دستورکار

آزمایشگاه ترمودینامیک

مدرس:

دکتر عباس صباحی نمینی

دانشکده فناوری‌های نوین نمین

فهرست مطالب

نحوه‌ی ارزیابی دانشجویان و جزئیات چگونگی نوشتن گزارش کار 2

آزمایش ماشین بخار..... 5

آزمایش دیگ مارست..... 18

آزمایش معادل مکانیکی گرما.....28

آزمایش موتور استرلینگ.....40

آزمایش برج خنک کننده.....56

آزمایش نازل.....94

منابع.....134

قابل توجه دانشجویان محترم

نحوه‌ی ارزیابی دانشجویان و جزئیات چگونگی نوشتن گزارش کار:

- مطالعه دستورالعمل آزمایشگاه ترمودینامیک و آشنایی با نحوه انجام آزمایش‌ها و ارتباط بین مطالب تئوری و عملی ضروری است.
- در ابتدا قبل از انجام هر آزمایش، جلساتی به تدریس مطالب تئوری مربوط به آزمایش مربوطه اختصاص می‌یابد.
- دانشجو لازم است راس ساعت مقرر در آزمایشگاه حضور داشته باشد (در صورت تاخیر بیش از 20 دقیقه، غیبت در نظر گرفته می‌شود).
- هر گروه (متشکل از سه نفر) موظف به تحویل یک گزارش کامل می‌باشد و تمام اعضاء گروه بایستی در نوشتن گزارش کار شرکت داشته باشند و نام تمام اعضاء باید به عنوان نویسندگان آورده شود. ولی با توجه به اینکه در این درس شش آزمایش انجام می‌گیرد، در هر گزارش کار بایستی نام یک نفر به عنوان نویسنده اصلی ذکر شود (یعنی هر شخص باید نویسنده اصلی دو گزارش کار باشد). پیشنهاد می‌شود در انتخآب هم‌گروه، دانشجویانی که نسبت به یکدیگر شناخت دارند هم‌گروه شوند. زیرا در صورت اشتباه بودن نتایج آزمایش، نمره از تمام اعضاء گروه کسر می‌شود.
- نتایج بدست آمده در حین آزمایش بایستی به گزارش کار اصلی ضمیمه شده و به استاد تحویل داده شود.
- مهلت تحویل گزارش کار حداکثر دو هفته پس از انجام آزمایش است. در صورت تاخیر در تحویل گزارش، به ازاء هر روز تاخیر 5 درصد از نمره گزارش کسر می‌شود. عدم تحویل هر گزارش موجب کسر 1/5 نمره از نمره پایان ترم این درس می‌گردد.

- هر دانشجو در این درس حداکثر می‌تواند یک جلسه غیبت داشته باشد (طبق قوانین آموزشی) و در صورت غیبت بیش از یک جلسه، امکان قبولی در این درس برای آن شخص وجود نخواهد داشت.
- منبع سوالات آزمون کتبی از مطالب همین جزوه و همینطور مطالب تدریس شده توسط استاد در طول ترم خواهد بود.
- نمره نهایی آزمایشگاه ترمودینامیک بر مبنای ارزیابی‌های زیر است:

✓ الف: حضور در کلاس، فعال بودن و آمادگی در انجام آزمایش‌ها، پاسخگویی به سوالات، ادب دانشجو و رعایت نظم و اصول اخلاقی در کلاس (غیبت بیش از یک جلسه، برای هر جلسه 1/5 نمره مستقیما از پایان ترم کم خواهد شد): **2 نمره**

✓ **ب:** گزارش کار (شامل دقت در محاسبات، نحوه تحلیل و تشریح نتایج بدست آمده (متشکل از نمودارها، جداول و اشکال) و نگارش علمی و ادبی: **8 نمره**

✓ ج: آزمون نهایی (شامل آزمون کتبی و عملی): **10 نمره**

- **محتوای گزارش کار آزمایشگاه ترمودینامیک:**
  - مقدمه شامل تاریخچه دستگاه
  - هدف از انجام آزمایش
  - شرح دستگاه
  - روش انجام آزمایش
  - ذکر نتایج بدست آمده در قالب جداول و نمودارها (بر اساس خواسته‌های ذکر شده در هر آزمایش)
  - انجام محاسبات و ارائه کمیات محاسبه شده

- تحلیل نتایج بدست آمده و تشریح مفهومی نتایج
- بررسی خطاها و مقایسه نتایج تئوری و عملی (ذکر عوامل موثر در پدید آمدن خطاهای آزمایش به صورت مجزا و ارائه پیشنهادهای عملی برای رفع آنها و در صورت امکان، انجام آنها)
- نتیجه‌گیری نهایی
- پاسخ به سوالات آخر هر آزمایش (ذکر شده در دستور کار)
- منابع و مراجع مورد استفاده

آزمایش ماشین بخار

تصویر ماشین بخار موجود در آزمایشگاه ترمودینامیک

هدف آزمایش:

هدف از انجام این آزمایش آشنایی بیشتر با مفاهیم ترمودینامیکی و کاربرد قوانین اول و دوم ترمودینامیک است. قانون اول ترمودینامیک بیانی از اصل بقای انرژی است و قانون دوم ترمودینامیک بیان می‌کند که فرآیندها در جهت مشخصی اتفاق می‌افتند.

مقدمه:

از اوایل قرن 18 میلادی، از انرژی بخار صرفا برای کاربردهای عمومی مانند پمپ های رفت و برگشتی استفاده می‌شد. اما از سال 1870 با ظهور ماشین هایی که حرکت رفت و برگشتی را به حرکت دورانی تبدیل می کردند، چرخ کارخانه ها به گردش درآمد و موجب ایجاد انقلاب صنعتی شد. موتور بخار، نوعی ماشین گرمایی است که با استفاده از بخار به عنوان سیال کار مکانیکی تولید می‌کند. ایده استفاده از بخار آب برای تولید حرکت مکانیکی، سابقه طولانی در حدود 2000 سال دارد. اختراع موتور بخار، مقدمه‌ای برای ساخت انواع لوکوموتیوها و ماشین‌های غول‌پیکر امروزی شده است. همچنین، توربین‌های بخار امروزی حدود 80٪ توان الکتریکی را تولید می‌کنند. در ماشین بخار، گرما از طریق سوختن سوخت در یک محفظه بسته تولید می‌شود. در مخزن تحت فشار(دیگ با حجم مشخص)، گرمای تولیدی به آب درون مخزن منتقل می شود و در نهایت آب را به جوش آورده و آن را به بخار اشباع تبدیل می کند. بخار اشباع معمولا در دمای جوش آب تولید می‌شود که این دما به فشار بخار روی سطح آب بستگی دارد. بخار به یونیت موتور که متشکل از سیلندر و پیستون می باشد وارد می-شود. فشار بخار با حرکت درآوردن پیستون، موجب تغییر حجم داخل سیلندر شده و کار ایجاد می‌کند که نمود این کار در حرکت رفت و برگشت پیستون مشهود است. برای تبدیل این حرکت رفت و برگشتی به حرکت دورانی، از یک دیسک دایره‌ای استفاده شده است که متصل به سیلندر می‌باشد و حرکت رفت و برگشت سیلندر و پیستون، موجب چرخیدن دیسک دایره‌ای و ایجاد حرکت دورانی می‌شود.

- جهت اعمال بار به سیستم از یک اهرم و کفه بارگذاری استفاده شده است.

- در نهایت بخار سرد شده و کم فشار و استفاده شده به اتمسفر تخلیه می‌شود.

بویلرها نیز مخازن تحت فشاری هستند که محتوی مقداری آب می‌باشند که توسط مکانیزم‌های خاصی گرما به آب انتقال می‌یابد تا آن را به جوش آورد. در این دستگاه، از هیتر داخل مخزن تحت فشار، با توان قابل تنظیم (حداکثر 2 kW) به عنوان گرما استفاده شده است. همچنین یونیت موتور نیز بخار در فشار و دمای بالا را دریافت و بخار با فشار و دمای کم را به اتمسفر تخلیه می‌کند. ضمن اینکه با توجه به اختلاف انرژی بخار ورودی و بخار خروجی، کار مکانیکی انجام می‌شود. البته می‌توان بخار با فشار و دمای کم را به اتمسفر تخلیه کرد یا اینکه توسط یک چگالنده (condenser) آن را به مایع تبدیل کرد و اجازه داد بویلر از آن به عنوان منبع تغذیه استفاده کند یا در سیستم‌هایی دیگر، به عنوان منبع تغذیه آب استفاده کرد. در بسیاری از پیستون های رفت و برگشتی، بخار، جهت حرکت جریان را در هر stroke در ورود و خروج بخار از سیلندر معکوس می کند. هر چرخه کامل که باعث چرخیدن یک دور دیسک دایره‌ای می‌شود شامل 4 اتفاق است:

1- مکش یا ورود (admission)

2- انبساط (expansion)

3- تراکم (compression)

4- تخلیه (exhaust)

این اتفاق توسط valve هایی که در سیلندر قرار دارد کنترل میشود که ورود و خروج بخار را با باز و بسته کردن دریچه بخار کنترل می کند.

تئوری آزمایش:

همانطوری که در نمودار زیر (شکل 1) مشاهده می‌شود، انرژی ورودی به سیستم برابر حاصل جمع حرارت محسوس $\dot{m}h_W$ و قدرت الکتریکی ورودی $\dot{Q}_1$ است. اما بخشی از قدرت الکتریکی ورودی، در اثر تبادل حرارتی

دیگ با محیط اطراف تلف می‌شود. این مقدار در ستون دوم با عنوان افت حرارتی دیگ $\dot{Q}_2$ نشان داده شده است. مابقی قدرت الکتریکی ورودی موجب تبخیر شدن آب می‌شود که به عنوان حرارت نهان $\dot{m}(h_1-h_W)$ شناخته می‌شود. حال سیال با فشار بالا وارد موتور می شود. قسمتی از این انرژی موجود در سیال، قدرت خروجی $\dot{W}_1$ را حاصل می‌نماید، قسمت دیگری از آن در اثر اصطکاک و ... در موتور تلف می‌شود که با عنوان افت‌های مکانیکی موتور $\dot{W}_2$ نشان داده شده است، بخش دیگر در نتیجه‌ی انتقال حرارت به محیط اطراف در موتور و کندانسور تلف می‌شود که با عنوان افت‌های حرارتی موتور و کندانسور $\dot{Q}_3 + \dot{Q}_4$ نشان داده شده است و نهایتا مابقی انرژی که به کندانسور انتقال می‌یابد، بخشی به آب خنک کننده $\dot{Q}_5$ انتقال می‌یابد و بخشی به صورت حرارت موجود در بخار تقطیر شده $\dot{m}h_3$ از کندانسور خارج می‌شود.

منحنی موازنه ی انرژی :

شکل 1: منحنی موازنه انرژی

بر اساس قانون اول ترمودینامیک، تبدیل انرژی‌ها به یکدیگر به سه صورت زیر می‌باشد:

الف) قانون اول برای سیکل: گرمای مفید برابر است با کار مفید :

$$\oint \delta q = \oint \delta w$$

ب) قانون اول سیستم بسته: گرما صرف کار، تغییرات انرژی داخلی، انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی می‌شود :

$$q = w + \Delta u + \Delta e_K + \Delta e_P$$

ج) اصل اول در حالت کلی :

$$Q_{cv} + \sum m_i \left[h_i + \frac{{v_i}^2}{2} + g z_i \right] = W_{cv} + \sum m_e \left[h_e + \frac{{v_e}^2}{2} + g z_e \right] + \left[m_2 \left[u_2 + \frac{{v_2}^2}{2} + g z_2 \right] - m_1 \left[u_1 + \frac{{v_1}^2}{2} + g z_1 \right] \right]$$

برای حالت جریان پایدار (سیستم باز) قانون اول به‌صورت زیر است :

$$\dot{Q}_{cv} + \sum \dot{m}_i \left[h_i + \frac{{v_i}^2}{2} + g z_i \right] = \dot{W}_{cv} + \sum \dot{m}_e \left[h_e + \frac{{v_e}^2}{2} + g z_e \right]$$

اگر از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف‌نظر شود، می‌توان قانون اول را برای سیستم باز (حجم کنترل) به‌صورت زیر نوشت:

$$\dot{Q}_{cv} = \dot{W}_{cv} + \Delta \dot{H}$$

و یا:

$$\dot{Q}_{cv} + \Delta \dot{m}_i h_i = \dot{W}_{cv} + \Delta \dot{m}_e h_e$$

کاربرد قانون اول برای کل دستگاه:

$$\dot{Q}_1 + \dot{m}h_o = \dot{W}_1 + \dot{m}h_3 + (\dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 + \dot{Q}_5)$$

$$\dot{W}_1 = \dot{Q}_1 + \dot{m}(h_o - h_3) - (\dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 + \dot{Q}_5)$$

چون در این مرحله از آزمایش، به‌جای مشخصات آب ورودی، آب جوش را در نظر می‌گیریم ، بنابراین h_W جانشین h_o می‌شود:

$$\dot{W}_1 = \dot{Q}_1 + \dot{m}(h_W - h_3) - (\dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 + \dot{Q}_5)$$

برای پی بردن به نحوه عملکرد موتور بخار می‌توان آن را با سیکل رانکین مقایسه کرد. سیکل ایده‌آل رانکین از چهار تحول تشکیل شده است. دو تحول فشار ثابت که مربوط به انتقال حرارت و دو تحول ایزنتروپیک که مربوط به تولید و مصرف کار می‌باشد. شماتیک سیکل ایده آل رانکین و نمودار T-S آن در شکل 2 مشاهده می‌شود:

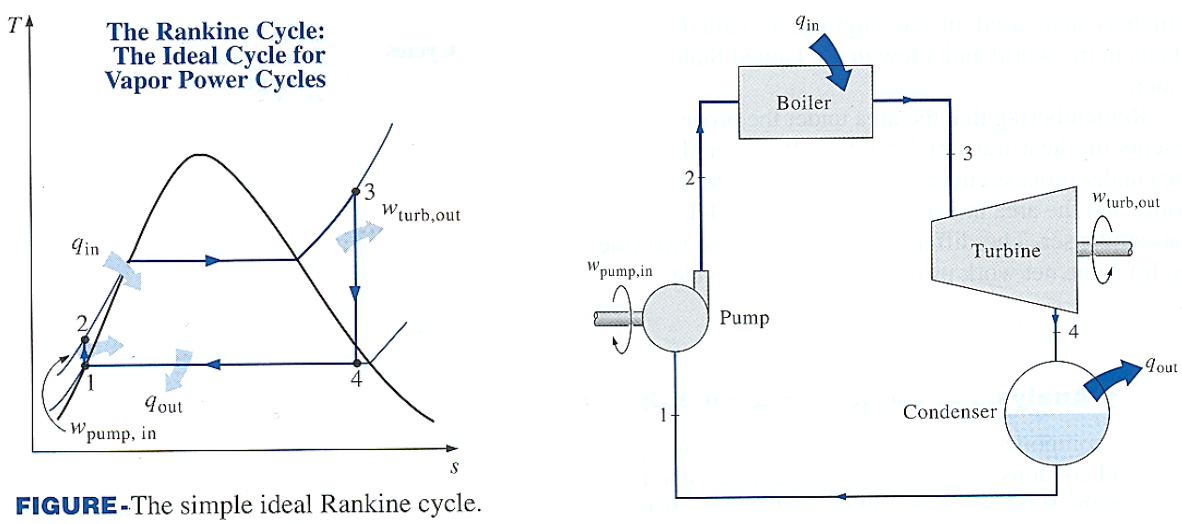


FIGURE-The simple ideal Rankine cycle.

شکل 2: شماتیک سیکل ایده آل رانکین و نمودار T-S آن.

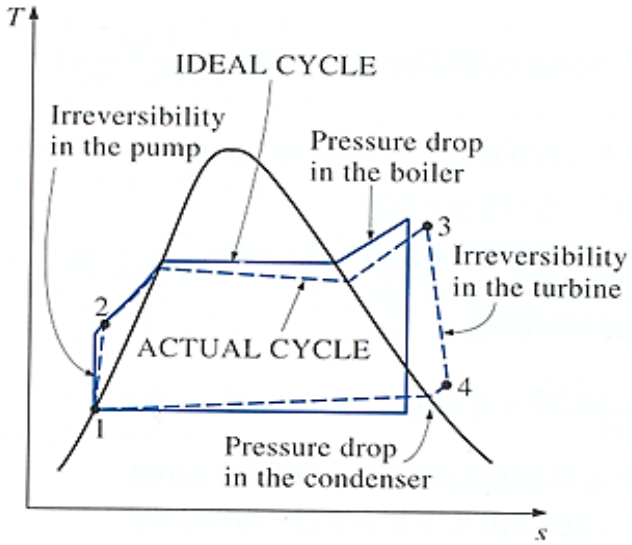
تراکم ایزنتروپیک در پمپ W_{Pump} : فرآیند 1 تا 2

انتقال حرارت فشار ثابت در دیگ q_{in} : فرآیند 2 تا 3

انبساط ایزنتروپیک در توربین $W_{Turbine}$: فرآیند 3 تا 4

انتقال حرارت فشار ثابت در کندانسور q_{out} : فرآیند 4 تا 1

همانطور که در شکل 3 نشان داده شده است، چرخه واقعی موتور بخار به‌دلیل عوامل برگشت ناپذیری مانند اصطکاک سیال که منجر به افت فشار در دیگ و کندانسور می‌شود و اتلاف نامطلوب حرارت به محیط، با چرخه ایده‌آل رانکین تفاوت دارد.



شکل3: چرخه واقعی سیکل رانکین

شرح دستگاه مورد استفاده در این آزمایش:

این موتور بخار دارای چهار بخش مختلف می‌باشد:

1- دیگ: استوانه‌ای با ضخامت ورق حدود 10 میلیمتر است که در زیر آن المنت 2000 واتی نصب شده است. همچنین این دیگ دارای شیر تنظیم، شیر اطمینان و دو شیر در پایین برای تخلیهٔ آب می‌باشد و همیشه 2/3 آن پر از آب و 1/3 فضای خالی برای بخار می‌باشد.

2- موتور بخار: شامل یک موتور دو سیلندر و یک چرخ طیار می‌باشد. نیروی محرکه اولیهٔ موتور توسط چرخانیدن با دست در جهت عقربه‌ی ساعت ایجاد می‌شود.

3- تابلو برق و کلیدهای فرمان که شامل کلید اصلی برق و کلید المنت دیگ می‌باشد.

4- فشار مخزن بخار در نمایشگر گیج نصب شده روی دستگاه قابل مشاهده است.

مشخصات دستگاه عبارت است از:

توان هیتر: 2kW

قطر داخلی سیلندر ها: 14mm

طول کورس پیستون: 35mm

طول قطر بازوی گشتاور: 120mm

روش انجام آزمایش:

ابتدا مخزن آب با استفاده از پارچ تا مقدار مشخص پر می شود. در این مرحله بهتر است با باز نمودن شیر تنظیم بخار ورودی به موتور و چرخاندن دیسک موتور اجازه دهید آب راحت‌تر به داخل مخزن برود. دستگاه پس از اتصال به جریان برق، بوسیله کلید روشن/خاموش روشن می‌شود. در این حالت هیتر نیز روشن می‌گردد. توان

هیتر روی حداکثر مقدار خود (2000 وات) تنظیم می‌گردد. فشار درون مخزن توسط فشارسنج اندازه‌گیری می‌شود. یک شیر اطمینان بر روی مخزن نصب شده است. در صورتیکه فشار مخزن از حد مجاز بالاتر رود، شیر اطمینان عمل نموده و بخار اضافی را از درون مخزن خارج می‌کند. دور موتور بوسیله‌ی یک سنسور دورسنج اندازه‌گیری شده و توسط نمایشگر دیجیتال بر حسب دور بر دقیقه نمایش داده می‌شود. بخار خروجی از سیلندرها، توسط یک شیلنگ هیدرولیک وارد محفظه‌ی استوانه‌ای جمع‌آوری بخار می‌شود. گشتاور ترمزی، با داشتن طول بازوی گشتاور، بوسیله‌ی قرار دادن وزنه‌های استاندارد روی کفه‌ی بارگذاری و عددی که نیروسنج نشان می‌دهد، قابل محاسبه خواهد بود.

نکات ایمنی:

دانشجویان بایستی توجه داشته باشند که از ابتدای شروع آزمایش تا پایان کار، به هیچ عنوان به مخزن آب (بخار)، سیلندرها و لوله خروجی بخار دست نزنید زیرا عدم رعایت نکات ایمنی باعث سوختگی دست شما خواهد شد. در طول آزمایش به هیچ عنوان شیر تغذیه آب و شیر خروجی آب (در پایین مخزن آب) را باز نکنید.

روابط مورد نیاز در این آزمایش:

$F = mg$

گشتاور ترمزی $T = \vec{r} \times \vec{F} = |r||F| \sin 90°$

سرعت زاویه‌ای $\omega = \frac{2\pi}{60} N_{RPM}$

توان بارگذاری شده $P = T\omega = mgr\left(\frac{2\pi}{60}N\right) = \frac{2\pi}{60} mgrN$

r =طول بازوی گشتاور

N =تعداد دور بر واحد زمان

m =جرم وزنه‌ها

L =طول کورس پیستون (m)

A = سطح مقطع (m^2)

ΔV = تغییر حجم (m^3)=AL

$\dot{w}_H$ = توان هیتر = VI

با داشتن فشار و دمای بخار آب خروجی از بویلر و با مراجعه به جدول پیوست کتاب ون وایلن، مقدار انتالپی (h) را می‌توان بدست آورد. در واقع زمانیکه فشار ثابت باشد (فرایند فشار ثابت) می توان مقدار $\dot{Q}$ که توسط آب دریافت شده است را با توان هیتر برابر قرار داد و از آنجا دبی جرمی آب تبخیر شده ($\dot{m}$) را محاسبه کرد. همچنین می‌توان توان تولیدی توسط سیلندر و پیستون ($\dot{W}_P$) را به صورت زیر محاسبه نمود:

توان هیتر : $\dot{W}_H = \dot{Q} = \dot{m}h$

توان تولیدی توسط پیستون : $W_P = \int PdV = P\Delta V \rightarrow \dot{W}_P = \frac{P\Delta V}{t}$

t مدت زمان اندازه گیری شده از شروع به حرکت پیستون تا توقف آن برای یک کورس پیستون می باشد. فشار مورد نظر (P) را می‌توان از روی گیج یادداشت کرد. بازده را می‌توان با تقسیم توان بارگذاری شده بر توان تولیدی توسط پیستون محاسبه کرد.

$$\eta = \frac{P\ (\text{توان بارگذاری‌شده})}{\dot{W}_P\ (\text{توان تولیدی‌توسط‌پیستون})}$$

لازم به ذکر است که این بازده، بازده واقعی ماشین بخار نمی باشد و درصدی از کار مصرف شده به کار تولید شده توسط پیستون را نشان می دهد. برای به دست آوردن بازده ماشین بخار، با در نظر گرفتن مفروضاتی، می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$Q - W = u_1 - u_2$$

در واقع بخار آب خروجی، بخار با فشار و دمای کم می باشد و بسیار مستعد است که به مایع تبدیل شود، زیرا انرژی خود را از دست داده است. ازاینرو، با توجه به اینکه خصوصیات آب در حالت مایع اشباع را می‌توان با خصوصیات مایع متراکم یکسان در نظر گرفت، می‌توان فرض کرد:

$$u_1 = u_2$$

$$\rightarrow \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = \dot{W}_{net}$$

در اینجا، $\dot{W}_{net}$ همان توان تولیدی توسط پیستون و $\dot{Q}_H$ توان هیتر است. از رابطه فوق می توان $\dot{Q}_L$ را نیز محاسبه نمود و مشخص کرد که چه مقدار گرما به منبع سرد (محیط) داده شده است. لذا، بازده ماشین بخار از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_H}$$

خواسته‌های آزمایش:

1) تکمیل جدول زیر:

		بارهای اعمالی مختلف (وزنه‌های مختلف)		
	واحد	مرحله 1	مرحله 2	مرحله 3
توان مصرفی (توان هیتر)	W			
فشار بخار	Pa			
جرم وزنه های اعمالی	gr			
گشتاور ترمزی	N.m			
مدت زمان یک کورس پیستون	Sec			
توان تولیدی توسط پیستون	w			
بازده ماشین بخار	٪			

2) رسم نمودارهای زیر:

1- نمودار توان تولیدی توسط پیستون بر حسب فشار بخار

2- نمودار بازده ماشین بخار بر حسب توان (کار) تولیدی توسط پیستون

3) پاسخ به سوالات زیر:

1- هنگام بارگذاری، حرکت دیسک دایره‌ای (چرخ طیار) کندتر می شود. علت را توضیح دهید.

2- قانون اول ترمودینامیک را برای این آزمایش تحلیل کنید. با بررسی قانون اول ترمودینامیک، اثبات کنید که چرا این سیکل انجام‌پذیر است.

3- منابع خطا و تاثیر آنها بر روی نتایج آزمایش را بیان کنید.

آزمایش دیگ مارست

تصویر دیگ مارست موجود در آزمایشگاه ترمودینامیک

هدف آزمایش:

هدف از انجام این آزمایش تعیین رابطه بین فشار و درجه حرارت بخار آب اشباع (حالت های تعادلی بین آب و بخار آب) در محدوده ی معینی از فشار نسبی بین 0 تا 10 بار می‌باشد. همچنین مقادیر اندازه گیری شده شیب منحنی اشباع $(dT/dP)_{SAT}$ با مقادیر محاسبه شده به کمک رابطه ی کلاپیرون و معلومات جدول بخار اشباع (در جداول ترمودینامیک) نیز مقایسه می‌شود.

مقدمه:

تغییر فاز از حالت جامد به مایع و یا از مایع به بخار از پروسه‌ها و یا تحولات مورد توجه در علوم مهندسی بخصوص مهندسی مکانیک میباشد. در مبحث ترمودینامیک با توجه به اینکه پدیده تغییر فاز را در اکثر سیکل هـای تـوانی و غیره داریم لذا توجه خاصی به این پدیده شده و مطالعه رفتار ماده در زمان تغییر فـاز از اهمیـت بـسزائی برخـوردار است. آب از جمله موادی است که با توجه به وفور آن در طبیعت و خواص آن بعنوان سـیال عامـل در سـیکل هـای نیروگاهی و غیره مورد استفاده قرار میگیرد. لذا با توجه به برنامه پیش بینی شده جهـت دوره کارشناسـی مهندسـی مکانیک لازم است دانشجویان این رشته بصورت عملی همزمان با درس رمودینامیک و یا بعد از گذراندن این درس جهت درک بهتر بطور عملی در آزمایشگاه از نزدیک تحول تغییر فاز این ماده را مطالعه و بررسی نمایند. وسیله مورد استفاده در آزمایشگاه برای دستیابی به هدف فوق دیگ مارست می‌باشد کـه در اصل شامل یک فضای حجم ثابت بوده که با قرار دادن آب در این فضا و افزودن حرارت طی یک تحول حجم ثابـت، تغییر فاز آب مایع را به بخار آب خواهیم داشت. در طول تحول همواره دو فاز مایع و بخار در مجاورت هـم خواهنـد بود. با استفاده از تجهیزات اندازه گیری نصب شده در هر لحظه مقادیر مربوط بـه فـشار و دمـا قابـل انـدازه گیـری خواهند بود.

تئوری آزمایش:

ترمودینامیک رابطه کار و گرما را بین سیستم و محیطی که کار در آن انجام می شود بررسی می کند. در واقع در ترمودینامیک، تغییر رفتار و خواص مایع در اثر تغییر فشار و دما بررسی می‌گردد. زمانیکه انرژی از طریق گرما به آب اضافه میشود، جنب و جوش مولکول‌های آب زیاد شده و سبب افزایش فرار مولکول‌های آب از سطح آب می شود. در واقع فشار پایین‌تر بخار هوا سبب می‌شود مولکول‌های مایع از سطح آن آسان‌تر جدا شوند. این روند فرار مولکول‌ها تا جایی ادامه می‌یابد که فشار بین بخار و سطح آب برابر شود. به دمایی که در آن دما، فشار بخار و فشار مایع برابر باشد، دمای اشباع می‌گوییم و همچنین به این فشار، فشار اشباع گفته می شود. ازاینرو، اصطلاح درجه حرارت اشباع بیانگر درجه حرارتی است که در آن تبخیر تحت فشار معین صورت می‌گیرد و این فشار را فشار اشباع می گویند. پس برای آب در دمای 99.6°C، فشار اشباع 0.1 MPa و برعکس، در فشار 0.1 MPa درجه حرارت اشباع معادل 99.6°C می باشد. اگر ماده‌ای به صورت مایع در درجه حرارت و فشار اشباع باشد آن را مایع اشباع می نامیم و اگر درجه حرارت مایع کمتر از درجه حرارت اشباع برای یک فشار معین باشد آن را مایع متراکم می‌نامیم. وقتی در درجه حرارت اشباع قسمتی از ماده به صورت بخار و قسمتی به شکل مایع باشد می‌توان پارامتر کیفیت (X) را به صورت نسبت جرم بخار به جرم کل تعریف کنیم. خواص مختلف فاز مایع و بخار آب در جداول ترمودینامیکی موجود است (جدول B.I در پیوست کتاب ترمودینامیک تالیف ون وایلن). اگر ماده‌ای در درجه حرارت اشباع به صورت بخار باشد آن را بخار اشباع می نامیم (گاهی از بخار اشباع خشک نیز جهت تاکید بر کیفیت صد در صد استفاده می شود). وقتی که بخار در دمای بالاتر از درجه حرارت اشباع است گفته می‌شود که بخار در حالت مافوق‌گرم است. فشار و درجه حرارت بخار مافوق‌گرم خواص مستقل هستند زیرا درجه حرارت را می توان افزایش داد در حالی که فشار ثابت می ماند. همچنین، موادی که آن ها را گاز می‌نامیم در حقیقت بخارات بسیار مافوق‌گرم هستند.

بطور کلی هدف از انجام آزمایش دیگ مارست بدست آوردن خواص از آزمایش‌های عملی و مقایسه آن با مقادیری است که در جداول کتب ترمودینامیک موجود است. در این آزمایش، منحنی تغییرات دما برحسب تغییرات فشار یعنی ($\frac{dT}{dP}$) که از نتیجه عملی انجام آزمایش به دست آمده رسم می‌شود و با نمودار رسم شده بر اساس مقادیر تئوری مقایسه می‌گردد. این مقادیر تئوری با استفاده از معادله کلاپیرون محاسبه می‌شود.

