

## بررسی عددی جریان ناشی از شکست سد با حمل رسوب بر روی بسترهای زنده با استفاده از Mike 3 Flow Model FM

محمد همتی<sup>۱\*</sup>، مینا سودی<sup>۲</sup>، وحید ندرخانلو<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۵/۱۰

### چکیده

جریان‌های ناشی از شکست سد می‌تواند باعث فرسایش، انتقال و رسوب‌گذاری ذرات شده و منجر به مشکلات ریخت‌شناسی شدید گردد. بنابراین برهم‌کنش میان جریان، انتقال رسوب و ریخت‌شناسی رودخانه منجر به ایجاد انگیزه برای مطالعه جریان ناشی از شکست سد روی بستر فرسایش پذیر می‌شود. در تحقیق حاضر از مدل سه‌بعدی Mike3 Flow Model FM برای شبیه‌سازی جریان ناشی از شکست سد با انتقال رسوب روی بستر فرسایش پذیر استفاده شد. مدل مذکور با استفاده از یک آزمایش پایه انجام شده بر روی فلوم با بازشدگی ناگهانی برای بررسی جریان ناشی از شکست موضعی سد روی بستر فرسایش پذیر آزموده شد. مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که مدل Mike3 Flow Model FM قادر به پیش‌بینی قابل‌قبولی از جریان‌های پیچیده شکست سد و الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در پایین‌دست سد می‌باشد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که پارامترهای مهمی نظیر عمق آب، گسترش سیلاب، پروفیل کف بستر، پروفیل زمانی سرعت توسط مدل ریاضی به درستی شبیه‌سازی می‌شود. علاوه بر آن نتایج تحقیق حاضر نشان داد که مدل سه‌بعدی مذکور دقت تغییرات مورفولوژی محاسبه شده در مراحل اولیه از جریان شکست سد، در نزدیکی جبهه موج را بهبود می‌بخشد.

**واژه‌های کلیدی:** انتقال رسوب، بستر فرسایش‌پذیر، شبیه‌سازی، شکست سد، Mike3 Flow Model FM

### مقدمه

است. با وجود اینکه در طبیعت تشکیلات آبرفتی معمولاً شامل رسوبات معلق در آب و ته‌نشین شده در بستر می‌باشد، مدل‌های عددی توسعه یافته اخیر جریان ناشی از شکست سد را به صورت آب صاف روی بستر صلب (غیرقابل فرسایش) مطالعه می‌کنند. جریان‌های ناشی از شکست سد می‌تواند باعث فرسایش، انتقال و رسوب‌گذاری ذرات شده و منجر به مشکلات ریخت‌شناسی شدید مثل تغییرات قابل توجه آبراهه‌ها، سواحل و سیلاب‌دشت‌ها، آبستگي اطراف سازه‌های هیدرولیکی و مانند آن گردد. به‌هرحال تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها ممکن است اثرات قوی بر روی رفتار هیدرودینامیکی سیل ناشی از شکست سد بگذارد. بنابراین برهم‌کنش میان جریان، انتقال رسوب و ریخت‌شناسی رودخانه منجر به ایجاد انگیزه برای مطالعه جریان ناشی از شکست سد روی بستر فرسایش‌پذیر شد. مطالعات عددی جریان ناشی از شکست سد روی بستر فرسایش‌پذیر با توسعه‌ی مدل‌های پخش یک‌بعدی و دوبعدی میانگین‌گیری شده‌ی عمقی بر اساس فرضیات جریان آب کم‌عمق شروع شد (Capart and Young., 1998; Cao et al., 2004; Wu and Wang., 2007; Xia et al., 2010; Wu et al., 2012; Zhang et al., 2013). برای جریان‌های متلاطم بر روی بسترهای

گروه تحقیق و توسعه انرژی (EDF R & D) و موسسه ملی تحقیقات علوم و فن‌آوری برای محیط‌زیست و کشاورزی (IRSTEA) در فرانسه جزو اولین مراکزی هستند که تجربه زیادی در مدل‌کردن شکست سد دارند و کار خود را از اواسط دهه ۶۰ میلادی برای توسعه ابزارهای عددی صنعتی جهت پیش‌بینی امواج سیلاب ناشی از شکست سد، شروع کردند. از سال ۱۹۷۰ به بعد محاسبات برای حدود ۱۰۰ شکست سد توسط گروه EDR R&D در فرانسه انجام گرفت (Paquier and Goutal., 2016).

جریان‌های ناشی از شکست سد از مباحث مورد علاقه‌ی محققان و مهندسان هیدرولیک در دهه‌های اخیر می‌باشد. تلاش‌های مهمی برای درک و شبیه‌سازی سازوکار جریان ناشی از شکست سد از طریق تجربیات آزمایشگاهی و صحرایی و مدل‌های عددی انجام شده

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه و استادیار گروه مهندسی آب، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه

۲- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه

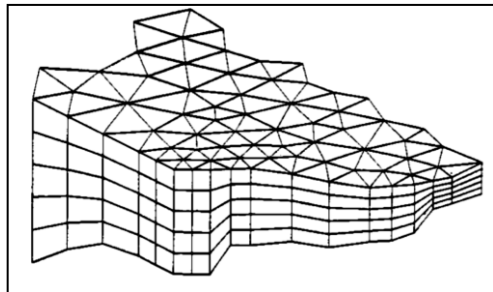
\*- نویسنده مسئول: (Email: m.hemmati@urmia.ac.ir)

(Wu., 2014) برای تحقیق جریان ناشی از شکست موضعی سد روی بستر فرسایش پذیر آزموده شد. از آنجا که انتقال رسوب در جریان ناشی از شکست سد روی بستر فرسایش پذیر به صورت انتقال رسوب غیرتبادل می باشد در این تحقیق این مسئله نیز مدنظر قرار داده شده است.

## مواد و روش ها

### مدل سازی ریاضی

مدل MIKE 3 Flow Model FM یکی از مجموعه مدل های محاسباتی هیدرولیک جریان است که به دلیل قابلیت بالا در شبیه سازی هیدرودینامیک جریان، در شبیه سازی پدیده شکست سد نیز مورد استفاده قرار می گیرد. این مدل توانایی شبیه سازی سه بعدی جریان، کیفیت آب و انتقال رسوب در اقیانوس ها، مخازن، سواحل و خورها را با در نظر گرفتن تری و خشکی، مدل های تلاطمی مختلف دارد. این مدل براساس معادلات ناویراستوکس غیرقابل تراکم با میانگین زمانی رینولدز و با در نظر گرفتن فرضیات بوسینسک و فشار هیدرواستاتیک بنا نهاده شده است. گسسته سازی مکانی از معادلات مذکور به روش حجم محدود میان سلولی می باشد. شبکه بندی در مدل (شکل ۱) در راستای افق، بدون ساختار و در راستای قائم ساختارمند است (ندرخلانو و همکاران، ۱۳۹۳).



