Prozhefa.com

بخش ۲

جریانهای دائمی در کانالهای باز

Prozhefa.com

Prozhefa.com

فصل ۴

جریان یکنواخت در کانالهای باز

سیدمحمود حسینی - جلیل ابریشمی

مقدمه

در فصل حاضر جریان یکنواخت دائمی یااختصاراً جریان یکنواخت درکانالهای باز تحلیل خواهد شد. بدین منظور ابتدا چگونگی شکل‌گیری و ویژگیهای جریان یکنواخت و نحوهٔ تعیین سرعت متوسط در این جریان بررسی می‌شود. سپس روشهای محاسباتی در این‌گونه جریانها برمبنای فرمول مانینگ، که کاربردی وسیع دارد، به همراه شناسائی پارامتر اصلی این فرمول یعنی ضریب زبری مانینگ ارائه خواهند شد.

مطالب تکمیلی دیگر همچون جریان در کانالهای بازبری غیریکنواخت، جریان در مقاطع مرکب، بهترین مقاطع هیدرولیکی و خصوصیات جریان در مقاطع دایروی مطالب بعدی این فصل می‌باشند.

۴-۱ شکل‌گیری جریان یکنواخت (Establishment of Uniform Flow)

شکل ۴-۱ الف جریان دائمی آب از یک دریاچه به داخل یک کانال آبگیری با شیب تند را نشان می‌دهد. گرچه در بدو ورود آب به داخل کانال ذرات آب دارای شتاب جابه‌جایی تند شونده هستند و سطح آب دارای انحنای تدریجی می‌باشد، ولی جریان پس از طی مسافتی در روی کانال شیبدار به‌سمت سرعت حد میل می‌نماید و در این تعادل دینامیکی ذرات آب دیگر شتابی نخواهند داشت.

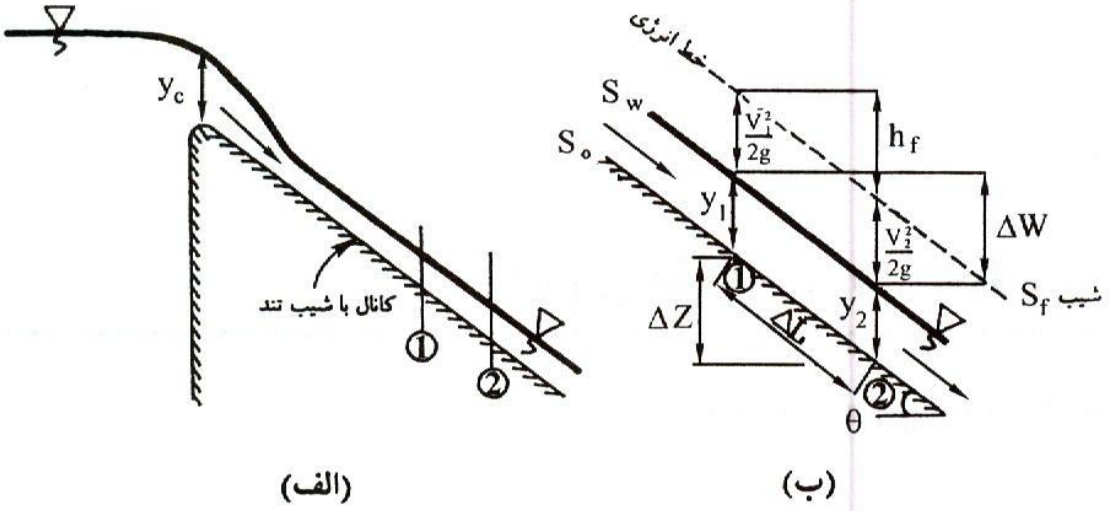
اگر مطابق شکل ۴-۱ ب یک بازه از کانال بین دو مقطع ۱ و ۲ درنظر گرفته شود، خصوصیات این جریان به خوبی روشن شده و می‌توان آن‌ها را به شکل زیر طبقه‌بندی نمود:

الف - به ازاء دبی ثابت، عمق و سرعت در امتداد طولی جریان ثابت است:

$$y_1 = y_2 \Rightarrow \frac{dy}{dx} = 0$$

$$V_1 = V_2 \Rightarrow \frac{dV}{dx} = 0$$

Prozhefa.com



شکل ۴-۱ جریان یکنواخت پس از خروج آب از دریاچه

با توجه به ثابت بودن خصوصیات فوق در طول زمان، جریان مذکور یک جریان یکنواخت دائمی (Steady Uniform Flow) بوده که به دلیل آن که جریان یکنواخت غیردائمی (Unsteady Uniform Flow) عملاً وجود ندارد، به اختصار جریان یکنواخت نامیده می‌شود. جریان یکنواخت دائمی جریان نرمال نیز نام دارد و عمق جریان در این حالت به عمق نرمال (y_n) موسوم است.

در صورتی‌که شیب و سایر خصوصیات هیدرولیکی و هندسی کانال به نحوی باشند که به ازاء یک دبی ثابت، عمق نرمال کانال بیش از عمق بحرانی مربوطه باشد ($y_n > y_c$) جریان یکنواخت زیربحرانی در کانال برقرار است. حال چنانچه $y_n < y_c$ ، جریان یکنواخت فوق‌بحرانی و در صورت $y_n = y_c$ جریان یکنواخت بحرانی در کانال جاری است. از نظر سادگی عمق نرمال در این بخش به y_o نمایش داده می‌شود.

باید درنظر داشت که با توجه به ماهیت جریان یکنواخت، رسیدن به تعادل دینامیکی و سرعت حد و برقراری جریان یکنواخت مستلزم طولانی‌بودن و منشوری‌بودن کانال و عدم وجود مانع در مسیر جریان است و ضمناً برقراری جریان یکنواخت در کانالهای افقی با شیب صفر و یا کانالهای با شیب منفی امکان ندارد.

ب - در صورتی‌که فاصلهٔ دو مقطع ۱ و ۲ در امتداد جریان برابر ΔL باشد می‌توان نوشت:

شیب خط انرژی = شیب سطح آب = شیب کف کانال

$$S_o = S_w = S_f = S$$

$$\frac{\Delta Z}{\Delta L} = \frac{\Delta W}{\Delta L} = \frac{h_f}{\Delta L} = S = \sin\theta \qquad (۱-۴)$$

همان‌گونه که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است، در رابطهٔ ۴-۱، ΔZ تغییر ارتفاع کف کانال، ΔW تغییر ارتفاع سطح آب و h_f تغییر در میزان انرژی (یا افت انرژی) بین دو مقطع ۱ و ۲ می‌باشند.

Prozhefa.com

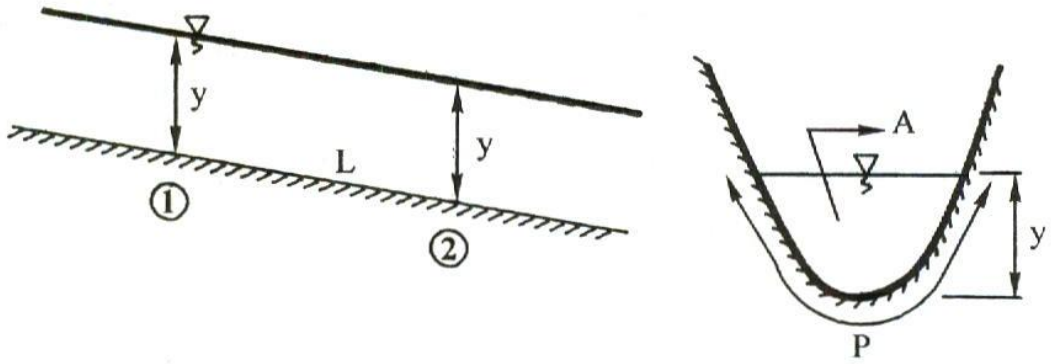
باید در نظر داشت که افت انرژی در فاصلهٔ ΔL از مسیر پیش می‌آید و لذا فاصلهٔ افقی (ΔL_H) به جای ΔL در تعریف شیب خط انرژی و سایر شیب‌ها به کار برده نشده است و چنانکه بعداً نیز اشاره خواهد گردید در محاسبات جریان یکنواخت، عموماً $\sin\theta$ به عنوان شیب بستر کانال در محاسبات ظاهر می‌شود و چنانچه جریان یکنواخت در کانالهای با شیب کم $(\theta < ۶^\circ)$ برقرار باشد، منظور نمودن $\tan\theta$ یعنی نسبت تغییر فاصلهٔ قائم به طول افقی (چنانکه در تعریف شیب معمول است) در محاسبات تغییری ایجاد نخواهد کرد.

۴-۲ سرعت متوسط در جریانهای یکنواخت

جهت تعیین سرعت در جریانهای یکنواخت دو فرمول شزی و مانینگ کاربرد همگانی دارند که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

۴-۲-۱ فرمول شزی (Chezy Equation)

فرض می‌گردد مطابق شکل ۴-۲ جریان یکنواخت در یک کانال منشوری با مقطع دلخواه برقرار باشد.



شکل ۴-۲ جریان یکنواخت در یک کانال منشوری

با به کاربردن رابطهٔ اندازهٔ حرکت بین دو مقطع ۱ و ۲ از جریان و با فرض $\beta_۱ = \beta_۲ = ۱$ می‌توان نوشت:

$$Fp_۱ - Fp_۲ - F_f + W\sin\theta = \rho Q\,(V_۲ - V_۱)$$

با توجه به ثابت بودن خصوصیات جریان بین دو مقطع ۱ و ۲ لذا، $Fp_۱ = Fp_۲$ و $V_۱ = V_۲$ بوده و بنابراین:

$$W\sin\theta - F_f = ۰ \rightarrow \boxed{W\sin\theta = F_f} \qquad (۴-۲)$$

رابطهٔ ۴-۲ به مفهوم به سرعت حد رسیدن جریان و برقراری تعادل دینامیکی بین دو نیروی اصطکاک (F_f) و نیروی رانش یعنی مؤلفه وزن در جهت شیب $(W\sin\theta)$ می‌باشد.

در شناسائی بیشتر این نیروها فرض می‌شود که نیروی F_f از حاصل ضرب یک تنش برشی متوسط در کف

Prozhefa.com

(τ_0) در مساحت اعمال شده در فاصلهٔ بین دو مقطع ۱ و ۲ (PL) به‌دست آید در نتیجه:

از طرفی: $F_f = \tau_0 PL$

$W \sin\theta = \gamma AL \sin\theta$

و لذا رابطهٔ ۴-۲ به شکل زیر تغییر می‌یابد:

$$\gamma AL \sin\theta = \tau_0 PL \Rightarrow \tau_0 = \gamma \frac{A}{p} \sin\theta \qquad (۳-۴)$$

نظر به‌این‌که $\frac{A}{P}$، شعاع هیدرولیکی (R) مقطع جریان می‌باشد، تنش برشی متوسط در کف برابر خواهد شد با:

$$\tau_0 = \gamma R \sin\theta = \gamma RS \qquad (۴-۴)$$

فرض می‌گردد که تنش برشی متوسط جداره که عکس تنش حاصل از نیروی رانش بر کف کانال می‌باشد متناسب با مجذور سرعت متوسط جریان (V) بوده یعنی:

$$\tau_0 = K\rho V^2 \qquad (۵-۴)$$

با مساوی قرار دادن دو رابطهٔ ۴-۴ و ۴-۵ می‌توان سرعت متوسط جریان را محاسبه نمود:

$$K\rho V^2 = \gamma RS \Rightarrow V = \left(\sqrt{\frac{g}{K}}\right)\sqrt{RS} \qquad (۶-۴)$$

اگر در رابطهٔ ۴-۶ مقدار $\sqrt{\frac{g}{K}}$ بانماد C نمایش داده شود، مقدار سرعت به‌شکل سادهٔ زیر به‌دست خواهد آمد:

$$V = C\sqrt{RS} \qquad (۷-۴)$$

رابطهٔ ۴-۷ که اولین بار در سال ۱۷۶۹ توسط Chezy و جهت انتقال آب به پاریس به کار برده شد، به فرمول شزی موسوم است. در این فرمول C ضریب شزی نامیده شده که دارای بعد $\frac{L^{1/2}}{T}$ می‌باشد و در سیستم بین‌المللی آحاد (SI) از واحد $m^{1/2}/s$ برخوردار است.

ضریب شزی که بیانگر رفتار هیدرودینامیکی بستر جریان می‌باشد، در صفحات بعد مورد شناسائی بیشتر قرار خواهد گرفت ولی یک راه مؤثر در شناسائی کیفی آن (و یا ضریب K) استفاده از روش آنالیز ابعادی و قضیه پارامترهای بدون بعد با کینگهام است که در مثال ۴-۱ تشریح می‌گردد.

مثال ۴-۱

تنش برشی متوسط کف تابعی از مشخصات هندسی یعنی شعاع هیدرولیکی و زبری (R و ε)، مشخصات سینماتیکی جریان (V)، مشخصات سیال یعنی لزجت مطلق و جرم مخصوص (μ و ρ) می‌باشد. رابطهٔ تنش برشی متوسط کف (τ_0) با سایر پارامترها را به‌دست آورید.

حل

لازم به یادآوری است که زبری مطلق (ε) شاخصی از اندازهٔ متوسط برآمدگی‌ها یا ناصافی‌های

Prozhefa.com

جدارهٔ کانال می‌باشد که در هیدرولیک لوله‌ها نام آشنائی دارد و معمولاً توسط کارخانه‌های سازنده مشخص می‌شود. با توجه به جنس کانالهای باز می‌توان مقداری به زبری کانالهای باز نیز نسبت داد.

