

اصلاح روابط عمق آبشستگی پایه پل با استفاده از الگوریتم ژنتیک

مهدی کرمی مقدم و تورج سبزواری

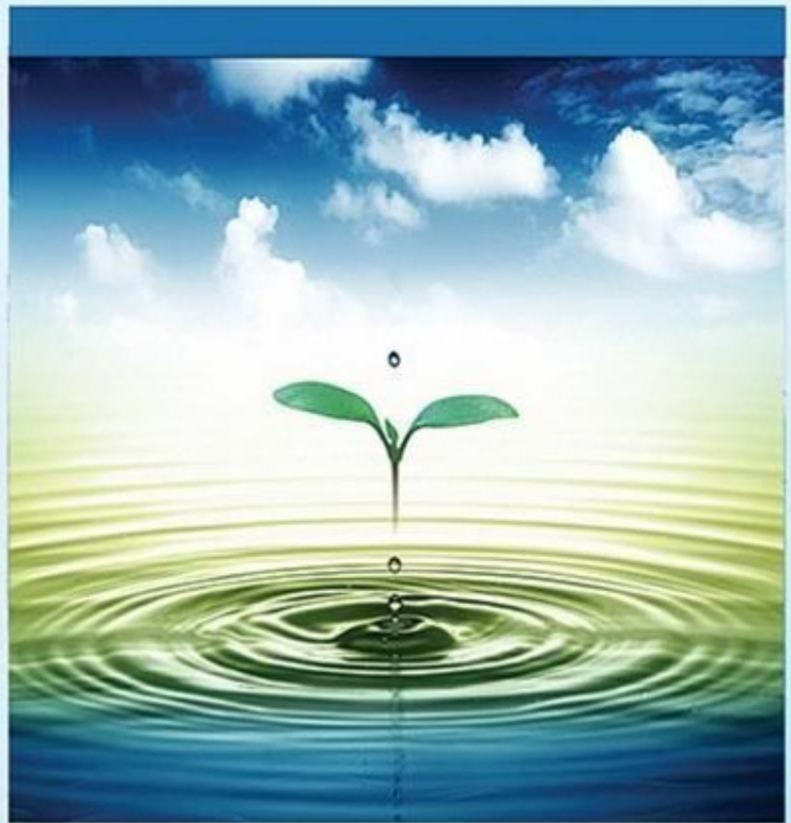
دوره ۴، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷، صفحات ۱۱۴-۱۰۱

Vol. 4(2), Summer 2018, 101 – 114

DOI: 10.22034/jewe.2018.112907.1223

**Bridge Piers Scour Depth Equations
Optimization using Genetic Algorithm**

Karami Moghadam M. and Sabzevari T.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله: کرمی مقدم م. و سبزواری ت. (۱۳۹۷). اصلاح روابط عمق آبشستگی پایه پل با استفاده از الگوریتم ژنتیک. محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۴، شماره ۲، صفحات: ۱۱۴-۱۰۱.

Citing this paper: Karami Moghadam M. and Sabzevari T. (2018). Bridge piers scour depth equations optimization using genetic algorithm. J. Environ. Water Eng., 4(2), 101 – 114. DOI: 10.22034/jewe.2018.112907.1223

اصلاح روابط عمق آبشستگی پایه پل با استفاده از الگوریتم ژنتیک

مهدی کریمی مقدم^{۱*} و تورج سبزواری^۲

^۱ استادیار، گروه آموزش مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
^۲ دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، استهبان، فارس، ایران

نویسنده مسئول*: m_karami_mo@yahoo.com

مقاله اصلی

تاریخ دریافت: [۱۳۹۶/۱۰/۱۲]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۷/۰۱/۲۷]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۷/۰۶/۱۳]

چکیده

یکی از مسائلی که باعث تخریب پل‌ها می‌شود، آبشستگی پایه‌های آنهاست. محاسبه دقیق‌تر عمق آبشستگی کمک زیادی به طراحی صحیح پایه‌های پل خواهد کرد. یکی از راه‌های محاسبه عمق آبشستگی استفاده از روابط تجربی است. در این تحقیق جهت بهینه کردن روابط با استفاده از الگوریتم ژنتیک و مقادیر میدانی عمق آبشستگی، ۱۷ رابطه تجربی اصلاح شدند. تعداد ۸۰ درصد داده‌های میدانی جهت بهینه کردن روابط و مابقی جهت صحت‌سنجی آنها استفاده شد. معیارهای آماری جهت مقایسه نتایج حاصل از روابط تجربی و روابط اصلاح شده با مقادیر اندازه‌گیری استفاده شد. نتایج نشان داد الگوریتم ژنتیک به خوبی توانست روابط تجربی را اصلاح کند. رابطه Froehlich (1988) دارای بیشترین دقت در بین روابط تجربی را داشت. بنابراین الگوریتم ژنتیک کمترین تأثیر را جهت اصلاح این رابطه داشت. بیشترین کاهش خطای RMSE روابط اصلاح شده نسبت به روابط تجربی مربوط به روابط Neill (1964)، Laursen and Melville (1975)، Blench II (1962)، Toch (1956) و Hancu (1971) به ترتیب برابر ۷۵، ۷۲، ۷۱، ۷۱ و ۷۱ درصد بود. رابطه اصلاح شده (Blench II 1962) با شاخص‌های MAE، RMSE، E و R^2 به ترتیب برابر ۰/۵۷ متر، ۰/۰۸۵ - متر، ۶۲ درصد و ۰/۶۵ یکی از روابط با کمترین میزان خطا و بیشترین ضریب همبستگی انتخاب شد. در انتها روابط دیگری جهت پیش‌بینی عمق آبشستگی پایه‌های پل پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی؛ بهینه کردن؛ پایه پل؛ الگوریتم ژنتیک.

۱- مقدمه

تعیین عمق آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل، نقش بسیار مهمی در طراحی پل‌ها در مقابل این پدیده مخرب ایفا می‌کند. این مهم با استفاده از معادلات تجربی انجام می‌شود. معادلات تجربی توسط محققان مختلف و با استفاده از آزمایش‌های گوناگون و عمدتاً با روش رگرسیون به دست آمده‌اند. برای تعیین میزان دقیق عمق آبشستگی، استفاده از معادلاتی که خطای کمتری دارند لازم و ضروری است. تحقیقات زیادی بر روی آبشستگی پایه‌های پل انجام شده است که می‌توان به تحقیقات Sheykhool Eslami, Zare, Aghli and Zomorodian (2012 et al. 2009) and Honar (2016) و Raeisi and Ghomeshi (2014) اشاره کرد. در این پژوهش‌ها اثر پارامترهای مختلف بر عمق آبشستگی و همچنین مقایسه روابط تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. Jain and Fischer (1979a) بر اساس پژوهش‌های خود به این نتیجه رسیدند که عدد فرود بالادست پایه‌های پل، در ایجاد آبشستگی از اهمیت خاصی برخوردار است. بر همین اساس، در جریان‌های حاوی رسوب، آبشستگی اطراف پایه‌های دایره‌ای، ابتدا کاهش یافته و سپس با زیاد شدن عدد فرود افزایش می‌یابد. نتایج اکثر این تحقیقات نشان می‌دهد عمق آبشستگی به دست آمده به وسیله این روابط با اطلاعات آزمایشگاهی یا میدانی اختلاف زیادی دارد. از اینرو لازم است این روابط تجربی بهینه شوند. الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه‌سازی غیر تحلیلی یا تکاملی است که در مسایل بهینه‌سازی و طراحی کاربردهای زیادی پیدا کرده است. Mirzaeian et al. (2001) یک روش جدید بر اساس الگوریتم ژنتیک-فازی برای بهینه‌سازی هم‌زمان چند تابع هدف ارائه دادند. از الگوریتم ارائه شده برای تعیین نقطه بهینه دو تابع هدف ریاضی غیرخطی استفاده شد. Liriano and Day (2008) و Aytac- Guven and Gunal (2001) در مطالعات خود عملکرد بهتر شبکه عصبی مصنوعی را نسبت به روابط تجربی در برآورد عمق آبشستگی سازه‌های کنترلی نشان دادند. D'Agostino and Ferro (2004) آبشستگی پایین‌دست سازه‌های کنترلی و تثبیت‌کننده بستر را مطالعه کرده و بر اساس داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده در شرایط متفاوت از نظر جریان، زمان، نوع سازه و غیره، روابط تجربی مختلفی

