



Gonbad Kavous University  
Journal of New Approaches in  
Water Engineering and Environment  
Volume 2, Issue 1

## Prediction of Maximum Scour Depth at Bridge Piers in Case of Debris Accumulation

Abdolreza Zahiri<sup>\*</sup>, Mahdi Meftah Helghi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Associate professor, Water Engineering Department, Water and soil Engineering Faculty, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

<sup>2</sup>Associate professor, Water Engineering Department, Water and soil Engineering Faculty, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received:14.02.2023; Accepted:25.04.2023

### Abstract

Local scour at the bridge piers is one of the most important factors threatening the stability of the bridges constructed on the rivers. This issue is mainly due to wake and horse shoe vortices. One of the key factors which intensify the local scour depth in bridge pier and usually is not considered is the accumulation of wooden debris in front of the pier. Many bridges have been unstable or collapsed due to this problem. By accumulation of wooden debris in front of bridge piers, the effective flow area around the piers is decreased and hence the flow velocity will be increased which led to increasing of the scour depth to several times of the normal conditions. There are limited relationships or approaches for estimating the scour depth in the case of debris accumulation at the bridge piers. In this study using experimental data of two laboratory flumes and based on the well-known equation of CSU, dimensionless equations have been presented for prediction of the scour depth in the presence of rectangular and triangular wooden debris. The optimum values of the coefficients and exponents of these new equations have been determined using optimization techniques. The modified CSU equation has suitable and acceptable results in both calibration and validation phases. The maximum percentage of error for the proposed equation is 10.1 and 8.4 in calibration and validation phases, respectively. Also, the mean error of this equation is 2.2 and 2.8 percent, respectively.

**Key words:** Local scour, Bridge pier, Wooden debris, CSU equation, Optimization

---

<sup>\*</sup>. Corresponding author, Email: zahiri@gau.ac.ir



دانشگاه گنبد کاووس

نشریه "رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست"

دوره دوم، شماره اول

<http://Nawee.gonbad.ac.ir>

## تخمین عمق بیشینه‌ی آبشستگی در وضعیت تجمع مواد شناور در جلوی پایه‌ی پل

عبدالرضا ظهیری<sup>\*</sup>، مهدی مفتاح هلقی

<sup>۱</sup>دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

<sup>۲</sup>دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۵

### چکیده

آبشستگی موضعی پایه‌های پل یکی از مهمترین عوامل تهدیدکننده‌ی پایداری پل‌های احداث شده بر رودخانه‌ها است. این پدیده به سبب جریان‌های گردابه‌ای برخاستگی و نعل اسبی اتفاق می‌افتد. یکی از عوامل مهمی که باعث تشدید عمق آبشستگی پایه‌های پل می‌شود و کمتر به آن توجه شده است، تجمع اجسام شناور و شاخه و برگ درختان در اطراف پایه است. پل‌های زیادی به دلیل این عامل، ناپایدار و تخریب شده‌اند. در این وضعیت به دلیل کاهش سطح مقطع دهانه ورودی پل و افزایش سرعت جریان، عمق آبشستگی تا چند برابر حالت عادی افزایش می‌یابد. تاکنون روابط و یا روش‌های محدودی برای تخمین عمق آبشستگی موضعی پایه‌ی پل ناشی از تجمع اجسام شناور ارائه شده است. در این تحقیق با استفاده از داده‌های آبشستگی پایه‌ی پل در دو کانال آزمایشگاهی و بر اساس رابطه‌ی معتبر *CSU* (ریچاردسون و دیویس، ۲۰۰۱)، روابط بدون بعد جدیدی به منظور تخمین عمق آبشستگی پایه‌ی پل ناشی از تجمع اجسام شناور مستطیلی و مثلثی ارائه شده است. مقادیر بهینه‌ی ضرایب و نماهای این روابط با استفاده از اصول بهینه‌سازی محاسبه شده است. معادله‌ی اصلاحی *CSU* در این تحقیق در هر دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی، نتایج مناسب و قابل قبولی داشت. حداکثر خطای نسبی این معادله در این مراحل به ترتیب ۱۰/۱ و ۸/۴ درصد بود. همچنین متوسط خطای نسبی این معادله در مراحل واسنجی و صحت-سنجی به ترتیب ۲/۲ و ۲/۸ درصد به دست آمد.

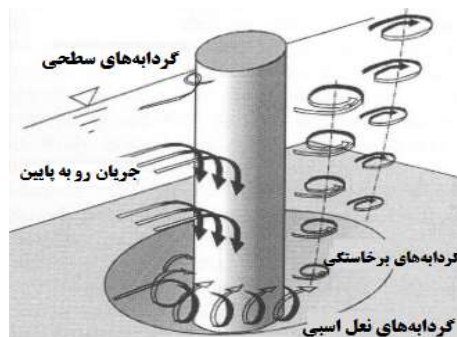
کلمات کلیدی: آبشستگی موضعی، پایه‌ی پل، اجسام شناور، معادله *CSU*، بهینه‌سازی.

<sup>\*</sup> نویسنده مسئول، Email: zahiri@gau.ac.ir

## مقدمه

اروپایی، بیش از ۶۰ درصد از تخریب پایه‌های پل و واژگونی آنها در اثر عوامل هیدرولیکی (آبشستگی موضعی) بوده است. این در حالی است که واژگونی پل‌ها در اثر زلزله، حوادث طبیعی، بارگذاری بیش از حد و تصادفات به ترتیب ۳، ۴، ۱۰ و ۱۳ درصد بوده است (Zarrati et al., 2010). این آمار اهمیت توجه به موضوع آبشستگی پایه‌ی پل‌ها و لزوم بررسی روش‌های کنترل و یا کاهش عمق آبشستگی موضعی را آشکار می‌کند.

آبشستگی موضعی نوعی از فرسایش در اطراف پایه پل‌ها است که در نتیجه‌ی گردابه‌های برخاستگی و نعل اسبی اتفاق می‌افتد. در شکل ۱، ساختار جریان در محل پایه‌های پل و گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی نشان داده شده است (Mazarona et al., 2011).



شکل ۱- گردابه‌های برخاستگی و نعل اسبی به ترتیب در پایین دست و بالادست پایه پل (Mazorana et al., 2011)

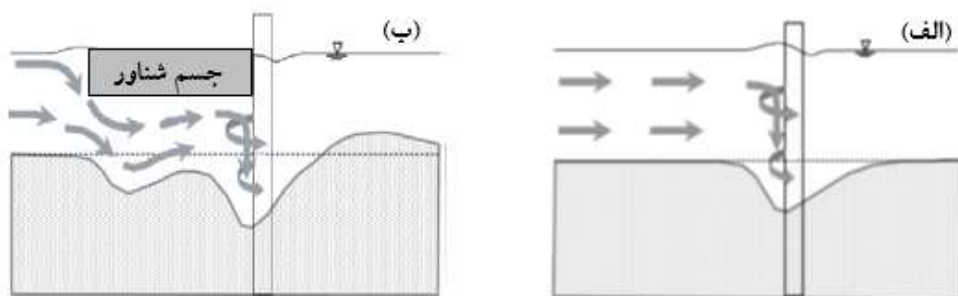
خود جلب نموده است، اما در کشور ما این مسأله اخیراً مورد توجه و استقبال قرار گرفته است (Mortazavi et al., 2015; Jafargholi et al., 2012; Fallah Golneshini et al., 2012).

