

# مطالعه روندیابی سیل در مخازن سدهای پاره‌سنگی متوالی با توسعه مدل دوبعدی هیدرولیکی برای جریانهای عبوری درون‌گذر و روگذر

جمال محمد ولی سامانی<sup>۱\*</sup>، مهرخ مکتیان<sup>۲</sup>، مجید حیدری<sup>۳</sup>

۱- استاد سازه‌های آبی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا

\* تهران، صندوق پستی ۳۳۶-۱۴۱۱۵

samani\_j@modares.ac.ir

**چکیده-** احداث سدهای پاره‌سنگی با به‌کارگیری مصالح ارزان و فناوری ساده، راه‌حلی مؤثر و اقتصادی برای مهار سیلاب است. به علت متلاطم بودن جریان در محیط سنگدانه‌ای بدنه این سدها، قانون داری معتبر نبوده و برای تحلیل جریان در چنین حالتی باید از روابط معرفی شده در این زمینه استفاده کرد. در این شرایط رفتار هیدرولیکی سدهای متوالی پاره‌سنگی پیچیده‌تر می‌شود، به نحوی که در هنگام وقوع سیل، علاوه بر آنکه تراوشی با جریان متلاطم از محیط متخلخل صورت گرفته، عبور جریان از مخازن سدهای متوالی نیز انجام می‌شود. اولین سد پاره‌سنگی ممکن است شرایط هیدرولیکی روگذر را نیز تجربه کند که این رفتار هیدرولیکی را باز هم پیچیده‌تر می‌سازد. این شرایط در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است. با تعریف هیدروگراف ورودی و مشخصات سنگ مورد استفاده به‌عنوان ورودی مدل، هیدروگراف روندیابی شده قابل محاسبه است. در این تحقیق با استفاده از مدل دوبعدی جریان در حالت درون‌گذر و روگذر برای سد اول و با محاسبه پروفیل سطح آب روگذر از رابطه جریان متغیر مکانی و درون‌گذر برای سدهای بعدی و نیز با استفاده از روش هیدرولوژیکی در روندیابی مخزن، با حل همزمان معادلات دیفرانسیل حاکم بر بدنه سدها و مخازن مربوط و با در دست داشتن هیدروگراف ورودی سیل، هیدروگراف سیل خروجی آخرین سد به‌دست می‌آید و سپس به‌منظور بررسی دقت و صحت مدل ریاضی به‌کار رفته و تأیید جواب‌ها، نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد که تطابق خوبی بین نتایج مدل و نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد. همچنین نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر نشان داد که قطر متوسط سنگدانه‌ها در مقایسه با پارامترهای دیگری مانند طول پی سدها و زاویه شیروانی آنها، بیشترین تأثیر را در کاهش حداکثر سیلاب و افزایش زمان رسیدن به این حداکثر در هیدروگراف خروجی از سدهای متوالی دارد.

**کلید واژگان:** مهار سیلاب، مخازن متوالی سدهای پاره‌سنگی، جریان درون‌گذر، جریان متلاطم، قانون داری.

## ۱- مقدمه

در کنار منافع متعدد حاصل از رودخانه‌ها، وقوع سیلاب‌های مهیب تهدیدی جدی برای تأسیسات ایجاد شده در رودخانه‌ها محسوب می‌شود. از این رو برای جلوگیری از خسارتهای ناشی از چنین سیلاب‌هایی باید با استفاده از روش‌های مناسب و تمهیدات و تأسیسات خاص، اثرهای مخرب سیلاب را کاهش داد. بنابر آنچه گفته شد می‌توان به اهمیت و ضرورت مهار سیلاب پی‌برد. مهار سیلاب شامل فرایندهای خاصی است که با تدابیر خاص و بهره‌برداری از سازه‌های طراحی شده، اثرهای تخریبی سیل را کاهش می‌دهد یا حذف می‌کند (قدسیان، ۱۳۷۷).

روش‌های مختلفی برای مدیریت سیلاب به کار می‌رود که به دو دسته روش‌های سازه‌ای و روش‌های غیرسازه‌ای طبقه‌بندی می‌شوند. در میان این روش‌ها استفاده از مخازن تأخیری پاره‌سنگی روشی شناخته شده است که هدف از آن، ذخیره‌سازی قسمتی از جریان سیلاب به منظور کاهش دبی حداکثر و افزایش زمان تداوم آن است. بدین ترتیب خطرهای ناشی از سیل در پایین دست سد کاهش می‌یابد (سامانی، ۱۳۷۶). این سدها دارای تخلخل بسیار زیاد، انعطاف‌پذیری خوب، عمر طولانی، مقاومت کافی در برابر نیروها و عوامل طبیعی و جوی بوده و ساختمان بسیار ساده‌ای دارند و لذا قابلیت اعتماد بالایی دارند (Kells, 1995). بنابراین احداث سدهای پاره‌سنگی با به‌کارگیری مصالح ارزان و فناوری ساده، راه‌حلی مؤثر و اقتصادی در مهار سیلاب است (حیدری، ۱۳۸۶).

بر اساس تحقیقات انجام شده در زمینه هیدرولیک جریان در محیط متخلخل، جریان آرام در این محیط با قانون داریسی توصیف می‌شود. بر طبق این قانون رابطه‌ای خطی بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک وجود دارد. با

آشفته شدن جریان، رابطه داریسی اعتبار خود را از دست می‌دهد. برای تبیین رفتار هیدرولیکی جریان در محیط‌های متخلخل سنگدانه‌ای محققانی مانند Ward (1964)، Geertsma (1974) و Forchheimer (1901) با در نظر گرفتن حالت آشفته برای جریان در چنین محیط‌هایی موضوع را مورد تحقیق قرار داده‌اند.

به طور کلی هیدرولیک جریان آشفته در محیط متخلخل به دو دسته کلی تقسیم می‌شود: ۱- معادلات بین گرادیان هیدرولیکی ( $i$ ) و سرعت جریان ( $V$ ) و ۲- معادلات بین ضریب اصطکاک ( $f$ ) و عدد رینولدز ( $Re$ ). معادلات ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت شامل معادله دو جمله‌ای یا معادله فرشه‌ایمر و نیز معادله نمایی ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان می‌باشد. معادلات ارتباط بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز نیز در برگیرنده شکل کسری و شکل نمایی ارتباط بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز می‌باشند که عبارتند از (Li et al., 1998):

$$\begin{cases} I: i = \alpha V + \beta V^2 \\ II: i = \alpha' V \beta' \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I: f = \frac{a}{Re} + b \\ II: f = a' R_e^{b'} \end{cases} \quad (2)$$

ضرایب  $\alpha, \beta, \alpha', \beta', a, b, a', b'$  ضرایب ثابت معادلات و توابعی از مشخصات محیط متخلخل و سیال هستند. در این زمینه محققان بسیاری مانند Stephenson (1979)، Wilkins (1956)، Felton, Herrera (1991) و Li et al. (1998) بر روی این دو معادله تحقیق کرده و ضرایب ثابت معادلات را به دست آورده‌اند. سامانی و همکاران (۲۰۰۳) طی تحقیقی ضرایب معادله فرم نمایی ارتباط بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز را در دو حالت یک

ارائه شده بود (رابطه ۳)، روندیابی سیل در سدهای پاره‌سنگی متوالی را در حالتی که جریان به صورت درون‌گذر از سدها عبور می‌کند مطالعه کردند (Samani & Heydari, 2007). در این مقاله روندیابی سیل در سدهای پاره‌سنگی متوالی در حالت درون‌گذر و روگذر با استفاده از روابط دوبعدی جریان بررسی شده است.

## ۲- مبانی نظری

از آنجا که هدف تحقیق حاضر روندیابی سیل در مخازن سدهای متوالی پاره‌سنگی است، لذا ضروری است دو مبحث مورد مطالعه قرار گیرند: مطالعه معادله جریان در محیط‌های متخلخل سنگدانه‌ای و روابط دبی-اشل عبوری از درون و روی سد پاره‌سنگی و بررسی روندیابی سیل در مخازن متوالی.