را برای تخمین بیشینه عمق آبشستگی ارائه کردند. Tsai et al. (2009) با انجام آزمایش‌هایی موفق به ارائه روابط تجربی برای پیش‌بینی عمق فرسایش سازه‌های ساحلی شدند. این روابط اگرچه ساده و قابل فهم هستند ولی به علت دقت کم و محدود بودن کاربرد، کارایی کافی را ندارند (Dehghani and Abdi Dehkordi 2014). ضرایب روابط تجربی ارائه شده به وسیله D'Agostino and Ferro (2004) برای بررسی خصوصیات بستر پایین‌دست سازه‌های کنترلی و تثبیت‌کننده بستر با استفاده از روش جستجوی ژنتیکی بهینه کردند. آنها نتیجه گرفتند که روش جستجوی ژنتیکی نسبت به روابط تجربی موجود از دقت و کارایی بیشتری در تخمین مشخصه‌های هندسی حفره آبشستگی پایین‌دست سازه‌های کنترلی و تثبیت‌کننده بستر برخوردار است. Roushangar et al. (2014) از روش برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد عمق آبشستگی پایه‌های پل در بسترهای با خاک چسبنده و غیرچسبنده استفاده کردند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که برنامه‌ریزی بیان ژن در تخمین عمق آبشستگی پایه‌های پل در بسترهای با خاک چسبنده و غیرچسبنده، در مقایسه با معادلات غیرخطی موجود عملکرد مؤثر و کارایی بهتری دارد. همچنین بین معادلات موجود، معادله CSU برای بسترهای با خاک چسبنده و غیرچسبنده و معادله Hancu Yeganeh-Bakhtiary (2015) برای داده‌های بستر با خاک چسبنده منجر به نتایج بهتری شده است. از روش برنامه‌ریزی ژنتیک برای تخمین دقیق عمق بیشینه آبشستگی سازه‌های ساحلی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد روش برنامه‌ریزی ژنتیک مدل‌های به‌مراتب دقیق‌تری نسبت به روابط تجربی ارائه می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان یک معیار برای تخمین عمق آبشستگی استفاده شود. روابط تجربی تخمین حداکثر عمق آبشستگی پایه پل پیشنهاد شده توسط محققین هر کدام اولاً در یک شرایط خاص آزمایشگاهی به دست آمده‌اند و ثانیاً ممکن است محدوده تغییرات پارامترها کم و یا تمام پارامترهای مؤثر در نظر گرفته نشده باشند. از اینرو برخی از روابط حتی چند برابر بیشتر و یا کمتر از مقدار واقعی، عمق آبشستگی را تخمین می‌زنند. بنابراین لازم است روابط تجربی این محققین با روش‌های امروزی بهینه و اصلاح شوند که از اهداف این تحقیق است. در این تحقیق روابط مختلف

بهینه کردن آن است، الگوریتم ژنتیک شامل مراحل زیر خواهد بود:

۲-۴-۱- ساختن جمعیت اولیه

برای شروع باید از متغیرهای موجود (ژن‌ها)، کروموزوم تشکیل شده و موتور الگوریتم ژنتیک یک جمعیت اولیه ناهمگن از کروموزوم‌ها را ایجاد نماید. مثلاً در مورد رابطه تجربی با پنج ضریب ثابت، الگوریتم با انتخاب پنج عدد (ژن)، کروموزومی به شکل (۱) ایجاد می‌کند. مقدار هر کدام از متغیرها (ژن‌ها) می‌تواند به صورت تصادفی و یا با قید و شروط مسئله انتخاب شوند. چندین کروموزوم با یکدیگر یک جمعیت را می‌سازند. مثلاً در صورتی که الگوریتم ۱۰۰ کروموزوم ایجاد کند، تعداد جمعیت برابر ۱۰۰ خواهد بود.

0.1	-0.3	2	0.5	0.7
3	1.5	2.7	-0.4	-1.6

شکل ۱- دو کروموزوم با پنج ژن

Fig. 1 Two chromosomes with five genes

۲-۴-۲- تقاطع یا جفت‌گیری

کام بعدی ایجاد دومین نسل از جمعیت اولیه است. تعدادی از کروموزوم‌های جمعیت (والدین) دوبه‌دو با یکدیگر تقاطع پیدا کرده و هر جفت دو فرزند تشکیل می‌دهند. مثلاً اگر از ۱۰۰ عضو جمعیت، ۷۰ عضو آن دوبه‌دو با هم عمل تقاطع انجام دهند، ۷۰ فرزند (نسل جدید) تولید می‌شود. فرزندان جدید ترکیبی از ژن‌های والدین خود را دارند. تقاطع کروموزوم‌ها می‌تواند در یک نقطه یا چند نقطه اتفاق بیافتد. مثلاً از تقاطع دو کروموزوم در دو نقطه فرزندان به صورت شکل (۲) تولید می‌شوند. محل تقاطع کروموزوم‌ها می‌تواند به صورت تصادفی انتخاب شود.

۲-۴-۳- جهش

به کمک این عملگر می‌توان در یک بخش از یک کروموزوم تغییراتی به صورت تصادفی ایجاد کرد به این امید که کروموزوم بهتری تولید شود. اینکه در چه درصدی از ژن‌ها عمل جهش صورت گیرد بستگی به انتخاب مقدار نرخ عملگر جهش دارد. برای مثال، کروموزوم با جهش در دو ژن از آن به صورت شکل (۳) تغییر می‌کند:

تجربی از محققان مختلف به وسیله الگوریتم ژنتیک اصلاح روابطی جهت تخمین عمق آبستگي پیشنهاد شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده به وسیله سازمان (FHWA 2005) ارائه شده است که مربوط به پل‌های موجود در ایالت متحده می‌باشد. این اطلاعات شامل پارامترهای هیدرولیکی جریان، رسوب و هندسه پل می‌باشد. مقادیر حداقل، میانگین، حداکثر و انحراف معیار برای داده‌های عرض پل به ترتیب ۰/۳، ۱/۴، ۵/۵ و ۱/۱ m، برای سرعت به ترتیب ۰، ۱/۳، ۴/۵ و ۰/۸ m/s، برای عمق به ترتیب ۰/۱، ۴/۴، ۲۲/۵ و ۳/۵ m و برای عمق آبستگي به ترتیب ۰، ۱، ۷/۷ و ۱/۱ m می‌باشند. خصوصیات آماری این پارامترها بیانگر محدوده قابل قبول داده‌ها می‌باشد.

۲-۲- روابط تخمین عمق آبستگي

در این پژوهش از ۱۷ رابطه مهم تخمین عمق آبستگي پایه پل استفاده شد (FHWA 2005). در هر کدام از این روابط برخی از پارامترهای مؤثر در تعیین عمق آبستگي دخالت داده شده است.

۲-۳- پارامترهای مؤثر بر آبستگي

مهم‌ترین پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مؤثر بر عمق آبستگي پایه پل به صورت رابطه‌ی (۱) می‌باشد:

$$S = f(B, y, u, u_c, D_{50}, \phi, g, \alpha) \quad (1)$$

که، S عمق آبستگي، B عرض پایه پل، y عمق جریان، u سرعت جریان، u_c سرعت بحرانی، D_{50} قطر متوسط ذرات، ϕ ضریب شکل پایه پل، g شتاب ثقل و α زاویه برخورد جریان به پایه پل می‌باشد (Melville 1997).

