

## بررسی انتشار امواج ناشی از شکست سد

دکتر یوسف حسن زاده

دانشکده فنی - دانشگاه تبریز

### ۱ - چکیده

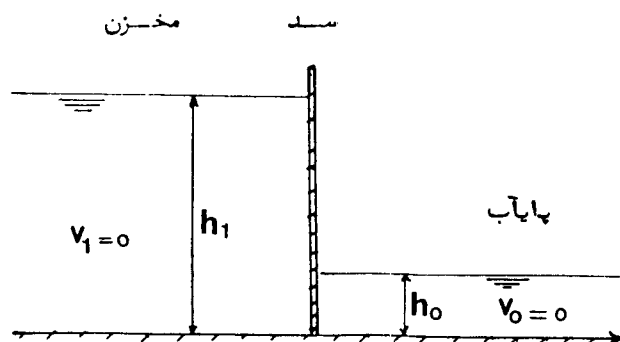
به منظور تعیین ارتفاع و سرعت انتشار امواج ناشی از شکست سد و پیش بینی تغییرات و محاسبه سرعت ودبی جریان سیال از معادله های پیوستگی و دینامیکی حاکم بر جریانهای متغیر گذرای بی افت انرژی درحالی که در پائین دست سد قشری از مایع ساکن وجود دارد استفاده شده است . با به کار بستن " روش مشخصه " و با انتخاب پارامترهای مناسب ، معادله های بی بعد برای محاسبه کمیت های هیدرولیکی نامبرده در بالا به دست آمده است . درستی نظریه به کار رفته به کمک داده های تجربی حاصل از یک مدل هیدرولیکی ارزیابی شده و نتایج حاصل به صورت نمودارهای بی بعد برای استفاده ارائه شده است .

### ۲ - مقدمه :

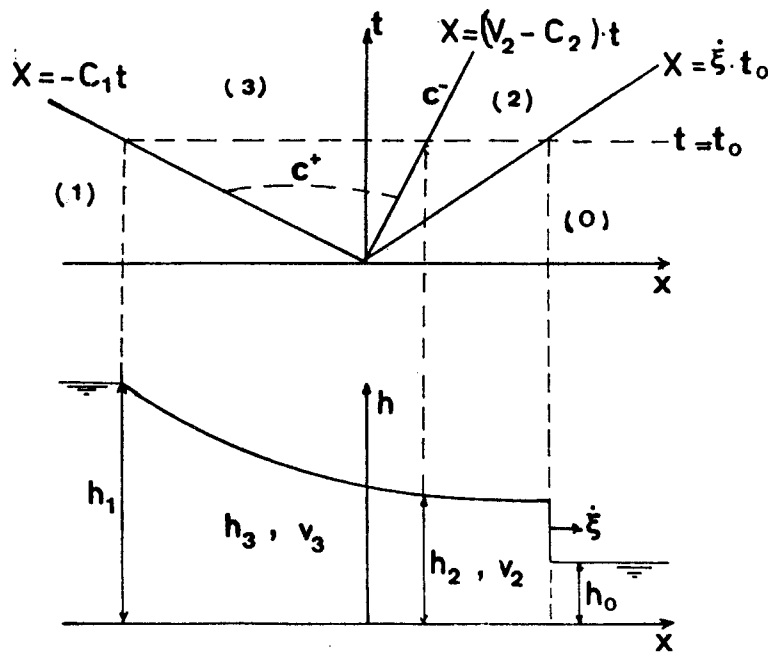
نسبت  $\frac{h_0}{h_1}$  می تواند بین صفر تا یک تغییر کند . با کاهش نسبت مذکور سرعت جریان مایع در پائین دست افزایش می یابد و در نتیجه ، عدد فرود ، مقادیر بزرگتری خواهد داشت . با شکست ناگهانی سد وضعیتی مشابه آنچه در شکل (۲) دیده می شود پیش می آید . پیشانی موج مثبت بلافاصله پس از شکست سد با سرعت  $C^+$  و با ارتفاع  $h_2$  به طرف پائین دست منتشر می شود و در هر لحظه مثل  $t=t_0$  می توان چهار ناحیه متفاوت را از هم تمیز داد . ناحیه (۰) تحت عنوان ناحیه آرام پائین دست نام دارد که در آن  $v_0=0$  و  $C_0=(gh_0)^{1/2}$  و به طرف بالا دست به پیشانی موج مثبت منتهی می شود . ناحیه (۲) ، ناحیه با مشخصات ثابت است که در آن آب ، حالت سکون ندارد بلکه با سرعت  $v_2$  و با عمق  $h_2$  جریان می یابد . ناحیه (۳) نواحی (۱) و (۲) با مشخصات ثابت رابه هم پیوند می دهد . ناحیه (۱) ناحیه آرام بالا دست نامیده می شود که در آن  $v_1=0$  ،  $C_1=(gh_1)^{1/2}$

