

طراحی سنگچین اطراف پایه‌های پل با استفاده از مدل‌های ناپارامتریک

جواد ظهیری*

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۵/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۴/۰۸

^۱ استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Zahiri_Javad@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق اندازه المان‌های سنگچین پایدار در اطراف پایه‌های پل با استفاده از تکنیک‌های نوین داده‌کاوی تعیین گردیده است. مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق مدل‌های ناپارامتریک CART و رگرسیون تطبیقی چند متغیره (MARS) می‌باشند که جهت ساخت این دو مدل از اطلاعات مربوط به پایداری سنگچین به صورت پارامترهای بدون بعد شامل ضریب شکل پایه، عدد فرود جریان، نسبت عرض پایه به عمق جریان، چگالی ویژه، تعداد لایه‌ها و محل قرارگیری پوشش سنگچین نسبت به کف بستر به عنوان ورودی و نسبت قطر سنگچین به عمق جریان به عنوان خروجی استفاده گردید. دو مدل در مرحله آموزش دقت نسبتاً مشابهی به هم داشته ولی در مرحله صحت‌سنجی، مدل CART اندازه المان‌های سنگچین را با دقت بهتری برآورد نمود. جهت بررسی کارایی مدل‌های فوق، از معادلات متداول موجود (جهت مقایسه با این مدل‌ها) و نیز از تعدادی معیارهای آماری استفاده گردید. نتایج تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که مدل CART دقت بیشتری نسبت به سایر معادلات متداول داشته به گونه‌ای که در این روش مجموع مربعات خطا نسبت به معادله Hec-18 به بیش از یک سوم کاهش یافت. همچنین دقت مدل CART، ۸۸ درصد بوده که ۱۵ درصد بیشتر از معادله Hec-18 تعیین گردید. نتایج تحلیل حساسیت صورت گرفته بر روی مدل CART جهت تعیین اهمیت پارامترهای مورد استفاده نشان داد که مقادیر عدد فرود جریان و نسبت عرض پایه به عمق جریان بیشترین تأثیر را بر روی پایداری المان‌های سنگچین دارا هستند.

واژه‌های کلیدی: پایه پل، تحلیل حساسیت، سنگچین، مدل CART، مدل MARS

Riprap Design for Bridge Piers Using Nonparametric Models

J Zahiri^{1*}

Received: 13 August 2014

Accepted: 29 June 2015

¹⁻ Assist. Prof., Dept. of Water Eng., Khouzestan Ramin Agriculture and Natural Resources University, Iran

* Corresponding Author, Email : Zahiri_Javad@yahoo.com

Abstract

In this study, bridge pier riprap sizing has been derived using new data mining techniques. Classification and regression tree (CART) and multivariate adaptive regression splines (MARS) were used to design a stable riprap size around bridge piers. The dimensionless parameters of pier shape factor (Ks), Froude number (Fr), pier width to flow depth ratio (b/y), specific gravity (1-Sg), riprap layers (n) and placement of riprap mattress to original sediment bed level (1-d/y) as input data and the riprap diameter to flow depth ratio (DR/y) as output one, were employed for training and testing the models. The applied models had similar performances in the training phase, while the results of testing phase showed better performance for the CART model. Some of the riprap stability equations and statistical criteria were used to investigate the performance of the applied models. The statistical analysis showed that the CART model had a better performance than the other equations, so that its sum of squares error value reduced to one-third, with respect to the Hec-18 equation. In addition, the accuracy of the CART model was 88% which was 15% more than that of the Hec-18 equation. Sensitivity analysis on the CART model indicated that the Froude number and pier width to flow depth ratio had the highest effects on riprap stability.

Keywords: Bridge pier, CART model, MARS model, Riprap, Sensitivity analysis

مقدمه

استفاده از سنگچین، اقتصادی بودن این روش و اجرای ساده آن هست. جهت طراحی ابعاد مناسب سنگچین روش‌های متعدد تجربی وجود دارد که تفاوت نتایج این روش‌ها بسیار زیاد است. دلیل این امر تجربی بودن روش‌های پیشنهادی توسط محققین مختلف هست (ملویل و کلمن ۲۰۰۰). بر اساس یافته‌های چیو (۱۹۹۵) سه مکانیزم متفاوت که باعث شکست سنگچین می‌گردند عبارت‌اند از: گسیختگی ناشی از برش^۱، تخریب زیرسطحی^۲ و تخریب لبه‌ای^۳. در شکست برشی المان‌های سنگچین تحت تأثیر تنش برشی ناشی از جریان از پوشش جدا شده و به پایین دست منتقل

آبشستگی موضعی ناشی از وجود هر گونه مانع در مقابل جریان است. این آبشستگی تابعی از شکل سازه، میزان تنگ‌شدگی و نحوه قرارگیری سازه در مقابل جریان است. آبشستگی موضعی به این صورت اتفاق می‌افتد که الگوی جریان در اطراف سازه تغییر کرده و جریان‌های آشفته چرخشی و گرداب‌هایی در اطراف آن‌ها ایجاد می‌شود. این تغییر الگوی جریان سبب می‌گردد به‌طور موضعی تنش‌های وارد بر بستر افزایش‌یافته و ذرات بستر شروع به حرکت کنند (آشتیانی و همکاران ۱۳۸۸). امروزه یکی از رایج‌ترین روش‌های مقابله با آبشستگی اطراف پایه‌های پل استفاده از سنگچین است (پارکر و همکاران ۱۹۹۸، لاگاس و همکاران ۲۰۰۷ و فروهلیچ ۲۰۱۳). دلیل

¹ Riprap shear failure

² Wining failure

³ Edge failure

معادلات خطی است، جهت تخمین عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل استفاده کردند. آداموسکی و همکاران (۲۰۱۲) از مدل MARS جهت پیش‌بینی سیلاب در زیر حوضه‌های هیمالیا که اطلاعات محدودی از آن‌ها در دسترس بود، استفاده کردند. این محققین جهت مقایسه کارایی مدل MARS از شبکه عصبی نیز استفاده کردند که در نهایت دقت مدل تطبیقی جهت تخمین سیلاب در حوضه‌های مذکور در مقایسه با شبکه عصبی بیشتر بود. در این تحقیق سعی گردید با استفاده از روش‌های نوین داده‌کاوی از قبیل CART و MARS معادلاتی جهت برآورد اندازه ابعاد سنگچین اطراف پایه‌های پل ارائه گردد.

