Razi University
Educational Use

مکانیک سیالات۲

جریان تراکم‌پذیر

میثم سعیدی-استادیار گروه مهندسی مکانیک

سرعت صوت

سرعت صوت، شدت انتشار یک موج فشاری با توان بی‌نهایت کوچک است که از میان یک سیال ساکن صورت می‌گیرد و یکی از پارامترهای مهم در مطالعه جریانهای تراکم‌پذیر است.

☜ **نکته:** سرعت صوت در هر سیال تابعی از خواص ترمودینامیکی آن سیال است.

برای تعیین سرعت صوت از معادلات زیر استفاده می‌کنیم:

$$C^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s = k\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_T$$

k نسبت گرماهای ویژه سیال است.

برای گاز ایده‌آل: $C = \sqrt{kRT}$

Razi University Educational Use

مثال) کدام‌یک از عبارات زیر صحیح است؟

۱) در جریان سیال تراکم‌پذیر در نازل همگرا ـ واگرا به هر میزان که بخواهیم می‌توانیم با کاهش فشار در انتهای نازل سرعت جریان سیال را افزایش دهیم.

۲) در جریان سیال تراکم‌پذیر در نازل همگرا ـ واگرا بعد از اینکه سرعت سیال در گلوگاه به سرعت صوت رسید همواره می‌تواند با سرعت مافوق صوت از انتهای نازل خارج شود.

۳) در جریان سیال تراکم‌پذیر در نازل همگرا ـ واگرا در حالت ایزنتروپیک ماکزیمم جریان موقعی خواهد بود که سرعت سیال در گلوگاه برابر با سرعت صوت در گلوگاه باشد.

۴) در جریان سیال تراکم‌پذیر در نازل همگرا ـ واگرا همواره در گلوگاه سرعت سیال برابر با سرعت صوت است.

حل) گزینه (۳) صحیح است.

Razi University
Educational Use

نکته: سرعت انتقال صوت در: گازها < مایعات < جامدات

سرعت صوت را می‌توان براساس ضریب کشسانی حجمی هم بیان نمود:

$$C^2 = \frac{E_v}{\rho}$$

عدد ماخ: عدد ماخ یک عدد بی‌بعد است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$M = \frac{V}{C}$$

V: سرعت واقعی سیال یا سرعت یک جسم در سیال ساکن

C: سرعت صوت در همان سیال

عدد ماخ نشان دهنده نسبت نیروی اینرسی به نیروی تراکم‌پذیری است.

چنانچه قبلاً اشاره گردید اگر $M < 0/3$ باشد از اثرات تراکم‌پذیری صرفنظر می‌کنیم.

$M = 1 \Rightarrow$ جریان صوتی است.

$M < 1 \Rightarrow$ جریان مادون صوت است.

$M > 1 \Rightarrow$ جریان مافوق صوت است.

$M >> 1 \Rightarrow$ جریان ماوراء صوت است.

Razi University Educational Use

مثال) معیار قابل تراکم بودن یک جریان سیال، مقدار عدد بدون بعد ..... Mach می‌باشد.

در جریان گاز ایده‌آل در یک مجرا داریم:

$$\dot{m} = \rho A V = \frac{P}{RT} A(MC) = \frac{P}{RT} AM\sqrt{kRT} = \frac{PAM\sqrt{k}}{\sqrt{RT}} \propto \frac{PAM}{\sqrt{T}}$$

معادله پیوستگی: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \Rightarrow \frac{P_1 A_1 M_1}{\sqrt{T_1}} = \frac{P_2 A_2 M_2}{\sqrt{T_2}}$

$$\Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\frac{A_2}{A_1}\frac{M_2}{M_1}\right)^2$$

Razi University Educational Use

مثال) هوا با دمای $100\ ^\circ C$ به یک لوله با قطر $4''$ و با سرعت جرمی $20\ kg/s$ وارد می‌شود. اگر به هنگام خروج دمای آن به $30\ ^\circ C$ رسیده باشد نسبت عدد ماخ ورودی به خروجی چقدر است؟ فشار هوای ورودی $2\ atm$ و فشار هوای خروجی $1\ atm$ می‌باشد.