جریان ناشی از شکست ناگهانی سد ، اغلب تلفات جانی و مالی فراوانی به همراه دارد . با وجود منظور داشتن ضرایب اطمینان کافی در طراحی سدهای بزرگ و اعمال دقت لازم در ساختمان آنها ، احتمال وقوع شکستگی ناشی از طغیان رودخانه ها ، پدیده رویا ، ضعف پی ، زلزله و یا بمباران وجود دارد . جریان گذرای ناشی از شکست سد با تغییرات سریع است و از طریق یک موج مثبت ( $C^+$ ) که در داخل کانال و یا رودخانه به طرف پائین دست پیشروی می کند و یک موج منفی ( $C^-$ ) که به طرف بالا دست آب ساکن مخزن ، عقب نشینی می کند مدل سازی می شود .

برای مطالعه چگونگی پیشروی موج به طرف پائین دست در آب ساکن یک کانال افقی با عمق اولیه ثابت ، از شرایط عدم پیوستگی جرم و مقدار حرکت در پیشانی موج استفاده می شود . عمق اولیه در پائین دست سد  $h_0$  و ارتفاع آب در بالا دست آن مطابق شکل (۱) مقدار ثابت  $h_1$  است و سرعت جریان در بالا دست و پائین دست نیز صفر منظور می شود . بنابراین ،



شکل (۱) - کروکی سد



شکل (۲) - وضعیت موج در شکست سد

۳- بررسی نظری

برای محاسبه کمیت‌های هیدرولیکی نظیر سرعت انتشار موج، عمق جریان و دبی در محل سد، با منظور داشتن راه‌حل استوکر [۱] و گذر موج از حالت (۰) به حالت (۲) شکل (۲)، از معادله‌های محافظه‌ای در پیشانی موج به شرح زیر استفاده می‌شود:

$$C_2/C_0 = [1/2 (\sqrt{1+8(\xi/C_0)^2} - 1)]^{1/2} \quad (۵)$$

و یا

$$\frac{h_2}{h_0} = \frac{1}{2} (\sqrt{1+8(\xi/C_0)^2} - 1) \quad (۶)$$

ارتفاع موج  $(h_2 - h_0)$  را نیز می‌توان به صورت تابعی از  $\frac{h_0}{h_1}$  نتیجه گرفت:

$$\frac{h_2 - h_0}{h_1} = \frac{h_0}{h_1} [ \frac{1}{2} \sqrt{1+8(\xi/C_0)^2} - \frac{3}{2} ] \quad (۷)$$

در شکل (۲)، شکست یک سد متصل به یک کانال افقی با منظور داشتن راه‌حل استوکر به طور کیفی نمایش داده شده است که در آن خط‌های ناچیده و منحنی خط چین به ترتیب خطوط مشخصه  $C^+$  و  $C^-$  را با به کار بردن معادله‌های مشخصه.

$$\xi(\xi - v_2) = \frac{1}{2} (C_0^2 + C_2^2) \quad (۱)$$

$$C_2^2(\xi - v_2) = C_0^2 \xi \quad (۲)$$

که در آن  $C_j^2 = gh_j$  عبارت از مجذور سرعت نسبی انتشار موج در آب به عمق  $h_j$  است، از تلفیق معادله‌های (۱) و (۲)، سرعت مطلق انتشار موج  $\xi$  و سرعت جریان مایع  $v_2$  در پشت پیشانی موج به صورت بی‌بعد به دست می‌آید:

$$\frac{\xi}{C_0} = \sqrt{1/2 \cdot \frac{h_2}{h_0} (1 + \frac{h_2}{h_0})} \quad (۳)$$

$$\frac{v_2}{C_0} = (1 - \frac{h_0}{h_2}) [ \frac{1}{2} \cdot \frac{h_2}{h_0} (1 + \frac{h_2}{h_0}) ]^{1/2} = (1 - \frac{h_0}{h_2}) \frac{\xi}{C_0} \quad (۴)$$