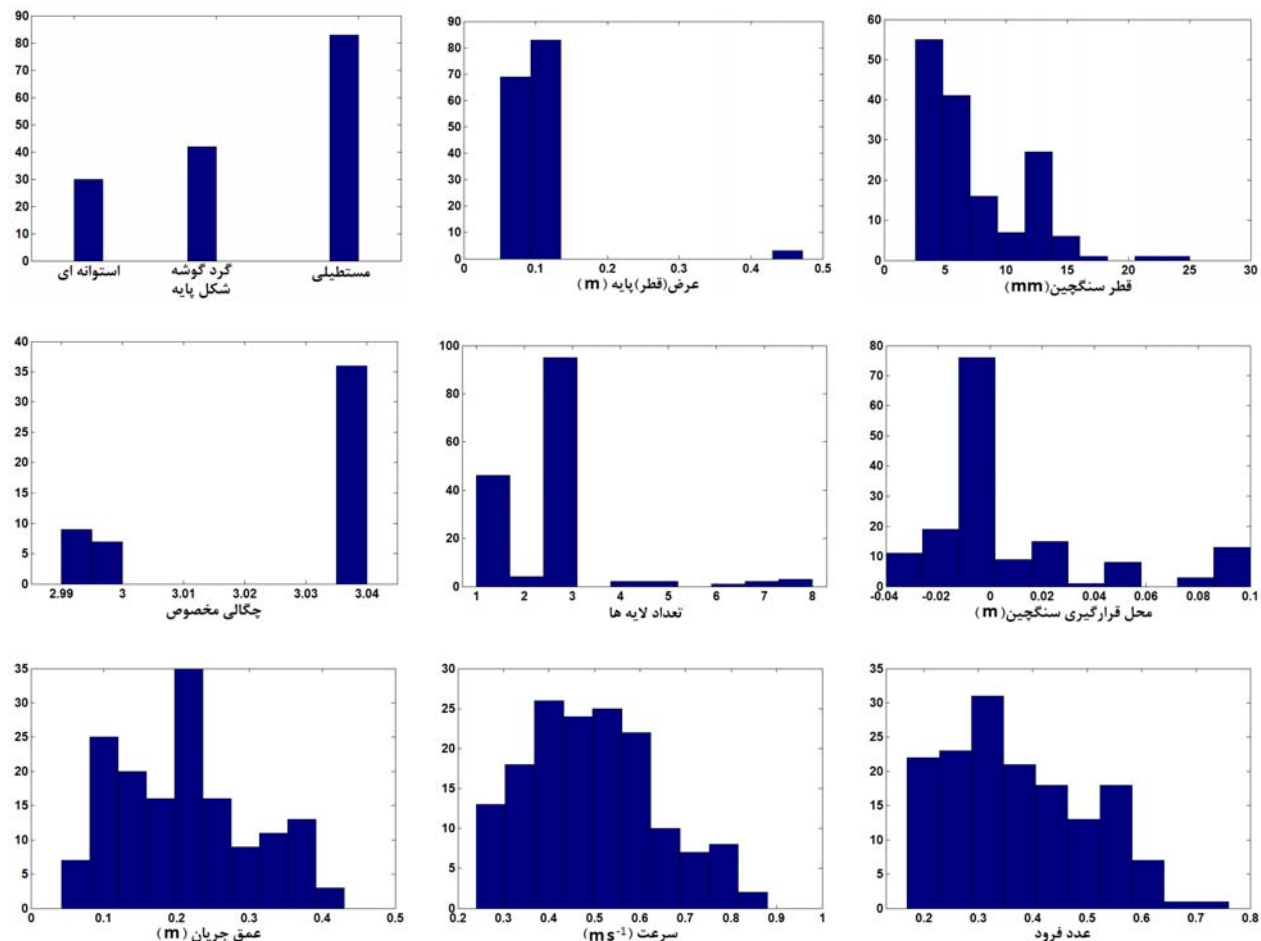
مواد و روش‌ها

اطلاعات مورد استفاده جهت ساخت و صحت-سنجی مدل‌های ناپارامتریک مشتمل بر ۱۵۵ داده مربوط به آزمایش‌ها پایداری سنگچین بوده که از تحقیقات کوازی و پترسون (۱۹۷۳)، راسول و بوهان (۱۹۷۴)، پارولا (۱۹۹۳) و چیو (۱۹۹۵) استخراج گردید. اکثر روابط موجود در زمینه پایداری سنگچین با استفاده از این اطلاعات به دست آمده است (فروهلچ ۲۰۱۳). اطلاعات مورد استفاده شامل شکل و عرض پایه، عمق و سرعت جریان و اندازه المان‌های سنگچین، چگالی نسبی، تعداد لایه‌ها و محل قرارگیری پوشش سنگچین نسبت به کف بستر هست. مشخصات اطلاعات آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شد. در این شکل هیستوگرام‌های مربوط به توزیع فراوانی هر کدام از متغیرها ارائه گردید که با استفاده از آن می‌توان به توزیع متغیرها و نیز نقص موجود در داده‌ها پی برد. در کلیه شکل‌ها محور عمودی نشان‌گر فراوانی داده‌های مورد استفاده هست.

می‌شوند، اما در تخریب زیرسطحی، رسوبات بستر از فضای خالی میان المان‌های سنگچین خارج شده و پوشش سنگچین نشست پیدا می‌کند. در تخریب لبه‌ای نیز المان‌های سنگچین قرار گرفته در کناره‌های پوشش جدا شده و به‌درون چاله آبشستگی ایجاد شده توسط جریان سقوط می‌کنند. لوچلان و ملویل (۲۰۰۱) مکانیزم چهارمی را با عنوان شکست ناشی از فرم بستر معرفی کردند که تنها در شرایط بستر متحرک اتفاق می‌افتد. در اکثر مطالعات، شکست به حالتی اطلاق می‌شود که المان‌های سنگچین اطراف پایه تحت تأثیر مکانیزم‌های فوق دچار حرکت و یا لغزش گردد (پارولا ۱۹۹۳، هگر و اولیوتو ۲۰۰۲، جیسونی و هگر ۲۰۰۸). کلیه معادلات ارائه شده در این زمینه بر اساس نتایج آزمایشگاهی بوده و بر همین اساس در این تحقیق سعی شده است با استفاده از اطلاعات منابع معتبر و به‌کارگیری تکنیک-های نوین داده‌کاوی، روشی جهت تعیین ابعاد المان‌های پایدار اطراف پایه‌های پل ارائه شود. جهت بررسی کارایی مدل‌های ناپارامتریک در این تحقیق از معادلات کوازی و پترسون (۱۹۷۳)، پارولا و همکاران (۱۹۸۹)، بروزرس و رادکیوی (۱۹۹۱)، ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵) [که به معادله Hec-18 نیز معروف است]، لوچلان (۱۹۹۹) و لاگاس و همکاران (۲۰۰۹) استفاده گردید. مدل‌های ناپارامتریک مورد استفاده شامل مدل درختی CART^۴ و مدل رگرسیون MARS^۵ می‌باشند که امروزه جزء قوی‌ترین الگوریتم‌های داده‌کاوی به حساب می‌آیند. مدل‌های معرفی شده، مدل‌های نوینی بوده که به‌تازگی در زمینه مهندسی رودخانه نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته توسط مدل‌های مذکور می‌توان به گیترز و همکاران (۲۰۰۹) اشاره کرد که با استفاده از مدل‌های CART و MARS اقدام به شبیه‌سازی فرسایش آبگزرها نمودند. محجوبی و همکاران (۲۰۱۰) نیز از مدل‌های درختی CART و M5 که ساختاری شبیه CART داشته با این تفاوت که خروجی آن به صورت