شکل ۱- شماتیکی از مش در حالت سه بعدی (راستای افق: بدون ساختار و راستای قائم: ساختارمند)

### معادلات حاکم بر هیدرودینامیک

معادلات پیوستگی و مومنتم بیانگر برقراری بقای جرم و اندازه حرکت بوده و در حالت سه بعدی و در دستگاه مختصات کارتزین برای جریان های لایه ای به صورت رابطه ۱ بیان می شوند:

### معادله پیوستگی

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (1)$$

که در آن  $w, v, u$  به ترتیب بردارهای سرعت در جهت طولی،

رسوبی فرسایش پذیر، مثل لحظات اولیه موج ناشی از شکست سد، غلظت رسوب بسیار بالا است و توپوگرافی بستر نیز به سرعت تغییر می کند که نمی توان تاثیر آن را بر روی جریان نادیده گرفت. بنابراین لازم است تمامی فرآیندهای مورفودینامیک در شبیه سازی در نظر گرفته شوند (Formann et al., 2007; Pasquale et al., 2011; Ali et al., 2012; Cao et al., 2012)

برای توسعه مدل های یک بعدی و دوبعدی جریان ناشی از شکست سد در بسترهای فرسایش پذیر از مفاهیم دوفازی و دولایه ای استفاده می شود. در مدل دولایه ای، ستون آب به دو لایه که لایه بالایی شامل آب صاف و لایه پایینی شامل جریان آب و رسوب است تقسیم شده است (Capart and Young., 2002; Fraccarollo and Capart., 2002). در مدل های دوفازی، معادلات پیوستگی و مومنتم برای هر فاز حل می شوند (Longo., 2005; Amoudry and Liu., 2009; Gerco et al., 2012). شده در مدل یک بعدی و دوبعدی مانند توزیع فشار هیدرواستاتیک، این مدل ها ممکن است برای شبیه سازی جریان ناشی از شکست سد-ها در مجاورت سازه های رودخانه ای، در انبساط یا انقباض ناگهانی، جریان های شکست موضعی سد، مرحله اولیه جریان های ناشی از شکست سد و مانند این ها مناسب نباشند. بنابراین مدل سازی سه بعدی این مثال های پیچیده می تواند نتایجی نزدیک به واقعیت را فراهم کند. بهر حال استفاده از یک مدل عددی سه بعدی جریان ناشی از شکست سد روی بستر فرسایش پذیر چالش برانگیزتر از مدل های یک بعدی و دوبعدی هست. اساساً یک مدل سه بعدی باید با دو مرز فرسایش پذیر یکی در سطح آب و دیگری در کف بستر سروکار داشته باشد (Marsooli and Wu., 2014).

در بسیاری از مطالعات به نقش شتاب عمودی و فشار غیرهیدرواستاتیکی در جریان های ناشی از شکست سد بر روی بسترهای صلب تاکید شده است. معادلات جریان کم عمق که شتاب عمودی و فشار غیرهیدرواستاتیکی را در نظر نمی گیرند معمولاً قادر به محاسبه دینامیک جریان در مراحل اولیه شکست سد و جبهه موج نمی باشند (Zima., 2007; Yang et al., 2010; Marsooli and Wu., 2014) که در مدل های سه بعدی این مشکل برطرف شده است. تمرکز مطالعات انجام گرفته در خصوص شکست سد، بیش تر بر روی شبیه سازی جریان ناشی از شکست سد و پخش آن بر روی بسترهای بدون فرسایش (صلب) می باشد. بنابراین تحقیقاتی که جریان ناشی از شکست سد را بر روی بسترهای فرسایش پذیر که در آن تمامی فرآیندهای مورفودینامیک در شبیه سازی در نظر گرفته باشند، بسیار نادر می باشد. هدف تحقیق حاضر، شبیه سازی جریان ناشی از شکست سد با انتقال رسوب در بستر فرسایش پذیر توسط مدل Mike3 Flow Model FM می باشد. مدل با استفاده از یک آزمایش پایه انجام شده در دانشگاه کاتولیک لووین (Marsooli and

عرضی و قائم و  $K$ : مقدار دبی منبع نقطه‌ای می‌باشند.

آب و فاصله عمقی از بستر می‌باشند.

### معادله مومنتم

معادله مومنتم در راستای طول در مختصات کارتزینی به صورت رابطه ۲ می‌باشد.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = \quad (2)$$

$$fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} (v_t \frac{\partial u}{\partial z}) + u_s S$$

در معادلات فوق  $t$ : زمان،  $x, y, z$ : مختصات دکارتی،  $\eta$ : ارتفاع سطح آب،  $d$ : عمق ثابت آب،  $h = \eta + d$ : کل عمق آب،  $w, v, u$ : سرعت جریان در راستای مختصات دکارتی،  $f = 2\Omega \sin \phi$ : نیروی کوریولیس که بیانگر اثر گردش زمین است ( $\Omega$ : نسبت زاویه حرکت چرخشی زمین،  $\phi$ : طول جغرافیایی منطقه)،  $g$ : شتاب گرانشی زمین،  $\rho$ : چگالی آب،  $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ : تانسورهای تنش انعکاسی،  $U_t$ : لزجت گردابه‌ای (تلاطمی) عمودی،  $P_a$ : فشار اتمسفر،  $\rho_0$ : چگالی مرجع آب،  $u_s, v_s$ : سرعت جریان آب ناشی از منبع نقطه‌ای در راستای  $x$  و  $y$ ،  $F_u, F_v$ : ترم‌های تنش افقی جریان هستند.

### مدل‌های تلاطمی

تنش تلاطمی را می‌توان بر اساس مفهومی به نام لزجت گردابه‌ای مدل کرد. لزجت گردابه‌ای به دو قسم لزجت گردابه‌ای افقی و عمودی تقسیم‌بندی می‌شود. در بسیاری از مدل‌سازی‌های عددی، تلاطم‌های با مقیاس کوچک را نمی‌توان با انتخاب گسسته‌سازی مکانی ریز در نظر گرفت، اما این نوع از تلاطم را می‌توان با منظور نمودن مدل‌های تلاطمی مدل نمود.