پس از حذف  $v_2$  از معادله‌های (۱) و (۲) داریم

$$(\frac{dx}{dt})_- = v - c, \quad (\frac{dx}{dt})_+ = v + c$$

این معادله به ازای  $h_2 = 3.214 h_0$  صادق است و جریان بحرانی در پشت پیشانی موج برقرار می‌شود. و به ازای  $h_2 > 3.214 h_0$  جریان ، فرابحرانی است و بالاخره به ازای  $h_2 < 3.214 h_0$  جریان فروبحرانی ایجاد می‌شود. در محل شکستگی سد ، مقدار دبی نسبت به زمان ثابت می‌ماند که به صورت بی‌بعد عبارت است از :

$$\frac{q}{C_1 h_1} = \frac{V_2 h_2}{C_1 h_1}$$

درحالی که جریان فرابحرانی در پشت پیشانی موج برقرار می‌شود  $q/C_1 h_1$  نسبت به  $h_0$  ثابت می‌ماند و مقدارش برابر با  $0.296$  خواهد شد. در شکل (۳) ، منحنیهای تغییرات  $\frac{V_2}{C_0}$  و  $\frac{C_2}{C_0} = 2\sqrt{h_2/h_0}$  ، با در دست داشتن به صورت تابعی از  $\xi$  ترسیم شده است. می‌توان خواه با استفاده از نمودار مقدار  $\frac{C_1^2}{C_0^2} = \frac{h_1}{h_0}$  شکل (۳) و یا معادله (۱۲) مقدار  $\xi$  را به دست آورد. آنجا مقادیر مربوط به  $h_2$  و  $\frac{V_2}{C_0}$  از نمودار شکل (۳) و یا به ترتیب از معادله‌های (۶) و (۴) به دست می‌آید. و بالاخره با استفاده از معادله (۷) ، ارتفاع موج ، قابل محاسبه است. بدین ترتیب کمیت‌های ثابت ناحیه (۲) پشت پیشانی موج تعیین می‌شود.

برای محاسبه پروفیل سطح آب در ناحیه (۳) واقع بین پشت پیشانی موج تا ناحیه آرام (۱) ، می‌توان خواه از روش مشخصه و یا روش عناصر محدود یا هر دو روش استفاده کرد. در امتداد هر یک از خطوط مشخصه مستقیم ناحیه (۳) که بیانگر انتشار امواج منفی  $C^-$  با سرعت مطلق  $\frac{dx}{dt} = V-C$  است می‌توان نوشت :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x}{t} = V-C \quad (15)$$

معادله اخیر با در نظر گرفتن رابطه (۸) به صورت زیر در می‌آید.

$$\frac{x}{t} = 2C_1 - 3C = \frac{3}{2} V - C_1 \quad (16)$$

از آنجا نتیجه می‌شود :

$$\frac{C}{C_1} = \frac{1}{3} \left( 2 - \frac{x}{t C_1} \right) \quad (17)$$

برای امواج منفی و مثبت بیان می‌کنند. خط‌های مشخصه و مستقیم که ناحیه (۳) را در سمت چپ محدود می‌کنند معادله مشخصه ای به صورت  $x = -C_1 t$  دارند درحالی که ناحیه (۳) در سمت راست با خط مشخصه مستقیم  $x = (V_2 - C_2) \cdot t$  محدود می‌شود.

بر روی هر یک از خط‌های مشخصه  $C^-$  ، کمیت  $(V-2C)$  و بر روی منحنیهای مشخصه  $C^+$  ، کمیت  $(V+2C)$  همواره ثابت می‌ماند. با استفاده از منحنیهای مشخصه  $C^+$  می‌توان ناحیه (۲) را با ناحیه (۱) ارتباط داد. بنابراین از یکسو با منظور داشتن  $V_1 = 0$  داریم

$$V+2C=2C_1 \quad (18)$$

و از سوی دیگر می‌توان نوشت

$$V+2C=V_2+2C_2 \quad (9)$$

از تساوی روابط (۸) و (۹) نتیجه زیر حاصل می‌شود

$$V_2+2C_2=2C_1 \quad (10)$$

رابطه بالا به صورت بی‌بعد عبارت است از :

$$\frac{V_2}{C_0} + 2 \frac{C_2}{C_0} = 2 \frac{C_1}{C_0} \quad (11)$$

بنابراین با توجه به روابط (۴) و (۵) ، معادله اخیر به صورت زیر در می‌آید :

