

מנועי טורבינה

תפעול, ביצועים, יתרונות וחסרונות

מבנה ותפעול מנוע טורבינה

-מנוע טורבינה כולל לפחות 4 רכיבים עיקריים :

-מדחס

-תא שריפה

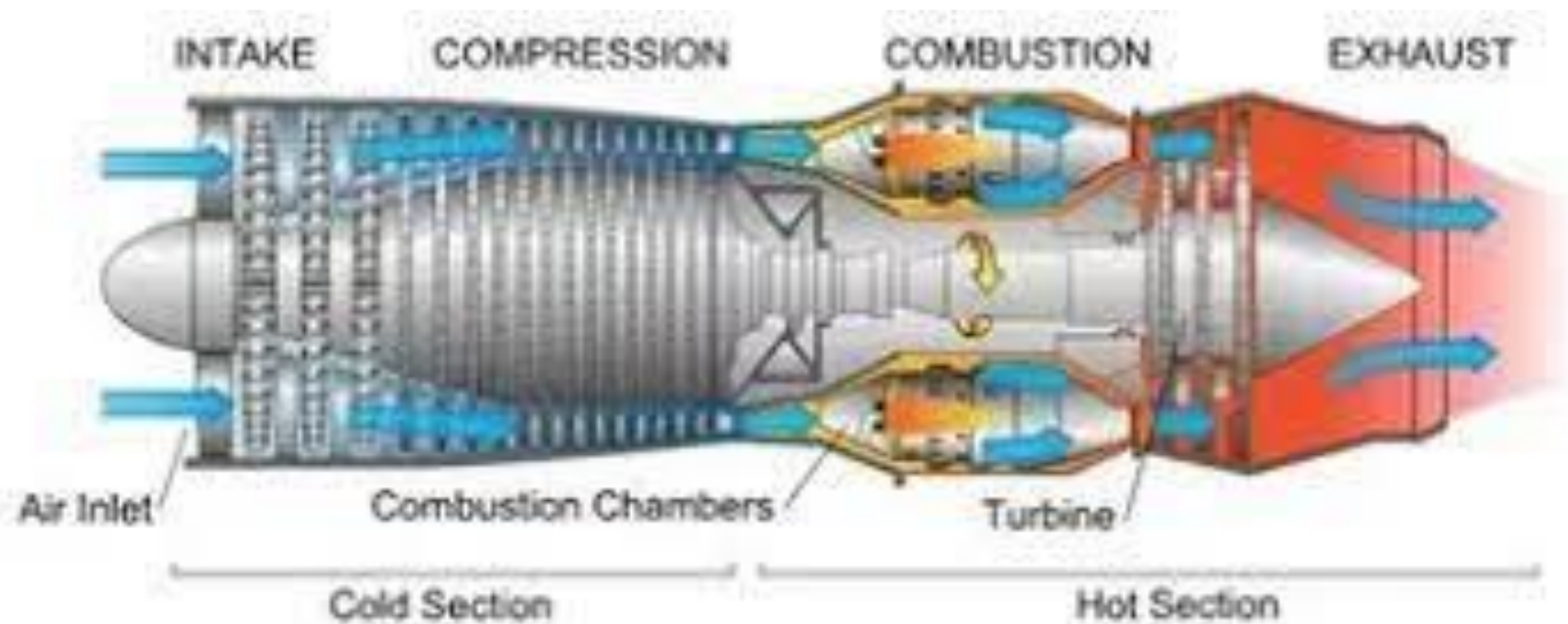
-טורבינה אחת או יותר

-צינור פליטה (כאשר תפקידו של המנוע לספק דחף זהו צנ"פ מאיץ)

המדחס יונק אוויר מהאטמוספירה , דוחס אותו ללחץ גבוה ומזרים אותו לתא השריפה בו מוזרק דלק המתרסס ומתערבב אתו. האוויר נשרף והטמפרטורה שלו עולה אך הלחץ בתא השריפה יורד באחוזים בודדים . גזי השריפה זורמים החוצה לאטמוספירה דרך טורבינה ותוך כדי כך מאבדים לחץ וטמפרטורה ומשקיעים הספק מכני בטורבינה . חלק מהספק זה מועבר מהטורבינה למדחס שמסתובב על אותו גל ויתרת ההספק היא ההספק המופק מהמנוע. בדרך כלל יש שתי טורבינות כשהראשונה מניעה את המדחס והשניה את עומס המנוע.

כאשר המנוע אינו יוצר הספק סיבובי אלא דחף (מנוע סילון) יש רק טורבינה אחת ולגזים נשארת אחריה אנרגיה תרמית/לחץ משמעותית שהופכת בצינור הפליטה המאיץ לאנרגיה קינטית היוצרת דחף.

מבנה מנוע טורבינת גז



רכיבים נוספים

-ממסרות , מיסבים , עוקות ושאר חלקים מכניים

-מערכת דלק (משאבות, מסננים , צנרת , ברזים וכו')

-מערכת שמן (מיכל , משאבות , מסננים , צנרת , מחליף חום וכו')

-מערכת חשמל (אלטרנטור , ווסת מתח , כבלים , רתמות וכו')

-מערכת בקרה (חישנים , משדרים , הגנות , מחשב בקרה)

-מערכת התנעה (מתנע , מצתים , ממירי מתח וכו')

• פרמטרים בתפעול מנועי טורבינה

-הספק : נמדד ב-Kw או דחף (במנוע סילון) : נמדד ב-N

-תצרוכת דלק : נמדדת ב-Kg/h

-תצרוכת דלק סגולית :

נמדדת במנוע הספק ב-Kg/h/Kw

נמדדת במנועי סילון ב-Kg/N/h

-מהירויות סיבוב של כל גלי המנוע (RPM)

בדרך כלל ההספק או הדחף עולה עם עלית סל"ד המדחס. הסל"ד המכסימלי המותר מוגבל בגלל המאמצים הצנטריפוגליים.

-ספיקת האוויר (Kg/s)

בדרך כלל ההספק או הדחף עולה עם עלית ספיקת האוויר.

התפתחות לחץ וטמפרטורת האוויר לאורך המנוע

דוגמה של מנוע הליקופטר של 508 Kw בכוח מלא, עם ספיקת אוויר 3.2 Kg/s ותצרוכת דלק סגולית 0.309 Kg/h/Kw. קוטרו 60 ס"מ ואורכו 112 ס"מ. משקלו 111 ק"ג.

