pump,I} + w_{pump,II} \quad (1.20)$$

Μια άλλη τεχνολογία αναγεννητή που συχνά χρησιμοποιείται στους ατμοπαραγωγούς είναι αυτός του κλειστού τύπου. Σε αυτόν η θερμότητα του απομαστευόμενου ατμού μεταφέρεται στο νερό τροφοδοσίας χωρίς ανάμιξη. Τα δύο ρεύματα μπορεί να είναι σε διαφορετική πίεση αφού δεν αναμειγνύονται. Σε έναν ιδανικό αναγεννητή κλειστού τύπου το νερό τροφοδοσίας θερμαίνεται στη θερμοκρασία εξόδου του απομαστευόμενου ατμού και εξέρχεται του αναγεννητή ως κορεσμένο νερό στην πίεση απομάστευσης.



9

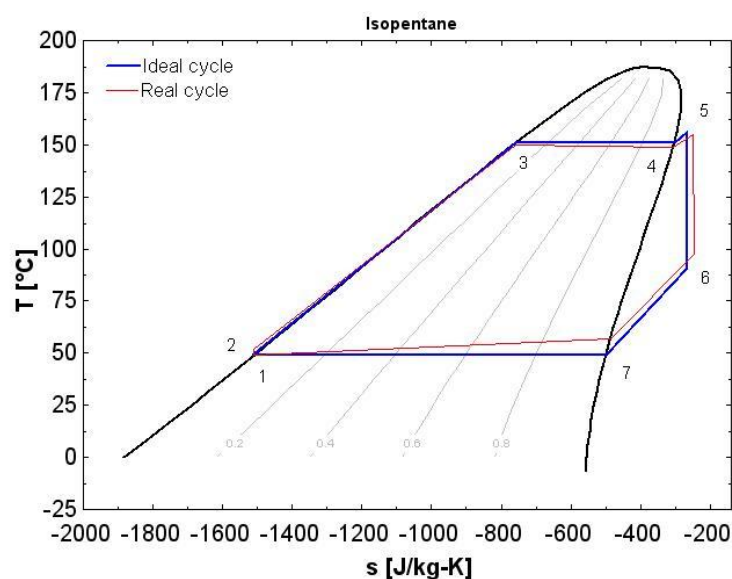
Οι περισσότεροι ατμοπαραγωγοί χρησιμοποιούν συνδυασμό ανοικτών και κλειστών θερμαντήρων με περισσότερες από μία απομαστεύσεις και τον αντίστοιχο αριθμό ενδιάμεσων αντλιών. Με τη μέθοδο αυτή, ο κύκλος Rankine προσεγγίζει περισσότερο τον κύκλο Carnot (διαδοχικοί κύκλοι Carnot), με αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης του θεωρητικού κύκλου Rankine.



Σχήμα 1-9: Ιδανικός κύκλος Rankine με απομάστευση ατμού με έναν ανοικτό και τρεις κλειστούς θερμαντήρες (Cengel & Boles, 2014).

1.5 Οργανικοί Κύκλοι Rankine

Ο Οργανικός Κύκλος Rankine (Organic Rankine Cycle – ORC) ονομάζεται για τη χρήση ενός οργανικού ρευστού υψηλής μοριακής μάζας με αλλαγή φάσης υγρού-ατμού ή σημείο βρασμού, που εμφανίζεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την αλλαγή φάσης νερού-ατμού. Το ρευστό επιτρέπει την ανάκτηση θερμότητας του κύκλου Rankine από πηγές χαμηλότερης θερμοκρασίας, όπως η καύση βιομάζας, η βιομηχανική απόβλητη θερμότητα, η γεωθερμία κ.λπ.



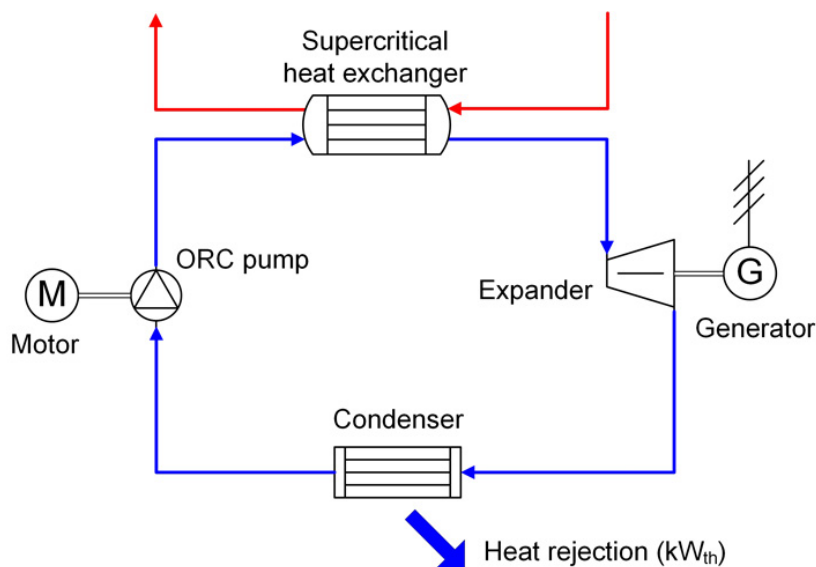
Σχήμα 1-10: Διάγραμμα T-s για τον ιδανικό και πραγματικό ORC (WIKIMEDIA COMMONS, 2007).

Η απόδοση του κύκλου είναι πολύ χαμηλότερη ως αποτέλεσμα του χαμηλότερου εύρους θερμοκρασίας, το οποίο μπορεί να μετατραπεί από μόνη της σε ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, υπάρχει μεγάλη ποικιλία από ρευστά, που έχουν σημεία βρασμού πάνω από το νερό, γεγονός που δίνει μεγαλύτερη ευελιξία κατά το σχεδιασμό της διαδικασίας/διεργασίας, καθώς το ρευστό μπορεί να επιλεγεί με βάση τη διαθεσιμότητα και τις ιδιότητες της πηγής θερμότητας. Οι ιδιότητες του πραγματικού ρευστού εργασίας έχουν μεγάλη επίδραση στην ποιότητα του ατμού μετά το βήμα εκτόνωσης, επηρεάζοντας τον σχεδιασμό ολόκληρου του κύκλου.

Αρχή λειτουργίας του ORC

Η αρχή λειτουργίας του οργανικού κύκλου Rankine είναι πανομοιότυπη με του συμβατικού κύκλου Rankine νερού-ατμού, δηλαδή το ρευστό εργασίας αντλείται σε ένα λέβητα όπου εξατμίζεται, διέρχεται μέσω μιας συσκευής εκτόνωσης και στη συνέχεια μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας συμπυκνωτή όπου τελικά επανασυμπυκνώνεται.

Στο Σχήμα 1-11 παρουσιάζεται η βασική διάταξη μιας μηχανής οργανικού κύκλου Rankine, όπου το κόκκινο κύκλωμα αποτελεί το κύκλωμα που παρέχει τη θερμότητα στη μηχανή μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, ενώ το μπλε κύκλωμα αποτελεί τη διεργασία προς διερεύνηση.



Σχήμα 1-11: Διάταξη μηχανής ORC (Ντάβου, Κοσμάδακης, Μανωλάκος & Παπαδάκης, 2019).

Στον ιδανικό κύκλο που περιγράφεται από το θεωρητικό μοντέλο του κινητήρα, η εκτόνωση είναι ισεντροπική και οι διαδικασίες εξάτμισης και συμπύκνωσης είναι ισοβαρής.

Σε κάθε πραγματικό κύκλο, η παρουσία μη αναστρέψιμων μειώνει την απόδοση του κύκλου. Αυτές οι μη αναστρεψιμότητες εμφανίζονται κυρίως:

- Κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης: Μόνο ένα μέρος της ενέργειας που ανακτάται από τη διαφορά πίεσης μετατρέπεται σε χρήσιμο έργο. Το άλλο μέρος μετατρέπεται σε θερμότητα και χάνεται. Η απόδοση του διαστολέα ορίζεται σε σύγκριση με μια ισεντροπική διαστολή.

- Στους εναλλάκτες θερμότητας: Το λειτουργικό ρευστό ακολουθεί μια μακρά και οδοντωτή διαδρομή που εξασφαλίζει καλή ανταλλαγή θερμότητας, αλλά προκαλεί πτώσεις πίεσης που

μειώνουν την ποσότητα ισχύος που ανακτάται από τον κύκλο. Παρομοίως, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της πηγής θερμότητας και του ρευστού εργασίας προκαλεί καταστροφή της εξέργειας και μειώνει την απόδοση του κύκλου.

Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία στο τέλος της εργασίας ([3],[13],[14],[19]-[24] & [29]).

1.6 Ασκήσεις

1.6.1 Άσκηση 1. Απλός Ιδανικός Κύκλος Rankine

Θεωρούμε μια εγκατάσταση παραγωγής ισχύος με υδρατμό η οποία λειτουργεί σύμφωνα με τον απλό ιδανικό κύκλο Rankine (Σχήμα 1-2). Ο υδρατμός εισέρχεται στο στρόβιλο με 3 MPa και 350°C και συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή σε πίεση 75 kPa. Ζητείται ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου (Cengel & Boles, 2014 [3]).

ΛΥΣΗ

Αρχικά, προσδιορίζουμε τις ενθαλπίες σε κάθε σημείο του κύκλου, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τους πίνακες ατμού (Παράρτημα Α).

Κατάσταση 1:

Η πίεση δίνεται από εκφώνηση $P_1 = 75 \text{ kPa}$ (κορεσμένο υγρό/saturated liquid). Από Πίνακα A-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), βρίσκουμε τα ακόλουθα δεδομένα:

Saturated water—Pressure table

Press., P kPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231

$$T_{\text{sat},1} = 91.76^\circ\text{C} \quad v_1 = 0.001037 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$h_1 = 384.44 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad s_1 = 1.2132 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Κατάσταση 2:

Από το σημείο 1 στο σημείο 2 έχουμε τη δράση της αντλίας (αντιστρεπτή αδιαβατική μεταβολή = ισεντροπική συμπίεση), για την οποία ισχύει η σχέση (1.2):

$$w_{pump,in} = h_2 - h_1 = \int_1^2 v \, dP \approx v_1(P_2 - P_1)$$

Από εκφώνηση γνωρίζουμε ότι η πίεση είναι $P_2 = 3 \text{ MPa} = 3,000 \text{ kPa}$ άρα:

$$w_{pump,in} = h_2 - h_1 = v_1(P_2 - P_1) = 0.001037 \cdot (3,000 - 75) \text{ kPa} = 3.03 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = h_1 + w_{pump,in} = (384.44 + 3.03) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 387.47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Επειδή η συμπίεση εντός της αντλίας είναι ισεντροπική (ιδανικός κύκλος), ισχύει:

$$s_2 = s_1 = 1.2132 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Κατάσταση 3:

Από τα δεδομένα της άσκησης έχουμε ότι η πίεση και η θερμοκρασία στην κατάσταση 3 είναι ίση με $P_3 = 3 \text{ MPa}$ και $T_3 = 350^\circ\text{C}$. Επομένως, από τον Πίνακα A-2: Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού, βρίσκουμε τα ακόλουθα δεδομένα:

Superheated water

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K
$P = 3.00 \text{ MPa} (233.85^\circ\text{C})$				
Sat.	0.06667	2603.2	2803.2	6.1856
225				
250	0.07063	2644.7	2856.5	6.2893
300	0.08118	2750.8	2994.3	6.5412
350	0.09056	2844.4	3116.1	6.7450
400	0.09938	2933.6	3231.7	6.9235
450	0.10789	3021.2	3344.9	7.0856
500	0.11620	3108.6	3457.2	7.2359
600	0.13245	3285.5	3682.8	7.5103
700	0.14841	3467.0	3912.2	7.7590
800	0.16420	3654.3	4146.9	7.9885
900	0.17988	3847.9	4387.5	8.2028
1000	0.19549	4047.7	4634.2	8.4045
1100	0.21105	4253.6	4886.7	8.5955
1200	0.22658	4465.3	5145.1	8.7771
1300	0.24207	4682.6	5408.8	8.9502

$$v_3 = 0.09056 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$h_3 = 3116.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_3 = 6.7450 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Κατάσταση 4:

Γνωρίζουμε ότι $P_4 = P_1 = 75 \text{ kPa}$ (κορεσμένο μίγμα) και επειδή ο θερμοδυναμικός κύκλος είναι ιδανικός, η εκτόνωση εντός του ατμοστροβίλου είναι ισεντροπική, άρα ισχύει:

$$s_4 = s_3 = 6.7450 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Επίσης, έχουμε διφασικό μίγμα άρα από Πίνακα A-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), βρίσκουμε ότι η ξηρότητα του ατμού, για την οποία ισχύει η σχέση (1.6) είναι ίση:

$$x_4 = \frac{s_4 - s_{f,4}}{s_{fg,4}} = \frac{6.7450 - 1.2132}{6.2426} = 0.8861$$

Οπότε από την σχέση (1.7) γίνεται ο υπολογισμός της ειδικής ενθαλπίας:

$$h_4 = h_{f,4} + x_4 \cdot h_{fg,4} = 384.44 \frac{kJ}{kg} + 0.8861(2278.0) \frac{kJ}{kg} \Rightarrow h_4 = 2403.0 \frac{kJ}{kg}$$

Η προσθήκη θερμότητας στο λέβητα από την σχέση (1.3) είναι:

$$q_{in} = h_3 - h_2 = 3116.1 - 387.47 = 2728.6 \frac{kJ}{kg}$$

Η απόρριψη θερμότητας από τον συμπυκνωτή από την σχέση (1.5) είναι:

$$q_{out} = h_4 - h_1 = 2403.0 - 387.44 = 2018.6 \frac{kJ}{kg}$$

Επομένως, για τον θερμικό βαθμό απόδοσης του κύκλου ισχύει η σχέση (1.12):

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{2018.6}{2728.6} = 0.260 = 26.0\%$$

Εναλλακτικά, η θερμική απόδοση μπορεί να προσδιοριστεί υπολογίζοντας το καθαρό ειδικό έργο του κύκλου που δίνεται από την σχέση (1.4) & (1.10) & (1.11) ως εξής:

$$w_{turb,out} = h_3 - h_4 = (3116.1 - 2403.0) \frac{kJ}{kg} = 713.1 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{net} = w_{turb,out} - w_{pump,in} = (713.1 - 3.03) \frac{kJ}{kg} = 710.0 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{net} = q_{in} - q_{out} = (2728.6 - 2018.6) \frac{kJ}{kg} = 710.0 \frac{kJ}{kg}$$

Άρα, ο βαθμός απόδοσης του κύκλου είναι από την σχέση (1.12):

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{710.0}{2728.6} = 0.260 = 26.0\%$$

1.6.2 Άσκηση 2. Ιδανικός Κύκλος Rankine με Αναθέρμανση

Θεωρούμε κύκλο Rankine που λειτουργεί με ατμό και διαθέτει αναθέρμανση (Σχήμα 1-6). Ο ατμός αφήνει τον λέβητα και εισέρχεται στο στρόβιλο με πίεση 4 MPa και θερμοκρασία 400°C. Μετά από εκτόνωση στο στρόβιλο υψηλής πίεσεως έως 400 kPa, ο ατμός αναθερμαίνεται στους 400°C και εισέρχεται στο στρόβιλο χαμηλής πίεσεως, όπως εκτονώνεται μέχρι πίεσεως 10 kPa. Ζητείται ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου (θεωρώντας ισεντροπικές εκτονώσεις). Μετά τον συμπυκνωτή, το νερό βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού (Νικολός, 2021 [23]).

ΛΥΣΗ

Από την εκφώνηση γνωρίζουμε τα εξής δεδομένα:

$$P_3 = 4 \text{ MPa}, T_3 = 400^\circ\text{C}, P_4 = 400 \text{ kPa}, T_5 = 400^\circ\text{C}, P_6 = 10 \text{ kPa}$$

Κατάσταση 3 (στην έξοδο του λέβητα):

Γνωρίζουμε ότι $P_3 = 4 \text{ MPa}$ και $T_3 = 400^\circ\text{C}$ άρα από τον Πίνακα A-2: Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού, βρίσκουμε ότι:

T $^\circ\text{C}$	v m^3/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
$P = 4.0 \text{ MPa (250.35}^\circ\text{C)}$				
Sat.	0.04978	2601.7	2800.8	6.0696
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164

$$v_3 = 0.07343 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$h_3 = 3214.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_3 = 6.7714 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Κατάσταση 4 (στην έξοδο του στροβίλου υψηλής πίεσης):

Δίνεται ότι $P_4 = 400 \text{ kPa}$ και επειδή η εκτόνωση 3-4 στον στρόβιλο υψηλής πίεσης θεωρείται ισεντροπική (από την εκφώνηση), ισχύει:

$$s_4 = s_3 = 6.7714 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Από τον Πίνακα A-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), για πίεση 400 kPa παρατηρούμε ότι η τιμή $s_4 = 6.7714 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ βρίσκεται μεταξύ των τιμών της ειδικής εντροπίας για κεκορεσμένο νερό και κεκορεσμένο ατμό. Συνεπώς, η κατάσταση 4 βρίσκεται εντός της διφασικής περιοχής (υγρός ατμός).

Saturated water—Pressure table

Press., P kPa	Sat. temp., T_{sat} $^\circ\text{C}$	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955

Υπολογίζουμε στη συνέχεια την ξηρότητα του ατμού από την σχέση (1.6) ως εξής:

$$s_4 = s_{f,4} + x_4 \cdot s_{fg,4} \Rightarrow 6.7714 \frac{kJ}{kg \cdot K} = 1.7765 \frac{kJ}{kg \cdot K} + x_4 \cdot (5.1191) \frac{kJ}{kg \cdot K} \Rightarrow$$

$$(6.7714 - 1.7765) \frac{kJ}{kg \cdot K} = x_4 \cdot 5.1191 \frac{kJ}{kg \cdot K} \Rightarrow$$

$$x_4 = \frac{4.9949}{5.1191} = 0.9757$$

Οπότε από την σχέση (1.7) είναι δυνατός ο υπολογισμός της ειδικής ενθαλπίας του υγρού ατμού στην κατάσταση 4:

$$h_4 = h_{f,4} + x_4 \cdot h_{fg,4} = 604.66 \frac{kJ}{kg} + 0.9757 \cdot (2133.4) \frac{kJ}{kg} \Rightarrow$$

$$h_4 = 2,686.22 \frac{kJ}{kg}$$

Κατάσταση 5 (στην έξοδο του αναθερμαντήρα):

$$P_5 = P_4 = 400 \text{ kPa} = 0.4 \text{ MPa}$$

$$T_5 = 400^\circ\text{C}$$

Από τον Πίνακα A-2: Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού, για τις παραπάνω συνθήκες, βρίσκουμε:

Superheated water

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K
$P = 0.40 \text{ MPa} (143.61^\circ\text{C})$				
Sat.	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723
250	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580
700	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828

$$h_5 = 3273.9 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_5 = 7.9003 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Κατάσταση 6 (στην έξοδο του στρόβιλου χαμηλής πίεσης):

Από την εκφώνηση έχουμε $P_6 = 10 \text{ kPa}$ και θεωρούμε ισεντροπική εκτόνωση στον στρόβιλο, άρα:

$$s_6 = s_5 = 7.9003 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Από τον πίνακα A-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), για τη δεδομένη πίεση έχουμε, ότι η εντροπία της κατάστασης 6 είναι μικρότερη της εντροπίας του κορεσμένου ατμού. Συνεπώς, η κατάσταση 6 αντιστοιχεί σε υγρό ατμό (διφασική περιοχή).