اجسام شناور و به‌ویژه تنه‌ها و شاخه و برگ گیاهان و درختان عموماً توسط با جریان سیلاب در جلوی پل‌ها تجمع می‌یابند. منبع تامین این اجسام، پوشش گیاهی و درختانی است که در اثر فرسایش سواحل رودخانه، گسیختگی شیب‌ها، حوادثی مثل باد و سیلاب و دیگر عوامل بیولوژیکی وارد سیستم رودخانه می‌شوند. با توجه به وضعیت نامناسب حوضه‌های آبخیز کشور و به‌ویژه تخریب جنگل‌ها و کاهش پوشش گیاهی در مناطق شمالی کشور، حجم عظیمی از بقایای گیاهی همراه با رواناب وارد رودخانه‌های کشور می‌شود. اثر تخریب جنگل‌ها نه تنها در

رودخانه‌ها یکی از مهمترین سیستم‌های منابع آب در دنیا و به‌ویژه در مناطق گرمسیر و نیمه‌گرمسیر هستند. این منبع اگرچه از نظر حجم آب شیرین، درصد بسیار کمی از حجم کل منابع آب دنیا را تشکیل می‌دهد، اما همواره مورد توجه و استفاده بشر بوده است. برای استفاده‌ی حداکثری از رودخانه‌ها، سازه‌های مختلفی در طول و عرض رودخانه احداث می‌شوند. بدیهی است جریان آب در مواجهه با سازه‌های تقاطعی که در عرض رودخانه ساخته می‌شوند، با تغییر الگو مواجه می‌شود. یکی از مهمترین عکس‌العمل‌ها، ایجاد آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل است. آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل یکی از مهمترین عوامل تهدیدکننده پایداری پل‌های احداث شده بر رودخانه‌ها است. برطبق آمار کشورهای

عمق حداکثر آبشستگی در محل سازه‌ها بیانگر ظرفیت تخریبی جریان در اطراف سازه است و معیار مناسبی برای طراحی ابعاد پی این سازه‌ها است. اگرچه تاکنون مطالعات بسیار زیادی در زمینه‌ی بررسی فرآیند آبشستگی پایه‌ی پل‌ها در وضعیت‌های مختلف جریان و هندسه‌ی پایه و نیز کارایی روش‌های مختلف کنترل عمق آبشستگی انجام شده است (Ghasemi et al., 2017)، اما موضوعات مهم دیگری نیز وجود دارد که عمق آبشستگی در مجاورت پایه‌ی پل را تحت تاثیر قرار می‌دهد. یکی از این موضوعات، تجمع اجسام شناور گیاهی شامل تنه و شاخه و برگ درختان در جلوی پایه‌ی پل است (Mortazavi et al., 2016). بررسی اثرات منفی ناشی از تجمع اجسام شناور و مستغرق شامل تنه و شاخه‌های درختان در جلوی پایه‌ها و تکیه‌گاه پل مدت‌ها است که توجه محققان را به

در شکل ۲ فرایند آبشستگی پایهی پل در دو حالت با و بدون وجود جسم شناور نشان داده شده است ( Fallah Golneshini et al., 2012). مشاهده می‌شود که در حالت وجود جسم شناور، بدنه‌ی جریان منقبض می‌شود و با افزایش سرعت، آبشستگی بیشتری در بالادست و پایین-دست پایه پل ایجاد می‌کند.



شکل ۲- الگوی جریان در حالت الف) نبود جسم شناور و ب) وجود جسم شناور در جلوی پایهی پل (Fallah Golneshini, 2012)

احداث شده بر روی رودخانه‌های کشورهای ایتالیا و امریکا در شکل ۳ نشان داده شده است (De ciccio, 2015).

تجمع اجسام شناور در مقابل پایه‌های پل به شکل‌های مختلفی اتفاق می‌افتد. نمونه‌هایی از این پدیده در پل‌های



شکل ۳- وضعیت‌های مختلف تجمع اجسام شناور در مقابل پایه‌های پل در رودخانه‌ها (De ciccio, 2015)

استان مازندران در هنگام وقوع سیل سال ۱۳۷۸ در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در طی وقوع سیل، حجم زیادی از تنه و شاخه درختان در

پدیده تجمع اجسام و قطعات چوبی شناور تاکنون باعث تخریب و واژگونی پل‌های زیادی شده است. وضعیت پل ارتباطی جاده اصلی ساری- بهشهر در شهر نکا در

بعد از وقوع سیل و به دلیل انسداد جریان و آبشستگی موضعی پایه‌ها ناشی از تجمع اجسام شناور بزرگ از قبیل تنه درختان نشان داده شده است (Bradley et al., 2005).



شکل ۴- تخریب پل اصلی شهرستان نکا به دلیل انسداد دهانه‌ی پل با تنه و شاخه‌های درختان (سیل ۱۳۷۸)



شکل ۵- واژگونی یک پل بزرگ ناشی از انسداد دهانه با اجسام شناور در جلوی پایه‌ها در رودخانه‌ی لویزیانا (Bradly et al., 2015)

افزایش و به تبع آن مساحت پایه افزایش می‌یابد. این افزایش مساحت منجر به افزایش نیروی درگ و در نتیجه تقویت گردابه‌های نعل اسبی خواهد شد. همچنین در اثر تجمع اجسام شناور، تراز سطح آب افزایش می‌یابد و عمق جریان بالادست و نیز شدت گردابه‌های نعل اسبی افزایش خواهد یافت. به دلیل تنگ‌شدگی فضای بین پایه‌های پل در اثر تجمع اجسام شناور، سرعت جریان در محل پایه‌ها افزایش می‌یابد و عمق آبشستگی افزایش خواهد یافت. بنابراین ضروری است که بحث تجمع اجسام شناور در جلوی پایه‌ی پل‌ها و اثر آن در تشدید عمق آبشستگی موضعی مورد توجه قرار گیرد. البته علی‌رغم اثرات منفی

تاکنون روابط تجربی زیادی برای تخمین عمق بیشینه‌ی آبشستگی پایه‌ی پل‌ها ارائه شده است که روابط Richardson and Melville and Kolman (2000) و Deivis (2001) دارای کاربرد بیشتری هستند. با این حال اثر تجمع اجسام شناور در روابط تعیین عمق آبشستگی پایه‌ی پل‌ها به صورت محدودی در نظر گرفته شده است (Mortazavi et al., 2015). نکته‌ی مهم این است که برطبق مطالعات Najafzadeh et al (2016)، تمامی این معادلات دارای خطای زیادی بوده و مقدار عمق آبشستگی را بسیار بیشتر از واقعیت برآورد نموده‌اند. در اثر تجمع اجسام شناور در جلوی پایه‌ی پل، عرض موثر پایه‌ی پل