^۴ Classification and regression tree model

^۵ Multivariate adaptive regression splines



شکل ۱- هیستوگرام مربوط به توزیع فراوانی متغیرهای اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق.

همکاران ۲۰۱۲). این روش شاخه‌های خود را به صورت دوتایی و تنها بر اساس یک فیلد (متغیر مستقل) ایجاد می‌کند، بدین گونه که بر اساس شرطی که در هر گره تعریف می‌شود، اطلاعات در آن گره به دو قسمت تقسیم می‌شوند. در این الگوریتم جهت انتخاب متغیر مورد آزمون از معیار انحراف حداقل مربعات^۶ با توجه به رابطه زیر استفاده می‌گردد:

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

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 هست.

از مجموع اطلاعات مورد استفاده ۸۰ درصد جهت توسعه مدل‌های ناپارامتریک و ۲۰ درصد باقی‌مانده جهت صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات داده‌های مورد استفاده در آموزش و صحت‌سنجی مدل‌های ناپارامتریک در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول عمق کارگذاری (d) بر اساس قرارگیری پوشش سنگچین نسبت به کف بستر بوده و علامت منفی نشان‌دهنده بالاتر بودن این پوشش نسبت به کف بستر هست.

مدل‌های ناپارامتریک CART و MARS

الگوریتم طبقه‌بندی و رگرسیونی (CART) که اولین بار توسط بریمن و همکاران (۱۹۸۴) معرفی شد به صورت یک درخت مرتبه‌ای دودویی هست که فضای مسئله را به قسمت‌های جزء تقسیم می‌کند (فورنکرانز و

⁶ Least squared deviation

جدول ۱- مشخصات اطلاعات مورد استفاده جهت آموزش و صحت سنجی مدل‌های ناپارامتریک.

متغیر آماری	عرض پایه (m)	سرعت جریان ($m s^{-1}$)	عمق جریان (m)	عدد فرود جریان	قطر سنگچین (mm)	چگالی مخصوص	تعداد لایه سنگچین	عمق کارگذاری (m)
بیشینه	۰/۴۷	۰/۸۸	۰/۴۳	۰/۷۶	۲۵/۰۰	۲/۹۲	۸	۰/۱۰
کمینه	۰/۰۵	۰/۲۴	۰/۰۴	۰/۱۷	۲/۵۸	۲/۶۴	۱	-۰/۰۴
میانگین	۰/۱۰	۰/۵۰	۰/۲۱	۰/۳۷	۷/۳۶	۲/۸۱	۳	۰/۰۱
انحراف معیار	۰/۰۶	۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۱۳	۴/۱۲	۰/۱۴	-	۰/۰۳

یک متغیر ورودی زمانی به عنوان بهترین صفت برای ایجاد شاخه در گره t مورد استفاده قرار می‌گیرد که تابع زیر بیشینه شود:

$$Q(X,t) = SS(t) - [SS(t_R) + SS(t_L)] \quad [2]$$

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 (جباری و صمدی ۱۳۹۲).

$$Y = f(x) = \beta_0 + \sum_{m=1}^M \beta_m h_m(x) \quad [3]$$

مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین (MARS) شکلی از الگوریتم‌های رگرسیونی بوده که توسط فردمن در سال ۱۹۹۱ جهت پیش‌بینی خروجی‌های عددی پیوسته معرفی گردید (آداموسکی و همکاران ۲۰۱۲). این تکنیک به وسیله تقسیم فضای مسئله به بازه‌هایی از متغیرهای ورودی و برآزش یک تابع پایه^۷ در هر بازه، مدل‌های رگرسیونی انعطاف‌پذیری را برای پیش‌بینی متغیر هدف ایجاد می‌نماید. تابع پایه نشان‌دهنده اطلاعاتی در بردارنده یک یا چند متغیر مستقل است. یک تابع پایه در یک بازه معین تعریف شده و نقاط ابتدایی و انتهایی آن گره^۸ نامیده می‌شود. گره مفهوم کلیدی در این روش است و بیانگر نقطه‌ای است که رفتار تابع در آن نقطه تغییر می‌کند. توابع پایه ارتباط بین متغیرهای ورودی و متغیر هدف را بیان می‌کنند و به صورت $\max(0, X-c)$ و یا