תחנה	לחץ טוטלי (Bar)	טמפרטורה טוטלית (C)
כניסה למדחס	1.013	15
כניסה לתא שריפה/יציאה ממדחס	8.100	315
כניסה לטורבינת מדחס/יציאה מתא שריפה	7.700	840
כניסה לטורבינת הספק	2.140	578
כניסה לצינור פליטה	1.060	438
יציאה מצינור פליטה	1.013	438

מעיון בטבלה רואים שעלית לחץ האוויר תוך זרימתו דרך המדחס מלווה בעליה של הטמפרטורה. המשמעות היא שגורם חיצוני משקיע עבודה במדחס אשר מעלה את אנרגיית האוויר. עבודה זו מבוצעת ע"י טורבינת המדחס ומופקת מירידת טמפרטורת הגזים העוברים דרכה. טמפרטורת הגזים ממשיכה לרדת בזרימתם דרך טורבינת ההספק ומירידה זו מתקבל ההספק המועיל של המנוע.

אפשרויות של הקטנת תצרוכת הדלק הסגולית

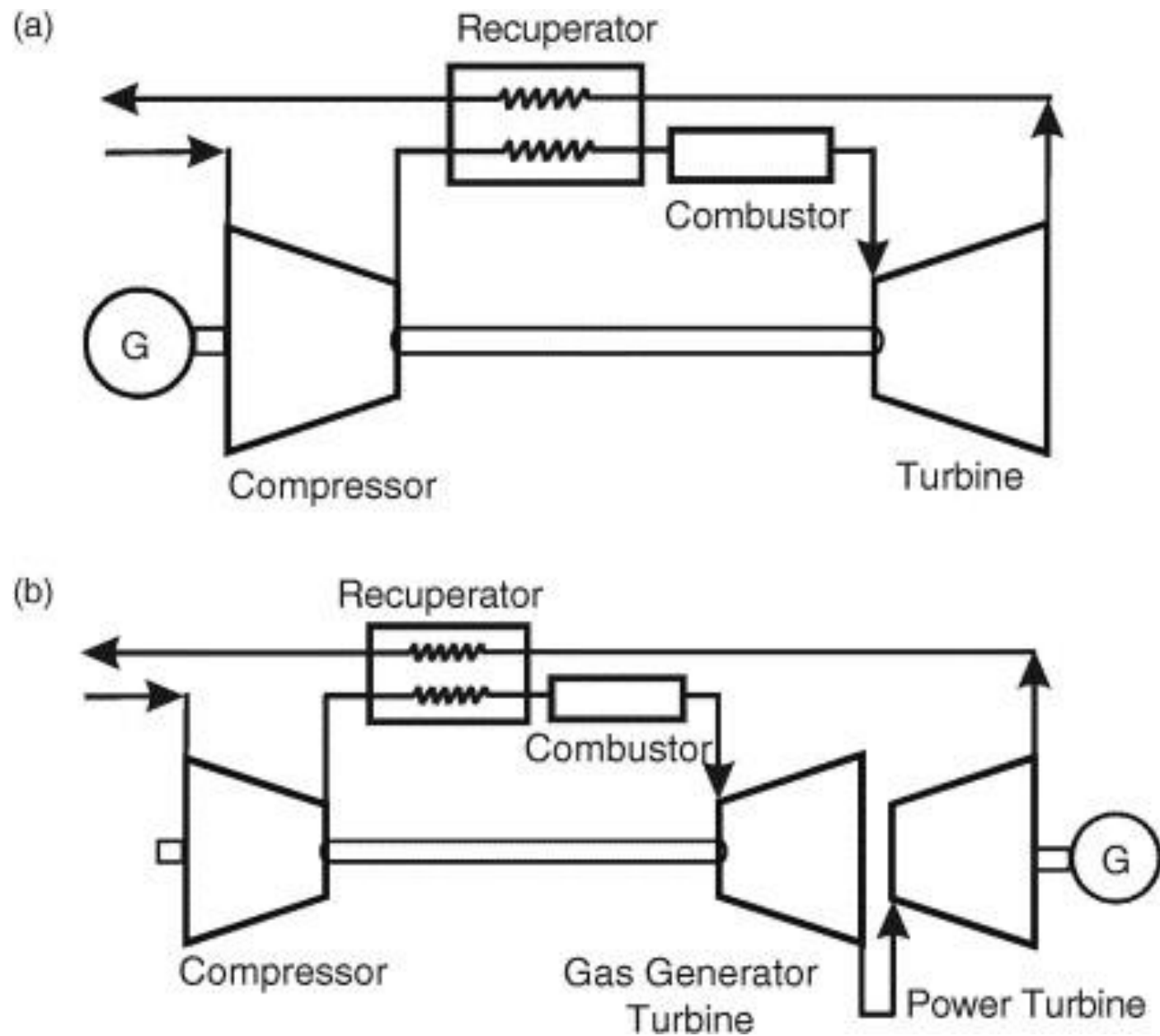
המשמעות של תצרוכת דלק סגולית 0.309 Kg/Kw/h היא נצילות של 27% של אנרגית הדלק הסיבה העיקרית לבזבז 73% מאנרגית הדלק היא העובדה שהמנוע פולט לאטמוספירה 3.2 Kg/s אוויר שחומם ל 438°C מבלי שהופק ממנו הספק מכני.