Saturated water—Pressure table

Press., P kPa	Sat. temp., T _{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071

Ακολουθούμε αντίστοιχη διαδικασία, όπως στην κατάσταση 4, για τον υπολογισμό της ξηρότητας του ατμού στην κατάσταση 6:

$$s_6 = s_{f,6} + x_6 \cdot s_{fg,6} \Rightarrow 7.9003 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 0.6492 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} + x_6 \cdot (7.4996) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \Rightarrow$$

$$(7.9003 - 0.6492) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = x_6 \cdot 7.4996 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \Rightarrow$$

$$x_6 = \frac{7.2511}{7.4996} = 0.9669$$

Επομένως, είναι δυνατός ο υπολογισμός της ειδικής ενθαλπίας στην κατάσταση 6:

$$h_6 = h_{f,6} + x_6 \cdot h_{fg,6} = 191.81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.9669 \cdot (2392.1) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow$$

$$h_6 = 2,504.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Το συνολικό έργο εξόδου των στροβίλων προκύπτει από την σχέση (1.16), άρα ισχύει ότι:

$$w_{turb,out} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) \Rightarrow$$

$$w_{turb,out} = (3,214.5 - 2,686.22) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + (3,273.9 - 2,504.7) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow$$

$$w_{turb,out} = 528.28 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 769.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow$$

$$w_{turb,out} = 1,297.48 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Το ειδικό έργο της αντλίας προκύπτει προσεγγίζεται από την σχέση (1.2) ως εξής:

$$w_{pump,in} = h_2 - h_1 = v_1(P_2 - P_1)$$

Γνωρίζουμε ότι οι πιέσεις για την κατάσταση 1 και κατάσταση 2 είναι:

$$P_2 = P_3 = 4000 \text{ kPa}$$

$$P_1 = P_6 = 10 \text{ kPa}$$

Ο ειδικός όγκος λαμβάνεται στην κατάσταση 1, δηλαδή σε κατάσταση κορεσμένου νερού για πίεση 10 kPa άρα από τον πίνακα A-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), βρίσκουμε:

$$v_1 = 0.00101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$h_1 = 191.81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Επομένως, αντικαθιστώντας έχουμε ότι:

$$w_{pump,in} = v_1(P_2 - P_1) = 0.00101 \cdot (4,000 - 10) \text{ kPa} = 4.03 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = h_1 + w_{pump,in} = (191.81 + 4.03) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 195.84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Η προσδιδόμενη ειδική θερμότητα που προκύπτει από την σχέση (1.15), μεταξύ εισόδου και εξόδου του λέβητα, όπου η ροή είναι άεργη:

$$q_{in} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \Rightarrow$$

$$q_{in} = (3214.5 - 195.84) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + (3273.9 - 2,686.22) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow$$

$$q_{in} = 3,018.66 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 587.68 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow$$

$$q_{in} = 3,606.34 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Το καθαρό ειδικό έργο του κύκλου προκύπτει από την σχέση (1.10):

$$w_{net} = w_{turb,out} - w_{pump,in} = 1,297.48 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 4.03 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1,293.45 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου από την σχέση (1.12) είναι:

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{1,293.45}{3,606.34} = 0.3587 = 35.87\%$$

1.6.3 Άσκηση 3. Ιδανικός Κύκλος Rankine με Απομάστευση Ατμού

Θεωρούμε έναν κύκλο Rankine με απομάστευση ατμού και προθέρμανση νερού, που λειτουργεί με εργαζόμενο μέσο ατμό (Σχήμα 1-7). Ο ατμός εξέρχεται από τον λέβητα και εισέρχεται στον στρόβιλο σε πίεση 4,5 MPa και θερμοκρασία 350°C. Μετά από εκτόνωση εντός του στρόβιλου στα 375 kPa, τμήμα του ατμού απομαστεύεται από τον στρόβιλο για να προθερμάνει το νερό, σε προθερμαντήρα ανοικτού τύπου. Η πίεση εντός του προθερμαντήρα είναι 375 kPa και το νερό εξέρχεται του προθερμαντήρα σε μορφή κεκορεσμένου νερού πίεσης 375 kPa. Ο υπόλοιπος ατμός εκτονώνεται εντός του ατμοστρόβιλου μέχρι πίεση 10 kPa. Ζητείται ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου (θεωρώντας ιδανικό κύκλο) (Νικολός, 2021 [23]).

ΛΥΣΗ

Από την εκφώνηση δίνονται τα εξής δεδομένα:

$$P_3 = 375 \text{ kPa}, P_5 = 4.5 \text{ MPa}, T_5 = 350^\circ\text{C}, P_6 = 375 \text{ kPa}, P_7 = 10 \text{ kPa}$$

Κατάσταση 1 (Κορεσμένο νερό πιέσεως 10 kPa):

Η πίεση δίνεται από εκφώνηση: $P_1 = P_7 = 10 \text{ kPa}$ (κορεσμένο υγρό). Από Πίνακα A-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), βρίσκουμε τα ακόλουθα δεδομένα:

Saturated water—Pressure table

Press., P kPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071

$$T_{\text{sat},1} = 45.81^\circ\text{C}$$

$$v_1 = v_f = 0.00101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$h_1 = h_f = 191.81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_1 = s_f = 0.6492 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Κατάσταση 2 (Υπόψυκτο νερό):

Από το σημείο 1 στο σημείο 2 έχουμε τη δράση της αντλίας (αντιστρεπτή αδιαβατική μεταβολή = ισηντροπική συμπίεση), για την οποία ισχύει η σχέση (1.2):

$$w_{\text{pump},in} = h_2 - h_1 = \int_1^2 v \, dP \approx v_1(P_2 - P_1)$$

Από εκφώνηση γνωρίζουμε ότι η πίεση είναι $P_2 = P_3 = 375 \text{ kPa}$ άρα:

$$w_{\text{pump},1} = v_1(P_2 - P_1) = 0.00101 \cdot (375 - 10) \text{ kPa} = 0.36865 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 0.37 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = h_1 + w_{pump,1} = (191.81 + 0.37) \frac{kJ}{kg} = 192.18 \frac{kJ}{kg}$$

Επειδή η συμπίεση εντός της αντλίας είναι ισεντροπική (ιδανικός κύκλος), ισχύει:

$$s_2 = s_1 = 0.6492 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Κατάσταση 3 (Κορεσμένο νερό πίεσεως 375 kPa):

Από τα δεδομένα της άσκησης έχουμε ότι η πίεση είναι ίση με $P_3 = 375 \text{ kPa}$ και από τον Πίνακα Α-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), βρίσκουμε τα ακόλουθα δεδομένα:

Saturated water—Pressure table

Press., P kPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, $kJ/kg \cdot K$		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955

$$T_{sat,3} = 141.61^\circ\text{C} \quad v_3 = 0.001081 \frac{m^3}{kg}$$

$$h_3 = 594.73 \frac{kJ}{kg} \quad s_3 = 1.7526 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Κατάσταση 4 (Υπόψυκτο υγρό πίεσεως 4.5 MPa):

Από το σημείο 3 στο σημείο 4 η συμπίεση εντός της δεύτερης αντλίας είναι ισεντροπική, οπότε ισχύει η σχέση (1.2):

$$w_{pump,2} = h_4 - h_3 = \int_3^4 v \, dP \approx v_3(P_4 - P_3)$$

Από εκφώνηση γνωρίζουμε ότι η πίεση είναι $P_4 = P_5 = 4.5 \text{ MPa} = 4500 \text{ kPa}$, άρα:

$$w_{pump,2} = v_3(P_4 - P_3) = 0.001081 \cdot (4500 - 375) \text{ kPa} = 4.19925 \frac{kJ}{kg} \approx 4.20 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_4 = h_3 + w_{pump,2} = (594.73 + 4.20) \frac{kJ}{kg} = 598.93 \frac{kJ}{kg}$$

Επειδή η συμπίεση εντός της αντλίας είναι ισεντροπική (ιδανικός κύκλος), ισχύει:

$$s_4 = s_3 = 1.7526 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Κατάσταση 5 (Υπέρθερμος ατμός):

Γνωρίζουμε ότι $P_5 = 4.5 \text{ MPa}$ και $T_5 = 350^\circ\text{C}$ άρα από τον Πίνακα A-2: Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού, βρίσκουμε ότι:

Superheated water

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K
-----------	---------------------------	--------------	--------------	----------------

Sat.	$P = 4.5 \text{ MPa (257.44}^\circ\text{C)}$			
225	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198
250	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429
300	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854
350	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153
400	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071
450	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770
500	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323
600	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127
700	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647
800	0.10916	3648.8	4140.0	7.7962
900	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118
1000	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144
1100	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060
1200	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880
1300	0.16140	4680.1	5406.5	8.7616

$$v_5 = 0.05842 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$h_5 = 3081.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_5 = 6.5153 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Κατάσταση 6 (Υγρός ατμός πίεσεως 375 kPa):

Από την εκφώνηση έχουμε $P_6 = 375 \text{ kPa}$ και θεωρούμε ισεντροπική εκτόνωση στον στρόβιλο, άρα:

$$s_6 = s_5 = 6.5153 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Από τον Πίνακα A-5: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), για τη δεδομένη πίεση έχουμε, ότι η εντροπία της κατάστασης 6 είναι μικρότερη της εντροπίας του κορεσμένου ατμού. Συνεπώς, η κατάσταση 6 αντιστοιχεί σε υγρό ατμό (διφασική περιοχή).

Υπολογίζουμε στη συνέχεια την ξηρότητα του ατμού από την σχέση (1.6) ως εξής:

$$s_6 = s_{f,6} + x_6 \cdot s_{fg,6} \Rightarrow 6.5153 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 1.7526 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} + x_6 \cdot (5.1645) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \Rightarrow$$

$$(6.5153 - 1.7526) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = x_6 \cdot 5.1645 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \Rightarrow$$

$$x_6 = \frac{4.7627}{5.1645} = 0.9222$$

Επομένως, είναι δυνατός ο υπολογισμός της ενθαλπίας από την σχέση (1.7) στην κατάσταση 6:

$$h_6 = h_{f,6} + x_6 \cdot h_{fg,6} = 594.73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.9222 \cdot (2140.4) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow$$

$$h_6 = 2,568.61 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Κατάσταση 7 (Υγρός ατμός πίεσεως 10 kPa):

Από την εκφώνηση έχουμε $P_7 = 10 \text{ kPa}$ και η εκτόνωση εντός του ατμοστροβίλου λαμβάνεται ισεντροπική, οπότε:

$$s_7 = s_6 = s_5 = 6.5153 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Από τον πίνακα A-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), για τη δεδομένη πίεση έχουμε, ότι η εντροπία της κατάστασης 6 είναι μικρότερη της εντροπίας του κορεσμένου ατμού. Συνεπώς, η κατάσταση 6 αντιστοιχεί σε υγρό ατμό (διφασική περιοχή).

Ακολουθούμε αντίστοιχη διαδικασία, όπως στην κατάσταση 6, για τον υπολογισμό της ξηρότητας του ατμού στην κατάσταση 7:

$$\begin{aligned} s_7 &= s_{f,7} + x_7 \cdot s_{fg,7} \Rightarrow 6.5153 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 0.6492 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} + x_7 \cdot (7.4996) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \Rightarrow \\ (6.5153 - 0.6492) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} &= x_7 \cdot 7.4996 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \Rightarrow \\ x_7 &= \frac{5.8661}{7.4996} = 0.7822 \end{aligned}$$

Επομένως, είναι δυνατός ο υπολογισμός της ειδικής ενθαλπίας στην κατάσταση 7:

$$\begin{aligned} h_7 &= h_{f,7} + x_7 \cdot h_{fg,7} = 191.81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.7822 \cdot (2392.1) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow \\ h_7 &= 2,062.91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Ανάμειξη στον προθερμαντήρα

Για να βρούμε το ποσοστό της παροχής μάζας y που απομαστεύεται από τον ατμοστροβίλο κάνουμε εφαρμογή στον προθερμαντήρα του Πρώτου Θερμοδυναμικού Νόμου για άεργη και αδιαβατική ροή (μόνιμη κατάσταση), άρα έχουμε ότι:

$$\begin{aligned} y \cdot h_6 + (1 - y) \cdot h_2 &= h_3 \Rightarrow \\ y \cdot h_6 + h_2 - y \cdot h_2 &= h_3 \Rightarrow (h_6 - h_2) \cdot y = h_3 - h_2 \Rightarrow \\ y &= \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} = \frac{594.73 - 192.18}{2,568.61 - 192.18} \Rightarrow \\ y &= 0.169 = 16.9\% \end{aligned}$$

Το ειδικό έργο του στροβίλου δίνεται από την σχέση (1.19):

$$\begin{aligned} w_{turb,out} &= (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_6 - h_7) \Rightarrow \\ w_{turb,out} &= (3081.5 - 2,568.61) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + (1 - 0.169)(2,568.61 - 2,062.91) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$w_{turb,out} = 933.13 \frac{kJ}{kg}$$

Το ειδικό έργο της αντλίας προκύπτει προσεγγίζεται από την σχέση (1.20) ως εξής:

$$\begin{aligned} w_{pump,in} &= (1 - y)w_{pump,1} + w_{pump,2} \Rightarrow \\ w_{pump,in} &= (1 - 0.169) \cdot 0.37 \frac{kJ}{kg} + 4.20 \frac{kJ}{kg} \Rightarrow \\ w_{pump,in} &= 4.51 \frac{kJ}{kg} \end{aligned}$$

Το καθαρό ειδικό έργο του κύκλου προκύπτει από την σχέση (1.10):

$$w_{net} = w_{turb,out} - w_{pump,in} = 933.13 \frac{kJ}{kg} - 4.51 \frac{kJ}{kg} = 928.62 \frac{kJ}{kg}$$

Η προσδιδόμενη ειδική θερμότητα του κύκλου δίδεται από την σχέση (1.17):

$$q_{in} = h_5 - h_4 = (3081.5 - 598.93) \frac{kJ}{kg} = 2,482.57 \frac{kJ}{kg}$$

Επομένως, ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου από την σχέση (1.12) είναι:

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{928.62}{2,482.57} = 0.3741 = 37.41\%$$

2 Ανάπτυξη Υπολογιστικού Εργαλείου Για Προβλήματα Κύκλου Rankine

2.1 Εισαγωγή – Σκοπός

Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει την ανάπτυξη εκπαιδευτικού υλικού υπό μορφή υπολογιστικών φύλλων Excel, το οποίο αφορά την επίλυση στα παραδείγματα που έχουν αναπτυχθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτό το υπολογιστικό εργαλείο, έχει ως χρησιμότητα να γίνονται οι υπολογισμοί αυτόματα για οποιοδήποτε πρόβλημα αλλάζοντας μόνο τα απαραίτητα δεδομένα, χωρίς να χρειάζεται εκ νέου υπολογισμός μεταβλητών.

Οι μεταβλητές που εισάγονται από τον χρήστη στο Excel δίνονται με μαύρα γράμματα. Με μπλε Bold γράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που υπολογίζονται αυτόματα από το εργαλείο, ενώ με κόκκινο δίνεται ο βαθμός απόδοσης του κύκλου.

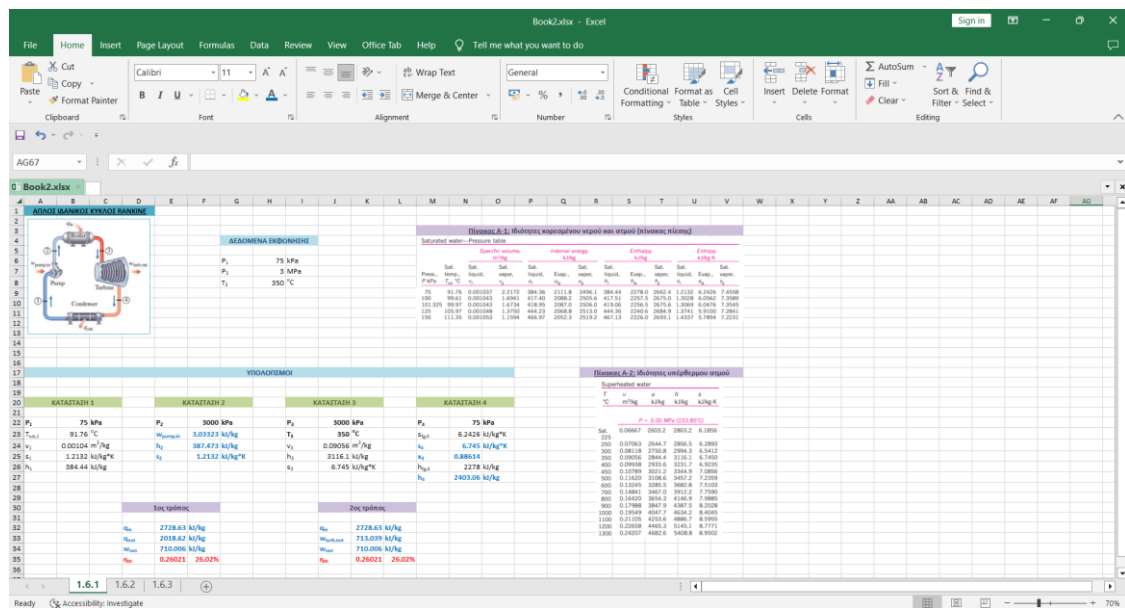
2.2 Επίλυση Ασκήσεων με Χρήση Εργαλείου Excel

2.2.1 Άσκηση 1. Απλός Ιδανικός Κύκλος Rankine

Θεωρούμε μια εγκατάσταση παραγωγής ισχύος με υδρατμό η οποία λειτουργεί σύμφωνα με τον απλό ιδανικό κύκλο Rankine (Σχήμα 1-2). Ο υδρατμός εισέρχεται στο στρόβιλο με 3 MPa και 350°C και συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή σε πίεση 75 kPa. Ζητείται ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου.

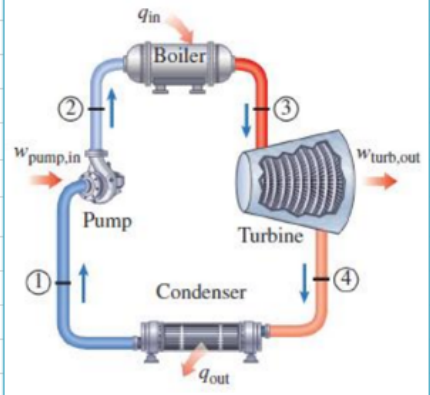
ΛΥΣΗ

Για τις ασκήσεις που αναφέρονται σε απλό ιδανικό κύκλο ανοίγουμε το αρχείο Excel με όνομα **Rankine_cycle.xlsx** και έπειτα στο φύλλο 1.6.1 στο και ακολουθούμε τις παρακάτω οδηγίες για την υλοποίηση της άσκησης.



1^ο Βήμα:

Στα κελιά H6-H8 τοποθετούνται τα δεδομένα της εκφώνησης από τον χρήστη ως εξής:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	ΑΠΛΟΣ ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ RANKINE								
2									
4							ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΚΦΩΝΗΣΗΣ		
6							P ₁	75	kPa
7							P ₃	3	MPa
8							T ₃	350	°C
9									
10									
11									
12									
13									

2^ο Βήμα (εισαγωγή από τον χρήστη):

Στα κελιά B22-B26 τοποθετούμε τις τιμές που δίνονται από τον Πίνακα A-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης) που βρίσκεται στο Παράρτημα Α, για την δεδομένη πίεση στην κατάσταση 1.

	A	B	C
20	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 1		
21			
22	P ₁	75	kPa
23	T _{sat,1}	91.76	°C
24	v ₁	0.001037	m ³ /kg
25	s ₁	1.2132	kJ/kg*K
26	h ₁	384.44	kJ/kg

Στα κελιά J22-J26 τοποθετούμε τις τιμές που δίνονται από τον Πίνακα A-2: Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού, για την δεδομένη πίεση και θερμοκρασία στην κατάσταση 3.

	I	J	K
20	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 3		
21			
22	P ₃	3000	kPa
23	T ₃	350	°C
24	v ₃	0.09056	m ³ /kg
25	h ₃	3116.1	kJ/kg
26	s ₃	6.745	kJ/kg*K

3^ο Βήμα (αυτόματος υπολογισμός):

Για την κατάσταση 2, λόγω δράσης της αντλίας έχουμε ισεντροπική συμπίεση επομένως, η εντροπία στο κελί F25 είναι ίση με την κατάσταση 1, ενώ η πίεση είναι η ίδια με την κατάσταση 3 και δίνεται στο κελί F22.

Στο κελί F23 γίνεται ο υπολογισμός του έργου που εισέρχεται στην αντλία ($w_{\text{pump,in}}$), το οποίο μας βοηθά στην εύρεση της ειδικής ενθαλπίας στο κελί F24.

Για την κατάσταση 4 έχουμε ισεντροπική εκτόνωση, επομένως η εντροπία στο κελί N24 είναι ίση με την κατάσταση 3, ενώ η πίεση είναι η ίδια με την κατάσταση 1 και δίνεται στο κελί N22.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
17	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ														
18															
19															
20	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 1			ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 2			ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 3			ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 4					
21															
22	P_1	75 kPa			P_2	3000 kPa			P_3	3000 kPa			P_4	75 kPa	
23	$T_{\text{sat},1}$	91.76 °C			$w_{\text{pump,in}}$	3.033225 kJ/kg			T_3	350 °C			$s_{\text{fg},4}$	6.2426 kJ/kg*K	
24	v_1	0.001037 m ³ /kg			h_2	387.4732 kJ/kg			v_3	0.09056 m ³ /kg			s_4	6.745 kJ/kg*K	
25	s_1	1.2132 kJ/kg*K			s_2	1.2132 kJ/kg*K			h_3	3116.1 kJ/kg			x_4	0.886137	
26	h_1	384.44 kJ/kg							s_3	6.745 kJ/kg*K			$h_{\text{fg},4}$	2278 kJ/kg	
27													h_4	2403.061 kJ/kg	

4^ο Βήμα (εισαγωγή από τον χρήστη):

Στα κελιά N23 και N26 τοποθετούμε τις μεταβλητές $s_{\text{fg},4}$ και $h_{\text{fg},4}$ αντίστοιχα, οι οποίες δίνονται από τον Πίνακα A-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), για την δεδομένη πίεση.

	M	N	O
20	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 4		
21			
22	P_4	75 kPa	
23	$s_{\text{fg},4}$	6.2426 kJ/kg*K	
24	s_4	6.745 kJ/kg*K	
25	x_4	0.886137	
26	$h_{\text{fg},4}$	2278 kJ/kg	
27	h_4	2403.061 kJ/kg	

5^ο Βήμα (αυτόματος υπολογισμός):

Στο κελί N25 γίνεται ο υπολογισμός της ξηρότητας x , που μας βοηθά στην εύρεση της ειδικής ενθαλπίας στο κελί N27.

	M	N	O
20	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 4		
21			
22	P_4	75 kPa	
23	$s_{\text{fg},4}$	6.2426 kJ/kg*K	
24	s_4	6.745 kJ/kg*K	
25	x_4	0.886137	
26	$h_{\text{fg},4}$	2278 kJ/kg	
27	h_4	2403.061 kJ/kg	

Στα κελιά E32-E35 και K32-K35 υπολογίζονται αυτόματα οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την εύρεση του θερμικού βαθμού απόδοσης του κύκλου, ο οποίος παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα, με δύο τρόπους.