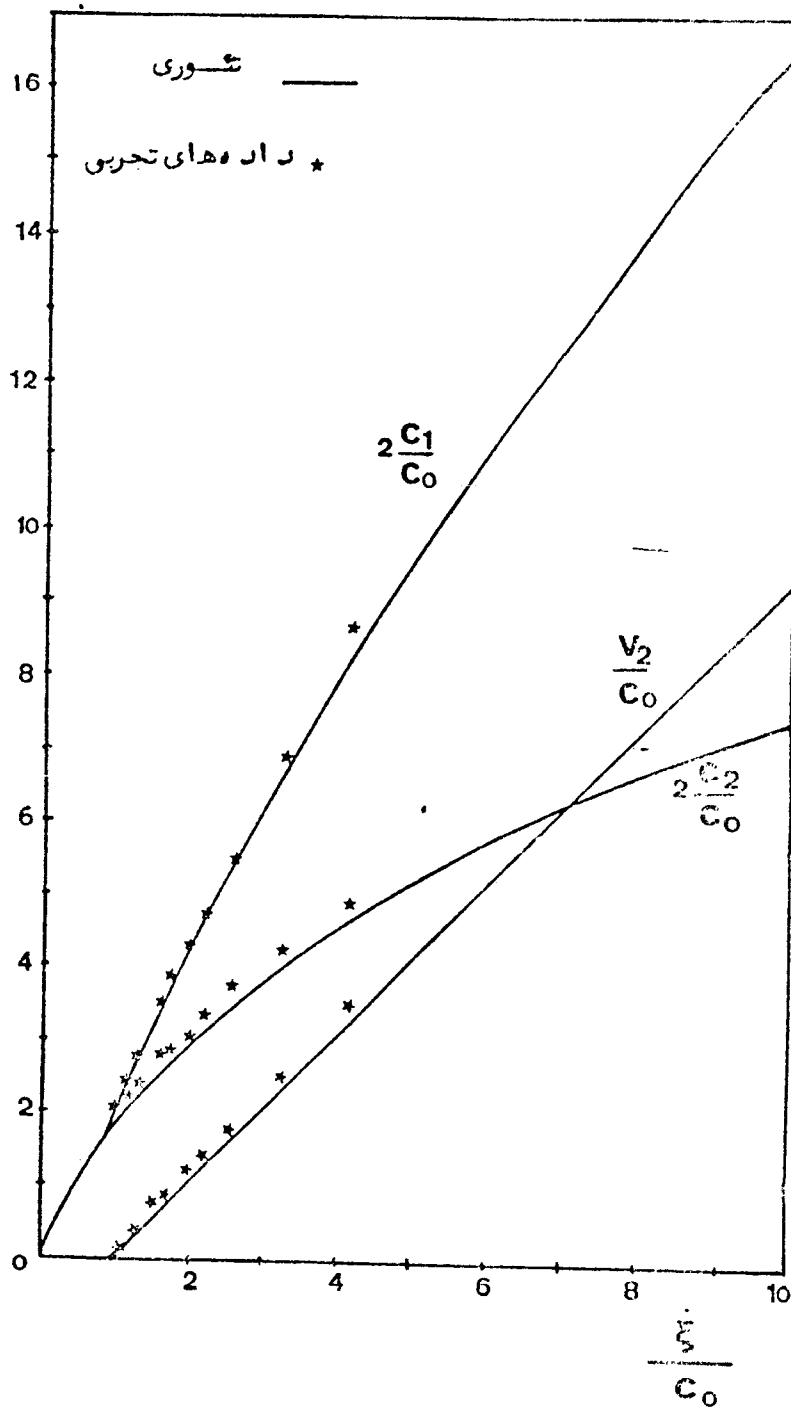
$$\frac{\xi}{C_0} = \frac{C_0}{4\xi} \left[ 1 + \sqrt{1 + 8 \left( \frac{\xi}{C_0} \right)^2} \right] + \sqrt{2} \left[ -1 + \sqrt{1 + 8 \left( \frac{\xi}{C_0} \right)^2} \right]^{1/2} = 2 \sqrt{\frac{h_1}{h_0}} \quad (12)$$