### الف) لزجت گردابه‌ای قائم

لزجت گردابه‌ای قائم بر اساس قانون لگاریتمی قابل محاسبه است:

$$v_t = U_{\tau} h \left( c_1 \frac{z+d}{h} + c_2 \left( \frac{z+d}{h} \right)^2 \right) \quad (3)$$

که در آن  $U_{\tau} = \max(U_{\pi}, U_{\pi b})$ ؛  $U_{\pi}$  و  $U_{\pi b}$  به ترتیب سرعت برشی بستر و سطح آب می‌باشند و ضرایب  $c_1$  و  $c_2$  به ترتیب برابر  $0.41$  و  $-0.41$  می‌باشند و بر اساس نیم‌رخ استاندارد سهمی‌گون محاسبه می‌شوند.  $h$  و  $z$  نیز به ترتیب بیانگر مقدار عمق

### ب) لزجت گردابه‌ای افقی

در بسیاری از موارد، مقدار لزجت گردابه‌ای افقی ثابت در نظر گرفته می‌شود. اما رابطه اسموگرونسکی تلاطم را بر اساس طول مشخصه و نسبت تغییر شکل که تابعی از سرعت جریان می‌باشد به صورت معادله‌های ۴ و ۵ بیان می‌کند:

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij} S_{ij}} \quad (4)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

که در آن  $c_s$ : ضریب ثابت اسموگرونسکی،  $l$ : طول مشخصه،  $S_{ij}$ : نسبت تغییر شکل و  $A$ : مقدار لزجت گردابه‌ای افقی می‌باشد.

### معادلات حاکم بر انتقال رسوب

به دلیل تنوع روابط، تعدد عوامل و پیچیدگی حاکم بر انتقال رسوب، روابط مختلفی برای تعیین مقدار رسوب حمل شده توسط محققین ارائه شده است که در نظر گرفتن همه عوامل موثر در یک معادله ریاضی را ناممکن می‌سازد. چنین محدودیت‌هایی تاکنون مانع از ارائه یک معادله جهانی واحد برای تعیین نرخ انتقال رسوب شده است. در این تحقیق از معادله انگلن - فریدوس برای محاسبه بار رسوبی استفاده شد.

### رابطه انگلند - فریدوس

نرخ انتقال بار کل حاصل جمع بار بستر و بار معلق می‌باشد که به تفکیک در ادامه ارائه شده است. متغیرهای مربوط به محاسبه بار معلق و بار بستر در جدول ۱ توصیف شده است.

### نرخ بار بستر:

$$S_{bl} = 5p \cdot (\sqrt{\theta'} - 0.7\sqrt{\theta_c}) \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (6)$$

$$p = \left[ 1 + \left( \frac{\frac{\pi}{6} \mu_d}{\theta' - \theta_c} \right) \right]^{\frac{1}{4}}, \mu_d = 0.51, \theta' > \theta_c \quad (7)$$

$$\theta' = \frac{u_f'^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (8)$$

$$c(\eta) = \left( \frac{1-\eta}{\eta} \frac{a}{1-a} \right)^z \quad (13)$$

$$\eta = \frac{y}{h} \quad (14)$$

$$a = \frac{2d_{50}}{h} \quad (15)$$

$$Z = \frac{w_s}{ku_f} \quad (16)$$

$$\eta_0 = \exp\left(\eta_0 - 1 - \frac{0.4C}{\sqrt{g}}\right) \quad (17)$$

$$u_f'^2 = \frac{V}{6 + 2.5 \ln\left(\frac{h}{2.5d_{50}}\right)} \quad (9)$$

نرخ بار معلق:

$$S_{sl} = c_b V h \int_{\eta_0}^1 u(\eta) \cdot c(\eta) d\eta \quad (10)$$

$$c_b = \frac{0.331(\theta - \theta_c)^{1.75}}{1 + \frac{0.331}{0.46}(\theta - \theta_c)^{1.75}} \quad (11)$$

$$u(\eta) = \frac{\sqrt{g}}{0.4C} \ln\left(\frac{\eta}{\eta_0}\right) \quad (12)$$

جدول ۱ - متغیرهای معادلات حاکم در مدل

بار معلق		بار بستر	
نشانه	متغیر	نشانه	متغیر
$S_{sl}$	نرخ بار معلق	$S_{bl}$	نرخ بار بستر
$c_b$	غلظت رسوب نزدیک بار بستر	$p$	احتمال حرکت بار بستر
$u(\eta)$	پروفیل سرعت جریان	$\mu_d = 0.51$	ضریب دینامیکی
$\eta$	نسبت فاصله از کف بستر به عمق	$\theta'$	پارامتر بی بعد شیلدرز
$a$	فاصله از بستر	$\theta_c$	پارامتر شیلدرز بحرانی
$c(\eta)$	پروفیل غلظت بار معلق	$u_f'^2$	سرعت برشی بی بعد
$Z$	پارامتر تعلیق راس	$V$	متوسط سرعت جریان
$w_s$	سرعت سقوط ذرات بار معلق	$h$	عمق جریان
$u_f$	سرعت برشی	$d_{50}$	متوسط قطر ذرات
$C$	ضریب سزی	$s$	نسبت چگالی بار رسوب
$\eta_0$	نسبت فاصله از کف بستر به عمق	$g$	شتاب گرانش

به صورت موضعی توسط دو بلوک غیرقابل نفوذ و یک دریچه به عرض یک متر بین بلوک‌ها در فاصله ۱۲ متری از انتهای فلوم شبیه سازی شده است. دریچه به صورت سریع باز شد تا پدیده شکست سد را شبیه سازی کند. بستر صلب فلوم با یک لایه ماسه به ضخامت ۸۵ میلی متر از فاصله‌ی یک متری بالادست دریچه تا ۹ متری پایین دست آن پوشیده شده است. ماسه‌های استفاده شده برای این منظور دارای دانه بندی یکنواخت و متراکم نشده بودند. قطر متوسط ذرات ماسه ۱/۶۱ میلی متر و چگالی آن ۲۶۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب و تخلخل اولیه آن ۰/۴۲ بود. طول مدت انجام آزمایش ۲۰ ثانیه و عمق اولیه آب داخل مخزن ۰/۴۷ متر بوده و بازه پایین دست در لحظه شروع آزمایش خشک بود.

### ارزیابی مدل عددی MIKE 3 Flow Model FM

به منظور بررسی و تحت آزمایش قرار دادن ظرفیت استفاده از مدل عددی در شبیه سازی فرآیندهای زودگذر، پدیده هیدرودینامیک شکست سد مدنظر و نتایج شبیه سازی عددی با داده های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. صحت سنجی مدل عددی با استفاده از یک آزمایش پایه انجام شده در واحد هیدرولیک آزمایشگاه مهندسی مکانیک و ساختمان دانشگاه کاتولیک لووین برای تحقیق جریان ناشی از شکست سد به صورت موضعی روی بستر فرسایش پذیر آزموده شد (Anon., 2012).