⁹ Threshold

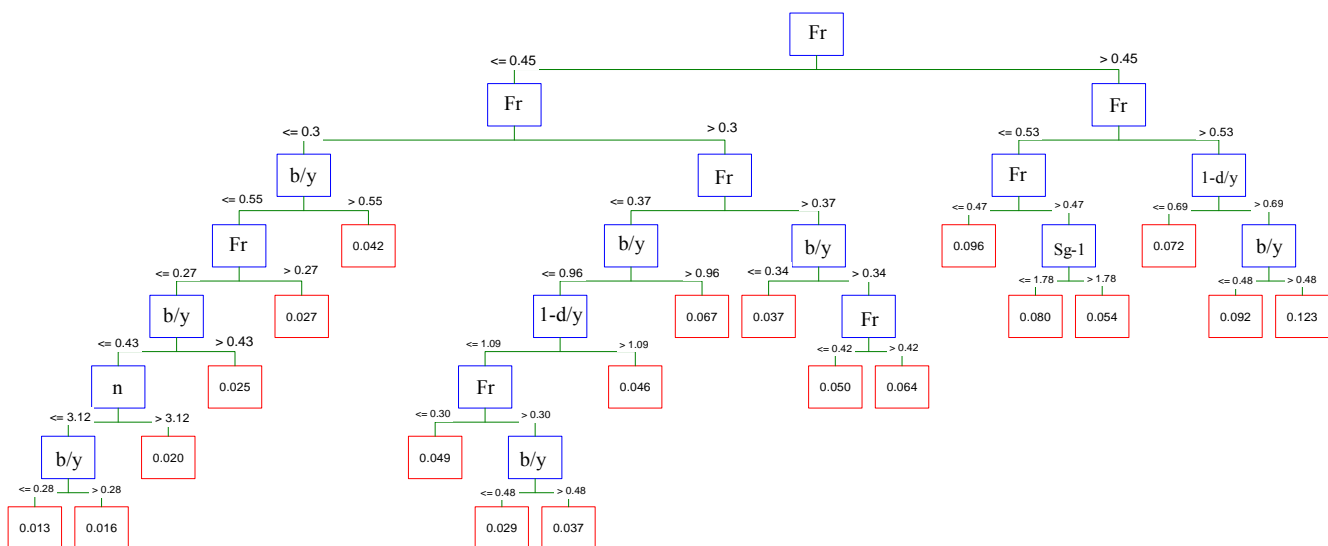
¹⁰ Pruning

⁷ Basis function

⁸ Node

معرفی اطلاعات مجموعه آموزش به مدل CART، این مدل ۳۹ گره را تشکیل داده که ۲۰ گره آن برگ‌های ساختار درختی را تشکیل داده و حاوی مقادیر خروجی (D_R/y) می‌باشند. فرم کلی مدل CART جهت تعیین ابعاد المان‌های سنگچین در شکل ۲ ارائه شد. همچنین با توجه به متغیرهای معرفی شده و مجموعه آموزش تعریف شده جهت الگوریتم MARS در نهایت این مدل هفت تابع شعاعی را ایجاد کرد که این توابع در معادله ۴ ارائه گردید.

اساس تحقیقات قبلی در این زمینه در نهایت شش متغیر ضریب شکل پایه (K_s) ، عدد فرود جریان (Fr) ، نسبت عرض پایه به عمق جریان (b/y) ، چگالی ویژه (S_g) ، تعداد لایه‌ها (n) و محل قرارگیری المان‌های سنگچین نسبت به کف بستر $(1-d/y)$ جهت ساخت مدل‌های ناپارامتریک مورد استفاده قرار گرفتند. ضریب شکل پایه با توجه به تحقیقات ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵) جهت پایه‌های مستطیلی برابر $1/7$ و جهت پایه‌های استوانه‌ای و گرد گوشه $1/5$ در نظر گرفته شد. پس از



شکل ۲- مدل نهایی CART جهت برآورد D_R/y المان‌های سنگچین اطراف پایه‌های پل.

$$\frac{D_R}{y} = 0.045 + \tag{۴}$$

$$0.36\{\max(0, Fr-0.40)\} - 0.15\{\max(0, 0.40-Fr)\} - 0.18\{\max(0, 0.35-b/y)\} - 0.07\{\max(0, 0.94-[1-d/y])\} + 0.07\{\max(0, K_s-1.5)\} + 0.03\{\max(0, b/y-0.46)\} - 0.13\{\max(0, [1-d/y]-1.02)\}$$

نتایج و بحث

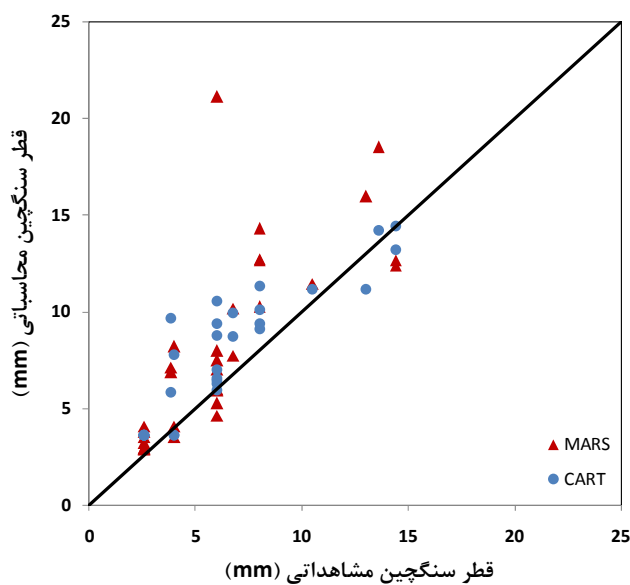
با روابط متداول در زمینه پایداری سنگچین همخوانی دارد. در روابط ارائه شده توسط سایر محققین توان عدد فرود بین $1/2$ تا ۳ متغیر است که بیشترین توان را در میان سایر متغیرها داراست. پس از عدد فرود جریان، نسبت عرض پایه به عمق جریان مؤثرترین پارامتر در پایداری سنگچین بود. این نسبت ۷ بار در الگوریتم CART مورد استفاده قرار گرفته که تنها نسبت به عدد

همان‌گونه که در مدل‌های ساخته شده توسط دو الگوریتم CART و MARS مشاهده می‌شود، عدد فرود جریان بیشترین تأثیر را بر روی پایداری سنگچین دارد، به‌گونه‌ای که در الگوریتم CART عدد فرود جریان بیش از سایر متغیرها جهت ایجاد ساقه و برگ در الگوریتم درختی مورد استفاده قرار گرفت. در مدل MARS نیز ضرایب بزرگ‌تر متعلق به توابع پایه عدد فرود هست که