شرح دستگاه مورد استفاده در این آزمایش:

دیگ مارست مخزنی استوانه‌ای است به حجم حدود 2/5 لیتر و با ضخامت بالا تا بتواند در فشارهای بالا مقاومت کند. بدنه دیگ نیز با ورق آهن پوشیده شده است. در نتیجه، فاصله هوایی ایجاد شده یک نوع عایق می‌باشد. از شیر تعبیه شده در کنار دیگ، آب به درون مخزن ریخته می‌شود. میزان پر شدن دیگ از آب، بوسیله شیر کنترل ارتفاع آب تنظیم می‌شود. آب درون دیگ توسط هیتر الکتریکی تعبیه شده در داخل دیگ گرم می‌شود. گرما توسط یک هیتر با توان 2 کیلووات تامین می‌گردد. بدین ترتیب آب داخل دیگ گرم می‌شود تا به نقطه جوش برسد. پس از تبخیر مقداری از آب، دما و فشار داخل دیگ در حجم ثابت افزایش می‌یابد. دستگاه دارای یک دماسنج می‌باشد که دمای داخل مخزن را نشان می‌دهد و واحد آن درجه‌ی سانتیگراد است. یک فشارسنج نیز فشار آب و بخار آب را نشان می‌دهد. از دیگر اجزای دستگاه شیر اطمینان است که اگر فشار از حد معینی بالاتر رود، باز می‌شود و فشار را کاهش می‌دهد. المنت الکتریکی نیز برای ایجاد گرما در زیر دیگ قرار گرفته است.

روش انجام آزمایش:

دیگ را از طریق شیر تغذیه ورودی از آب تمیز پر کرده تا مقدار آب به شیر کنترل ارتفاع رسیده و سرریز شود (شیر کنترل ارتفاع آب باید باز باشد). بعد از پر شدن دیگ، شیر تغذیه را محکم ببندید. در حالیکه شیر کنترل

ارتفاع آب باز است، هیتر را روشن کرده و صبر می‌کنیم تا بخار از شیر تخلیه خارج شود. سپس شیر کنترل ارتفاع را بسته و عمل حرارت دادن را ادامه می‌دهیم و مقادیر مختلف فشار و درجه حرارت را در حالت های مختلف یادداشت می‌کنیم تا فشار نسبی به 7 بار برسد. در این مرحله، هیتر را خاموش کرده و با سرد شدن دیگ و کاهش فشار، دوباره مقادیر فشار و دما را یادداشت می‌کنیم. با اضافه کردن فشار هوا در آزمایشگاه به مقادیر فشار نسبی، مقادیر فشار را به صورت مطلق محاسبه می‌کنیم. نهایتا مقادیر بدست آمده فشار و دما بایستی در جدول نشان داده شده در قسمت خواسته‌های آزمایش وارد گردد و منحنی تغییرات فشار نسبت به تغییرات دما در هر دو مرحله‌ی رفت و برگشت رسم شود.

نکات ایمنی :

1- قبل از شروع آزمایش اطمینان داشته باشید داخل مخزن به اندازه کافی آب موجود باشد تا از سوختن هیتر در اثر فقدان آب جلوگیری شود.

2- فشار دستگاه هرگز نباید از حداکثر فشار کاری مجاز (حدود 7 بار) بیشتر شود.

3- دستگاه طوری طراحی شده است که در دمای 175 درجه سانتیگراد هیتر خاموش می شود. درصورتیکه در این دما به دلایلی هیتر خاموش نشد، به صورت دستی به وسیله کلید هیتر، آن را خاموش کنید. در غیر این صورت در فشار 10 بار، شیر اطمینان باز می شود.

4- با اجتناب از باز کردن بدون دلیل و اشتباه شیرها از خروج خطرناک بخار آب و آب جوش جلوگیری کنید.

5- قبل از رسیدن فشار داخل دیگ به فشار محیط، از باز کردن شیر کنترل ارتفاع آب و شیر تغذیه آب خودداری نمایید.

6- در صورت مشاهده هر گونه نشتی از شیرها یا اتصالات مراتب را سریعا به مسئولین آزمایشگاه اطلاع دهید.

7- از لمس کردن سطوح داغ خودداری کنید زیرا باعث ایجاد سوختگی‌های شدید می‌شود.

8- بعد از پایان آزمایش و رسیدن فشار به فشار محیط، شیر تغذیه آب را برای جبران خلاء ایجاد شده در اثر تخلیه هوا باز کنید تا به گیج آسیب نرسد.

روابط مورد نیاز در این آزمایش:

به طور کلی منظور از این آزمایش بدست آوردن مقادیر عملی و مقایسه آن با مقادیری است که در جداول کتب ترمودینامیک موجود است. این مقادیر عبارت است از $Ps = f(T_r)$، گرمای نهان تبخیر (h_{fg}) و تغییرات انتروپی (S_{fg}). ازاینرو بایستی منحنی تغییرات دما بر حسب فشار یعنی (dT/dP) که از نتایج آزمایش بدست آمده است رسم شود و با مقادیر تئوری مقایسه گردد.

معادله کلازیوس - کلاپیرون (فقط برای ناحیه دو فازی) :

$$\left(\frac{dT}{dp}\right)_{SAT} = \frac{Tv_{fg}}{h_{fg}} = \frac{T\left(v_f - v_g\right)}{h_{fg}} \qquad v_g \gg v_f \rightarrow = \frac{TV_g}{h_{fg}}$$

$$x = \frac{v_x - v_f}{v_{fg}} = \frac{h_x - h_f}{h_{fg}} = \frac{s_x - s_f}{s_{fg}}$$

$$h_{fg} = h_g - h_f$$

- برای اندازه‌گیری فشار به ترتیب زیر عمل می‌کنیم:

$$P = P_g + P_a$$

در رابطه ی بالا، P فشار مطلق، P_a فشار هوای محیط و P_g فشار نسبی اندازه گیری شده توسط فشارسنج دستگاه است.

$$P_a = P_0 - \rho g h$$

در آزمایشگاه دانشکده فناوری‌های نوین نمین:

P_a = فشار هوا در ارتفاع موردنظر

P_0 = فشار هوا در سطح دریا = 1 اتمسفر = 100000 پاسکال

ρ = چگالی هوا = 1/225 کیلوگرم بر مترمکعب

g = 9/807 متر بر مجذور ثانیه

h = ارتفاع از سطح دریا = 1700 متر

$$P_a = 100000 - (1.225 \times 9.807 \times 1700) = 0.811\ atm$$

خواسته‌های آزمایش:

1) تکمیل جدول زیر:

	فشار(bar)		دما (°C)			$\frac{dT}{dP}$	$\frac{Tv_{fg}}{h_{fg}}$
	فشار نسبی	فشار مطلق	دما (در حین افزایش فشار)	دما (در حین کاهش فشار)	میانگین دما		
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

2) رسم نمودارهای زیر:

1- منحنی دما بر حسب فشار $(T-P)$ با استفاده از میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده در حالت رفت و برگشت (افزایش و کاهش فشار) و مقادیر موجود در جداول بخار آب اشباع (جداول ترمودینامیکی) را رسم کنید و در مورد نحوه‌ی تغییرات این سه منحنی بحث کنید.

2- منحنی‌های $\left(\frac{dT}{dP}\right)_{sat}$ و $\frac{T*v_g}{h_{fg}}$ بر حسب فشار مطلق را رسم کنید و در مورد آن بحث کنید.

3- منحنی‌های h_{fg} و S_{fg} به ازای فشارهای مختلف را برای مقادیر بدست آمده از جداول ترمودینامیکی رسم کنید و در مورد آن بحث کنید.

3) پاسخ به سوالات زیر:

1- دلیل تخلیه‌ی هوا را قبل از شروع آزمایش بیان کنید.

2- هنگامی که فشار دیگ به ماکزیمم مقدار خود رسید و آن را خاموش کردید مشاهده می‌شود که برای مدت زمان کوتاهی فشار ثابت یا کم شده ولی دما افزایش می‌یابد. علت این پدیده را توضیح دهید.

3- آیا در طول آزمایش، پدیده جوشیدن آب رخ می دهد یا خیر؟

4- در مورد تاثیر دمای اولیه آب روی نتایج آزمایش بحث کنید.

5- چگونه میتوان اطمینان یافت که آب دیگ به جوش آمده است؟

6- تغییرات حجم آب داخل دیگ هنگام کاهش دما به چه صورت است؟

7- علت پایین‌تر بودن مقادیر دما در مرحله رفت، نسبت به مرحله برگشت چیست؟

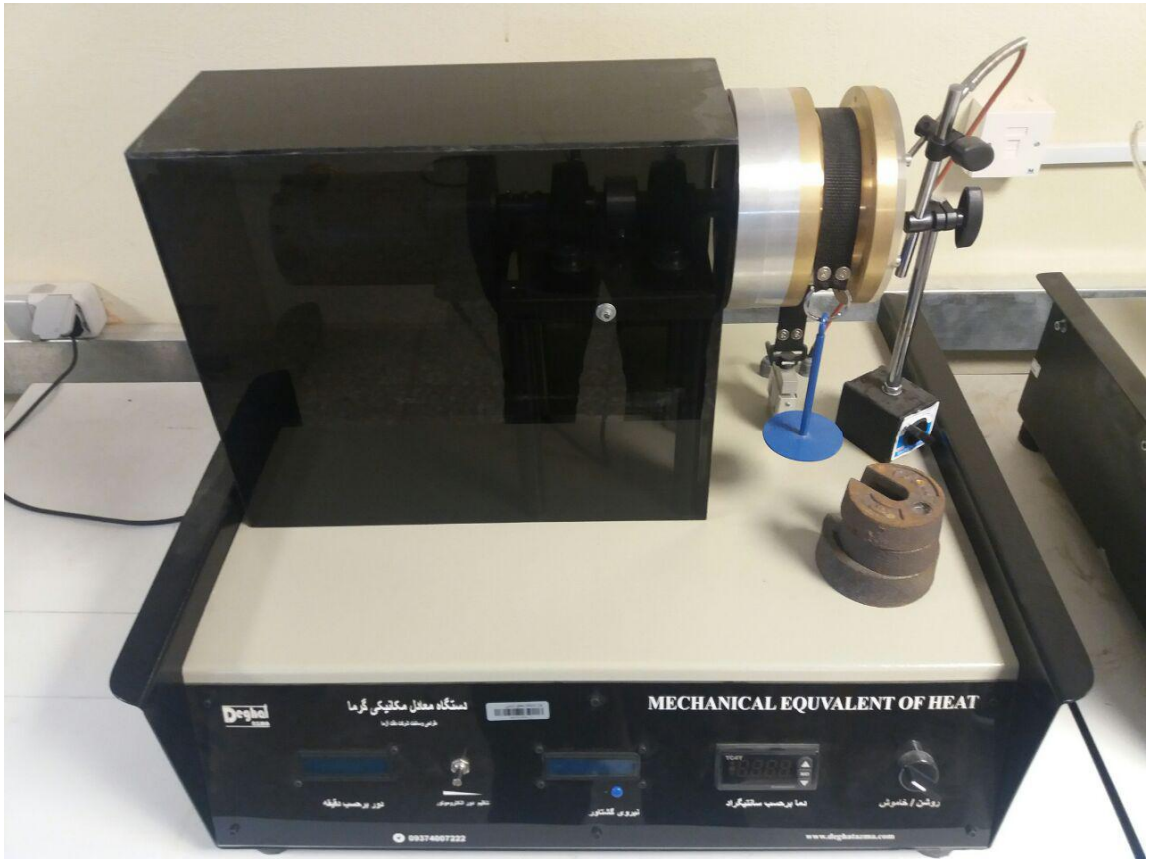
8- آیا منحنی‌های رفت و برگشت (دما نسبت به فشار) که در آزمایشگاه بدست آورده‌ایم زیر منحنی تئوریک (دما نسبت به فشار) قرار می گیرد یا بالای آن؟ چرا؟

9- فاصله‌های زمانی طی شده در هنگام تغییرات فشار (بین دو فشار متوالی) در مرحله رفت و برگشت را یادداشت کنید. دلیل تفاوت این فاصله‌های زمانی را توضیح دهید.

10- چند نمونه از کاربردهای عملی رابطه کلاپیرون در صنعت را بنویسید.

11- منابع خطا و تاثیر آنها بر روی نتایج آزمایش را بیان کنید.

آزمایش معادل مکانیکی گرما



تصویر دستگاه معادل مکانیکی گرما موجود در آزمایشگاه ترمودینامیک

هدف:

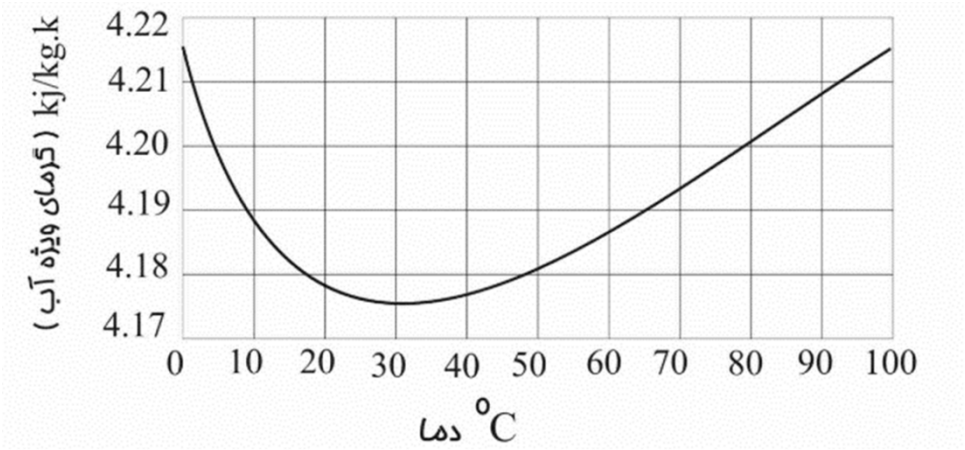
هدف از انجام این آزمایش، مطالعه قانون اول ترمودینامیک و نشان دادن رابطه‌ی بین انرژی مکانیکی و انرژی حرارتی با بررسی نحوه‌ی تبدیل کار و گرما به یکدیگر است. در واقع آنچه در این آزمایش به دنبالش هستیم، بدست آوردن معادل مکانیکی گرما با تبدیل کار به حرارت است؛ به این معنا که می‌خواهیم به طور تجربی میزان کار لازم (بر حسب ژول) برای تولید یک کالری گرما را بدست آوریم.

مقدمه:

در اواسط قرن هجدهم که برای اولین بار موضوع گرماسنجی مطرح شد، مناسب‌ترین واحد گرما کالری نامیده شد و به صورت ((مقدار گرمای لازم برای بالا بردن دمای یک گرم آب به اندازه یک درجه سانتیگراد)) تعریف شد. بعدها پس از کشف اینکه گرمای ویژه آب به دما بستگی دارد کالری به صورت ((گرمای لازم برای بالا رفتن دما از 14/5 به 15/5 درجه سانتیگراد)) تعریف شد و به طور کلی این موضوع مطرح گردید که مقدار کاری که انجام می‌شود تا آب از دمای 14/5 به 15/5 درجه سانتیگراد رسانده شود معادل مکانیکی گرما نامیده می‌شود و با J نمایش داده می‌شود. در این آزمایش مشخص شد که:

$$1(cal) = 4.186(J)$$

امروزه بیشتر کمیتهای گرمائی (حداقل در دماهای خیلی پایین و خیلی بالا) بر حسب ژول بیان می‌گردند. به عبارت دیگر معادل مکانیکی گرما وجود ندارد، بلکه در عوض گرمای ویژه آب بر حسب $kj/kg.k$ وجود دارد که تغییرات آن نسبت به دما در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1: تغییرات گرمای ویژه آب با دما

با توجه به فرم کمی قانون اول ترمودینامیک در مورد سیکل‌ها $\oint \delta Q = \oint \delta W$، اگر حرارت تبادل شده و کار انجام گرفته در یک واحد بیان نشود (کار بر حسب ژول و گرما بر حسب کالری) در آن صورت می‌توان نوشت:

$$\oint \delta W = j \oint \delta Q$$

امروزه کاربرد کالری در بین شیمیدان‌ها و فیزیکدان‌ها کمتر شده است و تمام کمیت‌های گرمایی، حداقل در دماهای خیلی پایین و خیلی بالا، بر حسب ژول بیان می‌گردند. به عبارت دیگر معادل مکانیکی گرما وجود ندارد، بلکه در عوض گرمای ویژه‌ی آب بر حسب Kj/Kg.K وجود دارد. نظر به اینکه در این دستگاه با استفاده از انرژی الکتریکی، ابتدا کار تولید می‌شود و سپس با ایجاد اصطکاک، کار مذکور به گرما تبدیل می‌گردد، لذا عنوان دستگاه، معادل حرارتی کار (معادل مکانیکی گرما) نامیده می‌شود.

تئوری آزمایش:

طبق قانون اول ترمودینامیک، انرژی نه خودبه‌خود بوجود می‌آید و نه خودبه‌خود از بین می‌رود بلکه فقط می‌تواند از حالتی به حالت دیگر تبدیل شود. در این آزمایش، گرما طی مکانیزمی ساده به ظرف و آب داخل آن منتقل شده و تغییرات انرژی داخلی ظرف و آب محاسبه می‌شود و با مقدار کار داده شده به سیستم مقایسه می‌شود. از طرفی باید به این نکته توجه کرد که اگر اتلاف انرژی نداشته باشیم، بر اساس قانون اول ترمودینامیک (بقای انرژی) ، مقدار این دو انرژی (کار و حرارت) باید با یکدیگر برابر باشند. همچنین انتقال حرارت بین آب و ظرف آب و محیط اطراف می‌تواند از طریق مکانیزم‌های هدایت، جابجایی و تشعشع انجام گیرد. این مکانیزم‌های انتقال حرارت بدین صورت تعریف می‌گردد:

1- هدایت (Conduction): هر گاه دو ماده در کنار هم (بطوریکه با هم سطح مشترک داشته باشند) و نسبت به هم ساکن باشند، حرارت با مکانیزم نفوذ مولکولی از ماده با دمای بالاتر به ماده با دمای پایین‌تر منتقل می‌شود. گرمای مبادله شده در حالت ساده با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = -KA\frac{dT}{dx}$$

K : ضریب هدایت حرارتی ماده

A : سطح تبادل حرارت بین دو ماده

$\frac{dT}{dx}$: نرخ تغییرات دما در راستای عمود بر سطح

2- جابجایی (Convection): این نوع انتقال حرارت بین یک سطح جامد و یک سیال مجاور آن که نسبت به یکدیگر دارای حرکت می‌باشند، رخ می‌دهد و ترکیبی از اثرات حرکت و هدایت سیال می‌باشد و به دو نوع طبیعی و اجباری رخ می‌دهد و گرمای مبادله شده با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = hA\Delta T$$

h : ضریب انتقال حرارت جابجایی

A : سطح تبادل حرارت

ΔT : اختلاف دما بین سیال و جامد

3- تشعشع (Radiation): انرژی گرمایی که توسط امواج الکترومغناطیس انتقال می‌یابد. برای تحلیل پدیده انتقال حرارت در دماهای پایین معمولا اثر تشعشع قابل صرفنظر کردن می‌باشد، ولی گرمای منتقل شده از یک سطح با اختلاف دمای بالا نسبت به محیط با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$Q=\delta AT$$

δ : ثابت استفان – بولتزمن

A: سطح تشعشع

T : دمای سطح

ازاینرو می‌توان گفت، در این آزمایش در حالت ایده‌آل باید کار انجام شده برابر با گرمایی باشد که به آب داده شده است (کار به گرما تبدیل می‌شود)، اما اتلافاتی در این مسیر وجود دارد که باعث عدم برابری کار انجام شده و گرمای تولید شده می‌شود. همچنین، بر طبق قانون دوم ترمودینامیک در شرایط ایده‌آل (صرفنظر از اصطکاک‌ها ، اتلافات و ...) تبدیل کار به حرارت به دلیل ماهیت ذاتی این دو انرژی حتی در شرایط ایده‌آل هم به طور کامل مقدور نمی‌باشد. ناگفته نماند که در حالت فرآیند معکوس (تبدیل حرارت به کار) قانون اول نقض نمی‌شود، چرا که آن مقدار از حرارت که تبدیل به کار نشده است به صورت افزایش آنتروپی (آشفتگی) محیط و سیستم و اتلافات و ... به صورت یک انرژی در سیستم یا محیط باقی می‌ماند.

شرح دستگاه مورد استفاده در این آزمایش:

این دستگاه شامل یک موتور الکتریکی مجهز به کنترل‌کننده سرعت برای چرخاندن یک استوانه‌ی برنجی، وزنه‌های بارگذاری، نوار ترمز دور استوانه، یک نیروسنج، یک دماسنج و یک دورشمار برای ثبت تعداد دور استوانه می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت، دستگاهی که با آن آزمایش را انجام می دهیم دارای یک کالریمتر برنجی با درپوش‌های پلاستیکی است، که درون آن مقدار معینی آب ریخته می شود. نوار مخصوصی به دور کالریمتر پیچانده می شود که از یک طرف به نیروسنج متصل و از طرف دیگر آن وزنه‌هایی آویزان است. کالریمتر توسط موتور الکتریکی گردانده می شود و توسط یک کنتور تعداد دفعات گردش کالریمتر شمارش می‌شود. برای اندازه‌گیری دمای آب از یک دماسنج دیجیتالی که روی پایه ی مخصوصی نصب شده است استفاده می گردد. محل دماسنج و زاویه ی قرار گرفتن آن نیز قابل تنظیم است.

روش انجام آزمایش:

1- با اطمینان از خالی بودن استوانه دوار، توسط یک سرنگ یا ظرف مدرج، مقدار دلخواه آب از طریق حفره محل عبور سنسور دما، به درون استوانه برنجی ریخته شود.

2- سنسور دما باید طوری بر روی پایه نصب شود که با بدنه برنجی تماس نداشته باشد و نوک حساس آن درون آب قرار گیرد.

3- به وسیله ی کلید on/off دستگاه روشن می شود.

4- مقدار نیرو به وسیله نیروسنج (Loadcell)، اندازه‌گیری شده و توسط نمایشگر نیرو بر حسب گرم نمایش داده می شود. قبل از شروع آزمایش با فشردن دکمه کلید "صفر نمایشگر" مقدار نیروی نشان داده شده صفر می‌شود.

5- توسط ولوم کنترل دور موتور، می‌توان دور موتور را روی عدد دلخواه تنظیم نمود. نمایشگر دیجیتال مقدار دور را بر حسب دور بر دقیقه نمایش می‌دهد.

6- وزنه‌ها روی کفه بارگذاری قرار داده می‌شوند.

7- دمای آب درون استوانه برنجی به وسیله سنسور دما اندازه‌گیری می‌شود.

8- به وسیله کرنومتر، مدت زمان افزایش دما به مقدار موردنظر اندازه‌گیری می‌شود.

به طور خلاصه می‌توان گفت، در این آزمایش حجم مشخصی آب به داخل یک محفظه دوار ریخته می‌شود. در اثر کار مکانیکی دمای آب تغییر خواهد کرد. مقدار کار مکانیکی بسته به نیروی اعمال شده از طرف وزنه‌ها (نیروی اصطکاک و نیروی ناشی از وزن وزنه‌ها) و مقدار دور محفظه متفاوت خواهد بود. دمای آب در طی این فرایند قابل اندازه‌گیری می‌باشد. در آزمایش اول، دور موتور ثابت نگه داشته شده و مقدار وزنه‌ها افزایش داده می‌شود و دماها ثبت می‌گردد. در آزمایش دوم نیز، مقدار وزنه‌ها ثابت نگه داشته شده و دور موتور بالا برده می‌شود و سپس دماها ثبت می‌گردد. در نهایت با استفاده از روابط موجود، مقدار کار انجام گرفته و حرارت ایجاد شده محاسبه می‌شود.

نکات ایمنی:

به منظور جلوگیری از ایجاد رسوب در داخل استوانه برنجی بعد از اتمام آزمایش، آب باقی‌مانده درون محفظه را با استفاده از یک سرنگ تخلیه کنید.

روابط مورد نیاز در این آزمایش:

F : نیروی اندازه گیری شده توسط نیروسنج (نیوتن)

f: نیروی ناشی از اصطکاک تسمه روی سطح استوانه (نیوتن)

m : جرم وزنه ها (در محاسبات به کیلوگرم تبدیل می‌کنیم)

g : شتاب گرانش

N : سرعت چرخش استوانه (دور بر دقیقه)

ω: سرعت زاویه ای $\omega = \frac{2\pi}{60}N \quad (\frac{rad}{sec})$

r : شعاع استوانه برنجی که برابر با 60 میلیمتر می‌باشد.

T : گشتاور اعمالی بر روی استوانه در اثر اصطکاک بر حسب نیوتن متر

Δt: فاصله زمانی افزایش دمای آب به اندازه 1^0C بر حسب (ثانیه)

ΔT : اختلاف دمای آب بر حسب درجه سانتیگراد

نحوه انجام محاسبات:

موازنه نیروها:

$$F = mg + f$$

گشتاور ترمزی:

$$T = \int r df = f.r = \frac{60}{1000} f$$

توان مکانیکی:

$$\dot{W} = T.\omega = \frac{2\pi N}{60}.f.\frac{60}{1000} = (6.28)(10)^{-3} N.f$$

کار ورودی به واحد ژول:

$$W = \dot{W}.\Delta t = (6.28)(10)^{-3} N.f.\Delta t$$

گرمای تولید شده ناشی از اتلاف اصطکاکی:

$$Q = [(mc)_w + (mc)_c]\Delta T$$

جرم آب داخل استوانه (50 cc):

$$m_w = \rho_w V_w = (1000)(50)(10)^{-6} = 0.05\ (kg)$$

گرمای ویژه آب:

$$c_w = 4.187 \frac{kj}{kg^0 c} = 1\ \frac{kcal}{kg^0 c}$$

جرم استوانه برنجی:

$$m_c = 880(gr)$$

گرمای ویژه برنج:

$$c_c = 0.385\frac{kj}{kg^0c} = 0.092\frac{kcal}{kg^0c}$$

درصورتیکه حجم آب 50cc باشد :

$$[(mc)_w + (mc)_c] = 0.104\frac{kcal}{^\circ C}$$

عدد ژول:

اگر حرارت تبادل شده و کار انجام گرفته در یک واحد بیان نشود، با توجه به قانون اول ترمودینامیک برای یک سیکل می توان نوشت:

$$\oint \delta W = j\oint \delta Q$$

که در اینجا (j) را معادل مکانیکی حرارت می گویند و مقدار آن عبارت است از:

$$j = 4.186(Kj/Kcal)$$

ضمنا عکس ژول را معادل حرارتی کار می نامند که با A نشان داده می‌شود:

$$A = 0.2388\frac{Kcal}{Kj}$$

خواسته‌های آزمایش:

1) تکمیل جدول زیر:

شماره آزمایش	سرعت چرخش (rpm)	وزن اعمالی (وزنه قرار داده شده- gr)	نیرو (N)	فاصله زمانی بین اندازه‌گیری دمای اولیه و دمای نهایی آب (sec)	دمای اولیه آب (˚C)	دمای نهایی آب (˚C)	مقدار حرارت مبادله شده (J)	مقدار کار انجام شده (J)	عدد ژول تجربی (J)
1		50							
2		50							
3		50							
4		100							
5		100							
6		100							
7		200							
8		200							
9		200							

2) رسم نمودار زیر:

نمودار کار بر حسب گرما را رسم کنید. شیب خط چقدر است؟ شیب این خط چه چیزی را نشان می دهد؟

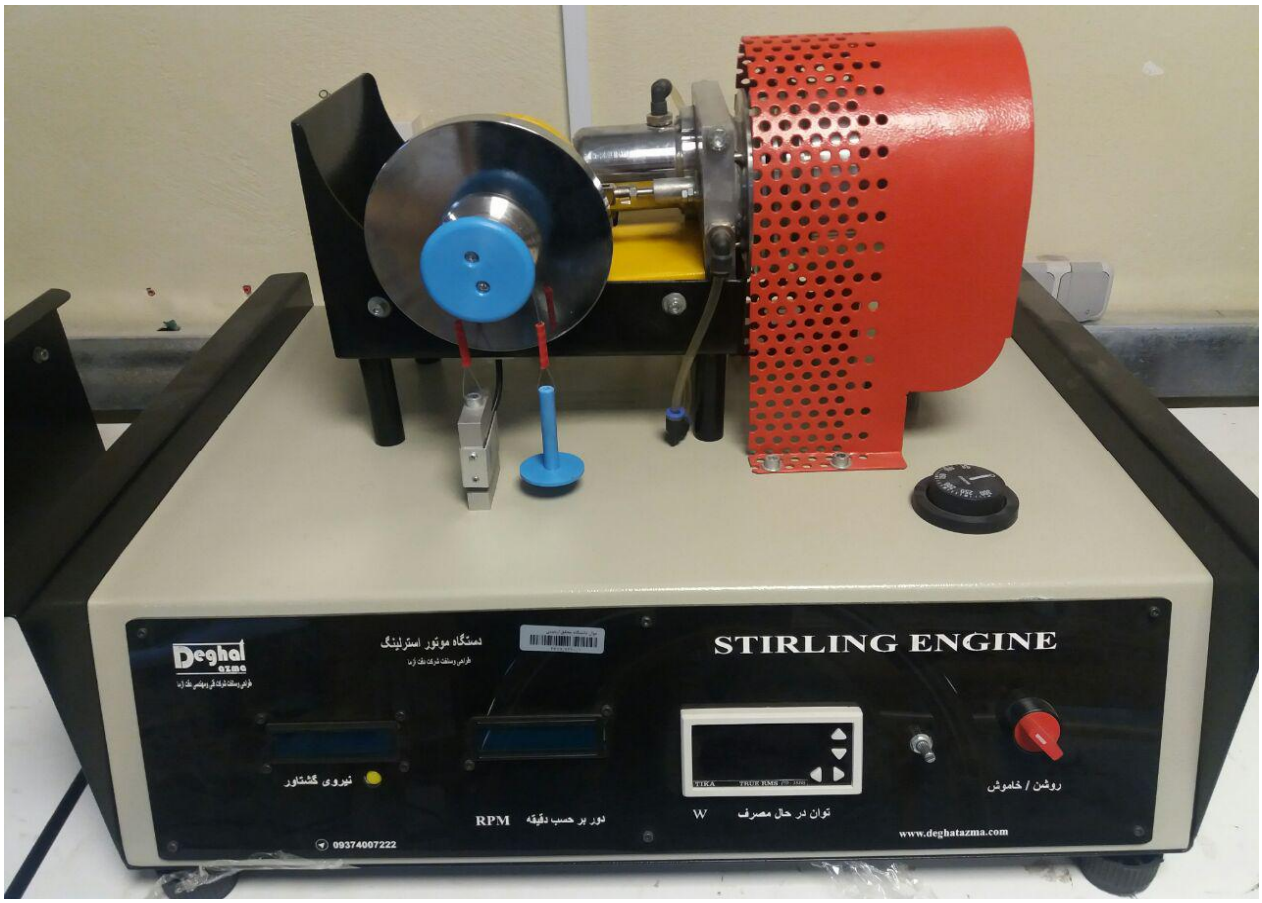
3) پاسخ به سوالات زیر:

1- با توجه به نمودار رسم شده، اگر در این آزمایش 200 ژول کار انجام شده بود، چند ژول و چند کالری حرارت به آب داده شده بود؟

2- واحدهای رایج کار و حرارت در صنعت را بیان کنید.

3- منابع خطا و تاثیر آنها بر روی نتایج آزمایش را بیان کنید.