در این مثال تعداد پارامترها ۶ و تعداد ابعاد مؤثر در پدیدهٔ ۳ است که طبق قضیهٔ پارامترهای بدون بعد با کینگهام، سه پارامتر مستقل بدون بعد در پدیده قابل تشخیص می‌باشد. این سه پارامتر که یافتن آنها به عهدهٔ مطالعه کنندگان واگذار می‌شود، $\frac{\tau_0}{\rho V^2}$ و $\frac{\varepsilon}{R}$ و عدد رینولدز جریان $(Re = \frac{\rho V R}{\mu})$ می‌باشند پس:

$$f\left(\frac{\tau_0}{\rho V^2}, \frac{\varepsilon}{R}, Re\right) = 0$$

$$\frac{\tau_0}{\rho V^2} = \phi\left(Re, \frac{\varepsilon}{R}\right) \qquad (۸-۴)$$

تابع $\phi(Re$ و $\frac{\varepsilon}{R})$، شاخص K در رابطهٔ ۴-۶ است که در ارتباط مستقیم با ضریب شزی می‌باشد. بنابراین رابطهٔ ۴-۸ نشان می‌دهد که ضریب شزی از دو پارامتر بدون بعد زبری نسبی $(\frac{\varepsilon}{R})$ و عدد رینولدز جریان (Re) تأثیر می‌پذیرد.

۴-۲-۲ تعیین ضریب شزی بر مبنای ضریب اصطکاک دارسی - وایسباخ

معادلهٔ دارسی - وایسباخ (Darcy-Weisbach) که جدیدترین و آشناترین رابطه در برآورد افت انرژی در جریان آب در لوله‌ها (مجاری تحت فشار) می‌باشد، شدت افت انرژی در جریان سیال تراکم‌ناپذیر در لوله را برحسب سرعت جریان، طول و قطر لوله مطابق رابطهٔ زیر ارائه می‌نماید:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \qquad (۹-۴)$$

در رابطهٔ ۴-۹، f ضریب اصطکاک بدون بعد دارسی - وایسباخ بوده که تابعی از عدد رینولدز جریان $\frac{(4VR\rho)}{\mu}$ و زبری نسبی $(\frac{\varepsilon}{4R})$ در لوله می‌باشد. اگرچه برای تعیین مقدار f، مجموعه‌ای از روابط نیمه تجربی پیشنهادی وجود دارد اما یک راه عملی عبارت است از استفاده از نمودار معروف مودی (Moody Diagram) که در اکثر کتب مکانیک سیالات پایه آورده شده است.

برای تعیین ارتباط بین ضریب شزی و ضریب اصطکاک بدون بعد دارسی - وایسباخ، رابطهٔ ۴-۹ به شکل زیر تغییر داده می‌شود:

$$\frac{h_f}{L} = S_f = \frac{f}{4R} \frac{V^2}{2g}$$

Prozhefa.com

$$V=\sqrt{\frac{8g}{f}}\sqrt{RS_f} \qquad (۱۰-۴)$$

لازم به توضیح است که در تبدیل رابطهٔ ۴-۹ به ۴-۱۰ از این مطلب که در لوله‌ها $D = 4R$ می‌باشد استفاده شده است و نظر به این‌که در جریان یکنواخت، کلیه شیبها با یکدیگر مساوی هستند می‌توان نوشت:

$$V=\sqrt{\frac{8g}{f}}\sqrt{RS} \qquad (۱۱-۴)$$

با مقایسهٔ دو رابطهٔ ۴-۱۱ و ۴-۷، مقدار ضریب شزی برحسب ضریب f برابر خواهد شد با:

$$C=\sqrt{\frac{8g}{f}} \qquad (۱۲-۴)$$

نمودار ۴-۱ که نمودار مودی با کمی تغییر می‌باشد، مستقیماً ضریب شزی در کانالهای باز را براساس عدد رینولدز $(\frac{4VR}{\nu})$ و زبری نسبی $(\frac{\varepsilon}{R})$ ارائه می‌نماید. در ترسیم این نمودار رابطهٔ ۴-۱۲ با روابط نیمه تجربی مرسوم در تعیین f ترکیب شده است.

جدول ۴-۱، ε پیشنهادی برای بعضی از مصالح مرسوم در کانالها را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱ مقادیر ε برای برخی از مصالح کانالها

نوع زبری بستر کانال	ε(mm)
شیشه	۳×۱۰^{-۴}
سطح بتنی صاف	۰٫۱۵-۰٫۳
سطح بتنی زبر	۰٫۵-۱٫۵
کانالهای خاکی (یکنواخت - مستقیم)	۳٫۰
سنگ‌کاری با قلوه سنگ	۶٫۰۰
لوله فاضلاب لعابدار	۰٫۶۰

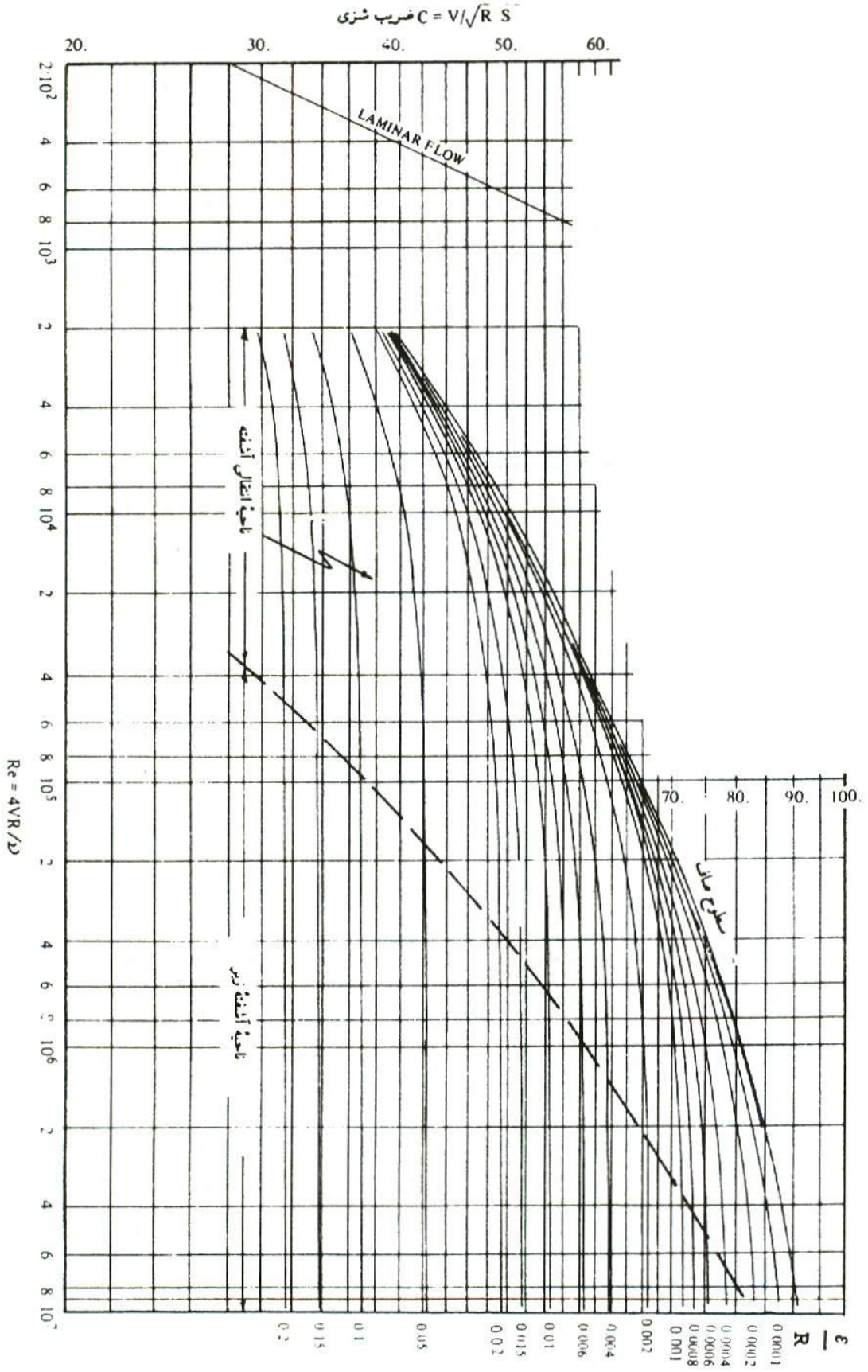
۴-۲-۳ تعیین ضریب شزی با استفاده از رابطهٔ بیزن (Bazin)

رابطهٔ پیشنهادی بیزن برای تعیین ضریب شزی به شکل زیر می‌باشد:

$$C=\frac{87}{1+\frac{\gamma}{\sqrt{R}}} \qquad (۱۳-۴)$$

در این رابطه R شعاع هیدرولیکی و γ ضریب زبری بستر کانال در رابطهٔ بیزن می‌باشد که می‌تواند با استفاده از جدول ۴-۲ به‌دست آید.

Prozhefa.com



نمودار ۴-۱

Prozhefa.com

جدول ۴-۲ مقادیر γ در رابطهٔ بیزن

نوع زبری بستر کانال	ضریب γ
سطح بسیار صاف (سیمانی، چوبی)	۰/۰۶
چوب - آجرکاری - بتن	۰/۱۲
دیوار زبر - سنگ کاری با قلوه سنگ	۰/۴۶
خاکی در وضعیت خوب	۰/۸۵
خاکی در وضعیت معمولی	۱/۳۰
خاکی در وضعیت بد	۱/۷۵

۴-۲-۴ تعیین ضریب شزی با استفاده از رابطهٔ گانگیلت - کاتر (Ganguillete-Kutter)

رابطه‌ای که توسط این محققین برای تعیین ضریب شزی پیشنهاد گردید عبارت است از:

$$C=\frac{\left(۲۳+\frac{۰/۰۰۱۵۵}{S}\right)+\frac{۱}{n}}{۱+\left(۲۳+\frac{۰/۰۰۱۵۵}{S}\right)\frac{n}{\sqrt{R}}} \qquad (۴-۱۴)$$

در رابطهٔ ۴-۱۴ که رابطهٔ کاتر نیز نامیده شده است، مقدار n ضریب زبری بستر کانال در رابطهٔ کاتر و مانینگ می‌باشد که به نام ضریب زبری مانینگ نیز شناخته می‌شود و در بخش ۴-۲-۶ به تفصیل در مورد این ضریب بحث خواهد شد. همچنین R شعاع هیدرولیکی مقطع جریان و S شیب طولی کانال می‌باشد.

۴-۲-۵ تعیین سرعت متوسط در کانالها با استفاده از معادلهٔ مانینگ

در سال ۱۸۸۹ یک مهندس ایرلندی به نام مانینگ (Manning) نشان داد که ضریب شزی با $R^{۱/۶}$ رابطهٔ مستقیم دارد ($C \propto R^{۱/۶}$). بعدها نشان داده شد که ضریب این تناسب $\frac{۱}{n}$ می‌باشد یعنی:

$$C=\frac{۱}{n}R^{۱/۶} \qquad (۴-۱۵)$$

که n همان ضریب زبری بستر کانال است که در فرمول کاتر به کار برده شده است و به صورت معمول ضریب زبری مانینگ نامیده می‌شود.

در صورتی‌که رابطهٔ ۴-۱۵ در فرمول شزی قرار داده شود، رابطهٔ زیر که به معادلهٔ مانینگ موسوم است و کاربرد بسیار وسیع در طراحی هیدرولیکی کانالهای باز دارد به‌دست می‌آید:

$$V=\frac{۱}{n}S^{۱/۲}R^{۲/۳} \qquad (۴-۱۶)$$

Prozhefa.com

یا:

$$Q = \frac{۱}{n} S^{۱/۲} R^{۲/۳} A$$

نکته‌ای که در استفاده از فرمول مانینگ می‌بایست مورد دقت قرار گیرد این است که رابطهٔ ۴-۱۵ یک رابطهٔ تجربی در تعیین C بوده و از طرفی معادلهٔ ۴-۱۶ در سیستم متریک نوشته شده است و لذا چنانچه فرض شود که این فرمول از نظر ابعادی یکنواخت است، ضریب $\frac{۱}{n}$ دارای بعد $\frac{L^{۱/۳}}{T}$ خواهد بود. همان‌گونه که بعداً خواهد آمد تعیین n عمدتاً از طریق جداول کمکی صورت می‌گیرد که مقداری است مشخص و لذا چنانچه خواسته شود از معادلهٔ مانینگ در سیستم آحاد مختلف استفاده گردد بایستی متناوباً مقدار n یا $\frac{۱}{n}$ تغییر داده شود. برای جلوگیری از این تغییر مقدار، می‌توان ضریب $\frac{۱}{n}$ را به $\frac{۱/۴۸۶}{n}$ تبدیل نمود و رابطهٔ ۴-۱۶ را در سیستم انگلیسی به شکل زیر به کار برد:

$$V = \frac{۱/۴۸۶}{n} S^{۱/۲} R^{۲/۳} \qquad (۴-۱۷)$$

با توجه به این‌که هر متر برابر ۳/۲۸۰۸ فوت می‌باشد، ضریب ۱/۴۸۶ از ریشه سوم ۳/۲۸۰۸ حاصل شده است.

۴-۲-۶ تخمین ضریب زبری مانینگ (n)

ضریب زبری مانینگ کلیهٔ عوامل مؤثر در مقاومت بستر کانال در مقابل جریان را در خود مستتر دارد و همچنین از تشابه فرمول دارسی - و ایسباخ مشاهده می‌شود که این ضریب شدت افت انرژی را در یک جریان نشان می‌دهد. در محاسبات هیدرولیکی کانالهای باز، ضریب n باید با توجه به وضعیت کانال مورد مطالعه به عنوان یکی از اطلاعات اولیه طراحی تخمین زده شود.

