فهرست دستورالعمل دستگاه

هدف ۱
مقدمه ۱
شرح دستگاه ۲
روش کار با دستگاه ۳

هدف :

آشنایی با رفتار جریان قابل‌تراکم در یک نازل

شکل ۱ : دستگاه تست نازل

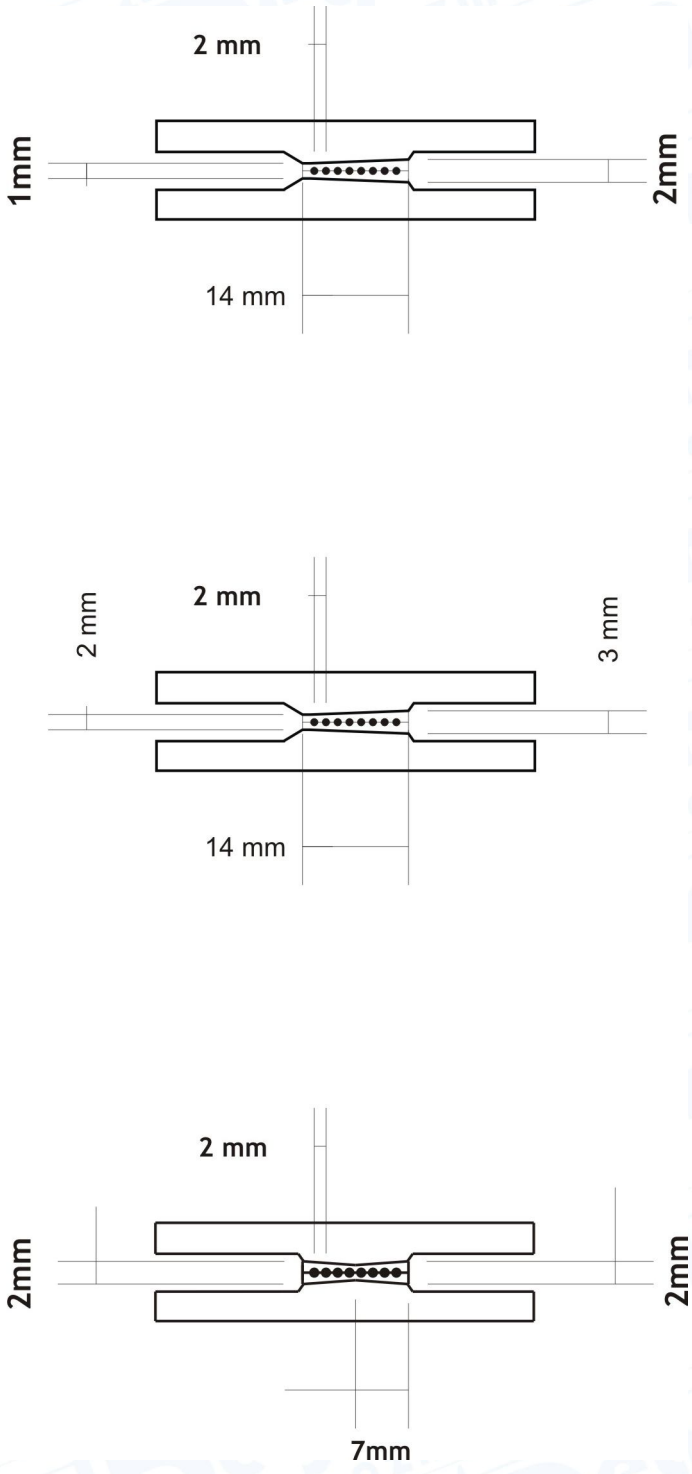
مقدمه :

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

یک شیپوره (nozzle) 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، به وجود می‌آید.

شرح دستگاه :

دستگاه تست نازل، دارای سه نوع نازل همگرا، واگرا و همگرا- واگرا می باشد که در مسیر جریان هوای فشرده بـر روی هر نازل ۸ نقطه به فاصله طولی $2mm$ از هم وجود دارد، که فشار این نقاط، توسط ۸ گیج فشار شماره گـذاری شـده از سمت چپ، نمایش داده می شود. نقشه نازلها در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ : نقشه نازل های مورد استفاده در دستگاه

نحوه نصب نازل روی دستگاه :

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

روش کار با دستگاه :

۱- کمپرسور تا فشار حدود ۵ الی ۶ بار شارژ شود.

۲- نازل مطابق روش گفته شده در قسمت "نحوه نصب نازل" ، روی دستگاه نصب می شود.

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

۴- به وسیله کلید *on/off* دستگاه روشن می شود.

۵- توسط شیر قطع و وصل هوا، جریان برقرار می گردد.

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

۷- دو گیج فشار، با محدوده اندازه گیری *bar (0-10)* ، فشار هوای ورودی به نازل و فشار هوای خروجی از نازل را نشان می دهند.