معادله (۱۲) ، به ازای  $\frac{C_1}{C_0} = \sqrt{h_1/h_0}$  بزرگتر از واحد ، دارای ریشه حقیقی مثبت است. شرط بحرانی بودن جریان در پشت پیشانی موج رانیز می‌توان با منظور داشتن  $V_2 = C_2 = \sqrt{gh_2}$  به شرح زیر به دست آورد :

$$\left( 1 - \frac{h_0}{h_2} \right) \sqrt{\frac{gh_2}{2} \left( 1 + \frac{h_2}{h_0} \right)} = \sqrt{gh_2} \quad (13)$$

معادله اخیر پس از خلاصه کردن به صورت بی‌بعد چنین می‌شود

$$\left( \frac{h_2}{h_0} \right)^3 - 3 \left( \frac{h_2}{h_0} \right)^2 - \frac{h_2}{h_0} + 1 = 0 \quad (14)$$



شکل (۳) - راه حل ترسیمی سرعت انتشار پیشانی موج

از  $\frac{h_0}{h_1}$  ترسیم شده است. به ازای  $\frac{h_0}{h_1} = 0$  پیشانی موج قائم بریستر مجرا نیست بلکه در پائین دست بریستر ماسر و با سرعت  $2c_1$  به طرف پائین دست پیشروی می کند وقتی نسبت  $\frac{h_0}{h_1}$  به مقدار نهایی خود یعنی واحد میل کند ارتفاع موج به طرف صفر گرایش می یابد. بنابراین ارتفاع موج باید دارای یک مقدار حداکثر به ازای مقدار معین  $\frac{h_0}{h_1}$  شود. محاسبات نشان می دهد که به ازای مقدار ارتفاع موج، حداکثر به  $\frac{h_0}{h_1} = 0,176$  می رسد.

$$\frac{h_2 - h_0}{h_1} = 0,32$$

$$\frac{h}{h_1} = \frac{1}{9} \left( 2 - \frac{x}{tC_1} \right)^2 \quad (18)$$

رابطه سرعت جریان مایع نیز در ناحیه (۳) به شرح زیر به دست می آید:

$$\frac{v}{C_1} = \frac{2}{3} \left( 1 + \frac{x}{tC_1} \right) \quad (19)$$

از معادله های بالا چنین نتیجه می شود که پروفیل سطح آزاد آب در ناحیه (۳) سهمی شکل است و در محل های اتصال به نواحی (۱) و (۲) پروفیل نامبرده حالت مساس برافق ندارد بلکه سطح آزاد آب در این نقاط حالت ناپیوسته به خود می گیرد. با مراجعه به شکل (۲) مشاهده می شود که در محل شکستگی سدی یعنی به ازای  $x=0$ ، کمیت های ارتفاع، سرعت و بنابراین دبی، مقادیر ثابت خواهند داشت و مستقل از زمان می شوند یعنی داریم.

$$(20)$$

$$\frac{h}{h_1} = \frac{4}{9} \quad \frac{v}{C_1} = \frac{C}{C_1} = \frac{2}{3} \quad \frac{q}{C_1 h_1} = \frac{v \cdot h}{C_1 h_1} = \frac{8}{27}$$