قضاوت مهندسی در تخمین این ضریب نقش مهمی دارد و در نتیجه مهندسین مجرب در پیدا کردن این ضریب مشکل چندانی ندارند ولی مهندسینی که از تجربهٔ کافی برخوردار نمی‌باشند نیاز به دقت بیشتری دارند تا انتخاب آنها به جای حدس و گمان تا حد ممکن صحیح و مستدل باشد.

راه مناسب در تخمین صحیح‌تر ضریب n ، شناخت عوامل مؤثر در این ضریب می‌باشد. این عوامل عبارتند از زبری بستر کانال (جنس کانال)، نامنظمی سطح مقطع، پوشش گیاهی (نوع و میزان تراکم آن)، شکل مسیر (مستقیم یا مارپیچی بودن مسیر)، وجود موانع در مسیر جریان و حتی عمق و دبی جریان، که علاوه بر تأثیر در افت طولی در مسیر جریان، تا حدودی در برگیرندهٔ افتهای ناشی از تغییر شکل جریان (افت‌های موضعی) نیز می‌باشند. اضافه می‌شود که تأثیر گذشت زمان و تغییر فصول را نیز باید در تغییرات n در نظر داشت.

با توجه به عوامل مؤثر ذکر شده، کاون (Cowan) رابطهٔ ۴-۱۸ را در تخمین ضریب n پیشنهاد نموده است:

$$n = (n_۰ + n_۱ + n_۲ + n_۳ + n_۴)\, m_۵ \qquad (۴-۱۸)$$

Prozhefa.com

که در آن، n_0 ، یک ضریب زبری پایه است که با توجه به جنس کانال برای کانال یکنواخت و صاف و مستقیم انتخاب می‌شود. ضرایب اصلاحی n_1 ، n_2 ، n_3 ، n_4 و m_5 به ترتیب در برگیرندهٔ اثرات نامنظمی سطح مقطع، چگونگی تغییرات سطح مقطع، وجود موانع در مسیر کانال، پوشش گیاهی و درجهٔ مارپیچی بودن مسیر می‌باشند.

کاون ضمن تفسیر وضعیت کانال در انتخاب ضرایب مذکور جدولی نیز جهت انتخاب این ضرایب ارائه نموده است.

به منظور آشنائی بیشتر با چگونگی تغییرات n نسبت به عوامل مؤثر در آن و نیز اطلاع از مقادیر ضرایب رابطهٔ ۴-۱۸ می‌توان به کتاب هیدرولیک کانالهای باز نوشتهٔ (Chow) مراجعه نمود.

روشهای عملی‌تر و ساده‌تر دیگری نیز در تخمین ضریب n وجود دارد که می‌توان آنها را به‌صورت زیر دسته‌بندی نمود:

۱- تصاویر و اسلایدهایی از کانالهای مختلف همراه با توضیحات لازم تهیه شده است که ضریب n در این کانالها نیز مشخص می‌باشد. از طریق مقایسهٔ کانال مورد مطالعه با این تصاویر می‌توان ضریب n را تخمین زد.

۲- استفاده از جداول کمکی عملی‌ترین روش در برآورد مقدار n می‌باشد. نمونه‌ای از این جداول همراه با توضیحات لازم توسط دفتر تحقیقات و معیارهای فنی سازمان برنامه و بودجه در مبحث هیدرولیک کانالها از مجموعه ضوابط و معیارهای فنی شبکه‌های آبیاری و زهکشی ارائه گردیده است (جدول ۴-۳). همچنین تصاویری از کانالها و نمونه‌های دیگری از جداول ارائه شده، در کتاب هیدرولیک کانالهای باز نوشته Chow وجود دارند که می‌توانند در تخمین ضریب n مفید واقع گردند.

۳- روش دیگر در تعیین ضریب n استفاده از بعضی روابط تجربی است. فرمول استریکلر (Strickler) که عام‌ترین فرمول از این گروه روابط می‌باشد به شکل زیر ارائه گردیده است:

$$n = \frac{d_{50}^{1/6}}{21/1} \qquad (۴-۱۹)$$

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

رابطهٔ پیشنهادی دیگر رابطه Meyer و همکارانش می‌باشد که در مورد رودخانه‌های کوهستانی که مصالح جدارهٔ آنها عمدتاً شامل مصالح درشت دانه است کاربرد دارد:

$$n = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} \qquad (۴-۲۰)$$

که در آن d_{90} (برحسب متر) اندازهٔ دانه‌ای است که ۹۰٪ وزنی ذرات از آن ریزتر می‌باشند.

Prozhefa.com

۴-کوششهایی نیز در جهت برآورد ضریب n با استفاده از روابط تئوری انجام شده که چندان در کارهای عملی وارد نگردیده است و از ذکر مطلب در این مجموعه خودداری می‌شود.

جدول ۳-۴ ضرایب زبری (n) مانینگ برای کانال و مجرا با جدارهای مختلف

(تهیه شده توسط دفتر تحقیقات و معیارهای فنی سازمان برنامه و بودجه)

شماره ردیف	شرح جزئیات	ضریب زبری (n)
۱	سطوح فوق‌العاده صاف مانند شیشه و چوب پولیش‌شده برای مدل‌سازی آزمایشگاهی. این ضریب زبری برای محاسبه سرعتهای زیاد در شوتهای تند شیب و یا سرریزهایی که هوادهی می‌شوند به‌کار برده می‌شود ولی برای محاسبه عمق جریان در این شرایط باید ۱/۵برابراین ضریب زبری در محاسبات به‌کار رود.	از ۰/۰۰۸ تا ۰/۰۱۰
۲	فلومهای چوبی پولیش شده[1] (ساخته شده از الوار) برای مدلهای آزمایشگاهی.	۰/۰۰۹
۳	کمترین مقداری که برای ضریب زبری درشرایط ایده‌آل کارگاهی به‌دست آمده ونباید درطراحی به‌کار برده شود	۰/۰۱۰
۴	فلومهای نیم‌دایره چوبی[2] نو و مستقیم، کاملاً صاف، رنگ نشده وبدون هیچ‌گونه مانع درمسیر جریان. لوله‌های بتنی درقطرهای بزرگ وبا کیفیت اجرایی فوق‌العاده عالی. (البته نباید انتظار داشت که این ضریب زبری در مدت طولانی دوام داشته باشد.	۰/۰۱۱
۵	فلوم چوبی[3] (ساخته شده ازالوار) در شرایط بسیارعالی. سطوح فلزی رنگ نشده در طولهای مستقیم وکوتاه. سطوح بتنی که بابالاترین کیفیت اجرایی ریخته وروی آن باماله فلزی دستی کاملاً صاف ودرزهای آن بامادهٔ پرکننده صاف و کاملاً هم‌سطح پوشش باشد. مسیر با طولهای مستقیم طولانی که قوسهای آن تاحدممکن باشعاع بزرگ اختیارشده‌باشد. (این مقدار ضریب زبری بندرت در شرایط کارگاهی قابل دستیابی است)	۰/۰۱۲
۶	ضریب زبری محتاطانه وحداقل برای کلیه موارد مندرج دربند ۵ در مورد فلومهای باطول زیادباهرنوع مصالح ساختمانی. فلومهای فلزی رنگ شده. فلومهای بتنی ساخته شده‌باقالبهای فلزی روغن‌مالی‌شده. بتن‌پاشی زیرفشار[4] وقتی سطح آن ماله کشی (ماله‌فلزی) شود. مواردمندرج دراین ردیف ممکن است درشروع بهره‌برداری دارای ضریب زبری ۰/۰۱۲ = n باشد.	۰/۰۱۳

1. Polished Lubmer Flume
2. Stave Flume
3. Surfaced Untreated Lumber Flume
4. Shot Concrete - shotcrete

Prozhefa.com

ادامهٔ جدول ۳-۴

شماره ردیف	شرح جزئیات	ضریب زبری (n)
۷	ضریب مناسب ومتداول‌برای طراحی سازه‌های چوبی،فلزی رنگ شده و بتن‌ریزی درشرایط معمولی،صافی ویکنواختی قوسهاباید همسان باقسمت مستقیم‌کانال باشد.پوشش بتنی باسیمان پرتلند.پوشش بابتن آسفالتی که با ماشین اجرا شود.آجرکاری با پوشش سیمانی. در این مقدار احتمال رشدکم جلبک و همچنین کمی ترسیب پیش‌بینی شده است.	۰/۰۱۴
۸	کارهای ساختمانی‌باسطوح جانبی خوب وکف کمی ناهموار.موارد مندرج در ردیف۷با قبول ترسیب سیلت، شن و ماسه. آب گل آلود درکانالهای بتنی درجایابتن‌پاشی بافشار.برای روکشهای بتنی صاف که به طور فصلی زبری‌آن‌به علت رویش رستنیهاافزایش می‌یابد.حداقل ضریب‌زبری کارهای مخلوط سنگ و بتن با اجرای بسیار عالی. پوشش خاک و سیمان[1] با سطح پرداخت خوب. مصالح پیش ساخته آسفالتی.	۰/۰۱۵
۹	بتن‌ریزی با قالب چوبی زبر برای انتقال آب صاف باکمی مواد معلق. موارد مندرج در ردیف ۷با جلبک خیلی زیاد یا حاوی مقدار زیاد ذرات قلوه سنگ[2] (۵-۷/۵ سانتیمتر). کانالهای قدیمی‌که‌باملات سیمانی روکش شده‌باشند. کانالهای کوچک با پوشش بتنی در طولهای مستقیم و یکنواخت که کف کانال دارای کمی ناهمواری باشد و سطوح جانبی به وسیله ته‌نشینی رسوبات زبر شده باشد. کانالهای خاکی با وضعیت عالی عاری از هرگونه ناهمواری و رستنی. پوشش خاک و سیمان با سطح زبر شبیه سطح شنی. پوشش بابتن پاشی زیر فشار و پرداخت شده. (برای موارد بالا معمولاً این رقم در طراحی به کار برده نمی‌شود.)	۰/۰۱۶
۱۰	برای انتقال آب صاف درکانال باکف بتنی خوب و سطوح جانبی عالی از سنگچین[3]. کانالهایی که پوشش آن با درزهای ناهموار همراه باشد.	
	رقم مبنابرای بتنهای پاشیدنی با فشار روی سطوح نیمرخ سازی و پروفیله شده صاف (پوشش با بتن‌پاشی زیر فشار).	۰/۰۱۷
۱۱	بالاترین ضریب زبری برای کارهای بتنی تحت هر شرایطی. پوشش بتنی باسطوح بسیار زبر و ناصاف و قوسهای تند و کوتاه پوشیده از جلبک و شن درکف آن. کمترین مقدار n برای استفاده از سنگچین یکدست[4] با اجرای خوب. کانال باجدارهای‌بتنی وکف طبیعی. کانال‌بابسترخاکسترهای آتش‌فشانی[5] بدون رویش‌گیاه.این مقدار،حداقل لازم‌برای‌کانالهای‌بزرگ	

1. Soil - Cement
2. Cobble
3. Rubble
4. Uniform Rubble
5. Volcanic Ash Soil

Prozhefa.com

ادامهٔ جدول ۳-۴

شماره ردیف	شرح جزئیات	ضریب زبری (n)
	بااجرای عالی دربستربا سیلت خیلی نرم‌است. کانال خاکی دربسترهای رس -لوم[1] با ته‌نشینی رسوبات ماسه‌ای در وسط و رسوبات سیلتی درنزدیکی کناره‌ها. سطوح بتن پاشیده با فشار و صاف نشده	۰/۰۱۸
۱۲	کانالهایی با بنای فرسوده. کانالهای ساخته شده در داخل زمین محکم یا کانالهایی که با پوشش شن کوبیده ساخته شده باشند وسرعت جریان چنان باشدکه دانه‌های سیلت فضاهای خالی درشت دانه‌ها با پوشش بتنی روی مقطع حفاری شده‌درگدازه‌آتش‌فشانی خیلی‌ناصاف همراه‌با چاله‌های گود. کانال درامتداد مستقیم حفاری شده درماسه کوبیده وصاف. کانالهای خاکی ساخته شده‌بزرگ برای ردیف ۱۳. کانالهای خاکی طبیعی صاف و بدون رستنیها.	۰/۰۲۰
۱۳	کانالهای‌باکف شنی و صافی متوسط که خوب اجرا شده باشد، همراه با کناره‌های علفی ورسوب‌گذاری درکف وسنگهای پراکنده[2] درآن. کانال با بستر رسی یا گدازه‌های آتش‌فشانی. (برای کانالهای بزرگ با مشخصات بالا معمولاً ضریب زبری ۰/۰۲۰ را می‌توان درنظرگرفت.)	۰/۰۲۲۵
۱۴	کانال حفاری شده دربسترسیلتی - رس -لوم[3]. جویهای پوشش شده با خشکه چینی درکف و بدنه‌ها. کانال‌بابسترکاملاً نامرتب با قلوه‌سنگهای (۵-۷/۵ سانتیمتر) پراکنده.	۰/۰۲۴
۱۵	کانالهای پوشیده شده ازخرده‌باعلف متراکم‌درحاشیه،یا سنگهای قلوه‌ای پراکنده‌درکف. کانالهای خاکی‌بدون‌نگهداری وتعمیرات‌که می‌توان n رااز این مقدار هم بیشتر اختیارکرد. این ضریب زبری برای نهرچه‌های آبیاری داخل مزارع مناسب است. کانالهایی‌که‌تماماً درخاکبرداری احداث می‌شود ودرمعرض ریزش دانه‌های مصالح[4] قرارمی‌گیرد. حداقل ضریب n برای کانالهای خاکبرداری شده درسنگ که به وسیله‌بتن پاشیدنی بافشار صاف شده باشد.	۰/۰۲۵
۱۶	کانال حفاری شده در تپه ماهور،که بازوی بالایی در زمین طبیعی دارای ریشه‌های بید و غیره باشد وبازوی پایینی بادیواربتنی خوب ساخته شده و کف آن از شن دانه درشت پوشیده شده باشد.	۰/۰۲۶
۱۷	کانالهای باکف قلوه سنگی (۵-۷/۵ سانتیمتر)، وقتی نزدیک به هم ودر خط مستقیم‌وباشیب یکنواخت‌کارگذاری شده‌باشد.این ضریب زبری وقتی به کاربرده می‌شودکه قلوه‌سنگها(۵-۷/۵ سانتیمتر) به طور مرتب چیده	