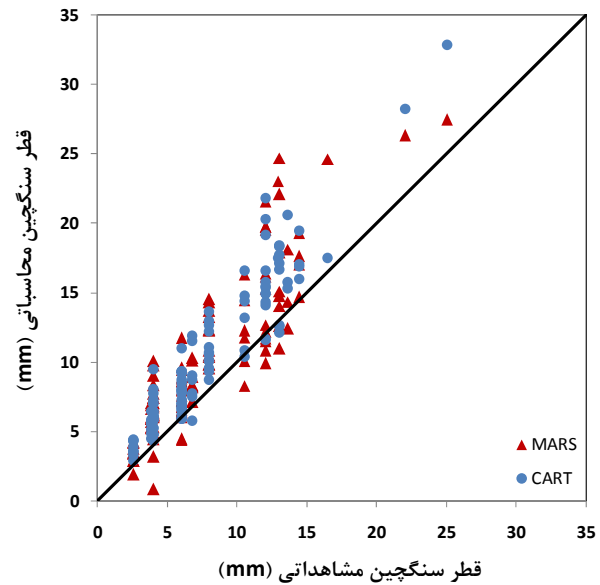
برآورد کرده‌اند. یکی از نقاط ضعف معادلات مربوط به پایداری سنگچین، برآورد المان‌های پایدار کمتر از اندازه واقعی است که مقایسه دو مدل نشان می‌دهد که در این زمینه مدل CART کارآیی نسبتاً بهتری داشته است. در شکل ۳-ب که نتایج مربوط به مرحله صحت‌سنجی است، با توجه به تراکم نقاط و قرارگیری آن‌ها نسبت به خط ۴۵ درجه، کارآیی مدل CART به مراتب بهتر از مدل MARS هست. جهت بررسی بهتر کارآیی مدل CART و مقایسه آن با روش‌های متداول از معادلات کوازی و پترسون (۱۹۷۳)، پارولا و همکاران (۱۹۸۹)، بروزرس و رادکیوی (۱۹۹۱)، ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵) - که به معادله Hec-18 نیز معروف است - لوچلان (۱۹۹۹) و لاگاس و همکاران (۲۰۰۹) استفاده گردید. نتایج این مقایسه در شکل ۴ ارائه شده است.

فرود کمتر بوده و در مدل MARS نیز بیشترین ضریب را بعد از عدد فرود از آن خود کرده است. این نسبت در اغلب روابط پایداری نقشی نداشته ولی از آنجاکه نقش مهمی در فرآیند آبشستگی پایه پل دارد و در اغلب روابط مربوط به آبشستگی پایه پل به‌کار رفته است، می‌تواند بر روی پایداری سنگچین نیز مؤثر باشد. پس از ساخت مدل‌های ناپارامتریک، این دو مدل جهت برآورد المان‌های سنگچین با استفاده از داده‌های آموزشی و صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت که نتایج در شکل ۳ ارائه گردید.

همان‌گونه که در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست‌آمده از دو مدل ناپارامتریک تطابق خوبی با مقادیر مشاهداتی داشته و تفاوت ناچیزی میان دو مدل مشاهده می‌شود. در این شکل نقاط قرار گرفته در زیر خط ۴۵ درجه معرف مقادیری است که دو مدل اندازه المان‌های سنگچین را کمتر از مقدار واقعی

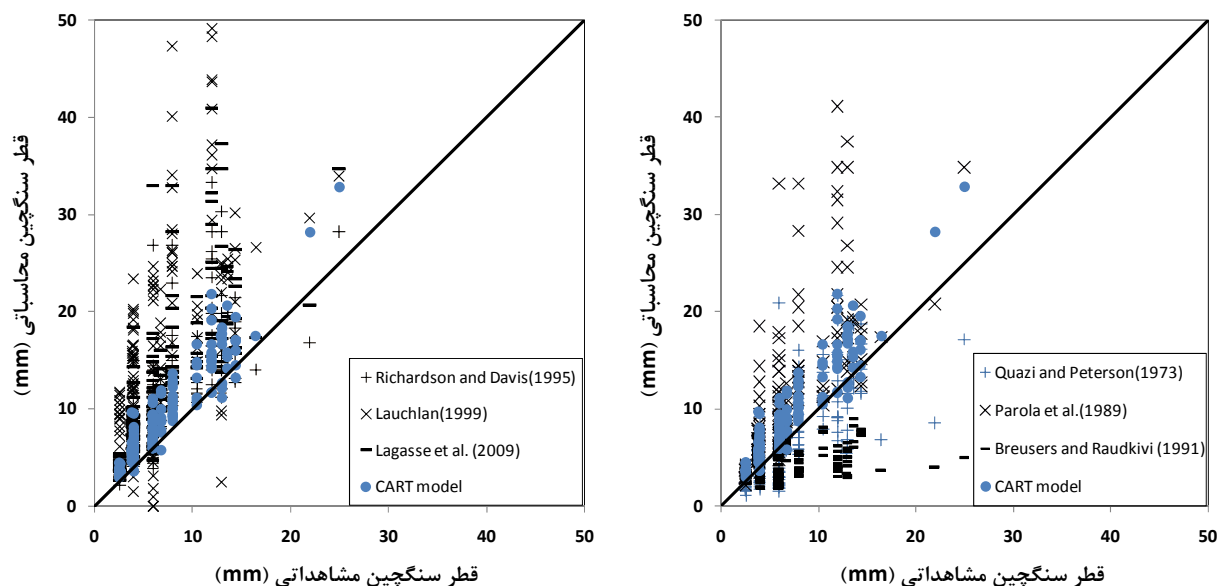


ب) مرحله صحت‌سنجی



الف) مرحله آموزش

شکل ۳- همبستگی نتایج مدل‌های ناپارامتریک با مقادیر مشاهداتی در مرحله آموزش و صحت‌سنجی.



شکل ۴- همبستگی نتایج معادلات سایر محققین با مقادیر مشاهداتی.

مربعات خطا (RMSE)^{۱۳} و ضریب تعیین (R²)^{۱۴} استفاده گردید. در میان معیارهای فوق SSE و R² بدون بعد بوده درحالی که MAE و RMSE برحسب متر می باشند. علاوه بر معیارهای ذکر شده در این تحقیق از نسبت اختلاف (DR)^{۱۵} استفاده گردید (اعتماد شهیدی و تقی پور ۲۰۱۲).

$$SSE = \frac{\sum (d_s^{\text{measured}} - d_s^{\text{computed}})^2}{\sum (d_s^{\text{measured}})^2} \times 100 \quad [5]$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |d_s^{\text{measured}} - d_s^{\text{computed}}| \quad [6]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (d_s^{\text{measured}} - d_s^{\text{computed}})^2} \quad [7]$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (d_s^{\text{measured}} - d_s^{\text{computed}})^2}{\sum (d_s^{\text{measured}} - \bar{d}_s^{\text{measured}})^2} \quad [8]$$

با توجه به شکل ۴ و تراکم نتایج مربوط به روش های مختلف اطراف خط ۴۵ درجه می توان به میزان کارایی روش های متداول در محاسبه ابعاد المان های ریپ و مقایسه آن ها با مدل CART پرداخت. بر اساس این شکل روش های پارولا و همکاران (۱۹۸۹)، لوچلان (۱۹۹۹) و لاگاس و همکاران (۲۰۰۹) اندازه المان های سنگچین را بسیار بزرگتر از مقادیر واقعی برآورد نموده اند، این در حالی است که روش های کوازی و پترسون (۱۹۷۳) و بروزرس و رادکیوی (۱۹۹۱) اندازه سنگچین را در اکثر حالات کمتر از مقادیر واقعی پیش بینی کرده اند. در میان روش های مورداستفاده تنها در مورد روش ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵) تطابق مناسبی میان مقادیر شبیه سازی شده و واقعی مشاهده می شود. هر چند این روش نیز در بعضی حالت ها اندازه سنگچین را بسیار بزرگتر از مقدار واقعی محاسبه کرده است. جهت مقایسه بهتر کارایی مدل های ارائه شده از تحلیل های آماری مجموع مربعات خطا (SSE)^{۱۱}، خطای متوسط مطلق (MAE)^{۱۲}، جذر میانگین