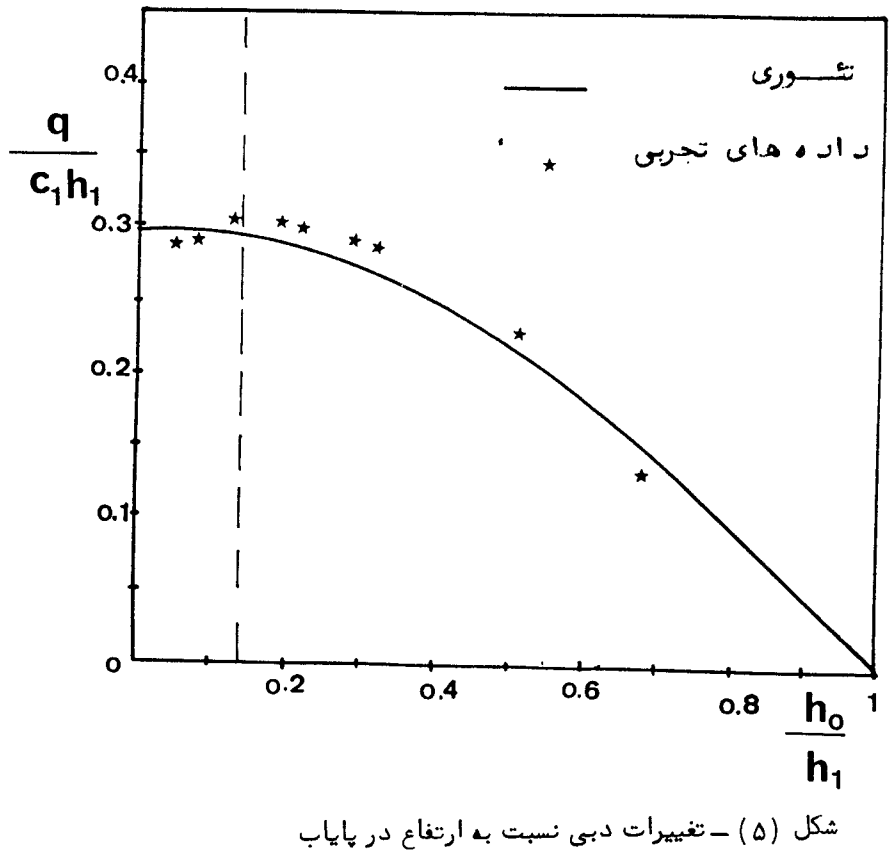
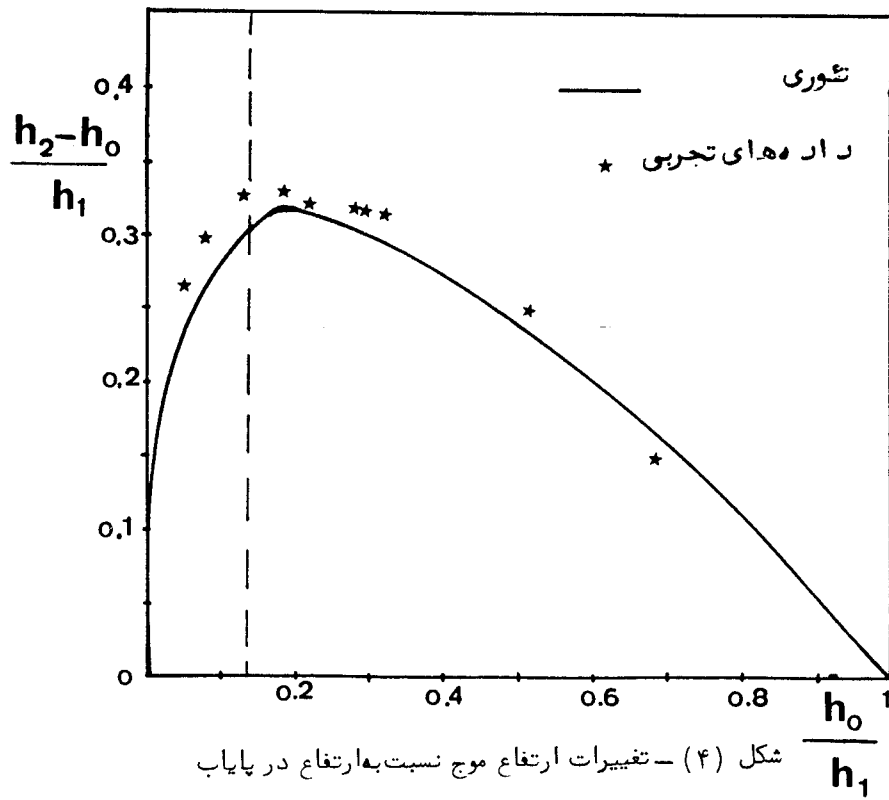
بنابراین چنین استنباط می شود که در محل شکستگی سد ( $x=0$ )، جریان حالت بحرانی پیدا می کند و مقادیر سرعت متوسط جریان  $v$  و سرعت نسبی انتشار موج  $C$  در این مقطع با هم برابرند و داریم  $v=C = \frac{2}{3} C_1$  در حالی که به ازای  $x>0$  یعنی در پایاب، جریان، فزاینده است.  $v > C$ ، و در نتیجه اغتشاشات پائین دست نمی توانند به طرف بالا دست منتشر شوند و به ازای  $x < 0$  یعنی در سرآب نیز جریان فرو بحرانی،  $v < C$  برقرار می شود. وقتی  $\frac{h_0}{h_1}$  بیشتر از مقدار بحرانی شود، سرعت جریان مایع کمتر از مقدار سرعت انتشار موج در این مقطع می شود.

