



## توسعه و کاربرد مدل ریاضی دو بعدی روندیابی سیل در مخازن سدهای پاره سنگی متواالی در حالت درون گذر - رو گذر

جمال محمد ولی سامانی<sup>۱</sup>، مجید حیدری<sup>۲</sup>، مهرخ مکنتیان<sup>۳</sup>

۱- دانشیار و عضو هیئت علمی گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی آب، دانشگاه بولوی سینا

۳- دانشجو مقطع کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس

mahrokh\_moknatian@yahoo.com

### خلاصه

در این تحقیق سیستم سدهای پاره‌سنگی نفوذپذیر متواالی برای کنترل و مهار سیل پیشنهاد شده است. در این سیستم با عبور سیل از مخازن این سدها، دبی پیک آن کاهش یافته و زمان رسیدن به آن افزایش می‌یابد. امکان عبور سیل از روی این سدها وجود دارد لذا در تعیین معادلات دبی- اشل از مدل دوبعدی جریان درون گذر- رو گذر استفاده شد. مقایسه نتایج حاصله با مشاهدات آزمایشگاهی، دقیق بسیار خوب مدل را در شبیه‌سازی روندیابی سیل در سیستم سدهای پاره‌سنگی نفوذپذیر متواالی نشان می‌دهد. تحلیل حساسیت مدل نشان داد که پارامتر  $D_{50}$  تاثیر بیشتری بر روی هیدرولیک سیل دارد. با بزرگتر شدن پارامتر  $D_{50}$ ، میزان دبی اوج هیدرولیک سیل کاهش و میزان زمان رسیدن به این دبی نیز افزایش می‌یابد. اثر تغییر زاویه شیروانی سد در کاهش دبی پیک و افزایش زمان تاخیر، بسیار کم می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** سدهای پاره‌سنگی ، مخزن، روندیابی سیل، جریان درون گذر- رو گذر

### ۱. مقدمه

در مقابل منافع زیاد حاصله از رودخانه‌ها، وقوع سیلاب‌های مهیب تهدیدی جدی برای تأسیسات ایجاد شده در مجاورت رودخانه‌ها محسوب می‌شود. از این‌رو جهت جلوگیری از خسارات ناشی از وقوع چنین سیلاب‌هایی می‌باشد با استفاده از روش‌های مناسب و تمهدات و تأسیسات خاص اثر محروم سیلاب را کنترل نمود. بنابر آنچه گفته شد به سهولت می‌توان به اهمیت و ضرورت مهار سیلاب پی‌برد. مهار سیلاب شامل فرایندهای خاصی است که با تدبیر خاص و بهره‌برداری از سازه‌های طراحی شده، اثرات تخریبی سیل را رفع یا کاهش دهد (قدسیان، ۱۳۷۷). روش‌های مختلفی برای مدیریت سیلاب به کار گرفته می‌شود که این روش‌ها به دو دسته روش‌های سازه‌ای و روش‌های غیرسازه‌ای طبقه‌بندی می‌شود. در بین این روش‌ها استفاده از مخازن تأخیری<sup>۱</sup> روشی شناخته شده است که هدف از احداث آن، ذخیره قسمتی از جریان سیلاب به منظور کاهش دبی پیک و افزایش زمان تداوم آن می‌باشد که بدین وسیله خطرات ناشی از سیل در پائین دست سد کاهش خواهد یافت (سامانی، ۱۳۷۶).

نمونه‌ای از سدهای تاخیری، سدهای پاره‌سنگی فاقد هسته نفوذ ناپذیر<sup>۲</sup> می‌باشد که احداث آنها در دهه اخیر عنوان یکی از روش‌های کنترل و مهار سیلاب از طرف مراجع ذیریت نظری وزارت نیرو و جهاد کشاورزی پیشنهاد شده است. از خصوصیات بارز این سدها می‌توان به تراویش جریان از درون بدن آنها اشاره کرد که منجر به کوچک شدن ابعاد سد نسبت به وقتی که سد ناتراوا باشد می‌شود (قضی مرادی، ۱۳۸۴). همچنین این سدها دارای تخلخل خیلی زیاد، انعطاف‌پذیری خوب، عمر طولانی، مقاومت کافی در مقابل نیروهای مؤثر و عوامل طبیعی و جوی و ساختمند بسیار ساده هستند و لذا از قابلیت اعتمادپذیری بالایی برخوردار می‌باشند (Kells، ۱۹۹۵). بدین ترتیب با در نظر گرفتن چند سد پاره‌سنگی متواالی در مسیر یک رودخانه، با عبور جریان از داخل و روی هر سد به مخزن سد دیگر، ضمن آنکه دبی پیک هیدرولیک سیل کاهش می‌یابد، زمان رسیدن به پیک جدید نیز طولانی- تر خواهد شد. مسلماً با توجه به درنظر گرفتن شرایط خاص هیدرولیکی حاکم بر محیط متخلف درشت‌دانه، طراحی هیدرولیکی این سدها آن هم جهت کنترل و مهار سیلاب شرایط مختص به خود را می‌طلبد. چرا که تراویش در چنین محیطی دارای رژیمی متلاطم می‌باشد به گونه‌ای که قانون دارسی بر آن حاکم نخواهد بود (Bordier، ۲۰۰۰). در این شرایط هیدرولیک سدهای متواالی پاره‌سنگی پیچیده‌تر می‌شود به نحوی که به هنگام وقوع سیل علاوه

