مدرسان شریف

فصل اول

«هیدرولیک کانال‌های باز»

پیشگفتار

موادی که به شکل ظرف خود درآیند و در برابر نیروهای برشی مقاومتی از خود نداشته باشند سیال نامیده می‌شوند. بررسی نیروهای وارد بر هر سیال ناشی از بدنه خارجی ظرف یا جرم خود سیال در میدان مورد مطالعه، در علم مکانیک سیالات انجام می‌شود. در حالت کلی تحلیل مکانیک سیالات از مکانیک جامدات پیچیده‌تر می‌باشد. این به دلیل آن است که تغییر شکل و جابه‌جایی در سیالات بسیار بیشتر بوده و بیشتر به شرایط هندسی بدنه بستگی دارد. در حالی که در جامدات تغییر شکل‌ها و جابه‌جایی‌ها بسیار محدود است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که تغییر شکل‌ها در سیال تغییراتی در توزیع نیرو و دیگر پارامترهای مرتبط ایجاد نماید که همان پیچیدگی بیشتر را توجیه می‌نماید. هنگامی که مطالعات سیال در میدان‌های واقعی مد نظر باشد، بررسی مزبور در شاخه‌ای از مکانیک سیالات به نام هیدرودینامیک انجام می‌شود.

در مکانیک سیالات به جهت کاربردی بودن در بسیاری از شاخه‌های عمرانی و سازه‌های آبی روابطی به دست آمده است که برخی ریشه تجربی و برخی ریشه تحلیلی داشته است. تلفیقی از این روابط موجب شده است تا مکانیک سیالات در کاربرد با مهندسی سازه‌های آبی بر خلاف پیچیدگی ذاتی خود، بسیار سریع ایده‌های مناسب را به یک طراح بدهد. به این مفهوم که رابطه‌های کاربردی و تعیین ابعاد در مهندسی سازه‌های آبی پیچیدگی ذاتی در علم مکانیک سیالات را ندارد و حتی به نظر ساده‌تر از علم مکانیک جامدات هم هست. همین ویژگی موجب گردیده است تا هر دانش‌پژوه در زمان کمتری تسلط کافی بر مهندسی هیدرولیکی سازه‌های آبی را به دست آورد. مکانیک سیالات در دو حالت سیال ایستا (در حالت سکون) و سیال در حالت حرکت به بررسی شرایط هیدرودینامیکی می‌پردازد.

دانش هیدرولیک به بررسی رفتار سینماتیکی آب (حرکت آب) می‌پردازد. حرکت آب تنها می‌تواند در اثر تابع توزیع فشار هیدروستاتیک در دو مقطع متوالی از حجم کنترلی (ناشی از گرانش) یا انرژی محرک خارجی (مانند پمپ) انجام شود. در حالت کلی در کانال‌های روباز، تنها عامل محرک آب شتاب گرانشی زمین می‌باشد. در بیشتر جریان‌های مورد بررسی، تمام یا بخشی از سطح جریان با هوای آزاد در تماس است. برای بررسی جریان در لوله‌ها که در آن تمام پیرامون تر شده با مرز صلب احاطه گردیده است به قسمت جریان در لوله‌ها علم مکانیک سیالات رجوع می‌گردد.

در شرایط خاصی اگر در لوله تمام مساحت مقطع مجرا با آب پر نشده و بخش خالی از مجرا در فشار ثابتی باشد، آنگاه می‌توان با قانون‌های حاکم بر جریان آزاد، جریان در لوله را تحلیل هیدرولیکی نمود. نمونه‌ای از این لوله‌ها که در شرایط فشار آزاد می‌باشند، لوله‌های فاضلاب هستند.

در این کتاب هیدرولیک کانال‌های باز مورد بررسی قرار می‌گیرد. هیدرولیک خود به شاخه‌های متعددی می‌تواند تقسیم شود که شامل موارد زیر می‌باشد:

۱ـ هیدرولیک کانال‌های باز و رودخانه‌ها
۲ـ هیدرولیک لوله‌های تحت فشار و خطوط انتقال
۳ـ هیدرولیک لوله‌های مویین و آزمایشگاهی
۴ـ هیدرولیک دریا (در حضور موج)
۵ـ هیدرولیک آب‌های زیرزمینی (آبخوان‌ها، قنات‌ها و...)
۶ـ هیدرولیک رسوب (جابه‌جایی و حمل مواد جامد در آب)

مکانیک سیالات در حالت جامع‌تری مکانیک شاره‌ها نیز نامیده شده که در آن صورت حرکت توده‌های گازی نیز مورد پوشش قرار می‌گیرد. از آن جایی که برخی از روابط ریشه تجربی دارند و حاصل کارهای آزمایشگاهی هستند، معمولاً رابطه‌های کلی و جامع در این علم کمتر است. به این ترتیب در هر دسته‌بندی از شاخه‌های هیدرولیک باید شرایط کاربرد یک رابطه از ابتدا در نظر گرفته شود. این قضیه به ویژه در هیدرولیک رسوب، دریا و رودخانه‌ها صدق می‌نماید. در این کتاب، هدف بررسی جریان در کانال‌های باز می‌باشد که تا حدی می‌توان از روابط آن در حالت‌های خاص در رودخانه‌ها نیز استفاده کرد. رویکرد کلی نیز بر این بوده است که این کتاب مرجعی برای گذراندن درس هیدرولیک در دوره کارشناسی و آمادگی برای آزمون ارشد ورود به تحصیلات تکمیلی باشد.

میدان و پیوستگی سیال

آب مایع است و مایع بودن به معنای این است که فاصله مولکولی بین ذره‌های تشکیل‌دهنده آب مقدار ثابتی بوده، اما مولکول‌ها به گونه‌ای می‌توانند نسبت به هم لغزش داشته باشند. لغزش بین مولکولی مهم‌ترین ویژگی سیال است که از آن به عنوان واژه بیان‌کننده تعریف سیال استفاده می‌شود. از نظر علم مکانیک، سیال (مایع) ماده‌ای است که نمی‌تواند تنش برشی را تحمل نماید. همین ویژگی لغزش مولکول‌ها نسبت به هم موجب می‌شود تا سیال به شکل ظرف خود در آید.

