

## کاربرد مدل‌های ناپارامتریک CART و M5' در محاسبه عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۰۵

جواد ظهیری<sup>۱</sup>

### چکیده

آبشستگی اطراف پایه‌های پل یکی از مهمترین زمینه‌های مطالعاتی علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه به حساب می‌آید که دلیل این امر خسارات جانی و مالی است که در اثر شکست پل ممکن است حاصل شود. تاکنون معادلات متعددی در زمینه برآورد آبشستگی در اطراف پایه‌های پل ارائه شده است ولی با توجه به پیچیدگی این پدیده، روابط موجود نتوانسته‌اند عمق آبشستگی را با دقت مناسب شبیه‌سازی کنند. بر همین اساس در این تحقیق از دو مدل ناپارامتریک CART و M5' استفاده گردید که دارای الگوریتم درختی بوده و فضای مساله را به شاخه‌های متعدد تقسیم‌بندی می‌کنند. نتیجه مدل درختی CART به ازای هر شاخه خاص یک کمیت عددی بوده، در حالی که مدل درختی M5' معادلاتی را جهت تخمین عمق آبشستگی در شاخه‌های مختلف ارائه می‌دهد. در این تحقیق از عدد فرود مختلط ذره، ضریب شکل پایه و نسبت عمق جریان به عرض پایه به عنوان ورودی استفاده گردید که در هر دو مدل ضریب شکل پایه به عنوان اولین معیار تصمیم‌گیری انتخاب گردید که نشان‌دهنده اهمیت این پارامتر بر روی عمق آبشستگی بوده و با معادلات ارائه شده در این زمینه مطابقت دارد. نتایج تحلیل‌های آماری بر روی مدل‌های پیشنهادی و معادلات موجود نشان داد که مدل‌های ناپارامتریک ارائه شده با دقت بهتری می‌توانند عمق آبشستگی را محاسبه نمایند. از جمله تحلیل‌های آماری مورد استفاده نسبت مقدار محاسباتی به مقدار واقعی بوده که نشان‌دهنده دقت بیش از ۶۵٪ برای مدل‌های درختی در مقایسه با دقت کمتر از ۵۰٪ جهت معادلات سایر محققین می‌باشد. همین نتیجه در مورد مقایسه مقادیر RMSE و R<sup>2</sup> نیز مشاهده گردید. در نهایت مدل M5' با توجه به ساختار ساده‌تر نسبت به مدل CART به عنوان مدل مناسب جهت برآورد عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های پل معرفی گردید. همچنین آنالیز حساسیت صورت گرفته بر روی مدل M5' نشان داد که قطر پایه، عمق و سرعت جریان به ترتیب بیشترین تاثیر را بر روی عمق آبشستگی دارند.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی پایه پل، آنالیز حساسیت، درخت تصمیم‌گیری، CART، M5'.

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی آب دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان، ۰۹۱۶۶۵۳۱۸۹۶، Email: Zahiri\_Javad@yahoo.com

جعبه سیاه عمل کرده و به کار بردن آن‌ها در مدل‌های دیگر از قبیل مدل‌های جریان و رسوب امکان‌پذیر نیست.

درخت‌های تصمیم‌گیری نسل جدیدی از تکنیک‌های داده‌کاوی هستند که در دو دهه اخیر توسعه زیادی یافته‌اند. از این مدل‌ها می‌توان جهت استخراج قوانین حاکم بر یک پدیده با استفاده از داده‌های موجود استفاده کرد. امروزه انواع مختلفی از درختان تصمیم مورد استفاده قرار می‌گیرند که می‌توان به الگوریتم‌های CHAID، CART، QUEST، C5 و M5 اشاره کرد. این مدل‌ها با استفاده از فرآیند تکراری تفکیک در گره‌ها، داده‌ها را به کلاس‌های مجزا تقسیم کرده و توسعه پیدا می‌کنند. از جمله مهمترین تحقیقات صورت گرفته توسط مدل‌های مذکور می‌توان به Bhattacharya and Solomatine (2006) اشاره کرد که از الگوریتم M5 جهت شبیه‌سازی رسوبات در بندر رتردام استفاده کردند. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان از مدل‌های ذکر شده جهت تصمیمات کاربردی سود جست. Gutiérrez et al. (2009) با استفاده از مدل‌های CART و MARS اقدام به شبیه‌سازی فرسایش آبگذرها نمودند. Etemad-Shahidi and Mahjoobi (2009) از مدل درختی M5 جهت شبیه‌سازی ارتفاع امواج رودخانه استفاده کردند. آنها علاوه بر مدل درختی از شبکه عصبی نیز جهت مقایسه کارایی مدل درختی استفاده کردند و نشان دادند که مدل درختی با دقت بیشتری می‌تواند ارتفاع امواج را شبیه‌سازی کند. Mahjoobi et al. (2010) نیز از مدل‌های درختی CART و M5 جهت تخمین عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل استفاده کردند. Etemad-Shahidi and Ghaemi (2011) جهت بررسی کارایی الگوریتم M5 در محاسبه عمق آبشستگی اطراف مجموعه پایه‌های پل از اطلاعات آزمایشگاهی و میدانی استفاده کردند. نتیجه این تحقیق دقت بالاتر مدل‌های درختی در

## مقدمه

تاکنون معادلات متعددی در زمینه برآورد آبشستگی در اطراف پایه‌های پل ارائه شده است. از جمله اولین معادلات ارائه شده در این زمینه می‌توان به Inglis (1949)، Ahmad (1953)، Chitale (1962) و Blench (1969) اشاره کرد که به معادلات رژیم معروف هستند (Sheppard et al. 2014). یکی از معروف‌ترین معادلات ارائه شده مربوط به دانشگاه کلرادو بوده که به معادله CSU و همچنین HEC-18 معروف است که می‌تواند حداکثر عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل را در هر دو حالت آب زلال<sup>۱</sup> و بستر متحرک<sup>۲</sup> محاسبه کند (Arneson et al. 2012). این معادله بر اساس داده‌های آزمایشگاهی آبشستگی اطراف پایه‌های استوانه‌ای استخراج شده است. از دیگر معادلات ارائه شده در این زمینه می‌توان به Melville and Sutherland (1988)، Breusers and Raudkivi (1991)، Richardson and Davis (1995)، Melville and Raudkivi (1996)، Lim and Cheng (2003)، Mia and Nago (2003) و Sheppard et al. (2014) اشاره کرد. پیچیدگی پدیده آبشستگی در اطراف پایه‌های پل به دلیل ماهیت سه بعدی جریان و ایجاد گردابه‌های متعدد در چاله آبشستگی بوده که این امر باعث شده کلیه معادلات ارائه شده، عمق آبشستگی را با مقداری خطا محاسبه کنند. بر همین اساس در کنار معادلات تجربی، محققین از روش‌های دیگری از قبیل شبکه‌های عصبی و مدل‌های فازی جهت مدل‌سازی این پدیده استفاده کرده‌اند (Bateni et al. 2007) و Firat and Gungor (2009). نتایج مدل‌های عصبی نشان می‌دهد که این مدل‌ها می‌توانند عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های پل را با خطای کمتری نسبت به معادلات متداول برآورد نمایند. با این حال مشکل عمده شبکه‌های عصبی علی‌رغم دقت مناسب آن‌ها، در ارائه نتایج خروجی است. این مدل‌ها به صورت