### ۲-۱- استخراج معادله دبی-اشل جریان دو بعدی

حیدری (۱۳۸۶) با استفاده از گسسته‌سازی معادله دوبعدی پیوستگی، از روش حجم‌های محدود و رابطه دو بعدی بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک که سامانی و همکاران ارائه کرده بودند (رابطه ۴)، رابطه جریان را به صورت دو بعدی در درون و روی سدهای پاره‌سنگی مطالعه کرد. در تحقیقی که وی انجام داد، جریان متغیر مکانی با جریان تراوشی دوبعدی ترکیب شد و حل معادله دوبعدی جریان تراوشی به روش حجم‌های محدود انجام شد. مشخصات جریان روگذر از روی تاج سد پاره‌سنگی که جریان متغیر مکانی در امتداد تاج تلقی می‌شود، به عنوان بخشی از شرایط مرزی در حل معادله دوبعدی جریان تراوشی استفاده شد. در این بخش به طور مختصر به نحوه به دست آوردن معادله جریان دوبعدی و روابط دبی-اشل در درون و روی سدهای پاره‌سنگی پرداخته می‌شود.

بعدی و دو بعدی به ترتیب به صورت زیر به دست آورده‌اند (Samani et al., 2003):

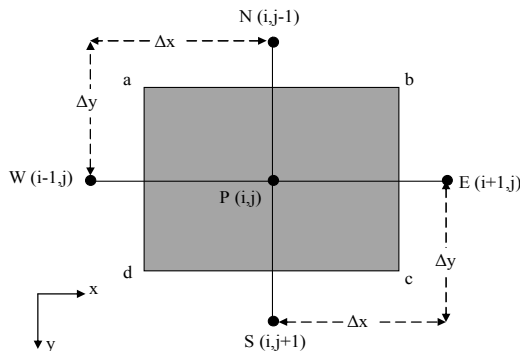
$$f = 54 R_e^{-0.077} \quad (3)$$

$$f = 80 R_e^{-0.034} \quad (4)$$

به استناد روابط معرفی شده برای تحلیل جریانهای آشفته در محیط‌های پاره‌سنگی و همچنین ضرایب حاصل از آزمایشهای مختلف، محققان بسیاری مانند (Kells, 1995), Hosseini (1997), Chanson (2006) و سامانی و همکاران (۲۰۰۳) به تحلیل جریان در درون و بر روی سدها و بندهای پاره‌سنگی پرداختند.

با توجه به نقشی که سد پاره‌سنگی در کاهش حداکثر سیلاب و افزایش زمان رسیدن به این حداکثر از طریق ایجاد افت در جریان عبوری از آن دارد، می‌توان نتیجه گرفت که با در نظر گرفتن چند سد پاره‌سنگی متوالی در مسیر رودخانه، با عبور جریان از داخل و روی هر سد به مخزن سد بعدی، ضمن آنکه دبی حداکثر هیدروگراف سیل به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد، زمان رسیدن به حداکثر جدید نیز طولانی‌تر خواهد شد. با توجه به شرایط خاص هیدرولیکی حاکم بر محیط متخلخل درشت‌دانه، طراحی هیدرولیکی این سدها با هدف مهار سیلاب، شرایط ویژه‌ای را می‌طلبد. در این شرایط، رفتار هیدرولیکی سدهای متوالی پاره‌سنگی پیچیده‌تر می‌شود، به نحوی که در هنگام وقوع سیل، علاوه بر آنکه شاهد تراوشی با جریان متلاطم از محیط متخلخل هستیم، شاهد عبور جریان از مخازن سدهای متوالی نیز می‌باشیم که این مخازن اثر متقابل بر تراز سطح آب در مخزن سد بالادست خود داشته و در عین حال، شرایط جریان غیردائم نیز بر آنها حاکم است. سامانی و حیدری در سال ۲۰۰۷ با در نظر گرفتن رابطه یک‌بعدی معادله ارتباط بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز که توسط سامانی و همکاران

$$H_{(i,j)} = \frac{(A_E H_{(i+1,j)} + A_W H_{(i-1,j)} + A_S H_{(i,j+1)} + A_N H_{(i,j-1)})}{A''} \quad (10)$$



شکل ۱ طراحی پنج نقطه در گسسته‌سازی معادله جریان دوبعدی

برای استخراج رابطه دبی-اشل جریان دو بعدی سد پاره‌سنگی، نخست معادله جریان دوبعدی در داخل محیط سنگدانه‌ای استخراج می‌شود. با در نظر گرفتن حجم کنترل و نوشتن معادله پیوستگی در حالت دوبعدی برای این حجم داریم:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

که در آن  $V_x$  و  $V_y$  به ترتیب سرعت جریان در راستاهای  $x, y$  است. معادله (۵) برای تحلیل جریان دوبعدی در محیط‌های اشباع و غیراشباع در حالت جریان دائمی به کار می‌رود و برای حل آن به استفاده از روش‌های عددی و شرایط اولیه و مرزی نیاز است.

در رابطه (۵) می‌توان سرعت را به شکل رابطه نمایی سرعت و گرادیان هیدرولیکی بیان کرد (Li et al, 1998):

$$\begin{cases} V_x = \alpha'' i_x^{\beta''} \\ V_y = \alpha'' i_y^{\beta''} \end{cases} \quad (6)$$

ضرایب این معادله با توجه به رابطه (II-1) به صورت زیر است:

$$\alpha'' = \left(\frac{1}{\alpha'}\right)^{1/\beta'}, \quad \beta'' = \frac{1}{\beta'} \quad (7)$$

در رابطه (۶) گرادیان هیدرولیکی در دو بعد  $x$  و  $y$  بر حسب پتانسیل هیدرولیکی ( $H$ ) به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$\begin{cases} i_x = -\frac{\partial H}{\partial x} \\ i_y = -\frac{\partial H}{\partial y} \end{cases} \quad (8)$$

اکنون با گسسته‌سازی معادله (۵) به روش حجم‌های محدود و طراحی پنج نقطه در درون و اطراف حجم کنترل مطابق شکل ۱ داریم:

$$H_N = H_{(i,j-1)}, H_W = H_{(i-1,j)}, H_S = H_{(i,j+1)}, H_E = H_{(i+1,j)}, H_P = H_{(i,j)} \quad (9)$$

از این رو رابطه پتانسیل هیدرولیکی برای هر گره در حالت جریان دوبعدی ماندگار به صورت ذیل در می‌آید:

$$\begin{cases} A_E = \alpha'' \frac{\Delta y}{\Delta x} \left(\frac{H_{(i,j)} - H_{(i+1,j)}}{\Delta x}\right)^{\beta''-1} \\ A_S = \alpha'' \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{H_{(i,j)} - H_{(i,j+1)}}{\Delta y}\right)^{\beta''-1} \\ A_W = \alpha'' \frac{\Delta y}{\Delta x} \left(\frac{H_{(i-1,j)} - H_{(i,j)}}{\Delta x}\right)^{\beta''-1} \\ A_N = \alpha'' \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{H_{(i,j-1)} - H_{(i,j)}}{\Delta y}\right)^{\beta''-1} \\ A'' = A_E + A_W + A_S + A_N \end{cases} \quad (11)$$

در این روابط ضرایب  $\alpha''$  و  $\beta''$  را می‌توان بر حسب  $a'$  و  $b'$  در رابطه II-۲ به صورت زیر به دست آورد:

$$Re = \frac{VD}{\nu n} \quad (12)$$

$$i = \frac{f}{2Dn} \frac{V^2}{g} \quad (13)$$

در این روابط:  $D_{50}$  متوسط قطر سنگدانه‌ها،  $n$  تخلخل،  $g$  شتاب گرانش،  $\nu$  لزجت سیال می‌باشد.