بنابراین میدان ظرفی است که سیال تمام آن را پر کرده است. پارامترهای هیدرولیکی سیال در این میدان تعریف می‌گردد. برای تحلیل یک میدان دو دیدگاه عمده وجود دارد:

الف: دیدگاه اویلری که در آن مرزهای واقعی یا فرضی (به عنوان برش عرضی یا طولی) به صورت ثابت در نظر گرفته شده و مولکول‌های سیال از این برش‌ها به حجم کنترلی وارد شده و از آن خارج می‌گردند.

ب: دیدگاه لاگرانژی که در آن به حجم کنترلی، مولکولی وارد یا خارج نمی‌شود. به بیان بهتر، در این دیدگاه مولکول سیال در میدان (حجم کنترلی) تعقیب می‌گردد.

رابطه‌هایی که با استفاده از دیدگاه اویلری به دست می‌آید ساده‌تر و کاربردی‌تر است. از نظر ریاضی استفاده از دیدگاه لاگرانژی مشکل‌تر بوده و رابطه‌های پیچیده‌تری به دست می‌دهد. بیشتر روابط کاربردی مهندسی آب (از جمله رابطه‌های این کتاب) از دیدگاه اویلری به دست آمده‌اند.

مثال۱: مولکول‌های یک مایع (مانند آب) نسبت به هم چگونه جابجا می‌شوند؟

۱) رفت و برگشتی ۲) رفت و برگشتی و چرخشی

۳) بستگی به حرکت یا سکون سیال دارد. ۴) لغزشی

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» در هر مایع، مولکول‌ها نسبت به هم می‌توانند بلغزند اما فاصله مولکول‌ها نسبت به هم ثابت باقی می‌ماند.

تعاریف و نام‌گذاری‌هایی کلی وجود دارد که در شاخه‌های مختلف مکانیک سیالات به صورت مشترک کاربرد دارد. ریشه این تعاریف در هیدرودینامیک بوده که به صورت کاربردی در هیدرولیک وارد می‌گردد. نام لاتین هر یک از این واژه‌ها در متن آمده است که در زمینه‌های وسیعی مانند مطالعات تکمیلی و زبان تخصصی تکرار می‌شود و حفظ کردن آن‌ها توصیه می‌شود.

برخی از پارامترهای مهم در مکانیک سیالات و هیدرولیک عبارتند از:

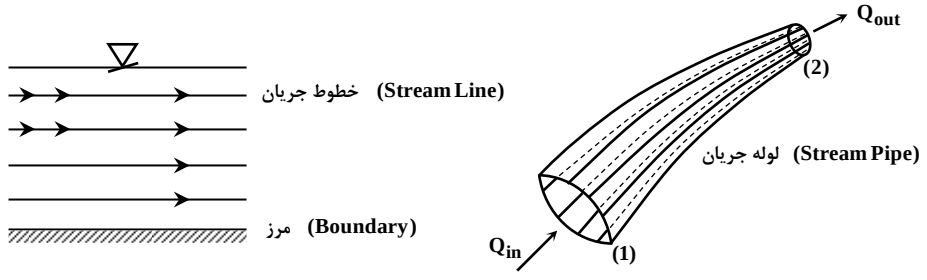
جریان Flow: شارش ذرات سیال اعم از مایع یا گاز در فضا جریان نامیده می‌شود.

لوله جریان Stream Pipe: لوله‌ای فرضی است که در مرز آن خطوط جریان قرار گرفته‌اند. جریان از جداره لوله جریان وارد یا خارج نمی‌شود.

تار جریان Streak Line: اگر در حالت حدی سطح مقطع لوله جریان به صفر میل نماید تار جریان خواهد بود.

خط جریان Stream Line: خطی فرضی در داخل میدان سیال است که بردارهای سرعت در همه طول بر آن مماس هستند. در حالت حدی تار جریان می‌تواند با خط جریان یکسان در نظر گرفته شود.

مرز Boundary: بخشی از بدنه ظرفی که سیال در آن قرار گرفته مرز سیال است. ویژگی مهم مرز، صفر بودن سرعت در مجاورت آن و عدم ورود یا خروج سیال به مرز در هر شرایطی است. فرض مرز صلب یا فرسایش‌ناپذیر (Rigid body) برای ساده‌سازی روابط می‌باشد.



شکل ۱: خط جریان، لوله و تار جریان

نکته۱: همواره خطوط هم‌پتانسیل (هم‌فشار) بر خطوط جریان عمود می‌باشند. به عبارتی تابع جریان ψ و تابع پتانسیل ϕ متعامدند.

در هر میدان سیال دو تابع تعریف می‌شود. این دو تابع عبارت از تابع جریان ψ و تابع پتانسیل ϕ هستند. هر دوی این معادلات در شرط لاپلاس صدق می‌نمایند. طبق قضیه لاپلاس خواهیم داشت:

$$\frac{\partial^۲F}{\partial x^۲}+\frac{\partial^۲F}{\partial y^۲}+\frac{\partial^۲F}{\partial z^۲}=\nabla^۲F=۰$$

در این رابطه x،y و z مختصات دستگاه دکارتی و F هر تابع جریان یا پتانسیل می‌باشد.

اگر جریان دو بعدی فرض شود (در بسیاری از حالت‌ها در طبیعت چنین فرضی صحیح می‌باشد) و سیال نیز تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شود، آنگاه تابع جریان ψ دارای خصوصیات زیر است:

$$u_x=\frac{\partial\psi}{\partial y}$$

$$u_y=\frac{-\partial\psi}{\partial x}$$

که در آن u_x و u_y مؤلفه‌های سرعت در جهت x و y می‌باشند.

