



## شبیه سازی عددی سه بعدی جریان ناشی از شکست ناگهانی سد بر روی بستر متخلخل

اکبر صفرزاده<sup>۱\*</sup>، پیمان محسن زاده<sup>۲</sup>، سلیم عباسی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده مهندسی آب و آب‌های معدنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران  
<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۶

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۴

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

### کلمات کلیدی:

شکست سد

مدل سازی سه بعدی

بستر متخلخل

نفوذپذیری

موج سیلاب

**خلاصه:** پدیده شکست سد به دلیل خسارت جبران ناپذیر اقتصادی، امنیتی، تلفات انسانی و زیست محیطی بسیار حائز اهمیت می باشد. در این مطالعه، جریان سه بعدی ناشی از پدیده شکست سد بر روی بستر متخلخل مدل سازی عددی شده و تأثیر نفوذپذیری بستر متخلخل، عمق بستر متخلخل و عمق آب در بستر متخلخل در پایین دست، بر روی حرکت موج مثبت بررسی شده است. در این تحقیق، ابتدا سه مدل کلاسیک از شکست سد بر روی بستر صلب و متخلخل ساخته شده و نتایج با داده های آزمایشگاهی موجود مقایسه شده است. در ادامه، صحت سنجی نتایج به صورت مقایسه پروفیل های سطح آب و لبه موج سیلاب پیش بینی شده با مدل شکست سد روی بستر صلب و متخلخل انجام شده است. هدف اصلی، بررسی تفاوت ها و تشابه های پدیده شکست سد در بسترهای صلب و متخلخل می باشد. نتایج حاصل نشان داد، به دلیل تأثیر موج دینامیکی در لحظات اولیه شکست سد، یک پیک موضعی در آب‌نگاشت سیلاب رخ می‌دهد. وجود بستر متخلخل باعث کاهش شتاب حرکت موج سیلاب نسبت به حالت جریان روی بستر صلب شده و با افزایش میزان نفوذپذیری بستر، سرعت و در نتیجه میزان پیش‌روی موج سیلاب، کاهش می‌یابد. با افزایش عمق بستر متخلخل، میزان پیش‌روی لبه موج، دبی جریان سیلابی و ارتفاع سطح آزاد جریان کاهش یافته می‌یابد. با پیش‌روی جریان در طول کانال مقادیر دبی پیک ثبت شده در ایستگاه ها کاهش یافته و در مدل های بستر خشک کاهش دبی پیک در راستای کانال بیشتر است. بیشترین مقادیر بیشینه دبی در انتهای کانال با بستر متخلخل، در حالت بستر متخلخل اشباع رخ داده است.

### ۱- مقدمه

کرد. این محقق طی تحقیقاتی پیرامون شکست سد، معادلات سنت و نانت را برای تحلیل جریان ناشی از شکست سد در کانال مستطیلی به کار برد [۵ و ۴]. درس‌لر (۱۹۵۲) به بررسی اعمال اثرات زبری بر حرکت موج سیلاب پرداخت. بدین منظور فرمول زبری شزی را به معادلات غیرخطی آب های کم عمق اضافه نمود [۶].

لاجر و هاگر (۱۹۹۸) به منظور بررسی پدیده شکست سد، آزمایش های زیادی را در کانال منشوری مستطیلی با جدار صاف انجام دادند. براساس آزمایش های اولیه، مشخص شد که جریان ناشی از شکست سد، به شرط آن که عمق اولیه جریان حداقل ۳۰۰ میلی متر باشد، از قانون شبیه سازی فرود تبعیت می کند [۷]. تان و چوو (۲۰۰۸) به مدل سازی یک بعدی پدیده شکست سد با استفاده

جریان شکست سد را می توان به صورت آزاد شدن جریان آب کنترل نشده ناشی از خرابی جزئی یا فاجعه بار سازه های نگهدارنده آب بیان کرد [۲ و ۱]. آزاد شدن ناگهانی آب ذخیره شده در یک مخزن به دلیل فروپاشی آبی سد می تواند منجر به مشکلات جدی محیطی در دره پایین دست، خطر برای زندگی انسان و خسارت شدید اقتصادی شود. بنابراین، جریان شکست سد نگرانی عمده ای در حوزه مهندسی هیدرولیک و محیط زیست است [۳]. ریتز (۱۸۹۲) حل تحلیلی مسئله شکست سد در کانال مستطیلی و بدون اصطکاک در پایین دست یک دریاچه و مخزن بی نهایت در بالادست را مطالعه \* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Safarzadeh@uma.ac.ir



و دو بعدی را ترکیب نموده و از این مدل ترکیبی یک بعدی- دو بعدی برای شبیه‌سازی جریان شکست سد در مخزن سد و انتشار امواج ناشی از شکست سد در کانال پایین دست استفاده نمودند [۱۴]. اسکار و جانسون (۲۰۱۷) ضمن بازبینی مطالعات ریتر در مورد جریان ناشی از شکست سد بر روی بستر خشک به مطالعه‌ی دینامیک موج مثبت و منفی ناشی از شکست سد با توجه به اثر اصطکاک بستر بر روی موج مثبت پرداختند [۱۵]. جوزدانی و همکاران (۲۰۱۱) ضمن مدل‌سازی آزمایشگاهی پدیده شکست سد، با استفاده از روش پردازش تصاویر به بررسی مشخصات هیدرولیکی سیلاب ناشی از شکست سد پرداختند. آزمایش‌ها در دو حالت بستر خشک و بستر مرطوب در پایین دست درجه صورت پذیرفته و نتایج اولیه در قالب فیلم ثبت شده و به تصویر تبدیل شده است [۱۶]. صفرزاده (۲۰۱۷) شبیه‌سازی عددی سه بعدی جریان ناشی از شکست ناگهانی سد در مسیرهای قوسی بر روی بستر صلب را با مطالعه جریان در قوس رودخانه با تغییر در زوایای قوس، نحوه پیش‌روی پیشانی موج سیلاب و همچنین آب‌نگاشت سیلاب بررسی کرد [۱۷].

در مطالعات پیشین سناریوهای متعددی در مورد پدیده شکست سد و جریان ناشی از آن بر روی بستر صلب توسط محققان مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است، لیکن تاثیر نفوذپذیری بستر بر هیدرودینامیک جریان‌های غیر دائم سریع، بررسی نشده است. در این مطالعه به منظور بررسی هیدرودینامیک موج سیلاب بر روی بستر متخلخل، شبیه‌سازی عددی پدیده شکست سد بر روی بستر متخلخل انجام شده است. اهداف اصلی تحقیق حاضر عبارتند از:

- ۱- تحلیل هیدرودینامیکی حرکت موج سیلاب ناشی از شکست سد بر روی بستر متخلخل در حالت تر و خشک
- ۲- مقایسه نتایج مربوط به پروفیل سطحی جریان ناشی از شکست سد با توجه به میزان نفوذپذیری و قطر دانه‌های بستر
- ۳- بررسی آب‌نگاشت سیلاب با تغییر در پارامترهای هندسی و مشخصات مصالح بستر.

## ۲- مبانی تئوریک جریان در محیط متخلخل و معادلات حاکم

### بر جریان

#### ۲-۱- مفاهیم جریان در محیط متخلخل

طبق رابطه داری، ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت

از روش بلوک‌های لاگرانژی در شبکه اوپلری (LEBM) پرداختند. ایشان ابتدا شکست ناگهانی سد بر روی بستر خشک بدون اصطکاک و سپس بستر پایین دست تر با ارتفاع آب ( $h_w$ ) مختلف را مدل‌سازی کرده و با نتایج حاصل از مطالعات ریتر (۱۸۹۲) و استوکر (۱۹۵۷) مقایسه نموده‌اند [۸]. تان و چوو (۲۰۰۹) با روش لیتس بولمن<sup>۱</sup> شکست سد را با توجه به نتایج آزمایش شکست سد لابر و هاگر مدل و صحت‌سنجی کردند. براساس نتایج به دست آمده اصطکاک مهم‌ترین عامل در حرکت پیشانی موج بوده و سرعت به صورت خطی از مقدار حداکثر در پیشانی موج تا پشت سد کاهش پیدا می‌کند. این محققان به بررسی تاثیر طول مخزن سد بر حداکثر عمق سیلاب در پایین دست سد پرداخته و یک پارامتر بی بعد تحت عنوان پارامتر مخزن با طول محدود پیشنهاد کردند [۹].

مامبرتی و همکاران (۲۰۰۸) برای پیش‌بینی حرکت سیلاب و جریان گل‌آلود یک مدل عددی بر پایه معادلات یک بعدی سنت و نانت توسعه دادند و برای حل معادلات الگوی مک کورمک را به کار گرفتند. این تکنیک برای تعیین کردن انتشار موج و پروفیل موج ناشی از جریان دوفازی گل‌آلود در نتیجه شکست کامل و آبی یک سد مخزنی به کار رفته است [۱۰].

پیلوتی و همکاران (۲۰۱۰) روش ساده‌ای برای تعیین آب‌نگاشت ناشی از شکست ناگهانی سد ارائه کردند. این روش از یک بیان ساده برای هندسه مخزن سد استفاده کرده و بر پایه حل عددی معادلات آب‌های کم عمق برای مطالعه روند تغییرات دو بعدی سطح آب در مخزن می‌باشد [۱۱]. چانگ و همکاران (۲۰۱۱) یک مدل عددی بدون شبکه را برای بررسی امواج شکست سد بر اساس مدل آب کم‌عمق در یک کانال یک بعدی ارائه کردند. مدل ارائه شده معادلات آب کم‌عمق را با روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) حل کرد [۱۲]. تاواتچای و راتاناپیتیکان (۱۹۹۹) یک مدل هیدرودینامیکی دو بعدی با عمق متوسط برای شبیه‌سازی موج ناشی از شکست سد برای بستر خشک را توسعه دادند. در این مدل، محاسبات عددی با استفاده از طرح تفاضل نامتقارن در ترکیب با طرح مک کورمک اصلاح شده انجام شده است [۱۳]. لی (۲۰۰۶) ابتدا مدل‌های یک و دو بعدی برای بررسی جریان شکست سد توسعه دادند و این مدل‌ها را توسط داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی کردند، سپس مدل‌های یک بعدی

غیرخطی می باشد. محققان مختلف بر روی تعیین ضرایب معادله فورشه‌ایمر کار کرده‌اند. از جمله معروف‌ترین روابط به فرم معادله فورشه‌ایمر معادله ارگون (۱۹۵۲) می باشد [۲۰].

$$i = \frac{150\nu(1-\varphi)^2}{g\varphi^3d_m^2}U^f + \frac{1.75(1-\varphi)}{g\varphi^3d_m}U^f |U^f| \quad (۴)$$