۸- فشار نقاط ۱ تا ۸ نازل از روی گیج های ۱ تا ۸ با محدوده اندازه گیری *bar -1* تا *bar 9* قابل رؤیت است.

۹- دمای ورودی و خروجی نازل، توسط سنسور های دمایی اندازه گیری شده و به وسیله نمایشگر های دیجیتال دما با دقت *0.1* درجه سانتی گراد نمایش داده می شود.

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

فهرست دستور آزمایش ها

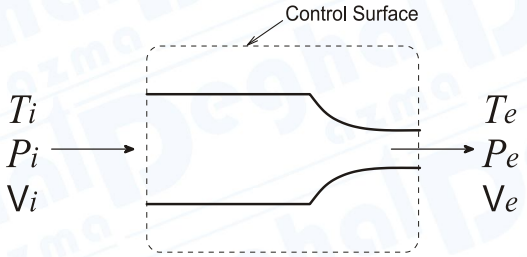
هدف ۱
تئوری ۱
اثر تغییر سطح مقطع در جریان های ایزنتروپیک یک بعدی ۱
روابط مربوط به جریان ایزنتروپیک گاز ایده آل ۲
جریان ایزونتروپیک در شیپوره همگرا ۳
جریان ایزونتروپیک در شیپوره همگرا – واگرا ۵
روش انجام آزمایش ۶
خواسته‌های آزمایش ۷
مثال های حل شده ۸

هدف :

آشنایی با رفتار جریان قابل‌تراکم در یک نازل

تئوری :

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



شکل ۱: طرح یک نازل

اثر تغییر سطح مقطع در جریان های ایزنتروپیک یک بعدی :

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

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

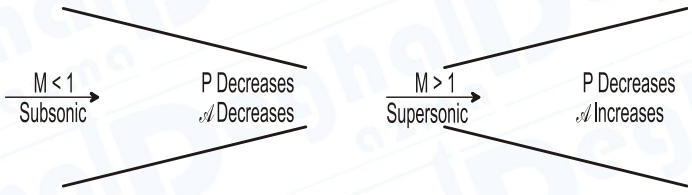
معادله (۱) بسیار مهم است، زیرا از آن می‌توان نتایج زیر را در مورد شکل صحیح شیپوره‌ها و پخش‌کننده‌ها بدست آورد.

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

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

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

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



شکل ۲: تغییر مساحت لازم برای شیپورها

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

$$\frac{dV}{V}=\left(\frac{-1}{1-M^2}\right)\frac{dA}{A} \qquad (۲)$$

$$\frac{d\rho}{\rho}=\left(-M^2\right)\frac{dV}{V} \qquad (۳)$$

$$\frac{dP}{P}=\left(\frac{kM^2}{1-M^2}\right)\frac{dA}{A} \qquad (۴)$$

$$\frac{dT}{T}=\left(\frac{(k-1)M^2}{1-M^2}\right)\frac{dA}{A} \qquad (۵)$$

روابط مربوط به جریان ایزنتروپیک گاز ایده آل :

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

$$\frac{T_0}{T}=1+\frac{K-1}{2}M^2 \qquad (۶)$$

برای یک فرآیند ایزو نتروپیک داریم :

$$\left(\frac{T_0}{T}\right)^{K/(K-1)}=\frac{P_0}{P} \quad , \quad \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/(K-1)}=\frac{\rho_0}{\rho} \qquad (۷)$$

بنابراین :

$$\frac{P_0}{P}=\left[1+\frac{(k-1)}{2}M^2\right]^{K/(K-1)} \qquad (۸)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho}=\left[1+\frac{(K-1)}{2}M^2\right]^{1/(K-1)} \qquad (۹)$$

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 شده‌اند.

$$\frac{T^*}{T_0}=\frac{2}{k+1} \qquad (۱۰)$$

$$\frac{P^*}{P_0}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)} \qquad (۱۱)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/(k-1)} \qquad (۱۲)$$

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

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

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

جریان ایزونتروپیک در شیپوره همگرا:

شیپوره ای همگرا نظیر شکل (۳- الف) را در نظر می گیریم که در آن جریانی ایزونتروپیک و همگرا وجود داشته باشد. سرعت جریان را در قسمت بالا دست، به علت اندک بودن در مقابل سرعت جریان در گلوگاه، برابر با صفر فرض می کنیم و فشار را در آن به P_0 نمایش می دهیم. اگر فشار در قسمت خروجی شیپوره تا مقدار P_b کاهش یابد، می توانیم منحنی تغییرات فشار در داخل شیپوره را بر حسب مقدار فشار P_b، (شکل۳- ب، منحنی های a تا e) رسم کنیم. در این صورت با ساده سازی معادله انرژی، به رابطه زیر می رسیم :

$$\frac{V}{c}=\left\{\frac{2}{K-1}\left[\left(\frac{P_0}{P}\right)^{K-1/K}-1\right]\right\}^{1/2} \qquad (۱۳)$$

در رابطه بالا V سرعت جریان و C سرعت صوت است . می بینیم که نسبت سرعت جریان به سرعت صوت در هر مقطع فقط تابع $\frac{P_0}{P}$ است.