<sup>1</sup>-Detention dams

<sup>2</sup>-Stone rockfill detention dams



بر آنکه شاهد تراویشی با جریان متلاطم از یک محیط متخلخل هستیم، شاهد عبور جریان از مخازن سدهای متواالی نیز هستیم که این مخازن دارای اثر مقابل بر روی تراز سطح آب در مخزن سد بالادست خود می‌باشند و در عین حال شرایط جریان غیردادم نیز بر آنها حاکم است (حیدری، ۱۳۸۶).

## ۰.۲ مبانی نظری

تحقیق موردنظر در ارتباط با روندیابی سیل در مخازن متواالی سدهای تأخیری پاره‌سنگی نفوذپذیر می‌باشد، لذا دو مبحث باید مورد بررسی قرار گیرند، یکی در مورد هیدرولیک جریان در محیط‌های متخلخل سنگدانه‌ای و دیگری روندیابی سیل در مخزن می‌باشد.

۱-۲- بر اساس تحقیقات انجام شده بر روی هیدرولیک جریان در محیط متخلخل، جریان آرام در این محیط با قانون دارسی بیان می‌شود. این قانون بیانگر رابطه خطی بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک می‌باشد(Hansen، ۲۰۰۲). با آشفته شدن جریان رابطه دارسی اعتبار خود را از دست می‌دهد. جهت تبیین هیدرولیک جریان در محیط‌های متخلخل سنگدانه‌ای محققینی نظری Geertsma (۱۹۷۴) و Forchheimer (۱۹۰۱) مطالعه نمودند و همه محققان با در نظر گرفتن حالت آشفته برای جریان در چنین محیط‌های موضوع را مورد تحقیق قرارداده‌اند. به طور کلی هیدرولیک جریان آشفته در محیط متخلخل به دو دسته کلی تقسیم می‌شود: ۱- معادلات بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان و ۲- معادلات بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز. معادلات ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت شامل معادله دو جمله‌ای یا معادله فرشایمر و نیز معادله نمایی ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان می‌باشند که عبارتند از(حیدری، ۱۳۸۶):

$$i = \alpha V + \beta V^2 \quad (2)$$

$$i = \alpha' V^{\beta'} \quad (3)$$

در روابط مذبور ۱- گرادیان هیدرولیکی (بدون بعد)،  $V$  سرعت جریان با بعد  $L^{-1}$  و  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\alpha'$  و  $\beta'$  ضرایب ثابت معادلات می‌باشند که توابعی هستند از مشخصات محیط متخلخل. همچنین معادلات ارتباط بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز نیز در برگیرنده فرم کسری و فرم نمایی ارتباط بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز می‌باشند(Li and Garga، ۱۹۹۸) که عبارتند از:

$$f = \frac{a}{R_e} + b \quad (4)$$

$$f = a' R_e^{b'} \quad (5)$$

۲- ضریب اصطکاک (بدون بعد)،  $R_e$  عدد رینولدز(بدون بعد) و  $a$  و  $b$  و  $a'$  و  $b'$  توابعی هستند از مشخصات محیط متخلخل. در این زمینه محققین بسیاری مانند Bingjum (۱۹۹۸) بر روی این دو معادله تحقیق کرده و مقادیر ضرایب ثابت معادلات را بدست آورده‌اند. سامانی و همکاران (۲۰۰۳) طی تحقیقی ضرایب معادله فرم نمایی ارتباط بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز را در دو حالت یک بعدی و دو بعدی به ترتیب به صورت زیر بدست آورده‌اند(Samani et al.، ۲۰۰۳):

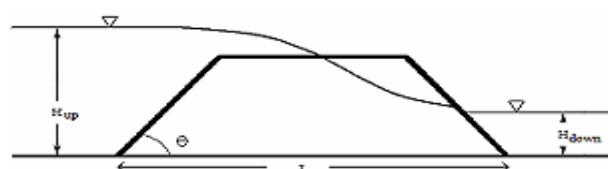
$$f = 54.0 R_e^{-0.077} \quad (6)$$

$$f = 80.0 R_e^{-0.034} \quad (7)$$

به استناد به این روابط محققین زیادی تحقیقات بسیاری را بر روی هیدرولیک سدهای پاره‌سنگی انجام دادند و روابط دبی-اشل را در حالات مختلف جریان ارائه دادند. حیدری در سال ۱۳۸۶ با استفاده از معادلات ارتباط بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک و بر اساس رابطه دو بعدی که سامانی و همکاران (رابطه ۷) ارائه داده بودند، جریان دو بعدی درون گذر و روگذر در سدهای پاره‌سنگی را تحلیل کرد و رابطه دبی-اشل در این سدها را به صورت زیر تعیین نمود:

$$Q = f(H_U, H_D) \quad (8)$$

راز سطح آب در بالادست و پائین دست سازه سد با بعد  $L$  و  $Q$  دبی جریان با بعد  $L^3 T^{-1}$  می‌باشد(شکل ۱).



