

## انتقال بار بستر تحت رژیم پرش رسوبات در جریان آشفته بخش دوم: تحلیل حساسیت پارامترهای مهم مدل

رضا براتی<sup>1</sup>، سید علی اکبر صالحی نیشابوری<sup>2\*</sup>، گودرز احمدی<sup>3</sup>

1- دکتری مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

2- استاد دانشکده عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

3- استاد دانشکده مهندسی مکانیک و هوانوردی، دانشگاه کلارکسون

\* salehi@modares.ac.ir

**چکیده** - در این پژوهش، مدل سه بعدی اوپلری-لاگرانژی انتقال رسوب توسعه داده شده در بخش اول این سری مقالات، به منظور پیش بینی اثرات زبری بستر کانال، دمای آب (اثر لزجت) و چگالی دانه های رسوب مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامترهای انتخاب شده هم از نظر هیدرولیک انتقال رسوب و هم از نظر بررسی عدم قطعیت داده های آزمایشگاهی مهم هستند. نتایج نشان می دهد که افزایش زبری بستر منجر به کاهش مشخصات پرش و در نتیجه میزان انتقال بار بستر می گردد. همچنین اثر دمای (لزجت) آب در محدوده ماسه اثرات قابل توجهی دارد و ضروری است به منظور کاهش عدم قطعیت داده های آزمایشگاهی تحت کنترل قرار بگیرد. اثر چگالی رسوبات بر نرخ انتقال رسوب هم در محدوده ماسه و هم شن قابل توجه است و در نظر گرفتن دانه های با چگالی متفاوت از رسوبات طبیعی در مطالعات آزمایشگاهی می تواند اثرات قابل توجهی بر نتایج داشته باشد.

**کلید واژگان:** انتقال رسوب، تحلیل حساسیت، زبری بستر، دما (لزجت) آب، چگالی.

### 1- مقدمه

مفهوم دوم ناشی از کمبود اطلاعات نمی باشد و می تواند به صورت آگاهانه (مثل خطای گرد کردن یا خطای ناشی از روش عددی) یا ناآگاهانه (مثل خطای برنامه نویسی به دلیل خطای انسانی) رخ دهد (Oberkampf et al. 1998). در تحقیقات گذشته انتقال رسوب، مدل های لاگرانژی مختلف با نیروها و اثرات مختلف هیدرودینامیکی نتایج مشابه و قابل قبولی برای یک سری داده آزمایشگاهی مشابه (با شرایط اندازه رسوبات و جریان محدود) داشتند که این مبحثی سوال بر انگیز است. در بخش اول این سری مقالات (براتی و همکاران، 1396)، به صورت سازمان یافته ای کلیه مراحل صحت سنجی، صلاحیت سنجی و اعتبار سنجی یک مدل سه بعدی اوپلری-لاگرانژی تحت شرایط شکل بستر صاف با در نظر گرفتن حرکت رسوبات، ارائه شد. با توجه به شواهد آزمایشگاهی موجود نتایج قابل

به طور کلی در هنگام توسعه یک مدل عددی وجود داده های آزمایشگاهی معتبر یکی از موارد ضروری است. با این حال با توجه به اینکه در شبیه سازی های عددی فرضیات و اصول ساده کننده ای در نظر گرفته می شود، این انتظار وجود ندارد که نتایج دقیقاً یکسانی با داده های آزمایشگاهی حاصل شود. در این راستا تبیین مفاهیم عدم قطعیت<sup>1</sup> و خطا<sup>2</sup> اهمیت بالایی دارد. عدم قطعیت و خطا به کلیه مواردی اطلاق می گردند که منجر به کاهش دقت شبیه سازی پدیده می شوند. مفهوم نخست صرفاً به دلیل عدم اطلاعات کافی<sup>3</sup> از پدیده رخ می دهد در حالی که

<sup>1</sup> Uncertainty

<sup>2</sup> Error

<sup>3</sup> Lack of knowledge

3) دمای آزمایش‌ها معمولاً به طور مشخص و قابل قبولی ثابت نگه‌داری نشده و یا مقدار آن گزارش نشده است. بنابراین در مدل‌سازی عددی حاضر مقدار استاندارد 20 درجه سانتی‌گراد مد نظر قرار گرفته است. این موضوع بر مقدار لزجت سینماتیکی و در نتیجه عوامل مختلفی از مدل عددی تأثیر قابل توجهی دارد.

4) برخی داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده برای اعتبارسنجی در یک بستر متحرک برداشت شده‌اند، در صورتی که مدل‌سازی تحت بستر ثابت انجام شده است. این موضوع می‌تواند در مقدار ارتفاع زبری مؤثر در شبیه‌سازی تأثیرگذار باشد.

5) برخی آزمایش‌ها برای رسوباتی با چگالی متفاوت با رسوبات طبیعی انجام شده‌اند، مثلاً تحقیق Abbott and Francis (1977) برای رسوباتی با چگالی پایین‌تر از رسوبات طبیعی انجام شده است.

6) از برخی اثرات هیدرودینامیکی، نظیر اثر جداره بر ضرایب لیفت و درگ در مدل‌سازی عددی به دلیل نبود اطلاعات کافی، صرف‌نظر شده است.

7) مقدار سرعت برشی بحرانی در بیشتر آزمایش‌ها به صورت عددی گزارش نشده است و لزوماً با مقادیر استفاده شده در شبیه‌سازی عددی یکسان نمی‌باشد.

8) برخی عوامل دیگر، نظیر میزان جور شدگی رسوبات بستر، شکل‌های بستر، حضور رسوبات چسبنده، مشخصات هندسه افقی و قائم کانال، عدم دقت محاسبه سرعت برشی جریان و ... در مطالعات آزمایشگاهی نیز می‌تواند ریشه تفاوت نتایج مطالعات عددی و آزمایشگاهی باشد.

9) در نهایت هر داده آزمایشگاهی به دلیل برخی ریشه‌های خطا در اندازه‌گیری پارامترها دچار عدم قطعیت است.