۱) ۱/۸ ۲) ۰/۹۱۳ ۳) ۰/۵۵۵ ۴) ۱/۰۹۵

حل)

$$\frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{M_1}{M_2}\frac{P_1}{P_2}\right)^2 \Rightarrow \frac{373/15}{303/15}=\left(\frac{M_1}{M_2}\times\frac{2}{1}\right)^2$$

$$\Rightarrow \frac{M_1}{M_2}=0/555$$

Razi University Educational Use

فرایند ایزنتروپیک

فرآیند ایزنتروپیک یک فرآیند آدیاباتیک برگشت‌پذیر است که در آن آنتروپی ثابت می‌ماند:

$$s_1 = s_2$$

در یک فرآیند ایزنتروپیک که سیال آن گاز ایده‌آل باشد روابط زیر برقرار هستند:

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

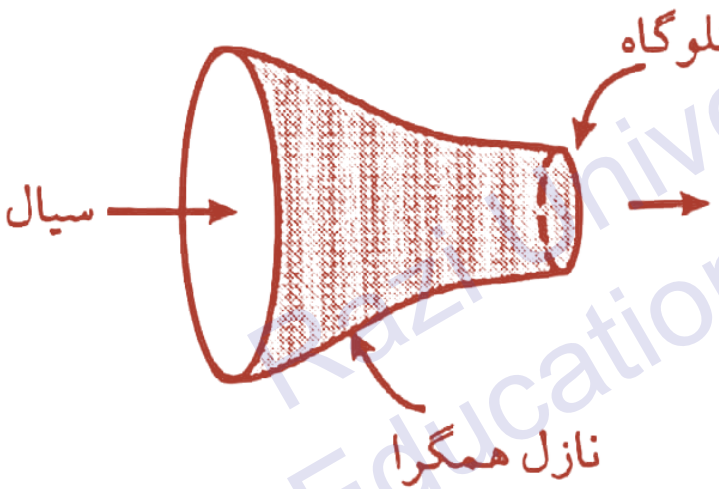
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{k-1}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{k}$$

که در معادلات فوق: $k = \frac{C_p}{C_v}$

Razi University
Educational Use

نازل همگرا: نازلی است که مساحت آن در امتداد جریان کاهش می‌یابد.



Razi University
Educational Use

خواص سکون

هرگاه سیالی از یک سرعت خاص به حالت توقف درآید گوییم به حالت سکون رسیده است.
معادله انرژی برای یک جریان پایا و آدیاباتیک به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$h + \frac{V^2}{2} = \text{ثابت}$$

h_0 را به عنوان آنتالپی موجود در نقطه‌ای که جزء سیال به طور آدیاباتیک به حالت سکون رسیده است نامیده و با توجه به معادله فوق و اعمال شرط $V = 0$ به معادله زیر می‌رسیم:

$$h + \frac{V^2}{2} = h_0$$

آنتالپی سکون انرژی کل به ازای واحد جرم سیال را نشان می‌دهد که برابر مجموع آنتالپی استاتیک (h) و انرژی جنبشی در واحد جرم است. هرگاه سیال، گاز ایده‌آل باشد با جایگزین کردن آنتالپی با $C_P T$ به معادله زیر می‌رسیم:

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2C_p}$$

Razi University
Educational Use

روابط مربوط به جریان ایزنتروپیک گاز ایده‌آل

در این قسمت روابط بین مشخصه‌های جریان برحسب شرایط سکون را بیان می‌کنیم.

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) M^2$$

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

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

Razi University
Educational Use

مثال) اگر سیالی تراکم‌پذیر از انتهای یک نازل بصورت سوپر سانیک و با عدد ماخ ۲ خارج شود، فشار انتهای نازل از کدامیک از روابط زیر محاسبه خواهد شد؟

۱) $P_۲ = P_۰ (\frac{۱}{۲\gamma - ۱})^{\frac{\gamma}{\gamma - ۱}}$

۲) $P_۲ = P_۰ (\frac{۱}{\gamma})^{\frac{\gamma}{\gamma - ۱}}$

۳) $P_۲ = P_۰ (\frac{۲}{\gamma + ۱})^{\frac{\gamma}{\gamma - ۱}}$

۴) $P_۲ = \frac{P_۰}{۲}$

حل)

$$\frac{P_۰}{P} = (۱ + \frac{k - ۱}{۲} M^۲)^{\frac{k}{k-۱}}$$

$$k = \gamma \quad , \quad M = ۲ \quad \Rightarrow \quad \frac{P_۰}{P} = \left[۱ + \frac{\gamma - ۱}{۲} \times ۲^۲\right]^{\frac{\gamma}{\gamma - ۱}} \quad \Rightarrow \quad \frac{P_۰}{P} = (۲\gamma - ۱)^{\frac{\gamma}{\gamma - ۱}}$$

$$P = (\frac{۱}{۲\gamma - ۱})^{\frac{\gamma}{\gamma - ۱}} P_۰$$

گزینه (۱) صحیح است.