Schmocker and Hanger (2010) نشان دادند که انسداد دهانه‌ی پل با اجسام شناور باعث افزایش میزان پس‌زدگی آب و عدد فرود جریان می‌شود و می‌تواند باعث به-وجود آمدن جریان‌های بحرانی و حتی پرش هیدرولیکی گردد. (Pagliara et al (2010, 2011) با انجام مطالعات آزمایشگاهی در وضعیت‌های مختلف جریان و رسوب بستر کانال نشان دادند که عمق بیشینه‌ی آبشستگی در هنگام تجمع اجسام شناور ممکن است حداکثر تا سه برابر عمق بیشینه‌ی آبشستگی در حالت نبود اجسام شناور گردد. همچنین شدت جریان و نسبت انسداد مقطع عرض کانال در بالادست پل، پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر عمق بیشینه و نیز توسعه‌ی زمانی آبشستگی هستند. (Mazarana et al (2010 در پژوهشی به‌علت خطری که اجسام و قطعات شناور چوبی در انسداد مقطع جریان و در نتیجه افزایش سیل‌گیری دشت‌های سیلابی ایجاد می‌کنند، به مدل‌سازی نحوه‌ی انتقال و سکون اجسام شناور و توده‌های شاخه و برگ گیاهان در مسیر رودخانه‌ی آلباین پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که با به‌کارگیری مدل ریاضی پیشنهادی می‌توان در مکان‌هایی مانند پل‌ها که در معرض تجمع شاخه و برگ هستند، برنامه‌های پیشگیرانه طراحی نمود (Mortazavi et al., 2015). Park et al (2016) نشان دادند که عمق آبشستگی در اطراف پایه‌ی پل به ابعاد و ضخامت اجسام شناور بستگی دارد. آن‌ها معادلات مختلفی را که محققان قبلی به‌منظور پیش‌بینی عمق آبشستگی اطراف پایه پل پیشنهاد کرده بودند با مشاهدات آزمایشگاهی خود مقایسه کردند و با اصلاح معادله‌ی Mellvil (1992) رابطه‌ی جدیدی برای تخمین عمق آبشستگی در حضور اجسام شناور و شمع ارائه نمودند. (Najafzadeh et al (2016 با بررسی دقت و کارایی روابط تجربی محدودی که برای پیش‌بینی عمق آبشستگی پایه‌ی پل‌ها در وضعیت تجمع اجسام شناور ارائه شده‌اند، نشان دادند که دقت این روابط برای تمامی داده‌ها از کارایی قابل قبولی برخوردار نیست. به همین دلیل آنها به کمک مدل‌های داده‌محور تازه مثل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، درخت تصمیم (MT) و رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی (EPR)، روابط بدون بعد مناسبی پیشنهاد نمودند. نتایج نشان داد که مدل درخت تصمیم دارای بهترین دقت است.

تجمع اجسام شناور، این نکته نیز قابل توجه است که وجود توده‌های گیاهی در بدنه‌ی جریان در رودخانه‌ها باعث بهبود کیفیت آب می‌شود و زیستگاه‌های گونه‌های مختلف جانوری و گیاهی را در زمان اوج آلاینده‌ها حفاظت می‌کند (Gurnell et al., 2002; Gurnell, 2014). همچنین این اجسام شناور باعث کنترل فرسایش سواحل رودخانه و تثبیت کناره‌ها نیز می‌شوند (Sheldz and smit, 1992). بررسی جامع تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی آبشستگی پایه‌ی پل‌ها در اثر تجمع اجسام شناور توسط نجف‌زاده و همکاران انجام شده است (Najafzadeh et al., 2016). در اینجا فقط خلاصه‌ای از این تحقیقات ارائه شده است.

حجم اجسام شناور تجمع‌یافته در جلوی پایه‌ی پل‌ها به منابع گیاهی تامین این مواد در محدوده‌ی رودخانه، وضعیت جریان سیلاب، مشخصات هندسی و هیدرولیکی رودخانه و مشخصات هندسی سازه‌ی پل بستگی دارد. (Diehl (1997 در مطالعات خود ثابت کرد که تجمع اجسام شناور در جلوی دهانه و پایه‌ی پل به طول اجسام شناور و عرض رودخانه در بالادست پایه‌های پل وابسته است. (Walleerstein and Walleerstein et al (1997 و Torn (2004) اساس وضعیت رودخانه‌ی می‌سی‌سی‌پی نشان دادند که منشأ اجسام شناور انباشت‌شده در جلوی پایه‌ی پل‌ها به‌ترتیب اهمیت شامل فرسایش قوس خارجی، فرسایش سواحل رودخانه ناشی از واژگونی دیواره‌ها، طوفان‌ها و درختان شناور حوزه‌های بالادست است. جامع‌ترین مطالعه‌ی مدل‌سازی فیزیکی در زمینه‌ی تأثیر تجمع اجسام شناور گیاهی (شامل تنه و شاخه و برگ درختان) بر میزان عمق آبشستگی پایه‌ی پل‌ها را Lagasse et al (2010) انجام داده‌اند. در این مطالعه، از یک کانال به عرض ۲/۴ متر و طول ۶۰ متر استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که زبری و تخلخل اجسام شناور دارای اهمیت کمتری نسبت به اندازه و شکل پایه و نیز اندازه، شکل و موقعیت توده بر روی پایه‌ی پل هستند. بر اساس نتایج این آزمایش‌ها، روشی برای تعیین عمق آبشستگی پایه‌ی پل‌ها در هنگام تجمع اجسام شناور ارائه شد. این روش دارای ۱۰ مرحله و نیازمند داده‌های فراوانی است که داده‌های موجود اغلب رودخانه‌ها و حوضه‌های آبخیز طبیعی، جوابگوی نیاز این روش نیست.

وجود اجسام شناور در جلوی پایه‌های پل تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی عمق، عرض و طول گودال آبشستگی دارد (Najafzadeh et al., 2016).

در این پژوهش به کمک داده‌های آزمایشگاهی موجود و بر اساس تحلیل ابعادی پدیده‌ی آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل در حالت تجمع اجسام شناور، رابطه‌ی جدیدی به منظور تخمین حداکثر عمق آبشستگی در این حالت ارائه شده است. معادله‌ی معتبر Richardson et al (2001) به عنوان معادله‌ی پایه برای این پژوهش در نظر گرفته شده است.