در شکل (۵)، تغییرات دبی در واحد عرض کانال  $\frac{v_2 h_2}{C_1 h_1}$  به صورت تابعی از  $\frac{h_0}{h_1}$  نمایش داده شده است. به طوری که از روی شکل پیدا است  $\frac{h_0}{h_1} = 0,138$  ثابت  $\frac{q}{C_1 h_1} = 0,296$  را خواهد داشت. وقتی که  $\frac{h_0}{h_1}$  به طرف واحد میل کند مقدار دبی نیز تدریجاً کاهش می یابد و برابر صفر می شود. در شکل (۴)، منحنی تغییرات ارتفاع موج  $\frac{h_2 - h_0}{h_1}$  به صورت تابعی

#### ۴ - بررسی تجربی

به منظور اندازه گیری ارتفاع و سرعت انتشار پیشانی موج و چگونگی تغییرات آنها نسبت به زمان و مکان و ارزیابی نظریه یاد شده، آزمایشهای شکست ناگهانی یک سد در یک مدل هیدرولیکی انجام شده است. این مدل از یک کانال مستطیلی افقی به طول ۲۴ متر، به عرض ۰/۹۱ متر و به ارتفاع ۱/۰۸ متر تشکیل شده است. در وسط کانال، یک سد قائم تعبیه شده که برداشتن سریع آن موجب رها شدن توده مایع موجود در مخزن می شود. سنجش کمیت های هیدرولیکی به وسیله دستگاه ثبات چرچیل کنترل که ۷ کانال اندازه گیری دارد انجام و تغییرات ارتفاع موج نسبت به زمان به طور همزمان در ۷ ایستگاه اندازه گیری ثبت شده است. یکی از ایستگاههای ثابت در سرآب سد ( $x=0$ ) و ۶ عدد دیگر در پایاب و در فواصل ۲، ۳، ۵، ۶، ۸، ۹ متری از محل استقرار نصب شده است. با ثبت و اندازه گیری مدت زمانی که پیشانی موج برای پیمودن فواصل بین ایستگاههای اندازه گیری صرف کرده عملاً می توان سرعت انتشار پیشانی موج را محاسبه کرد. تجربه نشان می دهد که در حین پیشروی پیشانی موج به طرف پائین دست، شکل، سرعت و ارتفاع آن به ازای مقدار معین  $\frac{h_0}{h_1}$ ، همواره ثابت می ماند لیکن با افزایش نسبت  $\frac{h_0}{h_1}$  مقدار سرعت انتشار پیشانی موج کاهش می یابد و برعکس، با کاهش این نسبت سرعت افزایش می یابد و حداکثر سرعت برای حالتی است که  $\frac{h_0}{h_1} = 0$  و به عبارت دیگر پایاب سد خشک باشد. آزمایشهای مختلف بر روی بستر صاف و زهر نشان می دهد که سرعت پیشروی پیشانی موج در بستر صاف بیشتر از بسترهای زیر است. به عنوان مثال در مدل مورد بحث که ضریب مانینگ در آن  $n = 0,015$  است.

نتایج اندازه گیریها نشان می دهد که



به شکل (۳) می‌توان کمیت‌های  $\frac{v_2}{c_0}$  و  $2\frac{c_2}{c_0}$  را به‌طور هم‌زمان خواند و بالاخره با در دست داشتن  $\frac{h_0}{h_1}$  و با استفاده از اشکال (۴) و (۵) مقدار ارتفاع موج ودبسی در واحد عرضی مجرا را به دست آورد.

هـ- پروفیل سطح آزاد آب را می‌توان به صورت تابعی از زمان،  $t$ ، و فاصله از محل شکستگی سد،  $x$ ، با استفاده از معادله (۱۸) محاسبه و ترسیم کرد.

### ۵- نتیجه

از مجموعه بررسی‌های نظری و داده‌های تجربی چنین نتیجه می‌شود که انطباق داده‌های تجربی با روش‌های تحلیلی در حد مطلوب است و در عمل می‌توان از روابط نظری ارائه شده برای محاسبه و پیش‌بینی دبسی، ارتفاع و سرعت انتشار امواج مثبت بایپاشانی قائم در کانال‌های مستطیلی افقی و برای حالتی که در پایاب سد آب ساکن وجود داشته باشد استفاده کرد. تجربه نشان می‌دهد که با ثابت ماندن ارتفاع آب در پشت سد، سرعت پیشروی موج در کانال‌هایی که مایع ساکن در پایاب سد وجود دارد کمتر از حالتی است که پایاب سد خشک است و عملاً " با افزایش ارتفاع آب در پایاب سد، سرعت انتشار موج نیز کاهش می‌یابد.

