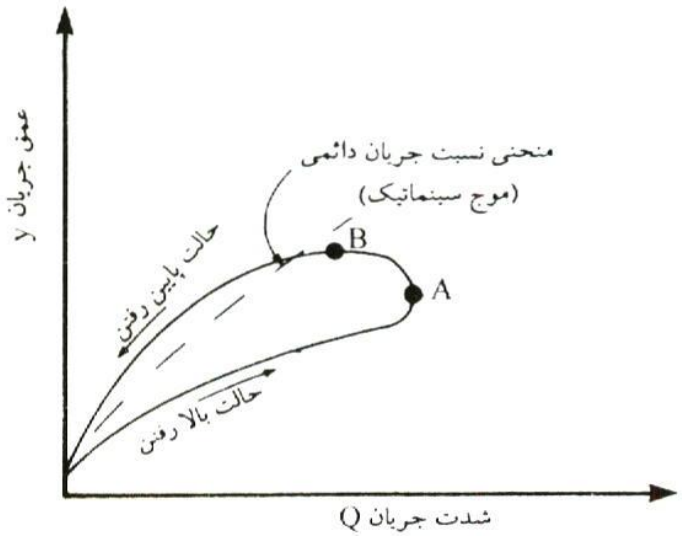
Prozhefa.com

$$Q = Q_{\circ}\left(1 - \frac{1}{S_{\circ}}\frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{S_{\circ}g}\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{S_{\circ}g}\cdot\frac{\partial V}{\partial t}\right)^{1/2} \qquad (۱۲-۱۸)$$

معادلهٔ ۱۲-۱۸که معادلهٔ یک منحنی حلقوی است به‌صورت شماتیک در شکل ۱۲-۴ نشان داده شده است که در آن نقاط A و B به ترتیب نقاط حداکثر شدت جریان و حداکثر عمق جریان را نشان می‌دهند و در هر حال می‌تواند برای تعیین مقدار دبی به ازای عمق جریان و یا بالعکس به کار رود.



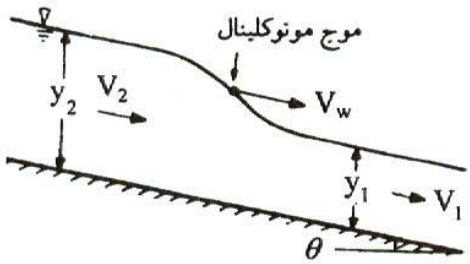
شکل ۱۲-۴ منحنی حلقوی نسبت جریان

۱۲-۲-۳ روشهای حل معادلات جریانهای غیردائمی متغیر تدریجی

معادلات دیفرانسیل جزئی ارائه شده به عنوان معادلات پیوستگی و حرکت جریانهای غیر دائمی متغیر تدریجی، به سادگی قابل‌حل نبوده و راه‌حل تحلیلی مشخصی نیز برای آنها وجود ندارد. گاه برای حل آنها از روشهای تقریبی و با در نظرگرفتن فرضیاتی نسبت به وضعیت جریان استفاده می‌گردد که بدیهی است هرچه فرضیات انجام شده جهت ساده‌کردن معادلات و حل تحلیلی آنها به واقعیت امر نزدیکتر باشد، جوابها از خطای کمتری برخوردار خواهند بود. از جمله مواردی که می‌توان معادلات یاد شده را ساده و به روش تحلیلی حل نمود، «موج پیشروندهٔ یکنواخت» است که در این قسمت به آن اشاره می‌شود.

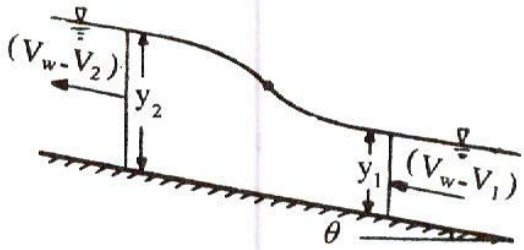
۱۲-۲-۳-۱ موج پیشرونده یکنواخت (Uniformly Progressive Wave) یکی از موارد بسیار ساده جریانهای متغیرتدریجی غیردائمی عبارت است از حالتی از یک موج سیلاب که فرض می‌شود موج در حین حرکت، تغییرشکل ندهد که در این‌صورت «موج پیشروندهٔ یکنواخت» نامیده می‌شود. حالت خاصی از این موج عبارت است از موج «مونوکلینال» (Monoclinal Wave) یا موج یک طرفه که تنها با یک برآمدگی یا فرورفتگی، دو جریان یکنواخت در بالادست و پایین دست را با اختلاف سطح مشخص به یکدیگر متصل می‌نماید.

Prozhefa.com



جریان غیر دائمی

a) یک موج مونو کلینال



جریان دائمی

b) جریان دائمی معادل

شکل ۱۲-۵

شکل ۱۲a-۵، نمونه یک موج مونوکلینال راکه به جهت تشابه‌گاه با موج بالارونده سیلاب معادل گرفته می‌شود نشان می‌دهد. در این حالت پیشانی موج با سرعت ثابت V_w حرکت می‌نماید که مقدار آن از سرعت جریانهای یکنواخت در بالادست (V_2) و پایین‌دست (V_1) بیشتر است. چنانچه بیننده‌ای در طول مسیر و با سرعت V_w حرکت نماید، از دید او موج ثابت مشاهده شده و لذا می‌توان این موقعیت غیردائمی را با اعمال سرعت $-V_w$ به‌کل سیستم، به‌یک جریان‌دائمی تبدیل نمود. با این فرض و با توجه به مشخصات نشان داده شده در شکل ۱۲b-۵، معادلهٔ پیوستگی می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود:

$$Q_r = A_1(V_w - V_1) = A_2(V_w - V_2) \qquad (۱۹-۱۲)$$

مقدار Q_r ، اضافه جریان (Overrun) نامیده شده و آن عبارت است از مقدار شدت جریانی که در ضمن حرکت موج، در بالادست جا می‌ماند. با ساده کردن رابطهٔ بالا:

$$V_w = \frac{A_1 V_1 - A_2 V_2}{A_1 - A_2} = \frac{Q_1 - Q_2}{A_1 - A_2} = \frac{\Delta Q}{\Delta A} \qquad (۲۰-۱۲)$$

که می‌توان مقدار سرعت پیشانی موج را از معادلهٔ بالا به‌دست آورد. ملاحظه می‌شود که چنانچه جریان اولیه در کانال وجود نداشته باشد ($V_1 = 0$ و $A_1 = 0$) مقدار V_w مساوی V_2 شده ولی در صورت وجود جریان اولیه، مقدار V_w همیشه از V_1 یا V_2 بیشتر است و بدین‌طریق موج همیشه از بقیهٔ جریان سریعتر حرکت نموده و در نتیجه شکل و ترکیب مرج ثابت می‌ماند.

با استفاده از معادلهٔ ۱۲-۲۰، حداکثر مقدار V_w به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$(V_w)_{max} = \frac{dQ}{dA} = \frac{dQ}{dy} \cdot \frac{dy}{dA} = \frac{1}{T} \cdot \frac{dQ}{dy} \qquad (۲۱-۱۲a)$$

$$(V_w)_{max} = \frac{dQ}{dA} = \frac{d(AV_0)}{dA} = V_0 + A\frac{dV}{dA} \qquad (۲۱-۱۲b)$$

Prozhefa.com

از این رابطه برای تعیین نسبت $\frac{(V_w)_{max}}{V_\circ}$ ($V_\circ$ = سرعت نرمال در کانال با سطح جریان ثابت) استفاده می‌شود. به عنوان مثال برای یک کانال مستطیلی عریض ($R = y$) داریم:

$$q_\circ = \frac{y^{۵/۳}}{n} S_\circ^{۱/۲}$$

$$\frac{dq_\circ}{dy} = \frac{۵}{۳} \times \frac{۱}{n} y^{۲/۳} S_\circ^{۱/۲} = \frac{۵}{۳} V_\circ$$

بنابراین:

$$(V_w)_{max} = K_w V_\circ \qquad (۲۲-۱۲)$$

که برای مقاطع مستطیلی عریض $K_w = ۱/۶۷$ و چنانچه به‌صورت مشابه عمل شود، دیده خواهد شد که برای کانال سهمی شکل عریض ($R = y$)، $K_w = ۱/۴۴$ و برای کانال مثلثی $K_w = ۱/۳۳$ می‌باشد.

چنانچه خواسته شود معادلهٔ مربوط به پروفیل سطح جریان در چنین حالتی به‌دست آید، با بررسی جریان‌دائمی معادل می‌توان نوشت:

$$\frac{d}{dt}(V_w - V) = \frac{\partial}{\partial x}(V_w - V)\frac{dx}{dt} + \frac{\partial}{\partial t}(V_w - V) = \circ$$

که در آن $\frac{dx}{dt}$ همان مقدار ثابت V_w بوده و لذا به‌صورت زیر ساده می‌شود:

$$V_w\left(-\frac{\partial V}{\partial x}\right) + \left(-\frac{\partial V}{\partial t}\right) = \circ$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -V_w \frac{\partial V}{\partial x} \qquad (۲۳-۱۲)$$

از آن‌جاکه $V = V_w - \frac{Q_r}{A}$ می‌باشد، داریم:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{Q_r T}{A^۲} \cdot \frac{\partial y}{\partial x}$$

که با جایگزینی رابطهٔ اخیر در معادلهٔ حرکت (۱۲-۱۴) و خلاصه نمودن آن، به معادلهٔ زیر می‌رسیم:

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{۱}{g}(V - V_w) - \frac{\partial V}{\partial x} = S_\circ - S_f$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{S_\circ - S_f}{۱ - \frac{Q_r^۲ T}{gA^۳}} \qquad (۲۴-۱۲)$$

معادلهٔ ۱۲-۲۴ به معادلهٔ دیفرانسیل موج مونوکلینال بالارونده مشهور است و ملاحظه می‌شود که شکل ظاهری آن شبیه معادلهٔ جریانهای متغیر تدریجی یکنواخت می‌باشد، اضافه می‌نماید که پروفیل موج با توجه به شرایط و با انتگرال‌گیری از معادلهٔ بالا به‌دست می‌آید.

Prozhefa.com

مثال ۱۲-۱

سرعت یک جریان یکنواخت پیش‌رونده غیردائمی (موج مونوکلینال) را در یک کانال عریض با مشخصات $S_0 = ۰/۰۰۰۴$ ، $V_2 = ۷/۶ \text{m/s}$ ، $V_1 = ۳ \text{m/s}$ و ضریب شزی $C = ۵۵/۲۵$ به‌دست آورید. همچنین تعیین کنید مقدار دبی ثابت حمل شده به‌وسیله موج را (Q_r).

حل:

با استفاده از رابطهٔ ۱۲-۲۰ داریم:

$$V_w = \frac{A_1 V_1 - A_2 V_2}{A_1 - A_2} = \frac{V_1 y_1 - V_2 y_2}{y_1 - y_2}$$

می‌دانیم $V = C\sqrt{y S_0}$ در نتیجه:

$$y_2 = \frac{V_2^2}{C^2 S_0} = \frac{(۷/۶)^2}{(۵۵/۲۵)^2 \times ۰/۰۰۰۴} = ۴۷/۳ \text{ m}$$

$$y_1 = \frac{(۳)^2}{(۵۵/۲۵)^2 \times ۰/۰۰۰۴} = ۷/۳۷ \text{ m}$$

$$V_w = \frac{۳ \times ۷/۳۷ - ۷/۶ \times ۴۷/۳}{۷/۳۷ - ۴۷/۳} = ۸/۴۵ \text{ m/s}$$

برای تعیین Q_r ، از رابطهٔ ۱۲-۱۹ استفاده می‌کنیم:

$$Q_r = A_1(V_w - V_1) = A_2(V_w - V_2)$$

$$q_r = y_2(V_w - V_2) = ۴۷/۳ \ (۸/۴۵ - ۷/۶) = ۴۰/۲۰۵ \text{ m}^3/\text{s/m}$$

و یا

$$q_r = y_1(V_w - V_1) = ۷/۳۷ \ (۸/۴۵ - ۳) = ۴۰/۱۷ \text{ m}^3/\text{s/m}$$

۱۲-۲-۳-۲ روشهای عددی (Numerical Methods) همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، حل معادلات St.Venant به روش تحلیلی تنها در صورتی امکان‌پذیر است که حالات بسیار خاص و محدودی از امواج که بتوان معادلات مذکور را با فرضیاتی ساده نمود وجود داشته باشد. از طرفی استفاده از روشهای ترسیمی نیز به جهت احتیاج به زمان نسبتاً طولانی، اخیراً کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد، بلکه می‌توان گفت که گسترش و توسعهٔ کامپیوترهای دیجیتالی و امکان استفاده از سرعتهای بالای آنها در حل معادلات پیچیده به روشهای عددی، کم‌کم جای سایر روشها را گرفته و بخصوص امکان اعمال عوامل و شرایط بیشتر و از طرفی همزمان با آن، دسترسی به نتایج و جوابهای نسبتاً دقیق، باعث شده است تا روشهای

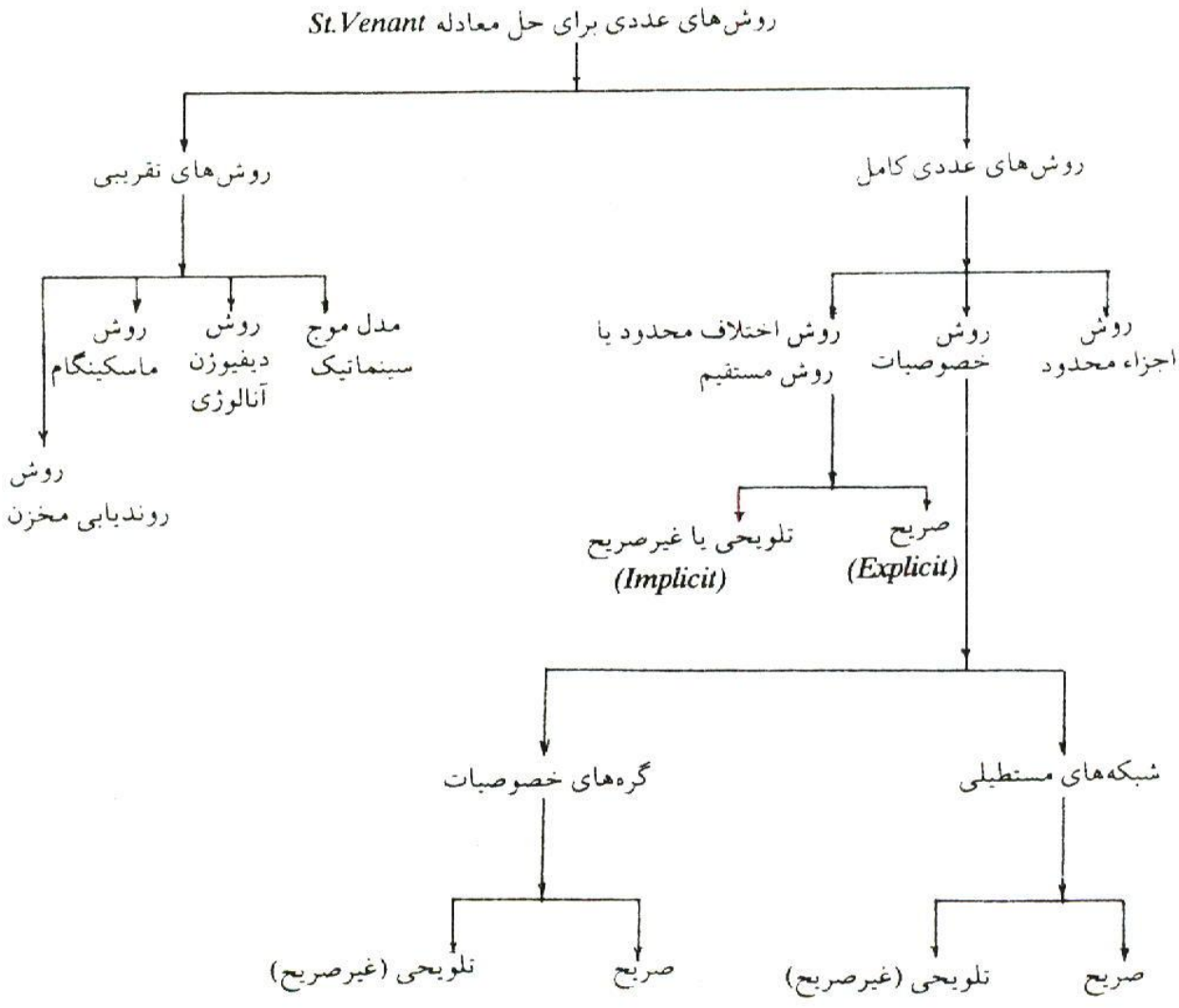
Prozhefa.com

دیگر کم‌کم به فراموشی سپرده شود.