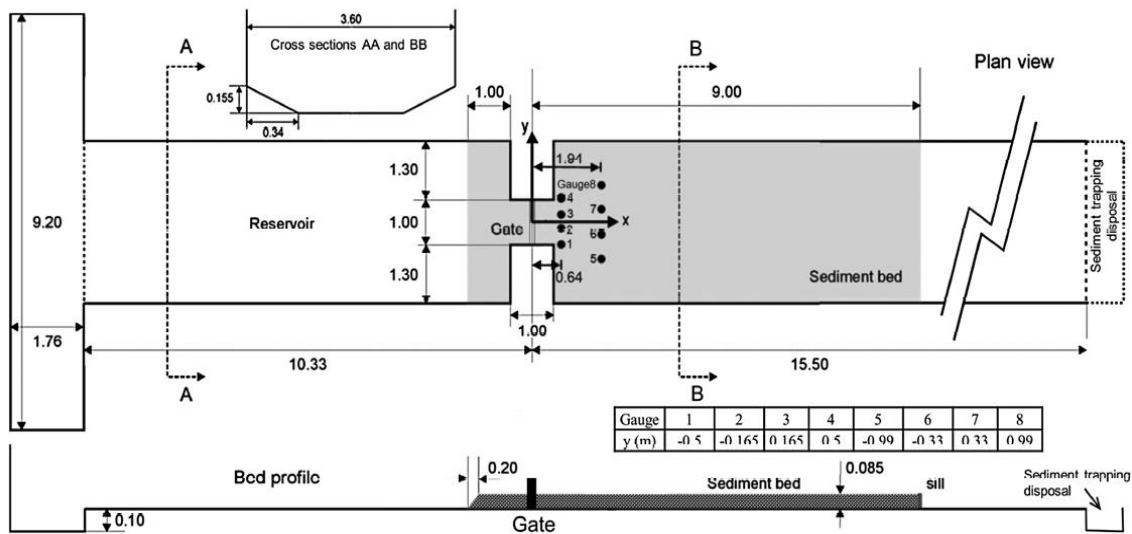
پلان شماتیکی از مدل آزمایشگاهی در شکل ۲ نشان داده شده است. فلوم دارای ۳۶ متر طول و ۳/۶ متر عرض می باشد. شکست سد

با حداقل زاویه ۳۰ درجه (شکل ۳) و ۱۱۵۴۱ گره و حداکثر مساحت ۰/۰۰۹ مترمربع برای هر المان و ۱۰ لایه عمودی یکنواخت از نوع سیگما صحت‌سنجی گردید. در شبیه‌سازی با توجه به صیقلی بودن دیواره‌ها، اثر تنش برشی بین آب و دیواره و نیز اثر تنش برشی بین آب و هوا منظور نگردید. همچنین به‌منظور پایداری مدل عددی و دقت در نتایج، عدد کورانت کمتر از ۱ انتخاب و شبیه‌سازی با گام زمانی ۰/۰۲ ثانیه اجرا گردید.

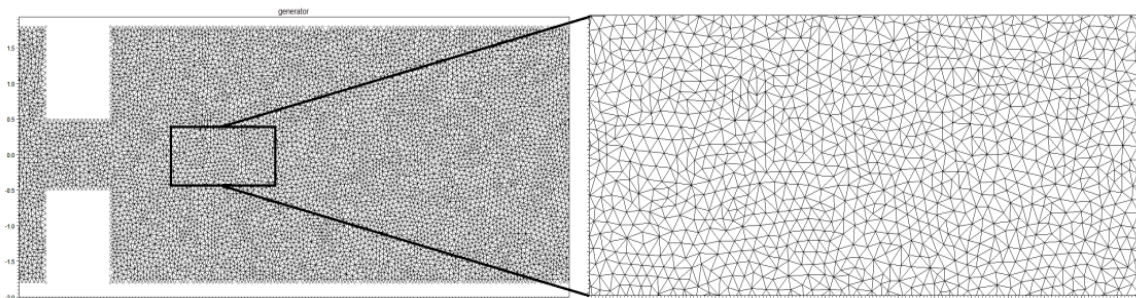
اندازه‌گیری سطح آب با استفاده از پروب‌های اولتراسونیک Baumer در ۸ ایستگاه واقع در پایین‌دست دریچه (شکل ۲) انجام شد. در پایان آزمایش تراز بستر با استفاده از دستگاه برداشت پروفیل رسوب Delf در عرض فلوم بین ۰/۵ الی ۸ متری دریچه اندازه‌گیری شد.

### اجزای شبیه‌سازی عددی

در تحقیق حاضر، دامنه حل بر اساس ۲۱۹۴۰ مش منعطف مثلثی



شکل ۲- پلان شماتیکی از مدل فیزیکی آزمایشگاهی شکست سد در بستر فرسایش‌پذیر (IAHR., 2012)



شکل ۳- مش‌بندی دامنه حل در مدل ریاضی Mike3 Flow Model FM

است که تمامی ضرایب به روش صحیح و خطا واسنجی گردید.

### واسنجی مدل

تعیین و تنظیم پارامترهای مدل به‌منظور تطبیق نتایج مدل با واقعیت (داده‌های اندازه‌گیری شده) را واسنجی مدل گویند. پارامترهای مدل بایستی در گستره معقولی از محدوده هر پارامتر انتخاب گردند تا بین نتایج مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده، کم‌ترین میزان خطا صورت گیرد. در تحقیق حاضر ضرایب ثابت در مدل به‌صورت جدول ۲ از نتایج واسنجی بدست آمده است. لازم به ذکر

#### جدول ۲- ضرایب واسنجی شده در مدل

۰/۱	ضریب ثابت اسموگرونیکی ( $C_s$ )
۰/۶	حداکثر لزجت گردابه‌ای قائم (مترمربع بر ثانیه)
۰/۰۰۱	ارتفاع زبری بستر (متر)

## نتایج و بحث

نقشه توپوگرافی نهایی بستر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و محاسبه شده توسط مدل به ترتیب در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب نشان داده شده است. نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی، مقادیر قابل-توجهی فرسایش در پایین‌دست بازشدگی موضعی و رسوب‌گذاری در نواحی نزدیک کناره دیواره‌های فلوم را نشان می‌دهند. فرسایش جلوی بازشدگی موضعی در نتیجه مقادیر بالای تنش برشی بستر در زمان شروع شکست سد است. نزدیک جدارها به علت کاهش سرعت جریان و تشکیل گردابه‌های افقی، رسوب‌گذاری اتفاق می‌افتد. در شکل ۵ پروفیل سرعت در فاصله عرضی ۰/۲ متری از مرکز فلوم به همراه توپوگرافی بستر و تراز سطح آب نشان داده شده است.