¹³ Root mean square error

¹⁴ Determination coefficient

¹⁵ Discrepancy ratio

¹¹ Sum of squares error

¹² Mean-absolute error

دقت را در میان روش‌های متداول داشته ولی دقت آن در مقایسه با مدل‌های CART و MARS که دقت آن‌ها به ترتیب ۸۸٪ و ۸۳٪ است، کمتر است. در شکل ۵ نیز که هیستوگرام فراوانی نسبت اختلاف که شامل نسبت مقادیر محاسبه شده به مشاهداتی هست، نشان می‌دهد که مدل‌های ناپارامتریک مورد استفاده بیشترین مقادیر را در بازه بین یک تا دو که بهترین بازه جهت برآورد سنگچین هست دارا هستند. در این شکل مقادیر $DR < 0.5$ نیز در مورد روش CART کمتر از MARS و معادله ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵) بوده که نشان‌دهنده کارایی مدل درختی CART هست. همین امر در مورد $DR > 2$ نیز صادق است. جهت بررسی دقیق‌تر کارایی روش‌های مختلف تخمین عمق آبشستگی از نمودار مستطیلی 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 هست. این نمودار ابزاری مناسب جهت شرح مکان و پراکندگی داده‌های مربوط به چند گروه مختلف است.

در این تحقیق نسبت اندازه سنگچین محاسبه شده به مشاهداتی به عنوان متغیر در نمودار مستطیلی در نظر گرفته شده است. بر همین اساس هرچه مقادیر محاسباتی بیشتر از یک و نزدیک آن باشند، نشان‌دهنده دقت بیشتر روش مورد نظر خواهد بود. با توجه به شکل ۶ قسمت اعظم نمودار مستطیلی روش‌های کوازی و پترسون (۱۹۷۳) و بروزرس و رادکیوی (۱۹۹۱) کمتر از مقدار یک بوده که نشان‌دهنده ضعف این روش‌هاست. در بین تمامی روش‌ها، روش لوچلان (۱۹۹۹) بیشترین تغییرات را داشته به گونه‌ای که مقادیر به دست آمده توسط این روش بین صفر تا شش برابر مقادیر مشاهداتی است. نمودار مستطیلی مربوط به مدل درختی CART کوچک‌تر از بقیه و در اطراف یک و بالاتر از آن تمرکز پیدا کرده که نشان‌دهنده دقت این الگوریتم در برآورد اندازه المان‌های سنگچین هست. ۱۱٪ از مقادیر محاسباتی توسط روش ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵) که با توجه به تحلیل‌های آماری دقت بهتری نسبت به روش‌های متداول دیگر داشته، کمتر از

$$DR = \frac{d_s^{\text{computed}}}{d_s^{\text{measured}}} \quad [9]$$

چنانچه DR برابر یک باشد نشان‌دهنده تطابق کامل نتایج مدل و مقادیر واقعی است، و چنانچه $DR > 1$ باشد مدل اندازه المان‌های سنگچین را بیشتر از مقدار واقعی^{۱۶} برآورد کرده است، در غیر این صورت ($DR < 1$)، اندازه سنگچین کمتر از مقدار واقعی^{۱۷} محاسبه شده است. سئو و چونگ (۱۹۹۸) درصد مقادیر با $0.5 < DR < 2$ را به عنوان دقت مدل انتخاب کردند که با توجه به موضوع تحقیق حاضر تنها $1 < DR < 2$ به عنوان دقت^{۱۸} در نظر گرفته شد. نتایج مربوط به تحلیل آماری روش‌های مختلف تخمین اندازه سنگچین در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین هیستوگرام فراوانی نسبت اختلاف (DR) برای تمامی روش‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته روش‌های کوازی و پترسون (۱۹۷۳) و بروزرس و رادکیوی (۱۹۹۱) در معیارهایی از قبیل RMSE و MAE بهتر از روش‌های متداول بوده ولی از نظر معیار دقت از کارایی کمتری برخوردار هستند که این امر به دلیل برآورد اندازه المان‌های سنگچین کمتر از مقدار واقعی بوده و استفاده از آن‌ها با ریسک زیادی همراه خواهد بود. در میان روش‌های باقیمانده، ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵) از دقت بهتری برخوردار است ولی در مقایسه با روش‌های ناپارامتریک دارای خطای بیشتری است. مجموع مربعات خطا در این روش در مقایسه با روش CART بیش از سه برابر و در مقایسه با روش MARS بیش از دو برابر هست. همچنین جذر میانگین مربعات خطا در این روش بیش از ۱/۵ برابر مدل‌های ناپارامتریک هست. معیار دقت تعریف شده نیز می‌تواند نشان‌دهنده کارایی روش‌های مختلف باشد. این معیار برابر درصد داده‌هایی است که مقدار شبیه‌سازی آن‌ها یک تا دو برابر مقدار مشاهداتی باشد. با توجه به معیار دقت، ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵) با ۷۳٪ بهترین

¹⁶ Overestimation

¹⁷ Underestimation

¹⁸ Accuracy

دو برابر مقدار واقعی قرار داشته درحالی‌که در مدل CART این مقدار برابر ۸۸٪ است که نشان‌دهنده میزان کارایی دو روش در محاسبه اندازه المان‌های سنگچین اطراف پایه‌های پل هست.

