

فصل هفتم

جریان در کانال‌های باز

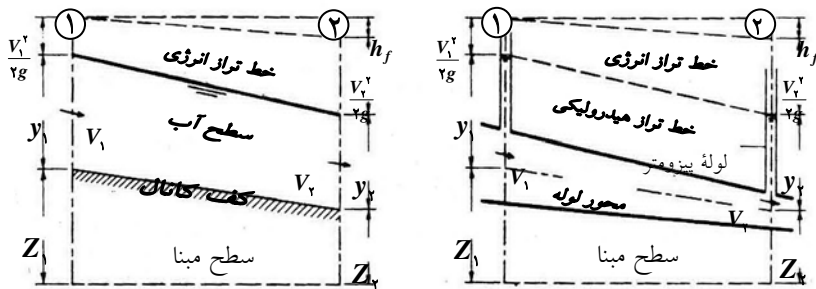
۷-۱ مقدمه

به‌طور کلی جریان مایع در یک مجرا به دو صورت جریان در لوله‌ها (تحت فشار) و جریان در کانال‌های باز (جریان با سطح آزاد) وجود دارد. در جریان تحت فشار که می‌توان آن را جریان در مجرای بسته نیز نامید، تمام مایع درون یک مرز جامد محصور شده است و مایع در تماس با جدار جامد می‌باشد ولی در کانال‌های باز، مایع در تمام مسیر در معرض فشار اتمسفر قرار دارد. در واقع در کانال‌های باز جریان در سطح بالایی خود آزاد بوده و در این مرز جریان همواره با فشار اتمسفر روبه‌رو می‌باشد.

۷-۲ مقایسه جریان در کانال‌های باز و مجاری تحت فشار

جریان تحت فشار عمدتاً شامل جریان آب در لوله‌های آبرسانی، شبکه‌های توزیع آب شهری و لوله‌کشی ساختمان‌ها می‌باشد ولی جریان در کانال‌های باز، حرکت آب در آبراهه‌های طبیعی (نظیر رودخانه و نهرها)، آبراهه‌های مصنوعی (نظیر کانال‌های آبرسانی و کانال‌های آبیاری و زهکشی را شامل می‌گردد. بنابراین فرق اساسی بین جریان در لوله‌ها و جریان در کانال‌های باز در این است که جریان در لوله‌ها، جریان تحت فشار است و فشار در قسمت‌های مختلف، معمولاً متفاوت است و با استفاده از اختلاف طبیعی و یا پمپ می‌توان آن را به میزان دلخواه کنترل کرد، در صورتی که فشار وارد بر سطح مایع در مجاری باز، در تمام قسمت‌های مسیر، ثابت و در مواردی مایع

در تماس با هوا قرار دارد، این فشار برابر فشار اتمسفر است.



شکل ۷-۱ مقایسه جریان در لوله ها و مجاری لوله باز

انرژی مکانیکی در هر مقطع از جریان عبارت از ارتفاع معادل سرعت $(\frac{V^2}{2g})$ ، ارتفاع معادل فشار $(\frac{P}{\gamma})$ و ارتفاع از مبنا Z خواهد بود. انرژی کل در هر مقطع از جریان که در واحد وزن بیان می شود، دارای بعد طول می باشد و از مجموع سه عبارت فوق به صورت زیر به دست می آید:

$$H = \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + Z \quad (۷-۱)$$

خط پیوسته ای که مقدار انرژی را در مقاطع مختلف جریان نشان می دهد. خط تراز انرژی نامیده می شود و به دلیل کاهش انرژی مکانیکی، (در مسیر حرکت آب قدری از انرژی به صورت گرما از محیط خارج می گردد که افت انرژی در مسیر حرکت نامیده می شود). این خط در مسیر حرکت دارای شیب منفی می باشد. مقدار فشار در هر مقطع از لوله به وسیله ارتفاع آب موجود در لوله پیزومتر مشخص می گردد. مکان هندسی نقاط مزبور خط پیزومتريک یا خط تراز هیدرولیک را نشان می دهد و فقط جمع دو عبارت $\frac{P}{\gamma}$ و Z را شامل می شود و به مقدار ارتفاع معادل سرعت $(\frac{V^2}{2g})$ از خط انرژی فاصله دارد ولی در مورد مجاری باز با شیب کم، سطح آزاد آب خود خط پیزومتريک است.

در هیدرولیک مجاری روباز، به علت شکل پذیری سطح آزاد مایع، مقطع عرضی

در هر نقطه از طول آبراهه، برخلاف لوله‌های تحت فشار، می‌تواند تغییر کند. بنابراین شکل سطح آزاد مایع در طول آبراهه مشخص نبوده و تعیین آن یکی از موضوعات اساسی در مجاری باز می‌باشد. همچنین تغییر شکل‌پذیری سطح آزاد مایع، سبب ایجاد پدیده‌هایی نظیر پرش هیدرولیکی و... می‌گردد که در لوله‌های تحت فشار وجود ندارد.

۷-۳ انواع کانال‌های باز

کانال‌ها را می‌توان براساس نقطه نظرهای گوناگون تقسیم بندی کرد که عبارتند از:

تقسیم‌بندی کانال‌ها از نظر طبیعی یا مصنوعی بودن

الف) کانال طبیعی کانالی است که به‌طور طبیعی در سطح زمین ایجاد گردیده و نقش بشر در ساخت و شکل‌گیری آن ناچیز می‌باشد و مشخصات این کانال‌ها با زمان و مکان تغییر می‌کند. مثال مشخصی از این کانال‌ها رودخانه‌هایی هستند که در خط القعر یک حوضه آبریز وظیفه انتقال آب را به سمت نقطه تمرکز دارا می‌باشند.

ب) کانال‌های مصنوعی کانال‌هایی هستند که برای هدف خاصی نظیر انتقال آب از سدهای ذخیره‌ای به مزارع، کارخانجات، ... یا جهت دفع سیلاب‌ها، ... توسط بشر ساخته می‌شود که دارای مقاطع عرضی ثابت و منظم است.

تقسیم‌بندی کانال‌ها بر اساس تغییرات در سطح مقطع

الف) کانال‌های منشوری: کانال‌هایی هستند که در مسیرشان سطح مقطع و شیب ثابت باشد.

ب) کانال‌های غیرمنشوری: کانال‌هایی هستند که در مسیر آنها سطح مقطع و یا شیب کانال تغییر می‌کند.

تقسیم‌بندی کانال‌ها براساس پایداری مصالح جداره در مقابل فرسایش

کانال‌های با جداره ثابت: کانال‌هایی هستند که مصالح جداره آنها ثابت و غیرقابل فرسایش می‌باشد و از مصالح سخت نظیر بتن، چوب، فلز و یا مصالح بنایی ساخت می‌شوند.

ب) کانال‌های با جداره متحرک: جداره این نوع کانال‌ها از ذرات رسوبی تشکیل یافته و ذرات این قابلیت را دارند تا تحت تاثیر جریان آب به حرکت درآیند.

تقسیم‌بندی کانال براساس کاربرد آنها

کانال‌های مصنوعی برحسب نوع کاربری به نامهای مختلفی تقسیم می‌شوند. کانال بازی که با طول زیاد و شیب متوسط که معمولاً بر روی زمین حفر می‌شود را کانال می‌گویند.

کانال بازی که دارای طول کمی هستند و از چوب، فلز، بتن و یا مصالح دیگر ساخته می‌شود و بر روی پایه‌های بالاتر از سطح زمین بنا می‌شود به نهر پایدار معروفند.

کانال‌هایی با شیب بسیار تند که معمولاً دارای طول کم و دیواره‌های قائم هستند تا آب را از ارتفاع زیاد به ارتفاع پایین‌تر برسانند به تند آبراه موسومند.

کانالی که برای اختلاف ارتفاع کم (0/9 متر تا 4/5 متر) به کار می‌رود و طول کمتری نسبت به تند آبراه داشته باشد، شیب شکن نامیده می‌شود.

کانال بسته کوتاهی که از زیر جاده یا راه آهن برای انتقال آب از یک طرف به طرف دیگر به کار می‌رود، آبرو نامیده می‌شود.

کانال بسته‌ای که برای عبور دادن آب از قسمت‌های تپه ماهوری و کوهستانی با سوراخ کردن کوه و عبور از موانع ساخته می‌شود تونل نام دارد.

هر تغییر مقطع یا تغییر جهت جریانی که در قسمت کوتاهی از مسیر کانال انجام می‌شود تبدیل نامیده می‌شود.

۴-۷ انواع مقاطع کانال‌های باز

۳-۱-۱ دوزنقه‌ای

این مقطع معمول‌ترین شکل برای کانال‌های آبیاری بوده، در مصالح خاکی حفر گردیده و دارای پوششی از مصالح سخت نمی‌باشد، شیب کناره‌ها پایداری عمومی آن را در مقابل لرزش‌ها تأمین می‌کند.

۳-۱-۲ مقاطع مستطیلی و مثلثی

حالت خاصی از مقطع دوزنقه‌ای هستند. مقطع مستطیلی در مصالح سنگی حفر گردیده و دارای پوششی از جنس مصالح سخت بوده در حالی که کانال‌های مثلثی در دبی‌های کم در آبروی حاشیه خیابان‌ها و جاده‌ها و در کارهای آزمایشگاهی مورد استفاده قرار

می‌گیرند.

۳-۱-۳ مقطع دایره‌ای

در سیستم‌های جمع‌آوری و انتقال فاضلاب و به‌صورت پیش ساخته (لوله) تولید شده و در آبروی‌های زیر جاده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۱-۴ مقطع سهمی

به‌عنوان یک تقریب برای کانال‌های طبیعی در اندازه کوچک و متوسط به‌کار می‌روند.

۳-۱-۵ مقاطع نعل اسبی و تخم‌مرغی

در تأسیسات جمع‌آوری و انتقال فاضلاب کاربرد دارند. این مقاطع علاوه بر خواص سازه‌ای نکات هیدرولیکی طرح را نیز ارضا می‌نمایند.

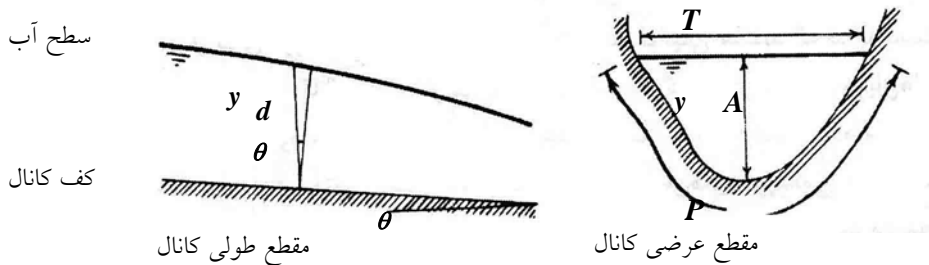
۳-۱-۶ مقاطع مرکب

در حالت سیلابی که آب از کانال اصلی لبریز شده و در بسترهای سیلابی اطراف جاری می‌گردد و شکل مقطع کانال با مقاطع استاندارد معرفی شده قابل تطبیق نبوده، بنابراین این گونه مقاطع، مقاطع مرکب نامیده می‌شوند.

۵-۷ مشخصات هندسی مقاطع کانال‌های باز

از آنجا که در این فصل با بعضی اصطلاحات سروکار داریم، لذا ابتدا به شرح این اصطلاحات و تعاریف می‌پردازیم که در جدول (۷-۳) ارائه گردیده است.

عمق جریان (y): عبارتست از فاصله قائم پایین‌ترین نقطه کف کانال تا سطح آزاد آب (شکل ۷-۱). این فاصله در جهت عمود بر کف و یا در صفحه‌ای عمود بر جهت عمومی جریان با d نمایش داده می‌شود که در مورد کانال‌های با شیب کم ($\theta \leq 6^\circ$). این دو مشخصه یکسان در نظر گرفته می‌شوند ولی در کانال‌های با شیب تندتر باید بین y و d تفاوت قائل شد. رابطه بین این دو عمق به‌صورت $d = y \cos \theta$ بین d و y وجود دارد، خواهد بود که θ زاویه امتداد طولی کف کانال با افق می‌باشد.



شکل ۲-۷ مقاطع طولی و عرضی در کانال روباز

مساحت مقطع (A): عبارت از سطح مقطع مجرا در زیر سطح آزاد آب است.

شکل (۲-۷)

عرض سطح آزاد (T): به طولی از مقطع جریان گفته می‌شود که با هوای آزاد در تماس باشد.

پیرامون مرطوب (محیط خیس شده) (P): در صورتی که از محیط کلی مقطع جریان عرض سطح آزاد آب را کم نماییم پیرامون مرطوب به دست می‌آید که طول مشترک تماس جریان با بستر کانال را نشان می‌دهد.

شعاع هیدرولیکی (R): نسبت سطح مقطع جریان به محیط خیس شده را شعاع هیدرولیکی می‌نامند، یعنی:

$$R = \frac{A}{P} \quad (۲-۷)$$

این تعریف در مجاری تحت فشار نیز به کار برده می‌شود. به عنوان مثال دریکی لوله مدور به قطر d شعاع هیدرولیکی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$R = \frac{\pi(d^2/4)}{\pi d} = \frac{d}{4} \rightarrow d = 4R$$

عمق هیدرولیکی (D): بنابر تعریف نسبت سطح مقطع جریان به عرض سطح آزاد آب (T) عمق هیدرولیکی نامیده می‌شود.

$$D = \frac{A}{T} \quad (۳-۷)$$

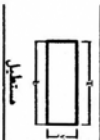
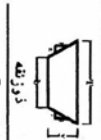
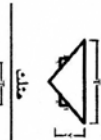
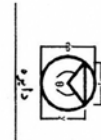
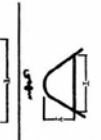
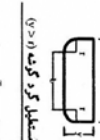
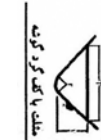
تراز: در یک مقطع از کانال فاصله قائم سطح آزاد آب نسبت به یک سطح مبنای

دلخواه تراز گفته می‌شود این واژه در محاسبات دبی رودخانه‌ها کاربرد دارد.

فاکتور سطح در محاسبه عمق بحرانی (Z): این فاکتور به صورت زیر تعریف

شده و در محاسبات عمق بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$Z = A\sqrt{D} = A\sqrt{\frac{A}{T}} = \frac{A^{3/2}}{\sqrt{T}} \quad (۴-۷)$$

مقطع	مساحت A	پیرامون مرطوب P	شیب هیدرولیکی R	عرض سطح T	صف هیدرولیکی D	فاکتور سطح Z
	by	b + 2y	$\frac{by}{b + 2y}$	b	y	$by^{1.5}$
	(b + zy) y	$b + 2y\sqrt{1 + Z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + Z^2}}$	b + 2zy	$\frac{(b + zy)y}{b + 2zy}$	$\frac{[(b + 2y)y]^{1.5}}{\sqrt{b + 2zy}}$
	zy ²	$2y\sqrt{1 + Z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1 + Z^2}}$	2zy	$\frac{1}{Z} y$	$\frac{\sqrt{2}}{2} zy^{2.5}$
	$\frac{1}{8} (\theta - \sin \theta) d^3$	$\frac{1}{2} \theta d$	$\frac{1}{4} \left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta} \right) d$	$\frac{(\sin \frac{\theta}{2}) d}{2 \sqrt{y(d - y)}}$	$\frac{1}{8} \left(\frac{\theta - \sin \theta}{\sin \frac{\theta}{2}} \right) d$	$\frac{\sqrt{2} (\theta - \sin \theta)^{1.5}}{32 (\sin \frac{\theta}{2}) d^{0.5}}$
	$\frac{2}{3} Ty$	$T + \frac{8}{3} \frac{y^2}{T}$	$\frac{2Ty^2}{3T^2 + 8y^2}$	$\frac{3}{2} \frac{A}{y}$	$\frac{2}{3} y$	$\frac{2}{9} \sqrt{6} Ty^{1.5}$
	$\left(\frac{\pi}{2} - 2 \right) r^2 + (b + 2r)y$	$(\pi - 2)r + b + 2y$	$\frac{(\pi/2 - 2)r^2 + (b + 2r)y}{(\pi - 2)r + b + 2y}$	b + 2r	$\frac{(\pi/2 - 2)r^2}{b + 2r} + y$	$\frac{[(\pi/2 - 2)r^2 + (b + 2r)y]^{1.5}}{\sqrt{b + 2r}}$
	$\frac{T^3}{48} \frac{r^2}{z} (1 - z \cos^3 z)$	$\frac{T}{2} \sqrt{1 + z^2} \frac{2r}{z} (1 - z \cos^3 z)$	$\frac{A}{P}$	$2\sqrt{z(y - r) + r\sqrt{1 + z^2}}$	$\frac{A}{T}$	$A\sqrt{\frac{A}{T}}$

شکل ۳-۷ مشخصات هندسی مقاطع در کانال‌های باز

۷-۶ طبقه‌بندی و تشخیص انواع جریان در کانال‌های باز

طبقه‌بندی جریان براساس دو معیار زمان و مکان صورت می‌گیرد. هرگاه در یک مقطع ثابت از جریان آب، مشخصات جریان نسبت به زمان تغییر نکند جریان را دائمی و در غیر این صورت جریان را غیردائمی می‌گویند و اما اگر مشخصات جریان نسبت به مکان تغییر نکند جریان را یکنواخت در غیراینصورت جریان را غیریکنواخت گویند. توجه شود که جریان غیریکنواخت، جریان متغیر هم نامیده می‌شود و به‌صورت‌های زیر قابل طبقه‌بندی است:

الف) جریان متغیر تدریجی (G.V.F)

تغییرات عمق در این جریان در فاصله طولانی از مسیر صورت می‌گیرد و انحنای سطح آب طبیعتاً قابل ملاحظه نیست.

ب) جریان متغیر سریع (R.V.F)

در این جریان، تغییرات شدید عمق جریان در فاصله کوتاهی از مسیر صورت گرفته و سطح آب انحنای قابل توجهی دارد. معمولاً جریان در رسیدن به یک مانع (نظیر تغییر در شیب، برخورد به یک دریچه و یا سرریز) به‌طور دفعه‌تاً چنین تغییرات سریعی از خود نشان می‌دهد.

ج) جریان متغیر مکانی (S.V.F)

در طبقه‌بندی جریان به‌صورت G.V.F و R.V.F فرض بر آن بود که هیچ گونه دبی در امتداد طولی کانال، به کانال افزوده و یا از آن خارج نمی‌شود. اگر این فرض برقرار نباشد جریان حاصله را متغیر مکانی گویند. طبقه‌بندی جریان براساس دیدگاه Chawo بدین صورت می‌باشد (متغیر مورد بررسی y است).

$$\left. \begin{array}{l} \text{متغیر تدریجی (G.V.F)} \\ \text{متغیر سریع (R.V.F)} \\ \text{متغیر مکانی (R.V.F)} \end{array} \right\} \frac{\partial y}{\partial x} \neq 0$$

$$\frac{dy}{dx} = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{الف) جریان دائمی} \\ \text{یکنواخت} \end{array} \right.$$

غیریکنواخت (متغیر)

$$\left. \begin{array}{l} \text{یکنواخت (به ندرت وجود دارد)} \quad \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \\ \text{ب) جریان غیردائمی} \quad \frac{\partial y}{\partial x} \neq 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{متغیر تدریجی (G.V.F)} \\ \text{متغیر سریع (R.V.F)} \\ \text{متغیر مکانی (R.V.F)} \end{array}$$

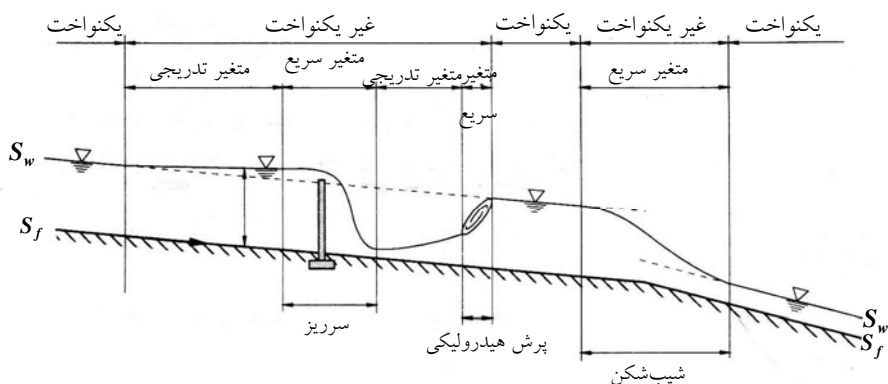
غیریکنواخت (متغیر)

برای درک بهتر انواع جریان‌ها در کانال‌های باز به ذکر چند مثال بسنده می‌کنیم
جریان یکنواخت دائم: حالتی که مایعی در یک لوله بلند مستقیم با شدت جریان ثابت در حرکت است.