	D	E	F	G	H	I	J	K	L
30	1ος τρόπος							2ος τρόπος	
31									
32	q_{in}	2728.627	kJ/kg				q_{in}	2728.627	kJ/kg
33	q_{out}	2018.621	kJ/kg				$w_{turb,out}$	713.0395	kJ/kg
34	w_{net}	710.0063	kJ/kg				w_{net}	710.0063	kJ/kg
35	η_{th}	0.260206	26.02%				η_{th}	0.260206	26.02%

2.2.2 Άσκηση 2. Ιδανικός Κύκλος Rankine με Αναθέρμανση

Θεωρούμε κύκλο Rankine που λειτουργεί με ατμό και διαθέτει αναθέρμανση (Σχήμα 1-6). Ο ατμός αφήνει τον λέβητα και εισέρχεται στο στρόβιλο με πίεση 4 MPa και θερμοκρασία 400°C. Μετά από εκτόνωση στο στρόβιλο υψηλής πίεσεως έως 400 kPa, ο ατμός αναθερμαίνεται στους 400°C και εισέρχεται στο στρόβιλο χαμηλής πίεσεως, όπως εκτονώνεται μέχρι πίεσεως 10 kPa. Ζητείται ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου (θεωρώντας ισοεντροπικές εκτονώσεις). Μετά τον συμπυκνωτή, το νερό βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού.

ΛΥΣΗ

Για τις ασκήσεις που αναφέρονται σε ιδανικό κύκλο με αναθέρμανση ανοίγουμε το αρχείο Excel με όνομα **Rankine_cycle.xlsx** και έπειτα στο φύλλο 1.6.2 στο και ακολουθούμε τις παρακάτω οδηγίες για την υλοποίηση της άσκησης.

The screenshot shows the 'Rankine_cycle.xlsx' spreadsheet. It includes a schematic of a Rankine cycle with reheat. The input data section specifies:

- High pressure (P₁): 4 MPa
- High temperature (T₁): 400 °C
- Intermediate pressure (P₂): 400 kPa
- Reheat temperature (T₃): 400 °C
- Low pressure (P₄): 10 kPa

 The spreadsheet contains several tables of thermodynamic properties for water/steam, including saturation properties and superheated steam properties at various pressures (4 MPa, 400 kPa, 10 kPa). It also includes a table for the cycle states (1, 2, 3, 4) and a summary table at the bottom showing the net work output (W_{net}) and thermal efficiency (η_{th}).

	A	B	C	D	E	F	G
21	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 3				ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 4		
22							
23	P_3	4000	kPa		P_4	400	kPa
24	T_3	400	$^{\circ}\text{C}$		s_4	6.7714	kJ/kg*K
25	v_3	0.07343	m^3/kg		$s_{f,4}$	1.7765	kJ/kg*K
26	h_3	3214.5	kJ/kg		$s_{fg,4}$	5.1191	kJ/kg*K
27	s_3	6.7714	kJ/kg*K		x_4	0.975738	
28					$h_{f,4}$	604.66	kJ/kg
29					$h_{fg,4}$	2133.4	kJ/kg
30					h_4	2686.299	kJ/kg

4^ο Βήμα (αυτόματος υπολογισμός):

Στο κελί F27 γίνεται ο υπολογισμός της ξηρότητας x , που μας βοηθά στην εύρεση της ειδικής ενθαλπίας στο κελί F30 για την κατάσταση 4.

	E	F	G
21	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 4		
22			
23	P_4	400	kPa
24	s_4	6.7714	kJ/kg*K
25	$s_{f,4}$	1.7765	kJ/kg*K
26	$s_{fg,4}$	5.1191	kJ/kg*K
27	x_4	0.975738	
28	$h_{f,4}$	604.66	kJ/kg
29	$h_{fg,4}$	2133.4	kJ/kg
30	h_4	2686.299	kJ/kg

5^ο Βήμα (εισαγωγή από τον χρήστη):

Στα κελιά J23-J27 τοποθετούμε τις τιμές που δίνονται από τον Πίνακα A-2: Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού, για την δεδομένη πίεση και θερμοκρασία στην κατάσταση 5.

	I	J	K
21	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 5		
22			
23	P_5	400	kPa
24	T_5	400	$^{\circ}\text{C}$
25	v_5	0.77265	m^3/kg
26	h_5	3273.9	kJ/kg
27	s_5	7.9003	kJ/kg*K

Για την κατάσταση 6, η πίεση δίνεται στο κελί N23 από την εκφώνηση και έχουμε ισεντροπική εκτόνωση επομένως, η εντροπία στο κελί N24 είναι ίση με την κατάσταση 5.

Στα κελιά N25 και N26 τοποθετούμε τις μεταβλητές $s_{f,6}$ και $s_{fg,6}$, ενώ στα κελιά N28 και N29 τις μεταβλητές $h_{f,6}$ και $h_{fg,6}$ αντίστοιχα, οι οποίες δίνονται από τον Πίνακα A-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), για την δεδομένη πίεση.

	I	J	K	L	M	N	O
21	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 5				ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 6		
22							
23	P_5	400 kPa			P_6	10 kPa	
24	T_5	400 °C			s_6	7.9003 kJ/kg*K	
25	v_5	0.77265 m ³ /kg			$s_{f,6}$	0.6492 kJ/kg*K	
26	h_5	3273.9 kJ/kg			$s_{fg,6}$	7.4996 kJ/kg*K	
27	s_5	7.9003 kJ/kg*K			x_6	0.966865	
28					$h_{f,6}$	191.81 kJ/kg	
29					$h_{fg,6}$	2392.1 kJ/kg	
30					h_6	2504.648 kJ/kg	

6° Βήμα (αυτόματος υπολογισμός):

Στο κελί N27 γίνεται ο υπολογισμός της ξηρότητας x , που μας βοηθά στην εύρεση της ειδικής ενθαλπίας στο κελί N30 για την κατάσταση 6.

	M	N	O
21	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 6		
22			
23	P_6	10 kPa	
24	s_6	7.9003 kJ/kg*K	
25	$s_{f,6}$	0.6492 kJ/kg*K	
26	$s_{fg,6}$	7.4996 kJ/kg*K	
27	x_6	0.966865	
28	$h_{f,6}$	191.81 kJ/kg	
29	$h_{fg,6}$	2392.1 kJ/kg	
30	h_6	2504.648 kJ/kg	

7° Βήμα (εισαγωγή από τον χρήστη):

Για την κατάσταση 1, στα κελιά D35-D37 τοποθετούμε τις τιμές που δίνονται από τον Πίνακα A-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), για την δεδομένη πίεση η οποία είναι ίδια με την πίεση στην κατάσταση 6.

	C	D	E
33	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 1		
34			
35	P₁	10 kPa	
36	v₁	0.00101 m³/kg	
37	h₁	191.81 kJ/kg	

8^ο Βήμα (αυτόματος υπολογισμός):

Για την κατάσταση 2, η πίεση είναι η ίδια με την κατάσταση 3 και δίνεται στο κελί H35.

Στο κελί H36 γίνεται ο υπολογισμός του έργου που εισέρχεται στην αντλία ($w_{\text{pump,in}}$), το οποίο μας βοηθά στην εύρεση της ειδικής ενθαλπίας στο κελί H37.

	G	H	I
33	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 2		
34			
35	P₂	4000 kPa	
36	w_{pump,in}	4.0299 kJ/kg	
37	h₂	195.8399 kJ/kg	

9^ο Βήμα (αυτόματος υπολογισμός):

Στα κελιά L35-L38 υπολογίζονται αυτόματα οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την εύρεση του θερμικού βαθμού απόδοσης του κύκλου, ο οποίος παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα.

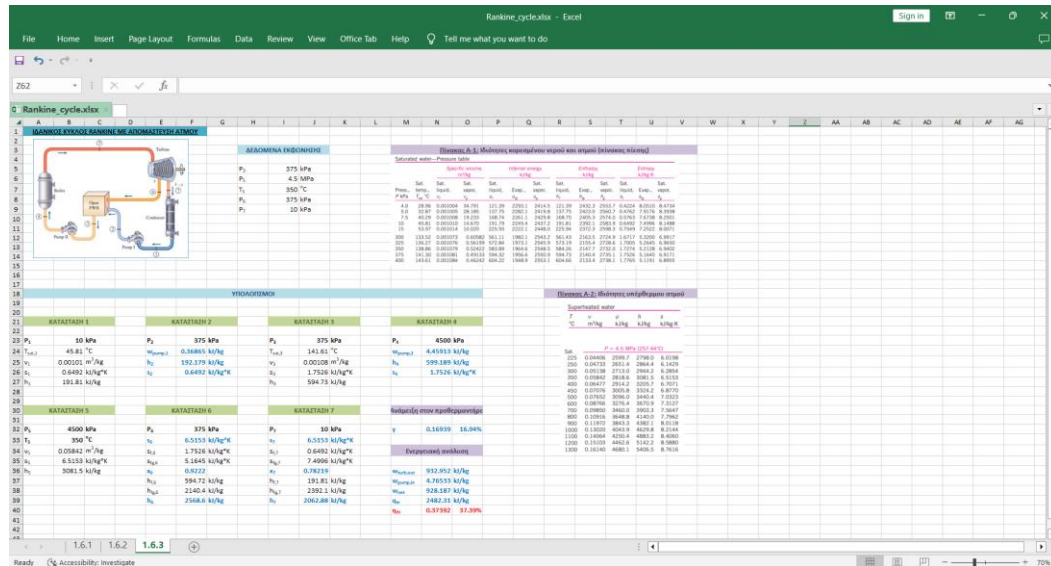
	K	L	M
33	Ενεργειακή ανάλυση		
34			
35	w_{turb,out}	1297.453 kJ/kg	
36	q_{in}	3606.261 kJ/kg	
37	w_{net}	1293.423 kJ/kg	
38	η_{th}	0.35866	35.87%

2.2.3 Άσκηση 3. Ιδανικός Κύκλος Rankine με Απομάστευση Ατμού

Θεωρούμε έναν κύκλο Rankine με απομάστευση ατμού και προθέρμανση νερού, που λειτουργεί με εργαζόμενο μέσο ατμό (Σχήμα 1-7). Ο ατμός εξέρχεται από τον λέβητα και εισέρχεται στον στρόβιλο σε πίεση 4,5 MPa και θερμοκρασία 350°C. Μετά από εκτόνωση εντός του στρόβιλου στα 375 kPa, τμήμα του ατμού απομαστεύεται από τον στρόβιλο για να προθερμάνει το νερό, σε προθερμαντήρα ανοικτού τύπου. Η πίεση εντός του προθερμαντήρα είναι 375 kPa και το νερό εξέρχεται του προθερμαντήρα σε μορφή κεκορεσμένου νερού πίεσης 375 kPa. Ο υπόλοιπος ατμός εκτονώνεται εντός του ατμοστρόβιλου μέχρι πίεση 10 kPa. Ζητείται ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου (θεωρώντας ιδανικό κύκλο).

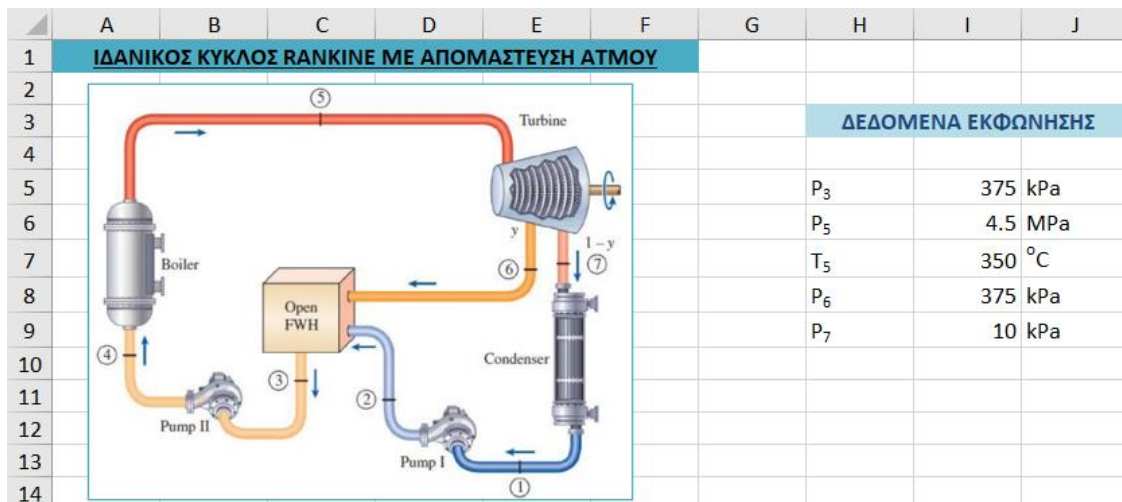
ΛΥΣΗ

Για τις ασκήσεις που αναφέρονται σε ιδανικό κύκλο με απομάστευση ατμού ανοίγουμε το αρχείο Excel με όνομα **Rankine_cycle.xlsx** και έπειτα στο φύλλο 1.6.3 στο και ακολουθούμε τις παρακάτω οδηγίες για την υλοποίηση της άσκησης.



1^ο Βήμα:

Στα κελιά I5-I9 τοποθετούνται τα δεδομένα της εκφώνησης από τον χρήστη ως εξής:



2^ο Βήμα (εισαγωγή από τον χρήστη):

Για την κατάσταση 1, στα κελιά B23-B27 τοποθετούμε τις τιμές που δίνονται από τον Πίνακα A-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), για την δεδομένη πίεση η οποία είναι ίδια με την πίεση στην κατάσταση 7.

	A	B	C
21	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 1		
22			
23	P₁	10 kPa	
24	T _{sat,1}	45.81	°C
25	v ₁	0.00101	m ³ /kg
26	s ₁	0.6492	kJ/kg*K
27	h ₁	191.81	kJ/kg

3° Βήμα (αυτόματος υπολογισμός):

Για την κατάσταση 2, λόγω δράσης της αντλίας έχουμε ισεντροπική συμπίεση επομένως, η εντροπία στο κελί F26 είναι ίση με την κατάσταση 1, ενώ η πίεση είναι η ίδια με την κατάσταση 3 και δίνεται στο κελί F23.

Στο κελί F24 γίνεται ο υπολογισμός του έργου που εισέρχεται στην αντλία ($w_{\text{pump},1}$), το οποίο μας βοηθά στην εύρεση της ειδικής ενθαλπίας στο κελί F25.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
18	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ														
19															
20															
21	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 1				ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 2				ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 3				ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 4		
22															
23	P₁	10 kPa			P₂	375 kPa			P₃	375 kPa			P₄	4500 kPa	
24	T _{sat,1}	45.81	°C		$w_{\text{pump},1}$	0.36865	kJ/kg		T _{sat,3}	141.61	°C		$w_{\text{pump},2}$	4.459125	kJ/kg
25	v ₁	0.00101	m ³ /kg		h ₂	192.1787	kJ/kg		v ₃	0.001081	m ³ /kg		h ₄	599.1891	kJ/kg
26	s ₁	0.6492	kJ/kg*K		s ₂	0.6492	kJ/kg*K		s ₃	1.7526	kJ/kg*K		s ₄	1.7526	kJ/kg*K
27	h ₁	191.81	kJ/kg						h ₃	594.73	kJ/kg				

4° Βήμα (εισαγωγή από τον χρήστη):

Για την κατάσταση 3, στα κελιά J23-J27 τοποθετούμε τις τιμές που δίνονται από τον Πίνακα A-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), για την δεδομένη πίεση η οποία δίνεται από την εκφώνηση.

	I	J	K
21	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 3		
22			
23	P₃	375 kPa	
24	T _{sat,3}	141.61	°C
25	v ₃	0.001081	m ³ /kg
26	s ₃	1.7526	kJ/kg*K
27	h ₃	594.73	kJ/kg

5^ο Βήμα (αυτόματος υπολογισμός):

Για την κατάσταση 4, λόγω δράσης της αντλίας έχουμε ισεντροπική συμπίεση επομένως, η εντροπία στο κελί N26 είναι ίση με την κατάσταση 3, ενώ η πίεση είναι η ίδια με την κατάσταση 5 και δίνεται στο κελί J23.

Στο κελί N24 γίνεται ο υπολογισμός του έργου που εισέρχεται στην αντλία ($w_{\text{pump},2}$), το οποίο μας βοηθά στην εύρεση της ειδικής ενθαλπίας στο κελί N25.

	I	J	K	L	M	N	O
21	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 3				ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 4		
22							
23	P_3	375	kPa		P_4	4500	kPa
24	$T_{\text{sat},3}$	141.61	$^{\circ}\text{C}$		$w_{\text{pump},2}$	4.459125	kJ/kg
25	v_3	0.001081	m^3/kg		h_4	599.1891	kJ/kg
26	s_3	1.7526	kJ/kg*K		s_4	1.7526	kJ/kg*K
27	h_3	594.73	kJ/kg				

6^ο Βήμα (εισαγωγή από τον χρήστη):

Στα κελιά B32-B36 τοποθετούμε τις τιμές που δίνονται από τον Πίνακα A-2: Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού, για την δεδομένη πίεση και θερμοκρασία στην κατάσταση 5 που δίνονται από την εκφώνηση.

	A	B	C
30	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 5		
31			
32	P_5	4500	kPa
33	T_5	350	$^{\circ}\text{C}$
34	v_5	0.05842	m^3/kg
35	s_5	6.5153	kJ/kg*K
36	h_5	3081.5	kJ/kg

7^ο Βήμα (αυτόματος υπολογισμός):

Για την κατάσταση 6, η πίεση δίνεται στο κελί F32 από την εκφώνηση και έχουμε ισεντροπική εκτόνωση επομένως, η εντροπία στο κελί F33 είναι ίση με την κατάσταση 5.

Στα κελιά F34 και F35 τοποθετούμε τις μεταβλητές $s_{f,6}$ και $s_{fg,6}$, ενώ στα κελιά F37 και F38 τις μεταβλητές $h_{f,6}$ και $h_{fg,6}$ αντίστοιχα, οι οποίες δίνονται από τον Πίνακα A-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), για την δεδομένη πίεση.

	E	F	G
30	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 6		
31			
32	P₆	375 kPa	
33	s₆	6.5153	kJ/kg*K
34	s _{f,6}	1.7526	kJ/kg*K
35	s _{fg,6}	5.1645	kJ/kg*K
36	x₆	0.9222	
37	h _{f,6}	594.72	kJ/kg
38	h _{fg,6}	2140.4	kJ/kg
39	h₆	2568.596	kJ/kg

Αντίστοιχα για την κατάσταση 7, η πίεση δίνεται στο κελί J32 από την εκφώνηση και έχουμε ισεντροπική εκτόνωση επομένως, η εντροπία στο κελί J33 είναι ίση με την κατάσταση 6.

Για την δεδομένη πίεση, βρίσκουμε από τον Πίνακα A-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης), τις μεταβλητές s_{f,7} και s_{fg,7}, οι οποίες τοποθετούνται στα κελιά J34 και J35.

	I	J	K
30	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 7		
31			
32	P₇	10 kPa	
33	s₇	6.5153	kJ/kg*K
34	s _{f,7}	0.6492	kJ/kg*K
35	s _{fg,7}	7.4996	kJ/kg*K
36	x₇	0.782188	
37	h _{f,7}	191.81	kJ/kg
38	h _{fg,7}	2392.1	kJ/kg
39	h₇	2062.883	kJ/kg

8° Βήμα (αυτόματος υπολογισμός):

Στο κελί F36 γίνεται ο υπολογισμός της ξηρότητας x₆, που μας βοηθά στην εύρεση της ειδικής ενθαλπίας στο κελί F39, για την κατάσταση 6.

Στο κελί J36 γίνεται ο υπολογισμός της ξηρότητας x₇, που μας βοηθά στην εύρεση της ειδικής ενθαλπίας στο κελί J39, για την κατάσταση 7.

	E	F	G	H	I	J	K
30	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 6				ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 7		
31							
32	P_6	375 kPa			P_7	10 kPa	
33	s_6	6.5153 kJ/kg*K			s_7	6.5153 kJ/kg*K	
34	$s_{f,6}$	1.7526 kJ/kg*K			$s_{f,7}$	0.6492 kJ/kg*K	
35	$s_{fg,6}$	5.1645 kJ/kg*K			$s_{fg,7}$	7.4996 kJ/kg*K	
36	x_6	0.9222			x_7	0.782188	
37	$h_{f,6}$	594.72 kJ/kg			$h_{f,7}$	191.81 kJ/kg	
38	$h_{fg,6}$	2140.4 kJ/kg			$h_{fg,7}$	2392.1 kJ/kg	
39	h_6	2568.596 kJ/kg			h_7	2062.883 kJ/kg	

9^ο Βήμα (αυτόματος υπολογισμός):

Στο κελί N32 υπολογίζεται το ποσοστό της παροχής μάζας γ που απομαστεύεται από τον ατμοστρόβιλο, στην κατάσταση 6.

	M	N	O
30	Ανάμειξη στον προθερμαντήρα		
31			
32	γ	0.169394	16.94%

Στα κελιά N36-N40 υπολογίζονται αυτόματα οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την εύρεση του θερμικού βαθμού απόδοσης του κύκλου η_{th} , ο οποίος παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα.