۲-۴- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم تکاملی، روشی مبتنی بر جستجوی تصادفی است که از مدل‌سازی بیولوژیکی طبیعی الگوبرداری کرده است. این الگوریتم بر روی پاسخ‌های ممکن کار می‌کند که از ویژگی‌های برتری برخوردارند و بقای نسل بیشتری دارند، لذا تخمین نزدیک‌تری از پاسخ بهینه به دست می‌دهند. برای آشنایی بیشتر با این روش فرض کنیم هدف پیدا کردن پنج ضریب یک معادله تجربی عمق آبستگي و

شامل ۲۰۰ کروموزوم ایجاد می‌شود. حال ۱۰۰ کروموزوم ابتدایی که قوی‌تر بوده‌اند (جواب بهتری را تولید کرده‌اند) انتخاب و ۱۰۰ تای دیگر که ضعیف‌تر بوده‌اند حذف می‌شوند. ۱۰۰ کروموزوم ابتدایی به‌عنوان جمعیت اولیه جدید انتخاب و دوباره این عملیات از مرحله ۲ تا ۴ تکرار می‌شود. اولین کروموزوم بهترین انتخاب خواهد بود. الگوریتم این مراحل را آن‌قدر تکرار می‌کند تا شرایط خاتمه فراهم شود. به این ترتیب بهترین کروموزوم (بهترین ضرایب برای رابطه تجربی) حاصل می‌شود. شرط خاتمه یافتن الگوریتم ممکن است متفاوت باشد از جمله ۱- رسیدن به حد قابل قبولی از پاسخ ۲- سپری شدن زمان (تکرار) معین ۳- سپری شدن زمان (تکرار) معین بدون مشاهده بهبود خاصی در نتیجه.

۲-۴-۵- شاخص‌های ارزیابی

برای مقایسه مقادیر حاصل از روابط تجربی و اصلاح شده با مقادیر اندازه‌گیری شده (واقعی)، از شاخص‌های میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریب (MAE)، مقدار متوسط درصد خطا (E) و ضریب همبستگی (R^2) استفاده شد. رابطه سه شاخص به ترتیب در روابط (۲) تا (۴) آورده شده است:

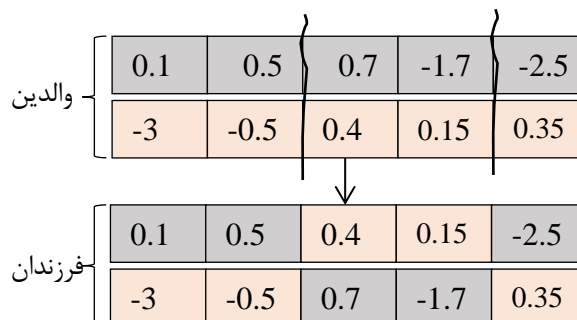
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - B_i) \quad (3)$$

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - B_i}{B_i} \right| \times 100 \quad (4)$$

در این روابط A_i مقادیر حاصل از روابط، B_i مقادیر اندازه‌گیری شده (واقعی) آبشستگی و n تعداد داده‌هاست. هر چه خطای RMSE و E کمتر باشد، مقادیر به دست آمده از روابط تخمین دقیق‌تری از عمق آبشستگی است. همچنین مقادیر مثبت و منفی MAE نشان می‌دهد رابطه تجربی یا اصلاح شده مقدار عمق آبشستگی را به ترتیب بیشتر و کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند.

برای اصلاح و بهینه کردن روابط عمق آبشستگی پایه پل، ابتدا ۸۰ درصد داده‌های مشاهداتی را انتخاب و ضرایب روابط مختلف مربوط به عمق آبشستگی با الگوریتم ژنتیک چنان تعیین گردید که تابع هدف مینیمم مقدار شود. از مابقی داده‌ها (۲۰ درصد باقی‌مانده) جهت آزمون و یا



شکل ۲- تقاطع دو کروموزوم در دو نقطه و تولید دو فرزند

Fig. 2 The intersection of two chromosomes at two points and the production of two daughters

3	1.5	2.7	-0.4	-1.6
---	-----	-----	------	------

3	0.8	2.7	-0.4	0.1
---	-----	-----	------	-----

شکل ۳- عمل جهش در کروموزوم

Fig. 3 Mutation in chromosome

تعداد عملگر جهش بر روی کروموزوم‌های جمعیت اختیاری است. مثلاً اگر بر روی ۳۰ درصد از کروموزوم‌های جمعیت با ۱۰۰ عضو جهش انجام شود، ۳۰ کروموزوم جدید حاصل می‌شود.

۲-۴-۴- ارزیابی به‌وسیله تابع هدف

هر کروموزوم باید مورد ارزیابی قرار گیرد. مناسب‌ترین کروموزوم‌ها شانس بیشتری برای زنده ماندن در طول دوره‌های دیگر و دوباره تولید شدن را دارا بوده و ضعیف‌ترها محکوم به نابودی هستند. جهت ارزیابی باید تابع هدف مشخص شود. مثلاً در مورد رابطه تجربی آبشستگی پایه پل می‌توان خطای RMSE یا MAE را به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفت. هر کروموزوم شامل متغیر یا ژن که مقدار آبشستگی حاصل از روابط تجربی را نزدیک‌تر به مقدار مشاهداتی تولید کند یا به عبارتی دارای خطای کمتری باشد، کروموزوم قوی‌تری خواهد بود. از ترکیب جمعیت اولیه، جمعیت نسل جدید تولید شده به‌وسیله عملگرهای تقاطع و جهش، یک جمعیت بزرگ‌تری تولید می‌شود. مثلاً با توجه به مراحل بالا از ترکیب جمعیت اولیه (۱۰۰ کروموزوم)، جمعیت نسل جدید (۷۰ و ۳۰ کروموزوم) ایجاد شده به ترتیب به‌وسیله عملگرهای تقاطع و جهش) جمعاً جمعیتی با ۲۰۰ کروموزوم ایجاد می‌شود. با انجام عمل ارزیابی و مرتب‌سازی کروموزوم‌ها بر اساس دارا بودن خطای RMSE یا MAE کمتر، یک جمعیت مرتب شده

جدول ۱- روابط ارائه شده برای تخمین مقدار آبشستگی پایه پل و روابط اصلاح شده با الگوریتم ژنتیک

Table 1 The equations presented to estimate the amount of bridge scour and the modified equations with genetic algorithm