برای حل معادلات St. Venant به روش عددی، تکنیک‌های مختلفی وجود دارد که هریک از نقطه‌نظر همگرایی، ثبات، دقت و راندمان، امتیازات مخصوص به‌خود را داشته و می‌توانند به شکل زیر طبقه‌بندی شوند:

۱- روشهای تقریبی که بر روی معادلهٔ پیوستگی و معادلهٔ خلاصه شدهٔ حرکت پایه‌ریزی شده‌اند. از جمله این موارد می‌توان روندیابی مخزن، روش ماسکینگام (Muskingum)، موج سینماتیک و روش دیفیوژن آنالوژی (Diffusion Analogy) را نام برد.

۲- روشهای عددی کامل که هدف آنها عبارت است از حل معادلات مربوطه از طریق مدل عددی که انواع آنها در جدول ۱۲-۱ آورده شده است.



جدول ۱۲-۱ انواع روشهای عددی برای حل معادلات St. Venant

Prozhefa.com

در روش خصوصیات (Method of Characteristics)، معادلات پیوستگی و حرکت به‌دو جفت معادلات دیفرانسیل معمولی که مشخصات و خصوصیات جریان را مشخص می‌نمایند، تبدیل گشته و سپس از طریق روش اختلافات محدود حل می‌گردند. در روش اختلافات محدود یا روش مستقیم، مشتقات جزئی با اختلافات محدود تعویض شده و معادلات جبری حاصله حل می‌گردند. برای استفاده از روش اجزاء محدود، سیستم به تعدادی جزء کوچک تقسیم شده و از معادلات دیفرانسیل جزئی در گره‌های مربوط به هرجزء انتگرال گرفته می‌شود.

روش اختلافات محدود، خود به دو روش صریح و تلویحی (غیرصریح) تقسیم می‌شود. در روش صریح، معادلات جبری حاصله خطی بوده و متغیرهای وابسته به‌طور صریح و در پایان هر محدودهٔ زمانی، استخراج می‌گردند. در حالی‌که در روش غیرصریح، معادلات جبری حاصله عموماً غیرخطی بوده و متغیرهای مربوطه به گونهٔ غیرصریح محاسبه می‌گردند. در هرحال، در حین محاسبات احتیاج به داشتن شرایط اولیه است که بتوانند مقادیر مجهولات در ابتدای هر محدودهٔ زمانی را مشخص نمایند. در این قسمت به روش خصوصیات و به صورت ضمنی به‌روش اختلافات محدود اشاره نموده و در فصل روندیابی سیل، بعضی دیگر از روشهای تقریبی عددی مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۱۲-۲-۴ روش خصوصیات (Method of Characteristics)

برای معرفی این روش، نخست ساده‌ترین نوع ممکن از کانال را که عبارت است از یک کانال منشوری با مقطع مستطیلی عریض و شیب بستر ثابت در نظر می‌گیریم. اولین گام عبارت است از حذف y از معادلات حرکت و پیوستگی با استفاده از رابطهٔ $C^2 = gy$ که C سرعت موج طویل با ارتفاع کم را در آبی به عمق y نشان می‌دهد. رابطهٔ فوق به‌صورت زیر تبدیل می‌گردد:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{2C}{g} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \qquad (۱۲-۲۵)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{2C}{g} \cdot \frac{\partial C}{\partial t} \qquad (۱۲-۲۶)$$

با جاگذاری معادلهٔ ۱۲-۲۵ در رابطهٔ ۱۲-۱۴ (معادلهٔ حرکت) داریم:

$$2C \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = g(S_0 - S_f) \qquad (۱۲-۲۷)$$

چنانچه در معادلهٔ ۱۲-۶ که معادلهٔ پیوستگی در کانالهای مستطیلی را می‌رساند، از دو معادلهٔ ۱۲-۲۵ و ۱۲-۲۶، استفاده شود، به‌صورت زیر خلاصه می‌گردد:

$$\frac{2VC}{g} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{C^2}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{2C}{g} \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \qquad (۱۲-۲۸)$$

و یا:

$$2V \frac{\partial C}{\partial x} + C \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + 2 \times \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \qquad (۱۲-۲۹)$$

Prozhefa.com

معادلهٔ ۱۲-۲۹ را یک‌بار به معادلهٔ ۱۲-۲۷ اضافه و یک‌بار از آن کسر می‌کنیم:

$$۲(V + C)\frac{\partial C}{\partial x} + ۲\frac{\partial c}{\partial t} + (V + C)\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = g(S_{\circ} - S_f) \qquad (۳۰\text{-}۱۲a)$$

$$-۲(V - C)\frac{\partial C}{\partial x} - ۲\frac{\partial C}{\partial t} + (V - C)\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = g(S_{\circ} - S_f) \qquad (۳۰\text{-}۱۲b)$$

معادلات فوق را می‌توان به‌صورت زیر تبدیل نمود:

$$(V + C)\frac{\partial(V + ۲C)}{\partial x} + \frac{\partial(V + ۲C)}{\partial t} = g(S_{\circ} - S_f) \qquad (۳۱\text{-}۱۲a)$$

$$(V - C)\frac{\partial(V - ۲C)}{\partial x} + \frac{\partial(V - ۲C)}{\partial t} = g(S_{\circ} - S_f) \qquad (۳۱\text{-}۱۲b)$$

حال برمی‌گردیم به این‌که چون y تابعی از دو متغیر مستقل x و t می‌باشد، می‌توان نسبت تغییرات y را اگر x و t همزمان و به شکل $\frac{dx}{dt}$ تغییر نمایند، به‌صورت معادلهٔ دیفرانسیل جزئی زیر نوشت:

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial y}{\partial t} \cdot dt \qquad (۳۲\text{-}۱۲a)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial y}{\partial t} \qquad (۳۲\text{-}۱۲b)$$

از معادلهٔ ۱۲-۳۲b نتیجه می‌شود که اگر بیننده‌ای در کنار رودخانه و با سرعت $\frac{dx}{dt}$ حرکت نماید، عمق جریان (y) با تغییرات زمان و به نسبت داده شده در معادلهٔ ۱۲-۳۲ تغییر می‌کند. از مقایسه معادلات ۱۲-۳۱ و معادلهٔ ۱۲-۳۲b و ملاحظهٔ شباهت آنها و فرض $\frac{dx}{dt} = V \pm C$، نتیجه گرفته می‌شود که معادلات ۱۲-۳۱a و b را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\frac{d(V + ۲C)}{dt} = g(S_{\circ} - S_f) \qquad (۳۳\text{-}۱۲a)$$

$$\frac{d(V - ۲C)}{dt} = g(S_{\circ} - S_f) \qquad (۳۳\text{-}۱۲b)$$

مجدداً اشاره می‌شود که رابطه‌های b و ۱۲-۳۳a موقعی درست خواهند بود که رابطه‌های $\frac{dx}{dt} = V \pm C$ درست باشند. این رابطه‌ها دو جهت و به عبارتی دو خصوصیت را نشان می‌دهند:

۱- $\frac{dx}{dt} = V + C$ که خصوصیت مثبت و یا جهت C_+ نامیده می‌شود.

۲- $\frac{dx}{dt} = V - C$ که خصوصیت منفی و یا جهت C_- نامیده می‌شود.

روابط b و ۱۲-۳۳a یک زوج معادلات دیفرانسیل معمولی را نشان می‌دهد که هرکدام در جهت خصوصیت مربوطه معتبر و به‌وسیلهٔ روش اختلاف محدود قابل حل می‌باشد. اگرچه این روابط برای کانال مستطیلی عریض حاصل گردیده، برای هر کانال منشوری با مقطع غیرمستطیلی نیز می‌توان به گونهٔ مشابه عمل نمود.

Prozhefa.com

حال محورهای مختصات $x-t$ (شکل ۱۲-۶) را در نظر می‌گیریم. اگر مقادیر عمق جریان و سرعت در دو نقطه R و S مشخص باشد، می‌توان مقادیر مجهول متغیرهای مربوطه را در نقطهٔ P که محل تقاطع دو منحنی خصوصیت مثبت (C_+) و خصوصیت منفی (C_-) رسم شده‌از نقاط R و S است، تعیین نمود. برای این منظور، رابطه‌های $\frac{dx}{dt} = V \pm C$ به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$x_p - x_R = (V_R + C_R)(t_P - t_R) \qquad (۳۴-۱۲)$$

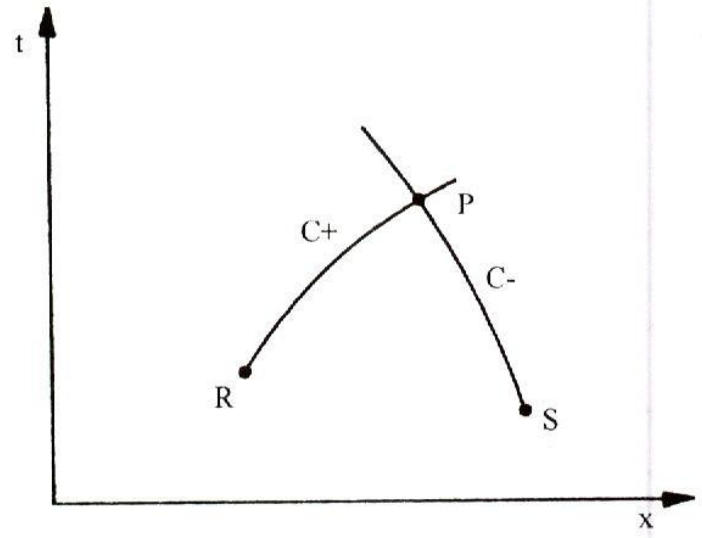
$$x_p - x_s = (V_s - C_s)(t_p - t_s) \qquad (۳۵-۱۲)$$

و به طریق مشابه برای معادلات b و a۱۲-۳۳:

برای خط C_+ (۳۶-۱۲)
$$(V_p - V_R) + ۲(C_p - C_R) = g(S_\circ - S_{fR})(t_p - t_R)$$

برای خط C_- (۳۷-۱۲)
$$(V_p - V_s) - ۲(C_p - C_s) = g(S_\circ - S_{fs})(t_p - t_s)$$

که از چهار معادلهٔ فوق، چهار مجهول t_p ، x_p ، V_p و C_p محاسبه می‌گردند و مقدار y_p از رابطهٔ $y_p = \frac{C_p^۲}{g}$ به‌دست می‌آید.

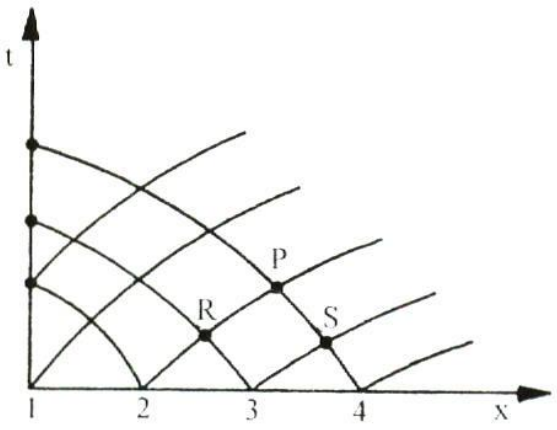


شکل ۱۲-۶ خطوط خصوصیات در محورهای مختصات $x-t$

چنانچه در محاسبات دقت بیشتری مورد نظر باشد، می‌توان به‌جای کاربرد روش اختلاف محدود سادهٔ فوق، از روشهای دیگری نظیر قانون ذوزنقه استفاده نمود. در این روش که به «روش شبکهٔ خصوصیات» (Characteristics-grid Method) موسوم می‌باشد، احتیاج است تا یک معادلهٔ مربوط به شرایط مرزی در هر انتهای کانال وجود داشته باشد. برای شرح چگونگی عمل، فرض می‌گردد که اطلاعات

Prozhefa.com

مربوط به نقاط ۱، ۲، ۳، ... و i که به فاصلهٔ Δx_i از یکدیگر قرار دارند، در زمان t معین باشد (شکل ۱۲-۷). از هر سه نقطهٔ نظیر ۲، ۳، ۴ که شروع شود، می‌توان نقاطی مانند R و S و از آنها نقطه‌ای مانند p را مشخص و روش را برای کل صفحهٔ $x-t$ تکرار نمود. و به همین طریق می‌توان از شبکه‌های مستطیلی و یا روشهای دیگر مشابه استفاده نمود که برای اطلاعات بیشتر به مرجع مربوط به Wylre (۱۹۷۰) ارجاع داده می‌شود.



شکل ۱۲-۷ شبکهٔ خصوصیات

مشکلی که در استفاده از روش اختلاف محدود صریح پیش می‌آید، ایجاد ناپایداری در حل عددی بعضی از مسایل است که به علت انتخاب مقادیر Δt بزرگ در مقایسه با Δx حاصل می‌گردد. برای رفع این مشکل French (۱۹۸۶) اظهار می‌دارد که در روش اختلاف محدود صریح مطرح شده در این بحث، Δt بایستی حدود ۲۰ درصد مقدار به‌دست آمده از شرط پایداری Courant که به‌صورت زیر بیان می‌گردد، باشد:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{V + C} \qquad (۳۸-۱۲)$$

مثال ۱۲-۲

آبی با عمق جریان یکنواخت ۱٫۵ متر و سرعت ۰٫۹m/s، از طریق یک رودخانه مستطیلی عریض وارد یک دهانهٔ بزرگ می‌شود. در زمان $t = 0$، تراز آب در محل دهانه هم تراز آب رودخانه بوده و سپس به نسبت ۰٫۳m/h شروع به پایین رفتن نموده و این امر به مدت ۳ ساعت ادامه می‌یابد. اگر از شیب بستر (S_o) و شیب مقاومت (S_f) صرفنظر گردد، مطلوب است تعیین زمان لازم برای آن‌که سطح آب در مقطعی به‌فاصلهٔ ۱٫۶km در بالادست دهانه به اندازهٔ ۰٫۶m پایین افتد. همچنین معین کنید که در این زمان چه نقطه‌ای از رودخانه شروع به کم کردن عمق می‌نماید.