جریان یکنواخت غیردائم: حالتی که مایعی در یک لوله بلند مستقیم با شدت جریان متغیر در حرکت باشد.

جریان غیریکنواخت دائم: حالتی که مایعی در لوله‌ای با سطح مقطع متغیر با شدت جریان ثابت در حرکت باشد.

جریان غیریکنواخت غیردائم: زمانی که مایعی در لوله‌ای با مقطع متغیر با شدت جریان متغیر در حرکت باشد.



شکل ۴-۷ جریان‌های دائمی، یکنواخت و غیریکنواخت در کانال‌های باز

۷-۷ وضعیت جریان در کانال‌های باز

حرکت سیالات معمولاً نتیجه تاثیر دو گروه نیروی مخالف است که این دو دسته نیرو،

نوع و شرایط حرکت سیال را کنترل می‌کنند. یک گروه از این نیروها، نیروهای شتاب‌دهنده سیال‌اند که سبب حرکت آن می‌شوند و گروه دیگر، که مخالف گروه اولند، از حرکت سیال و شتاب‌دار شدن آن جلوگیری می‌کنند. در جریان آب در کانال‌های باز، نیروهای مختلفی نظیر نیروهای لزجت، ثقل و شتاب‌دهنده بر روی عناصر سیال اثر می‌کنند.

۷-۱ تأثیر نیروی لزجت

تحت تأثیر نیروی لزجت نسبت به نیروی شتاب‌دهنده، سه حالت متفاوت جریان در کانال‌های باز مشاهده می‌شوند.

۱. **جریان آرام (لایه‌ای):** در این حالت نیروی لزجت قوت بیشتری نسبت به نیروی شتاب‌دهنده داشته و ذرات آب در راستای اصلی حرکت به آرامی بر روی یکدیگر می‌لغزند.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (۵-۷)$$

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

$$\tau = (\mu + \eta) \frac{du}{dy} \quad (۶-۷)$$

۳. **جریان انتقالی (بینابین):** حد واسط بین جریان آرام و آشفته است. معیار طبقه‌بندی و تشخیص این سه حالت پارامتر بدون بعدی به نام عدد دینولدز می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \propto \frac{\text{نیروی شتاب دهنده}}{\text{نیروی لزجت}} \quad (۷-۷)$$

که در رابطه فوق داریم ρ جرم مخصوص آب؛ μ لزجت دینامیک آب؛ V سرعت متوسط و L طول مشخصه جریان که در کانال‌های باز معمولاً همان شعاع هیدرولیکی (R) در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه عدد رینولدز برابر خواهد بود با:

$$Re = \frac{\rho VR}{\mu} = \frac{VR}{\nu} \quad (۸-۷)$$

که ν همان لزجت سنماتیکی آب می‌باشد.

براساس مشاهدات آزمایشگاهی و برای کانال‌های باز برای عدد رینولدز حدود زیر را می‌توان بیان کرد:

$$Re < 500 \quad \text{جریان آرام (لایه‌ای)}$$

$$500 \leq Re \leq 2300 \quad \text{جریان انتقالی (بینابین)}$$

$$2300 < Re \quad \text{جریان آشسته}$$

طبق تجربه ثابت شده که وضعیت جریان در کانال‌ها غالباً به صورت آشسته است.

۲-۷-۷ تأثیر نیروی ثقل

نیروی ثقل در تمام موارد عامل اصلی حرکت سیال است. تأثیر نیروی ثقل در قالب پارامتر دینامیکی بدون بعدی به نام عدد فرود مورد بررسی قرار می‌گیرد. این عدد در هر مقطع از جریان به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gl}} \propto \sqrt{\frac{\text{نیروی شتاب دهنده}}{\text{نیروی ثقل}}} \quad (۹-۷)$$

که در رابطه فوق V سرعت متوسط، g شتاب ثقل و L طول مشخصه جریان است.

در کانال‌های باز طول مشخصه از جریان برابر عمق هیدرولیکی (D) می‌باشد در نتیجه عدد فرود به شکل زیر محاسبه می‌گردد:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (۱۰-۷)$$

و در کانال‌های با مقطع مستطیلی با توجه این $D=y$ که می‌باشد عدد فرود برابر خواهد شد با:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (۱۱-۷)$$

براساس تأثیر نیروی ثقل نسبت به نیروی شتاب دهنده، سه وضعیت رفتاری متفاوت از جریان در کانال‌های باز مشاهده می‌گردد.

۱. اگر $Fr > 1$ باشد، جریان فوق بحرانی نامیده می‌شود که در آن به ازای یک دبی ثابت عمق جریان کم و سرعت زیاد می‌باشد. در این حالت بین جریان پایین دست و بالادست ارتباط هیدرولیکی مشاهده نمی‌شود و موج حاصله از اغتشاش موضعی در جریان قابلیت انتقال به بالادست را ندارد.
۲. اگر $Fr < 1$ باشد، جریان زیر بحرانی است که در آن به ازای یک دبی ثابت عمق جریان زیاد و سرعت کم می‌باشد. در این حالت موج حاصله در پایین دست به بالا منتقل می‌شود و رفتار بالادست از پایین دست جریان تأثیر می‌پذیرد.
۳. اگر $Fr = 1$ باشد جریان بحرانی است.

۳-۷-۷ رژیم جریان

تأثیر مشترک نیروی ثقل و نیروی لزجت، رژیم جریان را در کانال‌های باز مشخص می‌کند.

$Re < 500$, $Fr < 1$	رژیم زیر بحرانی - آرام
$Re > 2000$, $Fr < 1$	رژیم زیر بحرانی - آشفته
$Re < 500$, $Fr > 1$	رژیم فوق بحرانی - آرام
$Re > 2000$, $Fr > 1$	رژیم فوق بحرانی - آشفته

مثال ۱-۲ دبی آب $10 \text{ m}^3/\text{s}$ در یک کانال دوزنقه‌ای با مشخصات $b = 3 \text{ m}$ و $z = 1/5$ و عمق جریان $y = 1/3 \text{ m}$ به صورت یکنواخت در جریان است. رژیم جریان را مشخص نمایید؟
 $(v = 1.06 \text{ m}^2/\text{s})$

حل:

برای مقطع دوزنقه‌ای شکل با ابعاد هندسی داده شده داریم:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1+z^2}} = \frac{(3 + 1/5 \times 1/3)1/3}{3 + 2 \times 1/3 \sqrt{1+1/5^2}} = 0.837 \text{ m}$$

$$A = (b + zy)y = (3 + 1/5 \times 1/3)1/3 = 6/435 \text{ m}^2$$

$$D = \frac{A}{T} = \frac{(b + zy)y}{b + 2zy} = \frac{(3 + 1/5 \times 1/3)1/3}{3 + 2 \times 1/5 \times 1/3} = 0.932 \text{ m}$$

مشخصات هیدرولیکی مقطع جریان عبارتند از:

$$V = \frac{10}{6/435} = 1/554 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{VR}{\nu} = \frac{1/554 \times 0/837}{10^{-6}} = 1/3 \times 10^6 >> 2000$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} = \frac{1/554}{\sqrt{9/81 \times 0/0/932}} = 0/513 < 1$$

بنابراین رژیم جریان زیر بحرانی - آشفته می‌باشد.

۸-۷ کاربرد روابط اساسی حاکم بر حرکت سیالات در کانال‌های باز

۸-۷-۱ رابطه پیوستگی

این رابطه بیانگر قانون بقای جرم برای یک سیستم می‌باشد و برای حجم کنترل انتخابی بین دو مقطع ۱ و ۲ به صورت زیر نوشته می‌شود:

جرم خروجی در واحد زمان از حجم کنترل = جرم ورودی در واحد زمان به حجم کنترل

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \xrightarrow{\text{اگر } \rho = 0} V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q \quad (12-7)$$

۸-۷-۲ رابطه انرژی

رابطه انرژی در جریان دائمی آب در یک کانال باز برای حجم کنترل انتخابی به صورت زیر بیان می‌شود:

انرژی خروجی در واحد زمان از حجم کنترل = افت انرژی در واحد زمان - انرژی ورودی در واحد زمان به حجم کنترل

$$H_1 - h_f = H_2 \quad \text{یا}$$

این رابطه بر مبنای تحلیل یک بعدی و برای دو مقطع با لحاظ کردن ضریب تصحیح انرژی جنبشی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + Z_1 - h_f = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (13-7)$$

که در رابطه فوق α_1, α_2 ضریب تصحیح انرژی می‌باشد و به صورت زیر بیان

می گردند:

$$\alpha_1 = \frac{\int_{A_1} v_1^2 dA}{\bar{V}_1^2 A_1}, \quad \alpha_2 = \frac{\int_{A_2} v_2^2 dA}{\bar{V}_2^2 A_2}$$

۷-۳ رابطه اندازه حرکت

معادله اندازه حرکت به صورت زیر نوشته می شود:

$$\sum \bar{F} = \rho Q (\bar{V}_2 - \bar{V}_1) \quad (۷-۱۴)$$

معادله فوق، معادله تغییرات اندازه حرکت نامیده می شود که یک معادله ای برداری است. از آنجایی که ممکن است در مقاطع عرضی مختلف از یک کانال توزیع سرعت متفاوت باشد، ضریب تصحیح اندازه حرکت (β) یا ضریب مومنتم در معادله ۷-۱۴ اعمال می شود در نتیجه:

$$\sum \bar{F} = \rho Q (\beta_2 \bar{V}_2 - \beta_1 \bar{V}_1) \quad (۷-۱۵)$$

که در رابطه فوق ضریب تصحیح اندازه حرکت به صورت زیر بیان می شود:

$$\beta_1 = \frac{\int_{A_1} v_1^2 dA}{\bar{V}_1^2 A}, \quad \beta_2 = \frac{\int_{A_2} v_2^2 dA}{\bar{V}_2^2 A} \quad (۷-۱۶)$$

۷-۹ توزیع سرعت در کانال ها

توزیع سرعت در کانال های باز به دلیل شرط عدم لغزش، زبری بستر و سطح آزاد آب یکسان نیست.

به طور معمول حداکثر سرعت در یک کانال در عمق ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ عمق آب از سطح آزاد می باشد. همچنین به تجربه ثابت شده است که در صورتی که سرعت در اعماق ۰/۲۷ و ۰/۸۷ اندازه گیری شود، میانگین این دو سرعت، سرعت متوسط در آن مقطع قائم را به دست خواهد داد، یعنی:

$$V = \frac{V_{0.27} + V_{0.87}}{2} \quad (۷-۱۷)$$

به دلیل عدم یکنواختی توزیع سرعت در یک سطح مقطع از کانال مقدار واقعی

پتانسیل سرعت از $\frac{V^2}{2g}$ (سرعت متوسط جریان در یک مقطع می‌باشد) بیشتر است. و لذا در محاسبه پتانسیل سرعت این مقدار باید تصحیح شود. این تصحیح توسط ضریب تصحیح انرژی صورت می‌گیرد و در $\frac{V^2}{2g}$ ضرب می‌شود. α در کانال‌های مستقیم و با سطح مقطع ثابت از 1/03 تا 1/36 تغییر می‌کند و در جریان آرام بیش از جریان آشفته می‌باشد. ضریب α از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = \frac{\int_A v^3 dA}{\bar{V}^3 A} \cong \frac{\sum v^3 \Delta A}{V^3 A} \quad (18-7)$$

که در رابطه فوق v سرعت در هر جز سطح dA ، V سرعت متوسط در کل مقطع می‌باشد. بنابراین معادله برنولی بین دو مقطع برابر خواهد بود با:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} \quad (19-7)$$

عدم یکنواختی توزیع سرعت در کانال در معادله مومتم نیز موثر است. در این حالت از ضریب β یا ضریب مومتم استفاده می‌شود مقدار β از 1/01 تا ۱/۳۳ تغییر می‌کند و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\beta = \frac{\int_A v^2 dA}{\bar{V}^2 A} \cong \frac{\sum v^2 \Delta A}{V^2 A} \quad (20-7)$$

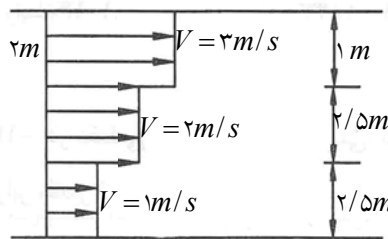
هرچه سطح مقطع کانال منظم‌تر و یکنواخت‌تر باشد. مقادیر α و β به نزدیکتر می‌شوند. همچنین در مسائل عملی برای جریان‌های آشفته α, β را یک در نظر می‌گیرند.

در دو رابطه (۱۹-۷) و (۲۰-۷) سرعت متوسط در کل مقطع مورد استفاده قرار گرفته است که سرعت متوسط با توجه به رابطه پیوستگی برابر خواهد بود با:

$$Q = AV$$

$$\bar{V} = \frac{\int_A v dA}{A} = \frac{\sum v dA}{A}$$

مثال ۱-۲: در یک مقطع از رودخانه پروفیل سرعت مطابق شکل (۱-۱۶) است. در صورتی که عمق آب در رودخانه ۲/۵ متر باشد، سرعت متوسط جریان، ضریب تصحیح انرژی و ضریب تصحیح اندازه حرکت را تعیین کنید؟



شکل

حل:

$$\bar{V} = \frac{\int_A v dA}{A} \cong \frac{\sum v \Delta A}{A} = \frac{(1 \times 2/5 \times 2) + (2 \times 2/5 \times 2) + (3 \times 1 \times 2)}{(6 \times 2)} = 1/75 m/s$$

$$\alpha = \frac{\int_A v^2 dA}{\bar{V}^2 A} \cong \frac{\sum v^2 \Delta A}{\bar{V}^2 A} = \frac{(1^2 \times 2/5 \times 2) + (2^2 \times 2/5 \times 2) + (3^2 \times 1 \times 2)}{(1/75^2 \times 2 \times 6)} = 1/53 m/s$$

$$\beta = \frac{\int_A v^3 dA}{\bar{V}^3 A} \cong \frac{\sum v^3 \Delta A}{\bar{V}^3 A} = \frac{(1^3 \times 2/5 \times 2) + (2^3 \times 2/5 \times 2) + (3^3 \times 1 \times 2)}{(1/75^3 \times 2 \times 6)} = 1/8 m/s$$

۷-۱۰ سرعت حرکت امواج سطحی

در صورت ایجاد اغتشاش در جریان (انداختن سنگ به داخل کانال) و ایجاد امواج کوچک سطحی این امواج با سرعت \sqrt{gy} منتشر خواهد شد که در آن y عمق جریان می باشد. این سرعت انتشار نسبت به آب در نظر گرفته می شود. بنابراین هر گاه جریان در کانال، دارای سرعت متوسط V باشد حرکت موج سطحی ایجاد شده نسبت به زمین در جهت جریان برابر $\sqrt{gy} + V$ و در خلاف جهت جریان برابر $\sqrt{gy} - V$ می باشد.

۲۶- در یک کانال با عمق و سرعت اولیه $1/2$ متر و $1/5$ متر در ثانیه، موجی در سطح آب به ارتفاع $0/7$ متر ایجاد شده و به طرف بالا دست در حرکت است. سرعت موج چند متر بر ثانیه است؟

$$c = \sqrt{gy_1} = \sqrt{9/81 \times 1/2} = 3/43 m/s$$

حل:

۱۱-۷ توزیع فشار در کانال‌ها

هدف از تعیین فشار در کانال‌ها مشخص نمودن نحوه تغییرات پارامتر فشار در عرض و در عمق در مقطع خاصی از کانال می‌باشد. در این فصل روابط لازم در تعیین تغییرات فشار در سه حالت جریان‌های یکنواخت با شیب تند، جریان‌های متغیر تدریجی و جریان‌های با انحنا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الف) توزیع فشار در جریان‌های یکنواخت (موازی)

اگر معادله حرکت یک المان از آب در جهت عمود بر جریان نوشته شود به توجه به اینکه خطوط جریان موازی هستند، مؤلفه شتاب در جهت عمود بر خطوط جریان وجود ندارد و لذا:

$$\sum F_n = 0 \rightarrow \text{مؤلفه وزن در جهت عمود بر خطوط جریان} = \text{نیروی فشاری}$$

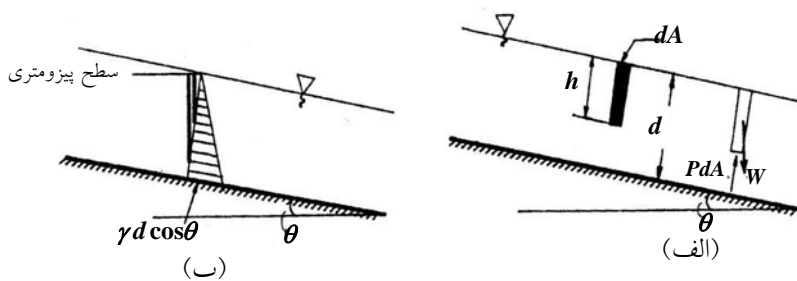
$$PdA = \gamma h dA \cos \theta \quad (21-7)$$

$$P = \gamma h \cos \theta \quad (22-7)$$

اگر تعیین مقدار فشار در کف کانال مورد نظر باشد با قرار دادن d به جای h می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$d = y \cos \theta \quad (23-7)$$

$$P = \gamma d \cos \theta = \gamma h \cos \theta$$



شکل ۵-۷ توزیع فشار در جریان یکنواخت

همان‌طور که در شکل (ب) مشاهده می‌شود تغییرات فشار از مقدار صفر تا $\gamma d \cos \theta$ تغییر می‌نماید. و در صورتی که شیب کف کانال کم باشد ($\theta \leq 6^\circ$) در آن صورت $\cos \theta = \cos^0 \theta = 1$ در نتیجه:

$$P = \gamma d \cos \theta = \gamma y \cos^* \theta = \gamma y \quad (۷-۲۴)$$

پس در کانال با شیب کم، سطح تراز هیدرولیکی را می‌توان منطبق بر سطح آزاد گرفت.

ب) توزیع فشار در جریان‌های متغیر تدریجی

با توجه به ویژگی‌های جریان متغیر تدریجی تغییرات عمق در فاصله طولانی از مسیر انجام می‌شود. بنابراین توزیع فشار در این حالت نیز از قانون تغییرات هیدرواستاتیکی فشار تبعیت خواهد کرد و روابط مربوط به توزیع فشار در جریان یکنواخت، در این حالت نیز صادق می‌باشد.

ج) توزیع فشار در جریان‌های با انحنا در صفحه قائم

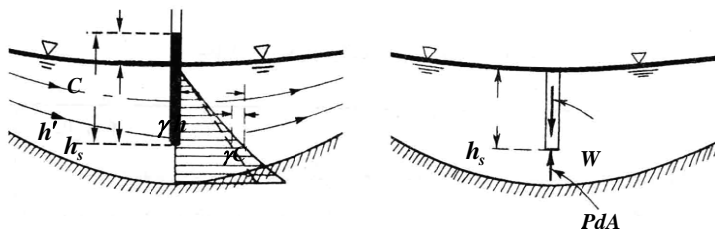
در مطالعات چگونگی تغییرات فشار در قسمت تاج سرریزها و یا در پای سرریزها، با توجه به انحنای شدید که جریان در این مواقع به خود می‌گیرد دیگر نمی‌توان از رابطه $P = \gamma h \cos \theta$ استفاده کرد، بلکه باید تصحیحاتی که دربرگیرنده تأثیر انحنای جریان باشد اعمال گردد.