شکل ۱- شماتیک عبور جریان در حالت درون گذر- روگذر از یک سد پاره‌سنگی



۲-۲- در مهندسی هیدرولوژی روندیابی سیل<sup>۱</sup> یک تکنیک لازم برای حل مسائل مربوط به مهار سیل و کار سیستم‌های پیش‌بینی سیل می‌باشد که در این تکنیک اثر ذخیره مخزن یا رودخانه شکل و حرکت یک موج سیل بررسی می‌شود و همچنین در صورت معلوم بودن ویا مفروض بودن هیدرولوگراف ورودی و دیگر مشخصات لازم، می‌توان مشخصات هیدرولوگراف سیل خروجی را تعیین نمود و بطور کلی می‌توان این روش‌ها را به دو بخش عمده، روش‌های هیدرولوگیکی و هیدرولوژیکی تقسیم نمود. روش‌های هیدرولوگیکی بر مبنای حل معادلات اساسی دیفرانسیلی برای جریانات غیر دائمی در مجاري روباز می‌باشد (Xiong & Melching, ۲۰۰۵). در روش‌های هیدرولوژیکی از معادله پیوستگی جریان و ارتباط بین دبی و ذخیره وقت آب در طی وقوع سیل استفاده می‌شود و با اتخاذ فرضیات ساده کننده، مسائل مربوط به روندیابی سیل بصورت ساده‌تری تبدیل می‌شوند و به همین دلیل است که جواب‌های حاصله از روش‌های هیدرولوژیکی تقریبی بوده و کاملاً دقیق نیست. اما با این وجود نتایج حاصله جهت استفاده در پژوههای هیدرولوگیکی به اندازه کافی رضایت‌بخش و قابل اطمینان می‌باشند. در روندیابی سیل به روش ذخیره در مخزن<sup>۲</sup> که یکی از روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی است، تغییرات مشخصات سیل ضمن عبور از یک مخزن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اساس این روش بر پایه معادله پیوستگی بین دبی ورودی، دبی خروجی و تغییرات حجم مخزن می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌شود (Subhash. Jain, ۲۰۰۰):

$$\frac{dS}{at} = I - O \quad (9)$$

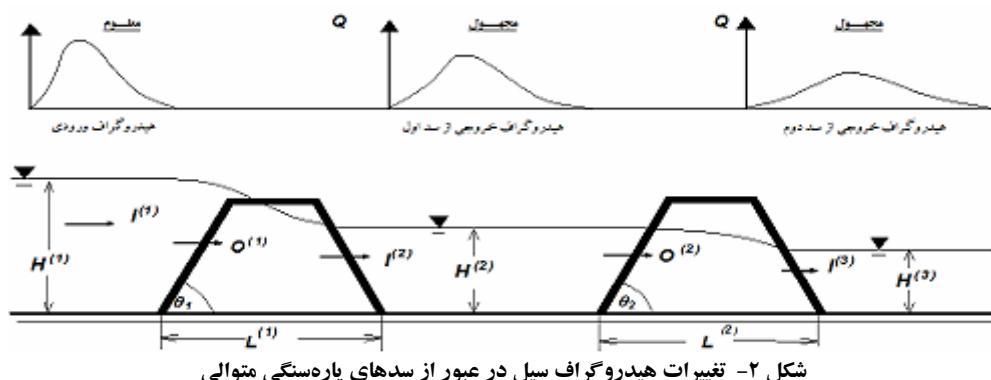
که در این رابطه  $I$  دبی جریان ورودی با بعد  $L^3 T^{-1}$ ،  $O$  دبی جریان خروجی با بعد  $L^3 T^{-1}$ ،  $t$  زمان با بعد  $T$  و  $S$  ذخیره با بعد  $L^3$ . با داشتن تغییرات ورودی ( $I$ ) نسبت به زمان (هیدرولوگراف ورودی) و نیز داشتن اطلاعاتی در مورد ذخیره مخزن ( $S$ ) می‌توانیم تغییرات جریان خروجی ( $O$ ) نسبت به زمان (هیدرولوگراف خروجی) را بدست آوریم. در این تحقیق برای حل این معادله از روش عددی تفاضلی محدود<sup>۳</sup> استفاده شده است و با توجه به این روش رابطه پیوستگی برای هر فاصله زمانی  $\Delta t$  به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\frac{I_{i+1} + I_i}{2} \Delta t - \frac{O_{i+1} + O_i}{2} \Delta t = S_{i+1} - S_i \quad (10)$$

که در این معادله اندیس  $i$  نشان‌دهنده گام‌های زمانی می‌باشد.