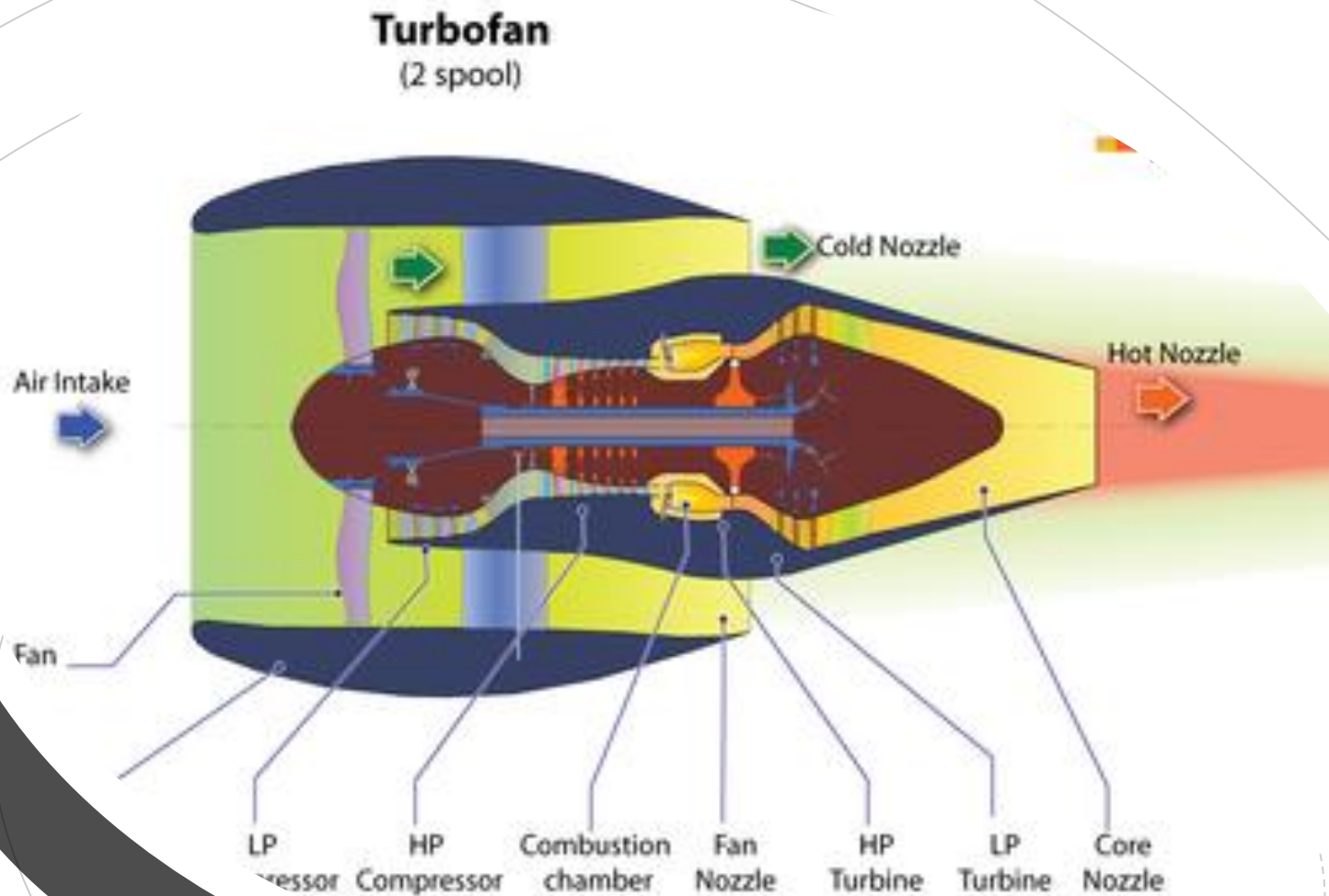
אפשר לשפר הנצילות ע"י תיכון מנוע עם יחס לחצים גדול יותר במכסימום סל"ד אבל אם ספיקת האוויר קטנה (מפני שההספק הנדרש קטן) יש לכך גבול: בדרגות דחיסה האחרונות גובה הלהבים קטן מאוד (בגלל גידול צפיפות האוויר בלחץ גבוה), מעברי האוויר צרים והפסדי החיכוך גדולים.

פתרון מעשי הוא לחמם את האוויר שיוצא מהמדחס ע"ח טמפרטורת גזי הפליטה באמצעות מחליף חום לפני כניסתו לתא השריפה. אמנם הוספת מחליף החום מגדילה מאוד את נפח המנוע אבל יש יישומים בהם פתרון זה משתלם.

במנועי סילון נמצא פתרון אחר להקטנת טמפרטורת הפליטה: התקנת מניפה בקדמת המכלול הסב שמזרימה אוויר קר ישירות לפליטה. הטמפרטורה הממוצעת של הפליטה קטנה יותר ויותר ככל שיחס הספיקה הקרה לספיקת הליבה (יחס העקיפה) גדול יותר. מנוע מסוג זה נקרא טורבו מניפה וכל מטוסי הנוסעים הגדולים משתמשים במנועים כאלה.