	M	N	O
34	Ενεργειακή ανάλυση		
35			
36	$w_{turb,out}$	932.9523 kJ/kg	
37	$w_{pump,in}$	4.765328 kJ/kg	
38	w_{net}	928.1869 kJ/kg	
39	q_{in}	2482.311 kJ/kg	
40	η_{th}	0.373921	37.39%

3 Καύση Υδρογονανθράκων σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης

3.1 Εισαγωγή – Σκοπός

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η μελέτη της καύσης υδρογονανθράκων, η οποία συναντάται κυρίως σε μηχανές εσωτερικής καύσης και επηρεάζουν σημαντικά την ισχύ του κινητήρα, τον βαθμό απόδοσης και τις εκπομπές αερίων. Σημαντικός είναι ο διαχωρισμός των διαφορετικών τύπων καύσεως που συναντούμε σε μια διεργασία. Επίσης, το κεφάλαιο αυτό εστιάζει, στη θερμοχημεία της καύσης, δηλαδή τη σύσταση και τις θερμοδυναμικές ιδιότητες των εργαζομένων μέσων, στους θαλάμους των μηχανών πριν και μετά την καύση, καθώς και στις ενεργειακές μεταβολές των διεργασιών της.

Στο υπό-κεφάλαιο 3.10, εφαρμόζονται αντίστοιχες ασκήσεις που μας βοηθούν στην κατανόηση της στοιχειομετρίας των αντιδράσεων σε μια διεργασία, καθώς και τον υπολογισμό της θερμογόνου δύναμης ή την ροή καυσίμου που απαιτείται σε έναν κύκλο ηλεκτροπαραγωγής κλπ.

3.2 Καύσιμα & Καύση

3.2.1 Καύσιμα

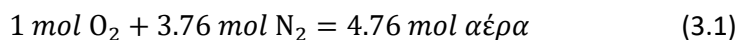
Οποιοδήποτε υλικό μπορεί να καεί και να απελευθερώσει θερμική ενέργεια ονομάζεται καύσιμο. Τα περισσότερα γνωστά καύσιμα είναι μόρια που αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο και άνθρακα. Αυτά ονομάζονται υδρογονάνθρακες και υποδηλώνονται με το γενικό χημικό τύπο C_nH_m . Τα καύσιμα υδρογονανθράκων υπάρχουν σε όλες τις φάσεις, δηλαδή τις φυσικές τους ιδιότητες, ως στερεό, υγρό ή αέριο, όπως είναι για παράδειγμα ο γαιάνθρακας (στερεή κατάσταση), η βενζίνη (υγρή κατάσταση) και το φυσικό αέριο (αέρια κατάσταση).

Για παράδειγμα, ο ορυκτός άνθρακας (γαιάνθρακας) αποτελεί οργανικό ορυκτό με κύρια συστατικά τον άνθρακα (C) και το υδρογόνο (H). Εκτός από υδρογονάνθρακες, περιέχει επίσης μικρές σχετικές ποσότητες οξυγόνου (O), άζωτου (N), θείου (S), υγρασίας και τέφρας (υπολείμματα από την καύση του άνθρακα).

3.2.2 Καύση

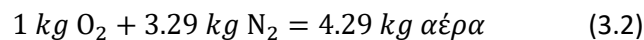
Καύση ονομάζεται οποιαδήποτε χημική αντίδραση ενός υλικού καυσίμου με αέρα και στην οποία συναντάται αρκετά μεγάλος βαθμός απόδοσης θερμότητας. Προφανώς, κατά την καύση απελευθερώνεται μια μεγάλη ποσότητα ενέργειας.

Στην ανάλυση των διεργασιών καύσης, τα αέρια καύσιμα αναλύονται συνήθως με ογκομετρική περιεκτικότητα και ανήκουν στα κύρια καύσιμα υδρογονανθράκων. Η γραμμομοριακή σύσταση του ξηρού αέρα θεωρείται κατά προσέγγιση ότι αποτελείται από 21% οξυγόνο (O_2) και 79% άζωτο (N_2), επομένως για κάθε 1 mole οξυγόνου έχουμε $0.79/0.21=3.76$ mole αζώτου, δηλαδή [1],[3]:



Τα στερεά και τα υγρά καύσιμα αναλύονται συνήθως κατά μάζα για να δώσουν την περιεκτικότητα σε άνθρακα, υδρογόνο, θείο και οποιαδήποτε άλλα στοιχεία υπάρχουν. Συχνά υπάρχει πυρίτιο, υγρασία και οξυγόνο σε μικρές ποσότητες που έχουν κάποια επίδραση στη διαδικασία. Το πυρίτιο

αφήνει εναποθέσεις σκουριάς στις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας στους λέβητες. Η βαρομετρική περιεκτικότητα σε αέρα θεωρείται κατά προσέγγιση ότι αποτελείται από 23% οξυγόνο (O_2) και 77% άζωτο (N_2), επομένως για κάθε 1 kg οξυγόνου έχουμε $0.77/0.23=3.35$ kg αζώτου, δηλαδή:



Οι κύριες εφαρμογές της καύσης είναι:

- Θέρμανση (κάμινος)
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ηλεκτρικοί σταθμοί)
- Συμπαγωγή (παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού)
- Κίνηση (κινητήρες)
- Στρατός/Διάστημα (ρουκέτες και πύραυλοι)
- Καταστατική καύση, καύση μετάλλων, σύνθεση σωματιδίων

3.3 Τύποι καύσης

Η καύση μπορεί να ταξινομηθεί σε διάφορες κατηγορίες με βάση την ποσότητα ενέργειας που εκλύεται, καθώς και τα υποπροϊόντα της αντίδρασης. Υπάρχουν πέντε διαφορετικές μορφές καύσης, οι οποίες παρατίθενται παρακάτω [8],[17].

3.3.1 Πλήρης Καύση

Στην πλήρη καύση, το αντιδρών (καύσιμο) καίγεται με οξυγόνο και παράγει συνήθως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και υδρατμούς (H_2O). Αυτό παρατηρείται για παράδειγμα σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, όταν οι υγροί ή αέριοι υδρογονάνθρακες καταναλώνονται πλήρως, αποδίδοντας κυρίως αυτά τα δύο οξείδια. Ο άνθρακας (C) αποδίδει διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το υδρογόνο θα μετατραπεί σε υδρατμούς (H_2O) και το θείο θα δώσει διοξείδιο του θείου (SO_2). Το άζωτο κανονικά δεν θεωρείται εύφλεκτη ουσία, αλλά μπορεί να σχηματίσει οξείδια του αζώτου όπως NO και NO_2 σε μικρές ποσότητες, παρουσία αέρα και σε υψηλή θερμοκρασία.

3.3.2 Ατελής Καύση

Σε ατελή καύση, δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο ώστε να επιτρέψει στο καύσιμο να αντιδράσει πλήρως και να μετατραπεί σε διοξείδιο του άνθρακα, μπορεί όμως να αποδοθεί μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και πτητικός άνθρακας (C), εκτός από άκαυστους υδρογονάνθρακες. Η ελάχιστη ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη καύση ενός δεδομένου καυσίμου ονομάζεται στοιχειομετρική ποσότητα οξυγόνου και μπορεί να προσδιοριστεί γνωρίζοντας τη σύνθεση του καυσίμου και τη στοιχειομετρία της αντίδρασης.

3.3.3 Ταχεία Καύση

Η ταχεία καύση είναι απλώς μια φωτιά που καίγεται γρήγορα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όσο υπάρχει διαθέσιμο καύσιμο και οξυγόνο, η αντίδραση καύσης μπορεί να διατηρηθεί, καθώς οι ουσίες που υπόκεινται σε ταχεία καύση έχουν χαμηλότερες θερμοκρασίες ανάφλεξης όπως για

παράδειγμα, καύση υγραερίου, συμπιεσμένου φυσικού αερίου, βενζίνης κ.α. Επίσης, αυτός ο τύπος καύσης συναντάται σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, εσωτερικούς κινητήρες, κανονικές πυρκαγιές καμινάδας κ.λπ.

3.3.4 Αυτανάφλεξη

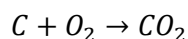
Αυτανάφλεξη ή αυθόρμητη καύση, ονομάζεται η διεργασία όταν μια ουσία ξαφνικά μετατρέπεται σε φλόγα, χωρίς να απαιτεί την παροχή οποιασδήποτε εξωτερικής ενέργειας για να ξεκινήσει η διαδικασία καύσης. Συμβαίνει σε θερμοκρασία δωματίου, λόγω αυτοθέρμανσης (εξώθερμες εσωτερικές αντιδράσεις), ακολουθούμενη από θερμική διαφυγή (ταχεία αύξηση της θερμοκρασίας χωρίς ψύξη) και αυτοανάφλεξη. Μια ουσία με χαμηλή θερμοκρασία ανάφλεξης θερμαίνεται και αυτή η θερμότητα δεν μπορεί να διαφύγει.

3.3.5 Εκρηκτική Καύση

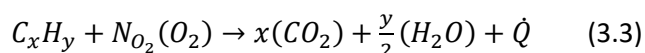
Εκρηκτική Καύση συμβαίνει όταν η αντίδραση συμβαίνει με εξαιρετικά γρήγορο ρυθμό. Η αντίδραση συμβαίνει όταν κάτι αναφλέγεται για να παράγει θερμότητα, φως και ηχητική ενέργεια. Ο απλός τρόπος για να το περιγράψουμε είναι να το ονομάσουμε έκρηξη. Μερικά κλασικά παραδείγματα είναι οι κροτίδες ή η ανατίναξη δυναμίτη.

3.4 Στοιχειομετρία Αντιδράσεων

Η στοιχειομετρία περιλαμβάνει τη χρήση σχέσεων μεταξύ αντιδρώντων και/ή προϊόντων σε μια χημική αντίδραση για τον προσδιορισμό επιθυμητών ιδιοτήτων. Ο στοιχειομετρικός ή θεωρητικός αέρας ορίζεται ως η ελάχιστη ποσότητα αέρα που απαιτείται για την πλήρη καύση του καυσίμου. Κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας καύσης, τα συστατικά που υπάρχουν πριν την αντίδραση (στην αριστερή πλευρά της εξίσωσης) ονομάζονται **αντιδρώντα**, ενώ τα συστατικά που υπάρχουν μετά την αντίδραση (στα δεξιά της εξίσωσης) ονομάζονται **προϊόντα**. Μια χημική εξίσωση πρέπει να είναι ισοσταθμισμένη ώστε να περιέχει στα αριστερά και δεξιά του βέλους, το ίδιο πλήθος ατόμων. Αυτό μπορεί κανείς να το προσδιορίσει με τους στοιχειομετρικούς συντελεστές, οι οποίοι δηλώνουν την αναλογία ατόμων ή μορίων με την οποία αντιδρούν τα αντιδρώντα και παράγονται τα προϊόντα. Για παράδειγμα, κατά την καύση 1 kmol άνθρακα με 1 kmol καθαρού οξυγόνου, σχηματίζεται 1 kmol διοξείδιο του άνθρακα. Για παράδειγμα:

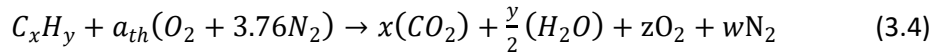


Στη καύση υδρογονανθράκων, ανεξάρτητα από τον τύπο του υδρογονάνθρακα, η χημική αντίδραση γίνεται με οξυγόνο και παράγει 3 προϊόντα: διοξείδιο του άνθρακα, νερό και θερμότητα. Η ενέργεια που απαιτείται για τη διάσπαση των δεσμών στα μόρια υδρογονάνθρακα είναι ουσιαστικά μικρότερη από την ενέργεια που απελευθερώνεται κατά το σχηματισμό των δεσμών στα μόρια CO_2 και H_2O . Για το λόγο αυτό, η διαδικασία απελευθερώνει σημαντικά ποσά θερμικής ενέργειας (θερμότητα, \dot{Q}) [7].



Όπου N_{O_2} ο αριθμός των ατόμων οξυγόνου που απαιτούνται στην αντίδραση καύσης, ενώ x και y αναφέρεται στον αριθμό των ατόμων άνθρακα και υδρογόνου στον υδρογονάνθρακα, αντίστοιχα.

Δεδομένου ότι τα καύσιμα καίγονται με αέρα (συνήθως) και όχι με καθαρό οξυγόνο, το άζωτο στον αέρα μπορεί να συμμετέχει στη διαδικασία καύσης για την παραγωγή οξειδίων του αζώτου. Η καύση δεν είναι πάντα πλήρης και τα αέρια εκροής περιέχουν άκαυστους υδρογονάνθρακες. Παρότι το άζωτο δεν μεταβάλλει σημαντικά την ισορροπία του οξυγόνου, έχει σημαντικό αντίκτυπο στη θερμοδυναμική, τη χημική κινητική και το σχηματισμό ρύπων στα συστήματα καύσης, για το λόγο αυτό υπολογίζεται στην χημική εξίσωση καύσης. Επομένως, η στοιχειομετρική σχέση για την πλήρη οξείδωση ενός καυσίμου υδρογονάνθρακα, γίνεται [7]:



Όπου a_{th} ο αριθμός των ατόμων οξυγόνου του θεωρητικού αέρα που απαιτούνται στην αντίδραση καύσης, ενώ x , y , z και w αναφέρεται στον αριθμό των ατόμων του κάθε χημικού στοιχείου που αντιστοιχεί.

Επίσης, γνωρίζουμε ότι η συνολική μάζα του κάθε στοιχείου διατηρείται κατά τη διάρκεια μιας χημικής αντίδρασης (ισοζύγιο μάζας), εφόσον το συνολικό πλήθος των ατόμων ισούται με τη συνολική μάζα του στοιχείου διαιρεμένη με την ατομική του μάζα ως εξής:

$$N = \frac{m}{M} \quad (3.5)$$

Όπου:

m η μάζα του στοιχείου, g

N ο αριθμός των ατόμων (moles), mol

M η ατομική μάζα, g/mol

Μια ποσότητα η οποία χρησιμοποιείται συχνά σε μια διαδικασία καύσης για τον ποσοτικό προσδιορισμό των ποσοτήτων του καυσίμου και του αέρα είναι ο λόγος αέρα – καυσίμου (air-fuel ratio, AFR). Εκφράζεται συνήθως κατά μάζα και ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του αέρα προς τη μάζα του καυσίμου για μια διεργασία καύσης:

$$AFR = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} \quad (3.6)$$

Η αντίστροφη αναλογία χρησιμοποιείται συχνά στη βιομηχανία αεριοστροβίλων και σε κινητήρες εσωτερικής καύσης και αναφέρεται στην αναλογία καυσίμου – αέρα (fuel-air ratio, FAR):

$$FAR = \frac{1}{AFR} = \frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{air}} \quad (3.7)$$

Στην πραγματικότητα, οι κινητήρες εσωτερικής καύσης δεν λειτουργούν ακριβώς με το ιδανικό AFR, αλλά με τιμές κοντά σε αυτό. Επομένως, θα έχουμε μια ιδανική και πραγματική αναλογία AFR καυσίμου αέρα. Η αναλογία μεταξύ της πραγματικής αναλογίας καυσίμου αέρα (AFR_{actual}) και της ιδανικής/στοιχειομετρικής αναλογίας καυσίμου αέρα (AFR_{stoich}) ονομάζεται αναλογία καυσίμου αέρα ισοδυναμίας ή λάμδα (λ).

$$\lambda = \frac{AFR_{actual}}{AFR_{stoich}} \quad (3.8)$$

Ανάλογα με την τιμή του λάμδα, ο κινητήρας λέγεται να λειτουργεί με άπαχο (lean mixtures), στοιχειομετρικό (stoichiometry) ή πλούσιο (rich mixtures) μείγμα καυσίμου αέρα.

Η αναλογία ισοδυναμίας (equivalence ratio) ενός συστήματος ορίζεται ως η αναλογία της αναλογίας καυσίμου προς οξειδωτικό προς τη στοιχειομετρική αναλογία καυσίμου προς οξειδωτικό, ως εξής:

$$\varphi = \frac{FAR}{(FAR)_{stoich}} \quad (3.9)$$

Ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου – αέρα σχετίζεται με τον λόγο ισοδυναμίας αέρα – καυσίμου (που ορίστηκε προηγουμένως) ως εξής:

$$\varphi = \frac{1}{\lambda} \quad (3.10)$$

Ένα πλεονέκτημα της χρήσης του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου προς αέρα και του ποσοστού των δεικτών περίσσειας αέρα είναι ότι αυτές οι παράμετροι είναι ίσες σε μάζα και μοριακή βάση, ανεξάρτητα από το επεξεργασμένο καύσιμο.

Πίνακας 3-1: Τύπος φλόγας/είδος μείγματος [18].

Τύπος μείγματος καυσίμου αέρα	Αναλογία ισοδυναμίας	Περιγραφή
Πλούσια μείγματα $\lambda < 1$	$\varphi > 1$	Αντιπροσωπεύουν πάντα την περίσσεια καυσίμου στο μείγμα καυσίμου-οξειδωτικού, από αυτό που θα απαιτούνταν για την πλήρη καύση.
Στοιχειομετρία $\lambda = 1$	$\varphi = 1$	Η μάζα του αέρα είναι ακριβής για την πλήρη καύση του καυσίμου. Μετά την καύση δεν υπάρχει περίσσεια οξυγόνου στα καυσαέρια και δεν υπάρχει άκαυστο καύσιμο.
Άπαχα μείγματα $\lambda > 1$	$\varphi < 1$	Αντιπροσωπεύουν έλλειψη καυσίμου από αυτό που απαιτείται για την πλήρη καύση της ποσότητας καυσίμου ή ισοδύναμη περίσσεια οξειδωτικού στο μείγμα.

Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το υπό κεφάλαιο βρίσκονται στη βιβλιογραφία στο τέλος της εργασίας ([4],[11],[12]&[18]).

3.5 Ενεργειακό Ισοζύγιο

Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος αφορά τις σχέσεις ισοζυγίου ενέργειας οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν σε αντιδρώντα και μη αντιδρώντα συστήματα. Στα χημικώς αντιδρώντα συστήματα εμπεριέχονται μεταβολές των χημικών ενεργειών και η σχέση του ισοζυγίου ενέργειας για ένα σύστημα κλειστής αντίδρασης, εκφράζεται ως εξής [11],[26]:

$$Q_{R-P} - W_{R-P} = U_P - U_R \quad (3.11)$$

Όπου:

Q_{R-P} η θερμότητα που μεταφέρεται, J/kg

W_{R-P} το έργο που μεταφέρεται, J

U_R η εσωτερική ενέργεια των αντιδρώντων, J

U_P η εσωτερική ενέργεια των προϊόντων, J

Σε συστήματα με διεργασία σταθερού όγκου, με σταθερή αρχική και τελική θερμοκρασία έχουμε:

$$Q_{R-P} = U_P - U_R = (\Delta U)_{v, T_0} \quad (3.12)$$

Σε μια διεργασία υπό σταθερή πίεση, με σταθερή αρχική και τελική θερμοκρασία έχουμε:

$$W_{R-P} = \int_R^P p \cdot dV = p \cdot (V_P - V_R) \quad (3.13)$$

Όπου:

p η πίεση, atm

V ο όγκος, L

Αντικαθιστώντας και από τον ορισμό της ενθαλπίας, προκύπτει:

$$\begin{aligned} Q_{R-P} - p \cdot (V_P - V_R) &= U_P - U_R \Rightarrow Q_{R-P} = (U_P + p \cdot V_P) - (U_R + p \cdot V_R) \\ \Rightarrow Q_{R-P} &= H_P - H_R = (\Delta H)_{p, T_0} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Όπου:

$H = U + p \cdot V$ η ενθαλπία, $kJ/kmol$

3.6 Ενθαλπία Σχηματισμού και Ενθαλπία Καύσης

Κατά τη διάρκεια μιας χημικής αντίδρασης, ορισμένοι χημικοί δεσμοί που συνδέουν τα άτομα σε μόρια διασπώνται και σχηματίζονται νέοι. Έτσι, μια διαδικασία που περιλαμβάνει χημικές αντιδράσεις περιλαμβάνει αλλαγές στις χημικές ενέργειες, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη σε ένα ενεργειακό ισοζύγιο.

Ενθαλπία αντίδρασης h_R (heat of reaction), ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της ενθαλπίας των προϊόντων σε μια καθορισμένη κατάσταση και της ενθαλπίας των αντιδρώντων στην ίδια κατάσταση για μια πλήρη αντίδραση.

Ενθαλπία καύσης h_C (heat of combustion), είναι η ενθαλπία αντίδρασης η οποία αντιπροσωπεύει την ποσότητα θερμότητας που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας καύσης όταν 1 kmol (ή 1 kg) καυσίμου καίγεται πλήρως σε καθορισμένη θερμοκρασία και πίεση, εκφράζεται ως:

$$h_R = h_C = H_{products} - H_{reactants} \quad (3.15)$$

Ενθαλπία σχηματισμού h_f (heat of formation), θεωρείται η ενθαλπία μιας ουσίας σε καθορισμένη κατάσταση λόγω της χημικής της σύστασης.