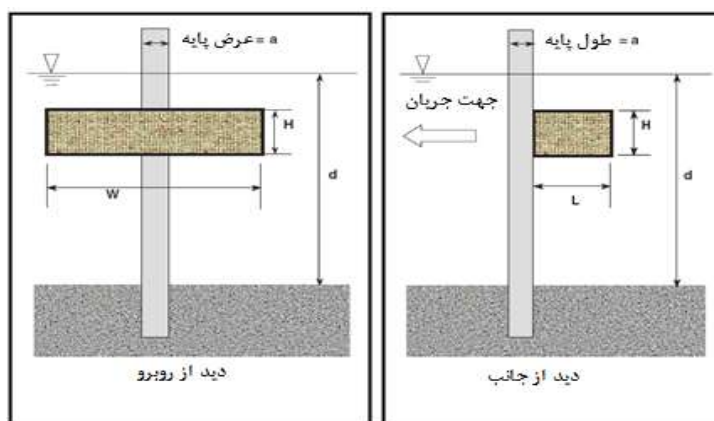
## مواد و روش‌ها

### تحلیل ابعادی پدیده مورد بررسی

تحلیل ابعادی ضمن بی‌بعد نمودن پارامترهای موثر بر پدیده‌ی مورد نظر و در نتیجه کاهش قابل توجه تعداد پارامترها و آزمایش‌های مورد نیاز، امکان کاربرد و تعمیم نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌ی واقعی (پروتوتایپ) را نیز فراهم می‌نماید. پارامترهای متعددی در پدیده‌ی آبشستگی موضعی پایه‌ی پل در هنگام وجود شاخه و برگ درختان مؤثرند. از جمله این عوامل، پارامترهای مربوط به هندسه-ی پایه‌ی پل (شامل عرض  $(a)$  و شکل دماغه پایه‌ی پل  $(K_1)$ ، هندسه‌ی اجسام شناور (شامل عرض  $(W)$ ، طول  $(L)$  و ارتفاع جسم شناور چوبی  $(H)$ )، وضعیت شاخه و برگ گیاهان از نظر تخلخل و زبری، وضعیت قرارگیری جسم شناور در بدنه‌ی جریان (سطح آب، کف کانال و سطح میانی)، پارامترهای هیدرولیک جریان (شامل سرعت متوسط جریان  $(V)$ ، سرعت برشی بحرانی  $(V_c)$ ، عمق متوسط جریان در بالادست پل  $(d)$ ، زاویه‌ی حمله جریان به پایه‌ی پل) و پارامترهای مصالح بستر رودخانه دارای اهمیت هستند. در شکل ۶ بعضی از پارامترهای موثر در حالت تجمع یک توده از قطعات چوبی مستطیلی شکل نشان داده شده است.

همچنین مشخص شد که پارامتر نسبت قطر پایه‌ی پل به قطر رسوبات کف رودخانه، مهمترین پارامتر در تخمین عمق آبشستگی است. (Fallah golshini 2012) قرارگیری اجسام شناور چوبی بر روی پایه‌ی پل در ترازهای مختلف جریان را به صورت آزمایشگاهی بررسی کرد. نتایج نشان داد که در یک سرعت ثابت، هرچه عمق جریان بیشتر باشد، عمق بیشینه‌ی آبشستگی نیز بیشتر است. همچنین مشخص شد که در حالتی که طول جسم شناور برابر عمق جریان باشد، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. (Jafargholi 2012) با استفاده از نرم افزار سه بعدی SSIM الگوی جریان در محل پایه‌های پل استوانه‌ای در وضعیت تجمع اجسام شناور مستطیلی را شبیه سازی نمود. نتایج شبیه سازی داده‌های آزمایشگاهی Lagasse et al (2010) نشان داد که با واسنجی مدل به کمک ارتفاع زبری مناسب و نیز انتخاب مدل آشفتگی هینه، این نرم افزار می‌تواند وضعیت حفره‌ی آبشستگی از نظر عمق بیشینه و طول پیشروی را با دقت قابل قبولی برآورد نماید. (Mortazavi et al 2015) در پژوهشی با استفاده از مدل آزمایشگاهی، میزان و روند تغییرات عمق بیشینه آبشستگی موضعی در وضعیت جریان غیردائمی و در دو حالت توده‌ی چوبی مستغرق و شناور در جلوی پایه‌ی پل استوانه‌ای را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که عمق بیشینه‌ی آبشستگی در هنگام حضور توده‌ی شاخه و برگ مستغرق، بیشتر از حالت شناور است. (Moshashaie et al 2015) تأثیر اجسام شناور چوبی مستطیلی بر آبشستگی پایه‌های استوانه‌ای دارای سیستم صفحه شمع را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد که در حالت نبود اجسام شناور، عمق بیشینه‌ی آبشستگی در اطراف پایه‌ی استوانه‌ای مستقر بر صفحه‌ی شمعدار نسبت به حالت بدون صفحه شمعدار، ۸۰ درصد کمتر است. (Moshashaie et al 2016) تأثیر اجسام شناور چوبی مستطیلی بر آبشستگی پایه‌های مربعی و مربعی دماغه تیز را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد





شکل ۶- پارامترهای موثر بر عمق آبشستگی پایه‌ی پل در هنگام وجود شاخه و برگ گیاهان

که عبارت  $\frac{V^2}{gd}$  بیانگر عدد فرود جریان در بالادست پایه‌ی پل ( $Fr$ )، عبارت  $\frac{Vd}{v}$  نشان‌دهنده‌ی عدد رینولدز جریان و  $\frac{Vdt}{A_b}$  نیز عدد بدون بعد فرآیند زمانی آبشستگی پایه‌ی پل است. در عبارت اخیر،  $A_b$  سطح مقطع تصویرشده پایه‌ی پل و جسم شناور است (۱۹). با فرض ثابت بودن چگالی نسبی رسوبات، دائمی بودن جریان، آشفته بودن جریان، ثابت بودن انحراف معیار هندسی ذرات رسوب، در نظر گرفتن عمق نهایی آبشستگی و نیز انجام برخی ساده‌سازی‌های ریاضی، رابطه‌ی (۲) به فرم ساده‌تری ظاهر خواهد شد:

$$\frac{h_s}{d} = f\left(\frac{V}{V_c}, \frac{d}{d_{50}}, Fr, \theta, \frac{L}{H}, \frac{W}{a}, DA\right) \quad (3)$$

**رابطه‌ی تجربی** Richardson et al (2001) یا CSU<sup>۱</sup> رابطه‌ی ارائه شده توسط دانشگاه ایالتی کلرادو (CSU) یکی از معتبرترین و پرکاربردترین روابط تجربی برای تعیین عمق بیشینه‌ی آبشستگی در محدوده‌ی پایه‌ی پل (بدون اثر تجمع اجسام شناور) است و دارای اعتبار و کارایی زیادی در وضعیت آزمایشگاهی و صحرایی است (اتیما و همکاران ۲۰۱۱، جولین ۲۰۰۲). از این رابطه به صورت پیش‌فرض در نرم‌افزارهای مهندسی رودخانه از

در این پژوهش تعدادی از پارامترهای مهم که تاثیر بیشتری بر عمق بیشینه‌ی آبشستگی در محل پایه‌های پل دارندشته و در روابط محققان قبلی نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند، انتخاب شده است. این پارامترها شامل هندسه‌ی پایه، مشخصات جریان، خواص سیال، خصوصیات مواد رسوب و مشخصات جسم شناور چوبی هستند. با در نظر گرفتن عمق بیشینه‌ی آبشستگی ( $h_s$ ) به عنوان متغیر وابسته، متغیرهای موثر مستقل به صورت رابطه‌ی زیر قابل ارائه است:

(۱)

$$h_s = f(d, V, V_c, g, \rho, \rho_s, v, d_{50}, \theta, a, H, L, W, \sigma_g, t, DA)$$

که  $\rho$  و  $v$  به ترتیب چگالی و لزجت سینماتیکی سیال،  $V$  سرعت متوسط جریان در بالادست پایه،  $d$  عمق جریان بالادست،  $g$  شتاب گرانشی،  $d_{50}$  و  $\sigma_g$  به ترتیب قطر میانه و انحراف معیار هندسی توزیع اندازه‌ی رسوبات بستر،  $\rho_s$  چگالی رسوبات،  $V_c$  سرعت بحرانی آستانه‌ی حرکت رسوبات بستر،  $t$  زمان،  $DA$  بیانگر سایر خصوصیات جسم شناور، از قبیل شکل توده و موقعیت قرارگیری آن در جلوی پایه‌ی پل (مستغرق یا شناور) و  $f$  نشان‌دهنده‌ی تابع است. با انجام تحلیل ابعادی به کمک روش  $\pi$  باکینگهام تابع زیر ظاهر می‌شود:

(۲)

$$\frac{h_s}{d} = f\left(\frac{V}{V_c}, \frac{a}{d}, \frac{V^2}{gd}, \frac{Vd}{v}, \frac{d}{d_{50}}, \frac{\rho}{\rho_s}, \theta, \frac{H}{d}, \frac{L}{d}, \frac{W}{d}, \sigma_g, \frac{Vdt}{A_b}, DA\right)$$

<sup>۱</sup> Colorado State University (CSU)



شناور در جلوی پایه‌ی پل، می‌توان رابطه‌ی اصلی  $CSU$  را به صورت زیر تصحیح نمود:

$$h_s = \underbrace{K_1 K_2 K_3 K_4 a^{0.65} d^{0.35} Fr^{0.43}}_{(1)} \underbrace{DA^\alpha}_{(2)} \quad (8)$$

که بخش اول رابطه‌ی فوق، همان رابطه‌ی  $CSU$  و بخش دوم آن  $(DA^\alpha)$  بیانگر اثر تجمع اجسام شناور بر عمق آبشستگی پایه‌ی پل است. بر اساس فرم تابعی تحلیل ابعادی (رابطه ۳)، پارامتر بدون بعد  $DA$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DA = c \left( \frac{W}{a} \right)^x \left( \frac{L}{H} \right)^y \left( \frac{V}{V_c} \right)^z \quad (9)$$

که  $c$  ضریبی است که تابع شکل جسم شناور و نیز موقعیت قرارگیری آن در بدنه‌ی جریان است. مقادیر نماهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  نیز برای شکل‌های مختلف جسم شناور چوبی به کمک روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی محاسبه خواهند شد.

#### داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده

در این مطالعه از ۲ سری آزمایش و ۲۷ داده آزمایشگاهی آبشستگی در حالت تجمع اجسام شناور در جلوی پایه‌ی پل برای واسنجی و صحت‌سنجی معادله‌ی پیشنهادی استفاده شده است. آزمایش‌های سری اول در یک کانال به عرض ۲/۴ متر و طول ۶۰ متر انجام گرفته است (Lagasse et al., 2010). عمق و دبی جریان در این آزمایش‌ها به ترتیب برابر ۳۰ سانتیمتر و ۰/۳۲ متر مکعب بر ثانیه و قطر متوسط مصالح بستر کانال ۰/۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی اجسام شناور در جلوی پایه‌ی پل‌ها از شبکه‌های مستطیلی در ۳ موقعیت سطح آب، سطح میانی و کف کانال استفاده شده است. در شکل ۷ نمایی از این کانال آزمایشگاهی و جسم شناور مستطیلی متصل به پایه‌ی پل نشان داده شده است. آزمایش‌های سری دوم در کانال آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شده است (Fallah Glneshini, 2012). این کانال به عرض و ارتفاع ۴۰ سانتیمتر و طول ۹ متر است. شکل ۸ نمای طولی و پلان کانال آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. حداکثر عمق و دبی جریان به ترتیب ۱۲ سانتیمتر و ۲۰ لیتر بر ثانیه و میانگین قطر مصالح کف ۰/۹ میلی‌متر است. قطر

قبیل  $HEC-RAS$ ،  $BRI-STAR$  و  $HEC-18$  استفاده می‌شود. این رابطه برای هر دو حالت آبشستگی بستر فعال و آب زلال به صورت زیر ارائه شده است:

$$\frac{h_s}{d} = 2K_1 K_2 K_3 K_4 \left( \frac{a}{d} \right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (4)$$

که ضرایب  $K$  بدون بعد هستند. ضریب  $K_1$  بیانگر اثر شکل پایه است و برای دماغه‌های تیز، مدور و مربعی به-ترتیب ۰/۹، ۱ و ۱/۱ است. ضریب  $K_2$  بیانگر اثر زاویه جریان است و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$K_2 = \left( \cos \theta + \frac{L}{a} \sin \theta \right)^{0.65} \quad (5)$$

که  $L$  طول پایه در مسیر جریان و  $\theta$  زاویه‌ی حمله‌ی جریان نسبت به پایه است. حداکثر مقدار نسبت طول پایه به عرض آن در رابطه‌ی فوق برابر ۱۲ در نظر گرفته می‌شود (ریچاردسون و دیویس، ۲۰۰۱). ضریب تصحیح  $K_3$  تابع وضعیت بستر رودخانه است و در حالت ناچیز بودن انتقال بار بستر از بالادست پل و نیز برای فرم بسترهای تخت، پشته‌های رسوبی دیون (با ارتفاع کوچکتر از ۳ متر) و آنتی‌دیون برابر ۱/۱ در نظر گرفته می‌شود. ضریب تصحیح  $K_4$ ، کاهش عمق حفره آبشستگی را با توجه به وضعیت آرمورینگ بستر اعمال می‌کند. این وضعیت‌ها در رودخانه‌های با قطر  $d_{50}$  بزرگتر از ۲ میلی‌متر و قطر  $d_{95}$  بزرگتر از ۲۰ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. این ضریب از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است (Richardson et al., 2001):

$$K_4 = 0.4V_R^{0.15} \quad (6)$$

که  $V_R$  از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$V_R = \frac{V - 3.993h^{1/6}d_{50}^{1/3} \left( \frac{d_{50}}{a} \right)^{0.053}}{6.19h^{1/6}d_{50}^{1/3} - 3.993h^{1/6}d_{95}^{1/3} \left( \frac{d_{95}}{a} \right)^{0.053}} \quad (7)$$

#### تصحیح رابطه‌ی تجربی ریچاردسون و دیویس

##### (۲۰۰۱) در وضعیت تجمع اجسام شناور

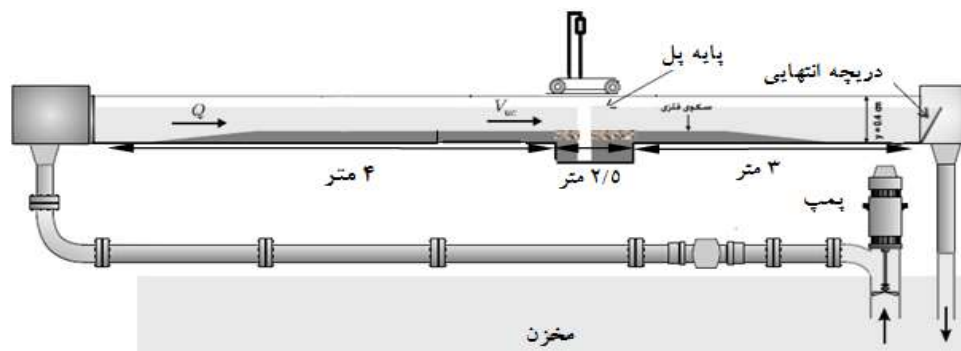
فرم تابع به دست آمده از تحلیل ابعادی مشابهت زیادی با رابطه‌ی اصلی  $CSU$  دارد. بر اساس تشابه دو رابطه‌ی (۳) و (۴) به ترتیب برای دو حالت وجود و نبود اجسام

جلوی پایه‌ی پل و در ۳ موقعیت سطح آب، سطح میانی و کف کانال نصب شده‌اند.