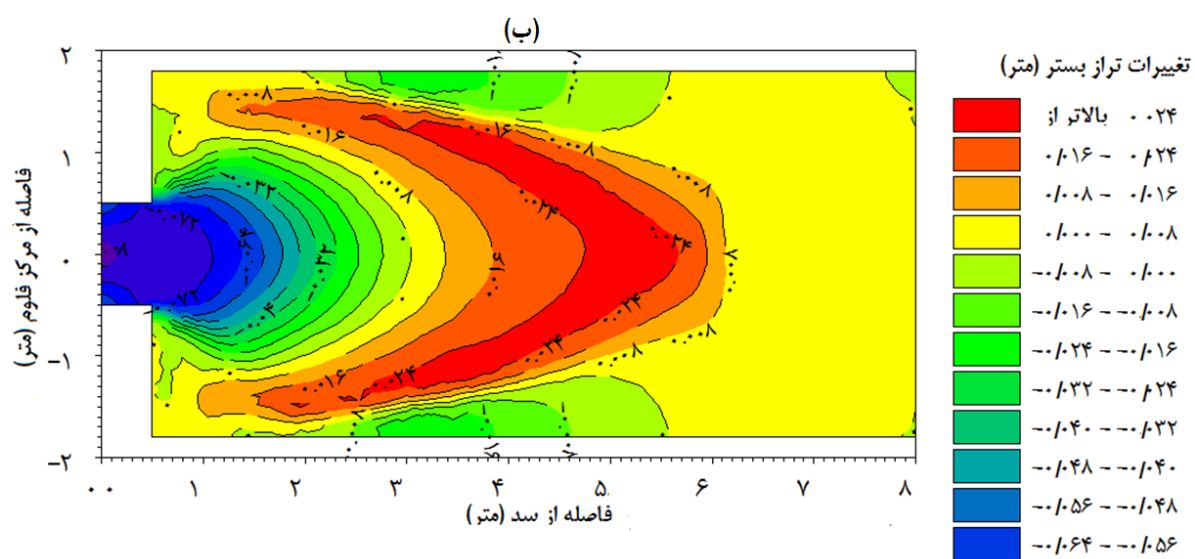
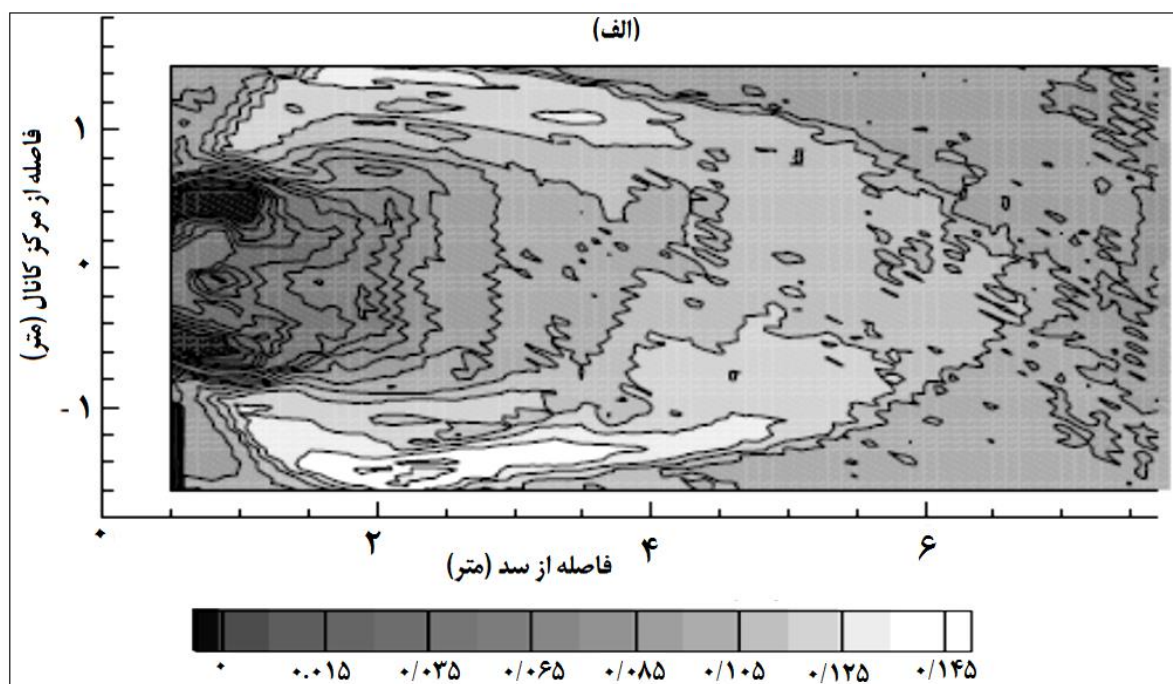
پروفیل‌های طولی بستر در پایین‌دست سد بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده در فواصل عرضی مختلف (۰/۲، ۰/۷ و ۱/۴۵ متری از مرکز) در شکل ۶ نشان داده شده است. یک اختلاف (ناهمخوانی) بین پروفیل محاسبه شده توسط مدل و پروفیل اندازه‌گیری شده در نزدیکی ناحیه بازشدگی موضعی در فاصله عرضی ۱/۴۵ متری از مرکز فلوم وجود دارد. این اختلاف حاکی از آن است که مدل مقادیر فرسایش و رسوب‌گذاری را کم‌تر از مقدار واقعی تخمین می‌زند زیرا حل معادلات سنت و نانت در نزدیکی ناحیه شکست سد نتایج نزدیک به واقعی را ارائه نمی‌دهد (Larocque et al., 2013). علاوه بر آن، فرمول‌های موجود برای محاسبه رسوب، برای شرایط حمل رسوب تعادلی تحت جریان‌های یکنواخت ماندگار استخراج شده‌اند که این شرایط برای شکست سد بر روی بسترهای فرسایش‌پذیر صادق نمی‌باشد. همچنین غلظت رسوب در نزدیک بستر رودخانه از غلظت رسوب در مرکز سلول پایینی و از معادله راس<sup>۱</sup> و یا پروفیل‌های مشابه تعیین می‌شود (Zhang et al., 2013; Wu et al., 2000). اگرچه ممکن است این پروفیل غلظت رسوب در رودخانه‌های آبرفتی معتبر و به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گیرد، اما برای بیان توزیع عمودی غلظت رسوب در جریان‌های ناشی از شکست سد کافی نمی‌باشد.