نام محقق	رابطه محقق	رابطه اصلاح شده با الگوریتم ژنتیک
Laursen and Toch (1956)	$S = 1.35B^{0.7}y^{0.3}$	$S = 0.23B^{0.63}y^{0.77}$
Neill (1964)	$S = 1.5B^{0.7}y^{0.3}$	$S = 0.23B^{0.63}y^{0.77}$
Melville (1975)	$S = 1.11B^{0.5}y^{0.5}$	$S = 0.23B^{0.63}y^{0.77}$
*Shen et al. (1969)	$S = 0.00073\left(\frac{uB}{v}\right)^{0.619}$	$S = 0.0000382\left(\frac{uB}{v}\right)^{0.78}$
Shen (1971)	$S = 0.00022\left(\frac{uB}{v}\right)^{0.619}$	$S = 0.0000116\left(\frac{uB}{v}\right)^{0.78}$
Hancu (1971)	$S = 2.42B\left(2\frac{u}{u_c} - 1\right)\left(\frac{u_c^2}{gB}\right)^{\frac{1}{3}}$	$S = 0.19B\left(2.22\frac{u}{u_c} + 1.92\right)\left(\frac{u_c^2}{gB}\right)^{0.147}$
Froehlich (1988)	$S = 0.32\phi g^{-0.1}V^{0.2}y^{0.36}B^{0.62}D_{50}^{-0.08}$	$S = 0.32\phi g^{-0.33}V^{0.70}y^{0.37}B^{0.48}D_{50}^{-0.14}$
Froehlich-Design (1988)	$S = 0.32\phi g^{-0.1}V^{0.2}y^{0.36}B^{0.62}D_{50}^{-0.08} + B$	$S = -10\phi g^{-0.82}V^{-0.63}y^{-0.46}B^{1.84}D_{50}^{0.24} + B$
*Blench I (1962)	$S = 1.8B^{0.25}y^{0.75} - y$	$S = 1.16B^{0.117}y^{0.9512} - y$
Inglis II (1949)	$S = 1.73B^{0.22}y^{0.78} - y$	$S = 1.261B^{0.117}y^{0.9512} - y$
**Blench II (1962)	$S = 1.53B^{0.25}V^{0.5}D_{50}^{-0.125}y^{0.5} - y$	$S = 1.23B^{0.094}V^{0.057}D_{50}^{-0.02}y^{0.92} - y$
Breusers (1965)	$S = 1.4B$	$S = 0.75B$
*Inglis I (1949)	$S = 1.7B^{0.22}V^{0.52}y^{0.52} - y$	$S = 1.15B^{0.1062}V^{0.0276}y^{0.9458} - y$
Chitale (1962)	$S = y(-5.49Fr^2 + 6.65Fr - 0.51)$	$S = y(-1.05Fr^{2.62} + 0.62Fr + 0.13)$
	$S = Bf\left(\frac{u}{u_c}\right)\left(2 \tanh\left(\frac{y}{B}\right)\right)$	$S = Bf\left(\frac{u}{u_c}\right)\left(1.12 \tanh\left(0.34\frac{y}{B}\right)\right)$
Breusers et al. (1977)	$\begin{cases} \frac{u}{u_c} < 0.5 \rightarrow f\left(\frac{u}{u_c}\right) = 0 \\ 0.5 \leq \frac{u}{u_c} < 1 \rightarrow f\left(\frac{u}{u_c}\right) = 2\frac{u}{u_c} - 1 \\ \frac{u}{u_c} \geq 1 \rightarrow f\left(\frac{u}{u_c}\right) = 1 \end{cases}$ $S = 5B \log\left(\frac{B}{D_{50}}\right) - 4 \dots 6 \leq \frac{B}{D_{50}} \leq 25$	$\begin{cases} \frac{u}{u_c} < 0.5 \rightarrow f\left(\frac{u}{u_c}\right) = 0 \\ 0.5 \leq \frac{u}{u_c} < 1 \rightarrow f\left(\frac{u}{u_c}\right) = 2\frac{u}{u_c} - 1 \\ \frac{u}{u_c} \geq 1 \rightarrow f\left(\frac{u}{u_c}\right) = 1 \end{cases}$ $S = 0.24B \log\left(\frac{B}{D_{50}}\right) - 0.1 \dots 6 \leq \frac{B}{D_{50}} \leq 25$
Sturm & Lee (2009)	$S = B \left[\frac{1.8}{\left(\left(0.02\left(\frac{B}{D_{50}}\right) - 0.2\right)^2 + 1\right)} + 1.3 \right] \dots 25 \leq \frac{B}{D_{50}} \leq 10000$	$S = B \left[\frac{0.1}{\left(\left(10\left(\frac{B}{D_{50}}\right) - 0.1\right)^2 + 10\right)} + 0.75 \right] \dots 25 \leq \frac{B}{D_{50}} \leq 10000$
Fischenich and Landers (1999)	$S = y\left(2\left(\frac{\theta}{90}\right)^{0.13}\left(\frac{B}{y}\right)^{0.43}Fr^{0.61}\right)$	$S = y\left(0.61\left(\frac{B}{y}\right)^{0.46}Fr^{0.196}\right)$

*: تمام پارامترها در سیستم انگلیسی و بر حسب فوت است به جز D_{50} که بر حسب میلی متر است.

گردید. تعداد تکرارهای حلقه اصلی جهت اعمال عملگر تقاطع و جهش چنان انتخاب شد تا مقدار تابع هدف مینیمم شده و عددی ثابت شود. در این حالت ضرایب به دست آمده به عنوان ضرایب بهینه در نظر گرفته شد. باید توجه داشت در اصلاح روابط تجربی، فرم کلی روابط محققین حفظ شده و از همان پارامترهای هندسی و

صحت سنجی استفاده شد. در این تحقیق شاخص RMSE بین مقادیر مشاهده شده یا واقعی عمق آبشستگی و برآورده شده به وسیله هر یک از روابط، به عنوان تابع هدف انتخاب شد. بازه تغییرات تعداد افراد جمعیت اولیه بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ نفر و درصد جمعیت انتخابی جهت اعمال عملگر تقاطع و جهش به ترتیب ۷۰ و ۳۰ درصد انتخاب

برای به دست آوردن ضرایب روابط بهینه با حداقل خطای RMSE، فرم کلی معادلات محققین حفظ شد. جدول (۲) مقادیر شاخص‌های ارزیابی $E(\%)$ ، $RMSE(m)$ و $MAE(m)$ و ضریب همبستگی R^2 بین نتایج حاصل از روابط محققین و روابط اصلاح شده با نتایج مشاهداتی را در مرحله آموزش و آزمون نشان می‌دهد.

هیدرولیکی موجود در رابطه محقق استفاده می‌شود و با استفاده از الگوریتم ژنتیک فقط ضرایب ثابت روابط بهینه می‌گردد.

۳- یافته‌ها و بحث

در جدول (۱) روابط عمق آبشستگی پایه پل مربوط به محققین مختلف (FWHA) و روابط اصلاح شده به وسیله الگوریتم ژنتیک در این تحقیق آمده است.

جدول ۲- شاخص‌های ارزیابی تخمین عمق آبشستگی برای روابط ارائه شده و روابط اصلاح شده در مرحله آموزش و آزمون (**)

Table 2 Indicators of scour depth estimation for the presented equations and modified equations in the training and test phases