Prozhefa.com

حل:

در این مثال که ساده‌ترین شکل ایجاد موج بیان می‌گردد، حالت جریان در زمان قبل از ایجاد موج، یکنواخت دائمی در نظر گرفته می‌شود که با پایین افتادن سطح آب، از این حالت خارج می‌گردد. در هر حال در چنین حالتی ثابت می‌شود که در طول خط خصوصیت مثبت مقدار $\frac{dx}{dt}$ ثابت و لذا خط C_+ مستقیم می‌باشد. امواج با چنین خصوصیتی را موج ساده (Simple Wave) نامیده و اضافه می‌شود که خط خصوصیت منفی مستقیم نخواهد بود.

زمان لازم برای آن‌که عمق جریان در دهانه به اندازهٔ ۰٫۶m پایین افتد ۲ ساعت بوده و از طرفی زمانی نیز طول می‌کشد تا موج با این عمق به نقطه‌ای به‌فاصلهٔ ۱٫۶km در بالادست دهانه برسد. برای توضیح بهتر مسأله، شکل صفحهٔ بعد را در نظر می‌گیریم. در نقطهٔ O با مشخصات $x_\circ = \circ$ و $t_\circ = \circ$ آب دارای سرعتی برابر ۰٫۹m/s می‌باشد. چنانچه جهت x به سمت بالادست را مثبت فرض کنیم داریم:

$$V_\circ = -\circ/۹ \text{ m/s}$$

$$C_\circ = \sqrt{gy_\circ} = \sqrt{۹/۸۱ \times ۱/۵} = +۳/۸۴ \text{ m/s}$$

$$C_\circ + V_\circ = ۳/۸۴ - \circ/۹ = +۲/۹۴ \text{ m/s}$$

یعنی با توجه به یکنواختی سرعت در قبل از ایجاد موج، شروع پایین افتادگی به هر نقطه که برسد، در آن نقطه سرعت آب $V_\circ$ و سرعت موج $C_\circ$ حاکم خواهد بود و در زمان قبل از آن نقطهٔ مربوطه دارای جریان یکنواخت دائمی و در زمان پس از آن، دارای جریان غیردائمی می‌باشد. لذا ملاحظه می‌شود که خط C_+ می‌بایست مستقیم و به عبارتی $\frac{dx}{dt} = C_\circ + V_\circ = ۲/۹۴$ یعنی عددی ثابت باشد.

در زمان $t = ۲^h$، دهانه دارای مشخصات نقطهٔ R ($x_R = \circ$ و $t_R = ۲^h$) می‌باشد و موج حاصله به سمت نقطهٔ p که در فاصلهٔ ۱۶۰۰ متری دهانه است حرکت می‌کند. لازم است تا نخست سرعت آب و سرعت موج در نقطهٔ R به‌دست آید.

$$C_R = \sqrt{gy_R} = \sqrt{۹/۸۱ \times \circ/۹} = +۲/۹۷ \text{m/s}$$

برای به‌دست آوردن V_R از خط C_- استفاده می‌کنیم. بدین‌طریق که چنانچه خط C_- از نقطهٔ R رسم شود، هر شکلی راکه دارا باشد، خط C_+ با شیب $V_o + C_o = ۲/۹۴$ را در یک نقطه که از نظر سرعت آب و سرعت موج مشابه نقطهٔ O است قطع می‌کند. با توجه به معادلهٔ ۱۲-۳۷:

$$(V_R - V_s) - ۲(C_R - C_s) = g(S_\circ - S_{fs})\,(t_R - t_s)$$

$$(V_R + \circ/۹) - ۲(۲/۹۷ - ۳/۸۴) = \circ$$

$$V_R = -۲/۶۴ \text{ m/s}$$

Prozhefa.com

حال با توجه به معادلهٔ ۱۲-۳۴ برای نقاط P و R خواهیم داشت:

$$x_P - x_R = (V_R + C_R)(t_P - t_R)$$

$$۱۶۰۰ - ۰ = (-۲٫۶۴ + ۲٫۹۷)(t_P - ۲ \times ۳۶۰۰)$$

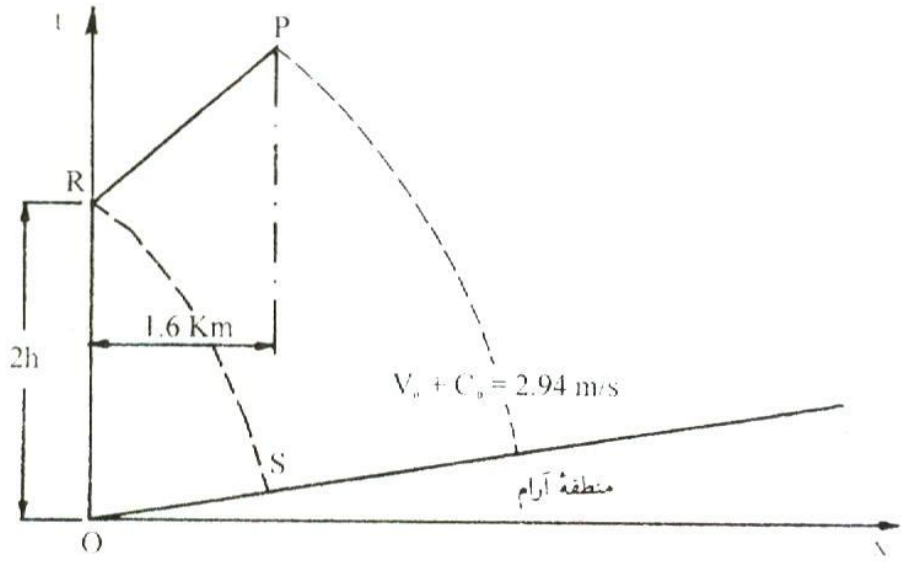
$$t_P = ۱۲۰۴۸٫۴۸۵\text{s} = ۳^h \quad ، \quad ۲۰\ \text{min} \quad ، \quad ۴۸٫۴۸۵\text{s}$$

برای حل قسمت دوم مسأله از خط C_+ که برای عمق ۱٫۵ متر رسم شده است استفاده می‌گردد. اگر نقطهٔ مورد نظر M باشد، با استفاده از رابطهٔ ۱۲-۳۴ داریم:

$$x_M - x_0 = (V_0 + C_0)(t_M - t_0)$$

$$x_M - ۰ = ۲٫۹۴(۱۲۰۴۸٫۴۸۵ - ۰)$$

$$x_M = ۳۵۴۲۲٫۵۵\ \text{m} \approx ۳۵٫۴۲۳\ \text{Km}$$

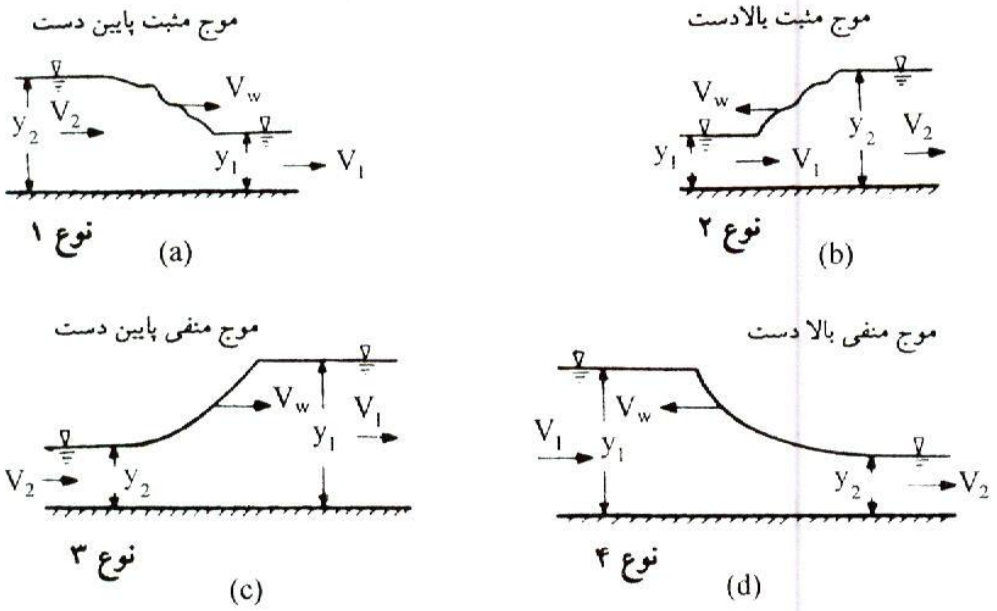


۱۲-۳ جریانهای غیردائمی متغیرسریع (Rapidly Varied Unsteady Flow)

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، یکی از مسایل مهم کانالهای باز که مهندسین طراح با آن در تماسند، جریانهای غیردائمی می‌باشد. یک‌جریان غیردائمی متغیر سریع عبارت است از جریان موجی که انحناء پروفیل سطح آب در آن تند، تغییرات عمق جریان نسبت به زمان سریع، مؤلفه قائم شتاب ذرات آب نسبت به کل شتاب قابل‌ملاحظه، و اثر اصطکاک کناره‌ها ناچیز و قابل‌صرفنظر کردن است. این‌گونه جریانها می‌تواند در اثر خرابی یک سد و یا باز و بسته شدن سریع سازه‌های کنترل‌کننده‌ای نظیر دریچه‌ها و ... به‌وجود آید.

Prozhefa.com

براساس آنچه در قسمت ۱۲-۱ آورده شد، امواج بلند که جریانهای غیردائمی متغیر سریع را تشکیل می‌دهند به امواج مثبت یا منفی، و بالادست یا پایین‌دست تقسیم می‌شوند که در شکل ۱۲-۸ نشان داده شده‌اند. اضافه می‌نماید که امواج مثبت که عموماً دارای پیشانی تند و گاه غلطان بوده، پایدار می‌باشند و لذا می‌توانند به‌عنوان یک موج پیشرونده یکنواخت مورد بررسی قرار گیرند در صورتی‌که امواج منفی ناپایدار بوده و شکل آنها با حرکت موج تغییر می‌یابد.



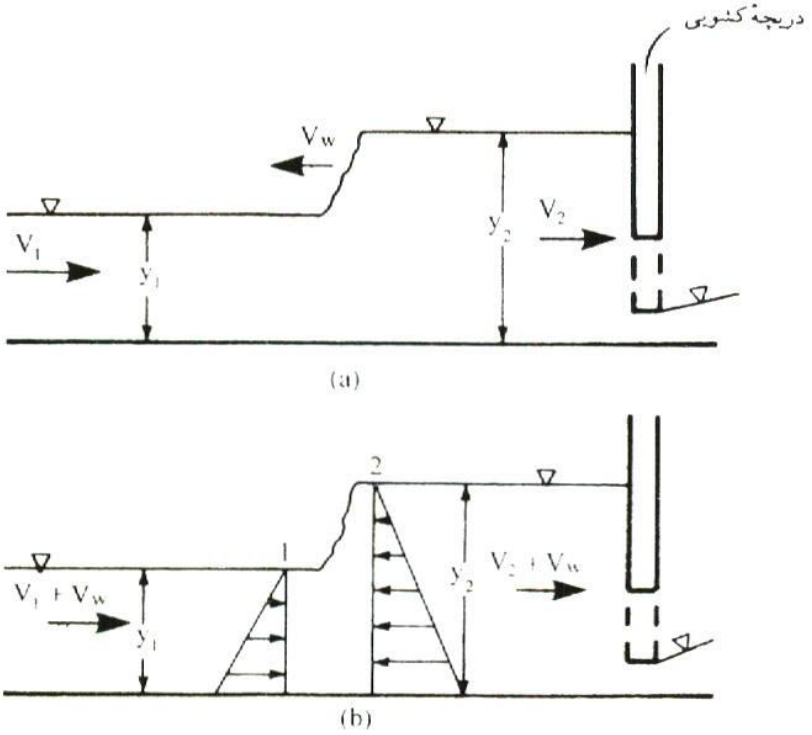
شکل ۱۲-۸ انواع امواج بلند

۱۲-۳-۱ موج مثبت (Positive Surge)

در مثال ارائه شدهٔ قبلی برای موج ساده، که یک موج با انحناء کم بود، موج می‌تواند مثبت باشد هرگاه عمق جریان افزایش یابد، و یا منفی باشد هرگاه عمق جریان کاهش پیدا کند. در امواج مثبت $C(t)=\sqrt{gy(t)}$ با افزایش زمان، افزایش می‌یابد. در صورتی‌که پیشانی موج مثبت دارای انحناء تند باشد، جریان غیردائمی متغیر سریع بوده که می‌تواند از بسته شدن و یا باز شدن جزئی و ناگهانی یک دریچه حاصل گردد (شکلهای ۱۲-۹ و ۱۲-۱۰).

یک کانال افقی بدون اصطکاک که در نقطه‌ای از مسیر آن دریچه‌ای تعبیه شده باشد، در نظر گرفته می‌شود. چنانچه دریچه به‌صورت ناگهانی بالا آید، باعث تغییر سریع عمق جریان و ایجاد یک موج مثبت که به سمت پایین‌دست در حرکت است می‌شود (شکل ۱۲a-۱۰). مقاطع ۱ و ۲ عبارتند از شرایط جریان

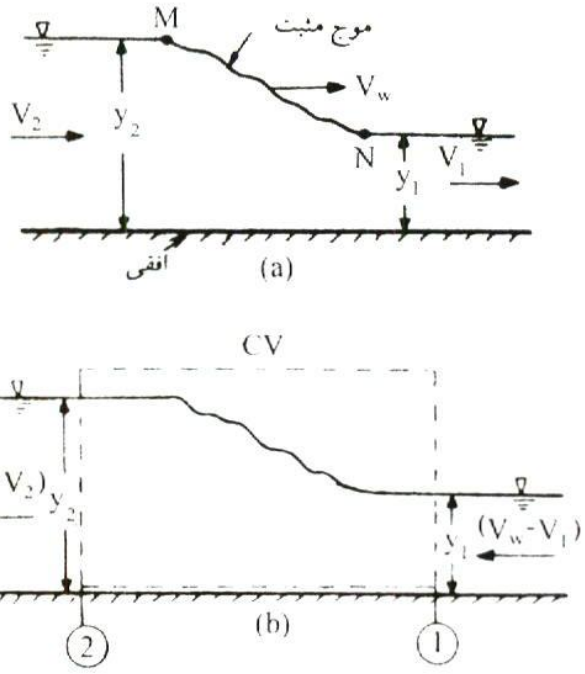
Prozhefa.com



شکل ۱۲-۹ موج مثبت بالادست

a) موج مثبت در یک کانال مستطیلی در اثر بسته شدن جزئی دریچه با بیننده ثابت

b) موج مثبت در یک کانال مستطیلی در اثر بسته شدن جزئی دریچه با بینندهٔ متحرک همراه موج (موج دائمی معادل)



شکل ۱۲-۱۰ موج مثبت پایین‌دست

a) موج مثبت در یک کانال مستطیلی در اثر باز شدن جزئی دریچه‌ها با بیننده ثابت

b) موج مثبت در یک کانال مستطیلی در اثر باز شدن جزئی دریچه‌ها با بینندهٔ متحرک همراه موج (موج دائمی معادل)

