

به نام خدا



دانشگاه خلیج فارس

دانشکده مهندسی

دستور کار

آزمایشگاه ترمودینامیک

نسخه ۲

پاییز ۱۳۹۲

مقررات و نحوه ارزشیابی:

۱. حضور به موقع در آزمایشگاه ضروری است.
۲. مطالعه دستور کار آزمایشگاه و آمادگی قبلی جهت انجام آزمایش ضروری است. اول هر جلسه از آزمایش مربوطه کوییز گرفته می‌شود.
۳. هر گروه باید یک گزارش برای هر آزمایش، حداکثر تا دوهفته بعد تحویل دهد. عدم تحویل به موقع گزارش موجب کسر نمره از آن گزارش خواهد شد. برای گزارشهایی که بین چند گروه مشترک باشد یک نمره داده شده و آن نمره بین نفرات تقسیم خواهد شد.
۴. امتحان پایان ترم به صورت کتبی بوده و در بر گیرنده مطالب دستور کار و گزارش‌های دانشجویان خواهد بود

ترتیب انجام آزمایش توسط گروه‌ها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. ترتیب انجام آزمایش‌ها توسط هر گروه.

	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵
گروه ۱	جلسه ۱	جلسه ۲	جلسه ۳	جلسه ۴	جلسه ۵
گروه ۲	جلسه ۵	جلسه ۱	جلسه ۲	جلسه ۳	جلسه ۴
گروه ۳	جلسه ۴	جلسه ۵	جلسه ۱	جلسه ۲	جلسه ۳
گروه ۴	جلسه ۳	جلسه ۴	جلسه ۵	جلسه ۱	جلسه ۲

گزارش هر آزمایش بایستی شامل موارد زیر باشد:

- عنوان: شامل شماره آزمایش و گروه و تاریخ انجام آزمایش و تحویل گزارش.
- فهرست
- مقدمه: شامل موضوع آزمایش، ضرورت، کاربرد و هدف از انجام آن.
- تئوری آزمایش: به طور خلاصه اما جامع. به همراه شکل‌ها و روابط. برای تهیه مطالب این بخش، کمی به خود زحمت داده، سری به کتابخانه بزنید! مطالب جدید و خارج از کتاب درسی امتیاز اضافه دارد.
- شرح دستگاه آزمایش: با تأکید بر وسایل اندازه‌گیری و دقت آنها به همراه شکل شماتیک دستگاه.
- روش آزمایش: دقیقاً همان چیزی که عملاً انجام شد.
- نتایج: شامل داده‌های حاصل از آزمایش بصورت جدول، یک نمونه محاسبه، کمیت‌های خواسته شده در دستور کار به شکل جدول و منحنی، بحث در نتایج و تحلیل خطا
- نتیجه‌گیری
- مراجع: فقط مراجعی در انتهای کار می‌آید که در متن نیز با شماره (به صورت [1]) به آن ارجاع شده باشد. در نوشتن نشانی مرجع، استاندارد رعایت شود.

تذکرات:

- گزارشها باید دست نویس و خوانا روی برگه A4 نوشته شوند.
- برای روابط، جداول و شکل‌ها شماره بگذارید. هر شکل و جدول نیاز به عنوان (توضیح) دارد. عنوان شکل در زیر آن و برای جدول در بالای آن می‌آید.
- از فعل‌های اول شخص (مفرد یا جمع) استفاده نشود.

آزمایش شماره ۱

بمب کالریمتر

هدف :**به دست آوردن ارزش حرارتی سوخت**

شکل ۱ : دستگاه بمب کالریمتر

شرح دستگاه :

ارزش حرارتی سوخت عبارت است از مقدار گرمایی که در موقع سوختن کامل واحد جرم سوخت آزاد می شود. می توان ادعا کرد که این دستگاه انجام آزمایشات ارزش حرارتی را برای سوخت بسیار آسان می سازد. پایه این دستگاه یونیت کوچکی را تشکیل می دهد که کاملاً از نظر تعادل پایدار بوده و میله های احتراق و نگهدارنده بوته را حمل می کند. این موضوع باعث می گردد که هر دو دست آزاد بوده و جهت تنظیم سیم احتراق و قرار دادن بوته در نگهدارنده مورد استفاده قرار گیرند. برای بازو بسته کردن درب پیچی بمب هم با توجه به عایق بندی مناسب، نیروی زیادی لازم نمی باشد و با آچار همراه دستگاه به راحتی محکم می شود.

بمب پس از آماده شدن داخل محفظه آب قرار می گیرد. با عمل کردن سیستم جرقه و داغ شدن وایر احتراق، سوخت منفجر می شود و موجب بالا رفتن دمای آب می گردد. با محاسبه مقدار گرمای داده شده به آب و دستگاه، ارزش حرارتی سوخت به دست می آید.

اجزای دستگاه :

۱. محفظه آب دستگاه
۲. محفظه بمب و محتویات شامل بوته، میله های احتراق، وایر جرقه، وسوپاپ اکسیژن و دود
۳. جایگاه قرار گیری محفظه بمب جهت باز و بسته کردن درب پیچی آن
۴. سیستم جرقه (شامل سیستم تغذیه، اتصال وایر به بمب، وایر جرقه و میله های احتراق)
۵. سنسور الکترونیکی دما با دقت $0.1/0$ درجه سانتیگراد
۶. کپسول اکسیژن و نازل تزریق هوا
۷. سیستم الکترونیکی، برد ویژه و نرم افزار مخصوص جهت ثبت اطلاعات و ترسیم گراف
۸. کلید روشن و خاموش کردن دستگاه
۹. پمپ جهت به گردش در آوردن آب محفظه آب

روش کار با دستگاه :

۱. دو سر وایر جرقه، با عبور از سوراخ های میله های احتراق، به آنها بسته می شود.
۲. بوته پس از ریختن سوخت به داخل آن، در محل مخصوص خود در داخل محفظه بمب قرار داده می شود. (وزن سوخت به وسیله ترازوی دیجیتالی اندازه گیری می شود).
۳. درب پیچی بمب، پس از قرارگیری بمب در محل مخصوص خود بر روی میز، توسط آچار مخصوص همراه دستگاه، محکم می شود.
۴. اکسیژن توسط کپسول، تا فشار $10-5 \text{ bar}$ ، به بمب تزریق می شود. دو بارومتر روی کپسول اکسیژن قرار دارد. یکی از فشار سنج ها، فشار داخلی کپسول را نشان می دهد (برای آگاهی از مقدار اکسیژن درون کپسول)، دیگری نیز فشار خروجی از کپسول را نشان می دهد که به وسیله شیر تنظیم، قابل تغییر است. اکسیژن خروجی از کپسول، توسط نازل تزریق اکسیژن به محفظه بمب تزریق می شود. فشارسنج نازل، فشار درون محفظه بمب را نشان می دهد. زمانی که عدد فشار سنج نازل برابر فشار تنظیم شده خروجی کپسول شد، فشار محفظه بمب ثابت می شود. اهرم نازل را رها کرده، اتصال نازل را از سوپاپ جدا نمایید.
۵. بمب درون دستگاه (محفظه آب)، قرار داده می شود. در جابجایی بمب دقت شود تا سوخت از بوته به بیرون نریزد.
۶. به حدی آب در داخل محفظه ریخته می شود که بمب به طور کامل درون آب قرار گیرد. حجم آب وارد شده در این قسمت، با استفاده از پارچ مدرج همراه دستگاه اندازه گیری می شود.
۷. پس از اتصال وایر اتصال سیستم جرقه به درب بمب، درب محفظه آب بسته شود.

۸. قبل از روشن کردن دستگاه، از اتصال برد الکترونیکی آن به کامپیوتر، توسط کابل USB، اطمینان حاصل شود. در این حالت چراغ LED برد الکترونیکی روشن می شود. در غیر این صورت با اجرای نرم افزار پنجره های متعددی باز می شود و سیستم پیغام خطا می دهد. برای رفع اشکال به وجود آمده، با فشار دادن همزمان کلید های Ctrl , Alt , Delete صفحه کلید، پنجره windows security باز می شود. روی Task Manager کلیک کنید. در پنجره Windows Task Manager، پس از انتخاب نام نرم افزار، روی گزینه End Task کلیک کنید.

۹. توسط کلید ON/OFF، دستگاه روشن می شود.

۱۰. با کلیک بر روی آیکون Play نرم افزار، رسم نمودار شروع می شود.

۱۱. به منظور همدم شدن آب درون محفظه، یک پمپ کوچک تعبیه شده است که آب را به گردش در می آورد. با علامت دار کردن گزینه Spark نرم افزار، سیستم جرعه عمل نموده و پمپ نیز شروع به کار می نماید. مدت زمان کارکرد پمپ بستگی به زمان جرعه تعریف شده در کالیبراسیون دستگاه دارد.

۱۲. دود ناشی از احتراق، به وسیله سوزن مخصوص تخلیه دود، تخلیه می شود. (بعد از تخلیه دود می توانید درب بمب را باز کنید).

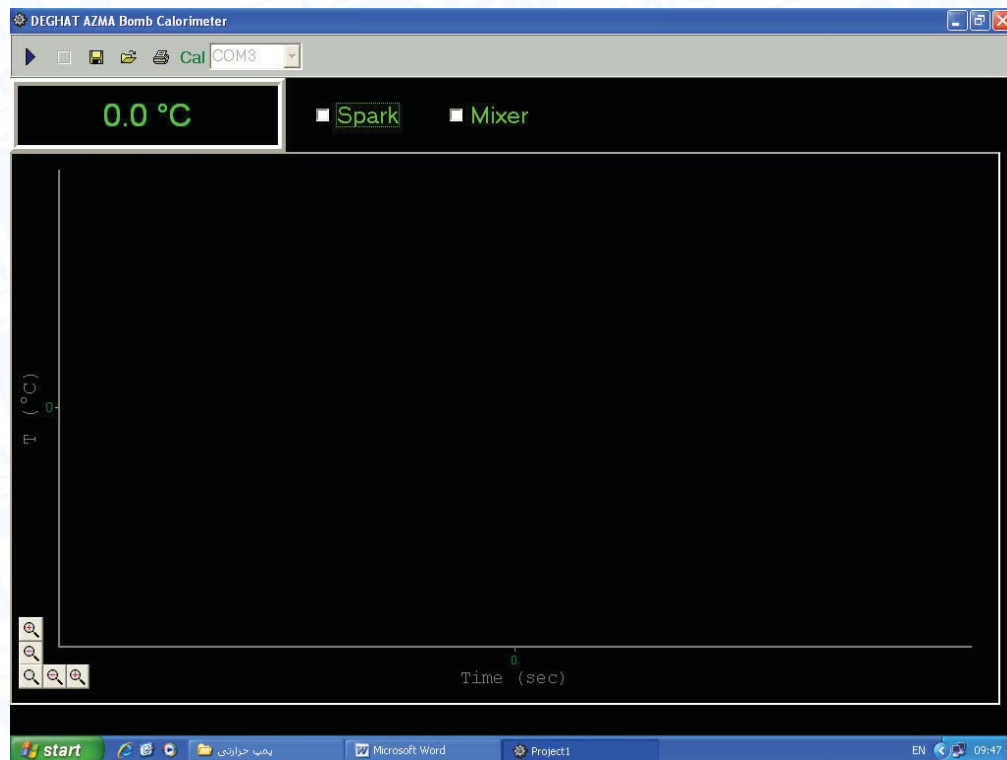
۱۳. در صورت نیاز به تخلیه آب درون محفظه، یک شیلنگ پنوماتیک به خروجی پمپ متصل شده و با فرمان spark نرم افزار، پمپ آب را تخلیه می نماید.

ضریب تصحیح تشعشع ۰/۰۳ می باشد که این عدد با تغییرات دما در طول آزمایش جمع می گردد.

نکات کار با نرم افزار :

-  دکمه Play : برای شروع آزمایش و ترسیم منحنی این دکمه را فشار دهید.
-  دکمه Stop : به منظور پایان دادن به آزمایش و اتمام ترسیم منحنی این دکمه را فشار دهید.
-  دکمه Save : با فشردن این دکمه پنجره Save استاندارد ویندوز باز می شود و اطلاعات مربوط به آزمایش جاری را با نام دلخواه می توان ذخیره کرد.
-  دکمه Open : با فشردن این دکمه پنجره Open استاندارد ویندوز باز می شود و با وارد کردن نام فایل، نتایج آزمایش های ذخیره شده را می توان بازبینی کرد.
-  دکمه Print : با فشردن این دکمه صفحه Print Preview باز می شود که در آن منحنی ترسیم شده قابل مشاهده است. در این صفحه قبل از چاپ می توان خصوصیات پرینتر و کاغذ را تغییر داد. بهتر است مشخصات پرینتر را یک بار در خود Windows تنظیم کنید تا به تنظیم مجدد در موقع پرینت نیاز نباشد.

با علامت دار کردن مربع کنار دکمه Spark سیستم جرعه عمل نموده و پمپ آب نیز شروع به کار می نماید.



شکل ۲: نرم افزار *Calorimeter Bomb*

هدف :

به دست آوردن ارزش حرارتی سوخت

تئوری آزمایش :**روش به دست آوردن ارزش حرارتی سوخت :**

برای بدست آوردن ارزش حرارتی، باید موارد زیر جزو معلومات مسأله باشد. آن‌ها را به شیوه‌ای که در ادامه آمده است به دست آورید.

وزن سوخت مورد آزمایش

وزن آب در ظرف کالریمتر

ارزش آبی دستگاه

وزن آب معادل دستگاه

اختلاف دمای ماکزیمم و اولیه

M = وزن آب معادل دستگاه (شامل وزن آب + ارزش آبی معادل دستگاه)

ΔT = (دما در شرایط دائم قبل از انفجار - دمای ماکزیمم قرائت شده)

$MC\Delta T$ = ارزش حرارتی سوخت داخل بوته، C هم ظرفیت گرمایی ویژه آب می باشد.

تصحیح تشعشع :

تصحیح تشعشع از روی دانستن میزان تغییر دمای آب قبل از احتراق سوخت نمونه و پس از تحصیل ماکزیمم دما محاسبه گشته است.

فرض میکنیم:

شماره دقایق بین احتراق و تحصیل دمای ماکزیمم n

میزان افزایش دما بر حسب درجه در دقیقه در ابتدای آزمایش V

میزان سقوط دما بر حسب درجه در دقیقه در پایان آزمایش V'

بنابراین :

$$\text{تصحیح تشعشع} = nV' + \left(\frac{-V + V'}{2} \right)$$

که این تقریبی است از فرمول رگنالت - استهمن - پفاندلر که سوای تحقیق برای تمام مقاصد دیگر به قدر کافی درست و دقیق است.

تعیین ارزش آبی دستگاه :

ارزش آبی دستگاه معمولاً با سوزاندن یک نمونه وزن شده سوختنی با ارزش حرارتی معلوم تعیین می گردد. چنین سوختی باید خالص باشد.

برای مثال، در صورتی که از نفتالین با ارزش حرارتی 9.630 کالری بر گرم یا 9630 C.H.M بر پوند استفاده شود، ارزش آبی دستگاه به صورت زیر محاسبه می شود :

در حدود 0.9 گرم نفتالین خرد شده را به صورت قالب جامدی درآورده و توزین میکنیم و بلافاصله به داخل بمب منتقل می نماییم تا از کم شدن وزن آن در اثر تصعید جلوگیری به عمل آید. یک آزمایش به روش معمول انجام داده و افزایش درجه حرارت را بدست می آوریم. بنابراین اگر :

m_{equal} : ارزش آبی دستگاه بر حسب گرم

t : افزایش دمای تصحیح شده

M : وزن آب در ظرف کالریمتر

y : وزن نفتالین مورد امتحان بر حسب گرم

با توجه به اینکه گرمای ویژه آب برابر $1 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ می باشد، داریم :

$$(M + m_{equal}) t = y \times 9630$$

و یا

$$m_{equal} = \left(\frac{y \times 9630}{t} - M \right)$$

در هنگام تعیین ارزش آبی چندین آزمایش بایستی بعمل آورد و سپس متوسط ارزش آبی مزبور را بدست آورد.