## ۲-۲- معادلات حاکم و معرفی نرم افزار

در این پژوهش، شبیه سازی سه بعدی جریان ناشی از شکست سد با استفاده از نسخه ۱۱ نرم افزار ۳D-Flow انجام گرفته است. معادلات حاکم بر مسئله مورد نظر، معادلات بقای جرم و اندازه حرکت می‌باشند. این معادلات در جریان های دو فازی در سیستم مختصات کارتزین ( $x_i$ ) با مولفه های سرعت ( $u_i$ ) و  $i=1, 2, 3$  به صورت زیر بیان می شوند:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j A_i) = 0 \quad (۵)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u_j A_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + G_i + f_i - b_i \quad (۶)$$

در معادلات فوق،  $\vec{n}$  گالی آب،  $V_F$  جزء حجم باز برای برقراری جریان در الگوریتم FAVOR و  $A_i$  جزء سطح باز برای برقراری جریان در جهت  $i$  ام می باشد. در معادلات بقای اندازه حرکت،  $p$  بیانگر فشار بوده و  $G_i$  ( $f_i$ ) ترتیب بیانگر مولفه های شتاب کالبدی و شتاب ناشی از لزجت برای راستای  $i$  ام می باشند. شتاب ناشی از لزجت شامل اثرات لزجت مولکولی و گردابه ای (ناشی از آشفتگی جریان) می باشد. در این نرم افزار برای مدل سازی تاثیر محیط متخلخل بر جریان، یک ترم مقاومتی تحت عنوان ترم درگ  $b_i$  (ه) سمت راست معادله مومتم به شکل زیر افزوده شده است:

$$b_i = F_d U^m = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (۷)$$

در معادله فوق  $U^m$  رعرت جریان در حفرات محیط متخلخل بوده و به صورت زیر نوشته می شود:

جریان عبوری در محیط متخلخل به فرم زیر می باشد:

$$i = -\frac{1}{k} U_i^f = a U_i^f \quad (۱)$$

در رابطه فوق  $U_i^f$  رعرت جریان در جهت  $i$  ام بوده،  $k$  فوذپذیری یا هدایت هیدرولیکی مصالح و  $i$  رادیان هیدرولیکی می باشد. رابطه زیر برای ارتباط بین نفوذپذیری  $k$  (تخلخل  $\varphi$ ) قطر ذرات ( $d_m$ ) رقرار است (کوزنی-کارمن، ۱۹۳۷) [۱۸].

$$k = \frac{\rho g}{\mu} \frac{\varphi^3}{180(1-\varphi)^2} d_m^2 \quad (۲)$$

رابطه داری فقط برای جریان های لایه ای (با عدد رینولدز کمتر از ده بر مبنای قطر ذره) صادق بوده و به مدل خطی معروف است. رفتار جریان در سازه های آبی ساخته شده با مصالح درشت دانه سنگ ریزه های به دلیل بزرگی اندازه ذرات و منافذ و بروز سرعت های بالا و آشفتگی در جریان، بسیار پیچیده است. از این رو بر خلاف محیط های ریزدانه که جریان در آنها آرام و قانون داری در آنها معتبر است، در محیط های درشت دانه نمی توان از قانون داری برای برآورد پارامترهای مختلف جریان استفاده نمود. برای این منظور از روابط دیگری که بیان کننده ارتباط غیرخطی بین سرعت و گرادیان هیدرولیکی در این نوع محیط ها می باشد و به روابط غیرخطی (غیر داری) معروف می باشند، استفاده می شود.

اولین مدل غیرخطی برای جریان در محیط های متخلخل توسط فورشه‌ایمر (۱۹۰۱) ارائه شده است. وی با افزودن یک ترم درجه دوم سرعت، معادله زیر را برای بین ارتباط گرادیان هیدرولیکی و سرعت ارائه نمود [۱۹].

$$i = A U^f + B U^f |U^f| \quad (۳)$$

در رابطه فوق، ضرایب بعد دار  $A$  و  $B$  ضرایب مقاومتی معروف بوده و به ویسکوزیته سیال، دانه بندی مصالح و همچنین رژیم جریان وابسته هستند. در واقع در معادله بالا، جمله اول بیانگر افت خطی مشابه معادله داری بوده و ترم دوم بیانگر تاثیر اینرسی و افت

جریان استفاده می‌کند. در این نرم افزار، تخلخل و ضرایب  $B$  و  $A$  عنوان اطلاعات محیط متخلخل وارد می‌شوند [۲۰]. با توجه به رابطه (۱۲)، ضریب  $A$  دارای مقدار مشخصی بوده ولی در ضریب  $B$  مقدار عدد صورت کسر در محدوده  $1/8$  تا  $4$  تغییر می‌کند. لذا استفاده از این روابط منوط به انجام کالیبراسیون مدل برای تعیین مقدار مناسب صورت کسر می‌باشد. عدد صورت کسر را  $\alpha$  امیده و در این تحقیق مقدار مناسب این پارامتر از طریق آنالیز حساسیت تعیین خواهد شد. برای مدل‌سازی آشفتگی در این تحقیق از مدل  $k-\epsilon$  RNG برای بستن معادلات متوسط‌گیری شده زمانی رینولدز استفاده شده است. معادلات غیردائم بقای جرم با روش حجم محدود، حل عددی شده‌اند. سطح آزاد جریان با استفاده از الگوریتم جزء حجم سیال (VOF) تعیین می‌شود. همچنین برای تعریف و شبیه‌سازی یک مانع و احجام صلب از روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR) استفاده می‌شود. روش‌های (VOF) و (FAVOR) مثال‌هایی از روش‌های جزء حجمی هستند.

در این نرم‌افزار، معادلات شبه‌ضمنی حاصل، به صورت تکراری برای حل عددی جریان سیال غیرنیوتنی و با استفاده از تکنیک‌های تخفیف، حل می‌شوند و پس از خطی‌سازی سیستم معادلات غیرخطی، این معادلات به فرم ضمنی نوشته شده‌اند، که در این مقاله از تکنیک GMRES به عنوان حل‌گر ضمنی فشار استفاده شده است. روش GMRES یک روش تکراری برای حل دستگاه معادلات خطی است. به علت هزینه متعامدسازی یا محدود بودن ذخیره‌سازی ممکن است نیاز به شروع مجدد حل معادله باشد. در حالت کلی، شروع مجدد موجب کند شدن همگرایی روش GMRES می‌گردد. با کاهش اثر مقادیر ویژه کوچک، همگرایی روش را می‌توان بهبود بخشید.

در مورد استفاده موفقیت‌آمیز نرم‌افزار شبیه‌سازی سه بعدی جریان (Flow-3D) می‌توان به مطالعات پرسیایی و دهدار بهبهانی (۲۰۱۶)، دهدار بهبهانی و پرسیایی (۲۰۱۶)، نجفیان و همکاران (۲۰۱۷)، صفرزاده و مهاجری (۲۰۱۸)، فتحی مقدم و همکاران (۲۰۱۸) و پرسیایی و مرادنژاد (۲۰۱۸) اشاره کرد [۲۱-۲۸].

$$U^m = \frac{U^f}{\phi} \quad (8)$$

$\nabla p$  یانگر گرادیان فشار بوده و داریم:

$$\nabla p = \hat{n} g_i \quad (9)$$

در این نرم‌افزار، رابطه توان دوم بین گرادیان سرعت و فشار به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$-\nabla p = aU^f + bU^{f^2} \quad (10)$$

ضرایب معادله فوق به صورت می‌باشند:

$$a = A \frac{\mu(1-\phi)^2}{\phi^3} \quad b = B \frac{\mu(1-\phi)^2}{\phi^3} \quad (11)$$

که در آن:

$$A = \frac{150}{d_m^2} \quad B = \frac{1.8to 4}{d_m} \quad (12)$$

با توجه به روابط (۷) و (۸) داریم:

$$F_d = \frac{-\frac{1}{\rho} \nabla p}{U^m} = \frac{\nabla p \phi}{-\rho U^f} \quad (13)$$

با جایگذاری رابطه (۱۰) در معادله فوق:

$$F_d = A \frac{\mu(1-\phi)^2}{\rho \phi^2} + B \frac{\mu(1-\phi) Re_p}{\rho \phi^2 d_m} \quad (14)$$

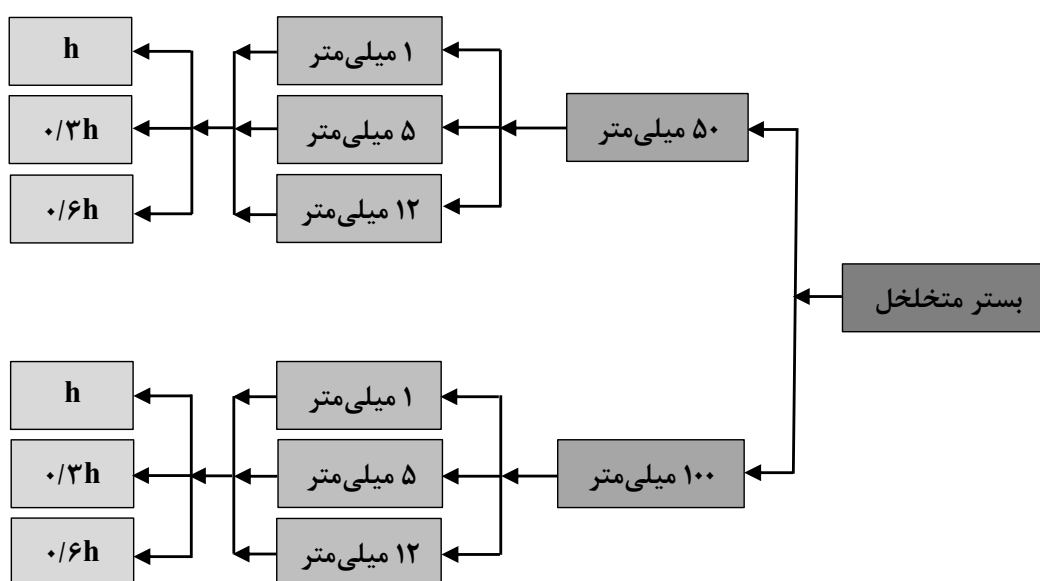
که در آن،  $Re_p$  عدد رینولدز بر حسب قطر ذره می‌باشد:

$$Re_p = \rho U^m d_p / \mu \quad (15)$$

با مقایسه روابط فوق با معادله ۴ در واقع نرم‌افزار 3D-Flow از رابطه ارگون (۱۹۵۲) برای محاسبه مقاومت محیط متخلخل در مقابل

جدول ۱. مشخصات و سناریوهای مدل سازی های عددی در مطالعه حاضر  
**Table 1. Characteristics and Scenarios of Numerical Modeling in the Present Study**

مدل ها	عمق بستر (میلی متر)			قطر ذرات (میلی متر)			ارتفاع آب پایین دست (میلی متر)		
روی بستر صلب	۰	-	-	-	-	-	-	-	-
داخل محیط متخلخل	-	-	-	-	۵	۱۲	-	-	-
روی بستر متخلخل	-	۵۰	۱۰۰	۱	۵	۱۲	۰/۳h	۰/۶h	۱h