Σε μια διεργασία με χημικές αντιδράσεις η σύσταση του καυσίμου στο τέλος της διεργασίας δεν είναι ίδια με την αρχική. Για να συσχετιστούν οι εσωτερικές ενέργειες ή οι ενθαλπίες των αντιδρώντων και των προϊόντων μέσω των ενθαλπιών σχηματισμού τους, απαιτείται να υπάρχει μια κοινή κατάσταση αναφοράς όλων των σταθερών στοιχείων (ουσιών). Η επιλεγμένη αναφορά είναι γνωστή ως πρότυπη κατάσταση αναφοράς υπό θερμοκρασία 25°C (298.15 K) και πίεση 1atm και οι τιμές ιδιοτήτων της συμβολίζονται με έναν εκθέτη (°) [2].

Η ενθαλπία σχηματισμού χημικών ουσιών, δίνεται στον **Πίνακα A-4 (Παράρτημα)**. Το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στο γεγονός ότι απελευθερώνεται χημική ενέργεια (εξώθερμη διεργασία) κατά το σχηματισμό του διοξειδίου άνθρακα CO₂, ενώ η θετική τιμή υποδηλώνει ότι η θερμότητα απορροφάται (ενδόθερμη διαδικασία).

Εκφράζουμε την ενθαλπία σε τέτοια μορφή έτσι ώστε να είναι σχετική με την πρότυπη κατάσταση αναφοράς και οι ενέργειες υπολογίζονται σε σχέση με την ενέργεια στην πρότυπη κατάσταση αναφοράς. Δηλαδή, εάν η υπό εξέταση ένωση βρίσκεται σε μία άλλη θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτήν της αναφοράς, τότε πρέπει να εισάγουμε την έννοια της ολικής ή καθολικής ενθαλπίας έτσι ώστε να έχουμε μια κοινή θερμοκρασία για τα προϊόντα και για τα αντιδρώντα. Η ολική ή καθολική ενθαλπία και ορίζεται ως [25]:

$$\Delta h^\circ_f = \bar{h}^\circ_f + \Delta h_T \quad (3.16)$$

Αισθητή ενθαλπία Δh_T , σχετίζεται κυρίως με την κινητική ενέργεια των μορίων και εξαρτάται μόνο από την απόκλιση της θερμοκρασίας από την θερμοκρασία αναφοράς $T_0 = 25^\circ\text{C}, 1\text{atm}$ στην θερμοκρασία T [25].

$$\Delta h_T = (\bar{h} - \bar{h}^\circ) = \int_{T_0}^T \bar{c}_p \cdot dT = \bar{c}_p \cdot (T - T_0) \quad (3.17)$$

Όπου:

\bar{c}_p η μέση τιμή ειδικής θερμότητας, $J/kg \cdot K$

Σε μια πρότυπη κατάσταση αναφοράς η ενθαλπία των προϊόντων και των αντιδρώντων, αντίστοιχα είναι:

$$H_{products} = N_p \cdot (\Delta h^\circ_f)_p \quad (3.18)$$

$$H_{reactants} = N_r \cdot (\Delta h^\circ_f)_r \quad (3.19)$$

Άρα από την σχέση (3.15), η ενθαλπία ή θερμότητα αντίδρασης – καύσης (heat of combustion) στην πρότυπη της κατάσταση γίνεται:

$$\Delta h^\circ_c = H_p - H_r = N_p \cdot (\Delta h^\circ_f)_p - N_r \cdot (\Delta h^\circ_f)_r \quad (3.20)$$

Όπου N είναι ο αριθμός των ατόμων και οι δείκτες p και r αναφέρονται στα προϊόντα και τα αντιδρώντα, αντίστοιχα.

Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το υπό κεφάλαιο βρίσκονται στη βιβλιογραφία στο τέλος της εργασίας ([1],[3],[4],[11]&[25]-[28]).

3.7 Θερμογόνος Δύναμη

Όταν η ακριβής χημική σύσταση του καυσίμου είναι άγνωστη, τότε γίνεται υπολογισμός της θερμογόνου δύναμης (heating or calorific value), η οποία είναι ίση με τη θερμότητα αντίδρασης καύσης σε σταθερή πίεση ή σε σταθερό όγκο σε θερμοκρασία αναφοράς (25°C) που προκύπτει κατά την τέλεια καύση ενός κιλού καυσίμου [26].

$$\dot{Q}_{HV_p} = -(\Delta H^{\circ}_c)_{p,T_0} \quad (3.21)$$

$$\dot{Q}_{HV_v} = -(\Delta U^{\circ}_c)_{v,T_0} \quad (3.22)$$

3.7.1 Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (ΑΘΔ)

Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV – Higher Heating Value) υποδηλώνει το ανώτερο όριο της διαθέσιμης θερμικής ενέργειας που παράγεται από την πλήρη καύση καυσίμου. Προϋποθέτει ότι όλο το νερό (H₂O) των προϊόντων, βρίσκεται σε υγρή κατάσταση μετά την ολοκλήρωση μιας διαδικασίας καύσης. Μετριέται ως μονάδα ενέργειας ανά μονάδα μάζας ή όγκου ουσίας. Τα προϊόντα αφήνονται να κρυώσουν στην αρχική θερμοκρασία και γίνεται μέτρηση της ενέργειας που απελευθερώνεται κατά την πλήρη καύση. Όλα τα καύσιμα που περιέχουν υδρογόνο απελευθερώνουν υδρατμούς ως προϊόν καύσης, οι οποίοι στη συνέχεια συμπυκνώνονται [6].

$$HHV = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_f} \quad (3.23)$$

Όπου:

\dot{Q} ο ρυθμός θερμότητας που εκπέμπεται από την αντίδραση καύσης, J/s

\dot{m}_f ο ρυθμός ροής του καυσίμου, kg/s

3.7.2 Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη (ΚΘΔ)

Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη (LHV – Lower Heating Value) υποδηλώνει το κατώτερο όριο της διαθέσιμης θερμικής ενέργειας που παράγεται από την πλήρη καύση καυσίμου, μετρούμενη ως μονάδα ενέργειας ανά μονάδα μάζας ή όγκου ουσίας. Προϋποθέτει ότι όλο το νερό (H₂O) των προϊόντων, βρίσκεται σε αέρια κατάσταση (υδρατμός) μετά την ολοκλήρωση μιας διαδικασίας καύσης. Εάν τα προϊόντα κρυώσουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται, απελευθερώνοντας τη θερμότητα συμπύκνωσης και σχηματίζονται υγρά σταγονίδια νερού.

Ο όρος κατώτερη θερμογόνος δύναμη αναφέρεται στην ποσότητα της θερμότητας που ανακτάται στη διαδικασία καύσης, σταματώντας την ψύξη πριν συμπυκνωθεί το νερό. Η διαφορά μεταξύ της υψηλότερης και της χαμηλότερης τιμής θέρμανσης είναι επομένως ο ρυθμός θερμότητας που αντιστοιχεί στη συμπύκνωση υδρατμών (ΔH_{vapor}) [6]:

$$LHV = HHV - \frac{\dot{m}_{H_2O,out}}{\dot{m}_f} \cdot \Delta H_{vapor} \quad (3.24)$$

Όπου:

$\dot{m}_{H_2O,out}$ μάζα νερού που εξατμίστηκε (υδρατμοί), kg/s

\dot{m}_f ο ρυθμός ροής του καυσίμου, kg/s

ΔH_{vapor} ενθαλπία εξάτμισης, kJ/kmol

Στη θερμοδυναμική, η ενθαλπία της εξάτμισης (ΔH_{vapor}), επίσης γνωστή ως η (λανθάνουσα) θερμότητα της εξάτμισης είναι η ποσότητα ενέργειας (ενθαλπία) που πρέπει να προστεθεί σε μια υγρή ουσία για να μετασχηματίσει μια ποσότητα αυτής της ουσίας σε αέριο. Η ενθαλπία της εξάτμισης είναι συνάρτηση της πίεσης στην οποία λαμβάνει χώρα ο μετασχηματισμός (εξαέρωση ή εξάτμιση). Στον **Πίνακα A-4 (Παράρτημα)** δίνονται δύο τιμές \bar{h}_f° , η μία αντιστοιχεί για το υγρό νερό και η άλλη για τον υδρατμό. Η διαφορά μεταξύ των δύο ενθαλπιών σχηματισμού είναι ίση με την ενθαλπία εξάτμισης στους 25°C, η οποία είναι 2,441.7 kJ/kg ή 44,000 kJ/kmol [3].

3.7.3 Θερμότητα Καύσης και Θερμογόνος Δύναμη

Οι όροι θερμότητα καύσης (heat of combustion) και θερμογόνος δύναμη (heating or calorific value) είναι δύο έννοιες που αφορούν συστήματα καύσης και μπορούν να εκφράζονται σε βάση μάζας (J/kg) ή σε μοριακή βάση (J/mol).

Οι κύριες διαφορές με την έννοια της θερμογόνου δύναμης, είναι ότι η έννοια της θερμότητας καύσης ασχολείται πάντα με (Nguyen, Granacher, Middelhaue & Platteau, 2019 [6]):

- στοιχεία σε πρότυπες καταστάσεις - το νερό που παράγεται από μια αντίδραση καύσης θα πρέπει να θεωρείται σε υγρή κατάσταση, όχι σε αέρια - αυτή είναι μια σημαντική διαφορά με την έννοια της κατώτερης θερμογόνου δύναμης, η οποία δεν λαμβάνει υπόψη τη θερμότητα της συμπύκνωσης του ατμού.
- στοιχεία σε πρότυπες συνθήκες - δεν υπάρχει καθολικός ορισμός του προτύπου, ακόμη και για θερμοδυναμικούς, αλλά αυτό συνήθως συνεπάγεται με τους 25°C για τις αντιδράσεις καύσης. Διαφορετικές ενώσεις (βιομηχανικές, ερευνητικές, κ.λπ.) μπορούν να εξετάσουν τους 16°C.

3.8 Θερμοκρασία Αδιαβατικής Φλόγας

Όταν ο θάλαμος καύσης είναι μονωμένος (χωρίς απώλεια θερμότητας στο περιβάλλον, $Q = 0$), η θερμοκρασία των προϊόντων φτάνει στο μέγιστο που ονομάζεται αδιαβατική φλόγα ή θερμοκρασία αδιαβατικής καύσης της αντίδρασης. Σε μια διεργασία καύσης σταθεροποιημένης ροής, η σχέση του ισοζυγίου ενέργειας εκφράζεται ως εξής [11]:

$$Q = \Delta H^\circ_c \Rightarrow H_{\text{products}} = H_{\text{reactants}}$$

$$N_p \cdot (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p = N_r \cdot (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r \quad (3.25)$$

Επειδή είναι ένα κλειστό σύστημα, η μάζα των προϊόντων και των αντιδρώντων είναι σταθερή επομένως το ενεργειακό ισοζύγιο της διαδικασίας μπορεί να γραφτεί σε βάση μάζας ως (Nguyen, Granacher, Middelhaue & Platteau, 2019 [6]):

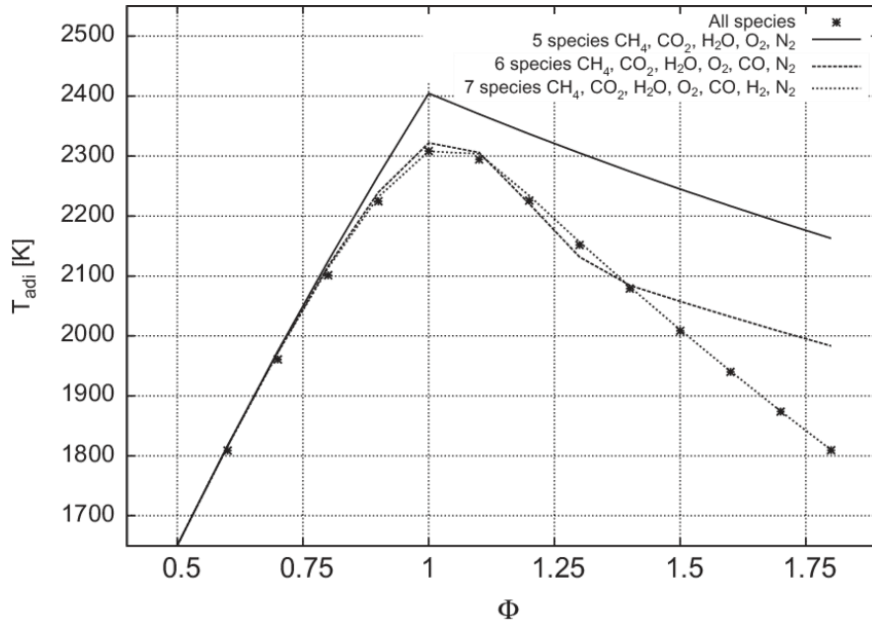
$$\dot{m}_g \cdot [c_{p,g}]_{T_0}^{T_{adf}} (T_{adf} - T_0) = \dot{m}_a \cdot [c_{p,a}]_{T_0}^{T_a} (T_a - T_0) + \dot{m}_f \cdot LHV_f \quad (3.26)$$

Όπου οι δείκτες g, a και f τα συμβολίζουν το αέριο (gas), τον αέρα (air) και τα καύσιμα (fuel), αντίστοιχα.

Η θερμοκρασία αδιαβατικής φλόγας (T_{adf}) είναι σημαντική παράμετρος για το σχεδιασμό των θαλάμων καύσης, των αεριοστροβίλων και των ακροφυσίων, και από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι (Nguyen, Granacher, Middelhaue & Platteau, 2019 [6]):

$$T_{adf} = T_0 + \frac{1}{[c_{p,g}]_{T_0}} \cdot \frac{LHV_f}{AFR+1} \quad (3.27)$$

Η θερμοκρασία της αδιαβατικής φλόγας μειώνεται με υψηλότερο ποσοστό περίσσειας αέρα, καθώς χρησιμοποιείται περισσότερη θερμότητα για την προθέρμανση του πρόσθετου αέρα που υπάρχει στον αντιδραστήρα καύσης. Για το λόγο αυτό, η μέγιστη θερμοκρασία εντός ενός θαλάμου καύσης συνήθως ελέγχεται ρυθμίζοντας (αυξάνοντας) την αναλογία αέρα προς καύσιμο (AFR), η οποία χρησιμεύει ως ψυκτικό μέσο [6].



Σχήμα 3-1: Διάγραμμα θερμοκρασία αδιαβατικής φλόγας προς αναλογία ισοδυναμίας για διαφορετικά σύνολα χημικών ειδών (Vervisch, 2015).

Η θερμοκρασία αδιαβατικής φλόγας ενός καυσίμου δεν είναι μοναδική και η αξία του εξαρτάται από [1],[3]:

- την κατάσταση των αντιδρώντων
- το βαθμό ολοκλήρωσης της καύσης
- την ποσότητα του αέρα που χρησιμοποιείται

3.9 Απόδοση Γεννήτριας Θερμότητας

Η θερμότητα που παράγεται από την καύση του καυσίμου μπορεί να ανακτηθεί μόνο εν μέρει ως χρήσιμη θερμότητα (\dot{Q}_u), καθώς είναι γενικά ανέφικτο (ή μη πρακτικό) να ψύχονται τα αέρια της καύσης μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Παραβλέποντας τις απώλειες θερμότητας από την καύση στο περιβάλλον και υποθέτοντας ότι η θερμότητα της συμπύκνωσης του νερού δεν μπορεί να ανακτηθεί, το ενεργειακό ισοζύγιο μιας γεννήτριας θερμότητας μπορεί να γραφεί (Nguyen, Granacher, Middelhaue & Platteau, 2019 [6]):

- με βάση την ανώτερη θερμογόνος δύναμη (ΑΘΔ) ως:

$$\dot{m}_f \cdot HHV_f = \dot{Q}_u + c_{p,g}(T_g - T_0) + \dot{m}_{H_2O,out} \cdot \Delta H_{vapor} \quad (3.28)$$

- Με βάση την κατώτερη θερμογόνο δύναμη (ΚΘΔ) ως:

$$\dot{m}_f \cdot LHV_f = \dot{Q}_u + c_{p,g}(T_g - T_0) \quad (3.29)$$

Η καύση στις μηχανές εσωτερικής καύσης είναι ατελής, επομένως με τον ορισμό ενός βαθμού απόδοσης λαμβάνεται υπόψη το ποσοστό της χημικής ενέργειας του καυσίμου που δεν αξιοποιείται. Η απόδοση της γεννήτριας θερμότητας δίνεται, εξ ορισμού (Nguyen, Granacher, Middelhaue & Platteau, 2019 [6]):

- με βάση την ανώτερη θερμογόνο δύναμη (ΑΘΔ) ως:

$$\eta_{HHV} = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{m}_f \cdot HHV_f} \quad (3.30)$$

- με βάση την κατώτερη θερμογόνο δύναμη (ΚΘΔ) ως:

$$\eta_{LHV} = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{m}_f \cdot LHV_f} \quad (3.31)$$

3.10 Ασκήσεις

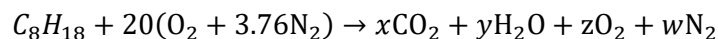
3.10.1 Άσκηση 1. Καύση Οκτανίου με Αέρα

Ένα kmol οκτανίου (C_8H_{18}) καίγεται με αέρα που περιέχει 20 kmol O_2 . Υποθέτοντας ότι τα προϊόντα περιέχουν μόνο CO_2 , H_2O , O_2 και N_2 , να προσδιοριστεί το πλήθος των γραμμομορίων του κάθε αερίου στα προϊόντα και ο λόγος αέρα – καυσίμου για την συγκεκριμένη διεργασία καύσης (Cengel & Boles, 2014 [3]).

ΛΥΣΗ

Η μοριακή μάζα του αέρα είναι: $M_{air} = 28.97 \text{ kg/kmol} \cong 29 \text{ kg/kmol}$ (Πίνακας Α-3, Παράρτημα)

Η χημική αντίδραση για αυτήν τη διεργασία καύσης μπορεί να γραφεί ως:



Τα x , y , z και w είναι το άγνωστο πλήθος των γραμμομορίων (στοιχειομετρικοί συντελεστές) των αερίων στα προϊόντα και προσδιορίζονται εφαρμόζοντας το ισοζύγιο μάζας σε καθένα από τα στοιχεία.

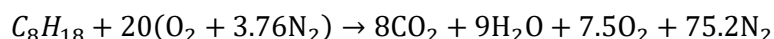
$$C: 8 = x \quad \rightarrow x = 8$$

$$H: 18 = 2y \quad \rightarrow y = 9$$

$$O: 20 \times 2 = 2x + y + 2z \quad \rightarrow z = 7.5$$

$$N_2: 20 \times 3.76 = w \quad \rightarrow w = 75.2$$

Επομένως, προκύπτει ότι:



Ο συντελεστής 20 στην χημική εξίσωση αναπαριστά το πλήθος των moles του οξυγόνου, όχι το πλήθος των moles του αέρα. Από το ισοζύγιο, το πλήθος των moles του αζώτου είναι 75.2 άρα έχουμε συνολικά 95.2 mol αέρα.

$$20 \text{ mol O}_2 + 75.2 \text{ mol N}_2 = 95.2 \text{ mol αέρα}$$

Ο λόγος αέρα – καυσίμου υπολογίζεται από την εξίσωση (3.6) λαμβάνοντας το λόγο της μάζας:

$$AFR = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} = \frac{(N \times M)_{air}}{(N \times M)_C + (N \times M)_{H_2}}$$

$$AFR = \frac{(95.2 \text{ kmol})(29 \text{ kg/kmol})}{(8 \text{ kmol})(12 \text{ kg/kmol}) + (9 \text{ kmol})(2 \text{ kg/kmol})} = 24.2 \text{ kg}_{air}/\text{kg}_{fuel}$$

Δηλαδή, κατά την διεργασία καύσης χρησιμοποιούνται 24.2 kg αέρα για την καύση κάθε 1 kg καυσίμου οκτανίου.

3.10.2 Άσκηση 2. Καύση Φυσικού Αερίου με Θεωρητική Ποσότητα Αέρα

Μία τυπική σύσταση φυσικού αερίου έχει την ακόλουθη ογκομετρική σύνθεση: 90% CH₄ (μεθάνιο), 6% C₂H₆ (αιθάνιο), 4% CO₂ (διοξείδιο του άνθρακα). Το αέριο αυτό καίγεται με θεωρητική ποσότητα αέρα με ογκομετρική σύνθεση 21% O₂ και 79% N₂ [6].

Δίνονται: η ενθαλπία εξάτμισης του φ.αερίου είναι 44000 kJ/kmol, η κατώτερη θερμογόνο δύναμη 44859 kJ/kg και οι μοριακές μάζες M_C: 12 kg/kmol, M_O: 16 kg/kmol, M_H: 1 kg/kmol.

1. Υπολογίστε τη μοριακή μάζα του καυσίμου.
2. Πόσα mol αέρα χρειάζεστε για να κάψετε στοιχειομετρικά ένα mol καυσίμου;
3. Υπολογίστε την ανώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου (HHV – Higher Heating Value).
4. Μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου παράγει ηλεκτρική ενέργεια 800MW με ενεργειακή απόδοση 56% με την καύση φυσικού αερίου. Δώστε την απαιτούμενη ροή καυσίμου του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής.

ΛΥΣΗ

1^ο Ερώτημα

Για να υπολογίσουμε τη μοριακή μάζα του καυσίμου χρειάζεται να υπολογιστούν οι μοριακές μάζες για κάθε στοιχείο που χρησιμοποιείται για την διεργασία καύσης, από την εξίσωση (3.5).