روش پیشنهادی دیگر جهت محاسبه ارزش آبی بمب، به کار بردن روشی است که در دستگاه معادل مکانیکی حرارت از آن استفاده شده است. در نتیجه ارزش آبی دستگاه از رابطه زیر محاسبه می گردد :

$$m_{equal} = \frac{(mc)_1 + (mc)_2 + (mc)_3}{C_{water}}$$

که در آن c گرمای ویژه، عدد ۱ مربوط به قسمت های فولادی محفظه بمب و عدد ۲ مربوط به بوته و متعلقات برنجی بمب و عدد ۳ مربوط به بخش های آلومینیومی بمب می باشد. ارزش آبی دستگاه حاضر ۴۴۴ گرم می باشد.

روش انجام آزمایش :

پر کردن بمب :

قبل از پر کردن بمب دقت داشته باشید که بوته و جداره بمب به طور کامل تمیز باشد. بوته را روی ترازوی دیجیتالی قرار داده و دکمه Zero را فشار دهید تا با ریختن سوخت به داخل بوته، تنها وزن سوخت نشان داده شود.

در حدود ۰/۵ گرم سوخت داخل بوته بریزید. سپس به آرامی و با دقت بوته را در محل تعبیه شده در بمب، قرار دهید. در صورتی که وایر در آزمایش قبل پاره شده است، آن را نیز به آرامی تعویض نمایید. بمب را بر روی میز کار در محل مخصوص آن قرار داده و درپچی آن را محکم نمایید. تا فشار 7 bar ، اکسیژن به بمب تزریق کنید. بمب در هنگام اتصال به بدنه دستگاه بمب کالریمتری، بایستی بطور قائم نگه داشته شود. تغییر مکان ناگهانی بمب ممکن است باعث بشود که قدری از سوخت نمونه از بوته بیرون ریخته شود و بدین ترتیب آزمایش را بی‌ارزش سازد.

پس از قرار دادن بمب درون دستگاه، به حدی آب بر روی آن بریزید که بمب به طور کامل درون آب قرار گیرد. برد الکترونیکی دستگاه را توسط کابل USB به کامپیوتر و نرم افزار متصل و پس از آن دستگاه را روشن نمایید (چراغ LED برد الکترونیکی باید روشن باشد). وقتی شرایط آزمایش به شرایط دائم رسید می توانید انفجار را انجام دهید. برای این کار پس از کلیک کردن روی آیکون $Play$ نرم افزار، کنار دکمه $Spark$ علامت تیک بزنید تا سیستم جرقه عمل کند. دمای ماکزیمم را از روی نمودار دما- زمان مربوطه به دست آورید. (نرخ افزایش دما در ابتدا سریع و به تدریج کاهش می‌یابد. هرگاه این نرخ ناچیز بود یا دما پس از افزایش اولیه شروع به کم شدن کرد، دمای ماکزیمم قابل خواندن است). حجم آب وارد شده در این قسمت، با استفاده از پارچ مدرج همراه دستگاه اندازه گیری می شود. (حجم آب را می‌توانید بعد از انجام عملیات انفجار اندازه‌گیری نمایید. البته برای راحتی و دقت بیشتر، بهتر است هنگام پر کردن محفظه، مقدار آب را اندازه بگیرید). هم‌چنین ضریب تصحیح تشعشع 0.03 می باشد که این عدد با تغییرات دما در طول آزمایش جمع می‌گردد.

توجه : پس از انفجار و بیرون آوردن بمب از محفظه آن، با فشار دادن میله درون سوپاپ به وسیله سوزن مخصوص تخلیه دود، دود ناشی از احتراق را تخلیه نمایید تا بتوانید درب بمب را باز کنید.

خواسته ها :

۱. ارزش حرارتی سوخت مورد نظر (بنزین) را بدست آورید.
۲. نمودار دما برحسب زمان را در طول آزمایش رسم نمایید و در مورد دقت آزمایش بحث کنید.

- جهت آشنایی با محاسبات، یک مثال نمونه در پیوست آمده است.

پیوست :**مثال :**

(توجه : این مثال جهت آشنایی با روش محاسبات آورده شده و مقادیر و اوزان داده شده در مثال، مربوط به دستگاه حاضر نمی باشد.)

برای روشن شدن نحوه محاسبه ارزش حرارتی، آزمایش زیر به عنوان یک مثال نمونه داده شده است.

سوخت مورد امتحان : روغن سوخت

وزن روغن سوخت : ۰/۷۶۸ گرم

وزن آب در ظرف کالریمتر : ۲۱۸۰ گرم

ارزش آبی دستگاه : ۴۱۲ گرم

وزن معادل کل آب : ۲۵۹۲ گرم

زمان و دمای قرائت شده

زمان بر حسب دقیقه	(°C) قرائت های ترمومتر
۰	۰/۷۸۸
۱	۰/۷۹۰
۲	۰/۷۹۱
۳	۰/۷۹۳
۴	۰/۷۹۴ (نمونه محترق می گردد.)
۵	۳/۱۵۰
۶	۳/۸۰۰
۷	۳/۸۵۶
۸	۰/۸۷۰
۹	۳/۸۷۱ (دمای ماکزیمم)
۱۰	۳/۸۶۸
۱۱	۳/۸۶۲
۱۲	۳/۸۵۵
۱۳	۳/۸۴۰
۱۴	۳/۸۴۳

تصحیح تشعشع :

تصحیح تشعشع از روی دانستن میزان تغییر دمای آب قبل از احتراق سوخت نمونه و پس از تحصیل ماکزیمم دما محاسبه می شود. فرض می کنیم :

شماره دقایق بین احتراق و تحصیل دمای ماکزیمم n =
 میزان سقوط دما بر حسب درجه در دقیقه در پایان آزمایش V' =
 میزان افزایش دما بر حسب درجه در دقیقه در آغاز آزمایش V =
 ضریب تصحیح تشعشع به صورت زیر محاسبه می شود :

$$\text{تصحیح تشعشع} = nV' + \left(\frac{-V + V'}{2} \right)$$

که این تقریبی است از فرمول رگنالت - استهن - پفاندلر که تحقیق برای تمام مقاصد دیگر به قدر کافی درست و دقیق است. در این مثال مقادیر زیر را منظور می داریم :

$$V' = \frac{0.025}{4} = 0.00626$$

$$V = \frac{0.006}{4} = 0.0015$$

که از دقیقه دهم تا دقیقه چهاردهم گرفته شده :

$$n = 5$$

که از دقیقه صفر تا دقیقه چهارم گرفته شده

و از آنجا :

$$\text{تصحیح تشعشع} = 5 \times 0.00625 + \left(\frac{-0.0015 + 0.00625}{2} \right) = 0.03125 + 0.0024 = 0.0336$$

$$3.871 - 0.794 = 3.0770^{\circ}\text{C} \quad \text{افزایش دما در طول آزمایش :}$$

$$0.0336 \quad \text{تصحیح مربوط به تشعشع :}$$

$$3.0770 + 0.0336 = 3.1106^{\circ}\text{C} \quad \text{افزایش دمای تصحیح شده :}$$

$$2592 \times 3.1106 = 8062.7 \text{ cal} \quad \text{حرارت جذب شده توسط آب :}$$

و از آنجا ارزش حرارتی سوخت مورد آزمایش برابر است با :

$$\frac{8062.7}{0.768} = 10.500 \text{ (cal/gr)}$$

آزمایش شماره ۲

دیگ مارست

هدف :

بررسی تبدیل حالت مایع به بخار (تغییر فاز) و کاربرد معادله کلاپیرون



شکل ۱ : دستگاه دیگ مارست

مقدمه :

اگر مایعی را در فشار ثابت حرارت دهیم حجم آن به مقدار ناچیز و دمای آن به شدت تغییر می کند و در دمای معینی ($T_s =$ دمای جوش) درجه حرارت ثابت مانده ولی تغییرات حجم شدید می شود تا اینکه تمام مایع داخل ظرف تبدیل به بخار گردد. سپس در اثر ادامه حرارت، دما و حجم هر دو تغییر خواهند کرد. در این آزمایش نحوه تغییرات فشار نسبت به دما در حجم ثابت و تغییر فاز از مایع به بخار بررسی می شود.

شرح دستگاه :

دیگ مارست مخزنی است استوانه‌ای به حجم ۲/۵ لیتر با ضخامت بالا تا بتواند در فشارهای بالا مقاومت کند. بدنه دیگ با ورق آهن نازک پوشیده شده است. در نتیجه، فاصله هوایی ایجاد شده یک نوع عایق می باشد. داخل دیگ آب ریخته می شود. میزان پر شدن دیگ از آب، به وسیله شیر کنترل ارتفاع آب تنظیم می شود. گرما توسط هیتر الکتریکی تعبیه شده در داخل دیگ با توان $2kW$ ، تأمین می گردد. به این ترتیب آب داخل دیگ گرم می شود تا به نقطه جوش

برسد. پس از تبخیر مقداری از آب، دما و فشار داخل دیگ در حجم ثابت افزایش می یابد. این دیگ مجهز به یک سنسور فشار و یک سنسور دما می باشد که اطلاعات دریافتی را به برد الکترونیکی و از آنجا به نرم افزار مربوطه انتقال می دهد و نرم افزار نمودار فشار بر حسب دمای مربوط به آزمایش را رسم می نماید. همچنین یک گیج فشار در قسمت بالایی دیگ نصب شده است که فشار درون دیگ را به صورت آنالوگ نمایش می دهد. ماکزیمم فشار مجاز دیگ توسط گیج فشار و نیز توسط نرم افزار قابل تنظیم است. ضمناً دمای بخار درون دیگ، علاوه بر نرم افزار، توسط نمایشگر دیجیتال نیز نمایش داده می شود.

به منظور اطمینان بیشتر، از ایمنی دستگاه، یک رله تعبیه شده است که در دمای 180 درجه سانتیگراد عمل نموده و هیتر خاموش می گردد. در صورتی که پس از رسیدن فشار به 10 bar و دما به 180 درجه سانتیگراد، هیتر خاموش نشد، شیر اطمینان تعبیه شده در بالایی دیگ در فشار 20 bar باز شده و بخار دیگ تخلیه می گردد تا از صدمات احتمالی جلوگیری شود.

روش کار با دستگاه :

۱. پس از اتصال به جریان برق شهر، دستگاه به وسیله کلید on/off روشن می شود.
۲. به وسیله ظرف مدرج، از قسمت قیف مانند، آب به درون دیگ ریخته می شود (در این مرحله، باید شیر تغذیه و شیر کنترل ارتفاع آب در حالت باز باشند).
۳. مقدار آب دیگ به وسیله شیر کنترل ارتفاع آب، تنظیم می شود. به این صورت که با رسیدن سطح آب به محل قرارگیری شیر کنترل ارتفاع آب، آب اضافی تخلیه می شود. پس از رسیدن سطح آب به شیر کنترل ارتفاع، شیر تغذیه آب را ببندید. شیر تنظیم ارتفاع آب را پس از جوش آمدن آب درون دیگ ببندید تا دمای بخار اشباع در فشار اتمسفر را نیز داشته باشیم.
۴. دما و فشار داخل دیگ به وسیله سنسورهای دما و فشار اندازه گیری شده و اطلاعات مربوطه، به برد الکترونیکی منتقل می شود.
۵. برد الکترونیکی توسط کابل USB به سیستم کامپیوتر و نرم افزار مربوطه متصل می شود.
۶. قبل از روشن کردن دستگاه، از اتصال برد الکترونیکی آن به کامپیوتر و نرم افزار مربوطه، توسط کابل USB، اطمینان حاصل شود. در این حالت چراغ LED برد الکترونیکی روشن می شود. در غیر این صورت با اجرای نرم افزار پنجره های متعددی باز می شود.
۷. با اجرای نرم افزار و فشردن دکمه Play، نرم افزار شروع به رسم نمودار فشار بر حسب دما با دقت 0.01 bar و 0.1 °C می نماید. همزمان هیتر را توسط کلید 0/1 روی پنل دستگاه، روشن نمایید.
۸. یک عدد گیج فشار نیز روی دستگاه نصب شده است که در کنار نرم افزار، فشار را به صورت آنالوگ نمایش می دهد. توسط این گیج، فشار مجاز درون دیگ بر روی 10 bar تنظیم شده است. پس از رسیدن فشار دیگ به این مقدار، هیتر خاموش می شود.
۹. در قسمت بالایی دیگ، شیر اطمینان با حداکثر تحمل فشار 20 bar نصب شده است. در صورتی که پس از رسیدن فشار دیگ به 10 bar هیتر خاموش نشود، شیر اطمینان در فشار 20 bar باز می شود.

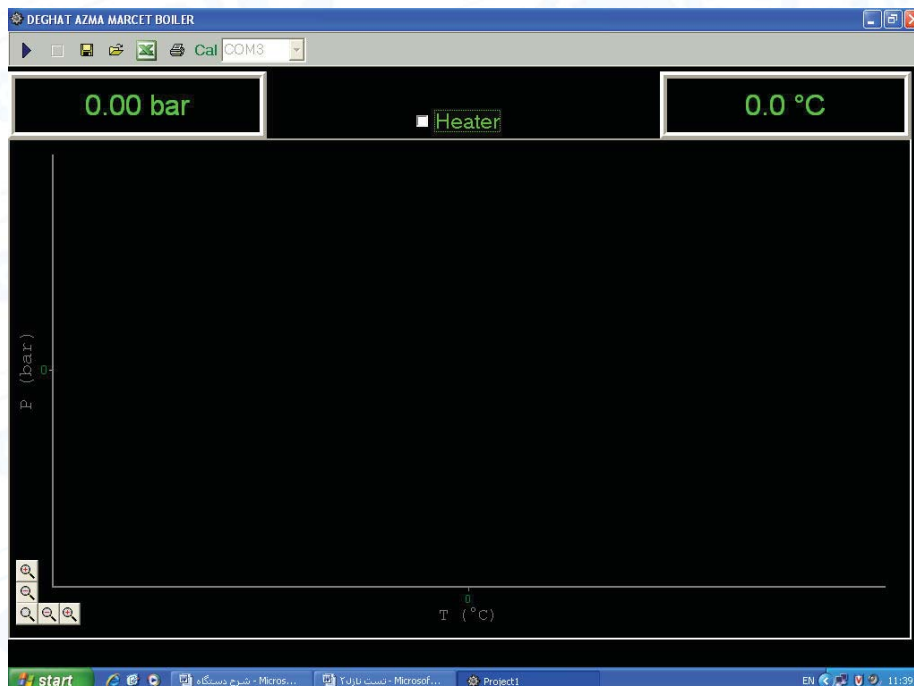
توجه :

- قبل از رسیدن فشار داخلی دیگ به فشار محیط، از باز کردن شیر کنترل ارتفاع آب خودداری نمایید.