شکل ۱. فلوچارت گام بندی مدل های عددی انجام شده بر روی بستر متخلخل در مطالعه حاضر  
**Fig. 1. Flowchart of numerical modeling steps performed on porous media in the present study**

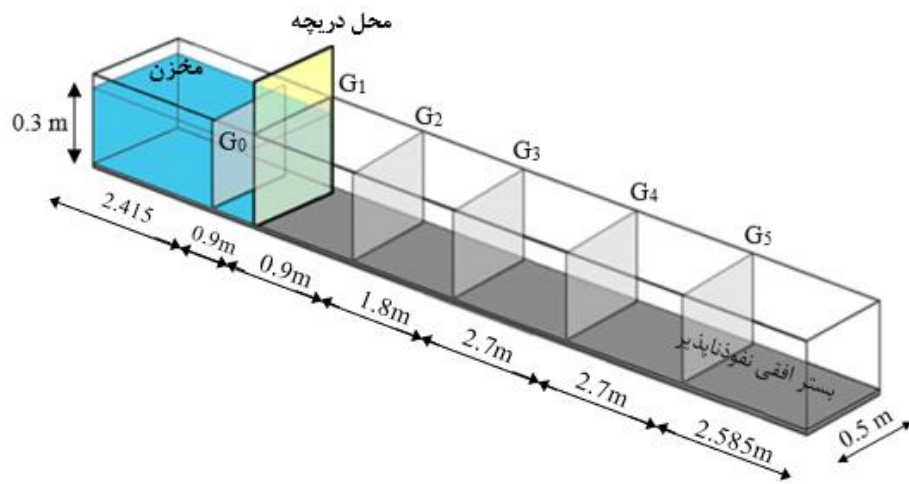
روی بستر متخلخل، ابتدا با استفاده از مدل آزمایشگاهی لابر و هاگر (۱۹۹۸) شکست سد بر روی بستر صلب مطابق شکل ۱ و همچنین مدل قیمیر (۲۰۰۹) جریان سیال در داخل محیط متخلخل طبق شکل ۵ صحت سنجی انجام گرفته است.

### ۳-۱- صحت سنجی شبیه سازی عددی شکست سد بر روی بستر صلب

مدل شکست سد بر روی بستر افقی و صلب و طبق نتایج

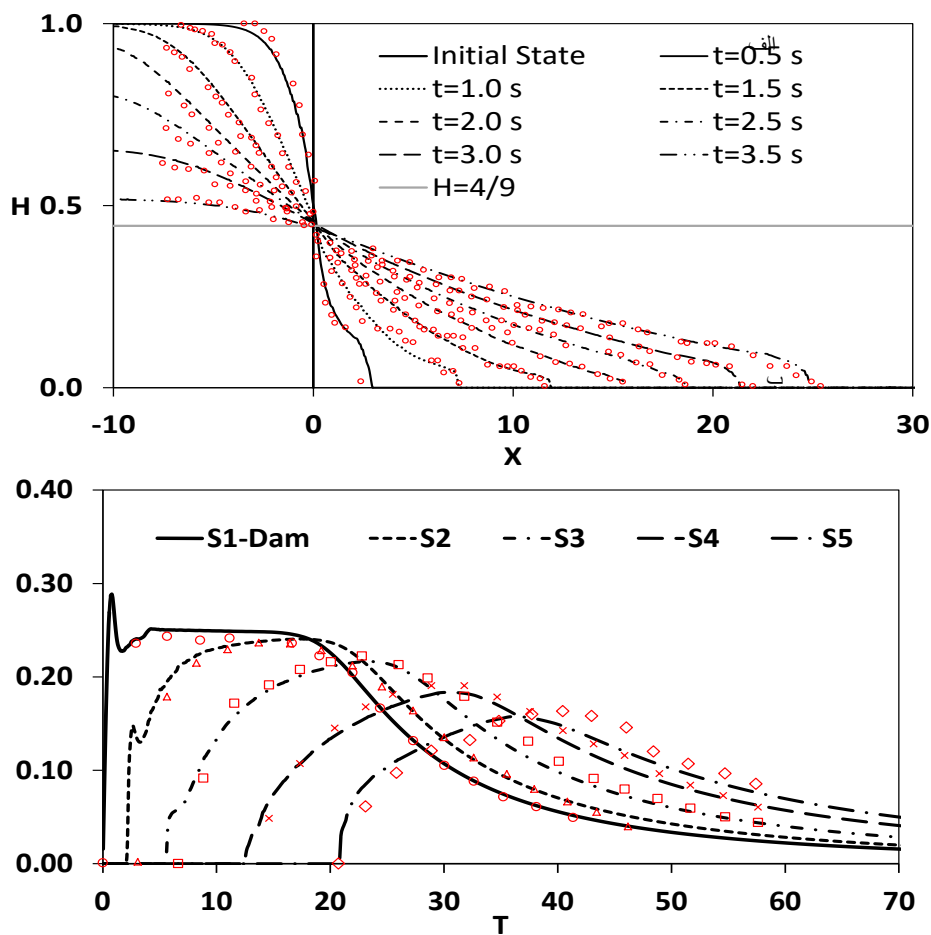
### ۳- معرفی و صحت سنجی مدل های عددی شکست سد و جریان در محیط صلب و متخلخل

جدول ۱ مشخصات و سناریوهای مدل سازی عددی در مطالعه حاضر را نشان می دهد، همچنین شکل ۱ گام های تحقیق را برای مدل های انجام شده بر روی بستر متخلخل نشان می دهد، که در دو عمق بستر ۵۰ و ۱۰۰ میلی متر از دانه های با قطر ذرات ۱، ۵ و ۱۲ میلی متر استفاده شده و همچنین برای هر کدام از قطر ذرات عمق آب در پایین دست به مقادیر  $h$ ،  $0/3h$  و  $0/6h$  تنظیم شده است. قبل از بررسی عددی جریان ناشی از شکست ناگهانی سد بر



شکل ۲. مشخصات هندسی و جزئیات ایستگاه‌های اندازه‌گیری آب‌نگاشت شکست ناگهانی سد در بستر افقی-مستقیم

Fig. 2. Geometric properties and details of sudden dam break hydrograph measurement stations in horizontal-direct bed



شکل ۳. مقایسه نتایج آزمایشگاهی (علائم) و شبیه‌سازی عددی (خطوط) در ایستگاه‌های مختلف شکست سد در مسیر افقی-مستقیم بر روی بستر صلب (الف): پروفیل‌های سطح آب و (ب): آب‌نگاشت‌های سیلاب

Fig. 3. Comparison of laboratory results (symptoms) and numerical simulations (lines) at different dam breakdown stations in horizontal-direct path on solid bed (a): surface profiles and (b): flood hydrographs

مطابق با داده های آزمایشگاهی بوده و در مراحل پیک سیلاب و شاخه نزولی سیلاب دارای هم خوانی بسیار خوبی با داده های آزمایشگاهی است. لازم به ذکر است که از دبی بی بعد شده  $Q = q / \sqrt{gh_0^3}$  این شکل استفاده شده است که در آن،  $q$  یانگر دبی در واحد عرض می باشد. همچنین پارامتر زمان به صورت  $T = t\sqrt{g/h_0}$  بی بعد شده است. آبنگاشت دبی مطابق شکل ۳ دارای یک شاخه صعودی و نزولی است و در محل شکست سد در زمان کوتاهی مقدار ثابت خود را در بازه  $20 \leq T \leq 5$  حفظ می کند، اما در ایستگاه های بعدی چنین شرایطی وجود ندارد، همچنین دبی پیک به تدریج از ایستگاه یک به بعد کاهش پیدا کرده و زمان وقوع دبی پیک هم به تاخیر می افتد. در شکل ۲ موقعیت ایستگاه ها نسبت به محل سد نشان داده شده است. با توجه به آبنگاشت ایستگاه S۱ مقدار دبی پیک موضعی حدود  $0/3$  بوده در حالی که دبی پیک کلی، برابر  $0/25$  می باشد. علت وقوع این پدیده، شکل گیری دو نوع موج در لحظات اولیه شکست سد می باشد. با شروع شکست، ابتدا موج اولیه از لایه های تحتانی شروع به حرکت نموده و در ادامه، توده های فوقانی سیال به صورت سقوط آزاد بر روی لایه های تحتانی تخلیه شده و منجر به شکل گیری یک موج جدید تحت عنوان موج دینامیکی می شود. افزوده شدن حجم آب ناشی از موج دینامیکی به حجم آب موج اولیه باعث افزایش ناگهانی دبی عبوری از مقطع سد می شود. با حرکت به سمت پایین دست، به واسطه پخش موج دینامیکی بر روی موج اولیه، اثر آن بر روی آبنگاشت سیلاب از بین می رود.

### ۳-۲- صحت سنجی شبیه سازی عددی جریان ناشی از شکست سد در داخل محیط متخلخل

قیمیر (۲۰۰۹) در مطالعات خود در مورد جریان سیال در داخل محیط نفوذ پذیر آزمایش هایی انجام داد و در دو مورد از این سری آزمایش ها به منظور شبیه سازی محیط متخلخل، از گوی های کره ای به قطر ۵ و ۱۲ میلی متر استفاده کرد. در شکل ۴ سایر جزئیات مدل آزمایشگاهی برای ذرات ۵ و ۱۲ میلی متر قابل مشاهده است.

با توجه به شکل ۴، ضمن اعمال نیروی ثقلی و شرایط مرزی، به واسطه ی وجود گرادبان فشار، حرکت جریان به آرامی از بالادست به سمت پایین دست بر قرار شده و سیال در محیط متخلخل نفوذ

آزمایشگاهی لابر و هاگر (۱۹۹۸) مطابق شکل ۲ طول مخزن  $3/315$  متر، طول کانال ۱۴ متر، عرض کانال  $0/5$  متر، عمق اولیه آب در مخزن  $0/3$  متر و ضریب زبری مانینگ  $0/10$  در نظر گرفته شده است. همچنین در شبکه بندی مدل شکست سد بر روی بستر صلب و مسیر افقی-مستقیم از دو میلیون سلول محاسباتی استفاده شده است.

برای دیواره های جانبی و کف از شرط مرزی دیواره<sup>۱</sup>، شرط مرزی تقارن<sup>۲</sup> برای مرز بالای میدان و برای قسمت خروجی میدان از شرط مرزی جریان خروجی<sup>۳</sup> استفاده شده است. برای تعیین آبنگاشت دبی در نرم افزار، از ۶ بافل<sup>۴</sup> در راستای کانال مطابق شکل ۲ استفاده شده است، به طوری که تخلخل بافل ها برابر یک قرار داده شده تا جریان از آن بتواند عبور کند. با توجه به ابعاد آزمایش لابر و هاگر، عمق آب ۳۰ سانتی متر در مخزن تثبیت شده است، بدین منظور عمق مزبور مخزن به عنوان شرط اولیه به صورت یک ستون آب ساکن با عمق ثابت به مدل اعمال شده است.