Razi University
Educational Use

روابط بین خواص بحرانی (خواص سیال در گلوگاه که $M = ۱$ است) و خواص سکون به صورت زیر است:

$$\frac{T^*}{T_۰} = \frac{۲}{k+۱}$$

$$\frac{P^*}{P_۰} = \left(\frac{۲}{k+۱}\right)^{\frac{k}{k-۱}}$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_۰} = \left(\frac{۲}{k+۱}\right)^{\frac{۱}{k-۱}}$$

Razi University
Educational Use

اثر تغییر سطح مقطع در جریانهای ایزنتروپیک یک بعدی

برای یک جریان ایزنتروپیک می‌توان نشان داد که تغییرات فشار سیال برحسب مساحت جریان به شکل زیر است:

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

(توجه: معادله فوق با استفاده از معادله پیوستگی و معادله اویلر به دست آمده است.)

با توجه به اینکه ρ ، V و A کمیاتی مثبت هستند داریم:

۱) جریان مادون صوت

$M < 1 \quad \Rightarrow \quad 1 - M^2 > 0 \quad \Rightarrow$ dA و dP هم علامت هستند.

بنابراین با افزایش مساحت جریان، فشار سیال افزایش می‌یابد و با کاهش مساحت جریان، فشار سیال کاهش می‌یابد.

با توجه به مطلب فوق، فشار مجراهای همگرا کاهش می‌یابد و در مجراهای واگرا افزایش می‌یابد.

Razi University Educational Use

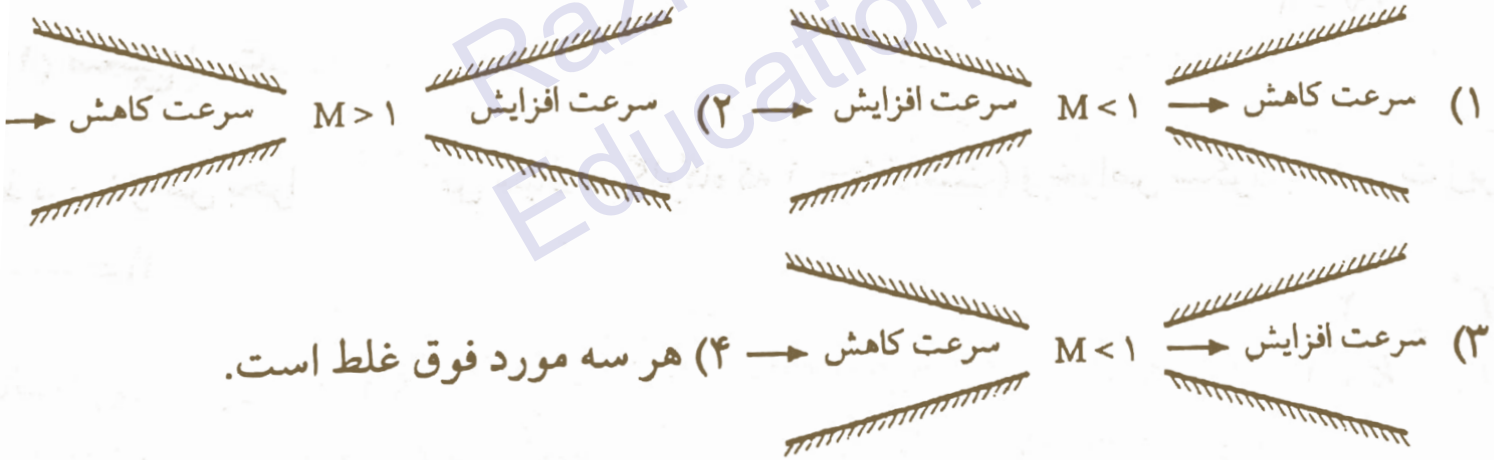
۲) جریان مافوق صوت

$M > ۱ \Rightarrow ۱ - M^{۲} < ۰ \Rightarrow$ dA و dP غیرهم علامت هستند.