<sup>1</sup> Clear water

<sup>2</sup> Live bed

خروجی نیز به صورت نسبت عمق آبشستگی به عرض پایه در نظر گرفته شد. پس از ساخت و صحت‌سنجی مدل‌های CART و M5<sup>۱</sup>، آنالیزهای آماری بر روی مدل‌های درختی و معادلات متداول موجود صورت گرفت که نتایج آنالیزهای آماری نشان داد مدل‌های CART و M5<sup>۲</sup> نسبت به معادلات ارائه شده توسط محققین دیگر با دقت بیشتری می‌توانند آبشستگی اطراف پایه‌های پل را مدل نمایند. مدل CART از گره‌های بیشتری نسبت به مدل M5<sup>۳</sup> برخوردار بوده و داری پیچیدگی بیشتری می‌باشد. این در حالی است که مدل M5<sup>۴</sup> به مراتب شکل ساده‌تری داشته و قوانین ارائه شده در این مدل را می‌توان توسط اصول حاکم بر پدیده آبشستگی تفسیر نمود. آنالیز حساسیت صورت گرفته بر روی مدل‌های M5<sup>۵</sup> نشان داد که قطر پایه بیشترین تاثیر را بر روی عمق آبشستگی دارد. عمق و سرعت جریان نیز در رده‌های بعدی قرار گرفتند. اندازه قطر رسوبات و ضریب یکنواختی آن‌ها نیز رابطه غیر مستقیم با عمق آبشستگی داشته که میزان تاثیر آن‌ها توسط آنالیز حساسیت برآورد گردید.

#### مدل‌های ناپارامتریک

درخت‌های تصمیم‌گیری نسل جدیدی از تکنیک‌های داده‌کاوی هستند که امروزه در علوم مختلف جهت استخراج قوانین و روابط حاکم بر یک پدیده مورد استفاده قرار می‌گیرند. درخت تصمیم‌گیری به شکل یک درخت وارونه بوده که ریشه آن در بالاترین قسمت و برگ‌ها در پایین آن قرار می‌گیرند. الگوریتم CART که اولین بار توسط Breiman et al. (1984) معرفی شد به صورت یک درخت مرتبه‌ای دودویی می‌باشد که فضای مساله را به قسمت‌های جزء تقسیم می‌کند. الگوریتم M5<sup>۶</sup> اولین بار توسط Quinlan (1992) ابداع شد و پس از آن توسط Wang and Witten (1997) توسعه و بهبود یافت. روش‌های CART و M5<sup>۷</sup> شاخه‌های خود را به

مقایسه با معادلات رایج از قبیل Sumer et al. (1992) و Bayram and Larson (2000) بوده است. در این تحقیق از دو درخت تصمیم<sup>۱</sup> CART و M5<sup>۲</sup> استفاده گردید که نسبت به مدل‌های دیگر متداول تر می‌باشند. جهت استفاده از درخت‌های تصمیم‌می‌بایستی اطلاعات مربوط به پدیده مورد نظر در اختیار مدل قرار گیرد. تعداد و کیفیت اطلاعات و نحوه معرفی کردن آن‌ها به مدل می‌تواند تا حد زیادی بر روی دقت آن تاثیر بگذارد. در این تحقیق جهت ساخت و صحت‌سنجی مدل‌ها از اطلاعات میدانی مربوط به آبشستگی اطراف پایه‌های پل که توسط سازمان فدرال معابر آمریکا<sup>۳</sup> ارائه شده است، استفاده گردید (Mueller and Wagner, 2005). این اطلاعات از پل‌های واقعی به دست آمده و طیف وسیعی از شکل پایه‌های پل موجود از قبیل استوانه‌ای، مستطیلی، گرد گوشه و لبه تیز را شامل می‌شود. در این تحقیق از سه متغیر ورودی، عدد فرود مختلط ذره<sup>۴</sup>، ضریب شکل پایه<sup>۴</sup> و نسبت عمق جریان به عرض پایه، استفاده گردید. با توجه به ماهیت داده‌های مورد استفاده که ضریب یکنواختی دانه‌های بستر بین ۱/۲ تا ۲۱/۸ می‌باشد، به جای استفاده از عدد فرود ذره<sup>۵</sup> از مفهوم عدد فرود مختلط ذره ( $F_{dm}$ ) که توسط Hager and Oliveto (2002) معرفی شد، استفاده گردید.

$$F_{dm} = \frac{V}{\sigma^{\frac{1}{3}} \sqrt{g' d_{50}}} \quad (1)$$

در رابطه فوق  $V$  سرعت جریان،  $\sigma$  ضریب یکنواختی رسوبات بستر،  $d_{50}$  اندازه رسوبات بستر و  $g' = ((\rho_s - \rho) / \rho)g$  که  $\rho_s$  و  $\rho$  به ترتیب جرم مخصوص رسوبات بستر و آب می‌باشند.

<sup>1</sup> Classification And Regression Tree(CART)

<sup>2</sup> Federal Highway Administration (FHWA)

<sup>3</sup> Mixture Densimetric Particle Froude Number

<sup>4</sup> Pier Shape Factor

<sup>5</sup> Densimetric Particle Froude Number

از این دیدگاه می توان مدل درختی  $M5^2$  را مشابه توابع خطی چند ضابطه‌ای دانست.

### مواد و روش‌ها

اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق جهت ساخت و صحت سنجی درخت‌های تصمیم‌گیری از منابع سازمان فدرال معابر آمریکا استخراج شده که کلیه اطلاعات به صورت میدانی برداشت شده و شامل ۳۸۰ رکورد مربوط به عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل در نقاط مختلف را شامل می‌شود. اطلاعات مورد استفاده شامل شکل و عرض پایه (قطر در پایه‌های استوانه‌ای)، سرعت و عمق جریان و اندازه و ضریب یکنواختی رسوبات بستر می‌باشد.

اطلاعات میدانی مورد استفاده در این تحقیق در ماتریس شکل (۱) ارائه شده است. در این ماتریس هیستوگرام‌های مربوط به توزیع فراوانی هر کدام از متغیرها ارائه شده است که با استفاده از آن می‌توان به توزیع متغیرها و نیز نقص موجود در داده‌ها پی برد. محور عمودی در تمامی شکل‌ها میزان فراوانی اطلاعات مورد استفاده می‌باشد.