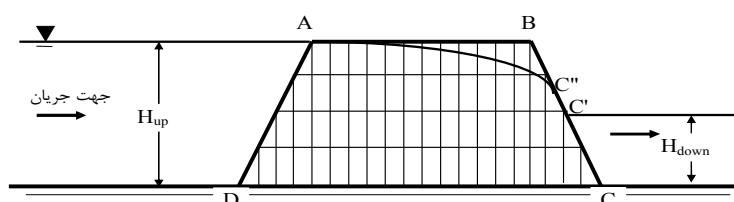
با استفاده از روابط ۱۲ و II-۲ و جایگزینی در رابطه ۱۳،  $\alpha''$  و  $\beta''$  به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\alpha'' = \left(\frac{2\nu^{b'} n^{b'+1} g}{a' D^{b'-1}}\right)^{\frac{1}{b'+2}}, \quad \beta'' = \frac{1}{b'+2} \quad (14)$$

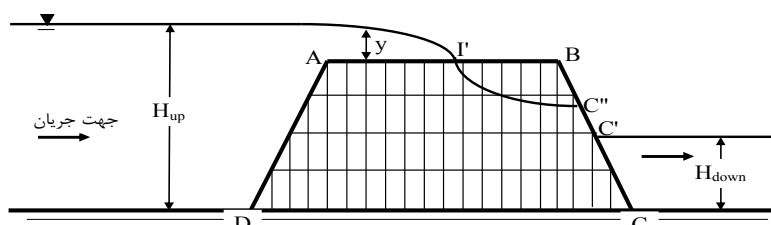
می‌گذارند. در این حالت جریان روگذر به علت تبادل دبی بین جریان درون‌گذر و جریان روگذر، از نوع جریان متغیر مکانی است. حالت جریان درون‌گذر- روگذر، خود به سه شکل ممکن است رخ دهد:

- جریان روگذر که کل تاج را در بر نگرفته (شکل ۳)
- جریان روگذر که کل تاج و بخشی از وجه پایین‌دست سد را در بر گرفته و به پایاب متصل است (شکل ۴)
- جریان روگذر که کل تاج و بخشی از وجه پایین‌دست سد را در بر گرفته اما عمق آن در محل اتصال به پایاب صفر نیست و سد کاملاً مستغرق است (شکل ۵).

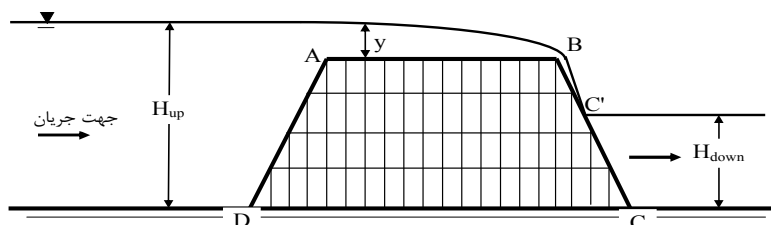
با در نظر گرفتن شرایط مرزی به‌منظور حل این معادله، شرایط جریان برای حالات جریان سرریزی و درون‌گذر از سد پاره‌سنگی به‌دست خواهد آمد. بدین منظور دو حالت را باید بررسی کرد. حالت اول هنگامی است که حداکثر تراز سطح آب در مخزن سد با تراز تاج برابر است. در این حالت فقط شاهد جریان درون‌گذر از بدنه سد هستیم (شکل ۲). حالت دوم هنگامی است که تراز سطح آب در مخزن از تراز تاج سد نیز بالاتر می‌رود. در این حالت جریانهای روگذر و درون‌گذر به‌صورت توأم حضور داشته و بر یکدیگر اثر



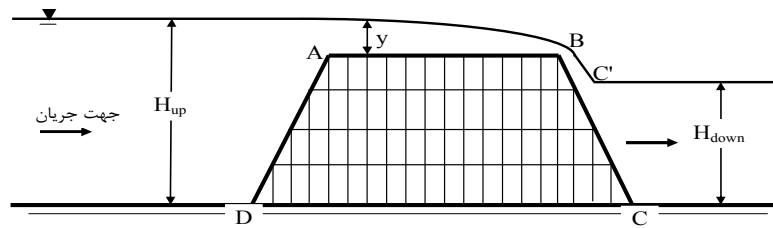
شکل ۲ حالت جریان درون‌گذر



شکل ۳ حالت جریان روگذر که جریان روگذر کل تاج را در بر نگرفته است



شکل ۴ حالت جریان درون‌گذر- روگذر که جریان روگذر کل تاج را در بر گرفته اما عمق آن در محل اتصال به پایاب برابر صفر است



شکل ۵ حالت جریان درون‌گذر-روگذر که جریان روگذر کل تاج را در بر گرفته اما عمق آن در محل اتصال به پایاب برابر صفر نیست

گره برابر پتانسیل ثقلی است. در حالتی که جریان کل تاج را دربرنگرفته (شکل ۳) برای قسمت  $IB$  پتانسیل هیدرولیکی مشابه شرایط مرز  $AB$  و برای مرز  $BC'$  نیز مشابه مرز  $BC'$  در حالت جریان درون‌گذر بوده و برای قسمت  $AI$  با توجه به اینکه نوعی جریان متغیر مکانی ایجاد شده، اگر در هر گره، عمق جریان روگذر  $y$  و پتانسیل ثقلی آن گره  $Z$  باشد، آنگاه پتانسیل کل در آن گره از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$H = y + Z \quad (15)$$

پروفیل سطح آب بر روی تاج از رابطه جریان متغیر مکانی به شکل زیر محاسبه می‌شود (حیدری، ۱۳۸۶):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f - \left( \frac{\alpha Q}{gA^2} \right) \left( \frac{dQ}{dx} \right)}{1 - \left( \frac{\alpha Q^2 T}{gA^3} \right)} \quad (16)$$

که در آن:  $\frac{dy}{dx}$  نشان‌دهنده تغییرات ارتفاع آب بر روی تاج سد در بازه  $dx$ ،  $\frac{dQ}{dx}$  نشان‌دهنده دبی تبدیلی با تاج سد در بازه  $dx$ ،  $Q$  شدت جریان کلی،  $S_0$  شیب کف کانال،  $S_f$  شیب خط انرژی،  $A'$  سطح مقطع جریان،  $T$  عرض فوقانی جریان،  $\alpha$  ضریب تصحیح انرژی می‌باشد. برای حالت‌های جریان در شکل‌های ۴ و ۵ پتانسیل هیدرولیکی گره‌های مرز  $AB$  نیز از رابطه (۱۵) به دست می‌آید. در حالت جریان که در شکل ۴ آورده شده در مرز  $BC'$  نیز یک جریان متغیر مکانی شکل گرفته و

در شکل‌های ۱ تا ۵:  $H_{up}$  تراز سطح آب در بالادست،  $H_{down}$  تراز سطح آب در پائین‌دست،  $y$  ارتفاع آب بر روی تاج سد،  $A$  مرز بالادست تاج سد،  $B$  مرز پایین‌دست تاج سد،  $C'$  مرز تماس آب در پایین‌دست با بدنه سد،  $C''$  مرز ریزش آب در وجه پایین‌دست سد،  $C$  مرز تماس وجه پایین‌دست سد با کف کانال،  $D$  مرز تماس وجه بالادست سد با کف کانال،  $I'$  فرورفتن آب در تاج سد می‌باشد.

برای بررسی شرایط جریان در حالت دوبعدی، ناحیه حل را شبکه‌بندی کرده و هر گره  $P$  و چهار گره اطراف (گره‌های  $N, S, W, E$ ) را مطابق شکل ۱ در نظر گرفته و شرایط مرزی را برای هر گره با توجه به مکان قرارگیری آن تشریح کرده و پتانسیل هیدرولیکی آن از رابطه (۱۰) به دست می‌آید. شرایط مرزی برای مرزهای  $AD$ ،  $CD$  و  $C'C$  در تمامی حالت‌های جریان یکسان است. در مرز  $AD$  و  $C'C$  پتانسیل تمامی گره‌های واقع بر این مرزها به ترتیب برابر تراز آب بالادست و پایین‌دست بوده و مرز  $CD$  نیز، مرز نفوذ ناپذیر در نظر گرفته می‌شود.