مشخص کردن مهم‌ترین پارامترهای مدل و میزان تأثیر آن‌ها متناسب با شرایط مدل، از طریق تحلیل حساسیت عوامل دخیل در مساله انجام‌پذیر است (Saltelli et al. 2008; Ruark et al. 2011). در میان عوامل ذکر شده پیش‌بینی اثرات زبری بستر کانال، دما (اثر لزجت) آب و چگالی دانه‌های رسوب در این مقاله مورد مطالعه قرار خواهند گرفت. شایان ذکر است که کلیه تحلیل‌ها برای بار

قبولی برای محدوده ماسه ریز تا شن درشت و شرایط جریان مختلف حاصل گردید و در عین حال بدون هیچگونه فرایند کالیبراسیونی تمامی اثرات هیدرودینامیکی مؤثر مد نظر قرار گرفت. به این ترتیب می‌توان از مدل توسعه داده شده به عنوان ابزاری کارآمد و به عنوان یک آزمایشگاه عددی در مرحله پیش‌بینی استفاده نمود.

هدف اصلی مقاله حاضر بررسی برخی از ریشه‌های تفاوت میان نتایج یافته‌های آزمایشگاهی و مدل عددی است. به عبارت دیگر راجع به این موضوع بحث می‌شود که درست است کالیبراسیون یک ابزار برای افزایش تطابق نتایج مدل عددی با داده آزمایشگاهی است، ولی برخی از اختلاف نتایج ریشه فیزیکی دارند و با دادن ورودی مناسب و مشابه شرایط آزمایشگاهی می‌توان نتایج قابل قبولی با مدل عددی دست یافت؛ البته بدون در نظر گرفتن فرایند کالیبراسیون. اعمال کالیبراسیون خصوصاً برای فرایند پیچیده‌ای مانند انتقال رسوب هیچگونه تضمینی برای دستیابی به نتایج قابل قبول در مرحله پیش‌بینی در اختیار قرار نمی‌دهد.

عوامل متعددی به عنوان ریشه‌های عدم قطعیت و خطا در مدل توسعه داده شده نهفته‌اند که منجر به اختلاف میان نتایج مدل عددی و داده‌های مشاهداتی (آزمایشگاهی و میدانی) می‌گردد. از جمله این عوامل می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

1) رسوبات در بیشتر مطالعات آزمایشگاهی (خصوصاً در ارتباط با آزمایشاتی با چگالی مشابه رسوبات طبیعی) کاملاً به صورت کروی نمی‌باشند، در حالیکه در مطالعه عددی به صورت کروی در نظر گرفته می‌شوند. این موضوع می‌تواند در محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر رسوبات و همچنین نیروهای ناشی از برخورد آنها با بستر تأثیرگذار باشد.

2) اندازه رسوبات در مطالعات آزمایشگاهی به صورت مجموعه‌ای از قطرها با یک مقدار میانگین هستند (توزیعی از اندازه رسوبات). در حالیکه در مطالعه عددی شبیه‌سازی‌ها برای یک قطر مشخص و معادل میانگین داده‌های آزمایشگاهی انجام شده است.

زبری<sup>5</sup> و (3) مشخصه‌ای از مدل (پارامتر کالیبراسیون<sup>6</sup>) به کار گرفته شده است؛ (Morvan et al. 2008; Smith, 2014). با این حال، تفکیک این سه مفهوم از یکدیگر به سختی امکان‌پذیر است. در واقع زبری تعامل میان پستی و بلندی‌های سطح با جریان سیال است. در عمل تعیین این اثرات متقابل ناهمواری‌های سطح و جریان به سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد و زبری به عنوان عاملی که کلیه این اندرکنش‌های بین جریان و سطح بستر را در برمی‌گیرد، تخمین زده (کالیبره) می‌شود. در مکانیک سیالات دو مفهوم آخر متداول‌تر هستند و معمولاً در کنار یکدیگر بکار می‌روند. ارتفاع زبری (مفهوم دوم) به فاصله قائم از مرز که در آن سرعت جریان برابر صفر است، اطلاق می‌گردد که در واقع ثابت انتگرال‌گیری است که از فرض قانون سرعت لگاریتمی حاصل می‌شود. با این حال در مدل‌سازی‌ها با توجه به اینکه عملاً مقدار ارتفاع زبری مشخص نمی‌باشد، از آن به عنوان پارامتری برای افزایش تطابق نتایج مدل با داده‌های آزمایشگاهی (مفهوم سوم) استفاده می‌شود. در مطالعات رسوب این موضوع به وضوح قابل مشاهده است. به عنوان نمونه در مطالعات (van Rijn (1984) و Nasrollahi et al. (2008) ارتفاع معادل زبری به عنوان یک پارامتر کالیبراسیون برای افزایش تطابق میان داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی در شبیه‌سازی تک-پرشه رسوبات استفاده شد. در واقع زبری به عنوان یک پارامتر کالیبراسیون نماینده مجموع اثرات انواع تلفات انرژی و ممنتوم در نظر گرفته می‌شود. با این حال، زمانی که از مدل‌های با ترم‌های هیدرودینامیکی کامل‌تر نظیر مدل حاضر استفاده می‌شود که در آن اثرات نوسانات جریان آشفتگی از طریق مدل‌سازی آشفتگی و سایر عوامل مقاومت جریان توسط ترم‌های نیرو مد نظر قرار گرفته‌اند، انتظار می‌رود ارتفاع زبری معادل از مفهوم یک پارامتر کالیبراسیونی به سمت یک پارامتر فیزیکی سوق داده شود.

در تعیین ارتفاع معادل زبری اختصاص اندازه مرجع رسوبات<sup>7</sup> از اهمیت بالایی برخوردار است. (Cheng (2015)

بستر تحت رژیم پرش و رسوبات غیر چسبنده انجام خواهند شد. در ادامه نتایج تحلیل حساست سه عامل مذکور به صورت گرافیکی و همچنین در ارتباط با مقادیر نمایه حساسیت (یک معیار متداول برای بررسی اثر تغییر پارامترهای ورودی بر خروجی مدل) به همراه بحث بر روی نتایج ارائه خواهد شد. در انتها نیز جمع‌بندی نتایج ارائه می‌گردد.