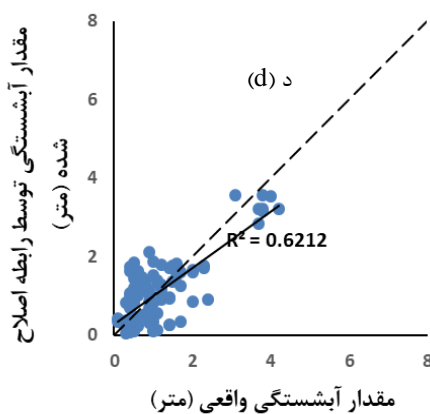
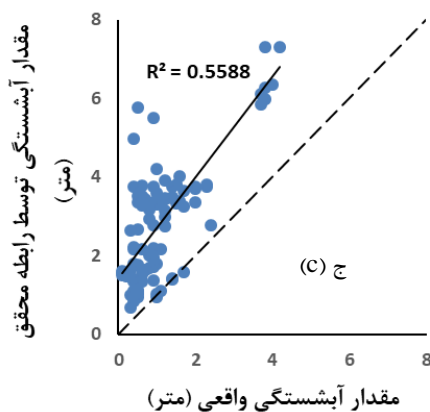
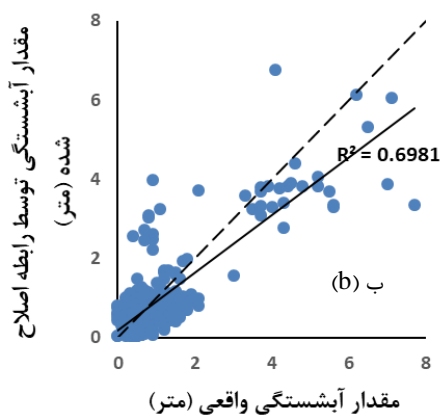
نام محقق	روابط محقق				روابط اصلاح شده			
	RMSE	MAE	R^2	E	RMSE	MAE	R^2	E
Laursen and Toch (1956)	1.87	1.44	0.63	253	0.65	-0.07	0.7	62
	2.07	1.75	0.56	269	0.6	-0.05	0.62	68
Neill (1964)	2.18	1.7	0.63	291	0.65	-0.07	0.7	62
	2.42	2.07	0.56	309	0.6	-0.05	0.62	68
Melville (1975)	1.93	1.52	0.66	267	0.65	-0.07	0.7	62
	2.18	1.83	0.56	275	0.6	-0.05	0.62	68
*Shen et al. (1969)	1.11	0.55	0.48	135	0.84	-0.09	0.51	68
	1.06	0.8	0.48	166	0.68	-0.034	0.49	68
Shen (1971)	1.11	0.55	0.48	135	0.84	-0.09	0.51	68
	1.05	0.79	0.48	165	0.68	-0.034	0.49	68
Hancu (1971)	3.32	1.32	0.60	210	0.71	-0.063	0.64	59
	2.12	1.2	0.58	186	0.62	-0.129	0.59	55
Froehlich (1988)	0.76	-0.11	0.59	60	0.69	-0.11	0.67	58
	0.62	-0.08	0.59	65	0.58	-0.11	0.65	59
Froehlich-Design (1988)	1.71	1.2	0.60	212	0.69	0.0075	0.65	71
	1.91	1.52	0.55	230	0.59	-0.01	0.62	67
*Blench I (1962)	0.9	0.3	0.54	109	0.65	-0.06	0.69	62
	0.93	0.31	0.41	128	0.6	-0.03	0.62	7
Inglis II (1949)	0.84	0.29	0.57	103	0.65	-0.06	0.69	62
	0.85	0.3	0.46	118	0.6	-0.3	0.62	70
**Blench II (1962)	1.82	-0.58	0.32	178	0.62	-0.045	0.72	61
	1.96	-1.12	0.06	153	0.57	-0.085	0.65	62
Breusers (1965)	1.35	0.86	0.53	174	0.80	0.027	0.53	74
	1.46	1.11	0.43	197	0.72	0.061	0.43	81
*Inglis I (1949)	2.24	0.46	0.23	250	0.65	-0.064	0.69	61
	1.98	0.62	0.06	255	0.58	-0.026	0.64	68
Chitale (1962)	2.67	1.31	0.36	285	0.74	0.039	0.6	83
	2.44	0.6	0.2	286	0.77	0.04	0.39	89
Breusers et al. (1977)	1.83	0.94	0.57	185	0.73	-0.15	0.62	74
	1.97	1.22	0.51	168	0.66	-0.15	0.57	66
Sturm and Lee (2009)	1.69	1.07	0.36	205	0.81	-0.02	0.52	71
	1.63	1.23	0.3	224	0.75	-0.034	0.41	67
Fischenich and Landers (1999)	1.35	0.86	0.57	166	0.70	0.083	0.66	77
	1.3	1.09	0.57	190	0.61	0.11	0.6	79

*: تمام پارامترها در سیستم انگلیسی و بر حسب فوت است به جز D50 که بر حسب میلیمتر است.

** : ردیف اول مربوط به نتایج مرحله آموزش و ردیف دوم مربوط به نتایج مرحله آزمون می‌باشد.

مرحله آموزش خطای RMSE مربوط به رابطه اصلاح شده Hancu(1971) در مقایسه با رابطه اصلی آن با کاهش از مقدار ۳/۳۲ به ۰/۷۱ m، بیشترین مقدار کاهش (۷۹)

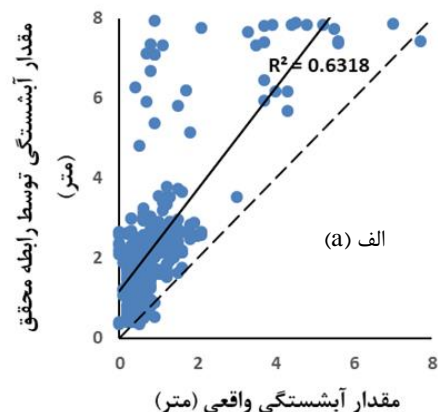
همان‌طور که در جدول (۲) مشخص است با اصلاح روابط محققین در این تحقیق، مقادیر خطای RMSE، MAE و E کاهش و ضریب همبستگی افزایش یافته است. در



شکل ۴- مقایسه مقادیر آبستگی رابطه (Laursen and Toch 1956) و رابطه اصلاح شده با مقادیر واقعی الف و ب) مرحله آموزش، ج و د) مرحله آزمون

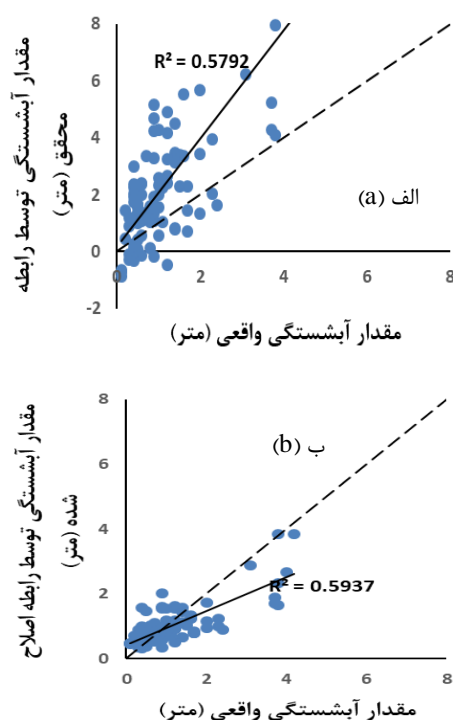
Fig. 4 Comparison of scouring values of the (Laursen and Toch 1956) equation and the modified equation with the actual values of a and b) Training stage, c and d) Testing stage

درصد) و خطای RMSE مربوط به رابطه (Froehlich 1988) با حدود ۱۰ درصد کاهش کمترین مقدار کاهش را داشته است. مقادیر متوسط درصد خطای E مربوط به روابط محققین بالاست و کمترین آن مربوط به رابطه (Froehlich 1988) به میزان ۶۰ درصد است. پس از اصلاح روابط، مقادیر متوسط خطای E کاهش چشمگیری یافته است. کمترین کاهش خطا مربوط به رابطه (Froehlich 1988) به میزان ۳ درصد و بیشترین میزان کاهش مربوط به روابط (Melville, Neill (1964), Hancu و Laursen and Toch (1956) (1975)، به ترتیب حدود ۷۹، ۷۷، ۷۵ و ۷۲ درصد بوده است بنابراین الگوریتم ژنتیک بیشترین تأثیر جهت اصلاح را بر روی این روابط داشته است. مقادیر ضریب همبستگی بین داده‌های آبستگی پس از اصلاح روابط افزایش یافته است. افزایش این ضریب در روابط اصلاح شده نسبت به روابط اصلی نسبتاً کم بوده است به جز رابطه Inglis I (1949) که علت آن پایین بودن ضریب همبستگی به جهت مقادیر منفی عمق آبستگی به دست آمده به وسیله این رابطه می‌باشد. با توجه به جدول (۲) و معیار MAE، اکثر روابط محققین مقادیر آبستگی را بیشتر از مقدار واقعی نشان می‌دهند به جز رابطه‌های (Blench II (1962) و (Froehlich (1988). در مقابل اکثر روابط اصلاح شده مقادیر آبستگی را پایین‌تر از مقدار واقعی نشان می‌دهند. پس از اصلاح روابط، شاخص MAE کاهش چشمگیری یافته است.