Prozhefa.com

قبل و بعد از عبور موج و V_w مساوی است با سرعت مطلق موج که می‌تواند ثابت در نظر گرفته شود. در شکل ۱۲a-۱۰ فرض گردیده که بیننده ثابت باشد که در این‌صورت یک جریان غیردائمی به‌نظر می‌رسد. حال اگر مختصات سیستم و به تعبیری فرد بیننده در جهت موج و با سرعت V_w حرکت نماید، جریان به‌صورت دائمی به‌نظر آمده و به‌عبارتی با اعمال سرعت $-V_w$ به کل مقاطع، جریان از حالت غیردائمی به دائمی تبدیل می‌گردد. معادلهٔ پیوستگی برای شکل ۱۲b-۱۰ به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$A_2(V_w - V_2) = A_1(V_w - V_1) \qquad (۱۲-۳۹)$$

$$V_2 = \frac{A_1}{A_2} V_1 + \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) V_w \qquad (۱۲-۴۰)$$

با اعمال معادلهٔ مقدار حرکت و با فرض پخش فشار هیدرواستاتیکی در مقاطع ۱ و ۲ داریم:

$$\gamma A_1 \bar{y}_1 - \gamma A_2 \bar{y}_2 = \frac{\gamma}{g} A_1(V_w - V_1)\left[(V_w - V_2) - (V_w - V_1)\right] \qquad (۱۲-۴۱)$$

با قرار دادن مقدار V_2 از معادلهٔ ۱۲-۴۰ در رابطهٔ ۱۲-۴۱:

$$(V_w - V_1)^2 = g \frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{1}{A_2 - A_1}(A_2 \bar{y}_2 - A_1 \bar{y}_1) \qquad (۱۲-۴۲)$$

و یا:

$$V_w = V_1 \pm \sqrt{g\left(\frac{A_2}{A_1}\right)\frac{(A_2\bar{y}_2 - A_1\bar{y}_1)}{(A_2 - A_1)}} \qquad (۱۲-۴۳)$$

از پنج عامل y_1 ، y_2 ، V_1 ، V_2 و V_w که در معادلات ۱۲-۳۹ و ۱۲-۴۳ دخالت داده شده‌اند، چنانچه سه عامل معلوم باشد، می‌توان دو مجهول باقیمانده را به‌دست آورد که در اکثر موارد از روش آزمون و خطا استفاده می‌گردد.

برای یک کانال مستطیلی، معادلهٔ ۱۲-۴۳ به شکل زیر خلاصه می‌گردد:

$$V_w = V_1 \pm \sqrt{g \cdot \frac{y_2}{2y_1}(y_1 + y_2)} \qquad (۱۲-۴۴)$$

با فرض $C_s = \sqrt{\frac{gy_2}{2y_1}(y_1 + y_2)}$ که به سرعت انتشار موج موسوم است، خواهیم داشت:

$$V_w = V_1 \pm C_s \qquad (۱۲-۴۵)$$

با توجه به این‌که $V_w = \frac{dx}{dt}$ می‌باشد، رابطهٔ ۱۲-۴۵ شبیه رابطهٔ جهات خصوصیات که قبلاً گفته شد می‌باشد. شایان ذکر است که اگر ارتفاع موج بسیار کوتاه باشد و $y_1 \to y_2$ خواهیم داشت:

$$V_w - V_1 = \pm\sqrt{gy_1} \qquad (۱۲-۴۶)$$

Prozhefa.com

لذا اگر فرض شود که یک موج با ارتفاع بلند، از چند موج با ارتفاع کوتاه که در روی یکدیگر قرار دارند ساخته شده است، ملاحظه می‌شود که بالای موج (نقطهٔ M درشکل ۱۲a-۱۰) سریعتر از پایین آن (نقطهٔ N) حرکت کرده و لذا قسمتهای بالاتر نسبت به قسمتهای پایین‌تر سبقت گرفته جریان بر روی پیشانی موج لغزیده و حالت یک غلطک را به‌وجود می‌آورد. بنابراین پروفیل امواج مثبت پایدار و شکل مربوطه حفظ خواهد شد.

در حالت شکل ۱۲-۹که موج مثبت بالادست را نشان می‌دهد، روابطی مشابه روابط فوق به‌دست می‌آید با این تفاوت که در هر جا مقدار V_w به $-V_w$ تبدیل می‌شود و نهایتاً برای کانال با مقطع مستطیلی خواهیم داشت:

$$V_w = -V_1 + \sqrt{g\frac{y_2}{2y_1}(y_1+y_2)} \qquad (۴۷-۱۲)$$

مثال ۱۲-۳

یک کانال مستطیلی به عرض ۴ متر، آبی با دبی $12\,m^3/s$ و عمق ۲ متر را حمل می‌نماید. اگر جریان به‌وسیلهٔ بسته شدن کامل یک دریچه در انتهای مسیر کاملاً و به‌صورت ناگهانی متوقف گردد، ارتفاع و سرعت موج به‌وجود آمده را محاسبه کنید.

حل:

در اثر بسته شدن کامل و ناگهانی دریچه، یک موج مثبت بالادست به‌وجود می‌آید که در محاسبات مربوطه می‌بایست مقدار $V_2 = 0$ در نظر گرفته شود. با توجه به معادلهٔ ۱۲-۴۷ داریم:

$$V_w = -V_1 + \sqrt{g\frac{y_2}{2y_1}(y_1+y_2)}$$

$$V_w = \frac{Q}{b(y_2-y_1)} = \frac{12}{4(y_2-2)} = \frac{3}{y_2-2}$$

$$V_1 = \frac{12}{2\times 4} = 1.5\ m/s$$

$$\frac{3}{y_2-2} = -1.5 + \sqrt{9.81\times\frac{y_2}{2\times 2}(2+y_2)}$$

با آزمون و خطا:

$$y_2 = 2.728\ m$$

$$V_w = \frac{3}{2.728-2} = 4.121\ m/s$$

لذا موج دارای ارتفاع ۰٫۷۲۸ متر و سرعتی برابر $4.121\,m/s$ می‌باشد.

Prozhefa.com

مثال ۱۲-۴

از بالادست یک کانال مستطیلی به عرض ۳m که آبی با دبی ۳٫۶۰ m^3/s و سرعت ۰٫۸m/s در آن جریان دارد، دبی به‌صورت ناگهانی افزایش می‌یابد به گونه‌ای که عمق جریان به اندازهٔ ۵۰ درصد بالا می‌آید. تعیین کنید سرعت مطلق موج و مقدار شدت جریان جدید را.

حل:

با توجه به این‌که موج مثبت پایین دست تشکیل می‌گردد، داریم:

$$V_w - V_1 = \pm \sqrt{g \frac{y_2}{2y_1}(y_1 + y_2)}$$

$$V_1 = ۰٫۸ \text{ m/s}$$

$$y_1 = \frac{Q}{bV_1} = \frac{۳٫۶۰}{۳ \times ۰٫۸} = ۱٫۵۰ \text{ m}$$

$$y_2 = ۱٫۵ \times ۱٫۵۰ = ۲٫۲۵ \text{ m}$$

$$V_2 > ۰$$

نخست علامت مثبت جلوی رادیکال را در نظر می‌گیریم:

$$V_w - ۰٫۸ = + \sqrt{۹٫۸۱ \frac{۲٫۲۵}{۲ \times ۱٫۵۰}(۱٫۵۰ + ۲٫۲۵)}$$

$$V_w = +۵٫۲۵۳ + ۰٫۸ = ۶٫۰۵۳ \text{ m/s}$$

با استفاده از معادلهٔ ۱۲-۳۹:

$$by_2(V_w - V_2) = by_1(V_w - V_1)$$

$$۲٫۲۵(۶٫۰۵۳ - V_2) = ۱٫۵(۶٫۰۵۳ - ۰٫۸)$$

$$V_2 = ۲٫۵۵۱ \text{ m/s}$$

$$Q_2 = by_2 V_2 = ۳ \times ۲٫۲۵ \times ۲٫۵۵۱ = ۱۷٫۲۲ \text{ m}^3/\text{s}$$

شایان ذکر است که اگر ریشه منفی رادیکال مورد استفاده قرار می‌گرفت، $V_w = -۴٫۴۵۳ \text{m/s}$ و لذا $V_2 = -۰٫۹۵۱ \text{m/s}$ به‌دست می‌آمد و از آن‌جاکه مشخصاً مقدار V_2 مثبت است، ریشهٔ منفی نمی‌تواند قابل قبول باشد.

Prozhefa.com

مثال ۱۲-۵

در حالی‌که آبی با دبی $۱۸m^۳/s$ و عمق ۲ متر در یک کانال مستطیلی به عرض ۳ متر در جریان است، مقدار شدت جریان به‌وسیلهٔ دریچه‌ای و به‌صورت ناگهانی به $۱۲m^۳/s$ تقلیل می‌یابد. معین کنید ارتفاع و سرعت موج به‌وجود آمده در بالادست دریچه را.

حل:

موج ایجاد شده، موج مثبت بالادست است:

$$V_w = -V_۱ + \sqrt{g\frac{y_۲}{۲y_۰}(y_۱ + y_۲)}$$

$$y_۱ = ۲m$$

$$V_۱ = \frac{Q_۱}{A_۱} = \frac{۱۸}{۳ \times ۲} = ۳m/s$$

$$V_w = \frac{Q_۱ - Q_۲}{b(y_۲ - y_۱)} = \frac{۱۸ - ۱۲}{۳(y_۲ - ۲)} = \frac{۲}{y_۲ - ۲}$$

$$\frac{۲}{y_۲ - ۲} = -۳ + \sqrt{۹/۸۱\frac{y_۲}{۲ \times ۲}(۲ + y_۲)}$$

$$y_۲ = ۲/۷۵m$$

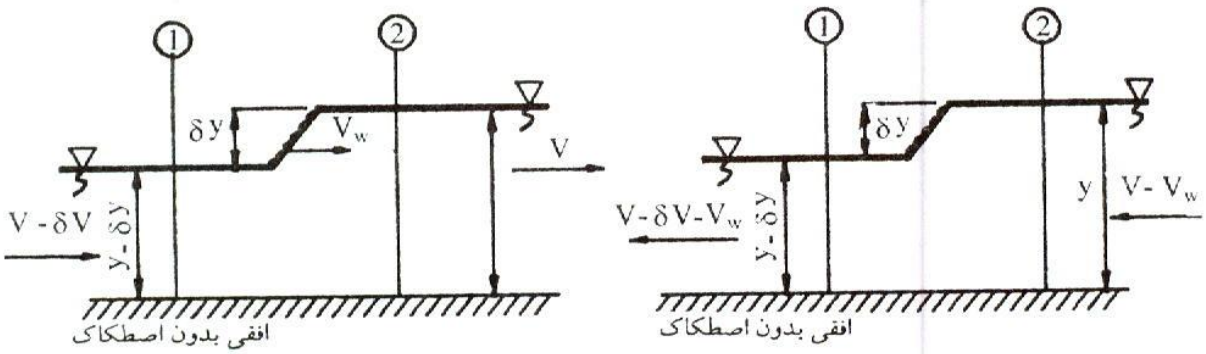
$$V_w = \frac{۲}{۲/۷۵ - ۲} = ۲/۶۷ \ m/s$$

لذا ارتفاع موج به‌وجود آمده برابر $۰/۷۵m = ۲/۷۵ - ۲$ و سرعت آن $۲/۶۷m/s$ می‌باشد.

۱۲-۳-۲ موج منفی (Negative Surge)

امواج مثبت معمولاً حاصل کاهش دبی در پایین دست بوده در صورتی‌که امواج منفی ممکن است در اثر افزایش دبی در پایین دست به‌وجود آیند. از آن‌جاکه شکل امواج منفی به‌جهت تغییر سرعت V_w در طول ارتفاع و نهایتاً گسترده شدن پروفیل موج، با زمان تغییر می‌یابد، برای محاسبات مربوطه، موج منفی را به‌صورت یک سری امواج منفی روی‌هم با سرعت انتشار هر یک مساوی $\sqrt{gy}$ که مجموعاً در روی جریان موجود قرار دارند، در نظر می‌گیرند. شکل ۱۲-۱۱a یکی از این امواج با ارتفاع δy را از دید یک بیننده ثابت و شکل ۱۲-۱۱b همان موج را از دید یک بینندهٔ متحرک که با سرعت V_w در جهت سرعت موج حرکت می‌کند و به‌عبارتی جریان دائمی معادل را با اعمال سرعت $-V_w$ به کل سیستم نشان می‌دهد.

Prozhefa.com



شکل ۱۲-۱۱ a) موج منفی با محورهای مختصات ثابت،
b) موج منفی با محورهای مختصات متحرک

با فرض مستطیلی بودن کانال و با نوشتن معادلهٔ پیوستگی برای دو مقطع ۱ و ۲ در جریان دائمی معادل خواهیم داشت:

$$(V - \delta V - V_w)(y - \delta y) = (V - V_w)y$$

و یا

$$-V \cdot \delta y + V_w \cdot \delta y - y \cdot \delta V - yV_w + yV + \delta y \cdot \delta V = Vy - V_w \cdot y$$

چنانچه از عبارت $\delta y \cdot \delta V$ به جهت کوچکی صرفنظر گردد، رابطهٔ بالا به‌صورت زیر خلاصه می‌گردد:

$$(V_w - V)\delta y = y \cdot \delta V \qquad (۴۸-۱۲)$$

و یا:

$$\frac{\delta V}{\delta y} = \frac{V_w - V}{y} \qquad (۴۹-۱۲)$$

معادلهٔ مقدار حرکت برای حجم آب محصور بین دو مقطع ۱ و ۲ در جهت جریان‌دائمی معادل به شکل ذیل نوشته می‌شود:

$$\gamma \frac{(y - \delta y)^2}{2} - \frac{\gamma y^2}{2} = \frac{\gamma}{g}[V - V_w - (V - \delta V - V_w)](V - V_w)y$$

با ساده نمودن رابطهٔ فوق و حذف مقادیر کوچک که به‌صورت حاصلضرب ظاهر می‌شوند، داریم:

$$\delta y = \frac{V_w - V}{g} \cdot \delta V$$

$$\frac{\delta V}{\delta y} = \frac{g}{V_w - V} \qquad (۵۰-۱۲)$$

از مقایسهٔ دو معادلهٔ ۱۲-۴۹ و ۱۲-۵۰ به رابطهٔ زیر می‌رسیم:

Prozhefa.com

$$(V_w - V)^2 = gy = C^2 \qquad (۵۱-۱۲)$$

$$C = \pm\sqrt{gy} \qquad (۵۲-۱۲)$$

که در عبارات فوق V_w سرعت موج و C سرعت انتشار موج در مقایسه با جریان موجود است. اگر در معادلهٔ ۱۲-۵۰ به‌جای مخرج کسر سمت راست، مقدار $\pm\sqrt{gy}$ را قرار دهیم، نتیجه می‌شود:

$$\frac{\partial V}{\partial y} = \frac{g}{\pm\sqrt{gy}} = \pm\sqrt{\frac{g}{y}}$$

$$\partial y \to 0 \quad \frac{dV}{dy} = \pm\sqrt{\frac{g}{y}} \qquad (۵۳-۱۲)$$

با انتگرال‌گیری از معادلهٔ فوق و اعمال شرایط مرزی می‌توان خصوصیات یک موج منفی را محاسبه نمود:

$$V = \pm 2\sqrt{gy} + \text{عدد ثابت} \qquad (۵۴-۱۲)$$

از بین دو علامت فوق، علامت مثبت را برای ادامهٔ کار انتخاب می‌کنیم که در این‌صورت پیشرفت موج به سمت پایین دست با علامت مثبت به‌دست می‌آید. چنانچه هر کدام از سرعتها دارای جواب منفی باشند، جهت پیشرفت موج به سمت بالادست را نشان خواهند داد.