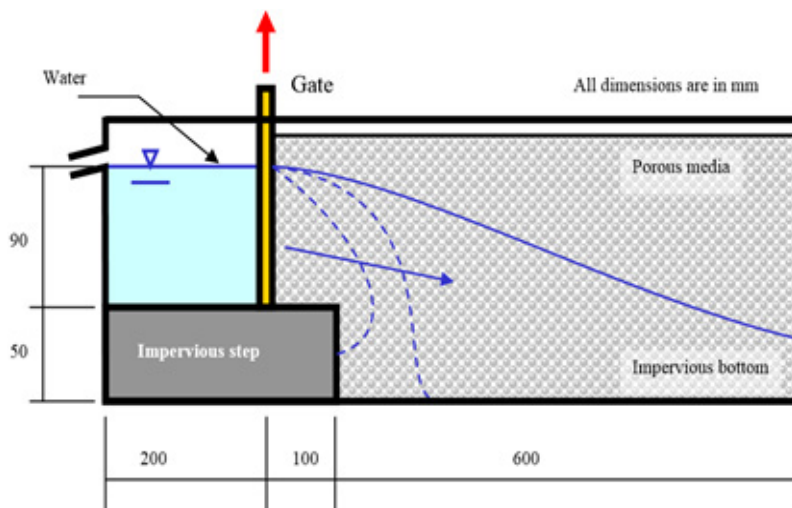
برای بررسی تاثیر اندازه شبکه بر پروفیل سطح آب در شرایط شکست سد و به منظور آنالیز حساسیت مدل به اندازه مش، به ترتیب تعداد سلول ۵۰۰۰۰، ۵۰۰۰۰۰ و ۲ میلیون به مدل اعمال شد. با زیاد شدن تعداد تقسیمات شبکه، دقت نتایج حاصل از شبیه سازی در قسمت پیشانی موج افزایش یافته و تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی حاصل می شود.

در شکل ۳-الف نتایج مدل عددی پروفیل سطح آب در زمان های مختلف با نتایج آزمایشگاهی شکست سد در بستر افقی لابر و هاگر (۱۹۹۸) مقایسه شده است. نمودار براساس  $X=x/h$  و  $H=h/h$  بی بعد شده است، که  $h$  ارتفاع اولیه مخزن،  $X$  معرف موقعیت مکانی یک نقطه نسبت به محل سد و  $h$  عمق جریان است. با توجه به شکل و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، نتایج با داده های آزمایشگاهی کاملاً منطبق بوده و در ثانیه اول اختلاف ناچیزی در ناحیه پیشانی موج وجود دارد. مقایسه کمی نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی نشانگر میانگین خطای نسبی،  $0/0009$  و مجذور میانگین مربعات خطا،  $0/0013$  می باشد.

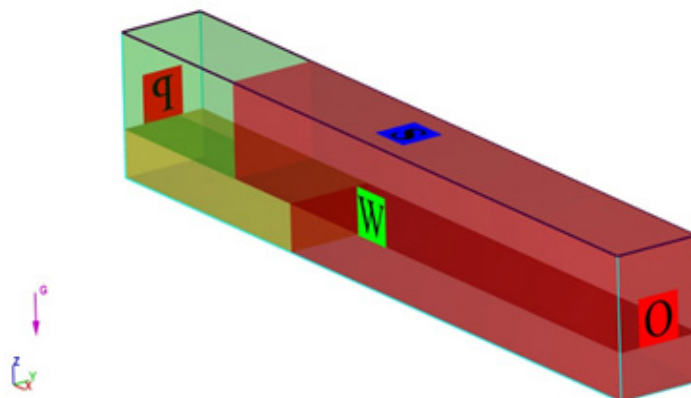
مطابق شکل ۳-ب آبنگاشت سیلاب در ایستگاه های مختلف نیز

- 1 Wall
- 2 Symmetry
- 3 Outflow
- 4 Baffle





شکل ۴. جزئیات مدل آزمایشگاهی شکست سد در محیط متخلخل با ذرات به قطر ۵ و ۱۲ میلی متر (ابعاد به میلی متر).  
**Fig. 4. Laboratory model details of dam breakage in porous media with 5 and 12 mm in diameter**  
 (dimensions in mm)



شکل ۵. شرایط مرزی مورد استفاده در مدل عددی جریان در محیط متخلخل با ذرات به قطر ۵ میلی متر  
**Fig. 5. Boundary conditions used in a numerical flow model in porous media with 5 mm diameter**

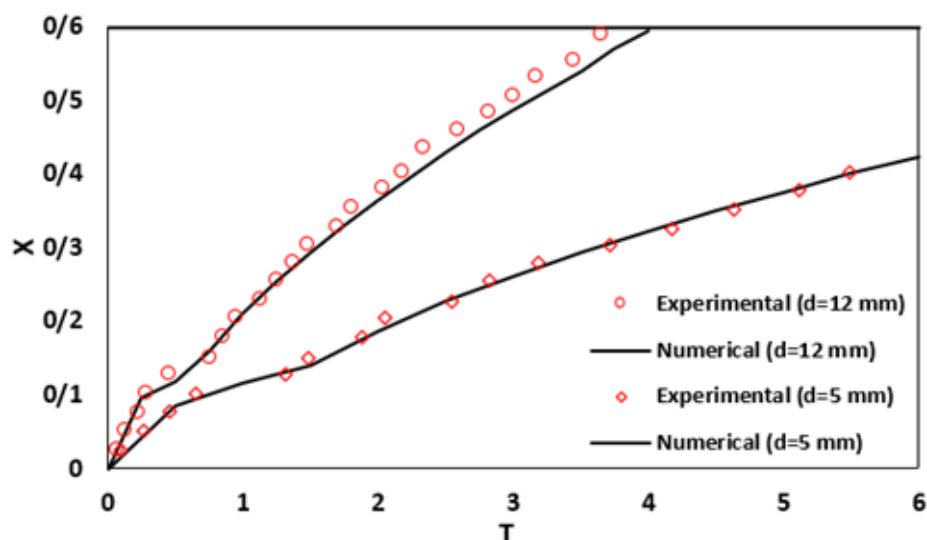
(۱۲) به عنوان پارامترهای اصلی محیط به نرم افزار داده شود، لذا لازم است تا ضرایب درگ محاسبه شوند. از بین این دو ضریب، ضریب A مربوط به بخش خطی مدل بوده و از طریق رابطه (۱۲) به دست می آید. حال نکته ی مهم نحوه ی تعیین ضریب درگ B می باشد و با توجه به استفاده از این ضریب در بخش غیرخطی مدل فورشه ایمر لازم است تا با استفاده از نتایج مدل آزمایشگاهی این ضریب بر اساس حساسیت سنجی، به درستی تعیین شود. همان گونه که در رابطه ی (۱۲) اشاره شد، صورت رابطه ی تعیین پارامتر B از ۱/۸ تا ۴ تغییر می کند و مقدار دقیق عدد صورت بستگی به خواص محیط متخلخل دارد.

می کند. برای مدل سازی آشفتگی از مدل RNG استفاده شده و نتایج مقایسه شده است.

مطابق شکل ۵ مرز بالای میدان محاسبات ( $Z_{max}$ )، مرز بالادست ( $X_{min}$ ) فشار معلوم تعریف شده و تراز آب ۰/۹ متر اعمال شده است. برای مرز پایین دست ( $X_{max}$ ) از شرط مرزی جریان خروجی، برای مرزهای ( $Y_{min}$ ) و ( $Y_{max}$ ) و ( $Z_{min}$ ) شرط دیوار و هم چنین برای مرز فوقانی ( $Z_{max}$ ) به صورت تقارن در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به نفوذپذیری بالا، جریان آشفته فرض شده است.

در صورت استفاده از مدل غیر خطی برای شبیه سازی محیط متخلخل، لازم است تا تخلخل و ضرایب درگ (A و B) مطابق رابطه





شکل ۶. مقایسه پیشروی پیشانی موج در داخل محیط متخلخل با قطر ذرات ۵ و ۱۲ میلی متر با نتایج آزمایشگاهی (علائم) و عددی (خطوط)

Fig. 6. Comparison of the wave front position between experimental (symbols) and numerical (line) results for flow inside of the vertical porous column of different grain sizes

با توجه به صحت سنجی صورت گرفته در مدل های پیشروی موج روی بستر صلب و نفوذ سیال در محیط متخلخل با دو قطر ذرات ۵ و ۱۲ میلی متر و انطباق نتایج حاصل از مدل عددی و آزمایشگاهی، در ادامه با تلفیق این دو نوع مسئله، به حل عددی مسئله شکست سد بر روی بستر متخلخل و حرکت موج در تماس با هوا و محیط متخلخل پرداخته شده است.

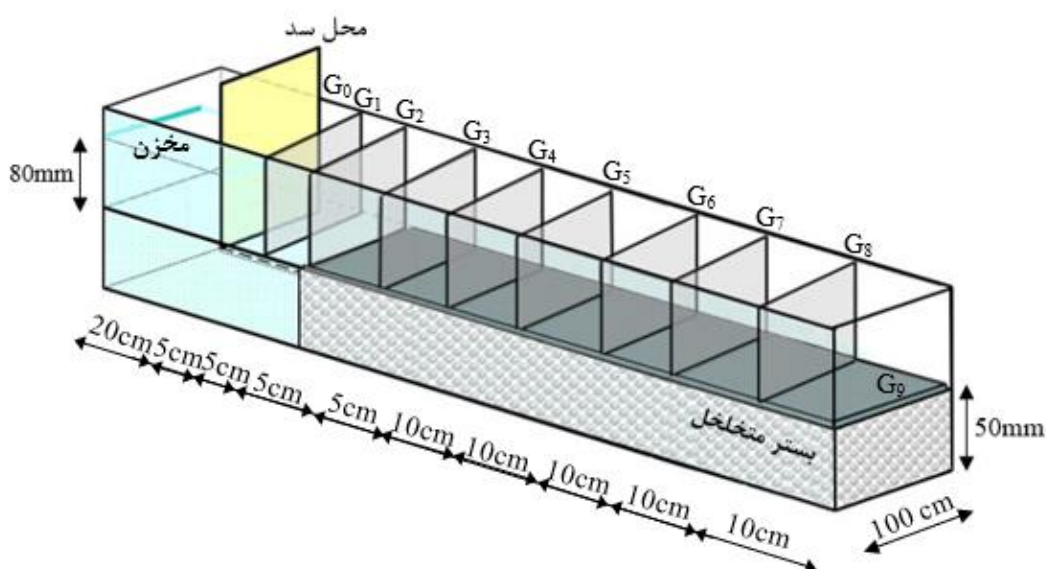
#### ۴- شبیه سازی عددی شکست سد بر روی بستر متخلخل

در بخش قبل، مدل عددی شکست سد بر روی بستر صلب و جریان غیرداریسی سیال در داخل محیط متخلخل ساخته شده و صحت سنجی بر روی متغیرهای مسئله انجام شد. در این بخش، مدل عددی جریان ناشی از شکست سد بر روی بستر متخلخل ساخته شده و پس از صحت سنجی نتایج، مدل های عددی برای محدوده وسیعی از پارامترهای هندسی، هیدرولیکی و شرایط تخلخل بستر، اجرا و نتایج ارائه شده است. برای مدل سازی عددی پیشروی موج بر روی بستر متخلخل، از ابعاد مخزن و کانال آزمایش شکست سد روی بستر متخلخل قیمیر (۲۰۰۹) استفاده شده است. در شکل ۷ هندسه ی مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است.