اصلاح شده نسبت به روابط تجربی مربوط به Neill (1964)، (Melville (1975), Laursen and Toch

در مرحله آزمون نیز تغییرات مشابه مرحله آموزش است. در این مرحله بیشترین کاهش خطای RMSE روابط



شکل ۵- مقایسه مقادیر آبخستگی روابط با مقادیر اندازه‌گیری شده در مرحله آزمون: الف) رابطه (Hancu (1971 و ب) رابطه اصلاح شده

Fig. 5 Comparison of scouring values of the equations with the measured values at the test stage: a) Hancu (1971) equation and b) modified equation

با اصلاح این رابطه ضمن مثبت شدن مقادیر منفی آبخستگی، شاخص‌های خطا کاهش یافته است. رابطه Froehlich-Design (1988) شبیه به معادله Froehlich (1988) است با این تفاوت که مقدار عرض پایه پل (B) به رابطه به صورت جمع اضافه شده است. اضافه کردن این پارامتر باعث افزایش خطای RMSE از ۰/۶۲ به ۱/۹۱ m و MAE از ۰/۰۸- به ۱/۵۲ در مرحله آزمون شده است.

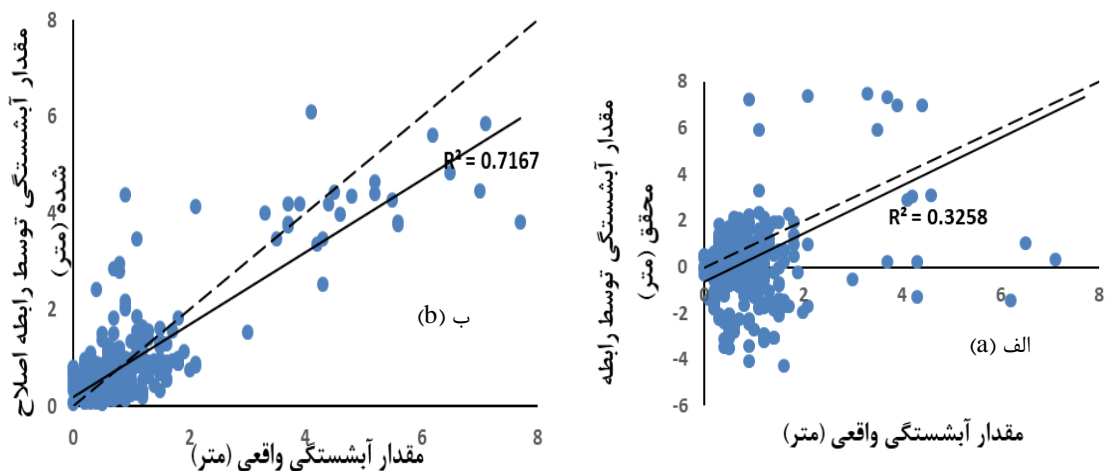
رابطه Blench II (1962) با توجه به شکل (۶)، مقادیر قابل توجهی از داده‌های آبخستگی را منفی نشان می‌دهد که با اصلاح ضرایب رابطه به وسیله الگوریتم ژنتیک، ضمن مثبت شدن مقادیر آبخستگی، رابطه اصلاح شده با شاخص‌های RMSE، MAE، E و R^2 به ترتیب برابر ۰/۵۷، ۰/۰۸۵، ۶۲ درصد و ۰/۶۵ یکی از روابط با کمترین میزان خطا و بیشترین ضریب همبستگی بین داده‌های آبخستگی

(1956)، (1962) Blench و (1971) Hancu به ترتیب برابر ۷۵، ۷۲، ۷۱، ۷۱ و ۷۱ درصد می‌باشد. در این مرحله نیز خطای MAE و E در روابط اصلاح شده نسبت به روابط محققین کاهش چشمگیری داشته است. همچنانکه در جدول مشخص است، اختلاف شاخص‌های RMSE، MAE، E و R^2 در روابط اصلاح شده بین مرحله آموزش و آزمون به یکدیگر نزدیک است که نشان می‌دهد روابط اصلاح شده به خوبی و بهتر از روابط محققین می‌توانند عمق آبخستگی پایه پل را تخمین بزنند. با توجه به جدول (۲)، در مرحله آزمون شاخص‌های MAE، E، RMSE و R^2 برای رابطه Froehlich (1988) به ترتیب برابر ۰/۶۲، ۰/۶۵، ۶۵ درصد، ۰/۸۰- و ۰/۵۹ است که با اصلاح رابطه، این مقادیر به ترتیب به ۰/۵۸ متر، ۵۹ درصد، ۰/۱۱- و ۰/۶۵ تغییر یافته که این تغییرات قابل توجه نیست. از این مطلب این نتیجه‌گیری حاصل می‌شود که نخست به دلیل پایین بودن شاخص‌های خطا در رابطه اصلی Froehlich (1988)، این رابطه نسبت به روابط دیگر پژوهش‌گران مقادیر آبخستگی را بهتر پیش‌بینی می‌کند و پارامترهای دخیل در این رابطه، پارامترهای تأثیرگذاری در پدیده آبخستگی پایه پل می‌باشند، دوم این که، الگوریتم ژنتیک با تغییر ضرایب رابطه، کمترین تأثیر و اصلاح را بر روی این رابطه داشته است.

شکل کلی روابط Neill, Laursen and Toch (1956) و (1964) Melville یکسان است. این روابط مقادیر آبخستگی را در مرحله آزمون به ترتیب ۱/۷۵، ۲/۰۷ و ۱/۸۳ m بیشتر از مقدار واقعی تخمین می‌زنند که با اصلاح این روابط به وسیله الگوریتم ژنتیک همان گونه که در شکل (۴) برای Laursen and Toch (1956) نشان داده شده است، مقادیر آبخستگی بیشتر در محدوده خط یک به یک قرار گرفته و به طور متوسط رابطه اصلاح شده حدود ۵ cm مقادیر آبخستگی را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند.

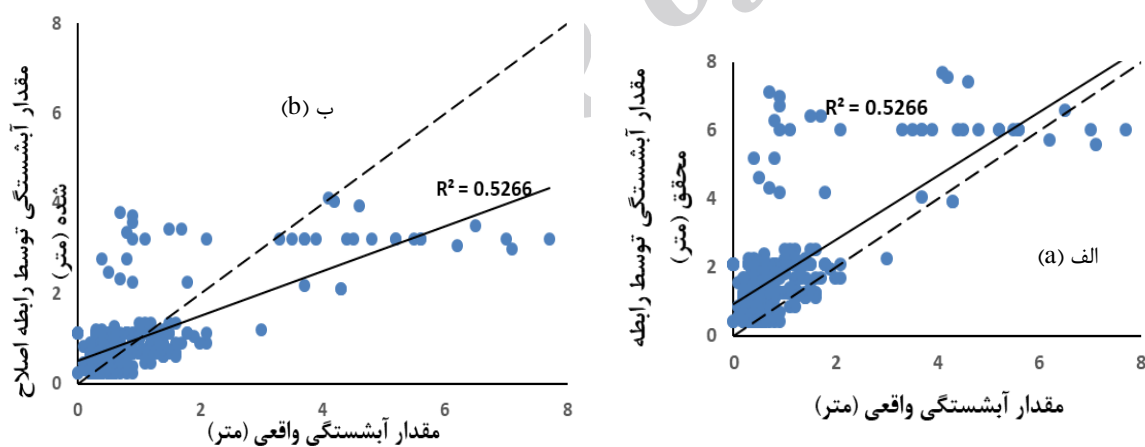
یکی از روابطی که الگوریتم ژنتیک توانسته با تغییر ضرایب آن بیشترین تأثیر را در کاهش خطای مقادیر آبخستگی داشته باشد رابطه Hancu (1971) است. همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است. این رابطه در برخی مواقع مقادیر آبخستگی را منفی نشان می‌دهد که غیرمنطقی است.