به همین ترتیب با فرض جریان دو بعدی و تراکم‌ناپذیر، می‌توان از تعریف تابع پتانسیل ϕ، روابط زیر را برای مؤلفه‌های سرعت بیان نمود.

$$u_x=\frac{\partial\phi}{\partial x}$$

$$u_y=\frac{\partial\phi}{\partial y}$$

توجه شود که به ازای هر تابع پتانسیل که در معادله لاپلاس صدق نماید، تابع جریانی وجود خواهد داشت که آن هم در معادله لاپلاس صدق می‌نماید.

دستگاه معادلات مقابل به دستگاه کوشی ریمان معروف است که از حل در علم هیدرودینامیک نتایج کاربردی مناسبی در مکانیک سیالات و هیدرولیک به دست می‌دهد. معادله انرژی برنولی یکی از این نتایج می‌باشد.

$$\begin{cases}u_x=\dfrac{\partial\psi}{\partial y}=\dfrac{\partial\phi}{\partial x}\\ u_y=\dfrac{-\partial\psi}{\partial x}=\dfrac{\partial\phi}{\partial y}\end{cases}$$

نکته۲: در روی هر خط جریان همواره مقدار تابع جریان ثابت می‌باشد، و نمودارهای تابع پتانسیل بر خطوط جریان عمود هستند. به عبارتی در جهت جریان انرژی کاهش می‌یابد. در نتیجه در امتداد هر خط جریان انتقال دبی برابر صفر می‌باشد.

مثال۲: اگر در یک میدان جریان سیال تابع پتانسیل با رابطه $۲x+۳y=c$ بیان شود، تابع جریان و بردارهای سرعت کدام خواهند بود؟

۱) $\begin{cases}\psi=۳x+۲y+c'\\ u_x=۳\\ u_y=۲\end{cases}$ ۲) $\begin{cases}\psi=-۳x+۲y+c'\\ u_x=۲\\ u_y=۳\end{cases}$ ۳) $\begin{cases}\psi=-۳x-۲y+c'\\ u_x=-۳\\ u_y=-۲\end{cases}$ ۴) $\begin{cases}\psi=۳x-۲y+c'\\ u_x=-۲\\ u_y=-۳\end{cases}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» ابتدا صدق کردن تابع پتانسیل داده شده در معادله لاپلاس کنترل می‌شود.

$$\nabla^۲\phi=\frac{\partial^۲\phi}{\partial x^۲}+\frac{\partial^۲\phi}{\partial y^۲}=۰$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\phi}{\partial x}=۲\\ \dfrac{\partial\phi}{\partial y}=۳\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}\dfrac{\partial^۲\phi}{\partial x^۲}=۰\\ \dfrac{\partial^۲\phi}{\partial y^۲}=۰\end{cases}\Rightarrow\nabla^۲\phi=۰+۰=۰$$

با توجه به این که تابع پتانسیل داده شده در معادله لاپلاس صادق است، می‌توان تابع جریانی یافت که آن هم معادله لاپلاس را ارضاء نماید. بنابراین طبق دستگاه معاملات کوشی ریمان خواهیم داشت:

$$\frac{\partial\phi}{\partial x}=\frac{\partial\psi}{\partial y}=۲ \quad \Rightarrow \quad \psi=۲y+f_۱(x)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial y}=\frac{-\partial\psi}{\partial x}=۳ \quad \Rightarrow \quad \psi=-۳x+f_۲(y)$$

در نتیجه تابع پتانسیل به صورت روبرو خواهد بود:

$$\psi=۲y-۳x+c'$$

با استفاده از رابطه بین تابع پتانسیل و سرعت داریم:

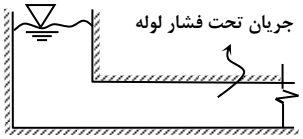
$$u_x=\frac{\partial\phi}{\partial x}=\frac{\partial\psi}{\partial y}=۲ \qquad u_y=\frac{\partial\phi}{\partial y}=\frac{-\partial\psi}{\partial x}=۳$$

دسته‌بندی انواع جریان سیال

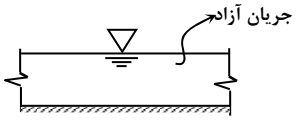
هیدرولیک جریان در یک مجرا ممکن است به دو صورت تحت فشار و یا جریان آزاد باشد و از این نظر می‌توان آن را به دو بخش دسته‌بندی نمود:

الف) هیدرولیک مجاری تحت فشار

ب) هیدرولیک کانال‌های باز



در جریان تحت فشار که می‌توان آن را جریان در مجاری بسته نیز نامید، تمام مایع درون یک مرز جامد پیوسته مانند لوله محصور شده است.



در کانال‌های باز، مایع در حال حرکت در تمام مرز در تماس با جدار جامد نیست.

مجرای بسته می‌تواند به صورت کانال باز عمل کند، در صورتی که جریان تعریف عمومی کانال باز را ارضا نماید. به عبارتی باید سطح آزاد آب در معرض فشار ثابت اتمسفریک قرار داشته باشد.

در هر مقطع از جریان، مقدار انرژی کل عبارت است از: مجموع ارتفاع معادل سرعت $(\frac{u^۲}{۲g})$، ارتفاع معادل فشار $(\frac{P}{\gamma})$ و ارتفاع تراز مبنا (z) انرژی کل (H) از رابطه برنولی به دست می‌آید که برابر است با:

$$H=\frac{P_\circ}{\gamma}+z+\frac{u^۲}{۲g}$$

در رابطه برنولی مجموع هدهای فشاری، تراز و سرعت با دیمانسیون ارتفاع ستون آب (m) بیان می‌شود.