بر خلاف ضریب A که تنها به قطر ذرات بستگی دارد و از طریق رابطه (۱۲) به دست می آید، به منظور انجام آنالیز حساسیت بر روی تاثیر عدد صورت کسر ضریب درگ B (که در اینجا  $\alpha$  نامیده می شود)، چهار مقدار برای  $\alpha$  در نظر گرفته شد (۲، ۲/۴، ۳/۴ و ۴) و برای هر مقدار مورد نظر، مدل عددی جریان سیال در داخل محیط متخلخل حل شده است. برای تعیین مقدار مناسب  $\alpha$ ، موقعیت پیشانی موج مدل شده بر روی کف صلب که با  $x_p$  (برحسب متر) نشان داده شد، در مدل عددی با مقدار آزمایشگاهی اندازه گیری شده آن ( $x_m$  برحسب متر) در زمان  $t = 3/75$  s مقایسه شده است. بدیهی است مقدار صحیح  $\alpha$  (در مدل حاضر  $\alpha = 3/4$ ) زمانی به دست می آید، که به ازای آن نتایج مقادیر مدل سازی شده و آزمایشگاهی برابر باشند

$$(x_{p(d=5mm)} = 0.328m, x_{m(d=5mm)} = 0.327m)$$

در شکل ۶ نتایج مدل های عددی پیشروی پیشانی موج در داخل محیط متخلخل در طول زمان با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در مدل عددی، نتایج داده های مربوط به موقعیت پیشانی موج سیال در فواصل زمانی ۰/۵ ثانیه برداشت شده و محل درپچه به عنوان مبدا در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، مدل عددی دقت بسیار بالایی در شبیه سازی موقعیت پیشانی موج در محیط متخلخل دارد.



شکل ۷. مشخصات هندسی و جزئیات ایستگاه‌های اندازه‌گیری آب‌نگاشت شکست ناگهانی سد بر روی بستر متخلخل

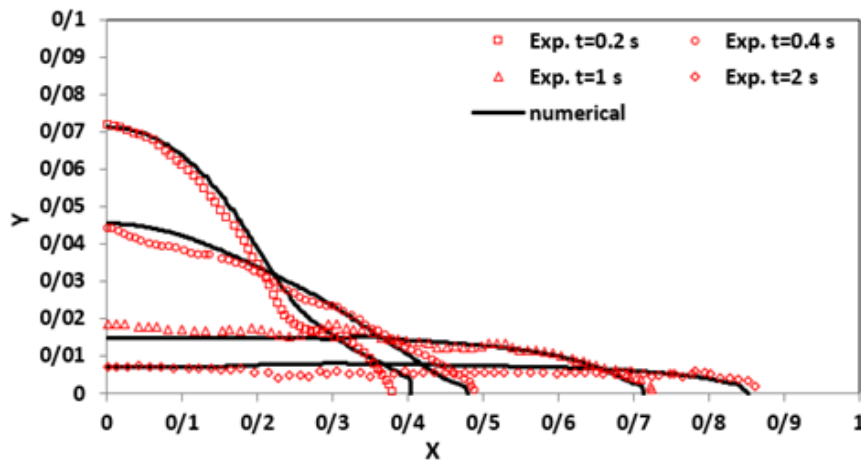
Fig. 7. Geometric properties and details of sudden dam break hydrograph measuring stations on porous bed

به یکسان بودن جنس و قطر ذرات مصالح، از مقادیر به دست آمده، استفاده شده است. در شکل ۸ نتایج مدل عددی پروفیل سطح آب در زمان‌های  $t = 0.2$  s تا  $t = 2$  s نتایج آزمایشگاهی جریان بر روی بستر متخلخل مقایسه شده است. که مقدار خطای پروفیل سطح آب بر روی بستر متخلخل بین نتایج آزمایشگاهی و عددی ۸/۱۱ درصد می‌باشد. روند تغییرات زمانی شکست سد و نحوه حرکت موج سیلاب به سمت پایین دست و همچنین پسروری موج منفی به داخل مخزن در مدل عددی با دقت خوبی پیش بینی شده است. با توجه به تصاویر مزبور، در لحظات اول، موج سیلاب مشابه جریان ناشی از شکست سد در بستر صلب بوده ولی در ادامه به واسطه وجود تخلخل در بستر کانال و نفوذ بخشی از جریان آب در بستر متخلخل، باعث افت شدید سطح آب و هموار شدن آن شده است.

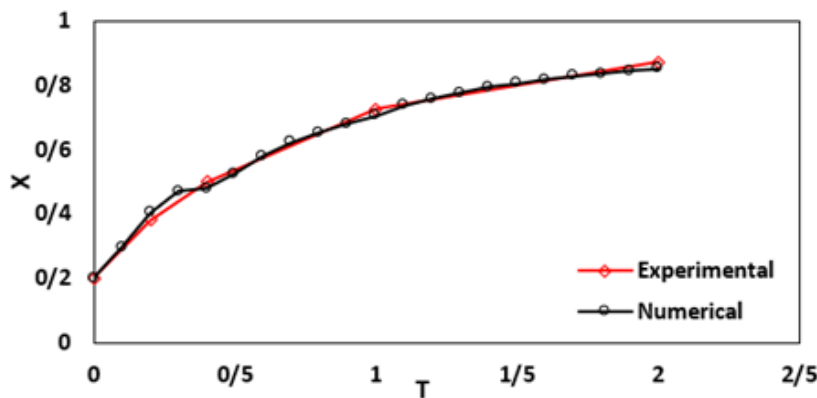
نتایج مدل‌های عددی پیش‌روی پیشانی موج بر روی بستر متخلخل در طول زمان با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. با توجه به شکل ۹ و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، تطابق نتایج با داده‌های آزمایشگاهی بسیار خوب بوده است. همچنین مقدار خطای موقعیت لبه موج روی بستر متخلخل بین نتایج آزمایشگاهی و عددی ۵/۵۶ درصد می‌باشد. با توجه به شکل ۹، شیب تغییرات موقعیت

در تحقیق حاضر، تعداد ۲۸ حالت مرتبط با مسئله مدل‌سازی شده که شامل حالت‌های بستر متخلخل با دو عمق ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر، ذرات بستر به قطر ۱، ۵ و ۱۲ میلی‌متر، تراز آب به ارتفاع ۰/۳، ۰/۶ و صفر برابر عمق بستر متخلخل و حالت بستر صلب است. برای انفعال میدان از شبکه بندی یکنواخت در کل میدان محاسباتی به تعداد ۷۰۰۰۰ سلول استفاده شد. از شرط مرزی دیواره برای جداره‌های جانبی، شرط مرزی تقارن برای مرز بالای میدان، برای مرز زیرین محیط متخلخل کانال از شرط مرزی دیواره، در بالادست میدان از شرط مرزی فشار استفاده شده و مقدار تراز آب ۰/۸۰ متر به این مرز اعمال شده است. همچنین در پایین دست میدان نیز از شرط مرزی دیواره استفاده شده است. برای استخراج آب‌نگاشت دبی جریان در مجموع مطابق شکل ۷ از ۸ بافل کنار هم در طول کانال و به منظور محاسبه حجم آب نفوذی به داخل بستر متخلخل، از یک بافل افقی بر روی سطح بستر متخلخل استفاده شد. تخلخل بافل‌ها برابر یک قرار داده شده است تا جریان از آن بتواند عبور کند.

مقدار تخلخل و نفوذ پذیری با توجه به صحت سنجی انجام گرفته در بخش قبل (۲-۲) به دست آمده و برای ضرایب A و B با توجه

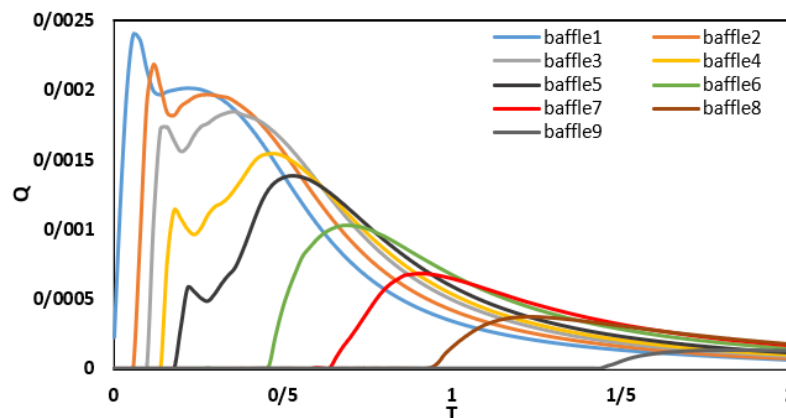


شکل ۸. مقایسه پروفیل سطح آب بر روی بستر متخلخل با قطر ذرات ۱۲ میلی متر نتایج آزمایشگاهی (علائم) و عددی (خطوط)  
**Fig. 8. Comparison of water surface profiles over porous media with 12 mm particle diameter in laboratory (measurements (symbols) and numerical results (lines**



شکل ۹. مقایسه موقعیت لبه موج روی بستر متخلخل به عمق ۵۰ میلی متر و قطر ذرات ۱۲ میلی متر بین داده های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی

**Fig. 9. Comparison of wave edge position on porous media at 50 mm depth and 12 mm particle diameter between laboratory data and numerical model results**



شکل ۱۰. آب‌نگاشت دبی در ایستگاه های مختلف در شکست سد روی بستر متخلخل با قطر ذرات ۱۲ میلی متر  
**Fig. 10. Discharge hydrograph at various stations in breakdown of dam on porous bed with 12 mm diameter**

پیشانی موج تا لحظه  $0/2$  ثانیه تند بوده و پس از آن ملایم تر شده است. علت این پدیده این است که در لحظات اولیه، موج حاصل از شکست سد بر روی بستر صلب حرکت نموده و به محض رسیدن به لبه بستر صلب و ورود به بخش متخلخل، بخشی از جریان به داخل محیط متخلخل نفوذ می کند. با حرکت موج سیلاب بر روی بستر متخلخل، سرعت پیشروی پیشانی موج (یا شیب نمودار در شکل ۹) به دو دلیل کاهش یافته است. اولاً بخشی از جرم سیال به داخل بستر متخلخل نفوذ می کند. ثانیاً به واسطه مقاومت محیط متخلخل در برابر حرکت آب نیز سرعت پیشروی موج کاهش می یابد.

