

فصل

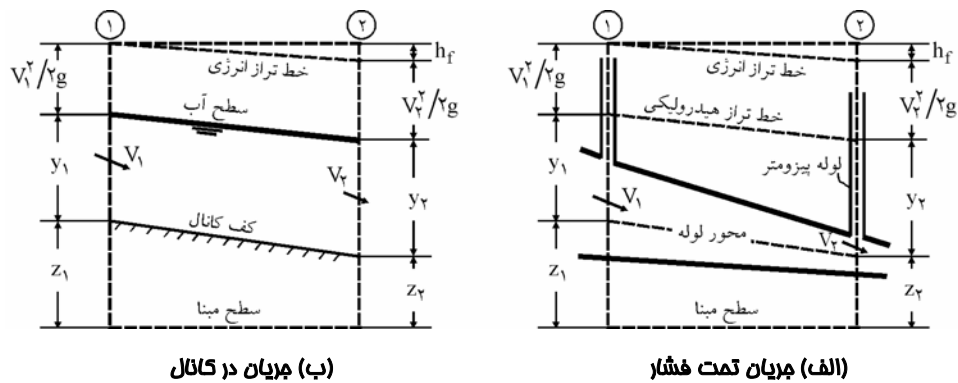
۱

کلیات و مفاهیم اولیه

انواع جریان

۱- جریان تحت فشار: این نوع جریان داخل مرز جامد محصور بوده و مرزهای حرکت سیال با دیواره جامد در تماس می‌باشد.

۲- جریان کانال‌های روباز: این نوع جریان در حین حرکت در تمامی مرزها با دیواره جامد در تماس نبوده، بلکه قسمت بالایی سطح تحت فشار اتمسفر می‌باشد.
در شکل (۱-۱) به مقایسه جریان در لوله‌های تحت فشار و کانال‌های روباز پرداخته شده است.



شکل (۱-۱) مقایسه جریان در لوله‌های تحت فشار و کانال‌های باز

انرژی جنبشی یا مکانیکی در مقطع جریان برابر ارتفاع معادل سرعت $\frac{V^2}{2g}$ ، ارتفاع معادل فشار $\frac{P}{\gamma}$ و ارتفاع مرجع Z می‌باشد. واحد انرژی کل برابر $\frac{N.m}{N}$ بوده که دارای بعد طول می‌باشد و بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$H = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z$$

در شکل فوق دو خط تراز انرژی و تراز هیدرولیکی آورده شده است.

خط تراز انرژی (Energy Grade Line): خط پیوسته که میزان انرژی را برای مقاطع مختلف جریان نشان می‌دهد، و بدلیل کاهش انرژی در حین حرکت دارای شیب منفی می‌باشد.

خط تراز هیدرولیکی (Hydraulic Grade Line): برابر خط پیزومتری که به اندازه ارتفاع معادل $\frac{V^2}{2g}$ از

خط انرژی فاصله داشته و برابر مجموع $\frac{P}{\gamma}$ و Z می‌باشد.

انواع کانال‌های روباز

کانال‌های روباز به صورت ساده به دو دسته مصنوعی یا طبیعی تقسیم می‌شوند:

۱- مصنوعی: ناودانی‌ها، سرریزها، سدها، کانال‌ها و... به منظور آبیاری، جمع‌آوری و انتقال فاضلاب‌ها که توسط بشر ساخته شده است.

۲- طبیعی: مانند چشمه‌ها، رودخانه‌ها، تنگه‌ها و سیل‌ها که بصورت طبیعی در زمین ایجاد شده و بشر هیچگونه نقشی در شکل‌گیری آن‌ها ندارد.

با توجه به شکل‌گیری کانال‌های مصنوعی برای اهداف خاص توسط بشر، لذا دارای اشکال هندسی مختلفی چون مستطیلی، ذوزنقه‌ای، مثلثی، دایروی و... می‌باشند.

مشخصات هندسی مقاطع کانال‌ها

عمق جریان (y): در یک نقطه فاصله بین کف کانال تا سطح آزاد آب می‌باشد.

سطح مقطع جریان (A): در یک نقطه، مساحت مقطع جریان در صفحه قائم بر جهت جاری جریان می‌باشد.