با اعمال شرایط مرزی و این‌که $V = V_0$ است وقتی $y = y_0$ باشد، داریم:

$$V = V_0 - 2\sqrt{gy_0} + 2\sqrt{gy} \qquad (۵۵-۱۲)$$

با توجه به آن‌که $V_w = V + \sqrt{gy}$ می‌باشد، مقدار V_w که سرعت مطلق موج (سرعت انتشار در آب متحرک) است از معادلهٔ زیر محاسبه می‌گردد:

$$V_w = V_0 - 2\sqrt{gy_0} + 3\sqrt{gy} \qquad (۵۶-۱۲)$$

چنانچه دریچه در زمان $t_0 = 0$ پایین آورده شود، برای به‌دست آوردن موقعیت موج نسبت به دریچه (x) در هر لحظهٔ زمانی t به صورت زیر عمل می‌نمائیم:

$$x = V_w t$$

$$x = \left(V_0 - 2\sqrt{gy_0} + 3\sqrt{gy}\right) t \qquad (۵۷-۱۲)$$

که با حذف y از معادلات ۱۲-۵۵ و ۱۲-۵۷، مقدار سرعت در هر لحظهٔ زمانی و در هر فاصلهٔ مکانی از رابطهٔ زیر محاسبه می‌گردد:

$$V = \frac{V_0}{3} + \frac{2}{3}\frac{x}{t} - \frac{2}{3}\sqrt{gy_0} \qquad (۵۸-۱۲)$$

Prozhefa.com

در صورتی‌که به عنوان مثال دریچهٔ کنترل موجود در مسیر جریان، کاملاً بسته باشد، و سپس به صورت ناگهانی و به‌طور کامل باز شود، موج منفی به‌وجود خواهد آمد که در آن $V_0 = 0$ بوده و لذا:

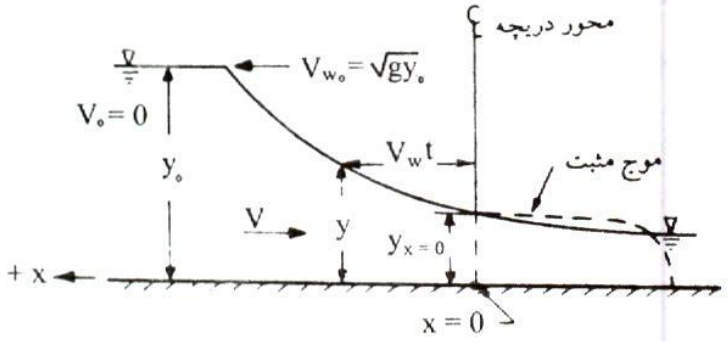
$$V_w = 2\sqrt{gy} - 2\sqrt{gy_0} \qquad (۵۹-۱۲)$$

و بنابراین در هر مقطع به عمق y و در زمان t، مقادیر سرعت و فاصله (x) از عبارتهای زیر به‌دست می‌آیند:

$$V = V_w - \sqrt{gy} = 2\sqrt{gy} - 2\sqrt{gy_0} \qquad (۶۰-۱۲)$$

$$x = \left(3\sqrt{gy} - 2\sqrt{gy_0}\right) t \qquad (۶۱-۱۲)$$

که معادلهٔ ۱۲-۶۱ در حقیقت شکل سطح آب را معین می‌سازد (شکل ۱۲-۱۲).



شکل ۱۲-۱۲ رها شدن ناگهانی آب از یک مخزن

از معادلات فوق نتیجه می‌شود که در محل دریچه $(x = 0)$، ارتفاع و سرعت جریان معادل عبارتهای زیر خواهند بود:

$$y_{x=0} = \frac{4}{9} y_0 \qquad (۶۲-۱۲)$$

$$V_{x=0} = \frac{-2}{3}\sqrt{gy_0} \qquad (۶۳-۱۲)$$

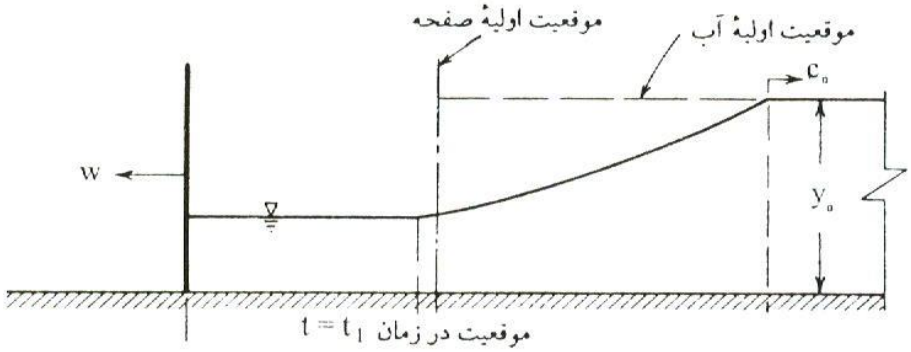
که هر دو مستقل از t بوده و علامت منفی در معادلهٔ سرعت نشان‌دهندهٔ پیشرفت موج به‌سمت بالادست است. چنانچه بخواهیم مقدار شدت جریان عبور شده از واحد طول دریچه را حساب کنیم داریم:

$$q_{x=0} = (V.y)_{x=0} = \left(\frac{2}{3}\sqrt{gy_0}\right)\left(\frac{4}{9}y_0\right) = \frac{8}{27}\sqrt{gy_0^3} \qquad (۶۴-۱۲)$$

۱۲-۳-۲-۱ شکست سد (Dam-break) از جمله مسایلی که می‌تواند بدین‌طریق مورد تحلیل قرار گیرد، مسأله شکست سد (Dam-break Problem) است که در اثر خرابی سد، حجم زیادی از آب به‌صورت ناگهانی در رودخانه جاری می‌شود. ساده‌ترین حالت برای این منظور موقعی است که شیب بستر

Prozhefa.com

و مقاومت قابل صرفنظر کردن بوده و کانال مستطیلی فرض گردد که در این‌صورت مشابه حالتی است که در مسیر کانال یک دریچهٔ قائم (شکل ۱۲-۱۳) و در بالادست آن حجمی از آب ساکن وجود داشته باشد. در صورتی‌که در پایین‌دست سد یا دریچه و قبل از خرابی و یا برداشتن سریع آن از مسیر آبی وجود نداشته باشد، می‌توان برای حل مسأله از معادلات ۱۲-۵۹ تا ۱۲-۶۴ استفاده نمود.

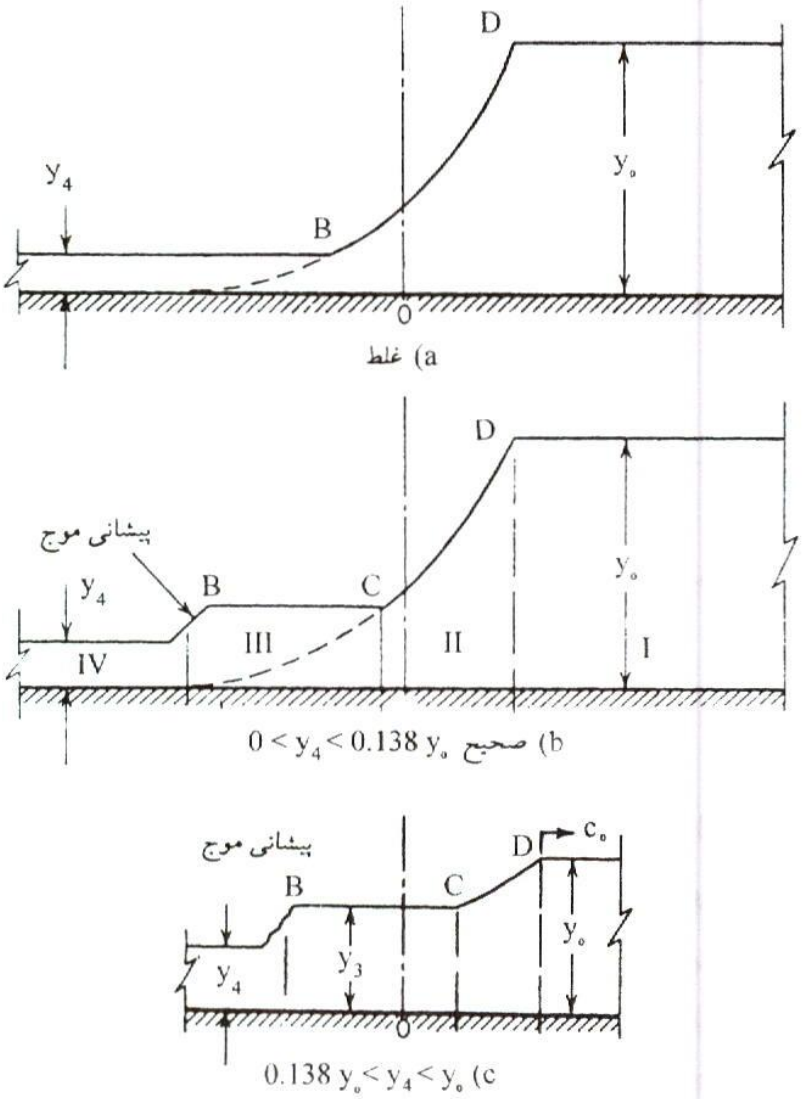


شکل ۱۲-۱۳ مسأله شکست سد

چنانچه در ابتدا، در پایین‌دست دریچه، آب ساکنی وجود داشته باشد، مسأله تغییر محسوسی ننموده و می‌توان از محاسبات فوق استفاده نمود. در این حالت و در نگاه اول گمان می‌رود که نظیر شکل ۱۲a-۱۴، سطح سهمی شکل موج منفی تا مقطعی که عمق جریان به y_2 می‌رسد ادامه می‌یابد و از آن نقطه به بعد سطح آب افقی می‌گردد در حالی‌که با چنین فرضی در محل اتصال دو سطح (نقطهٔ B)، یک ناپیوستگی در سرعت وجود دارد به گونه‌ای که بلافاصله پس از B سرعت مساوی صفر و بلافاصله قبل از آن سرعت دارای مقدار مشخصی که از معادلهٔ ۱۲-۶۰ به‌دست می‌آید می‌باشد. این ناپیوستگی تنها دراثر موج با ارتفاع محدود نظیر آنچه در شکل ۱۲b-۱۴ نشان داده شده است به‌وجود می‌آید و لذا موج منفی فقط تا مقطع C که روابط عمق و سرعت آن در معادلهٔ ۱۲-۶۰ صدق کرده و برای ایجاد یک موج مثبت کافی هستند ادامه می‌یابد. پس از تشکیل موج مثبت و از آن‌جاکه سرعت پیش موج B(Surge Front) از سرعت موج اولیه در مقطع C بیشتر است، موج جدید از موج منفی ابتدایی پیشی گرفته و لذا منطقه‌ای نظیر منطقه BC یا ناحیه III به‌وجود خواهد آمد که دارای جریان‌دائمی یکنواخت بوده و طول آن به‌طور ثابت افزایش می‌یابد و سپس مطابق شکل ۱۲b-۱۴ یا ۱۲c-۱۴ به منطقهٔ دارای آب ساکن منتهی می‌گردد.

در هر حال روش سادهٔ فوق جهت رها شدن ناگهانی آب، که به مسأله شکست سد مشهور است برای بسیاری از پروفیلهای حقیقی جوابهای رضایت‌بخشی داده و تنها در انتهای پایین‌دست، به‌جای پروفیل داده شده از معادلهٔ ۱۲-۶۱، موج مثبت گرد شده وجود خواهد داشت.

Prozhefa.com



شکل ۱۲-۱۴ دو نوع پروفیل سطح آب در حالت شکست سد موقعی‌که کانال پایین‌دست خشک نباشد

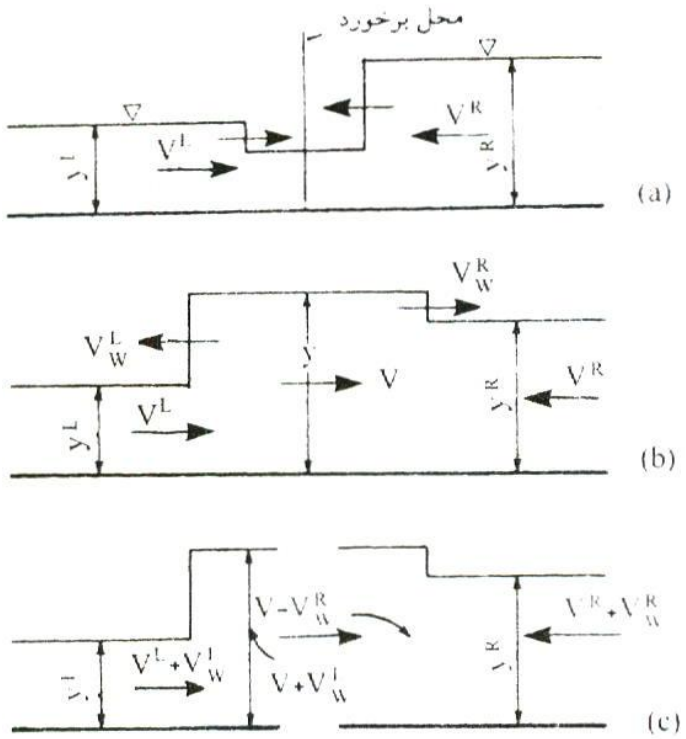
۱۲-۳-۲-۲ تأثیر شیب و مقاومت کانال (Effects of Channel Slope and Resistance)

تأثیر شیب و مقاومت کانال که تا کنون از آن صرفنظر می‌شد، در مواقعی‌که قسمت پایین‌دست رودخانه خشک می‌باشد، بیشتر بوده و مطالعهٔ آن از اهمیت بالاتری برخوردار است. تجربیات و تحقیقات Schoklitsch در سال ۱۹۱۷ و Dressler در سال ۱۹۵۴ نشان می‌دهد که حتی در این‌حالت و در محدودهٔ $\frac{y_4}{y_0} \leq 0.75$ تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و معادلات تئوری ارائه شده وجود داشته و برای مقادیر بیشتر از محدودهٔ یاد شده، پیش موج (Surge Front) واقعی دارای سرعتی کمتر و شیبی تندتر از آنچه از طریق تئوری به‌دست می‌آید است که این به جهت تأثیر مقاومت کانال می‌باشد.

۱۲-۳-۲-۳ برخورد دو موج (Meeting of Two Surges) در صورتی‌که دو موج که در

Prozhefa.com

جهت مخالف یکدیگر حرکت می‌کنند، به یکدیگر برسند (شکل ۱۲-۱۵a)، حاصل آن ایجاد دو موج جدید خواهد بود که در جهت معکوس منتشر می‌شوند (شکل ۱۲-۱۵b) و حل مربوطه با استفاده از معادلات پیوستگی و مقدار حرکت که برای شکل ۱۲-۱۵c نوشته می‌شود، صورت می‌پذیرد.