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

$$G=\frac{\dot{m}}{A}=\rho V=\sqrt{\frac{KP}{\rho}.\rho^2\frac{2}{K-1}\left[\left(\frac{P_0}{P}\right)^{K-1/K}-1\right]} \qquad (۱۴)$$

رابطه (۱۴) را با در نظر گرفتن رابطه (۷)، می توان به صورت زیر نوشت :

$$G=\frac{\dot{m}}{A}=\rho V=\frac{2K}{K-1}P_0\rho_0\left[\left(\frac{P}{P_0}\right)^{2/K}-\left(\frac{P}{P_0}\right)^{K+1/K}\right] \qquad (۱۵)$$

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 :

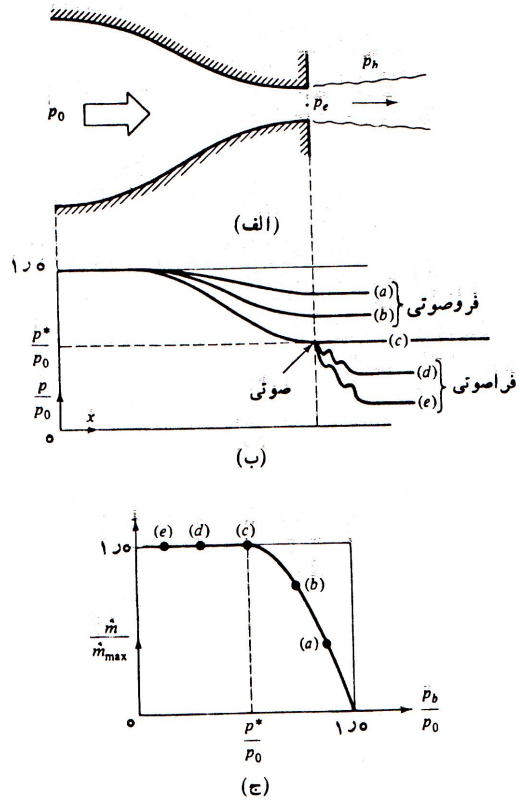
$$\dot{m}_{max} = \dot{m}_C = \rho_C V_C A_C = A_C \sqrt{K P_0 \rho_0} \left(\frac{2}{K+1}\right)^{K+1/2(K-1)} \qquad (۱۶)$$

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

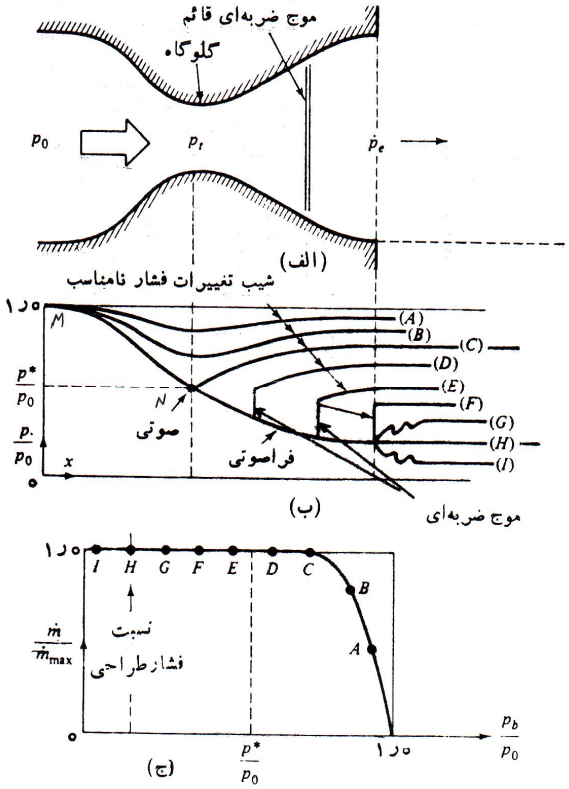
$$\dot{m}_{max} = \frac{0.6847 P_0 A_C}{\sqrt{RT_0}} \qquad (۱۷)$$

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 ۳ : تغییرات فشار و دبی جرمی در شیپوره همگرا



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

جریان ایزونتروپیک در شیپوره همگرا – واگرا :

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

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

اگر فشار P_b برابر با فشار P_0 باشد، جریانی صورت نمی گیرد و فشار در سرتاسر شیپوره همان فشار P_0 را خواهد داشت؛ پس نسبت $P/P_0 = 1$ خواهد بود و نمودار تغییرات P/P_0 بر حسب x به صورت خطی مستقیم در می آید (شکل ۴-ب).