عرض سطح آزاد (T): طولی از مقطع جریان که در تماس با هوای آزاد می‌باشد.

پیرامون مرطوب (P): اختلاف محیط کلی مقطع جریان و عرض سطح آزاد می‌باشد که محدوده تماس جریان با بستر کانال می‌باشد.

شعاع هیدرولیکی (R): نسبت سطح مقطع جریان به پیرامون مرطوب می‌باشد:

$$R = \frac{A}{P}$$

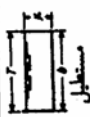

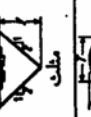


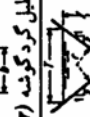
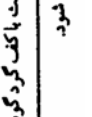
عمق هیدرولیکی (D): نسبت سطح مقطع جریان به عرض سطح آزاد آب می‌باشد:

$$D = \frac{A}{T}$$

فاکتور سطح در محاسبه عمق بحرانی (Z): این فاکتور بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$Z = A\sqrt{D} = A\sqrt{\frac{A}{T}} = \frac{A^{3/2}}{\sqrt{T}}$$

پارامتر هندسی Z در ستون آخر جدول (۱-۱) آورده شده است:

مقطع	مساحت A	پهنا برین مرطوب P	شیع هیدرولیکی $\frac{B}{R}$	عرض سطح T	معمق هیدرولیکی D	فاکتور سطح $\frac{Q}{S}$
 مستطیل	by	$b + 2y$	$\frac{by}{y + 2y}$	b	y	$by^{1.486}$
 خزانه	$(b + my)y$	$b + 2y\sqrt{1 + m^2}$	$\frac{(b + my)y}{b + 2y\sqrt{1 + m^2}}$	$b + 2my$	$\frac{(b + my)y}{b + 2my}$	$\frac{[(b + my)]^{1.486}}{\sqrt{b + 2my}}$
 مثلث	my^2	$2y\sqrt{1 + m^2}$	$\frac{my}{2\sqrt{1 + m^2}}$	$2my$	$\frac{y}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2} my^{1.486}$
 دایره	$14(\theta - \sin \theta)d^2$	$14d \sin \frac{\theta}{2}$	$14 \left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right) d$	$\frac{(\sin \frac{1}{2}\theta)d}{2\sqrt{1 - \cos \theta}}$ or $2\sqrt{d(1 - \cos \theta)}$	$\frac{1}{2}d \left(\frac{\theta - \sin \theta}{\sin \frac{1}{2}\theta}\right)$	$\frac{\sqrt{2}(\theta - \sin \theta)^{1.486}}{32(\sin \frac{1}{2}\theta)^{1.486}}$
 پهنی	$\frac{3}{2}Ty^2$	$T + \frac{3}{2}\frac{T^2}{y}$	$\frac{2Ty^2}{3T^2 + 2Ty}$	$\frac{3}{2}\frac{T}{y}$	$\frac{y}{2}$	$\frac{3}{4}\sqrt{6}Ty^{1.486}$
 مستطیل گرد گوشه ($y > r$)	$\left(\frac{\pi}{2} - 2\right)r^2 + (b + 2r)y$	$(\pi - 2)r + b + 2y$	$\frac{(\pi/2 - 2)r^2 + (b + 2r)y}{(\pi - 2)r + b + 2y}$	$b + 2r$	$\frac{(\pi/2 - 2)r^2 + y}{b + 2r} + y$	$\frac{[(\pi/2 - 2)r^2 + (b + 2r)]^{1.486}}{\sqrt{b + 2r}}$
 مثلث با کف گرد گوشه	$\frac{\pi r^2}{4} - \frac{r^2}{4}(1 - \varepsilon \cos^{-1} \varepsilon)$	$\frac{\pi}{2}\sqrt{1 + \varepsilon^2} - \frac{2r}{\varepsilon}(1 - \varepsilon \cos^{-1} \varepsilon)$	$\frac{A}{T}$	$2r(\varepsilon - 1) + \varepsilon\sqrt{1 + \varepsilon^2}$	$\frac{A}{T}$	$A \sqrt{\frac{1}{T}}$

این مقدار برای $0 < \varepsilon \leq 1$ تقریب رضایت بخشی است ($\varepsilon = 4y/T$). وقتی که $\varepsilon > 1$ باشد از فرمول دقیق $P = (\pi/2)(\sqrt{1 + \varepsilon^2} + 1/\varepsilon \ln(\varepsilon + \sqrt{1 + \varepsilon^2}))$ استفاده شود.