الف) سطوح مقعر: در سطوحی که تقعر رو به بالا دارند فشار در کف بیشتر از

فشار هیدرواستاتیکی است. شکل (۷-۶)

$$h' = h_s + \frac{V^2 h}{gr} \quad \text{یا} \quad h' = h_s + C \quad (۷-۲۵)$$

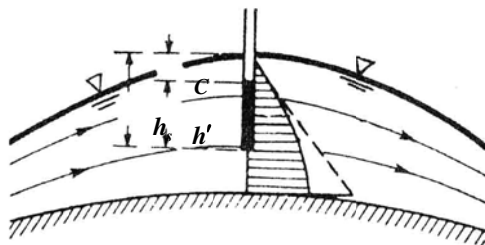
h' ارتفاع معادل فشار بر حسب ستون آب؛ r شعاع انحنای جریان؛ V سرعت یکنواخت و متوسط؛ h عمق جریان (عمود بر افق)؛ C مقدار تصحیح ارتفاع نمایش فشار و h_s ارتفاع معادل فشار هیدرواستاتیک است.



شکل ۷-۶ جریان در کانال با انحنای مقعر

ب) سطوح محدب: در این سطوح فشار در کف کمتر از فشار هیدرواستاتیک است. شکل (۷-۷)

$$h' = h_s - \frac{V^2 h}{g r} \quad \text{یا} \quad h' = h_s - C \quad (۷-۲۶)$$



شکل ۷-۷ جریان در کانال با انحنای محدب

مثال ۲-۲: در یک کانال مستطیلی با کف محدب، عمق آب 3m و شعاع کف کانال 18m است. اگر دبی در واحد عرض کانال 30m/s باشد، فشار در کف مجرا را به دست آورید؟ (شکل ۷-۷).

حل:

با استفاده از معادله زیر مقدار تصحیح ارتفاع نظیر فشار در کف کانال، C، به دست می‌آید.

$$V = \frac{q}{y} = \frac{30}{3} = 10 \text{ m/s}$$

در نتیجه:

$$C = \frac{V^2 h}{g \cdot r} = \frac{10^2 \times 3}{9.81 \times 18} = 1.70 \text{ m}$$

$$h' = h_s - C = 3 - 1.7 = 1.3 \text{ m}$$

$$P = \gamma h' = 9810 \times 1.3 = 12753 \text{ N/m}^2$$

h' = اختلاف فشار نمایش فشار واقعی

h_s = ارتفاع فشار هیدرواستاتیک

۱۲-۷ انرژی در کانال‌های باز

در حل مسائل مربوط به مباحث هیدرولیکی، آشنایی با اصول انرژی لازم و ضروری است. در این جا اصول مربوط به انرژی در کانال‌های باز مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین شکل خاصی از انرژی که انرژی مخصوص نامیده می‌شود، شرح داده می‌شوند. با استفاده از انرژی مخصوص می‌توان جریان سیال هنگام عبور از یک برآمدگی یا تنگنای موضعی را بررسی کرد که خود در تحلیل جریان در تاسیسات اندازه‌گیری دبی جریان، طراحی تبدیل‌ها و سرریزها قابل استفاده است.

۱۳-۷ معادله انرژی و انرژی مخصوص

مقدار انرژی در هر مقطع جریان از یک کانال باز به صورت رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$H = d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} + Z = y \cos^2 \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} + Z \quad (27-7)$$

$$d = y \cos \theta \quad (28-7)$$

اگر شیب کانال کم باشد ($\theta < 6^\circ$) و $\alpha = 1$ فرض شود معادله (۲۷-۷) به شکل زیر ساده می‌شود:

$$H = y + \frac{V^2}{2g} + Z \quad (29-7)$$

با استفاده از روابط فوق معادله انرژی بین دو مقطع به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$H = y_1 \cos^2 \theta + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = y_2 \cos^2 \theta + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_f \quad (30-7)$$

در صورتی که شیب کف کانال کم باشد و $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ فرض شوند معادله فوق به صورت زیر در می‌آید:

$$H = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_f \quad (31-7)$$

h_f مقدار افت انرژی از سطح مقطع ۱ تا ۲ است. در جریان‌های یکنواخت، شیب سطح آب، شیب کف و شیب خط انرژی با هم برابرند.

$$S_o = S_w = S_f = \sin \theta$$

باختماف در سال ۱۹۱۲ مفهوم انرژی مخصوص را برای حل مسائل دشوار

هیدرولیک کانال‌های باز بیان نمود که راهنما و کلید مناسبی برای حل بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی می‌باشد.

انرژی مخصوص (E) عبارتست از انرژی در هر سطح مقطع در واحد وزن، زمانی که نسبت به کف کانال (به عنوان سطح مبنا) در نظر گرفته شود و مقدار آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} = y \cos^2 \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} = y \cos^2 \theta + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (32-7)$$

به عبارت دیگر، انرژی مخصوص بیانگر فاصله خط انرژی تا کف کانال می‌باشد. در یک کانال با شیب کم و با فرض $\alpha = 1$ ، معادله انرژی مخصوص برابر خواهد بود با:

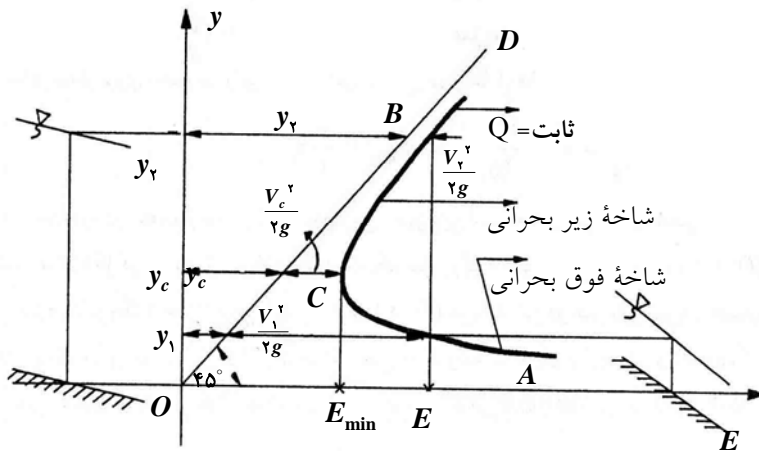
$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (33-7)$$

رابطه فوق نشان می‌دهد که برای یک مقدار ثابت، Q ثابت، انرژی مخصوص تابعی از عمق جریان است. لذا می‌توان منحنی تغییرات انرژی مخصوص بر حسب y را رسم نمود (شکل ۷-۱۰). این منحنی دارای ۲ شاخه CB و CA در ربع اول دستگاه مختصات می‌باشد که به ترتیب به سمت منحنی دارای خط مجانب OD (مجانب مایل با شیب 45° و محور افقی OE کشید می‌شوند).

از نظر فیزیکی می‌توان گفت که با افزایش y از ارتفاع معادل سرعت کاسته شده و با کاهش y ، ارتفاع معادل سرعت افزوده می‌شود یعنی:

$$y \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{V^2}{2g} \rightarrow 0 \quad \text{اگر}$$

$$y \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{V^2}{2g} \rightarrow 0 \quad \text{و اگر}$$



شکل ۷-۱۰ منحنی انرژی مخصوص

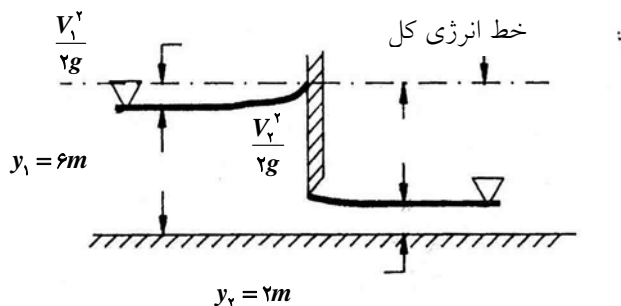
شاخه دیگر آن زیر محور افقی OE واقع می‌شود که به دلیل منفی بودن عمق (y) دارای مفهوم فیزیکی نیست. چنانچه در شکل (۷-۱۰) مشاهده می‌شود به ازای یک مقدار معین E برای y سه جواب به دست می‌آید که این جواب‌ها، جواب‌های معادله (۷-۳۳) می‌باشند.

دو جواب y_1 و y_2 که مثبت و حقیقی هستند، اعماق متناوب نامیده می‌شوند. عمق y_2 به دلیل منفی بودن (در پایین منحنی OE قرار دارد) قابل قبول نیست. در یک نقطه از منحنی انرژی مخصوص (C) مقدار انرژی مخصوص به حداقل خود می‌رسد که در این نقطه از منحنی، یک عمق جریان به نام y_c (عمق بحرانی) وجود دارد.

در یک منحنی انرژی مخصوص اگر مقدار Q تغییر کند، انرژی مخصوص دیگری به دست می‌آید و هرچه Q زیادتر شود، منحنی‌ها به طرف راست تغییر می‌کنند. منحنی انرژی مخصوص دارای دو شاخه می‌باشد. در شاخه بالایی وضعیت جریان زیر بحرانی ($Fr < 1, y_2 > y_c$) و در شاخه پایینی وضعیت جریان فوق بحرانی ($Fr > 1, y_1 < y_c$) می‌باشد.

نکته: به ازای هر E ثابت امکان شکل‌گیری دو عمق جریان وجود دارد که یکی عمق بزرگ‌تر از عمق بحرانی ($Fr < 1, y_2 > y_c$) و عمق دیگر کوچک‌تر از عمق بحرانی ($Fr > 1, y_1 < y_c$) می‌باشد. این دو عمق را اعماق متناوب گویند.

مثال ۲: در یک کانال افقی مطابق شکل زیر، اعماق آب بفاصله کمی از دو طرف دریاچه برابر ۶m و ۲m می‌باشند. چنانچه کانال مستطیلی با عرض ۸m فرض گردد، مقدار جریانی را که از زیر دریاچه عبور می‌کند، محاسبه کنید؟ $h_f = 0$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$



شکل ۷-۸

حل:

سطح مبنا را منطبق بر کف کانال فرض می‌کنیم، در این صورت:

$$z_1 = z_2 = 0$$

با فرض $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ و با استفاده از معادله انرژی بین دو مقطع کانال داریم:

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_f$$

معادله انرژی:

$$6 + \frac{V_1^2}{2g} = 2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

از طرفی داریم:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

$$6 \times 18 \times V_1 = 2 \times 18 \times V_2$$

$$V_2 = 3V_1$$

با اعمال این رابطه در معادله انرژی خواهیم داشت:

$$6 + \frac{V_1^2}{2g} = 2 + \frac{9V_1^2}{2g}$$

$$V_1 = 4.42 \text{ m/s}$$

$$Q = V_1 A_1 = 4.42 \times (6 \times 18) = 212.6 \text{ m}^3/\text{s}$$

مثال ۲-۲: آب با دبی $20 \text{ m}^3/\text{s}$ در یک کانال مستطیلی به عرض 10 m جاری است. منحنی $E-y$ را ترسیم کرده و در صورتی که عمق جریان در مقطعی برابر $0/6 \text{ m}$ باشد وضعیت جریان را در این مقطع مشخص نمایید. عمق متناوب این عمق را تعیین کنید؟

حل:

با توجه به این که $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ و عرض کانال مستطیلی $b = 10 \text{ m}$ می باشد می توان نوشت:

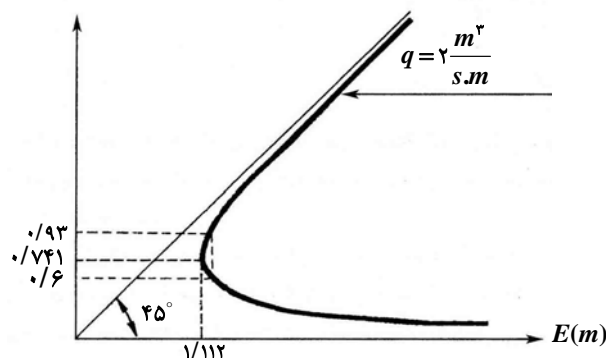
$$q = \frac{Q}{b} = \frac{20}{10} = 2 \frac{\text{m}^3}{\text{s.m}}$$

$$E = y + \frac{V^2}{2g} = y + \frac{q^2}{2gy^3} = y + \frac{4}{2gy^3} = y + \frac{2}{gy^3}$$

$$E = y + \frac{2}{gy^3}$$

این معادله به سادگی قابل ترسیم است که به صورت شماتیک در شکل ۷-۹ ترسیم گردیده است. نقطهٔ مینیمم منحنی با استفاده از روابط زیر به دست می آید: در محلی که عمق جریان معادل $0/6 \text{ m}$ باشد:

$$y_1 = 0/6 \text{ m} < y_c = 0/741 \text{ m}$$



شکل ۷-۹

در نتیجه جریان فوق بحرانی بوده و مقدار انرژی مخصوص در این عمق برابر است با:

$$\bar{E} = 0.6 + \frac{4}{2 \times 9.81 (0.6)^2} = 1.166m$$

به منظور به دست آوردن عمق متناوب y_1 ، بایستی معادله زیر با استفاده از روش آزمون و خطا حل شود و جواب صحیح انتخاب گردد:

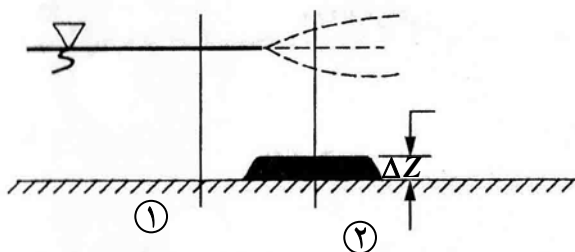
$$1.166 = y_1 + \frac{4}{2gy_1^2} \xrightarrow{\text{آزمون و خطا}} y_1 = 0.93m$$

بدیهی است که y_2 بایستی بیش از عمق بحرانی انتخاب گردد. ترسیم دقیق منحنی $E-y$ می‌تواند در تعیین سریعتر جواب کمک نماید.

۷-۱۴ کاربرد انرژی مخصوص

۷-۱۴-۱ تحلیل جریان ناشی از یک برآمدگی موضعی در کانال مستطیلی

اگر کف کانال در یک مقطعی به اندازه ΔZ بالا بیاید با نوشتن معادله انرژی بین مقطع (۱) و (۲) با فرض کم بودن شیب کانال و $\alpha = 1$ و صرف نظر از اتلاف انرژی در مسیر داریم:



شکل ۷-۱۱ برآمدگی در کف کانال

$$y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} = y_2 + \frac{q^2}{2gy_2^2} + \Delta Z \quad (7-38)$$

$$E_1 = E_2 + \Delta Z \Rightarrow E_2 = E_1 - \Delta Z \quad (7-39)$$

یعنی ضمن حرکت از مقطع ۱ به مقطع ۲، انرژی مخصوص به مقدار ΔZ (ارتفاع برآمدگی) کاهش پیدا کرده است. در نتیجه با توجه به شکل ۳-۳ با کاهش E_1 به میزان ΔZ یکی از اعماق ۲ یا ۲' جواب خواهد بود.

۱. در صورتی که وضعیت جریان قبل از برآمدگی زیر بحرانی باشد عمق y' به عمق y' تبدیل شده و کاهش عمق پیش خواهد آمد.

۲. اگر وضعیت جریان قبل از برآمدگی فوق بحرانی باشد، عمق ۱ به عمق ۲ تبدیل خواهد شد و افزایش عمق پیش خواهد آمد.

۳. در صورتی که ارتفاع برآمدگی به گونه‌ای باشد که E_2 از E_{min} کمتر شود، در این صورت هیچ نقطه‌ای از منحنی جواب مساله نخواهد بود و در این شرایط جریان مجبور به تغییر شرایط خود قبل از محل برآمدگی می‌باشد. به عبارت دیگر پدیده انسداد (پنگاب Backwater) در کانال اتفاق خواهد افتاد. اگر این برآمدگی بیشتر از ΔZ_c شود، عمق همچنان عمق بحرانی می‌ماند.

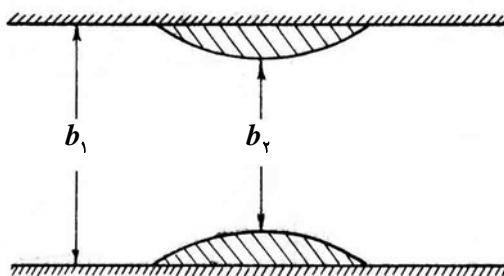
۴. جهش از یک شاخه منحنی به شاخه دیگر از نظر فیزیکی امکان پذیر نیست.
نکته: مقطعی از جریان که در آن ارتباط مشخصی بین عمق و دبی جریان وجود داشته باشد، مقطع کنترل نامیده می‌شود.

در صورتی که ارتفاع برآمدگی به ازای دبی خاص بیشتر از ارتفاع بحرانی انتخاب شود عمق بحرانی بر روی برآمدگی تثبیت خواهد شد و این مقطع یک مقطع کنترل

است (مانند سرریز لبه پهن برای اندازه‌گیری دبی در کانال $y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$).

۷-۱۴-۲ جریان ناشی از یک تنگنای موضعی در یک کانال مستطیلی

چنانچه عرض یک کانال مستطیلی را که دبی ثابت Q در آن جریان دارد به تدریج تنگ‌تر کرده و از b_1 به b_2 تقلیل دهیم برای تعیین عمق جریان باید از معادله انرژی استفاده کرد.



شکل ۷-۱۲ کاهش عرض کانال مستطیلی

$$y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^3} = y_2 + \frac{q_2^2}{2gy_2^3} \quad (۷-۴۰)$$

با توجه به رابطه فوق می‌توان گفت که انرژی مخصوص بین دو مقطع ۱ و ۲ ثابت است اما دبی عبوری در واحد عرض بین دو مقطع تغییر کرده است.

یعنی:

$$E_1 = E_2, q_2 > q_1$$

$$q_2 > q_1 \Rightarrow (y_c)_2 > (y_c)_1 \Rightarrow (E_{\min})_2 > (E_{\min})_1$$

بنابراین منحنی‌های $E-y$ با افزایش q به سمت راست حرکت خواهند کرد. در صورتی که قبل از تنگنای (فشردگی) موضعی مقدار انرژی مخصوص برابر با E_1 باشد هنگام رسیدن به فشردگی مقدار انرژی مخصوص ثابت باقی می‌ماند ولی اعماق از روی منحنی $E-y$ با مشخصه q_1 به اعماق روی منحنی q_2 منتقل خواهد شد (شکل ۷-۱۳).

۱. چنانچه وضعیت جریان قبل از فشردگی زیر بحرانی باشد، عمق y_1 به y_2

تبدیل خواهد شد و کاهش عمق رخ می‌دهد.

۲. اگر وضعیت جریان قبل از فشردگی فوق بحرانی باشد، عمق y_1 به y_2 تبدیل

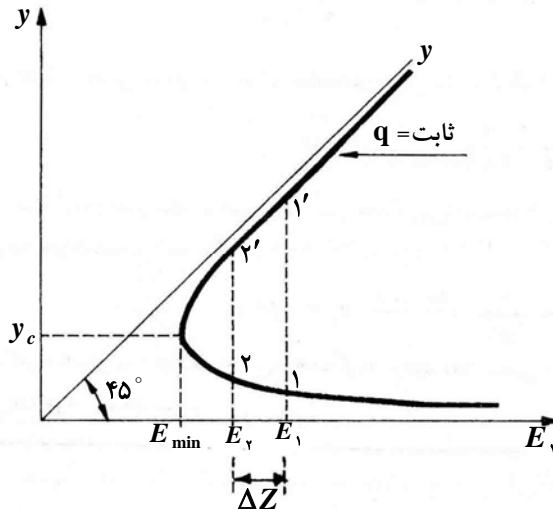
می‌شود و افزایش عمق را باعث می‌شود.

۳. هر گاه کاهش عرض به گونه‌ای باشد که منحنی $E-y$ با مشخصه q_2 در سمت

راست خط قائم به معادله $E_1 = E_2$ قرار گیرد، به عبارت دیگر $(E_{\min})_2 < E_1$ باشد در

این صورت هیچ نقطه‌ای از منحنی فوق جواب مساله نخواهد بود. در صورتیکه جریان قبل از فشردگی زیر بحرانی باشد، وضعیت انسداد پیش آمده و انرژی مخصوص در

ابتدای تنگنا به اندازه‌ای افزایش پیدا خواهد کرد که عبور جریان از مقطع ۲ با حداقل انرژی مخصوص $(E_{\min})_2$ انجام گردد و این کار با افزایش عمق در مقطع ۱ انجام می‌پذیرد. در این حالت عمق $(y_c)_2$ در مقطع ۲ تثبیت خواهد شد.