1. Clay Loam
2. Scattered Stone
3. Silty Clay Loam
4. Rolling Debris

Prozhefa.com

ادامهٔ جدول ۳-۴

شماره ردیف	شرح جزئیات	ضریب زبری (n)
	و جا گذاری شود. این ضریب زبری هر چه اندازه قلوه سنگهابزرگتر شود افزایش یافته و به ۰/۰۴۰ هم می‌رسد. آبراه طبیعی با کف قلوه‌سنگی (۵-۷/۵ سانتیمتر) که‌به علت سرعت زیاد جریان یا وجودکمی سیلت در آب، مانع ایجاد کف صاف و یکنواخت شود.	۰/۰۲۸
۱۸	کانال حفاری شده در خاکهای سیلتی رسوبی همراه باترسیب ماسه و رشدعلف.	۰/۰۲۹
۱۹	کانال با رویش ضخیم خزه، سطوح جانبی خیلی ناهموار، کف پوشیده با قلوه‌سنگهای درشت[1] یاکانالهایی که به‌علت فرسایش کاملاً مضرس شده باشد.	۰/۰۳۰
۲۰	کانالهای نسبتاً بزرگ که ۵۰ درصد آن را خزه پوشانیده و دارای جریان نامنظمی نیزباشد. کانالهای کوچک با نوسانات مکرر سطح آب و عدم نگهداری صحیح، آبراه طبیعی با شیبهای کناری ناهموار و کف نسبتاً ناصاف دربسترهایی ازنوع سیلتی - رس خاکستری تاسیلتی -لوم روشن که تغییرات مقطع آب ناچیز باشد. مسیلهایی که نگهداری صحیح نشود. برای کانالها یا تونلهای حفاری شده در سنگ، منطبق با سطح مقطع طراحی شده است.	۰/۰۳۵
۲۱	برای کانالهایی که با خزه انبوه پوشیده شده باشد. کانالهای بزرگ دارای قلوه‌سنگهای درشت(۵-۷/۵ سانتیمتر). کانال حفاری شده‌بامواد منفجره دربسترسنگی. آبرو در بستر ماسه - لوم[2] با کف وکناره‌ها ومقطع نامنظم با رویش علف در شیبهای جانبی.	۰/۰۴۰
۲۲	کانال لایروبی شده‌با کف وکناره‌های نامنظم،قسمت جنس بسترازرس تیره در بالا تا رس زرد درکف، و بدنه پوشیده از علف و نهالهای کوچک با تغییرات مختصر درمقطع.	۰/۰۴۵
۲۳	کانال لایروبی شده با کف وکناره‌های خیلی ناصاف و هموارد رس تیره همراه با رویش رستنیها و علف و تغییرات کمی در شکل و مقطع.	۰/۰۵۰
۲۴	سیلابروهاکه بندرت مرمت شود. کانالهایی که $\frac{2}{3}$ آن توسط رستنیهای مختلف گرفته شده باشد	از ۰/۰۵۰ ۰/۰۶۰
۲۵	آبروها درخاک سنگین رس - سیلتی‌با کف وکناره‌های ناهمواره‌که درتمام طول مسیر، درختهایی از قبیل بید روییده باشد و مقطع آبروها تقریباً یکنواخت باشد.	۰/۰۶۰

1. Fragment Of Rock
2. Sandy Loam

Prozhefa.com

ادامهٔ جدول ۳-۴

شماره ردیف	شرح جزئیات	ضریب زبری (n)
۲۶	کانال لایروبی شده در رس سیاهرنگ یا سیلتی - رس - لوم[1] به رنگ خاکستری با مقطع نامنظم و پوشیده از درختهای پراکنده بید، صنوبر بدون شاخ و برگ و گاهی همراه با ته‌نشینی سیلت در کف.	۰٫۰۸۰
۲۷	مانند ردیف ۲۶ همراه با شاخ و برگ فراوان و پوشیده از رستنیهای شبیه علف.	۰٫۱۱۰
۲۸	مسیرهای طبیعی ومسیلهادرماسه ریزدانه تارس‌نرم‌بدون شیب کناری منظم وکف نسبتاً صاف و یکنواخت گاهی همراه با کنده درخت مغروق در آن.	۰٫۱۲۵
۲۹	رودخانه‌های طبیعی در رس ماسه‌ای[2]، کف ناصاف و ناهموار و شیبهای کناری نامنظم و غیریکنواخت، دارای مقدار زیادی بوته، ریشه درخت وغیره،درختهابه علت فرسایش کناره‌ها کنده می‌شود وغرقاب می‌شود.	۰٫۱۵۰

مثال ۴-۲

آب ۲۰°C با عمق نرمال ۳٫۰m در یک کانال ذوزنقه‌ای از جنس بتن صاف با عرض کف ۱۰٫۰m، شیب کناره‌های (H)۱٫۵ : (V)۱ و شیب طولی ۰٫۰۰۰۳ جاری است. مطلوب است تعیین دبی جریان در صورتی که :

الف - ضریب شزی از تشابه فرمول شزی با فرمول دارسی - وایسباخ به‌دست آورده شود،

ب - ضریب شزی از فرمول گانگیلت -کاتر تعیین گردد،

ج - از فرمول مانینگ استفاده شود،

د - ضریب شزی از فرمول بیزن به‌دست آید $(\nu = ۱ \times ۱۰^{-۶} m^۲/s)$

حل :

شکل ۴-۳ مقطع جریان را نشان می‌دهد.

نخست مشخصات هندسی مقطع جریان محاسبه می‌گردند:

$$A = (b + zy_۰)y_۰ = (۱۰ + ۱٫۵ \times ۳)۳ = ۴۳٫۵ m^۲$$

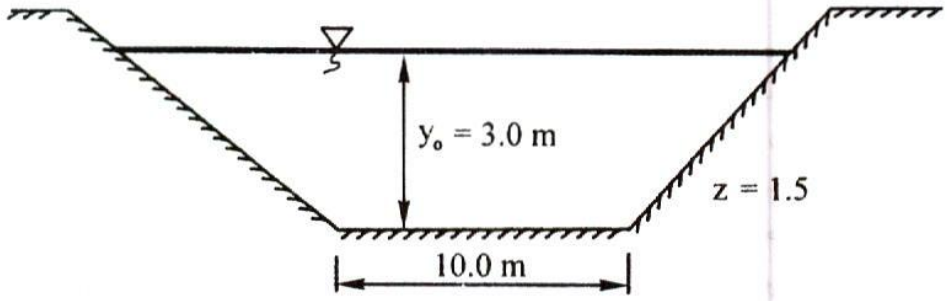
1. Silty Clay Loam
2. Sandy Clay

Prozhefa.com

$$P = b + ۲\sqrt{۱+z^۲}\,y_۰ = ۱۰ + ۲\sqrt{۲/۲۵ + ۱} \times ۳ = ۲۰/۸۱۷\,\text{m}$$

$$R = \frac{A}{p} = \frac{۴۳/۵}{۲۰/۸۱۷} = ۲/۰۹\,\text{m}$$

$$S = S_۰ = ۰/۰۰۰۳$$



شکل ۴-۳

الف - در این روش با توجه به این‌که جنس کانال بتن صاف می‌باشد مقدار ε از جدول ۴-۱ برابر ۰/۱۵mm انتخاب می‌گردد. از آن‌جایی که سرعت جریان و در نتیجه عدد رینولدز مشخص نمی‌باشد لذا در استفاده از نمودار ۴-۱ جهت تعیین C ابتدا فرض می‌شود که جریان در محدودهٔ آشفتهٔ زبر برقرار باشد و لذا مقدار C براساس $\frac{\varepsilon}{R}$ به‌دست می‌آید.

$$\frac{\varepsilon}{R} = \frac{۰/۱۵ \times ۱۰^{-۳}}{۲/۹۰} = ۷/۱۸ \times ۱۰^{-۵} \xrightarrow[\text{سطوح صاف}]{\text{نمودار ۴-۱}} C \approx ۹۰$$

$$V = C\sqrt{RS} = ۹۰\sqrt{۲/۰۹ \times ۰/۰۰۰۳} = ۲/۲۵\,\text{m/s}$$

$$\begin{cases} Re = \dfrac{۴VR}{\nu} = \dfrac{۴ \times ۲/۲۵ \times ۲/۰۹}{۱ \times ۱۰^{-۶}} = ۱/۸۸۴ \times ۱۰^{۷} \\ \dfrac{\varepsilon}{R} = ۰/۰۰۰۰۷۱۸ \end{cases} \rightarrow \quad C \approx ۹۴$$

$$V = C\sqrt{RS} = ۹۴\sqrt{۲/۰۹ \times ۰/۰۰۰۳} = ۲/۳۵\,\text{m/s}$$

تعیین مجدد مقدار C با استفاده از نمودار ۴-۱ تغییر چندانی در مقدار سرعت نخواهد داد:

$$V = ۲/۳۵\text{m/s} \Rightarrow Q = VA = ۲/۳۵ \times ۴۳/۵ = ۱۰۲/۴\text{m}^۳\text{/s}$$

Prozhefa.com

روابط تجربی دیگری نیز براساس جریان یکنواخت آشفتهٔ آب در کانالهای باز پیشنهاد گردیده که فقط در همین محدوده اعتبار دارند و در محدودهٔ جریان آرام صادق نمی‌باشند. از میان این معادلات هر کشوری به تناسب فرهنگ مهندسی خود یکی را برگزیده و به کار می‌برد.

در ایران دفتر تحقیقات و معیارهای فنی سازمان برنامه و بودجه به دلیل قدمت آشنائی مهندسین و طراحان با رابطهٔ مانینگ از یک سو و سهولت محاسبات و دقت قابل قبول این رابطه از سوی دیگر، به کارگیری آنرا در طرحهای آبیاری و زهکشی توصیه می‌کند و همان‌گونه که اشاره شد در مجموع این رابطه کاربرد بسیار وسیعتری داشته و در اکثر کشورهای انگلیسی زبان نیز در طرح کانالهای آب و فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۳ محاسبات جریان یکنواخت

گرچه برقراری جریان یکنواخت در کانالها یک فرض ایده‌آل است، ولی در عمل طراحی کانالها براساس روابط جریان یکنواخت صورت می‌گیرد.

منظور از محاسبات جریان یکنواخت، شناخت معلومات در یک مسأله هیدرولیکی و پیداکردن پارامترهای مجهول براساس روابط جریان یکنواخت می‌باشد. قبل از بیان انواع مسایلی که ممکن است در مطالعات هیدرولیکی پیش آید، دو پارامتر قراردادی که در توضیحات آینده لازم می‌آیند معرفی می‌گردند:

۱- ضریب انتقال: رابطهٔ شزی و یا مانینگ در ترکیب با رابطهٔ پیوستگی به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$Q=\frac{A}{n}R^{۲/۳}\sqrt{S} \qquad (۲۱-۴)$$

$$Q=CA\sqrt{R}\sqrt{S} \qquad (۲۲-۴)$$

در روابط ۴-۲۱ و ۴-۲۲ برحسب این‌که از کدام رابطه استفاده شود ضریب $CA\sqrt{R}$ یا $\frac{۱}{n}AR^{۲/۳}$ ضریب انتقال نامیده می‌شود.

۲- فاکتور سطح در محاسبه جریان یکنواخت: در صورتی‌که در محاسبات جریان یکنواخت از فرمول مانینگ استفاده شود، عبارت $AR^{۲/۳}$ به فاکتور سطح در محاسبه جریان یکنواخت موسوم است. دلیل استفاده از این فاکتور در محاسبات جریان یکنواخت روشن می‌شود.

به‌طور کلی انواع مسایلی که در مطالعات هیدرولیکی جریان یکنواخت پیش می‌آیند می‌توانند به ۵ گروه زیر طبقه‌بندی گردند:

۱- در نوع اول $y_۰$، n، S و مشخصات هندسی مقطع جریان مشخص و سرعت (V) و یا دبی جریان

Prozhefa.com

(Q) مجهول هستند.

۲- در مسایل نوع دوم Q ، y_0 ، n و مشخصات هندسی مقطع جریان معلوم ولی شیب کانال (S) مجهول می‌باشد.

۳- در این حالت Q ، y_0 ، S و مشخصات هندسی مقطع جریان معین و ضریب زبری مانینگ (n) مجهول می‌باشد.

۴- در نوع چهارم Q ، n ، S و مشخصات هندسی مقطع جریان مشخص، عمق نرمال (y_0) مجهول می‌باشد.

۵- و نهایتاً Q ، n ، S ، y_0 و هندسهٔ عمومی کانال معلوم ولی مشخصات هندسی مقطع جریان باید محاسبه گردند.

بررسی کلی برروی رابطهٔ مانینگ و پارامترهای آن نشان می‌دهد که در مسایل نوع ۱ و ۲ و ۳ که عمق نرمال و مشخصات هندسی مقطع مشخص می‌باشند، مجهولات به صورت صریح محاسبه می‌گردند در حالی‌که در مسایل نوع ۴ و ۵ که در طراحی‌های هیدرولیکی و تعیین ابعاد هندسی مقاطع پیش می‌آیند تعیین مجهولات به شکل صریح نخواهد بود. در این نوع مسایل لازم است تا از روش آزمون و خطا یا سایر روشهای عددی در محل معادلات غیرخطی استفاده گردد. بدیهی است نمودارها یا جداول کمکی می‌توانند در یافتن سهل‌تر جواب کمک نمایند. قبل از بیان چگونگی استفاده از این نمودارها یا جداول، مسایل نوع ۴ و ۵ در قالب مثالهای ۴-۳ و ۴-۴ تشریح می‌شوند.