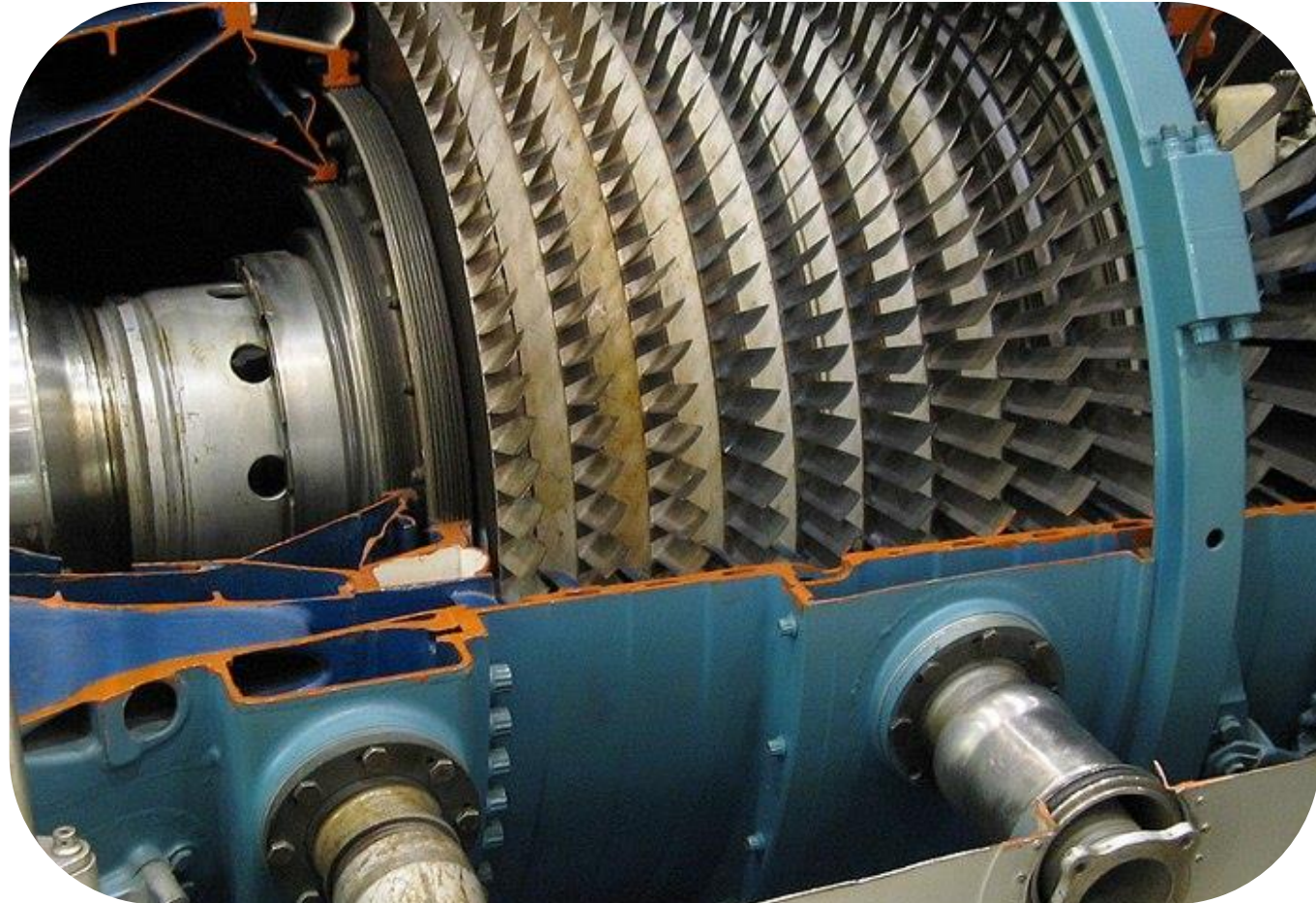
דיאגרמה של טורבינת גז עם מחליף חום





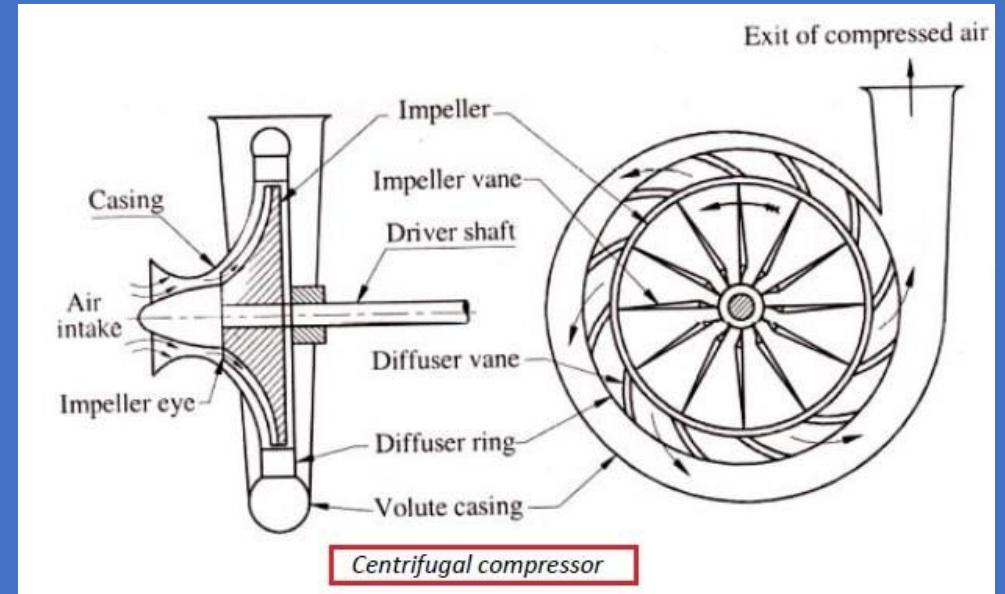
דוגמה
של מנוע
טורבומוניפה דו-
גלי

רוטור מדחס צירי לאחר הסרת הסטטור על להביו



תפעול מדחס צנטריפוגלי

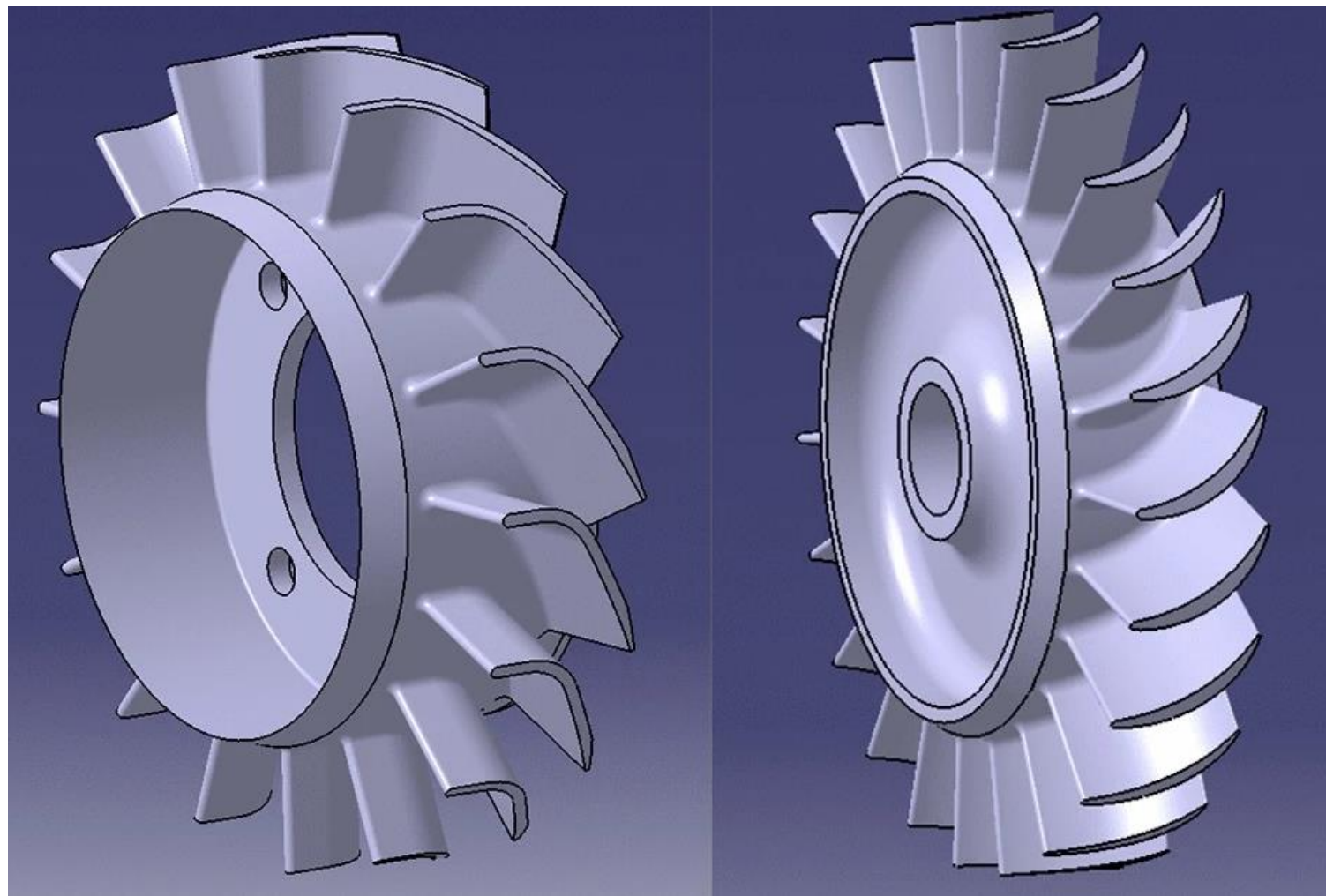
תהליך הדחיסה במדחס צנטריפוגלי דומה לרוטור צירי אבל נוספת בו העלאת לחץ ע"י הזרמת האוויר בכיוון רדיאלי ברוטור. הסטטור מיישר את הזרימה מכיוון רדיאלי והיקפי לכיוון צירי