بنابراین با افزایش مساحت جریان، فشار سیال کاهش می‌یابد و با کاهش مساحت جریان، فشار سیال افزایش می‌یابد.

با توجه به مطلب فوق، فشار مجراهای همگرا افزایش می‌یابد و در مجراهای واگرا کاهش می‌یابد.

مثال) کدام یک از جریان‌های زیر صحیح نیست؟



هر سه مورد فوق غلط است.

حل) گزینه (۳) صحیح است.

Razi University
Educational Use

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

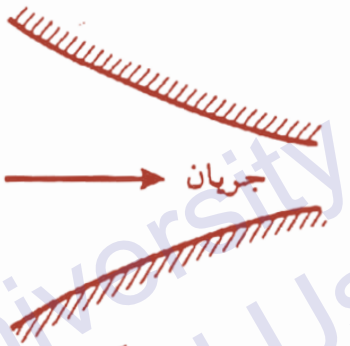
$$\frac{dV}{V} = \frac{1}{M^2 - 1}\frac{dA}{A}$$

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

$$\frac{dP}{P} = \frac{kM^2}{1 - M^2}\frac{dA}{A}$$

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

Razi University
Educational Use

سطح مقطع	شکل	$M<1$	$M>1$
سطح مقطع کاهش می‌یابد $(dA<0)$	 مجرای همگرا	$dV>0$ $dM>0$ $dP<0$ $d\rho<0$ $dT<0$ مجرا نازل است	$dV<0$ $dM<0$ $dP>0$ $d\rho>0$ $dT>0$ مجرا پخش کننده است
سطح مقطع افزایش می‌یابد $(dA>0)$	مجرای واگرا	$dV<0$ $dM<0$ $dP>0$ $d\rho>0$ $dT>0$ مجرا پخش کننده است	$dV>0$ $dM>0$ $dP<0$ $d\rho<0$ $dT<0$ مجرا نازل است

Razi University Educational Use

مثال) در جریان مطالعه سیال (جریان) با آنتروپی ثابت از گذرگاه با تغییر سطح مقطع و بدون اصطکاک معادله زیر صادق است: که M عدد ماخ می‌باشد. $\frac{dA}{A}=(M^2-1)\frac{dV}{V}$ وقتی $M<1$ باشد برای ازدیاد سرعت:

۱) سطح مقطع باید افزایش یابد. $(\frac{dA}{A}>0)$ ۲) سطح مقطع باید ثابت باشد. $(\frac{dA}{A}=0)$

۳) سطح مقطع باید تقلیل یابد. $(\frac{dA}{A}<0)$ ۴) نمی‌توان با سطح مقطع کار نمود.

حل)

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

$$M<1 \Rightarrow M^2-1<0$$

$$\frac{dV}{V}>0 \Rightarrow \frac{dA}{A}<0$$

گزینه (۳) صحیح است.

Razi University Educational Use

حالت خفگی

در شرایط سکون معین، حداکثر دبی جرمی موقعی از یک مجرا عبور می‌کند که گلوگاه در حالت بحرانی ($M = 1$) قرار داشته باشد که این حالت را خفگی می‌نامیم.

☜ **نکته:** در جریان ایزنتروپیک حداکثر دبی جرمی ممکن با سطح مقطع گلوگاه (A^*) و فشار سکون (P_0) نسبت مستقیم و با ریشه دوم دمای سکون نسبت عکس دارد.

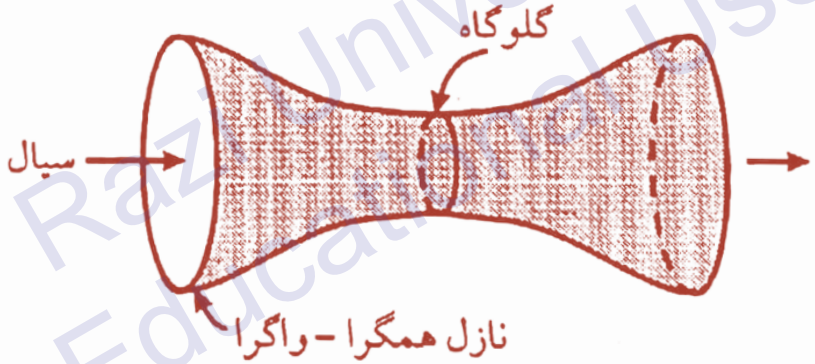
$$\dot{m}_{max} \propto \frac{P_0 A^*}{\sqrt{T_0}}$$