صورت دوتایی و تنها براساس یک فیلد (متغیر مستقل) ایجاد می‌کنند، بدین گونه که بر اساس شرطی که در هر گره تعریف می‌شود، اطلاعات در آن گره به دو قسمت تقسیم می‌شود (جباری و صمدی، ۱۳۹۲). در الگوریتم CART جهت انتخاب متغیر مورد آزمون از معیار انحراف حداقل مربعات  $(SS(t))$  با توجه به رابطه زیر استفاده می‌گردد.

$$SS(t) = \sum_{i=1}^{N_t} (y_i(t) - \bar{y}(t))^2 \quad (2)$$

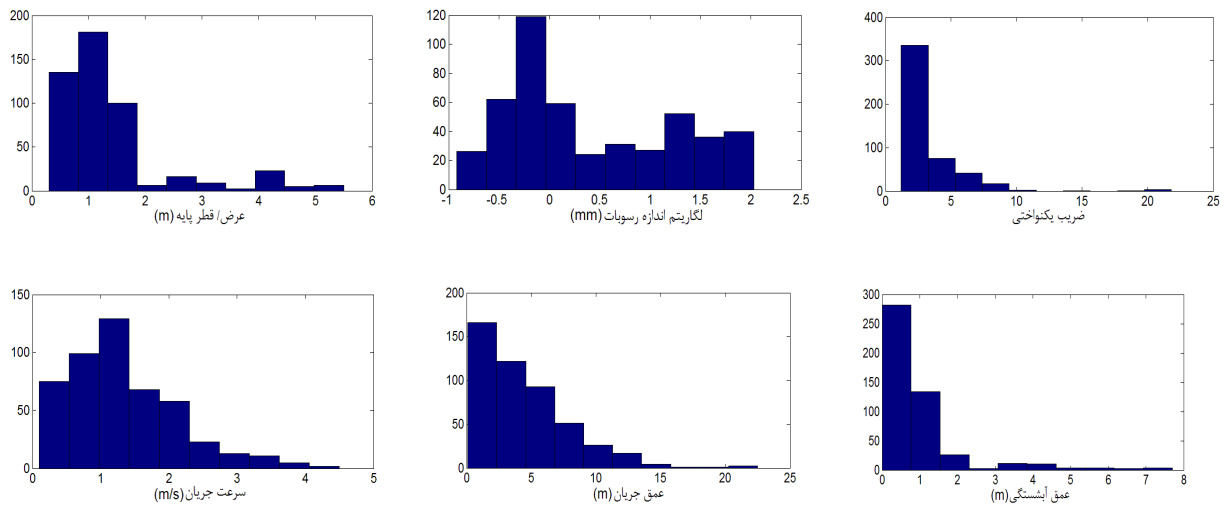
در رابطه بالا  $N_t$  تعداد رکوردها در گره  $t$ ،  $y_i(t)$  مقدار متغیر هدف در گره  $t$  و  $\bar{y}(t)$  میانگین مقادیر متغیر هدف در گره  $t$  می‌باشد. یک متغیر ورودی زمانی به عنوان بهترین صفت برای ایجاد شاخه در گره  $t$  مورد استفاده قرار می‌گیرد که تابع زیر بیشینه شود.

$$Q(X, t) = SS(t) - [SS(t_R) + SS(t_L)] \quad (3)$$

در تابع  $Q(X, t)$  متغیر  $SS(t_R)$  و  $SS(t_L)$  به ترتیب میزان  $SS(t)$  در شاخه سمت راست و چپ گره  $t$  می‌باشند.

در روش  $M5^2$  فضای مساله به زیر دامنه‌هایی تقسیم شده و برای هر زیر دامنه یک مدل رگرسیون خطی چند متغیره برازش داده می‌شود. این الگوریتم جداسازی‌های ممکن را در فضای چند متغیره انجام داده و به طور خودکار مدل‌هایی را برای هر کدام از دامنه‌ها ایجاد می‌کند (Quinlan 1992). تفاوت اصلی این الگوریتم با درخت‌های رگرسیونی CART از آنجایی است که برگ‌های مدل درختی  $M5^2$  بر خلاف درختان رگرسیونی CART که شامل مقادیر عددی هستند، حاوی مدل‌های خطی چند متغیره هستند.

<sup>1</sup> Least Squared Deviation



شکل (۱): هیستوگرام مربوط به توزیع فراوانی متغیرهای موثر بر آبشستگی

آموزش به گونه‌ای انتخاب شود که کران بالا و پایین هر کدام از متغیرها در مجموعه آموزش قرار گیرد. مشخصات داده‌های مورد استفاده در آموزش و ساخت درخت‌های تصمیم‌گیری در جدول (۱) ارائه شده است.

از مجموع اطلاعات در دسترس ۸۰٪ جهت ساخت مدل‌ها و ۲۰٪ باقیمانده جهت صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. از آنجا که مدل‌های CART و M5 قادر به تخمین مقادیر خارج از بازه‌های معرفی شده در قسمت آموزش نیستند، می‌بایستی مجموعه

جدول (۱): اطلاعات مورد استفاده جهت ساخت و صحت‌سنجی مدل‌های درختی

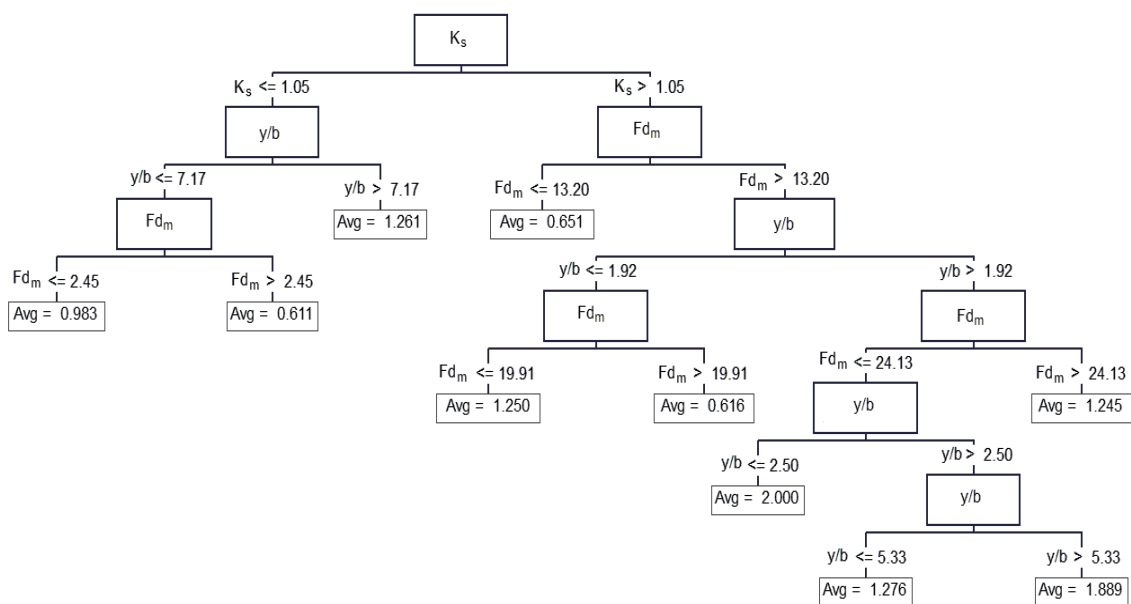
متغیر آماری	عرض پایه (m)	سرعت جریان (m/s)	عمق جریان (m)	اندازه ذرات (mm)	ضریب یکنواختی	عمق آبشستگی (m)	$F_{dm}$	$y/b$	$d_s/b$
حداکثر	۵/۵	۴/۵	۲۰/۰	۹۵/۰	۲۱/۸	۴/۳	۳۷/۲	۱۱/۰	۳/۰
حداقل	۰/۳	۰/۱	۰/۱	۰/۱۲	۱/۲	۰/۲	۰/۲۸	۰/۱	۰/۱۲
میانگین	۱/۱۸	۱/۳۲	۳/۶۵	۱۲/۷۵	۳/۴۲	۰/۸۴	۵/۲۰	۳/۳۵	۰/۷۸
انحراف معیار	۰/۸۷	۰/۷۵	۳/۱۰	۲۱/۲۲	۲/۵۱	۰/۷۹	۵/۳۷	۲/۲۴	۰/۴۸

مدل ارائه شده توسط درخت تصمیم CART پس از ساخت و هرس کردن شاخه‌های اضافی به صورت شکل (۲) خواهد بود. همچنانکه در این شکل مشاهده می‌شود، در اولین گره فاکتور شکل پایه به عنوان بهترین صفت جهت ایجاد شاخه انتخاب گردید که این امر نشان‌دهنده تاثیر شکل پایه بر روی عمق

پس از بررسی اعداد بی‌بعد موثر بر آبشستگی، عدد فرود مختلط ذره ( $F_{dm}$ )، نسبت عمق جریان به عرض پایه ( $y/b$ ) و فاکتور شکل پایه ( $K_s$ ) به عنوان متغیرهای ورودی و نسبت عمق آبشستگی به عرض پایه ( $d_s/b$ ) به عنوان خروجی به مدل‌ها معرفی شدند.