- شیر اطمینان دستگاه، تحمل حد اکثر فشار 10 bar را دارد. در نرم افزار، ماکزیمم فشار روی 10 bar تنظیم شده است. زمانی که فشار بخار درون دستگاه به این مقدار برسد، شیر اطمینان باز شده و اجازه افزایش بیشتر فشار را نمی دهد. هیتر نیز خاموش می شود. پس از خاموش شدن هیتر، نرم افزار رسم نمودار را در حالت برگشت (سرد شدن)، ادامه می دهد.

نکات کار با نرم افزار:

- ▶ دکمه Play: برای شروع آزمایش و ترسیم منحنی این دکمه را فشار دهید.
 - دکمه Stop: به منظور پایان دادن به آزمایش و اتمام ترسیم منحنی این دکمه را فشار دهید.
 - 💻 دکمه Save: با فشردن این دکمه پنجره Save استاندارد ویندوز باز می شود و اطلاعات مربوط به آزمایش جاری را با نام دلخواه می توان ذخیره کرد.
 - 📁 دکمه Open: با فشردن این دکمه پنجره Open استاندارد ویندوز باز می شود و با وارد کردن نام فایل، نتایج آزمایش های ذخیره شده را می توان بازبینی کرد.
 - 🖨 دکمه Print: با فشردن این دکمه صفحه Print Preview باز می شود که در آن منحنی ترسیم شده قابل مشاهده است. در این صفحه قبل از چاپ می توان خصوصیات پرینتر و کاغذ را تغییر داد. بهتر است مشخصات پرینتر را یک بار در خود Windows تنظیم کنید تا به تنظیم مجدد در موقع پرینت نیاز نباشد.
 - 📊 دکمه Export to EXCEL: با فشردن این دکمه، اطلاعات مربوط به نمودار (نقاط روی نمودار) به نرم افزار EXCEL فرستاده می شود و با مراجعه به فایل ذخیره شده می توان مختصات نقاط مربوط به نمودار را مشاهده نمود.
- گزینه Heater، در این دستگاه کاربردی ندارد.



شکل ۲: نرم افزار دیگ مارست جهت رسم نمودار $P-T$

هدف :

بررسی تبدیل حالت مایع به بخار (تغییر فاز) و کاربرد معادله کلایپرون

تئوری :

وقتی به آب حرارت داده می شود، درجه حرارت آن افزایش خواهد یافت. حجم مخصوص به آرامی زیاد می شود ولی فشار ثابت می ماند. در فشار اتمسفر (0.1 MPa) وقتی درجه حرارت به $99.6^{\circ}C$ می رسد انتقال حرارت بیشتر، سبب تغییر فاز خواهد شد. یعنی قسمتی از آب تبدیل به بخار می شود و در طی این فرآیند درجه ی حرارت و فشار ثابت می ماند اما حجم مخصوص به مقدار زیادی افزایش خواهد یافت. وقتی که آخرین قطره ی مایع تبخیر شود انتقال حرارت بیشتر، باعث افزایش درجه حرارت و حجم مخصوص بخار خواهد شد.

اصطلاح درجه حرارت اشباع بیانگر درجه حرارتی است که در آن تبخیر تحت فشاری معین صورت می گیرد و این فشار را فشار اشباع برای آن درجه حرارت می نامند. پس برای آب در $99.6^{\circ}C$ ، فشار اشباع 0.1MPa است و در فشار 0.1MPa درجه حرارت اشباع معادل $99.6^{\circ}C$ می باشد. برای یک ماده ی خالص رابطه ی معینی میان فشار اشباع و درجه حرارت اشباع وجود دارد که نمونه ای از آن در شکل (1-a) مشاهده می شود. این منحنی را منحنی بخار می نامند.

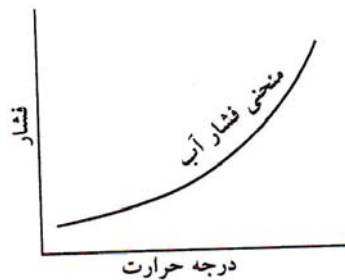
دیگرام های P-T, T-V, P-V, T-S را در شکل (۱) مشاهده می نمایید.

اگر ماده ای به صورت مایع در درجه حرارت و فشار اشباع باشد آن را مایع اشباع می نامیم. اگر درجه حرارت مایع کمتر از درجه حرارت اشباع برای یک فشار معین باشد آن را مایع متراکم می نامیم.

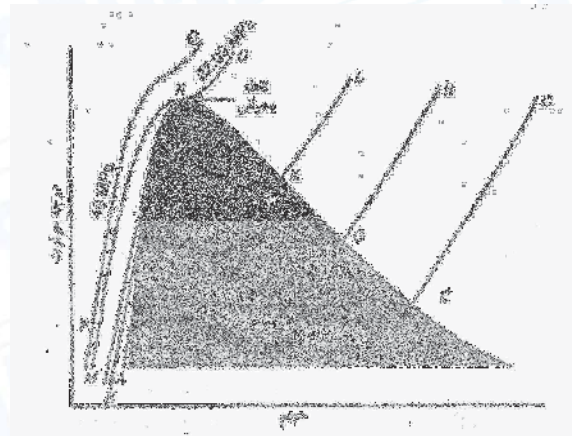
وقتی در درجه حرارت اشباع، قسمتی از ماده ای به صورت بخار و قسمتی به شکل مایع باشد، کیفیت را به صورت نسبت جرم بخار به جرم کل تعریف می کنیم و با x نشان می دهیم. کیفیت تنها زمانی معنی دارد که ماده در حالت اشباع یا به عبارت دیگر در درجه حرارت و فشار اشباع باشد.

مشخصات مختلف مایع و بخار در جداول موجود است (جداول B.I در کتاب ترمودینامیک تألیف ون وایلن). فقط برای

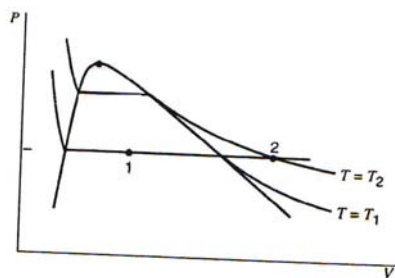
$$\text{محاسبه مشخصات ناحیه دو فازی باید از رابطه } x = \frac{v_x - v_f}{v_{fg}} = \frac{h_x - h_f}{h_{fg}} = \frac{S_x - S_f}{S_{fg}} \text{ استفاده نمود.}$$



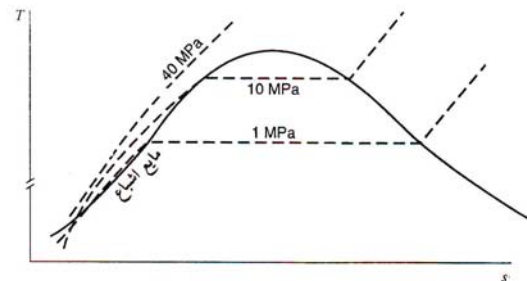
(a)



(b)



(c)



(d)

شکل ۱: (a): نمودار P-T, (b): نمودار T-V, (c): نمودار P-V, (d): نمودار T-S آب

اگر ماده ای در درجه حرارت اشباع به صورت بخار باشد آن را بخار اشباع می نامیم (گاهی از بخار اشباع خشک نیز جهت تأکید بر کیفیت صد در صد استفاده می شود). وقتی که بخار در درجه حرارتی بالاتر از درجه حرارت اشباع است گوئیم بخار به صورت مافوق گرم وجود دارد. فشار و درجه حرارت بخار مافوق گرم خواص مستقل هستند. زیرا درجه حرارت را می توان افزایش داد در حالی که فشار ثابت باقی می ماند. موادی که آنها را گاز می نامیم در حقیقت بخارات بسیار مافوق گرم هستند.

روی نمودار T-V شکل (1-b) خط فشار ثابت نمایانگر حالتی است که آب در حین گرم شدن از حالت اولیه از آنها می گذرد. فرض کنید A نشان دهنده ی حالت اولیه، B حالت مایع اشباع $99.6^{\circ}C$ و خط AB فرآیندی باشد که در طی آن مایع گرم می شود و از درجه حرارت اولیه به درجه حرارت اشباع می رسد. نقطه C حالت بخار اشباع شده و خط BC فرآیند درجه حرارت ثابتی است که تغییر فاز از مایع به بخار صورت می گیرد. خط CD نمایانگر فرآیندی است که طی آن بخار آب، در فشار ثابت مافوق گرم می شود. در طی این فرآیند درجه حرارت و حجم هر دو افزایش می یابند.

نقطه ی N، نقطه ی انحراف با شیب صفر می باشد. این نقطه را نقطه ی بحرانی می نامند و در نقطه ی بحرانی مایع اشباع و بخار اشباع با هم معادلند.

به طور کلی منظور از این آزمایش به دست آوردن مقادیر عملی و مقایسه آن با مقادیری است که در جداول کتب ترمودینامیک موجود است. این مقادیر عبارتند از $P_s = f(T_s)$ و گرمای نهان تبخیر (h_{fg}) و تغییرات آنتروپی (S_{fg}) .

روش آزمایش :

شیر محل تغذیه و شیر کنترل ارتفاع آب دیگ را باز نموده، به وسیله یک ظرف مدرج از قسمت قیف مانند، دیگ را پر از آب کنید تا ارتفاع آب به شیر کنترل ارتفاع رسیده و سرریز شود. در این لحظه شیر ورودی آب را ببندید. در حالی که شیر کنترل ارتفاع باز است، روی دکمه Play نرم افزار کلیک کنید و هیتر را با علامت دار کردن مربع مربوط به Heater در نرم افزار روشن نمایید تا بخار آزادانه از شیر خارج شود (به این دلیل که تقریباً هوای داخل دیگ تخلیه شود). سپس شیر کنترل ارتفاع را ببندید. به این ترتیب گرما به آب منتقل شده و نرم افزار نمودار P-T آب را با دقت 0.01 bar و 0.1 °C رسم می نماید. پس از رسیدن فشار به 8 bar، هیتر خاموش می شود و به تدریج فشار و دما کاهش می یابند.

نرم افزار منحنی فشار- دما را در دو مرحله رفت و برگشت (گرم و سرد شدن) رسم می نماید.

توجه :

- قبل از رسیدن فشار داخلی دیگ به فشار محیط، از باز کردن شیر کنترل ارتفاع آب خودداری نمایید.
- شیر اطمینان دستگاه، تحمل حد اکثر 10 bar را دارد. در نرم افزار، ماکزیمم فشار روی 8 bar تنظیم شده است. زمانی که فشار بخار درون دستگاه به این مقدار برسد، شیر اطمینان باز شده و اجازه افزایش بیشتر فشار را نمی دهد. هیتر نیز خاموش می شود.

خواسته ها :

۱. میانگین دمای رفت و برگشت را به ازای فشارهای مختلف بدست آورده و در دیاگرام $P_s = f(T_s)$ منحنی تغییرات دمای رفت - دمای برگشت - دمای تئوری (از کتاب وان ویلن) را رسم نمایید.
۲. منحنی $\frac{dP}{dT}$ را به ازاء فشارهای مختلف برای دمای میانگین و دمای تئوری رسم نمایید.
۳. گرمای نهان تبخیر h_{fg} و تغییرات آنتروپی را در ناحیه دو فاز (بخار مرطوب) به کمک معادله کلاپرون (فصل ده کتاب ترمودینامیک تألیف ون ویلن) یعنی از رابطه $\frac{dP_{sat}}{dT} = \frac{h_{fg}}{T(v_g - v_f)} = \frac{S_{fg}}{(v_{fg})}$ بدست آورید.
۴. رسم منحنی h_{fg} و S_{fg} به ازای فشارهای مختلف برای مقادیر بدست آمده از آزمایش و مقادیری که به کمک رابطه کلاپرون از جدول بدست می آید.
۵. رسم منحنی $T_s = f(P_s)$ که توسط معادله کلاپرون بدست آمده و مقایسه آن با منحنی تئوری.
۶. معادله ای برای $P_s = f(T_s)$ که با منحنی بدست آمده در آزمایش مطابقت داشته باشد پیشنهاد کنید.
۷. منابع خطا و تأثیر آنها بر روی نتایج آزمایش را بیان کنید.
۸. بحث و نتیجه گیری کامل از نمودارهای فوق.

۹. رسم تحول طی شده از ابتدا تا انتهای آزمایش در دیاگرام $P-V$

سوالات :

۱. هنگامیکه فشار دیگ به ماکزیمم خود رسید و آن را خاموش کردید مشاهده می‌شود که برای زمان کوتاهی فشار ثابت یا کم شده ولی دما افزایش می‌یابد علت این پدیده را بیان کنید.
۲. آیا بدنه دیگ عایق است یا خیر؟ چرا؟
۳. آیا در طول آزمایش پدیده جوش رخ می‌دهد یا خیر؟
۴. در مورد تأثیرات دمای اولیه آب روی نتایج آزمایش بحث کنید.
۵. چگونه می‌توان اطمینان یافت که آب دیگ به جوش آمده است؟
۶. نوع تحول در دیگ را بررسی نمایید.
۷. تغییرات حجم آب داخل دیگ در مرحله برگشت به چه صورتی است؟
۸. علت بالا واقع شدن منحنی فشار نسبت به دما در مرحله رفت، نسبت به مرحله برگشت چیست؟
۹. آیا هر دو منحنی رفت و برگشت (دما نسبت به فشار) که در آزمایشگاه بدست آورده‌ایم زیر منحنی تئوریک قرار می‌گیرند؟ چرا؟
۱۰. همانطور که ملاحظه گردید فاصله زمانی طی شده در هنگام تغییرات فشار متفاوت است. توضیح دهید چرا؟
۱۱. γ_g را چگونه محاسبه می‌کنیم و تا چه حد مرتکب خطا می‌شویم؟ علل آن را شرح دهید.
۱۲. چند نمونه از کاربرد (تئوریک و عملی) رابطه کلایپرون را بنویسید.
۱۳. پدیده جوش، دمای اشباع و فشار اشباع را تعریف کنید.
۱۴. فشارسنج فشار چه نقطه‌ای را نشان می‌دهد؟
۱۵. آیا به کمک دو مشخصه فشار و دما می‌توان حالت یک ماده خالص را معین نمود؟
۱۶. آیا ماده مورد آزمایش خالص بود؟ (چرا باید ماده مورد آزمایش خالص باشد).
۱۷. دلیل تخلیه هوا را قبل از شروع آزمایش بیان کنید.
۱۸. منحنی‌های بدست آمده از نتایج آزمایش را با منحنی‌های بدست آمده از طریق اطلاعات جدول مقایسه کنید.
۱۹. علت حلقوی بودن لوله ارتباطی فشارسنج به دیگ چیست؟
۲۰. دلیل تخلیه بخار از دیگ قبل از انجام آزمایش چیست؟

مثال حل شده :

گرمای نهان تبخیر بخار آب را در دمای 25°C به کمک معادله کلایپرون بدست آورید.

$$\frac{dP}{dT} = \frac{h_{fg}}{Tv_{fg}} \quad \text{حل :}$$

به کمک جدول بخار آب به ازاء $T = 25^{\circ}\text{C}$ مقادیر مربوطه عبارتند از:

$$\begin{cases} T_B = 20^{\circ}\text{C} \Rightarrow P_B = 2.34 \text{ kPa} \\ T_B = 30^{\circ}\text{C} \Rightarrow P_B = 4.24 \text{ kPa} \end{cases}, \quad V_{fg} @ 25^{\circ}\text{C} = 43.3 \text{ m}^3/\text{kg}$$

با استفاده از معادله کلایپرون، خواهیم داشت :

$$\frac{DP}{DT} = \frac{4.24 - 2.34}{30 - 20} = \frac{1.9}{10} = 0.19$$

$$0.19 = \frac{h_{fg}}{(25 + 237) \times 43.3} \Rightarrow h_{fg} = 2451.6$$

که در مقایسه با مقدار تئوری از جدول $h_{fg} = 2442$ مقدار 0.4 درصد اختلاف دارد.