هر گاه 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 بالا دست سرایت می کند و افت فشار بیشتری را در گلوگاه سبب می شود. کاهش فشار در این حالت (منحنی های A و B)، به اندازه ای نیست که در گلوگاه جریان صوتی ایجاد کند، لذا در سرتاسر شیپوره جریان از نوع فروصوتی است و فشار خروجی برابر با $P_e = P_b$ است. مشخصه های مختلف جریان سیال در این حالت با استفاده از روابط جریان ایزونتروپیک فروصوتی یا جدول جریان تراکم پذیر 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.

روش انجام آزمایش:

دستگاه کمپرسور را به ورودی متصل و کمپرسور را روشن نمایید. دقت کنید که فشار ورودی حداقل $2bar$ باشد. دستگاه دارای سه نازل همگرا، همگرا با گوشه‌های گرد و همگرا- واگرا می‌باشد. یکی از نازل ها را به ورودی و خروجی

در مکان معیین نصب نموده، اتصالات گیج ها را نیز به ترتیب شماره گذاری برقرار نمایید. به وسیله کلید *on/off* دستگاه را روشن نموده، سپس توسط شیر قطع و وصل سریع هوا، جریان را برقرار کنید. فشار ورودی را به وسیله شیر تنظیم دبی هوا، روی فشار مورد نظر تنظیم کنید.

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

آزمایش را برای دو نازل دیگر نیز تکرار نمایید.

جدول ۲: نتایج آزمایش

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

خواسته های آزمایش:

۱. منحنی نمایش توزیع فشار در طول شیپوره را برای هر سه نوع شیپوره رسم کنید.
۲. منحنی نمایش تغییرات سرعت، دما و عدد ماخ در طول شیپوره را رسم کنید.

۳. چرا عدد ماخ در گلوگاه شیپوره نمی‌تواند بیشتر از یک باشد؟
۴. موارد استعمال شیپوره در صنعت را بیان کنید.

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 $T^* = (T^*/T_t)T_t = 0.8333(500) = 416.15K$ است که T^*/T_t از جدول جریان تراکم پذیر آیزنتروپیک، برای $\gamma = 1.4$ به دست آمده است. گذر جرمی برای پس فشارهای 0 و 125 و 250 برابر است با :

روش اول:

$$\dot{m} = \rho A V$$
$$= \frac{P_e}{RT_e} A_e M_e \sqrt{\gamma R T_e}$$
$$= \frac{\left(264.15k\ {N}/{m^2}\right)\left[(50)(10^{-4})m^2\right](1)}{\left(0.287\ {kN.m}/{kg.K}\right)(416.7K)} \sqrt{1.4\left(287\ {N.m}/{kg.K}\right)(416.7K)}$$
$$= 4.519\ \left({kg}/{s}\right)$$

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 می کند.

در منحنی C ، جریان صوتی در گلوگاه برقرار است و به دنبال آن در جریان زیر صوت، از سرعت جریان کاسته می شود. جواب زیر صوت برای نسبت A/A^* از جدول جریان تراکم پذیر 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.

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

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

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

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

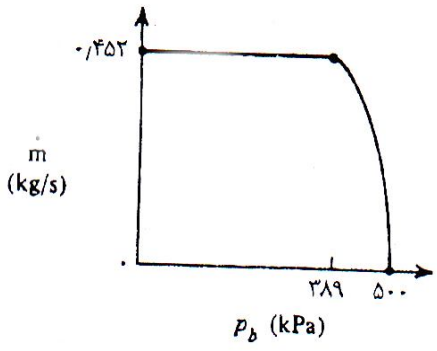
(د) برای پس فشار $0\ kPa$ ، شیپوره خفه می کند و فشار در صفحه‌ی خروجی آن با پس فشار برابر نیست. در این شرایط عدد ماخ در گلوگاه برابر یک است و فشار و دما در گلوگاه برابر است با :

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

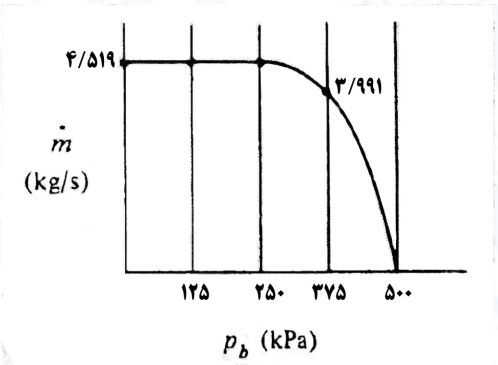
$$\dot{m} = \rho_t A_t V_t$$

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

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



شکل ۶



شکل ۵