اما در مرزهای  $AB$  و  $BC'$  شرایط مرزی متفاوت است. در حالت درون‌گذر هیچ جریانی بر روی مرزهای  $AB$  و  $BC''$  برقرار نیست و مرز  $C''C'$  سطح تراوش است که فشار هر گره برابر فشار اتمسفر بوده و پتانسیل کل هر

وضعیت برای مخازن دیگر نیز وجود دارد و هیدروگراف خارج شده از مخزن آخرین سد نسبت به هیدروگراف سیل ورودی به مخزن سد اول فروکش کرده و لذا سیل با هیدروگرافی مطمئن عبور می‌کند، به طوری که خطرهای ناشی از سیل تا حد زیادی کاهش خواهد یافت. در این حالت ورودی مخزن سد اول همان هیدروگراف سیل است. خروجی بدنه سد اول، ورودی مخزن سد دوم بوده و خروجی بدنه سد دوم ورودی مخزن سد سوم است. در شکل ۶ دو سد پاره‌سنگی متوالی در نظر گرفته شده و تغییرات جریان و هیدروگراف جریان در عبور از این دو سد نشان داده شده است.

لازم است ذکر شود که این حالت به بیش از دو سد نیز قابل تعمیم است. در شکل ۶  $H^1$  تراز سطح آب در بالادست سد اول،  $H^2$  تراز سطح آب در بالادست سد دوم،  $H^3$  تراز سطح آب در پایین دست سد دوم،  $I^1$  دبی ورودی مخزن سد اول،  $O^1$  دبی خروجی مخزن سد اول،  $I^2$  دبی ورودی مخزن سد دوم،  $O^2$  دبی خروجی مخزن سد دوم،  $I^3$  دبی خروجی سد دوم می‌باشد.

البته باید در نظر داشت که امکان اینکه جریان عبوری از هر یک از سدها به صورت درون‌گذر، درون‌گذر-روگذر و یا حتی مستغرق باشد، نیز وجود دارد. در این تحقیق با در نظر گرفتن دو سد متوالی، دو حالت جریان بررسی شده است. در حالت اول جریان عبوری از هر دو سد درون‌گذر صورت می‌گیرد و برای هر دو سد از رابطه دوبعدی دبی - اشل درون‌گذر استفاده می‌شود. در حالت دوم جریان عبوری از سد اول بصورت درون‌گذر-روگذر و در سد دوم به صورت درون‌گذر رخ می‌دهد که در این حالت برای سد اول از رابطه دوبعدی دبی - اشل جریان درون‌گذر-روگذر و برای سد دوم رابطه دوبعدی دبی - اشل درون‌گذر استفاده می‌شود.

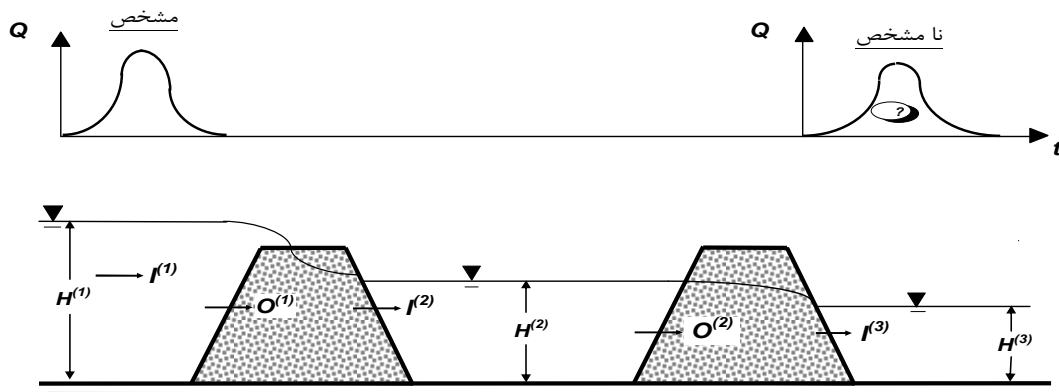
پتانسیل گره‌ها از رابطه (۱۵) به دست می‌آید در حالی که برای حالت استغراق کامل سد (شکل ۵) پتانسیل تمامی گره‌های واقع بر مرز  $BC'$  برابر با تراز آب پایین دست است. لازم به ذکر است که در حالت های ۴ و ۵ ممکن است پرش هیدرولیکی در ابتدای سطح صورت گیرد که از تاثیر آن بر پروفیل سطح آب روگذر بالادست صرف نظر شده است. در این دو حالت نیز برای محاسبه پتانسیل هیدرولیکی در گره‌های واقع بر تاج سد از رابطه (۱۶) استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن شرایط مرزی در هر یک از دو حالت جریان درون‌گذر و درون‌گذر-روگذر و با فرض آنکه مشخصات مصالح مورد استفاده در سازه سد، مشخصات هندسی سازه و منحنی دبی - اشل پایاب سد معلوم باشد، معادله (۱۰) برای هر گره حل شده و برای مقادیر مشخص تراز سطح آب در بالادست، دبی و تراز سطح آب در پایین دست محاسبه می‌شود. با در دست داشتن این مقادیر، معادله دبی - اشل سد پاره‌سنگی، در حالت جریان درون‌گذر و همچنین در حالت درون‌گذر-روگذر به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Q = f(H_{up}, H_{down}) \quad (17)$$

در این رابطه  $H_{up}$  و  $H_{down}$  تراز سطح آب در بالادست و پایین دست سازه سد و  $Q$  دبی جریان است.

## ۲-۲- روندیابی سیل

تعدادی سد پاره‌سنگی نفوذپذیر متوالی در مسیر جریان در نظر گرفته می‌شود. در هنگام وقوع سیل بخشی از حجم سیلاب ایجاد شده در مخزن سد اول ذخیره شده و بخش دیگر آن به تدریج به مخزن سد دوم تخلیه می‌شود. پس از مدتی بخشی که در مخزن سد اول ذخیره شده به مخزن سد دوم تخلیه می‌شود که در این زمان، تخلیه از مخزن سد دوم و هم چنین ذخیره‌سازی در آن وجود دارد. این



شکل ۶ تغییرات هیدروگراف سیل در عبور از دو سد پاره سنگی متوالی

$$\frac{I_{i+1}^{(K)} + I_i^{(K)}}{2} \Delta t - \frac{O_{i+1}^{(K)} + O_i^{(K)}}{2} \Delta t = S_{i+1}^{(K)} - S_i^{(K)} \quad (20)$$

نکاتی که در به دست آوردن معادلات روندیابی حاکم بر سدهای متوالی پاره سنگی باید مورد توجه قرار گیرند عبارتند از:

- جریان خروجی مخزن هر سد برابر با جریان ورودی مخزن سد بعدی است:

$$O_i^{(K)} = I_i^{(K+1)} \quad (21)$$

- جریان خروجی مخزن هر سد برابر با جریان ورودی مخزن سد بعدی و برابر با دبی عبوری از این سد است، لذا مقدار  $O$  در هر مخزن برابر با رابطه دبی-اشل سد پایین دستی آن (رابطه ۱۷) است:

$$O_i^{(K)} = f(H_i^{(K)}, H_i^{(K+1)}) \quad (22)$$

- رابطه حجم ذخیره نیز با توجه به توپوگرافی هر مخزن و تراز سطح آب در آن مخزن تعریف می شود:

$$S_i^{(K)} = g(H_i^{(K)}) \quad (23)$$

- معادله دبی-اشل در رودخانه پایین دست نیز به صورت تابعی از ارتفاع آب در پایین دست سد آخر تعریف می شود (رابطه ۲۴).

$$O_{i+1}^{(P)} = I_{i+1}^{(P+1)} = f'(H_{i+1}^{(P+1)}) \quad (24)$$

### ۳- جزئیات مدل

به منظور استخراج روابط روندیابی به علت اینکه سرعت جریان در پشت مخزن سد کم است، از روش روندیابی ذخیره‌های سیل در مخزن می توان استفاده کرد. اساس این روش بر معادله پیوستگی بین دبی ورودی، دبی خروجی و تغییرات حجم مخزن استوار است که به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{dS}{dt} = I - O \quad (18)$$