רוטור צנטריפוגלי מודרני

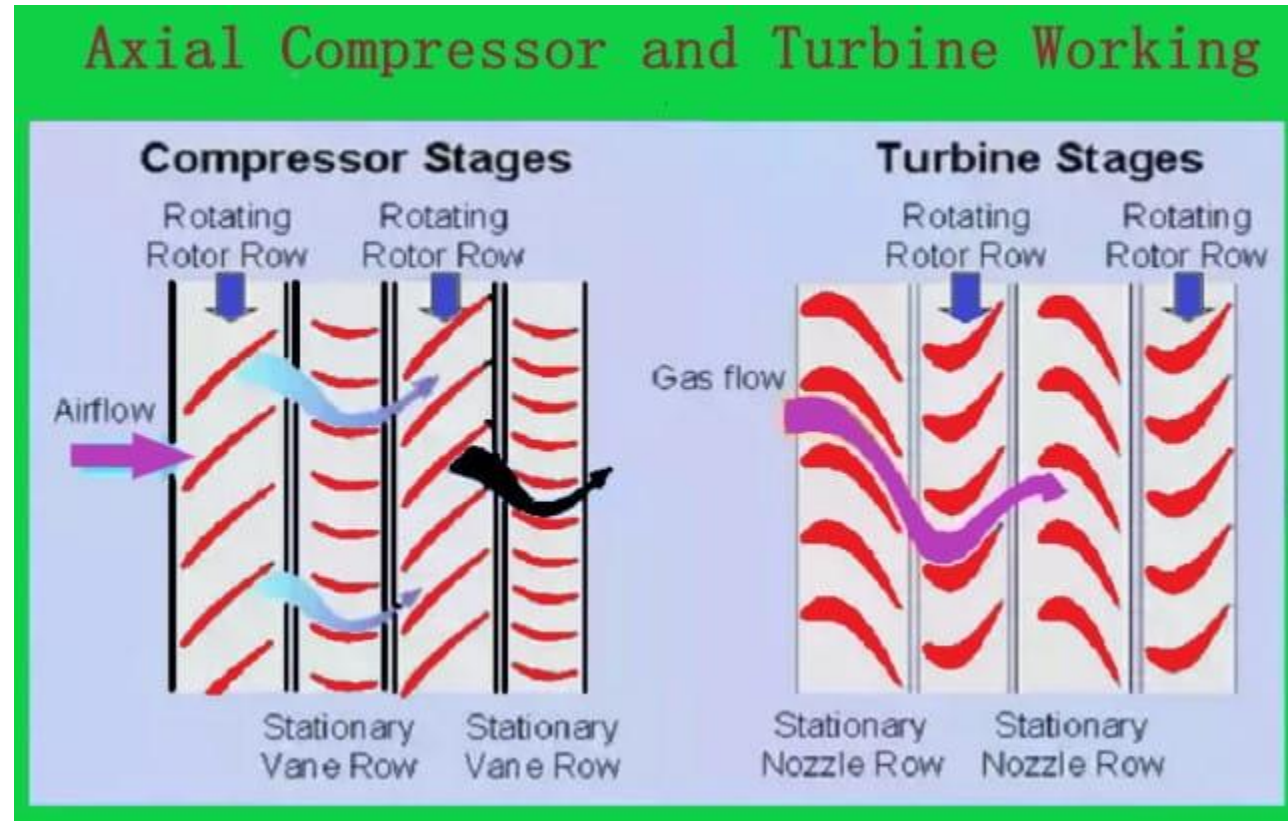
להבים משוכות לאחור, להבי הכוונה בכניסה





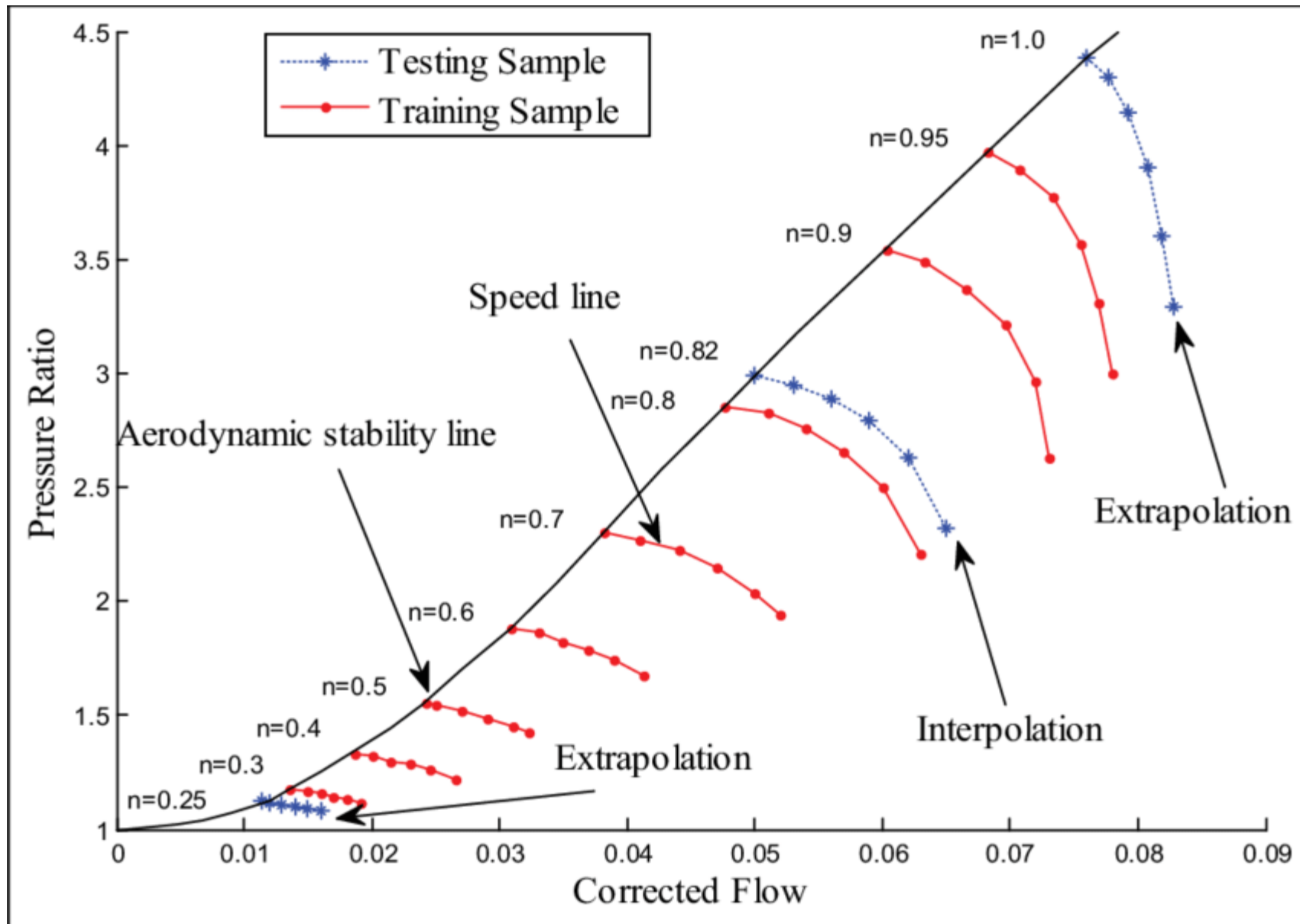
טורבינה
צירית

אופן הפעולה של טורבינה צירית/מדחס צירי



מפת ביצועי מדחס

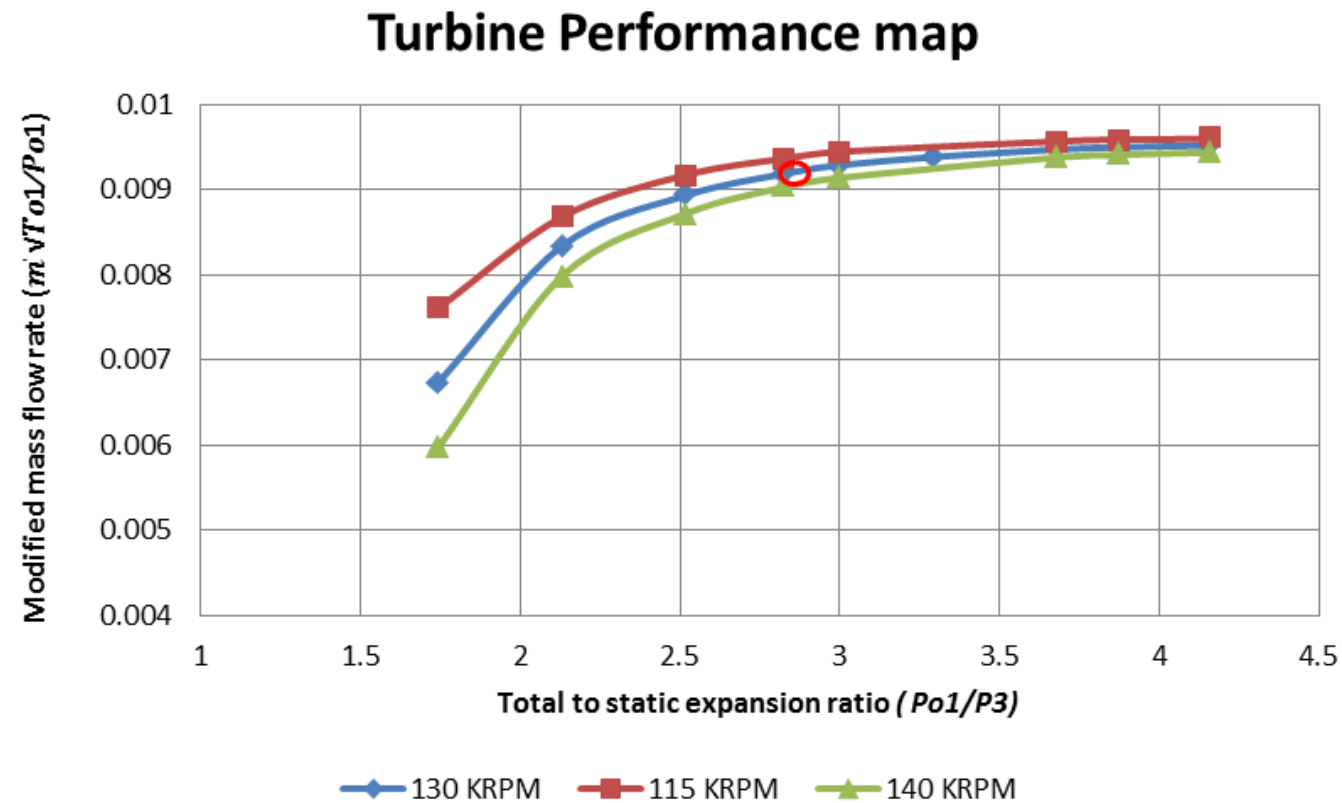
מפת המדחס מתארת את יחס הלחצים (P_{out}/P_{in}) והנצילות האיזנטרופית של הדחיסה כתלות של ספיקת האוויר ומהירות הסיבוב



• מאפיינים של מפת מדחס צירי/צנטריפוגלי

- המפה נכונה עבור לחץ טוטלי וספיקה טוטלית נתונים בכניסה למדחס.
- בכל ספיקת אוויר נתונה העלאת הסל"ד מעלה את יחס הלחצים.
- בכל סל"ד נתון יש גבול תחתון וגבול עליון לספיקה המותרת . הגבול התחתון נקרא נקודת ההזדקרות . פעולה בספיקה זו או בספיקה פחותה ממנה אפשרית אבל היא איננה יציבה ומתלווה בפעימות לחץ ולפעמים בזרימות חוזרות ונפילת סל"ד בזמן פעולת מנוע עד כדי כיבוי מנוע.
- הגבול העליון במהירויות סיבוב גבוהות נקרא ספיקת החניקה. במצב זה מגיעה מהירות הזרימה ל $M=1$ באחת משורות הלהבים ואין אפשרות לפעול בספיקה גדולה יותר. תופעת החניקה לא קיימת בסל"ד נמוך אבל ואז החל מספיקה מסוימת יורד יחס הלחצים ל-1 ומעבר לה לאף פחות מ-1 והמדחס מפסיק להיות מדחס.
- הנצילות המוצגת במפה מיצגת עד כמה עלית הטמפרטורה המתלווה לעלית הלחץ קרובה לעלית הטמפרטורה האיזנטרופת שהינה המינימום האפשרי.