Razi University
Educational Use

نازل‌های همگرا ـ واگرا

نازل‌های همگرا ـ واگرا، نازل هایی هستند که در آنها سطح مقطع در امتداد جریان ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

در شکل زیر یک نازل همگرا ـ واگرا نشان داده شده است:



Razi University
Educational Use

☜ **نکته:** حداکثر سرعت سیال در نازل همگرا سرعت صوت است و جهت رسیدن به سرعتهای مافوق صوت باید از نازل همگرا ـ واگرا استفاده کرد.

گلوگاه: محل متناظر با کمترین سطح مقطع جریان را گلوگاه می‌نامیم.

☜ **نکته:** برای شتاب دادن به سیال در سرعتهای مادون صوت باید از نازل همگرا و در سرعتهای مافوق صوت باید از نازل واگرا استفاده کنیم.

☜ **نکته:** اگر جریان در بخش واگرای نازل، مافوق صوت باشد گلوگاه باید دارای عدد ماخ یک باشد.

Razi University
Educational Use

امواج ضربه‌ای

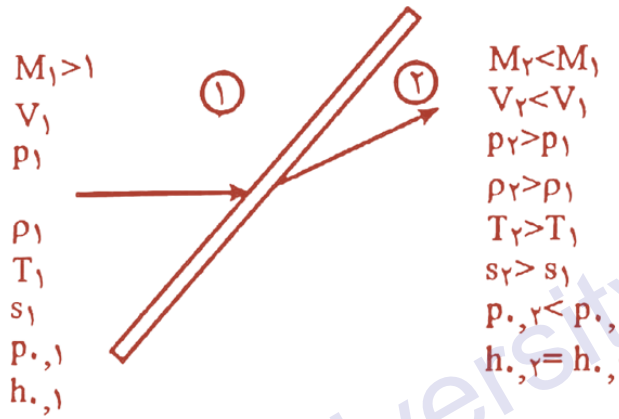
امواج ضربه‌ای، نواحی بسیار نازکی در جریانهای مافوق صوت هستند که تغییرات خواص در عرض آنها شدید است. این فرآیند برگشت‌ناپذیر بوده و نمی‌توان آن را ایزونتروپیک فرض کرد.

اگر موج ضربه‌ای در صفحه عمود بر امتداد جریان رخ دهد آن را موج ضربه‌ای قایم می‌نامند و در صورتیکه غیرعمود باشد آنرا موج ضربه‌ای مایل می‌نامند.

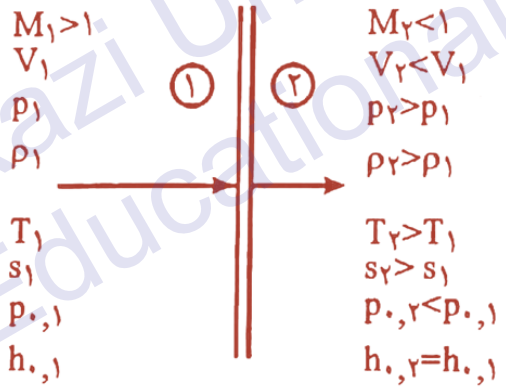
در امواج ضربه‌ای قایم جریانهای بالا دست و پایین دست در امتداد هم واقعند.

Razi University
Educational Use

تغییرات کیفی خواص جریان درگذر از امواج ضربه‌ای قایم و مایل در شکل زیر نشان داده شده است:



(الف) موج ضربه‌ای مایل



(ب) موج ضربه‌ای قائم

چنانچه در شکل فوق نشان داده شده است فشار، چگالی، دما و آنتروپی در عرض یک موج ضربه‌ای افزایش پیدا می‌کند ولی فشار کلی، عدد ماخ و سرعت کاهش می‌یابند.

Razi University Educational Use

☜ **نکته:** جریان در عرض یک موج ضربه‌ای، آدیاباتیک است بنابراین آنتالپی کلی در عرض یک موج ضربه‌ای ثابت است.

☜ **نکته:** در موج ضربه‌ای قایم، آنتالپی سکون ثابت می‌ماند و در نتیجه برای گازهای ایده‌آل دمای سکون هم ثابت می‌ماند.