### ۳. جزئیات کار (توسعه مدل)

مطابق شکل (۲) تعدادی سد پاره‌سنگی نفوذپذیر متوالی در مسیر جریان درنظر می‌گیریم. به هنگام وقوع سیل بخشی از حجم سیلان ایجاد شده در مخزن سد اول ذخیره می‌شود و بخش دیگر آن به تدریج به مخزن سد دوم تخلیه می‌شود. پس از مدتی بخشی که در مخزن سد اول ذخیره شده بود به مخزن سد دوم تخلیه می‌شود که در این حین هم عمل تخلیه از مخزن سد دوم را داریم و هم عمل ذخیره در آن. این عمل برای مخازن دیگر نیز صورت می‌گیرد که در نهایت هیدرولوگراف خارج شده از مخزن آخرین سد نسبت به هیدرولوگراف سیل ورودی به مخزن سد اول فروکش می‌کند و سیل با یک هیدرولوگراف مطمئن عبور می‌کند بطوریکه خطرات ناشی از سیل تا حد زیادی کاهش خواهد یافت. البته در اینجا باید در نظر داشت، امکان اینکه جریان عبوری از هر یک از این سدها بصورت درون‌گذر- روگذر اتفاق بیفتند نیز وجود دارد. در این حالت ورودی به مخزن سد اول همان هیدرولوگراف سیل می‌باشد. خروجی از بدن سد اول، ورودی به مخزن سد دوم می‌باشد و خروجی از بدن سد دوم ورودی به مخزن سد سوم خواهد بود.



شکل ۲- تغییرات هیدرولوگراف سیل در عبور از سدهای پاره‌سنگی متوالی

<sup>1</sup> - Flood routing

<sup>2</sup> - Reservoir Flood Routing

<sup>3</sup> - Finite Difference method



برای نوشتن مدل ریاضی باید دو سری روابط را در نظر گرفت و سپس با برقراری رابطه منطقی بین آنها مدل را نوشت. سری اول شامل روابط دبی-اشن مربوط به هر یک از سدها و سری دوم روابط مربوط به روندیابی سیل در مخازن سدهای متواالی پاره‌سنگی می‌باشد. به منظور استخراج روابط روندیابی به علت اینکه سرعت جريان در پشت مخزن سد کم است، از روش روندیابی ذخیره‌ای سیل در مخزن می‌توان استفاده کرد (Hanif Chaudhry, ۲۰۰۸). با این تفاصیل الگوریتم مدل به شرح ذیل خواهد بود:

برای رسیدن به روابط مدل ریاضی رابطه پیوستگی روندیابی در مخزن هر سد با استفاده از رابطه (۱۰) به فرم ذیل نوشته می‌شود (اندیس K بیانگر شماره سدها می‌باشد):

$$\frac{I_{i+1}^{(K)} + I_i^{(K)}}{2} \Delta t - \frac{O_{i+1}^{(K)} + O_i^{(K)}}{2} \Delta t = S_{i+1}^{(K)} - S_i^{(K)} \quad (11)$$

مطلوب شکل (۲) اگر تعداد  $P$  سد متواالی داشته باشیم با استفاده از معادله (۱۱) یک دستگاه معادلات غیرخطی با تعداد  $P$  معادله بدست خواهد آمد، که این دستگاه و مجهولات آن به قرار ذیل می‌باشد:

برای مخزن سد اول:

$$\frac{I_{i+1}^{(1)} + I_i^{(1)}}{2} \Delta t - \frac{O_{i+1}^{(1)} + O_i^{(1)}}{2} \Delta t = S_{i+1}^{(1)} - S_i^{(1)} \quad (12)$$

برای مخزن سد دوم:

$$\frac{I_{i+1}^{(2)} + I_i^{(2)}}{2} \Delta t - \frac{O_{i+1}^{(2)} + O_i^{(2)}}{2} \Delta t = S_{i+1}^{(2)} - S_i^{(2)} \quad (13)$$

و به همین ترتیب برای براي مخزن سد  $P$  آم:

$$\frac{I_{i+1}^{(P)} + I_i^{(P)}}{2} \Delta t - \frac{O_{i+1}^{(P)} + O_i^{(P)}}{2} \Delta t = S_{i+1}^{(P)} - S_i^{(P)} \quad (14)$$

حال با توجه به این موضوع که جريان خروجی از مخزن هر سد بعنوان جريان ورودی به مخزن سد بعدی می‌باشد، یعنی  $Q_i^{(K)} = I_i^{(K+1)}$ ، این دستگاه به صورت زیر تغییر خواهد کرد:

برای مخزن سد اول:

$$\frac{I_{i+1}^{(1)} + I_i^{(1)}}{2} \Delta t - \frac{O_{i+1}^{(1)} + O_i^{(1)}}{2} \Delta t = S_{i+1}^{(1)} - S_i^{(1)} \quad (15)$$

برای مخزن سد دوم:

$$\frac{O_{i+1}^{(2)} + O_i^{(2)}}{2} \Delta t - \frac{O_{i+1}^{(1)} + O_i^{(1)}}{2} \Delta t = S_{i+1}^{(2)} - S_i^{(2)} \quad (16)$$

برای مخزن سد  $P$  آم:

$$\frac{O_{i+1}^{(P-1)} + O_i^{(P-1)}}{2} \Delta t - \frac{O_{i+1}^{(P)} + O_i^{(P)}}{2} \Delta t = S_{i+1}^{(P)} - S_i^{(P)} \quad (17)$$

همانطور که مشاهده می‌شود برای  $P$  سد،  $P+1$  اشن داریم  $P$  تا برای مخازن و یک اشن هم برای کanal پائین دست)، بنابراین تعداد مجهولات  $P+1$  می‌باشد و این مجهولات عبارتند از:  $H_{i+1}^{(P)}$  و  $H_{i+1}^{(3)}$  و  $H_{i+1}^{(2)}$  و ... و  $H_{i+1}^{(1)}$ . لذا یک معادله دیگر هم نیاز می‌باشد. این معادله، معادله دبی-اشن در رودخانه پائین دست می‌باشد.

$$Q_{H_{i+1}}^{(P+1)} = f(H_{i+1}^{(P+1)}) \quad (18)$$

لذا داریم:

$$O_{i+1}^{(P)} = I_{i+1}^{(P+1)} = Q_{H_{i+1}}^{(P+1)} \quad (19)$$

حال  $P+1$  معادله به همراه  $P+1$  مجهول با استفاده از یکی از روش‌های عددی و با در دست داشتن مقادیر  $I$  با توجه به هیدرودگراف ورودی،  $O$  با توجه به روابط دبی-اشن برای هر سد از رابطه ۸ قابل محاسبه می‌باشد، که برای هر سد به صورت رابطه ۲۰ در خواهد آمد و همچنین رابطه حجم ذخیره-اشن هر سد که با توجه به توپوگرافی مخزن به دست می‌آید (رابطه ۲۱)، قابل حل می‌باشد.

$$O_{i+1}^{(K)} = f(H_{i+1}^{(K)}, H_{i+1}^{(K)}) \quad (20)$$

$$S_{i+1}^{(P)} = f(H_{i+1}^{(P)}) \quad (21)$$



پس از بدست آمدن مقادیر تراز سطح آب در هر گام زمانی مقادیر دبی‌های خروجی از هر سد قابل محاسبه خواهد بود و سپس با رسم دبی-های خروجی در مقابل زمان، هیدروگراف‌های خروجی بدست می‌آیند.

#### ۴. داده‌های آزمایشگاهی

جهت بررسی و ارزیابی دقت و صحت مدل ریاضی اقدام به ساخت مدل فیزیکی و جمع آوری داده‌های آزمایشگاهی گردید. این آزمایشات در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر و عرض  $0.3/0$  متر، با مصالح و فواصل مختلف انجام گردید. مشخصات آزمایشات انجام شده در جدول شماره ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات آزمایشات انجام شده

تعداد سدهای متواالی	قطر متوسط سنگدانها (m)	ارتفاع (cm)	زاویه شیروانی (deg)	طول قاعده (cm)	فاصله سدها از هم (cm)
۲	۲/۱	۳۰	۴۵	۱۰۰	۱۳۰
۲	۲/۱	۲۴/۵	۴۵	۱۰۰	۱۳۰
۲	۲/۱	۲۴/۵	۴۵	۱۰۰	۸۲
۲	۱/۴	۲۴/۵	۴۵	۱۰۰	۱۳۰
۲	۱/۴	۲۴/۵	۴۵	۱۰۰	۸۲

یکی از مواردی که ابتدا باید در آزمایشات اندازه گیری شود، تعیین رابطه دبی-اشل پایاب می‌باشد. بدین منظور دبی با استفاده از یک دبی سنج مغناطیسی و اشل نیز توسط عمق سنجی با دقت قابل قبول اندازه گیری گردید. سپس هیدروگراف ورودی با استفاده از شیر پمپ وارد شد و توسط دبی سنج مغناطیسی محاسبه گردید. جهت برداشت تراز سطح آب پیزومترهایی در طول کanal نصب گردید و به علت ماهیت غیر دائمی بودن سیل، با استفاده از دوربین فیلمبرداری در حین آزمایش زمان ترازهای سطح آب ثبت شد. جهت افزایش دقت هر آزمایش با ۴ تکرار انجام شد. جهت تعیین هیدروگراف خروجی، با استفاده از ترازهای قرائت شده و منحنی دبی-اشل، دبی در هر زمان قابل استخراج بوده و در مقابل زمان رسم شد.