در مدل شکست سد بر روی بستر متخلخل، تغییرات زمانی دبی عبوری از مقاطع مختلف استخراج شده است. همان طور که از آب‌نگاشت‌های شکل ۱۰ قابل مشاهده است، دبی پیک در محل شکست سد بیشترین مقدار را دارد، اما در ایستگاه‌های بعدی به تدریج کاهش پیدا کرده و زمان وقوع دبی پیک هم به تاخیر می افتد. همچنین در بافل‌های ۵ و ۴ شاخه صعودی دوم بر خلاف انتظار افزایش بیشتری نسبت به بافل‌های قبلی دارد که دلیل آن رسیدن آب به کف نفوذناپذیر و در نتیجه کاهش نفوذ آب به داخل بستر متخلخل و در نتیجه افزایش دبی عبوری از سطح بستر است. در شکل ۸ موقعیت بافل‌ها نسبت به محل سد نشان داده شده است. دبی حداکثر در محل سد حاصل موج دینامیکی ناشی از سقوط ستون آب مخزن در اثر باز شدن آبی دریاچه بوده و با توجه به آب‌نگاشت، با دور شدن از محل سد کاهش یافته است.

## ۵- تجزیه و تحلیل نتایج

### ۵-۱- تاثیر قطر دانه ها، ارتفاع آب پایین دست و عمق بستر متخلخل

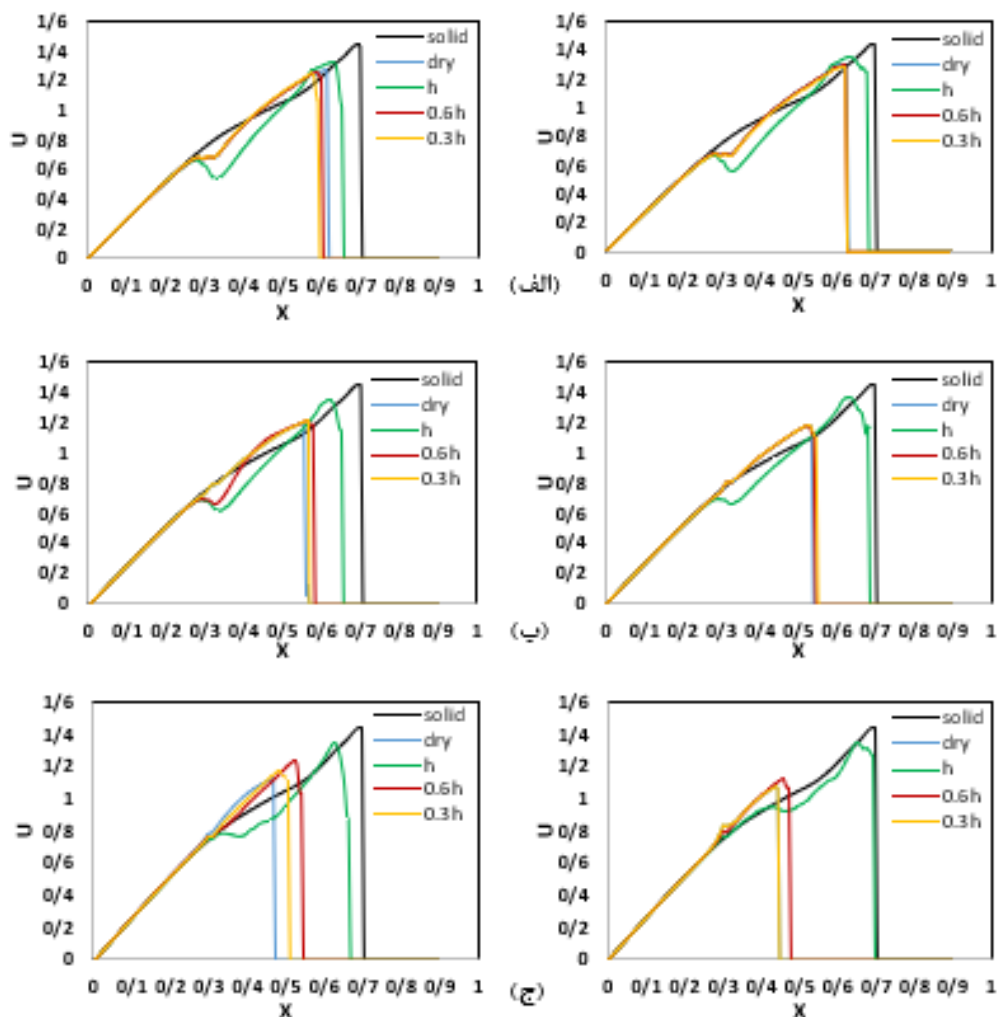
#### بر پروفیل سرعت جریان

پروفیل سرعت در راستای طولی کانال برای نقاط نزدیک به سطح بستر در ارتفاع  $Z/395 = 0$  از سطح بستر متخلخل به عمق ۵۰ و ۱۰۰ میلی متر و در حالت‌های مختلف بستر تر و حالت بستر خشک و صلب در لحظه  $0/4$  ثانیه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۱، در تمام پروفیل‌های مربوط به جریان روی بستر متخلخل، سرعت جریان سیلاب در ارتفاع  $Z$  از روی سطح بستر از محل سد ( $=0 \cdot X/m^2$ ) تا محل انتهایی پله صلب و ابتدای بستر متخلخل ( $=0 \cdot X/m^3$ ) به صورت خطی افزایش یافته و روی بستر

متخلخل به صورت ناگهانی دچار افت شده است. دلیل فراز و فرود بعد از حالت خطی کاملاً وابسته به قطر ذرات می باشد، طوری که در ذرات به قطر ۱ میلی متر فرود نمودار بیشتر، و در حالت ذرات به قطر ۱۲ میلی متر فراز نمودار بیشینه می باشد. همچنین افت سرعت در مؤلفه افقی سرعت در حالت جریان روی بستر اشباع همواره بیشتر است. پس از افت محسوس در ابتدای بستر متخلخل سرعت به تدریج افزایش یافته و در لبه موج به حداکثر مقدار خود رسیده است. همچنین سرعت در لبه موج در حالت بستر اشباع همواره بیشتر از حالت بستر خشک متخلخل و سایر حالت‌های بستر تر است. مقدار سرعت جریان سیلاب روی بستر متخلخل همواره کمتر از بستر صلب است، اما تنها در حالت بستر متخلخل به عمق ۱۰۰ میلی متر و قطر ذرات ۱۲ میلی متر (شکل ج) سرعت بستر صلب تقریباً برابر با بستر متخلخل اشباع می باشد. با افزایش ارتفاع آب داخل بستر تر به شرط موثر بودن ارتفاع آن در جریان (جریان نفوذی به سطح آب داخل بستر متخلخل برسد) میزان سرعت جریان در راستای  $X$  افزایش یافته است. مقدار سرعت جریان سیلاب روی بستر متخلخل همواره کمتر از بستر صلب بوده، ولی با افزایش ارتفاع آب در داخل بستر متخلخل مطابق شکل ۱۱ سرعت جریان افزایش می یابد، طوری که در بستر متخلخل به عمق ۱۰۰ میلی متر (نمودارهای سمت راست شکل ۱۱)، در حالت ارتفاع آب برابر با عمق بستر متخلخل سرعت جریان بسیار نزدیک به حالت بستر صلب می باشد، همچنین با توجه به شکل ۱۱، در بستر متخلخل به عمق ۵۰ میلی متر (نمودارهای سمت چپ شکل ۱۱)، و بستر خشک با افزایش قطر ذرات سرعت پروفیل به شدت کاهش یافته و لبه موج افت می کند.

### ۵-۲- تاثیر قطر دانه ها و عمق بستر متخلخل بر پیشروی لبه موج

در شکل ۱۲ تغییرات زمانی لبه موج جریان آب روی بستر متخلخل به عمق ۵۰ و ۱۰۰ میلی متر با ذرات به قطر ۱۲، ۵ و ۱ میلی متر و آب پایین دست به ارتفاع  $h^3/0$ ،  $h^6/0$  و ارتفاع برابر با عمق بستر ( $h$ ) و همچنین حالت بستر صلب نشان داده شده است. با توجه به شکل، افزایش میزان ارتفاع آب در بستر متخلخل پایین دست به شرط اینکه جریان آب نفوذی فرصت رسیدن به این ارتفاع را داشته باشد باعث پیشروی بیشتر لبه موج به جلو می گردد. در حالت جریان روی بستر متخلخل اشباع شده، موقعیت لبه بسیار نزدیک به



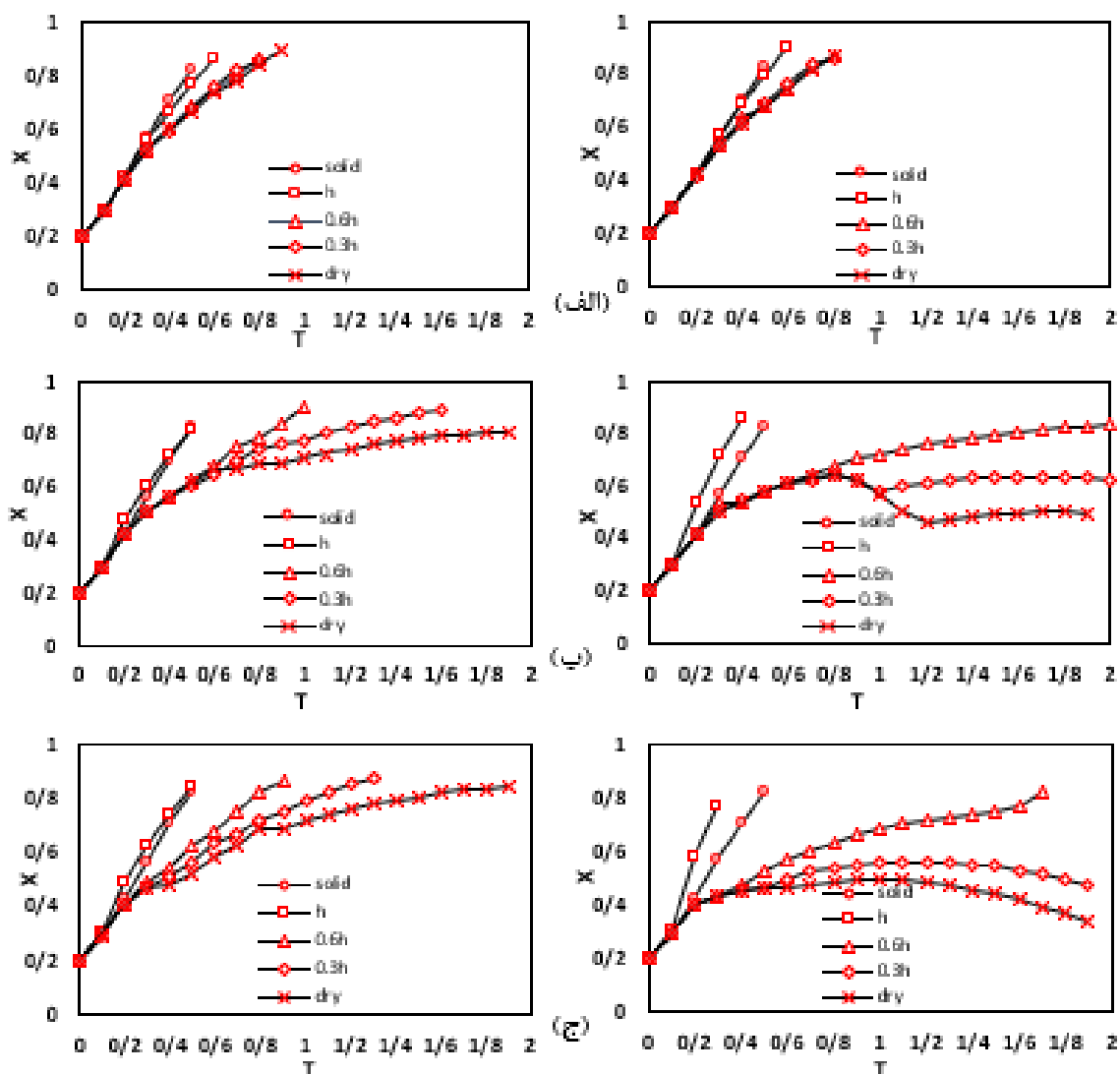
شکل ۱۱. مقایسه پروفیل سرعت (U بر حسب متر بر ثانیه) افقی جریان سیلابی بر روی بستر متخلخل به عمق ۱۰۰ میلی متر (نمودارهای سمت راست)، عمق ۵۰ میلی متر (نمودارهای سمت چپ) و بستر صلب و آب پایین دست به ارتفاع ۰/۳ h، ۰/۶ h و h و بستر خشک با ذرات به قطرهای (الف) ۱ میلی متر (ب) ۵ میلی متر (ج) ۱۲ میلی متر