آزمایش موتور استرلینگ



تصویر موتور استرلینگ موجود در آزمایشگاه ترمودینامیک

هدف آزمایش:

کار موتوری را که بر اساس سیکل استرلینگ طراحی شده مورد مطالعه قرار گرفته و راندمان این سیکل (مشابه راندمان سیکل استرلینگ) و نقش بازیاب در این سیکل بررسی می‌گردد.

مقدمه:

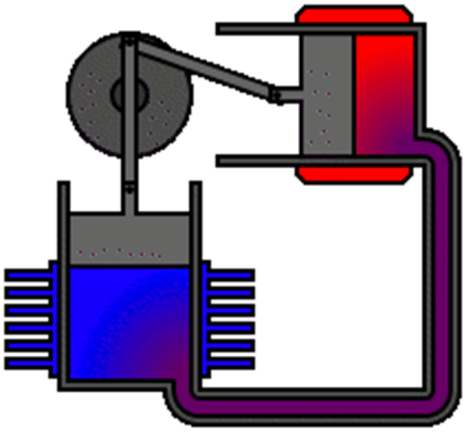
موتور استرلینگ یک موتور حرارتی است که در سال 1816 توسط رابرت استرلینگ اختراع شد. این موتورها، موتورهای گرما- کاری هستند که حرارت را به انرژی جنبشی تبدیل می‌کنند و نسبت به موتورهای بنزینی و دیزلی بازدهی بیشتری دارند. امروزه از این موتورها برای موارد خاصی همچون زیردریایی‌ها یا ژنراتورهای کمکی در قایق های خصوصی استفاده می‌شود. گازهای درون موتور استرلینگ هرگز از موتور خارج نمی‌شوند. در چنین موتورهایی هیچ احتراقی صورت نمی‌پذیرد، هیچ اگزوزی وجود ندارد و هیچ صدای انفجاری شنیده نمی‌شود. به همین دلیل چنین موتورهایی فاقد صدا هستند. این موتورها از منبع گرمایی خارجی استفاده می کنند. به طور کلی سیکلی که بر مبنای آن موتور استرلینگ عمل می‌کند از دو فرآیند دما ثابت و دو فرآیند حجم ثابت تشکیل می‌شود (دو فرآیند حجم ثابت به کمک بازیاب انجام می‌شود).

معرفی انواع موتور استرلینگ

طبقه بندی از نظر اتصال سیلندرها می باشد.

الف- موتورهای نوع آلفا

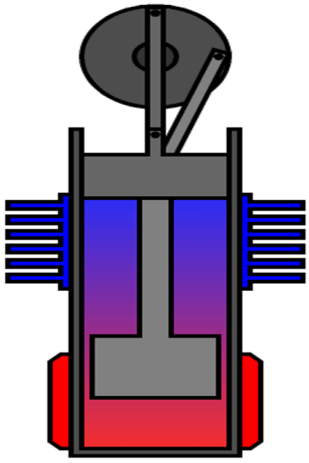
موتورهای نوع آلفا (شکل 1) دارای دو سیلندر مجزا برای فضاهای تراکم و انبساط بوده و در هر سیلندر یک پیستون قرار دارد. دو سیلندر مجزا به واسطه هیتر، بازیاب و کولر به هم متصل شده اند. پیستون گرم در کنار منبع گرم و پیستون سرد در کنار منبع سرد قرار می گیرد. این نوع از موتورها، از لحاظ مفهومی، ساده ترین ترکیب را در میان انواع ترکیبات موتور استرلینگ دارند. لازم به ذکر است که احتیاج به آب‌بندی هر دو پیستون از معایب آن به شمار می‌رود و مسئله آب‌بندی پیستون گرم به دلیل تماس با منبع گرم از مشکلات فنی آن می باشد. موتورهای آلفا دارای نسبت توان به حجم بالایی هستند.



شکل 1: تصویر شماتیک موتور استرلینگ نوع آلفا

ب- موتورهای نوع بتا

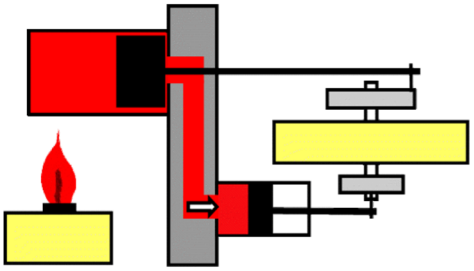
موتور استرلینگ نوع بتا (شکل 2)، قدیمی‌ترین ساختمان موتورهای استرلینگ می باشد. اختراع رابرت استرلینگ به عنوان اولین موتور استرلینگ دارای ساختمان نوع بتا بوده است. موتورهای نوع بتا از ترکیب پیستون قدرت و جابجاکننده استفاده می‌کنند. ساختمان موتور بدین گونه است که هر دو پیستون در یک سیلندر به طور خطی قرار گرفته‌اند.



شکل 2: تصویر شماتیک موتور استرلینگ نوع بتا

ج- موتورهای نوع گاما

موتور استرلینگ نوع گاما (شکل 3) همانند موتور نوع بتا دارای ترکیب پیستون جابجاکننده می‌باشد. در این نوع موتور پیستون و جابجاکننده در دو سیلندر مجزا قرار دارند. موتور استرلینگ نوع گاما نسبت به نمونه های آلفا و بتا، دارای نسبت تراکم کمتری می‌باشد. اما به دلیل اینکه تنها پیستون قدرت نیاز به آب‌بندی دارد و همچنین سیلندرها مجزا هستند، از لحاظ مکانیکی ساده‌ترین آرایش را در میان سایر چیدمان‌ها دارد.



شکل 3: تصویر شماتیک موتور استرلینگ نوع گاما

ما در این آزمایش موتور نوع آلفا استفاده می کنیم.

سیال عامل (گاز) داخل موتور استرلینگ:

در چرخه استرلینگ، سیال عامل به عنوان یکی از اجزای مهم موتور استرلینگ، در یک حجم بسته به طور متناوب گرما و سرما می‌گیرد و وظیفه حمل انرژی و انجام کار را به عهده دارد. هر سیالی با ظرفیت حرارتی مخصوص بالا ممکن است به عنوان سیال عامل در موتور استرلینگ مطرح شود. به جز چند استثنا، اکثر موتورهای استرلینگ در قرن نوزدهم از هوا به عنوان سیال عامل استفاده می‌کردند. هوا ارزان و به سهولت در دسترس می‌باشد. سیال عامل به کار رفته در موتور استرلینگ باید خصوصیات ترمودینامیکی، انتقال حرارتی و دینامیکی زیر را داشته باشد:

1- رسانش گرمایی بالا، 2- ظرفیت گرمایی ویژه بالا، 3- گرانروی پایین و 4- چگالی پایین برای عملکرد بهتر موتور. علاوه بر شرایط فوق، دسترس‌پذیری، قیمت مناسب، ایمنی عملکرد و ذخیره سازی آسان، خصوصیات مهمی هستند که نمی‌توان آنها را نادیده گرفت.

بهترین سیال عامل (گاز) داخل موتور استرلینگ:

همانطور که گفته شد، در ابتدا از هوا به عنوان سیال عامل در موتور استرلینگ استفاده می‌شد و به همین علت نامگذاری ابتدایی آن بنام موتورهای هوایی بوده است. اما بعدها به علت سبکتر بودن هلیم و هیدروژن نسبت به هوا، این دو گاز جایگزین هوا شدند. سبکتر بودن سیال عامل از طرفی منجر به کاهش حجم و وزن موتور شده و از طرفی دیگر کوچک و سبک بودن مولکولها موجب کاهش تلفات می‌گردد. در حال حاضر هیدروژن سیال عامل ایده‌آل برای موتور استرلینگ از لحاظ خصوصیات ترمودینامیکی و فیزیکی به شمار می رود. اما به خاطر خطرات آن و مسائل امنیتی، استفاده کاربردی کمتری دارد. بنابراین در حال حاضر بیشتر از هلیم به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود. هوا حدودا دارای وزن مولکولی 29 است. در حالیکه وزن مولکولی هلیم 4 است . بنابراین هوا حدودا هفت بار سنگین‌تر از هلیم می‌باشد. پس هلیم حدودا باید هفت برابر کمتر از هوا انرژی دریافت کند تا یک نیروی مشخص را تولید نماید. در کل هلیم خصوصیات ترمودینامیکی نسبتا خوبی دارد، سبک است و از طرفی خطرات هیدروژن را نیز ندارد.

سرد کننده موتور استرلینگ (کولر):

در موتورهای استرلینگ دفع حرارت در کولر با توجه به اختلاف دمای محدود بسیار مشکل بوده و از اهمیت زیادی در زمینه بازدهی موتور برخوردار است. بنابراین با بهبود و افزایش عملکرد آن یکی از گام‌های مطمئن را در جهت بهبود بازدهی می‌توان برداشت. به همین دلیل است که سطح کولر را بزرگتر از هیتر در نظر می‌گیرند. برای خنک‌کاری از آب و هوا در حالت ساده می توان استفاده کرد. در ساده‌ترین حالت استفاده از هوا معقول‌تر است، بدین‌صورت که با تعبیه فن‌های مناسب بر روی قسمت سرد موتور عمل خنک سازی انجام می‌گیرد. برای استفاده از آب، باید کانال‌های لازم برای انتقال آب پیش‌بینی شود و در صورت استفاده از پمپ و رادیاتور بازدهی بالاتر خواهد رفت. موتورهای استرلینگ در مقایسه با موتورهای احتراق داخلی نیاز به رادیاتور بزرگتری دارند.

برای مثال در مقایسه با موتور دیزل سه برابر بیشتر نیاز به دفع حرارت دارند. برای افزایش انتقال حرارت، محفظه سرد باید تا حد امکان بزرگ انتخاب شود تا عمل سرمایش امکان‌پذیر باشد.

معایب و مزایای موتور استرلینگ:

معایب : سیال عامل تا به دمای ماکزیمم نرسد ماشین شروع به کار نمی‌کند و وقتی ماشین را خاموش می کنیم حتی اگر دستگاه را از برق هم خارج کنیم تا به دمای مینیمم نرسد قادر به خاموش شدن نمی‌باشد و نمی‌ایستد. همچنین ساخت این دستگاه مشکل است.

مزایا : بدون صداست، هیچگونه آلودگی ندارد و با هر گازی مثل هیدروژن و هوا کار می کند.

امروزه از موتور استرلینگ در موارد بسیار تخصصی مثل زیردریایی و مولدهای کمکی، جاییکه عملکرد بی‌سروصدا اهمیت دارد، استفاده میشود. این موتورها یک دسته از موتورهای حرارتی خاص هستند زیرا بازده آنها تقریباً نزدیک ماکزیمم بازدهی است که توسط تئوری پیش بینی میشود (بازده چرخه کارنو). این موتور با گاز کار میکند. انبساط آن هنگام گرم شدن و انقباض آن هنگام سردشدن نیروی این موتور را تامین میکند. این مقدار گاز بین دو انتهای سرد و گرم در حرکت است و هیچگاه از این چرخه خارج نمیشود. همانطور که گفته شد این گاز هیچوقت از موتور استرلینگ خارج نمی‌شود. این موتور برخلاف موتورهای دیزلی یا بنزینی هیچ کانال تخلیه ندارد زیرا اساس کار آن بر احتراق سوخت نیست بنابراین کاملا بی صدا عمل میکند. منبع تامین گرمای آن میتواند انرژی خورشیدی، سوخت‌های فسیلی یا هر نوع گرمای اتلاف شده در طبیعت باشد.

کاربرد های موتور استرلینگ:

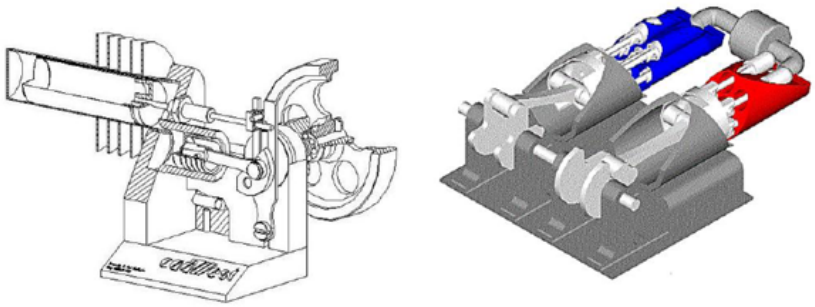
در خنک‌کاری قطعات کامپیوتر شرکت کامپیوتری و سخت افزاری *MSI* در یکی از بردهای اصلی کامپیوترهای خانگی جهت خنک‌کاری یکی از چیپ‌ستها که ورودی کارت گرافیک و ماژول های حافظه جانبی و نیز ورودی چیپ جنوبی می باشد (شکل 4) و گرمایی نسبتا بالایی هم دارد، از موتور استرلینگ جهت خنک‌کاری استفاده شده است.

شکل 4: موتور استرلینگ مورداستفاده برای خنک‌کاری یکی از بردهای اصلی کامپیوتر.

تئوری آزمایش:

این دستگاه بر اساس سیکلی نزدیک به سیکل استرلینگ عمل می‌کند. موتور دارای یک سیلندر اولیه است که در آن کار انجام می‌گیرد و پیستون آن تحت کنترل میل‌لنگ عمودی و میله‌های رابط می‌باشد. همچنین دارای یک سیلندر ثانویه است که در آن پیستون (بازیاب) تحت کنترل یک نیروی خارج از مرکز که روی میل‌لنگ انجام می‌شود قرار دارد. در موتور استرلینگ دو انتهای سیلندر جابجایی بوسیله یک مجرا به یکدیگر متصل می‌باشند و صرف‌نظر از تلفات مکانیکی می‌توان فشار محفظه‌های بالا و پائین آن را یکسان فرض نمود. در مسیر مجرای مورد بحث سه عضو مهم موتور، یعنی گرم کن، بازیاب و سرد کن، قرار گرفته اند (شکل 5). در این موتور گرمکن یا منبع گرم یک مبدل حرارتی است که حرارت را از هر منبع حرارتی مانند انرژی خورشیدی یا سوخت

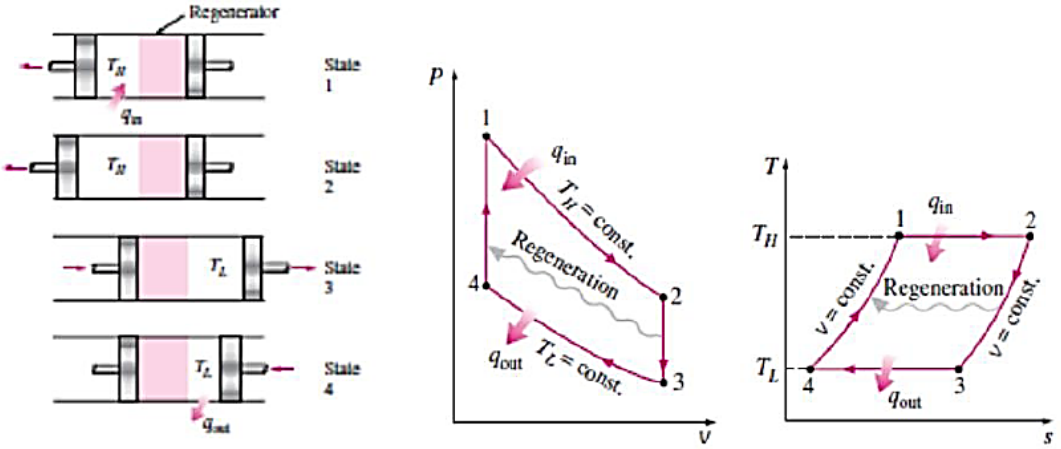
فسیلی دریافت کرده و به گاز عامل انتقال می‌دهد. منبع سرد نیز حرارت را به یک مبدل حرارتی یا محیط انتقال می‌دهد. در وسط منبع گرم و منبع سرد بازیاب قرار دارد که همانند یک باطری حرارتی در حین عبور گاز گرمای آن را گرفته و در بازگشت مجددا آن را گرم می‌کند. بازیاب بایستی ظرفیت حرارتی نسبتا بالایی داشته و هدایت حرارتی در آن بخوبی انجام گیرد. پیستون بازیاب نسبت به پیستون سیلندر اصلی 90 درجه اختلاف فاز دارد، بنابراین سرعت آن زمانیکه سرعت پیستون اصلی حداقل است، حداکثر می‌باشد. ازآنجاییکه این موتور دارای یک سیلندر کار می‌باشد، چرخ طیار آن سنگین ساخته شده است ولی در سرعتهای کم هم می‌تواند کار بکند. حرارت توسط یک المنت ولتاژ پایین که در انتهای سیلندر ثانویه قرار دارد تامین می‌شود. معمولا ماده تشکیل دهنده بازیاب بسته به نوع کاربرد، از سیم‌های فولاد ضد زنگ و یا برنج ساخته میشود. موتور استرلینگ در یک چرخه بسته عمل می‌کند و لذا بایستی از هرگونه نشت گاز عامل به بیرون جلوگیری گردد. بنابراین محل عبور محور حرکت دهنده پیستون جابجایی از مرز سیلندر از جمله محل‌هایی است که باید درزبندی شود. پیستون کار توسط محور مربوطه (شاتون) به میل لنگ متصل می‌باشد.



شکل 5: تصویر شماتیک موقعیت پیستون‌ها و سیلندرها در موتور استرلینگ

مراحل کارکرد موتور استرلینگ:

در سیکل استرلینگ انتقال حرارت بین دو دمای T_H و T_L (منبع دما بالا و منبع دما پایین) انجام می‌گیرد (شکل 6). تفاوت این سیکل با سیکل‌های کارنو این است که در سیکل استرلینگ دو فرایند بازیابی در حجم ثابت جایگزین دو فرایند آیزنتروپیک سیکل کارنو می شود. همان‌طور که در شکل 6 نشان داده شده است، چرخه‌ی ایده‌ال استرلینگ همانند دیگر چرخه‌های حرارتی از چهار فرآیند تشکیل شده است که دو فرآیند آن حجم ثابت بوده و دو فرایند دیگر دما ثابت:



شکل 6: مراحل مختلف در طی سیکل استرلینگ

۱- در فرآیند ۱ به ۲ پیستون سمت راست به طرف داخل حرکت می‌کند و گاز را متراکم می‌نماید. گرما از گاز به محیط با دمای T_L داده می‌شود. بطوریکه ضمن افزایش فشار دمای گاز در T_L ثابت می‌ماند.

۲- در فرآیند ۲ به ۳ هر دو پیستون با سرعت یکسان به سمت چپ حرکت می‌کنند و حجم ثابت می‌ماند و گاز به داخل محفظه ی سمت چپ رانده می‌شود. دمای گاز هنگام عبور از بازیاب از T_L به T_H افزایش می‌یابد.

۳- در فرآیند ۳ به ۴ گرما از المنت حرارتی با دمای T_H به گاز با دمای T_L داده می‌شود. وقتی گاز بصورت دما ثابت منبسط میشود پیستون سمت چپ به طرف بیرون حرکت میکند ،کار انجام می‌دهد و فشار گاز افت میکند.

۴- در فرآیند ۱ به ۴ هر دو پیستون با سرعت یکسان به سمت راست حرکت می‌کنند ،حجم ثابت می‌ماند و گاز به داخل محفظه ی سمت راست رانده می‌شود. هنگام عبور گاز از بازیاب، گاز به بازیاب گرما می‌دهد و دمای گاز از T_H به T_L کاهش می‌یابد. برای اینکه فرایند انتقال حرارت برگشت پذیر باشد، اختلاف دمای بین گاز و بازیاب نباید از مقدار دیفرانسیلی dT بیشتر شود.از این رو در این حالت دمای بازیاب درانتهای چپ برابر T_H و در انتهای سمت راست برابر T_L است.مقدار انرژی ذخیره شده در بازیاب در فرایند ۳-۲ با فرایند ۱-۴ برابر است. موتوراسترلینگ فقط در طول مرحله اول سیکل نیرو تولید میکند. در این جا دو روش برای افزایش قدرت خروجی از سیکل استر لینگ وجود دارد :

• افزایش قدرت خروجی در مرحله اول : در مرحله اول سیکل، فشار گاز گرم، پیستونی که کار انجام می‌دهد را می‌راند، افزایش فشار در طول این قسمت از سیکل قدرت خروجی موتور را افزایش می‌دهد. یک راه افزایش فشار، افزایش دمای گاز است. هنگامی که ما بعدا به دو پیستون موتور استرلنگ در این مقاله نگاه کنیم خواهیم دید که چگونه

یک وسیله که ریجناتور نامیده می‌شود قدرت خروجی موتور را به وسیله ی حرارت ذخیره شده- -ی لحظه‌ای بهبود می‌بخشد .

• کاهش قدرت استفاده شده در مرحله ۳ :در مرحله سوم سیکل، پیستون روی گاز کار انجام می‌دهد و از قسمتی ازکار ایجاد شده در مرحله اول استفاده می‌کند. کاهش فشار در طول این مرحله از سیکل، می‌تواند قدرت استفاده شده در این مرحله را کاهش دهد (و به طور موثر قدرت خروجی افزایش می‌یابد). یک راه کاهش فشار سرد کردن گاز در دمای پایین تر است. کار واقعی موتور به دلیل محدودیتهای طراحی فیزیکی مقداری با سیکل ایده آل اختلاف دارد.

شرح دستگاه مورد استفاده در این آزمایش:

این دستگاه بر اساس سیکلی نزدیک به سیکل استرلینگ عمل می‌کند. موتور دارای یک سیلندر اولیه است که در آن کار انجام می‌گیرد، و پیستون آن تحت کنترل میل‌لنگ عمودی و میله‌های رابط می‌باشد، همچنین دارای یک سیلندر ثانویه نیز می‌باشد که در آن پیستون (بازیاب) تحت کنترل یک خروج از مرکز، که روی میل‌لنگ انجام می‌شود می‌باشد. این دو سیلندر به یکدیگر راه دارند. به پیستون اول، پیستون قدرت و به پیستون دوم، پیستون جابجاشونده می‌گویند. پیستون دوم نسبت به پیستون اصلی 90 درجه اختلاف فاز دارد. بنابراین سرعت آن زمانیکه سرعت پیستون اصلی حداقل است ، حداکثر می‌باشد. از آنجاییکه این موتور دارای یک سیلندر کار می‌باشد چرخ طیار (*Flywheel*) آن سنگین ساخته شده است ولی در سرعتهای کم هم می‌تواند کار بکند. حرارت توشط یک المنت ولتاژ کم که در انتهای سیلندر ثانویه قرار دارد تامین می‌شود. برای سرد کردن هوا تا درجه حرارت TL گرما از طریق جداره‌های اصلی به محیط منتقل می‌شود. گشتاور ترمزی به وسیله‌ی قرار دادن وزنه‌های استاندارد روی کفه بارگذاری، و عددی که نیروسنج نشان می‌دهد، محاسبه می‌شود. قدرت ورودی به دستگاه توسط ولوم کنترل‌کننده وات قابل تنظیم بوده و مقدار آن توسط نمایشگر دیجیتال بر حسب وات نمایش داده می‌شود. یک سنسور الکترونیکی، دور موتور را اندازه‌گیری نموده و نمایش‌دهنده‌ی دیجیتال آن را بر حسب دور بر دقیقه نمایش می‌دهد. به منظور اندازه‌گیری گشتاور ترمزی در دستگاه از یک سنسور بار الکترونیکی (Loadcell) استفاده شده است. مقدار نیروی اندازه‌گیری شده توسط نمایشگر مربوطه نشان داده می‌شود.

روش انجام آزمایش:

1- ورودی آب دستگاه را به منبع تامین آب برسانید و خروجی آن را به فاضلاب وصل کنید.

2- دستگاه پس از اتصال به منبع قدرت، بوسیله‌ی کلید ON/OFF روشن می‌شود.

3- توان ورودی دستگاه، بوسیله ولوم کنترل وات و نمایشگر توان بر حسب وات قابل تنظیم است. باید چند دقیقه قبل از شروع آزمایش هیتر را روی توان موردنظر قرار دهید تا به اندازه‌ی کافی گرم شود و توانایی راه‌اندازی موتور را داشته باشد. بعد از آنکه قسمت گرم‌کننده گرمای لازم را فراهم آورد، با چرخاندن فلایویل در جهت عقربه‌های ساعت موتور شروع به کار خواهد کرد. در حین کار برای روانکاری بهتر است که به کمک یک سرنگ نفت بر روی میله‌های هر دو پیستون ریخته شود.

4- نمایشگر دور، تعداد دور موتور را بر حسب دور بر دقیقه نشان می‌دهد.

5- گشتاور ترمزی بوسیله‌ی قرار دادن وزنه‌های استاندارد روی کفه‌ی بارگذاری و عددی که نیروسنج نشان می‌دهد، محاسبه می‌شود.

نکات ایمنی:

- در زمان انجام آزمایش به بدنه‌ی سیلندر دست نزنید زیرا ممکن است باعث سوختگی گردد.
- قبل از روشن کردن هیتر و در ابتدای انجام آزمایش حتما آب ورودی به شلنگ آبگرد جهت خنک کردن بدنه دستگاه و جلوگیری از افزایش بیش از حد دمای سیستم باز شود.
- توجه داشته باشید که دستگاه را تا حد امکان از گرد و غبار در امان نگه دارید.

روابط مورد نیاز در این آزمایش:

ولتاژ دو سر المنت: V

قدرت ورودی: $P_1 = VI = RI^2$

جریان در المنت (آمپر) : I

قدرت خروجی: $P_2 = 2\pi.N.T$ یي $P_2 = T.W$

مقاومت المنت : $R = 3.5\Omega$

شعاع برآمدگی چرخ طیار: $R = 19\ mm$

گشتاور: $T = F \times R$

سرعت زاویه‌ای: $\omega = 2\pi N$

نیروی اصطکاک: $F = (N)$

راندمان $y\% = \frac{p_2}{P_1} \times 100$

خواسته‌های آزمایش:

1) تکمیل جدول زیر:

داده‌ها را در جدول زیر برای 4 آزمایش پیاپی ثبت نمایید.

جریان در المنت	راندمان	توان خروجی	توان ورودی	سرعت زاویه ای	گشتاور	نیروی اصطکاک	تعداد دور	عدد نیرو سنج	وزن وزنه	پارا متر
I	η%	P_2	P_1	ω	T	F	N	-	-	نماد
Amper	Watts	Watts	Watts	Rad/Sec	N.m	N	R.P.M	gr	gr	واحد
										1
										2
										3
										4

2) رسم نمودارهای زیر:

1- نمودارهای $P_1 - N$، $\eta - N$، $P_1 - \eta$ و $T - N$ را رسم کنید.

3) پاسخ به سوالات زیر:

1- علت تغیرات زمان رفت و برگشت را توضیح دهید؟

2- چرا برامدگی میل لنگ نباید به چربی و گرد وخاک آغشته باشد؟

3- درباره نتایج بدست آمده و راندمان دستگاه بحث کنید.

4- نقش بازیاب را توضیح دهید؟

آزمایش برج خنک کننده

تصویر دستگاه برج خنک‌کننده موجود در آزمایشگاه ترمودینامیک

هدف آزمایش:

با رشد روزافزون استفاده از سیستمهای تهویه مطبوع و از طرف دیگر نیاز به آب خنک کن در واحدهای صنعتی تقاضا برای برج‌های خنک کن افزایش یافته است. ازاینرو، هدف از انجام این آزمایش بررسی پدیده های انتقال جرم و انتقال حرارت در برجهای خنک کن می‌باشد.

مقدمه:

در اکثر کارخانجات کوچک و بزرگ یکی از مهمترین و اساسی‌ترین دستگاهها انواع برجهای خنک کننده می‌باشند. برجهای خنک کننده علاوه بر آب به منظور خنک کردن سیالاتی دیگر در صورت لزوم مورد استفاده واقع می شود. با توجه به اینکه برجهای خنک کننده معمولاً حجیم می باشند و بعلت پاشیدن آب در محیط اطراف خود و خرابی تجهیزات، آن را معمولاً در انتهای فرایند نصب می‌کنند. برج خنک کننده دستگاهی است که با ایجاد سطح وسیع تماس آب با هوا، تبخیر را آسان می کند و باعث خنک شدن سر یع آب می گردد. عمل خنک شدن در اثر از دست دادن گرمای نهان تبخیر انجام می گیرد، درحالیکه مقدار کمی آب تبخیر می شود و باعث خنک شدن آب می‌گردد . باید توجه داشت آب مقداری از گرمای خود را به طریق تشعشع، هدایت و جابجایی و بقیه از راه تبخیر از دست می دهد. بیشتر دستگاههای خنک‌کن از یک مدار بسته تشکیل شده‌اند که آب در این دستگاهها نقش جذب، دفع و انتقال گرما را به عهده دارد، یعنی گرمای بوجود آمده توسط ماشین را جذب و از دستگاه دور می سازد. این کار باعث ادامه کار یکنواخت و پایداری دستگاه می شود. در دستگاههایی که به دلایلی مجبوریم آب را به گردش درآوریم و یا به کار ببریم باید بنحوی گرمای آب را دفع کرد.

به دلایل زیر آب رایج‌ترین سرد کننده است:

1- به مقدار زیاد و ارزان در دسترس می باشد.

2- به آسانی آب را می توان مورد استفاده قرار داد.

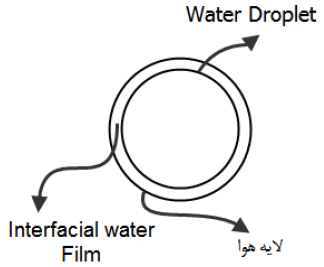
3- قدرت سرد کنندگی آب نسبت به اکثر مایعات (در حجم مساوی) بیشتر است.

4- انقباض و انبساط آب با تغییر درجه حرارت جزیی است.

5- هر چند که آب برای انتقال گرما بسیار مناسب است با بکار بردن آن مشکلاتی نیز ایجاد می شود. در واقع آب با سختی زیاد باعث رسوب سازی در دستگاهها شده و همچنین از آنجایی که بیشتر این دستگاه‌ها از آلیاژهای آهن ساخته شده‌اند مشکل خوردگی بوجود می‌آید. از طرف دیگر بیشتر برجهای خنک کننده در بر خورد مستقیم با هوا و نور خورشید می باشند که در نتیجه باعث می‌گردد محیط مناسبی برای رشد باکتر یها و میکروارگانیسم ها ایجاد شود که آنها نیز مشکلاتی همراه دارند. وارد شدن گرد و خاک به داخل برج نیز در بعضی مواقع ایجاد اشکال می نماید. در کل این مشکلات باعث می‌شوند که بازدهی دستگاه کم شده و در نتیجه از نظر اقتصادی هزینه‌ی بالاتری خواهند داشت.

تئوری آزمایش:

در برج‌های خنک‌کننده، هوا در تماس با آب قرار گرفته و انتقال حرارت بین این دو انجام می‌گیرد (شکل 1).