در شکل ۷ بردارهای سرعت جریان در لایه نزدیک بستر و لایه نزدیک سطح آب برای زمان ۵ ثانیه نشان داده شده است. اختلاف در مقدار و جهت سرعت نزدیک جداره در کف بستر و سطح آب بر وجود جریان ثانویه در مقطع عرضی دلالت دارد. علاوه بر آن، در نظر گرفتن فشار غیرهیدرواستاتیکی در شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی باعث تغییر در میدان سرعت جریان می‌گردد که در نتایج تحقیق حاضر این امر به وضوح مشاهده می‌گردد (شکل ۷). از آن‌جا که موج‌های ناشی از شکست سد به سمت جداره‌های فلوم گسترش می‌یابند پس از برخورد با دیواره‌های جانبی جریان برگشت داده می‌شود. بنابراین قدرت جریان کاهش یافته و رسوب‌گذاری در پایین‌دست فلوم در

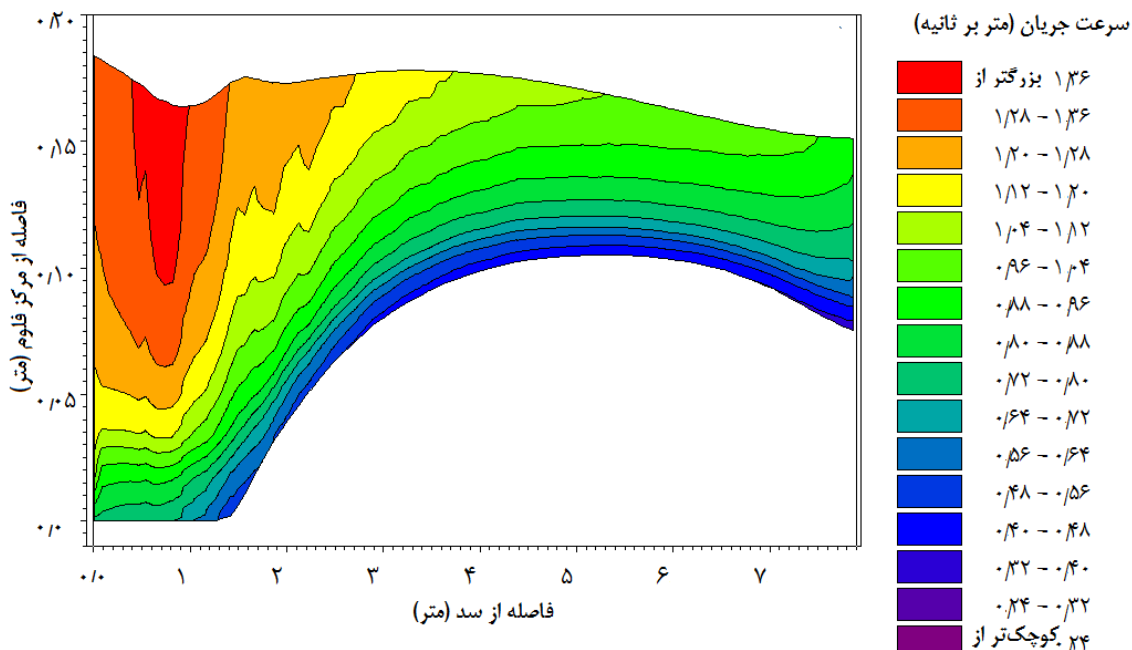
قسمت کناره‌ها اتفاق می‌افتد. الگوی رسوب‌گذاری توسط موج‌های عرضی ناشی از برگشت جریان پس از برخورد به دیواره‌ها تعیین می‌شود. در شکل ۸ تغییر پروفیل طولی بستر با زمان نشان داده شده است. شدت تغییرات پروفیل بستر در ۵ ثانیه اول بیش‌تر است و با گذشت زمان از شدت تغییرات آن کاسته می‌شود. با افزایش فرسایش، رسوبات شسته شده از چاله فرسایشی در پایین‌دست انباشته شده و تپه رسوبی را تشکیل می‌دهند که با گذشت زمان ابعاد آن بزرگ شده و به سمت پایین‌دست توسعه می‌یابد. علاوه بر آن تغییرات تراز سطح آب در نقاط  $P_1, P_3, P_5, P_7$  (نقاط مشخص شده در شکل ۲) نسبت به زمان در شکل ۹ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در نزدیکی بازشدگی موضعی، سطح آب رفتار نوسانی از خود نشان می‌دهد که با گذشت زمان به حالت پایدار می‌رسد. علت این امر به تغییرات شدید تراز کف بستر در زمان‌های اولیه مربوط می‌شود. علاوه بر آن مقایسه مقادیر تراز سطح آب محاسبه شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده بیانگر تطابق خوب بین داده‌های مشاهده‌ای و پیش-بینی شده با مدل است. این در حالی است که نتایج مطالعه (Haltas et al., 2016) که با استفاده از مدل FLO-2D بر روی سد اورکمز<sup>۲</sup> ترکیه انجام گرفته بود، نشان داد که اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده تراز آب به‌ویژه در زمان‌های اولیه زیاد می‌باشد. به-طوری‌که میزان اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده حداکثر تراز آب در بیش‌ترین حالت در حدود ۲۷ درصد گزارش شده است. همچنین میزان خطای مدل مورد مطالعه آن‌ها در پیش‌بینی وقوع زمان حداکثر تراز آب در حدود ۴۲ درصد می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