به ازای  $\frac{h_0}{h_1} = 0$  داریم  $\xi = 1/988 \text{ m/s}$

به ازای  $\frac{h_0}{h_1} = 0/133$  داریم  $\xi = 1/613 \text{ m/s}$

به ازای  $\frac{h_0}{h_1} = 0/5$  داریم  $\xi = 1/572 \text{ m/s}$

در شکلهای (۳) و (۴) و (۵) روابط نظری با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که همخوانی نتایج تجربی با مدل ریاضی ارائه شده در حد مطلوب است. به طور کلی به منظور تبیین مطالب با توجه به آنچه بیان شد برای محاسبه کمیت‌های هیدرولیکی می‌توان به ترتیب زیر عمل کرد:

الف- با در دست داشتن نسبت  $h_1/h_0$  مقدار  $2\sqrt{h_1/h_0} = 2c_1/c_0$  محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از شکل (۳) و با معادله (۱۲) می‌توان مقدار  $\frac{\xi}{c_0}$  را به دست آورد. با منظور داشتن  $c_0 = \sqrt{gh_0}$ ، مقدار  $\xi$  محاسبه می‌شود.

ب- با در دست داشتن  $\xi/c_0$  می‌توان خواه با استفاده از شکل (۳) مقدار  $2\frac{c_2}{c_0}$  و سپس  $h_2/h_0$  را از رابطه  $\frac{2c_2}{c_0} = 2\sqrt{\frac{h_2}{h_0}}$  محاسبه کرد. و یا به کمک معادله (۶)، نسبت کمیت اخیر را به دست آورد.

پ- با در دست داشتن  $\xi/c_0$ ، می‌توان مقدار  $v_2$  را از شکل (۳) خواند و یا به کمک کمیت‌های  $\frac{h_2}{h_0}$  و  $\frac{\xi}{c_0}$  محاسبه شده در مراحل پیشین، مقدار  $v_2/c_0$  را از رابطه (۴) نتیجه گرفت.

ت- با در دست داشتن  $\frac{h_0}{h_1}$ ، می‌توان با مراجعه به شکل (۴)، مقدار ارتفاع موج  $\frac{h_2-h_0}{h_1}$  را خواند و یا با در دست داشتن کمیت‌های تعیین شده ارتفاع موج را از معادله (۷) محاسبه کرد.

ج- با در دست داشتن  $\frac{h_0}{h_1}$  و با استفاده از شکل (۵)، می‌توان مقدار دبسی در واحد عرضی مجرا را به صورت بی‌بعد در محل شکست سد خواند و یا به کمک کمیت‌های  $v_2$  و  $h_2$  محاسبه شده در مرحله‌های پیشین مقدار  $\frac{q}{c_1 h_1} = \frac{v_2 h_2}{c_1 h_1}$  را محاسبه کرد. به‌طور کلی با در دست داشتن  $\frac{h_1}{h_0}$  و با مراجعه

## فهرست منابع :

## References

- 1- Stoker, J.J., Water Waves. Interscience publishers, 1957
- 2- Chen, c and Armbruster, J.J., Dam-Break, wave Model: Formulation and verification, Journal of the Hydrsulics Division Asce, Vol. 106, 1980
- 3- Chervet, A. and Dalleves, P., Calcul de l'onde de submersion consecutive a la rupture d'un barrage, schweizerische Bauzeitung, Vol. 88, 1980
- 4- Whitham, G.E., The Effects of Hydraulic Resistanca in the Dam-Break problem, Proceedings, Royal society of london, series A, Vol, 227, 1955
- 5- Chow, v, Open channel Hydraulics, Mc Graw-Hill book comp.

۶ - دکتر یوسف حسنزاده - مهندس علی اصغر زرین تن -  
"خطرات مربوط به شکستگی سدها" تهریز ۱۳۶۰ انتشارات  
ذوقی

۷ - دکتر یوسف حسنزاده - "بررسی جریانهای سیلابی  
ناشی از شکستگی احتمالی سدها" اولین سمینار سدسازی ایران  
- تهران - دانشگاه شهید بهشتی - ۱۳۶۶