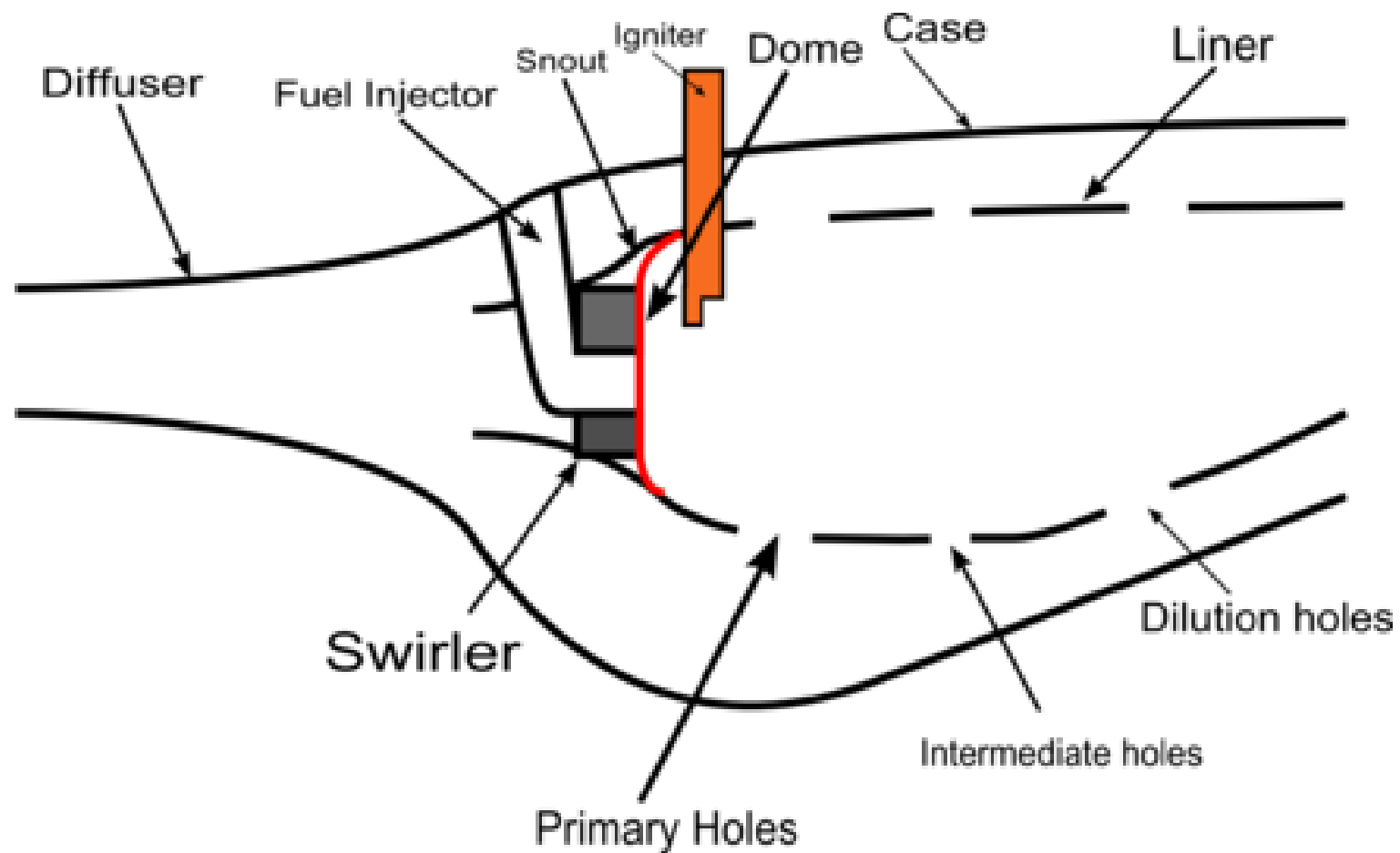
מפת טורבינה צירית



מאפיינים של מפת טורבינה צירית

- -המפה המוצגת כדוגמה דומה למפת המדחס אם כי בהיפוך קואורדינטות.
- -הפרמטרים במפה מותאמים ללחץ וטמפרטורה נתונים בכניסה לטורבינה.
- -ספיקות החניקה של מהירויות הסיבוב השונות קרובות.
- -בדרך כלל טורבינה מותקנת במנוע פועלת בתחום מצומצם במפה באזור חניקה.
- -בתחום זה נצילות ההתפשטות של הטורבינה שמייצגת את יחס ההספק המכני המופק ממנה להספק שיתקבל מהתפשטות איזנטרופית שהינה המכסימום האפשרי עבור יחס הלחצים הנתון.

חתך תא שריפה



מבנה ותפקוד תא השריפה

-בציור מוצגת דוגמה של תא שריפה טבעתי.

-בכניסה לתא השריפה יש דיפיוזר (DIFFUSER) שתפקידו להאט את הזרימה שמגיעה מהמדחס על מנת להבטיח להבה יציבה.

-בתוך הבית (CASE) העשוי בדרך כלל יציקת פלדה מצויות המעטפה (LINER) החיצונית והמעטפה הפנימית העשויות בדרך כלל פח מנתכים עמידים לטמפרטורה גבוהה. בחוטם (SNOUT) של המעטפות מותקנים מספר מזרקי דלק (INJECTORS) בחלוקה היקפית. כל מזרק עטוף במסחרר אוויר (SWIRLER).

-קרוב לפית הזרקת הדלק של אחד או שניים מהמזרקים מצוי מצת (IGNITER) שתפקידו לאתחל את הלהבה בזמן התנעת המנוע.

-הלהבה מתקיימת באזור המזרקים וניזונה מדלק ואוויר המוזרם דרך החורים הראשוניים (PRIMARY HOLES) באופן שנוצר יחס דלק/אוויר סטויכיומטרי (0.068)

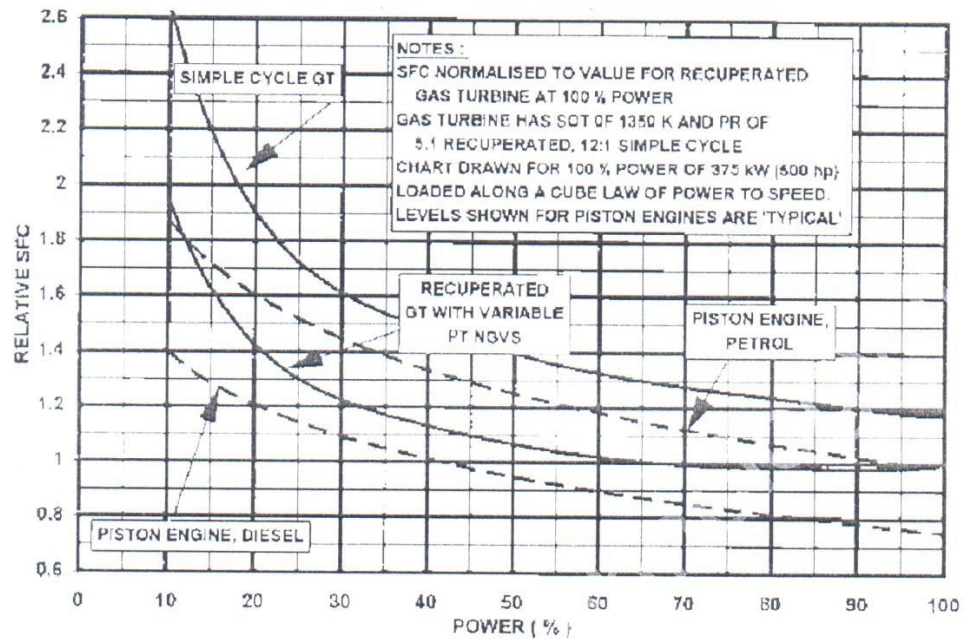
-בהמשך זרימת גזי השריפה נכנס אוויר נוסף מהמדחס דרך חורי הביניים (INTERMEDIARY HOLES) ודרך חורי הדילול (DILUTION HOLES) ומתערבב בגזים במטרה להקטין את הטמפרטורה שלהם לרמה שלא תגרום נזק לטורבינה.