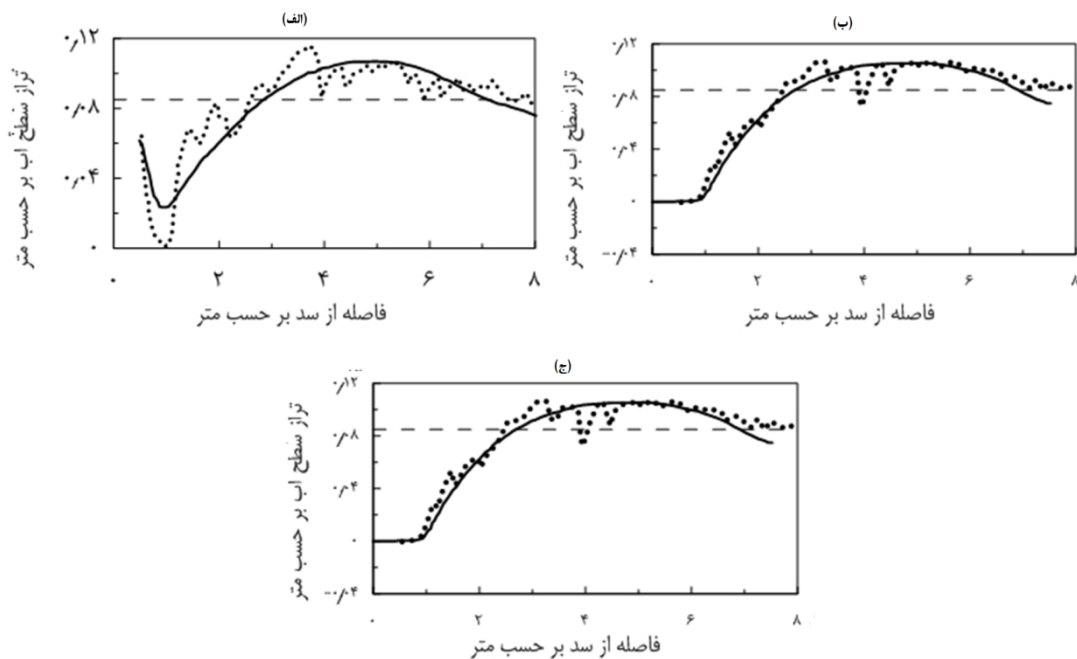
در تحقیق حاضر، به بررسی قابلیت مدل Mike 3 Flow Model در شبیه‌سازی صحیح از جریان‌های سطح آزاد نظیر سیلاب ناشی از شکست سد پرداخته شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل سه‌بعدی مذکور قابلیت شبیه‌سازی رفتار جریان‌های غیرماندگار را در کل دوره مشاهداتی دارا می‌باشد. همچنین نتایج تحقیق حاضر نشان داد که در برخی از نقاط اندکی تفاوت بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد. علاوه بر آن مدل قادر است اطلاعات کامل و دقیق از مقادیر فیزیکی روند تکامل سیل در مکان و زمان همچون عمق آب، مشخصات سطح آزاد، سرعت جریان، دینامیک جبهه موج و غیره را فراهم کند.



شکل ۴- توپوگرافی نهایی بستر پایین دست سد، (الف): اندازه گیری شده توسط IAHR (2012) و (ب): شبیه سازی شده

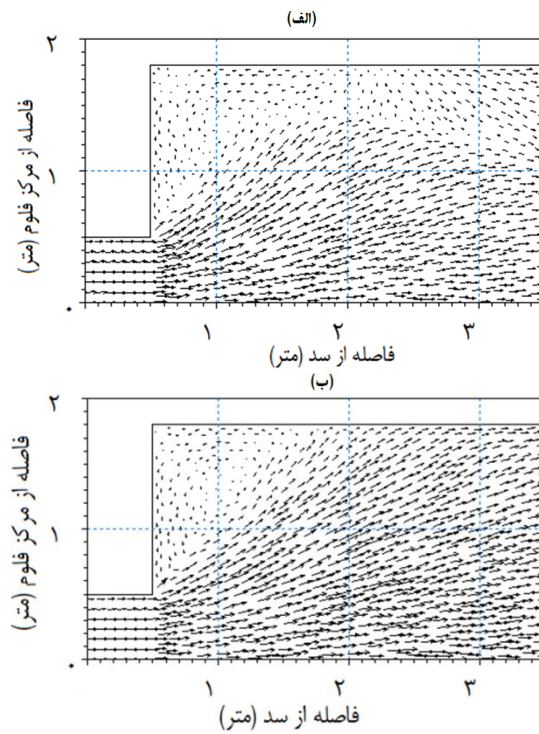


شکل ۵- پروفیل سرعت در فاصله عرضی ۰/۲ متری از مرکز فلووم به همراه توپوگرافی بستر و تراز سطح آب

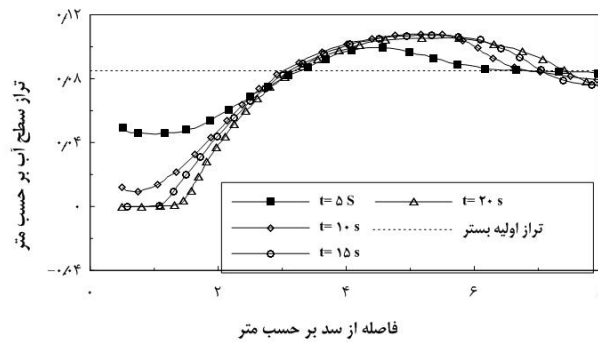


شکل ۶- پروفیل طولی بستر محاسبه شده توسط مدل (خطوط ممتد) و اندازه‌گیری شده توسط IAHR (2012) (نقطه‌چین) در پایین دست سد، (الف): ۰/۲ متری از مرکز کانال، (ب): ۰/۷ متری از مرکز کانال و (ج): ۱/۴۵ متری از مرکز کانال

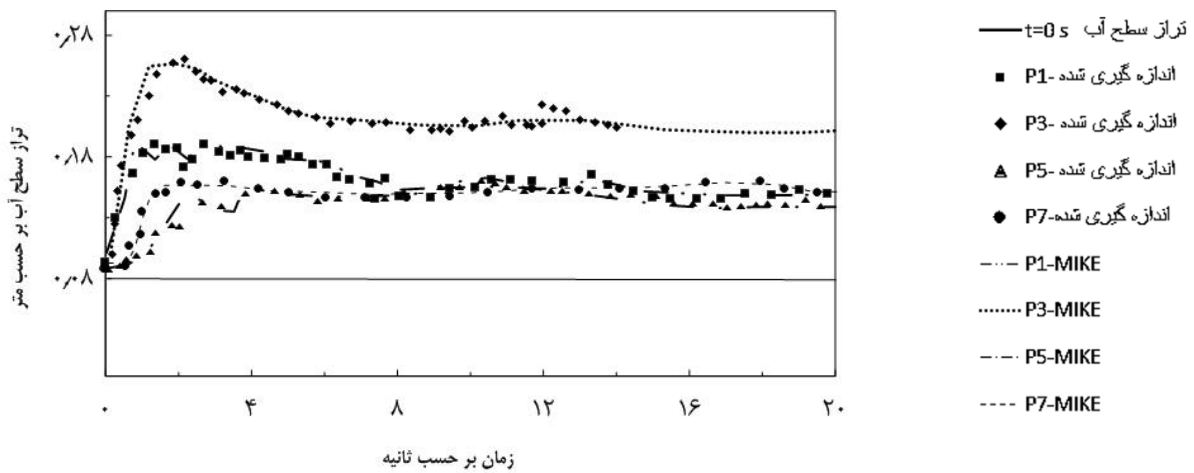




شکل ۷- بردارهای سرعت در زمان ۵ ثانیه، (الف): لایه یک (کف بستر) و (ب): لایه ۱۰ (سطح آب)



شکل ۸- تغییر پروفیل طولی بستر با زمان در فاصله ۰/۲ متری از مرکز فلوم



شکل ۹- تغییرات تراز سطح آب در نقاط P<sub>7</sub>، P<sub>5</sub>، P<sub>3</sub>، P<sub>1</sub>