#### ۵. بورسی صحت و دقت مدل

نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی زمانی قابل اعتماد می‌باشند که، صحت و دقت نتایج مدل عددی با داده‌های صحرایی (در صورت وجود)، یا با داده‌های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گیرند.

##### ۱-۵- صحت

صحت عملکرد برنامه کامپیوتری تهیه شده با انجام مواردی که در ذیل به آنها اشاره می‌شود به اثبات رسید.

۱- محاسبه سطوح زیر هیدروگراف سیل‌های ورودی و خروجی نشان می‌دهد که این سطوح با هم برابرند.

۲- در هر یک از عملیات‌های روندیابی سیل مشاهده شد که نقطه اوج هیدروگراف سیل خروجی بر روی هیدروگراف سیل ورودی واقع است.

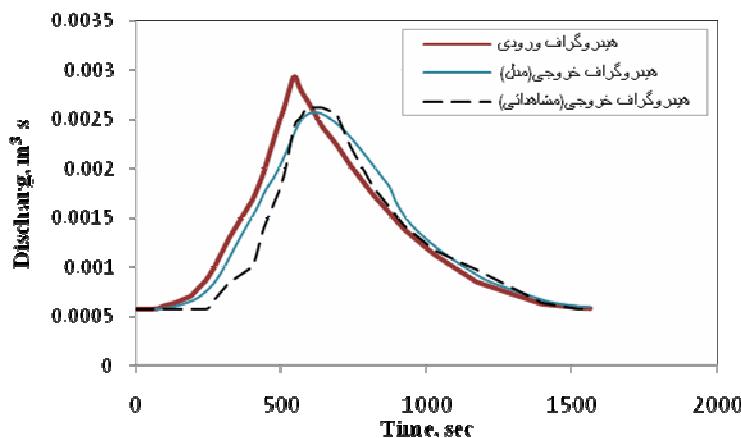
۳- با کوچکتر در نظر گرفتن بعد از سدها، روندیابی سیل نشان داد که هیدروگراف سیل خروجی به هیدروگراف سیل ورودی می‌کند.

۴- روابط ارائه شده بازه ترازهای یکسان سطح آب در بالادست و پایین دست هر یک از سدهای متواالی پاره سنگی دبی صفر را نتیجه می‌دهد و این امر کاملاً منطقی می‌باشد چرا که تحت این شرایط گرادیان هیدرولیکی صفر خواهد بود.

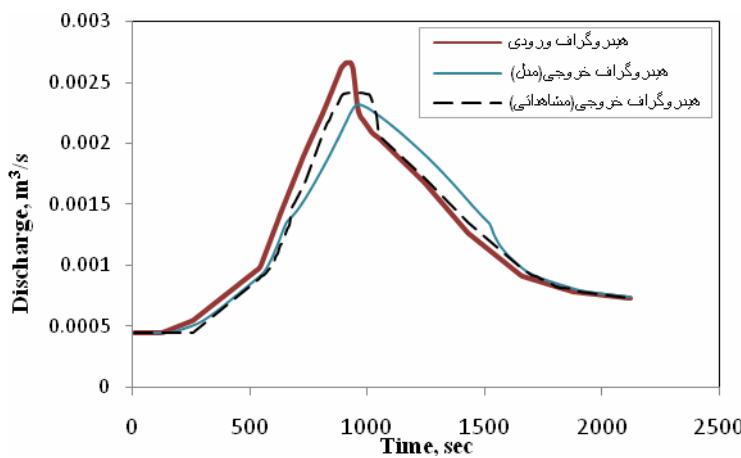
۵- در صورتیکه شرایط جریان ماندگار حاکم باشد، تراز سطح آب در طرفين هر یک از سدهای متواالی پاره سنگی ثابت می‌ماند.

##### ۲-۵- دقت نتایج حاصل از اجرای مدل

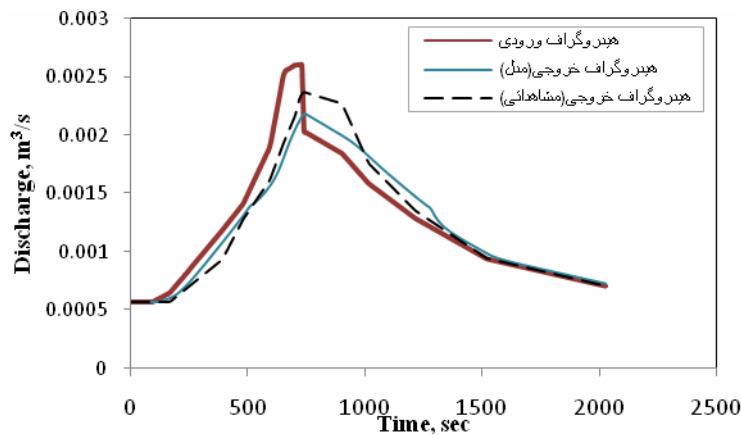
به منظور بررسی دقت مدل ریاضی نتایج حاصل از اجرای مدل، می‌بایست این نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گیرند. شکل‌های ۳ الی ۷ نتایج حاصل از هر دو مدل ریاضی و فیزیکی را نشان می‌دهند.