مثال ۴-۳

یک کانال ذوزنقه‌ای با عرض کف ۵٫۰ متر و شیب کناره‌های $(H) ۱٫۵ : ۱(V)$ دارای شیب طولی ۰٫۰۰۰۳۵ می‌باشد. عمق نرمال را برای دبی $۲۰ m^3/s$ محاسبه نمایید ($n = ۰٫۰۱۵$).

حل:

مشخصات هندسی مقطع جریان به صورت زیر تعیین شده، در فرمول مانینگ قرار می‌گیرند:

$$A = (b + zy_0)y_0 = (۵ + ۱٫۵y_0)y_0$$

$$P = b + ۲\sqrt{۱ + z^۲}\, y_0 = ۵ + ۳٫۶۰۶y_0$$

$$R = \frac{A}{p} = \frac{(۵ + ۱٫۵y_0)y_0}{۵ + ۳٫۶۰۶y_0}$$

$$۲۰ = \frac{۱}{۰٫۰۱۵}(۰٫۰۰۰۳۵)^{۱/۲}\left[\frac{(۵ + ۱٫۵y_0)y_0}{(۵ + ۳٫۶۰۶y_0)}\right]^{۲/۳}(۵ + ۱٫۵y_0)y_0 \qquad (۴-۲۳)$$

Prozhefa.com

رابطهٔ ۴-۲۳ نشان می‌دهد که تابع $AR^{۲/۳}$ تابع پیچیده‌ای از $y_۰$ است، لذا در پیداکردن $y_۰$ از آزمون و خطا استفاده می‌گردد، با این تکنیک مقدار $y_۰$ برابر ۱٫۸۲m به‌دست می‌آید.

مثال ۴-۴

یک کانال بتنی ($n = ۰٫۰۱۵$) با مقطع ذوزنقه دارای شیب کناره‌های ۱:۱ می‌باشد. اگر شیب طولی کانال ۰٫۰۰۰۴ باشد، عرض کف را به گونه‌ای محاسبه نمایید که کانال بتواند دبی $۱۰۰\text{m}^۳/\text{s}$ را در عمق نرمال ۲٫۵m انتقال دهد.

حل:

نخست مشخصات مقطع ذوزنقه‌ای را برحسب عرض کف به‌دست می‌آوریم:

$$A = (b + zy_۰)y_۰ = (b + ۲٫۵)۲٫۵$$

$$P = (b + ۲\sqrt{۱ + z^۲}y_۰) = b + ۷٫۰۷۱$$

$$R = \frac{A}{p} = \frac{(b + ۲٫۵)۲٫۵}{b + ۷٫۰۷۱}$$

$$۱۰۰ = \frac{۱}{۰٫۰۱۵}(۰٫۰۰۰۴)^{۱/۲}\left[\frac{(b + ۲٫۵)۲٫۵}{b + ۷٫۰۷۱}\right]^{۲/۳}(b + ۲٫۵)۲٫۵ \qquad (۴-۲۴)$$

جواب معادلهٔ ۴-۲۴ با استفاده از آزمون و خطا برابر ۱۶٫۳۳m می‌باشد.

۴-۳-۱ محاسبهٔ عمق نرمال

چنان‌که در حل مثال ۴-۳ مشاهده گردید با توجه به تغییرات پیچیده فاکتور $AR^{۲/۳}$ برحسب $y_۰$، عمق نرمال در فرمول مانینگ به صورت صریح محاسبه نمی‌گردد. روشهای مختلف محاسبهٔ عمق نرمال به صورت زیر دسته‌بندی می‌شود:

الف - روش عددی آزمون و خطا: در این روش معلومات مسأله در فرمول مانینگ قرار داده شده مجهول براساس قضاوت مهندسی و تجربه با آزمون و خطا پیدا می‌شود.

ب - روش استفاده از نمودارها یا جداول کمکی: در صورتی‌که در یک مقطع مستطیلی فاکتور سطح در محاسبه جریان یکنواخت برمقدار عرض کف به توان $\frac{۸}{۳}$ تقسیم گردد، پارامتر بدون بعد حاصل تابعی از $\frac{y}{b}$ خواهد بود:

Prozhefa.com

$$\frac{AR^{۲/۳}}{b^{۸/۳}} = \frac{A^{۵/۳}}{b^{۸/۳}P^{۲/۳}} = \frac{b^{۵/۳}y^{۵/۳}}{b^{۸/۳}(b+۲y)^{۲/۳}} = \frac{y^{۵/۳}}{b(b+۲y)^{۲/۳}}$$

$$\frac{AR^{۲/۳}}{b^{۸/۳}} = \frac{y^{۵/۳}}{b(b+۲y)^{۲/۳}} = \frac{y}{b}\left(\frac{y}{b+۲y}\right)^{۲/۳} = \frac{y}{b}\left(\frac{\frac{y}{b}}{۱+\frac{۲y}{b}}\right)^{۲/۳} = f_۱\left(\frac{y}{b}\right)$$

به‌همین ترتیب با قدری عملیات ریاضی می‌توان ثابت نمود که در مقاطع ذوزنقه‌ای و دایروی نیز روابط ۴-۲۵ و ۴-۲۶ برقرار می‌باشند:

$$\frac{AR^{۲/۳}}{b^{۸/۳}} = f_۲\left(\frac{y}{b}, z\right) \qquad (۲۵-۴)$$

$$\frac{AR^{۲/۳}}{d_۰^{۸/۳}} = f_۳\left(\frac{y}{d_۰}\right) \qquad (۲۶-۴)$$

با توجه به این مطالب، منحنی تغییرات $\frac{AR^{۲/۳}}{d_۰^{۸/۳}}$ و $\frac{AR^{۲/۳}}{b^{۸/۳}}$ می‌تواند به ترتیب برحسب $\frac{y}{d_۰}$ و $\frac{y}{b}$ (به‌ازاء z ثابت) مطابق نمودار ۲-۴ ترسیم گردد.

توجه به‌فرمول مانینگ نحوه استفاده از نمودار ۴-۲ در تعیین عمق نرمال را نشان می‌دهد که به‌عنوان مثال در مقطع دایروی می‌توان نوشت:

$$Q = \frac{۱}{n}S^{۱/۲}AR^{۲/۳} \Rightarrow \frac{nQ}{\sqrt{S}\,d_۰^{۸/۳}} = \frac{AR^{۲/۳}}{d_۰^{۸/۳}}$$

به ازاء دبی جریان، شیب طولی، ضریب مانینگ و قطر کانال، مقدار $\frac{nQ}{\sqrt{S}\,d_۰^{۸/۳}}$ که معادل $\frac{AR^{۲/۳}}{d_۰^{۸/۳}}$ می‌باشد، محاسبه و این مقدار بر روی نمودار ۴-۲ برده شده، مقدار $\frac{y_۰}{d_۰}$ قرائت می‌شود که در نتیجه مقدار $y_۰$ قابل محاسبه خواهد بود.

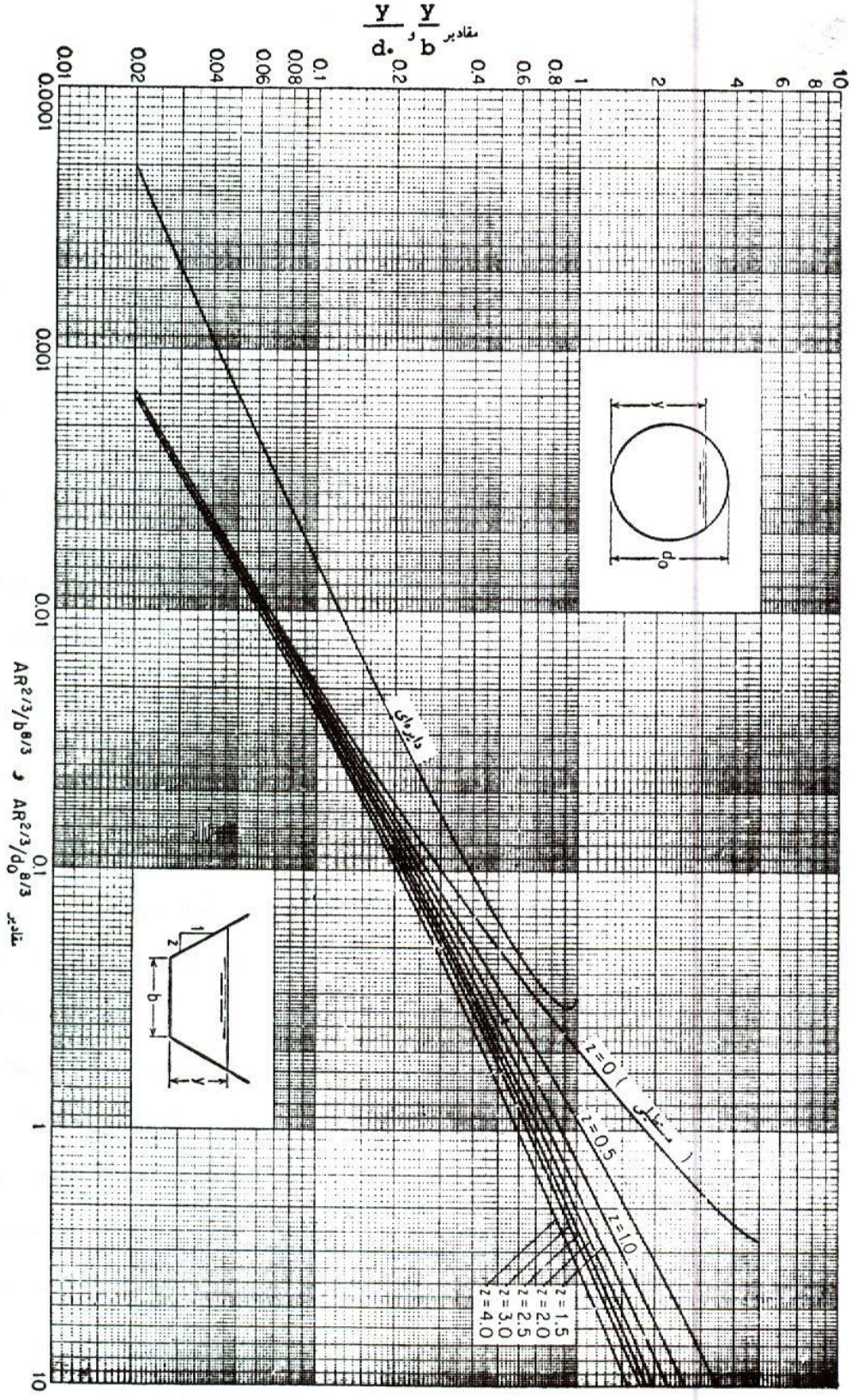
به همین ترتیب در کانالهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای مقادیر بدون بعد $\frac{nQ}{\sqrt{S}\,b^{۸/۳}}$ محاسبه شده و سپس عمق نرمال $y_۰$ با استفاده از نمودار کمکی ۴-۲ به‌دست می‌آید.

ج - روش ترسیمی: در این روش، که می‌تواند برای مقاطع هندسی نامنظم به کار رود، با تغییر دلخواه مقدار y منحنی تغییرات $AR^{۲/۳}$ برحسب y ترسیم می‌شود (شکل ۴-۴).

با توجه به این‌که در جریان نرمال رابطه $\frac{nQ}{\sqrt{S}} = AR^{۲/۳}$ برقرار می‌باشد، مقدار $\frac{nQ}{\sqrt{S}}$ به ازاء دبی، شیب و زبری مانینگ خاص محاسبه شده و بر روی منحنی $(AR^{۲/۳} - y)$ برده می‌شود تا مقدار $y_۰$ تعیین گردد. بدیهی است در مقاطع هندسی منظم نیز می‌توان روش حاضر را به کار برد.

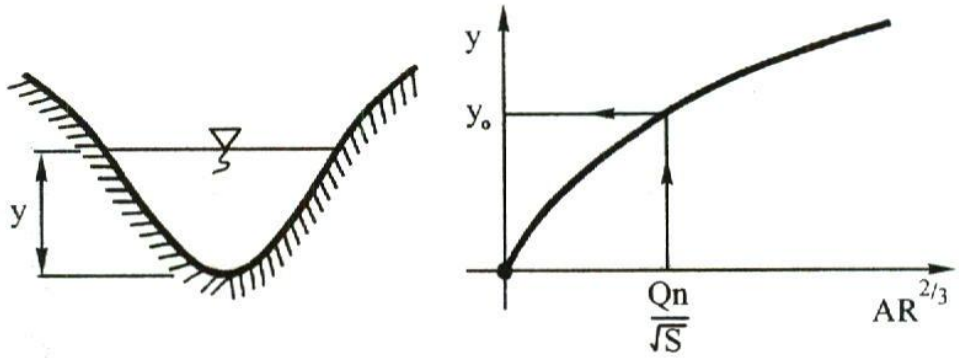
د - روش نیوتن-رافسون: روش نیوتن-رافسون درانتهای بخش ۲-۷ به تفضیل توضیح داده شد.