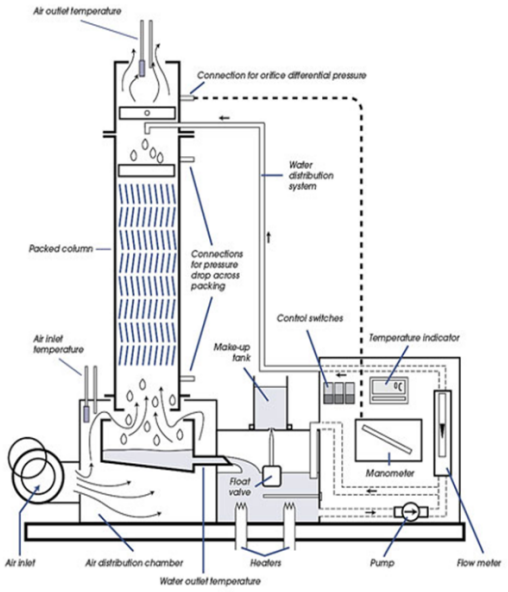
شکل 1: تصویر شماتیک لایه‌ی سطحی آب در تماس با هوا.

برحسب اینکه تماس مستقیم یا غیرمستقیم باشد برج‌های خنک‌کننده به دو گروه اصلی تقسیم شوند:

الف - برج‌های خنک کننده خشک (مبدل حرارتی)

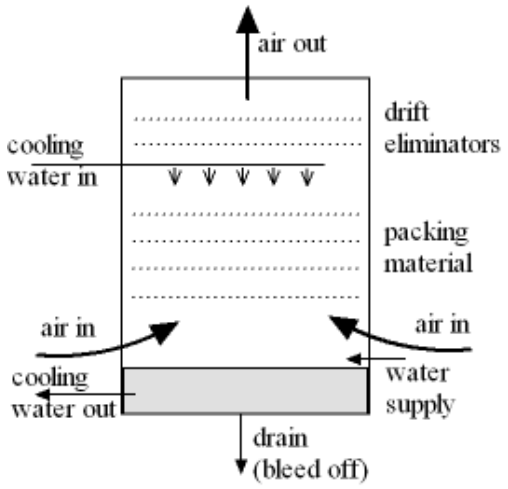
ب – برج‌های خنک کن تر (شکل 2)

در برج‌های خنک کننده خشک، تماس بین آب و هوا مستقیما برقرار نمی‌شود (مانند رادیاتور ماشین). در برج‌های خنک کن ترهوا از بین آب جاری، رد شده و با هم در تماسند، مانند برج خنک کن در نیروگاه‌های بخار برای سرد کردن آب خنک کننده کندانسور. انتقال حرارت در برج خنک‌کن تر بهتر صورت گرفته و می‌توان آب را تا دمای هوای مرطوب سرد کرد، پس می‌توان گفت برج خنک‌کن تر وسیله ای برای خنک کردن آب به وسیله تماس آن با هوا می‌باشد. برج خنک کن تر را می‌توان به دو گروه اتمسفریک و مکانیکی تقسیم بندی کرد. در روش اتمسفریک هوا به طور طبیعی جریان داشته واز فن استفاده نمی‌شود.



شکل 2: تصویر شماتیک برج خنک‌کن تر

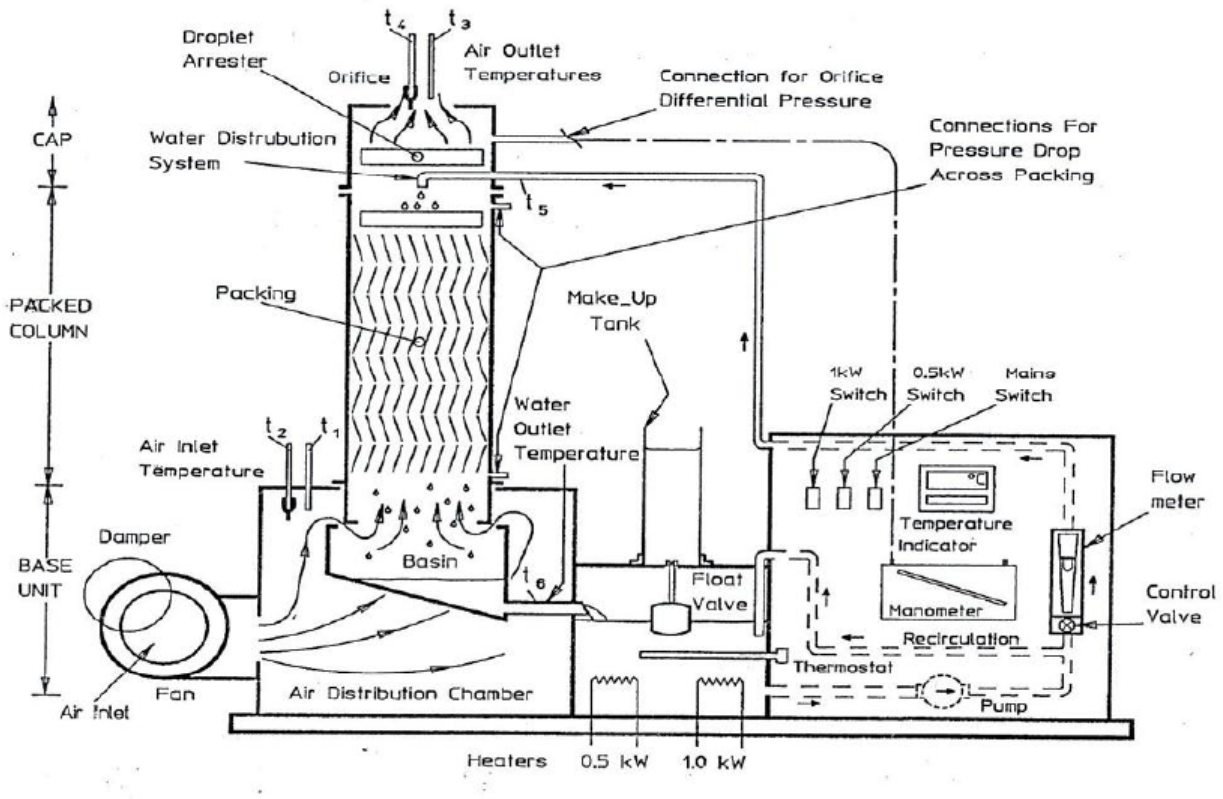
آب گرم از بالای برج به‌صورت قطره به پایین می‌ریزد (شکل 3) و هوای سرد در جهت عکس حرکت آب توسط یک فن، از پایین به بالا جریان دارد. در اثر تماس هوا با آب ذرات آب جذب هوا شده و تبخیر می‌گردد و چون برای تبخیر حرارت لازم دارد ، دمای آب پایین آمده و رطوبت و دمای هوا زیاد می‌شود.



شکل 3: مسیر جریان هوا، آب ورودی و آب خروجی در داخل برج خنک‌کن

شرح دستگاه مورد استفاده در این آزمایش:

دستگاه برج خنک‌کننده موجود در آزمایشگاه به طور کامل بی‌نیاز از دستگاه‌های جانبی دیگر بوده و شامل سیستم‌های ایجاد بار حرارتی و پمپ گردش جریان می‌باشد. این دستگاه پیکربندی و ویژگی‌های بسیار مشابهی با نمونه‌ی واقعی دارد و دارای پایداری سریع می‌باشد. در شکل 4 ساختار درونی دستگاه برج خنک‌کننده نشان داده شده است.



شکل 4: تصویر شماتیک بخش‌های مختلف دستگاه برج خنک‌کننده موجود در آزمایشگاه

در ابتدا آب گرم از مخزن گرم‌کن (که دارای دو هیتر درون آن است) حرکت کرده و با عبور از سیر تنظیم دبی و دبی‌سنج به برج وارد می‌شود. پس از اندازه‌گیری دما، آب به صورت یکنواخت بالای برج پاشیده شده و سپس روی صفحات توزیع می‌شود. با این کار لایه‌ی بسیار نازکی از آب در معرض جریان هوا قرار می‌گیرد. آب در حین حرکت از میان صفحات، خنک می‌شود که این موضوع بیشتر تحت تاثیر تبخیر اتفاق می‌افتد. آب خنک شده پس از عبور از آخرین عرشه دوباره به مخزن ذخیره وارد شده و دمای آن مجددا اندازه‌گیری شده، گرم می‌شود و مجددا وارد سیکل می‌گردد. به دلیل تبخیری که در مدار اتفاق می‌افتد، سطح آب موجود در مخزن شروع به پایین رفتن می‌کند. در شرایط پایدار، نرخی که آب، مخزن جبرانی را ترک می‌کند برابر است با نرخ تبخیر ایجاد شده در مدار بعلاوه هر گونه قطرات جزئی آب که به همراه هوای خروجی به محیط پاشیده می‌شود.

هوا نیز از محیط به وسیله‌ی یک فن که نرخ ورود هوا در آن توسط یک دریچه‌ی فلزی قابل کنترل است وارد محفظه‌ی توزیع هوا شده و قبل از ورود به برج از دماسنج‌های حباب خشک و مرطوب عبور می‌کند. همزمان با عبور هوا از میان صفحات میزان رطوبت آن افزایش یافته و آب موجود در مدار نیز خنک می‌شود. هوا در خر.ج از بالای ستون، از میان یک قطره‌گیر عبور می‌کند و مقادیر زیادی از قطرات خروجی آب از بالای برج را به دام می‌اندازد و سپس به جعبه باز می‌گرداند. سپس هوا با عبور از یک اوریفیس و دماسنج‌های حباب خشک و مرطوب به محیط تخلیه می‌شود.

اصطلاحات برج خنک‌کن:

1- بازه سرمایش: اختلاف بین دمای آب ورودی و خروجی از برج

2- بار سرمایشی: نرخ انتقال حرارت از آب که با توان هیتر گرمایشی برابر است و به صورت Kw/h یا Kcal/h بیان می‌گردد.

3- آب جبرانی: مقدار معینی آب که در یک مخزن ذخیره شده و جهت جبران اتلافات حاصل از تبخیر و عوامل دیگر استفاده می‌شود.

4- دمای رویکرد به حباب مرطوب: اختلاف بین دمای آب خروجی از برج و دمای حباب خیس هوای وارد شده به برج $(T_6 - T_2)$

نرخ تبخیر از یک سطح خیس به هوای محیط اطراف، به اختلاف فشار بخار موجود در محیط با فشار اشباع مایع بستگی دارد. فشار بخار موجود در محیط توسط رطوبت مطلق محیط و فشار محیط تعیین می‌شود. در یک سطح بسته، تبخیر تا زمانی که دو فشار بخار ذکر شده مساوی شوند، یعنی تا زمانی که هوا اشباع شود، ادامه می‌یابد. در این حالت دمای هوا و سطح نیز با هم برابر خواهد شد. اما اگر هوای اشباع نشده به طور مداوم در حال حرکت باشد، میزان انتقال حرارت از سطح خیس در اثر تبخیر با انتقال حرارت به مایع در اثر هدایت و جابجایی برابر بوده و دمای سطح به این روش محاسبه می‌شود. در این حالت دمای سطح، بیشتر خواهد بود.

دمای تعادلی که سطح در شرایط آدیاباتیک پیدا می‌کند دمای حباب مرطوب نامیده می‌شود که در علم رطوبت-سنجی، پارامتری معروف است. در یک برج خنک‌کن با اندازه‌ی نامحدود و با دبی جریان هوای کافی، دمای آب خروجی از برج با دمای حباب مرطوب هوای ورودی از پایین برج برابر می‌باشد. بدین دلیل، اختلاف بین دمای آب خروجی از برج خنک‌کن و دمای حباب مرطوب محلی (دمای رویکرد به حباب مرطوب) بیانگر میزان کارایی و تاثیرگذاری برج می‌باشد. دمای رویکرد به حباب مرطوب یکی از مهم‌ترین پارامترها در آزمایش، تشخیص، طراحی و انتخاب برج خنک‌کن است. فاکتورهایی همچون دبی جریان آب، دبی جریان هوا، دمای آب، دمای هوا و رطوبت ورودی (به ویژه دمای حباب خیس)، مساحت و حجم جعبه و نحوه‌ی قرار گرفتن صفحات بر روی برج خنک‌کن تاثیرگذار هستند.

مشخصات دستگاه:

این دستگاه شامل اجزاء مختلفی از جمله برج اصلی ، فن ، پمپ ، هیترها ، دبی سنج‌ها ، ترمومتر دیجیتالی و مخزن آب بوده و قدرت هیترها برابر 0.5KW و 1KW است.

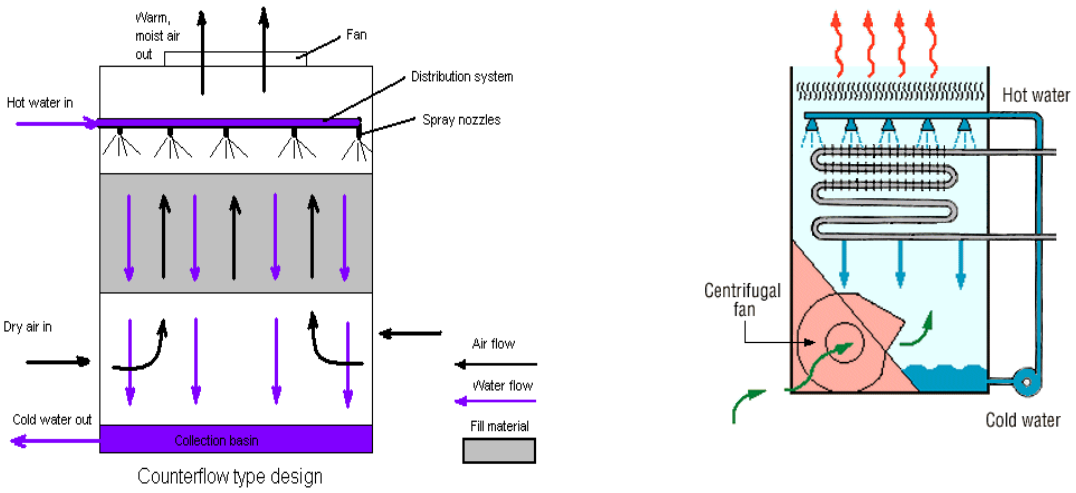
نمایشگر دما: 6 دمای موردنیاز برای انجام آزمایش با این دستگاه را نشان می‌دهد که در شکل --- نشان داده شده است.

روش انجام آزمایش:

آب از یک مخزن گرم‌کننده که دارای دو هیتر درون آن است به کمک یک پمپ به بالای برج انتقال پیدا می‌کند و از آنجا به درون برج اسپری می‌شود. قبل از ورود آب به برج، آب پمپاژ شده از یک فیلتر و روتامتر عبور می‌کند. فیلتر ناخالصی‌های همراه آب را به خود جذب می‌کند و روتامتر میزان دبی آب را بر حسب لیتر بر دقیقه نشان می‌دهد. برای این دستگاه توصیه می‌شود که دبی را از 3 لیتر بر دقیقه بالاتر نبرید. دمای آب در

لحظه‌ی ورود به برج و قبل از پاشیده شدن به برج اندازه‌گیری می‌شود و سپس بر روی طبقات برج که از پلاستیک هستند اسپری می‌شوند و در پایان آب در یک سینی جمع‌آوری شده و به مخزن گرم‌کننده باز می‌گردد. دمای آب قبل از بازگشت به مخزن گرم‌کننده نیز اندازه‌گیری خواهد شد و بدین ترتیب دمای آب ورودی و خروجی برج را خواهیم داشت. به منظور گرمایش آب داخل مخزن گرم‌کننده از دو هیتر استفاده شده است. یکی از هیترها 1000 وات و دیگری 500 وات توان دارد که به منظور فعال نمودن هر یک از آنها کلید مربوط به هر یک روی جعبه برق در حالت روشن قرار می‌دهیم. برای تنظیم دمای آب داخل مخزن گرم‌کننده یک ترموستات روی جعبه برق دستگاه نصب شده است که می‌توانیم مخزن را در دمای موردنظر و دلخواه قرار دهیم. بعد از رسیدن دمای آب مخزن به دمای انتخاب شده هیتر خاموش خواهد شد. به صورت پیش‌فرض، دمای 50 درجه سانتیگراد برای مخزن در نظر گرفته شده است. ازآنجا که مقداری از آب در طی فرایند تبخیر خواهد شد، بنابراین برای ادامه فرایند یک مخزن ذخیره آب در نظر گرفته شده است که در صورتیکه آب در سیستم اصلی کاهش یابد، شیر نصب شده در پایین مخزن ذخیره باز خواهد شد و کمبود آب جبران می‌شود. جریان هوا در دستگاه به نحوی است که هوای محیط به کمک یک فن دور متغیر به داخل برج دمیده می‌شود. در این حین دما و رطوبت نسبی هوا نیز اندازه‌گیری خواهد شد (دما و رطوبت هوای ورودی). دور فن را به کمک ولوم نصب شده بر روی صفحه‌ی جعبه برق می‌توان کم یا زیاد کرد که به این ترتیب دبی هوای ورودی به برج افزایش یا کاهش خواهد یافت. اتاقک هوا که هوای فن ابتدا به آنجا دمیده می‌شود دارای آشفتگی است و پس از آن هوا به داخل ستون برج انتقال پیدا می‌کند و با آب که در خلاف جهت آن در حرکت است برخورد می‌کند و رطوبت و دمای آن افزایش پیدا می‌کند. قطرات آب که همراه هوا به بالای برج انتقال پیدا می‌کند، با رسیدن به قطره‌گیر که قبل از دهانه‌ی خروجی نصب شده است به داخل برج برمی‌گردند. این امر از اتلاف آب جلوگیری خواهد کرد. در نهایت دما و رطوبت هوا اندازه‌گیری خواهد شد و هوا به سمت خارج از برج جاری می‌شود (دما و رطوبت هوای خروجی). ستون خنک‌کننده که بر روی اتاقک هوا سوار شده است و به واسطه شفاف بودن آن می‌توان داخل آن را به راحتی مشاهده کرد. داخل این ستون طبقات متعدد شیب‌داری وجود دارد که به آنها

پکینگ گفته می‌شود. این پکینگ‌ها امکان افزایش سطح تماس آب و هوا را بیشتر کرده و در نتیجه بازدهی برج را بالا می‌برند (شکل 5).



شکل 5: نحوه عملکرد برج خنک کن.

تمام عملیات‌های مربوط به برج خنک کن از طریق صفحه کنترل دستگاه قابل انجام ومشاهده است. ابتدا کلید برق اصلی را روشن کرده که در این صورت فن و پمپ شروع به کار کنند. پمپ، آب را به بالای برج فرستاده و در آن‌جا توسط لوله پخش کننده به طرف پایین جاری می‌شود. با شروع آزمایش بعد از گذشت زمان مناسب که دستگاه به حالت تعادل درآید (حدود ده دقیقه) می‌توان آزمایش را شروع کرد. مقداری آب در قسمت منبع تا مکان مشخص شده بریزید. در هر مرحله آزمایش برای دبی‌های متفاوت، هوای سرد توسط فن وارد برج شده و آب گرم توسط هیتر داغ شده و به وسیله پمپ بعد از عبور از دبی سنج از بالای برج به پایین جریان می‌یابد. مقداری از آب گرم در جریان هوای سرد تبخیر شده و در نتیجه دمای آب پایین می‌آید. در حالیکه دمای هوا و رطوبت آن افزایش پیدا می‌کند. آب سرد خروجی مجددا به مخزن اصلی برگشته و توسط هیتر گرم شده و به جریان در می‌آید.

روابط مورد نیاز در این آزمایش:

ثابت اوریفیس:

$$\dot{m}_a = 0.0137\sqrt{\frac{x}{V_B}} = 0.0137\sqrt{\frac{x}{(1+\omega_B)V_{aB}}}$$

$\dot{m}_a$: دبی جرمی هوای خشک ($Kg.s^{-1}$)

x: اختلاف فشار نشان داده شده توسط مانومتر

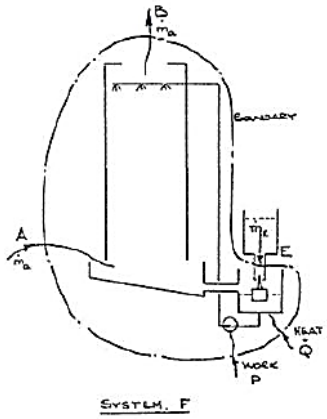
v_B حجم مخصوص مخلوط بخار آب و هوای خروجی از بالای برج ($m^3.Kg^{-1}$)

v_{aB}: حجم مخصوص هوای خشک خروجی از بالای برج ($m^3.Kg^{-1}$)

ω_B: رطوبت مطلق هوای خروجی از بالای ستون ($Kg.Kg^{-1}$)

کاربرد معادله‌ی انرژی جریان پایدار

قبل از معادلات باید ابتدا سیستم موردنظر را تعریف کنیم.



شکل 6: سیستم انتخابی در این آزمایش

برای سیستم نشان داده شده در شکل 6 که با خط چین نمایش داده شده است، انتقال حرارت از مخزن حرارت‌دهی و کار نیز توسط پمپ به حجم کنترل وارد می‌شود. هوا با رطوبت کم از A وارد شده و با رطوبت زیاد از B خارج می‌شود. همچنین آب جبرانی (که مقدار آن با افزایش رطوبت هوای عبوری از برج برابر است) نیز از E وارد سیستم می‌شود. از معادله جریان پایدار و با توجه به منفی بودن کار پمپ، داریم:

$$\dot{Q} - \dot{P} = \dot{H}_{Exit} - \dot{H}_{Entry}$$

$$\dot{Q} - \dot{P} = (\dot{m}_a h_{da} + \dot{m}_s h_s)_B - (\dot{m}_a h_{da} + \dot{m}_s h_s)_A - \dot{m}_E h_E$$

$$\dot{Q} - \dot{P} = \dot{m}_a (h_B - h_A) - \dot{m}_E h_E$$

لازم به ذکر است که:

1- دبی جرمی جریان هوای خشک ($\dot{m}_a$) درون برج خنک‌کن ثابت است درحالیکه دبی جرمی جریان هوای مرطوب به دلیل تبخیر آب افزایش می‌یابد.

2- عبارت $\dot{m}_E h_E$ در مقایسه با عبارت‌های دیگر کوچک بوده و قابل صرف‌نظر می‌باشد.

تعادل جرم:

بنابر قانون بقای جرم تحت شرایط حالت پایدار، دبی جرمی هوای خشک و دبی جرمی آب (به صورت مایع یا بخار) در ورود و خروج حجم کنترل باید برابر باشد. بنابراین:

$$(\dot{m}_a)_A = (\dot{m}_a)_B$$

$$(\dot{m}_s)_A + \dot{m}_E = (\dot{m}_s)_B$$

$$\dot{m}_E = (\dot{m}_s)_B - (\dot{m}_s)_A$$

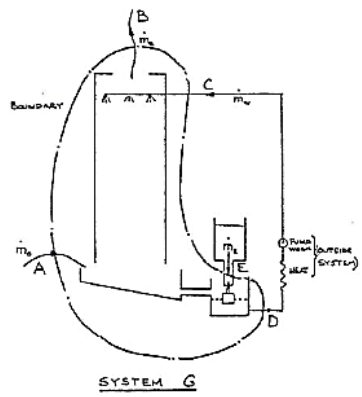
با توجه به اینکه نسبت جرم بخار به جرم هوای خشک، **ω**، برای نقاط ورودی و خروجی برج با استفاده از نمودار سایکرومتریک قابل محاسبه است داریم:

$$(\dot{m}_s)_B = \dot{m}_a \omega_B$$

$$(\dot{m}_s)_A = \dot{m}_a \omega_A$$

$$\dot{m}_E = \dot{m}_a(\omega_B - \omega_A)$$

در حالتی دیگر اگر حجم کنترل را به صورت زیر در نظر بگیریم، فرایندهای حرارت‌دهی و پمپاژ در بیرون سیستم قرار دارند، بنابراین $\dot{Q}$ و $\dot{P}$ وارد محاسبات نخواهند شد.



شکل ۳-۵: سیستم انتخابی G

شکل 7: سیستم انتخابی در این آزمایش

در این حالت آب گرم از نقطه‌ی C وارد حجم کنترل شده و از نقطه D آب خنک شده خارج می‌گردد. حال معادله انرژی جریان پایدار را به صورت زیر خواهیم داشت:

$$\dot{Q} - \dot{P} = \dot{H}_{Exit} - \dot{H}_{Inlet}$$

همانگونه که ذکر شد برای حجم کنترل بالا، P=0 در نظر گرفته می‌شود اما مقداری انتقال حرارت بین سیستم و محیط وجود دارد. بنابراین داریم:

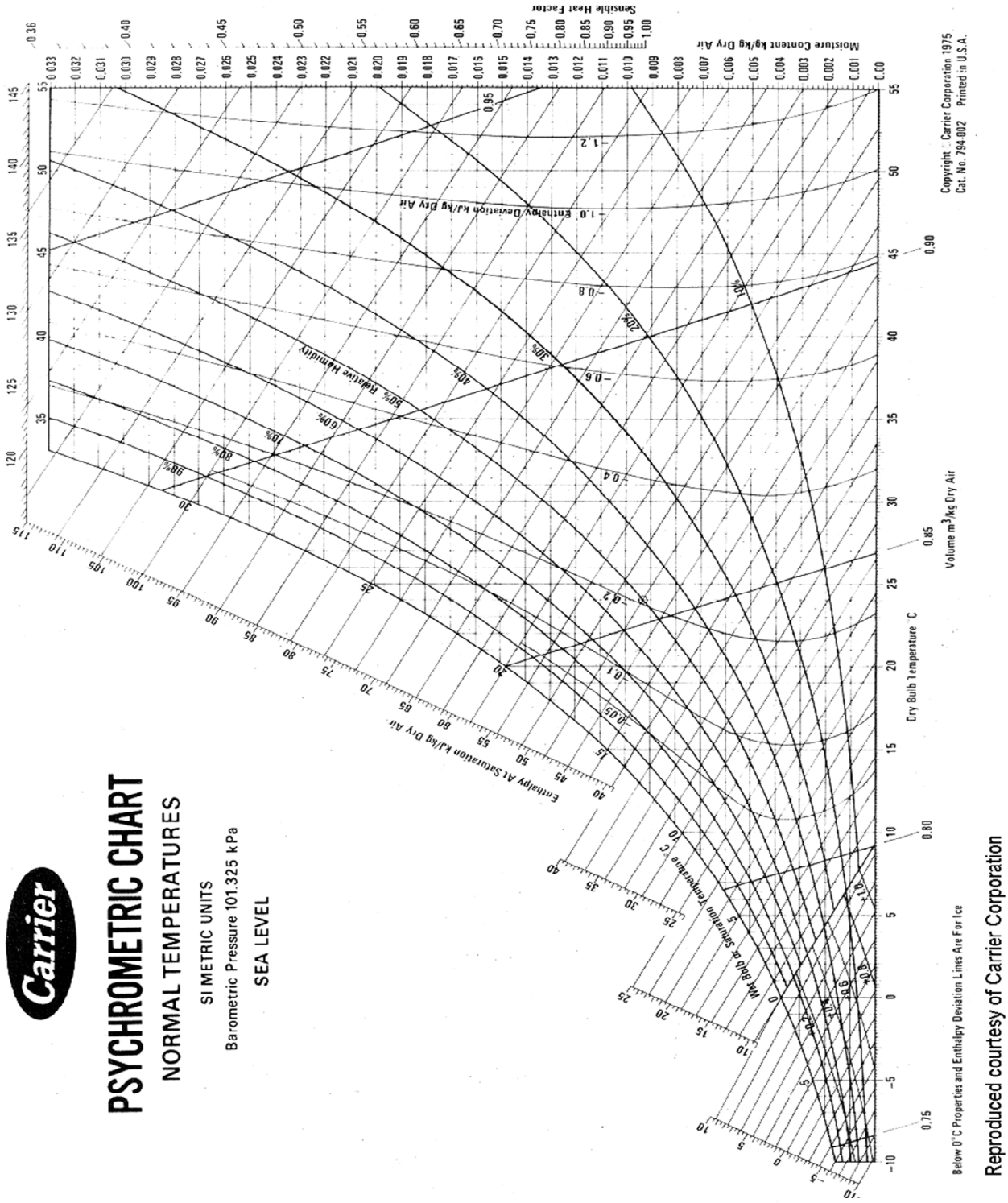
$$\dot{Q} = \dot{m}_a h_B + \dot{m}_W h_D - (\dot{m}_a h_A + \dot{m}_W h_C + \dot{m}_E h_E)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_a (h_B - h_A) + \dot{m}_W (h_D - h_C) - \dot{m}_E h_E$$

$$= \dot{m}_a (h_B - h_A) + \dot{m}_W C_P (t_D - t_C) - \dot{m}_E h_E$$

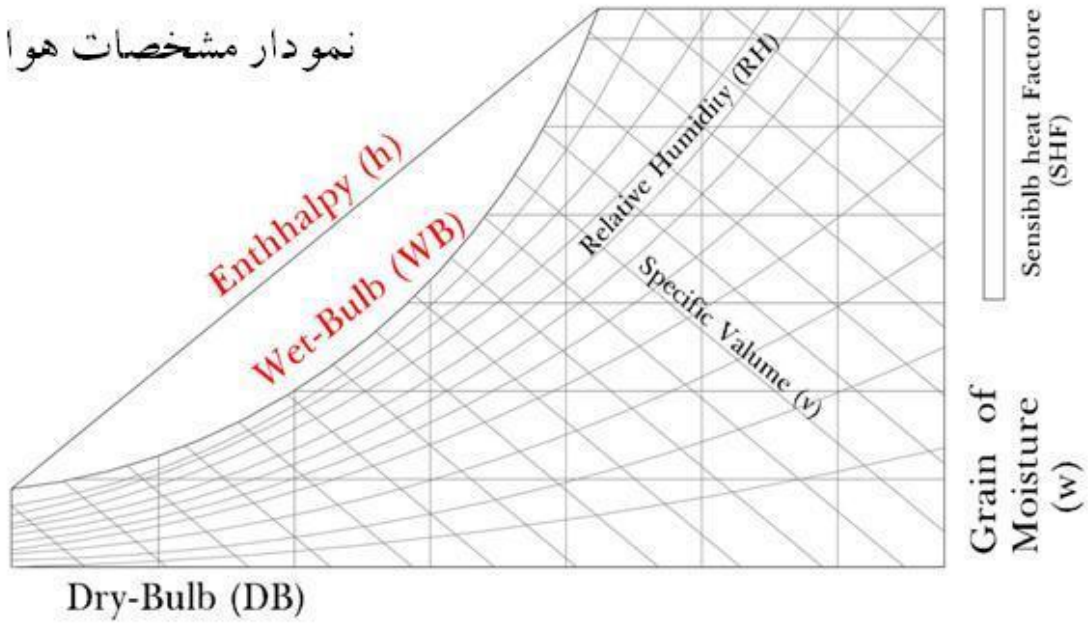
همانطور که قبلا هم بیان شد عبارت $\dot{m}_E h_E$ معمولا در مقایسه با سایر عبارت‌ها کوچک است.

در شکل 8 تصویر نمودار سایکرومتریک آورده شده است.



شکل8: نمودار سایکرومتریک.

شکل 9 مشخصات کلی این نمودار را به صورت شماتیک نشان میدهد. که در آن: درجه حرارت خشک = DB، درجه حرارت مرطوب = WB، رطوبت نسبی = RH، آنتالپی = h، حجم مخصوص = v، مقدار رطوبت = w و ضریب حرارت محسوس = SHF است.