شکل ۷-۱۳ منحنی‌های $E-y$ در عبور جریان از یک تنگ شدگی موضعی

نکته: در بررسی پروفیل سطح آب در اثر تغییرات در کف یا عرض کانال حتماً از منحنی‌های $E-y$ استفاده شود و اصلاً سعی نشود چیزی حفظ گردد.

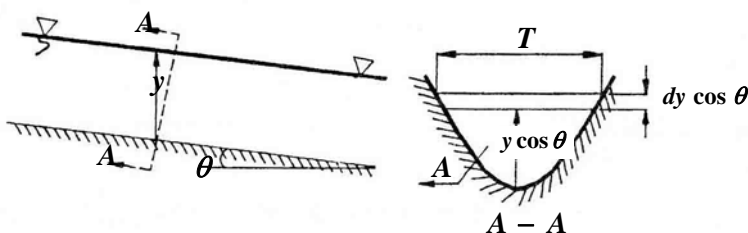
نکته: در یک نتیجه کلی می‌توان گفت که جریان زیر بحرانی همواره بر خلاف تصور تجربیات ذهنی رفتار می‌کند مثلاً در حالت گشاد شدگی عرض کانال توقع داریم سطح آب افت کند، در حالی که در جریان زیر بحرانی سطح آب بالا می‌آید. اما جریان فوق بحرانی با تصورات ذهنی ما سازگاری بیشتری دارد.

۷-۱۵ منحنی $E-y$ در حالت کلی و برای هر مقطع دلخواه

در قسمت‌های قبل مفاهیم انرژی مخصوص توضیح داده شدند و کاربردهای این مفاهیم در مقطع مستطیلی شکل به تفصیل مورد بررسی قرار گرفتند. برای معرفی منحنی $E-y$ و مشخصات آن در مورد مقاطع با هر شکل دلخواه و در حالت $a \neq 1$ ، شکل ۷-۱۴ را که سطح مقطع جریان در صفحه‌ای عمود بر جهت عمومی حرکت آب

را در یک کانال منشوری نشان می‌دهد در نظر می‌گیریم. انرژی مخصوص در هر مقطع از جریان برابر است با:

$$E = y \cos^2 \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} = y \cos^2 \theta + \alpha \frac{Q^2}{2gA^3}$$



شکل ۷-۱۴

منحنی $E-y$ به ازاء یک دبی ثابت به صورت شکل ۷-۱۵ الف ترسیم گردیده است. این منحنی دارای یک مجانب افقی به معادله $y=\theta$ و یک مجانب مایل به معادله $E = y \cos^2 \theta$ می‌باشد که در نتیجه زاویه θ' در شکل ۷-۱۵ الف برابر $\tan^{-1} \frac{1}{\cos^2 \theta}$ خواهد بود. جهت به دست آوردن مشخصات نقطه بحرانی این منحنی از E نسبت به y مشتق‌گیری می‌شود (در مشتق‌گیری تغییرات α در نظر گرفته نشده است):

$$\frac{dE}{dy} = \cos^2 \theta + \frac{\alpha Q^2}{2g} \left[\frac{-2A \frac{dA}{dy}}{A^3} \right] = \cos^2 \theta - \frac{\alpha Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dy} \quad (7-41)$$

با دقت در شکل ۷-۱۴ ملاحظه می‌شود که به ازاء تغییر dy در عمق میزان تغییر در مساحت مقطع جریان برابر خواهد شد با:

$$dA = T dy \cos \theta$$

که در نتیجه $\frac{dA}{dy} = T \cos \theta$ و رابطه ۷-۴۱ به شکل زیر نوشته می‌شود:

رابطه ۷-۴۵ شکل عدد فرود جریان در این گونه مقاطع را نشان می‌دهد:

$$Fr = \frac{V\sqrt{\alpha}}{\sqrt{gD\cos\theta}} \quad (۷-۴۵)$$

که براساس رابطه ۷-۴۵ مقدار عدد فرود جریان در نقطه بحرانی برابر واحد به دست می‌آید و مقدار انرژی مخصوص مینیمم در این حالت برابر است با:

$$E_{\min} = y_c \cos^3 \theta + \frac{\alpha V_c^3}{2g} = y_c \cos^3 \theta + \frac{\alpha V_c^3 D_c \cos \theta}{2g D_c \cos \theta}$$

$$E_{\min} = y_c \cos^3 \theta + \frac{1}{2} D_c \cos \theta \quad (۷-۴۸)$$

در صورتی که منحنی‌های $E-y$ برای دو مقدار Q_1, Q_2 ترسیم شود و $Q_2 > Q_1$ باشد، این منحنی‌ها مطابق شکل ۷-۱۵ ب نمایش داده خواهند شد، یعنی اگر $Q_2 > Q_1$ باشد، به ازاء یک عمق ثابت مقدار انرژی معادل سرعت مربوط به دبی Q_2 بیشتر خواهد بود و منحنی‌ها با افزایش Q به سمت راست متمایل خواهند شد.

قابل ذکر است که نقاط مینیمم این منحنی‌ها بر روی خط $y = \frac{2}{3} E$ قرار نخواهند گرفت بلکه این نقاط از رابطه ۷-۴۸ تبعیت خواهند نمود.

۷-۱۶ جریان‌های زیر بحرانی، بحرانی و فوق بحرانی در کانال باز

جریان‌های زیر بحرانی، بحرانی و فوق بحرانی توسط عدد بدون بعد فرود طبقه‌بندی می‌شوند. فرم کلی عدد فرود به صورت زیر است:

$$Fr^* = \frac{\alpha Q^3 T}{g A^3 \cos \theta}$$

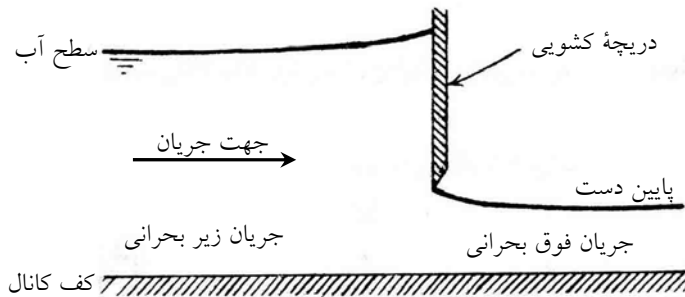
ولی با فرض $\alpha = 1$ ، $D = \frac{A}{T} \cos \theta = 1$ (عمق هیدرولیکی) و $V = \frac{Q}{A}$ رابطه

فوق به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$Fr^* = \frac{V^3}{gD} \quad \text{یا} \quad Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

رابطه فوق در اصل بیان‌کننده نسبت سرعت جریان به سرعت انتقال موج می‌باشد. به ازای $Fr < 1$ جریان زیر بحرانی، $Fr = 1$ جریان بحرانی و $Fr > 1$ جریان

فوق بحرانی است. در جریان‌های زیر بحرانی تغییر اعمال شده در یک مقطع جریان، به پایین دست و بالا دست آن مقطع منتقل می‌شود. به عنوان مثال اگر یک دریچه کشویی در مسیر یک جریان زیر بحرانی قرار گرفته باشد وجود این دریچه در بالا دست تأثیر خواهد گذاشت. یعنی جریان‌های زیر بحرانی از پایین دست کنترل می‌شوند ولی در جریان‌های فوق بحرانی تغییرات پایین دست در بالا دست تأثیر نمی‌گذارد. به عبارت دیگر این جریان‌ها از بالا دست کنترل می‌شوند. به عبارت ساده تر بالا دست یک دریچه که جریان زیر بحرانی است، توسط پایین دست خود و جریان بعد از دریچه که فوق بحرانی است، به وسیله بالا دست یعنی دریچه کنترل می‌شود (شکل ۷-۱۶)



شکل ۷-۱۶ ایجاد جریان فوق بحرانی و زیر بحرانی با یک دریچه کشویی

۷-۱۷ خصوصیات عمق بحرانی

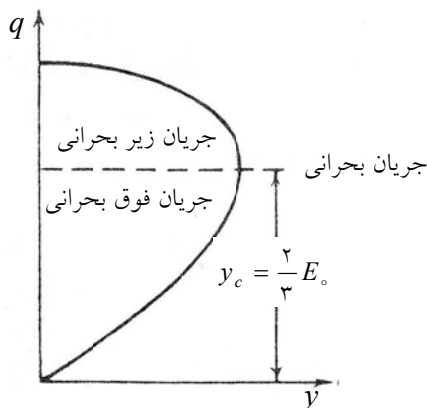
به طور کلی برای یک مقطع بحرانی می‌توان خصوصیات زیر را بیان نمود:

۱. عدد فرود جریان بحرانی برابر یک است.
۲. به ازای یک دبی ثابت، انرژی مخصوص حداقل است.
۳. به ازای یک انرژی مخصوص ثابت، دبی عبوری حداکثر است.
۴. به ازای یک نیروی مخصوص ثابت، دبی عبوری حداکثر است.
۵. به ازای یک دبی ثابت، نیروی مخصوص حداقل است.

بندهای ۱ و ۲ بیانگر آن است که رابطه مشخصی بین عمق و دبی جریان در یک مقطع بحرانی وجود دارد. بنابراین مقطع بحرانی به عنوان یک مقطع کنترل شناخته می‌شود. به ازاء یک انرژی مخصوص ثابت معادله انرژی مخصوص برای یک کانال مستطیلی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^3} \quad \text{یا} \quad q^2 = 2gy^3(E - y) \quad (۴۹-۷)$$

با توجه به معادله فوق منحنی تغییرات $q-y$ را می‌توان رسم کرد (شکل ۱۷-۷).



شکل ۱۷-۷

در معادله ۴۹-۷ به ازای $y=0$ و $y=E_0$ مقدار q صفر می‌شود و با مشتق‌گیری از این معادله و به‌دست آوردن روابط q ماکزیمم، مشخص می‌شود که q ماکزیمم در عمق بحرانی اتفاق می‌افتد. روابط فوق را می‌توان برای تمام کانال‌ها تعمیم داد.

۱۷-۷ محاسبات عمق بحرانی

منظور از محاسبات عمق بحرانی در یک کانال با هندسه مشخص، تعیین عمق بحرانی به ازای یک دبی خاص می‌باشد. لذا رابطه $\frac{\alpha Q^3 T_c}{g A_c^3 \cos \theta} = 1$ باید برحسب y بیان شود و به ازاء دبی خاص عمق بحرانی محاسبه گردد. با قرار دادن عمق بحرانی در رابطه $E_{\min} = y_c \cos^2 \theta + \frac{1}{4} D_c \cos \theta$ می‌توان انرژی مخصوص متناسب با این عمق را نیز محاسبه نمود.

رابطه $Fr^2 = \frac{\alpha Q^3 T}{g A^3 \cos \theta}$ برای عمق بحرانی به‌صورت زیر است:

$$\frac{\alpha Q^3 T_c}{g A_c^3 \cos \theta} = 1 \quad (۵۰-۷)$$

با توجه به رابطه فوق رابطه بین عمق ودبی بحرانی برای مقاطع مختلف هندسی به دست می‌آید. در این مقاطع فرض بر این است که شیب کانال بسیار کم، یعنی $\cos \theta = 1$ و همچنین $\alpha = 1$ می‌باشد. بنابراین رابطه ۷-۵۰ به شکل زیر درمی‌آید:

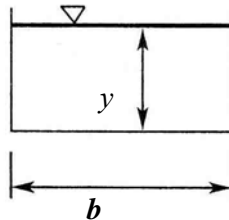
$$\frac{Q^r}{g} = \frac{A_c^r}{T_c} \quad (۷-۵۱)$$

۱-۱۷-۷ مقطع مستطیلی

کانال مستطیلی دارای عرض کف (b) و عمق جریان (y) مطابق شکل (۷-۱۸) را در نظر بگیرید.

با استفاده از شکل ۷-۱۸ و همچنین رابطه ۷-۵۱ می‌توان نوشت:

$$\frac{Q^r}{g} = \frac{A_c^r}{T} \Rightarrow \frac{Q^r}{g} = \frac{b^r y_c^r}{b}$$



شکل ۷-۱۸

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^r}{b^r g}} \quad (۷-۵۱)$$

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^r}{g}} \quad (۷-۵۲)$$

در نتیجه انرژی مخصوص مینیمم برابر خواهد بود با:

$$E_{\min} = y_c + \frac{1}{4} D_c = y_c + \frac{1}{4} y_c = \frac{3}{4} y_c \quad (۷-۵۳)$$

و عدد فرود برابر خواهد بود با:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}, \quad D = \frac{A}{T} = \frac{by}{b} = y \Rightarrow Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (۵۴-۷)$$

$$Fr^{\gamma} = \frac{V^{\gamma}}{gy^{\gamma}}, \quad V = \frac{q}{y} \Rightarrow Fr^{\gamma} = \frac{q^{\gamma}}{gy^{\gamma}} \quad (۵۴-۷)$$

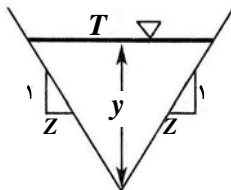
با استفاده از رابطه ۵۲-۷ و ۵۴-۷ می‌توان نوشت:

$$Fr^{\gamma} = \frac{y_c^{\gamma}}{y^{\gamma}} \quad (۵۵-۷)$$

۲-۱۷-۷ مقطع مثلثی

در یک مقطع مثلثی با شیب کناره z و با توجه به شکل ۱۹-۷ پارامترهای هندسی مساحت مقطع، عرض سطح آزاد و عمق هیدرولیکی به صورت زیر بیان می‌گردند:

$$T = 2zy, \quad A = zy^{\gamma}, \quad D = \frac{A}{T} = \frac{y}{2}$$



شکل ۱۹-۷

$$\frac{Q^{\gamma}}{g} = \frac{A_c^A}{T} \Rightarrow \frac{Q^{\gamma}}{g} = \frac{z^{\gamma} y_c^{\gamma}}{2zy_c} \Rightarrow y_c = \sqrt[3]{\frac{2Q^{\gamma}}{gz^{\gamma}}} \quad (۵۶-۷)$$

در این صورت انرژی مخصوص مینیمم در این مقطع برابر خواهد بود با:

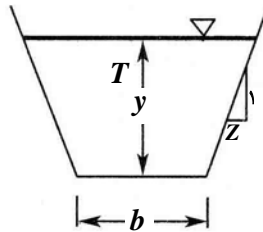
$$E_{\min} = y_c + \frac{1}{\gamma} D_c = y_c + \frac{1}{\gamma} \left(\frac{y_c}{2} \right) = \frac{5}{4} y_c \quad (۵۷-۷)$$

عدد فرود برابر خواهد بود با:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g}} = \frac{V}{\sqrt{g \frac{y}{2}}} = \frac{\sqrt{2} \times V}{\sqrt{gy}} \quad (۵۸-۷)$$

۳-۱۷-۷ مقطع دوزنقه‌ای

در مقطع دوزنقه‌ای با شیب کناره z و عرض کف b (مانند شکل ۲۰-۷) می‌توان نوشت:



شکل ۲۰-۷

با توجه به مشخصات هندسی از این مقطع رابطه $\frac{Q^r}{g} = \frac{A_c^r}{T_c}$ را به صورت صریح نمی‌توان حل کرد و باید از روش‌های دیگر مانند روش عددی آزمون و خطا و روش ترسیمی استفاده نمود.

در روش ترسیمی از پارامتر هندسی به نام فاکتور سطح (z) بر حسب سایر مشخصات هندسی استفاده شده و از نمودارهای ارائه شده مسائل حل می‌گردد.

$$Z = A \sqrt{\frac{A}{T}} = A \sqrt{D} \quad (۵۹-۷)$$

$$\frac{Q^r}{g} = \frac{A_c^r}{T_c} \Rightarrow \frac{Q^r}{g} = A_c^r D \Rightarrow \frac{Q}{\sqrt{g}} = A \sqrt{D} \Rightarrow Z_c = \frac{Q}{\sqrt{g}}$$

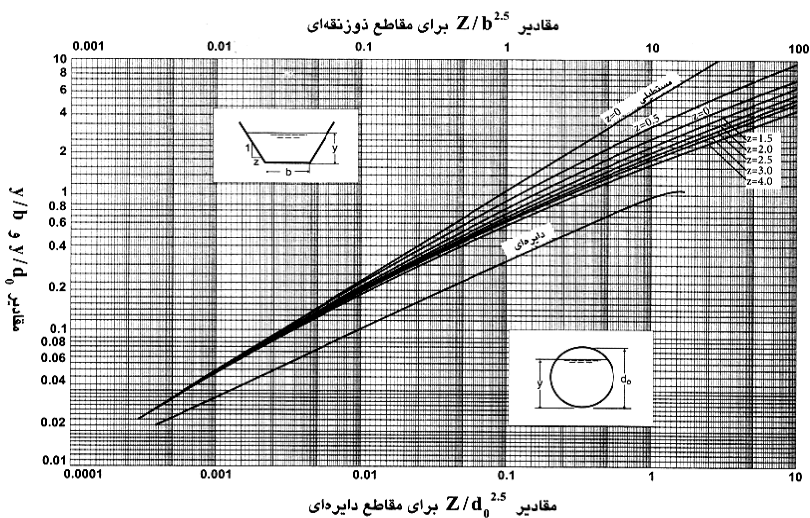
$$\frac{Q}{\sqrt{g} b^{5/3}} = \frac{Z_c}{b^{5/3}} \quad (۶۰-۷)$$

در تعیین عمق بحرانی می‌توان مقدار $\frac{Z_c}{b^{5/3}}$ به ازاء دبی خاص را از معادله به‌دست آورد و سپس با استفاده از شکل نمودار (۷-۲۱) به ازاء z مشخص مقدار y_c و یا به عبارت دیگر عمق بحرانی را تعیین نمود.

با داشتن y_c می‌توان مقدار D_c و با توجه به روابط ذیل می‌توان مقدار E_{\min} و عدد فروود در هر عمق از جریان را به‌دست آورد.

$$E_{\min} = y_c \cos^2 \theta + \frac{1}{4} D_c \cos \theta$$

$$Fr = \frac{V\sqrt{\alpha}}{\sqrt{gD\cos\theta}}$$



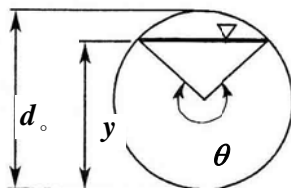
شکل ۷-۲۱ نمودار محاسبه عمق بحرانی در کانال‌های دوزنقه‌ای و دایره ای

۷-۱۷-۴ مقطع دایره‌ای

با توجه به شکل ۷-۲۲ برای این مقطع می‌توان نوشت:

$$\theta = 2\cos^{-1}\left(1 - \frac{y}{d_0}\right) = f\left(\frac{y}{d_0}\right) \quad (۷-۶۱)$$

این مقطع مانند مقطع دوزنقه‌ای به کمک یکی از دو روش آزمون و خطا و یا روش ترسیمی حل می‌شود.



شکل ۷-۲۲

$$\frac{Q^r}{g} = \frac{A_c^r}{T_c} \Rightarrow \frac{Q^r}{g} = A_c^r D_c \Rightarrow \frac{Q}{\sqrt{g}} = A \sqrt{D_c} \Rightarrow Z_c = \frac{Q}{\sqrt{g}}$$

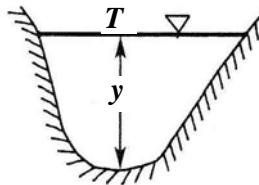
$$\frac{Q}{\sqrt{g d_o^{5/2}}} = \frac{Z_c}{d_o^{5/2}} \quad (۶۲-۷)$$

لذا به ازای هر دبی خاص، پارامتر $\frac{Z_c}{d_o^{5/2}}$ محاسبه می‌شود و از روی نمودار (۷-۷) عمق بحرانی مربوط به دست خواهد آمد.