Η μοριακή μάζα του μεθανίου, είναι:

$$M_{CH_4} = (N \times M)_C + (N \times M)_H = (1 \times 12) + (4 \times 1) = 16 \text{ kg/kmol}$$

Η μοριακή μάζα του αιθανίου, είναι:

$$M_{C_2H_6} = (N \times M)_C + (N \times M)_H = (2 \times 12) + (6 \times 1) = 30 \text{ kg/kmol}$$

Η μοριακή μάζα του διοξειδίου του άνθρακα, είναι:

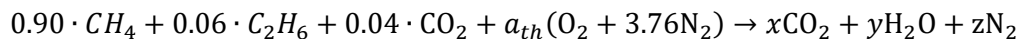
$$M_{CO_2} = (N \times M)_C + (N \times M)_O = (1 \times 12) + (2 \times 16) = 44 \text{ kg/kmol}$$

Επομένως, η συνολική μοριακή μάζα (ή μοριακό βάρος) του μίγματος καυσίμου είναι ίση με το άθροισμα του γινομένου της ογκομετρικής σύνθεσης και της μοριακής μάζας των αντιδρώντων του μείγματος:

$$\begin{aligned} M_{fuel} &= (m \times M)_{CH_4} + (m \times M)_{C_2H_6} + (m \times M)_{CO_2} \\ &= (0.90 \times 16) + (0.06 \times 30) + (0.04 \times 44) = 17.96 \text{ kg/kmol} \end{aligned}$$

2^ο Ερώτημα

Ζητείται ο στοιχειομετρικός αέρας για την καύση 1 mol καυσίμου, άρα χρειάζεται να βρούμε την η ελάχιστη ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη καύση κάθε μείγματος. Επομένως, εφαρμόζουμε το ισοζύγιο μάζας, έχοντας στην χημική εξίσωση ως αντιδρώντα το φυσικό αέριο και τον αέρα ενώ, ως προϊόντα το διοξείδιο του άνθρακα, το νερό και άζωτο. Άρα από την χημική εξίσωση (3.4) η αντίδραση για αυτήν τη διεργασία καύσης μπορεί να γραφεί ως:



Τα a_{th} , x , y και z είναι το άγνωστο πλήθος των γραμμομορίων (στοιχειομετρικοί συντελεστές) των αερίων και προσδιορίζονται εφαρμόζοντας το ισοζύγιο μάζας σε καθένα από τα στοιχεία.

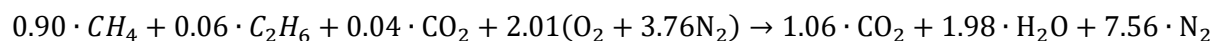
$$C: 0.90 + 0.06 \times 2 + 0.04 = x \quad \rightarrow x = 1.06$$

$$H: 0.90 \times 4 + 0.06 \times 6 = 2y \quad \rightarrow y = 1.98$$

$$O: 0.04 \times 2 + a_{th} \times 2 = 2x + y \quad \rightarrow a_{th} = 2.01$$

$$N_2: a_{th} \times 3.76 = z \quad \rightarrow z = 7.56$$

Επομένως, προκύπτει ότι:



Ο συντελεστής a_{th} μας δίνει τον αριθμό ατόμων οξυγόνου του θεωρητικού αέρα που απαιτούνται στην αντίδραση καύσης, άρα ο στοιχειομετρικός αέρας για την καύση 1 mol καυσίμου είναι:

$$2.01 \text{ mol } O_2 + 7.56 \text{ mol } N_2 = 9.57 \text{ mol αέρα}$$

3° Ερώτημα

Γνωρίζουμε ότι για τον υπολογισμό της κατώτερης θερμογόνου δύναμης απαιτείται η πλήρη ποσότητα νερού (1 kg/kmol) των προϊόντων να βρίσκεται σε αέρια κατάσταση μετά την ολοκλήρωση μιας διαδικασίας καύσης. Επομένως, χρειάζεται η συνολική μάζα του μίγματος καυσίμου που βρήκαμε στο 1° ερώτημα και από τα δεδομένα της εκφώνησης και τους τύπους (3.23) & (3.24), βρίσκουμε ότι η ανώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου είναι:

$$LHV = HHV - \frac{\dot{m}_{H_2O,out}}{\dot{m}_f} \cdot \Delta H_{vapor} \Rightarrow$$

$$HHV = LHV + \frac{\dot{m}_{H_2O,out}}{\dot{m}_f} \cdot \Delta H_{vapor} = 44859 + \frac{1}{17.96} \cdot 44000 = 47308.88 \cong 47309 \text{ kJ/kmol}$$

4° Ερώτημα

Από τα δεδομένα της εκφώνησης έχουμε ότι:

$$\dot{Q}_u = 800 \text{ MW} = 800 \times 10^3 \text{ kW}$$

$$\eta_{LHV} = 56\% = 0.56$$

Χρησιμοποιώντας τον τύπο της απόδοσης της γεννήτριας θερμότητας (3.31), μπορούμε να βρούμε την απαιτούμενη ροή καυσίμου του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, ως εξής:

$$\eta_{LHV} = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{m}_f \cdot LHV_f}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_f = \frac{\dot{Q}_u}{\eta_{LHV} \cdot LHV_f} = \frac{800 \times 10^3}{0.56 \cdot 44859} = 31.85 \cong 32 \text{ kg/s}$$

4 Ανάπτυξη Υπολογιστικού Εργαλείου Για Προβλήματα Καύσης Καυσίμων

4.1 Εισαγωγή – Σκοπός

Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει την ανάπτυξη εκπαιδευτικού υλικού υπό μορφή υπολογιστικών φύλλων Excel, το οποίο αφορά την επίλυση στα παραδείγματα που έχουν αναπτυχθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτό το υπολογιστικό εργαλείο, έχει ως χρησιμότητα να γίνονται οι υπολογισμοί αυτόματα για οποιοδήποτε πρόβλημα αλλάζοντας μόνο τα απαραίτητα δεδομένα, χωρίς να χρειάζεται εκ νέου υπολογισμός μεταβλητών με χρήση χειρόγραφων σημειώσεων.

4.2 Επίλυση Ασκήσεων με Χρήση Εργαλείου Excel

4.2.1 Άσκηση 1. Καύση Οκτανίου με Αέρα

Ένα kmol οκτανίου (C_8H_{18}) καίγεται με αέρα που περιέχει 20 kmol O_2 . Υποθέτοντας ότι τα προϊόντα περιέχουν μόνο CO_2 , H_2O , O_2 και N_2 , να προσδιοριστεί το πλήθος των γραμμομορίων του κάθε αερίου στα προϊόντα και ο λόγος αέρα – καυσίμου για την συγκεκριμένη διεργασία καύσης.

ΛΥΣΗ

Για τις ασκήσεις που αναφέρονται στην καύση υδρογονανθράκων, ανοίγουμε το αρχείο Excel με όνομα **Combustion.xlsx** και έπειτα στο φύλλο 3.10.1 στο και ακολουθούμε τις παρακάτω οδηγίες για την υλοποίηση της άσκησης.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΚΦΩΝΗΣΗΣ									
Οκτάνιο C_8H_{18}	1 kmol								
Οξυγόνο O_2	20 kmol								
Μοριακή μάζα αέρα: M_{air}	29 kg/kmol								
Μοριακή μάζα άνθρακα: M_C	12 kg/kmol								
Μοριακή μάζα υδρογόνου: M_{H_2}	2 kg/kmol								

ΕΠΙΛΥΣΗ ΑΣΚΗΣΗΣ									
Αντιδρώντα στοιχεία					Προϊόντα στοιχεία				
Υδρογονάνθρακας	Αέρας				Διοξείδιο άνθρακα	Νερό	Οξυγόνο	Άζωτο	
C: 8	O: 2				C: 1	H: 2	O: 2	N ₂ : 1	
H: 18	N ₂ : 3.76				O: 2	O: 1			

Χημική Αντίδραση									
Στοιχειομετρικοί συντελεστές αντιδρώντων					Στοιχειομετρικοί συντελεστές προϊόντων				
1 mol	υδρογονάνθρακα				8 mol	διοξείδιο του άνθρακα			
20 mol	οξυγόνο				9 mol	νερό			
					75.2 mol	αέρας			

1^ο Βήμα:

Στα κελιά D4-D5 τοποθετούνται τα δεδομένα της εκφώνησης από τον χρήστη ως εξής:

	A	B	C	D	E	F
2	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΚΦΩΝΗΣΗΣ					
3						
4		Οκτάνιο	C_8H_{18}	1 kmol		
5		Οξυγόνο	O_2	20 kmol		
6						
7		Μοριακή μάζα αέρα: M_{air}			29 kg/kmol	
8		Μοριακή μάζα άνθρακα: M_C			12 kg/kmol	
9		Μοριακή μάζα υδρογόνου: M_{H_2}			2 kg/kmol	

Ενώ στα κελιά E7-E9 δίνονται ο μοριακές μάζες των στοιχείων, οι οποίες είναι σταθερές μεταβλητές.

2^ο Βήμα:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
13	ΕΠΙΛΥΣΗ ΑΣΚΗΣΗΣ																	
14																		
15	Αντιδρώντα στοιχεία						Προϊόντα στοιχεία											
16																		
17	Υδρογονάνθρακας			Αέρας			Διοξείδιο άνθρακα			Νερό			Οξυγόνο			Άζωτο		
18	C:	8		O:	2			C:	1		H:	2		O:	2		N ₂ :	1
19	H:	18		N ₂ :	3.76			O:	2		O:	1						

Στα κελιά B18 & B19 τοποθετούμε τον αριθμό των ατόμων άνθρακα και υδρογόνου στον υδρογονάνθρακα οκτάνιο, αντίστοιχα.

Για την αντίδραση του υδρογονάνθρακα με αέρα, τα κελιά E18 & E19 αναφέρονται στον αριθμό των ατόμων οξυγόνου και αριθμό mole αζώτου που απαιτούνται στην αντίδραση για την καύση του υδρογονάνθρακα.

	A	B	C	D	E
15	Αντιδρώντα στοιχεία				
16					
17	Υδρογονάνθρακας		Αέρας		
18	C:	8		O:	2
19	H:	18		N ₂ :	3.76

Ομοίως, τα κελιά I18-I19, L18-L19, O18 & R18 δείχνουν τον αριθμό των ατόμων των χημικών στοιχείων στα προϊόντα που θα παραχθούν κατά την καύση.

	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
15	Προϊόντα στοιχεία										
16											
17	Διοξείδιο άνθρακα			Νερό			Οξυγόνο			Άζωτο	
18	C:	1		H:	2		O:	2		N ₂ :	1
19	O:	2		O:	1						

3^ο Βήμα:

Στα κελιά A26 & A27 βλέπουμε την ποσότητα των αντιδρώντων στοιχείων σε mol για την αντίδραση καύσης, η οποία δίνεται από την εκφώνηση της άσκησης.

Στα κελιά H26-H29 γίνονται οι υπολογισμοί για την εύρεση του πλήθους των γραμμομορίων των προϊόντων μετά την χημική αντίδραση, εφαρμόζοντας το ισοζύγιο μάζας.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
22	Χημική Αντίδραση											
23												
24	Στοιχειομετρικοί συντελεστές αντιδρώντων							Στοιχειομετρικοί συντελεστές προϊόντων				
25												
26		1 mol	υδρογονάνθρακα					8 mol		διοξείδιο του άνθρακα		
27		20 mol	οξυγόνο					9 mol		νερό		
28								7.5 mol		οξυγόνο		
29								75.2 mol		άζωτο		

Στα κελιά C33- C36 παρουσιάζονται τα mol των ατόμων πριν την καύση ενώ στα κελιά J33-J36 το συνολικό πλήθος μετά την καύση. Με αυτό τον τρόπο βλέπουμε ότι ισχύει το ισοζύγιο μάζας, άρα επαληθεύονται οι συντελεστές των αερίων στα προϊόντα που έχουν βρεθεί.

	B	C	D		I	J	K
32	Πλήθος ατόμων			32	Πλήθος ατόμων		
33	C:		8 mol	33	C:		8 mol
34	H:		18 mol	34	H:		18 mol
35	O:		40 mol	35	O:		40 mol
36	N ₂ :		75.2 mol	36	N ₂ :		75.2 mol

4^ο Βήμα:

Τα κελιά C39-C41 μας δίνουν την σύσταση του ξηρού αέρα για 1 mole οξυγόνου, ενώ στα κελιά J39-J41 γίνεται ο υπολογισμός του στοιχειομετρικού αέρα που περιέχει 20 mole οξυγόνου.

	B	C	D		I	J	K
38	Σύσταση ξηρού αέρα			38	Στοιχειομετρικός αέρας		
39	O ₂		1 mol	39	O ₂ :		20 mol
40	N ₂		3.76 mol	40	N ₂ :		75.2 mol
41	Air:		4.76 mol	41	Air:		95.2 mol

5° Βήμα:

Στο κελί P32 υπολογίζεται η μάζα του στοιχειομετρικού αέρα και στο κελί P36 η συνολική μάζα του καυσίμου, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εύρεση του λόγου αέρα – καυσίμου (AFR), που βρίσκεται στο κελί P41.

	O	P	Q
31	Μάζα αέρα:		
32	m(air)	2758	kg
33			
34			
35	Μάζα καυσίμου:		
36	m(fuel)	114	kg
37			
38			
39	Λόγος αέρα – καυσίμου (AFR):		
40			
41	AFR	24.2	

4.2.2 Άσκηση 2. Καύση Φυσικού Αερίου με Θεωρητική Ποσότητα Αέρα

Ένα συγκεκριμένο φυσικό αέριο έχει την ακόλουθη ογκομετρική σύνθεση: 90% CH₄ (μεθάνιο), 6% C₂H₆ (αιθάνιο), 4% CO₂ (διοξείδιο του άνθρακα). Το αέριο αυτό καίγεται με θεωρητική ποσότητα αέρα με ογκομετρική σύνθεση 21% O₂ και 79% N₂.

Δίνονται: η ενθαλπία εξάτμισης είναι 44000 kJ/kmol, η κατώτερη θερμογόνο δύναμη 44859 kJ/kg και οι μοριακές μάζες M_C: 12 kg/kmol, M_O: 16 kg/kmol, M_H: 1 kg/kmol.

1. Υπολογίστε τη μοριακή μάζα του καυσίμου.
2. Πόσα mol αέρα χρειάζεστε για να κάψετε στοιχειομετρικά ένα mol καυσίμου;
3. Υπολογίστε την ανώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου (HHV – Higher Heating Value).
4. Μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου παράγει ηλεκτρική ενέργεια 800MW με ενεργειακή απόδοση 56% με την καύση φυσικού αερίου. Δώστε την απαιτούμενη ροή καυσίμου του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής.

ΛΥΣΗ

Για τις ασκήσεις που αναφέρονται στην καύση υδρογονανθράκων, ανοίγουμε το αρχείο Excel με όνομα **Combustion.xlsx** και έπειτα στο φύλλο 3.10.2 στο και ακολουθούμε τις παρακάτω οδηγίες για την υλοποίηση της άσκησης.

Combustion.xlsx - Excel


Sign in






98



-

X

□

File Home Insert Page Layout Formulas Data Review View Office Tab Help  Tell me what you want to do

A140   fx

0 Combustion.xlsx A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z AA AB AC

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΚΦΩΝΗΣΗΣ

Φυσικό Αέριο

Μεθάνιο CH_4

Αιθάνιο C_2H_6

Διοξείδιο του άνθρακα CO_2

Μοριακή μάζα άνθρακα: M_C

Μοριακή μάζα οξυγόνου: M_O

Μοριακή μάζα υδρογόνου: M_H

90%

6%

4%

12 kg/kmol

16 kg/kmol

1 kg/kmol

Θεωρητικός Αέρας

Οξυγόνο O_2

Άζωτο N_2

21%

79%

ΔH_{lower}

44000 kJ/kmol

44859 kJ/kg

ΕΠΙΛΥΣΗ ΑΣΚΗΣΗΣ

1ο Ερώτημα

Αντιδρώντα στοιχεία

Αέρας

Μεθάνιο

Αιθάνιο

Διοξείδιο άνθρακα

Μοριακή μάζα (kg/kmol): $M(\text{CH}_4)$

Μοριακή μάζα του καυσίμου: $M(\text{fuel})$

2

3.76

1

4

16

17.96 kg/kmol

C:

H:

M(C_2H_6)

30

44

C:

H:

C:

O:

N₂:

1

2

2

1

2

1

C:

H:

C:

O:

N₂:

1

2

2

1

2

1

C:

H:

C:

O:

N₂:

1

2

2

1

2

1

C:

H:

C:

O:

N₂:

1

2

2

1

2

1

C:

H:

C:

O:

N₂:

1

2

2

1

2

1

C:

H:

C:

O:

N₂:

1

2

2

1

2

1

C:

H:

C:

O:

N₂:

1

2

2

1

2

1

C:

H:

C:

O:

N₂:

1

2

2

1

2

1

C:

H:

C:

O:

N₂:

1

2

2

1

2

1

C:

H:

C:

O:

N₂:

1

2

2

1

2

1

C:

H:

C:

O:

N₂:

1

2

2

1

2

1

C:

H:

C:

O:

N₂:

1

2

2

1

2

1

C:

H:

C:

O:

N₂:

1

2

2

1

2

1

2ο Ερώτημα

Χημική Αντίδραση

Στοιχειομετρικοί συντελεστές αντιδρώντων

0.30 mol μεθάνιο

0.06 mol αιθάνιο

0.04 mol διοξείδιο του άνθρακα


2.01 mol οξυγόνο

Στοιχειομετρικοί συντελεστές προϊόντων

1.96 mol διοξείδιο του άνθρακα


1.98 mol νερό


7.56 mol άζωτο


Ready  Accessibility: Investigate


3.10.1


3.10.2


















































1^ο Βήμα:

Στα κελιά E5-E7 δίνεται η ογκομετρική σύνθεση ενός φυσικού αερίου και στα κελιά J5-J6 η αναλογία στοιχείων του αέρα.

Στα κελιά E9-E11 δίνονται ο μοριακές μάζες των στοιχείων, οι οποίες είναι σταθερές μεταβλητές και βρίσκονται στους πίνακες του παραρτήματος. Ενώ στα κελιά I10 & I11 δίνονται η ενθαλπία εξατμίσεως νερού και η κατώτερη θερμογόνος δύναμη (LHV), αντίστοιχα.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
2	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΚΦΩΝΗΣΗΣ									
3										
4	Φυσικό Αέριο					Θεωρητικός Αέρας				
5			Μεθάνιο	CH ₄	90%			Οξυγόνο	O ₂	21%
6			Αιθάνιο	C ₂ H ₆	6%			Άζωτο	N ₂	79%
7	Διοξείδιο του άνθρακα			CO ₂	4%					
8										
9	Μοριακή μάζα άνθρακα:			M _C	12	kg/kmol				
10	Μοριακή μάζα οξυγόνου:			M _O	16	kg/kmol		ΔH _{vapor}	44000	kJ/kmol
11	Μοριακή μάζα υδρογόνου:			M _H	1	kg/kmol		LHV	44859	kJ/kg

2^ο Βήμα:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
15	ΕΠΙΛΥΣΗ ΑΣΚΗΣΗΣ																				
16																					
17	1ο Ερώτημα																				
18																					
19	Αντιδρώντα στοιχεία											Προϊόντα στοιχεία									
20																					
21	Αέρας			Μεθάνιο			Αιθάνιο			Διοξείδιο άνθρακα			Διοξείδιο άνθρακα			Νερό			Άζωτο		
22	O ₂ :	2		C:	1		C:	2		C:	1		C:	1		H:	2		N ₂ :	1	
23	N ₂ :	3.76		H:	4		H:	6		O:	2		O:	2		O:	1				
24																					
25	Μοριακή μάζα (kg/kmol):			M(CH ₄)			16			M(C ₂ H ₆)			30			M(CO ₂)			44		
26																					
27	Μοριακή μάζα του καυσίμου:			M(fuel)			17.96 kg/kmol														

Στα κελιά B22-B23, E22-E23, H22-H23, K22-K23 τοποθετούμε τον αριθμό των αερίων στα αντιδρώντα που θα χρησιμοποιηθούν στην διεργασία καύσης.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
19	Αντιδρώντα στοιχεία										
20											
21	Αέρας			Μεθάνιο			Αιθάνιο			Διοξείδιο άνθρακα	
22	O:	2		C:	1		C:	2		C:	1
23	N ₂ :	3.76		H:	4		H:	6		O:	2

Ομοίως, τα κελιά O22-O23, R22-R23 & U22 δείχνουν τον αριθμό των ατόμων των αερίων στα προϊόντα που θα παραχθούν κατά την καύση.

	N	O	P	Q	R	S	T	U
19	Προϊόντα στοιχεία							
20								
21	Διοξείδιο άνθρακα			Νερό			Άζωτο	
22	C:	1		H:	2		N ₂ :	1
23	O:	2		O:	1			

Στα κελιά E25, H25, K25 γίνεται οι υπολογισμοί για την μοριακή μάζα του κάθε αερίου που περιέχει το συγκεκριμένο φυσικό αέριο, έτσι ώστε να βρεθεί η μοριακή μάζα του συνολικού καυσίμου που καίγεται με θεωρητική ποσότητα αέρα στο κελί E27.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
19	Αντιδρώντα στοιχεία										
20											
21	Αέρας			Μεθάνιο			Αιθάνιο			Διοξείδιο άνθρακα	
22	O:	2		C:	1		C:	2		C:	1
23	N ₂ :	3.76		H:	4		H:	6		O:	2
24											
25	Μοριακή μάζα (kg/kmol):			M(CH ₄)	16		M(C ₂ H ₆)	30		M(CO ₂)	44
26											
27	Μοριακή μάζα του καυσίμου:			M(fuel)	17.96 kg/kmol						

3^ο Βήμα:

Στα κελιά A36-A38 βλέπουμε την ποσότητα των στοιχείων του φυσικού αερίου, δηλαδή την ογκομετρική σύνθεση (σε mol) η οποία δίνεται από την εκφώνηση της άσκησης.