طبقه‌بندی جریان در کانال‌های روباز

۱- جریان دائمی - غیر دائمی

در صورتیکه عمق جریان در یک مقطع ثابت از جریان برحسب زمان بدون تغییر باشد، جریان دائمی بوده و در صورتیکه عمق جریان با زمان تغییر کند، غیر دائمی می‌باشد. برای x ثابت داریم:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = 0 \rightarrow \text{جریان دائمی}$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} \neq 0 \rightarrow \text{جریان غیر دائمی}$$

۲- جریان یکنواخت - غیر یکنواخت

در صورتیکه عمق جریان در هر لحظه زمانی ثابت در مقاطع مختلف بدون تغییر باشد، جریان یکنواخت بوده و در صورتیکه عمق جریان در مقاطع مختلف تغییر کند، جریان غیر یکنواخت می‌باشد. برای t ثابت داریم:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = 0 \rightarrow \text{جریان یکنواخت}$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} \neq 0 \rightarrow \text{جریان غیر یکنواخت}$$

براساس تعریف فوق در جریان یکنواخت دبی و سرعت در طول مسیر ثابت می‌باشند ولی در جریان غیر یکنواخت این دو پارامتر ثابت نمی‌باشند.

به جریان غیر یکنواخت در هیدرولیک، جریان متغیر نیز گفته می‌شود و بصورت زیر طبقه‌بندی می‌شود:

(الف) جریان متغیر تدریجی (Gradually Varied Flow)

اگر تغییرات عمق جریان در یک فاصله طولانی از مسیر صورت گیرد، جریان متغیر تدریجی گفته می‌شود.

(ب) جریان متغیر سریع (Rapidly Varied Flow)

اگر تغییرات عمق جریان در فاصله کوتاهی از مسیر شدید باشد و انحنای قابل ملاحظه‌ای در سطح آب دیده شود، جریان متغیر سریع می‌باشد.

(ج) جریان متغیر مکانی (Spatially Varied Flow)

اگر هیچگونه دبی در راستای طولی کانال به کانال اضافه نشود و یا از آن خارج نشود، جریان متغیر سریع یا تدریجی خواهد بود ولی اگر مقداری جریان از کانال اصلی گرفته شود و یا به آن اضافه شود، جریان متغیر مکانی خواهد بود.

وضعیت جریان در کانال‌های روباز

انواع نیروهایی که به سیال در جریان آب در کانال‌های روباز وارد می‌شود شامل نیروهای ثقل لزجت، شتاب دهنده و کشش سطحی بوده که در این میان مقدار کشش سطحی ناچیز می‌باشد. وضعیت‌های مختلف جریان در کانال با توجه به اثرات نسبی نیروهای لزجت و نیروی ثقلی نسبت به نیروهای اینرسی ایجاد می‌شود.

تأثیر نیروی لزجت

- ۱- **جریان آرام یا لایه‌ای:** در این حالت نیروی لزجت نسبت به نیروی اینرسی بزرگتر بوده و ذرات آب در راستای اصلی حرکت بر روی یکدیگر می‌لغزند.
- ۲- **جریان آشفته یا متلاطم:** در این حالت نیروی اینرسی نسبت به نیروی لزجت بیشتر بوده و ذرات آب از مسیر اصلی خود خارج شده و دارای حرکات پراکنده، غیر مشخص و نامنظم در عرض می‌باشند.
- ۳- **جریان انتقالی:** این حالت، حالت حد وسط بوده که در آن جریان به آرام یا آشفته تبدیل می‌شود. برای تعیین سه وضعیت فوق همانند مبحث مکانیک سیالات از عدد بی‌بعد رینولدز استفاده می‌شود که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \propto \frac{\text{نیروی اینرسی}}{\text{نیروی لزجت}}$$