در امواج ضربه‌ای جریان جلو موج ضربه‌ای باید مافوق صوت باشد ($M_1 > 1$) در پشت موج ضربه‌ای مایل معمولاً جریان مافوق صوت است ($M_2 > 1$) اما با عدد ماخ کوچکتر ($M_2 < M_1$) .

برای موج ضربه‌ای قایم جریان پایین دست همواره مادون صوت است ($M_2 < 1$) .

☜ **نکته:** مافوق صوت بودن سرعت جریان شرط لازم برای ایجاد موج ضربه‌ای قایم است.

Razi University Educational Use

مثال) در عبور از یک موج ضربه‌ای در جریان سیال تراکم‌پذیر افزایش

۱) فشار، عدد ماخ، آنتروپی وجود دارد.

۲) فشار، آنتروپی و کاهش ماخ وجود دارد.

۳) فشار، عدد ماخ و ثابت ماندن آنتروپی مطرح است.

۴) فشار، عدد ماخ و کاهش آنتروپی بوجود می‌آید.

Razi University
Educational Use

حل)

موقعی که از یک موج ضربه‌ای عبور می‌کنیم به دلیل آدیاباتیک بودن آن آنتالپی سکون و دمای سکون ثابت باقی می‌مانند ولی فشار و آنتروپی افزایش می‌یابند و عدد ماخ کاهش می‌یابد.

گزینه (۲) صحیح است.

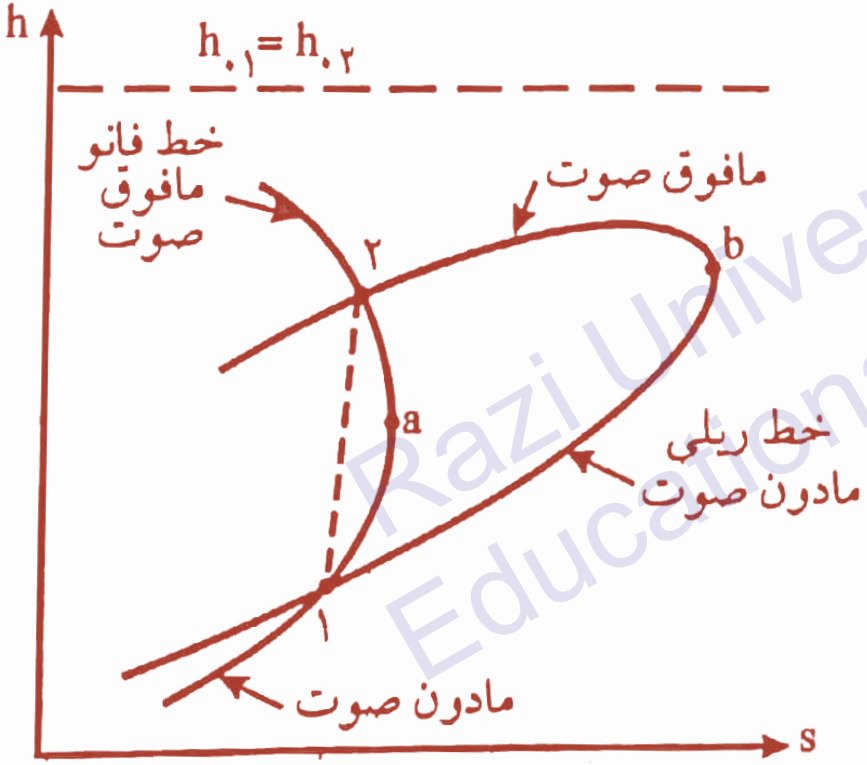
خطوط فانو و ریلی

خط فانو: جریان پایا، آدیاباتیک همراه با اصطکاک و دارای سطح مقطع ثابت را درنظر می‌گیریم. هرگاه معادلات پیوستگی و بقای انرژی را با هم ترکیب نموده و معادله حاصل را با استفاده از روابط بین خواص در نمودار $h - s$ رسم کنیم منحنی حاصل را خط فانو می‌نامند. خط فانو مکان هندسی حالتهایی است که دارای آنتالپی سکون و شار جرمی یکسان هستند.