فشار نسبی (bar)	شیب اندازه گیری شده dT/dP	شیب محاسبه شده Tv_{fg}/h_{fg}
۱		
۲		
۳		
۴		
۵		
۶		
۷		
۸		
۹		
۱۰		

آزمایش شماره ۳

کمپرسور دو مرحله‌ای

هدف :

به دست آوردن مشخصات کارکرد یک کمپرسور رفت و برگشتی دو مرحله ای محاسبه توان و راندمان های مختلف آن

مقدمه :

برای فشرده کردن گاز یا بخار که در صنایع و تأسیسات مختلف نیازهای متعددی به آن است، از کمپرسور استفاده می‌شود. بسته به دبی و فشار مورد نیاز انواع مختلفی از آن بکار می‌رود. کمپرسورها چه از نوع دورانی و چه از نوع رفت و برگشتی در انواع دستگاهها و ادوات صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در هر حال هدف بالا بردن فشار هوا و یا یک گاز خاص، برای استفاده‌ای بخصوص است. اساساً برای دستیابی به نسبت فشار زیاد در محدوده نسبتاً وسیعی از دبی، از کمپرسور پیستونی یا رفت و برگشتی (*Reciprocating Compressor*) که از نوع جابجایی مثبت (*Positive Displacement*) است استفاده می‌شود. چون جریان هوای فشرده تولیدی آن حالت متناوب دارد لذا برای پیوستگی و یکنواختی جریان، ابتدا هوای فشرده خروجی آن را به یک مخزن با حجم مناسب منتقل می‌کنند و سپس مورد استفاده قرار می‌دهند.

شرح دستگاه :

دستگاه کمپرسور دو مرحله از یک کمپرسور دو مرحله ای شامل سیلندر های مرحله اول و مرحله دوم می باشد. نیروی رانش کمپرسور توسط یک موتور الکتریکی سه فاز تامین می گردد. انتقال قدرت توسط تسمه و فولی صورت می پذیرد. در خط مکش کمپرسور برای اندازه گیری مقدار هوای ورودی از یک سرعت سنج دیجیتال استفاده شده است که علاوه بر سرعت، دمای هوای ورودی را نیز اندازه گیری می نماید. سرعت و دمای هوای ورودی بر حسب واحدهای مختلف قابل دستیابی است ولی معمولاً به علت انجام محاسبات در سیستم متریک، واحد اندازه گیری دما را بر حسب درجه سانتی گراد و سرعت را بر حسب متر بر ثانیه تنظیم می نماییم.

مخزن اول که هوای مکیده شده، ابتدا وارد آن می شود، حکم ضربه گیر را دارد. هوا پس از خروج از این مخزن وارد کمپرسور مرحله اول شده و پس از فشرده شدن تا فشار معین، به سمت کمپرسور دوم هدایت می گردد. در میان راه، هوای فشرده وارد مخزن دوم که زیر میز دستگاه قرار گرفته است می شود. در این قسمت فشار هوای خروجی از کمپرسور مرحله اول توسط گیج فشار اندازه گیری می شود. این مخزن علاوه بر محل جمع شدن هوای فشرده، تا حدی باعث پایین آمده دمای هوای خروجی کمپرسور اول و ورودی کمپرسور دوم می گردد. هوا پس از ورود به سیلندر دوم (کمپرسور مرحله دوم) فشرده تر شده و وارد مخزن جمع آوری هوای فشرده می گردد. فشار نهایی هوای فشرده توسط گیج نصب شده بر روی مخزن جمع آوری هوای فشرده (مخزن سوم) اندازه گیری می شود.

چهار سنسور دمایی در چهار نقطه دستگاه (ورودی و خروجی کمپرسور اول و ورودی و خروجی کمپرسور دوم) نصب شده است که مقادیر دما را در این نقاط اندازه گیری می نمایند. هر یک از سنسورها به یک نمایشگر دیجیتال مرتبط شده اند که این نمایشگرها مقدار دماهای اندازه گیری شده را بر حسب درجه سانتی گراد نمایش می دهند.

یک میکروسویچ مکانیکی روی مخزن نهایی (مخزن جمع آوری هوای فشرده) نصب شده است که در صورت رسیدن فشار مخزن به مقدار 10 bar ، برای جلوگیری از افزایش فشار، این میکروسویچ عمل نموده و موتور از حرکت می ایستد.

تعداد دور کمپرسور در دقیقه توسط یک سنسور دور الکترونیکی اندازه گیری شده و به وسیله نمایشگر دیجیتال نمایش داده می شود.

مشخصات کمپرسورهای مرحله اول و دوم :

کمپرسور مرحله اول :

قطر پیستون : 105 mm

کورس : 55 mm

کمپرسور مرحله دوم :

قطر پیستون : 55 mm

کورس : 55 mm

اجزای دستگاه:

- ۱- کمپرسور دو مرحله
- ۲- الکتروموتور
- ۳- مخزن ضربه گیر (ورودی هوا)
- ۴- سنسور دور
- ۵- سنسور های دمایی
- ۶- گیج های فشار
- ۷- سرعت سنج دیجیتال
- ۸- پانل محل نصب نمایشگرها و کلیدها
- ۹- سنسور های مکانیکی اطمینان
- ۱۰- مخزن میانی که به عنوان خنک کننده نیز کاربرد دارد.
- ۱۱- مخزن جمع آوری هوای فشرده

روش کار با دستگاه:

- ابتدا ارتباط دستگاه با جریان برق شهر برقرار شود.
- دستگاه به وسیله کلید " روشن/خاموش دستگاه " روشن می شود.
- نمایشگرهای دیجیتال توسط کلید on/off روشن می شوند.
- الکتروموتور توسط کلید " روشن/خاموش الکتروموتور " روشن و شروع به کار می نماید.

- یک نمایشگر دیجیتال مقدار ولتاژ و آمپر مصرفی را نمایش می دهند.
- سرعت و دمای هوای ورودی به کمپرسور، توسط یک سنسور دیجیتال سرعت و دما اندازه گیری می شود و بر حسب واحد های مختلف اندازه گیری سرعت و دما، قابل مشاهده است.
- تعداد دور کمپرسور به وسیله سنسور دور اندازه گیری شده، و توسط نمایشگر دیجیتال نمایش داده می شود.
- فشار مخزن میانی و مخزن جمع آوری هوای فشرده، توسط دو گیج فشار اندازه گیری می شود.
- دمای هوای ورودی و خروجی کمپرسورهای مرحله اول و دوم توسط سنسور های دما اندازه گیری شده و توسط نمایشگر های دیجیتال مربوطه نمایش داده می شوند.

توجه شود که :

- ماکزیمم فشار کمپرسور روی $8bar$ تنظیم شده است. پس از رسیدن فشار به این مقدار، کمپرسور خاموش می شود.
- همان طور که در مراحل آزمایش آمده است، برای انجام هر یک از حالت های آزمایش ابتدا باید مخزن خالی شود.
- اگر در حین آزمایش به هر دلیلی کمپرسور خاموش شد، برای شروع مجدد آزمایش باز هم باید مخزن خالی شود تا هنگام روشن کردن دستگاه به کمپرسور فشار نیاید.

هدف :

به دست آوردن مشخصات کارکرد یک کمپرسور رفت و برگشتی دو مرحله ای محاسبه توان و راندمان های مختلف آن

تئوری و محاسبات :

کمپرسور های رفت و برگشتی مثل کمپرسورهای دوار در یک مفهوم کلی می توانند به عنوان ماشین با جریان دائمی در نظر گرفته شوند. بنابراین طبق قانون اول ترمو دینامیک کار از رابطه زیر بدست می آید :

$$W = H_1 - H_2 + \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2} + Q$$

عموماً اختلاف کمی بین سرعت های ورودی و خروجی وجود دارد بنابراین:

$$\dot{W} = \dot{m}(h_1 - h_2) + \dot{Q}$$

اگر سیال عامل یک گاز کامل باشد داریم:

$$h_1 - h_2 = C_p(T_1 - T_2)$$

۱- تعیین دبی جرمی هوای ورودی :

دبی جرمی هوای ورودی، با داشتن سرعت و دمای هوای ورودی از روی سرعت سنج دیجیتالی، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\dot{m}_{air} = \rho VA$$

V سرعت هوای ورودی به موتور، $A = (0.255)(10-2) \text{ m}^2$ مساحت لوله در قسمت ورودی هوا و ρ چگالی هوای ورودی است که با استفاده از معادله حالت گاز کامل، محاسبه می شود:

$$\rho = \frac{P}{RT}, \quad R = 0.287 \left(\frac{kJ}{kg.K} \right)$$

P فشار هوای ورودی بر حسب پاسکال و T دمای هوای عبوری از سرعت سنج بر حسب کلوین می باشد.

با داشتن دبی جرمی هوای ورودی می توان دبی حجمی آن را از رابطه زیر محاسبه نمود :

$$\dot{V}_{air} = \frac{\dot{m}_{air}}{\delta}$$

۲- محاسبه راندمان کلی کمپرسور :

الف) محاسبه توان هوایی کمپرسور :

محاسبه توان هوایی کمپرسور بر حسب شرایط SSSF در حجم کنترل :

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}(P_1 V_1 - P_2 V_2)}{n-1} = \frac{\dot{m}_{air} n R (T_1 - T_2)}{n-1}$$

n توان پلی تروپیک است که بر حسب اتلاف گرما از بدنه کمپرسور از حالت آدیاباتیک به حالت ایزوترمال میل می کند.

$$1 < n < \gamma$$

ب) محاسبه توان الکتریکی ورودی :

چون الکتروموتور از نوع AC و سه فاز می باشد، لذا در روی تابلوی برق مقدار ولت و آمپر هر فاز آن مشخص شده است. پس توان الکتریک برابر است با :

$$\dot{W}_{ele} = \sqrt{3}VI$$

راندمان کلی کمپرسور :

$$\delta_g = \frac{\dot{W}_c}{\dot{W}_{ele}}$$

۳- راندمان حجمی کمپرسور :

 V_{Lp} : حجم جابجایی پیستون کمپرسور مرحله اول V_{Hp} : حجم جابجایی پیستون کمپرسور مرحله دوم

$$\dot{V}_{Lp} = V_{Lp} \times \frac{N}{60}$$

$$\dot{V}_{Hp} = V_{Hp} \times \frac{N}{60}$$

$$\eta_{vol1} = \frac{\dot{V}_{air}}{\dot{V}_{Lp}}$$

$$\eta_{vol2} = \frac{\dot{V}_{air}}{\dot{V}_{HP}}$$

۴- محاسبه توان پلی تریپیک یا اندیس تراکم (n):

در تحول آدیاباتیک داریم:

$$PV^n = cte \rightarrow p_1 V_1^n = p_2 V_2^n$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

با داشتن P_2, P_1, T_2, T_1 توان پلی تریپیک (n) محاسبه می شود.

۵- محاسبه کار واقعی انجام شده:

تعاریف:

$$P_1 = P_{atm} + P_{suction} = P_{atm} \quad \text{فشار ورودی:}$$

$$P_2 = P_{atm} + P_2(\text{gauge}) \quad \text{فشار میانی:}$$

$$P_3 = P_{atm} + P_3(\text{gauge}) \quad \text{فشار مخزن:}$$

$$r_1 = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{نسبت تراکم مرحله اول:}$$

$$r_2 = \frac{P_3}{P_2} \quad \text{نسبت تراکم مرحله دوم:}$$

$$r = \frac{P_3}{P_1} \quad \text{نسبت تراکم کلی:}$$

کار انجام شده در هر سیکل تراکم کم فشار (low pressure) سیلندر اول به صورت زیر محاسبه می شود.

$$W_{Lp} = \frac{n}{n-1} \left[p_1 V_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \text{ J/cycle}$$

کار انجام شده در هر سیکل تراکم پر فشار (High pressure) سیلندر دوم به صورت زیر محاسبه می شود.

$$W_{Hp} = \frac{n}{n-1} \left[p_2 V_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \text{ J/cycle}$$

در نتیجه کار واقعی انجام شده کل از جمع کار سیلندر اول و دوم بدست می آید:

$$W = W_{Lp} + W_{Hp}$$

۶- توان اندیکاتوری :

$$IP = W \times \frac{N}{60} (\text{watt})$$

۷- توان ایزوترم :

ابتدا کار ایزوترم را محاسبه می نماییم :

$$W_{iso} = p_1 V_1 \left[\ln \left(\frac{p_3}{p_1} \right) \right] \quad (J/cycle)$$

حال توان ایزوترم از رابطه زیر بدست می آید :

$$P_{iso} = W_{iso} \times \frac{N}{60} \quad (\text{watts})$$

۸- محاسبه راندمان ایزوترم :

$$\eta_{iso} = \frac{\text{توان ایزوترم}}{\text{توان اندیکاتوری}} = \frac{P_{iso}}{IP}$$

۹- محاسبه گرمای از دست داده شده در خنک کن (مخزن میانی) :

$$Q_{2-3} = m_{air} c_p (T_2 - T_3)$$

$$C_p = 100035 \text{ } \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$$

و یا :

$$\dot{Q}_{2-3} = \dot{m}_{air} C_p (T_2 - T_3)$$

روش انجام آزمایش :

دستگاه را روشن نمایید. نمایشگر سرعت هوا را نیز روشن کنید. دقت کنید که واحد سرعت m/s و واحد دما $^\circ C$ باشد. شیر تخلیه زیرین مخزن را باز کنید تا فشار داخل آن صفر شده و آب موجود در آن تخلیه گردد. سپس آن را ببندید. موتور را روشن نمایید تا کمپرسور شروع بکار نموده و فشار مخزن افزایش یابد. به ازای هر $1bar$ افزایش فشار مخزن، فشار مخزن میانی، دماهای ورودی و خروجی کمپرسورها، سرعت و دمای ورودی به مخزن اول (مخزن ورودی)

هوا) را یادداشت نمایید. در هر مرحله به منظور ایجاد شرایط پایدار، توسط شیر تخلیه مخزن، فشار مخزن را ثابت نمایید.