که در آن ρ چگالی، μ لزجت دینامیکی، L طول مشخصه جریان و V سرعت جریان آب می‌باشد. براساس مشاهدات تجربی برای کانال‌های باز داریم:

$$Re < 500 \quad \rightarrow \quad \text{جریان آرام یا لایه‌ای}$$

$$500 \leq Re \leq 2000 \quad \rightarrow \quad \text{جریان انتقالی}$$

$$Re \geq 2000 \quad \rightarrow \quad \text{جریان آشفته}$$

تأثیر نیروی ثقل

تأثیر نیروی ثقل در قالب پارامتر دینامیکی بی‌بعد عدد فرود استفاده می‌شود. که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \propto \sqrt{\frac{\text{نیروی اینرسی}}{\text{نیروی ثقل}}}$$

که در آن V سرعت مشخصه جریان، L طول مشخصه جریان و g شتاب ثقل آب می‌باشد. از پارامتر فوق برای تعیین سه وضعیت زیر استفاده می‌شود:

الف: $Fr > 1$: جریان فوق بحرانی، برای یک دبی ثابت عمق جریان کم و سرعت زیاد می‌شود.

ب: $Fr < 1$: جریان زیر بحرانی، برای یک دبی ثابت عمق جریان بالا و سرعت کم می‌شود.

ج: $Fr = 1$: جریان بحرانی در کانال وجود خواهد داشت.

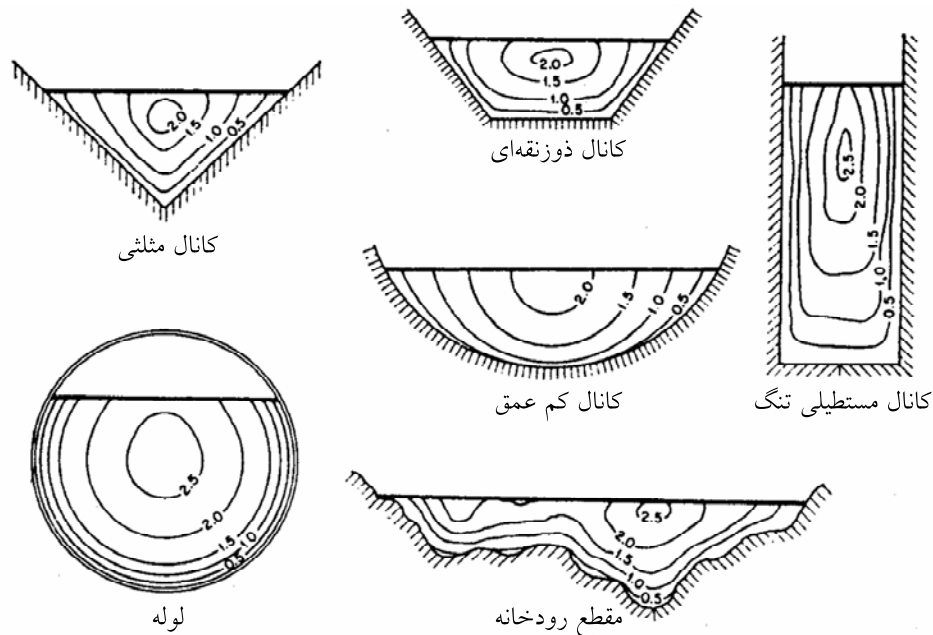
رژیم جریان

از اثر مشترک نیروی ثقل و نیروی لزجت، رژیم جریان کانال‌های روباز مشخص می‌شود:

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

توزیع سرعت در کانال‌ها

توزیع سرعت در کانال‌ها پیچیده و سه بعدی بوده و تعیین یک رابطه کلی برای توزیع سرعت در کانال‌ها به راحتی قابل محاسبه نیست دلیل این مطلب اثر لزجت آب، وجود دیواره‌ها، زبری دیواره‌ها، وجود سطح آزاد آب و همچنین بی‌نظمی مقاطع می‌باشد. برای این کار با اندازه‌گیری سرعت طولی در چند نقطه از یک مقطع از جریان می‌توان منحنی‌های هم سرعت را در یک مقطع معین و رسم نمود. که نمونه‌ای از این منحنی‌ها در شکل (۲-۱) رسم شده است:



شکل (۲-۱): منحنی‌های هم سرعت در مقاطع مختلف

از شکل (۱-۲) می‌توان گفت سرعت در دیواره‌ها صفر بوده و با فاصله گرفتن از دیواره‌ها افزایش می‌یابد. و همچنین گرادیان سرعت در نزدیکی مرزها بیشتر بوده و حداکثر سرعت در هر مقطع قائم در نزدیکی سطح آب و در فاصله ۰/۵ تا ۰/۲۵ عمق جریان از سطح آزاد بوجود می‌آید. قانون لگاریتمی توزیع سرعت بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$U = V + \frac{V_*}{K} \left(1 + \ln \frac{y}{y_0} \right)$$

که در آن V سرعت میانگین، V_* سرعت برشی (ثابت جریان)، y عمق جریان و K ثابت فن - کارمن (حدوداً ۰/۴ برای آب صاف) می‌باشد.

توزیع فشار در کانال‌ها

منظور از تعیین توزیع فشار در کانال‌ها، مشخص نمودن نحوه تغییرات پارامتر فشار در عرض و عمق در مقطع خاصی از کانال می‌باشد. برای توزیع فشار در کانال‌ها داریم:

الف) توزیع فشار در جریان‌های یکنواخت (موازی)

کانالی مطابق شکل (۱-۳ الف) را با سطح مقطع دلخواه در نظر گرفته و جریان را یکنواخت فرض می‌کنیم. برای محاسبه توزیع فشار، ستونی از آب به عمق h و سطح مقطع dA را در نظر می‌گیریم. اگر معادله حرکت برای جرم این ستون و در جهت عمود بر خط جریان را بنویسیم، داریم:

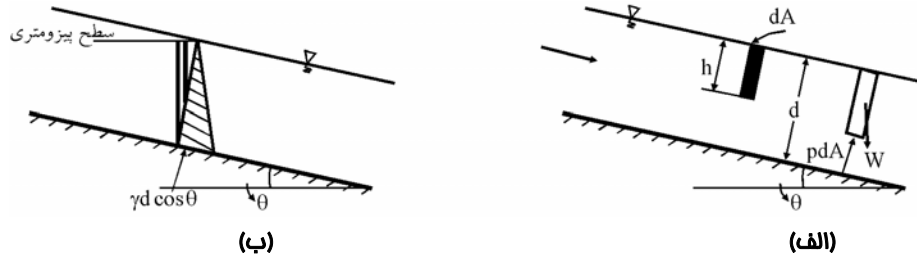
$$\sum F_h = 0 \quad \text{مولفه وزن در جهت عمود بر خطوط جریان = نیروی فشاری:}$$

$$PdA = \gamma h dA \cos \theta \rightarrow P = \gamma h \cos \theta$$

رابطه فوق قانون تغییرات هیدرواستاتیک فشار می‌باشد، که در آن P براساس فشار نسبی بوده و h تغییرات عمق در موضع موردنظر در صفحه‌ای عمود بر جهت عمومی جریان می‌باشد. γ وزن مخصوص آب و θ زاویه شیب کانال می‌باشد. اگر بنخواهیم فشار در کف کانال را بدست آوریم، می‌بایست d را به جای h قرار دهیم:

$$P = \gamma d \cos \theta = \gamma y \cos^2 \theta$$

در شکل (۱-۳ ب) نحوه تغییرات فشار در جریان یکنواخت ترسیم گردیده و مشخص است که فشار مربوطه از صفر تا $\gamma d \cos \theta$ بصورت خطی تغییر می‌کند.



شکل (۱-۱۳): توزیع فشار در جریان یکنواخت

اگر شیب کف کانال کم باشد ($\theta < 6^\circ$) در آن صورت می توان $\cos^2 \theta$ را تقریباً معادل یک در نظر گرفت در نتیجه داریم:

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

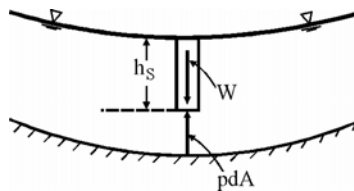
$$P = \gamma d \cos \theta = \gamma y \cos^2 \theta = \gamma y$$

ب) توزیع فشار در جریان های متغیر تدریجی

در این حالت توزیع فشار از قانون تغییرات هیدرواستاتیکی فشار پیروی کرده و روابط مربوط به توزیع فشار در جریان های یکنواخت برای این حالت صادق می باشد.