شکل 9: نموار سایکرومتریک (مشخصات هوا).

نمودار سایکرومتریک ارتباط میان هوای خشک، رطوبت و انرژی را بیان می‌کند و کاربرد زیادی در صنایع وابسته به تهویه مطبوع مانند تهویه مطبوع ساختمان‌ها دارد. در ابتدا کار با این نمودار ممکن است سخت و پیچیده به نظر برسد ولی زمانی که با ارتباط میان اجزای مختلف آن آشنا می‌شوید، متوجه خواهید شد که کار با این نمودار و فهم آن بسیار ساده است. توجه کنید که هفت فرایند در کاربردهای مختلف تهویه مطبوع مانند تهویه مطبوع ساختمان‌ها و اتاق‌های تمیز بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند که این هفت فرایند شامل فرایندهای گرمایش، سرمایش، رطوبت گیری، رطوبت زنی، تهویه، پاک‌سازی و جابه‌جایی هوا هستند.

نمودار سایکرومتریک با استفاده از دو مفهوم بسیار ساده ساخته شده است. مفهوم اول بیان می‌کند که هوای داخل یک اتاق، ترکیبی از هوای خشک و بخار آب است. مفهوم دوم نیز بیان می‌کند که ترکیب بیان شده مقدار مشخصی انرژی دارد که این مقدار انرژی به دما و فشار مشخصه آن بستگی دارد. توجه کنید که بخار آب موجود در هوا را در کاربردهای مختلف تهویه مطبوع Moisture یا Humidity می‌نامند. همچنین مقدار بخار آب موجود در هوا را بر اساس نسبت جرم بخار آب بر جرم هوای خشک بیان می‌کنند. این پارامتر را نسبت رطوبت (Humidity Ratio) می‌نامند که با نماد ω نمایش داده می‌شود. این پارامتر با استفاده از رابطه ریاضی زیر تعریف می‌شود.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

نکته مهم دیگری که باید به آن اشاره کرد این است که خواص هوای مرطوب با فشار و ارتفاع، تغییر می‌کند. بنابراین نمودار سایکرومتریک معمولا بر اساس فشار استاندارد در سطح دریا رسم می‌گردد. بر این اساس در قسمت‌های باقی مانده این مبحث، فشار به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود. نکته مهم دیگر این است که برای بیان ارتباط میان بخار آب، هوا و دما، دو حالت مختلف را در نظر می‌گیریم که این دو حالت در ادامه مطلب مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

حالت اول: دما ثابت باقی می‌ماند ولی مقدار بخار آب در حال تغییر است:

اگر دما ثابت باقی بماند، با افزایش مقدار بخار آب موجود در هوا، رطوبت (Humidity) نیز افزایش می‌یابد. نکته دیگری که باید به آن توجه کرد این است که در هر دمای مشخص، یک مقدار بیشینه برای بخار آب موجود در هوا قابل تعیین است و به نقطه‌ای که این مقدار بیشینه در آن حضور دارد، نقطه اشباع می‌گویند. در واقع زمانی که بعد از نقطه اشباع، بخار آب بیشتری به هوا اضافه شود، مقداری برابر با همان مقدار اضافه شده، به شکل قطرات مایع یا کریستال یخ شکل می‌گیرد. در هوای بیرون این قطرات مایع را به شکل مه، ابر و باران

مشاهده می‌کنیم و کریستال‌های یخ را به شکل برف یا تگرگ می‌توان مشاهده کرد. نکته مهمی که باید به آن اشاره کرد این است که نمودار سایکرومتریک تنها در شرایطی قبل از نقطه اشباع کاربرد دارد. در واقع این نمودار به بررسی آب در فاز بخار می‌پردازد و قطرات مایع یا کریستال یخ را مورد مطالعه قرار نمی‌دهد.

حالت دوم: دما در حال تغییر است ولی مقدار بخار آب ثابت باقی می‌ماند:

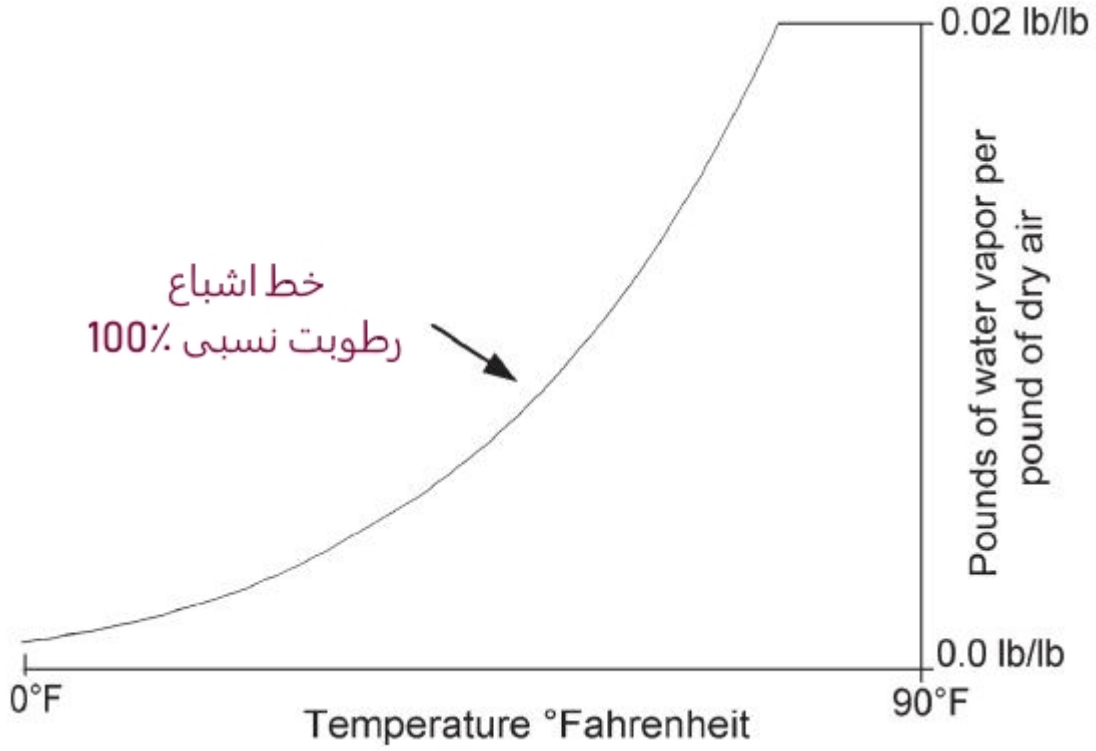
اگر دمای هوا کاهش پیدا کند، به خط اشباع (Saturation Line) می‌رسد و اگر باز هم این کاهش ادامه داشته باشد، شبنم (Dew) شکل می‌گیرد. برای مثال، اگر یک ظرف نوشیدنی را از یخچال بیرون بیاورید و برای چند دقیقه بیرون از یخچال قرار دهید، ظرف آن مرطوب می‌شود. دلیل این موضوع این است که هوای مرطوب در تماس با ظرف سرد قرار می‌گیرد و این ظرف سرد، هوایی که با آن در تماس است را تا دمایی پایین‌تر از دمای اشباع سرد می‌کند و در نتیجه شبنم شکل می‌گیرد. این موضوع در شکل 10 به خوبی به تصویر کشیده شده است.

شکل 10: تشکیل قطرات آب روی سطح یک ظرف سرد (پدیده‌ی شبنم).

همانطور که توضیح داده شد، در شرایط فوق به دمایی که در آن، هوا شروع به تقطیر می‌کند، دمای نقطه شبنم (Dew Point Temperature) گفته می‌شود.

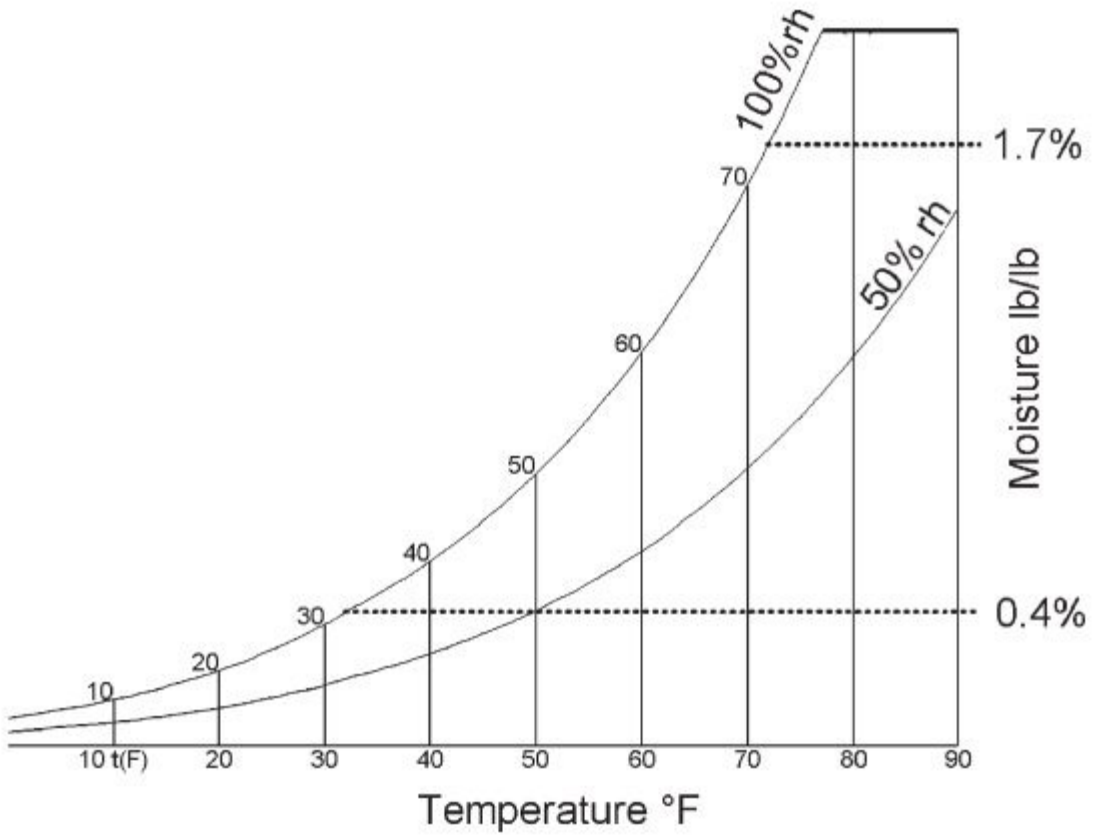
رطوبت نسبی

در قسمت قبل مفهوم نسبت رطوبت (Humidity Ratio) بیان شد. همانطور که اشاره شد، نسبت جرم بخار آب بر جرم هوای خشک را نسبت رطوبت می‌نامند. در این قسمت برای روشن شدن مفهوم رطوبت نسبی ϕ (Relative Humidity)، ابتدا نمودار مربوط به ماکزیمم مقدار بخار آب در واحد جرم هوا را نسبت به دمای هوا رسم می‌کنیم (شکل 11). محور x این نمودار، دما را نشان می‌دهد و محور Y آن نشان دهنده نسبت جرم بخار آب به جرم هوای خشک است.



شکل 11: خط اشباع یا رطوبت نسبی 100٪.

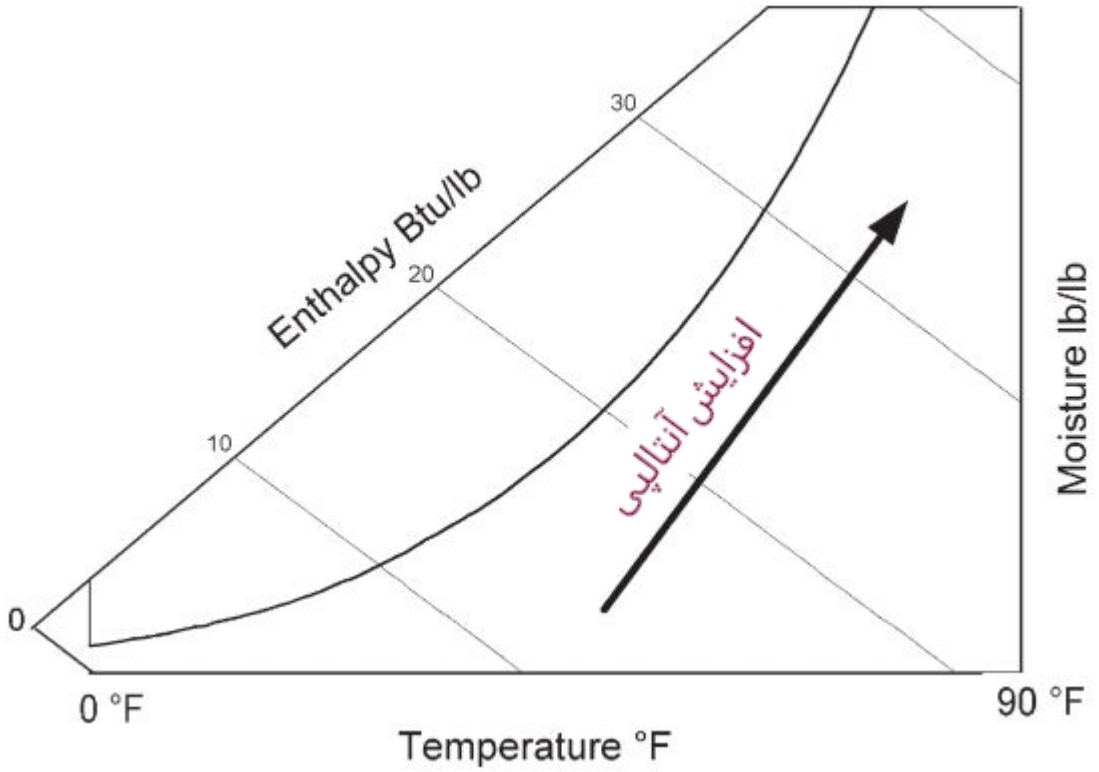
همانطور که اشاره شد، منحنی نشان داده شده در شکل 11، خط ماکزیمم بخار آب است که با عنوان خط اشباع (Saturation Line) یا رطوبت نسبی 100٪ شناخته می‌شود. رطوبت نسبی 100 % را با نماد 100 %rh نیز نمایش می‌دهند. در واقع هر نقطه موجود در خط اشباع، نشان دهنده ماکزیمم مقدار ممکن بخار آب موجود در هوای خشک و در یک دمای مشخص است. حالتی دیگری را در نظر بگیرید که در این حالت، حجم هوا تغییر نکند و در این حجم هوا و دمای معین، وزن بخار آب موجود نصف شود. این حالت را رطوبت نسبی 50٪ می‌نامند و در شکل 12، خط مربوط به این حالت نشان داده شده است. هوا در هر نقطه از خط 50٪ رطوبت نسبی، نصف مقدار ماکزیمم بخار آب ممکن در دما و حجم مشخص را دارد.



شکل 12: رطوبت نسبی 50٪ و 100٪ در نمودار سایکرومتریک.

مفهوم دوم در نمودار سایکرومتریک بیان می‌کند که در یک دمای معین، مقدار انرژی مشخصی در مخلوط هوا و بخار آب موجود است و این انرژی به دو عامل بستگی دارد. عامل اول، دمای هوا است و عامل دوم نسبت بخار آب موجود در هوا در نظر گرفته می‌شود. در واقع همانطور که بیان شد، هوا با دمای بالاتر، انرژی بیشتری دارد. اضافه کردن گرما برای افزایش دما را گرمای محسوس (Sensible Heat) می‌نامند. در حالت دیگر، توجه کنید که وقتی بخار آب بیشتری در هوا است، انرژی بیشتری نیز موجود است. در این حالت، انرژی که بخار آب در بر می‌گیرد را می‌توان گرمای نهان (Latent Heat) نامید. اندازه انرژی کل که برابر با مجموع گرمای محسوس موجود در هوا و گرمای نهان موجود در بخار آب است را به صورت رایج، آنتالپی (Enthalpy) می‌نامند. با افزودن انرژی به مخلوط هوا و بخار آب، آنتالپی نیز افزایش می‌یابد. این افزایش آنتالپی می‌تواند با

اضافه کردن یک و یا هر دو شرط زیر به وقوع بپیوندد. شرط اول این است که گرمای محسوس به هوا اضافه شود. شرط دوم نیز این است که بخار آب بیشتری به مخلوط اضافه شود و در نتیجه گرمای نهان مخلوط افزایش می‌یابد. در نمودار سایکرومتریک، خطوط آنتالپی ثابت، شیب دارند و از بالای سمت چپ به قسمت پایین سمت راست کشیده شده‌اند. این خطوط با عنوان آنتالپی یا Enthalpy در نمودار سایکرومتریک مشاهده می‌شوند. این موضوع در شکل 13 به خوبی به تصویر کشیده شده است.



شکل 13: تغییرات آنتالپی بر حسب دما و درصد رطوبت نشان داده شده در نمودار سایکرومتریک.

نقطه شبنم : عبارت است از دمایی که اگر مخلوط را در فشار ثابت سرد کنیم بخار موجود شروع به تقطیر شدن و یا انجماد می‌کند (t_w).

رطوبت مطلق یا نسبت رطوبت ($\dot{\omega}$) : عبارت است از نسبت جرمی بخار موجود در مخلوط به جرم هوای خشک $\dot{\omega} = \dot{m}_v / \dot{m}_a$ که می‌توان آن‌را با در نظر گرفتن معادله گازی کامل به صورت زیر نوشت :

$$\dot{\omega} = 0.622 \quad p_v / p_a$$

رطوبت نسبی (ϕ) : عبارت است از تعداد مولهای بخار در مخلوط به تعداد مولهای بخار در یک مخلوط اشباع:

$$\phi = n_v/n_{vs} \rightarrow \phi = P_v/P_g = \dot{\omega}\, P_{a1}/0.622P_{g1}$$

نکات ایمنی:

- در صورتی که دستگاه برای چند روز روشن نباشد، بهتر است آب درون مخزن آن را تخلیه نمایید.
- هیترها حتما باید در زمانی روشن شوند که درون مخزن گرم‌کننده آب داشته باشیم، در غیر این صورت هیترها خواهند سوخت.
- در صورت خالی بودن مخزن از آب، پمپ روشن نشود.

خواسته‌های آزمایش:

1) تکمیل جداول و نمودارهای خواسته شده در سه آزمایش شرح داده شده:

آزمایش اول: بدست آوردن خواص حالت نهایی هوا و آب از جدول ها و نمودارهای ترمودینامیکی و کاربرد معادله انرژی جریان پایدار و بالانس جرم برای سیستم انتخابی.

پس از آماده سازی دستگاه توسط مسئول ازمایشگاه دستگاه را روشن کرده دبی آب، هوا و بار سرمایشی (توان هیتر) را روی مقادیر دلخواه تنظیم کنید. اجازه دهید سیستم به پایداری برسد. سپس آزمایش را شروع نمایید. بعد از گذشت 10 دقیقه و پایدار شدن سیستم، داده‌های موردنیاز را در جدول وارد کنید. در مثال زیر نمونه‌ای از محاسبات ارائه شده است. رسیدن به پایداری هنگامی بوجود می‌آید که تغییر محسوسی در دماها، نرخ جریان و غیره ایجاد نشود. لازم به ذکر است که در این آزمایش اختلاف فشار دو سمت اوریفیس باید محاسبه شود.

؟	**تراکم جعبه m^{-1}**
؟	**$T_1(^0C)$**
؟	**$T_2(^0C)$**
؟	**$T_3(^0C)$**
؟	**$T_4(^0C)$**
؟	**$T_5(^0C)$**

$T_6(^0C)$	؟
$T_7(^0C)= T_1(^0C)$	؟
X(mmH_2O) دیفرانسیل اوریفیس	**16**
$\dot{m}_w$ نرخ جریان آب	؟
$\dot{Q}$ بار سرمایشی	؟
S بازده زمانی	؟
مقدار آب جبرانی	؟

مثال: نمونه محاسبات برای برج خنک‌کن در شرایط زیر:

اختلاف فشار اوریفیس: X = 16 میلیمتر آب،

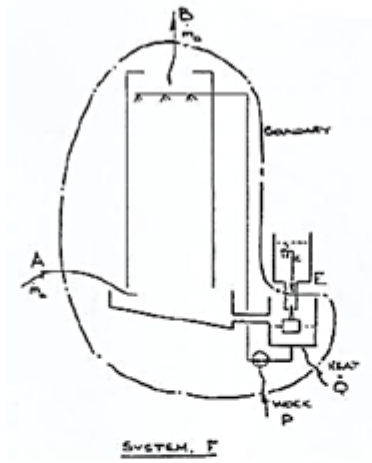
دبی آب: 40 گرم بر ثانیه

بار سرمایشی (توان هیتر): 1 کیلووات

مطلوب است محاسبه‌ی: $\Delta\dot{H}$، $\dot{m}_e$، $\dot{Q} - P$، h_e، m_e، $\dot{m}_a$.

خواسته ها	داده ها
ستون نصب شده	B
تراکم جعبه m^{-1}	۱۱۰
T_1 (°C)	۲۰٫۸
T_2 (°C)	۱۷
T_3 (°C)	۲۲٫۹
T_4 (°C)	۲۲٫۷
T_5 (°C)	۲۹٫۵
T_6 (°C)	۲۳٫۱
T_7 (°C) = T_1 (°C)	۲۰٫۸
دیفرانسیل اوریفیس x(mmH2O)	۱۶
نرخ جریان آب $\dot{m}_w(gm.s^{-1})$	۴۲
بار سرمایشی $\dot{Q}(KW)$	۱٫۰
بازه ی زمانی (s)	۶۰۰
مقدار آب جبرانی m_E/kg	۰٫۲۶

با استفاده از نمودار سایکرومتریک داریم:



سیستم انتخابی

$$h_A = 47.8\ kj.kg^{-1}$$

$$\omega_A = 0.0105\ kg.kg^{-1}$$

$$h_B = 67.4\ kj.kg^{-1}$$

$$\omega_B = 0.0175\ kg.kg^{-1}$$

$$V_{a_B} = 0.862 m^3 (kg\ dry\ air)^{-1}$$

$$\dot{m}_a = 0.0137 \sqrt{\frac{x}{(1+\omega_B)V_{aB}}}$$

$$= 0.0137 \sqrt{\frac{16}{(1+0.0175)\times 0.862}}\ kg.s^{-1} = 0.0585\ kg.s^{-1}$$

$$m_E = \frac{m_E}{y} = \frac{0.26}{600}\ kg.s^{-1} = 0.433 \times 10^{-3}\ kg.s^{-1}$$

آنتالپی مخزن جبرانی (h_f @ 20.8 °c)

$$h_E = 86.9\ kj.kg^{-1}$$

$$\dot{Q} - \dot{P} = \Delta\dot{H} - \Delta\dot{K}E$$

$$\dot{Q} - \dot{P} = 1.0KW - (-0.1KW) = 1.1KW$$

توان پمپ تقریبا ۱۰۰ کیلو وات، منفی در نظر گرفته می‌شود.

$$\Delta\dot{H} = \dot{H}_{Exit} - \dot{H}_{Entry}$$

$$= \dot{m}_a h_B - \dot{m}_a h_A - \dot{m}_E h_E = \dot{m}_a(h_B - h_A) - \dot{m}_E h_E$$

$$= 0.0585(67.4 - 47.8) - 0.433 \times 10^{-3} \times 86.9$$

$$= 1.146 - 0.038 = 1.108KW$$

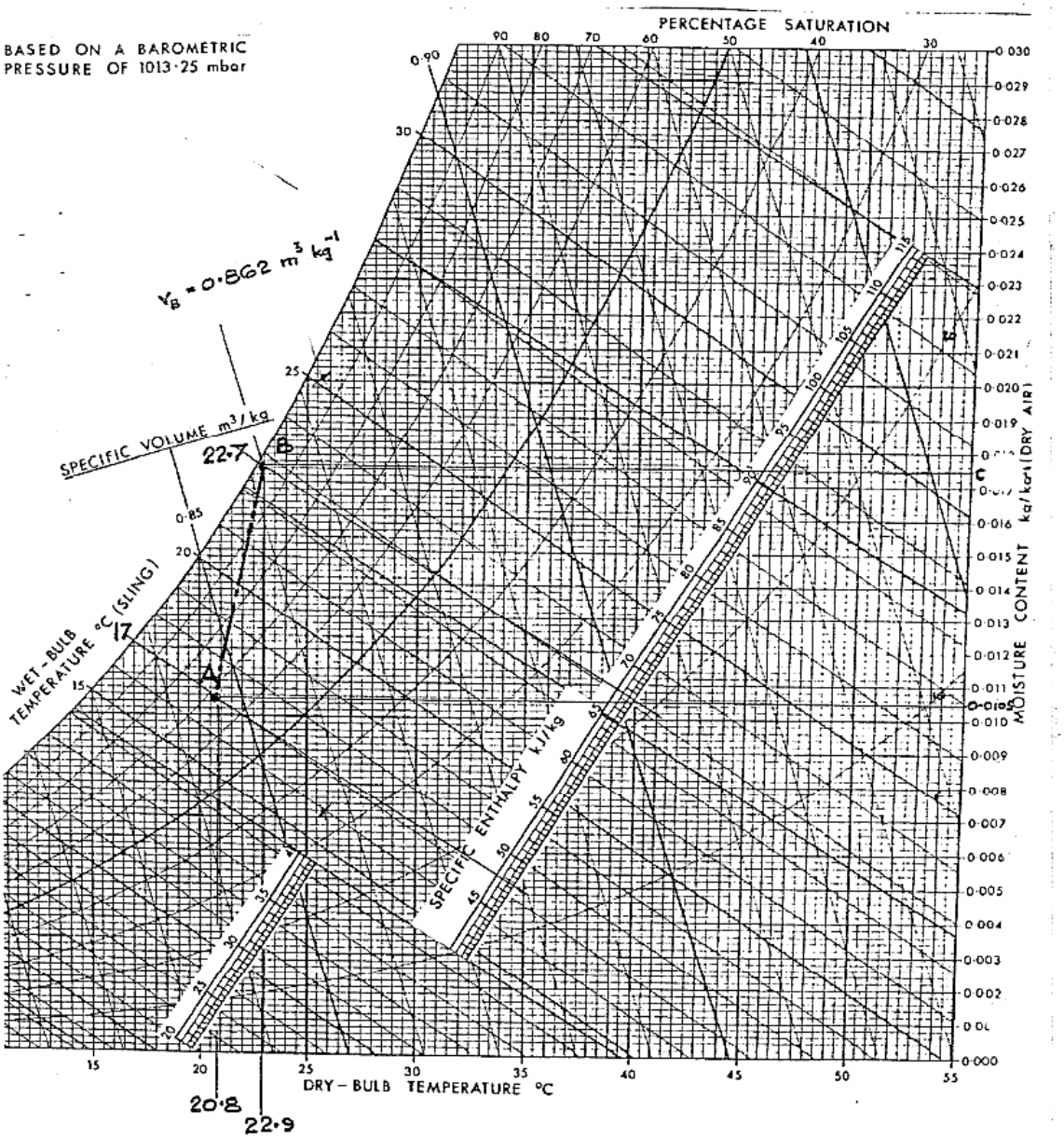
قانون بقای جرم:

$$\dot{m}_E = \dot{m}_a(\omega_B - \omega_A)$$

$$\dot{m}_E = 0.433 \times 10^{-3}\ kg.s^{-1}$$

$$\dot{m}_a(\omega_B - \omega_A) = 0.0585(0.0175 \times 0.0105) = 0.409 \times 10^{-3}\ kg.s^{-1}$$

به نظر شما اختلاف در محاسبه‌ی $\dot{m}_E$ ناشی از چیست؟



شکل 14: نمودار سایکرومتریک

آزمایش دوم: تاثیر بار سرمایشی بر روی دمای رویکرد به حباب مرطوب:

همان طور که اشاره شد در شرایط مطلوب عملکرد برج خنک کننده دما خروجی از برج ، T6 ، با دمای حباب مرطوب هوای ورودی به برج، T2 برابر است. در شرایط واقعی این دو دما با هم اختلاف دارند که اختلاف آنها تحت عنوان دمای رویکرد به حباب مرطوب شناخته می شود و هر چقدر آن کمتر باشد برج عملکرد بهتری داشته است. هدف این ازمایش برسی تاثیر بار سرمایشی (توان هیتر) و دبی هوا بر رو دمای رویکرد به حباب مرطوب می باشد. پس از آماده سازی دستگاه توسط مسئول ازمایشگاه، دبی آب و هوا را روی مقادیر دلخواه تنظیم نمایید. بدون تغییر دادن دبی هوا و آب، آزمایش را برای چهار حالت بار سرمایشی (توان هیتر) 0، 0/5، 1 و 1/5 کیلو وات انجام داده و داده‌های جدول را تکمیل نمایید. دراین آزمایش باید اختلاف فشار دو سر اوریفیس اندازه گیری شود.

T_1(^{0}C)	؟	؟	؟	؟
T_2(^{0}C)	؟	؟	؟	؟
T_3(^{0}C)	؟	؟	؟	؟
X(mmH_2O)	**16**	**16**	**16**	16
نرخ جریان آب	**-**	**-**	**-**	-
بار سرمایشی $\dot{Q}$	**0**	**0,5**	**1**	1,5

در مثال زیر نمونه محاسبات برای این آزمایش ارائه شده است. همین محاسبات را برای شرایط آزمایش خود تکرار نمایید و با ذکر علت بیان کنید که بار سرمایشی چه تاثیری بر روی دمای رویکرد به حباب مرطوب دارد.

نمونه مثال حل شده: در یک آزمایش داده‌های بدست آمده در یک مرحله به صورت جدول زیر آورده شده است:

الف) جریان جرمی هوا، ب) نرخ جریان آب بر واحد سطح، ج) حجم مخصوص در خروجی، د) دمای رویکرد به حباب مرطوب، د) رسم نمودار بار سرمایشی بر حسب دمای رویکرد به حباب مرطوب.