**Fig. 11. Comparison of velocity profiles (U:m/s) of horizontal flood flow on porous bed to 100 mm depth (right diagrams), 50 mm depth (left diagrams), and rigid bed water to height 0.3h, 0.6h, h and dry substrate with particles in diameters of a) 1 mm b) 5 mm c) 12 mm**

میزان آن همواره بیشتر از حالت بستر خشک و کمتر از حالت بستر متخلخل اشباع است.

در تمامی حالات، تا لحظه ۰/۲ ثانیه موج سیلاب به صورت متعادل حرکت کرده، با این تفاوت که در قطر ذرات ۱ میلی متر موج سیلاب تا لحظه ۰/۴ ثانیه متعادل بوده ولی از آن لحظه به بعد، به واسطه تاثیر تغییر در ارتفاع آب پایین دست و قطر ذرات پیشانی موج سیلاب به سمت جلو متمایل شده و به عبارت بهتر، سیلاب در زمان کمتری مسیر مشابهی را طی می کند. با توجه به شکل ۱۱-الف

حالت جریان بستر صلب است. همچنین در این حالت برای بستر با قطر ذرات ۱ میلی متر پیشروی لبه کمتر از حالت بستر صلب و برای بستر با قطر ۵ و ۱۲ میلی متر بیشتر از حالت صلب است، یعنی در بستر با قطر ۵ و ۱۲ میلی متر، جریان در حالت بستر متخلخل اشباع نسبت به حالت بستر صلب در مدت زمان کمتری طول کانال را طی کرده است. همچنین شدت این رفتار با افزایش عمق بستر متخلخل بیشتر شده است. در سایر حالت های بستر تر با افزایش ارتفاع آب در بستر پایین دست میزان پیشروی لبه موج نیز افزایش یافته است و



شکل ۱۲. مقایسه پیشروی لبه موج سیلاب (T برحسب ثانیه و X برحسب متر) بر روی بستر متخلخل وابسته به عمق ۱۰۰ میلی-متر (نمودارهای سمت راست)، عمق ۵۰ میلی متر (نمودارهای سمت چپ) و بستر صلب و آب پایین دست به ارتفاع  $0/3h$ ،  $0/6h$  و  $h$  و بستر خشک با ذرات به قطرهای الف) ۱ میلی متر ب) ۵ میلی متر ج) ۱۲ میلی متر

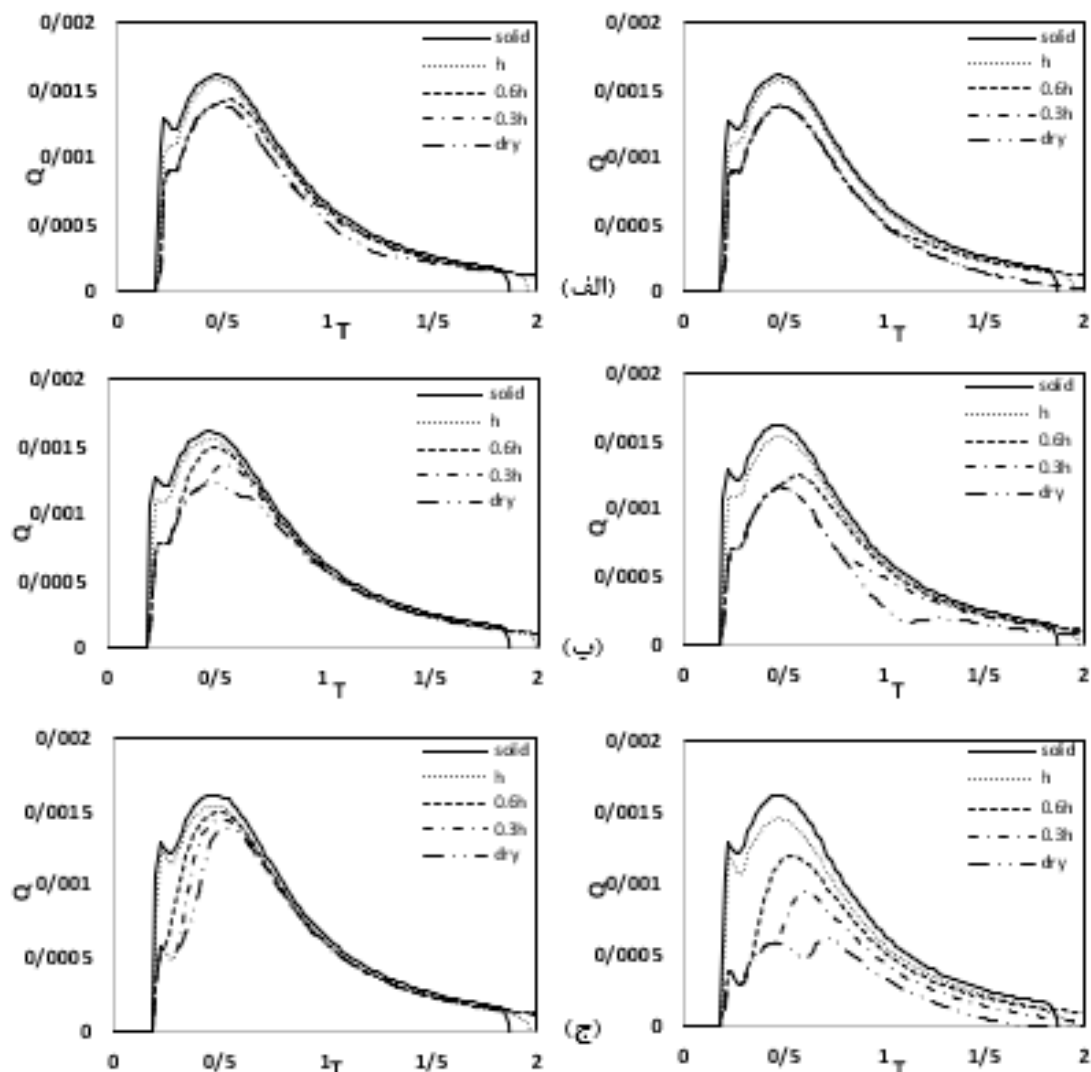
**Fig. 12. Comparison of flood wave front (T in seconds and X in meters) on a 100 mm deep porous substrate (right diagrams), 50 mm depth (left diagrams) and a downstream solid bed and water of downstream 0.3h, 0.6h, h, dry substrate with particles in diameters of A) 1 mm B) 5 mm C) 12 mm**

۵۰ و ۱۰۰ میلی متر با ذرات به قطر ۱۲، ۵، و ۱ میلی متر و آب پایین دست به ارتفاع  $0/3h$ ،  $0/6h$  و ارتفاع برابر با عمق بستر (h) و همچنین حالت بستر صلب در ایستگاه G5 (قابل مشاهده در شکل ۷ مقایسه شده است. با توجه به آبنگاشت های زیر دبی جریان سیلابی بر روی بستر متخلخل همواره نسبت به دبی جریان روی بستر صلب کمتر است. با توجه به شکل مذکور، به جز آبنگاشت مربوط به بستر اشباع (h)، آبنگاشت تمامی حالات بستر تر تا زمانی

پیشروی لبه موج در هر دو حالت عمق بستر متخلخل ۱۰۰ و ۵۰ میلی متر با توجه به قطر ذرات (۱ میلی متر) نسبت به سایر ذرات (قطر ۵ و ۱۲ میلی متر) بسیار تند بوده و حرکت لبه موج بستر صلب و متخلخل اشباع بسیار نزدیک به هم می باشد.

۳-۵- تاثیر قطر دانه ها و عمق بستر متخلخل بر آبنگاشت سیلاب  
در شکل ۱۳ آبنگاشت های مربوط به بستر متخلخل به عمق





شکل ۱۳. مقایسه آب‌نگاشت‌های سیلاب (T برحسب ثانیه و Q برحسب مترمکعب بر ثانیه) بر روی بستر متخلخل به عمق ۱۰۰ میلی‌متر (نمودارهای سمت راست)، عمق ۵۰ میلی‌متر (نمودارهای سمت چپ) و بستر صلب و آب پایین دست به ارتفاع  $h$ ،  $0.6h$ ،  $0.3h$  و بستر خشک با ذرات به قطرهای (الف) ۱ میلی‌متر (ب) ۵ میلی‌متر (ج) ۱۲ میلی‌متر

Fig. 13. Comparison of flood hydrographs (T in seconds and X in meters) on a 100 mm deep porous substrate (right diagrams), 50 mm depth (left diagrams) and a downstream solid bed and water of downstream 0.3h, 0.6h, h, dry substrate with particles in diameters of A) 1 mm B) 5 mm C) 12 mm

سیلابی شده است. زمانی که ارتفاع آب پایین دست برابر عمق بستر متخلخل باشد ( $h_w = h$ )، به عبارت دیگر بستر متخلخل به صورت بستر کاملاً اشباع در نظر گرفته شود، آب‌نگاشت جریان سیلابی بسیار نزدیک به حالت بستر صلب عمل کرده است. همچنین با افزایش عمق بستر متخلخل در حالت اشباع کامل بستر متخلخل ( $h_w = h$ )، میزان دبی پیک جریان نسبت به حالت مشابه با عمق بستر کمتر، کاهش می‌یابد.