## 2- نتایج پیش‌بینی مدل و انجام تحلیل حساسیت

منظور از پیش‌بینی<sup>1</sup>، پیش‌گویی وضعیت سیستم فیزیکی تحت شرایطی که مدل پیش از این برای آن اعتبارسنجی نشده است، می‌باشد. در واقع هدف غائی از توسعه یک مدل، شبیه‌سازی چنین شرایطی با دقت قابل قبول است. در این بخش پیش‌بینی اثرات تغییر سه عامل مهم در انتقال رسوب، شامل زبری نسبی بستر، دمای آب و چگالی رسوب با کمک مدل توسعه داده شده انجام خواهد شد. به منظور بررسی اثر تغییر پارامترهای ذکر شده بر روی پارامترهای انتقال رسوب، از رابطه (1) به عنوان نمایه حساسیت<sup>2</sup> استفاده شده است (Akbari and Barati, 2012):

$$S(\%) = \left( \frac{O_2 - O_1}{O_2 + O_1} \right) / \left( \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \right) \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه S نمایه حساسیت،  $I_1$  و  $I_2$  به ترتیب کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین مقدار پارامتر ورودی و  $O_1$  و  $O_2$  مقادیر خروجی متناظر با  $I_1$  و  $I_2$  می‌باشند. علامت منفی نمایه حساسیت، نشان‌دهنده کوچک‌تر شدن مقدار خروجی به ازای بزرگ‌تر نمودن پارامتر ورودی است.

### 2-1- اثر زبری نسبی و بحث بر روی نتایج

عبارت زبری در علوم وابسته به زمین تحت مفاهیم مختلفی شامل: (1) مشخصه‌ای از سطح (زبری بستر<sup>3</sup>)، (2) مشخصه‌ای از جریان (مقاومت جریان<sup>4</sup> یا ارتفاع معادل

<sup>5</sup> Equivalent roughness height

<sup>6</sup> Calibration parameter

<sup>7</sup> Representative grain size

<sup>1</sup> Prediction

<sup>2</sup> Sensitivity index

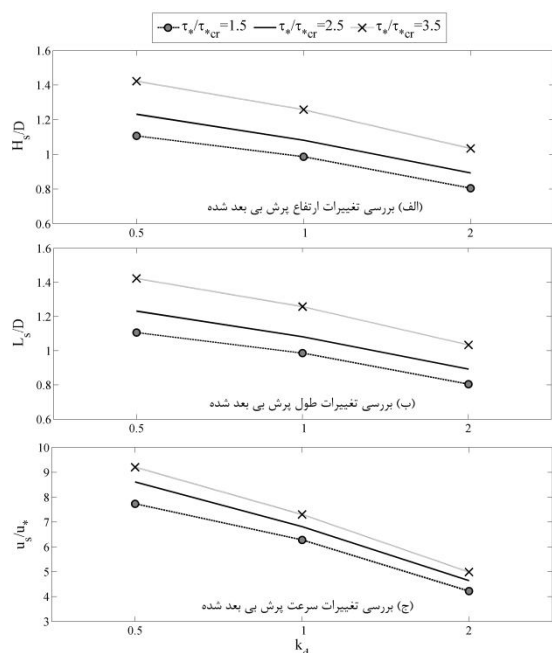
<sup>3</sup> Surface roughness

<sup>4</sup> Flow resistance

می‌رود که افزایش زبری منجر به کاهش میزان بار بستر نیز گردد که از لحاظ فیزیکی قابل توجیه است. بنابراین این روند نیز تأیید کننده آن است که مدل عددی-تئوری حاضر با فیزیک مساله تطابق دارد. بررسی مقادیر نمایه حساسیت جدول 1 نشان می‌دهد که بیشترین تأثیر پارامتر زبری نسبی برای محدوده ماسه بر روی پارامتر طول پرش و برای محدوده شن بر روی پارامترهای طول و سرعت پرش است.

جدول 1 مقادیر نمایه حساسیت برای زبری نسبی

مقدار متوسط قدر مطلق SD	$\tau^*/\tau_{*cr}$			پارامتر	D (cm)
	3/5	2/5	1/5		
26	-26	-27	-26	$H_s$	0/053
71	-68	-73	-73	$L_s$	
50	-50	-50	-50	$U_s$	
30	-21	-30	-38	$H_s$	0/5
59	-39	-58	-80	$L_s$	
53	-42	-52	-66	$U_s$	
27	-17	-26	-40	$H_s$	2/25
52	-34	-47	-73	$L_s$	
48	-39	-45	-61	$U_s$	



شکل 1 بررسی اثر زبری بر روی مشخصات پرش رسوبات برای دانه 0/053 سانتی‌متری

این ارتفاع را با کمک قطر متوسط بر مبنای میانگین حجمی رسوبات<sup>1</sup> و انحراف معیار هندسی<sup>2</sup>  $\sigma_g$  اندازه رسوبات تبیین نمود. نتایج تحلیل تئوری او نشان داد  $D_{50}$  برای  $\sigma_g=1$ ،  $D_{65}$  برای  $\sigma_g=1.3$ ،  $D_{85}$  برای  $\sigma_g=2$  و  $D_{95}$  برای  $\sigma_g=3$  اندازه مرجع رسوبات می‌باشند.

در مطالعه حاضر حرکت تک‌دانه رسوب بر روی بستر با دانه‌های هم‌قطر مدنظر است، بنابراین با داشتن قطر دانه‌های بستر به راحتی می‌توان زبری نسبی  $k_d=k_s/D$  که در آن ارتفاع مؤثر (معادل) زبری بستر است، را تعیین نمود. اما به این نکته می‌بایست توجه نمود که در شرایط آزمایشگاهی یا میدانی اصولاً مقدار زبری بستر می‌تواند متفاوت از قطر دانه در حال حرکت باشد و دانه‌های بستر به‌صورت یکنواخت نباشند. به عنوان نمونه داده‌های آزمایشگاهی Niño et al. (1994) برای محدوده شن با میانگین قطر 1/5 و 3/1 سانتی‌متر و به ترتیب با انحراف معیار هندسی 1/33 و 1/25 حاصل شده‌اند. بنابراین یکی از ریشه‌های عدم قطعیت مدل، مقدار زبری نسبی بستر است. حال این سؤال مطرح است که اثر این عدم قطعیت چه مقدار است و بر روی چه مشخصه‌ای از انتقال رسوب بیشترین تأثیر را دارد؟ برای پاسخ به این سؤال برای سه قطر دانه 0/053، 0/5 و 2/25 سانتی‌متر و سه مقدار زبری نسبی 0/5، 1 و 2 تحلیل اثر زبری نسبی انجام شده است (García, 2008). مقادیر نمایه حساسیت زبری بر مشخصات اصلی پرش شامل ارتفاع  $H_s$ ، طول  $L_s$  و سرعت افقی  $U_s$  در جدول 1 خلاصه شده‌اند. همچنین به عنوان نمونه اثر تغییرات زبری نسبی بر روی میانگین آماری 1000 پرش متوالی دانه ماسه با قطر 0/053 سانتی‌متر و شدت جریان‌های مختلف،  $\tau^*/\tau_{*cr}$ ، در شکل 1 نشان داده شده است. در اینجا  $\tau_* = u_*^2 / [g(s-1)D]$  پارامتر شیلدز و  $\tau_{*cr}$  مقدار بحرانی این پارامتر برای لحظه آستانه حرکت را نشان می‌دهند و  $s$  چگالی نسبی است.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار زبری نسبی، مقادیر مشخصات پرش کاهش می‌یابند. با توجه به رابطه مستقیم این مشخصات با مقدار بار بستر این انتظار