است. لذا پارامترها و شکل این رابطه برای پیش‌بینی آبشستگی مناسب است.



شکل ۶- مقایسه مقادیر آبشستگی روابط با مقادیر اندازه‌گیری شده در مرحله آموزش: الف) رابطه (Blench II (1962) و ب) رابطه اصلاح شده

Fig. 6 Comparison of scouring values of the equations with the measured values at the training stage: a) (Blench II 1962) equation and b) modified equation



شکل ۷- مقایسه مقادیر آبشستگی روابط با مقادیر اندازه‌گیری شده در مرحله آموزش الف) رابطه (Breusers (1965) و ب) رابطه اصلاح شده

Fig. 7 Comparison of scouring values of the equations with the measured values at the training stage: a) Breusers (1965) equation and b) modified equation

این رابطه یک مقدار مساوی از عمق آبشستگی را به دست می‌دهد در حالی که مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده بسته به هیدرولیک جریان متفاوت است. در رابطه Chitale (1962) مقادیر شاخص‌های خطا بالا و ضریب همبستگی بین داده‌ها پایین است. با اصلاح رابطه مقادیر شاخص‌های خطا کاهش و ضریب همبستگی افزایش یافته است ولی

رابطه Breusers (1965) و اصلاح شده آن اگرچه معادله ساده‌ای هستند ولی بالا بودن نسبی شاخص‌های خطا و پایین بودن نسبی ضریب همبستگی هم در رابطه محقق و هم اصلاح شده نشان می‌دهد روابط مناسبی برای پیش‌بینی عمق آبشستگی نمی‌باشند. همان‌طور که در شکل (۷) نیز نشان داده شده است، برای یک عرض ثابت پایه پل

خود استفاده کرده‌اند، لذا از پارامترهای بدون بعد نیز استفاده شد. این روابط در جدول (۳) نشان داده شده است. جدول (۴) شاخص‌های ارزیابی روابط پیشنهادی در مرحله آموزش و آزمون و شکل (۸) مقادیر پیش‌بینی آبستگی به‌وسیله برخی از روابط پیشنهادی را در مقابل مقادیر واقعی آبستگی نشان می‌دهند.

همان‌طور که در جدول (۴) مشخص شده است، روابط ۴ و ۵ دارای کمترین شاخص خطا و بیشترین ضریب همبستگی هستند. در ردیف آخر جدول مقادیر شاخص‌های خطای RMSE، E و MAE نسبت به دیگر روابط بالاتر است که نشان می‌دهد پارامترهای با بعد بهتر و تأثیرگذارتر از پارامترهای بدون بعد می‌توانند مقادیر آبستگی را پیش‌بینی کنند. نتایج محققینی مانند (Ghazanfari Hashemi and Etemad- Shahidi 2012) Firat and Gungor (2009) و Bateni et al. (2009) نیز این مسئله را تأیید می‌کند. روابط پیشنهادی به‌جز رابطه (۶) در این جدول نسبت به روابط اصلی و روابط اصلاح شده دارای شاخص‌های خطای کمتری می‌باشند.

همان‌طور که در جدول (۲) مشخص است مقادیر خطای RMSE و E باز هم بالاست. علت این امر می‌تواند این موضوع باشد که در رابطه فوق فقط شرایط هیدرولیکی جریان در نظر گرفته شده است و مشخصات پایه پل و ذرات رسوب نقشی در مقدار آبستگی ندارند. در رابطه اصلاح شده (Fischenich and Landers 1999) به‌وسیله الگوریتم ژنتیک در مقایسه با رابطه اصلی، نسبت $\frac{\theta}{90}$ حذف شده که می‌تواند نمایانگر این مسئله باشد که زاویه برخورد جریان به پایه پل (Θ) به اندازه دیگر پارامترها در مقدار آبستگی مؤثر نیست و همان‌طور که در روابط دیده می‌شود، دیگر محققین نیز از این پارامتر استفاده نکرده‌اند. در ادامه با توجه به اینکه برخی روابط اصلی و اصلاح شده مانند (Froehlich 1988)، (Inglis II 1949) و (Blench II 1962) دارای کمترین شاخص خطا و بیشترین ضریب همبستگی را نسبت به دیگر روابط دارا می‌باشند، پارامترهای دخیل در این روابط و شکل کلی آنها جهت پیشنهاد چند رابطه که ضرایب آن به‌وسیله الگوریتم ژنتیک به دست آمده است، استفاده شد. همچنین به جهت اینکه برخی از محققین از پارامترهای بدون بعد در روابط

جدول ۳- روابط پیشنهادی جهت تخمین عمق آبستگی پایه پل

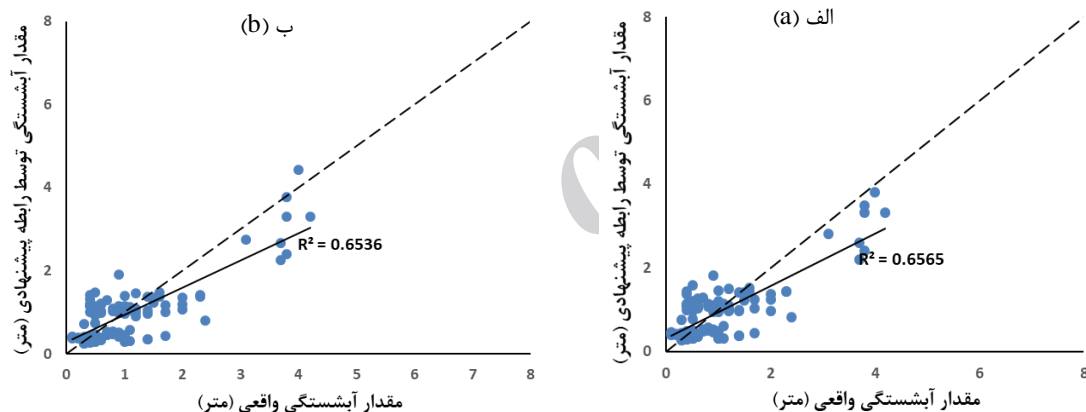
Table 3 Proposed equations for estimating the bridge base scour depth

شماره رابطه پیشنهادی	روابط پیشنهادی
1	$S = 5g^{-0.7} B^{0.5} y^{0.6} u^{0.52} D_{50}^{0.2} u_c^{-0.96}$
2	$S = 0.32\phi g^{-0.96} B^{0.99} y^{0.02} u^{1.226} D_{50}^{-0.227} + 0.12y$
3	$S = 0.32\phi g^{0.77} B^{1.03} y^{0.098} u^{1.51} D_{50}^{0.45} u_c^{-2.13} + 0.12y$
4	$S = 0.32\phi g^{-2.77} B^{0.73} y^{1.04} u^{1.66} D_{50}^{-0.386} + 0.087y + 0.27B$
5	$S = 0.32\phi g^{1.18} B^{0.73} y^{0.819} u^{2.108} D_{50}^{0.93} u_c^{-4.16} + 0.087y + 0.24B$
6	$S = 5.1 \left(\frac{uB}{v}\right)^{1.24} \left(\frac{y}{B}\right)^{2.78} \left(\frac{B}{D_{50}}\right)^{-2.1} \left(\frac{u_c^2}{gB}\right)^{-4.11} \left(\frac{u}{u_c}\right)^{5.8} \left(\frac{uy}{v}\right)^{-2.1} Fr^{-4.36}$

جدول ۴- شاخص‌های ارزیابی تخمین عمق آبشستگی برای روابط پیشنهادی در مرحله آموزش و آزمون