پایه‌ی پل ۳۵ میلیمتر و ابعاد جسم شناور شامل طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۲، ۲۰ و ۲ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. در این آزمایش‌ها نیز اجسام شناور در



شکل ۷- کانال آزمایشگاهی عریض و توده شناور مستطیل شکل در آزمایش‌های سری اول (Lagasse et al., 2010)



شکل ۸- کانال آزمایشگاهی مستطیل شکل در آزمایش‌های سری دوم (Fallah Golshani, 2012)

که  $y = Y - \bar{Y}$ ،  $x = X - \bar{X}$  مقدار محاسباتی،  $\bar{X}$  میانگین مقادیر مشاهداتی،  $\bar{Y}$  میانگین مقادیر محاسباتی و  $N$  تعداد داده‌ها است.

### نتایج و بحث

#### ارزیابی دقت نتایج رابطه‌ی CSU بدون اجسام شناور

نتایج رابطه‌ی CSU در حالت نبود اجسام شناور چوبی در جلوی پایه‌ی پل برای کانال‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در شکل ۹ ارائه شده است. در این شکل عمق نسبی آبشستگی مشاهداتی (نسبت عمق بیشینه‌ی آبشستگی به عمق جریان) با عمق نسبی آبشستگی محاسباتی مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج این معادله تقریباً دارای دقت مناسبی در تخمین عمق بیشینه‌ی آبشستگی است. ضریب تعیین و مجذور مربعات خطای این معادله به ترتیب حدود ۰/۷۸ و ۰/۵۷ است.

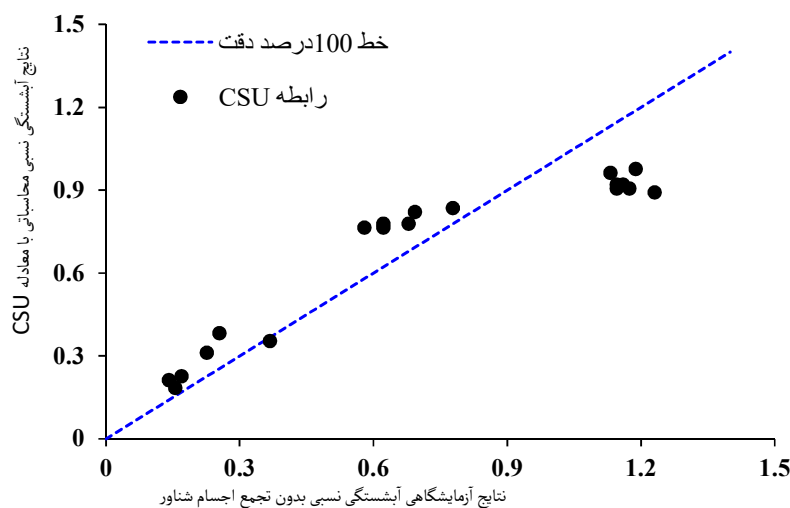
#### شاخص‌های آماری ارزیابی دقت نتایج

برای ارزیابی دقت نتایج عمق بیشینه‌ی آبشستگی به‌دست آمده از روش پیشنهادی، از پارامترهای آماری ضریب تعیین ( $R^2$ )، ریشه‌ی دوم میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) و میانگین درصد خطای نسبی ( $MAPE$ ) به صورت زیر استفاده شده است:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}} \right]^2 \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X - Y)^2}{N}} \quad (10)$$

$$MAPE = \frac{\sum \left| \frac{X - Y}{X} \right|}{N} \times 100 \quad (11)$$



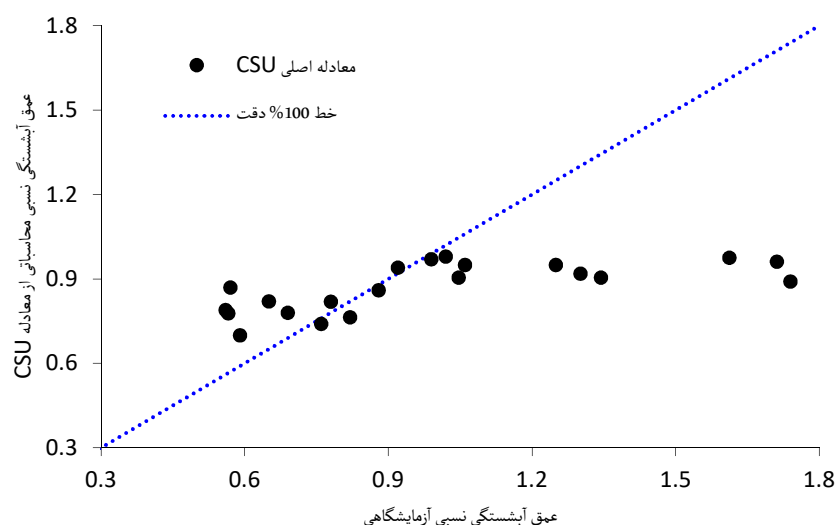
شکل ۹- ارزیابی دقت معادله CSU در حالت نبود اجسام شناور در جلوی پایه‌ی پل در کانال‌های آزمایشگاهی

CSU ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عمق نهایی آبشستگی به‌دست‌آمده از این معادله به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر از عمق آبشستگی آزمایشگاهی است. متوسط خطای نسبی معادله‌ی CSU حدود ۳۱ درصد و حداکثر خطای نسبی آن بیش از ۴۸ درصد است. این مسأله تخمین کمتر از واقع روابط معمول تعیین عمق آبشستگی پایه‌ی پل‌ها را به‌وضوح نشان می‌دهد و لزوم استفاده از روابط اصلاحی برای دخالت اثر تجمع اجسام شناور را آشکار می‌کند.

#### ارزیابی دقت نتایج رابطه‌ی اصلاحی CSU

##### واسنجی ضرایب و نماهای معادله‌ی اصلاحی

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، در حالتی که قطعات شناور در بدنه‌ی جریان در جلوی پایه‌ی پل جمع می‌شوند، عمق بیشینه‌ی آبشستگی افزایش خواهد یافت؛ بنابراین احتمال اینکه روابط تجربی معمول برای تخمین عمق بیشینه‌ی آبشستگی بتوانند دقت قابل قبولی داشته باشند، کم است. برای نشان دادن این موضوع، در شکل ۱۰ داده‌های آزمایشگاهی عمق بیشینه‌ی آبشستگی در حالت تجمع اجسام شناور در مقایسه با نتایج رابطه‌ی