Οι υπολογισμοί για την εύρεση του πλήθους των γραμμομορίων (στοιχειομετρικών συντελεστών) των προϊόντων μετά την χημική αντίδραση, εφαρμόζοντας το ισοζύγιο μάζας, παρουσιάζονται στα κελιά H36-H37.

Στο κελί A39 υπολογίζεται ο συντελεστής του οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη καύση καυσίμου, στα αντιδρώντα στοιχεία.

Εφόσον βρεθεί ο συντελεστής του οξυγόνου, τότε υπολογίζεται και το πλήθος ατόμων του αζώτου στα προϊόντα, στο κελί H38.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
30	2ο Ερώτημα											
31												
32	Χημική Αντίδραση											
33												
34	Στοιχειομετρικοί συντελεστές αντιδρώντων						Στοιχειομετρικοί συντελεστές προϊόντων					
35												
36	0.90 mol	μεθάνιο						1.06 mol	διοξείδιο του άνθρακα			
37	0.06 mol	αιθάνιο						1.98 mol	νερό			
38	0.04 mol	διοξείδιο του άνθρακα						7.56 mol	άζωτο			
39	2.01 mol	οξυγόνο										

4^ο Βήμα:

Στα κελιά C43-C46 παρουσιάζεται το συνολικό πλήθος των ατόμων πριν την καύση, ενώ στα κελιά J43-J46 το συνολικό πλήθος μετά την καύση. Με αυτό τον τρόπο βλέπουμε ότι ισχύει το ισοζύγιο μάζας, άρα επαληθεύονται οι συντελεστές των αερίων στα προϊόντα και του οξυγόνου στα αντιδρώντα που έχουν βρεθεί προηγουμένως.

	B	C	D
42	Πλήθος ατόμων		
43	C:	1.06	mol
44	H:	3.96	mol
45	O:	4.1	mol
46	N ₂ :	7.56	mol

	I	J	K
42	Πλήθος ατόμων		
43	C:	1.06	mol
44	H:	3.96	mol
45	O:	4.1	mol
46	N ₂ :	7.56	mol

Τα κελιά C49-C51 μας δίνουν την σύσταση του ξηρού αέρα για 1 mole οξυγόνου, ενώ στα κελιά J49-J51 γίνεται ο υπολογισμός του στοιχειομετρικού αέρα που απαιτείται για την πλήρη καύση του καυσίμου.

	B	C	D
48	Σύσταση ξηρού αέρα		
49	O ₂ :	1	mol
50	N ₂ :	3.76	mol
51	Air:	4.76	mol

	I	J	K
48	Στοιχειομετρικός αέρας		
49	O ₂ :	2.01	mol
50	N ₂ :	7.56	mol
51	Air:	9.57	mol

5^ο Βήμα:

Στο κελί B56 δίνεται η μάζα νερού που εξατμίστηκε (υδρατμοί) και στο κελί B58 υπολογίζεται αυτόματα η ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV) του καυσίμου με την βοήθεια των δεδομένων που έχουν δοθεί στην εκφώνηση της άσκησης.

	A	B	C
54	3ο Ερώτημα		
55			
56	m(H ₂ O)	1	kg/kmol
57			
58	HHV	47309	kJ/kmol

6^ο Βήμα:

Στο κελί B64 & F65 τοποθετούμε την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας σε MW και την ενεργειακή απόδοση που δίνεται από την άσκηση. Ενώ στο κελί B65 γίνεται μετατροπή μονάδων της ηλεκτρικής ενέργειας σε kW, έτσι ώστε να γίνουν ευκολότερα οι υπολογισμοί.

Στο κελί D68 υπολογίζεται η απαιτούμενη ροή καυσίμου του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, από τα δεδομένα που έχουν δοθεί.

	A	B	C	D	E	F
61	4ο Ερώτημα					
62						
63	Ηλεκτρική ενέργεια				Ενεργειακή απόδοση	
64	Q	800	MW			
65	=	800000	kW		η	56%
66						
67						
68	Ροή καυσίμου:		m(fuel)	32	kg/s	

Συμπεράσματα – Επόμενα Βήματα

Συνοψίζοντας, στην παρούσα διπλωματική εργασία στόχος ήταν η ανάπτυξη κάποιων προβλημάτων που σχετίζονται με θέματα κύκλου παραγωγής ενέργειας Rankine και καύσης υδρογονανθράκων σε εσωτερικές μηχανές. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε η προσομοίωση των διεργασιών αυτών και η ανάπτυξη υπολογιστικών δυνατοτήτων για την μελέτη της συμπεριφοράς των συστημάτων κάτω από διαφορετικές συνθήκες.

Το πρώτο μέρος της διπλωματικής, αφορούσε τους κύκλους παραγωγής ενέργειας Rankine, οι οποίοι αποτελούνται από τον απλό ιδανικό κύκλο, τον ιδανικό κύκλο Rankine με αναθέρμανση και με απομάστευση ατμού. Τα προβλήματα τα οποία λύθηκαν έχουν να κάνουν με χαρακτηριστικά προβλήματα τα οποία υπολογίζουν κάποιους βαθμούς απόδοσης, έχοντας ως δεδομένα εισόδου κάποια συγκεκριμένα δεδομένα που αφορούν την πίεση και θερμοκρασία του ατμού/νερού σε μερικά από τα βασικά στοιχεία του κύκλου. Επίσης, μέσω των ασκήσεων βλέπουμε την χρησιμότητα των πινάκων που βρίσκονται στο παράρτημα για την μελέτη της συμπεριφοράς του κάθε κύκλου και την ενεργειακή του ανάλυση στην κάθε κατάσταση. Παρατηρήθηκε ότι στους βελτιωμένους κύκλους είχαμε υψηλότερο βαθμό απόδοσης, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση μεγάλων ποσοτήτων καυσίμου.

Αντίστοιχα, στο δεύτερο μέρος της εργασίας, στόχος ήταν η μελέτη της καύσης καυσίμων – υδρογονανθράκων σε εσωτερικές μηχανές. Η επίλυση των ασκήσεων που πραγματοποιήθηκε, χρησιμεύει στον υπολογισμό στοιχειομετρικών συντελεστών της αντίδρασης καύσης, βάση του ενεργειακού ισοζυγίου. Στην εκφώνηση, δόθηκε η σύνθεση ενός μίγματος καυσίμου το οποίο καίγεται με αέρα και με την βοήθεια κατάλληλων πινάκων του παραρτήματος, πήραμε τα απαραίτητα δεδομένα που χρειάζονται για την υλοποίηση της άσκησης. Έγιναν επίσης, υπολογισμοί της θερμογόνου δύναμης και του λόγου αέρα – καυσίμου, ο οποίος δείχνει πόση μάζα αέρα απαιτείται για την καύση κάθε 1 kg καυσίμου. Σε ένα από τα παραδείγματα, δόθηκαν ως δεδομένα εισόδου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου και η ενεργειακή απόδοση, έτσι ώστε να υπολογιστεί η απαιτούμενη ροή καυσίμου του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής.

Με την επίλυση και κατανόηση των ασκήσεων, αναπτύχθηκε αντίστοιχο υπολογιστικό εργαλείο με τη χρήση Excel, έχοντας ως σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων στα προβλήματα που παρουσιάστηκαν. Στην συνέχεια, εισήγαμε τα δεδομένα για την κάθε άσκηση ώστε να μελετηθούν κάποιες εφαρμογές των συστημάτων, με την χρήση του υπολογιστικού αυτού εργαλείου που πραγματοποιήθηκε για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Γενικότερα, ο κύκλος Rankine είναι ο ιδανικός κύκλος για εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος με ατμό, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την παραγωγή του μεγαλύτερου μέρους της ηλεκτρικής ισχύος παγκοσμίως. Η μελέτη του κρίνεται σημαντική, εφόσον στόχος είναι η βελτίωση της απόδοσης του κύκλου, καθώς η παραμικρή αύξηση της θερμικής απόδοσης μπορεί να φέρει μεγάλη εξοικονόμηση των απαιτήσεων σε καύσιμα. Ομοίως, η καύση ορυκτών καυσίμων συναντάται σχεδόν σε όλους τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας, ο οποίος χρησιμοποιούν την καύση σαν την βασική αρχή για την διαδικασία εναλλαγής ενεργείας. Η μελέτη της, είναι απαραίτητη για την μείωση κόστους καυσίμου και μείωση εκπομπών για την προστασία του περιβάλλοντος. Για τους λόγους αυτούς, η διερεύνηση της συμπεριφοράς αυτών των συστημάτων είναι απαραίτητη, έτσι ώστε να κατανοηθεί σε βάθος το θεωρητικό τους υπόβαθρο και το υπολογιστικό εργαλείο που δημιουργήθηκε, να μπορεί να δράσει ως μέσο για την εξοικείωση με αυτά τα συστήματα.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

- [1] Bahrami, M., n.d. *Chemical Reactions*. Burnaby: Simon Fraser University. [online] Available at: <<https://www.sfu.ca/~mbahrami/ENSC%20461/Notes/Chemical%20Reactions.pdf>> [Accessed 21 July 2023].
- [2] Cengel, Y.A., & Boles, M.A., 2014. *PROPERTY TABLES AND CHARTS (SI UNITS)*. [online] Available at: <<https://engineering.wayne.edu/mechanical/pdfs/thermodynamic-tables-updated.pdf>> [Accessed 21 July 2023].
- [3] Cengel, Y.A., & Boles, M.A., 2014. *Thermodynamics, An Engineering Approach, Eighth Edition in SI Units*.
- [4] Chemeurope, 2023. *Air fuel ratio*. [online] Available at: <https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Air-fuel_ratio.html> [Accessed 21 July 2023].
- [5] Electrical4u, 2021. *Rankine Cycle: What is it? (Ideal vs. Actual + T-s Diagram)*. [online] Available at: <<https://www.electrical4u.com/ideal-verses-actual-in-rankine-cycle/>> [Accessed 21 July 2023].
- [6] Nguyen, T.V., Granacher, J., Middelhaue, L., & Platteau, C., 2019. *ME-409 Energy Conversion and Renewable Energy*.
- [7] Sathyabama Institute of Science and Technology, 2021. *COMBUSTION OF FUELS*. [online] Available at: <https://sist.sathyabama.ac.in/sist_coursematerial/uploads/SME1606.pdf> [Accessed 21 July 2023].
- [8] toppr, n.d. *Combustion and Types of Combustion*. [online] Available at: <<https://www.toppr.com/guides/chemistry/combustion-and-flame/introduction-and-types-of-combustion/>> [Accessed 21 July 2023].
- [9] Vervisch, L., 2015. [online] Available at: <https://www.researchgate.net/figure/Adiabatic-flame-temperature-vs-equivalence-ratio-for-different-sets-of-chemical-species_fig1_282803161> [Accessed 21 July 2023].
- [10] WIKIMEDIA COMMONS, 2007. File: Ideal and real organic rankine cycle.jpg. [online] Available at: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ideal_and_real_organic_rankine_cycle.jpg> [Accessed 21 July 2023].
- [11] Wikipedia, 2023. *Adiabatic flame temperature*. [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Adiabatic_flame_temperature> [Accessed 21 July 2023].
- [12] Wikipedia, 2023. *Air–fuel ratio*. [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Air%E2%80%93fuel_ratio> [Accessed 21 July 2023].
- [13] Wikipedia, 2023. *Carnot cycle*. [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Carnot_cycle> [Accessed 21 July 2023].
- [14] Wikipedia, 2023. *Rankine cycle*. [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Rankine_cycle#:~:text=The%20Rankine%20cycle%20is%20an,heat%20source%20and%20heat%20sink> [Accessed 21 July 2023].
- [15] Wikipedia, 2007. File: Rankine cycle Ts.png. [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Rankine_cycle_Ts.png> [Accessed 21 July 2023].
- [16] Wikipedia, 2007. File: Rankine cycle with superheat.jpg. [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Rankine_cycle_with_superheat.jpg> [Accessed 21 July 2023].

- [17] World Of Chemicals, n.d. *Combustion reaction: Types of combustion and combustion fuels*. [online] Available at: <<https://www.worldofchemicals.com/623/chemistry-articles/combustion-reaction-types-of-combustion-and-combustion-fuels.html>> [Accessed 21 July 2023].
- [18] X-engineer, 2023. *Air fuel ratio*. [online] Available at: <<https://x-engineer.org/air-fuel-ratio/>> [Accessed 21 July 2023].

Ελληνική

- [19] Lambda Geeks, 2023. *Κύκλος Carnot: 21 σημαντικά γεγονότα που πρέπει να γνωρίζετε*. [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο από: <<https://el.lamdageeks.com/carnot-cycle-processes-carnot-engine-efficiency/>> [Πρόσβαση 21 Ιουλίου 2023].
- [20] Αλαμπρίτης, Δ., 2016. *ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΩΝ ΜΕΣΩΝ ΓΙΑ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ*. Διατριβή [Διαδίκτυο] Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Διαθέσιμο στο: <<https://core.ac.uk/download/pdf/45649351.pdf>> [Πρόσβαση 21 Ιουλίου 2023].
- [21] Αναστάσιος, Χ., 2012. *ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ και ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE*. Διατριβή [Διαδίκτυο] Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Διαθέσιμο στο: <<http://ikee.lib.auth.gr/record/129803/files/XARITOS.pdf>> [Πρόσβαση 21 Ιουλίου 2023].
- [22] Καλικάτσαρη, Μ., 2013. *ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΧΑΜΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE*. Διατριβή [Διαδίκτυο] Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Διαθέσιμο στο: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/38269/kalikatzarakism_organic.pdf?sequence=3> [Πρόσβαση 21 Ιουλίου 2023].
- [23] Νικολός, Ι., 2021. *ΤΕΧΝΙΚΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [24] Ντάβου, Ε., Κοσμαδάκης, Γ., Μανωλάκος, Δ., & Παπαδάκης, Γ., 2019. *Ανάπτυξη μιας μηχανής οργανικού κύκλου Rankine σε υπερκρίσιμη λειτουργία για ανάκτηση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας*. [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο από: <<https://opsiktikos.gr/blog/anaptiximias-mixanis-organikou-kiklou-ankine-se-iperkrisimi-leitourgia-gia-anaktisi-thermotitas-xamilis-thermokrasias/>> [Πρόσβαση 21 Ιουλίου 2023].
- [25] Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, 2016. *Θερμοχημεία και Κινητική Θεωρία των Χημικών Αντιδράσεων*. [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο από: <https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH261/11_%CE%9ACE%95%CE%A6.pdf> [Πρόσβαση 21 Ιουλίου 2023].
- [26] Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2015. *Ενότητα 3: Θερμοχημεία μιγμάτων αέρα καυσίμου-ιδιότητες εργαζόμενων μέσων*. [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο από: <<http://archive.eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHXB117/%CE%9ACE%B5%CF%86%CE%AC%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF3.pdf>> [Πρόσβαση 21 Ιουλίου 2023].
- [27] Πανεπιστήμιο Πατρών, 2011. *Καύση Κεφάλαιο 1*. [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο από: <<https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/MECH1160/%CE%9ACE%91%CE%A5%CE%A3%CE%97%20%CE%9ACE%95%CE%A6%CE%91%CE%9B%CE%91%CE%99%CE%9F-01.pdf>> [Πρόσβαση 21 Ιουλίου 2023].
- [28] Πανεπιστήμιο Πατρών, 2011. *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΚΥΚΛΟΙ ΚΑΥΣΙΜΟΥ-ΑΕΡΑ*. [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο από: <<https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/MECH1159/%CE%9C%CE%95%CE%9>

[A%20%CE%9A%CE%95%CE%A6%CE%91%CE%9B%CE%91%CE%99%CE%9F-04.pdf>](#)

[Πρόσβαση 21 Ιουλίου 2023].

- [29] Παπαδόπουλου, Ι., 2011. *Ανάπτυξη Διαδικτυακής Εφαρμογής Προσομοίωσης Ατμοηλεκτρικού Σταθμού (ΑΗΣ)*. Διατριβή [Διαδίκτυο] Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Διαθέσιμο στο: http://ikee.lib.auth.gr/record/290844/files/diploma_thesis.pdf [Πρόσβαση 21 Ιουλίου 2023].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας Α-1: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού (πίνακας πίεσης) [2].

Saturated water—Pressure table

Press., <i>P</i> kPa	Sat. temp., <i>T</i> _{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, <i>v</i> _f	Sat. vapor, <i>v</i> _g	Sat. liquid, <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>u</i> _g	Sat. liquid, <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>h</i> _g	Sat. liquid, <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>s</i> _g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

Πίνακας Α-2: Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού [2].

Superheated water												
<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K
<i>P</i> = 0.01 MPa (45.81°C)*					<i>P</i> = 0.05 MPa (81.32°C)				<i>P</i> = 0.10 MPa (99.61°C)			
Sat.†	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	14.5209	4687.3	5413.3	10.8429	7.2605	4687.2	5413.3	10.5229
<i>P</i> = 0.20 MPa (120.21°C)					<i>P</i> = 0.30 MPa (133.52°C)				<i>P</i> = 0.40 MPa (143.61°C)			
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0221	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828
<i>P</i> = 0.50 MPa (151.83°C)					<i>P</i> = 0.60 MPa (158.83°C)				<i>P</i> = 0.80 MPa (170.41°C)			
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1	6.8207	0.31560	2566.8	2756.2	6.7593	0.24035	2576.0	2768.3	6.6616
200	0.42503	2643.3	2855.8	7.0610	0.35212	2639.4	2850.6	6.9683	0.26088	2631.1	2839.8	6.8177
250	0.47443	2723.8	2961.0	7.2725	0.39390	2721.2	2957.6	7.1833	0.29321	2715.9	2950.4	7.0402
300	0.52261	2803.3	3064.6	7.4614	0.43442	2801.4	3062.0	7.3740	0.32416	2797.5	3056.9	7.2345
350	0.57015	2883.0	3168.1	7.6346	0.47428	2881.6	3166.1	7.5481	0.35442	2878.6	3162.2	7.4107
400	0.61731	2963.7	3272.4	7.7956	0.51374	2962.5	3270.8	7.7097	0.38429	2960.2	3267.7	7.5735
500	0.71095	3129.0	3484.5	8.0893	0.59200	3128.2	3483.4	8.0041	0.44332	3126.6	3481.3	7.8692
600	0.80409	3300.4	3702.5	8.3544	0.66976	3299.8	3701.7	8.2695	0.50186	3298.7	3700.1	8.1354
700	0.89696	3478.6	3927.0	8.5978	0.74725	3478.1	3926.4	8.5132	0.56011	3477.2	3925.3	8.3794
800	0.98966	3663.6	4158.4	8.8240	0.82457	3663.2	4157.9	8.7395	0.61820	3662.5	4157.0	8.6061
900	1.08227	3855.4	4396.6	9.0362	0.90179	3855.1	4396.2	8.9518	0.67619	3854.5	4395.5	8.8185
1000	1.17480	4054.0	4641.4	9.2364	0.97893	4053.8	4641.1	9.1521	0.73411	4053.3	4640.5	9.0189
1100	1.26728	4259.0	4892.6	9.4263	1.05603	4258.8	4892.4	9.3420	0.79197	4258.3	4891.9	9.2090
1200	1.35972	4470.0	5149.8	9.6071	1.13309	4469.8	5149.6	9.5229	0.84980	4469.4	5149.3	9.3898
1300	1.45214	4686.6	5412.6	9.7797	1.21012	4686.4	5412.5	9.6955	0.90761	4686.1	5412.2	9.5625

Πίνακας Α-2: Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού (Συνέχεια) [2].