در انتهای هر گره یک کمیت عددی به عنوان خروجی ارائه می‌دهد (Avg) که این کمیت بیانگر میانگین عمق آبشستگی مربوط به اطلاعات آن گره می‌باشد. تعداد زیاد گره‌ها در این الگوریتم باعث مشکل شدن کاربرد آن در سایر مدل‌ها می‌گردد.

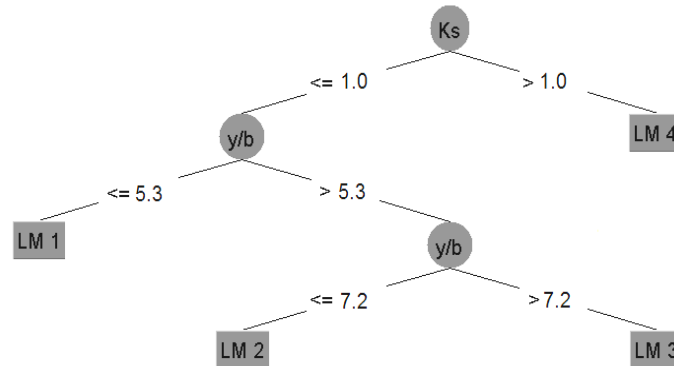
آبشستگی می‌باشد. پس از شکل پایه بقیه متغیرها که شامل نسبت عمق جریان به عرض پایه و عدد فرود مختلط ذره جهت تشکیل شاخه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، الگوریتم CART از گره‌های متعددی تشکیل شده و



شکل (۲): مدل درخت تصمیم CART جهت برآورد عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل

توانی تبدیل شوند. درخت تصمیم  $M5'$  با توجه به داده‌های معرفی شده در قسمت آموزش و پس از تبدیل مقادیر از حالت لگاریتم طبیعی به صورت شکل (۳) خواهد بود.

مدل  $M5'$  تنها قادر به شبیه‌سازی مدل‌های خطی بوده که این امر با اساس معادلات متداول آبشستگی در تناقض است. بر همین اساس کلیه داده‌ها به صورت لگاریتم طبیعی به مدل معرفی شدند و پس از ساخت مدل خطی از حالت لگاریتمی به



شکل (۳): مدل درخت تصمیم M5' جهت برآورد عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل

$$LM\ 3: \frac{d_s}{b} = 0.39 F d_m^{0.05} K_s^{-0.5} \left( \frac{y}{b} \right)^{0.40} \quad (۶)$$

$$LM\ 4: \frac{d_s}{b} = 0.66 K_s^{0.3} \left( \frac{y}{b} \right)^{0.34} \quad (۷)$$

در شکل (۳) به ازای  $y/b \leq 5.3$  می‌توان عمق آبشستگی را با استفاده از رابطه LM1 محاسبه نمود. در این رابطه عمق آبشستگی تنها به صورت تابعی از  $K_s$  و  $y/b$  بیان شده است. این معادله از آنجایی که پارامترهای سرعت و اندازه رسوبات بستر در محاسبه عمق آبشستگی دخالت ندارند را می‌توان مشابه با معادلات (Laras (1963), Larsen (1963), Breusers (1965), Hanco (1971) و Melville and Coleman (2000)) بسیاری از معادلات آبشستگی پایه پل از جمله معادله Melville (1997) در بسیاری از حالت‌ها اثر سرعت و اندازه ذرات بستر در آن لحاظ نمی‌شود. عدد فرود مختلط ذره تنها در معادلات (۵) و (۶) لحاظ شده است. بر این اساس با توجه به معادلات ارائه شده تنها در پایه‌های غیر مستطیلی با نسبت عمق جریان به عرض پایه بالا ( $y/b \geq 7.2$ )، عدد فرود مختلط ذره می‌تواند بر روی عمق آبشستگی موثر باشد. در مورد

### نتایج و بحث

با توجه به مدل‌های ساخته شده توسط الگوریتم‌های CART و M5'، اولین متغیر جهت تقسیم‌بندی داده‌ها مربوط به شکل پایه ( $K_s$ ) بوده که تاثیر زیادی بر روی عمق آبشستگی دارد. در این تحقیق فاکتور شکل پایه با توجه به تحقیقات Melville (1997) جهت پایه‌های لبه تیز ۰/۹، پایه‌های استوانه‌ای و لبه گرد برابر ۱/۰ و پایه‌های مستطیلی ۱/۱ در نظر گرفته شد. براساس تقسیم‌بندی صورت گرفته در دو درخت تصمیم کلیه پایه‌های لبه تیز، استوانه‌ای و لبه گرد در یک گره قرار گرفته و پس از آن داده‌ها بر اساس نسبت عمق جریان به عرض پایه تقسیم‌بندی شده‌اند. در شکل (۳)، روابط خطی بوده که توسط مدل M5' بر هر کدام از حالت‌ها توسعه یافته است که پس از تبدیل از حالت لگاریتمی، معادلات این مدل به صورت روابط (۴) تا (۷) خواهند شد.

$$LM\ 1: \frac{d_s}{b} = 0.45 K_s^{-2.8} \left( \frac{y}{b} \right)^{0.11} \quad (۴)$$

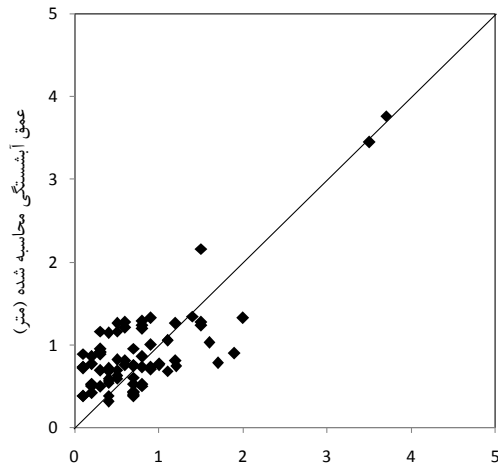
$$LM\ 2: \frac{d_s}{b} = 0.38 F d_m^{0.1} K_s^{-0.5} \left( \frac{y}{b} \right)^{0.26} \quad (۵)$$

در این تحقیق از نمودار مستطیلی جهت بررسی کارایی روش‌های مختلف تخمین عمق آبشستگی استفاده شده است. مزیت این نمودار ارائه اطلاعاتی در زمینه توزیع مقادیر با نشان دادن مقادیر میانه، دامنه تغییرات بین چارکی و بیشترین و کمترین مقادیر یک گروه از نمونه‌ها می‌باشد. این نمودار ابزاری مناسب جهت شرح مکان و پراکندگی داده‌های مربوط به چند گروه مختلف است. در این تحقیق تفاضل عمق آبشستگی محاسبه شده و عمق آبشستگی مشاهداتی به عنوان متغیر در نمودار مستطیلی در نظر گرفته شده است. بر همین اساس هرچه پراکندگی داده‌ها در اطراف صفر بیشتر باشند نشان‌دهنده دقت بیشتر روش مورد نظر خواهد بود. با توجه به شکل (۶) نمودار مستطیلی مربوط به الگوریتم‌های درختی کوچک‌تر از بقیه و در اطراف صفر تمرکز پیدا کرده که نشان‌دهنده دقت الگوریتم‌ها در برآورد عمق آبشستگی می‌باشد.