חומרים לבנית טורבינות גז

- באזור ה"קר" של המנוע (מדחס)
- -חלקים סובבים :נתכי אלומיניום ,פלדות ובמהירויות גבוהות נתכי טיטניום.
- -חלקים סטטיים :במנועי תעופה נתכי אלומיניום , באחרים פלדה מצופה.
- באזור החם של המנוע (תא שריפה , טורבינה וצינור פליטה)
- -חלקים סובבים : נתכי-על על בסיס ברזל , ניקל וקובלט.
- -חלקים סטטיים : פלב"מ ונתכי-על על בסיס ניקל וקובלט.
- העלות הגבוהה של נתכי-על וטיטניום ,הקושי בעיבודם והגיאומטריה המסובכת
- של חלקים מיוחדים כמו להבים ודיסקות מייקרים את תהליך ייצור המנוע.

Charts

Chart 1.1 Performance of gas turbines compared with piston engines.



(a) SFC versus power

השוואה בין
טורבינת גז
למנוע דיזל

תצרוכת דלק סגולית כנגד %הספק

השוואה בין טורבינת גז למנוע דיזל

- -גודל ומשקל המנוע בהספק נתון :
- טורבינת הגז קטנה וקלה יותר באופן משמעותי.
- -ספיקת אוויר נדרשת בהספק נתון :
- ספיקת האוויר גדולה פי 2-3 יותר ני יחס דלק/אוויר בטורבינת גז קטן יותר
- נתון זה משליך על תכן תעלות כניסת אוויר וסינונו (אם נדרש) וארובות פליטה.
- -זיהום אוויר בהספק נתון :
- זיהום אוויר של טורבינת גז נמוך יותר בגלל יחס דלק/אוויר מופחת.
- -איזון , רעידות ומהירות סיבוב :
- למכלול(ים) הסב(ים) בטורבינת גז יש צורה מאוד קרובה לגוף סיבוב לעומת מנגנון ארכובה-טלטל-בוכנה במנוע דיזל ולכן רמת הרעידות נמוכה יותר. טורבינות גז יכולות לפעול במהירויות גדולות יותר וטווחי סל"ד רחבים יותר.

השוואה בין טורבינת גז למנוע דיזל (המשך)

- -מערכת שמן :
 - מערכת השמן פשוטה יותר בטורבינות גז הודות לחיכוך המועט יותר.
- -מערכת ההצתה :
 - מערכת ההצתה פועלת רק בזמן התנעה בטורבינת גז אבל אי אפשר בלעדיה . במנוע דיזל אין צורך במערכת הצתה.
- -זמן התנעה :
 - זמן ההתנעה קצר יותר בטורבינת גז (בעיקר בטמפרטורות נמוכות) בגלל מיעוט
 - החיכוך והשימוש בשמני סיכה פחות צמיגים.
- -מומנט פיתול :
 - בניגוד לפעילות האופייניות למנוע בוכנה המומנט המופק מטורבינת גז פועל על העומס באופן רציף בזמן . כמו כן
 - טורבינת גז עם טורבינת הספק נפרדת מטורבינת המדחס יכולה לספק מומנט פיתול משמעותי כאשר מהירות
 - הסיבוב של העומס אפסית בניגוד למנוע דיזל .

השוואה בין טורבינת גז למנוע דיזל (סוף)

- עלות רכישה :
- עלות רכישה של טורבינת גז יקרה יותר בגלל שימוש בנתכי-על/טיטניום
- וייצור חלקים עם צורות ייחודיות.
- אורך חיים ועלות תחזוקה :
- החלקים החמים בטורבינת גז פועלים ברצף בטמפרטורה גבוהה לעומת
- חלקי מנוע בוכנה המצויים 50% מהזמן בפעימות קרות (יניקה , חצי-דחיסה ,
- חצי-פליטה) לכן השחיקה, צריכת חלקי חילוף ועלויות התחזוקה גדולות יותר
- בטורבינת גז . ביישום של תחנת כוח חשמלית אורך חיים ממוצע הוא 30
- שנה למנוע דיזל לעומת 20 שנה לטורבינת גז. ביישומים צבאיים אורך החיים
- קצר יותר.

יישומי הנעה של טורבינות גז

- -הנעת כלי טיס
- יתרון הקומפקטיות של טורבינות גז גרם לכך שכמעט כל כלי הטיס החל מגודל מסוים מונעים ע"י טורבינות גז, מנועי סילון וטורבומניפה כאשר
- נדרש דחף וטורבינות הספק להנעת פרופלור או ראש רוטור של מסוק.
- -הנעת כלי רכב יבשתיים
- היו נסיונות לפתח טורבינות גז להנעת משאיות שנכשלו בגלל עלות ייצור
- ותצרוכת דלק . ביישומים צבאיים המחיר פחות חשוב : טנק המערכה העיקרי
- של צבא ארה"ב ABRAMS M1 מונע ע"י טורבינת גז עם מחליף חום. גם הטנק
- הרוסי T-80 מונע ע"י טורבינת גז.
- -הנעת כלי שיט
- מאז 1960 הוכנסו טורבינות גז בשימוש בכלי שיט . היום הן משמשות בכלים
- צבאיים לתוספת הספק בחרום מעבר למנועי דיזל המשמשים בשיוט .
-
- - ייצור הספק חשמלי
- יש שימוש בטורבינות גז בשילוב עם טורבינות קיטור כאשר החום למחזור הקיטור מתקבל מגזי
- הפליטה של הטורבינה באמצעות מחליף חום עבור הספקים גדולים (מחזור משולב)