۷-۱۷-۵ مقطع نامنظم

در کانال‌هایی که شکل هندسی مشخصی ندارند (شکل ۷-۲۳) برای تعیین عمق بحرانی می‌توان از روش ترسیمی ذیل استفاده نمود:

مقادیر دلخواهی برای y انتخاب نموده، سپس با توجه به شکل مقطع، مقدار Z مشخص می‌شود و لذا می‌توان منحنی شکل (۷-۲۳) را برای این مقطع خاص ترسیم کرد.

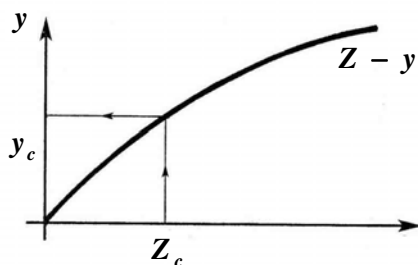


شکل ۷-۲۳

در شرایط بحرانی رابطه زیر را داریم:

$$\frac{Q^r}{g} = \frac{A_c^r}{T_c} \Rightarrow \frac{Q^r}{g} = A_c^r D_c \Rightarrow \frac{Q}{\sqrt{g}} = A \sqrt{D_c} \Rightarrow Z_c = \frac{Q}{\sqrt{g}} \quad (۶۴-۷)$$

که با داشتن Q مقدار Z_c به دست خواهد آمد و می‌توان با استفاده از منحنی شکل ۷-۲۴، عمق بحرانی را تعیین نمود. با تعیین y_c ، D_c و در نتیجه E_{\min} متناسب با وضعیت بحرانی به دست می‌آید.



شکل ۷-۲۴

روشن است که این روش یک روش ترسیمی در حل معادله $\frac{\alpha Q^2 T \cos \theta}{g A^3} = 1$ می‌باشد و می‌توان آن را در مورد مقاطع با اشکال منظم هندسی نیز به کار برد.

مثال ۲-۵: در یک کانال مستطیلی با دبی در واحد عرض $1/5 \text{ m}^2/\text{s}$ عمق، سرعت و انرژی بحرانی را به دست آورید؟

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{1/5^2}{9/81}} = 0/612 \text{ m}$$

$$V_c = \sqrt{g y_c} = \sqrt{9/81 \times 0/612} = 2/45 \text{ m/s}$$

$$E_c = \frac{3}{2} y_c = \frac{3}{2} (0/612) = 0/918 \text{ m}$$

مثال ۲-۶: عمق جریان در یک کانال مستطیلی $0/4$ متر بوده و در این کانال جریان فوق بحرانی با عدد فرود برابر $1/5$ برقرار می‌باشد. عمق بحرانی در این کانال را به دست آورید؟

حل:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g y}} \Rightarrow 1/5 = \frac{V}{\sqrt{9/81 \times 0/4}} \Rightarrow V = 2/991 \text{ m/s}$$

$$q = V y \Rightarrow q = 2/991 \times 0/4 = 1/189 \text{ (m}^3/\text{s)}/\text{m}$$

$$y_c = \left(\frac{q^2}{g} \right)^{1/3} = \left(\frac{1/189^2}{9/81} \right)^{1/3} = 0/524 \text{ m}$$

مثال ۲-۷: در یک کانال مستطیلی حداقل انرژی مخصوص $3/5$ متر می‌باشد. در

صورتی که عرض این کانال ۲ متر باشد، با صرف نظر کردن از افت انرژی، حداکثر دبی عبوری از کانال را به دست آورید؟

حل:

$$E_{\min} = \frac{3}{2} y_c \Rightarrow y_c = \frac{2}{3} \times 3/5 = 2/3 \text{ m}$$

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \Rightarrow q^2 = g y_c^3 \Rightarrow q^2 = 9/81 \times 2/33^3 = 124/1$$

$$q = 11/14 (m^3/s)/m$$

$$Q = qb = 11/14 \times 2 = 22/28 m^3/s$$

مثال ۲-۸: در یک کانال مستطیلی، اعماق متناوب برابر با ۱/۵ و ۳ متر می باشند.

در صورتی که عرض این کانال ۲ متر باشد، مقدار دبی کانال را به دست آورید؟

حل: دو عمقی که دارای انرژی مخصوص برابر هستند، اعماق متناوب نامیده

می شوند، بنابراین می توان نوشت:

$$E_1 = E_2$$

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^3} = y_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^3}$$

$$1/5 + \frac{Q^2}{2 \times 9/81 \times (1/5 \times 2)^3} = 3 + \frac{Q^2}{2 \times 9/81 \times (3 \times 2)^3}$$

$$Q = 18/79 m^3/s$$

در نتیجه جریان در کانال زیر بحرانی است.

مثال ۲-۱۶: در یک کانال مستطیلی به عرض ۲/۵m جریان ۴/۸m³/s را با سرعت

۱/۲m/s از خود عبور می دهد. اگر بخواهیم کانال را در یک نقطه طوری تنگ کنیم که

جریان آن بحرانی شود، ماکزیمم عرض کانال در قسمت تنگ شده چند متر می تواند

باشد؟

حل:

$$Q = V A_1 \Rightarrow y_1 = \frac{Q}{b_1 V_1} = \frac{4/8}{(2/5 \times 1/2)} = 1/6 m$$

$$E = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = 1/6 + \frac{1/2^2}{(2 \times 9/81)} = 1/673 m$$

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} = \frac{1/2}{\sqrt{9/81 \times 1/6}} = 0/303 \leq 1$$

با توجه به اینکه $Fr_1 < 1$ ، در نتیجه جریان زیر بحرانی است. لذا ماکزیمم عرض تنگ‌شدگی باید به اندازه‌ای باشد که در کانال وضعیت انسداد به‌وجود نیاید. با فرض اینکه افت انرژی موضعی وجود ندارد، خواهیم داشت:

$$E_{\min 2} = E_1 = 1/673 m$$

$$y_{c2} = \frac{2}{3} E_{\min 2} = \frac{2}{3} \times 1/673 = 1/115 m$$

$$y_{c2} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \Rightarrow 1/115 = \sqrt[3]{\frac{q^2}{9/81}} \Rightarrow q_2 = 3/688 (m^3/s)/m$$

$$Q = q_2 b_2 \Rightarrow b_2 = \frac{Q}{q_2} = \frac{4/8}{3/688} = 1/302 m$$

مثال ۲-۱۷: در یک کانال مستطیلی به عرض ۳/۵ متر، عمق ۱/۴ متر، عمق ۱/۴ متر و سرعت ۰/۶ متر بر ثانیه است. در صورتی که ارتفاع بالآآمدگی در مسیر ۰/۳ متر باشد، عمق جریان بر روی مانع را به‌دست آورید؟
حل: ابتدا انرژی مخصوص در بالا دست بالآآمدگی را محاسبه می‌شود.

$$q = V_1 y = 0.6 \times 1/4 = 0.15 \left(m^3 / s \right) / m$$

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = 1/4 + \frac{(0.6)^2}{(2 \times 9.81)} = 1/42 \text{ m}$$

$$E_1 = E_2 + \Delta Z \Rightarrow E_2 = E_1 + \Delta Z$$

$$E_2 = 1/42 - 0.3 = 1/12 \text{ m}$$

$$E_2 = y_2 + \frac{q^2}{2gy_2^3}$$

$$E_2 = y_2 + \frac{(0.15)^2}{(2 \times 9.81)y_2^3}$$

$$1/12 = y_2 + 0.00236 \frac{1}{y_2^3}$$

مثال ۲-۱۸: کانال مستطیلی با عرض ۱/۵ متر جریان $2/7 m^3/s$ را با عمق ۱/۲

متر از خود عبور می‌دهد. اگر بخواهیم در کف کانال مانعی قرار دهیم، حداقل ارتفاع مانع برای اینکه جریان در روی آن بحرانی شود، چقدر است؟

حل:

$$E_1 = y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^3}$$

$$E_1 = 1/2 + \frac{(2/7)^2}{2 \times 9.81 \times (1/5 \times 1/2)^3} = 1/315 \text{ m}$$

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{(Q/b)^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{(2/7/1/5)^2}{9.81}} = 0.69 \text{ m}$$

$$E_2 = E_{\min} = \frac{3}{2} y_c = \frac{3}{2} \times 0.691 = 1/0.37 \text{ m}$$

$$E_1 = E_2 + \Delta Z \Rightarrow \Delta Z = E_1 - E_2 = 1/315 - 1/0.37 = 0/278 \text{ m}$$

در نتیجه حداقل ارتفاع مانع باید ۲۷/۸ سانتی متر باشد تا جریان روی آن بحرانی

شود.

مثال: یک کانال مستطیلی شکل به عرض ۴ متر و عمق ۳ متر جریان ۱۵ متر

مکعب بر ثانیه را از خود عبور می‌دهد. در انتهای کانال تبدیلی وجود دارد که قرار است حداقل عرض ممکن را داشته باشد. مقدار عرض حداقل چند متر است (مشروط بر اینکه شرایط بالادست تغییر نکند)؟

حل:

حداقل عرض ممکن مشروط بر اینکه جریان در بالادست تغییری نکند زمانی است که جریان در تبدیل بحرانی شود، بدون اینکه پدیده انسداد پیش آید. در این حالت انرژی مخصوص قبل از تنگ شدگی برابر با انرژی مخصوص حداقل درتنگ شدگی است بنابراین:

$$E_1 = E_{\min 2} \Rightarrow y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1} = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{Q^2}{gb^2}} \Rightarrow$$

$$3 + \frac{15^2}{2 \times 9.81 \times (4 \times 3)^2} = \frac{3}{2} \times \sqrt{\frac{15^2}{9.81 \times b^2}} \Rightarrow b = 1.63 \text{ m}$$

۷-۱۸ اندازه حرکت (مومتم) در کانال‌های باز

حل برخی از مسائل هیدرولیکی در کانال‌های روباز به کمک معادلات پیوستگی و انرژی امکان‌پذیر نیست و استفاده از معادله تغییر اندازه حرکت لازم می‌گردد. اصل اندازه حرکت هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرد که نیروهای خارجی مؤثر بر حجم کنترل انتخابی از جریان مشخص یا قابل صرفنظر کردن باشند. استفاده از معادله اندازه حرکت منجر به پیدایش نیروی مخصوص می‌گردد که تحلیل بعضی پدیده‌های موضعی نظیر پرش هیدرولیکی در کانال‌های روباز را آسان می‌کند. همچنین در این فصل با استفاده از رابطه ممتوم به مسئله پرش هیدرولیکی خواهیم پرداخت.

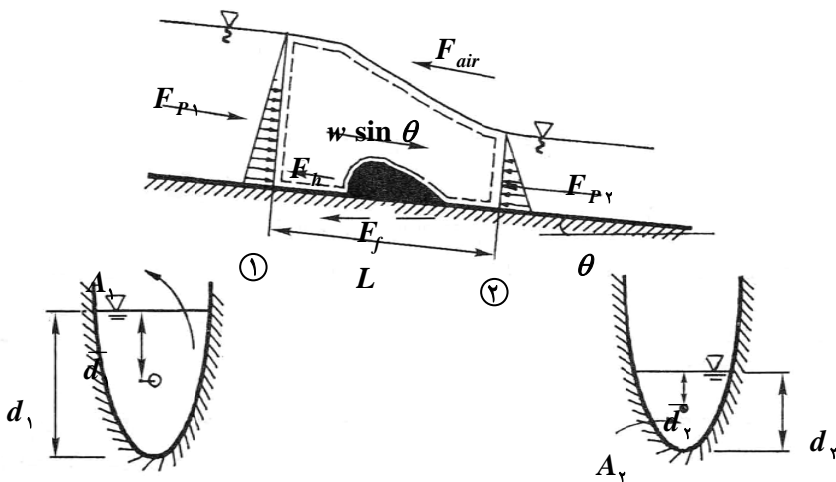
معادله اندازه حرکت بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum \bar{F} = \rho Q (\bar{V}_2 - \bar{V}_1) \quad (7-65)$$

معادله فوق، معادله تغییرات اندازه حرکت نامیده می‌شود که یک معادله‌ای برداری است. از آنجایی که ممکن است در مقاطع عرضی مختلف از یک کانال توزیع سرعت متفاوت باشد، ضریب تصحیح اندازه حرکت در معادله ۷-۶۵ اعمال می‌شود در نتیجه:

$$\sum \bar{F} = \rho Q (\beta_v \bar{V}_v - \beta_1 \bar{V}_1) \quad (۶۶-۷)$$

معادله تغییرات اندازه حرکت برای تعیین نیروهای خارجی مؤثر بر حجم کنترل انتخابی از یک سیستم مشخص مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک حجم کنترل مشخص بین مقاطع ۱ و ۲ (شکل ۷-۲۵) برای بررسی معادله تغییرات اندازه حرکت در نظر گرفته می‌شود. معادله ۶۶-۷ برای حجم کنترل انتخابی به شکل خط چین به صورت زیر نوشته می‌شود:



شکل ۷-۲۵ جریان در قسمتی از مسیر کانال باز

$$\begin{aligned} \sum \bar{F} &= \rho Q (\beta_v \bar{V}_v - \beta_1 \bar{V}_1) \\ \Rightarrow F_{P_1} - F_{P_2} - F_h - F_f - F_{air} + W \sin \theta &= \rho Q (\beta \bar{V}_v - \beta \bar{V}) \quad (۶۷-۷) \end{aligned}$$

که در رابطه فوق:

F_{P_1}, F_{P_2} : نیروهای فشاری در مقاطع ۱ و ۲

F_h : در صورت وجود مانعی در کف کانال (اگر طول کانال کوتاه باشد $F_f = 0$)

F_{air} : نیروی ناشی از مقاومت هوا بر روی جریان که معمولاً صفر در نظر گرفته

می‌شود.

برآیند مقادیر F_h و F_f و $w \sin \theta$ بدون در نظر گرفتن جهت اعمال آنها،

به صورت نیروهای خارجی نشان داده می‌شوند:

$$F_P - F_{P_r} - F_{ext} = \rho Q (\beta V_r - \beta V_1) \quad (68-7)$$

در جریان‌های یکنواخت و متغیر تدریجی می‌توان از قانون توزیع هیدرواستاتیکی فشار استفاده کرد در این صورت:

$$F_P = \gamma \bar{y}_1 A_1 \cos \theta$$

$$F_{P_r} = \gamma \bar{y}_r A_r \cos \theta$$

\bar{y}_1, \bar{y}_r فاصله مرکز سطح مقاطع A_1, A_r تا سطح آزاد آب می‌باشند.

در نتیجه با توجه به توضیحات فوق و اعمال روابط گفته شده در رابطه ۶۷-۷ رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\gamma \bar{d}_1 A_1 \cos \theta - \gamma \bar{d}_r A_r \cos \theta + F_{ext} = \rho Q (\beta_r V_r - \beta V_1) \quad (69-7)$$

$$\frac{F_{ext}}{\gamma} = \left(\frac{\beta_r Q}{g A_r} + \bar{d}_r A_r \cos \theta \right) - \left(\frac{\beta Q}{g A_1} + \bar{d}_1 A_1 \cos \theta \right) \quad (70-7)$$

F_{ext} نیروی خارجی وارد بر سطح کنترل مورد نظر می‌باشد.

۷-۱۹ کاربرد معادله اندازه حرکت در کانال‌های باز

۷-۱۹-۱ نیروی مخصوص

رابطه ۶۷-۷ شکل عمومی معادله اندازه حرکت را نشان می‌دهد که رابطه ۷۰-۷ با فرض هیدرواستاتیکی بودن فشار، از آن نتیجه شده است.

با فرض یکنواخت بودن سرعت در مقاطع ۱ و ۲ یعنی $\beta_1 = \beta_r = 1$ و $\cos \theta = 1$

و کم بودن شیب ($\theta < 6^\circ$) رابطه ۷۰-۷ به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$d = h = y \Rightarrow \bar{d} = \bar{h} = \bar{y}$$

$$\frac{F_{ext}}{\gamma} = \left(\frac{Q}{g A_r} + \bar{y}_r A_r \right) - \left(\frac{Q}{g A_1} + \bar{y}_1 A_1 \right) \quad (71-7)$$

رابطه فوق نشان می‌دهد که نسبت نیروهای خارجی به وزن مخصوص آب، برابر

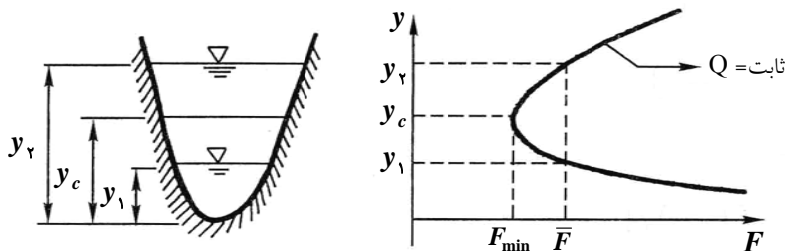
تفاضل دو عبارت مشابه در دو مقطع است. این عبارت بنابر تعریف، نیروی مخصوص آن مقطع نامیده می‌شود. یعنی:

$$F = \frac{Q^2}{gA} + \bar{y}A \quad (۷۲-۷)$$

بنابراین با توجه به تعریف نیروی مخصوص نسبت نیروهای خارجی به وزن مخصوص آب به صورت زیر تعریف می شود:

$$F = \frac{F_{ext}}{\gamma} = \gamma \frac{wsin\theta - F_F - F_h}{\gamma} = F_F - F_h \quad (۷۳-۷)$$

در معادله (۷۲-۷) سطح مقطع (A) و لنگر اول سطح مقطع نسبت به سطح آزاد ($\bar{y}A$) تابعی از y می باشند. بنابراین به ازای یک دبی مشخص تابعی از y می باشد و می توان منحنی را رسم نمود. این منحنی فقط دارای مجانب افقی است. (شکل ۷-۲۶).



شکل ۷-۲۶ منحنی نیروی مخصوص

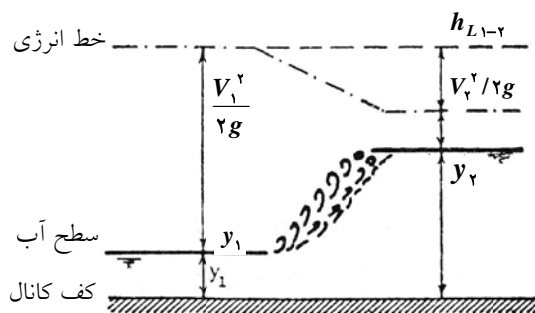
از منحنی $F-y$ نکات زیر نتیجه گیری می شوند:

۱. مقدار حداقل نیروی مخصوص (F_{min}) در عمق بحرانی حاصل می شود.
 ۲. به ازای هر نیروی ثابت (F) دو عمق جریان وجود جریان وجود دارد. این دو عمق که یکی از آنها وضعیت فوق بحرانی و دیگری وضعیت زیر بحرانی جریان را نشان می دهد، اعماق مزدوج (Conjugate Depths) نامیده می شوند.
 ۳. چون حداکثر دبی عبوری در جریان بحرانی است، بنابراین با توجه به نکته ۱ به ازای نیروی مخصوص حداقل، دبی عبوری حداکثر خواهد بود.
- مقدار F_{min} در یک کانال مستطیلی برابر خواهد بود با:

$$F_{min} = \frac{Q^2}{gby_c} + \frac{by_c^2}{2} = \frac{bq^2}{gy_c} + \frac{by_c^2}{2} = \frac{3}{2}by_c^2$$

۲-۱۹-۷ پرش هیدرولیکی

پرش یا جهش هیدرولیکی یک جریان متغیر سریع است و عبارتست از تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی که این تغییر حالت در مسیر نسبتاً کوتاهی بوده و همراه با آشفته‌گی و افت انرژی بسیار زیاد می‌باشد (شکل ۷-۲۷)



شکل ۷-۲۷ تبدیل جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی توسط پرش هیدرولیکی

با توجه به اینکه پرش در فاصله کوتاهی از کانال صورت می‌گیرد لذا می‌توان حجم کنترل مشخصی بین مقطع ۱ و ۲ (قبل و بعد از پرش) انتخاب کرد (شکل ۷-۲۱). سپس با استفاده از معادله اندازه حرکت می‌توان نوشت:

$$\frac{F_{ext}}{\gamma} = F_2 - F_1, \quad F_{ext} = 0 \Rightarrow F_2 = F_1$$

یا

$$\frac{Q^2}{gA_1} + \bar{y}_1 A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{y}_2 A_2 \quad (۷-۷۴)$$

به عبارت دیگر نیروی مخصوص در قبل و بعد از پرش هیدرولیکی ثابت باقی می‌ماند و اعماق y_1, y_2 ، اعماق مزدوج متعلق به یک نیروی مخصوص ثابت می‌باشند. با مشخص بودن y_1, y_2 مقدار $(y_2 - y_1)$ که ارتفاع پرش نامیده می‌شود به دست می‌آید. پس از تعیین اعماق مزدوج، مقدار افت انرژی در پرش ΔE_f توان از دست رفته در طول پرش (P_f) و راندمان پرش (η) با استفاده از رابطه انرژی تعیین می‌شوند.