در این رابطه، g: شتاب گرانش زمین $(\frac{m}{sec^۲})$، $P_\circ$: فشار هیدروستاتیک (pa)، z : تراز مبنا (m)، γ: وزن مخصوص آب $(\frac{N}{m^۳})$ و u: سرعت سیال $(\frac{m}{sec})$ می‌باشد.

با استفاده از رابطه برنولی دو مفهوم پرکاربرد HGL و EGL تعریف می‌شود.

EGL:(Energy Grade Line) **خط تراز انرژی**

$$EGL=H=\frac{P_\circ}{\gamma}+z+\frac{u^۲}{۲g}$$

HGL:(Hydraulic Grade Line) **خط پیزومتری**

$$HGL=\frac{P_\circ}{\gamma}+z$$

EGL خط تراز انرژی بوده و برابر مجموع انرژی فشاری + تراز مبنای بستر + هد معادل سرعت آب می‌باشد. واحد EGL از جنس متر بوده و بر حسب ارتفاع ستون آب بیان می‌شود.

HGL خط پیزومتری است که به مقدار هد معادل سرعت از EGL کمتر می‌باشد. واحد HGL نیز از جنس متر بوده و بر حسب ارتفاع ستون آب بیان می‌شود.

رابطه زیر بین این دو پارامتر برقرار است:

$$HGL=EGL-\frac{u^۲}{۲g}$$

مثال۳: بین خط پیزومتری و تراز خط انرژی آب چه رابطه‌ای برقرار است؟

۱) به مقدار $\frac{u^۲}{۲g}$ خط پیزومتری از تراز خط انرژی بیشتر است.

۲) به مقدار $\frac{u^۲}{۲g}$ خط پیزومتری از تراز خط انرژی پایین‌تر است.

۳) بستگی به پارامترهای سرعت و فشار آب دارد.

۴) مجموع خط پیزومتری و تراز خط انرژی برابر است با مقدار ثابت.

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» رابطه $EGL = HGL + \frac{u^۲}{۲g}$ تعریف شده است.

جریان در کانال‌های باز از پیچیدگی‌های بیشتری نسبت به جریان در لوله‌های تحت فشار برخوردار می‌باشد. مطالعه این‌گونه جریان‌ها نیاز به تحقیقات تجربی و آزمایشگاهی بیشتری دارد. برخی از محدودیت‌های مطالعات جریان‌های آزاد نسبت به تحت فشار عبارتند از:

الف) کانال‌های باز محدوده وسیع‌تری از جریان آب را شامل می‌شوند. (از رودخانه‌های بزرگ تا کانال‌های زهکش مزارع، فاضلابروها و ....).

ب) در کانال‌های باز وابستگی بیشتری بین پارامترهای هیدرولیکی مشاهده می‌شود. به عنوان مثال، در یک جریان تحت فشار، سرعت هنگامی تغییر می‌کند که مقطع جریان تغییر کند. سرعت در کانال باز به شیب طولی کانال، زبری و برخی دیگر از پارامترهای هندسی وابسته است.

پ) کمبود اطلاعات آزمایشگاهی و صحرایی کافی برای کالیبراسیون روابط تجربی در جریان‌های آزاد.

جدول ۱. انواع جریان آب در مجراهای متداول از نظر تحت فشار بودن

تحت فشار	لوله‌های آب رسان شهری ـ لوله‌کشی ساختمان
آزاد	کانال‌های روباز ـ رودخانه‌ها ـ لوله‌های فاضلاب

دسته‌بندی کانال‌ها

کانال‌ها مهم‌ترین سازه‌های انتقال آب با جریان روباز هستند. کانال‌ها برای آبرسانی از مخازن یا آب‌گیرها به محل مصرف ساخته می‌شوند. معمولاً تلاش می‌شود تا مسیر کانال‌ها از شیب طبیعی زمین تبعیت نماید. در نتیجه ساخت کانال‌ها با انجام عملیات خاک‌ریزی و خاک‌برداری انجام می‌شود. برای بهینه‌سازی هزینه‌ها، انتخاب مسیر بهینه و انتخاب تیپ مناسب برش عرضی و دیگر مشخصات کانال می‌تواند با اهمیت باشد.

کانال‌ها بر مبنای پارامترهای متفاوتی مانند جنس، شکل و ..... می‌توانند دسته‌بندی شوند.

جدول ۲. دسته‌بندی کانال‌ها بر اساس جنس بدنه

کانال‌های طبیعی	آبراهه‌ها و رودخانه‌های طبیعی با بستر خاکی و سنگی
کانال‌های ساختگی	کانال‌های بتنی، سنگ و ملاتی و آجری جهت آب‌رسانی مزارع و زهکشی، فاضلابروها و ....

کانال‌های ساختگی در مناطقی که نفوذپذیری و فرار آب از کف بالا بوده و یا ارزش زمین بالا باشد (مانند مناطق شهری) ساخته می‌شوند. کانال‌های ساختگی با مصالح بنایی یا بتن پوشش‌دار می‌شوند. این کانال‌ها می‌توانند دبی بالاتری را گذر داده و تلفات آب را کاهش دهند. ارزش آب تلف شده با هزینه پوشش‌دار کردن کانال سنجیده شده و نسبت به انجام پوشش تصمیم‌گیری می‌شود.