شماره گام (مرحله)	1
ستون نصب شده	**B**
تراکم جعبه m^{-1}	۱۱۰
T_1 (°C)	۲۱,۲
T_2 (°C)	۱٦,٤
T_6 (°C)	۲۳,۲
دیفرانسیل اوریفیس $x(mmH_2O)$	۱٦
نرخ جریان آب $\dot{m}_w(gm.s^{-1})$	٤۰
بار سرمایشی $\dot{Q}(KW)$	۱

پاسخ:

بار کل: بار اعمالی + توان ورودی پمپ

$$= 0.1 + 1.0kw = 1.1kw$$

دمای رویکرد به حباب مرطوب:

$$= t_D - t_{A_w} = 23.2 - 16.4K = 6.8K$$

حجم مخصوص در خروجی(بطور نمونه):

$$= 0.87\frac{m^3}{kg}$$

$$\dot{m}_a = 0.0137\sqrt{\frac{x}{V_B}}$$

$$\dot{m}_a = 0.0137\sqrt{\frac{16}{0.87}} = 0.0587\frac{kg}{s}$$

مساحت سطح مقطع ستون:

$$A = 0.15 \times 0.15m^2 = 0.0225m^2$$

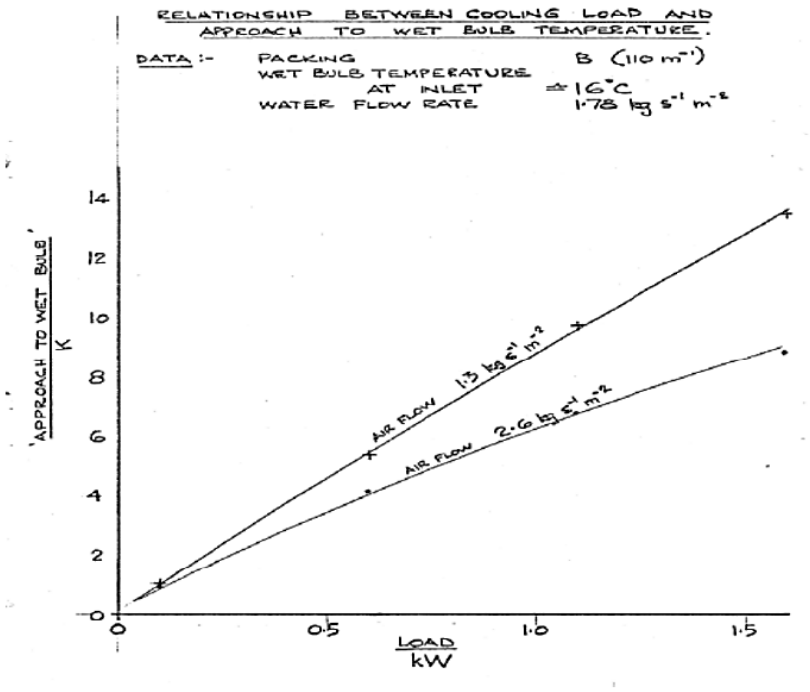
جریان جرمی هوا بر واحد سطح:

$$\frac{\dot{m}_a}{A} = \frac{0.0587}{0.0225}\ kg.s^{-1}.m^2 = 2.6\ kg.s^{-1}.m^2$$

نرخ جریان آب بر واحد سطح:

$$\frac{\dot{m}_w}{A} = \frac{0.04}{0.0225}kg.s^{-1}.m^2 = 1.777kg.s^{-1}.m^2$$

نمودار بصورت زیر است:



شکل 15: نمودار تغییرات بار سرمایشی بر حسب دمای رویکرد به حباب مرطوب.

آزمایش سوم: رابطه بین سرعت هوا و دمای رویکرد به حباب مرطوب:

پس از اماده سازی دستگاه توسط مسئول آزمایشگاه را روشن کرده دبی آب را روی40 g/s و بار سرمایشی را روی1 kw تنظیم نمایید. دمپر هوای ورودی به فن را کاملا باز کنید طوری که دبی هوای ورودی به برج ماکزیمم شود. اجازه دهید سیستم به پایداری برسد و نتایج را در جدولی مانند جدول زیر یاداشت نمایید. بدون تغیر دادن دبی آب و بار سرمایشی، آزمایش را برای دو دبی هوای دیگر انجام داده و نتایج را یاداشت کنید.

در مثال زیر نمونه محاسبات برای این آزمایش ارائه شده است. همین محاسبات را برای شرایط آزمایش خود تکرار نمایید و نمودار مربوطه را رسم نموده و در مورد نتایج بدست آمده بحث کنید.

$T_1(^0C)$	**?**	**?**	**?**	?
$T_2(^0C)$	**?**	**?**	**?**	?
$T_3(^0C)$	**?**	**?**	**?**	?
$T_4(^0C)$	**?**	**?**	**?**	?
$T_5(^0C)$	**?**	**?**	**?**	?
$T_6(^0C)$	**?**	**?**	**?**	?
$X(mmH_2O)$	**16**	**16**	**16**	16
$\dot{m}$	**?**	**?**	**?**	?
$\dot{Q}$	**?**	**?**	**?**	?
$\Delta p(mmH_2O)$	**?**	**?**	**?**	?

نمونه مثال حل شده: در یک آزمایش داده‌های بدست آمده در یک مرحله به صورت جدول زیر آورده شده است. مطلوب است محاسبه: الف) دمای حباب مرطوب ورودی، ب) دمای آب خروجی، ج) نمودار سرعت هوا بر حسب دمای رویکرد به حباب مرطوب، د) دمای رویکرد به حباب مرطوب، ه) نرخ جریان جرمی و حجمی هوا، و) سرعت هوا، ن) حجم مخصوص هوا در خروجی.

شماره گام	1
ستون نصب شده	C
تراکم جعبه m^{-1}	۲۰۰
T_1 (°C)	۲۲
T_2 (°C)	۱۸,۵
T_3 (°C)	۲۳,۹
T_4 (°C)	۲۳,۹
T_5 (°C)	۳۰,۶
T_6 (°C)	۲۴,۷۵
دیفرانسیل اوریفیس $x(mmH_2O)$	۱۰
نرخ جریان آب $\dot{m}_W(gm.s^{-1})$	۴۰
بار سرمایشی $\dot{Q}(KW)$	۱,۰
افت فشار در عرض جعبه $\Delta P(mmH_2O)$	۲,۹

پاسخ:

دمای حباب خیس ورودی(t_2)

$$= 18.5\ C^O$$

دمای حباب خیس ورودی(t_6)

$$= 24.75\ C^O$$

حجم مخصوص هوا در خروجی(با میانیابی کردن بر روی نمودار سایکرومتریک بین t_{B_D} و t_{B_W}

$$= 0.86\, m^3 kg^{-1}$$

نرخ جریان جرمی هوا:

$$\dot{m}_a = 0.0137\sqrt{\frac{h}{V_B}}$$

$$\dot{m}_a = 0.0137\sqrt{\frac{10}{0.86}} = 0.0467\frac{kg}{s}$$

نرخ جریان حجمی هوا:

$$= \dot{m}V_B$$

$$= 0.0467 \times 0.06\, m^3.s^{-1} = 0.04\, m^3.s^{-1}$$

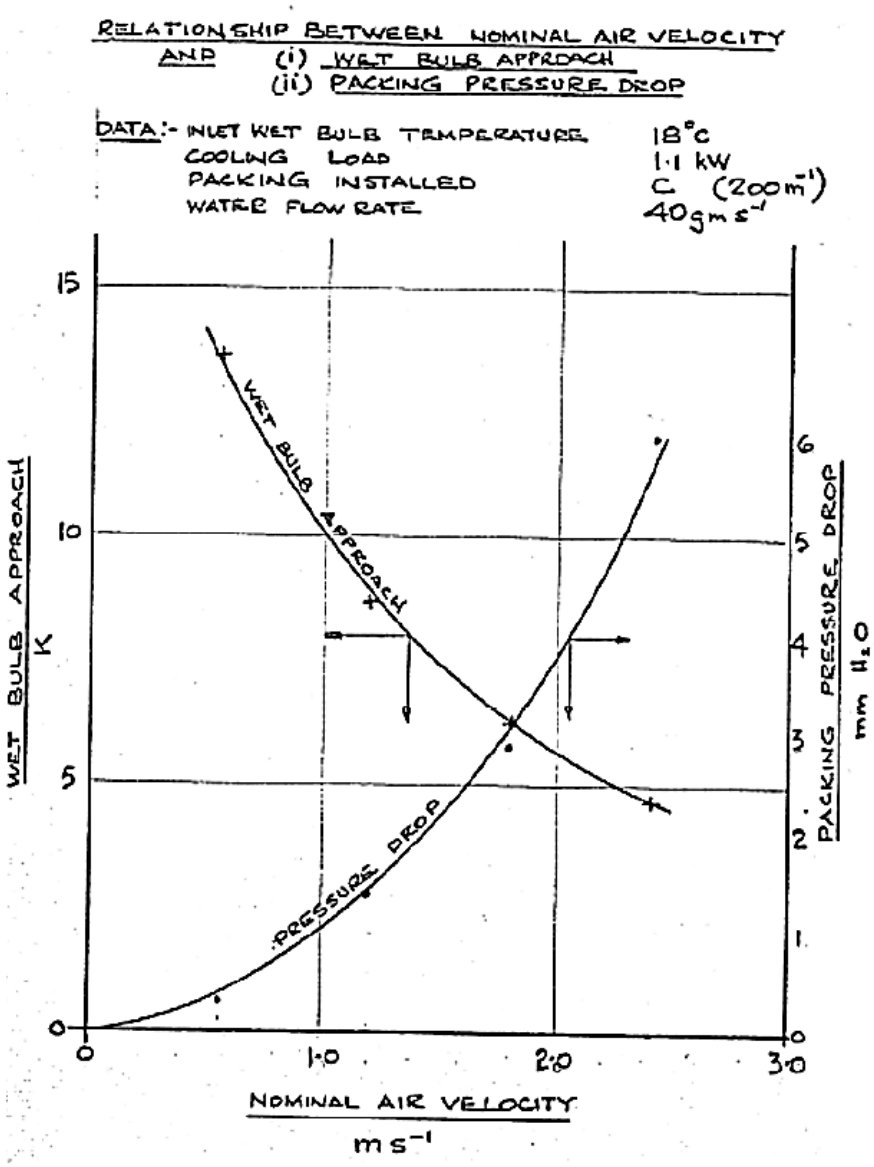
مساحت سطح مقطع خالی برج:

$$= 0.15 \times 0.15 = 0.0225m^2$$

سرعت هوا:

$$\frac{\dot{V}}{A} = \frac{0.04}{0.0225} = 1.78\, m.s^{-1}$$

نمودار سرعت هوا بر حسب دمای رویکرد به حباب مرطوب بصورت زیر است:



شکل 16: نمودار تغییرات سرعت هوا بر حسب دمای رویکرد به حباب مرطوب.

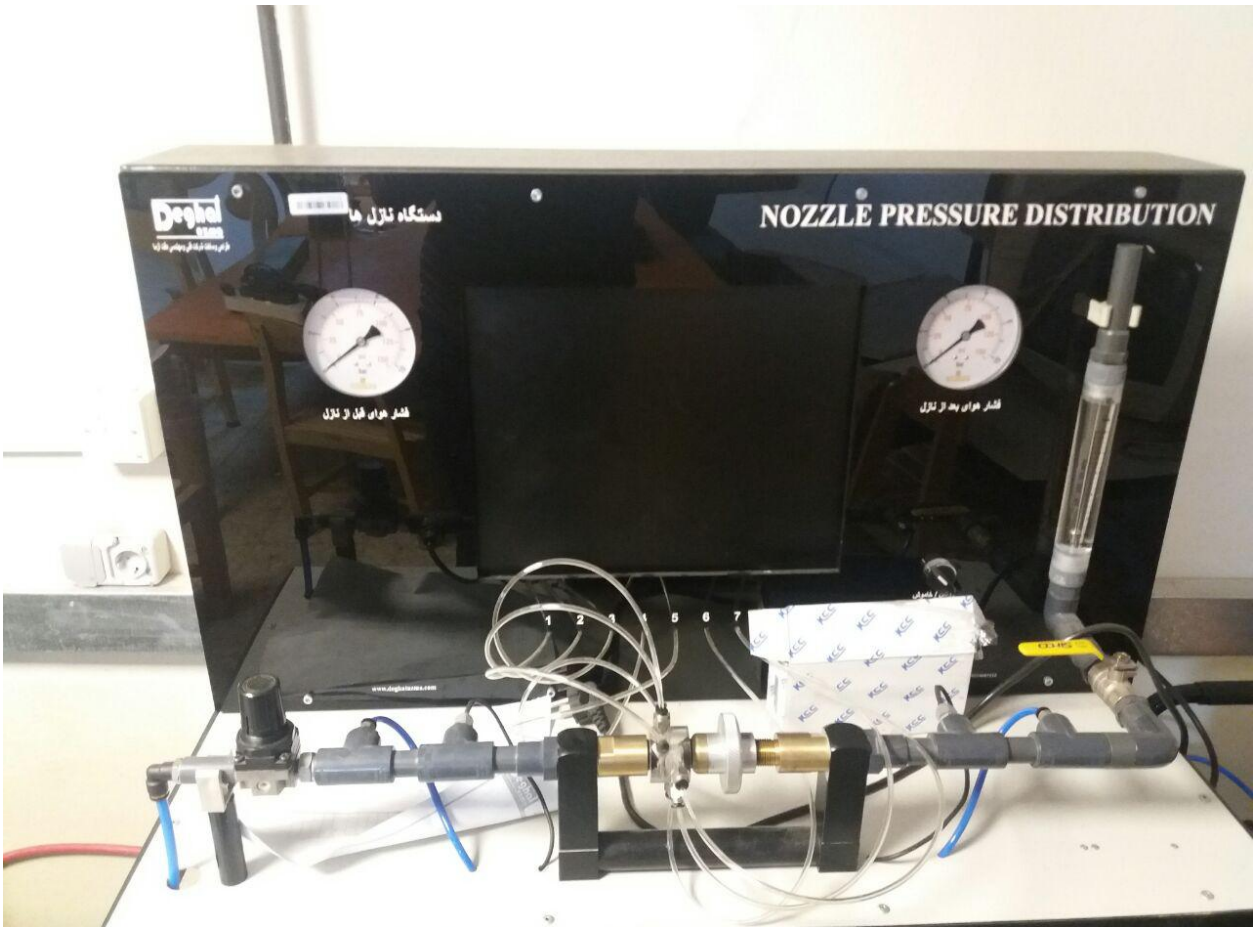
نکته: در تمامی آزمایشات$X(mmH_2O)$ اختلاف فشار دو سر اوریفیس است که ما در اینجا برابر 16 فرض کرده‌ایم.

2) پاسخ به سوالات زیر:

1) رسم فرایند در برج بر روی نمودار سایکرومتریک.

2) اهمیت وکاربرد برج خنک کن در صنعت.

آزمایش نازل



تصویر دستگاه تست نازل موجود در آزمایشگاه ترمودینامیک

هدف آزمایش:

شیپوره یا نازل به وسیله‌ای گفته می شود که بتواند به سیال شتاب داده و سرعت آن را افزایش دهد. بطور کلی کاربرد اصلی نازل ها در جلوبرندگی موشکها وهواپیماها می‌باشد. اگرچه این وسیله در موارد یگری مانند پمپهای خلا کاربراتورها، آب افشانها وغیره استفاده می‌شود ولی کاربرد اصلی آنها در بکارگیری از عکس‌العمل سیال خارج شده از آن است. هدف از انجام این آزمایش، بررسی پدیده های مربوط به نازل های زیرصوت و مافوق صوت و همچنین چگونگی توزیع فشار درون آنها است.

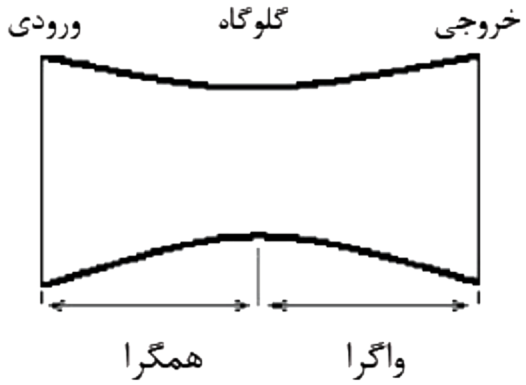
مقدمه:

تعریف نازل: نازل وسیله‌ای است که با کاهش فشار سیال، سرعت آن را افزایش می‌دهد. فوران پر سرعت سیال خروجی از یک شیپوره موارد استفادهٔ متعددی دارد:

- در توربین ها انرژی جنبشی ذخیره شده در سیال خروجی از شیپوره، انرژی لازم جهت حرکت پره‌ها را فراهم می کند.
- در موشک‌ها تغییرات اندازهٔ حرکت (مومنتوم) سیال خروجی از شیپوره، قسمت اعظم نیروی جلوبر (یا نیروی پیش رانش یا تراست) را تشکیل می دهد.
- در اژکتورها و انژکتورها تغییرات مومنتوم سیال باعث به وجود آمدن یک اختلاف فشار دلخواه می شود.

نازل همگرا - واگرا

در این نوع نازل سطح مقطع ورودی به تدریج کاهش می‌یابد تا به سطح ایده‌آل در گلوگاه برسد (بخش همگرا) و سپس زیاد می‌شود تا به سطح مقطع در خروجی برسد (بخش واگرا). در شکل 1 تصویر شماتیک یک نازل همگرا – واگرا نشان داده شده است.



شکل 1: تصویر شماتیک یک نازل همگرا – واگرا.

نازل همگرا:

در این نوع نازل، سطح مقطع ورودی به تدریج کم می‌شود تا در خروجی نازل به یک مقدار حداقل برسد (گلوگاه). تصویر شماتیک این نوع نازل در شکل 2 به تصویر کشیده شده است.

شکل 2: تصویر شماتیک یک نازل واگرا.

تعریف دیفیوزر

دیفیوزر عکس عمل نازل را انجام می‌دهد؛ یعنی با کاهش سرعت سیال فشار آن را افزایش می‌دهد.

مشخصات سیال در گلوگاه را با اندیس t نمایش می‌دهند (P_t، T_t و C_t). می‌توان اثبات کرد که وقتی P_t برابر مقدار زیر باشد، دبی عبوری از نازل ماکزیمم است و به آن فشار بحرانی می‌گویند.

$$P_t = (\frac{2}{\gamma+1})^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} P_1 \quad \text{و} \quad T_t = (\frac{2}{\gamma+1}) T_1$$

در رابطهٔ بالا P_t و T_t فشار و دمای گلوگاه هستند که در اینحالت فشار و دمای بحرانی نامیده می‌شوند.

همینطور سرعت صوت نیز از رابطهٔ $C = \sqrt{\gamma RT}$ محاسبه می‌شود.

اگر فشار سیال در گلوگاه به فشار بحرانی برسد، در اینحالت سرعت سیال نیز به سرعت صوت می‌رسد و سرعت را اصطلاحاً صوتی یا سونیک (Sonic velocity) می‌گویند. نسبت سرعت سیال به سرعت صوت را به صورت عدد ماخ نشان می‌دهند که معیاری برای تشخیص حالت سیال از نظر سرعت می‌باشد:

سرعت سونیک (صوتی یا تراصوت)	Mach=1
سرعت سوپرسونیک (مافوق صوت یا فراصوت)	Mach >1
سرعت ساب‌سونیک (مادون صوت یا فروصوت)	Mach <1

توجه به دو نکته حائز اهمیت است:

الف- اگر $P_e < P_t$ (P_e فشار خروجی است) شود، در این صورت نازل از نوع همگرا- واگرا است؛ یعنی در ورودی نازل سرعت Sub Sonic (Mach<1) خواهد بود و در گلوگاه نازل سرعت Sonic (Mach=1) و در خروجی گلوگاه نازل سرعت Super Sonic (Mach >1) می‌شود.

ب- اگر $P_i > P_t$ باشد، در اینصورت نازل از نوع همگرا خواهد بود و سرعت سیال از ورودی تا خروجی نازل به صورت Sub Sonic (Mach<1) خواهد شد.

تئوری آزمایش:

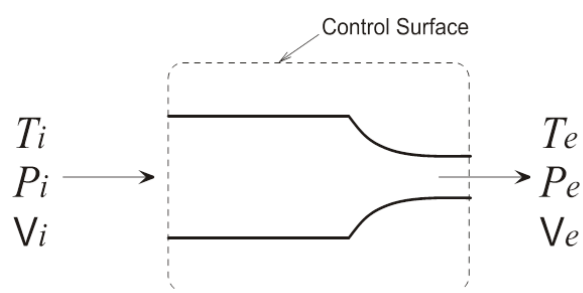
همانطور که قبلا گفته شد یک شیپوره (نازل) وسیله‌ای است که انرژی جنبشی سیال را در یک فرایند آدیاباتیک افزایش می‌دهد. افزایش انرژی جنبشی باعث کاهش فشار می‌شود و به دلیل تغییر در سطح مقطع جریان، بوجود می‌آید. اگر سیال درون نازل را تراکم ناپذیر فرض کنیم خواهیم داشت:

$$v(P_e - P_i) + \frac{v_e^2 \quad v_i^2}{2} + (Z_e - Z_i)g = 0$$

این معادله، معادله برنولی است و برای فرآیند بازگشت‌پذیر، آدیاباتیک، یک بعدی، جریان پایدار - حالت پایدار یک سیال تراکم‌پذیر در نازل، معادله برنولی بیانگر ترکیب قوانین اول و دوم ترمودینامیک می‌باشد. کوچکترین سطح مقطع یک نازل را گلوگاه می‌گویند. از آنجا که جریان ایزنتروپیک است خواهیم داشت:

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

فرایند هم‌آنتروپی یا فرایند آیزنتروپیک (Isentropic process) فرایندی است که در طی آن میزان آنتروپی سیستم ثابت می‌ماند. می‌توان نشان داد که هر فرایند برگشت‌پذیر بی‌دررو، یک فرایند هم‌آنتروپی است. درصورتیکه اثر انتقال حرارت و اصطکاک و شوک های حرارتی را در نازل در نظر نگیریم می‌توان فرآیند عبور سیال از داخل نازل را برگشت پذیر فرض نمود. بنابراین در طی عبور سیال از نازل آنتروپی ثابت است و فرآیند ایزنتروپیک می باشد. درصورتیکه روابط ترمودینامیکی سیال عبور کننده از نازل را بدانیم می توانیم سرعت های تئوری و بقیه روابط را برای یک نازل ایزنتروپیک به دست آوریم، که این روابط معمولا در کتاب‌های مکانیک سیالات و ترمودینامیک موجود می باشد. نازل‌ها وسیله‌هایی هستند که کاربرد وسیعی در صنعت از جمله توربین ها و راکت‌ها (موشک‌ها) انژکتورها دارند. شیپوره (نازل) نشان داده شده در شکل 3 را در نظر بگیرید و فرایند را یک‌بعدی، آدیاباتیک، جریان پایدار برای یک سیال تراکم ناپذیر فرض کنید.



شکل 3: طرح یک نازل

از معادله پیوستگی نتیجه می‌گیریم :

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e = \rho A_i V_i = \rho A_e V_e$$

$$\frac{A_i}{A_e} = \frac{V_e}{V_i}$$

$$\frac{V^2}{C^2} = M^2 = \frac{2}{K-1}\left(\frac{T_0}{T} - 1\right)$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{K-1}{2} M^2$$

$\dot{m}$: دبی جرمی جریان، A : مساحت، V : سرعت، T : درجه حرارت، M : عدد ماخ و C : سرعت نور

همچنین، همانطور که گفتیم:

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

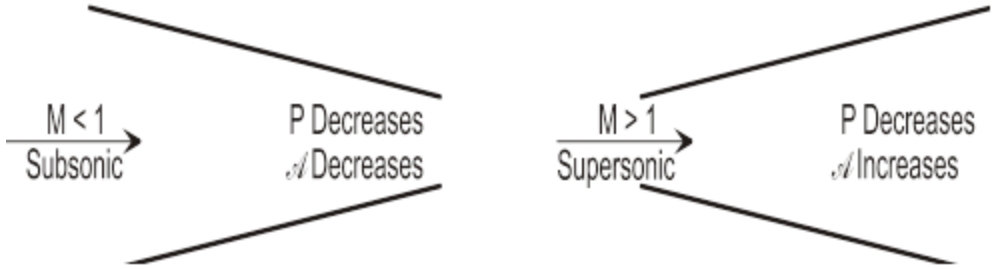
این معادله بسیار مهم است زیرا از آن می‌توان نتایج زیر را در مورد شکل صحیح شیپوره‌ها و پخش‌کننده‌ها بدست آورد. به طوریکه می‌توان گفت:

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

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

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

هنگامی‌که $M=1$ بوده و $dA=0$ باشد، دستیابی به سرعت صوت تنها در گلوگاه یک شیپوره امکان‌پذیر است این نتایج در شکل 4 خلاصه شده‌اند.



شکل 4: تغییر مساحت لازم برای شیپورها.

اثرات تغییر مساحت روی خواص در فرآیند ایزنتروپیک:

برای یک شیپوره **dp** منفی است.چرا که این وسیله سیال را از یک فشار زیاد تا یک فشار کم منبسط می کند.در اینصورت **dv** مثبت است و این مبین افزایش سرعت در جهت جریان است.

برای یک جریان مادون صوت داریم:

$$M^2 \leq 1$$

می بینیم که با منفی بودن **dp** برای یک شیپوره ، **dA** بایستی منفی باشد.از اینرودر یک شیپوره برای جریان مادون صوت باید سطح مقطع در جهت جریان کاهش یابد.بعلاوه هنگامیکه **M=1** می شود ، یعنی در شرایط صوتی ، از معادله فوق پیداست که **dA** صفر بوده و در نتیجه به حداقل سطح رسیده ایم برای **M** بزرگتر از **1** **dA**، مثبت می شود .بنابراین در یک شیپوره برای جریان مافوق صوت باید سطح در جهت جریان افزایش یابد.

برای یک دیفیوزر **dP** مثبت است چرا که دیفیوزر وسیله ایست که برای افزایش فشار بکار میرود.و مشاهده می کنیم که سرعت جریان کاهش می یابد.بنابراین برای جریان مادون صوت افزایش سطح مقطع و برای مافوق صوت کاهش سطح مقطع داریم.اغلب کاهش سرعت در یک مقطع باریک شونده را عجیب می خوانیم .

این یک نمونه از تفاوت های بنیادی جریان های مادون صوت و مافوق صوت می باشد.

فقط ذکر این نکته ضروری به نظر می رسد که برای طراحی یک شیپوره که باید دبی جرمی معینی را بطور ایزنتروپیک از شرایط سکون معلوم به فشار محیط برساند ، معادلاتی داریم که سطح گلوگاه را بدست می دهند.

با این وجود در کارکرد واقعی ، حتی اگر شرایط دقیق طراحی به شیپوره اعمال شود ، همواره مقداری اصطکاک در لایه مرزی وجود دارد که باعث می شود که کارکرد شیپوره آنطور که از پیش تعیین شده نباشد.البته در غالب موارد ، انحراف به اندازه ای کوچک است که لازم است تنها به مقدار جزیی تحلیل ایزنتروپیک تصحیح شود.

برای تغییرات سرعت، چگالی، فشار و دما هم می‌توان نوشت:

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

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

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

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

عدد ماخ:

عدد ماخ (M)، بیان کننده نسبت سرعت جسم در سیال به سرعت صوت در همان سیال می باشد. و معمولا برای نشان دادن سرعت جسمی که نزدیک به سرعت صوت یا بالاتر از آن حرکت می کند، استفاده می شود (مثل هواپیما). این مقیاس به احترام دانشمندی آلمانی که برای اولین بار چنین فاکتوری را در نظر گرفت، ماخ نامیده‌اند. پس عدد ماخ، کمیتی متغیر و بدون بعد است که بسته به خصوصیات هوا مانند دما و فشار، تغییر کرده و کاهش یا افزایش می یابد.

$$M=V/C$$

M: عدد ماخ، V: سرعت جسم، C: سرعت صوت.

نکات کلی در مورد عدد ماخ:

در سرعت‌های نزدیک سرعت صوت، فرضیه تراکم‌ناپذیر بودن هوا رد شده و ضریب تراکم هوا به 16٪ می‌رسد، که مقداری غیرقابل چشم پوشی است. در این سرعت‌ها هوای جلوی بال یا لبه حمله به شدت متراکم گشته و دما و فشار آن به طرز قابل توجهی افزایش می‌یابد، همین مسئله، یکی از عوامل ایجاد امواج ضربه‌ای است. هواپیما با حرکت خود در هوا، نظم فشار هوای محیط را برهم می‌زند و همانند قایقی که در آب در حال حرکت است، امواجی از آن ساطع شده و به دلیل اینکه این امواج با سرعت صوت حرکت می‌کنند و هواپیما زیر سرعت صوت در حال سیر است، از آن دور می‌شوند. عدد ماخ هم برای اجسام پرسرعت در حال حرکت در یک سیال و هم برای جریانات سیال پرسرعت در کانال‌هایی مانند شیپوره (نازل)، پخش‌کن‌ها (دیفیوزر) یا تونل‌های باد مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجایی که این عدد نسبتی از دو سرعت است، یک عدد بدون بعد محسوب می‌شود. در دمای 20 درجه سانتیگراد، سرعت صوت در جو زمین برابر است با 343 متر بر ثانیه (1234 کیلومتر بر ساعت) است که بوسیله‌ی عدد ماخ نشان داده می‌شود. در واقع عدد ماخ یک عدد ثابت نیست و به دما و ترکیب جوی بستگی دارد.

جریان پرسرعت در یک کانال:

زمانی که یک جریان در یک کانال از 1 ماخ عبور کند، بالای صوت می‌شود و یک تغییر بزرگ هم رخ می‌دهد. به‌طور معمول انسان توقع دارد که با منقبض کردن کانال سرعت جریان افزایش پیدا کند. در سرعت زیر صوت این موضوع صحت دارد، اما زمانی که جریان بالای صوت شود، رابطه محدوده جریان و سرعت برعکس می‌شود. در واقع بسط دادن تونل سرعت را افزایش می‌دهد. نتیجه کلی این است که برای رساندن یک جریان به سرعت بالای صوت یک نازل همگرا – واگرا لازم است که در آن بخش همگرا سرعت جریان را به سرعت صوت M = 1

برساند و بخش واگرا این افزایش سرعت را ادامه دهد. چنین نازل‌هایی را de Laval nozzles می‌نامند و در شرایط خاص آن‌ها قادر به دست یافتن به سرعت‌های مافوق صوت باورنکردنی ای هستند (13ماخ در سطح دریا). در کل عدد ماخ بستگی به سرعت صوت در گاز و سرعت صوت نیز به نوع و دمای گاز بستگی دارد. سرعت صوت در سیالات مختلف متفاوت است.

وابستگی سرعت صوت به دما:

از آنجایی که سرعت صوت همواره با افزایش دما، افزایش پیدا می‌کند، سرعت واقعی یک شی که با سرعت یک ماخ حرکت می‌کند به دمای ماده سیال اطراف آن بستگی خواهد داشت. عدد ماخ به این دلیل مفید است که ماده سیال در یک عدد ماخ مشابه، به شکل مشابهی رفتار می‌کند؛ بنابراین هواپیمایی که با سرعت یک ماخ بر سطح دریا پرواز می‌کند، موج شوک را به همان شکل دریافت می‌کند که اگر با سرعت یک ماخ در ارتفاع 11000 متری پرواز می‌کرد، دریافت می‌کرد.

جریان پرسرعت در اطراف اشیاء پرواز را می‌توان بطور کلی به 5 دسته طبقه‌بندی کرد:

زیرصوت (Subsonic) : $M < M_{cri}$

نزدیک صوت (Transonic) : $0.8 < M < 1$

صوت (Sonic) : $M = 1$

بالای صوت (Supersonic): $1 < M < 5$

مافوق صوت (Hypersonic): $M > 5$

امواج ضربه‌ای (Shockwaves) نیز عامل اصلی ایجاد دیوار صوتی است. امواج ضربه‌ای، تغییری ناگهانی در فشار و دمای یک لایه از هواست که می‌تواند به لایه‌های دیگر منتقل شده و به صورت یک موج فضا را بپیماید. برای درک بهتر مطلب، وقتی که سنگی در آب انداخته می‌شود، موجهایی در آب بوجود می‌آیند که به سمت خارج در حال حرکتند. این امواج، نتیجه افزایش سرعت یا اعمال نیرو به لایه‌ای از مولکول‌های آب است که قادر به انتقال به لایه‌های دیگر نیز می‌باشد، و امواج ضربه‌ای نیز، همان امواج درون آب هستند، با این تفاوت که آنها به جای آب در سیالی دیگر به نام هوا، تشکیل می‌شوند.