<sup>1</sup> Mean-volume diameter

<sup>2</sup> Geometric standard deviation

<sup>3</sup> قطری که 65 درصد دانه‌ها از آن ریزتر هستند.

در آنجا در کلیه شبیه‌سازی‌ها فرض شد دمای آزمایش‌ها، دمای استاندارد 20 درجه سانتی‌گراد است.

بنابراین بررسی اثر دما در انتقال رسوب، نه تنها از نقطه نظر بررسی اثرات تغییرات گرم شدن کره زمین و تغییرات فصلی دمای آب حائز اهمیت است، بلکه از نظر بررسی عدم قطعیت نتایج آزمایشگاهی نیز مهم می‌باشد.

عامل مؤثر که در مدل حاضر نشان دهنده تغییرات دما است، لزجت آب می‌باشد. عامل اصلی لزجت مایعات، نیروی جاذبه مولکولی است و با افزایش دما نیروی جاذبه مولکولی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در مایعات دما و لزجت با یکدیگر رابطه عکس دارند. لزجت سینماتیکی آب برای دماهای مختلف با کمک رابطه زیر قابل محاسبه است (Cheng et al. 2011):

$$v = \left( \frac{60}{T + 40} \right)^{1.45} \times 10^{-2} \quad (2)$$

که در آن  $T$  دمای آب برحسب درجه سلسیوس و  $v$  لزجت سینماتیکی برحسب  $\text{cm}^2/\text{s}$  است. این رابطه در محدوده دمایی صفر تا  $100^\circ\text{C}$  قابل استفاده می‌باشد.

با توجه به محدوده دمای آب در رودخانه‌های طبیعی و دمای آب در فصول مختلف، چهار دمای 2، 12، 20 و 25 درجه سلسیوس در شبیه‌سازی‌ها مد نظر قرار گرفته است. همچنین با توجه به اینکه اثر دما (لزجت) متناسب با قطر و شدت جریان تغییرات اساسی دارد، در مجموع 10 قطر مختلف در محدوده ماسه ریز تا شن درشت انتخاب شده است. خلاصه نتایج نمایه حساسیت برای محدوده‌های ماسه و شن به ترتیب در جدول‌های 2 و 3 ارائه شده است. همچنین اثر تغییرات دما برای قطرهای مختلف و شدت جریان‌های متفاوت بر روی مشخصات اصلی پرش (ارتفاع، طول و سرعت افقی) به ترتیب در شکل‌های 2 تا 4 نمایش داده شده است.

آنچه در ابتدا قابل توجه است این است که در محدوده ماسه (عموماً و نه در همه حالات) رابطه میان مشخصات پرش و لزجت رابطه مستقیم است. به عبارت دیگر با افزایش دما (کاهش لزجت) مشخصات پرش کاهش پیدا می‌کنند. بنابراین این انتظار وجود دارد که با ثابت بودن سایر شرایط، در فصول گرم سال میزان انتقال بار بستر رسوب ریزدانه کاهش پیدا کند.

در مجموع اثر زبری نسبی بر روی سرعت و طول پرش تقریباً دو برابر اثر آن بر روی ارتفاع پرش است. همچنین با افزایش پارامتر شدت جریان  $\tau/\tau_{cr}$  در محدوده ماسه تغییر قابل ملاحظه‌ای بر روی مقادیر نمایه حساسیت مشاهده نمی‌شود، ولی در محدوده شن با افزایش شدت جریان اثر تغییر زبری نسبی بر روی مشخصات پرش کاهش پیدا می‌کند.

به طور خلاصه بر مبنای مقادیر میانگین نمایه حساسیت، اثر تغییر زبری نسبی (در محدوده 0/5 تا 2) به صورت: ارتفاع پرش (40- تا 22- درصد) و سرعت مشخصه پرش (65- تا 40- درصد) است.

## 2-2- اثر دمای آب (لزجت) و بحث بر روی نتایج

بررسی تغییرات دمای آب رودخانه‌ها بر روی مشخصات مختلف رودخانه، از جمله عوامل وابسته به هیدرولیک آن ضروری است. این تغییرات به عوامل محیطی مختلفی شامل دمای هوا، تابش مستقیم آفتاب، رواناب ورودی به رودخانه، آب زیرزمینی ورودی، عمق و عرض رودخانه، سایه احاطه شده بر رودخانه و غیره وابسته است (Piotrowski et al. 2015). در این میان احتمالاً به دلیل گرم شدن کره زمین<sup>1</sup> دمای آب در اکثر رودخانه‌های طبیعی کره زمین در حال افزایش است (Orr et al. 2015; Marszelewski and Pius, 2015). علاوه بر این، دمای آب در فصول مختلف سال نیز تغییرات قابل توجهی دارد. اگرچه این تغییرات وابسته به منطقه مد نظر می‌تواند متفاوت باشد، محدوده تغییرات معمول دمای آب در نقاط مختلف جهان ما بین 2 تا 25 درجه در فصول سرد تا گرم سال است (Webb and Walling, 1985; Isaak et al. 2012; Derx et al. 2012; Piotrowski et al. 2015).

نکته قابل توجه دیگر در ارتباط با اثر دما در انتقال رسوب آن است که در نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط محققین مختلف، کمتر مقدار دمای آب به عنوان یک عامل تأثیرگذار کنترل و گزارش شده است. این موضوع در ارتباط با اکثر داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده در مقاله نخست (براتی و همکاران، 1396) قابل مشاهده می‌باشد.