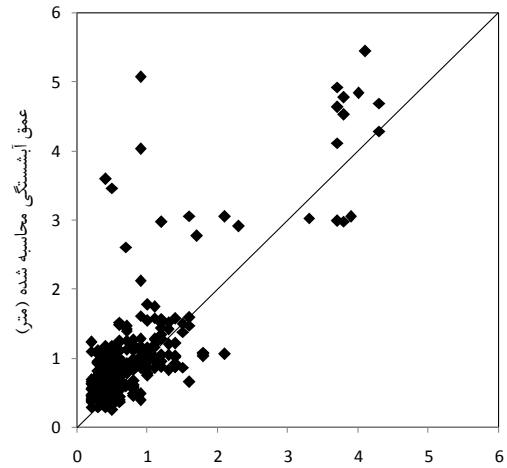
پایه‌های مستطیلی نیز در کلیه حالت‌ها، عمق آبشستگی به صورت تابعی از ضریب شکل پایه و نسبت  $b/y$  می‌باشد. پس از ساخت مدل‌های CART و  $M5'$ ، دو مدل جهت برآورد عمق آبشستگی با استفاده از داده‌های آموزشی و صحت‌سنجی مورد ارزیابی قرار گرفتند که خروجی دو مدل در شکل (۴) ارائه شده است. با توجه به شکل (۴) تراکم نقاط مدل‌های درختی در اطراف خط ۴۵ درجه بوده که این امر نشان دهنده همبستگی مناسب میان مقادیر مشاهداتی و نتایج مدل‌های CART و  $M5'$  می‌باشد. جهت مقایسه میزان کارایی مدل‌های درختی ارائه شده از معادلات (Melville, Shen et al. (1969), Hec-18 and Sutherland (1988), Ansari and Qadar (1994), Melville (1997) و Melville and Chiew (1999) استفاده گردید. با توجه به تشابه نتایج دو مدل CART و  $M5'$ ، در شکل (۵) تنها از نتایج مدل  $M5'$  به همراه سایر معادلات ذکر شده استفاده گردید.

با توجه به شکل (۵) مدل  $M5'$  نسبت به سایر معادلات همبستگی بهتری با مقادیر آبشستگی مشاهداتی دارد. از میان معادلات سایر محققین، Shen et al. (1969) دقت کمتری داشته و مدل‌های Ansari and Qadar (1994), Melville (1997) و Hec-18 بیش از سایر روش‌ها مقدار آبشستگی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده‌اند.

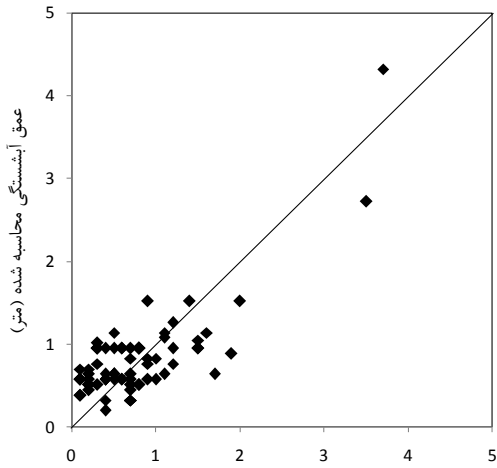




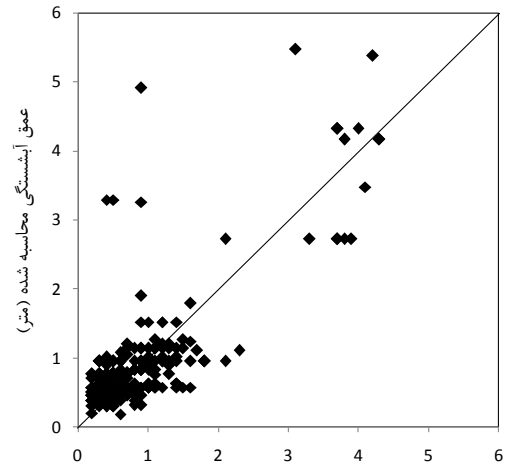
عمق آیشستگی مشاهده‌ای (متر)  
عمق آیشستگی محاسبه شده (متر)  
(ب) مدل M5- مرحله صحت سنجی



عمق آیشستگی مشاهده‌ای (متر)  
عمق آیشستگی محاسبه شده (متر)  
(الف) مدل M5- مرحله آموزش

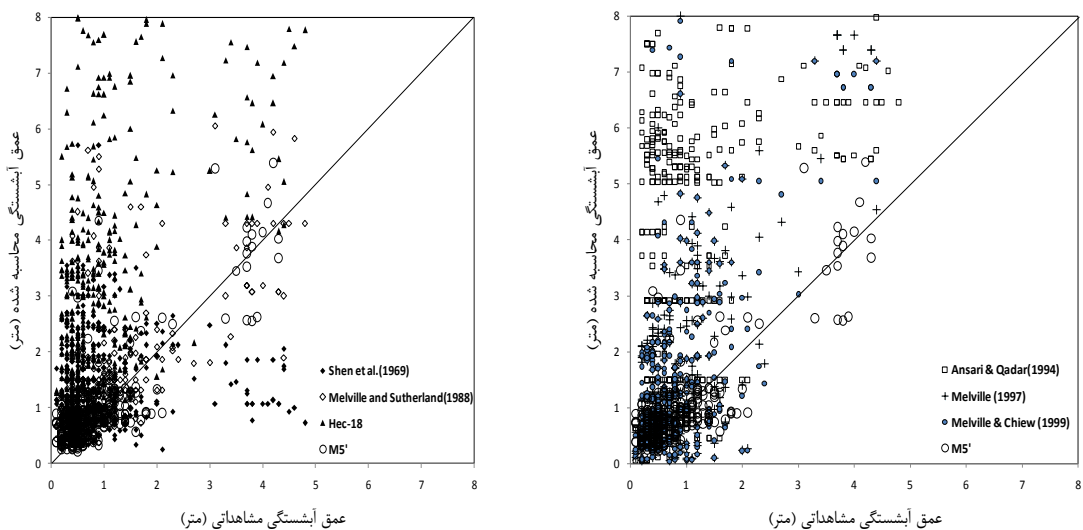


عمق آیشستگی مشاهده‌ای (متر)  
عمق آیشستگی محاسبه شده (متر)  
(د) مدل CART- مرحله صحت سنجی