منابع

- numerical modeling of flood wave propagation in an urban area due to dam-break, Izmir, Turkey. *Natural Hazards*. 81.3: 2103-2119.
- Longo, S. 2005. Two-phase flow modeling of sediment motion in sheet flows above plane beds. *Journal of hydraulic engineering*. 131.5: 366-379.
- Larocque, L.A., Imran, J., Chaudhry, M.H. 2013. 3D numerical simulation of partial breach dam-break flow using the LES and  $k-\epsilon$  turbulence models. *Journal of Hydraulic Research*. 51.2: 145-157.
- Marsooli, R and Wu, W. 2014. 3-D finite-volume model of dam-break flow over uneven beds based on VOF method. *Advances in Water Resources*. 70: 104-117.
- Pasquale, N., Perona, P., Schneider, P., Shrestha, J., Wombacher, A and Burlando, P. 2011. Modern comprehensive approach to monitor the morphodynamic evolution of a restored river corridor. *Hydrology and Earth System Sciences*. 15.4: 1197-1212.
- Paquier, A and Goutal, N. 2016. Dam and levee failures: an overview of food wave propagation modeling. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, EDP Sciences*. 5-12.
- Wu, W., Wang, S.S.Y and Jia, Y. 2000. Non-uniform sediment transport in alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research*. 38.6: 427-434.
- Wu, W and Wang, S.S.Y. 2007. One-dimensional modeling of dam break flow over movable beds *Journal of hydraulic engineering*. 133.1: 48-58.
- Wu, W, Marsooli, R and He, Z. 2012. A depth-averaged two-dimensional model of unsteady flow and sediment transport due to noncohesive embankment break/breaching. *Journal of hydraulic engineering*. 138.6: 503-516.
- Yang, C., Lin, B.L., Jiang, C.B and Liu, Y. 2010. Predicting near-field dam-break flow and impact force using a 3D model. *Journal of Hydraulic Research*. 48.6: 784-792.
- Xia, J., Lin, B., Falconer, A and Wang, G. 2010. Modeling dam-break flows over mobile beds using a 2D coupled approach. *Advances in Water Resources*. 33.2: 171-183.
- Zhang, S., Duan, J and Strelkoff, T. 2013. Grain-scale nonequilibrium sediment-transport model for unsteady flow. *Journal of hydraulic engineering*. 139.1: 22-36.
- Zima, P. 2007. Two-dimensional vertical analysis of dam-break flow. *Task Q*, 11.4: 315-328.
- ندرخانلو، و.، صمدی، ر.ع.، مظاهری، م و سپهری، ج. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی سیلاب ناشی از شکست سد. سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۲۳-۲۱ آبان، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
- Ali, M., Sterk, G., Seeger, M., Boersema, M., and Peters, P. 2012. Effect of hydraulic parameters on sediment transport capacity in overland flow over erodible beds. *Hydrology and Earth System Sciences*. 16.2: 591-601.
- Amoudry, L.O and Liu, P.L.-F. 2009. Two-dimensional two-phase granular sediment transport model with applications to scouring downstream of an apron. *Coastal Engineering*. 56.7: 693-702.
- Anon, Y. 2012. Dam-break flows over mobile beds: Experiments and benchmark tests for numerical models. International association for hydraulic research (IAHR) working group for dam-break flows over mobile beds. *Journal of hydraulic engineering*. 50.4: 364-375.
- Cao, Z., Pender, G., Wallis, S and Carling, P. 2004. Computational dam-break hydraulics over erodible sediment bed. *Journal of hydraulic engineering*. 130.7: 689-703.
- Cao, Z., Li, Z., Pender, G and Hu, P. 2012. Non-capacity or capacity model for fluvial sediment transport. *Water Management*, 165.4: 193-211.
- Capart, H and Young, D.L. 1998. Formation of jump by the dam-wave over a granular bed. *Journal of Fluid Mechanics*. 372: 165-187.
- Capart, H and Young, D.L. 2002. Two-layer shallow water computations of torrential flows. In *Proceedings of River Flow*. Balkema Lisse Netherlands. 1003-1012.
- Formann, E., Habersack, H.M and Schober, St. 2007. Morphodynamic river processes and techniques for assessment of channel evolution in Alpine gravel bed rivers. *Geomorphology*. 90.3-4: 340-355.
- Fraccarollo, L and Capart, H. 2002. Riemann wave description of erosional dam break flows. *Journal of Fluid Mechanics*. 461: 183-228.
- Greco, M., Iervolino, M., Leopardi, A and Vacca, A. 2012. A two-phase model for fast geomorphic shallow flows. *International Journal of Sediment Research*. 27.4: 409-425.
- Haltas, I., Tayfur, G., Elci, E. 2016. Two-dimensional

## 3D Numerical Simulation of Dam-Break Flows with Sediment Transport over Movable Bed using Mike 3 Flow Model FM

M. Hemmati<sup>1\*</sup>, M. Soudi<sup>2</sup>, V. Naderkhanloo<sup>3</sup>

Received: Jun.20, 2017

Accepted: Agus.01, 2017

### Abstract

Dam-break flows can erode, transport and deposit sediment particles and create severe morphological problems such as significant alternations to river channel, banks, and floodplains, devastating scour around hydraulic structures and so on. Therefore, the interactions between flow, sediment transport, and channel morphology have raised a strong motivation to study dam-break flows on movable beds. In this research Mike 3 Flow Model FM have been used to simulate dam-break flows with sediment transport over movable beds. The model is finally tested using a benchmark experiments carried out in a sudden-expanded flume to investigate the partial dam-break flow over movable beds. The simulation results of water level and bed changes are in reasonably good agreement with the experimental measured data. Comparison between experimental and numerical results revealed that the Mike 3 Flow Model FM able to predict dam-break flows, erosion, and sedimentation process at the downstream of the dam. Also, the present research showed that the parameters such as flow depth, flood domain, spread time of flood wave and time series of velocity correctly simulated by mentioned model. Moreover, the present results reveal that the mentioned 3D model improves the accuracy of calculated morphological changes at the initial stages of dam-break flow, near the wave front.

**Keywords:** Dam-break, Mike 3 Flow Model FM, Movable bed, Sediment transport, Simulation

---

1- Assistant Professor of water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran; b: Assistant Professor of Water Engineering, Lake Urmia Research Institute, Urmia university, Urmia, Iran  
2,3- Ph.D. Student of Hydraulic Structures, Urmia University, Urmia, Iran  
(\*-Corresponding Author Email: m.hemmati@urmia.ac.ir)