Superheated water (Concluded)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K
<i>P</i> = 1.00 MPa (179.88°C)					<i>P</i> = 1.20 MPa (187.96°C)				<i>P</i> = 1.40 MPa (195.04°C)			
Sat.	0.19437	2582.8	2777.1	6.5850	0.16326	2587.8	2783.8	6.5217	0.14078	2591.8	2788.9	6.4675
200	0.20602	2622.3	2828.3	6.6956	0.16934	2612.9	2816.1	6.5909	0.14303	2602.7	2803.0	6.4975
250	0.23275	2710.4	2943.1	6.9265	0.19241	2704.7	2935.6	6.8313	0.16356	2698.9	2927.9	6.7488
300	0.25799	2793.7	3051.6	7.1246	0.21386	2789.7	3046.3	7.0335	0.18233	2785.7	3040.9	6.9553
350	0.28250	2875.7	3158.2	7.3029	0.23455	2872.7	3154.2	7.2139	0.20029	2869.7	3150.1	7.1379
400	0.30661	2957.9	3264.5	7.4670	0.25482	2955.5	3261.3	7.3793	0.21782	2953.1	3258.1	7.3046
500	0.35411	3125.0	3479.1	7.7642	0.29464	3123.4	3477.0	7.6779	0.25216	3121.8	3474.8	7.6047
600	0.40111	3297.5	3698.6	8.0311	0.33395	3296.3	3697.0	7.9456	0.28597	3295.1	3695.5	7.8730
700	0.44783	3476.3	3924.1	8.2755	0.37297	3475.3	3922.9	8.1904	0.31951	3474.4	3921.7	8.1183
800	0.49438	3661.7	4156.1	8.5024	0.41184	3661.0	4155.2	8.4176	0.35288	3660.3	4154.3	8.3458
900	0.54083	3853.9	4394.8	8.7150	0.45059	3853.3	4394.0	8.6303	0.38614	3852.7	4393.3	8.5587
1000	0.58721	4052.7	4640.0	8.9155	0.48928	4052.2	4639.4	8.8310	0.41933	4051.7	4638.8	8.7595
1100	0.63354	4257.9	4891.4	9.1057	0.52792	4257.5	4891.0	9.0212	0.45247	4257.0	4890.5	8.9497
1200	0.67983	4469.0	5148.9	9.2866	0.56652	4468.7	5148.5	9.2022	0.48558	4468.3	5148.1	9.1308
1300	0.72610	4685.8	5411.9	9.4593	0.60509	4685.5	5411.6	9.3750	0.51866	4685.1	5411.3	9.3036
<i>P</i> = 1.60 MPa (201.37°C)					<i>P</i> = 1.80 MPa (207.11°C)				<i>P</i> = 2.00 MPa (212.38°C)			
Sat.	0.12374	2594.8	2792.8	6.4200	0.11037	2597.3	2795.9	6.3775	0.09959	2599.1	2798.3	6.3390
225	0.13293	2645.1	2857.8	6.5537	0.11678	2637.0	2847.2	6.4825	0.10381	2628.5	2836.1	6.4160
250	0.14190	2692.9	2919.9	6.6753	0.12502	2686.7	2911.7	6.6088	0.11150	2680.3	2903.3	6.5475
300	0.15866	2781.6	3035.4	6.8864	0.14025	2777.4	3029.9	6.8246	0.12551	2773.2	3024.2	6.7684
350	0.17459	2866.6	3146.0	7.0713	0.15460	2863.6	3141.9	7.0120	0.13860	2860.5	3137.7	6.9583
400	0.19007	2950.8	3254.9	7.2394	0.16849	2948.3	3251.6	7.1814	0.15122	2945.9	3248.4	7.1292
500	0.22029	3120.1	3472.6	7.5410	0.19551	3118.5	3470.4	7.4845	0.17568	3116.9	3468.3	7.4337
600	0.24999	3293.9	3693.9	7.8101	0.22200	3292.7	3692.3	7.7543	0.19962	3291.5	3690.7	7.7043
700	0.27941	3473.5	3920.5	8.0558	0.24822	3472.6	3919.4	8.0005	0.22326	3471.7	3918.2	7.9509
800	0.30865	3659.5	4153.4	8.2834	0.27426	3658.8	4152.4	8.2284	0.24674	3658.0	4151.5	8.1791
900	0.33780	3852.1	4392.6	8.4965	0.30020	3851.5	4391.9	8.4417	0.27012	3850.9	4391.1	8.3925
1000	0.36687	4051.2	4638.2	8.6974	0.32606	4050.7	4637.6	8.6427	0.29342	4050.2	4637.1	8.5936
1100	0.39589	4256.6	4890.0	8.8878	0.35188	4256.2	4889.6	8.8331	0.31667	4255.7	4889.1	8.7842
1200	0.42488	4467.9	5147.7	9.0689	0.37766	4467.6	5147.3	9.0143	0.33989	4467.2	5147.0	8.9654
1300	0.45383	4684.8	5410.9	9.2418	0.40341	4684.5	5410.6	9.1872	0.36308	4684.2	5410.3	9.1384
<i>P</i> = 2.50 MPa (223.95°C)					<i>P</i> = 3.00 MPa (233.85°C)				<i>P</i> = 3.50 MPa (242.56°C)			
Sat.	0.07995	2602.1	2801.9	6.2558	0.06667	2603.2	2803.2	6.1856	0.05706	2603.0	2802.7	6.1244
225	0.08026	2604.8	2805.5	6.2629								
250	0.08705	2663.3	2880.9	6.4107	0.07063	2644.7	2856.5	6.2893	0.05876	2624.0	2829.7	6.1764
300	0.09894	2762.2	3009.6	6.6459	0.08118	2750.8	2994.3	6.5412	0.06845	2738.8	2978.4	6.4484
350	0.10979	2852.5	3127.0	6.8424	0.09056	2844.4	3116.1	6.7450	0.07680	2836.0	3104.9	6.6601
400	0.12012	2939.8	3240.1	7.0170	0.09938	2933.6	3231.7	6.9235	0.08456	2927.2	3223.2	6.8428
450	0.13015	3026.2	3351.6	7.1768	0.10789	3021.2	3344.9	7.0856	0.09198	3016.1	3338.1	7.0074
500	0.13999	3112.8	3462.8	7.3254	0.11620	3108.6	3457.2	7.2359	0.09919	3104.5	3451.7	7.1593
600	0.15931	3288.5	3686.8	7.5979	0.13245	3285.5	3682.8	7.5103	0.11325	3282.5	3678.9	7.4357
700	0.17835	3469.3	3915.2	7.8455	0.14841	3467.0	3912.2	7.7590	0.12702	3464.7	3909.3	7.6855
800	0.19722	3656.2	4149.2	8.0744	0.16420	3654.3	4146.9	7.9885	0.14061	3652.5	4144.6	7.9156
900	0.21597	3849.4	4389.3	8.2882	0.17988	3847.9	4387.5	8.2028	0.15410	3846.4	4385.7	8.1304
1000	0.23466	4049.0	4635.6	8.4897	0.19549	4047.7	4634.2	8.4045	0.16751	4046.4	4632.7	8.3324
1100	0.25330	4254.7	4887.9	8.6804	0.21105	4253.6	4886.7	8.5955	0.18087	4252.5	4885.6	8.5236
1200	0.27190	4466.3	5146.0	8.8618	0.22658	4465.3	5145.1	8.7771	0.19420	4464.4	5144.1	8.7053
1300	0.29048	4683.4	5409.5	9.0349	0.24207	4682.6	5408.8	8.9502	0.20750	4681.8	5408.0	8.8786

Πίνακας Α-2: Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού (Συνέχεια) [2].

Superheated water (*Continued*)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K
<i>P</i> = 4.0 MPa (250.35°C)					<i>P</i> = 4.5 MPa (257.44°C)				<i>P</i> = 5.0 MPa (263.94°C)			
Sat.	0.04978	2601.7	2800.8	6.0696	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198	0.03945	2597.0	2794.2	5.9737
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429	0.04144	2632.3	2839.5	6.0571
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854	0.04535	2699.0	2925.7	6.2111
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153	0.05197	2809.5	3069.3	6.4516
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071	0.05784	2907.5	3196.7	6.6483
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770	0.06332	3000.6	3317.2	6.8210
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323	0.06858	3091.8	3434.7	6.9781
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127	0.07870	3273.3	3666.9	7.2605
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647	0.08852	3457.7	3900.3	7.5136
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523	0.10916	3648.8	4140.0	7.7962	0.09816	3646.9	4137.7	7.7458
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118	0.10769	3841.8	4380.2	7.9619
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144	0.11715	4042.6	4628.3	8.1648
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060	0.12655	4249.3	4882.1	8.3566
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880	0.13592	4461.6	5141.3	8.5388
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164	0.16140	4680.1	5406.5	8.7616	0.14527	4679.3	5405.7	8.7124
<i>P</i> = 6.0 MPa (275.59°C)					<i>P</i> = 7.0 MPa (285.83°C)				<i>P</i> = 8.0 MPa (295.01°C)			
Sat.	0.03245	2589.9	2784.6	5.8902	0.027378	2581.0	2772.6	5.8148	0.023525	2570.5	2758.7	5.7450
300	0.03619	2668.4	2885.6	6.0703	0.029492	2633.5	2839.9	5.9337	0.024279	2592.3	2786.5	5.7937
350	0.04225	2790.4	3043.9	6.3357	0.035262	2770.1	3016.9	6.2305	0.029975	2748.3	2988.1	6.1321
400	0.04742	2893.7	3178.3	6.5432	0.039958	2879.5	3159.2	6.4502	0.034344	2864.6	3139.4	6.3658
450	0.05217	2989.9	3302.9	6.7219	0.044187	2979.0	3288.3	6.6353	0.038194	2967.8	3273.3	6.5579
500	0.05667	3083.1	3423.1	6.8826	0.048157	3074.3	3411.4	6.8000	0.041767	3065.4	3399.5	6.7266
550	0.06102	3175.2	3541.3	7.0308	0.051966	3167.9	3531.6	6.9507	0.045172	3160.5	3521.8	6.8800
600	0.06527	3267.2	3658.8	7.1693	0.055665	3261.0	3650.6	7.0910	0.048463	3254.7	3642.4	7.0221
700	0.07355	3453.0	3894.3	7.4247	0.062850	3448.3	3888.3	7.3487	0.054829	3443.6	3882.2	7.2882
800	0.08165	3643.2	4133.1	7.6582	0.069856	3639.5	4128.5	7.5836	0.061011	3635.7	4123.8	7.5185
900	0.08964	3838.8	4376.6	7.8751	0.076750	3835.7	4373.0	7.8014	0.067082	3832.7	4369.3	7.7372
1000	0.09756	4040.1	4625.4	8.0786	0.083571	4037.5	4622.5	8.0055	0.073079	4035.0	4619.6	7.9419
1100	0.10543	4247.1	4879.7	8.2709	0.090341	4245.0	4877.4	8.1982	0.079025	4242.8	4875.0	8.1350
1200	0.11326	4459.8	5139.4	8.4534	0.097075	4457.9	5137.4	8.3810	0.084934	4456.1	5135.5	8.3181
1300	0.12107	4677.7	5404.1	8.6273	0.103781	4676.1	5402.6	8.5551	0.090817	4674.5	5401.0	8.4925
<i>P</i> = 9.0 MPa (303.35°C)					<i>P</i> = 10.0 MPa (311.00°C)				<i>P</i> = 12.5 MPa (327.81°C)			
Sat.	0.020489	2558.5	2742.9	5.6791	0.018028	2545.2	2725.5	5.6159	0.013496	2505.6	2674.3	5.4638
325	0.023284	2647.6	2857.1	5.8738	0.019877	2611.6	2810.3	5.7596	0.016138	2624.9	2826.6	5.7130
350	0.025816	2725.0	2957.3	6.0380	0.022440	2699.6	2924.0	5.9460	0.020030	2789.6	3040.0	6.0433
400	0.029960	2849.2	3118.8	6.2876	0.026436	2833.1	3097.5	6.2141	0.023019	2913.7	3201.5	6.2749
450	0.033524	2956.3	3258.0	6.4872	0.029782	2944.5	3242.4	6.4219	0.025630	3023.2	3343.6	6.4651
500	0.036793	3056.3	3387.4	6.6603	0.032811	3047.0	3375.1	6.5995	0.028033	3126.1	3476.5	6.6317
550	0.039885	3153.0	3512.0	6.8164	0.035655	3145.4	3502.0	6.7585	0.030306	3225.8	3604.6	6.7828
600	0.042861	3248.4	3634.1	6.9605	0.038378	3242.0	3625.8	6.9045	0.032491	3324.1	3730.2	6.9227
650	0.045755	3343.4	3755.2	7.0954	0.041018	3338.0	3748.1	7.0408	0.034612	3422.0	3854.6	7.0540
700	0.048589	3438.8	3876.1	7.2229	0.043597	3434.0	3870.0	7.1693	0.038724	3618.8	4102.8	7.2967
800	0.054132	3632.0	4119.2	7.4606	0.048629	3628.2	4114.5	7.4085	0.042720	3818.9	4352.9	7.5195
900	0.059562	3829.6	4365.7	7.6802	0.053547	3826.5	4362.0	7.6290	0.046641	4023.5	4606.5	7.7269
1000	0.064919	4032.4	4616.7	7.8855	0.058391	4029.9	4613.8	7.8349	0.050510	4233.1	4864.5	7.9220
1100	0.070224	4240.7	4872.7	8.0791	0.063183	4238.5	4870.3	8.0289	0.054342	4447.7	5127.0	8.1065
1200	0.075492	4454.2	5133.6	8.2625	0.067938	4452.4	5131.7	8.2126	0.058147	4667.3	5394.1	8.2819
1300	0.080733	4672.9	5399.5	8.4371	0.072667	4671.3	5398.0	8.3874				

Πίνακας Α-3: Μοριακή μάζα, σταθερά αερίου και ιδιότητες κρίσιμου σημείου [2].

Molar mass, gas constant, and critical-point properties

Substance	Formula	Molar mass, <i>M</i> kg/kmol	Gas constant, <i>R</i> kJ/kg·K*	Critical-point properties		
				Temperature, K	Pressure, MPa	Volume, m ³ /kmol
Air	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Ammonia	NH ₃	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argon	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benzene	C ₆ H ₆	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromine	Br ₂	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
<i>n</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Carbon dioxide	CO ₂	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Carbon monoxide	CO	28.011	0.2968	133	3.50	0.0930
Carbon tetrachloride	CCl ₄	153.82	0.05405	556.4	4.56	0.2759
Chlorine	Cl ₂	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Chloroform	CHCl ₃	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2403
Dichlorodifluoromethane (R-12)	CCl ₂ F ₂	120.91	0.06876	384.7	4.01	0.2179
Dichlorofluoromethane (R-21)	CHCl ₂ F	102.92	0.08078	451.7	5.17	0.1973
Ethane	C ₂ H ₆	30.070	0.2765	305.5	4.48	0.1480
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH	46.07	0.1805	516	6.38	0.1673
Ethylene	C ₂ H ₄	28.054	0.2964	282.4	5.12	0.1242
Helium	He	4.003	2.0769	5.3	0.23	0.0578
<i>n</i> -Hexane	C ₆ H ₁₄	86.179	0.09647	507.9	3.03	0.3677
Hydrogen (normal)	H ₂	2.016	4.1240	33.3	1.30	0.0649
Krypton	Kr	83.80	0.09921	209.4	5.50	0.0924
Methane	CH ₄	16.043	0.5182	191.1	4.64	0.0993
Methyl alcohol	CH ₃ OH	32.042	0.2595	513.2	7.95	0.1180
Methyl chloride	CH ₃ Cl	50.488	0.1647	416.3	6.68	0.1430
Neon	Ne	20.183	0.4119	44.5	2.73	0.0417
Nitrogen	N ₂	28.013	0.2968	126.2	3.39	0.0899
Nitrous oxide	N ₂ O	44.013	0.1889	309.7	7.27	0.0961
Oxygen	O ₂	31.999	0.2598	154.8	5.08	0.0780
Propane	C ₃ H ₈	44.097	0.1885	370	4.26	0.1998
Propylene	C ₃ H ₆	42.081	0.1976	365	4.62	0.1810
Sulfur dioxide	SO ₂	64.063	0.1298	430.7	7.88	0.1217
Tetrafluoroethane (R-134a)	CF ₃ CH ₂ F	102.03	0.08149	374.2	4.059	0.1993
Trichlorofluoromethane (R-11)	CCl ₃ F	137.37	0.06052	471.2	4.38	0.2478
Water	H ₂ O	18.015	0.4615	647.1	22.06	0.0560
Xenon	Xe	131.30	0.06332	289.8	5.88	0.1186

*The unit kJ/kg·K is equivalent to kPa·m³/kg·K. The gas constant is calculated from $R = R_u/M$, where $R_u = 8.31447$ kJ/kmol·K and M is the molar mass.

Source: K. A. Kobe and R. E. Lynn, Jr., *Chemical Review* 52 (1953), pp. 117–236; and ASHRAE, *Handbook of Fundamentals* (Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993), pp. 16.4 and 36.1.

Πίνακας Α-4: Ενθαλπία σχηματισμού, συνάρτηση Gibbs σχηματισμού και απόλυτη εντροπία στους 25°C, 1atm [2].

Enthalpy of formation, Gibbs function of formation, and absolute entropy at 25°C, 1 atm

Substance	Formula	\bar{h}_f° kJ/kmol	\bar{g}_f° kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol·K
Carbon	C(s)	0	0	5.74
Hydrogen	H ₂ (g)	0	0	130.68
Nitrogen	N ₂ (g)	0	0	191.61
Oxygen	O ₂ (g)	0	0	205.04
Carbon monoxide	CO(g)	-110,530	-137,150	197.65
Carbon dioxide	CO ₂ (g)	-393,520	-394,360	213.80
Water vapor	H ₂ O(g)	-241,820	-228,590	188.83
Water	H ₂ O(l)	-285,830	-237,180	69.92
Hydrogen peroxide	H ₂ O ₂ (g)	-136,310	-105,600	232.63
Ammonia	NH ₃ (g)	-46,190	-16,590	192.33
Methane	CH ₄ (g)	-74,850	-50,790	186.16
Acetylene	C ₂ H ₂ (g)	+226,730	+209,170	200.85
Ethylene	C ₂ H ₄ (g)	+52,280	+68,120	219.83
Ethane	C ₂ H ₆ (g)	-84,680	-32,890	229.49
Propylene	C ₃ H ₆ (g)	+20,410	+62,720	266.94
Propane	C ₃ H ₈ (g)	-103,850	-23,490	269.91
n-Butane	C ₄ H ₁₀ (g)	-126,150	-15,710	310.12
n-Octane	C ₈ H ₁₈ (g)	-208,450	+16,530	466.73
n-Octane	C ₈ H ₁₈ (l)	-249,950	+6,610	360.79
n-Dodecane	C ₁₂ H ₂₆ (g)	-291,010	+50,150	622.83
Benzene	C ₆ H ₆ (g)	+82,930	+129,660	269.20
Methyl alcohol	CH ₃ OH(g)	-200,670	-162,000	239.70
Methyl alcohol	CH ₃ OH(l)	-238,660	-166,360	126.80
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH(g)	-235,310	-168,570	282.59
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH(l)	-277,690	-174,890	160.70
Oxygen	O(g)	+249,190	+231,770	161.06
Hydrogen	H(g)	+218,000	+203,290	114.72
Nitrogen	N(g)	+472,650	+455,510	153.30
Hydroxyl	OH(g)	+39,460	+34,280	183.70

Source: From JANAF, *Thermochemical Tables* (Midland, MI: Dow Chemical Co., 1971); *Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties*, NBS Technical Note 270-3, 1968; and *API Research Project 44* (Carnegie Press, 1953).

Πίνακας Α-5: Ιδιότητες ορισμένων κοινών καυσίμων και υδρογονανθράκων [2].

Properties of some common fuels and hydrocarbons

Fuel (phase)	Formula	Molar mass, kg/kmol	Density, ¹ kg/L	Enthalpy of vaporization, ² kJ/kg	Specific heat, ¹ c_p kJ/kg·K	Higher heating value, ³ kJ/kg	Lower heating value, ³ kJ/kg
Carbon (s)	C	12.011	2	—	0.708	32,800	32,800
Hydrogen (g)	H ₂	2.016	—	—	14.4	141,800	120,000
Carbon monoxide (g)	CO	28.013	—	—	1.05	10,100	10,100
Methane (g)	CH ₄	16.043	—	509	2.20	55,530	50,050
Methanol (ℓ)	CH ₄ O	32.042	0.790	1168	2.53	22,660	19,920
Acetylene (g)	C ₂ H ₂	26.038	—	—	1.69	49,970	48,280
Ethane (g)	C ₂ H ₆	30.070	—	172	1.75	51,900	47,520
Ethanol (ℓ)	C ₂ H ₆ O	46.069	0.790	919	2.44	29,670	26,810
Propane (ℓ)	C ₃ H ₈	44.097	0.500	335	2.77	50,330	46,340
Butane (ℓ)	C ₄ H ₁₀	58.123	0.579	362	2.42	49,150	45,370
1-Pentene (ℓ)	C ₅ H ₁₀	70.134	0.641	363	2.20	47,760	44,630
Isopentane (ℓ)	C ₅ H ₁₂	72.150	0.626	—	2.32	48,570	44,910
Benzene (ℓ)	C ₆ H ₆	78.114	0.877	433	1.72	41,800	40,100
Hexene (ℓ)	C ₆ H ₁₂	84.161	0.673	392	1.84	47,500	44,400
Hexane (ℓ)	C ₆ H ₁₄	86.177	0.660	366	2.27	48,310	44,740
Toluene (ℓ)	C ₇ H ₈	92.141	0.867	412	1.71	42,400	40,500
Heptane (ℓ)	C ₇ H ₁₆	100.204	0.684	365	2.24	48,100	44,600
Octane (ℓ)	C ₈ H ₁₈	114.231	0.703	363	2.23	47,890	44,430
Decane (ℓ)	C ₁₀ H ₂₂	142.285	0.730	361	2.21	47,640	44,240
Gasoline (ℓ)	C _n H _{1.87n}	100–110	0.72–0.78	350	2.4	47,300	44,000
Light diesel (ℓ)	C _n H _{1.8n}	170	0.78–0.84	270	2.2	46,100	43,200
Heavy diesel (ℓ)	C _n H _{1.7n}	200	0.82–0.88	230	1.9	45,500	42,800
Natural gas (g)	C _n H _{3.8n} N _{0.1n}	18	—	—	2	50,000	45,000

¹At 1 atm and 20°C.

²At 25°C for liquid fuels, and 1 atm and normal boiling temperature for gaseous fuels.

³At 25°C. Multiply by molar mass to obtain heating values in kJ/kmol.