Prozhefa.com



نمودار ۴-۲ نمودار تعیین عمق نرمال

Prozhefa.com



شکل ۴-۴

این روش می‌تواند در حلّ معادلهٔ مانینگ جهت تعیین عمق نرمال نیز مورد استفاده قرار گیرد. در نتیجه با مراجعه به مطالب بخش ۲-۷ و به منظور حلّ معادلهٔ مانینگ می‌توان نوشت:

$$F(y) = AR^{۲/۳} - \frac{Qn}{\sqrt{S}} = ۰ \qquad (۲۷-۴)$$

$$\frac{dF}{dy} = \frac{d}{dy}\left(A^{۵/۳} P^{-۲/۳} - \frac{Qn}{\sqrt{S}}\right)$$

$$\frac{dF}{dy} = \frac{۵}{۳} TR^{۲/۳} - \frac{۲}{۳} R^{۵/۳} \frac{dP}{dy} \qquad (۲۸-۴)$$

عبارت $\frac{dP}{dy}$ که چگونگی تغییرات پیرامون مرطوب نسبت به عمق را نشان می‌دهد برای هر مقطع باید تعیین گردد. برای یک مقطع ذوزنقه‌ای با شیب کناره‌های متفاوت ($z_۱$ و $z_۲$) این عبارت می‌تواند از رابطهٔ ۴-۲۹ تعیین گردد.

$$\frac{dP}{dy} = \sqrt{۱ + z_۱^۲} + \sqrt{۱ + z_۲^۲} \qquad (۲۹-۴)$$

رابطهٔ فوق می‌تواند به مقاطع مثلثی، مستطیلی و ذوزنقه‌ای نیز تعمیم یابد.

برنامهٔ کامپیوتری ارائه شده در انتهای فصل معادلهٔ ۴-۲۷ را برای مقطع ذوزنقه‌ای با شیب کناره‌های متفاوت حلّ می‌کند. در این برنامه حدس اوّلیه برای عمق نرمال بر مبنای این که کانال مستطیلی عریض می‌باشد محاسبه می‌گردد.

مثال ۴-۵

مثال ۴-۳ را با استفاده از نمودار ۴-۲ حل نمایید.

$$\frac{Qn}{\sqrt{S}\, b^{۸/۳}} = \frac{۲۰ \times ۰/۰۱۵}{\sqrt{۰/۰۰۰۳۵}(۵)^{۸/۳}} = ۰/۲۱۹$$

Prozhefa.com

در صورتی‌که مقدار $z = ۱/۵$ به ازاء ۰/۲۱۹ روی نمودار ۴-۲ برده شود، مقدار $\frac{y_0}{b}$ برابر ۰/۳۷ به‌دست می‌آید. در نتیجه:

$$\frac{y_0}{b} = ۰/۳۷ \Rightarrow y_0 = ۰/۳۷ \times ۵ = ۱/۸۵ \text{ m}$$

مثال ۴-۶

مثال ۴-۳ را با استفاده از روش نیوتن - رافسون و برنامه ارائه شده در انتهای فصل حلّ نمایید.

حل:

مشخصات مقطع، کانال و جریان به شرح زیر می‌باشند:

$Q = ۲۰ \text{ m}^3/\text{s}$ $n = ۰/۰۱۵$ $S = ۰/۰۰۰۳۵$

$b = ۸/۰ \text{ m}$ $z = ۱/۵$

اطلاعات ورودی و خروجی مربوط به این مثال در انتهای فصل آورده شده‌اند. آنالیز حساسیت بر روی ε_T انتخابی نشان می‌دهد که ε_T مناسب برای این مثال نیز در حدود ۰/۰۰۱m می‌باشد. به ازاء این ε_T، روش بعد از ۳ آزمون همگرا می‌شود و جواب به دست آمده برابر با ۱/۸۲۰۵۴m می‌باشد که با جواب مثالهای ۵-۴ و ۴-۳ نزدیکی لازم را دارد.

مثال ۴-۷

در یک کانال ذوزنقه‌ای به عرض کف ۶/۰ متر، شیب کناره‌های $(H)۲ : (V)۱$ و ضریب مانینگ ۰/۰۲۵ مطلوب است:

الف - تعیین شیب نرمال (S_n) اگر عمق نرمال ۱/۵m و دبی $۱۰\text{m}^3/\text{s}$ در نظر گرفته شود.

ب - تعیین شیب بحرانی (S_c) و عمق نرمال (y_0) در صورتی‌که دبی $۱۰\text{m}^3/\text{s}$ باشد.

ج - تعیین شیب بحرانی نرمال (S_{cn}) و مقدار دبی (Q) در صورتی‌که عمق نرمال ۱/۵m در نظر گرفته شود.

جهت شناسائی شکل نیمرخهای سطح آب، طبقه‌بندی و تشخیص انواع شیب کانالها اهمیت زیادی دارد. این طبقه‌بندی که در فصل پنجم مورد بحث قرار خواهد گرفت عبارت است از مقایسهٔ دو عمق نرمال و بحرانی و یا به‌عبارت دیگر مقایسه شیب کانال نسبت به شیب بحرانی (S_c) که مثال حاضر چند تعریف پایه از شیب کانالها را نشان می‌دهد.

حل:

الف: در این قسمت شیب کانال به گونه‌ای تعیین می‌شود که به ازاء دبی $۱۰\text{m}^3/\text{s}$ جریان نرمال

Prozhefa.com

به‌عمق ۱٫۵m در کانال برقرار شود. با محاسبهٔ مشخصات هندسی مقطع و قرار دادن آن در رابطهٔ مانینگ مقدار شیب نرمال به‌دست می‌آید:

$$y_0 = ۱٫۵\,\text{m} \Rightarrow A = (b + zy_0)y_0 = (۶ + ۲ \times ۱٫۵)۱٫۵ = ۱۳٫۵\ \text{m}^۲$$

$$P = b + ۲\sqrt{۱ + z^۲}\,y_0 = ۶ + ۲ \times ۱٫۵\sqrt{۱ + ۴} = ۱۲٫۷۱\text{m}$$

$$R = \frac{A}{P} = ۱٫۰۶۲\ \text{m}$$

$$Q = \frac{۱}{n} S^{۱/۲} R^{۲/۳} A$$

$$۱۰ = \frac{۱}{۰٫۰۲۵} S_n^{۱/۲} (۱٫۰۶۲)^{۲/۳} \times ۱۳٫۵ \Rightarrow S_n = ۰٫۰۰۰۳۱۵$$

ب: به ازاء شیب بحرانی (S_c) جریان یکنواخت شکل گرفته در کانال همواره در وضعیت بحرانی بوده و عمق نرمال در این حالت با عمق بحرانی مساوی خواهد بود. ابتدا به ازاء دبی ۱۰m^۳/s عمق بحرانی محاسبه می‌شود و سپس با قرار دادن این عمق در فرمول مانینگ شیب بحرانی به‌دست می‌آید.

جهت محاسبهٔ عمق بحرانی از نمودار ۲-۱ استفاده می‌گردد:

$$\frac{Z_c}{b^{۲٫۵}} = \frac{Q}{\sqrt{g}\,b^{۲٫۵}} = \frac{۱۰}{\sqrt{۹٫۸۱}\,۶^{۲٫۵}} = ۰٫۰۳۶$$

$$\frac{Z_c}{b^{۲٫۵}} = ۰٫۰۳۶ \xrightarrow[z = ۲]{\text{نمودار ۲-۱}} \frac{y_c}{b} = ۰٫۱ \Rightarrow y_c = ۰٫۶\,\text{m}$$

برای پیداکردن S_c به شکل زیر عمل می‌گردد:

$$y_0 = y_c = ۰٫۶\,\text{m}$$

$$A = (۶ + ۲ \times ۰٫۶)\,۰٫۶ = ۴٫۳۲\ \text{m}^۲$$

$$P = ۶ + ۲\sqrt{۱ + ۴} \times ۰٫۶ = ۸٫۶۰\,\text{m}$$

$$R = \frac{۴٫۳۲}{۸٫۶۰} = ۰٫۴۹۷\,\text{m}$$

$$Q = \frac{۱}{n} S_c^{۱/۲} R^{۲/۳} A$$

$$۱۰ = \frac{۱}{۰٫۰۲۵} S_c^{۱/۲} (۰٫۴۹۷)^{۲/۳} \times ۰٫۳۲ \Rightarrow S_c = ۰٫۰۰۸۴۶$$

با توجه به این‌که شیب قسمت اول مسأله (S_n) کمتر از شیب بحرانی (S_c) است مشخص می‌شود که

Prozhefa.com

به ازاء دبی $۱۰ m^۳/s$ جریان نرمال شکل گرفته در حالت الف جریان یکنواخت زیربحرانی $(y_۰ > y_c)$ می‌باشد. چنین شیبی اصطلاحاً شیب ملایم نامیده می‌شود.

ج : می‌توان با تنظیم شیب و دبی جریان، جریان یکنواخت را به ازاء یک عمق خاصی به گونه‌ای ایجاد نمود که حالت جریان بحرانی باشد. چنین شیبی، بحرانی نرمال (S_{cn}) نامیده می‌شود. عمق خاص داده شده در این مسأله ۱٫۵m می‌باشد :

$$y_c = y_۰ = ۱٫۵ \, m$$

$$A = ۱۳٫۵ \, m^۲$$

$$T = b + ۲zy_c = ۶ + ۲ \times ۲ \times ۱٫۵ = ۱۲ \, m$$

$$R = ۱٫۰۶۲ \, m$$

ابتدا دبی جریان (Q) به ازاء عمق بحرانی ۱٫۵m محاسبه می‌گردد :

$$\frac{Q^۲}{g} = \frac{A^۳}{T} \Rightarrow \frac{Q^۲}{۹٫۸۱} = \frac{(۱۳٫۵)^۳}{۱۲} \Rightarrow Q = ۴۴٫۸۵ \, m^۳/s$$

با داشتن این مقدار می‌توان شیب را نیز به نحوی تعیین نمود که دبی $۴۴٫۸۵ m^۳/s$، جریان نرمال بحرانی به عمق ۱٫۵m در کانال ایجاد نماید :

$$۴۴٫۸۵ = \frac{۱}{۰٫۰۲۵} S_{cn}^{۱/۲} (۱٫۰۶۲)^{۲/۳} \times ۱۳٫۵ \Rightarrow S_{cn} = ۰٫۰۰۶۳$$

۰٫۰۰۶۳ شیب بحرانی نرمال در عمق ۱٫۵m می‌باشد.

در این‌جا لازم است اضافه شود که کمترین شیب بحرانی در یک کانال با شکل هندسی و ضریب زبری مشخص را شیب حد آن کانال می‌نامند. به عنوان مثال در صورتی‌که فرض شود که مقطع کانال، مستطیلی به عرض ثابت b باشد، در شیب بحرانی جریان نرمال بحرانی در کانال برقرار می‌باشد پس:

$$Q = \frac{۱}{n} S_c^{۱/۲} R^{۲/۳} A$$

$$Q = \frac{۱}{n} (by_c) \left(\frac{by_c}{b + ۲y_c}\right)^{۲/۳} S_c^{۱/۲} \qquad (۳۰-۴)$$

در این کانال جریان در وضعیت بحرانی می‌باشد یعنی :

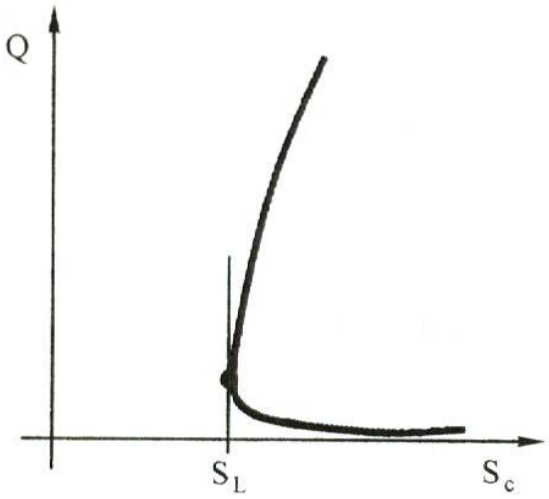
$$\frac{Q^۲}{g} = \frac{A^۳}{T} \Rightarrow \frac{Q^۲}{g} = \frac{b^۳ y_c^۳}{b} \Rightarrow Q = by_c \sqrt{gy_c} \qquad (۳۱-۴)$$

از حذف y_c بین دو رابطهٔ ۴-۳۰ و ۴-۳۱، رابطهٔ بین Q و S_c به‌دست می‌آید. در صورتی‌که تابع Q برحسب S_c در یک دستگاه محورهای مختصات مطابق شکل ۴-۵ رسم شود، نقاط قرار گرفته

Prozhefa.com

برروی منحنی، جریان نرمال بحرانی را نشان می‌دهد. کمترین شیب بحرانی در این حالت شیب حد کانال نامیده می‌شود.

ساده‌ترین راه برای ترسیم منحنی $(Q - S_c)$ عبارت است از انتخاب مقادیر دلخواه برای y و سپس تعیین مقدار Q از رابطهٔ ۴-۳۱ و مقدار S_c از رابطه ۴-۳۰. بدین ترتیب می‌توان در یک دستگاه محورهای مختصات مطابق شکل ۴-۵ منحنی $(Q - S_c)$ را رسم نمود. نقاط سمت راست منحنی $(Q - S_c)$ جریان فوق بحرانی و نقاط قرار گرفته در سمت چپ آن وضعیت جریان زیر بحرانی را نشان می‌دهند. برای یک کانال مستطیلی به عرض ۳٫۰۵m و زبری ۰٫۰۱۵، Chow منحنی شبیه شکل ۴-۵ را ترسیم نموده و شیب حدّ را برابر ۰٫۰۰۴ پیدا نموده است.