جدول ۳. انواع دیگر دسته‌بندی کانال‌ها

منشوری	در طول مسیر، هم سطح مقطع و هم شیب طولی ثابت است
غیر منشوری	در طول مسیر سطح مقطع یا شیب طولی و گاهی هر دو تغییر می‌کند
بدنه فرسایش‌پذیر	رودخانه‌ها و آبراهه‌های طبیعی که هنوز در مرحله جوانی باشند، با گذر سیلاب‌ها یا حتی جریان‌های پایه دچار فرسایش عمومی یا موضعی می‌شوند
بدنه فرسایش‌ناپذیر	کانال‌های ساختگی با پوشش صلب یا رودخانه‌ها و آبراهه‌های پیر با گذر جریان پایه و حتی بیشینه سیلابی، مقطع دچار فرسایش و رسوب‌گذاری نمی‌شود

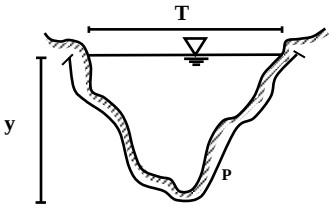
نکته۳: بیشتر رودخانه‌ها و آبراهه‌های طبیعی ایران در مرحله جوانی بوده و به ویژه در هنگام عبور سیلاب‌ها فرسایش پذیرند. با توجه به شکل هیدروگراف سیلاب، رودخانه‌های فصلی در بخشی از مسیر (سرشاخه‌ها) کف‌کنی داشته و در بخش دیگری از مسیر (تالاب‌ها) رسوب‌گذاری می‌نماید (مانند بسیاری از مسیل‌ها). بسیاری دیگر از آبراهه‌های طبیعی و رودخانه‌های دائمی در مرحله رژیم قرار دارند. به این مفهوم که در هنگام پرآبی در یک مقطع خاص از بستر خود کف‌کنی نموده و آن را می‌فرسایند، سپس در فصل کم‌آبی مجدداً در همان مقطع از این بازه‌های فرسایش یافته رسوب‌گذاری می‌شود. هر ساله این حالت نوسانی تکرار می‌شود و به طور متوسط در طی چندین سال تراز بستر تغییر می‌نماید اما متوسط تراز بستر ثابت می‌باشد (مانند رودخانه ارس).

پارامترهای هندسی جریان

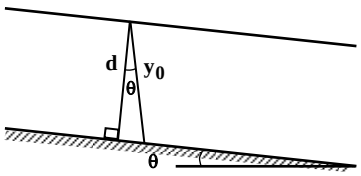
در بررسی هیدرولیکی پارامترهای هندسی جریان تعیین می‌گردند که مبنای اقتصادی طرح‌ها را تشکیل می‌دهند. به عبارتی، مهندس طراح هیدرولیک نیاز به ساخت مقطع و ابعاد لازم برای گذر دبی طرح را تعیین می‌نماید.

جدول۴. پارامترهای هندسی جریان

مشخصه	نماد	توضیحات
عمق جریان	y	فاصله سطح آزاد آب تا پایین‌ترین نقطه کانال (عمق بیشینه)
سطح مقطع جریان	A	صفحه‌ای که به صورت عرضی آبراهه را قطع می‌کند و بردار سرعت جریان بر آن عمود است
تراز سطح آب	W.S.E	ارتفاع سطح آزاد آب نسبت به نقطه مبنای تراز صفر (Datum)
عرض سطح آزاد آب	T	عرض سطح در تماس با هوای آزاد آب در کانال
پیرامون تر شده	P	پیرامون کل جریان در مقطع عرضی منهای عرض سطح آزاد آب (طول در تماس با مرز صلب)
شعاع هیدرولیکی	R	نسبت سطح مقطع جریان به پیرامون تر شده $R=\frac{A}{P}$
عمق هیدرولیکی	D	نسبت سطح مقطع جریان به عرض سطح آزاد آب $D=\frac{A}{T}$
فاکتور سطح	Z	در محاسبه عمق بحرانی کاربرد دارد و به صورت $Z=A\sqrt{D}$ تعریف می‌شود



شکل ۳. مقطع عرضی کانال



شکل ۲. مقطع طولی کانال

$$d = y_\circ \cos\theta$$

اگر $\theta < 6^\circ$ باشد، آنگاه می‌توان y و d را به جای هم با دقت مناسبی به کار برد.

مثال۴: کدام یک از پارامترهای هیدرولیکی زیر بر اقتصاد طرح تأثیرگذار است؟

۱) سرعت جریان ۲) عمق جریان ۳) دبی ۴) تراز سطح آب

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» تعیین دبی طرح مهم‌ترین مسئله در کنترل شرایط اقتصادی است. دیگر پارامترهای هیدرولیکی وابسته به مقدار دبی است.

انواع سازه‌های ساختگی کنترل‌کننده جریان

معمولاً در مسیر انتقال روزمینی آب، به صورت روباز سازه‌هایی ساخته می‌شود. تیپ‌بندی این سازه‌ها از نظر شکل و کارکرد هیدرولیکی قابل دسته‌بندی می‌باشد. این سازه‌ها تحت عنوان سازه‌های کنترل‌کننده جریان مطرح هستند، به ترتیبی که با استفاده از آن‌ها ضمن نیل به هدف‌های دیگر در زمینه انتقال آب می‌توان میزان دبی عبوری را نیز کنترل نمود یا به عبارتی مقدار دبی را اندازه‌گیری کرد. این کار با نصب یک اشل در جهت خواندن عمق جریان و تطبیق آن با منحنی مربوطه با عنوان دبی ـ اشل انجام می‌شود. در ادامه تعدادی از سازه‌های پراهمیت معرفی می‌شوند.

کانال (canal): آبراهه‌ای با شیب ملایم و طول زیاد که جریان می‌تواند به عمق ثابت در آن برسد.

فلوم (flume): کانال‌های پایه‌دار که از روی یک دره یا خیابان عبور می‌نماید و مدل‌های آزمایشگاهی.

تندابه (chute): تند آبراهه یا شوت، کانالی کوتاه با شیب زیاد است.

شیب‌شکن (drop): سازه‌هایی برای ملایم کردن شیب طولی هستند و پروفیل طولی را پلکانی می‌نمایند.

کالورت (culvert): آبرو سازه‌هایی هستند که می‌توانند تحت فشار هم عمل نمایند و آب را از زیر جاده یا خط راه‌آهن عبور دهند.

تبدیل (transition): سازه‌هایی برای تغییر مقطع جریان هستند که به صورت ملایم ابعاد هندسی را تغییر می‌دهند.