ج) توزیع فشار در جریان های با انحنا در صفحه قائم

از روابط توزیع فشار $P = \gamma h \cos \theta$ نمی توان برای قسمت تابع سرریزها و یا در انحنا پای سرریزها بدلیل انحنای بالا استفاده کرد. برای حل این موضوع براساس شکل (۱-۴) ستونی از آب به عمق h و سطح مقطع dA در مقطع مورد نظر انتخاب کرده و معادلات حرکت در جهت عمود بر خطوط جریان نوشته می شود:

شکل (۱-۴): ستون آب با عمق h

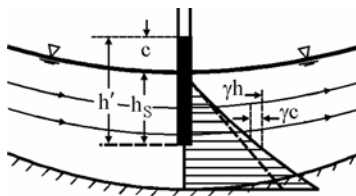
$$\sum F_n = ma_n \Rightarrow PdA - \gamma h dA = \rho dA h \frac{V^2}{r}$$

$$P = \gamma h + \frac{\gamma V^2 h}{gr} \Rightarrow h' = \frac{P}{\gamma} = h + \frac{V^2 h}{gr}$$

$$h' = h_s + \frac{V^2 h}{gr} \Rightarrow h' = h_s + c$$

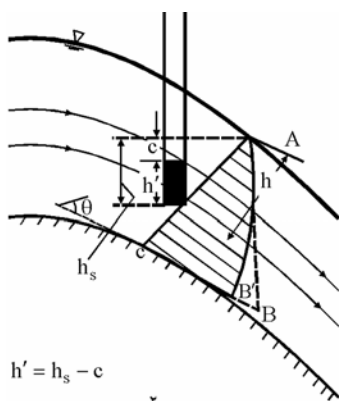
در روابط فوق a_n شتاب جانب مرکز، r شعاع انحنا، V سرعت ثابت و میانگین جریان در مقطع مورد نظر

و h' ارتفاع معادل فشار برحسب ستون آب می‌باشند. و مقدار h' از مجموع ارتفاع معادل فشار هیدرواستاتیک h_s و یک عامل تصحیحی c که شامل انحنای جریان می‌باشد. شکل (۱-۵) چگونه تغییرات فشار حقیقی را نسبت به تغییرات هیدرواستاتیکی فشار نشان می‌دهد.



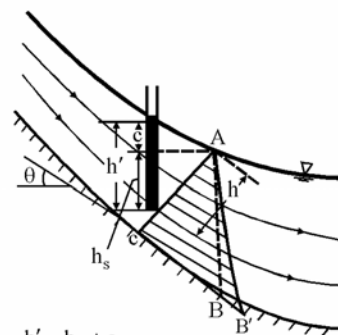
شکل (۱-۵): تغییرات فشار موقی نسبت به تغییرات هیدرواستاتیکی فشار

در شکل (۱-۶) حالت کامل جریان با انحنا در صفحه قائم، شامل جریان محدب در صفحه کاملاً قائم و نیز جریان‌های محدب و مقعر در صفحه با شیب θ نشان داده شده است:



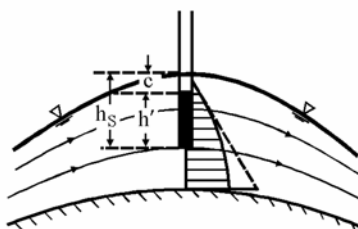
$$h' = h_s - c$$

$$h' = h \cos \theta - \frac{V^2 h}{gr}$$



$$h' = h_s + c$$

$$h' = h \cos \theta + \frac{V^2 h}{gr}$$



$$h' = h_s - c$$

$$h' = h - \frac{V^2 h}{gr}$$

شکل (۱-۶): جریان در کانال‌های دارای انحنای در صفحه قائم