Table 4 assessment indicators for estimating the scour depth for the proposed equations at training and testing stages

شماره رابطه پیشنهادی	مرحله آموزش				مرحله آزمون			
	RMSE	MAE	R ²	E	RMSE	MAE	R ²	E
1	0.61	-0.035	0.73	59.5	0.55	-0.11	0.68	57
2	0.6	-0.052	0.74	61	0.59	-0.12	0.63	63
3	0.59	-0.035	0.75	60	0.57	-0.12	0.65	59.70
4	0.58	-0.03	0.75	58	0.57	-0.11	0.66	60
5	0.58	-0.021	0.76	58	0.57	-0.11	0.65	60
6	0.75	-0.32	0.68	75	0.98	-0.64	0.48	89



شکل ۸- مقایسه مقادیر آبشستگی واقعی با مقادیر به دست آمده از روابط الف) پیشنهادی ۴ و ب) پیشنهادی ۵ در مرحله آزمون

Fig. 8 Comparison of the actual scour values with the values obtained from equations: a) Proposed 4 and b) Proposed 5 at the test stage

۱- روابط اصلاح شده با الگوریتم ژنتیک نسبت به روابط اصلی، عمق آبشستگی را با خطای بسیار کمتری تخمین می‌زند.

۲- کمترین کاهش خطا مربوط به رابطه Froehlich (1988) به میزان ۳ درصد است.

۳- بیشترین میزان کاهش خطا مربوط به روابط Neill (1964)، Melville (1975)، Laursen and Toch (1956) و Hancu (1971) به ترتیب حدود ۷۹، ۷۷، ۷۵ و ۷۲ درصد بوده است بنابراین الگوریتم ژنتیک بیشترین تأثیر جهت اصلاح را بر روی این روابط داشته است.

۴- نتیجه گیری

یکی از راه‌های تخمین عمق آبشستگی پایه پل استفاده از روابط تجربی است. برخی از این روابط عمق آبشستگی را با خطای زیادی تخمین می‌زنند. در این تحقیق ابتدا با استفاده از داده‌های میدانی خطای روابط تجربی محاسبه شد. خطای اکثر روابط بسیار بالا بود. با استفاده از الگوریتم ژنتیک روابط تجربی اصلاح شد. تعداد ۸۰ درصد داده‌ها برای اصلاح روابط و مابقی جهت صحت‌سنجی روابط بکار برده شد. نتایج در مرحله آموزش و آزمون نشان داد:

References

- Aghli M. and Zomorodian S.M.A. (2012). Effect of Cable and Collar on Scouring Depth Around Cylindrical Bridge Pier in Meandering River. *J. Irrig. Sci. Eng.*, 36(3), 31-40 [In Persian].
- Aytac-Guven A. and Gunal M. (2008). Prediction of scour downstream of grade-control structures using neural network. *J. Hydr. Eng.*, 134(11), 1656-1660.
- Batani S.M. Jeng D.S. and Melville B.W. (2007). Bayesian neural networks for prediction of equilibrium and time-dependent scour depth around bridge piers. *Adv. Eng. Soft.*, 38 (2), 102-111.
- D'Agostino V. and Ferro V. (2004). Scour on alluvial bed downstream of grade-control structures. *J. Hydr. Eng.*, 130(1), 24-37.
- Dehghani A.A. and Abdi Dehkordi M. (2014). Application of genetic algorithms in the optimization of empirical relations to estimate of geometrical characteristics of the scour hole downstream of grade control structures. *Modares Civil Eng. J.*, 14(2), 165-173 [In Persian].
- Field observations and evaluations of streambed scour at bridge. (2005). Federal Highway Administration (FHWA), Publication No. FHWA-RD-03-052.
- Firat M. and Gungor M. (2009). Generalized regression neural networks and feed forward neural networks for prediction of scour depth around bridge piers. *Adv. Eng. Soft.*, 40 (8), 731-737.
- Ghazanfari Hashemi S. and Etemad- Shahidi A. (2012). Prediction of Scour Depth Around Bridge Pier by Support Vector Machines. *Modares Civil Eng. J.*, 12(2), 23-36 [In Persian].
- Jain, S.C., Fischer, E.E. (1979a). Scour around circular bridge pier at high Froude number. Report of Federal Highway Administration, FHWA-RR-79-104, 308-317.
- Liriano S.L. and Day R.A. (2001). Prediction of scour depth at inlets using neural network. *J. Hydroinfo.*, 3, 231-238.
- Melville, B. (1997). Pier and Abutment Scour: Integrated Approach. *J. Hydr. Eng.*, 123 (2), 125-136.
- Mirzaeian B., Moallem M., Tahani V. and Lucas C. (2001). A new multi-objective optimization method based on Genetic-Fuzzy Algorithm and its application in induction motor speed control. *Esteghlal*, 20(1), 29-42 [In Persian].
- Raeisi N. and Ghomeshi M. (2014). Effect of Model Scale in Bridge Piers Scour Experiments. *Water Soil Sci.*, 25(3), 227-240 [In Persian].
- Roushangar, K., Taghi Aalami, M. and Mirheidarian, S. (2014). The efficiency of gene expression programming method to estimate the scour depth in cohesive soil beds at the bridge piers. *J. Civil Environ. Eng.*, 44(2), 21-33 [In Persian].
- Sheykhool Eslami M., Shafai Bajestan M. and Kashefipoor S.M. (2009). Estimation of scour depth at bridge piers by using FASTER model. *Iran. Soci. Irrig. Water.*, 1(1), 57-68 [In Persian].
- Tsai, C.P., Chen H.B. and You, S.S. (2009). Toe scour of seawall on a steep seabed by

- breaking waves. *J. Waterway, Port, Coast. Ocean Eng.*, 135 (2), 61-68.
- Yeganeh-Bakhtiary, A. Pourzangbar, A. and Hajivalie, F. (2015). Genetic programming to predict scour depth at coastal structures. *J. Civil Environ. Eng.*, 45(1), 116-122 [In Persian].
- Zare M. and Honar T. (2016). The effect of groyne on reduction of the scour depth around bridge piers in river bends. *J. Water Soil Sci.*, 19(74), 167-177 [In Persian].

Archive of SID

Modification of Bridge Piers Scour Depth Equations using Genetic Algorithm

Mehdi Karami Moghadam*¹ and Touraj Sabzevari²

¹Assistant Professor, Department of Agriculture Technology and Engineering Education, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran

²Associate Professor, Department of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran

*Corresponding author: m_karami_mo@yahoo.com

Original Paper

Received: February 05, 2018

Revised: April 15, 2018

Accepted: May 23, 2018

Abstract

One of the main reasons of bridge destruction is the bridge piers scour. A more accurate computation of scour depth would lead to a more solid design of bridge piers. Empirical equations can be applied to compute the scour depth. In this study, the coefficients of 17 empirical equations were optimized using genetic algorithm and fieldwork values. 80% of the field data were used to optimize the equations and the rest were used to verify them. The RMSE, MAE, E and R^2 criteria were applied to evaluate the optimization method where the results showed the ability of genetic algorithm in empirical equations optimization. The Froehlich (1988) equation had the highest degree of precision among the empirical equations, so the genetic algorithm has had the least effect on the optimization of this equation. The optimized Neill (1964), Melville (1975), Laursen and Toch (1956), Blench II (1962) and Hancu (1971) equations with respectively, 75, 72, 71, 71 and 71 percent showed the highest reduction in RMSE error criteria. The optimized Blench II (1962) equation with RMSE, MAE, E and R^2 criteria equal to 0.57 m, -0.085 m, 62 and 0.65 percent respectively, presented the highest correlation coefficient and lowest error. In the end, more equations were proposed to predict the bridge piers scour depth.