تونل (tunnel): سازه‌هایی هستند که با جریان آزاد یا تحت فشار آب را از داخل کوه عبور می‌دهند.

پل (bridge): سازه‌هایی برای عبور جریان از زیر جاده و خط راه‌آهن هستند که به صورت جریان آزاد عمل می‌کنند.

انواع مقطع در کانال‌های ساختگی

با توجه به مقطع عرضی کانال‌های ساختگی تیپ‌های مختلفی وجود دارند. هر یک از این مقاطع عرضی در جای خاصی کاربرد داشته و استفاده از آن‌ها دارای مزایایی می‌باشد. مبنای جانمایی آن‌ها در سازه‌های آبی ضمن برآورده ساختن نیازهای هیدرولیکی، بهینه کردن هزینه‌های اقتصادی طرح است.

جدول ۵. انواع مقطع در کانال‌های ساختگی

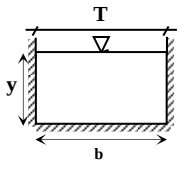
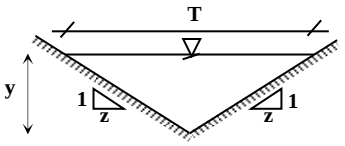
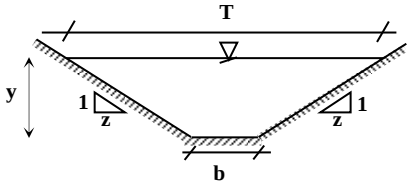
مقطع مستطیلی	جهت شبکه‌های آبیاری کوچک و در مناطقی که ارزش زمین بالا باشد مانند مناطق شهری کاربرد دارد
مقطع مثلثی	جهت شبکه‌های آبیاری و زهکشی بسیار کوچک مانند جوی‌های کنار خیابان کاربرد دارد
مقطع ذوزنقه‌ای	جهت شبکه‌های آبیاری مزارع بهترین مقطع از نظر ظرفیت عبور جریان بوده و به صورت گسترده کاربرد دارد
مقطع سهمی	در کانال‌های کوچک با مقاطع پیش ساخته کاربرد دارد
مقطع نعل اسبی و تخم‌مرغی	آبروهای فاضلاب مدفون که باربری مناسبی نیز از نظر سازه‌ای دارد
مقطع دایره‌ای	در آبراهه‌های کوچک و سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب کاربرد دارد

مثال۵: از کدام یک از مقاطع زیر در طرح‌های آب‌رسانی به مزارع استفاده می‌شود؟

۱) ذوزنقه‌ای
۲) ذوزنقه‌ای و مستطیلی
۳) مستطیلی و پیش ساخته دایروی
۴) دوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» بسته به دبی و درجه‌بندی کانال‌های آب‌رسانی به مزارع و دیگر محدودیت‌های موجود، ممکن است از هر سه تیپ ذوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی استفاده شود.

جدول ۶. پارامترهای هیدرولیکی هندسی در مقاطع عرضی

برش عرضی	A	P	$R=\frac{A}{P}$	T	$D=\frac{A}{T}$	$Z=A\sqrt{D}$
	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b	y	$by^{\frac{3}{2}}$
	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$	$\frac{y}{2}$	$\frac{zy^{\frac{5}{2}}}{\sqrt{2}}$
	$by+zy^2$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{A}{P}$	$b+2zy$	$\frac{A}{T}$	$A\sqrt{D}=\frac{A\sqrt{A}}{\sqrt{T}}$

مثال۶: آبی به صورت یکنواخت در یک کانال ذوزنقه‌ای با مشخصات $b = ۳/۰۵$ و $z = ۱/۵$ در جریان است. اگر عمق جریان برابر $۱/۲۲m$ باشد، عمق هیدرولیکی کدام است؟

۱) ۱/۲۲ ۲) ۱/۵ ۳) ۰/۸۹ ۴) قابل تعیین نیست

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» با استفاده از رابطه‌های هندسی در برش ذوزنقه‌ای خواهیم داشت: $A = by + zy^۲$

$$T = b + ۲zy \Rightarrow D = \frac{A}{T} = \frac{by + zy^۲}{b + ۲zy} = \frac{۳/۰۵ \times ۱/۲۲ + ۱/۵ \times ۱/۲۲^۲}{۳/۰۵ + ۲ \times ۱/۵ \times ۱/۲۲} = ۰/۸۸۷ \ (m)$$

انواع جریان

جریان‌های دائم و غیر دائم:

معیار طبقه‌بندی جریان‌های دائمی و غیردائمی تغییرات پارامترهای هیدرولیکی در یک مکان (مقطع عرضی) ثابت، بر حسب زمان است. اگر در یک برش عرضی ثابت از کانال با گذر زمان پارامترهای هیدرولیکی به ویژه دبی و عمق تغییر ننماید، جریان دایمی بوده و اگر تغییر نماید جریان غیر دایمی است.

جریان‌های یکنواخت و غیریکنواخت:

معیار طبقه‌بندی جریان‌های یکنواخت و غیر یکنواخت تغییرات پارامترهای هیدرولیکی (مانند عمق، سرعت، دبی جریان و . . .) در یک زمان ثابت برای هر مقطع عرضی در یک کانال است. در جدول ۷ طبقه‌بندی انواع جریان نسبت به متغیرهای مکانی و زمانی انجام شده است.