<sup>1</sup> Global warming

به روشنی قابل مشاهده است.

بیشترین اثر تغییر دما بر روی پارامتر طول پرش است که با افزایش قطر این اثر کاهش پیدا می‌کند. همچنین در قطرهای پایین با افزایش شدت جریان  $\tau^*/\tau_{*cr}$  میزان اثرات تغییرات لزجت (دما) بر روی پارامترهای پرش افزایش پیدا می‌کند، ولی در قطرهای بالاتر از 0/1 سانتی‌متر در این ارتباط روند خاصی مشاهده نمی‌شود.

به‌طور خلاصه می‌توان بیان نمود که بیشترین تأثیر تغییرات دما در محدوده قطر کمتر از 0/1 سانتی‌متر است. بعد از آن بیشترین اثرات برای قطرهای بالاتر از 0/5 سانتی‌متر مشاهده می‌شود. در این میان محدوده قطر 0/1 تا 0/5 سانتی‌متر کمتر تحت تأثیر اثر لزجت (دما) قرار گرفته است. این موضوع در شکل‌های 2 تا 4 به روشنی قابل مشاهده است.

قابل توجه است که یکی از ریشه‌های اثر تغییر لزجت (دما) در مدل، تغییر در مقدار تنش برشی بحرانی (معیار بحرانی شیلدز) می‌باشد.

تنش برشی بحرانی و متعاقب آن سرعت برشی بحرانی با کمک روابط (4 و 3) حاصل شده است (García, 2008):

$$\tau_{*cr} = 0.22 R_p^{-0.6} + 0.06 \exp(-17.77 R_p^{-0.6}) \quad (3)$$

$$\tau_{*cr} = \frac{u_{*cr}^2}{g(s-1)D}, \quad R_p = \frac{\sqrt{(s-1)gD^3}}{\nu} \quad (4)$$

در رابطه فوق تغییر دما منجر به تغییر لزجت آب و تغییر لزجت منجر به تغییر پارامتر بدون بعد قطر  $R_p$  می‌شود. به عنوان نمونه افزایش دما از 2 به 12 درجه برای قطر رسوب 0/053 سانتی‌متر منجر به کاهش سرعت برشی بحرانی از 1/73 به 1/67 سانتی‌متر بر ثانیه می‌شود که برای شدت جریان‌های نسبی ( $\tau^*/\tau_{*cr}$ ) بزرگتر، این اختلاف سرعت برشی جریان افزایش خواهد یافت.

به‌طور خلاصه بر مبنای مقادیر میانگین نمایه حساسیت، اثر تغییر دما (لزجت) (در بازه 2 تا 25 درجه سلسیوس) در محدوده ماسه، متناسب با اندازه رسوب و شرایط جریان به صورت: ارتفاع (70- تا 5 درصد) و سرعت مشخصه (30- تا 15 درصد) می‌باشد. این تغییرات در محدوده شن به صورت: ارتفاع (3 تا 11 درصد) و سرعت مشخصه (10- تا 10 درصد) است.

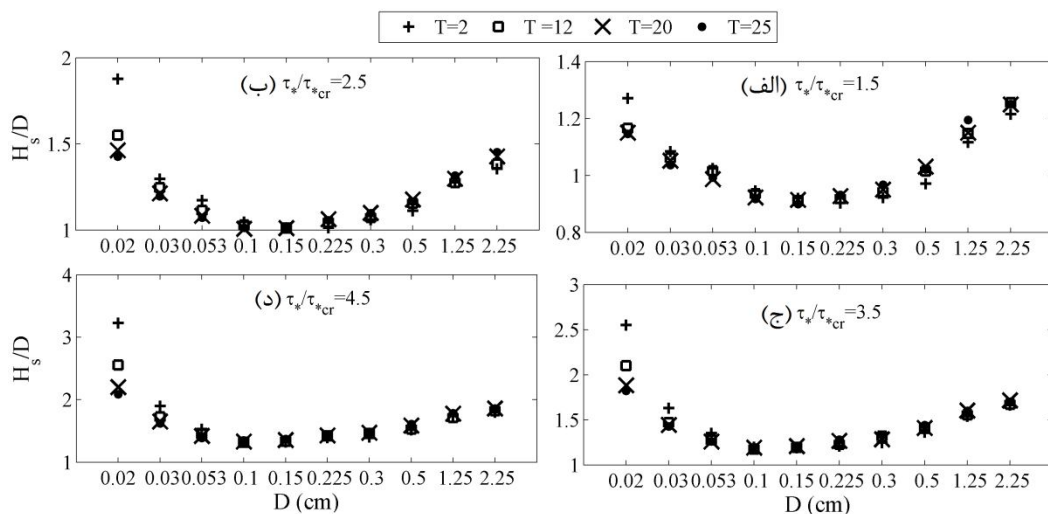
جدول 2 مقادیر نمایه حساسیت اثر لزجت در محدوده ماسه

مقدار متوسط قدر مطلق SD	$\tau^*/\tau_{*cr}$				پارامتر	D (cm)
	4/50	3/50	2/50	1/50		
47	70	55	45	17	$H_s$	0/02
158	188	172	160	113	$L_s$	
8	2	-7	-8	-16	$U_s$	
17	26	21	13	7	$H_s$	0/03
71	100	83	60	39	$L_s$	
4	8	5	1	-3	$U_s$	
12	16	11	15	5	$H_s$	0/05
44	49	43	48	37	$L_s$	
21	20	20	22	19	$U_s$	
3	0	2	5	5	$H_s$	0/10
39	33	37	45	43	$L_s$	
26	20	23	29	31	$U_s$	
3	-5	-2	-1	4	$H_s$	0/15
27	24	25	24	34	$L_s$	
18	13	15	17	28	$U_s$	