در این معادله  $I$  جریان ورودی مخزن هر سد،  $O$  جریان خروجی مخزن هر سد،  $S$  حجم مخزن هر سد است. در این تحقیق برای حل این معادله از روش عددی تفاضل‌های محدود استفاده شده و با توجه به این روش رابطه پیوستگی برای هر فاصله زمانی  $\Delta t$  به صورت زیر است:

$$\frac{I_{i+1} + I_i}{2} \Delta t - \frac{O_{i+1} + O_i}{2} \Delta t = S_{i+1} - S_i \quad (19)$$

در این معادله  $i$  نشان دهنده گام زمانی قبلی و  $i+1$  گام زمانی بعدی است. برای استخراج روابط مدل ریاضی رابطه پیوستگی روندیابی در مخزن هر سد با استفاده از رابطه (۱۹) به شکل زیر نوشته می شود ( $K$  شماره مخزن بالادست هر سد است):



این دستگاه معادلات در گام‌های زمانی مورد نظر قابل حل است. پس از به‌دست آمدن مقادیر تراز سطح آب در هر گام زمانی، مقادیر دبی خروجی هر سد قابل محاسبه بوده و سپس با ترسیم دبی خروجی سد آخر با گذشت زمان، هیدروگراف خروجی به‌دست می‌آید. قابل ذکر است که برای ساده‌سازی مدل، دستگاه معادلات به‌دست آمده، با فرض اینکه شرایط برای هر گام زمانی  $\Delta t$  ماندگار در نظر گرفته شده، حل می‌شود. در این تحقیق به‌منظور حل دستگاه معادلات به‌دست آمده، برنامه‌ای کامپیوتری نوشته شد که به روش حداقل مربع، دستگاه معادلات به‌دست آمده را حل کرده و هیدروگراف خروجی را به‌دست می‌آورد.

### ۵- داده‌های آزمایشگاهی

برای بررسی و ارزیابی دقت و صحت مدل ریاضی، یک مدل فیزیکی ساخته شد و به جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی اقدام گردید. این آزمایشها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر و عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر، با مصالح و فواصل مختلف در آزمایشگاه هیدرولیک گروه سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. مشخصات آزمایشها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات آزمایشها

شماره آزمایش	تعداد سدهای متوالی	قطر متوسط سنگدانه‌ها (cm)	ارتفاع سد (cm)	زاویه شیروانی (deg)	طول قاعده (cm)	فاصله سدها (cm)
۱	۲	۲/۱	۲۴/۵	۴۵	۱۰۰	۱۳۰
۲	۲	۲/۱	۲۴/۵	۴۵	۱۰۰	۸۰
۳	۲	۱/۴۵	۲۴/۵	۴۵	۱۰۰	۱۳۰
۴	۲	۱/۴۵	۲۴/۵	۴۵	۱۰۰	۸۰

با استفاده از این روابط، یک دستگاه معادلات غیرخطی برای  $P$  سد متوالی با تعداد  $P + 1$  معادله به‌شکل زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{cases} \frac{I_{i+1}^{(1)} + I_i^{(1)}}{2} \Delta t - \frac{O_{i+1}^{(1)} + O_i^{(1)}}{2} \Delta t = S_{i+1}^{(1)} - S_i^{(1)} \\ \frac{O_{i+1}^{(1)} + O_i^{(1)}}{2} \Delta t - \frac{O_{i+1}^{(2)} + O_i^{(2)}}{2} \Delta t = S_{i+1}^{(2)} - S_i^{(2)} \\ \frac{O_{i+1}^{(2)} + O_i^{(2)}}{2} \Delta t - \frac{O_{i+1}^{(3)} + O_i^{(3)}}{2} \Delta t = S_{i+1}^{(3)} - S_i^{(3)} \\ \vdots \\ \frac{O_{i+1}^{(P-1)} + O_i^{(P-1)}}{2} \Delta t - \frac{O_{i+1}^{(P)} + O_i^{(P)}}{2} \Delta t = S_{i+1}^{(P)} - S_i^{(P)} \\ I_{i+1}^{P+1} = f(H_{i+1}^{(P+1)}) = O_{i+1}^P \end{cases} \quad (25)$$

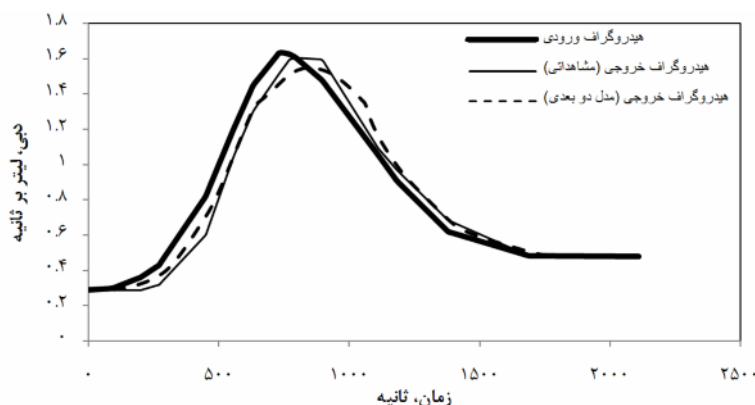
با جایگذاری روابط دوبرعده‌ی دبی-اشل هر سد و روابط حجم ذخیره هر مخزن در دستگاه معادلات روندیابی ذخیره‌ای به‌دست آمده، دیده می‌شود که برای  $P$  سد،  $P + 1$  اشل داریم ( $P$  تا برای مخازن و یک اشل برای کانال پایین‌دست)، بنابراین تعداد مجهولات برابر  $P + 1$  بوده که عبارتند از:  $H_{i+1}^{(1)}$  و  $H_{i+1}^{(2)}$  و  $H_{i+1}^{(3)}$  و ... و  $H_{i+1}^{(P+1)}$  و همچنین  $P + 1$  معادله نیز در دست است. اکنون با استفاده از یکی از روش‌های عددی و با تعیین یک گام زمانی مناسب ( $\Delta t$ ) و با در دست داشتن مقادیر  $I$  با توجه به هیدروگراف ورودی،  $O$  با توجه به روابط دبی-اشل هر سد و همچنین رابطه‌ی حجم ذخیره-اشل هر سد،

گونه‌ای باشد که جریان، کل تاج سد اول را در بر نگیرد. برای افزایش دقت، هر آزمایش چهار بار تکرار شد. برای تعیین هیدروگراف خروجی، با استفاده از ترازهای قرائت شده و منحنی دبی-اشل، دبی خروجی آخرین سد در هر زمان قابل استخراج بوده و در برابر زمان ترسیم شد. لازم است ذکر شود که داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده به صورت غیرماندگار است در حالی که برای ساده‌سازی، مدل برای هر گام زمانی  $\Delta t$  دستگاه معادلات را به شکل ماندگار حل می‌کند.

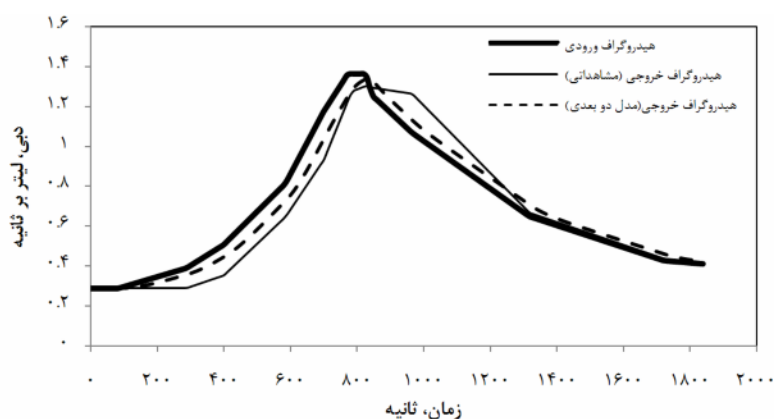
### ۶- بررسی دقت مدل

به منظور بررسی دقت مدل ریاضی نتایج حاصل از اجرای مدل، این نتایج باید با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شود. شکل‌های ۸ تا ۱۱ نتایج حاصل از دو مدل ریاضی و فیزیکی را در حالت جریان درون‌گذر (ارتفاع آب در پشت سد اول کمتر از ارتفاع سد) و شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ نتایج هیدروگراف‌های درون‌گذر-روگذر (ارتفاع آب در پشت سد اول بیشتر از ارتفاع سد) را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها هیدروگراف ورودی سد اول و هیدروگراف خروجی آخرین سد در دو حالت آزمایشگاهی و عددی نشان داده شده است.