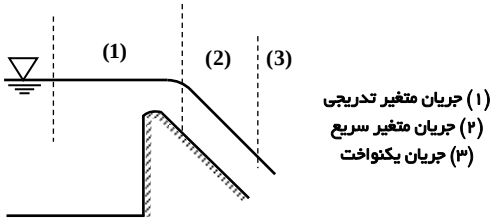
جدول ۷. طبقه‌بندی انواع جریان با تغییرات نسبت به مکان و زمان

$\frac{\partial}{\partial t} = ۰$	دائم (با گذشت زمان تغییری در پارامترهای هیدرولیکی جریان به وجود نمی‌آید)
$\frac{\partial}{\partial t} \neq ۰$	غیر دائم (با گذشت زمان پارامترهای هیدرولیکی جریان تغییر می‌کند)
$\frac{\partial}{\partial x} = ۰$	یکنواخت (پارامترهای هیدرولیکی جریان در طول کانال یکسان است)
$\frac{\partial}{\partial x} \neq ۰$	غیریکنواخت (پارامترهای هیدرولیکی جریان در طول کانال یکسان نمی‌باشد)

منظور از گرادیان، تغییر هر پارامتر قابل تغییر هیدرولیکی در جریان مورد مطالعه می‌باشد. جریان غیریکنواخت در هیدرولیک، جریان متغیر نامیده شده و به دو دسته تقسیم شده است.

الف) جریان متغیر تدریجی: به تغییرات عمق جریان در فاصله طولانی از مسیر جریان متغیر تدریجی گفته می‌شود.

ب) جریان متغیر سریع: تغییرات عمق جریان در فاصله کوتاهی از مسیر صورت گرفته و انحنای سطح آب قابل توجه است.



شکل ۴. شکل‌گیری نیم‌رخ‌های متغیر در پشت سرریز یک سد

هر یک از انواع جریان‌های متغیر سریع و متغیر تدریجی در فصول آینده مورد بررسی قرار می‌گیرند.

نکته۴: جریان یکنواخت فقط زمانی رخ می‌دهد که کانال، شیب و سطح مقطع ثابت داشته (کانال منشوری) و به اندازه کافی طولانی باشد.

مثال۷: در طول یک رودخانه در مقطع خاصی از سال آبی، رژیم جریان چگونه است؟

۱) یکنواخت و دایم ۲) یکنواخت و غیر دایم ۳) غیر یکنواخت و دایم ۴) غیر یکنواخت و غیر دایم

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» در رودخانه‌ها مقطع عرضی شکل ثابتی ندارد (غیر منشوری است). در نتیجه پارامترهای هیدرولیکی در طول رودخانه تغییر کرده و جریان غیر یکنواخت خواهد بود. با توجه به این که در یک مقطع زمانی خاص از سال دبی می‌تواند ثابت فرض شود، جریان دائم می‌باشد.

نیروهای وارد بر سیال

نیروهای وارد بر سیال انواع متفاوتی دارد. برای سنجش درصد تعیین‌کنندگی هر نیرو در محاسبات هیدرولیکی، نسبت آن نیرو به نیروی شتاب‌دهنده سیال سنجیده می‌شود. به این منظور پارامترهای بدون بعدی وجود دارند که معیار مناسبی در اختیار طراح قرار می‌دهد. نیروی شتاب‌دهنده سیال در بیشتر از ۹۹ درصد موارد مطالعاتی در هیدرولیک، همان نیروی اینرسی یا لختی است که منشأ آن گرانش زمین می‌باشد. مقایسه بین نیروی شتاب‌دهنده به سیال و دیگر نیروهای با اهمیت مقاوم در برابر حرکت سیال مبنای طراحی هیدرولیکی سازه‌های آبی می‌باشد. ممکن است در هر سازه آبی نیروی با اهمیت مقاوم متفاوت باشد. در کنار نیروی لختی گاهی نیروی لزجت یا ... پراهمیت می‌باشد. دو مورد از این عددهای بدون بعد که در کانال‌های روباز مورد توجه قرار دارد معرفی می‌گردد.

عدد رینولدز (Re):

عدد رینولدز پارامتر مناسبی برای تحلیل هیدرولیکی جریان‌های تحت فشار است و به صورت نسبت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\text{نیروی شتاب‌دهنده}}{\text{نیروی لزجت}} = \frac{\rho u R}{\mu}$$

که در آن، μ: ویسکوزیته دینامیک آب $(۱\times۱۰^{-۳}\ \frac{N.sec}{m^۲})$، ρ: جرم مخصوص آب $(۱۰۰۰\ \frac{kg}{m^۳})$، u : سرعت متوسط مقطع $(\frac{m}{sec})$، R: شعاع هیدرولیکی مقطع (m) که با رابطه $R = \frac{A}{P}$ بیان می‌شود.

با توجه به مقدار عدد رینولدز می‌توان رژیم جریان را مشخص نمود. تحت تأثیر نیروی لزجت، سه حالت جریان در کانال‌های باز مشاهده می‌شود:

الف) جریان آرام (لایه‌ای): در این حالت نیروی لزجت قوت بیشتری نسبت به نیروهای شتاب‌دهنده سیال داشته و ذرات آب در راستای اصلی حرکت به آرامی بر روی یک دیگر می‌لغزند.

ب) جریان آشفته (متلاطم): در این حالت نیروهای شتاب‌دهنده قوت بیشتری نسبت به نیروی لزجت دارد. ذرات آب از مسیر اصلی خود خارج شده و دارای حرکات پراکنده و نامنظم می‌باشند.

پ) جریان انتقالی: در این شرایط جریان در حال تبدیل (گذار) از رژیم لایه‌ای به رژیم آشفته قرار دارد.

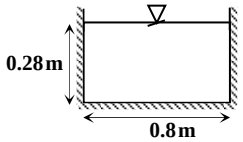
جدول ۸. معیار عدد رینولدز در تعیین رژیم جریان

جریان لایه‌ای	$Re < ۵۰۰$
حالت انتقالی	$۵۰۰ < Re < ۲۰۰۰$
جریان آشفته	$۲۰۰۰ < Re$

جریان لایه‌ای که به آن حالت آرام یا لامینار (Laminar) هم گفته می‌شود در لوله‌های مویرگی و سرعت‌های بسیار پایین اتفاق می‌افتد. همین‌طور در تحلیل هیدرودینامیکی جریان لایه مرزی (Boundary Layer)، عدد رینولدز تعیین‌کننده است. لایه مرزی ناحیه با ضخامت کم و بسیار نزدیک به مرز صلب میدان جریان بسیار نزدیک است.