رابطه انرژی:

$$E_1 - \Delta E_j = E_v \quad (7-75)$$

$$\Delta E_j = E_1 - E_v = \left(y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(y_v + \frac{V_v^2}{2g} \right) \quad (7-76)$$

$$P_j = \gamma Q \Delta E_j \quad (7-77)$$

$$\eta = \frac{E_v}{E_1} \times 100 \quad (7-78)$$

حل: رابطه ۷-۷۴ با استفاده از تکنیک آزمون و خطا، یا روش‌های عددی دیگر و یا با استفاده از نمودارها و جداول ارائه شده می‌باشد.

۷-۲۰ مقایسه بین منحنی انرژی مخصوص و نیروی مخصوص

۱. در نمودار $E-y$ دو عمق با یک انرژی مخصوص را اعماق متناوب گویند.
۲. در نمودار $F-y$ دو عمق با یک نیروی مخصوص را اعماق مزدوج گویند در صورتیکه این دو عمق متعلق به یک پرش هیدرولیکی باشند y_1 ، عمق اولیه و y_2 عمق ثانویه پرش هیدرولیکی است.

رابطه بین اعماق مزدوج بدین صورت است:

$$\frac{y_v}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (7-79)$$

$$\frac{y_1}{y_v} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_v^2} - 1 \right) \quad (7-80)$$

و میزان افت در طول پرش هیدرولیکی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta E = \frac{(y_v - y_1)^3}{4y_1 y_v} \quad (7-81)$$

۳. منحنی $E-y$ دارای دو مجانب است ولی منحنی $F-y$ فقط دارای یک مجانب است.

۴. در منحنی $E-y$ مقدار q_{min} در عمق بحرانی رخ می‌دهد و در منحنی $F-y$ مقدار F_{min} در همین عمق (عمق بحرانی) رخ می‌دهد.

۷-۲۱ مشخصات جریان یکنواخت

جریان یکنواخت (*Uniform Flow*) به جریانی اطلاق می‌شود که در آن نیروهای عامل

(نیروی وزن سیال) و بازدارنده حرکت (تنش‌های برشی ناشی از جدار کانال در مقابل حرکت سیال) به تعادل رسیده باشند. در این حالت در جهت جریان شتابی وجود نخواهد داشت و مشخصات جریان به ازای دبی ثابت در تمام مقاطع ثابت است یعنی:

$$\frac{dQ}{dx} = 0, \quad \frac{dV}{dx} = 0, \quad \frac{dy}{dx} = 0.$$

در این جریان شیب طولی کانال (S_0)، شیب سطح آب (S_w) و شیب خط انرژی (S_f) با یکدیگر مساوی خواهند شد یعنی:

$$S = S_0 = S_w = S_f$$

با توجه به شرایط فوق جریان یکنواخت دائمی (steady Uniform Flow) تعریف می‌شود و به دلیل آنکه جریان یکنواخت غیردائمی (Unsteady Uniform Flow) عملاً وجود ندارد، جریان فوق به اختصار جریان یکنواخت (جریان نرمال) نامیده می‌شود. عمق جریان در این حالت به عمق نرمال (y_0 یا y_n) موسوم است. اگر y_n عمق نرمال y_c عمق بحرانی در یک کانال باشد، یکی از سه حالت زیر اتفاق می‌افتد:

۱. اگر $y_n > y_c$ باشد، در چنین حالتی جریان زیر بحرانی (subcritical Flow) است.

۲. اگر $y_n = y_c$ باشد، در چنین حالتی جریان بحرانی (Critical Flow) است.

۳. اگر $y_n < y_c$ باشد، در چنین حالتی جریان فوق بحرانی (super Critical Flow) است.

۷-۲۲ تنش برشی متوسط جدار کانال

در کانال‌های روباز برای جریان یکنواخت تنش برشی در سطح آزاد آب تقریباً صفر و در کف کانال حداکثر و در راستای عمق جریان از سطح آب تا کف کانال به‌طور یکنواخت افزایش می‌یابد. به علاوه به علت تنوع شکل مقطع جریان در کانال‌های روباز، هر شکل مقطع توزیع تنش برشی مربوط به خود را دارد. با وجود این تفاوت‌ها و کافی نبودن اطلاعات در مورد توزیع تنش برشی در مقاطع با شکلهای مختلف، از تنش برشی متوسط در کانال‌های استفاده می‌شود.

تنش برشی متوسط بر روی کف کانال از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tau_0 = \gamma R S \quad (۷-۸۲)$$

در رابطه فوق τ_0 : تنش برشی متوسط بر روی کف کانال؛ R شعاع هیدرولیکی و γ زون مخصوص آب می‌باشد. لازم به یادآوری است که در جریان‌های یکنواخت به علت تساوی شیب کف کانال و شیب خط انرژی S می‌تواند شیب کف کانال انتخاب شود. اما در جریان‌های غیریکنواخت و غیردائمی S شیب خط انرژی خواهد بود.

۲۳-۷ سرعت متوسط در جریان یکنواخت

سرعت متوسط در جریان یکنواخت از دو فرمول شزی و مانینگ استفاده می‌شود.

۱-۲۳-۷ فرمول شزی (Chezy)

در سال ۱۷۶۸ میلادی طراحی کانال آبرسانی شهر پاریس به عهده آنتوان شزی مهندس فرانسوی واگذار شد. او با فرض تناسب تنش برشی متوسط جدار کانال (τ_0) با مربع سرعت متوسط (V^2) فرمول ساده زیر را برای جریان‌های یکنواخت به دست آورد:

$$\tau_0 = K\rho V^2 \quad (۸۳-۷)$$

که در اینجا K ضریبی بدون بعد است و مقدار آن به زبری جدار و شکل مقطع کانال بستگی دارد. با برابر قرار دادن دو رابطه ۸۲-۷ و ۸۳-۷ می‌توان سرعت متوسط جریان را محاسبه کرد:

$$K\rho V^2 = \gamma RS \Rightarrow V = \sqrt{\frac{g}{K}} \sqrt{RS} \quad (۸۴-۷)$$

اگر به جای $\sqrt{\frac{g}{K}}$ ضریب C به کار گرفته شود رابطه ۸۴-۷ به صورت زیر ساده می‌شود:

$$V = C\sqrt{RS} \quad (۸۵-۷)$$

فرمول فوق به فرمول شزی و ضریب C به ضریب شزی معروف است. برای تعیین ضریب شزی، این ضریب با ضریب اصطکاک f در فرمول دارسی ویسباخ در لوله‌ها تحت‌های تحت فشار مقایسه می‌شود:

$$h_f = f \frac{LV^2}{D\gamma g} \quad (۸۶-۷)$$

اگر در لوله‌های با مقطع دایره‌ای به جای D ، $4R$ قرار داده شود و $\frac{h_f}{L}$ برابر با S_f قرار داده شود. نظر به اینکه در جریانهای یکنواخت کلیه شیبها با یکدیگر مساویند رابطه ۷-۸۶ به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\frac{h_f}{L} = S_f = \frac{fV^2}{4R^2g} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{RS} \quad (۷-۸۷)$$

با مقایسه دو رابطه ۷-۸۵ و ۷-۸۷، مقدار ضریب شزی بر حسب f برابر خواهد شد با:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (۷-۸۸)$$

۲۷-۲۳-۲ فرمول مانینگ

رابطه مانینگ یکی از متداولترین روابط مورد استفاده در جریان یکنواخت می باشد که در سال ۱۸۸۹ توسط یک مهندس ایرلندی ارائه شده است.

مانینگ نشان داد که $C \propto R^{\frac{1}{6}}$ می بوده و ضریب این تناسب $\frac{1}{n}$ می باشد یعنی:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad (۷-۸۹)$$

که n همان ضریب بستر کانال است. با جایگذاری ضریب C به دست آمده از رابطه ۷-۸۹، رابطه زیر حاصل خواهد شد:

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (۷-۹۰)$$

$$Q = \frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (۷-۹۱)$$

رابطه‌های فوق در سیستم متریک بوده و در سیستم انگلیسی عدد $1/486$ در روابط فوق ضرب می شود یعنی:

$$V = \frac{1/486}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (۷-۹۲)$$

ضریب n عمدتاً از جداول و تصاویر کمکی ارائه شده (که در اکثر کتب هیدرولیکی موجود می باشد) تعیین می گردد. اما روش‌های تجربی دیگری نیز برای تعیین n مورد استفاده قرار می گیرند که فرمول استریکلر (*Strickler*) یکی از این روابط

است.

$$n = \frac{d_{50}^{\frac{1}{2}}}{21/1} \quad (93-7)$$

در رابطه فوق d_{50} اندازه متوسط دانه‌ها (شماره الکی که ۵۰٪ وزنی ذرات از آن عبور کند) می‌باشد که برحسب متر بیان می‌شود. این رابطه در مورد کانال‌های طبیعی کاربرد دارد.

۲۴-۷ محاسبات جریان یکنواخت

منظور از محاسبات جریان یکنواخت، شناخت معلومات در یک مساله هیدرولیکی و پیدا کردن پارامترهای مجهول بر اساس روابط جریان یکنواخت می‌باشد. با توجه به رابطه مانینگ یا شزی و ترکیب با رابطه پیوستگی دو پارامتر قرار دادی وجود دارند که عبارتند از:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (94-7)$$

$$Q = CA\sqrt{R}\sqrt{S} \quad (95-7)$$

که در فرمول‌های فوق بر حسب قرارداد، $CA\sqrt{R}$ یا $\frac{1}{n}AR^{\frac{2}{3}}$ را ضریب انتقال و

در فرمول مانینگ $AR^{\frac{2}{3}}$ را فاکتور سطح گویند.

به‌طور کلی انواع مسائلی که در مطالعات جریان یکنواخت پیش می‌آید در ۵

گروه زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

۱. S, n, y و مشخصات هندسی مقطع جریان مشخص و Q, V مجهول می‌باشند.

۲. n, y, Q و مشخصات هندسی مقطع جریان مشخص و S مجهول می‌باشند.

۳. S, y, Q و مشخصات هندسی مقطع جریان مشخص و n مجهول می‌باشد.

۴. S, n, Q و مشخصات هندسی مقطع جریان مشخص و y مجهول می‌باشد.

۵. S, n, Q و هندسه عمومی کانال معلوم ولی مشخصات هندسی مقطع جریان

باید محاسبه گردد. در صورتی که مسائل از نوع ۱ و ۲ و ۳ باشند، مجهولات به طریق

صریح به‌دست می‌آیند و اگر مسائل از نوع ۴ و ۵ باشند باید از تکنیک عددی آزمون و

خطا استفاده کرد.

۲۵-۷ زبری معادل

برای استفاده از فرمول مانینگ در کانال‌های با جنس جدار متفاوت در نقاط مختلف باید n (زبری) معادلی برای این نوع کانال‌ها تعیین گردد. در اینجا روش‌های مختلفی برای محاسبه زبری معادل مورد بررسی قرار می‌گیرند، که روش هورتن - انشتین یکی از آنها است.

رابطه هورتن - انشتین: در این رابطه فرض بر این است که سرعت متوسط در هر یک از مساحت‌های مساوی و برابر سرعت متوسط کل جریان بر مبنای زبری معادل می‌باشد.

$$n_e = \left(\frac{\sum n_i^{\frac{2}{3}} P_i}{P^{\frac{2}{3}}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (۹۶-۷)$$

۲۶-۷ بهترین مقطع هیدرولیکی

هدف در طراحی کانال‌ها در تعیین شکل و اندازه سطح مقطع کانال برای انتقال دبی طرح بین دو نقطه با اختلاف ارتفاع معین به گونه‌ای مطمئن و اقتصادی باشد. با توجه به رابطه مانینگ (۹۱-۷) می‌توان نوشت:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (۹۷-۷)$$

روش اول: فرمول مانینگ را می‌توانیم به صورت زیر بیان نماییم:

$$Q = \frac{1}{n} A S^{\frac{1}{2}} \frac{A^{\frac{5}{3}}}{P^{\frac{2}{3}}} = \frac{A^{\frac{5}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{n P^{\frac{2}{3}}} \quad (۹۸-۷)$$

به ازای n , S و A ثابت، دبی انتقالی کانال هنگامی حداکثر است که محیط خیس شده حداقل باشد. چنین مقطعی را می‌توان بهترین مقطع هیدرولیکی نامید. در بین کلیه مقاطع کانال‌های باز، مقطع نیم دایره بهترین مقطع می‌باشد زیرا به ازای مساحت ثابت دارای کمترین محیط خیس شده است.

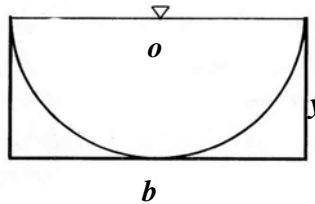
روش دوم: رابطه (۹۸-۷) می‌تواند به صورت رابطه (۹۹-۷) مرتب شود:

$$A = \frac{Q^{3/5} n^{3/5}}{S^{3/10}} P^{2/5} = K_1 P^{2/5} \quad (۷-۹۹)$$

در رابطه (۱) ماکزیمم کردن K_1 (ماکزیمم نمودن Q) به ازای A ثابت معادل با مینیمم کردن A به ازای یک K_1 ثابت می‌باشد که هر دو تعریف به P حداقل منجر خواهند شد. لذا مترادف با تعریف قبلی می‌توان گفت که بهترین مقطع هیدرولیکی مقطعی است که به ازای S, n, Q مشخص دارای مساحت (خاکبرداری) و پیرامون مرطوب (پوشش) حداقل باشد.

۷-۲۶-۱ بهترین مقطع هیدرولیکی مستطیلی

مقطع مستطیلی با ابعاد b و y در شکل (۷-۲۸) نشان داده شده است. به‌طور کلی از لحاظ ریاضی برای اینکه مقدار محیط خیس شده حداقل باشد، لازم است که مشتق آن نسبت به متغیر وابسته (در اینجا y) وابسته برابر صفر شود.



شکل ۷-۲۸ بهترین مقطع هیدرولیکی مستطیلی

بنابراین با یک سطح مقطع مشخص و شیب وزبری معلوم، محیط خیس شده (P) وقتی حداقل است که:

$$A = by \Rightarrow b = \frac{A}{y}$$

$$P = b + 2y \Rightarrow P = \frac{A}{y} + 2y$$

به ازاء A ثابت داریم:

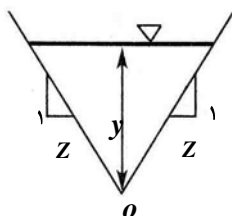
$$\frac{dP}{dy} = 0 \Rightarrow -\frac{A}{y^2} + 2 = 0$$

$$A = 2y^2 \Rightarrow by = 2y^2 \Rightarrow b = 2y \quad (۷-۱۰۰)$$

پس در بهترین مقطع هیدرولیکی مستطیلی عرض کف دو برابر عمق جریان انتخاب می‌شود و در نتیجه می‌توان نیم دایره‌ای مطابق شکل (۷-۲۸) در این مقطع محاط کرد.

۷-۲۶-۲ بهترین مقطع هیدرولیکی مثلثی

از لحاظ ریاضی برای اینکه مقدار محیط خیس شده حداقل باشد، لازم است که مشتق آن نسبت به متغیر وابسته (در اینجا شیب کناره (z) می‌باشد) برابر صفر شود.



شکل ۷-۲۹ بهترین مقطع هیدرولیکی مثلثی

بنابراین:

$$A = zy^2$$

$$P = 2\sqrt{1+z^2} y$$

$$P^2 = 4(1+z^2)y^2 = 4(1+z^2) \frac{A}{z}$$

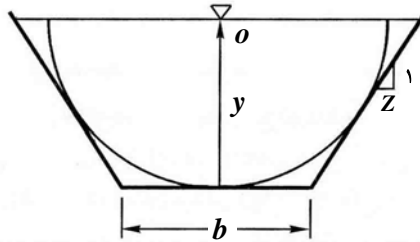
$$\frac{dP^2}{dz} = 0 \Rightarrow \left(1 - \frac{1}{z^2}\right) = 0 \Rightarrow z = +1$$

لذا بهترین مقطع هیدرولیکی مثلثی زاویهٔ راس 90° خواهد داشت.

۷-۲۶-۳ بهترین مقطع هیدرولیکی ذوزنقه‌ای

از لحاظ ریاضی برای اینکه مقدار محیط خیس شده حداقل باشد، لازم است که مشتق آن نسبت به متغیر وابسته برابر صفر شود. در کانال ذوزنقه‌ای شکل با شیب جانبی z (افقی) در مقابل ۱ (عمودی) P به مقادیر y و z وابسته است؛ لذا برای به حداقل

رساندن P باید $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$ و $\frac{\partial P}{\partial z} = 0$ باشند.



شکل ۷-۳۰ بهترین مقطع هیدرولیکی ذوزنقه‌ای

بهترین مقطع هیدرولیکی با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید:

$$A = (b + zy)y$$

$$P = b + 2\sqrt{1+z^2}y = \frac{A}{y} - zy + 2y\sqrt{1+z^2}$$

$$\frac{dP}{dy} = 0 \Rightarrow -\frac{A}{y^2} + 2\sqrt{1+z^2} - z = 0$$

$$-\frac{(b+zy)}{y} + 2\sqrt{1+z^2} - z = 0$$

$$b = 2y(\sqrt{1+z^2} - z) \rightarrow b + 2zy = 2y\sqrt{1+z^2} \quad (7-101)$$

رابطه () مشخصات بهترین مقطع به ازاء z ثابت را نشان می‌دهد. در صورتی

که هم به عنوان متغیر در نظر گرفته شود علاوه بر $\frac{\partial P}{\partial y}$ باید $\frac{\partial P}{\partial z}$ را هم برابر صفر قرار

داد که در این حالت معادله جدید مقدار z را برابر $\sqrt{3}/3$ به دست می‌دهد و شکل مقطع

نصف یک شش ضلعی منتظم، با شیب کناره 60° نسبت به افق خواهد بود.

تست‌های فصل هفتم: جریان در کانال‌های باز

۱. جریان متغیر تدریجی عبارت است از:

(۱) دائمی یکنواخت

(۲) دائمی غیر یکنواخت

(۳) غیر دائمی یکنواخت

(۴) غیر دائمی غیر یکنواخت

۲. در یک جریان دائمی S.V.F، در یک مجرای باز منشوری شکل.....

- ۱) دبی بر اساس زمان تغییر می‌کند.
- ۲) عمق در امتداد طول جریان تغییر نمی‌کند.
- ۳) عمق بتدریج بر اساس زمان تغییر می‌کند.
- ۴) دبی جریان در طول مجرا تغییر می‌کند.
۳. کدام جریان قابل شناسایی نیست (اتفاق نمی‌افتد)؟
 - ۱) دائمی یکنواخت
 - ۲) غیردائمی یکنواخت
 - ۳) دائمی غیر یکنواخت
 - ۴) غیردائمی متغیر
۴. جریان موج حاصله از سیلاب رودخانه چه نوع جریانی است؟
 - ۱) جریان دائمی متغیر تدریجی
 - ۲) جریان غیر دائمی متغیر تدریجی
 - ۳) جریان دائمی متغیر سریع
 - ۴) جریان غیر دائمی متغیر سریع
۵. در یک سد مخزنی که ارتفاع آب در بالاست آن h می‌باشد، در اثر وقوع زلزله شکسته و آب به طرف پایین دست جریان می‌یابد.