فشار هوای ورودی به کمپرسور اول : $P_1 = P_{atm}$

جدول ۱

فشار نسبی مخزن نهایی $P_3 (bar)$	فشارنسبی مخزن میانی $P_2 (bar)$	دمای هوای ورودی $^{\circ}C$	سرعت هوای ورودی $V(m/s)$	$T_1 (^{\circ}C)$	$T_2 (^{\circ}C)$	T_3	T_4	دور کمپرسور $N(RPM)$
۱								
۲								
۳								
۴								
۵								
۶								
۷								

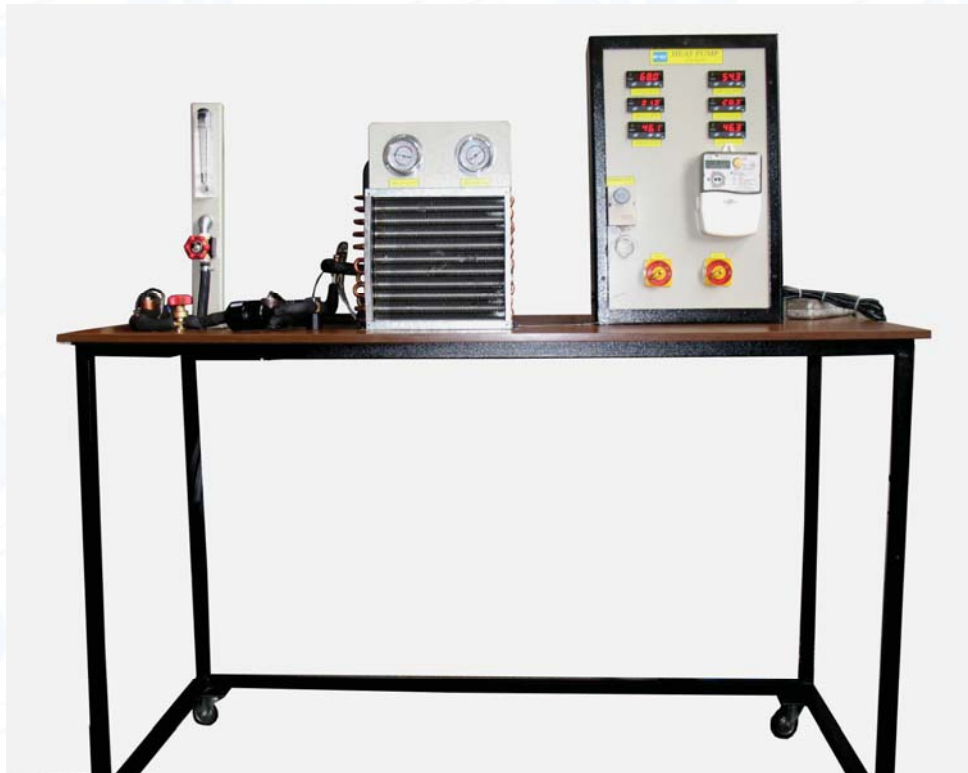
توجه : در محاسبات دما را بر حسب واحد کلوین وارد نموده و فشار نسبی گیج را به فشار مطلق تبدیل نموده و محاسبات را انجام دهید.

آزمایش شماره ۴

پمپ حرارتی

هدف :

آشنایی با اجزای اصلی یک پمپ حرارتی صنعتی
 تعیین ضریب عملکرد پمپ حرارتی
 شناخت پارامترهای تأثیرگذار بر روی ضریب عملکرد
 بررسی سیکل بر روی نمودارهای ترمودینامیکی و مقایسه سیکل واقعی با سیکل ایده آل



شکل ۱: دستگاه پمپ حرارتی

مقدمه :

پمپ حرارتی ماشینی است که اساس کار آن جذب گرما از یک منبع با درجه حرارت پائین در اوپراتور و تحویل این گرما در کندانسور است. پمپ حرارتی برای گرم کردن فضاهای مختلف یا آب گرم خانه مناسب است. با توجه به قابلیت هواسازی راحت تر و مناسب تر با کمک این سیکل ها، امروزه کاربرد بیشتری یافته اند.

طبق قانون دوم ترمودینامیک برای انتقال گرما از یک محیط سرد به یک محیط گرم باید کار وارد سیستم شود. با بررسی سیکل تبرید تراکمی، به وضوح مشاهده می شود که انرژی گرمایی تولید شده توسط پمپ حرارتی از کار ورودی به آن بیشتر است. بنابراین در سیستم های گرمایش به منظور کاهش انرژی مصرفی (نسبت به سیستم هایی نظیر بخاری برقی و ...) می توان از پمپ حرارتی استفاده نمود. منبع درجه حرارت پایین در اوپراتور، عموماً در عمل آب یا هواست. اما می توان از منابع دیگری مانند تشعشع خورشیدی، بخار آب فشار پایین، دودکش یا گازهای خروجی ماشین های حرارتی نیز استفاده نمود.

با شناخت پارامترهای مختلف می‌توان با در نظر گرفتن تمامی مشکلات و محدودیت‌ها بهترین شرایط کاری برای یک سیکل تبرید و یا پمپ حرارتی بدست آورد.

شرح دستگاه :

این سیستم دارای اجزای اصلی یک پمپ حرارتی صنعتی و یا سیکل معکوس آن یعنی تبرید تراکمی صنعتی است که با توجه به قابلیت هواسازی راحت‌تر و مناسب‌تر با کمک این سیکل‌ها، امروزه کاربرد بیشتری یافته‌اند. از آنجا که در این پمپ گرما از هوا به آب داده می‌شود، پمپ حرارتی هوا به آب نامیده می‌شود.

سیال عامل در این پمپ حرارتی $R134$ می‌باشد. منبع با دمای پایین در اوپراتور هوای اتمسفر است، بدین معنی که در اوپراتور حرارت از هوای اتمسفر به $R134$ منتقل می‌شود و $R134$ تبخیر می‌گردد. سپس بخار اشباع با فشار کم وارد کمپرسور شده و در یک فرآیند برگشت‌پذیر و آدیاباتیکی، فشار افزایش می‌یابد. در کندانسور بخار داغ $R134$ گرمای نهان خود را به آب منتقل نموده و تقطیر می‌شود. مایع اشباع در یک فرآیند آنتالپی ثابت توسط شیر انبساط، منبسط شده و سپس وارد اوپراتور می‌گردد و دوباره سیکل تکرار می‌شود.

شیر انبساط از نوع ترمو استاتیکی است. سنسورهای دما دیجیتال هستند و دبی آب به وسیله روتامتر اندازه‌گیری می‌شود. اگر بار کمپرسور از حد مجاز بیشتر شود توسط سیستم‌های حفاظتی، کمپرسور خاموش می‌شود و در صورت رفع اشکال دوباره بکار می‌افتد. مطلب قابل توجه این است که بخار ورودی به کمپرسور باید تقریباً به میزان $5-10\text{ k}$ سوپرهیت (ما فوق داغ) باشد. یعنی T_1 دمای $R134$ در ورود به کمپرسور، باید $5-10\text{ K}$ بالاتر از دمای اشباع در فشار اوپراتور باشد. (این امر هم به این خاطر است که ورودی به کمپرسور فاز گازی باشد).

اجزای دستگاه :

- ۱- اوپراتور (هوایی)
- ۲- کمپرسور
- ۳- کندانسور (پوسته و لوله $shell \& tube$)
- ۴- شیر انبساط ($expansion\ valve$)
- ۵- فیلتر درایر جهت جذب رطوبت و ناخالصی‌ها
- ۶- نمایشگر دیجیتال توان (ولتاژ و جریان)
- ۷- گیج فشار (دو عدد)
- ۸- سنسورهای دمایی در ۶ نقطه
- ۹- نمایشگرهای دیجیتال دما
- ۱۰- فن
- ۱۱- ترموستات
- ۱۲- کلید روشن و خاموش کردن دستگاه
- ۱۳- کلید روشن و خاموش کردن فن
- ۱۴- روتامتر جهت محاسبه دبی آب بر حسب لیتر بر دقیقه

اعدادی که فشارسنج ها نشان می دهند، مربوط به فشار قبل از شیر انبساط و فشار خروجی اواپراتور می باشد. نمایشگرهای دیجیتالی دما نیز، دمای گاز ورودی به کندانسور، گاز خروجی از کندانسور، گاز ورودی به اواپراتور، گاز خروجی از اواپراتور، آب ورودی به کندانسور و آب خروجی از کندانسور را نشان می دهند.

طریقه روشن کردن دستگاه :

۱. شیر ورودی آب را به مقدار زیادی باز کنید.
 ۲. کلید اصلی را روشن کنید.
 ۳. ترموستات را روی درجه حرارت دلخواه تنظیم کنید.
- بعد از اینکه نمایشگرهای درجه حرارت و فشار، اعداد ثابتی را نشان دادند می توان آزمایش را شروع کرد.

طریقه خاموش کردن دستگاه :

قبل از خاموش کردن دستگاه دبی آب کندانسور را به مدت ۲ تا ۳ دقیقه افزایش دهید. سپس دستگاه را خاموش کنید و پس از چند دقیقه شیر آب کندانسور را ببندید.

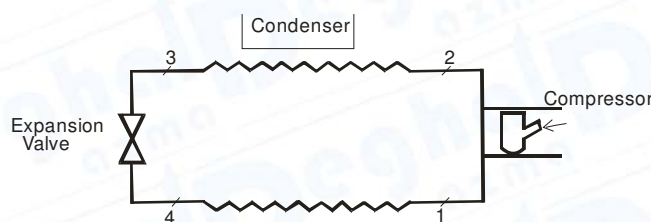
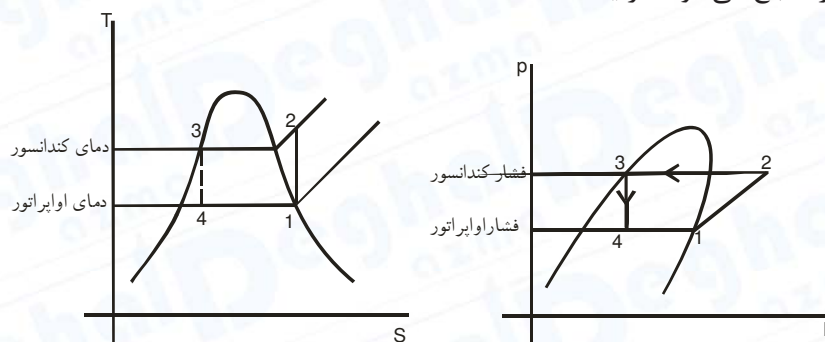
در تمام آزمایش ها به خاطر داشته باشید که برای حفاظت دستگاه، ابتدا شیر آب کندانسور را باز نمایید تا آب خنک کننده کندانسور جریان داشته باشد. سپس کمپرسور روشن شود.

هدف :

آشنایی با اجزای اصلی یک پمپ حرارتی صنعتی
 تعیین ضریب عملکرد پمپ حرارتی
 شناخت پارامترهای تأثیرگذار بر روی ضریب عملکرد
 بررسی سیکل بر روی نمودارهای ترمودینامیکی و مقایسه سیکل واقعی و ایده آل

تئوری آزمایش :**سیکل تبرید تراکمی :**

شکل (۱) سیکل ایده آل تبرید تراکمی را نشان می دهد (۱-۲-۳-۴-۱). بخار اشباع با فشار کم وارد کمپرسور می شود در یک فرآیند برگشت پذیر و آدیاباتیکی، فشار افزایش می یابد (فرآیند ۱-۲) سپس در یک فرآیند فشار ثابت درون کندانسور گرما از دست می دهد (فرآیند ۲-۳) و به صورت مایع اشباع کندانسور را ترک می کند. مایع اشباع در یک فرآیند آنتالپی ثابت ($h_3 = h_4$) منبسط می شود (فرآیند ۳-۴). مخلوط مایع و بخار در اوپراتور در یک فرآیند فشار ثابت تبدیل به بخار اشباع می شود (فرآیند ۴-۱).



شکل ۱ : سیکل ایده آل تبرید تراکمی

ضریب عملکرد :

ضریب عملکرد یک سیکل تبرید عبارت است از نسبت ظرفیت تبرید به کار کمپرسور.

$$\beta = \frac{q_L}{w_C} = \frac{q_{4-1}}{w_{1-2}}$$

اگر سیکل برای یک پمپ حرارتی بکار رود ضریب عملکرد عبارت است از نسبت حرارت دفع شده به کار کمپرسور.

$$\beta = \frac{q_h}{w_c} = \frac{q_{2-3}}{w_{1-2}}$$

که در این روابط :

$q_L = h_1 - h_4$ گرمای تبادل شده در اوپراتور بر واحد جرم

$q_h = h_2 - h_3$ گرمای تبادل شده در کندانسور بر واحد جرم

$w_c = h_2 - h_1$ کار ورودی به کمپرسور بر واحد جرم

$$\beta = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

بنابراین ضریب عملکرد یک پمپ حرارتی عبارتست از :

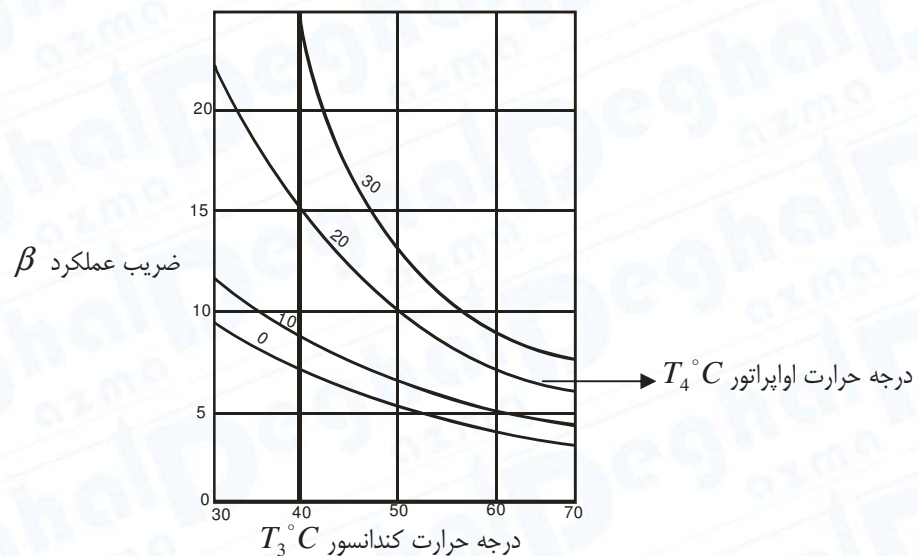
$$\beta = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

و ضریب عملکرد یک سیکل تبرید هم از این رابطه به دست می‌آید :

تاثیر دمای کندانسور T_3 (یا فشار اشباع هم‌ارز این دما) و دمای اوپراتور T_4 بر روی ضریب عملکرد در سیکل ایده‌آل پمپ حرارتی در شکل (۲) نشان داده شده است.

- برای محاسبه دبی مبرد در صورت لزوم می‌توان از موازنه انرژی در کندانسور استفاده نمود. (در هنگام محاسبه تغییر آنتالپی مبرد دقت به تغییر فاز مبرد داشته باشید).

$$\dot{m}_r (h_2 - h_3) = \dot{m}_w C_w (T_6 - T_5)$$



شکل ۲: تاثیر دمای کندانسور و اوپراتور بر روی ضریب عملکرد

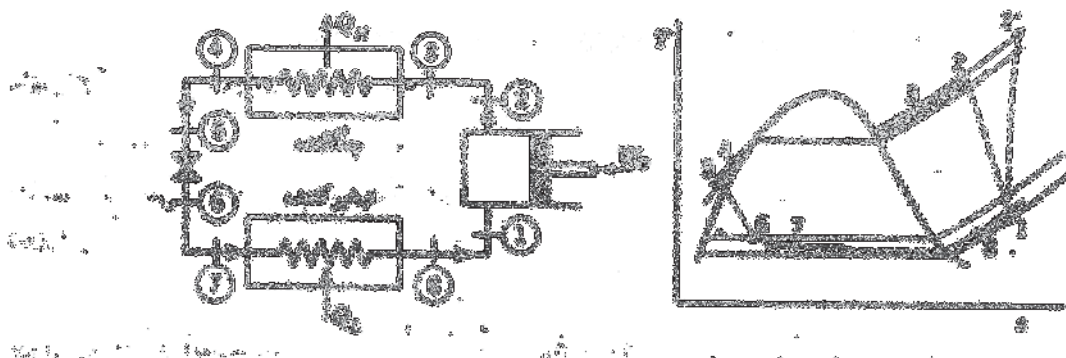
همان‌طور که می‌دانیم تغییر در فشار یا دمای عملکردی کندانسور، اوپراتور و میزان سوپرهیت بودن مبرد در ورودی به کمپرسور و ... عواملی هستند که بر روی ضریب عملکرد تاثیرگذار می‌باشند.