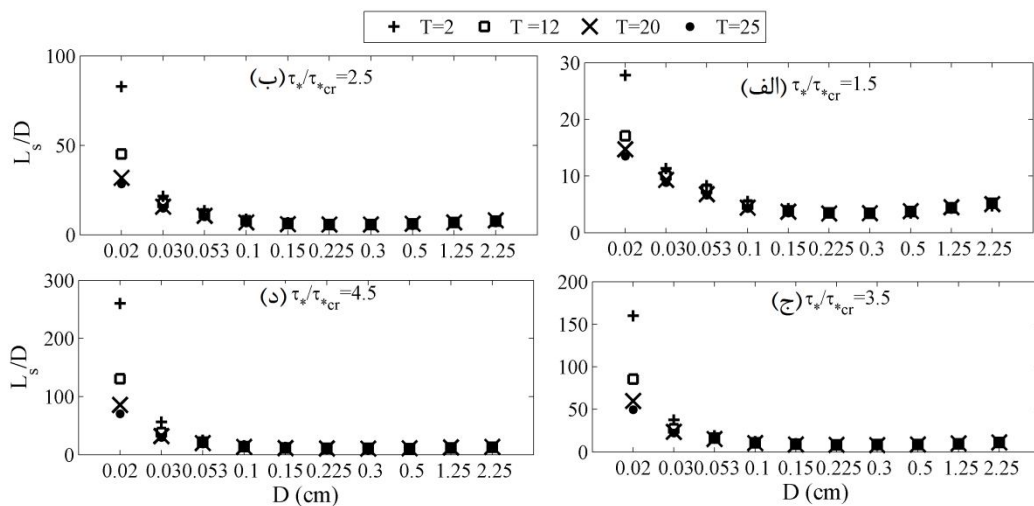
جدول 3 مقادیر نمایه حساسیت اثر لزجت در محدوده شن

مقدار متوسط قدر مطلق SD	$\tau^*/\tau_{*cr}$				پارامتر	D (cm)
	4/5	3/5	2/5	1/5		
6	-2	-9	-7	-5	$H_s$	0/225
8	15	5	8	6	$L_s$	
8	7	5	8	10	$U_s$	
8	-9	-10	-6	-8	$H_s$	0/3
1	-1	0	2	1	$L_s$	
5	-2	2	6	10	$U_s$	
9	-10	-9	-8	-8	$H_s$	0/5
6	-3	-7	-6	-7	$L_s$	
1	-1	-1	1	-1	$U_s$	
6	-3	-6	-5	-11	$H_s$	1/25
7	-2	-7	-6	-14	$L_s$	
5	-2	-5	-2	-9	$U_s$	
6	-5	-3	-11	-5	$H_s$	2/25
10	-9	-1	-16	-13	$L_s$	
5	-3	0	-8	-8	$U_s$	

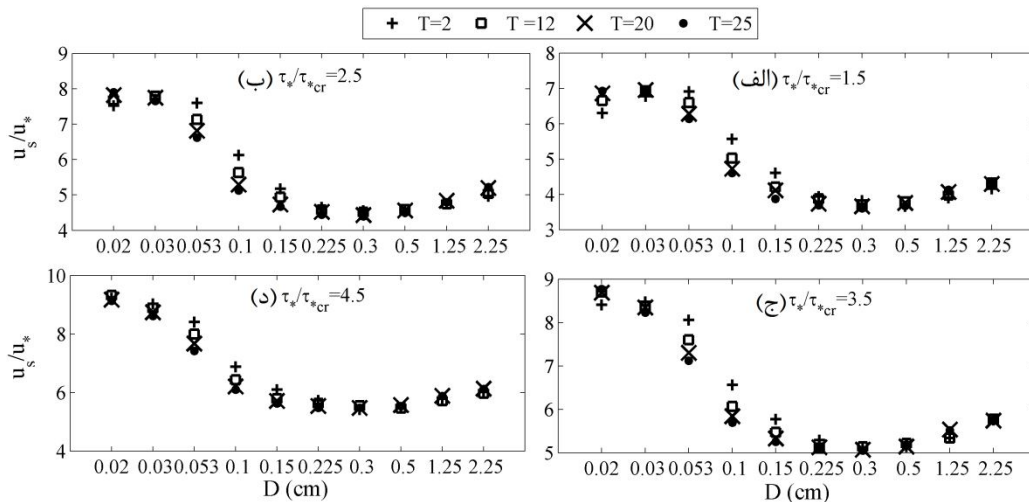
در نقطه مقابل، برای محدوده شن، اثر دما بر مشخصات پرش روند معکوسی دارد. یعنی با افزایش دما (کاهش لزجت) مشخصات پرش نیز افزایش می‌یابند. نکته قابل توجه آن است که در محدوده انتقال از قطر محدوده ماسه به شن (0/15 و 0/225 سانتی‌متر) این تغییر رفتار



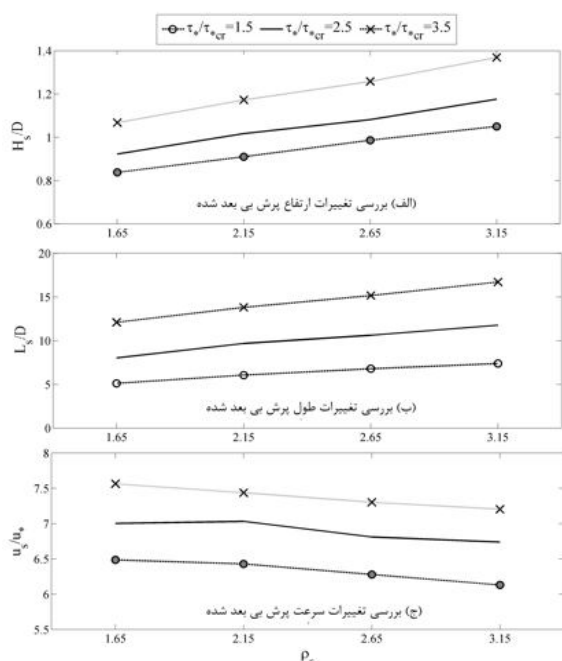
شکل 2 بررسی اثر دما بر روی ارتفاع پرش دانه‌های رسوب در محدوده ماسه ریز تا شن درشت



شکل 3 بررسی اثر دما بر روی طول پرش دانه‌های رسوب در محدوده ماسه ریز تا شن درشت



شکل 4 بررسی اثر دما بر روی سرعت افقی پرش دانه‌های رسوب در محدوده ماسه ریز تا شن درشت



شکل 5 بررسی اثر چگالی بر روی مشخصات پرش رسوبات برای دانه 0/053 سانتی متری

بررسی نتایج نشان می‌دهد که در مجموع رابطه میان چگالی رسوبات و مشخصات پرش مستقیم است. به عبارت دیگر با افزایش چگالی رسوب مقدار مشخصات پرش نیز افزایش می‌یابد.