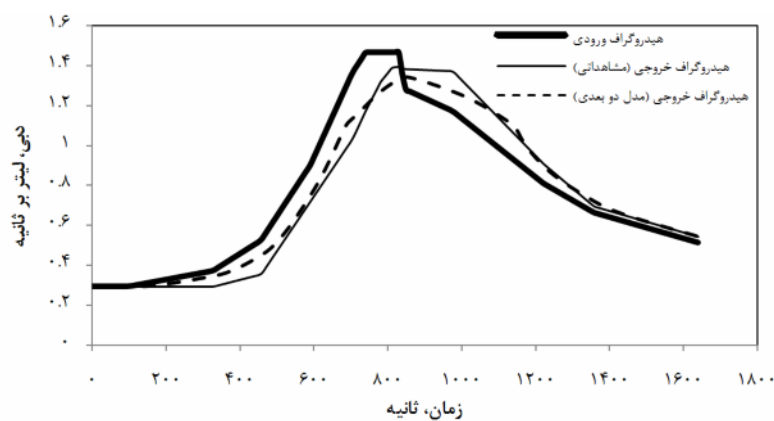
در چهار حالت ذکر شده در جدول بالا به جز قطر متوسط سنگدانه‌ها و همچنین فاصله بین دو سد، شرایط دیگر حاکم بر آزمایشها یکسان در نظر گرفته شده است. یکی از مواردی که نخست باید در آزمایشها اندازه‌گیری شود، تعیین رابطه دبی-اشل پایاب است. بدین منظور دبی با استفاده از دبی‌سنج مغناطیسی و اشل توسط عمق‌سنجی با دقت کافی اندازه‌گیری شد. سپس هیدروگراف ورودی با استفاده از شیر پمپ وارد و توسط دبی‌سنج مغناطیسی محاسبه شد. به منظور تعیین هیدروگراف خروجی از قرائت تراز سطح آب پایاب و تبدیل آنها به دبی با استفاده از رابطه دبی-اشل پایاب استفاده شد. برای برداشت تراز سطح آب پایاب، پیزومتري در پایین‌دست سد دوم در کانال نصب شد و به علت ماهیت غیر دائمی بودن سیل، با استفاده از دوربین فیلم‌برداری در مدت آزمایش، زمان و ترازهای سطح آب ثبت شد. دو دسته هیدروگراف یکی به صورت درون‌گذر و دیگری به صورت درون‌گذر-روگذر در کانال برقرار شد. در هر یک از آزمایشها برای برقراری شرایط جریان درون‌گذر، هیدروگراف ورودی به گونه‌ای اعمال شد که ارتفاع آب در حالت عبور دبی پیک در بالادست سد اول کمتر از ارتفاع سد باشد و همچنین در شرایط درون‌گذر-روگذر ارتفاع آب در حالت عبور دبی حداکثر بیشتر از ارتفاع سد بوده و نیز به



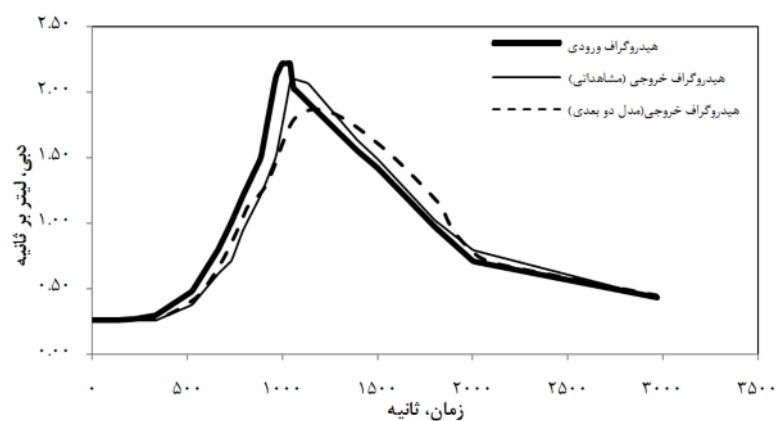
شکل ۸ مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج مدل کامپیوتری در روندیابی سیل درون‌گذر در آزمایش ۱ (قطر سنگدانه برابر ۲/۱ سانتی‌متر و فاصله سدها برابر ۱۳۰ سانتی‌متر)



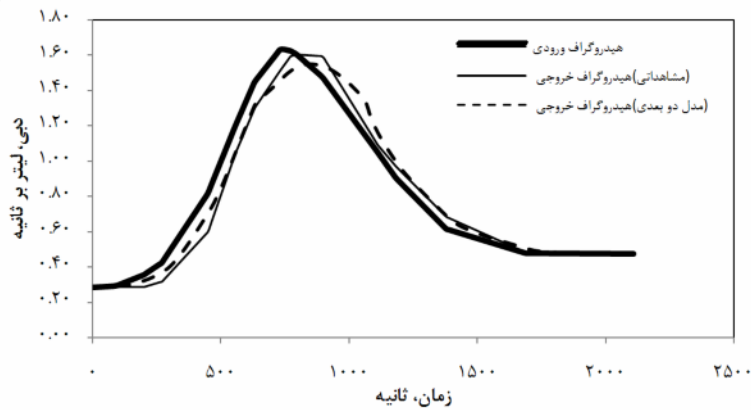
شکل ۹ مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج مدل کامپیوتری در روندیابی سیل درون‌گذر در آزمایش ۲ (قطر سنگدانه برابر ۲/۱ سانتی‌متر و فاصله سدها برابر ۸۰ سانتی‌متر)



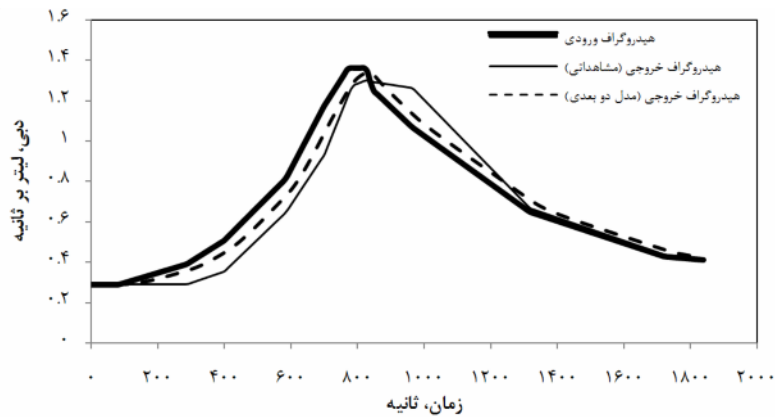
شکل ۱۰ مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج مدل کامپیوتری در روندیابی سیل درون‌گذر در آزمایش ۳ (قطر سنگدانه برابر ۱/۴۵ سانتی‌متر و فاصله سدها برابر ۱۳۰ سانتی‌متر)



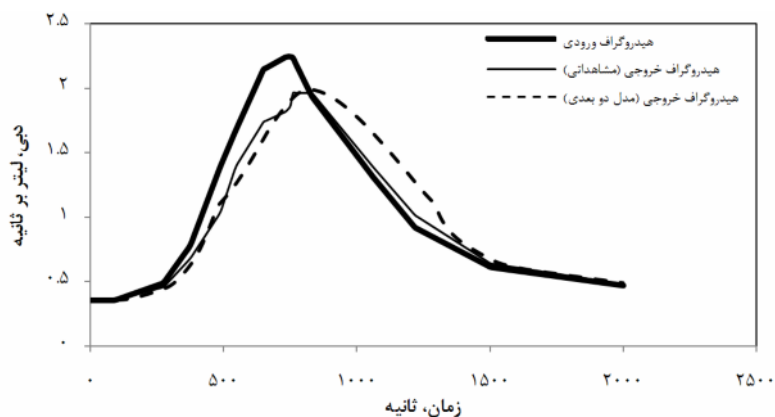
شکل ۱۱ مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج مدل کامپیوتری در روندیابی سیل درون‌گذر در آزمایش ۴ (قطر سنگدانه برابر ۱/۴۵ سانتی‌متر و فاصله سدها برابر ۸۰ سانتی‌متر)