خط ریلی: جریان پایا، بی‌اصطکاک همراه با انتقال گرما و دارای سطح مقطع ثابت را درنظر می‌گیریم. هرگاه معادلات پیوستگی و بقای اندازه حرکت را با هم ترکیب نموده و معادله حاصل را با استفاده از روابط بین خواص دو نمودار $h - s$ رسم کنیم منحنی حاصل را خط ریلی می‌نامند.

Razi University
Educational Use

در شکل زیر خطوط فانو و ریلی نشان داده شده است.



Razi University
Educational Use

☜ **نکته:** با توجه به شکل فوق در نقاطی که دارای حداکثر مقدار آنتروپی هستند $M = ۱$ است.

قسمتی از خطوط فانو و ریلی که روی نمودار $h - s$ بالای نقاط متناظر با $M = ۱$ (نقاط a و b) قرار می‌گیرد مربوط به جریان مادون صوت و قسمت پایین مربوط به جریان مافوق صوت است.

☜ **نکته:** خطوط فانو و ریلی همدیگر را در دو نقطه ۱ و ۲ قطع می‌کنند که نقطه ۱ مربوط به حالت قبل از وقوع امواج ضربه‌ای و نقطه ۲ مربوط به حالت بعد از وقوع امواج ضربه‌ای است.

☜ **نکته:** در موج ضربه‌ای شرایط جریان از نقطه تقاطع ۱ به صورت ناگهانی به نقطه تقاطع ۲ منتقل می‌شود.

Razi University
Educational Use

جریان آدیاباتیک همراه با اصطکاک در یک کانال با مقطع یکنواخت

جریان دایمی و آدیاباتیکی را درنظر می‌گیریم که در یک کانال با مقطع یکنواخت جاری است و در آن اثرات اصطکاک قابل صرفنظر نیست. می‌توان نشان داد که جریان ورودی چه مادون صوت باشد چه مافوق صوت، عدد ماخ جریان پایین دست به عدد ۱ میل کرده و شرایط صوتی برقرار می‌گردد.

اگر در ورودی کانال جریان مادون صوت باشد با حرکت سیال به طرف پایین‌دست، عدد ماخ آن افزایش می‌یابد و اگر در ورودی کانال جریان مافوق صوت باشد با حرکت سیال به طرف پایین دست، عدد ماخ جریان کاهش می‌یابد که در هر حالت جریان به شرایط صوتی می‌رسد.

Razi University
Educational Use

اگر طولی از کانال را که جریان در آن به عدد ماخ ۱ می‌رسد با L^* نشان دهیم در حالتیکه $L > L^*$ داریم:

۱) جریان ورودی مافوق صوت باشد.

در این حالت با افزایش بیشتر طول کانال با ایجاد یک موج ضربه‌ای صفحه‌ای در نزدیکی خروجی، شرایط در خروجی به حالت صوتی می‌رسد. اگر طول لوله را باز هم افزایش دهیم موج ضربه‌ای به سمت بالادست حرکت می‌کند تا به ورودی کانال برسد. تا این مرحله دبی جریان ثابت است. اگر طول لوله افزایش بیشتری بیابد جریان دچار خفگی شده و دبی جریان کاهش می‌یابد.

۲) جریان ورودی مادون صوت باشد.

در این حالت با کاهش دبی جرمی جریان شرایط در خروجی به حالت صوتی می‌رسد. بنابراین در این حالت برای برقراری شرایط صوتی در خروجی، جریان دچار خفگی می‌شود و با افزایش بیشتر طول لوله عدد ماخ ورودی و دبی جرمی کاهش می‌یابد.

Razi University Educational Use

مثال) اگر سیال تراکم‌پذیر در حالت آدیاباتیک در لوله حرکت کند و عدد ماخ در انتهای لوله به ۱ برسد با افزایش طول لوله دبی جرمی ($\dot{m}$) به چه صورتی تغییر می‌کند؟

۱) زیاد می‌شود
۲) فرق نمی‌کند
۳) کم می‌شود
۴) بستگی به شرایط ورودی لوله دارد

حل) گزینه (۳) صحیح است.