مقادیر مشاهداتی و ۱۶٪ مقادیر نیز از دو برابر مقادیر مشاهداتی بیشتر بوده است که این ارقام در مورد مدل CART به‌ترتیب ۱۰٪ و ۲٪ هست. بر این اساس در روش ریچاردسون و دیویس ۷۳٪ از مقادیر بین یک تا

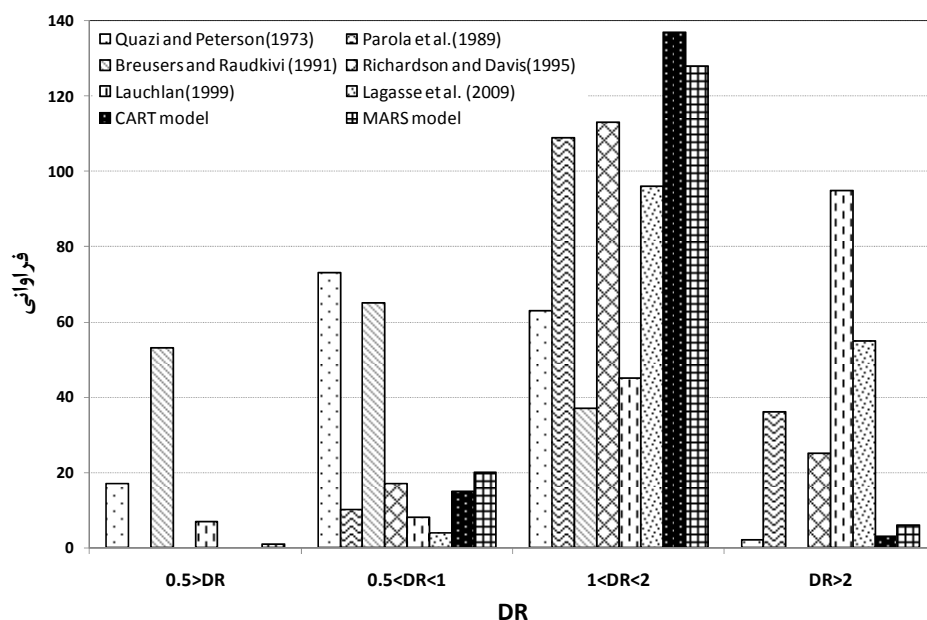
جدول ۲- مقایسه کارایی مدل‌های تخمین عمق آبشستگی اطراف تکیه‌گاه.

مدل	SSE	1<DR<2	MAE (m)	RMSE (m)	R ²
کوازی و پترسون (۱۹۷۳)	۱۶/۰۲	٪۴۱	۲/۳۶	۳/۳۷	۰/۵۳
پارولا و همکاران (۱۹۸۹)	۸۳/۰۹	٪۷۰	۵/۱۵	۷/۶۸	۰/۵۱
بروزرس و رادکیوی (۱۹۹۱)	۳۱/۶۳	٪۲۴	۳/۳۸	۴/۷۴	۰/۱۸
ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵)	۴۴/۱۶	٪۷۳	۳/۸۹	۵/۶۰	۰/۵۷
لوچلان (۱۹۹۹)	۸۵/۲۲	٪۲۹	۱۱/۲۶	۱۴/۲۳	۰/۳۲
لاگاس و همکاران (۲۰۰۹)	۹۶/۱۴	٪۶۲	۶/۱۸	۸/۲۶	۰/۵۷
مدل CART آموزش	۱۲/۱۵	٪۹۰	۲/۳۱	۲/۹۳	۰/۸۹
صحت سنجی	۱۱/۸۲	٪۸۱	۲/۴۲	۳/۱۱	۰/۷۹
کلیه داده‌ها	۱۲/۱۱	٪۸۸	۲/۳۲	۲/۹۵	۰/۸۷
مدل MARS آموزش	۱۶/۶۳	٪۸۵	۲/۷۴	۳/۵۴	۰/۷۹
صحت سنجی	۲۵/۸۰	٪۷۱	۲/۳۵	۳/۶۹	۰/۵۷
کلیه داده‌ها	۱۸/۰۰	٪۸۳	۲/۶۶	۳/۵۷	۰/۷۶

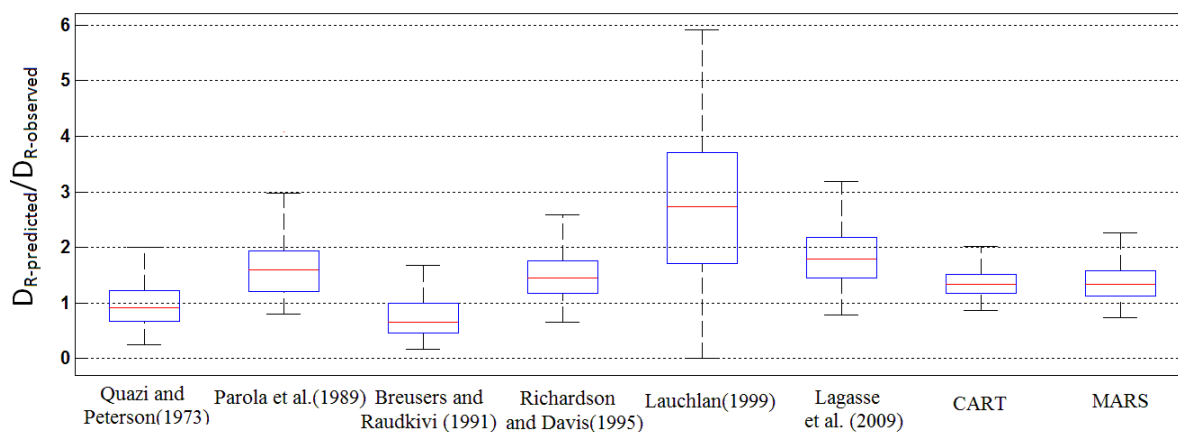
تحلیل حساسیت

جهت بررسی تأثیر هر کدام از پارامترهای ورودی بر روی اندازه سنگچین در مدل CART، پارامتر موردنظر حذف‌شده و ساختار درختی بدون آن پارامتر تشکیل شد. بر اساس تحلیل حساسیت صورت گرفته عدد فرود همان‌گونه که در کلیه معادلات پایداری سنگچین توان بالایی دارد، بیشترین تأثیر را بر روی اندازه المان‌های سنگچین داراست. حذف این پارامتر باعث افزایش نزدیک به دو برابری مجموع مربعات خطا و کاهش ۲۰٪ دقت مدل گردیده است. جذر میانگین مربعات خطا نیز با حذف عدد فرود جریان بیشترین

افزایش را داشته و از ۲/۹۳ به ۴/۱۴ تغییر یافته است. پس از عدد فرود جریان نسبت عرض پایه به عمق جریان بیشترین تأثیر را بر روی کارایی مدل CART داشته است. حذف این پارامتر ۵٪ از دقت مدل کاسته و باعث افزایش مجموع مربعات خطا به ۱۷/۲۴ گشته است. پس از عدد فرود و نسبت b/y پارامترهای چگالی نسبی المان‌های سنگچین، تعداد لایه‌های پوشش سنگچین و محل قرارگیری آن بیشترین تأثیر را بر روی کارایی مدل داشته و در نهایت نیز شکل پایه کمترین تأثیر را داشته است.