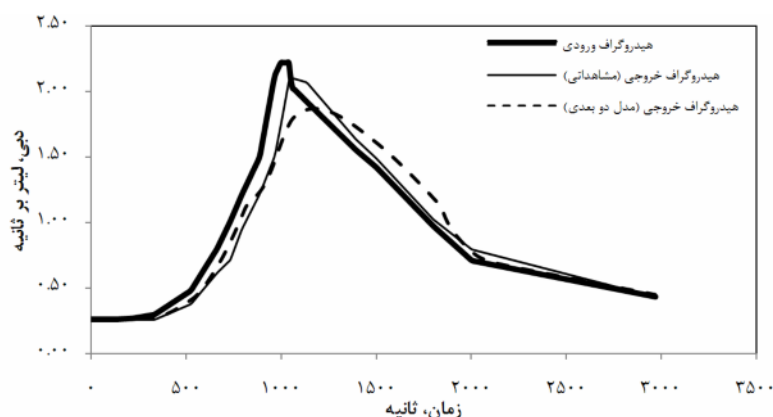
شکل ۱۲ مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج مدل کامپیوتری در روندیابی سیل درون‌گذر- روگذر در آزمایش ۱ (قطر سنگدانه برابر ۲/۱ سانتی‌متر و فاصله سدها برابر ۱۳۰ سانتی‌متر)



شکل ۱۳ مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج مدل کامپیوتری در روندیابی سیل درون‌گذر- روگذر در آزمایش ۲ (قطر سنگدانه برابر ۲/۱ سانتی‌متر و فاصله سدها برابر ۸۰ سانتی‌متر)



شکل ۱۴ مقایسه بین مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج مدل کامپیوتری در روندیابی سیل درون‌گذر-روگذر در آزمایش ۳ (قطر سنگدانه برابر ۱/۴۵ سانتی‌متر و فاصله سدها برابر ۱۳۰ سانتی‌متر)



شکل ۱۵ مقایسه بین مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج مدل کامپیوتری در روندیابی سیل درون‌گذر-روگذر در آزمایش ۴ (قطر سنگدانه برابر ۱/۴۵ سانتی‌متر و فاصله سدها برابر ۸۰ سانتی‌متر)

$$RMSE = \left( \frac{1}{n \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \right)^{1/2} \quad (27)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (28)$$

جدول‌های ۲ و ۳ نتایج حاصل از مقایسه مدل ریاضی را با داده‌های آزمایشگاهی در دو حالت هیدروگراف‌های درون‌گذر و هیدروگراف‌های درون‌گذر-روگذر، نشان می‌دهد. در این جدول‌ها ضریب همبستگی ( $R^2$ )، مقدار متوسط خطای نسبی ( $ARE$ )، خطای مربع میانگین ( $RMSE$ ) و راندمان مدل ( $ME$ ) (معادلات ۲۶ تا ۲۸) بین مقادیر دبی به‌دست آمده از مدل و مشاهدات آزمایشگاهی آورده شده است.

جدول ۳ مقایسه نتایج حاصل از اجرای مدل دوبعدی در روندیابی سیل در حالت درون‌گذر-روگذر با مشاهدات آزمایشگاهی

شماره آزمایشها	$R^2\%$	$ARE\%$	$RMSE\%$	$ME\%$
۱	۹۹/۱۴	۳/۷۴	۳/۶۳	۹۳/۴۴
۲	۹۷/۷۶	۷/۳۹	۴/۲۷	۹۸/۲۰
۳	۹۶/۴۰	۶/۵۴	۴/۲۹	۹۴/۸۹
۴	۹۷/۱۹	۵/۷۳	۵/۳۳	۹۵/۶۴

جدول ۲ مقایسه نتایج حاصل از اجرای مدل دوبعدی در روندیابی سیل در حالت درون‌گذر با مشاهدات آزمایشگاهی

شماره آزمایشها	$R^2\%$	$ARE\%$	$RMSE\%$	$ME\%$
۱	۹۹/۱۴	۳/۷۴	۱۱/۳۷	۹۹/۰۴
۲	۹۷/۷۶	۷/۳۹	۹/۶۳	۹۷/۱۷
۳	۹۹/۰۲	۵/۱۰	۱۳/۷۳	۹۸/۶۷
۴	۹۷/۱۹	۵/۷۳	۳/۶۹	۹۷/۱۷

در این روابط  $P_i$  داده‌های پیش‌بینی شده از مدل،  $O_i$  داده‌های مشاهداتی آزمایشگاهی،  $\bar{O}$  متوسط داده‌های مشاهداتی.

$$ARE = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{P_i - O_i}{O_i} \right)}{n} \quad (26)$$

خروجی و تغییرات نسبی رسیدن به این دبی نشان می‌دهد. جدول ۴ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت را نشان می‌دهد.

در این نتایج دیده می‌شود که در حالت جریان فقط درون‌گذر و همچنین در حالت درون‌گذر-روگذر، کوچکتر شدن  $D_{50}$  باعث کاهش بیشتر دبی حداکثر و طولانی‌تر شدن زمان رسیدن به اوج می‌شود. علت این پدیده، کوچکتر شدن خلل و فرج سدها، افزایش سطح تماس سیال با سنگدانه‌ها و در نتیجه افزایش اصطکاک و مقاومت در برابر جریان است.

همچنین با بزرگتر شدن  $L$  و زاویه شیروانی، شکل و طول سد تغییر کرده و لذا درصد سنگدانه‌های به‌کار رفته در سد بیشتر شده و در نتیجه مقاومت در برابر جریان بیشتر می‌شود و لذا دبی خروجی کاهش بیشتری می‌یابد. با مقایسه میزان تأثیر هر یک از پارامترها بر دبی حداکثر خروجی آخرین سد، دیده می‌شود که تغییر پارامتر  $D_{50}$  تأثیر بیشتری بر هیدروگراف سیل عبوری از سد پاره‌سنگی دارد و تغییر زاویه شیروانی کمترین تأثیر را دارد. همچنین مشاهده می‌شود که با تغییر پارامترهای مؤثر، تغییرات نسبی ایجاد شده در دبی حداکثر سیلاب خروجی در حالت جریان درون‌گذر بیشتری از حالت درون‌گذر-روگذر است.

همان‌طور که در شکل‌های ۹ تا ۱۵ و جدول‌های ۲ و ۳ دیده می‌شود، نتایج حاصل از مدل ریاضی در حالت دو بعدی در هر دو حالت درون‌گذر و درون‌گذر-روگذر با توجه به خطاهای آزمایشگاهی، دقت مناسبی دارد، به‌طوری که ضریب وابستگی نتایج مدل ریاضی و فیزیکی ( $R^2$ ) بیشتر از ۹۵ درصد بوده و همچنین متوسط خطای نسبی از ۱۱ درصد کمتر بوده و راندمان مدل نیز بیشتر از ۹۳ درصد است. این گویای تطابق خوب بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی ریاضی و نشان‌دهنده دقت مدل تحقیق حاضر و استفاده به‌جا از مدل دوبعدی در تحلیل جریان درون‌گذر و روگذر در سدهای پاره‌سنگی است.