در نگاه نخست این موضوع با آنچه به صورت فیزیکی قابل انتظار است، ممکن است متناقض به نظر برسد، ولی توجه به این نکته ضروری است که قسمت عمده این افزایش ناشی از تغییر مقدار پارامتر بحرانی شیلدز است. به عبارت دیگر مقدار سرعت برشی بحرانی برای دانه با چگالی بالاتر بر اساس معیار شیلدز به مراتب بالاتر از دانه با چگالی پایین‌تر می‌باشد. برای نشان دادن این موضوع سه اجرای جداگانه مدل انجام شده است. در این حالات دو چگالی 1/65 و 3/15، ولی با سرعت برشی یکسان که منجر به حرکت دانه رسوب در هر دو حالت بشود (یعنی سرعت برشی که برای حرکت دانه با چگالی بزرگ‌تر کافی است  $\tau^*/\tau_{cr} = 1/5$ )، مد نظر قرار گرفته‌اند. تحت این شرایط برای هر سه قطر، مشخصات پرش برای دانه با چگالی کوچک‌تر بیشتر از دانه رسوب با چگالی بزرگ‌تر است. صرف نظر از این موضوع، آنچه مهم است این است که در

### 2-3- اثر چگالی رسوبات و بحث بر روی نتایج

چگالی مواد معدنی در محدوده وسیعی می‌تواند تغییر کند، ولی با توجه به اینکه رسوبات طبیعی اکثراً از جنس کوارتز<sup>1</sup> هستند، مقدار چگالی نسبی (رسوب به آب) 2/65 در رودخانه‌های طبیعی قابل مشاهده است. اما نکته قابل توجهی که وجود دارد این است که در بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی از رسوباتی با جنسی متفاوت و در نتیجه چگالی متفاوت استفاده می‌شود و سؤالی که مطرح است این می‌باشد که اثر این موضوع بر روی مشخصات اصلی پرش چگونه است؟ به عنوان مثال داده‌های آزمایشگاهی برای Francis (1973) و Abbott and Francis (1977) رسوباتی با چگالی نسبی 1/2 تا 2/88 حاصل شده‌اند. رویکرد مشابهی توسط مهدیزاده (1387) نیز مد نظر قرار گرفت. بنابراین در اینجا مدل برای سه قطر دانه 0/053، 0/5 و 2/25 سانتی‌متری و چهار مقدار چگالی نسبی 1/65، 2/15، 2/65 و 3/15 و برای شدت جریان‌های  $\tau^*/\tau_{cr}$  معادل 1/5، 2/5 و 3/5 اجرا شده است.

مقادیر نمایه حساسیت اثر چگالی رسوبات بر مشخصات اصلی پرش در جدول 4 خلاصه شده‌اند. همچنین به عنوان نمونه، اثر تغییرات چگالی رسوبات بر روی میانگین آماری 1000 پرش متوالی دانه ماسه با قطر 0/053 سانتی‌متر و شدت جریان‌های مختلف،  $\tau^*/\tau_{cr}$ ، در شکل 5 نشان داده شده است.

جدول 4 مقادیر نمایه حساسیت برای چگالی رسوبات

D (cm)	پارامتر	$\tau^*/\tau_{cr}$		
		3/5	2/5	1/5
0/053	$H_s$	40	39	36
	$L_s$	51	60	58
	$U_s$	-8	-6	-9
0/5	$H_s$	59	53	57
	$L_s$	80	84	105
	$U_s$	9	11	18
2/25	$H_s$	53	55	56
	$L_s$	75	90	96
	$U_s$	13	18	17

<sup>1</sup> Quartz



عمل مقایسه بر اساس سرعت بحرانی محاسبه شده توسط معیار شیلدز صورت می‌گیرد که بر این اساس رابطه میان چگالی و مشخصات پرش مستقیم است.

در میان مشخصات مختلف پرش بیشترین تأثیر تغییرات چگالی رسوبات بر روی پارامتر طول پرش است. در رتبه بعدی ارتفاع پرش قرار گرفته است. در این میان کمترین تأثیرات بر روی سرعت پرش بوده است.

به طور خلاصه بر مبنای مقادیر میانگین نمایه حساسیت، در ارتباط با اثر تغییر چگالی نسبی رسوبات (در محدوده 1/65 تا 3/15) متناسب با اندازه رسوب و شرایط جریان، تغییرات به صورت: ارتفاع پرش (35 تا 60 درصد) و سرعت مشخصه پرش (9- تا 18 درصد) قابل مشاهده می‌باشد.

نتیجه مهمی که از این تحلیل می‌توان گرفت آن است که برای انجام تحلیل‌های آزمایشگاهی انتقال رسوب به منظور کاهش عدم قطعیت نتایج، استفاده از دانه‌های با چگالی رسوبات طبیعی (چگالی نسبی رسوب به آب معادل 2/65) در اولویت قرار بگیرد.

### 3- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر یک مدل اعتبار سنجی شده برای انتقال رسوب (براتی و همکاران، 1396) (Barati et al. 2014a,b and 2015a,b) به منظور بررسی اثرات عدم قطعیت پارامترهای زبری بستر کانال، دمای آب (اثر لزجت) و چگالی بر مشخصات مهم انتقال رسوب استفاده شده است. محدوده پارامترها، با توجه به آنچه در طبیعت برای آن‌ها قابل وقوع است و همچنین محدوده‌هایی که در مطالعات آزمایشگاهی قبلی مد نظر قرار گرفته، انتخاب شده است. به طور کلی نتایج حاصل از این تحقیق عبارت‌اند از:

(الف) از نقطه نظر هیدرولیک رسوب، پارامتر زبری نسبی در تمامی محدوده‌های ماسه تا شن بر مشخصات پرش تأثیر قابل توجهی دارد. اثر دما برای محدوده ماسه خصوصاً ماسه ریز کاملاً قابل توجه است.