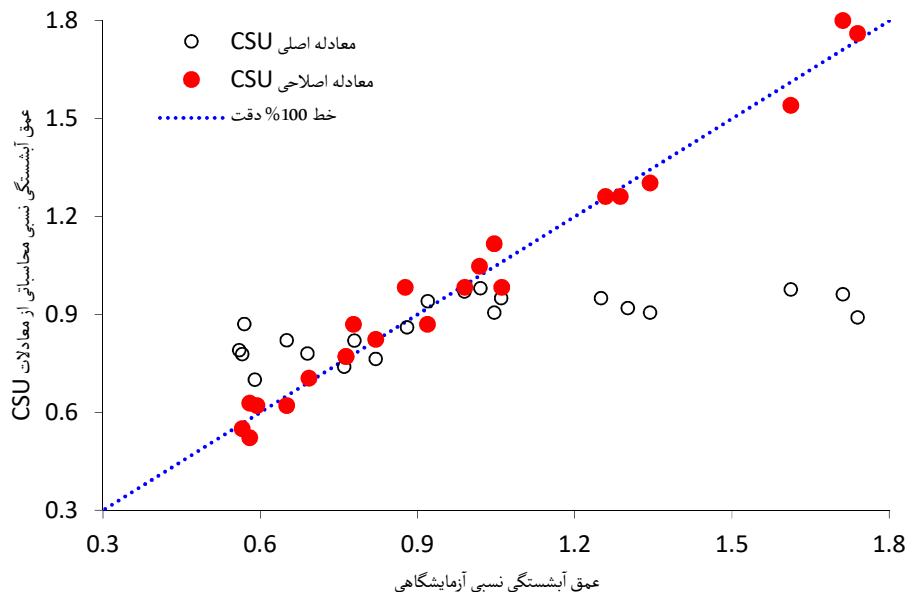
شکل ۱۰- ارزیابی دقت معادله CSU در حالت تجمع اجسام شناور در جلوی پایه‌ی پل در کانال‌های آزمایشگاهی

آزمایشگاهی سری اول مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج محاسباتی مطابقت خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد. ضریب تعیین ( $R^2$ ) و میانگین درصد خطای این نتایج حدود ۰/۹۷ و ۲/۲ به‌دست آمده است که بیانگر کارایی مناسب این رابطه در تعیین عمق آبشستگی پایه‌ی پل ناشی از تجمع مواد شناور چوبی در وضعیت‌های مختلف هیدرولیکی است. در این شکل، نتایج معادله‌ی  $CSU$  نیز ارائه شده است.

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی سری اول و بهینه‌سازی ضریب و نماهای معادله (۸)، رابطه‌ی بدون بعد زیر برای اجسام شناور مستطیلی قابل ارائه است:

$$DA = c \left( \frac{W}{a} \right)^{0.236} \left( \frac{L}{H} \right)^{0.158} \left( \frac{V}{V_c} \right)^{0.57} \quad (۱۲)$$

که ضریب  $c$  تابع موقعیت جسم شناور است و برای محل قرارگیری در سطح آب، وسط بدنه جریان و کف کانال به-ترتیب برابر ۱/۲۵، ۱/۲۲ و ۰/۷۹ است. همچنین ضریب  $\alpha$  در این معادله برابر ۱/۱۲ به‌دست آمده است. با استفاده از این روابط، عمق آبشستگی نسبی پایه‌ی پل در حالت تجمع اجسام شناور محاسبه شده و با داده‌های



شکل ۱۱- مقایسه‌ی نتایج معادلات اصلی و اصلاحی  $CSU$  برای تخمین عمق نهایی آبشستگی پایه‌ی پل برای داده‌های آزمایشگاهی سری اول در حالت تجمع اجسام شناور مستطیلی (مرحله‌ی واسنجی)

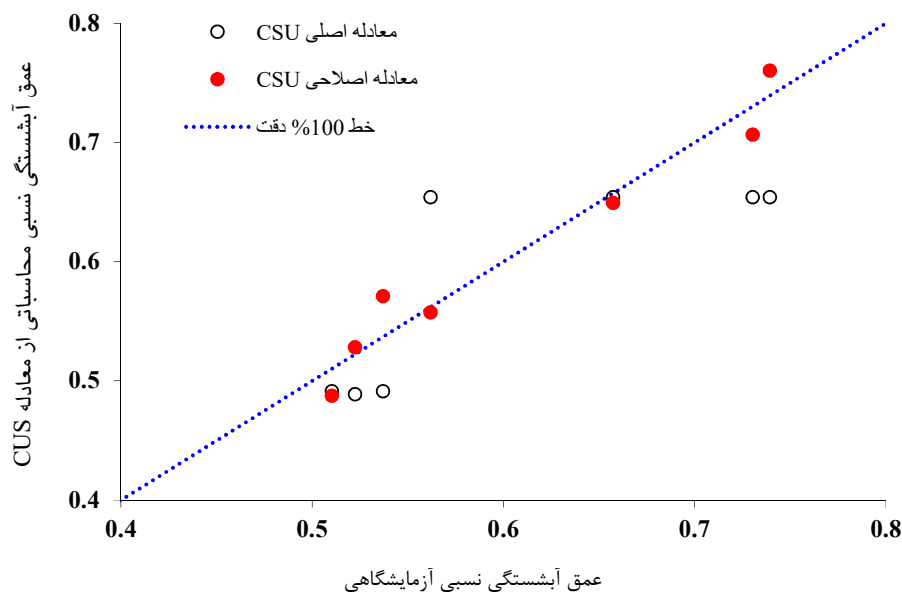
داده‌های آزمایشگاهی سری دوم استفاده شد. نتایج رابطه‌ی پیشنهادی فوق برای این کانال آزمایشگاهی در شکل ۱۲ ارائه شده است. در این شکل، نتایج معادله‌ی  $CSU$  نیز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رابطه‌ی اصلاحی  $CSU$  نتایج عمق بیشینه آبشستگی قابل قبولی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی ارائه نموده است. این در حالی است که معادله‌ی اصلی  $CSU$  کماکان نتایجی کمتر از واقع ارائه نموده است. ضریب تعیین نتایج معادلات اصلی و اصلاحی  $CSU$  به‌ترتیب حدود ۰/۵۷ و

### صحت‌سنجی معادله‌ی اصلاحی $CSU$

معمولاً در تمامی مطالعات مدل‌سازی، معادلات پیشنهادی باید برای داده‌هایی غیر از داده‌های مورد استفاده در مرحله‌ی صحت‌سنجی نیز مورد بررسی و آزمون قرار گیرند. با توجه به تعداد کم داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در مرحله‌ی واسنجی از یک طرف و پیچیدگی پدیده‌ی مورد مطالعه در این پژوهش از طرف دیگر، انجام صحت‌سنجی از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش برای صحت‌سنجی رابطه (۱۲) از

۱۶/۵ درصد است. مجذور مربعات خطا ( $RMSE$ ) برای این دو روش نیز به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۶ به دست آمده است.

۰/۹۵ به دست آمده است. همچنین متوسط و حداکثر خطای نسبی برای معادله‌ی اصلاحی  $CSU$  به ترتیب ۲/۸ و ۸/۴ درصد و برای معادله‌ی اصلی  $CSU$ ، به ترتیب ۸/۲ و



شکل ۱۲- مقایسه‌ی نتایج معادلات اصلی و اصلاحی  $CSU$  برای تخمین عمق نهایی آبشستگی پایه‌ی پل برای داده‌های آزمایشگاهی سری دوم در حالت تجمع اجسام شناور (مرحله صحت‌سنجی)

نسبی آن بیش از ۸۰ درصد است. این مسئله تخمین کمتر از واقع روابط معمول تعیین عمق آبشستگی پایه‌ی پل‌ها را به وضوح نشان داد و لزوم استفاده از روابط اصلاحی برای دخالت اثر تجمع اجسام شناور را آشکار نمود. برای محاسبه‌ی عمق بیشینه‌ی آبشستگی پایه‌ی پل‌ها در حالت تجمع اجسام شناور رابطه‌ی ساده و بدون-بعدی بر پایه‌ی تحلیل ابعادی متغیرهای موثر بر پدیده و با تصحیح معادله تجربی ریچاردسون و دیویس (۲۰۰۱) یا  $CSU$  پیشنهاد شد. در معادله‌ی اصلاحی اثر هندسه و موقعیت قرارگیری جسم شناور در جلوی پایه‌ی پل بر افزایش عمق بیشینه‌ی آبشستگی پیشنهاد شد. سپس به کمک اصول بهینه‌سازی، ضریب و نماهای رابطه پیشنهادی به دست آمد. معادله‌ی اصلاح شده  $CSU$  در این پژوهش در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، نتایج مناسب و قابل قبولی داشته است. متوسط خطای نسبی این معادله در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۲/۲ و ۲/۸ درصد به دست آمد.