شکل ۱۲-۱۵ a) دو موج قبل از برخورد،
b) دو موج بعد از برخورد،
c) برخورد دو موج، حالت دائمی معادل

معادلهٔ پیوستگی:

$$(V^L + V_w^L)\, y^L = (V + V_w^L)\, y \qquad (۶۵-۱۲)$$

$$(V^R + V_w^R)\, y^R = -(V - V_w^R)\, y \qquad (۶۶-۱۲)$$

معادلهٔ مقدار حرکت:

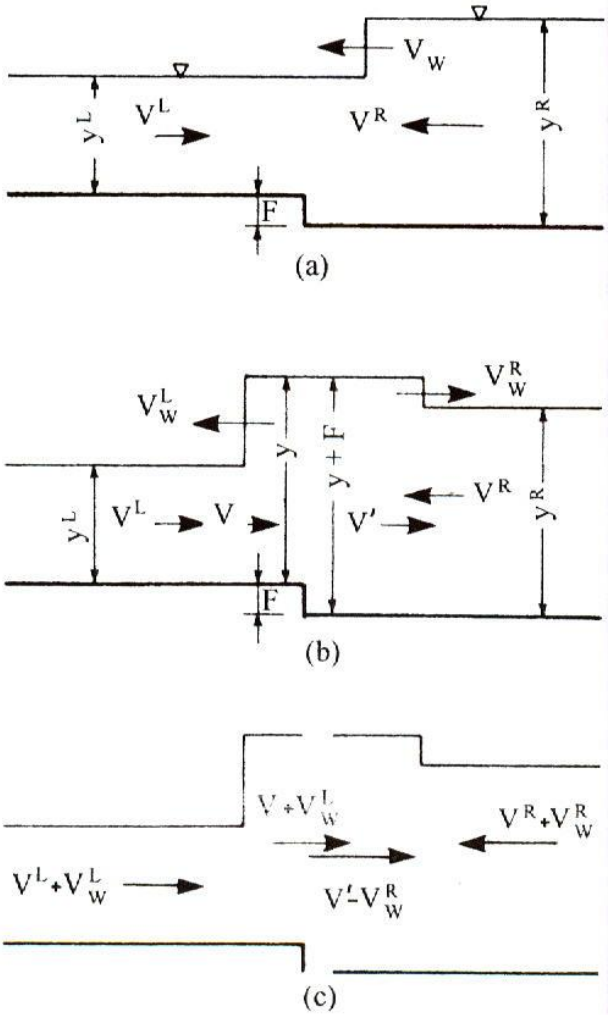
$$-[(y^L)^2 - y^2] = \frac{2y^L}{g}(V^L + V_w^L)(V^L - V) \qquad (۶۷-۱۲)$$

$$[y^2 - (y^R)^2] = \frac{2y^R}{g}(V^R + V_w^R)(V + V^R) \qquad (۶۸-۱۲)$$

در معادلات ۱۲-۶۵ تا ۱۲-۶۸، مقادیر V^R، y^R، V^L، y^L و g معلوم بوده و می‌توان چهار مجهول y، V_w^R، V_w^L و V را محاسبه نمود.

Prozhefa.com

گاهی اوقات، در مسیر کانال پله‌ای وجود دارد که موج در برخورد با آن و در حین عبور از روی آن، شرایطی مشابه برخورد دو موج و حتی کمی پیچیده‌تر را به‌وجود می‌آورد. پلهٔ مزبور می‌تواند حقیقی و یا مجازی باشد که در صورت اخیر، برعکس موارد یاد شده قبل و به جهت شیب نسبتاً زیاد کانال، نمی‌توان از این شیب صرفنظر نمود و لذا کانال را به چند قسمت کوتاه‌تر تقسیم نموده و به‌منظور تأثیر شیب از پله‌ای که در انتهای هرقسمت منظور می‌شود و ارتفاع آن معادل حاصلضرب طول قسمت و شیب مربوطه است، استفاده می‌نمایند (شکل ۱۲a-۱۶). در هر حال موقعی که موج به پله می‌رسد، دو موج جدید که یکی به سمت بالادست و دیگری به‌سمت پایین‌دست در حرکت است به‌وجود می‌آید (شکل ۱۲b-۱۶) که برای محاسبات مجدداً به روش قبل عمل می‌شود.



شکل ۱۲-۱۶ موج عبورکننده از روی پله، a) قبل از رسیدن، b) بعد از رسیدن، c) جریان دائمی معادل

Prozhefa.com

معادلهٔ پیوستگی:

$$(V^L + V_w^L)\, y^L = (V + V_w^L)\, y \qquad (۶۹-۱۲)$$

$$(V^R + V_w^R)\, y^R = -(V - V_w^R)\, (y + F) \qquad (۷۰-۱۲)$$

معادلهٔ مقدار حرکت:

$$-[(y^L)^۲ - y^۲] = \frac{۲y^L}{g}\, (V^L + V_w^L)\, (V^L - V) \qquad (۷۱-۱۲)$$

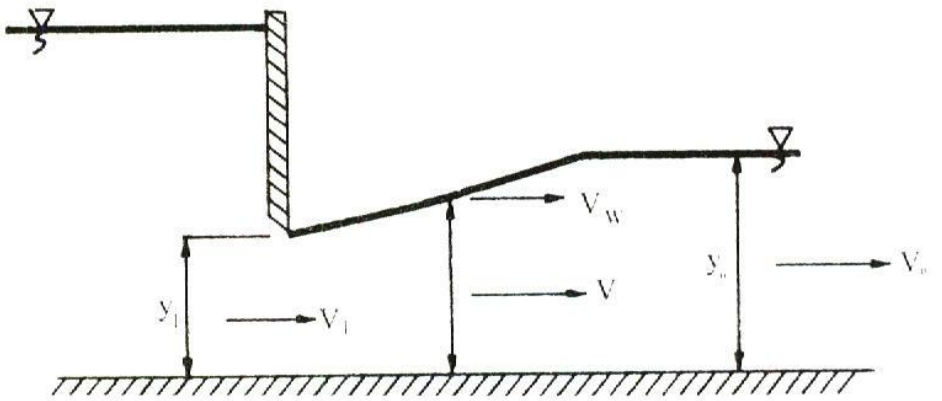
$$(y + F)^۲ - (y^R)^۲ = \frac{۲y^R}{g}\, (V^R + V_w^R)\, (V + V^R) \qquad (۷۲-۱۲)$$

که برای به‌دست آوردن پنج مجهول V، V_w^L، V'، V_w^R و y، می‌توان علاوه بر چهار معادلهٔ فوق از رابطهٔ زیر نیز استفاده نمود:

$$V_\circ\, y = V'\, (y + F) \qquad (۷۳-۱۲)$$

مثال ۱۲-۶

در شکل زیر، دریچه در زمان $t_\circ = \circ$ به گونه‌ای تغییرمکان می‌دهد که شدت جریان به اندازهٔ ۵۰ درصد کاهش یابد. اگر در شرایط اولیه $V_\circ = ۶٫۲\text{m/s}$ و $y_\circ = ۳\text{m}$ باشد و کانال مستطیلی درنظر گرفته شود، مطلوب است تعیین مقادیر $V_۱$ و $y_۱$ و نیز پروفیل سطح آب.



حل:

در زمان $t_\circ = \circ$ داریم:

$$q_\circ = V_\circ\, y_\circ = ۶٫۲ \times ۳ = ۱۸٫۶\ \text{m}^۳/\text{s/m}$$

بعد از پایین آمدن دریچه:

$$q = ۰٫۵\, q_\circ = ۹٫۳\ \text{m}^۳/\text{s/m} = V_۱\, y_۱$$

با استفاده از معادلهٔ ۱۲-۵۵:

Prozhefa.com

$$V_1 = V_0 - ۲\sqrt{gy_0} + ۲\sqrt{gy_1}$$

$$V_1 = ۶/۲ - ۲\sqrt{۹/۸۱ \times ۳} + ۲\sqrt{۹/۸۱ y_1}$$

$$V_1 = -۴/۶۵ + ۶/۲۶\sqrt{y_1}$$

$$\frac{۹/۳}{y_1} = -۴/۶۵ + ۶/۲۶\sqrt{y_1}$$

$$y_1 = ۲/۱۰ \text{ m}$$

$$V_1 = ۴/۴۳ \text{ m/s}$$

برای تعیین شکل پروفیل، از معادلهٔ ۱۲-۵۷ استفاده می‌گردد:

$$x = \left(V_0 - ۲\sqrt{gy_0} + ۳\sqrt{gy}\right) t$$

$$x = \left(۶/۲ - ۲\sqrt{۹/۸۱ \times ۳} + ۳\sqrt{۹/۸۱ y}\right) t$$

$$x = \left(-۴/۶۵ + ۹/۴۰\sqrt{y}\right) t$$

که می‌توان در هر زمان t ، مقدار عمق جریان y را در هر فاصلهٔ x تعیین نمود.

مثال ۱۲-۷

در یک کانال مستطیلی که آبی با دبی نسبی $q = ۱۰ \text{m}^۳/\text{s/m}$ را با عمقی برابر $۲/۵\text{m}$ انتقال می‌دهد، یک دریچهٔ کشوی قائم کارگذاشته شده است. اگر دریچه به اندازه‌ای پایین آورده شود که شدت جریان را به میزان ۶۰ درصد تقلیل دهد، محاسبه کنید ارتفاع موج منفی ایجاد شده و نیز سرعت جریان را پس از عبور موج.

حل:

در شرایط اولیه $q_0 = ۱۰ \text{m}^۳/\text{s/m}$ و $y_0 = ۲/۵\text{m}$ بوده و لذا:

$$V_0 = \frac{۱۰}{۲/۵} = ۴/۰ \text{ m/s}$$

مقدار دبی پس از پایین آوردن دریچه معادل $q_1 = ۴ \text{m}^۳/\text{s/m}$ می‌گردد. حرکت موج منفی ایجاد شده به سمت پایین‌دست بوده و خواهیم داشت:

$$V_1 = V_0 - ۲\sqrt{gy_0} + ۲\sqrt{gy_1}$$

Prozhefa.com

$$V_1 = \frac{q_1}{y_1} = ۴ - ۲\sqrt{۹٫۸۱ \times ۲٫۵} + ۲\sqrt{۹٫۸۱ y_1}$$

$$\frac{۴}{y_1} = ۴ - ۹٫۹۰ + ۶٫۲۶\sqrt{y_1}$$

$$y_1 = ۱٫۷۲۴ \text{ m}$$

ارتفاع موج $h = y_0 - y_1 = ۲٫۵ - ۱٫۷۲۴ = ۰٫۷۷۶\text{m}$

سرعت نهائی $V_1 = \frac{۴}{۱٫۷۲۴} = ۲٫۳۲ \text{ m/s}$

مثال ۱۲-۸

یک جریان دائمی با سرعت ۲m/s و عمق ۱۳m به‌طور ناگهانی و در پایین‌دست متوقف می‌شود. اگر کانال مستطیلی بدون اصطکاک در نظر گرفته شود معین کنید ارتفاع موج و سرعت آن و نیز زمان لازم برای رسیدن موج به نقطه‌ای به فاصلهٔ ۴ کیلومتر در بالادست محل توقف را.

حل:

موج به‌وجود آمده عبارت از موج مثبت بالادست بوده و داریم:

$$V_w = -V_1 + \sqrt{g\frac{y_2}{۲y_1}(y_1 + y_2)}$$

$$y_1 = ۱۳\text{m} \quad , \quad V_1 = ۲\text{ m/s}$$

$$V_w = \frac{Q}{b(y_2 - y_1)} = \frac{۲ \times ۱۳}{y_2 - ۱۳} = \frac{۲۶}{y_2 - ۱۳}$$

$$\frac{۲۶}{y_2 - ۱۳} = -۲ + \sqrt{۹٫۸۱\frac{y_2}{۲ \times ۱۳}(۱۳ + y_2)}$$

$$y_2 = ۱۵٫۴۰\text{m}$$

$$V_w = \frac{۲۶}{۱۵٫۴ - ۱۳} = \frac{۲۶}{۲٫۴} = ۱۰٫۸۳ \text{ m/s}$$

لذا سرعت موج ۱۰٫۸۳m/s و ارتفاع آن ۱۵٫۴ − ۱۳ = ۲٫۴m خواهد بود. زمان لازم برای آن‌که موج حاصله به نقطه‌ای به فاصلهٔ ۴ کیلومتر در بالادست محل توقف برسد:

$$t = \frac{۴ \times ۱۰۰۰}{۱۰٫۸۳} = ۳۶۹٫۳۴ \quad \text{ثانیه}$$

Prozhefa.com

مسایل

۱-۱۲ یک رودخانه نسبتاً افقی، آبی با دبی نسبی $q = ۱\text{m}^۳/\text{s/m}$ و سرعت ۰٫۵m/s را وارد دریاچه‌ای که سطح آب در آن همتراز سطح آب رودخانه است می‌نماید. چنانچه بطریقی دیگر، سطح آب دریاچه در طول مدت یک ساعت به اندازهٔ ۰٫۵m بالا آید، مطلوب است:

۱- تعین زمان لازم برای آن‌که در نقطه‌ای از رودخانه و بفاصلهٔ ۲km در بالادست دریاچه، عمق آب به اندازهٔ ۰٫۵m افزایش یابد.

۲- تعیین سرعت آب در رودخانه پس از بالارفتن سطح آب به اندازهٔ فوق در رودخانه و ارائه توضیحات مربوطه

۳-رسم منحنی مشخصات C^+

۲-۱۲ دریک رودخانه‌عریض‌به‌شکل تقریبی‌مستطیل‌و مشخصات $b = ۵۰\text{m}$ ، $n = ۰٫۰۲۰$ و $S_۰ = ۰٫۰۰۰۸$ ، آبی با دبی $۵۰\text{m}^۳/\text{s}$ جریان دارد. چنانچه در اثر بروز یک سیل، دبی رودخانه به‌صورت ناگهانی به $۵۰۰\text{m}^۳/\text{s}$ افزایش یابد، تعیین کنید عمق جریان را در این حالت (با فرض ثابت ماندن آن) و زمان رسیدن این عمق به شهری که در فاصله ۵کیلومتری پایین‌دست محل شروع سیل قرار دارد.

۳-۱۲ با استفاده از معادلهٔ $\frac{x}{t} = ۳\sqrt{gy} + V_۰ - ۲\sqrt{gy_۰}$ برای پروفیل یک موج منفی، مقدار سرعت موج را در مقاطعی که در آنها $y = ۰$ و $y = y_۰$ باشد معین نموده، توضیح دهید که آیا نتیجهٔ اولی می‌تواند دارای یک مفهوم فیزیکی باشد؟ همچنین نشان دهید که در طول مسیر مقطعی وجود دارد که مقدار عمق جریان در آن در همهٔ زمانها ثابت می‌ماند.