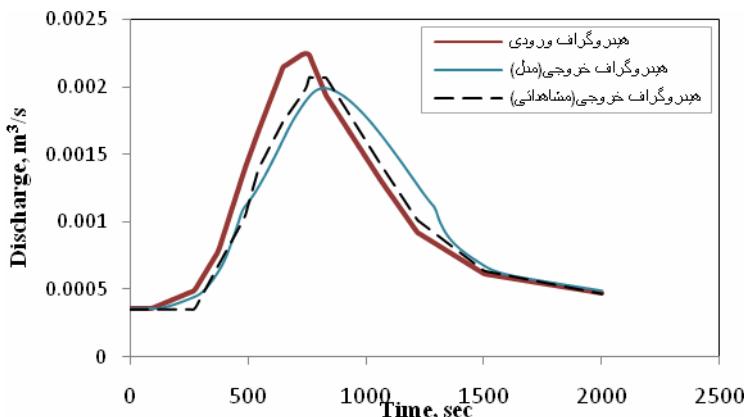
شکل ۳- نتایج حاصل از مدل فیزیکی و ریاضی در دو سد با قطرمتوسط سنجدانه ۲/۱ سانتیمتر و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر و فاصله ۱۳۰ سانتیمتر  
( $R^2=96/1\%$ )



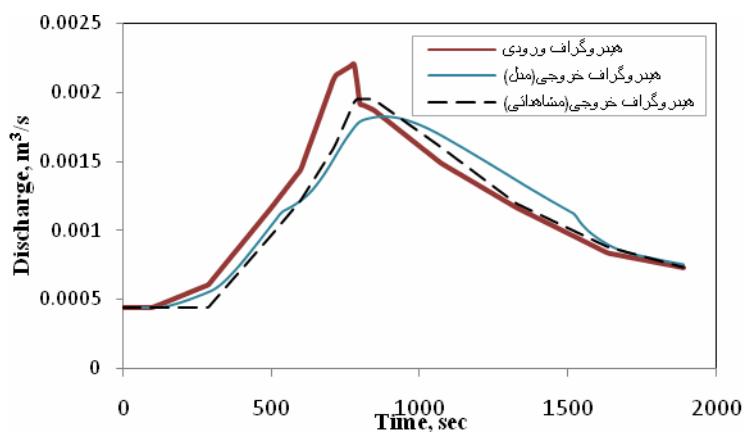
شکل ۴- نتایج حاصل از مدل فیزیکی و ریاضی در دو سد با قطرمتوسط سنجدانه ۲/۱ سانتیمتر و ارتفاع ۲۴/۵ سانتیمتر و فاصله ۱۳۰ سانتیمتر  
( $R^2=96/1\%$ )



شکل ۵- نتایج حاصل از مدل فیزیکی و ریاضی در دو سد با قطرمتوسط سنجدانه ۲/۱ سانتیمتر و ارتفاع ۲۴/۵ سانتیمتر و فاصله ۸۲ سانتیمتر  
( $R^2=98\%$ )



شکل ۶- نتایج حاصل از مدل فیزیکی و ریاضی در دو سد با قطر متوسط سنگدانه ۱/۴ سانتیمتر و ارتفاع ۲۴/۵ سانتیمتر و فاصله ۱۳۰ سانتیمتر  
( $R^2=96/6\%$ )



شکل ۷- نتایج حاصل از مدل فیزیکی و ریاضی در دو سد با قطر متوسط سنگدانه ۱/۴ سانتیمتر و ارتفاع ۲۴/۵ سانتیمتر و فاصله ۸۲۴ سانتیمتر  
( $R^2=97/1\%$ )

همانطور که مشاهده می شود این نتایج از دقت خوبی برخوردار بوده و ضریب وابستگی آنها ( $R^2$ ) از ۹۶ درصد بیشتر می باشد و همچنین میزان متوسط خطا ۶۱/۶ درصد می باشد.

## ۶. بررسی حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامترها

پارامترهای ورودی مدل شامل پارامترهای هندسی، مثل اندازه قطر متوسط سنگدانه ها ( $D_{50}$ )، عرض پی ( $L$ )، زاویه شیروانی سد ( $\theta$ ) می باشند. آنالیز حساسیت اثر تغییر هر یک از این پارامترها را بر روی تغییر دیگر را بررسی کرد. تغییر زمان رسیدن به این دبی ها ( $\Delta T\%$ ) را نشان می دهد. جدول شماره ۲ نتایج حاصل از آنالیز حساسیت را نشان می دهد.