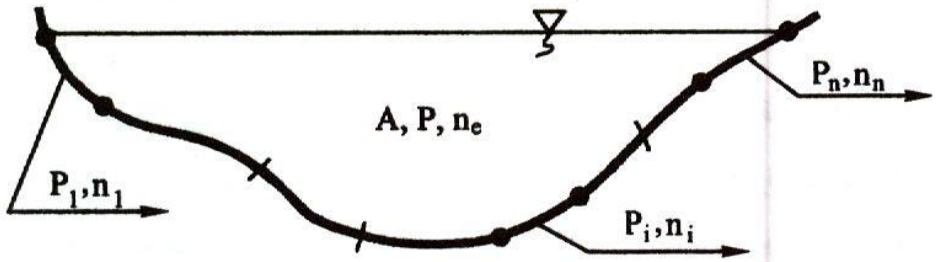


شکل ۴-۵ منحنی $Q - S_c$

۴-۴ زبری معادل (Equivalent Roughness)

در قسمت ۴-۲-۶ اشاره گردید که جنس بستر کانال نقش اساسی در تخمین مقدار ضریب‌زبری مانینگ در کانال دارد. در عمل می‌توان کانالهایی داشت که ضریب زبری مانینگ و به عبارتی جنس بدنهٔ کانال در قسمتهای مختلف متفاوت باشد (شکل ۴-۶). چنین کانالی می‌تواند یک فلوم آزمایشگاهی با جوانب شیشه‌ای (جهت مشاهدهٔ جریان) و کف فلزی و یا چوبی باشد و یا می‌توان کانالهای مصنوعی را به نحوی طراحی نمود که دارای کف خاکی بوده ولی جوانب آنها برای جلوگیری از تراوش آب و یا ریزش بدنه از پوشش سخت تشکیل شود. مقاطع مرکب کانالهای طبیعی و رودخانه‌ها مثالی مشخص‌تر از کانالهای با زبری متفاوت می‌باشند.

Prozhefa.com



شکل ۴-۶ مقطع یک کانال با زبری متغیر

در این‌گونه مقاطع می‌توان از فرمول مانینگ در تحلیل جریان استفاده نمود ولی این امر مستلزم آن است که برای بستر کانال یک زبری معادل معرفی گردد به گونه‌ای که چنانچه این زبری معادل در فرمول مانینگ قرار داده شود دبی واقعی را به‌دست دهد.

روشهای مختلفی در تخمین زبری معادل مانینگ ارائه شده است که در این جا به سه روش متداولتر آن اشاره می‌شود:

۱- رابطهٔ هورتن - اینستین (Horton-Einstein): این دو فرض نمودند که هر جزء مساحت (A_i) از مقطع تحت تأثیر پیرامون مرطوب (P_i) و ضریب‌زبری مانینگ (n_i) می‌باشد و همچنین سرعت متوسط در هر یک از این جزء مساحتها مساوی و برابر سرعت متوسط کل جریان برمبنای زبری معادل می‌باشد.

با توجه به این فرضیات می‌توان نوشت:

$$A_1 + A_2 + \ldots + A_i + \ldots + A_n = A$$
$$V_1 = V_2 = \ldots = V_i = \ldots = V_n = V \qquad (۳۲-۴)$$

با فرض شیب ثابت S_o برای تمام قسمتها و با استفاده از فرمول مانینگ می‌توان نوشت:

$$S_o^{1/2} = \frac{V_1 n_1}{R_1^{2/3}} = \frac{V_2 n_2}{R_2^{2/3}} = \ldots = \frac{V n_e}{R^{2/3}} \qquad (۳۳-۴)$$

در رابطهٔ ۴-۳۳ n_e زبری معادل مقطع، R_1 و R_2 و... شعاع هیدرولیکی در هر یک از مساحتهای جزئی و R شعاع هیدرولیکی کل مقطع یعنی حاصل تقسیم مساحت مقطع بر پیرامون مرطوب کل می‌باشد. رابطه ۴-۳۳ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{V_i n_i}{R_i^{2/3}} = \frac{V n_e}{R^{2/3}} \Rightarrow \left(\frac{A_i}{A}\right)^{2/3} = \frac{n_i P_i^{2/3}}{n_e P^{2/3}} \qquad (۳۴-۴)$$

و یا:

$$A_i = A \frac{n_i^{3/2} P_i}{n_e^{3/2} P}$$

و یا:

$$\Sigma A_i = A = A \frac{\Sigma n_i^{3/2} P_i}{n_e^{3/2} P}$$

Prozhefa.com

$$n_e = \frac{(\Sigma n_i^{۳/۲} P_i)^{۲/۳}}{P^{۲/۳}} \qquad (۳۵-۴)$$

رابطهٔ ۴-۳۵ به رابطهٔ هورتن - اینستین و یا رابطهٔ هورتن (Horton) در تعیین زبری معادل موسوم است. در این رابطه با معلوم بودن n_i ، P_i و پیرامون مرطوب کل می‌توان زبری معادل را به‌دست آورد.

۲- رابطهٔ پاولوفسکی : پاولوفسکی و دیگران فرض نمودند که نیروی رانش کل در یک بازه از کانال برمبنای سرعت متوسط و پیرامون مرطوب کل معادل با جمع نیروی رانش در هر یک از مساحتهای تفکیک شده باشد و نیز این‌که سرعت متوسط و شعاع هیدرولیکی در هریک از این جزء مساحتها مساوی و برابر سرعت متوسط و شعاع هیدرولیکی کل جریان می‌باشد. در نتیجه فرمول زیر را به‌دست آوردند :

$$n_e = \frac{(\Sigma n_i^{۲} P_i)^{۱/۲}}{P^{۱/۲}} \qquad (۳۶-۴)$$

اثبات رابطهٔ ۴-۳۶ به عنوان تمرین به عهده مطالعه کنندگان گذاشته شده است.

۳- رابطهٔ لوتر (Lotter): لوتر با فرض این‌که دبی جریان در کل مقطع معادل با جمع دبی جریان در هر یک از مساحتهای جزء می‌باشد، رابطهٔ خود را در تعیین زبری معادل به شکل زیر ارائه نمود:

$$n_e = \frac{PR^{۵/۳}}{\Sigma(P_i R_i^{۵/۳}/n_i)} \qquad (۳۷-۴)$$

که می‌توان آن را به سهولت استخراج کرد:

$$Q = \Sigma Q_i \Rightarrow \frac{۱}{n_e} S^{۱/۲} R^{۲/۳} A = \left(\frac{۱}{n_۱} R_۱^{۲/۳} A_۱ + \frac{۱}{n_۲} R_۲^{۲/۳} A_۲ + \ldots\right) S^{۱/۲} \qquad (۳۸-۴)$$

با توجه به این‌که $R = \frac{A}{P}$ می‌باشد رابطهٔ ۴-۳۸ تبدیل به رابطهٔ ۴-۳۹ می‌گردد:

$$\frac{۱}{n_e} S^{۱/۲} PR^{۵/۳} = \left(\frac{۱}{n_۱} P_۱ R_۱^{۵/۳} + \frac{۱}{n_۲} P_۲ R_۲^{۵/۳} + \ldots\right) S^{۱/۲} \qquad (۳۹-۴)$$

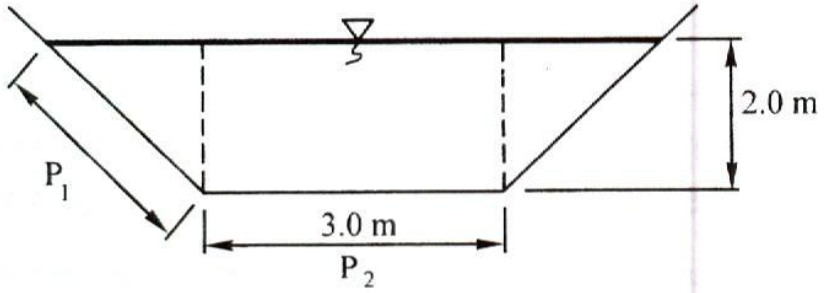
که همان رابطهٔ ۴-۳۷ می‌باشد.

بحث در کاربرد میزان دقت هریک از روابط فوق در ضمن دو مثال ۴-۸ و ۴-۹ خواهد آمد.

مثال ۴-۸

یک کانال ذوزنقه‌ای با شیب کناره‌های ۱:۱ دارای کفی از جنس ماسه ($n = ۰/۰۲$) و جوانبی از جنس بتن ($n = ۰/۰۱۴$) می‌باشد. دبی جریان را در صورتی‌که عمق ۲/۰m و شیب طولی کانال ۰/۰۰۱ باشد به‌دست آورید.

Prozhefa.com



شکل ۴-۷

حل:

با توجه به شکل ۴-۷ مشخصات هندسی مقطع جریان برابر خواهند بود با:

$$P_۱ = P_۳ = \sqrt{۴ + ۴} = ۲/۸۲۸\text{m}$$

$$P_۲ = ۳/۰\text{m}$$

$$P = P_۱ + P_۲ + P_۳ = ۲ \times ۲/۸۲۸ + ۳ = ۸/۶۵۶\text{m}$$

$$A_۱ = A_۳ = ۲ \times ۲ \times \frac{۱}{۲} = ۲\text{m}^۲$$

$$A_۲ = ۳ \times ۲/۰ = ۶/۰\,\text{m}^۲$$

$$A = A_۱ + A_۲ + A_۳ = ۲ + ۲ + ۶ = ۱۰\text{m}^۲$$

$$R_۱ = R_۳ = \frac{A_۱}{P_۱} = \frac{۲}{۲/۸۲۸} = ۰/۷۰۷\text{m}$$

$$R_۲ = \frac{A_۲}{P_۲} = \frac{۶}{۳} = ۲/۰\text{m}$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{۱۰}{۸/۶۵۶} = ۱/۱۵۵\text{m}$$

رابطهٔ هورتن -اینستین:

$$n_e = \left[\frac{۲(۲/۸۲۸)(۰/۰۱۴)^{۱/۵} + ۳ \times (۰/۰۲)^{۱/۵}}{۸/۶۵۶}\right]^{۲/۳} = ۰/۰۱۶۲$$

رابطهٔ پاولوفسکی:

$$n_e = \left[\frac{۲(۲/۸۲۸)۰/۰۱۴^۲ + ۳ \times ۰/۰۲^۲}{۸/۶۵۶}\right]^{۱/۲} = ۰/۰۱۶۳$$

رابطهٔ لوتر:

$$n_e = \frac{۸/۶۵۶(۱/۱۵۵)^{۵/۳}}{۲ \times ۲/۸۲۸(۰/۷۰۷)^{۵/۳} / ۰/۰۱۴ + ۳ \times ۲^{۵/۳}/(۰/۰۲)} = ۰/۰۱۵۷$$

دبی جریان براساس هر یک از روابط فوق به صورت زیر به‌دست می‌آید:

Prozhefa.com

$$Q = \frac{۱}{n_e} R^{۲/۳} A S^{۱/۲}$$

رابطهٔ هورتن - اینستین $Q = ۲۱/۴ \text{m}^۳/\text{s}$

رابطهٔ پاولوفسکی $Q = ۲۱/۳۶ \text{ m}^۳/\text{s}$

رابطهٔ لوتر $Q = ۲۲/۱۷ \text{m}^۳/\text{s}$

همان‌گونه که در مثال ۴-۸ ملاحظه می‌شود روابط هورتن و پاولوفسکی در ضمن سادگی، جواب نسبتاً نزدیکی را به‌دست می‌دهند در حالی که رابطهٔ لوتر اگر چه جواب دوری را نسبت به نتایج قبلی نمی‌دهد اما نیاز به تفکیک مساحتهای جزء و محاسبه مساحت مقطع و شعاع هیدرولیکی در هر قسمت دارد که این عمل را در مورد کلیهٔ مقاطع نمی‌توان با دقت لازم انجام داد.

اضافه می‌نماید که تخمین دبی جریان با استفاده از روابط جریان یکنواخت و مفهوم زبری معادل، یک روش دقیق در تحلیل رفتار جریان در این نوع کانالها نمی‌باشد و از طرفی مسلم است که زبری معادل به میزان زیادی از شکل هندسی مقطع و چگونگی توزیع زبری‌ها در مقطع تأثیر می‌پذیرد ولی در این‌که کدامیک از روشهای ارائه شده در تخمین زبری معادل، دقیقتر می‌باشد نظر قاطعی وجود ندارد.