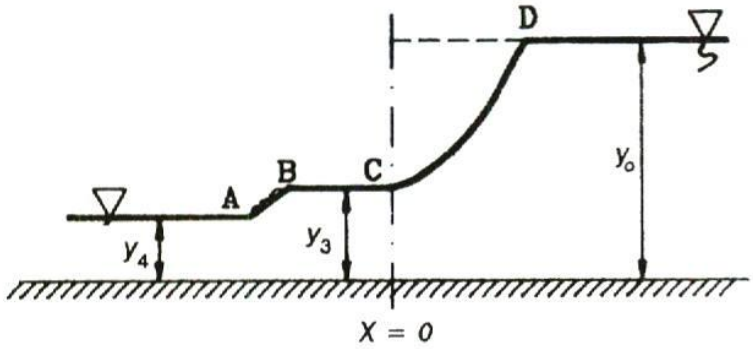
۴-۱۲ در یک کانال با شیب بستر و اصطکاک ناچیز، جریان یکنواختی برقرار است. چنانچه در یک مرحله و از ابتدای کانال، مقدار دبی با تغییرات زمان، شروع به تغییر نماید $(q = q(t))$ نشان دهید که در این نقطه رابطهٔ زیر برقرار است:

$$g\frac{dq}{dt} = ۲C(V + C)\frac{dC}{dt}$$

۵-۱۲ در دو طرف سدی آب به ارتفاع‌های $y_۰$ و $y_۴ = ۰٫۱y_۰$ وجود داشته و ساکن فرض می‌گردد. در صورت شکست ناگهانی سد، اولاً، موقعیت امواج به‌وجود آمده و نیمرخ تقریبی مربوطه را معین نمایید. ثانیاً، مقدار دبی در این حالت را پس از تعیین حداکثر دبی ممکنه محاسبه کنید. ثالثاً، ثابت کنید که اگر آب وارد شده به رودخانه - برای انرژی مخصوص فرضی $y_۰$ باشد و دبی نسبی معادل $q = \frac{۱}{۲۷}\sqrt{gy_۰}$ در نظر گرفته شود، جریان ایجاد شده دارای عدد فرودی برابر ۰٫۳۱۸ می‌باشد.

Prozhefa.com

۶-۱۲ سدی در مقطع O از یک رودخانه مستطیلی، به گونه‌ای قرار دارد که جریان آب در بالادست سد برابر y_0 ثابت بوده و در پایین دست آن آب ساکنی با عمق y_4 وجود دارد. چنانچه سد مذکور و بطور ناگهانی شکسته شود، ضمن توضیح وضعیت جریان به‌وجود آمده، اولاً، حداکثر دبی و عمق جریان مربوطه را محاسبه کنید. ثانیاً، اگر نقطهٔ C (شکل زیر) در محل اولیه سد ($x = 0$) ثابت بماند، یعنی $y_c = \frac{۴}{۹}y_0$ و $V_c = \frac{۲}{۳}C_0$ باشد، نشان دهید که در این حالت مقدار y_4 می‌بایست مساوی $0/138y_0$ باشد. ثالثاً، چنانچه y_4 بزرگتر و یا کوچکتر از $0/138y_0$ باشد، موقعیت نقطهٔ C و تغییرات احتمالی دبی انتقالی را تشریح نمایید.



۷-۱۲ در یک کانال مستطیلی بدون اصطکاک یک جریان دائمی با سرعت ۲٫۵m/s و عمق ۱۳m بطور ناگهانی و به‌صورت کامل در پایین‌دست متوقف می‌شود. در بالادست محل توقف موج و به‌فاصله ۳۵۰۰m از آن، پله‌ای به ارتفاع ۰٫۷m وجود دارد. معین کنید اولاً، مشخصات موج به‌وجود آمده را، ثانیا، وضعیت جریان را بلافاصله پس از آنکه موج به این مانع برسد.

۸-۱۲ یک کانال مستطیلی با عرض ۵m ، آبی به شدت جریان $30m^3/s$ را با عمق ۳m از خود عبور می‌دهد. اگر مقدار دبی در پایین‌دست، و به‌وسیلهٔ یک دریچه به‌صورت ناگهانی به $15m^3/s$ تقلیل یابد، مطلوب است محاسبهٔ مقدار افزایش عمق و نیز سرعت انتشار موج.

۹-۱۲ یک جریان دائمی به شدت جریان $30m^3/s$ وارد یک کانال مستطیلی طولانی به عرض ۱۰m با شیب بستر ۰٫۰۰۰۱ و ضریب مانینگ ۰٫۰۱۵ می‌شود. چنانچه مقدار دبی به‌وسیلهٔ یک دریچه به $15m^3/s$ کاهش یابد، مقدار عمق جریان و سرعت متوسط موج حاصله را به‌دست آورید. همچنین تعیین کنید پروفیل سطح جریان و زمان لازم برای آنکه پیش موج بتواند به مقطعی به‌فاصلهٔ 1km در پایین دست برسد (از اصطکاک صرفنظر می‌شود).

۱۰-۱۲ آب از طریق یک ورودی مجهز به دریچه از مخزن سدی وارد یک کانال مستطیلی با عرض ۱۰m و شیب بستر ۰٫۰۰۰۱ و ضریب مانینگ ۰٫۰۱۵ می‌شود. در زمانی‌که شدت جریان دائمی $25m^3/s$ برقرار است، دریچه به‌صورت ناگهانی باز شده و باعث افزایش دبی تا میزان $60m^3/s$ می‌گردد.

Prozhefa.com

مقادیر عمق جریان و سرعت انتشار موج را محاسبه کنید.

۱۲-۱۱ یک رودخانهٔ عریض آبی با سرعت ۱٫۵m/s و عمق ۲٫۵m را وارد دریا می‌کند، اگر در یک حالت خاص، در دریا مدی به ارتفاع ۰٫۹۰m ایجاد شود، تعیین کنید سرعت موج ایجاد شده به‌سمت بالادست و نیز سرعت جریان بعد از عبور موج را. چنانچه مد حاصله بتواند مسافت ۲٫۵km را در زمان ۱۰ دقیقه طی کند، در این صورت ارتفاع موج چقدر است؟

۱۲-۱۲ در اثر بالابردن ناگهانی یک دریچه در یک کانال مستطیلی، موج منفی با ارتفاع ۰٫۷۵m ایجاد شده است. اگر عمق اولیه در بالادست دریچه ۳m باشد مطلوب است. الف: محاسبهٔ مقدار دبی نسبی منتقل شده از زیر دریچه و نیز رسم پروفیل موج منفی در ثانیهٔ چهارم از باز شدن دریچه.

ب: محاسبهٔ مقدار دبی اگر میزان بالاکشیدن دریچه برابر ۲m باشد.

Prozhefa.com

فصل ۱۳

روندیابی سیل[1]

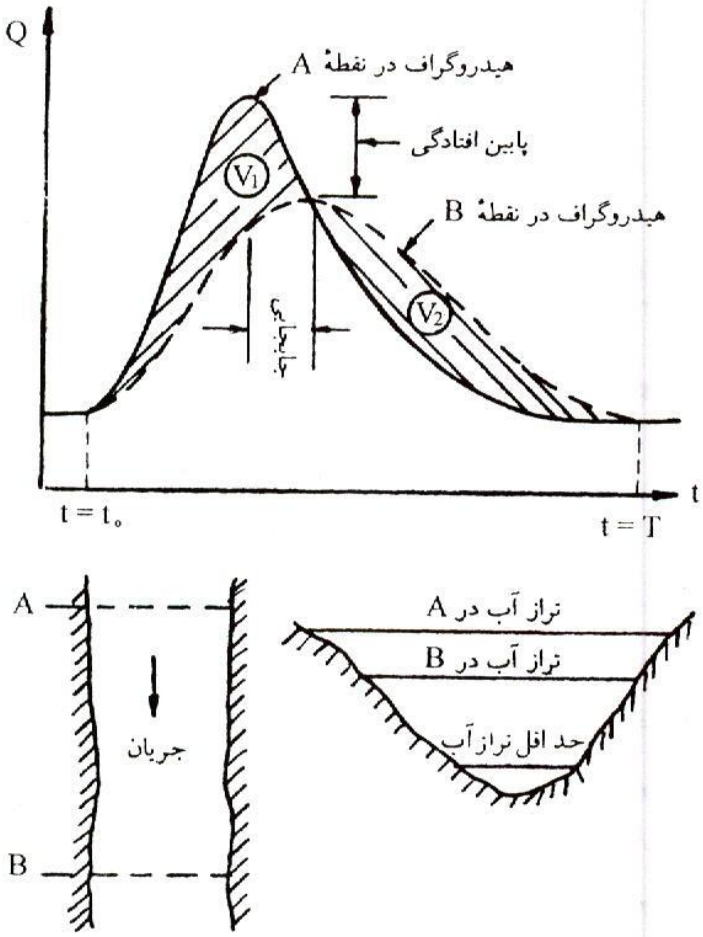
جلیل ابریشمی - سیدمحمود حسینی

مقدمه

یکی از مهمترین حالات جریانهای غیردائمی که هر مهندس هیدرولیک به ناچار با آن روبرو خواهد شد، عبارت است از حرکت یک موج سیل (Flood Wave) در داخل رودخانه و تغییراتی که در اثر این حرکت در شکل و ارتفاع سیل به‌وجود می‌آید. به عبارت دیگر؛ به منظور کنترل سیل در رودخانه و یا دریاچه‌های پشت سدها و بندها و همچنین جهت حفاظت کناره‌های رودخانه‌ها لازم است تا تغییرات ارتفاع و حجم آب و نیز مقدار شدت جریان ورودی و خروجی به منطقهٔ مورد مطالعه را در طول زمان سیل معین نمود که این عمل را روندیابی سیل می‌نامند. به عنوان مثال چنانچه مسیر کوتاه AB از یک کانال دارای جریان یکنواخت دائمی را در نظر گیریم و سپس در حد فاصل زمانی $t = 0$ و $t = T$ مقدار دبی در نقطهٔ A براثر وقوع سیل افزایش یابد و از تغییراتی مشابه شکل ۱۳-۱ تبعیت نماید، با افزایش ارتفاع آب، مقداری از حجم آب وارد شده به نقطهٔ A در کانال AB ذخیره و لذا مقدار آب خروجی و ارتفاع آب در نقطهٔ B در هر لحظه کمتر از مقادیر مشابه در نقطهٔ A خواهد بود. حال چنانچه مقدار شدت جریان (و همچنین به تبع آن مقدار ارتفاع) در نقطهٔ A شروع به کاهش نماید، تا زمان مشخص و محدودی، باز هم دبی خروجی از نقطهٔ B افزایش می‌یابد ولی در زمانی‌که مقدار دبی ورودی به منطقه و خروجی از آن مساوی یکدیگر گردیدند، از آن پس حجم آب ذخیره شده بتدریج رها شده و لذا دبی و ارتفاع در نقطهٔ B بیشتر از مقادیر مشابه در نقطهٔ A خواهند بود و نهایتاً در زمان $t = T$ مجدداً جریان به حالت یکنواخت دائمی برمی‌گردد. بدیهی است در این‌صورت دو سطح هاشور خورده V_1 و V_2 که به ترتیب حجم‌های ذخیره شده و رها شده را نشان می‌دهند با یکدیگر مساوی خواهند بود. با توجه به مطالب فوق، نقطهٔ اوج هیدروگراف B ضمن آن‌که پایین‌تر از نقطه اوج هیدروگراف A می‌باشد (پایین افتادگی)، دارای یک

1. Flood Routing

Prozhefa.com



شکل ۱۳-۱ تغییرات هیدروگراف در حین عبور سیل از یک کانال

تأخیر زمانی (Lag) یا جابه‌جایی نیز نسبت به آن خواهد بود. محاسبهٔ موارد فوق و به عبارتی تعیین هیدروگراف خروجی با داشتن هیدروگراف ورودی، همان روندیابی سیل است که مشابه آن برای مخازن سدها و سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها و تونلهای انحراف آب اتفاق می‌افتد.

روندیابی سیل یکی از مسایل مربوط به جریانهای غیر دائمی است که از اهمیت عملی خاصی برخوردار بوده و برای حل آن می‌توان از روشها و تکنیک‌های مختلف هیدرولیکی و هیدرولوژیکی استفاده نمود. در روشهای هیدرولیکی نظیر روش همانندی پخش (Diffusion Analogy) که بر اصول تئوری جریانهای غیردائمی و حل معادلهٔ دیفرانسیل مربوطه استوار است، روندیابی سیل به جوابهای دقیق منتج خواهد گردید اما پیچیدگی نسبی روابط و مشکل بودن استفاده از آنها و طولانی بودن رسیدن به جواب (حتی گاه با استفاده از کامپیوتر)، باعث می‌گردد تا در اکثر موارد از روشهای هیدرولوژیکی که با اتخاذ فرض‌هایی، مسأله را به میزان قابل ملاحظه‌ای ساده‌می‌نماید، استفاده گردد. دراین روشها که‌ازآن جمله می‌توان روشهای پالس (Puls)، ماسکینگام (Muskingum)، مقادیر اجرایی (Working Values) و ...

Prozhefa.com

خواهد بود از O_2 و V_2 که پس از به‌دست آوردن آنها می‌توان برای فاصلهٔ‌زمانی بعدی اقدام نمود. با انتقال مجهولات معادلهٔ ۱۳-۲ به یك طرف تساوی داریم:

$$V_2 + \frac{1}{2} O_2 \Delta t = V_1 - \frac{1}{2} O_1 \Delta t + \frac{1}{2} (I_1 + I_2) \Delta t \qquad (۳-۱۳)$$

با تقسیم رابطهٔ فوق بر Δt و معرفی عامل N به‌صورت:

$$N = \frac{V}{\Delta t} + \frac{O}{2} \qquad (۴-۱۳)$$

خواهیم داشت:

$$N_2 = N_1 + \frac{1}{2} (I_1 + I_2) - O_1 \qquad (۵-۱۳)$$

که شکل دادن معادله به‌صورت رابطهٔ ۱۳-۵ می‌تواند ما را در محاسبات مربوطه، نظیر آنچه در جداول مربوط به مثال ۱۳-۱ آورده شده است، یاری دهد. همچنین از آن‌جاکه N تابعی از حجم ذخیره (V) می‌باشد، رابطهٔ $V - O$ می‌تواند به شکل $N - O$ تغییر داده شود و مقدار Δt را نیز می‌توان در حین حل و با توجه به حساسیت و شیب منحنی هیدروگراف ورودی تغییر داد. بدیهی است انتخاب کوچکتر Δt بخصوص در قسمتهای با شیب تند منحنی، به نتایج دقیقتری منتهی خواهد گردید.

مثال ۱۳-۱

از دریاچه‌ای با کناره‌های با شیب تند و سطحی معادل ۱۹۸۰۰۰۰ متر مربع، آب وارد یک کانال طبیعی با شیب تند که می‌توان آن را دارای مقطعی مستطیلی به‌عرض ۸ متر فرض نمود، می‌گردد. در ابتدا، حالت جریان دائمی و مقدار دبی خروجی از دریاچه $28 m^3/s$ بوده اما در یک زمان معین، سیلابی وارد رودخانه و دریاچه شده که دبی ورودی آن به‌صورت زیر یادداشت گردیده است. مطلوب است محاسبه و رسم هیدروگراف خروجی برای زمانی معادل ۴۸ ساعت بعد از شروع سیلاب.