انحراف سیکل تبرید تراکم بخار حقیقی از سیکل ایده‌آل :

بدلیل افت‌های فشار ناشی از جریان سیال و نیز تبادل حرارت با محیط، سیکل تبرید حقیقی از سیکل ایده‌آل انحراف خواهد داشت. سیکل حقیقی می‌تواند به سیکل شکل (۳) نزدیک شود.

احتمالاً بخار ورودی به کمپرسور به صورت مافوق گرم خواهد بود. در طی فرآیند تراکم، بازگشت ناپذیری‌ها و تبادل حرارت با محیط (با توجه به درجه حرارت مبرد و محیط) صورت خواهد گرفت. بنابراین در طی این فرآیند، انتروپی ممکن است افزایش یا کاهش یابد. بازگشت ناپذیریها و انتقال حرارت به مبرد، موجب افزایش انتروپی می‌شود و انتقال حرارت از مبرد موجب کاهش انتروپی می‌گردد. این احتمالات با دو خطچین 1-2 و 1-2'' نشان داده شده است. فشار مایع خروجی از چگالنده کمتر از فشار بخار ورودی به آن می‌باشد و درجه حرارت مبرد در چگالنده مقداری بیشتر از درجه حرارت محیطی که با آن تبادل حرارت می‌کند خواهد بود. معمولاً درجه حرارت مایع خروجی از چگالنده کمتر از درجه حرارت اشباع است و احتمال دارد که مقدار آن در لوله‌های بین چگالنده و شیر انبساط، افت بیشتری نیز داشته باشد. این امر نمایانگر منفعت است زیرا در اثر این انتقال حرارت، مبرد با آنتالپی کمتری وارد تبخیر کننده می‌شود و می‌توان در تبخیرکننده مقدار حرارت بیشتری به مبرد انتقال داد.

در حین جریان یافتن مبرد از درون تبخیرکننده مقداری افت فشار روی خواهد داد. امکان دارد مبرد در هنگام خروج از تبخیرکننده کمی مافوق گرم باشد. همچنین در اثر انتقال حرارت از محیط به لوله بین تبخیرکننده و کمپرسور درجه حرارت مبرد می‌تواند افزایش یابد. این انتقال حرارت نشان‌دهنده یک نوع افت است زیرا در اثر افزایش حجم مخصوص سیال ورودی به کمپرسور، کار کمپرسور نیز افزایش خواهد یافت.



شکل ۳: سیکل واقعی تبرید تراکم

طریقه روشن کردن دستگاه :

۱. شیر ورودی آب را به مقدار زیادی باز کنید.
۲. کلید اصلی را روشن کنید.
۳. ترموستات را روی درجه حرارت دلخواه تنظیم کنید.

بعد از اینکه نشان دهنده‌های درجه حرارت و فشار، اعداد ثابتی را نشان دادند می‌توان آزمایش را شروع کرد. در تمام آزمایش‌ها به خاطر داشته باشید که برای حفاظت دستگاه، ابتدا شیر آب کندانسور را باز نمایید تا آب خنک کننده کندانسور جریان داشته باشد. سپس کمپرسور روشن شود.

طریقه خاموش کردن دستگاه :

قبل از خاموش کردن دستگاه دبی آب کندانسور را به مدت ۲ تا ۳ دقیقه افزایش دهید. سپس دستگاه را خاموش کنید و پس از چند دقیقه شیر آب کندانسور را ببندید.

روش انجام آزمایش :**آزمایش اول :**

هدف : شناخت پارامترهای تأثیرگذار بر روی ضریب عملکرد.

مراحل آزمایش :

- مطابق دستورالعمل فوق دستگاه را روشن نمایید.
- بسته به شرایط هوایی محل آزمایش، دبی آب کندانسور را به حدی باز نمایید که اختلاف دمای آب ورودی (T_5) و خروجی (T_6) از کندانسور حداقل ۱ درجه باشد
- صبر کنید تا دستگاه به شرایط دائم برسد. سپس (T_5, T_6) و دمای مبرد (T_1, T_2, T_3, T_4) و همچنین فشار کندانسور و اواپراتور را در جدول (۱) یادداشت نمایید.
- در هر مرحله دبی آب را 1 Lit/min کاهش دهید و مراحل فوق را تکرار نمایید.

خواسته های آزمایش اول :

۱. در تمام دبی های جدول فوق، قدرت ورودی به کمپرسور و فن، گرمای خروجی و ضریب عملکرد را محاسبه نمایید. (راهنمایی : گرمای خروجی از مبرد در کندانسور با صرف نظر از افت ها، معادل گرمای داده شده به آب سرد کن کندانسور می باشد).
۲. با تغییر دبی آب ورودی به محفظه کندانسور، سیکل مبرد دچار تغییراتی می شود. علت این تغییرات را ذکر کنید. همچنین پارامترهایی را که از این تغییر تأثیر می پذیرند را با دقت در اعدادی که در جدول فوق ثبت کرده اید ذکر نمایید.
۳. تغییر دبی آب ورودی به محفظه کندانسور چه تأثیری بر فشار عملکردی اواپراتور و کندانسور دارد؟

جدول داده ها و محاسبات

	آزمایش اول			آزمایش دوم		
	۱	۲	۳	۱	۲	۳
قدرت ورودی $P(kw) = V.I$						
فشار گاز خروجی از اوپراتور P_1						
فشار گاز قبل از شیر EXP P_2						
دمای گاز خروجی از اوپراتور $T_1 (^{\circ}C)$						
دمای گاز ورودی به کندانسور $T_2 (^{\circ}C)$						
دمای گاز خروجی از کندانسور $T_3 (^{\circ}C)$						
دمای گاز ورودی به اوپراتور $T_4 (^{\circ}C)$						
دبی جرمی آب ورودی به کندانسور $\dot{m}_w (Lit / min)$						
دمای آب ورودی به کندانسور $T_5 (^{\circ}C)$						
دمای آب خروجی از کندانسور $T_6 (^{\circ}C)$						
گرمای خروجی (j/sec)						
ضریب عملکرد پمپ حرارتی β						

آزمایش دوم:

هدف: مقایسه سیکلهای واقعی و ایده‌آل.

مراحل آزمایش:

- دبی آب کندانسور را در یکی از حالت‌های متوسط قرار دهید. (حدود ۴ لیتر بر دقیقه)
- کمپرسور و فن را روشن کنید.
- چند دقیقه صبر کنید تا شرایط دائم بر دستگاه حاکم شود. (حدوداً ۱۰ دقیقه)
- دماها و فشارهای مربوط به مبرد (دماهای T_1, T_2, T_3, T_4 و هر دو فشار کندانسور و اوپراتور) موجود بر روی دستگاه را یادداشت نمایید.

– مراحل زیر را در یکی از دبی‌های میانی انجام دهید. در این مورد فرض های زیر انجام می‌شود :

الف) کاهش فشار در کندانسور قابل چشم‌پوشی است ($P_2 = P_3$).

ب) فرآیند انبساط یک فرایند آدیاباتی است ($h_3 = h_4$).

برای مقایسه بین سیکل ایده‌آل و سیکل واقعی در یک دیاگرام $P-h$ یک کپی از این نمودار تهیه نمایید و نقاط زیر را روی آن مشخص کنید :

نقطه ۱ : تقاطع بین P_1 و T_1

نقطه ۲ : تقاطع بین P_2 و T_2

نقطه ۲s : روی خط آنتروپی ثابت از نقطه ۱ تا فشار P_2 حرکت کنید.

نقطه ۳ : تقاطع P_3 و T_3 (در کندانسور فرآیند فشار ثابت است) $P_3 = P_2$.

نقطه ۴ : روی خط آنتالپی ثابت از نقطه ۳ تا دمای T_4 حرکت کنید.

نقاط ۱، ۲، ۳، ۴ و همچنین ۲s و ۳ را به هم متصل نمایید.

فرآیند ۲-۳ :

در این فرآیند ابتدا بخار $Super Heat$ و سپس به ترتیب تقطیر و $sub cooled$ می‌شود. در اینجا مقدار گرما بر واحد جرم $h_2 - h_3$ از مبرد به آب منتقل می‌شود که این خروجی قابل استفاده پمپ حرارتی است.

فرآیند ۳-۴ :

فرآیند آنتالپی ثابت است ($h_3 - h_4$) البته بدلیل انتقال حرارت در شیر انبساط، مقدار h_4 کمی بیشتر از مقدار h_3 است که از این تفاوت صرف‌نظر می‌نماییم. در فرآیند انبساط ($3-4$) $R134$ از مایع فشار بالا تبدیل به مایع اشباع فشار پایین با درصدی از بخار می‌شود.

فرآیند ۴-۱ :

با انتقال حرارت از محیط به $R134$ در اواپراتور، آنتالپی $R134$ از h_4 به h_1 تبدیل می‌شود و سوپرهیت (فوق داغ) می‌گردد. حرارت تبادل شده (بر واحد جرم) مساوی $h_1 - h_4$ است. دقت کنید که افت فشار در لوله‌ها و مسیر اواپراتور وجود دارد. در ادامه به عنوان یکی از خواسته‌های آزمایش از شما خواسته می‌شود میزان این افت فشار را به دست آورید.

خواسته‌های آزمایش دوم :

۱- بر روی یک کپی از منحنی $P-h$ نقاط مربوط به عملکرد سیکل را مشخص نمایید و آن را با سیکل ایده‌آلی

که بین فشار کندانسور و اواپراتور سیکل واقعی کار می‌کند، مقایسه نمایید. علت اختلاف‌های موجود را توضیح دهید.

۲- تغییرات فشار در طول اواپراتور را در صورت وجود مشخص نمایید. علت آن را توضیح دهید.

آزمایش شماره ۵

جریان تراکم‌پذیر در نازل

هدف :

آشنایی با رفتار جریان قابل تراکم در یک نازل



شکل ۱ : دستگاه تست نازل

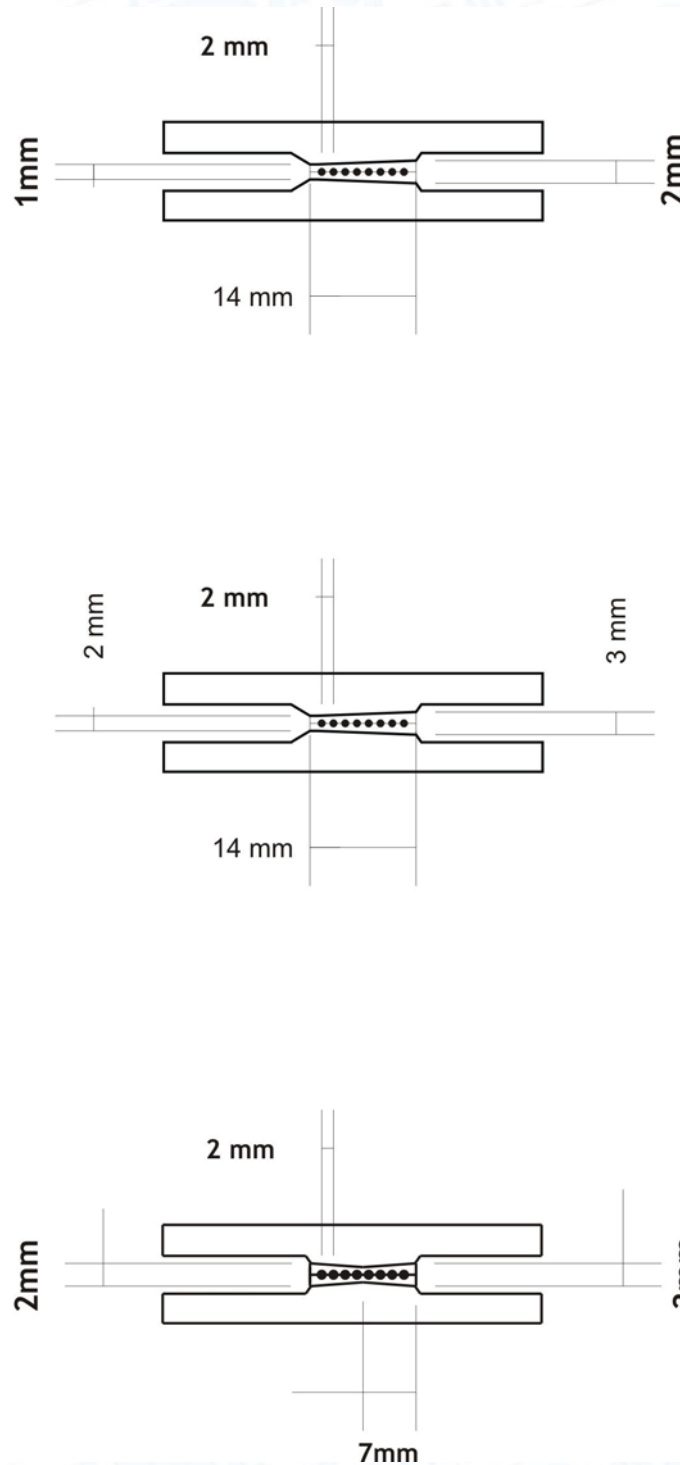
مقدمه :

معمولاً تمام سیالات تراکم پذیرند. اگر جرم مخصوص سیال در جریانی چندان تغییر نکند، می توان آن را جریان تراکم نا پذیر در نظر گرفت. بر عکس اگر تغییرات جرم مخصوص سیال قابل اغماض نباشد، جریان تراکم پذیر خواهد بود. در جریان گازها، معمولاً وقتی سرعت جریان گاز، یا سرعت جسم غوطه ور در گاز، برابر و یا بیشتر از سرعت صوت در همان گاز باشد، تغییرات جرم مخصوص زیاد و جریان تراکم پذیر در نظر گرفته می شود. همچنین در اثر تغییر سرعت ناگهانی گاز و یا تغییر ارتفاع خیلی زیاد آن، باز جریان تراکم پذیر خواهد بود. سرعت صوت بر حسب خواص ترمودینامیکی تعریف می شود و اهمیت عدد ماخ به عنوان یک متغیر در جریان تراکم پذیر، مورد توجه است.

یک شیپوره (nozzle) وسیله ای است که انرژی جنبشی سیال را در یک فرایند آدیاباتیک افزایش می دهد. افزایش انرژی جنبشی باعث کاهش فشار می شود و به دلیل تغییر در سطح مقطع جریان، به وجود می آید.

شرح دستگاه :

دستگاه تست نازل، دارای سه نوع نازل همگرا، واگرا و همگرا-واگرا می باشد که در مسیر جریان هوای فشرده بر روی هر نازل ۸ نقطه به فاصله طولی 4mm از هم وجود دارد، که فشار این نقاط، توسط ۸ گیج فشار شماره گذاری شده از سمت چپ، نمایش داده می شود. نقشه نازلها در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: نقشه نازل های مورد استفاده در دستگاه

نحوه نصب نازل روی دستگاه :

نازل توسط دو مهره به دو لوله ورودی و خروجی هوا متصل می شود. همچنین به منظور ارتباط ۸ نقطه مشخص روی نازل با گیج های مربوطه، شیلنگ های هیدرولیک به ترتیب داخل فیتینگ های پنوماتیک واقع بر نقاط، قرار داده شده و با کمی فشار، در جای خود محکم می شوند. برای بیرون آوردن شیلنگ ها از داخل فیتینگ ها، هم زمان با فشار دادن قطعه پلاستیکی فیتینگ پنوماتیک، شیلنگ بیرون آورده می شود.