شکل ۵- مقایسه نسبت اختلاف (DR) مدل‌های مختلف.



شکل ۶- نمودار مستطیلی روش‌های مختلف تخمین عمق آبشستگی اطراف تکیه‌گاه پل.

عمق جریان (b/y)، چگالی ویژه ($S_g - 1$)، تعداد لایه‌ها (n) و محل قرارگیری المان‌های سنگچین نسبت به کف بستر ($1-d/y$) بوده است. پس از ساخت مدل‌های ناپارامتریک مشخص شد که عدد فرود جریان و نسبت عرض پایه به عمق جریان بیشترین نقش را در ساخت مدل‌ها داشته که نشان‌دهنده اهمیت این دو پارامتر بر روی پایداری سنگچین هست. نتایج مراحل آموزش و صحت‌سنجی مربوط به مدل‌های مورداستفاده نشان

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق جهت شبیه‌سازی ابعاد المان‌های سنگچین در اطراف پایه‌های پل از دو مدل ناپارامتریک CART و MARS استفاده گردید. جهت ساخت و صحت‌سنجی مدل‌ها از اطلاعات تعدادی از منابع معتبر استفاده گردید. پارامترهای مورداستفاده جهت ساخت مدل‌های ناپارامتریک شامل شش متغیر ضریب شکل پایه (K_s)، عدد فرود جریان (Fr)، نسبت عرض پایه به

و مجموع مربعات خطا $2/95$ هست، دارای خطای بیشتری است. تحلیل حساسیت صورت گرفته بر روی الگوریتم CART نشان‌دهنده تأثیر عدد فرود جریان بر روی پایداری سنگچین بوده که با مطالعات قبلی هم‌خوانی دارد. پس از عدد فرود نسبت عرض پایه به عمق جریان بیشترین تأثیر را داشته که این امر با تأثیر ابعاد پایه پل بر روی فرآیند آبخستگی مطابقت دارد. شکل پایه نیز نسبت به سایر پارامترها تأثیر کمتری بر روی پایداری سنگچین داشته است.

می‌دهد مدل MARS در مواردی بیشتر از مدل CART اندازه المان‌های سنگچین را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است که از نقاط ضعف مدل ساخته شده به حساب می‌آید. جهت بررسی کارایی مدل‌های مورد استفاده از تعدادی روابط متداول پایداری سنگچین استفاده گردید. از میان روابط مورد استفاده معادله Hec-18 با توجه به دقت ۷۳ درصد و مجموع مربعات خطا $5/6$ در مقایسه با دیگر معادلات دقت بهتری داشته ولی در مقایسه با مدل CART که دارای دقت ۸۸ درصد

منابع مورد استفاده

- آشتیانی م، زراتی ا، حیدری ح و مشاهیر م، ۱۳۸۸. کاربرد آستانه برای جلوگیری از آبخستگی اطراف کوله‌های پل، مجموعه مقالات هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز.
- جباری ا و صمدی م، ۱۳۹۲. کاربرد الگوریتم M5 در پیش‌بینی عمق آبخستگی در پایین دست سرریزها. طرح تحقیقات کاربردی، شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران، تهران.
- Adamowski J, Chan HF, Prasher SO and Sharda VN, 2012. Comparison of multivariate adaptive regression splines with coupled wavelet transform artificial neural networks for runoff forecasting in Himalayan micro-watersheds with limited data. *Journal of Hydroinformatics* 14(3): 731-744.
- Breiman L, Friedman JH, Olshen R and Stone C, 1984. *Classification and regression trees*. Pacific Grove, CA: Wadsworth & Brooks.
- Breusers HNC and Raudkivi AJ, 1991. *Scouring: Hydraulic Structures Design Manual*, Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Chiew YM, 1995. Mechanics of riprap failure at bridge piers. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 121(9): 635-643.
- Etemad-Shahidi A and Taghipour M, 2012. Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams using M5' tree model tree. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 138(6): 542-554.
- Froehlich DC, 2013. Protecting bridge piers with loose rock riprap. *Journal of Applied Water Engineering and Research* 1(1): 39-57.
- Fürnkranz J, Gamberger D and Lavrac N, 2012. *Foundations of Rule Learning*. Springer, New York.
- Gisonni C and Hager WH, 2008. Spur failure in river engineering. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 134(2): 135-145.
- 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 WH and Oliveto G, 2002. Shields' entrainment criterion in bridge hydraulics. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 128(5): 538-542.
- Lagasse PF, Clopper PE, Zevenbergen LW and Girard LG, 2007. Countermeasures to protect bridge piers from scour. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies (NCHRP Report 593).
- Lagasse PF, Clopper PE, Pagan-Ortiz JE, Zevenbergen LW, Arneson LA, Schall JD and Girard LG, 2009. Bridge scour and stream instability countermeasures. *Hydraulic Engineering Circular No. 23*. (NHI-00-112, Third Edition). Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Lauchlan CS, 1999. Pier scour countermeasures. Ph.D. Thesis, University of Auckland, Auckland, NZ.
- Lauchlan CS and Melville BW, 2001. Riprap protection at bridge piers. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 127(5): 412-418.
- 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. August 3-8, Liege, Belgium.
- Melville BW and Coleman SE, 2000. *Bridge Scour*. Water Resources Publication, New Zealand.
- Parker G, Toro-Escobar C and Voigt RL, 1998. Countermeasures to protect bridge piers from scour. Washington, DC: Transportation Research Board, National Academy of Sciences (NCHRP Report 24-7).
- Parola AC, Jones JS and Miller AC, 1989. Model study on the stability of riprap placed in local scour holes at bridge piers. Pp.272-322, Proceedings of the Bridge Scour Symposium. October 17-19, Virginia, USA.

- Parola AC, 1993. Stability of riprap at bridge piers. ASCE Journal of Hydraulic Engineering 119(10): 1080-1093.
- Quazi ME and Peterson AW, 1973. A method for bridge pier riprap design. Pp. 96-106, Proceedings, First Canadian Hydraulics Conference, Edmonton, Canada.
- Richardson EV and Davis SR, 1995. Evaluating scour at bridges. Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18, Third Edition), FHWA HI 96-031, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Rothwell ED and Bohan JP, 1974. Investigation of scour and protection around bridge piers. Report Prepared for the Louisiana Department of Highways. Vicksburg.
- Seo IW and Cheong TS, 1998. Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams. ASCE Journal of Hydraulic Engineering 124(1): 25-32.