## ۷- بررسی حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامترها

پس از صحت‌سنجی مدل ریاضی می‌توان حساسیت مدل دوبعدی را نسبت به تغییر پارامترهای ورودی مدل بررسی کرد. پارامترهای ورودی مدل شامل پارامترهای هندسی، مانند قطر متوسط سنگدانه‌ها ( $D_{50}$ ) عرض پی ( $L$ ) و زاویه شیروانی سد ( $\theta$ ) است. تحلیل حساسیت اثر تغییر هر یک از این پارامترها را بر میزان درصد کاهش دبی اوج، تغییرات نسبی دبی اوج هیدروگراف ورودی و

جدول ۴ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مدل در حالت درون‌گذر

پارامتر	$D_{50} (m)$	$L (m)$	$\theta (deg)$
دامنه تغییر پارامتر	۰/۰۲-۰/۱۰	۳-۶	۳۰-۴۵
درصد کاهش دبی اوج	۸۰/۸۹-۷۲/۰۱	۷۲/۰۱-۷۵/۳۹	۷۴/۹۲-۷۵/۳۹
درصد تغییر نسبی دبی اوج	۱۰/۰۳	۷/۳۵	۱/۷۸
درصد تغییر نسبی زمان رسیدن به دبی اوج	۷/۰۳	۴/۸۴	۱/۱۰

جدول ۵ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مدل در حالت درون‌گذر-روگذر

پارامتر	$D_{50} (m)$	$L (m)$	$\theta (deg)$
دامنه تغییر پارامتر	۰/۰۲-۰/۱۰	۳-۶	۳۰-۴۵
درصد کاهش دبی اوج	۷۳/۲۶-۶۲/۳۳	۶۲/۳۳-۶۶/۰۲	۶۵/۵۱-۶۶/۰۲
درصد تغییر نسبی دبی اوج	۶/۱۶	۴/۰۵	۰/۹۵
درصد تغییر نسبی زمان رسیدن به دبی اوج	۷/۶۳	۲۶۵	۱/۱۵

در حالتی که جریان درون‌گذر رخ می‌دهد، کل جریان از درون بدنه سدها عبور کرده و مقاومت در برابر کل جریان وجود دارد. در حالی که برای جریان درون‌گذر-روگذر بخشی از جریان از روی سد عبور کرده و در این حالت بخشی از جریان به‌صورت روگذر و بدون تأثیرپذیری از پارامترهای ایجاد کننده مقاومت در برابر جریان رخ می‌دهد. بنابراین در حالت درون‌گذر-روگذر اثر تغییر پارامترهایی مانند قطر سنگدانه‌ها، طول پی سدها و مانند آن کمتر بوده و همچنین راندمان مهار سیلاب با استفاده از سدهای پاره‌سنگی متوالی در حالت جریان درون‌گذر بیشتر از حالت درون‌گذر-روگذر است.

در حالت جریان درون‌گذر-روگذر در حدود ۶۰ درصد از حداکثر سیلاب مستهلک شده و زمان رسیدن اوج سیلاب نیز به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. این تأخیر را می‌توان به‌عنوان پارامتر مؤثری در هشدار و آمادگی برای مقابله با خطر سیل در نظر گرفت. نتایج مدل در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دقت مدل پیشنهادی را تأیید می‌کند. نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که با انتخاب قطر کوچکتر سنگدانه و عرض بیشتر پی و زاویه بزرگتر شیروانی می‌توان به راندمان بیشتر و مطمئن‌تری برای مهار سیلاب دست یافت و همچنین قطر متوسط سنگدانه‌ها پارامتر مؤثرتری نسبت به دیگر پارامترهای ورودی است.

## ۸- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از مدل دوبعدی جریان دائمی در دو حالت جریان فقط درون‌گذر و جریان درون‌گذر-روگذر در سدهای پاره‌سنگی و نیز با استفاده از روش هیدرولوژیکی در روندیابی مخزن، با حل همزمان معادلات دیفرانسیل حاکم بر بدنه سدها و مخازن مربوط، هیدروگراف سیل خروجی آخرین سد با استفاده از یک مدل ریاضی به‌دست آورده شده است. در مدل پیشنهادی بخش روگذر از طریق هیدرولیک جریان متغیر تدریجی شبیه‌سازی شد. سدهای پاره‌سنگی متوالی کاربرد مؤثری در مهار سیلاب دارند. با استفاده از دو سد متوالی (در این مسأله) در حالت درون‌گذر در حدود ۷۰ درصد و

## ۹- فهرست علائم

$A$	مرز بالادست تاج سد
$ARE$	مقدار متوسط خطای نسبی
$A'$	سطح مقطع جریان
$B$	مرز پایین‌دست تاج سد
$C$	مرز تماس وجه پایین‌دست بدنه سد با کف کانال
$C'$	مرز تماس آب در پایین‌دست با بدنه سد
$C''$	مرز ریزش آب در وجه پایین‌دست سد
$D$	مرز تماس وجه بالادست بدنه سد با کف کانال
$D_{50}$	متوسط قطر سنگدانه‌ها
$f$	بین ضریب اصطکاک

## ۱۰- منابع

قدسیان، م. (۱۳۷۷). "مهاریسیلاب و مهندسی زهکشی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس.

محمد ولی سامانی، ح. (۱۳۷۶). "طراحی سازه‌های هیدرولیکی"، چاپ اول، انتشارات شرکت مهندسی مشاور دزآب.

حیدری، م. (۱۳۸۶). "مدل دوبعدی جریان عبوری از داخل و روی سدهای پاره‌سنگی و کاربرد آن در کنترل سیلاب"، رساله دکتری تأسیسات آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

Chanson, H. (2006). "Discharge through a permeable rubble mound weir", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 132, No. 4, pp. 432-433.

Geertsma, J. (1974). "Estimating the coefficients of inertial resistance in fluid flow through porous media", Society of Petroleum Engineering of the AIME, Vol. 14, pp. 445-450.

Forchheimer, P. (1901). "Wasserbewegung durch boden", Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 45, pp. 1736-1741, 1781-1788.

Herrera, N.M., and Felton, G.K. (1991). "Hydraulics of flow through a rockfill dam using sediment-free water", Transactions of the American society of Agricultural Engineers, Vol. 34, No. 3, pp. 871-875.

Hosseini, S.M. (1997). "Development of an unsteady non-linear model for flow through coarse porous media", Doctoral dissertation, Guelph University, Canada.

Kells, J.A. (1995). "The analysis of flow through and over a gabion dam", Doctoral dissertation, Saskatchewan University, Canada.

Li, B., Garga, V.K., and Davies, M.H. (1998). "Relationships for non-Darcy flow in rockfill", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 2, pp. 206-212.

Samani, J.M.V. and Heydari, M. (2007). "Reservoir routing through successive rockfill detention dams", Journal of Agricultural Science and Technology, Vol. 9, pp. 317-326.

$g$	شتاب گرانش
$H_{up}$	تراز سطح آب در بالادست
$H_{down}$	تراز سطح آب در پایین‌دست
$i$	گرادیان هیدرولیکی
$I$	جریان ورودی مخزن هر سد
$I'$	مرز فرورفتن آب در تاج سد
$L$	عرض پی
$n$	تخلخل
$ME$	راندمان مدل
$O$	جریان خروجی مخزن هر سد
$O_i$	داده‌های آزمایشگاهی
$\bar{O}$	متوسط داده‌های مشاهداتی
$P_i$	داده‌های پیش‌بینی شده با مدل
$Q$	شدت جریان کلی
$Re$	عدد رینولدز
$RMSE$	خطای مربع میانگین
$R^2$	ضریب همبستگی
$S$	حجم مخزن هر سد
$S_0$	شیب کف کانال
$S_f$	شیب خط انرژی
$T$	عرض فوقانی جریان
$V$	سرعت جریان
$V_x$	سرعت جریان در راستای x
$V_y$	سرعت جریان در راستای y
$y$	ارتفاع آب بر روی تاج سد
$z$	پتانسیل ثقلی آن گره
$\alpha, \beta, \alpha', \beta'$	ضرایب ثابت
$a, b, a', b'$	ضریب تصحیح انرژی
$\alpha$	لزجت سیال
$\nu$	زاویه شیروانی سد
$\theta$	



Ward, J.C. (1964). "Turbulent flow in porous media", Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 90, No. HY 5, pp. 1-12

Wilkins, J.K. (1956). "Flow of water through rockfill and its application to the design of dams", Proceeding of 2nd Australia-New Zealand Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, Canterbury University college, Christchurch, New Zealand, pp. 141-149.

Samani, H.M.V., Samani, J.M.V. and Shayannejad, M. (2003). "Reservoir routing using steady and unsteady flow through rockfill dams", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 6, pp. 448-454

Stephenson, D. (1979) "Rockfill in Hydraulic Engineering", Elsevier Scientific Publishing Company, New York.