روش کار با دستگاه :

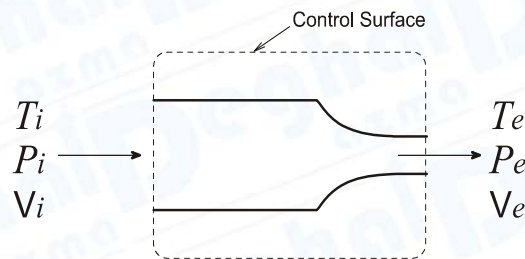
- ۱- کمپرسور تا فشار حدود ۵ الی ۶ بار شارژ شود.
- ۲- نازل مطابق روش گفته شده در قسمت "نحوه نصب نازل" ، روی دستگاه نصب می شود.
- ۳- کمپرسور به وسیله شیلنگ هیدرولیک به قسمت ورودی هوای دستگاه متصل می شود.
- ۴- به وسیله کلید *on/off* دستگاه روشن می شود.
- ۵- توسط شیر قطع و وصل هوا، جریان برقرار می گردد.
- ۶- فشار ورودی به وسیله شیر تنظیم دبی هوا، تنظیم می شود.
- ۷- دو گیج فشار، با محدوده اندازه گیری *bar (0-10)* ، فشار هوای ورودی به نازل و فشار هوای خروجی از نازل را نشان می دهند.
- ۸- فشار نقاط ۱ تا ۸ نازل از روی گیج های ۱ تا ۸ با محدوده اندازه گیری *bar -1* تا *bar 9* قابل رؤیت است.
- ۹- دمای ورودی و خروجی نازل، توسط سنسور های دمایی اندازه گیری شده و به وسیله نمایشگر های دیجیتال دما با دقت *0.1* درجه سانتی گراد نمایش داده می شود.
- ۱۰- دبی هوای خروجی از نازل به وسیله فلومتر بر حسب (m^3/hr) اندازه گیری می شود.

هدف :

آشنایی با رفتار جریان قابل تراکم در یک نازل

تئوری :

شیپوره (نازل) نشان داده شده در شکل (۱) را در نظر بگیرید و فرایند را یک بعدی، آدیاباتیک با جریان پایدار- حالت پایدار برای یک سیال تراکم پذیر فرض کنید.



شکل ۱: طرح یک نازل

اثر تغییر سطح مقطع در جریان های ایزنتروپیک یک بعدی :

برای یک جریان ایزنتروپیک می توان نشان داد که تغییرات فشار سیال بر حسب مساحت جریان به شکل زیر است :

$$\frac{dA}{A} = \frac{dP}{\rho V^2} (1 - M^2) \quad (۱)$$

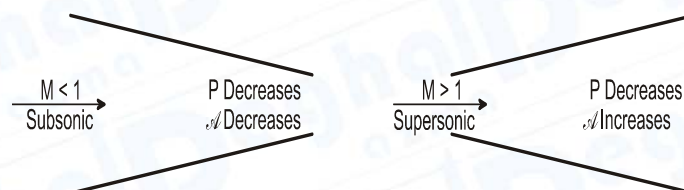
معادله (۱) بسیار مهم است، زیرا از آن می توان نتایج زیر را در مورد شکل صحیح شیپوره ها و پخش کننده ها بدست آورد.

برای یک شیپوره، $dP < 0$ است. بنابراین :

برای یک شیپوره فروصوت، $M < 1$ ، $dA < 0$ و شیپوره همگرا ست.

برای یک شیپوره فراصوت، $M > 1$ ، $dA > 0$ و شیپوره واگرا ست.

هنگامی که $M=1$ بوده و $dA=0$ باشد، دستیابی به سرعت صوت تنها در گلوگاه یک شیپوره امکان پذیر است. این نتایج در شکل زیر خلاصه شده اند.



شکل ۲: تغییر مساحت لازم برای شیپورها

برای تغییرات سرعت، چگالی، فشار و دما هم می توان نوشت :

$$\frac{dV}{V} = \left(\frac{-1}{1-M^2} \right) \frac{dA}{A} \quad (2)$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = (-M^2) \frac{dV}{V} \quad (3)$$

$$\frac{dP}{P} = \left(\frac{kM^2}{1-M^2} \right) \frac{dA}{A} \quad (4)$$

$$\frac{dT}{T} = \left(\frac{(k-1)M^2}{1-M^2} \right) \frac{dA}{A} \quad (5)$$

روابط مربوط به جریان ایزنتروپیک گاز ایده آل :

در بررسی مسایل مربوط به جریان، بسیاری از مطالب و معادلات را می توان با معرفی مفهوم حالت سکون ایزنتروپیک و خواص مربوط به آن ساده کرد. حالت سکون ایزنتروپیک حالتی است که سرعت آن در یک فرآیند آدیاباتیک به صفر می رسد، به دست خواهد آورد. در این قسمت روابط بین مشخصه های جریان بر حسب شرایط سکون را بیان می کنیم:

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{K-1}{2} M^2 \quad (6)$$

برای یک فرآیند ایزو نتروپیک داریم :

$$\left(\frac{T_0}{T} \right)^{K/(K-1)} = \frac{P_0}{P}, \quad \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/(K-1)} = \frac{\rho_0}{\rho} \quad (7)$$

بنابراین :

$$\frac{P_0}{P} = \left[1 + \frac{(k-1)}{2} M^2 \right]^{K/(K-1)} \quad (8)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left[1 + \frac{(K-1)}{2} M^2 \right]^{1/(K-1)} \quad (9)$$

شرایط در گلوگاه شیبوره را می توان با توجه به این مطلب که در گلوگاه $M=1$ می باشد پیدا کرد. خواص در گلوگاه با علامت * مشخص شده اند.

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{k+1} \quad (10)$$

$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{K/(K-1)} \quad (11)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{1/(K-1)} \quad (12)$$

وقتی در گلوگاه $M=1$ باشد، این خواص را غالباً به عنوان فشار بحرانی، درجه حرارت بحرانی و چگالی بحرانی می‌شناسند. نسبت‌های داده شده در معادلات (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) نسبت درجه حرارت بحرانی، نسبت فشار بحرانی و نسبت چگالی بحرانی نامیده می‌شوند. جدول (۱)، این نسبت ها را برای مقادیر مختلف k نشان می‌دهد.

جدول ۱: نسبت های فشار، چگالی و درجه حرارت بحرانی برای جریان ایزونتروپیک یک گاز ایده‌آل

	$K=1.1$	$K=1.2$	$K=1.3$	$K=1.4$	$K=1.67$
P^*/P_0	0.5847	0.5644	0.6276	0.5283	0.4867
ρ^*/ρ_0	0.6139	0.6209	0.6276	0.6340	0.6497
T^*/T_0	0.9524	0.9091	0.8696	0.8333	0.7491

جریان ایزونتروپیک در شیپوره همگرا:

شیپوراه ای همگرا نظیر شکل (۳-الف) را در نظر می‌گیریم که در آن جریانی ایزونتروپیک و همگرا وجود داشته باشد. سرعت جریان را در قسمت بالا دست، به علت اندک بودن در مقابل سرعت جریان در گلوگاه، برابر با صفر فرض می‌کنیم و فشار را در آن به P_0 نمایش می‌دهیم. اگر فشار در قسمت خروجی شیپوره تا مقدار P_b کاهش یابد، می‌توانیم منحنی تغییرات فشار در داخل شیپوره را بر حسب مقدار فشار P_b ، (شکل ۳-ب، منحنی های a تا e) رسم کنیم. در این صورت با ساده سازی معادله انرژی، به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\frac{V}{c} = \left\{ \frac{2}{K-1} \left[\left(\frac{P_0}{P} \right)^{K-1/K} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (13)$$

می‌بینیم که نسبت سرعت جریان به سرعت صوت در هر مقطع فقط تابع $\frac{P_0}{P}$ است.

اگر دبی جرمی جریان را به $\dot{m}$ نمایش دهیم، مقدار آن به ازای واحد سطح گلوگاه برابر می‌شود با:

$$G = \frac{\dot{m}}{A} = \rho V = \sqrt{\frac{KP}{\rho}} \cdot \frac{2}{K-1} \left[\left(\frac{P_0}{P} \right)^{K-1/K} - 1 \right] \quad (14)$$

رابطه (۱۳) را با در نظر گرفتن رابطه (۷)، می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$G = \frac{\dot{m}}{A} = \rho V = \frac{2K}{K-1} P_0 \rho_0 \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^{2/K} - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{K+1/K} \right] \quad (15)$$

یعنی دبی جرمی واحد سطح گلوگاه نیز فقط تابعی از $\frac{P}{P_0}$ است. منحنی تغییرات $\dot{m}/\dot{m}_{\max}$ نسبت به P_b/P_0 مطابق

منحنی c در شکل (۳-ج) است که می‌بینیم اگر P_b/P_0 برابر با ۱/۰ باشد، هیچ جریانی از شیپوره عبور نمی‌کند،

مقدار $\dot{m}$ برابر با صفر می شود و فشار با x در طول شیپوره تغییر نمی کند. با کم شدن P_b از مقدار P_0 ، به تدریج بر دبی جرمی اضافه می شود. در این جریان زیر صوت، فشار استاتیک با x کاهش می یابد. هرچه پس فشار، کاهش بیشتری داشته باشد، سرعت در صفحه خروجی شیپوره افزایش می یابد تا این که نهایتاً به سرعت صوت می رسد (منحنی c). در این حالت دبی جرمی به مقدار حداکثر می رسد. جریان در شیپوره همگرا نمی تواند به سرعتی بیش از سرعت صوت شتاب داده شود. کاهش پس فشار به مقدار کمتر از مقدار مربوط به منحنی c باعث ایجاد خفگی در شیپوره می شود. تحت این شرایط، عدد ماخ در صفحه خروجی برابر ۱ می شود و مقدار فشار و دما در صفحه خروجی شیپوره برابر فشار و دمای بحرانی خواهد بود. جریان در بالادست گلوگاه فروصوتی است و نسبت A/A^* از جدول جریان ایزونتروپیک گاز کامل به دست می آید و سیال پس از خروج از شیپوره تحت شرایط فراصوتی منبسط می شود تا فشار آن از P^* به P_b برسد.

اگر نسبت فشار بحرانی را در رابطه (۱۵) قرار دهیم، حداکثر دبی جرمی (دبی بحرانی) برابر خواهد شد با :

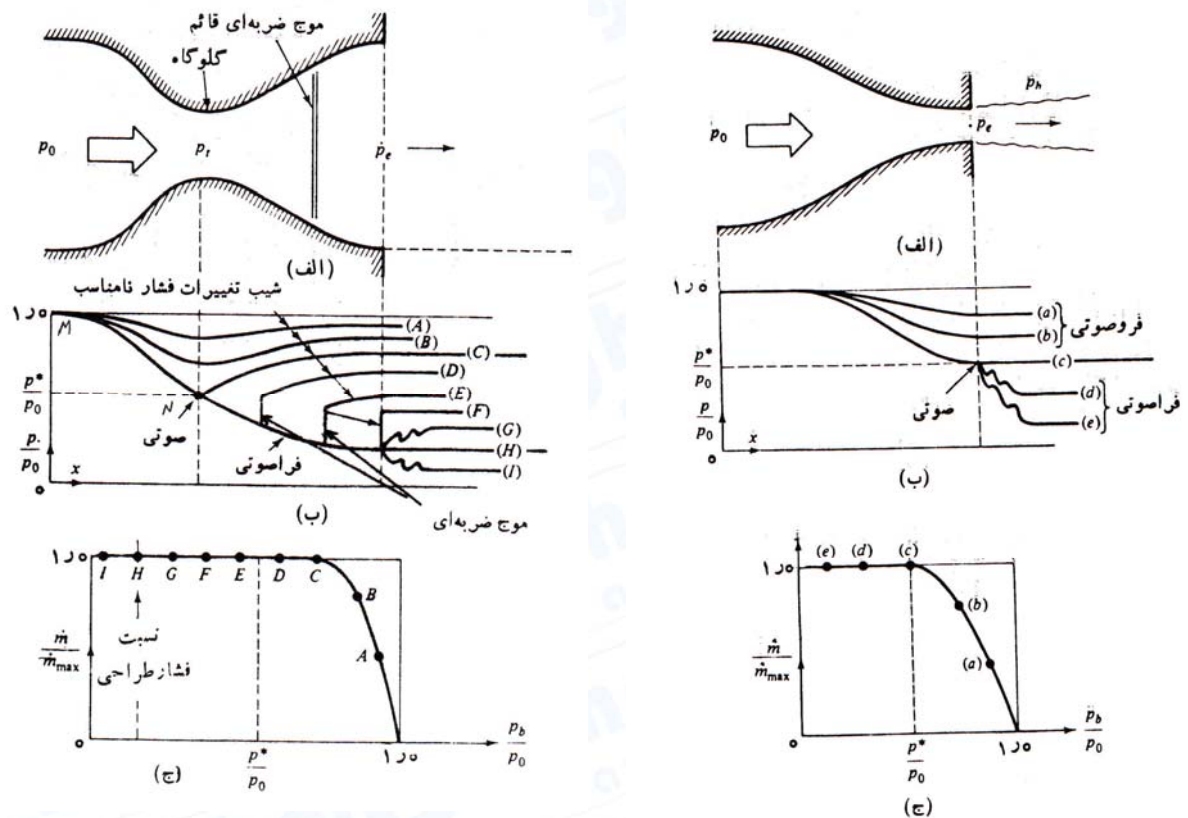
$$\dot{m}_{\max} = \dot{m}_c = \rho_c V_c A_c = A_c \sqrt{K P_0 \rho_0} \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K+1/2}{2(K-1)}} \quad (16)$$

رابطه فوق، به ازای $K=1.4$ به صورت زیر در می آید :

$$\dot{m}_{\max} = \frac{0.6847 P_0 A_c}{\sqrt{RT_0}} \quad (17)$$

وقتی فشار در پایین دست شیپوره (P_b)، از فشار بحرانی بیشتر باشد (نظیر حالات a و b در شکل ۳-ب)، جریان در سرتاسر شیپوره فروصوتی و فشار در مقطع خروجی شیپوره (P_e)، برابر با فشار قسمت خارجی آن (P_b) است. دبی جرمی در این حالت از حداکثر دبی جرمی کمتر است و مقدار آن که بر روی منحنی (۳-ج) نشان داده شده است، از رابطه (۱۵) به دست می آید.

به طور کلی، جریان تراکم پذیر در شیپوره همگرا را می توان به دو منطقه تقسیم کرد. در منطقه اول $P^*/P_0 \leq P_b/P_0 \leq 1$ است و جریان ایزونتروپیک و $P_e = P_b$ است؛ اما در منطقه دوم $P_b/P_0 < P^*/P_0$ و جریان تا گلوگاه ایزونتروپیک و بعد از گلوگاه غیر از ایزونتروپیک است و $P_e = P^* > P_b$ است (شکل ۳-ب).



شکل ۳: تغییرات فشار و دبی جرمی در شیپوره همگرا

شکل ۴: تغییرات فشار و دبی جرمی در شیپوره همگرا-واگرا

جریان ایزونتروپیک در شیپوره همگرا - واگرا:

برای تبدیل جریان فروصوتی به جریان فراصوتی، لازم است سیال از حالت همگرا به حالت واگرا عبور کند، مشروط بر اینکه در مقطع گلوگاه که مقطع حداقل است، جریان بحرانی باشد. در غیر این صورت، جریان هم در قسمت همگرا و هم در قسمت واگرا، فروصوتی خواهد بود.

اگر در بررسی جریان تراکم پذیر در داخل یک شیپوره همگرا - واگرا (شکل ۴-الف)، از سرعت بالا دست جریان چشم پوشی کنیم، مقدار فشار در آن مقطع ثابت (P_0)، ولی در قسمت پایین دست مقطع خروجی شیپوره (P_b) متغیر خواهد بود.