جریان آب ایجاد شده در رودخانه.....

 - ۱) یکنواخت و غیر دائمی است.
 - ۲) یکنواخت و دائمی است
 - ۳) غیر یکنواخت و دائمی است.
 - ۴) غیر یکنواخت و غیر دائمی است.
۶. در یک جریان صفحه‌ای آب با عمق 0/01 مترو سرعت 0/01 متر بر ثانیه چه رژیمی از جریان حاکم است؟ (لزجت سینماتیکی آب برابر 1×10^{-6} مترمربع بر ثانیه است)
 - ۱) زیر بحرانی - آرام
 - ۲) زیر بحرانی - متلاطم
 - ۳) فوق بحرانی - متلاطم
 - ۴) فوق بحرانی - آرام
۷. ضریب تصحیح انرژی جنبشی (Kinetic Energy Correction Factor) یا ضریب کریولیس (α)
 - ۱) برابر است با $a = \frac{1}{A} \int_A \left(\frac{v}{V} \right)^2 dA$
 - ۲) برابر است با $a = \frac{1}{A} \int_A \left(\frac{v}{V} \right)^2 dA$
 - ۳) برابر است با $a = \frac{1}{A} \int_A \left(\frac{v}{V} \right) dA$
 - ۴) دارای معادله ابعادی سرعت است.
۸. ضریب تصحیح انرژی جنبشی جریان (Kinetic Energy Corretion Factor) یا ضریب کریولیس (α)
 - ۱) بیشتر از ۳ است.

(۲) بیشتر از ۲ است و باید در نظر گرفته شود.

(۳) کمتر از ۱ است.

(۴) در کارهای مهندسی و عملی برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود.

۹. در رابطه با ضریب تصحیح انرژی جنبشی (ضریب α) کدام عبارت صحیح می‌باشد؟

(۱) در جریان آرام مقدار ضریب α کمتر از جریان متلاطم می‌باشد.

(۲) در جریان آرام مقدار ضریب α تقریباً برابر ۱ می‌باشد.

(۳) در جریان متلاطم مقدار ضریب α به مراتب بزرگتر از ۱ است.

(۴) در جریان متلاطم این ضریب معادل یک بوده، لذا در معادلات جریان متلاطم

نیازی به در نظر گرفتن آن نمی‌باشد.

۱۰. توزیع سرعت در یک کانال مستطیلی به عرض ۲ متر و ارتفاع ۱ متر به صورت

$v = 2y$ می‌باشد. مقادیر ضریب تصحیح انرژی جنبشی (α) و ضریب تصحیح

مومتّم (β) عبارتند از:

$$\beta = 1/3, \quad \alpha = 2 \quad (۲) \quad \beta = 1/2, \quad \alpha = 1/5 \quad (۱)$$

$$\beta = 1/7, \quad \alpha = 1/8 \quad (۴) \quad \beta = 1/5, \quad \alpha = 1/2 \quad (۳)$$

۱۱. در یک کانال مستطیل شکل به عمق ۲ متر با پرتاب یک تکه سنگ موجی ایجاد

می‌شود که در مدت ۱۰ ثانیه مسافت ۵۰ متر را طی می‌کند، سرعت واقعی آب در

کانال چند متر بر ثانیه است؟

$$2/5 \quad (۲) \quad 0/57 \quad (۱)$$

$$5 \quad (۴) \quad 4/4 \quad (۳)$$

۱۲. در یک کانال مستطیل شکل به عمق 0/6 متر با پرتاب سنگی موجی ایجاد می‌شود

که در مدت زمان ۱۰ ثانیه مسافت ۶۰ متر را طی می‌کند. سرعت واقعی آب در

کانال چند متر بر ثانیه است؟

$$3/57 \quad (۲) \quad ۳ \quad (۱)$$

$$2/57 \quad (۴) \quad ۶ \quad (۳)$$

۱۳. در یک کانال مستطیلی به عرض ۱۰ متر، آب با دبی $۲ \frac{m^3}{s}$ در جریان است. در

صورتی که عمق جریان در مقطعی از آن 0/6m باشد، وضعیت جریان در این مقطع

و مقدار حداقل انرژی مخصوص در این مقطع به ترتیب عبارتند از:

- (۱) جریان فوق بحرانی و 0/49 متر (۲) جریان زیر بحرانی و 1/11 متر
- (۳) جریان بحرانی و 1/11 متر (۴) جریان فوق بحرانی و 1/11 متر
۱۴. در یک مجرای مستطیل شکل، عمق آب ۲ متر و شعاع تقعر کف ۱۰ متر می‌باشد اگر دبی در واحد عرض برابر $20 (m^3/s)$ باشد، مقدار انرژی ویژه چند متر است؟
- $g = 10 m/s^2$
- (۱) ۵ (۲) ۶ (۳) ۷ (۴) ۹
۱۵. در یک کانال با مقطع مستطیل، اگر حداقل انرژی مخصوص $E_{min} = 1/5 m$ باشد عمق جریان در شرایط بحرانی (V_c) چند متر است؟
- (۱) 0/5 (۲) ۱ (۳) 1/5 (۴) 2/25
۱۶. در یک کانال مستطیلی اگر عمق جریان قبل و بعد از دریچه به ترتیب 60cm, 2/5m باشد، شدت جریان در واحد عرض برابر با چند $\frac{m^3}{s.m}$ است؟
- (۱) 3/27 (۲) 3/77 (۳) 7/37 (۴) 14/22
۱۷. در قسمتی از یک کانال مستطیلی به عرض ۳ متر، عمقهای متناوب به ترتیب 3/86 و ۱ متر می‌باشند. دبی عبوری در این کانال چند متر مکعب در ثانیه است؟
- (۱) 7/29 (۲) 11/58 (۳) 23/28 (۴) 32/38
۱۸. در یک کانال مستطیل شکل، عمقهای متناوب برابر ۱ متر و ۲ متر می‌باشند. انرژی مخصوص چند متر است؟
- (۱) 2/33 (۲) 2/6 (۳) 3/5 (۴) 12
۱۹. در انتهای سرریزی جریان آب از قوس مقعری به شعاع ۱۰ متر عبور عبور می‌کند. اگر دبی در واحد عرض ۲۰ متر مکعب در ثانیه در متر و عمق آب ۲ متر باشد، مقدار انرژی مخصوص در محل قوس چند متر است؟
- (۱) 4/04 (۲) 5/06

۹/۱۴ (۳) ۱۰ (۴)

۲۰. در یک کانال مستطیلی عمق بحرانی $1/65$ متر می‌باشد. بار انرژی مخصوص حداقل چند متر است؟

۰/۸۲ (۱) ۱ (۲)

۱/۶۵ (۳) ۲/۴۷۵ (۴)

۲۱. دو عمق متناوب (Alternates) در یک کانال مستطیل شکل به عرض ۳ متر به ترتیب $3/5$ و $0/6$ متر می‌باشند، دبی جریان بر حسب m^3/s در کانال چقدر است؟

۱/۰۵ (۱) ۱۳/۸ (۲)

۱۶/۷ (۳) ۱۹/۵ (۴)

۲۲. جریان با شدت $q = ۱۰ m^2/s$ در یک کانال مستطیلی در حرکت است. حداقل انرژی مخصوص این جریان E_{min} برابر است با: (شتاب ثقل $۱۰ m/s^2$)

۰/۵ متر (۱) ۰/۷ متر (۲)

۱/۰۰ متر (۳) ۰/۳ متر (۴)

۲۳. عمقهای متناظر انرژی مخصوص معینی (مانند E) در یک کانال با مقطع مستطیلی بسیار عریض به ترتیب $h_1 = ۱$, $h_2 = ۲$ متر می‌باشند. با فرض $g = ۱۰ (m/s^2)$ مقدار دبی در واحد عرض کانال (q) برابر است با:

۰/۱۹ m/s (۱) $۵/۱۶ m^2/s$ (۲)

$۸/۹۴ m^2/s$ (۳) $۶/۳۲ m^2/s$ (۴)

۲۴. در یک کانال با مقطع مستطیلی حداقل انرژی مخصوص جریان $E_{min} = ۴m$ است.

اگر عرض این کانال $2/5$ متر باشد دبی جریان عبارت است از:

$Q = ۳۴ m^3/s$ (۱) $Q = ۴/۳ m^3/s$ (۲)

$Q = ۴۳ m^3/s$ (۳) $Q = ۳/۴ m^3/s$ (۴)

۲۵. هر گاه جریان در یک کانال مستطیلی شکل بحرانی باشد، دبی بر واحد عرض این کانال چند متر مکعب بر ثانیه بر متر خواهد بود اگر انرژی مخصوص برابر ۳ متر باشد؟

۱/۰ (۱) ۳/۱۳ (۲)

۵/۱۷۶ (۳) ۸/۸۶ (۴)

۲۶. آب با دبی $4/5 m^3/s$ و عمق $1/4 m$ ، در یک کانال مستطیلی با عرض کف 2m جریان دارد. حداکثر ارتفاع یک مانع موضعی در کف کانال چند سانتیمتر می‌تواند باشد تا در بالا دست مانع انسداد (پنگاب) backwater ایجاد نشود؟

- | | |
|--------|--------|
| (۱) ۱۲ | (۲) ۲۶ |
| (۳) ۳۳ | (۴) ۷۴ |

۲۷. کانال مستطیلی با عرض 1/5 متر، جریان 2/7 متر مکعب در ثانیه را با عمق $\frac{1}{4}$ متر حمل می‌کند. اگر بخواهیم در کف کانال مانعی قرار دهیم، حداقل ارتفاع مانع برای اینکه جریان از روی آن بحرانی شود، چقدر است. ($g = 10 m/s^2$)

- | | |
|-----------------|-----------------|
| (۱) ۲۸ سانتیمتر | (۲) ۵۲ سانتیمتر |
| (۳) ۶۸ سانتیمتر | (۴) 1/03 متر |

۲۸. مقطع کنترل.....

- (۱) محل نصب دریچه است.
- (۲) محلی است که در آن جریان بحرانی شود.
- (۳) محل کنترل n مانینگ است.
- (۴) محل اندازه گیری سرعت جریان است.

۲۹. یک کانال مستطیلی به عرض ۲ متر، جریان ۳ متر مکعب بر ثانیه را با عمق 1/5 متر حمل می‌کند. اگر بخواهیم در یک نقطه مانعی در کف قرار دهیم، به‌طوریکه جریان روی مانع بحرانی شود، مینیمم ارتفاع مانع چندسانتی متر باید باشد؟ ($g = 9/8 m/s^2$)

- | | |
|--------|--------|
| (۱) ۳۰ | (۲) ۵۵ |
| (۳) ۶۳ | (۴) ۹۱ |

۳۰. جریان در کانالی با مقطع مستطیلی به‌صورت زیر بحرانی است. اگر در طول کوتاهی از مسیر در کف کانال فرو رفتگی ایجاد شود، عمق آب در محل فرو رفتگی نسبت به عمق آب در بالا دست.....

- (۱) کمتر است.
- (۲) تغییر نمی‌کند.
- (۳) زیادتر است.
- (۴) برابر عمق بحرانی می‌شود

۳۱. مقطع کنترل در جریانهای با سطح آزاد مقطعی است که در آن:

(۱) دبی ماکزیمم است.

(۲) سطح مقطع ماکزیمم است.

(۳) شدت جریان به حداقل می‌رسد.

(۴) رابطه معینی بین دبی و عمق جریان وجود دارد.

۳۲. در یک کانال مستطیلی عمق جریان در بالای یک سرریز پهن $y = 0.5m$ است. اگر

عرض کانال ۳ متر باشد دبی جریان (Q) چند متر مکعب بر ثانیه است؟

(۱) 0/32 (۲) 2/93

(۳) 3/03 (۴) 3/3

۳۳. مقطع یک کانال با جریان زیر بحرانی به‌طور موضعی تنگ می‌شود. رژیم جریان در

مقطع تنگ شده کانال کدام است؟

(۱) جریان بحرانی یا فوق بحرانی بوده و سطح آب بالا می‌رود.

(۲) جریان زیر بحرانی یا فوق بحرانی بوده و سطح آب ثابت می‌ماند.

(۳) جریان زیر بحرانی یا بحرانی بوده و سطح آب پایین می‌افتد.

(۴) در مقطع تنگ شده جهش هیدرولیکی ایجاد می‌شود.

۳۴. یک کانال مستطیل شکل به عرض ۴ متر و عمق ۳ متر جریان ۱۵ متر مکعب بر

ثانیه را از خود عبور می‌دهد. در انتهای کانال تبدیلی وجود دارد که قرار است

حداقل عرض ممکن را داشته باشد. مقدار عرض حداقل چند متر است (مشروط

بر اینکه شرایط بالا دست تغییر نکند)؟

(۱) 1/38 (۲) 1/5

(۳) 1/63 (۴) 2/5

۳۵. در یک کانال مستطیل شکل عدد فرود برای عمق 0/6 متر برابر ۳ می‌باشد مقدار

دبی بحرانی چند متر است؟

(۱) 3/12 (۲) 1/8

(۳) 1/8 (۴) 1/25

۳۶. جریان از مخزن سدی وارد کانال مستطیلی می‌شود. اگر رقوم سطح آب مخزن

نسبت به رقوم کف کانال در محل آبگیر ۹ متر باشد، حداکثر دبی عبوری در واحد

عرض کانال بر حسب متر مکعب در ثانیه در متر چقدر است؟

$$66/49 \quad (۲) \qquad ۷۶ \quad (۱)$$

$$۴۴ \quad (۴) \qquad ۴۶ \quad (۳)$$

۳۷. کانال دوزنقه‌ای با عرض کف ۲ متر و شیب دیواره ۱:۱، جریان 5/53 متر مکعب در ثانیه را حمل می‌کند، عمق بحرانی برای این کانال چند سانتیمتر است؟

$$۹۲ \quad (۲) \qquad ۸۰ \quad (۱)$$

$$۱۳۰ \quad (۴) \qquad ۱۲۰ \quad (۳)$$

۳۸. در مورد محل کنترل جریانهای فوق بحرانی و زیر بحرانی در کانال‌ها کدام حالت صحیح است؟

(۱) جریان فوق بحرانی از بالا دست و جریان زیر بحرانی از پایین دست کنترل می‌شوند.

(۲) جریان فوق بحرانی از پایین دست و جریان زیر بحرانی از بالا دست کنترل می‌شوند.

(۳) جریان‌های فوق بحرانی و زیر بحرانی از بالا دست کنترل می‌شوند.

(۴) جریان‌های فوق بحرانی و زیر بحرانی از پایین دست کنترل می‌شوند.

۳۹. در یک کانال مستطیلی جریان فوق بحرانی با عدد فرود ۲ و عمق جریان 0/63 متر برقرار است. عمق بحرانی این کانال چند متر است؟

$$0/85 \quad (۲) \qquad 0/5 \quad (۱)$$

$$1/5 \quad (۴) \qquad ۱ \quad (۳)$$

۴۰. در یک کانال دوزنقه‌ای بتنی، آب با سرعت بحرانی جریان دارد. چنانچه سطح مقطع کانال ۸ متر مربع و عرض فوقانی سطح آب در کانال ۶ متر باشد سرعت آب در کانال چقدر است؟ (عمق آب ۲ متر و $z=1$).

$$۳/۶۳ \frac{m}{s} \quad (۲) \qquad ۳/۴۳ \frac{m}{s} \quad (۱)$$

$$۵/۴۳ \frac{m}{s} \quad (۴) \qquad ۳/۹۳ \frac{m}{s} \quad (۳)$$

۴۱. آب از دریاچه‌ای وارد کانال یا مقطع مثلث قائم الزاویه‌ای متساوی الساقین که بر روی شیب تند احداث شده می‌گردد، در صورتیکه اختلاف ارتفاع سطح آب در دریاچه تا ابتدای کف ورودی کانال برابر 2/5 متر باشد، میزان دبی چند متر مکعب بر ثانیه است؟

12/5 (۲) 1/6 (۱)

32 (۴) 18/4 (۳)

۴۲. عرض کف یک آبراهه مستطیلی که بتواند دبی CMS را در شرایط بحرانی و با عمق 1/2m از خود عبور دهد چند متر است؟

۳/۶۴ (۲) ۳ (۱) کمتر از

۴/۱۲ (۴) ۴ (۳) بیشتر از

۴۳. منحنی نیروی ویژه به ما نشان می دهد که برای یک q ثابت، اگر عمق اولیه (y_1) کم شود، عمق ثانویه (y_2).....

(۱) ثابت می ماند و تغییری نمی کند.

(۲) به همان نسبت نیز کم می گردد ولذا ارتفاع پرش ثابت می ماند.

(۳) به نسبت بیشتر کم می گردد ولذا افت انرژی در پرش زیاد می شود.

(۴) زیاد می شود، یعنی ارتفاع پرش هیدرولیکی زیاد می گردد.

۴۴. در یک کانال افقی با مقطع مستطیلی اعماق جریان قبل و بعد از پرش هیدرولیکی به ترتیب و می باشد. عمق بحرانی چند متر است؟

۰/۸۷۲ (۲) ۰/۲۹۸ (۱)

۱/۷۱۰ (۴) ۰/۹۴۴ (۳)

۴۵. در یک کانال مستطیلی با شیب کم به عرض ۱۰ متر، آب با عمق ۱ متر و با عدد فرود ۵ جریان دارد. در این مقطع پرش هیدرولیکی ایجاد شده است. مقدار توان تلف شده ناشی از تشکیل این پدیده چند مگاوات خواهد شد؟ (وزن مخصوص

آب $\gamma = 1 \frac{N}{m^3}$ و g برابر $10 \frac{m}{s^2}$ می باشند؟

20/5 (۲) 15/5 (۱)

10/5 (۴) 6/6 (۳)

۴۶. در جهش هیدرولیکی اگر مانعی بین دو مقطع بالادست و پایین دست پرش وجود داشته باشد، آنگاه عمق جریان در پایین دست پرش در مقایسه با حالت بدون مانع....

(۱) بیشتر می شود (۲) کمتر می شود

(۳) تغییر نمی کند (۴) پرش رخ نمی دهد

۴۷. اگر عدد فروود جریان زیر بحرانی بعد از یک پرش هیدرولیکی 0/2 باشد عدد فروود

$$\left(\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_2^3} \right) \right) \text{؟ چقدر است؟}$$

(۱) 5/05 (۲) 8/00

(۳) 9/84 (۴) 17/63

۴۸. در یک کانال افقی با مقطع مستطیلی اعماق جریان قبل و بعد از پرش هیدرولیکی

به ترتیب 0/5m و 1/6m می‌باشد. عمق بحرانی چند متر است؟

(۱) 0/298 (۲) 0/872

(۳) 0/944 (۴) 1/710

۴۹. در پرش هیدرولیکی اعماق مزدوج برابر 0/4 و 2/5 متر اندازه گیری شده اند انرژی

تلف شده در پرش چند متر است؟

(۱) ۲ (۲) 2/32

(۳) 2/5 (۴) 3/21

۵۰. در رابطه با عمق مزدوج (conjugate) و عمق متناوب (Alternate) کدامیک درست

است؟

(۱) عمق مزدوج نوع جریان را مشخص می‌کند.

(۲) عمق متناوب در محاسبات جهش هیدرولیکی کاربرد دارد.

(۳) عمق مزدوج از رابطه انرژی و عمق متناوب از رابطه مومنتم محاسبه می‌شود.

(۴) عمق مزدوج از رابطه مومنتم و عمق متناوب از رابطه انرژی محاسبه می‌شود.

۵۱. بهترین مقطع هیدرولیکی مقطعی است که:

(۱) با یک شعاع هیدرولیکی ثابت، دبی آن ماکزیمم باشد.

(۲) با یک مساحت مقطع ثابت A پیرامون‌تر شده (P) آن ماکزیمم باشد.

(۳) با یک شعاع هیدرولیکی ثابت، مساحت مقطع A ماکزیمم باشد.

(۴) با یک مساحت مقطع ثابت، شعاع هیدرولیکی آن ماکزیمم باشد.