جدول ۱۳-۱ شدت جریان سیل ورودی در زمانهای مختلف (مثال ۱۳-۱)

زمان پس از شروع (ساعت)	۰	۳	۶	۹	۱۲	۱۵	۱۸	۲۱	۲۴
دبی ورودی (m^3/s)	۲۸	۳۴	۴۵	۵۹٫۵	۷۴٫۵	۸۳٫۵	۸۶	۸۵	۸۰
زمان پس از شروع (ساعت)	۲۷	۳۰	۳۳	۳۶	۳۹	۴۲	۴۵	۴۸	
دبی‌ورودی (m^3/s)	۷۳٫۵	۶۵	۵۶٫۵	۴۸	۴۰٫۵	۳۴	۲۹٫۵	۲۸	

Prozhefa.com

حل

نخست بایستی مقادیر V و N را بر حسب مقدار دبی خروجی O به‌دست آورد. با توجه به این‌که کانال خروجی دارای شیب تند می‌باشد، در ابتدای آن جریان بحرانی وجود داشته و چنانچه فرض گردد که در زمان شروع سیل، دبی خروجی نیز $۲۸m^۳/s$ بوده (می‌توان با مقادیر دیگری شروع کرد) داریم:

$$Q_c = ۲۸ = bV_c y_c = ۸\sqrt{gy_c}.y_c$$

$$y_c = ۱/۰۸m$$

$$H = E_c = ۱/۵y_c = ۱/۵ \times ۱/۰۸ = ۱/۶۲m$$

که H عبارت است از فاصلهٔ سطح آب دریاچه تاکف کانال در ابتدا. حال به طریق فوق و با انتخاب مقادیری برای H می‌توان مقدار دبی خروجی و افزایش حجم و نهایتاً مقدار N را مطابق جدول ذیل به‌دست آورد. یادآوری می‌شود که با توجه به صورت مسأله و این‌که کناره‌های دریاچه را دارای شیب تند معرفی کرده، فرض می‌گردد که حجم دریاچه به صورت مکعب مستطیلی افزایش می‌یابد.

جدول ۱۳-۲ محاسبهٔ مقادیر V و N و O برحسب تغییرات H (مثال ۱۳-۱)

تراز آب دریاچه نسبت به کف ابتدای کانال $H(m)$	$y_c = \frac{۲}{۳}H$ (m)	$V_c = \sqrt{gy_c}$ (m/s)	دبی خروجی $O = ۸V_c y_c$ ($m^۳/s$)	حجم اضافه شده V ($m^۳$)	$\frac{V}{\Delta t}$ ($\Delta t = ۳hr$)	$N = \frac{V}{\Delta t} + \frac{O}{۲}$
۱/۶۲	۱/۰۸	۳/۲۵	۲۸	۰	۰	۱۴
۲	۱/۳۳	۳/۶۱	۳۸/۴۱	۷۵۲۴۰۰	۶۹/۶۷	۸۸/۸۷۵
۲/۵	۱/۶۷	۴/۰۵	۵۴/۱۱	۱۷۴۲۴۰۰	۱۶۱/۳۳	۱۸۸/۳۸۵
۳	۲	۴/۴۳	۷۰/۸۸	۲۷۳۲۴۰۰	۲۵۳	۲۸۸/۴۴
۳/۵	۲/۳۳	۴/۷۸	۸۹/۱۰	۳۷۲۲۴۰۰	۳۴۴/۶۷	۳۸۹/۲۲
۴	۲/۶۷	۵/۱۲	۱۰۹/۳۶	۴۷۱۲۴۰۰	۴۳۶/۳۳	۴۹۱/۰۱

حال می‌توان منحنی $N - O$ را با توجه به نتایج جدول قبل، ترسیم و سپس با استفاده از آن و به ازای هر مقدار N ، O را محاسبه نمود که برای محاسبات بعدی ضروری می‌باشد.

با این موقعیت می‌توان برای محاسبهٔ مقدار دبی خروجی و به عبارتی هیدروگراف خروجی اقدام نمود. همان‌گونه که در جدول بعدی با فلش نشان داده شده است، در زمان شروع ($t = ۰$) و با

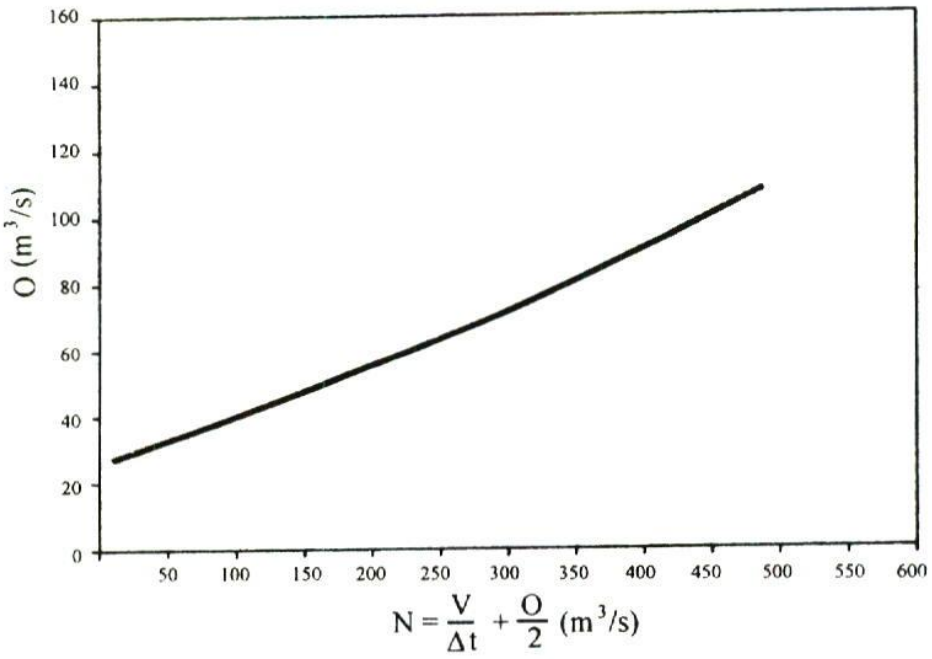
Prozhefa.com

داشتن مقدار دبی ورودی و خروجی، می‌توان N راکه مساوی ۱۴ است به‌دست آورد. از طرفی با کاربرد معادلهٔ ۱۳-۵و داشتن مقادیر $\bar{I} = \frac{۱}{۲}(I_۱ + I_۲)$ و $O_۱$، مقدار $\Delta N = N_۲ - N_۱$ محاسبه شده و در نتیجه مقدار $N_۲ = ۱۷$ محاسبه می‌گردد. با داشتن $N_۲$، مقدار $O_۲$ از روی منحنی مربوط معادل ۲۸٫۴۲ به‌دست می‌آید و لذا نقطهٔ دیگری از هیدروگراف خروجی معین می‌گردد. با ادامهٔ این روش، حل کامل مسأله صورت گرفته و همان‌طور که قبلاً اشاره شد می‌توان مقدار Δt را در طول مسأله و به تناسب حساسیت جوابها کم و یا زیاد نمود.

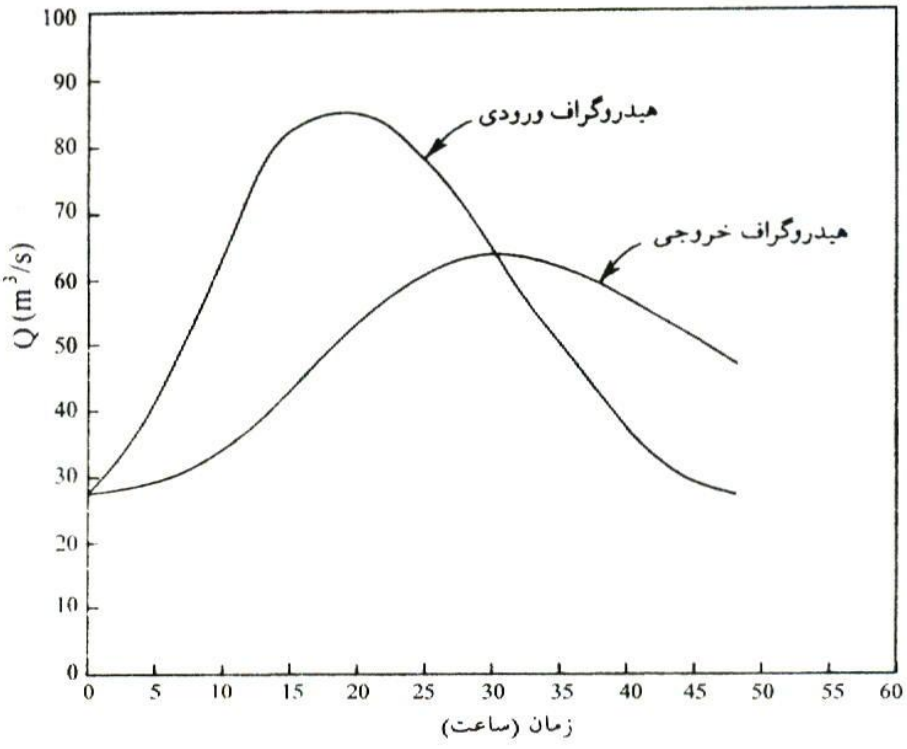
جدول ۱۳-۳ محاسبهٔ مقادیر دبی خروجی (مثال ۱۳-۱)

زمان t (hr)	Δt (hr)	دبی ورودی I ($m^۳/s$)	$\bar{I}=\frac{۱}{۲}(I_۱ + I_۲)$ ($m^۳/s$)	$N=\frac{V}{\Delta t} + \frac{O}{۲}$ ($m^۳/s$)	$\Delta N=\bar{I}-O_۱$ ($m^۳/s$)	O ($m^۳/s$)
۰		۲۸		۱۴		۲۸
	۳		۳۱		۳	
۳		۳۴		۱۷		۲۸٫۴۲
	۳		۳۹٫۵		۱۱٫۰۸	
۶		۴۵		۲۸٫۰۸		۳۰
	۳		۵۲٫۲۵		۲۲٫۲۵	
۹		۵۹٫۵		۵۰٫۳۳		۳۳٫۱
	۳		۶۷		۳۳٫۹	
۱۲		۷۴٫۵		۸۴٫۲۳		۳۷٫۸
	۳		۷۹		۴۰٫۲	
۱۵		۸۳٫۵		۱۲۴٫۴۳		۴۴٫۲
	۳		۸۴٫۷۵		۴۰٫۵۵	
۱۸		۸۶		۱۶۴٫۹۸		۵۰٫۵۶
	۳		۸۵٫۵		۳۴٫۹۴	
۲۱		۸۵		۱۹۹٫۹۲		۵۶
	۳		۸۲٫۵		۲۶٫۵	
۲۴		۸۰		۲۲۶٫۴۲		۶۰٫۴۴
	۳		۷۶٫۷۵		۱۶٫۳۱	
۲۷		۷۳٫۵		۲۴۲٫۷۳		۶۳٫۱۷
	۳		۶۹٫۲۵		۶٫۰۸	
۳۰		۶۵		۲۴۸٫۸۱		۶۴٫۲
	۳		۶۰٫۷۵		-۳٫۴۵	
۳۳		۵۶٫۵		۲۴۵٫۳۶		۶۳٫۶
	۳		۵۲٫۲۵		-۱۱٫۳۵	
۳۶		۴۸		۲۳۴٫۰۱		۶۱٫۷
	۳		۴۴٫۲۵		-۱۷٫۴۵	
۳۹		۴۰٫۵		۲۱۶٫۵۶		۵۸٫۰
	۳		۳۷٫۲۵		-۲۱٫۵۵	
۴۲		۳۴		۱۹۵٫۰۱		۵۵٫۱
	۳		۳۱٫۷۵		-۲۳٫۳۵	
۴۵		۲۹٫۵		۱۷۱٫۶۶		۵۱٫۳
	۳		۲۸٫۷۵		-۲۲٫۵۵	
۴۸		۲۸		۱۴۹٫۱۱		۴۷٫۸

Prozhefa.com



شکل ۱۳-۲ منحنی تغییرات N برحسب O (مثال ۱۳-۱)



شکل ۱۳-۳ هیدروگراف‌های ورودی و خروجی (مثال ۱۳-۱)

Prozhefa.com

با استفاده از جدول فوق، هیدروگراف‌های ورودی و خروجی مطابق شکل ۱۳-۳ رسم شده، ملاحظه می‌شود که نقطهٔ اوج هیدروگراف خروجی در محلی واقع می‌شود که دو هیدروگراف یکدیگر را قطع می‌نمایند. خواننده می‌تواند به راحتی مسأله را برای خود اثبات نماید.

۱۳-۲ روندیابی رودخانه (River Roating)

۱۳-۲-۱ روش ماسکینگام (Muskingum Method)

واضح است که حرکت سیلاب و در نتیجه روندیابی آن تابعی است از زبری کانال و مشخصات مخزن در منطقهٔ مورد مطالعه که در حالت روندیابی سیل از داخل مخزن می‌توان از تأثیر زبری صرفنظر نمود و تنها اثر مخزن را در نظر گرفت. چنین روشی که به «روندیابی مخزن» موسوم است و در آن فرض می‌گردد که تراز آب در تمام مخزن یکسان است می‌تواند هنوز برای روندیابی سیل در قسمتی از یک رودخانه که دارای سازهٔ کنترل‌کنندهٔ دبی خروجی نبوده و ضمن تأثیر قابل‌ملاحظه زبری، تراز آب نیز در ابتدا و انتهای منطقهٔ مورد مطالعه اختلاف محسوس‌تری دارد، مورد استفاده قرار گیرد، اما بدیهی است جوابهای به‌دست آمده از دقت کافی برخوردار نبوده بلکه تنها با تقریبی قابل قبول خواهند بود.

برای دقت بیشتر در این‌گونه مسایل از روشهای دیگری استفاده می‌گردد که از آن جمله است روشی که در سال ۳۵-۱۹۳۴ توسط Mc Carthy و به منظور تحقیقات روی بستر رودخانهٔ Muskingum در Ohio جهت کنترل سیل پیشنهاد و بدین‌منظور به روش ماسکینگام موسوم گردید.

بدیهی است که در این حالت نیز معادلهٔ پیوستگی صادق بوده و لذا برای یک فاصلهٔ زمانی محدود Δt می‌توان معادلهٔ مزبور را جهت دو انتهای منطقهٔ موردنظر از رودخانه به شکل زیر نوشت:

$$\frac{۱}{۲}(I_۱ + I_۲)\,\Delta t - \frac{۱}{۲}(O_۱ + O_۲)\,\Delta t = V_۲ - V_۱ \qquad (۶\text{-}۱۳)$$

حجم ذخیره منحصراً به‌وسیلهٔ دبی خروجی محاسبه نخواهد شد بلکه چنانچه دبی‌های ورودی و خروجی در محدودهٔ خاص مورد مطالعه به ترتیب تابع عمق بالادست و پایین‌دست باشند (شکل ۱۳-۴)، ذخیرهٔ کل بستگی به هر دو دبی ورودی و خروجی داشته و به دو قسمت ذخیره منشوری (Prism Storage) که تنها تابع دبی خروجی می‌باشد و ذخیرهٔ گوه‌ای (Wedge Storage) که به تفاضل دبی‌های ورودی و خروجی $(I - O)$ بستگی دارد تقسیم می‌گردد.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود چنانچه دبی‌های ورودی و خروجی مساوی باشند تنها ذخیرهٔ منشوری وجود داشته، از طرفی در صورتی‌که شدت جریان ورودی از شدت جریان خروجی بیشتر باشد، ارتفاع آب در ابتدای منطقه بیشتر از انتها بوده و ذخیرهٔ گوه‌ای مثبت به‌وجود خواهد آمد و چنانچه شدت جریان