اگر فشار P_b برابر با فشار P_0 باشد، جریانی صورت نمی گیرد و فشار در سرتاسر شیپوره همان فشار P_0 را خواهد داشت؛ پس نسبت $P/P_0 = 1$ خواهد بود و نمودار تغییرات P/P_0 بر حسب x به صورت خطی مستقیم در می آید (شکل ۴-ب). هر گاه فشار پایین دست شیپوره (P_b) به تدریج کاهش یابد، مقدار فشار در مقطع خروجی شیپوره (P_e) نیز کاهش پیدا می کند و اگر سرعت جریان در هیچ مقطعی از شیپوره به سرعت بحرانی (صوتی) نرسد، اثر کاهش فشار به قسمت بالا دست سرایت می کند و افت فشار بیشتری را در گلوگاه سبب می شود. کاهش فشار در این حالت (منحنی های A و B)، به اندازه ای نیست که در گلوگاه جریان صوتی ایجاد کند، لذا در سرتاسر شیپوره جریان از نوع فروصوتی است و فشار

خروجی برابر با $P_e = P_b$ است. مشخصه های مختلف جریان سیال در این حالت با استفاده از روابط جریان ایزونتروپیک فروصوتی یا جدول جریان تراکم پذیر ایزونتروپیک که در پیوست کتاب های ترمودینامیک، مکانیک سیالات و دینامیک گازها موجود می باشد، به دست می آیند.

اگر مقدار فشار P_b باز هم کاهش یابد، تا آنجا که فشار در گلوگاه به P^* برسد (منحنی C در شکل ۴-ب)، A_e/A_0 درست برابر با A_e/A^* خواهد بود که به ازای عدد ماخ M_e از جدول جریان تراکم پذیر ایزونتروپیک قابل محاسبه است. جریان در گلوگاه بحرانی می شود و دبی جرمی به حداکثر خود می رسد (شکل ۴-ج). در این حالت جریان در سایر قسمت های شیپوره فروصوتی $P_e = P_b$ است.

اگر P_b به مقدار بیشتری کاهش یابد (منحنی های D تا F) در قسمت واگرا امواج ضربه ای تشکیل می شوند که به سمت بالادست جریان حرکت خواهند کرد. این امواج بر شرایط جریان در قسمت واگرا تأثیر می گذارند ولی در قسمت همگرا اثری ندارند و مقدار فشار در گلوگاه نیز برابر همان مقدار بحرانی خواهد بود؛ یعنی شرایط جریان در گلوگاه "صوتی" است؛ به طوری که منحنی MN در قسمت همگرا تغییر نمی کند.

اگر مقدار فشار P_b تا میزان P_H کاهش یابد، نسبت P_b/P_0 بر مقدار A_e/A^* منطبق خواهد بود که از جدول جریان تراکم پذیر ایزونتروپیک، به ازای عدد ماخ M_e فراصوتی به دست می آید. توزیع فشار در این حالت، نظیر منحنی MNH خواهد بود. جریان سیال در این حالت در سرتاسر شیپوره تسریعی است، به طوری که در قسمت همگرا فروصوتی، در گلوگاه بحرانی و در قسمت واگرا فراصوتی خواهد بود. در این حالت که به "نسبت فشار طراحی" موسوم است، موجی تشکیل نمی شود و مقدار دبی جرمی با استفاده از فرمول مربوط به حداکثر دبی قابل محاسبه است.

برای یک نسبت مساحت مشخص A/A^* دو حل ایزونتروپیک امکان پذیر است، یکی زیر صوت و دیگری فراصوت. برای عدد ماخ در گلوگاه، جریان زیر صوت می تواند کند شود تا به سرعت زیر صوت در خروجی برسد یا اینکه به شتاب خود ادامه دهد تا به سرعت فراصوت در خروجی برسد. منحنی C مربوط به جریان زیر صوت در خروجی است. در حالی که منحنی H مربوط به جریان فراصوت در صفحه خروجی است. بنابراین چنانچه پس فشار تا حدود مربوط به منحنی H کاهش داده شود، فشار در هر دو قسمت همگرا و واگرای شیپوره کاهش می یابد و جریان در صفحه خروجی فراصوت خواهد بود. برای پس فشارهای بین مقدارهای مربوط به منحنی های C و H یافتن جواب برای معادله های حرکت یک بعدی و ایزونتروپیک غیر ممکن است. این جریان ها مستلزم وجود امواج ضربه ای هستند که فرایند های برگشت ناپذیرند.

روش انجام آزمایش:

دستگاه کمپرسور را به ورودی متصل و کمپرسور را روشن نمایید. دقت کنید که فشار ورودی حداقل 2bar باشد. دستگاه دارای سه نازل همگرا، همگرا با گوشه های گرد و همگرا-واگرا می باشد. یکی از نازل ها را به شلنگ های هیدرولیک ورودی و خروجی نصب نموده، اتصالات گیج ها را نیز به ترتیب شماره گذاری برقرار نمایید. به وسیله کلید on/off دستگاه را روشن نموده، سپس توسط شیر قطع و وصل سریع هوا، جریان را برقرار کنید. فشار ورودی را به وسیله شیر تنظیم دبی هوا، روی فشار مورد نظر تنظیم کنید.

پس از برقراری جریان در نازل، اعداد روی گیج‌های فشار و دما، و همچنین دبی هوای خروجی را خوانده و در جدول شماره (۲) یادداشت نمایید.

آزمایش را برای دو نازل دیگر نیز تکرار نمایید.

جدول ۲: نتایج آزمایش

نازل شماره ۳	نازل شماره ۲	نازل شماره ۱
		فشار ورودی به نازل $P_i (bar)$
		فشار بعد از خروجی نازل $P_b (bar)$
		دمای ورودی به نازل $T_1 (°C)$
		دمای هوای خروجی از نازل $T_2 (°C)$
		$P_1 (bar)$
		$P_2 (bar)$
		$P_3 (bar)$
		$P_4 (bar)$
		$P_5 (bar)$
		$P_6 (bar)$
		$P_7 (bar)$
		$P_8 (bar)$
		دبی هوا (m^3/hr)

خواسته‌های آزمایش:

۱. منحنی نمایش توزیع فشار در طول شیبوره را برای هر سه نوع شیبوره رسم کنید.
۲. منحنی نمایش تغییرات سرعت، دما و عدد ماخ در طول شیبوره را رسم کنید.
۳. چرا عدد ماخ در گلوگاه شیبوره نمی‌تواند بیشتر از یک باشد؟
۴. موارد استعمال شیبوره در صنعت را بیان کنید.

مثال های حل شده:

مثال ۱:

هوا از یک مخزن بزرگ از طریق شیبوره همگرایی با مساحت مقطع خروجی 50cm^2 جریان می یابد. مخزن به قدری بزرگ است که در اثر خروج هوا از شیبوره تغییری در فشار و دمای مخزن ایجاد نمی شود. جریان را دائم و آیزنتروپیک فرض کنید. $P_r = 500\text{ kPa}$ و $T_r = 500\text{ K}$ هم چنین فرض کنید هوا رفتاری شبیه یک گاز کامل با $\gamma = 1.4$ دارد. برای پس فشارهای 0 و 125 و 250 و 375 kPa گذر جرمی جریان در شیبوره را حساب کنید.

حل :

برای $\gamma = 1.4$ نسبت فشار بحرانی 0.5283 است. بنابراین برای کلیه پس فشارهای کمتر از 264.15 kPa ، شیبوره خفه می کند. تحت این شرایط، عدد ماخ در صفحه ی خروجی برابر ۱ است، فشار در صفحه ی خروجی 264.15 kPa است (که با پس فشار برابر نیست) و دما در صفحه ی خروجی $T^* = (T^*/T_t)T_t = 0.8333(500) = 416.15\text{ K}$ است که T^*/T_t از جدول جریان تراکم پذیر آیزنتروپیک، برای $\gamma = 1.4$ به دست آمده است. گذر جرمی برای پس فشارهای 0 و 125 و 250 برابر است با :

روش اول:

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \rho AV \\ &= \frac{P_e}{RT_e} A_e M_e \sqrt{\gamma RT_e} \\ &= \frac{(264.15\text{ kN/m}^2) [(50)(10^{-4})\text{m}^2] (1)}{(0.287\text{ kN.m/kg.K})(416.7\text{ K})} \sqrt{1.4 (287\text{ N.m/kg.K})(416.7\text{ K})} \\ &= 4.519\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)\end{aligned}$$

روش دوم :

$$\begin{aligned}\dot{m} = \dot{m}_{\max} &= \frac{(0.6847)P_0 A_c}{\sqrt{RT_0}} \\ &= \frac{(0.6847)(500)(10^3)(50)(10^{-4})}{\sqrt{(287)(500)}} = 4.519\text{ kg/s}\end{aligned}$$

در پس فشار 375 kPa ، شیبوره خفه نمی کند و فشار در صفحه ی خروجی برابر پس فشار است. در $P/P_t = 0.75$ (جدول جریان تراکم پذیر آیزنتروپیک، $\gamma = 1.4$)، $M_e = 0.654$ و $T_e/T_t = 0.921$.

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \frac{(375)(50)(10^{-4})(0.654)}{(0.287)(0.921)(500)} \sqrt{(1.4)(287)(0.921)(500)} \\ &= 3.991\text{ kg/s}\end{aligned}$$

تغییرات گذر جرمی با پس فشار در (شکل ۵) دیده می شود.

برای محاسبه مقطع بحرانی در حالتی که پس فشار برابر 375 kPa باشد، A^*/A_e را از جدول خوانده، و با توجه به اینکه مقدار A_e را داریم، A^* محاسبه می شود.

محاسبه سرعت در مقطع دلخواه:

۱. در صورتی که مقدار عددی دبی جرمی را داشته باشیم با استفاده از رابطه $\dot{m} = \rho AV$ می توانیم مقدار سرعت را در مقطع مربوطه محاسبه کنیم.

۲. در صورتی که عدد ماخ مقطع مورد نظر را داشته باشیم، پس از محاسبه دما در آن مقطع با کمک جدول، سرعت را با استفاده از رابطه زیر به دست می آوریم:

$$V = Mc = M(20\sqrt{T})$$

مثال ۲:

یک شپیوره همگرا - واگرا طوری طراحی شده است که به صورت آیزونتروپیک عمل کند و عدد ماخ خروجی آن 1.5 باشد. شپیوره به یک مخزن هوا با فشار 500 kPa و دمای 500 K متصل است مساحت گلوگاه شپیوره 5 cm^2 است.

فرض کنید هوا مثل یک گاز کامل با $\gamma = 1.4$ و $R = 0.287 \text{ kJ/kg-K}$ رفتار کند.

(الف) نسبت مساحت مقطع خروجی به مساحت گلوگاه را حساب کنید.

(ب) محدوده پس فشارهای پشت که در آن شپیوره خفه می کند را به دست آورید.

(ج) برای پس فشار 450 kPa ، گذر جرمی جریان را محاسبه کنید.

(د) برای پس فشار 0 kPa ، گذر جرمی جریان را حساب کنید.

حل :

(الف) برای این که عدد ماخ در خروجی شپیوره 1.5 باشد، باید عدد ماخ در گلوگاه 1 باشد. بنابراین مساحت گلوگاه برابر A^* است. از پیوست یک برای $M=1.5$ دیده می شود که $A/A^* = 1.176$ بنابراین نسبت مساحت مقطع خروجی به مساحت گلوگاه برابر 1.176 و یا $A_e = 5.88 \text{ cm}^2$ است.

(ب) برای کلیه ی پس فشارهایی که کمتر از مقدار مربوط به منحنی C در (شکل ۴) هستند شپیوره خفه می کند.

در منحنی C، جریان صوتی در گلوگاه برقرار است و به دنبال آن در جریان زیر صوت، از سرعت جریان کاسته می شود. جواب زیر صوت برای نسبت A/A^* از جدول جریان تراکم پذیر آیزونتروپیک، به دست می آید: $M=0.61$ در این عدد ماخ $P/P_t = 0.778$ بنابراین بالاترین پس فشاری که در آن شپیوره خفه می کند برابر است با $0.778(500 \text{ kPa}) = 389 \text{ kPa}$ به عبارت دیگر برای دامنه ی $0 \leq P_b \leq 389 \text{ kPa}$ ، شپیوره خفه می کند.

(ج) در پس فشار 450 kPa ، شپیوره خفه نمی کند و در سرتاسر شپیوره جریان زیرصوت برقرار است. در این شرایط، فشار در صفحه ی خروجی شپیوره با پس فشار برابر است. از جدول جریان تراکم پذیر آیزونتروپیک، برای $p/p_t = 0.9$ ، $M = 0.390$ و $T/T_t = 0.971$. فشار در صفحه ی خروجی P_e و دما T_e به ترتیب برابر 450 kPa و 485.5 K هستند.

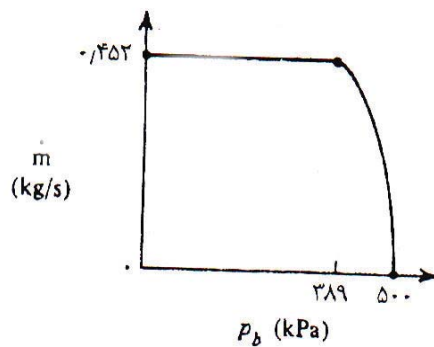
$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= \rho_e A_e V_e \\
 &= \frac{P_e}{RT_e} A_e M_e \sqrt{\gamma R T_e} \\
 &= \left[\frac{450 \text{ kN/m}^2}{(0.287 \text{ kNm/kg.K})(485.5 \text{ K})} \right] [5.88 \times 10^{-4} \text{ m}^2] \times [0.39 \sqrt{1.4(287 \text{ Nm/kg.K})(485.5 \text{ K})}] \\
 &= (3.230)(5.88 \times 10^{-4})(0.39 \times 441.7 \text{ K}) = 0.327 \text{ kg/s}
 \end{aligned}$$

(د) برای پس فشار 0 kPa ، شیپوره خفه می کند و فشار در صفحه ی خروجی آن با پس فشار برابر نیست. در این شرایط عدد ماخ در گلوگاه برابر یک است و فشار و دما در گلوگاه برابر است با:

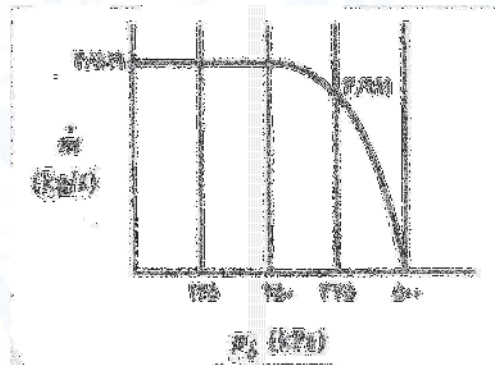
$$M = 1 \Rightarrow \begin{cases} \frac{P}{P_0} = \frac{P^*}{P_0} = 0.5283 \rightarrow P^* = 264.2 \text{ kPa} \\ \frac{T^*}{T} = 0.8333 \rightarrow T^* = 416.7 \text{ K} \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= \rho_t A_t V_t \\
 &= \frac{264.2(5 \times 10^{-4}) \sqrt{1.4 \times 0.287 \times 416.7}}{0.28 \times 416.7} = 0.452 \text{ kg/s}
 \end{aligned}$$

نتیجه ی حاصل از این مثال در (شکل ۶) رسم شده است.



شکل ۶



شکل ۵