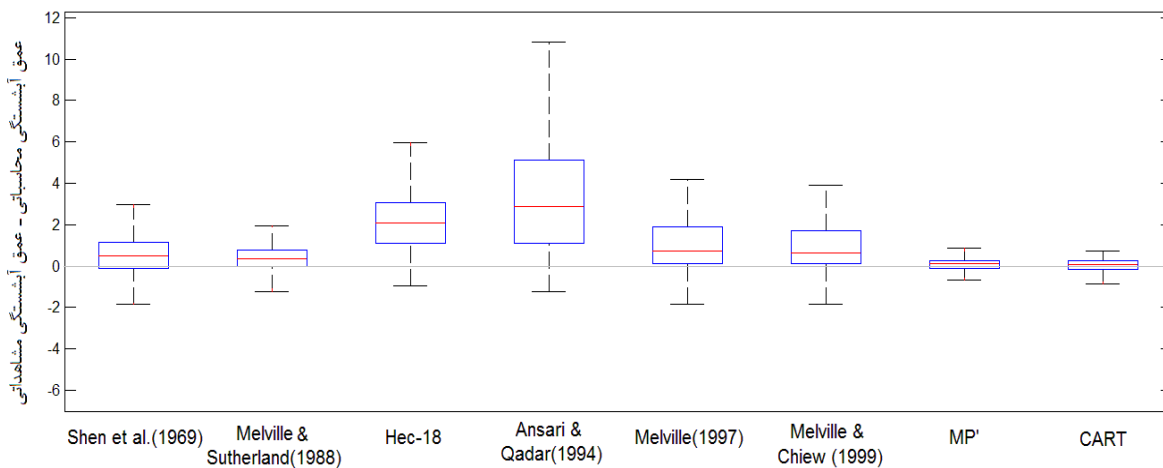
عمق آیشستگی مشاهده‌ای (متر)  
عمق آیشستگی محاسبه شده (متر)  
(ج) مدل CART- مرحله آموزش

شکل (۴): همبستگی نتایج مدل‌های درختی با مقادیر مشاهده‌ای



شکل (۵): همبستگی نتایج معادلات سایر محققین با مقادیر مشاهداتی

روش‌های (Ansari and Qadar (1994)، Melville and Melville (1997) و Hec-18، آبخستگی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده‌اند. بر اساس شکل (۶)، به مراتب عمق مشاهداتی



شکل (۶): نمودار مستطیلی روش‌های مختلف تخمین عمق آبخستگی اطراف پایه‌های پل

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (d_s^{measured} - d_s^{computed})^2} \quad (9)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (d_s^{measured} - d_s^{computed})^2}{\sum (d_s^{measured} - \bar{d}_s^{measured})^2} \quad (10)$$

جهت مقایسه بهتر کارایی مدل‌های ارائه شده و معادلات سایر محققین از آنالیزهای آماری: متوسط خطای مطلق (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین ( $R^2$ ) و نسبت اختلاف (DR) استفاده شده است.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |d_s^{measured} - d_s^{computed}| \quad (8)$$

بوده که در مقایسه با روش‌های متداول دقت قابل قبولی به حساب می‌آید. در میان روش‌های متداول روش Melville and Sutherland (1988) و Melville and Chiew (1999) به ترتیب با ۴۵/۳ درصد و ۲۴/۵ درصد بیشترین دقت را داشته‌اند. مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای مطلق نیز در این دو روش نسبت به سایر روش‌های موجود کمتر می‌باشد. در میان دو مدل درختی، مدل  $M5'$  دارای نسبت  $DR < 0.5$  کمتری در مقایسه با روش CART بوده که نشان می‌دهد این مدل در رکوردهای کمتری مقدار آبهستگی را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. همچنین در مدل  $M5'$  مجموع مربعات خطا ۰/۵۹ محاسبه گردید که در مقایسه با روش ملویل و سازلند (۰/۸۹) و ملویل و چپو (۲/۲) مقدار به مراتب کمتری را نشان می‌دهد. ضریب  $R^2$  نیز در دو مدل درختی برابر ۰/۷ محاسبه شده که در مقایسه با سایر روش‌ها همبستگی بهتری با مقادیر مشاهداتی دارند.

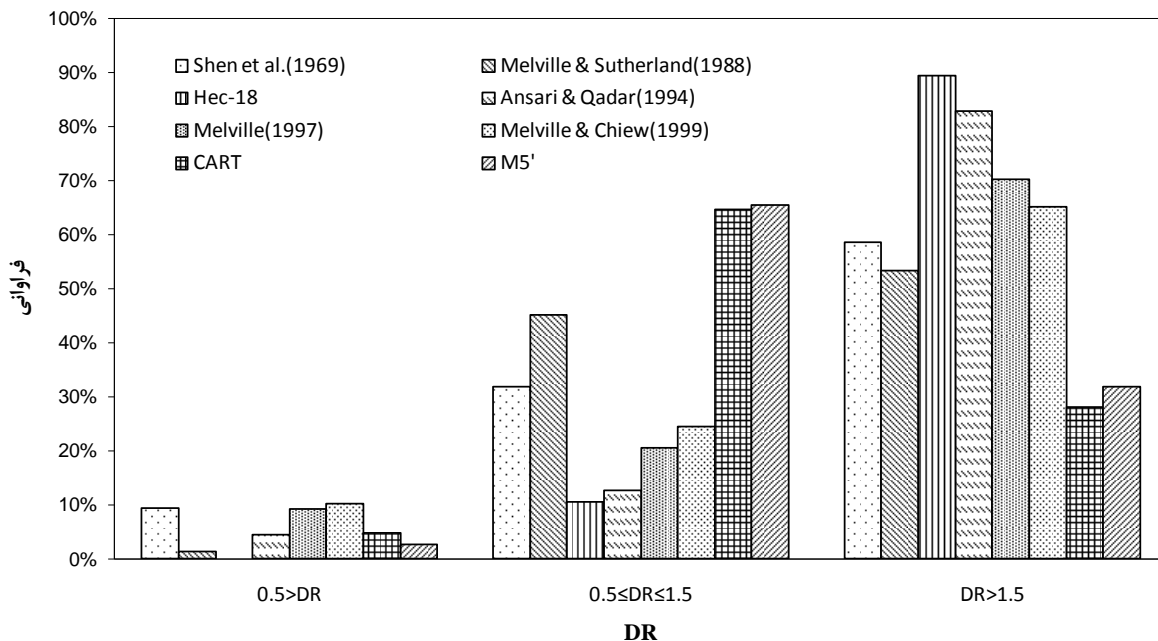
$$DR = \frac{d_s^{computed}}{d_s^{measured}} \quad (11)$$

نسبت اختلاف توسط White et al. (1973) پیشنهاد شده است و از معیارهای قدرتمند آماری جهت بررسی کارایی مدل‌های مختلف به حساب می‌آید (Etemad-Shahidi and Taghipour, 2012). چنانچه  $DR$  برابر یک باشد نشان‌دهنده مطابق بودن نتایج مدل و مقادیر واقعی می‌باشد. در غیر اینصورت چنانچه  $DR > 1$  باشد، مدل مورد نظر آبهستگی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است در غیر اینصورت ( $DR < 1$ )، آبهستگی کمتر از مقدار واقعی محاسبه شده است. در این تحقیق درصد مقادیر با  $DR$  بین ۰/۵ و ۱/۵ به عنوان دقت هر مدل در نظر گرفته شده است که شباهت زیادی به دقت تعریف شده توسط Seo and chong (1998) دارد (Etemad-Shahidi and Taghipour (2012)).