روابط مربوط به جریان ایزنتروپیک گاز ایده‌ال:

در بررسی مسایل مربوط به جریان، بسیاری از مطالب و معادلات را می‌توان با معرفی مفهوم حالت سکون ایزنتروپیک و خواص مربوط به آن ساده کرد. حالت سکون ایزنتروپیک حالتی است که سرعت آن در یک فرایند آدیاباتیک به صفر می‌رسد. در این قسمت روابط بین مشخصه‌های جریان بر حسب شرایط سکون بیان می‌گردد:

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{K-1}{2}M^2$$

برای یک فرآیند ایزو نتروپیک داریم :

$$\left(\frac{T_0}{T}\right)^{K/(K-1)} = \frac{P_0}{P}$$

$$\left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/(K-1)} = \frac{\rho_0}{\rho}$$

بنابراین:

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

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

شرایط در گلوگاه شیپوره را می‌توان با توجه به این مطلب که در گلوگاه M=1 می‌باشد پیدا کرد. خواص در گلوگاه با علامت * مشخص شده است.

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{K+1}$$

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

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

وقتی در گلوگاه M=1 باشد، این خواص را غالبا به عنوان فشار بحرانی، درجه حرارت بحرانی و چگالی بحرانی می‌شناسند. نسبت‌های نشان داده شده در جدول 1، نسبت درجه حرارت بحرانی، نسبت فشار بحرانی و نسبت چگالی بحرانی نامیده می‌شوند.

جدول 1: نسبت‌های فشار، چگالی و درجه حرارت بحرانی برای جریان ایزنتروپیک یک گاز ایده‌آل

	K=1.1	K=1.2	K=1.3	K=1.4	K=1.67
$\frac{P^*}{P_0}$	0.5847	0.5644	0.6276	0.5283	0.4867
$\frac{\rho^*}{\rho_0}$	0.6139	0.6209	0.6276	0.6340	0.6497
$\frac{T^*}{T_0}$	0.9524	0.9091	0.8696	0.8333	0.7491

جریان ایزنتروپیک در شیپوره همگرا:

شیپوره همگرا نظیر شکل 5الف را در نظر می‌گیریم که در آن جریانی ایزنتروپیک و همگرا وجود داشته باشد. سرعت جریان را در قسمت بالادست، به علت اندک بودن در مقابل سرعت جریان در گلوگاه، برابر با صفر فرض می‌کنیم و فشار را در آن با P0 نمایش دهیم. اگر فشار در قسمت خروجی شیپوره تا مقدار Pb کاهش یابد، می‌توانیم منحنی تغییرات فشار در داخل شیپوره را بر حسب مقدار فشار Pb (شکل 3ب، منحنی‌های a تا e) رسم کنیم. در این صورت با ساده‌سازی معادله انرژی، به رابطه‌ی زیر می‌رسیم:

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

در رابطه بالا V سرعت جریان و C سرعت صوت است. می‌بینیم که نسبت سرعت جریان به سرعت صوت در هر مقطع فقط تابع $\frac{P_0}{P}$ است. اگر دبی جرمی جریان را با ṁ نمایش دهیم، مقدار آن به ازای واحد سطح گلوگاه برابر می‌شود با:

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

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

که در آن V سرعت است.

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 می بینیم اگر P_b/P_0 برابر با ۱/۰ باشد، هیچ جریانی از شیپوره عبور نمی کند، 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 نهایتا" 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(منحنی صوت) 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 :

(۱۶)

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

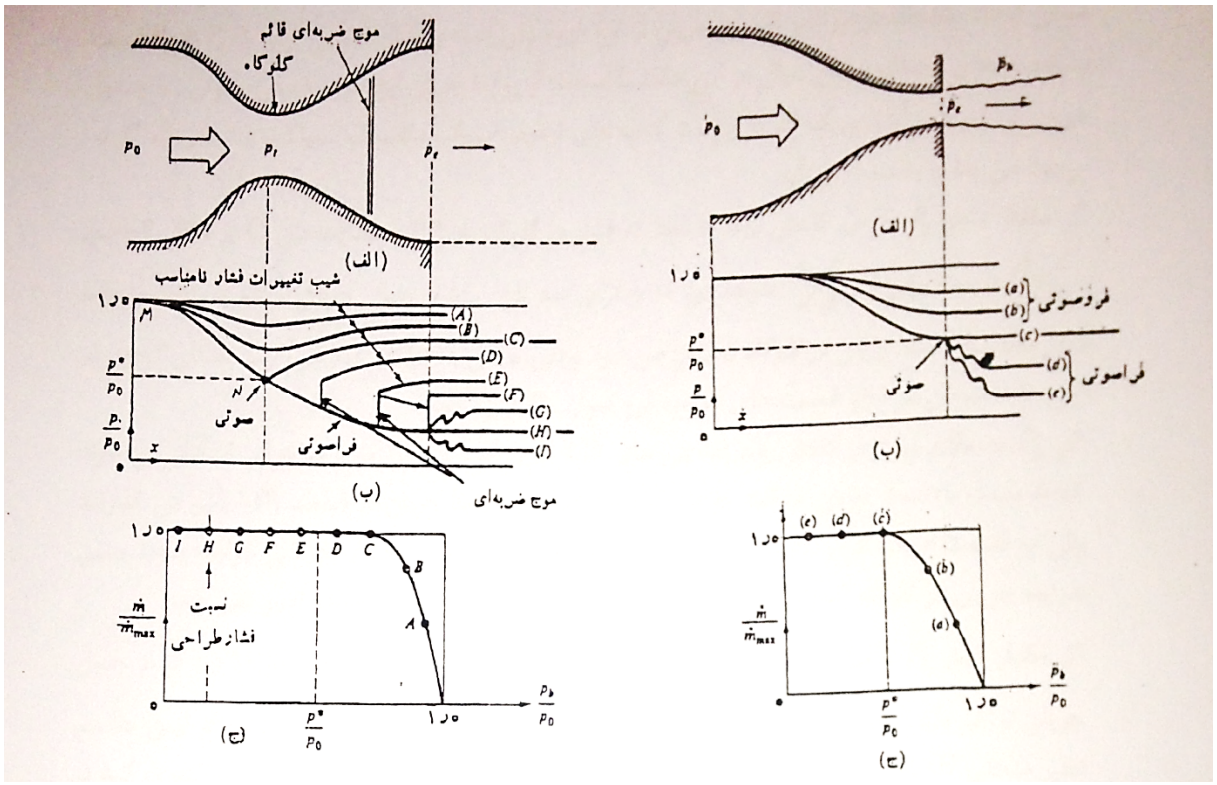
رابطه فوق، به ازای $K=1.4$ به صورت زیر در می آید :

(۱۷)

$$\dot{m}_{max} = \frac{0.6847 P_0 A_c}{\sqrt{RT_0}}$$

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 $P^*/P_0 \le P_b/P_0 \le 1$ 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 (شکل۳- ب).



شکل 5: تغییرات فشار و دبی جرمی در شیپوره‌های همگرا و 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 فشارپایین 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 بالادست 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 آیزنتروپیک 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 آیزنتروپیک 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 فرو صوتی $P_e = P_b$ 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 آیزنتروپیک، به ازای عدد ماخ M_e فراصوتی به دست می آید. توزیع فشاردر 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 آیزنتروپیک 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 آیزنتروپیک غیر ممکن است. این جریان ها مستلزم وجود امواج ضربه ای هستند که فرایند های برگشت ناپذیرند.

مثال های حل شده:

مثال ۱:

هوا از یک مخزن بزرگ از طریق شیپوره همگرایی با مساحت مقطع خروجی $50cm^2$ جریان می یابد. مخزن به قدری بزرگ است که در اثر خروج هوا از شیپوره تغییری در فشار و دمای مخزن ایجاد نمی شود. جریان را دائم و آیزنتروپیک فرض کنید. $P_r = 500\ kPa$ و $T_r = 500K$ 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 شیپوره را حساب کنید.

حل :

برای $\gamma = 1.4$ نسبت فشار بحرانی 0.5283 است. بنابراین برای کلیه پس فشارهای کمتر از $264.15\ kPa$, شیپوره خفه می کند. تحت این شرایط, عدد ماخ در صفحه‌ی خروجی برابر ۱ است, فشار در صفحه ی خروجی $264.15\ kPa$ است (که با پس فشار برابر نیست) و دما در صفحه‌ی خروجی $T^* = (T^*/T_r)T_r = 0.8333(500) = 416.15K$ است که T^*/T_r 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:

$$\dot{m} = \rho A V$$

$$= \frac{P_e}{RT_e} A_e M_e \sqrt{\gamma R T_e}$$

$$= \frac{\left(264.15k\,{}^{N}\!/_{m^2}\right)\left[(50)(10^{-4})m^2\right](1)}{\left(0.287\ {}^{kN.m}\!/_{kg.K}\right)(416.7K)} \sqrt{1.4\left(287\ {}^{N.m}\!/_{kg.K}\right)(416.7K)}$$

$$= 4.519\ \left({}^{kg}\!/_{s}\right)$$

روش دوم :

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

$$= \frac{(0.6847)(500)(10^3)(50)(10^{-4})}{\sqrt{(287)(500)}} = 4.519\ {}^{kg}\!/_{s}$$

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

$$\dot{m} = \frac{(375)(50)(10^{-4})(0.654)}{(0.287)(0.921)(500)}\sqrt{(1.4)(287)(0.921)(500)}$$

$$= 3.991\ \ {}^{kg}\!/_{s}$$

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 $\dot{m} = \rho A V$ 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:

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

مثال ۲:

یک شیپوره همگرا ـ واگرا طوری طراحی شده است که به صورت آیزونتروپیک عمل کند و عدد ماخ خروجی آن 1.5 باشد. شیپوره به یک مخزن هوا با فشار $500\ kPa$ و دمای $500\ K$ متصل است مساحت گلوگاه شیپوره $5cm^2$ است. فرض کنید هوا مثل یک گاز کامل با $\gamma = 1.4$ و $R = 0.287\ {}^{kj}\!/_{kg-K}$ رفتار کند.

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

(ب) محدوده پس فشارهای پشت که در آن شیپوره 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 شیپوره 1.5 باشد , باید عدد ماخ در گلوگاه ۱ 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 $A_e = 5.88\ cm^2$ است.

(ب) برای کلیه ی پس فشارهایی که کمتر از مقدار مربوط به منحنی C در (شکل۴) هستند شیپوره خفه میکند.

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 آیزنتروپیک، به دست می آید: $M=0.61$ در این عدد ماخ $P/P_t = 0.778$ بنابراین بالاترین پس فشاری که در آن شیپوره خفه می کند برابر است با $0.778(500\,kPa) = 389\,kPa$ به عبارت دیگر برای دامنه‌ی $0 \le P_b \le 389\,kPa$ ، شیپوره خفه می کند.

(ج) در پس فشار $450\ kPa$ ، شیپوره خفه نمی کند و در سرتاسر شیپوره جریان زیرصوت برقرار است. در این شرایط, فشار در صفحه ی خروجی شیپوره با پس فشار برابر است. از جدول جریان تراکم پذیر آیزنتروپیک، 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.

$$\dot{m} = \rho_e A_e V_e$$

$$= \frac{P_e}{RT_e} A_e M_e \sqrt{\gamma R T_e}$$

$$= \left[\frac{450 kN/m^2}{(0.287 kNm/kg.K)(485.5K)}\right]\left[5.88\times10^{-4} m^2\right]\times\left[0.39\sqrt{1.4(287 Nm/kg.K)(485.5K)}\right]$$

$$= (3.230)(5.88\times10^{-4})(0.39\times441.7K) = 0.327 kg/s$$

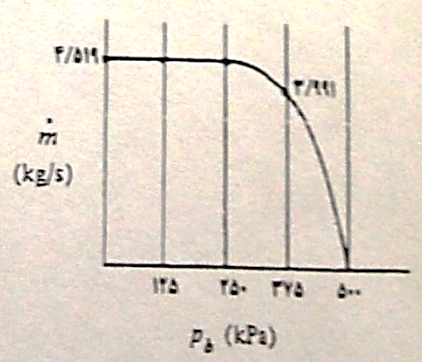
(د) برای پس فشار $0\ kPa$ ، شیپوره خفه می کند و فشار در صفحه‌ی خروجی آن با پس فشار برابر نیست. در این شرایط عدد ماخ در گلوگاه برابر یک است و فشار و دما در گلوگاه برابر است با :

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

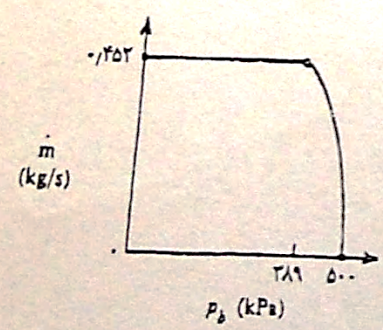
$$\dot{m} = \rho_t A_t V_t$$

$$= \frac{264.2(5\times10^{-4})\sqrt{1.4\times0.287\times416.7}}{0.28\times416.7} = 0.452\ \ kg/s$$

نتیجه‌ی حاصل از این مثال در (شکل۶) رسم شده است.

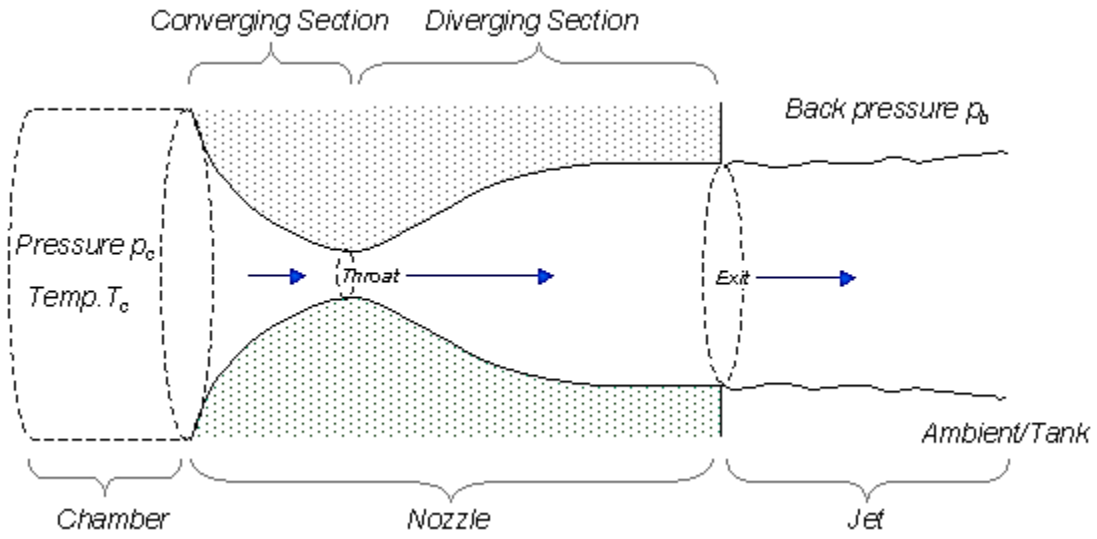


شکل ۵



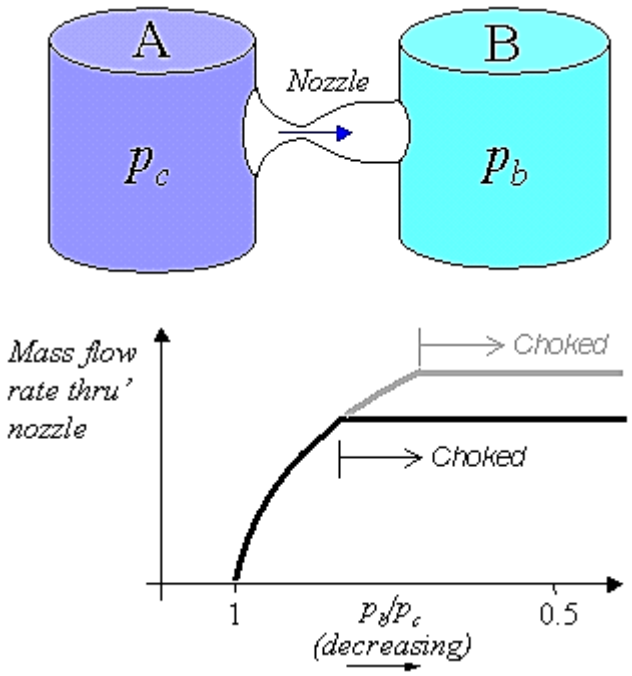
شکل ۶

تصویری از یک نازل همگر- واگرا در شکل 6 نشان داده شده است. در این تصویر گاز از طریق نازل از منطقه ای با فشار بالا (به عنوان مخزن) به محفظه‌ای با فشار پایین (به عنوان محیط یا مخزن) جریان می یابد. گاز از مخزن به بخش همگرای نازل رفته، از گلو عبور کرده، وارد بخش واگرای نازل شده و سپس به محیط بیرون (مثلا داخل موتور جت) خارج می‌گردد. فشار محیط به عنوان پس فشار شناخته شده و با نماد P_b نمایش داده می‌شود.



شکل 6: تصویر شماتیک یک نازل همگرا- واگرا.

برای شناخت بهتر رفتار نازل تصور کنید که آزمایش ساده‌ی نشان داده شده در شکل 7 انجام گیرد. در اینجا ما از یک نازل همگرا - واگرا برای اتصال دو سیلندر هوا استفاده می کنیم. سیلندر A حاوی هوا با فشار بالا است و به عنوان مخزن می‌باشد و نازل همگرا – واگرا که این هوا را به سیلندر B انتقال می‌دهد به عنوان مخزن خروجی می‌باشد.



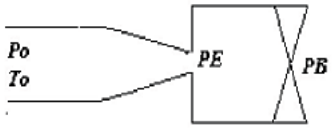
شکل 7: یک آزمایش ساده برای نشان دادن رفتار نازل همگرا – واگرا.

تصور کنید شما فشار را در سیلندر B کنترل می کنید و میزان جریان جرم ورودی از طریق نازل را اندازه می گیرید .شما ممکن است انتظار داشته باشید که هر چه فشار را در سیلندر B کاهش دهید، میزان جریان جرم بیشتری از طریق نازل وارد سیلندر می‌شود. این درست است، اما تنها تا یک نقطه. اگر مقدار پس فشار را به مقدار کافی کاهش دهید، به جایی می‌رسید که نرخ جریان ناگهان متوقف می شود و مهم نیست که چقدر بیشتر فشار را کاهش دهید، حتی اگر در آن خلاء ایجاد کنید، جریان جرم بیشتری از طریق نازل وارد سیلندر نخواهد شد. در این حالت می گوییم که نازل "خفه شده" است .شما می توانید این کار را با افزایش قطر گلویی نازل (به عنوان مثال خط خاکستری در شکل بالا) به تاخیر بیندازید، اما در نهایت همان اتفاق می افتد .حتی اگر گلویی را حذف کنید و فقط یک نازل همگرا داشته باشید ، نازل نیز خفه می شود. دلیل این رفتار مربوط به رفتار جریان جرم در سرعت 1 ماخ است، یعنی زمانی که سرعت جریان به سرعت صوت می رسد .در یک جریان داخلی پایدار (مثل یک نازل)، عدد ماخ تنها می تواند در حداقل سطح مقطع عرضی به مقدار 1 برسد. زمانی که نازل خفه نشده است، سرعت جریان از طریق آن کاملا مادون صوت است و اگر پس‌فشار را کمی کاهش دهید،

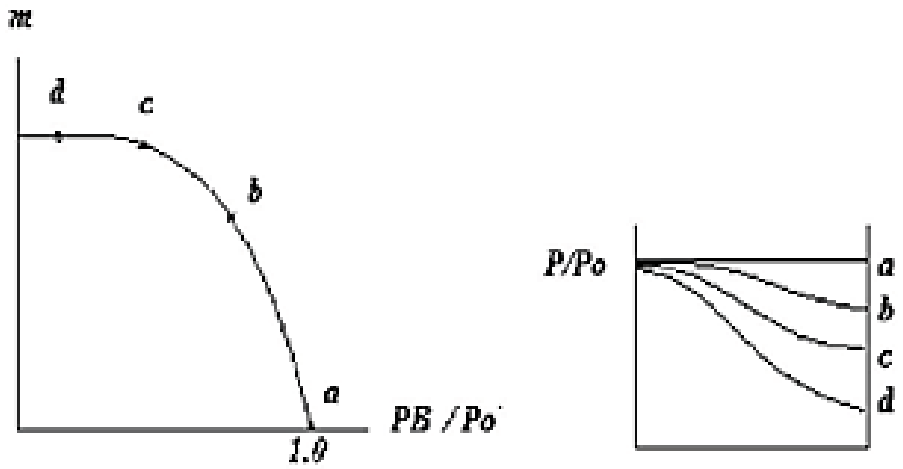
جریان سریعتر می شود و نرخ جریان افزایش می یابد. اگر پس‌فشار را به مقدار بیشتری کاهش دهید سرعت جریان در گلویی در نهایت به سرعت صوت می رسد (1 ماخ). هر گونه کاهش بیشتر پس‌فشار نمی تواند سرعت جریان از نازل را بیشتر تسریع کند، زیرا این امر مستلزم این است که نقطه ای که در آن M = 1 است به منطقه‌ای دور از گلویی جابجا گردد. الگوی جریان در قسمت پایین نازل (در قسمت واگرا و جت) هنوز هم می تواند تغییر کند اگر پس‌فشار را پایین‌تر بیاورید، اما نرخ جریان جرم اکنون ثابت شده است زیرا جریان در گلویی نیز ثابت است. تغییرات در الگوی جریان پس از خفه شدن نازل زیاد مهم نیست، زیرا نمی‌تواند نرخ جریان جرم را تغییر دهد.

پدیده خفگی (Choking):

پدیده‌ای است که در نازل‌ها هنگامی رخ می‌دهد که سرعت در آنها به سرعت صوت برسد (Mach>1). در اینحالت فشار خروجی نازل را با فرض ثابت بودن فشار ورودی، تغییر داده‌ایم تا دبی افزایش یابد. هنگامی که به فشار بحرانی برسیم، سرعت در گلوگاه نازل به سرعت صوت می‌رسد و از آن به بعد تغییر در فشار خروجی نازل تأثیری بر دبی عبوری از نازل نخواهد داشت؛ یعنی دبی جرمی ماکزیمم شده است. به چنین حالتی پدیدهٔ خفگی یا اصطلاحاً choking می‌گویند.

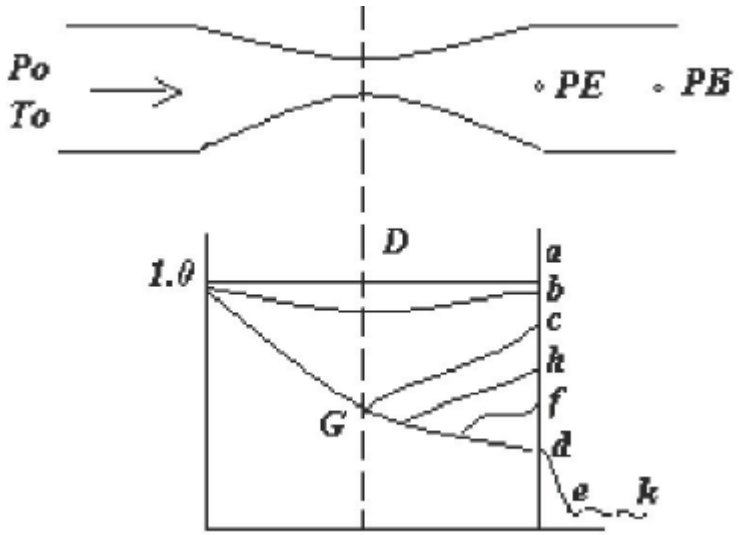


اگر نازلی مانند شکل مقابل را در نظر بگیریم و فشار خروجی آن را تا حد فشار بحرانی و زیر فشار بحرانی کاهش دهیم، نمودارهای دبی را بر حسب نسبت فشار به صورت زیر شاهد خواهیم بود. در نقطهٔ a هیچ اختلاف فشاری نداریم و دبی صفر است. دبی را افزایش می‌دهیم. در نقطهٔ b فشاری بالاتر از فشار بحرانی داریم. با افزایش دبی، فشار در نقطهٔ c فشار بحرانی است؛ یعنی دبی به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد و در نقطهٔ d که فشار زیر فشار بحرانی است، دبی ثابت است و در همان مقدار دبیِ نقطهٔ c ثابت می‌ماند؛ یعنی در نقطهٔ c پدیدهٔ خفگی رخ داده است.



شکل 8: منحنی تغییرات فشار و دبی برای یک نازل همگرا.

در شیپورۀ نشان داده شده در شکل 9، نقطۀ a بیانگر حالتی است که اختلاف فشاری بین ورودی و خروجی وجود ندارد.



شکل 9: منحنی تغییرات فشار و دبی برای یک نازل همگرا

هنگامیکه P_B تا فشار معینی که با فشار نقطهٔ b مشخص شده کاهش یابد، سرعت در قسمت همگرا افزایش خواهد یافت اما در قسمت گلوگاه M<1 است. بنابراین قسمت واگرا به عنوان یک پخش کنندهٔ فروصوت که در آن فشار افزایش و سرعت کاهش یافته عمل می‌کند. نقطهٔ c نمایانگر فشار خروجی (back pressure) در زمانیکه در گلوگاه M=1 است، می‌باشد. اگر قسمت واگرا به صورت یک پخش کنندهٔ فروصوت که در آن فشار افزایش یافته و سرعت کم می‌شود، عمل کند نقطهٔ d نمایانگر فشار خروجی دیگری است که اجازهٔ جریان آیزنتروپیک را می‌دهد و در اینحالت قسمت واگرا به صورت یک شیپورهٔ فراصوت رفتار می‌کند.

پدیده موج ضربه (Shock)

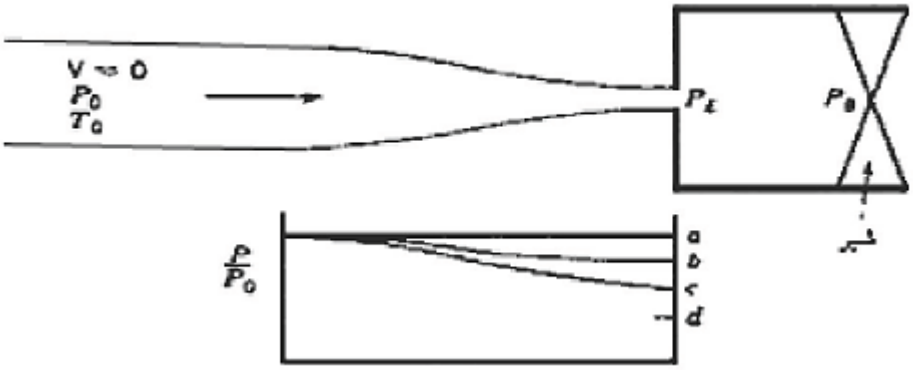
در شکل 9، منحنی AGC زمانیکه فشار خروجی معادل فشار نقطه c است، در نقطه b یعنی گلوگاه، فشار همان

فشار بحرانی است. اگر فشار خروجی بیش از فشار نقطهٔ e شود، نازل تا حدی این فشار را تحمل می‌کند و اثر ضربه‌ای بر نازل وارد نمی‌شود، ولی اگر فشار از حدی بالاتر رود (مثلاً نقطهٔ f) ضربه به داخل نازل نفوذ کرده و منحنی فشار آن منحنی AGF خواهد بود. به این پدیده، پدیدهٔ موج ضربه یا shock گفته می‌شود. هر چه فشار خروجی بیشتر شود، این ضربه به سمت ورودی نازل حرکت می‌کند.
پدیدهٔ shock در قسمت واگرای نازل‌ها اتفاق می‌افتد. اگر فشار خروجی بکار برده شده برای نازل پایین‌تر از فشار خروجی طراحی باشد، در نقطهٔ k در اینصورت انبساط نرمال abc در طول نازل اتفاق افتاده و یک کاهش در فشار ck خارج از نازل اتفاق می‌افتد.

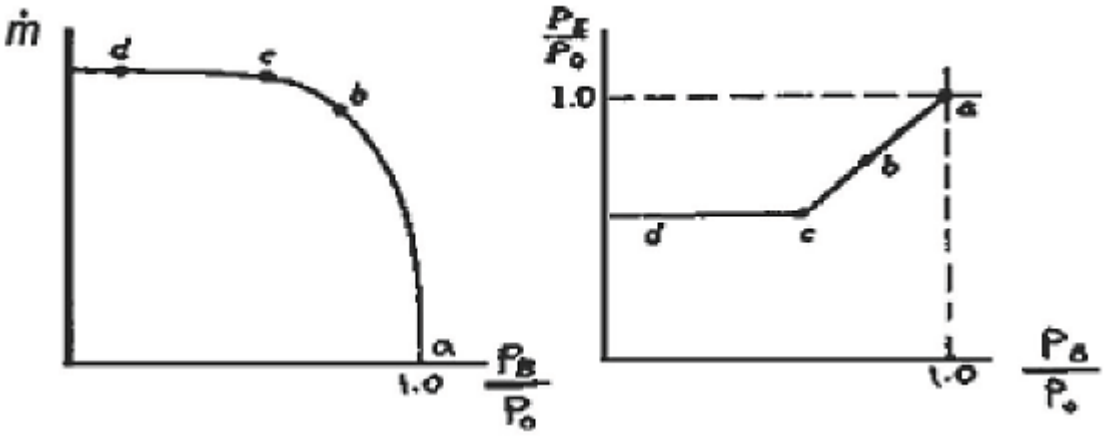
جریان سیال در شیپوره‌ها:

یک شیپوره‌ی همگرا را مطابق شکل 10 در نظر بگیرید. نسبت فشار P/P_0 نیز در امتداد طول شیپوره نشان داده

شده است. شرایط بالادست جریان، شرایط سکون است که ثابت فرض شده است. فشار خروجی شیپوره با P_E و پس‌فشار (back pressure) با P_B نمایش داده شده است. حال می‌خواهیم بررسی کنیم که دبی جرمی جریان ($\dot{m}$) و نسبت فشار در سطح خروجی شیپوره (P_E/P_O) با کاهش پس‌فشار (P_B/P_O) چگونه تغییر می‌کند. این مقادیر در شکل 11 ترسیم شده‌اند.



شکل 10: تصویر شماتیک یک شیپوره همگرا.