۵۲. شیب بحرانی برای کانال مستطیلی با عرض کف 1/5 متر، دبی 1/5 متر مکعب در

ثانیه و $n=0/014$ برابر است با:

(۱) $\frac{1}{2}$ درصد (۲) اطلاعات کافی نیست

(۳) 4/7 در هزار

(۴) 9/8 در هزار

۵۳. بهترین سطح مقطع هیدرولیکی، A در یک مقطع ذوزنقه‌ای که در آن عمق آب y می‌باشد برابر خواهد بود با:

$$A = \sqrt{3y^3} \quad (۱)$$

$$A = 2\sqrt{3y^3} \quad (۲)$$

$$A = \frac{4}{3}\sqrt{3y^3} \quad (۳)$$

$$A = 2\sqrt{3y^3} \quad (۴)$$

پیوستها

پیوست ۱: جدول الف) خواص فیزیکی آب در سیستم SI

دمای °C	جرم مخصوص kg/m ^۳	لزجت N-s/m ^۲	کشش سطحی N/m	فشار بخار kPa	مدول حجمی kPa
۰	۹۹۹٫۹	$1,792 \times 10^{-۴}$	$7,62 \times 10^{-۳}$	۰٫۵۸۸	$2,04 \times 10^۳$
۵	۱۰۰۰٫۰	$1,519 \times 10^{-۴}$	$7,52 \times 10^{-۳}$	۰٫۸۸۲	$2,06 \times 10^۳$
۱۰	۹۹۹٫۷	$1,3۰۸ \times 10^{-۴}$	$7,4۸ \times 10^{-۳}$	۱٫۱۷۶	$2,11 \times 10^۳$
۱۵	۹۹۹٫۱	$1,14۰ \times 10^{-۴}$	$7,41 \times 10^{-۳}$	۱٫۶۶۶	$2,14 \times 10^۳$
۲۰	۹۹۸٫۲	$1,۰۰5 \times 10^{-۴}$	$7,36 \times 10^{-۳}$	۲٫۴۴۷	$2,2۰ \times 10^۳$
۳۰	۹۹۵٫۷	$۰,۸۰1 \times 10^{-۴}$	$7,1۸ \times 10^{-۳}$	۴٫۲۹۷	$2,23 \times 10^۳$
۴۰	۹۹۲٫۲	$۰,6۵۶ \times 10^{-۴}$	$7,۰1 \times 10^{-۳}$	۷٫۴۰۰	$2,27 \times 10^۳$
۵۰	۹۸۸٫۱	$۰,549 \times 10^{-۴}$	$6,۸2 \times 10^{-۳}$	۱۲٫۲۲۰	$2,3۰ \times 10^۳$
۶۰	۹۸۳٫۲	$۰,469 \times 10^{-۴}$	$6,6۸ \times 10^{-۳}$	۱۹٫۶۰۰	$2,2۸ \times 10^۳$
۷۰	۹۷۷٫۸	$۰,4۰6 \times 10^{-۴}$	$6,5۰ \times 10^{-۳}$	۳۰٫۷۰۰	$2,25 \times 10^۳$
۸۰	۹۷۱٫۸	$۰,3۵۷ \times 10^{-۴}$	$6,3۰ \times 10^{-۳}$	۴۶٫۴۰۰	$2,21 \times 10^۳$
۹۰	۹۶۵٫۳	$۰,31۷ \times 10^{-۴}$	$6,12 \times 10^{-۳}$	۶۸٫۲۰۰	$2,16 \times 10^۳$
۱۰۰	۹۵۸٫۴	$۰,2۸4 \times 10^{-۴}$	$۵,92 \times 10^{-۳}$	۹۷٫۵۰۰	$2,۰۷ \times 10^۳$

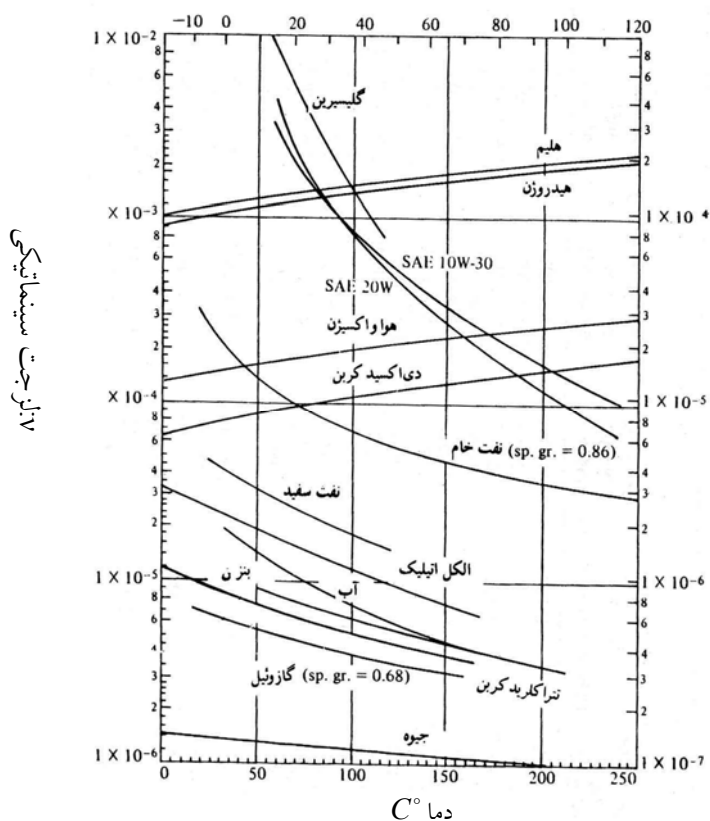
جدول ب) خواص فیزیکی آب در سیستم انگلیسی

دمای °F	جرم مخصوص slug/ft ^۳	لزجت lb-s/ft ^۲	کشش سطحی lb-s/ft	فشار بخار psi	مدول حجمی psi
۳۲	۱٫۹۴	$3,75 \times 10^{-۴}$	$۰,51۸ \times 10^{-۳}$	۰٫۰۸۹	293×10^۳
۴۰	۱٫۹۴	$3,23 \times 10^{-۴}$	$۰,514 \times 10^{-۳}$	۰٫۱۲۲	294×10^۳
۵۰	۱٫۹۴	$2,74 \times 10^{-۴}$	$۰,5۰9 \times 10^{-۳}$	۰٫۱۷۸	3۰5×10^۳
۶۰	۱٫۹۴	$2,36 \times 10^{-۴}$	$۰,5۰4 \times 10^{-۳}$	۰٫۲۵۶	311×10^۳
۷۰	۱٫۹۴	$2,۰5 \times 10^{-۴}$	$۰,5۰۰ \times 10^{-۳}$	۰٫۳۴۰	32۰×10^۳
۸۰	۱٫۹۳	$1,۸۰ \times 10^{-۴}$	$۰,492 \times 10^{-۳}$	۰٫۵۰۷	322×10^۳
۹۰	۱٫۹۳	$1,6۰ \times 10^{-۴}$	$۰,4۸6 \times 10^{-۳}$	۰٫۶۹۸	323×10^۳
۱۰۰	۱٫۹۳	$1,42 \times 10^{-۴}$	$۰,4۸۰ \times 10^{-۳}$	۰٫۹۴۹	327×10^۳
۱۲۰	۱٫۹۲	$1,1۷ \times 10^{-۴}$	$۰,465 \times 10^{-۳}$	۱٫۶۹	333×10^۳
۱۴۰	۱٫۹۱	$۰,9۸۸ \times 10^{-۴}$	$۰,454 \times 10^{-۳}$	۲٫۸۹	33۰×10^۳
۱۶۰	۱٫۹۰	$۰,۸4 \times 10^{-۴}$	$۰,441 \times 10^{-۳}$	۴٫۷۴	326×10^۳
۱۸۰	۱٫۸۸	$۰,۷3 \times 10^{-۴}$	$۰,426 \times 10^{-۳}$	۷٫۵۱	31۸×10^۳
۲۰۰	۱٫۸۷	$۰,64 \times 10^{-۴}$	$۰,412 \times 10^{-۳}$	۱۱٫۵۳	3۰۸×10^۳
۲۱۲	۱٫۸۶	$۰,59 \times 10^{-۴}$	$۰,4۰4 \times 10^{-۳}$	۱۴٫۷	3۰۰×10^۳

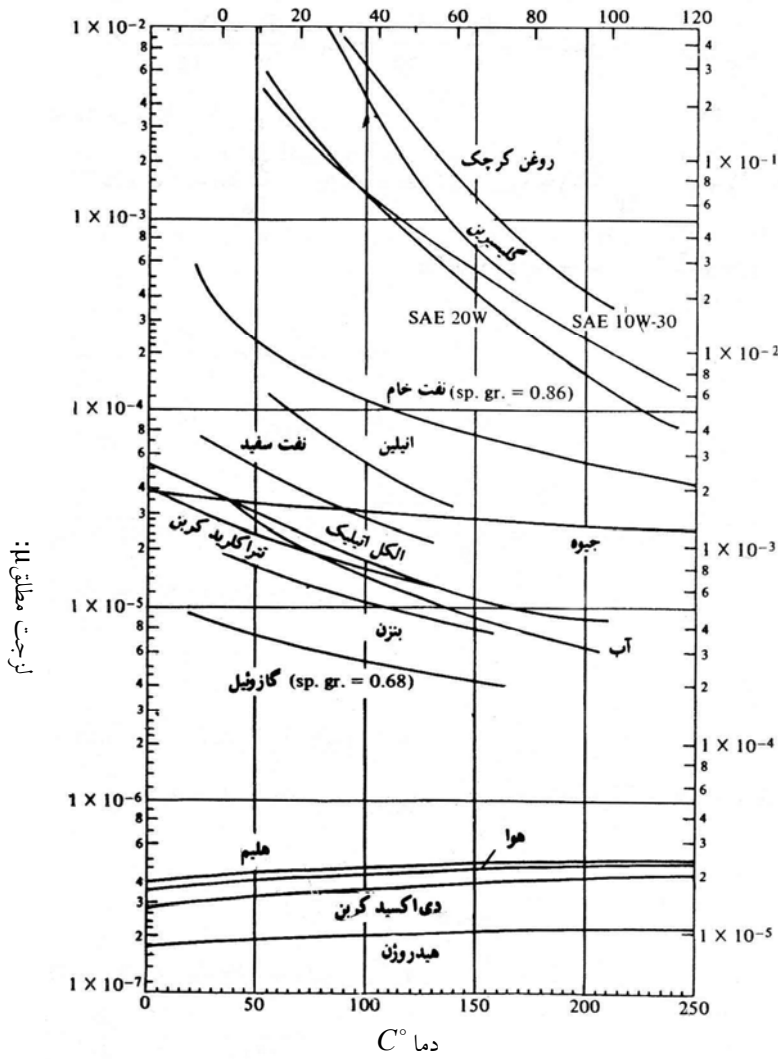
پیوست ب) علائم اختصاری، نشانه‌ها و واحدها

واحد انگلیسی	واحد SI	نشانه	
ft/s^2	m/s^2	a	شتاب
ft/s	m/s	V	سرعت
ft^2	m^2	A	مساحت
$\text{ft.lb/slug} \cdot \text{R}$	$\text{j/kg} \cdot \text{K}$	c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت
$\text{ft.lb/slug} \cdot \text{R}$	$\text{j/kg} \cdot \text{K}$	c_v	گرمای ویژه در حجم ثابت
-	-	c_c	ضریب انقباض
-	-	c_d	ضریب دبی
-	-	c_D	ضریب دراگ
ft/s	m/s	C	سرعت صوت یا سرعت موج
ft.lb	J	E	انرژی
lb	N	FB	نیروی شناوری
-	-	Fr	عدد فرود
ft/s^2	m/s^2	g	شتاب ثقل
ft	m	h	هد انرژی و فاصله قائم
ft	m	hf	افت هد انرژی از اصطکاک
ft	m	H	هد انرژی
ft	m	HGL	خط تراز هیدرولیکی
ft^3	m^3	I	گشتاور ماند
-	-	k	ضریب افت
ft	m	L	طول
-	-	ln	لگاریتم طبیعی
Slug	Kg	m	جرم
-	-	Ma	عدد ماخ
-	-	n	ضریب زبری مانینگ
$\text{ft}^3 / \text{s} / \text{ft}$	$\text{m}^3 / \text{s} / \text{m}$	q	دبی در واحد عرض
ft^3 / s	m^3 / s	Q	دبی
ft	m	r	شعاع
ft	m	R	شعاع
$\text{ft.lb/slug} \cdot \text{R}$	$\text{j/kg} \cdot \text{K}$	R	ثابت عمومی گازها
-	-	Re	عدد رینولدز
-	-	Sg	چگالی
s	s	t	زمان
$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{C}$	t	دما
lb.ft	N.m	T	گشتاور
ft/s	m/s	V یا U	سرعت
ft/s	m/s	u_o	سرعت برشی
lb	N	w	وزن
ft	m	x_p	فاصله تا مرکز فشار
ft	m	y	فاصله یا عمق
ft	m	z	فاصله قائم (ارتفاع)
-	-	α	ضریب تصحیح انرژی
-	-	θ	زاویه

-	-	β	ضریب تصحیح اندازی حرکت
ft	m	γ	وزن مخصوص
ft	m	δ	ضخامت لایه مرزی
ft	m	δ_1	ضخامت زیر لایه مرزی
ft ² /s	m ² /s	ε	لزجت گردابه‌ای سینماتیکی
ft	m	ε	ارتفاع زبری
Lb.s/ft ²	N.s/m ²	η	لزجت گردابه‌ای
lb.s/ft	N.s/m ²	μ	ضریب لزجت دینامیکی
ft ² /s	m ² /s	ν	ضریب لزجت سینماتیکی
ft ² /s	m ² /s	ϕ	پتانسیل سرعت
lb / ft ³	Kg / m ³	ρ	جرم مخصوص
lb/ft	N/s	σ	کشش سطحی
-	-	σ	شاخص کاویتاسیون
ft/s	m/s	Ψ	تابع جریان
Rad/s	Rad/s	ω	سرعت زاویه‌ای



شکل: لزجت سینماتیکی برخی از مایعات و گازها در فشار اتمسفر



شکل: لزجت مطلق برخی از مایعات و گازها

منابع:

۱. افضل‌ی مهر، حسین؛ (زمستان ۱۳۸۶). آموزش مکانیک سیالات. چاپ سوم، اصفهان، انتشارات ارکان
۲. افضل‌ی مهر، حسین، ۱۳۳۸ حیدر پور، منوچهر- ۱۳۸۰، مبانی هیدرودینامیک کانال‌های باز، اصفهان، انتشارات ارکان
۳. امیر افشاری ساسان؛ ۱۳۸۹. مکانیک سیالات، تهران، انتشارات سیمای دانش
۴. ایرونیگ، اچ شیمز؛ مکانیک سیالات، ترجمه علیرضا انتظاری (۱۳۸۰). تهران، انتشارات نورپردازان
۵. جارویس، پترج؛ ۱۳۸۷. مکانیک سیالات مهندسی. تالیف محمد مقیمان، محمد خاوری، مشهد، جهاد دانشگاهی مشهد
۶. حسینی، محمود، ابریشمی، جلیل، ۱۳۳۹. هیدرولیک کانال‌ها باز. مشهد، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)
۷. رابرت ال، استریت؛ گری زد، واترز؛ جان کی ورنارد، مبانی مکانیک سیالات. (پاییز ۱۳۸۶) ترجمه محسن شیرزاد، ویراستار، ابراهیم ابوکاظمی، تهران، انتشارات نورپردازان
۸. سمیع‌پور، محمد، پاییز ۱۳۸۲. مکانیک سیالات، تهران، پوران پژوهش، ۱۳۸۵
۹. شمسایی، ابوالفضل؛ پاییز ۱۳۸۳، سیستم‌های انتقال آب، چاپ دوم، انتشارات صنعتی امیر کبیر
۱۰. فرانک، ام وایت؛ مکانیک سیالات، ترجمه کریم موسوی نسب، (۱۳۸۵). تهران، مرکز نشر صدا
۱۱. فرداد، عباسعلی؛ (۱۳۸۲). مکانیک سیالات. تهران، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران
۱۲. فضل‌ی، بابک؛ رنجبر رنجور جاده؛ ۱۳۵۸؛ هیدرولیک مجاری باز، مازندران، انتشارات ساری: شلفین ۱۳۸۸
۱۳. قمشی، مهدی؛ امام قلی، مهدی؛ ۱۳۸۲. مکانیک سیالات و هیدرولیک به زبان ساده، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز
۱۴. کله‌چی، کوروش؛ ۱۳۸۴، مجموعه سوالات طبقه‌بندی شده آزمون کارشناسی ارشد مکانیک سیالات، تهران، جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۱۵. مدنی، حسن؛ (زمستان ۱۳۸۵). مکانیک سیالات و هیدرولیک. انتشارات دانشگاهی واحد علامه طباطبائی
۱۶. معیری، محمد صادق؛ مکانیک سیالات، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف
۱۷. ناکایاما، یاسوکی؛ مقدمه‌ای بر مکانیک سیالات. ترجمه محمد حسن شجاعی فرد، فاطمه بویاغچی، علیرضا نورپور هشترودی، تهران، انتشارات دانشگاه علم و صنعت
۱۸. نیهانی، نادر؛ (۱۳۸۴). مکانیک سیالات. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف
۱۹. ویکتور، استریت؛ بنجامین، وایلی؛ مکانیک سیالات، ترجمه علیرضا انتظاری، (۱۳۷۸). تهران، انتشارات نور پردازان

20. ASHRAE Handbook of Fundamentals, ASHRAE, Atlanta, 1981.

21. Cengel, Y.A., Cimbala J.M., Fluid Mechanics, McGraw-Hill; 1st ed., 2004

22. Colebrook, C.F., "Turbulent Flow in Pipes with Particular Reference to

23. the Transition Between the Smooth and Rough Pipe Laws," Journal of the

24. Institute of Civil Engineers London, Vol. 11, 1939.

25. Eck, B., Technische Stromungslehre, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1957.

26. Eck, B., Technische Stromungslehre, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1957.

27. F. Young, Theodore H. Okiishi, Wiley India, New Delhi, 2009 Edition.

28. Fluid Mechanics of Internal Flow, Sovran, G., ed., Elsevier, Amsterdam
29. Fox, R.W., McDonald, A.T., Pritchard, P.J., Introduction to Fluid Mechanics, Wiley; 6th ed., 2003
30. Fundamentals of Fluid Mechanics' – Bruce R. Munson, Donald
31. Giles, R.V., Liu, C., Evett, J.B., Evett, J., Schaum's 17. Outline of 25. Fluid Mechanics and Hydraulics, McGraw-Hill; 3rd ed., 1994
32. Glyn James, Advanced Modern Engineering Mathematics, Pearson Education (2007).
33. Hinze, J. O., Turbulence, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, 1975.
34. Introduction To Fluid Mechanics' – Edward j. Shaughnessy,jr, Ira 29.m. Katz:: James p Schaffer, Oxford University Press, New Delhi, 2005 Edition.
35. Moody, L. F., "Friction Factors for Pipe Flow," Transactions of the ASME, Vol.66, 1944.
36. Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T. H., 11. Fundamentals of Fluid Mechanics, Wiley; 5th ed., 2005
37. Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T. H., A Brief 15. Introduction to Fluid Mechanics, Wiley; 3th ed., 2004
38. Nikuradse, J., "Stomungsgesetz in Rauhen Rohren," VDI- Forschungsch, No. 361, 1933; or see NACA Tech Memo 1922.
39. Shames, I., Mechanics of Fluids, McGraw-Hill; 4th ed., 2002
40. Shames, I.H. (1993) Mechanics of fluid Mc Graw-Hill Book Company
41. Streeter, Victor L. (1993). Fluids Mechanics, Mac Graw-Hill Inc.
42. Text Book Of Fluid Mechanics & Hydraulic Machines' - R.K. Bansal, Laxmi Publications, New Delhi, 2008 Edition
43. Veerarajan, T., Engineering Mathematics (For First Year), Tata McGraw-Hill Pub. Pvt Ltd., New Delhi (2006).
44. Venard, J.K. (1991) Elementary Fluid Mechanics John Wiley and Sony, Inc.
45. White, F.M., Fluid Mechanics, McGraw-Hill; 5th ed., 2002

hadisiasar@yahoo.com
hadisiasar@gmail.com