(ب) از نقطه نظر عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی، استفاده از دانه‌های با چگالی متفاوت از رسوبات طبیعی می‌تواند اثرات قابل توجهی بر نتایج داشته باشد. همچنین کنترل شرایط دمای آزمایش‌های انتقال رسوب، خصوصاً

در محدوده ماسه ضروری است.

در مطالعات آینده سایر عوامل عدم قطعیت نتایج مدل، از جمله اثر شکل رسوبات، توزیع اندازه رسوبات، حضور شکل‌های بستر و همچنین حضور رسوبات چسبنده می‌توانند مد نظر قرار بگیرند. علاوه بر این توسعه روابطی با دقت مناسب برای محاسبه مقدار انتقال رسوب نیز می‌بایست در نظر گرفته شود.

### 4- فهرست علائم

$D$	قطر رسوب
$g$	شتاب ثقل
$H_s$	ارتفاع پرش
$I_1$ و $I_2$	کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین مقدار پارامتر ورودی
$k_s$	ارتفاع مؤثر (معادل) زبری بستر
$L_s$	طول پرش
$O_1$ و $O_2$	مقادیر خروجی متناظر با $I_1$ و $I_2$
$S$	نمایه حساسیت
$T$	دمای آب
$U_s$	سرعت افقی پرش
$v$	لزجت سینماتیکی
$\tau_*$	تنش برشی
$\tau_{*cr}$	مقدار بحرانی تنش برشی
$u_*$	سرعت برشی

### 5- منابع

براتی، ر.، صالحی نیشابوری س.ع.ا. و احمدی، گ. (1396). "انتقال بار بستر تحت رژیم پرش رسوبات در جریان آشفته یخش اول: توسعه مدل" مجله هیدرولیک، همین شماره.

مهدیزاده، س.س. (1387). "بررسی آزمایشگاهی حرکت ذره رسوبی در نزدیکی بستر با استفاده از دستگاه PIV"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

Abbott, J. E., and Francis, J. R. D. (1977). "Saltation and suspension trajectories of solid grains in a water stream." Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 284(1321), 225-254.

Akbari, G. H., and Barati, R. (2012). Comprehensive analysis of flooding in unmanaged catchments. Proceedings of the ICE-Water

- Marszelewski, W., and Pius, B. (2015). "Long-term changes in temperature of river waters in the transitional zone of the temperate climate: a case study of Polish rivers." *Hydrological Sciences Journal*, 61(8), 1430-1442.
- Morvan, H., Knight, D., Wright, N., Tang, X., and Crossley, A. (2008). "The concept of roughness in fluvial hydraulics and its formulation in 1D, 2D and 3D numerical simulation models". *Journal of Hydraulic Research*, 46(2), 191-208.
- Nasrollahi, A., Salehi Neyshabouri, S. A. A., Ahmadi, G., and Namin, M. M. (2008). Numerical simulation of particle saltation process. *Particulate Science and Technology*, 26(6), 529-550.
- Niño, Y., García, M., and Ayala, L. (1994). Gravel saltation: 1. Experiments. *Water resources research*, 30(6), 1907-1914.
- Oberkampf, W. L., Sindir, M. M., and Conlisk, A. T. (1998). Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA).
- Orr, H. G., Simpson, G. L., Clers, S., Watts, G., Hughes, M., Hannaford, J. and Evans, R. (2015). "Detecting changing river temperatures in England and Wales". *Hydrological Processes*, 29(5), 752-766.
- Piotrowski, A. P., Napiorkowski, M. J., Napiorkowski, J. J., and Osuch, M. (2015). "Comparing various artificial neural network types for water temperature prediction in rivers." *Journal of Hydrology*, 529, 302-315.
- Ruark, M. D., Niemann, J. D., Greimann, B. P., and Arabi, M. (2011). "Method for assessing impacts of parameter uncertainty in sediment transport modeling applications." *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(6), 623-636.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., and Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons.
- Smith, M. W. (2014). Roughness in the earth sciences. *Earth-Science Reviews*, 136, 202-225.
- van Rijn, L. C. (1984). "Sediment transport, part I: bed load transport." *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1431-1456.
- Webb, B. W., and Walling, D. E. (1985). "Temporal variation of river water temperatures in a Devon river system." *Hydrological Sciences Journal*, 30(4), 449-464.
- Management, 165(4), 229-238.
- Barati, R., Salehi Neyshabouri, S. A. A. and G. Ahmadi, (2014a) "Development of a 3D Lagrangian model for numerical simulation of initiation of motion of sediment particles" The 11th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS 2014), Tehran, Iran, 24-26, 215-218.
- Barati, R., Salehi Neyshabouri, S. A. A. and G. Ahmadi, (2015a) "On the threshold of motion of sediment grains: Hydrodynamic forces effects" The Sixth Jordanian International Civil Engineering Conference, Jordan.
- Barati, R., Salehi Neyshabouri, S. A. A. and G. Ahmadi, (2014b). "Numerical simulation of the sediment transport in the saltation regime" *River Flow 2014 - the 7th International Conference on Fluvial Hydraulics –EPFL*, Lausanne, Switzerland.
- Barati, R., Salehi Neyshabouri, S. A. A., and Ahmadi, G. (2015b). "A 3D Eulerian-Lagrangian model for the motion of the multiple non-cohesive sediment grains in water" 10th International Congress on Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
- Cheng, N. S. (2015). "Representative grain size and equivalent roughness height of a sediment bed". *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1), 06015016(1-4).
- Cheng, N. S., Nguyen, H. T., Zhao, K., and Tang, X. (2011). "Evaluation of flow resistance in smooth rectangular open channels with modified Prandtl friction law." *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(4), 441-450.
- Derx, J., Farnleitner, A. H., Zessner, M., Pang, L., Schijven, J., and Blaschke, A. P. (2012). "Evaluating the effect of temperature induced water viscosity and density fluctuations on virus and DOC removal during river bank filtration—a scenario analysis." *River Systems*, 20(3-4), 169-184.
- Francis, J. R. D. (1973). "Experiments on the motion of solitary grains along the bed of a water-stream." In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society, 332(1591), 443-471.
- García, M. H. (Ed.). (2008). *Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice* (No. 110). ASCE Publications.
- Isaak, D. J., Wollrab, S., Horan, D., and Chandler, G. (2012). "Climate change effects on stream and river temperatures across the northwest US from 1980–2009 and implications for salmonid fishes." *Climatic Change*, 113(2), 499-524.