Razi University
Educational Use

تغییر خواص گاز برای یک جریان آدیاباتیک همراه با اصطکاک در جدول زیر آورده شده است:

خاصیت	جریان مادون صوت	جریان مافوق صوت
سرعت V	افزایش می‌یابد	کاهش می‌یابد
عدد ماخ M	افزایش می‌یابد	کاهش می‌یابد
فشار P	کاهش می‌یابد	افزایش می‌یابد
دما T	کاهش می‌یابد	افزایش می‌یابد
چگالی ρ	کاهش می‌یابد	افزایش می‌یابد
آنتالپی سکون h_0	ثابت می‌ماند	ثابت می‌ماند
آنتروپی s	افزایش می‌یابد	افزایش می‌یابد

Razi University Educational Usa

مثال) کدام یک از عبارات زیر در مورد درجه حرارت سکون *(Stagnation Temperature)* صادق است؟

۱) در یک پروسس آدیاباتیک دمای سکون در طول مسیر ثابت است.
۲) در یک پروسس ایزوترم اصطکاکی دمای سکون افزایش خواهد یافت.
۳) در یک پروسس ایزوترم دمای سکون در طول مسیر ثابت است.
۴) در یک پروسس آدیاباتیک اصطکاکی دمای سکون در طول مسیر کاهش خواهد یافت.

حل)
در فرآیند آدیاباتیک دمای سکون درطول مسیر ثابت است.
گزینه (۱) صحیح است.

Razi University
Educational Use

جریان همدما همراه با اصطکاک

جریان گازی را درنظر می‌گیریم که در یک مجرای طولانی غیرعایق با محیط به تعادل گرمایی می‌رسد به عبارت دیگر یک جریان همدما داریم که همراه با اصطکاک و انتقال گرما است.

با استفاده از معادلات مومنتم، پیوستگی، انرژی و معادله حالت به معادله زیر می‌رسیم:

$$\frac{f}{D}L_{max} = \frac{1 - kM^2}{kM^2} + ln(kM^2)$$

L_{max} حداکثر طول لوله است.

اگر $L > L_{max}$ باشد جریان دچار خفگی شده و دبی جرمی کاهش پیدا می‌کند.

☜ **نکته:** در جریان آدیاباتیک عدد ماخ به عدد ۱ میل می‌کند و در جریان هم دما به عدد $\frac{1}{\sqrt{k}}$ میل می‌کند.

Razi University
Educational Use

در جدول زیر تغییر خواص در جریان همدما با اصطکاک آورده شده است:

خاصیت	$M < 1/\sqrt{k}$	$M > 1/\sqrt{k}$
فشار P	کاهش می‌یابد	افزایش می‌یابد
چگالی ρ	کاهش می‌یابد	افزایش می‌یابد
سرعت V	افزایش می‌یابد	کاهش می‌یابد
عدد ماخ M	افزایش می‌یابد	کاهش می‌یابد
دمای سکون T_0	افزایش می‌یابد	کاهش می‌یابد
فشار سکون P_0	کاهش می‌یابد	اگر $M < \sqrt{2}/(k+1)$ باشد افزایش می‌یابد اگر $M > \sqrt{2}/(k+1)$ باشد کاهش می‌یابد

Razi University Educational Use

مثال) در جریان آدیاباتیک اصطکاکی سیال تراکم‌پذیر در حالت یکنواخت در لوله‌ها کدامیک از عبارات زیر صحیح است؟

۱) درجه حرارت سیال ثابت است.

۲) سرعت صوت در طول مسیر ثابت است.

۳) انتروپی گاز تغییر نمی‌کند.

۴) درجه حرارت سکون گاز در طول مسیر ثابت است.

حل)

چنانچه در متن درس اشاره گردید در جریان آدیاباتیک همراه با اصطکاک آنتالپی سکون ثابت می‌ماند و با فرض ایده آل بودن گاز، دمای سکون ثابت می‌ماند.

گزینه (۴) صحیح است.

Razi University
Educational Use

مثال) در حرکت ایزوترم اصطکاکی سیال تراکم‌پذیر در لوله، کدامیک از عبارات زیر صحیح است؟

۱) در حرکت مادون صوت *(subsonic)*، سرعت در طول لوله افزایش و فشار کاهش می‌یابد.

۲) در حرکت مادون صوت، سرعت در طول لوله افزایش و فشار نیز افزایش می‌یابد.

۳) در حرکت مافوق صوت *(supersonic)*، سرعت در طول لوله افزایش و فشار کاهش می‌یابد.

۴) در حرکت مافوق صوت، سرعت در طول کاهش و فشار نیز کاهش می‌یابد.

حل) گزینه (۱) صحیح است.

Razi University
Educational Use