که جریان نفوذی به عمق آب داخل بستر نرسیده باشد، مشابه حالت بستر خشک هستند. واگرایی آب‌نگاشت‌های بستر تر با توجه به زمان رسیدن آب نفوذی به آب داخل هر بستر شروع شده و دبی آن افزایش یافته است. همچنین با افزایش قطر ذرات بستر متخلخل این افزایش دبی سریع‌تر و با شدت بیشتری رخ داده است. افزایش میزان ارتفاع آب در بستر متخلخل پایین دست به شرط اینکه جریان آب نفوذی فرصت رسیدن به این ارتفاع را داشته باشد، باعث افزایش دبی جریان

متخلخل، بستر همانند بستر اشباع عمل کرده و دبی جریان پس از آن نسبت به حالت بستر متخلخل خشک افزایش یافته است. همچنین با افزایش قطر ذرات بستر متخلخل این افزایش دبی زودتر و با شدت بیشتری رخ داده است. افزایش میزان ارتفاع آب در بستر متخلخل پایین دست به شرط اینکه جریان آب نفوذی فرصت رسیدن به این ارتفاع را داشته باشد باعث افزایش دبی جریان سیلابی شده است.

۶- با افزایش عمق بستر متخلخل، میزان پیشروی لبه موج و دبی جریان سیلابی و ارتفاع سطح آزاد جریان کاهش یافته است. بر طبق نتایج حاصل از مدل سازی جریان روی بستر متخلخل با عمق های مختلف، در صورتی که عمق بستر متخلخل به اندازه ای باشد که جریان آب نفوذی به داخل بستر به انتهای آن که بستر صلب نفوذناپذیر (شرط مرزی دیوار) است برسد، پس از آن بستر همانند بستر اشباع عمل می کند و دبی جریان به شدت افزایش می یابد.

۷- با پیشروی جریان در طول کانال مقادیر دبی پیک ثبت شده در ایستگاه ها کاهش یافته است و در مدل های بستر خشک کاهش دبی پیک در راستای کانال بیشتر است. بیشترین مقادیر دبی پیک در انتهای کانال با بستر متخلخل، در حالت بستر متخلخل، اشباع رخ داده است، همچنین با افزایش عمق بستر متخلخل، میزان پیشروی لبه موج و دبی جریان سیلابی و ارتفاع سطح آزاد جریان کاهش یافته است. با پیشروی جریان در طول کانال مقادیر دبی پیک ثبت شده در ایستگاه ها کاهش یافته و در مدل های بستر خشک کاهش دبی پیک در راستای کانال بیشتر است.

### مراجع

- [1] D. Fread, Flow Routing in Handbook of Hydrology, ed. by DR Maidment. 1993, McGraw-Hill Inc., New York.
- [2] M. Morris, CADAM: Concerted Action on Dambreak Modeling – Final Report. HR Wallingford, 2000. Rep. SR 571.
- [3] H. Chanson, Environmental Hydraulics for Open Channel Flows. 2004: Elsevier.
- [4] A. Ritter, Die Fortpflanzung der Wasserwellen. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 1892. 36(33): p. 947-954.

با افزایش قطر ذرات در بستر متخلخل به عمق ۱۰۰ میلی متر (آبنگاشت های سمت راست) با کاهش ارتفاع آب در پایین دست روند صعودی و نزولی آبنگاشت به شدت بخصوص در قطرهای ذرات ۵ و ۱۲ میلی متر کاهش یافته و دبی سیلاب نیز کاهش یافته است.

### ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، به مطالعه عددی سه بعدی جریان ناشی از شکست ناگهانی سد بر روی بستر صلب، داخل محیط متخلخل و بر روی بستر متخلخل با تغییر در اندازه دانه های بستر متخلخل و تغییر در عمق آب پایین دست سد به طور مفصل پرداخته شده و تاثیر قطر دانه ها، ارتفاع آب پایین دست و عمق بستر متخلخل بر پروفیل سرعت جریان، پیشروی لبه موج و آبنگاشت سیلاب بررسی گردید. حال، نتایج به طور مختصر به شرح ذیل ارائه می گردد:

۱- مدل عددی به خوبی قادر به پیش بینی آبنگاشت سیلاب در محل سد و طول کانال پایین دست می باشد. در محل سد و تا فاصله کوتاهی در پایین دست آن، یک پیک موضعی در شاخه صعودی آبنگاشت رخ می دهد که علت آن موج دینامیکی ناشی از سقوط آزاد لایه های بالایی مخزن بر روی موج اولیه و افزایش حجم آب عبوری در واحد زمان می باشد.

۲- مقایسه الگوی جریان بر روی بستر صلب و بستر متخلخل خشک با هندسه مشابه نشان داد که دبی جریان روی بستر متخلخل همواره کمتر از حالت مشابه با بستر صلب است.

۳- با افزایش قطر ذرات و در نتیجه افزایش نفوذپذیری بستر متخلخل، میزان پیشروی لبه موج و دبی جریان سیلابی و ارتفاع سطح آزاد جریان کاهش یافته است.

۴- با مقایسه الگوی جریان بر روی بستر متخلخل خشک و بستر متخلخل اشباع مشاهده شد دبی جریان، ارتفاع سطح آزاد جریان و مؤلفه افقی سرعت جریان در نزدیکی سطح بستر، روی بستر متخلخل اشباع همواره بیشتر از حالت مشابه بستر متخلخل خشک است.

۵- با مقایسه آبنگاشت مربوط به بستر اشباع و آبنگاشت سایر حالات بستر تر، الگوی جریان سیلاب تا زمانی که جریان نفوذی به عمق آب داخل بستر نرسیده باشد، مشابه حالت بستر خشک عمل می کند. پس از رسیدن آب نفوذی به آب داخل بستر

- [17] A. Safarzadeh, Three Dimensional Hydrodynamics of Sudden Dam Break in Curved Channels. *Journal of Modares Civil Engineering*, 2017. 17(3): p. 77-86.
- [18] P.C. Carman, Fluid Flow through Granular Beds. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 1937. 15: p. 150-166.
- [19] P. Forchheimer, Wasserbewegung Durch Boden. *Z. Ver. Deutsch. Ing.*, 1901. 45: p. 1782-1788.
- [20] S. Ergun, Fluid Flow through Packed Columns. *Chem. Eng. Prog.*, 1952. 48: p. 89-94.
- [21] A. Parsaie, S. Dehdar-Behbahani, and A.H. Haghiabi, Numerical Modeling of Cavitation on Spillway's Flip Bucket. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2016. 10(4): p. 438-444.
- [22] S. Dehdar-Behbahani, and A. Parsaie, Numerical Modeling of Flow Pattern in Dam Spillway's Guide Wall. Case study: Balaroud dam, Iran. *Alexandria Engineering Journal*, 2016. 55(1): p. 467-473.
- [23] A. Parsaie, A.H. Haghiabi, and A. Moradinejad, CFD Modeling of Flow Pattern in Spillway's Approach Channel. *Sustainable Water Resources Management*, 2015. 1(3): p. 245-251.
- [24] S. Najafyan, H. Younesi, A. Parsai, and P.H. Torabi, Physical and Numerical Modeling of Flow in Heterogeneous Roughness Non-Prismatic Compound Open Channel. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 2016. 17(66): p. 87-104.
- [25] S. Najafian, H. Younesi, A. Parsaei, and P.H. Torabi, Physical and Numerical Modeling of Flow Properties in Prismatic Compound Open Channel With Heterogeneous Roughness. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 2017. 18(68): p. 1-16.
- [26] A. Safarzadeh, and S.H. Mohajeri, Hydrodynamics of Rectangular Broad-Crested Porous Weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2018. 144(10): p. 04018028.
- [27] M. Fathi-moghaddam, M.T. Sadrabadi, and M. Rahmanshahi, Numerical Simulation of the Hydraulic Performance of Triangular and Trapezoidal Gabion Weirs in Free Flow Condition. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2018. 62: p. 93-104.
- [5] B. Ghimire, Hydraulic Analysis of Free-Surface Flows into Highly Permeable Porous Media and its Applications. 2009.
- [6] R.F. Dressler, Hydraulic Resistance Effect Upon the Dam-Break Functions. Vol. 49. 1952: National Bureau of Standards Washington, DC.
- [7] G. Lauber, and W.H. Hager, Experiments to Dambreak Wave: Horizontal Channel. *Journal of Hydraulic research*, 1998. 36(3): p. 291-307.
- [8] L.W. Tan, and V.H. Chu, Lagrangian Block Hydrodynamics of Macro Resistance in a River-Flow Model. *River Flow 2010*, 2010: p. 419-428.
- [9] L. Tan, and V.H. Chu, Lauber and Hager's Dam-Break Wave Data for Numerical Model Validation. *Journal of hydraulic research*, 2009. 47(4): p. 524-528.
- [10] S. Mambretti, E. Larcen, and D. De Wrachien, 1D Modelling of Dam-Break Surges with Floating Debris. *Biosystems engineering*, 2008. 100(2): p. 297-308.
- [11] M. Pilotti, M. Tomirotti, G. Valerio, and B. Bacchi, Simplified Method for the Characterization of the Hydrograph Following a Sudden Partial Dam Break. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010. 136(10): p. 693-704.
- [12] T.J., Chang, H.M. Kao, K.H. Chang, and M.H. Hsu, Numerical Simulation of Shallow-Water Dam Break Flows in Open Channels Using Smoothed Particle Hydrodynamics. *Journal of Hydrology*, 2011. 408(1-2): p. 78-90.
- [13] T. Tingsanchali, and W. Rattanapittikon, 2-D Modelling of Dambreak Wave Propagation on Initially Dry Bed. *Science & Technology Asia*, 1999. p. 28-37.
- [14] J. Yan, Z.x. Cao, H.h. Liu, and L. Chen, Experimental Study of Landslide Dam-Break Flood Over Erodible Bed in Open Channels. *Journal of Hydrodynamics*, 2009. 21(1): p. 124-130.
- [15] O. Castro-Orgaz, and H. Chanson, Ritter's Dry-Bed Dam-Break Flows: Positive and Negative Wave Dynamics. *Environmental Fluid Mechanics*, 2017. 17(4): p. 665-694.
- [16] A. Jozdani, and A.R. Kabiri-Samani, Application of Image Processing Method to Analysis of Flood Behavior Due to Dam Break. 9th Iranian Hydraulic Conference, Univ. of Tarbiat Moddares, 2011.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Safarzadeh, P. Mohsenzadeh, S. Abbasi, Numerical Simulation of Three-Dimensional Flow of Sudden Dam-Break over the Porous Bed. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(6) (2021) 2231-2248

DOI: [10.22060/ceej.2020.17329.6530](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17329.6530)