## نتیجه‌گیری

داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش نشان داد که تقریباً در تمام وضعیت‌های آزمایشگاهی، تجمع اجسام شناور چوبی در اطراف پایه‌ی پل باعث افزایش عمق آبشستگی نهایی می‌شود. این افزایش تا دو برابر میزان آبشستگی در حالت شرایط عدم تجمع نبود اجسام شناور نیز می‌رسد. با توجه به این که تاکنون معادله‌ای برای تخمین عمق بیشینه آبشستگی پایه پل‌ها در حالت تجمع اجسام شناور ارائه نشده است، در این پژوهش، ابتدا بر اساس داده‌های آزمایشگاهی موجود، کارایی و اعتبار معادله‌ی تجربی ریچاردسون و دیویس (۲۰۰۱) یا  $CSU$  که کاربرد گسترده‌ای در تخمین عمق بیشینه‌ی آبشستگی پایه‌ی پل‌ها دارد، در حالت تجمع اجسام شناور در جلوی پایه‌ی پل بررسی شد. نتایج نشان داد که این معادله، عمق آبشستگی را به میزان قابل توجهی کمتر از واقع پیش‌بینی می‌نماید. متوسط خطای نسبی این معادله حدود ۴۵/۵ درصد و حداکثر خطای

## منابع

- Bradley J.B., Richards D.L. and Bahuer C.D. 2005. Debris control structures evaluations and countermeasures. Third Edition, Hydraulic Engineering Circular 9 (HEC-9), FHWA, Washington, DC.
- De Cicco P.N., Solari L. and Paris E. 2015. Bridge clogging caused by woody debris: Experimental analysis on the effect of pier shape. 3rd Int. Conf. on Wood in World Rivers, Padova, Italy.
- Diehl T.H. 1997. Potential drift accumulation at bridges. FHWA RD-97-28, Federal highway administration research and development, U.S. Department of Transportation, McLean, VA, 1997.
- Ettema R., Constantinescu G., and Melville B. 2011. Evaluation of bridge scour research: Pier scour processes and predictions. Transportation Research Board. NCHRP, Report No. 175.
- Fallah Golneshini N.N. 2012. Experimental study on scour depth at bridge pier with debris accumulation. M.Sc. Thesis in Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 120 pp. (In Persian)
- Ghasemi E., Zahiri A., Meftah M., Dehghani A.A. 2017. Controlling local scouring around bridge pier using nano-structured materials, Water and Soil Science, 27(3): 79-91. (In Persian)
- Gurnell A.M. 2014. Plants as river ecosystem engineers, Earth Surface Processes and Landforms, 39:4-25.
- Gurnell A.M., Piégay H., Swanson F.J., and Gregory S.V. 2002. Large wood and fluvial processes. Freshwater Biology. 47(4):601-619.
- Jafargholi K. 2012. Estimating scour depth at bridge pier with debris accumulation using SSIIM. M.Sc. Thesis in Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 110 pp. (In Persian)
- Julien, P.Y. 2002. River Mechanics, Cambridge University Press, 434 pp.
- Lagasse, P.F., Clopper P.E., Zevenbergen L.W., Spitz W.J., and Girard L.G. 2010. Effects of debris on bridge pier scour. National Cooperative Highway Research Program, NCHRP.
- Li, K., Coe Y., Ramankutty M.T. and De Jong R. 2007. Modeling the hydrological impact of land use change in West Africa. J. Hydrology, 337:258-267.
- Mazzorana B., Hubl J., Zischg A., and Largiadier A. 2011. Modelling woody material transport and deposition in alpine rivers. Nat. Hazards, 56(2):425-449.
- Melville B.V., and Coleman S.E. 2000. Bridge scour. Water Resources Publications, LLC, Colorado, USA, 180 pp.
- Melville, B.W., and Dongol D.M. 1992. Bridge pier scour with debris accumulation. J. Hydraul. Eng. 118(9):1306-1310.
- Mortazavi, V., Zahiri A., Meftah M., Dehghani A.A., and Hezarjeribi A. 2015. Experimental investigation of debris accumulation on local scour at bridge pier under unsteady flow conditions. Research Report, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 40 pp. (In Persian)
- Moshashaie S.M., and Asadi Aghbolaghi M. 2016. Scour around a square pier with parabolic nose in presence of woody debris in front of pier. Modares Civil Engineering Journal, 15(4):85-96. (In Persian)
- Moshashaie S.M., Asadi Aghbolaghi M., and Samadi Brojeni H. 2015. Effect of woody debris accumulation on the scour in front of a circular shaped pier with plate pile system. Water and Soil Science, University of Tabriz, 25(2):141-153. (In Persian)
- Najafzadeh M., Rezaei Balf M., and Rashedi E. 2016. Prediction of maximum scour depth around piers with debris accumulation using EPR, MT, and GEP models. J. Hydroinformatics, 18(5):867-884.
- Pagliara, S., and Carnacina L. 2010. Temporal scour evolution at bridge piers: effect of wood debris roughness and porosity. J. Hydraul. Res., 48(1):3-13.
- Pagliara S., and Carnacina L. 2011. Influence of wood debris accumulation on bridge pier scour. J. Hydraul. Eng., 137:254-261.
- Park J.H., Chamroeun S., Park C.K., and Young D.K. 2016. A study on the effects of debris accumulation at sacrificial piles on bridge pier scour. J. Civil Engineering, KSCE, 20(4):1546-1551.
- Richardson E.V., and Davis S.R. 2001.

Evaluating scour at bridges. Fourth Edition, Federal Highway Administration, Washington, DC, 378 pp.

Schmocker L., and Hanger W. 2010. Drift accumulation at river bridge. Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology VAW, ETH-Zurich, Zurich, Switzerland.

Shields F.D., and Smith R.H. 1992. Effects of large woody debris removal on physical characteristics of a sand-bed river. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2:145-63.

Talebi A., Shahrivar M., Malekinezhad H., Poormohamadi S., and Hosseini Z. 2019. Investigation of the effects of land use change on flooding and sedimentation in Honifaqan watershed. *J. Watershed Management Research*, 10(20):25-37. (In Persian)

Wallerstein N., and Thome C.R. 2004. Influence of large woody debris on morphological evolution of incised, sand-bed channels. *Geomorphology*, 57: 53-73.

Wallerstein N., Thome C.R., and Doyle M.W. 1997. Spatial distribution and impact of large woody debris in northern Mississippi. *Proceedings of the Conference on Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision*, 145-150.

Zarrati A.R., Chamani M.R., Shafaie A., and Latifi M. 2010. Scour countermeasures for cylindrical piers using riprap and combination of collar and riprap, *Int. J. Sediment Research*, 25(3):313-321.