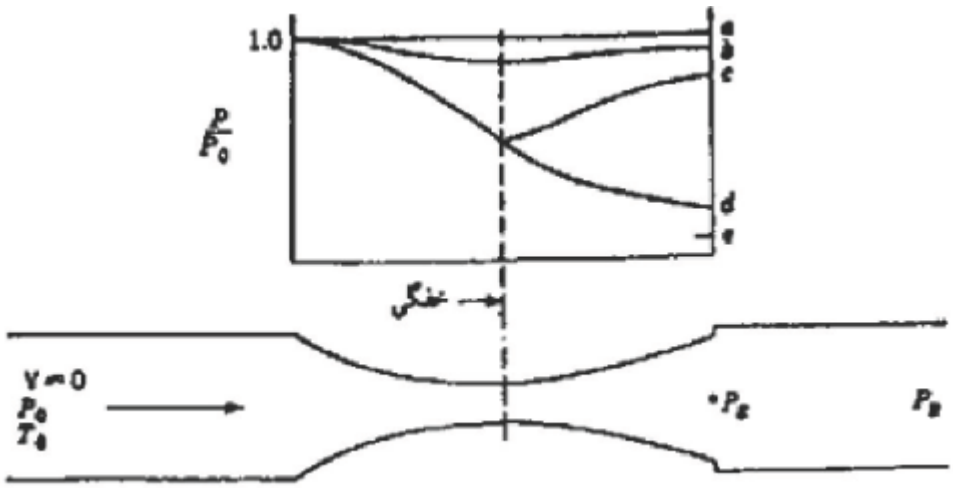


شکل 11: نمودار تغییرات دبی و فشار در یک شیپورهٔ همگرا.

البته وقتی P_B/P_O یک باشد یعنی جریانی وجود نخواهد داشت و نسبت $P_E/P_O = 1$ با نقطهٔ a نشان داده می‌شود. اکنون فرض کنید پس‌فشار (P_B) تا فشار نقطهٔ b پایین آورده می‌شود بطوریکه نسبت P_B/P_O بزرگتر از نسبت فشار بحرانی باشد. دبی جرمی جریان دارای مقدار معینی است، $P_E = P_B$ می‌باشد و عدد ماخ خروجی کمتر از یک است. سپس فرض کنید که پس‌فشار تا فشار نقطهٔ بحرانی که با نقطهٔ c نمایش داده شده، پایین آید. حال عدد ماخ در خروجی شیپوره مساوی واحد است و P_E برابر با P_B می‌باشد. هنگامیکه P_B تا زیر فشار بحرانی کاهش یابد (با نقطه d مشخص شده) دبی جرمی جریان ازدیاد بیشتری نخواهد یافت و P_E در مقدار فشار بحرانی، ثابت باقی می‌ماند و عدد ماخ برابر یک می‌گردد. افت فشار P_E تا P_B نیز در خروجی شیپوره صورت می‌گیرد. تحت این شرایط گفته می‌شود که در شیپوره پدیدهٔ خفگی (choking) رخ داده است. این بدان معنی است که برای شرایط سکون معینی، حداکثر جریان ممکن از شیپوره عبور می‌کند.

حال یک شیپوره همگرا–واگرا را به ترتیبی که در شکل 12 نشان داده شده، در نظر بگیرید. نقطه a نمایانگر

شرایطی است که $P_B = P_O$ می‌باشد و جریانی وجود ندارد. هنگامیکه P_B تا فشار نقطهٔ معینی که با نقطه b مشخص شده، کاهش یابد (بطوریکه نسبت P_B/P_O کمتر از یک، ولی به مقدار قابل توجهی بیشتر از فشار بحرانی باشد)، سرعت در قسمت همگرا افزایش خواهد یافت، اما در گلوگاه شیپوره $M > 1$ است؛ بنابراین قسمت واگرا به عنوان یک پخش‌کنندهٔ فروصوت که در آن فشار و سرعت کاهش یافته، عمل می‌کند. نقطهٔ c نمایانگر پس‌فشار در زمانی است که در گلوگاه $M = 1$ می‌باشد، اما قسمت واگرا به صورت یک پخش‌کننده فروصوت (با $M = 1$ در ورودی) که در آن فشار افزایش یافته و سرعت کم می‌شود، عمل می‌کند. نقطهٔ d نمایانگر پس‌فشار دیگری است که اجازهٔ جریان آیزنتروپیک را می‌دهد و در این حالت قسمت واگرا به صورت یک شیپورهٔ فراصوت (کاهش در فشار در سرعت) رفتار می‌کند.

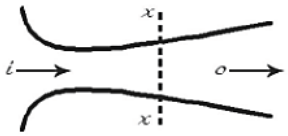


شکل 12: نمودار تغییرات دبی و فشار در یک شیپوره‌ی همگرا – واگرا.

بین پس‌فشارهای نشان داده شده با نقاط c و d امواج شوک موجود است و حالت آیزنتروپیک وجود نخواهد داشت. این موضوع در قسمت زیر بررسی خواهد شد. هنگامیکه پس‌فشار تا زیر نقطه‌ای که با d نمایش داده شده پایین بیاید، سطح فشار P_E در مقطع خروجی ثابت خواهد ماند و افت فشار از P_E تا P_B در خارج شیپوره صورت می‌گیرد. این مطلب با نقطهٔ e نشان داده شده است.

جریان آیزنتروپیک در شیپوره:

جریان سیال در یک شیپورهٔ ایده‌آل، برگشت‌پذیر (بدون اصطکاک و موج ضربه‌ای) و بدون انتقال حرارت (آدیاباتیک) می‌باشد و از اینرو به آن جریان آیزنتروپیک گفته می‌شود. اگر شرایط ترمودینامیکی سیال مشخص باشد، سرعت‌های مربوطه و سایر روابط ترمودینامیکی سیال قابل محاسبه خواهند بود.



حال شیپوره‌ای مطابق شکل مقابل را در نظر بگیرید. شرایط ورودی با اندیس i و شرایط خروجی با اندیس o مشخص شده‌اند. برای جریان آیزنتروپیک در طول شیپوره سرعت سیال در مقطع دلخواه $x - x$ به صورت زیر می‌باشد.

$$V_x = \sqrt{2(h_i - h_x)} \qquad (۱)$$

و سطح مقطع شیپوره در این مقطع از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$A_x = \frac{\dot{m}v}{V_x} \qquad (۲)$$

که $V_x = \frac{1}{p_x}$ حجم مخصوص سیال در این مقطع است. در حالت آیزنتروپیک، تغییرات انتروپی صفر است، بنابراین:

$$Tds = dh - vdp$$

$$ds = 0 \rightarrow dh = vdp \rightarrow h_x - h_i = \int vdp$$

برای یک گاز ایده‌آل $pv^k = cte$ می‌باشد، بنابراین $pv^k = p_i v_i^k$ و پس از جایگذاری $v = v_i \left(\frac{p_i}{p}\right)^{\frac{1}{k}}$ در انتگرال بالا خواهیم داشت:

$$h_i - h_x = \frac{k}{k-1} p_i v_i \left[1 - \left(\frac{p_x}{p_i}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] \qquad (۳)$$

بنابراین رابطهٔ (۱) به صورت زیر در خواهد آمد:

$$v_x = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_i v_i \left[1-(\frac{p_x}{p_i})^{\frac{k-1}{k}}\right]} \qquad (۴)$$

همچنین رابطهٔ (۲) به صورت زیر در می‌آید:

$$A_x = \frac{m(\frac{p_i}{p_x})^{\frac{1}{k}} v_i}{\sqrt{\frac{2k}{k-1} p_i v_i \left[1-(\frac{p_x}{p_i})^{\frac{k-1}{k}}\right]}} \qquad (۵)$$

و یا می‌توان نوشت:

$$\frac{m}{A_x} = \sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{p_i}{v_x}\left[(\frac{p_x}{p_i})^{\frac{1}{k}} - (\frac{p_x}{p_i})^{\frac{k-1}{k}}\right]} \qquad (۶)$$

رابطهٔ اخیر به ازای مقدار $\frac{p_x}{p_i}$ به صورت زیر حداکثر (ماکزیمم) خواهد بود.

$$\frac{p_x}{p_i} = (\frac{2}{k+1})^{\frac{k}{k-1}} \qquad (۷)$$

رابطهٔ (۷) معادلهٔ نسبت فشار بحرانی نامیده می‌شود.

از آنجاییکه $\dot{m}$ ثابت است، کسر $\frac{\dot{m}}{A_x}$ وقتی ماکزیمم می‌شود که A_x کمترین مقدار خود یعنی سطح مقطع گلوگاه (A_t) را داشته باشد. پس در واقع نسبت فشار گلوگاه به فشار ورودی از رابطهٔ (۸) به دست خواهد آمد.

$$\frac{P_1}{P_i} = (\frac{2}{K+1})^{\frac{k}{k-1}} \qquad (۸)$$

هر گاه نتیجهٔ اخیر را در رابطهٔ (۴) جایگزین کنیم، سرعت سیال در گلوگاه برابر مقدار زیر خواهد بود.

$$V_1 = \sqrt{\frac{2k}{k+1} P_i v_i} \qquad (۹)$$

با جایگزینی رابطهٔ (۹) در رابطهٔ (۲) خواهیم داشت.

$$v_i = (\frac{P_i}{P_1})^{1/k} v_i$$

$$v_i = (\frac{2}{K+1})^{\frac{-1}{k+1}} v_i \rightarrow \frac{\dot{m}}{A_2} = \frac{v_1}{v_2} = (\frac{2}{K+1})^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2K}{K+1}\frac{P_i}{v_i}} \qquad (۱۰)$$

از تقسیم رابطهٔ (۱۰) بر رابطهٔ (۶)، ارتباط بین سطح مقطع گلوگاه با هر مقطعی مانند x مشخص می‌شود:

$$\frac{A_x}{A_1} = (\frac{2}{k+1})^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{k-1}{(k+1)\left[(\frac{P_x}{P_1})^{\frac{2}{k}} - (\frac{P_x}{P_i})^{\frac{k+1}{k}}\right]}} \qquad (۱۱)$$

در خروجی از شیپوره خواهیم داشت:

$$\frac{A_0}{A_1} = (\frac{2}{k+1})^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{k-1}{(k+1)\left[(\frac{P_x}{P_1})^{\frac{2}{k}} - (\frac{P_x}{P_i})^{\frac{k+1}{k}}\right]}} \qquad (۱۲)$$

از روابط اخیر مشاهده می‌شود که در جریان تراکم‌پذیر یک سیال عبوری از یک گذرگاه که به صورت برگشت‌پذیر و

بدون انتقال حرارت انجام می‌شود، هرگاه انبساط سیال با نسبت فشار $\frac{P_0}{P_i} < (\frac{2}{k+1})^{\frac{k}{k-1}}$ صورت گیرد:

الف) گذرگاه باید تا جاییکه نسبت فشار به $\frac{P_1}{P_t} = (\frac{2}{k+1})^{\frac{k}{k-1}}$ می‌رسد، سطح مقطعش کم شود (یعنی همگرا باشد) و از آنجا به بعد باید سطح مقطع افزایش یابد، یعنی واگرا باشد.

ب) در قسمت سطح مقطع مینیمم یعنی گلوگاه، سرعت سیال به سرعت موضعی صوت می‌رسد.

ج) در قسمت همگرای گذرگاه، سرعت سیال مادون صوت و در ناحیهٔ واگرای آن، سرعت مافوق صوت خواهد بود.

د) دبی جرمی در طول گذرگاه با مساحت سطح مقطع گلوگاه و خواص سیال در ورودی تعیین می‌شود و پس از آنکه نسبت فشار بحرانی در گلوگاه برقرار شد، دیگر از پس‌فشار متأثر نخواهد شد.

اگر سیال در حال جریان، یک گاز کامل باشد خواهیم داشت:

$$Pv = RT$$
$$R = C_p - C_v$$
$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}, h_1 - h_2 = C_p(T_1 - T_2)$$

در طی جریان آیزنتروپیک، همواره $Pv^{\gamma} = cte$ برقرار می‌باشد.

فرض می‌شود که هوا در شرایط انجام آزمایش‌های این دستگاه، یک گاز کامل با خصوصیات زیر باشد:

$$C_P = 1.005\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \quad \text{و} \quad R = 287.1\frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$$
$$\gamma = 1.4$$

هر گاه از روابط اخیر در رابطهٔ (۴) استفاده کنیم، به روابط زیر خواهیم رسید:

$$V_x = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1}RT_i\left[1-(\frac{P_x}{P_i})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}$$
$$V_x = \sqrt{\frac{2(1.4)}{1.4-1}(287.1)T_i\left[1-(\frac{P_x}{P_i})^{\frac{0.4}{1.4}}\right]}$$
$$V_x = 44.83\sqrt{T_1\left[1-(\frac{P_x}{P_i})^{0.286}\right]} \quad \text{m/s}$$

و رابطهٔ (۱۰) به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\dot{m} = A_1(\frac{2}{\gamma+1})^{\frac{1}{\gamma-1}}\sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1}\frac{P_i^2}{RT_i}}$$
$$\dot{m} = A_2(\frac{2}{2.4})^{\frac{1}{0.4}}\sqrt{\frac{2(1.4)}{2.4(287.1)}\frac{P_i^2}{T_i}}$$
$$\dot{m} = 0.0404A_1\frac{P_i}{\sqrt{T_1}} \qquad (۱۳)$$

رابطهٔ (۹) به صورت زیر درخواهد آمد:

$$V_1 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1}RT_i}$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(1.4)(287.1)}{2.4} T_i} \rightarrow V_i = 18.3\sqrt{T_1} \qquad \mathrm{m/s} \tag{۱۴}$$

لازم به ذکر است کلیهٔ روابط بالا در حالت جریان آیزنتروپیک (برگشت‌پذیر و بدون انتقال حرارت) به دست آمده‌اند. گرچه جریان واقعی را در شیپوره‌ها معمولاً می‌توان آدیاباتیک فرض کرد، ولی همواره به دلیل وجود اصطکاک و نیز موج‌های ضربه‌ای (بخصوص در قسمت واگرا)، انبساط به صورت برگشت‌ناپذیر صورت می‌گیرد.

وقتی شیپوره با نسبت فشاری غیر از مقدار طراحی کار می‌کند، سیال تمایل به جریان یافتن با مقداری بیش از انبساط مد نظر در شرایط طراحی یا کمتر از انبساط مد نظر در شرایط طراحی، خواهد داشت. این دو حالت به ترتیب حالت فوق انبساط (over expansion) و زیر انبساط (مادون انبساط) (under expansion) نامیده می‌شوند.

الف) حالت فوق انبساط (شیپورهٔ فرامنبسط)

وقتی نسبت $\frac{P_0}{P_i}$ بیش از مقدار طراحی باشد شیپوره، سیال را تا فشار کاملاً محسوس پایین‌تری از پس‌فشار موجود منبسط می‌کند و به تبع آن سرعت در شیپوره به مقادیر بالاتر می‌رسد. در اینحالت یک عدم پیوستگی در سیال (موج ضربه‌ای) رخ می‌دهد که باعث بالا رفتن فشار و تعدیل سرعت (پایین‌آمدن سرعت) می‌شود (منحنی‌های E، C و D در نمودار شکل ۸). موج ضربه‌ای در ناحیهٔ واگرای شیپوره شروع به تشکیل شدن می‌کند و محل آن جایی است که با مقدار $\frac{P_0}{P_i}$ مشخص می‌شود.

بازیابی فشار در اثر موج ضربه‌ای یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است و کاهش انرژی مفید را به دنبال دارد که در نتیجهٔ آن، راندمان شیپوره کم می‌شود.

منحنی C در نمودار از این جهت قابل توجه است که علیرغم اینکه $\frac{P_0}{P_i}$ بزرگتر از نسبت فشار بحرانی است، شیپوره هنوز دچار خفگی است زیرا نسبت فشار بحرانی در گلوگاه رخ می‌دهد و سرعت جریان در این محل برابر سرعت صوت است.

با افزایش مقدار $\frac{P_0}{P_i}$، موج ضربه به طرف عقب به سمت گلوگاه رانده می‌شود و بالاخره از قسمت ورودی شیپوره بیرون می‌رود و جریان در تمام طول شیپوره مادون صوت می‌شود. در مقادیر بالایی از $\frac{P_0}{P_i}$، شیپوره مانند یک ونتوری مادون صوت عمل می‌کند (منحنی‌های A و B در نمودار). در اینحالت بازیابی فشار (بخاطر نبودن موج ضربه‌ای) اتفاق نمی‌افتد، افت‌ها در شیپوره کم می‌باشند و راندمان شیپوره افزایش می‌یابد.

ب) حالت زیر انبساط (شیپورهٔ فرومنبسط)

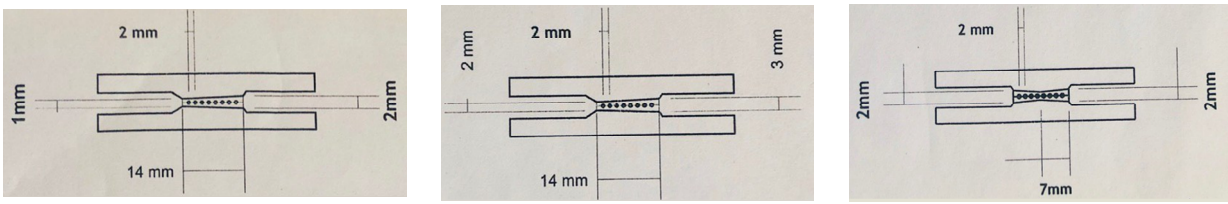
وقتی نسبت فشار $\frac{P_0}{P_1}$ کمتر از مقدار طراحی باشد، انبساط سیال در داخل شیپوره فقط تا نسبت فشار بحرانی صورت می‌گیرد و انبساط تا پس‌فشار پایین‌تر در خارج شیپوره و به شکلی غیرقابل کنترل کامل می‌شود.

شرح دستگاه مورد استفاده در این آزمایش:

این دستگاه از نازل‌های کوچک بسیار دقیق با هشت عدد فشارسنج اندازه گیری فشار در مقاطع مختلف نازل، دو عدد فشارسنج بزرگ جهت اندازه‌گیری فشارهای بالادست و پایین‌دست جریان، دو عدد شیر گلوئی در ورودی و خروجی نازل جهت تنظیم فشارهای ورودی و خروجی و یک اریفیس جهت اندازه گیری دبی جریان تشکیل شده است. به طور کلی با استفاده از این دستگاه می‌توان توزیع فشار، اثرات دمایی نازل، پدیده خفگی، رابطه بین فشار ورودی - نرخ جریان جرمی و فشار خروجی - نرخ جریان جرمی در چند نازل مختلف را ارزیابی کرد. در کل این دستگاه از قسمت‌های زیر تشکیل شده است:

1- دو عدد گیج فشار 10 bar در ورودی و خروجی مسیر نازل
2- فلومتر جهت اندازه‌گیری دبی جریان هوا
3- سنسورهای دما با دقت 0/1 درجه
4- شیر قطع و وصل سریع
5- رگولاتور تنظیم فشار ورودی
6- مجهز به اتصالات خاص جهت تعویض سریع نازل‌ها بدون نیاز به ابزار
7- سه عدد نازل با هندسه و ابعاد مشخص
8- شیر تنظیم دبی هوای گذرنده از نازل
9- کمپرسور همراه دستگاه جهت تامین فشار و جریان هوا
10- هشت سنسور فشار جهت اندازه گیری فشار در نقاط مختلف نازل
11- نمایش دهنده فشار، دما و دبی به صورت دیجیتال با دقت بالا

جهت انجام این آزمایش از سه نازل همگرا، همگرا – واگرا و واگرا استفاده می شود (شکل 13) که در مسیر جریان هوای فشرده بر روی هر نازل 8 نقطه به فاصله 2 میلیمتر از هم وجود دارد، که فشار این نقاط، توسط 8 سنسور فشار اندازه‌گیری شده و توسط نمایشگر، نمایش داده می شود. هوا به وسیله یک کمپرسور به مسیر جریان انتقال می‌یابد و رگولاتور نصب شده در مسیر جریان مقدار فشار ورودی به مسیر را تنظیم میکند. دمای هوای ورودی اندازه‌گیری شده و سپس جریان هوا وارد نازل شده و فشار در 8 نقطه از نازل اندازه گیری می شود. دمای هوا پس از خروج از نازل اندازه گیری شده و سپس دبی آن توسط روتامتر اندازه گیری می‌گردد.



شکل 13: تصویر شماتیک سه نازل مورداستفاده در این آزمایش.

نحوه نصب نازل روی دستگاه:

با باز کردن مهره نصب شده بر لوله سمت راست می‌توانید لوله را کمی به عقب برانید و نازل را جا بزنید. سپس مهره را سفت کنید تا نازل کاملا در جای خود نگه داشته شود. همچنین به منظور ارتباط 8 نقطه مشخص روی نازل با گیج های مربوطه، شیلنگ های هیدرولیک به ترتیب داخل فیتینگ‌های پنوماتیک واقع بر روی نقاط قرار داده شده و با کمی فشار در جای خود محکم می شوند. برای بیرون آوردن شیلنگ ها از داخل فیتینگ ها، همزمان با فشار دادن قطعه پلاستیکی فیتینگ پنوماتیک به سمت پایین و شیلنگ بیرون آورده می‌شود.

روش انجام آزمایش:

1- کمپرسور را تا فشار حدود 5 الی 6 بار شارژ کنید.

2- نازل مطابق روش گفته شده روی دستگاه نصب شود.

3- کمپرسور به وسیله شیلنگ هیدرولیک به قسمت ورودی هوای دستگاه متصل شود.

4- به وسیله کلید on/off دستگاه روشن شود.

5- توسط شیر قطع و وصل هوا، جریان برقرار شود.

6- فشار ورودی به وسیله شیر تنظیم دبی هوا، تنظیم شود.

7- دو گیج فشار، با محدوده اندازه گیری صفر الی 10 بار، فشار هوای ورودی به نازل و فشار هوای خروجی از نازل را نشان می دهد.

8- فشار نقاط 1 تا 8 نازل از روی سنسور دیجیتال به صورت همزمان اندازه گیری می‌شود.

9- دمای ورودی وخروجی نازل، توسط سنسورهای دما اندازه گیری شده و به وسیله نمایشگرهای دیجیتال دما با دقت 0/1 درجه سانتیگراد نمایش داده می شود.

10- دبی هوای خروجی از نازل به وسیله فلومتر بر حسب (m^3/hr) اندازه گیری می شود.

نکات ایمنی :

1- بایستی در طی انجام این آزمایش و در هنگام باز بودن فشارهای ورودی، به هیچ عنوان اقدام به باز کردن یا تعویض نازل‌ها نکنید.

2- در هنگام تعویض و جابه‌جایی نازل‌ها دقت کنید که نازل را بر روی زمین نیندازید یا اینکه با شدت به جایی برخورد نکند، زیرا باعث شکستن نازل خواهد شد.

3- در هنگام شارژ کمپرسور هوا، مخزن را بیشتر از نصف ظرفیت آن شارژ نکنید.

1- خواسته‌های آزمایش:

- **آزمایش اول با عنوان "مشاهده عینی پدیدهٔ خفگی" را به صورت زیر انجام دهید:**

شیر ورودی هوا را ببندید و شیپوره همگرا را نصب کنید .شیر ورودی هوا را باز نموده، یک فشار ورودی دلخواه بین 600 تا 800 کیلوپاسکال را انتخاب کنید. این فشار باید در تمام طول آزمایش ثابت نگه داشته شود .وقتی شیر خروجی بسته باشد باید فشار ورودی و خروجی یکسان باشند و دبی جرمی هوا صفر شود .اکنون ضمن آنکه پس فشار (خروجی) و دبی جرمی را مشاهده میکنید، شیر خروجی را به آهستگی باز کنید .همزمان با باز شدن این شیر، میزان دبی جرمی عبوری از شیپوره افزایش خواهد یافت تا به مقدار حداکثر خود برسد و سپس علیرغم باز کردن شیر خروجی، دبی جرمی ثابت می ماند .در این حالت شیپوره دچار پدیدهٔ خفگی شده است.

خواسته‌ی آزمایش: نسبت پس فشار به فشار ورودی را وقتی شیپوره همگرا دچار خفگی می شود، تعیین کنید. این آزمایش را با نازل واگرا هم انجام دهید و ذکر کنید که شروع پدیدهٔ خفگی در شیپوره واگرا در چه نسبت فشاری صورت می گیرد؟

- **آزمایش دوم با عنوان "مشاهدهٔ عینی توزیع فشار" را به صورت زیر انجام دهید:**

شیپوره‌ی همگرا را روی دستگاه سوار کنید. شیر خروجی را ببندید و شیر ورودی را باز کنید تا فشار ورودی در مقدار دلخواهی بین 600 تا 800 کیلوپاسکال تنظیم شود. حال شیر خروجی را به آهستگی باز کنید و فشار خروجی را روی مقدار 200 کیلوپاسکال کمتر از از فشار ورودی تنظیم نمایید. مشاهدهٔ فشارسنج ها نشان خواهد داد که فشار در یک مخروط همگرا (شیپوره همگرا) به صورت تدریجی تا فشار خروجی کاهش می یابد. هرگاه پس‌فشار خروجی تا مقدار فشار بحرانی تقلیل داده شود، باز هم توزیع فشار در طول شیپوره مشابه حالت قبل خواهد بود. حال اگر فشار خروجی را از مقدار فشار بحرانی کمتر کنیم، مشاهده می شود که توزیع

فشار در طول شیپوره دیگر تغییر نخواهد کرد، ضمن آنکه یک کاهش فشار ناگهانی در خروجی شیپوره اتفاق می افتد. این آزمایش مثال مشخصی از حالت زیر انبساط می‌باشد.

- **آزمایش سوم با عنوان "نمایش اثر فشار پایین دست بر محل بازیافت فشار (محل تشکیل موج ضربه) را به صورت زیر انجام دهید:**

شیر ورودی را ببندید و شیپوره واگرا را سوار کنید. شیر خروجی را کاملاً باز کنید. شیر ورودی را به تدریج باز کنید تا فشار ورودی بین مقادیر 600 تا 800 کیلوپاسکال قرار گیرد. شیر خروجی را به تدریج ببندید و همزمان به تغییرات فشارسنج ها و دبی سنج توجه کنید. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش پس فشار، محل موج ضربه های به طرف عقب شیپوره (ورودی شیپوره) جابجا می‌شود. در این حالت مشاهده می‌شود که از هر نقطه‌ای که موج از آن عبور کند، فشار به یکباره افزایش می یابد. فشار کلیهٔ نقاط بالادست موج بدون تغییر باقی خواهند ماند در حالیکه فشار نقاط پایین دست بطور یکنواخت تا مقدار پس‌فشار خروجی افزایش می‌یابند. همچنین ملاحظه می‌شود تا وقتی که موج ضربه‌های به محل گلوگاه بر نگردد و فشار گلوگاه شروع به افزایش نکند، مقدار دبی جرمی بدون تغییر می ماند.

- **آزمایش چهارم با عنوان "تعیین تأثیر فشار خروجی بر دبی جرمی" را به صورت زیر انجام دهید:**

شیر ورودی هوا را ببندید و شیپوره همگرا را سوار کنید. در حالیکه شیر خروجی کاملاً باز می باشد، شیر ورودی را طوری تنظیم کنید که فشار نسبی ورودی در مقادیر 600 تا 800 کیلوپاسکال ثابت بماند. مقادیر

دبی جرمی، فشار و دمای ورودی و خروجی را در جدولی یادداشت کنید. شیر خروجی را تا اندازه‌ای ببندید تا فشار خروجی 100 کیلوپاسکال افزایش یابد و سپس مجدداً مقادیر را در جدول یادداشت کنید. این عمل را تا آنجا ادامه دهید که فشار خروجی و ورودی یکسان شوند و هر بار مقادیر را در جدول یادداشت کنید. همین آزمایش را برای شیپوره‌ی واگرا نیز انجام دهید.

خواسته‌ی آزمایش: منحنی تغییرات دبی جرمی را بر حسب نسبت پس‌فشار خروجی به ورودی P_0/P_i رسم کنید و از روی منحنی‌های به دست آمده تعیین کنید که هر یک از شیپوره‌ها در چه نسبت فشاری دچار خفگی می شوند. دبی جرمی حالت خفگی را برای هر یک از سه شیپوره از روی منحنی‌ها و نیز با محاسبه به دست آورید و با یکدیگر مقایسه کنید.

- **آزمایش پنجم با عنوان "مشاهدهٔ توزیع فشار در شیپوره‌ها" را به صورت زیر انجام دهید:**

شیر ورودی را ببندید و نازل همگرا را روی دستگاه سوار کنید .فشار ورودی را روی مقدار ثابتی بین 600 تا 800 کیلوپاسکال تنظیم و شیر خروجی را کاملاً باز کنید .کلیهٔ مقادیر فشار و دما و دبی جرمی هوا را در جدولی مشابه قبل یادداشت کنید. حال فشار خروجی را تا حدود 100 کیلوپاسکال افزایش دهید و مجددا مقادیر را در ستون بعدی جدول یادداشت کنید. این کار را تکرار کنید و هر بار فشار را 100 کیلوپاسکال افزایش دهید تا آنجا که مقدار پس فشار خروجی به فشار نسبی ورودی نزدیک شود و در هر مرحله مقادیر را در یک ستون از جدول یادداشت کنید. همین آزمایش را با شیپوره واگرا انجام دهید و مقادیر را در جدول جداگانه‌ای یادداشت کنید.

خواسته‌های آزمایش: شکل هر یک از سه شیپوره را به طور دقیق در بالای سه برگهٔ مدرج جداگانه رسم کنید و در زیر هر شیپوره، منحنی تغییرات نسبت فشار P_x/P_i را در طول شیپوره رسم کنید.

نمونه‌ای از جدول داده ها برای ثبت متغیرهای آزمایش:

	نازل شماره1	نازل شماره2	نازل شماره 3
فشار ورودی به نازل P_i			
فشار بعد از خروج از نازل P_b			
دمای گاز ورودی به نازل T_1(°C)			
دمای گاز 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)			

2- پاسخ به سوالات زیر:

1- آیا شکل هندسی نازل در نسبت فشاری که پدیده خفگی روی می دهد ، تاثیر گذار است؟

2- چرا عدد ماخ در گلوگاه شیپوره نمی تواند بیشتر از 1 باشد؟

3- موارد استعمال شیپوره در صنعت را بیان کنید.

4- چرا در ابتدای آزمایش تغییرات اختلاف مانومتر شدید و بعد آهسته و در نهایت ثابت می شود؟

5- توضیح دهید چرا در بعضی از نسبت های فشار P_e/P_i در قسمت واگرای مجرا (در نازل همگرا - واگرا)، ابتدا فشار کم و سپس ناگهان فشار زیاد می شود؟

منابع:

1- ریچارد زونتاگ، کلاوس بورگناک، گوردن جی ون وایلن، اصول ترمودینامیک، ترجمه ی محسن حسنوند، محمدعلی رمضانی، انتشارات نورپردازان

2- یونس ای سنجل، میخاییل ای بولز، ترمودینامیک با نگرش مهندسی، ترجمه‌ی بهرام پوستی، انتشارات متفکران

3- دستور کار آزمایشگاه ترمودینامیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

4- دستور کار آزمایشگاه ترمودینامیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

5- Experimental Operating & Maintenance Manual Bench Top Cooling Tower H891, P.A.Hilton LTD, England, 1988.