۴-۴-۱ زبری معادل در مقطع مرکب

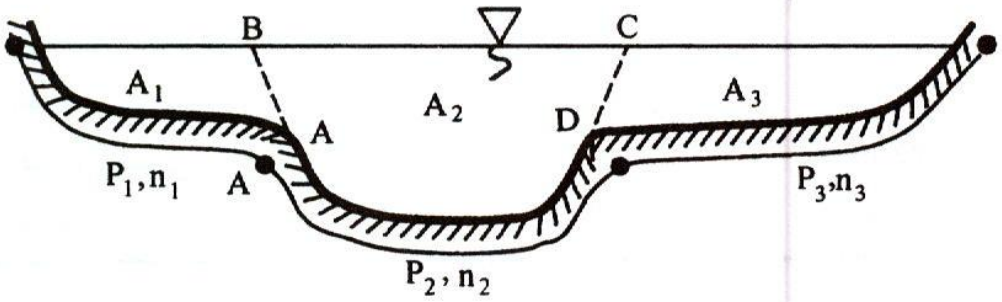
مفهوم زبری معادل می‌تواند در تخمین دبی جریان در مقاطع مرکب (Compound Sections) نیز مورد استفاده واقع شود. چنانکه در بخش ۱-۸-۳ ذکر گردید، مقاطع رودخانه‌ها در هنگام سیلاب و جاری شدن آب به دشتهای سیلابی مثال مشخصی از مقاطع مرکب می‌باشند که در آنها آب علاوه بر مسیر اصلی، در دشتهای سیلابی نیز با عمق کم جاری می‌شود و معمولاً ضریب زبری مانینگ بسترهای سیلابی بیش از کانال اصلی می‌باشد. یک راه‌حل پیشنهادی در تخمین دبی جریان در این‌گونه کانالها و در هنگامی که عمق جریان کم می‌باشد عبارت است از تقسیم مقطع به اجزاء کوچکتر و مقاطع منفرد و تعیین دبی هر یک از این مقاطع و محاسبه مجموع آنها به عنوان دبی کل. مثلاً چنانچه مقطع مرکبی مطابق شکل ۴-۸ وجود داشته باشد، می‌توان آن را به سه مقطع جزء $A_۱$، $A_۲$ و $A_۳$ تقسیم نموده و دبی کل را از جمع دبی جریان در هر یک از مساحتهای تفکیک شده تعیین نمود، یعنی:

$$Q = Q_۱ + Q_۲ + Q_۳ = \frac{۱}{n_۱} A_۱ R_۱^{۲/۳} S^{۱/۲} + \frac{۱}{n_۲} A_۲ R_۲^{۲/۳} S^{۱/۲} + \frac{۱}{n_۳} A_۲ R_۲^{۲/۳} S^{۱/۲}$$

یا:

$$Q = (K_۱ + K_۲ + K_۳)\sqrt{S} \qquad (۴-۴۰)$$

Prozhefa.com



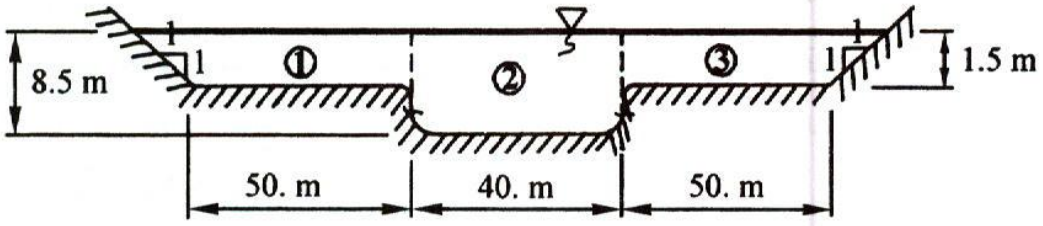
شکل ۴-۸ مقطع مرکب از یک کانال

در رابطه ۴-۳۷، K_1، K_2، K_3 ضریب انتقال در هر یک از مقاطع ۱، ۲ و ۳ می‌باشند. بعضی از محققین پیشنهاد می‌کنند که در صورتی‌که در محاسبه شعاع هیدرولیکی مقطع ۲، طول‌های AB و CD نیز به طول P_2 اضافه شود، جواب دقیقتری به‌دست خواهد آمد.

چنانچه خواسته شود به‌جای استفاده از روش فوق، مقطع مرکب را به صورت یک مقطع واحد با زبری معادل حل نمود، ملاحظه می‌شود که از روابط زبری معادل، رابطهٔ لوتر با رابطهٔ ۴-۴۰ هماهنگی بیشتری دارد چراکه فرضیاتی که هر دو رابطه بر پایه آن بنا شده‌اند یکسان می‌باشند. مثال ۴-۹ محاسبهٔ دبی را در یک مقطع مرکب نشان می‌دهد.

مثال ۴-۹

شکل ۴-۹ مقطع یک رودخانه را در زمان سیلاب نشان می‌دهد. با فرض این‌که ضریب زبری مانینگ در کانال اصلی ۰٫۰۳ و در دشتهای سیلابی ۰٫۰۴ باشد، دبی رودخانه را تخمین بزنید. شیب طولی رودخانه معادل ۰٫۰۰۵ فرض می‌گردد.



شکل ۴-۹

حل :

به منظور استفاده از رابطهٔ ۴-۴۰، نخست مشخصات جریان در هر یک از مقاطع محاسبه می‌شود :

$A_1 = A_3 = ۷۶٫۱۲۵ \text{ m}^2$

Prozhefa.com

$$P_۱ = P_۳ = ۵۲/۱۲ \text{ m}$$

$$R_۱ = R_۳ = ۱/۴۶ \text{ m}$$

$$K_۱ = K_۳ = \frac{۱}{n_۱} A_۱ R_۱^{۲/۳} = \frac{۱}{۰/۰۴} \times (۷۶/۱۲۵)(۱/۴۶)^{۲/۳} = ۲۴۴۹/۲۶ \text{m}^۳/\text{s}$$

$$A_۲ = ۴۰ \times ۸/۵ = ۳۴۰ \text{ m}^۲$$

قسمتهای خط‌چین در محاسبهٔ پیرامون مرطوب منظور می‌شود.

$$P_۲ = ۵۴ + ۳ = ۵۷ \text{m}$$

$$R_۲ = \frac{۳۴۰}{۵۷} = ۵/۹۶۵ \text{ m}$$

$$K_۲ = \frac{۱}{۰/۰۳} (۳۴۰)(۵/۹۶۵)^{۲/۳} = ۳۷۲۷۵/۷۶ \text{ m}^۳/\text{s}$$

$$Q = (K_۱ + K_۲ + K_۳)\sqrt{S} = (۲ \times ۲۴۴۹/۲۶ + ۳۷۲۷۵/۷۶)\sqrt{۰/۰۰۵}$$

$$Q = ۲۹۸۲/۱۷ \text{ m}^۳/\text{s}$$

اگر در حل این مثال از مفهوم زبری معادل استفاده شود، مشخصات زیر در تعیین زبری معادل و محاسبهٔ دبی لازم می‌آیند:

$$P_۱ = P_۳ = ۵۲/۱۲ \text{m}$$

$$R_۱ = R_۳ = ۱/۴۶ \text{m}$$

$$A_۲ = ۳۴۰ \text{ m}^۲ \ , \quad P_۲ = ۵۴/۰ \text{ m} , \quad R_۲ = ۶/۳ \text{m}$$

$$A = ۴۹۲/۲۵ \text{ m}^۲ \ , \quad P = ۱۵۸/۲۴ \text{ m} \ , \quad R = ۳/۱۱۱ \text{ m}$$

با استفاده از روابط مختلف در تعیین زبری معادل، مقدار زبری معادل کانال و دبی مربوطه حساب می‌شود:

فرمول هورتن - اینستین $n_e = ۰/۰۳۶۷ \Rightarrow Q = ۲۰۲۱ \text{ m}^۳/\text{s}$

فرمول پاولوفسکی $n_e = ۰/۰۳۶۹ \Rightarrow Q = ۲۰۱۰ \text{m}^۳/\text{s}$

فرمول لوتر $n_e = ۰/۰۲۴۱ \Rightarrow Q = ۳۰۷۷ \text{m}^۳/\text{s}$

چنانکه دیده می‌شود این تصور که در مقاطع مرکب، هر سه رابطه در تعیین زبری معادل، مقادیر نسبتاً یکسانی می‌دهند فرض باطلی است.

با توجه به این‌که به محض جاری شدن جریان به دشتهای سیلابی با عمق کم، پیرامون مرطوب جریان سریعاً زیاد می‌شود ولی تغییر در مساحت ناچیز می‌باشد، لذا استفاده از روابط هورتن- اینستین و یا پاولوفسکی با توجه به فرضیات آنها به مفهوم دخالت دادن پیرامون مرطوب کل در سرعت متوسط جریان، نمی‌توانند صحیح باشند ولی فرض‌های انجام شده توسط لوتر و یا رابطهٔ

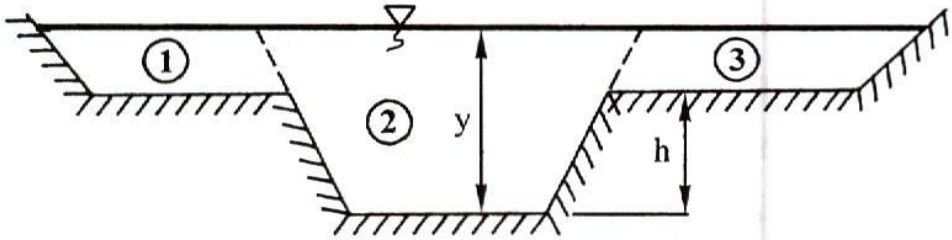
Prozhefa.com

۴-۴۰ در تجزیهٔ مقطع و نسبت دادن یک پیرامون مرطوب به هر یک از مقاطع، محاسبه دبی در هر یک از آنها و جمع دبی‌ها در به‌دست آوردن دبی کل قابل قبول‌تر می‌باشد.

باید در نظر داشت در صورتی‌که در استفاده از رابطهٔ ۴-۴۰ طول‌های AB و CD در محاسبهٔ پیرامون مقطع ۲ در نظر گرفته نشود، جواب رابطهٔ ۴-۴۰ با جواب حاصل از رابطهٔ لوتر در تعیین زبری معادل و تعیین دبی مساوی خواهند بود.

جالب این‌جاست که در صورتی‌که عمق آب در دشتهای سیلابی قابل توجه باشد، در این‌صورت جواب حاصل از روابط لوتر، هورتن-اینستین و پاولوفسکی به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند. علاقمندان می‌توانند با تغییر عمق جریان در دشتهای سیلابی در مثال ۴-۹ این موضوع را کنترل نمایند.

با ذکر نکتهٔ فوق مشخص‌تر می‌شود که نسبت عمق آب در دشتهای سیلابی به عمق آب در کانال اصلی در رفتار هیدرولیکی مقاطع مرکب نقش دارد. برای روشن‌تر شدن این مطلب می‌توان یک کانال مرکب مشابه شکل ۴-۱۰ را که دارای زبری یکنواخت است در نظر گرفت.



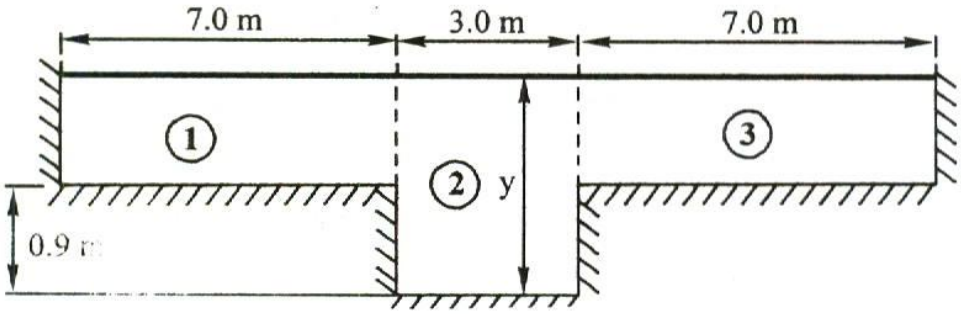
شکل ۴-۱۰ کانال با مقطع مرکب و زبری یکنواخت

مطالعات بعضی محققین مشخص می‌سازد که در صورتی‌که عمق جریان بیش از h و کوچکتر از y_{max} باشد، محاسبهٔ دبی به روش تجزیهٔ مقطع نسبت به حالتی که کل مقطع با پیرامون مرطوب کل به‌عنوان یک مقطع واحد در نظر گرفته شود مقدار بیشتری نشان می‌دهد و در این‌صورت مقدار دبی به‌روش تجزیه مقطع، جواب صحیح می‌باشد و در صورتی‌که $y > y_{max}$ باشد محاسبهٔ دبی به روش مقطع واحد مقدار صحیح‌تری را ارائه خواهد نمود که y_{max} تابعی از شکل هندسی مقطع می‌باشد. مثال ۴-۱۰ تعیین مقدار دبی را با توجه به آنچه گفته شد مشخص می‌نماید.

مثال ۴-۱۰

برای مقطع مرکب نشان داده شده در شکل ۴-۱۱ با زبری یکنواخت ۰٫۰۲ و شیب طولی ۰٫۰۰۰۲ دبی جریان را برای اعماق ۱٫۲m و ۱٫۶m محاسبه نمایید.

Prozhefa.com



شکل ۴-۱۱

حل :

حالت الف - عمق جریان برابر ۱٫۲m می‌باشد ($y = ۱٫۲m$). نخست مسأله به روش تجزیه مقطع حل می‌شود:

$$A_۱ = ۷ \times ۰٫۳ = ۲٫۱ \ m^۲$$

$$P_۱ = ۰٫۳ + ۷٫۰ = ۷٫۳m$$

$$R_۱ = \frac{A_۱}{P_۱} = \frac{۲٫۱}{۷٫۳} = ۰٫۲۸۸ \ m$$

$$Q_۱ = \frac{۱}{۰٫۰۲}(۲٫۱)(۰٫۲۸۸)^{۲/۳}(۰٫۰۰۰۲)^{۱/۲} = ۰٫۶۴۷ \ m^۳/s$$

و به طور مشابه :

$$Q_۳ = ۰٫۶۴۷m^۳/s$$

مقطع ۲ :

$$A_۲ = ۳ \times ۱٫۲ = ۳٫۶ \ m^۲$$

$$P_۲ = ۳٫۰ + ۱٫۲ + ۱٫۲ = ۵٫۴m$$

$$R_۲ = \frac{A_۲}{P_۲} = ۰٫۶۶۶۷m$$

$$Q_۲ = \frac{۱}{۰٫۰۲}(۳٫۶)(۰٫۶۶۶۷)^{۲/۳}(۰٫۰۰۰۲)^{۱/۲} = ۱٫۹۴۳m^۳/s$$

$$Q_T = ۲ \times ۰٫۶۴۷ + ۱٫۹۴۳ = ۳٫۲۳۷m^۳/s$$

در صورتی‌که به روش مقطع واحد عمل شود :

$$A = ۲٫۱ + ۲٫۱ + ۳٫۶ = ۷٫۸m^۲$$

$$P = ۰٫۳ + ۷٫۰ + ۰٫۹ + ۳٫۰ + ۰٫۹ + ۷٫۰ + ۰٫۳ = ۱۹٫۴m$$

$$R = ۰٫۴۰۲m$$