عدد رینولدز ملاک مناسبی برای تحلیل هیدرولیکی جریان‌های کانال‌های روباز نمی‌باشد و در تحلیل رژیم جریان در آبراهه‌ها معمولاً مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. جریان در آبراهه‌ها آشفته است. بنابراین کاربرد عدد رینولدز بیشتر در بررسی و تحلیل جریان در لوله‌ها می‌باشد.

مثال۸: حداکثر سرعت جریان در یک آبراهه با ابعاد داده شده که جریان در آن لایه‌ای می‌باشد کدام است؟



۱) $۳\times۱۰^{-۳}\ \frac{mm}{sec}$ ۲) $۳/۰۴\ \frac{mm}{sec}$

۳) $۶/۰۶\times۱۰^{-۳}\ \frac{m}{sec}$ ۴) $۶/۰۶\times۱۰^{-۳}\ \frac{mm}{sec}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» هرچه سرعت افزایش یابد، عدد رینولدز بالاتر می‌رود. بنابراین حداکثر عدد رینولدز در جریان لایه‌ای برابر ۵۰۰ خواهد بود.

$$\text{Re} = ۵۰۰ = \frac{\rho u R}{\mu} \qquad R = \frac{A}{P} = \frac{۰/۲۸ \times ۰/۸۰}{۲ \times ۰/۲۸ + ۰/۸} = ۰/۱۶۵ \ (\text{m})$$

$$۵۰۰ = \frac{۱۰۰۰ u \times ۰/۱۶۵}{۱۰^{-۳}} \quad \Rightarrow \quad u = ۳/۰۴ \times ۱۰^{-۳} \ (\frac{\text{m}}{\text{sec}}) = ۳/۰۴ \ (\frac{\text{mm}}{\text{sec}})$$

ملاحظه می‌گردد که برای لایه‌ای بودن جریان، سرعت باید بسیار کم باشد.

◆ ◆ ◆ ◆

عدد فرود (Fr):

عدد فرود معیار مناسب و پرکاربردی برای تحلیل هیدرولیکی جریان‌های آزاد (فقط در اثر شتاب گرانش زمین) می‌باشد. در مدل‌سازی موج‌های مکانیکی در سازه‌های دریایی، سرریزها، تندابه‌ها، کانال‌های روباز، حوضچه‌های آرامش و... از عدد فرود استفاده می‌گردد. موج‌های مکانیکی منشأ طبیعی مانند باد یا زلزله دارند. عدد فرود به صورت نسبت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Fr} = \frac{u}{\sqrt{gD}} = \frac{u}{\sqrt{g\frac{A}{T}}} = \frac{\text{نیروی شتاب‌دهنده}}{\text{نیروی گرانشی}}$$

در این رابطه، u: سرعت متوسط مقطع $(\frac{\text{m}}{\text{sec}})$، g: شتاب گرانشی زمین $(\frac{\text{m}}{\text{sec}^۲})$ و A، D و T قبلاً در جدول ۴ تعریف شده‌اند.

در اثر تأثیر نیروی گرانش به عنوان نیروی اصلی شتاب‌دهنده به جریان سیال سه حالت جریان در کانال‌های باز مشاهده می‌شود:

الف) جریان زیر بحرانی: به ازای یک دبی ثابت، عمق جریان زیاد و سرعت کم خواهد بود.

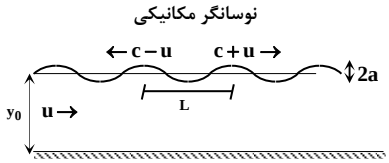
ب) جریان بحرانی: حالتی است که Fr برابر عدد یک است. این حالت ناپایدار بوده و در طول کوتاهی تشکیل می‌شود.

پ) جریان فوق بحرانی: به ازای یک دبی ثابت، عمق جریان کم و سرعت زیاد وجود خواهد داشت.

جدول ۹. عدد فرود و دسته‌بندی رژیم جریان

جریان زیر بحرانی	$\text{Fr} < ۱$
جریان بحرانی	$\text{Fr} = ۱$
جریان فوق بحرانی	$۱ < \text{Fr}$

اگر موجی در سطح آزاد کانال ایجاد گردد در جریان زیر بحرانی، این موج امکان حرکت به سمت بالادست را خواهد داشت، در حالی که در جریان بحرانی و فوق بحرانی موج به بالادست انتشار نمی‌یابد.



اگر عمق کانال $y_۰$ نسبت به طول موج L بزرگ باشد $(\frac{y_۰}{L} > \frac{۱}{۲})$، آنگاه رفتار موج در کانال مانند رفتار حرکت موج در آب عمیق بوده و سرعت انتشار موج از رابطه $c = \sqrt{gy_۰}$ به دست می‌آید.

در صورت داشتن طول موج L و پریود آن T (یا فرکانس f) می‌توان از رابطه $c = \frac{L}{T} = Lf$ نیز سرعت انتشار موج را یافت.

سرعت انتشار موج به پایین‌دست کانال برابر $c + u$ و سرعت انتشار موج به بالادست کانال برابر $c - u$ خواهد بود. از رابطه عدد فرود می‌توان پی برد که این عدد نسبتی از سرعت متوسط جریان در مقطع به سرعت موج منتشر شونده در آن است.

در کانال‌های روباز عدد فرود معیار بسیار مناسب و پرکاربردی برای تحلیل هیدرولیکی جریان است.

مثال۹: اگر دبی جریان $۲ \frac{\text{m}^۳}{\text{sec}}$ باشد، رژیم جریان را مشخص نمایید.

۱) آشفته و فوق بحرانی ۲) آشفته و زیر بحرانی ۳) آرام و فوق بحرانی ۴) آرام و زیر بحرانی