با توجه به آنالیزهای صورت گرفته در جدول (۲) و شکل (۷) دقت مدل‌های درختی بیشتر از ۶۵ درصد

جدول (۲): مقایسه کارایی مدل‌های تخمین عمق آبهستگی اطراف پایه‌های پل

MEAN	RMSE	$R^2$	Accuracy %	$DR > 1.5$ %	$0.5 \leq DR \leq 1.5$ %	$DR < 0.5$ %	مدل
۰/۹	۱/۲	۰/۰۶	۳۱/۸	۵۸/۷	۳۱/۸	۹/۵	Shen et al.(1969)
۰/۶	۰/۸۹	۰/۴۴	۴۵/۳	۵۲/۴	۴۵/۳	۱/۳	Melville and Sutherland.(1988)
۲/۰	۲/۵	۰/۳	۱۸	۸۲	۱۸	۰/۰	Hec-18
۲/۸	۴/۰	۰/۰۷	۱۲/۶	۸۲/۹	۱۲/۶	۴/۵	Ansari and Qadar.(1994)
۱/۴	۲/۳	۰/۵	۲۰/۵	۷۰/۳	۲۰/۵	۹/۲	Melville.(1997)
۱/۳	۲/۲	۰/۵	۲۴/۵	۶۵/۳	۲۴/۵	۱۰/۳	Melville and Chiew.(1999)
۰/۱۱	۰/۵۶	۰/۷	۶۶/۶	۲۸/۱	۶۶/۶	۵/۳	CART
۰/۴۳	۰/۵۹	۰/۷	۶۵/۶	۳۱/۸	۶۵/۶	۲/۶	$M5'$



شکل (۷): مقایسه نسبت اختلاف (DR) مدل‌های مختلف

بیشتر متغیر مربوطه بر روی عمق آبشستگی خواهد بود. به عنوان مثال ضریب حساسیت ۰/۲ نشان‌دهنده افزایش ۲٪ در میزان عمق آبشستگی به ازای ۱۰٪ افزایش در آن متغیر به شرطی که کلیه پارامترها ثابت نگاه داشته شوند، می‌باشد. آنالیز حساسیت صورت گرفته در مورد کلیه متغیرهای موثر بر روی عمق آبشستگی به ازای تغییرات ۲۰٪ در مقدار هر متغیر با استفاده از رابطه (۱۲) در جدول (۳) ارائه شده است. در جدول (۳)،  $S_b$  ضریب حساسیت عرض پایه (قطر پایه در مورد پایه‌های استوانه‌ای)،  $S_y$  ضریب حساسیت عمق جریان،  $S_v$  ضریب حساسیت سرعت،  $S_{d50}$  ضریب حساسیت اندازه رسوبات بستر و  $S_\sigma$  ضریب حساسیت یکنواختی رسوبات بستر رودخانه می‌باشد. با توجه به جدول (۳) در چهار مدل ارائه شده جهت برآورد عمق آبشستگی، عرض پایه بیشترین تاثیر را بر روی عمق آبشستگی دارد. ضریب حساسیت عرض پایه در چهار مدل بین ۰/۶۰ تا ۰/۹۰ تغییر می‌کند و بدین معنی است که به ازای ۱۰٪ تغییر در اندازه عرض پایه، با ثابت نگاه داشتن کلیه متغیرها، عمق آبشستگی بین

#### آنالیز حساسیت

جهت آنالیز حساسیت متغیرهای موثر بر عمق آبشستگی در این تحقیق حالات بی بعد مشتقات جزئی مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس از ضریب حساسیت معرفی شده توسط Gong et al. (2006) استفاده گردید.

$$S_{Vi} = \lim_{\Delta V_i \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta d_s / d_s}{\Delta V_i / V_i} \right) = \frac{\partial d_s}{\partial V_i} \cdot \frac{V_i}{d_s} \quad (12)$$

در رابطه فوق  $S_{Vi}$  ضریب حساسیت،  $V_i$  متغیر  $i$ ام و  $d_s$  عمق آبشستگی می‌باشد. رابطه فوق ضریب حساسیت نسبی بی‌بعدی<sup>۱</sup> را ارائه می‌دهد که با استفاده از آن می‌توان تاثیر متغیرهای مختلف بر روی خروجی را مقایسه کرد. این مفهوم برای اولین بار توسط McQueen (1974) مورد استفاده قرار گرفت ولی پس از آن توسط محققین دیگر بکار گرفته شد (Gong et al (2006)). هر چه ضریب حساسیت بدست آمده از رابطه فوق بیشتر باشد، نشان‌دهنده تاثیر

<sup>1</sup> Non-dimensional relative sensitivity coefficient

معنی که در مدل (۲) با ۱۰٪ افزایش اندازه و ضریب یکنواختی رسوبات بستر به طور جداگانه و با فرض ثابت بودن کلیه متغیرها، عمق آبشستگی به ترتیب ۰/۵ و ۰/۳ درصد کاهش خواهد یافت.

۶٪ تا ۹٪ درصد تغییر خواهد کرد. پس از اندازه پایه، عمق و سرعت جریان بیشترین تاثیر را بر روی عمق آبشستگی دارند. ضریب حساسیت مربوط به اندازه و یکنواختی رسوبات بستر با علامت منفی نشان دهنده اثر معکوس بر روی عمق آبشستگی می باشد. به این

جدول (۳): ضریب حساسیت متغیرهای موثر بر روی عمق آبشستگی به ازای ۲۰٪ انحراف نسبت به میانگین

	$S_b$		$S_y$		$S_v$		$S_{d50}$		$S_\sigma$	
	-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%
LM1	۰/۹۰	۰/۸۸	۰/۱۱	۰/۱۱	---	---	---	---	---	---
LM2	۰/۷۳	۰/۷۴	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۱	۰/۱	-۰/۰۵	-۰/۰۵	-۰/۰۳	-۰/۰۳
LM3	۰/۶	۰/۶	۰/۴	۰/۴	۰/۰۵	۰/۰۵	-۰/۰۲۵	-۰/۰۲۴	-۰/۰۱۷	-۰/۰۱۶
LM4	۰/۶۵	۰/۶۳	۰/۳۴	۰/۳۵	---	---	---	---	---	---

Melville and Sutherlan (1988) و Melville and Chiew (1999) از دقت بهتری برخوردار بوده ولی در مقایسه با مدل‌های درختی دقت پایین‌تری را نشان دادند. همچنین آنالیز حساسیت بر روی مدل  $M5'$  نشان داد که عرض پایه، عمق و سرعت جریان به ترتیب بیشترین تاثیر را بر روی عمق آبشستگی دارند. اندازه متوسط ذرات بستر و ضریب یکنواختی رسوبات نیز که تاثیر عکس بر روی عمق آبشستگی دارند در رده‌های بعدی قرار گرفتند. جهت بررسی میزان کارایی روش‌های ارائه شده از معادلات دیگر محققین استفاده گردید و با استفاده از آنالیزهای آماری مشخص شد که الگوریتم‌های درختی می‌توانند با دقت قابل قبولی عمق آبشستگی را در اطراف پایه‌های پل برآورد نمایند.

### نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق ارائه روشی بر مبنای الگوریتم‌های درختی جهت محاسبه عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل می‌باشد. بر همین اساس از دو مدل  $M5'$  و CART جهت این منظور استفاده گردید. مدل CART نسبت به مدل  $M5'$  دارای گره‌های بیشتری بوده که استفاده از این مدل را دچار مشکل می‌کند، این در حالی است که مدل  $M5'$  چهار رابطه را جهت برآورد عمق آبشستگی ارائه داده که براحتی می‌توان از این روابط در مدل‌های دیگر سود جست. شکل پایه به عنوان صفت اول جهت تقسیم‌بندی داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت که نشان‌دهنده تاثیر بالای آن بر روی عمق آبشستگی می‌باشد. جهت بررسی کارایی مدل‌های درختی از معادلات متداول موجود استفاده شد که در بین این معادلات

### منابع

جباری، ا.، و م. صمدی. ۱۳۹۲. کاربرد الگوریتم  $M5$  در پیش‌بینی عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریزها. طرح تحقیقات کاربردی، شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران.

Arneson, L. A., L. W. Zevenbergen, P. F. Lagasse and P. E Clopper. 2012. Evaluating Scour at Bridges: Federal Highway Administration Hydraulic Engineering Circular No. 18: Federal Highway Administration Publication No. FHWA-HIF-12-003 HEC-18, 340 p.

Bateni, S. M, D. S. Jeng and B. W. Melville. 2007. Bayesian Neural Networks for Prediction of Equilibrium and Time-dependent Scour Depth around Bridge Piers. *Advances in Engineering Software*, 38 (2): 102-111.

Bhattacharya, B. and D. P. Solomatine. 2006. Machine Learning in Sedimentation Modeling. *Neural Networks Journal*, 19: 208-214.

Breusers, H. N. C. and A. J. Raudkivi. 1991. Scouring In Hydraulic Structures Design Manual. International Association of Hydraulic Research, Balkema, 143 p.

Etemad-Shahidi, A. and J. Mahjoobi. 2009. Comparison between M5' Model Tree and Neural Networks for prediction of significant wave height. *Journal of Ocean Engineering*. 36(15-16): 1175-1181.

Etemad-Shahidi, A. and N. Ghaemi, 2011. Model Tree Approach for Prediction of Pile Groups Scour due to Waves. *Ocean Engineering*, 38: 1522-1527.

Etemad-Shahidi, A. and M. Taghipour. 2012. Predicting Longitudinal Dispersion Coefficient in Natural Streams Using M5' Model Tree. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(6): 542-554.

Firat, M. and M. Gungor. 2009. Generalized Regression Neural Networks and Feed Forward Neural Networks for Prediction of Scour around Bridge Piers. *Advances in Engineering Software*. 40 (8):731-737.

Gong, L., X. Chong-yu, D. Chen, S. Halldin , and Y. D. Chen. 2006. Sensitivity of the Penman-Monteith Reference Evapotranspiration to Key Climatic Variables in the Changjiang (Yangtze River) Basin. *Journal of Hydrology*, 329:620-629.

Gutiérrez AG, Schnabel S and Lavado Contador JF, 2009. Using and Comparing Two Nonparametric Methods (CART and MARS) to Model the Potential Distribution of Gullies. *Ecological Modeling* 220(24): 3630-3637.

Hager, W. H. and G. Oliveto. 2002. Shields' Entrainment Criterion in Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5): 538-542.

Lim, S. Y. and N. S. Cheng. 1998. Prediction of Live-Bed Scour at Bridge Abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(6): 635-638.

Mahjoobi J, Sabzianpoor A and Jabbari E, 2010. Application of Meta-Heuristic Models for Local Scour Evaluation, Pp. 389-397, Ninth International Conference on Computing Anticipatory Systems. AIP Conference Proceedings. 3-8 August, Liege, Belgium.

Melville, B. W. 1997. Pier and Abutment Scour: Integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(2):125-136.

Melville, B. W and A.J. Sutherland. 1988. Design Method for Local Scour at Bridge Piers. American Society of Civil Engineers, *Journal of Hydraulic Division*, 114(10).

Melville, B. W. and A. J. Raudkivi. 1996. Effects of Foundation Geometry on Bridge Pier Scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(4): 203-209.

Melville, B. W. and S. E. Coleman. 2000. Bridge Scour: Highlands Ranch, Colo., Water Resources Publications, 550 p.

Mia, M. F. and H. Nago. 2003. Design Method of Time-Dependent Local Scour at Circular Bridge Pier. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(6): 420-427.

Mueller, D. S. and C. R. Wagner. 2005. Field Observations and Evaluations of Streambed Scour at Bridges. US Department of Transportation, Federal Highway Admin., Turner-Fairbank Highway Research Center, McLean, Virginia.

Quinlan, J. R.1992. Learning with Continuous Classes. *Proceedings of AI'92, World Scientific*, pp.343-348.

Richardson, E. V. and S. R. Davis. 1995. Evaluating Scour at Bridges (3rd edition.). Federal Highway Administration, FHWA-IP-90-017 HEC-18, 204 p.

Sheppard, D. M., B. Melville and H. Demir. 2014. Evaluation of Existing Equations for Local Scour at Bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering, 140(1): 14–23.

Wang, Y. and I. H. Witten. 1997. Induction of Model Trees for predicting Continuous Classes. Proceedings of the Poster Papers of the European Conference on Machine Learning, University of Economics, Faculty of Informatics and Statistics, Prague.

## Nonparametric CART and M5' Methods Application on Bridge Piers Scour Depth Computation

Javad Zahiri<sup>1</sup>

### Abstract

Bridge pier scouring is one of the most important fields in hydraulics and river engineering, especially due to loss of life and property caused by bridge failure. Many experimental equations have been previously proposed to evaluate bridge pier scouring, most of which could not accurately simulate scoring depth because of complexity of the phenomenon. The present study, in this regard, compares two nonparametric CART and M5' models having tree-structure and dividing the problem space into several branches. CART model offers a scalar quantity for each branch while M5' model could provide equations as a result of bridge scour for different branches. Mixture densimetric particle Froude number, pier shape factor and ratio of flow depth to pier width were taken into account as input parameters in this research. Pier shape factor has been chosen as the first decision variable in both models that reflects the importance of this parameter on scour depth, corresponded to previous equations from the literature. Statistical analysis on proposed models and previous equations indicated that the nonparametric models could predict scour depth around piers with more precision. Discrepancy ratio was one of the statistical tests used in this research, indicating more than 65% accuracy for the tree-based models against other equations having less than 50% accuracy. Same results were observed from other statistical tests such as RMSE and R2. Finally, in comparison with CART model, M5' was recommended for estimating of scour depth according to its simple structure. Also based on sensitivity analysis on M5' model, pier width, flow depth and velocity had the highest impact on scour depth, respectively.

**Keywords:** Scour depth, Sensitivity analysis, Tree models, CART, M5'

---

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Water Engineering, Khuzestan Ramin Agriculture and Natural Resources University. Email: Zahiri\_Javad@yahoo.com