جدول ۲- نتایج حاصل از آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی مدل بر  $\Delta Q\%$  و  $\Delta T\%$

پارامتر	$\Delta Q\%$	$\Delta T\%$
دامنه تغییرات پارامترها	۰/۰۲-۰/۱۰	۳-۶
$\Delta Q\%$	۴۲/۶-۲۵/۳	۲۵/۳-۴۱/۱
$\Delta T\%$	۷۶/۹-۶۱/۱	۶۱/۱-۷۵/۸



همانطور که دیده می شود اثر تغییرات پارامتر  $D_{50}$  تاثیر بیشتری بر روی هیدروگراف سیل عبوری از سد پاره سنگی دارد و کوچکتر شدن آن باعث کاهش بیشتر دبی پیک و طولانی تر شدن زمان رسیدن به اوج می شود. همچنین با بزرگتر شدن پارامتر  $L$ ، میزان دبی اوج هیدروگراف خروجی کاهش و میزان زمان رسیدن به این دبی نیز افزایش می یابد. همانطور که از نتایج مشاهده می شود اثر تغییر زاویه شیروانی سد در کاهش دبی پیک و افزایش زمان تاخیر، بسیار کم می یاشد.

## ۷. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از مدل دوبعدی جریان دائمی در دو حالت درون‌گذر- روگذر در سدهای پاره سنگی و نیز استفاده از روش هیدرولوژیکی در روندیابی مخزن، با حل همزمان معادلات دیفرانسیلی حاکم در بدنه سدها و مخازن مربوطه، در حالت درون‌گذر- روگذر هیدروگراف سیل خروجی از آخرین سد با استفاده از توسعه یک مدل ریاضی بدست آورده شده است. مطلب مهمی را که می‌توان دریافت، آنستکه سدهای پاره سنگی متواالی کاربرد موثری در کنترل و مهار سیلاب دارند، بنحوی که می‌توان بیان کرد که با استفاده از دو سد متواالی (در این مسئله) ضمن آنکه حدود ۴۰٪ پیک سیلاب مستهلک شده است، زمان رسیدن اوج سیلاب نیز به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است و این تأخیر پارامتر موثری در هشدار و آمادگی افراد جهت مقابله با خطرات سیل می‌باشد. نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که با انتخاب قطر سنگدانه کوچکتر و عرض بی‌بیشتر و زاویه شیروانی بزرگتر می‌توان به راندمان بیشتر و مطمئن‌تری به منظور کنترل و مهار سیلاب دست یافت و همچنین قطر متوسط سنگدانه‌ها پارامتر موثرتری نسبت به دیگر پارامترها ورودی می‌باشد.

## ۸. مراجع

- قدسیان، م.، (۱۳۷۷)، "مهراسیلاب و مهندسی زهکشی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس.
- محمد ولی سامانی، ح.، (۱۳۷۶)، "طراحی سازه‌های هیدرولیکی"، چاپ اول، انتشارات شرکت مهندسی مشاور دزآب.
- فاضی مرادی، ا.، (۱۳۸۴)، "بررسی اثرات جریان‌های روگذر روی خصوصیات جریان در سدهای تاخیری سنگدانه ای و پاره سنگی"، وزارت جهاد کشاورزی و آموزش کشاورزی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.
- Kells, J.A., (1995), "The analysis of flow through and over a gabion dam," Ph.D. dissertation, pp.362, Saskatchewan, Univ., Canada
- حیدری، م.، (۱۳۸۶)، "مدل دوبعدی جریان عبوری از داخل و روی سدهای پاره سنگی و کاربرد آن در کنترل سیلاب"، رساله دکتری تأسیسات آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- Bordier, C., and Zimmer, C., (2000), "Drainage equations and non-darcian modeling in coarse porous media or geosynthetic materials," J. Hydrology, 228, 174–187
- Hansen, D., and Rizwanul, B., (2002), "Application of gradually varied flow algorithms to simulate buried streams," J. Hyd. Div., ASCE, 40(6):670-675
- Li, B., and Garga, V.K., (1998), "The theoretical solution for seepage flow in overtopped rockfill," J. Hyd. Div., ASCE, 124(2):213-217
- Bingjum, Li . Vinod ,K.G and Michael, H.D., (1998), "Relationships for Non-Darcy flow in rockfill," Journal of Hydraulic Engineering.
- Samani, H.M.V, Samani, J.M. V, and Mohammad Shajannejad., (2003)," Reservoir Routing using Steady and Unsteady Flow through Rockfill Dams," Journal of Hydraulic Engineering, 129(6): 448-454
- Xiong, Y., and Melching C.S., (2005), "Comparison of Kinematic-Wave and Nonlinear Reservoir Routing of Urban Watershed Runoff,"Journal of Hydrologic Engineering, 10(1): 39-49
- Subhash C. Jain., (2000)," Open channel flow," John Wiley & Sons, INC Publishing.
- Hanif Chaudhry, M., (2008), "Open-Channel Flow," Second edition, John Wiley & Sons, INC Publishing.