

بررسی عملکرد و کارائی روش برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد عمق آبشستگی پایه‌های پل در بسترهای با خاک چسبنده و غیر چسبنده

کیومرث روشنگر^{۱*}، محمدتقی اعلمی^۲ و شبنم میرحیدریان^۳

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۳ کارشناس ارشد مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

چکیده

پیش‌بینی عمق آبشستگی پایه پل برای طراحی ایمن و اقتصادی پل ضروری است. در واقع، آبشستگی نوعی فرسایش در اطراف پایه می‌باشد، که در اثر جریان‌های پیچیده گردابی رخ داده و به صورت کلی باعث ایجاد یک گودال در اطراف پایه‌های پل می‌شود. تاکنون، تحقیقات آزمایشگاهی و صحرایی در زمینه آبشستگی اطراف پایه‌های پل، منجر به ارائه روابط متعدد برای برآورد حداکثر عمق آبشستگی شده است. ولی به دلیل عدم قطعیت در عملکرد، نتایج حاصل از روابط موجود جامع و قابل قبول نمی‌باشد. روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) روش تکاملی نوینی است که به دلیل بالا بودن سرعت همگرایی محاسبات و دقت شبیه‌سازی، در اکثر پدیده‌های طبیعی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق، روش GEP برای تخمین میزان آبشستگی پایه‌های پل در بسترهای با خاک چسبنده و غیر چسبنده مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان دادند که برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در تخمین عمق آبشستگی پایه‌های پل در بسترهای با خاک چسبنده و غیر چسبنده، در مقایسه با معادلات غیر خطی موجود عملکرد مؤثر و کارائی بهتری دارد. همچنین بین معادلات موجود، معادله CSU برای بسترهای با خاک چسبنده و غیر چسبنده و معادله Hancu برای داده‌های بستر با خاک چسبنده منجر به نتایج بهتری شده است. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، عدد فرود پایه بیشترین تأثیر را بر میزان عمق آبشستگی برای بستر با غیر چسبنده در حالت بی‌بعد دارد، اما برای داده‌های میدانی عمق جریان مؤثرتر است.

واژگان کلیدی: آبشستگی موضعی، پایه پل، خاک‌های چسبنده، خاک‌های غیر چسبنده، برنامه‌ریزی بیان ژن، داده‌های میدانی.

۱- مقدمه

آبشستگی به عرض پایه با عدد فرود پایه ارتباط دارد [۲]. Jain و Fischer بر اساس تحقیقات به این نتیجه رسیدند که عدد فرود بالادست پایه‌های پل، در ایجاد آبشستگی از اهمیت خاصی دارد. بر همین اساس، در جریان‌های حاوی رسوب، آبشستگی اطراف پایه‌های دایره‌ای، ابتدا کاهش یافته و سپس با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد [۳]. Grade و Kothyari [۴] مطالعه‌ای بر روی تغییرات زمانی عمق آبشستگی حول پایه‌های دایره‌ای در جریان آب زلال در شرایط جریان دائمی و غیر دائمی انجام داده و رابطه‌ای برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی موضعی ارائه کردند.

امروزه با پیشرفت علم و تکنولوژی، استفاده از سیستم‌ها و نرم‌افزارهای کامپیوتری در محاسبات پیچیده گسترش بسیاری یافته است. از جمله این سیستم‌های کامپیوتری، الگوریتم تکاملی است. الگوریتم‌های تکاملی، روش‌هایی بر مبنای جستجوی تصادفی‌اند که از مدل‌سازی بیولوژیکی طبیعی الگو-برداري شده‌اند. آن‌ها بر روی پاسخ‌های ممکن کار می‌کنند که

پل‌ها به عنوان کلید راه‌های ارتباطی از جمله مهم‌ترین سازه‌های رودخانه‌ای هستند. هر ساله با وقوع سیلاب در هر رودخانه تعداد زیادی از این پل‌ها، درست زمانی که بیش‌ترین نیاز به آن‌ها وجود دارد تخریب می‌گردند. یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین عوامل این تخریب‌ها آبشستگی اطراف پایه‌های پل می‌باشد. به فرسایش کف رودخانه در اثر عبور جریان آب و به وجود آمدن جریان‌های متلاطم موضعی، آبشستگی و نیز به تغییر عمق کف رودخانه ناشی از این فرسایش، نسبت به حالت اولیه، عمق آبشستگی می‌گویند [۱]. تعیین دقیق عمق آبشستگی پایه‌ها، برای طراحی ایمن و اقتصادی پایه‌های پل ضروری است. زیرا تخمین کم عمق آبشستگی ممکن است منجر به تخریب پل و تخمین زیاد منجر به هزینه‌های اضافی گردد.

طی سال‌های اخیر مطالعات متنوعی در زمینه تخمین عمق آبشستگی پایه‌های پل انجام گرفته است. از جمله Shen و همکاران در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که نسبت عمق

می‌شود) و سپس به شکل نهادهای غیر خطی با اندازه‌ها و اشکال متفاوت (یعنی نمایش دیاگرام ساده یا بیان درختی مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک) اظهار می‌شوند [۷].

۲-۱-۲- مراحل اصلی در برنامه‌ریزی بیان ژن

اولین مرحله در الگوریتم GEP، تولید جمعیت اولیه از راه حل‌هاست. این موضوع می‌تواند به وسیله فرآیند تصادفی و یا با استفاده از مقداری اطلاعات درباره مسئله انجام شود. سپس کروموزوم‌ها به صورت بیان درختی نشان داده شده، که این هم مطابق با یک تابع برازش ارزیابی می‌گردد. معمولاً تابع برازش به وسیله پردازش تعدادی از مسئله هدف، که مورد برازش نیز نامیده می‌شوند، ارزیابی می‌گردد. اگر کیفیت رضایت‌بخش از یک راه حل پیدا شود و یا نسل‌ها به تعداد معینی برسند، تکامل متوقف می‌شود و بهترین راه حل یافت شده تا به حال، گزارش داده می‌شود. از طرف دیگر اگر شرایط توقف یافت نشود، بهترین راه حل از نسل حاضر نگهداشته می‌شود (به معنای نخبه‌گزینی است) و بقیه راه حل‌ها به فرآیند گزینشی واگذار می‌شوند. بر اساس گزینش، بهترین افراد شانس بیشتری برای تولید فرزندان دارند. کل این روند برای چندین نسل تکرار می‌شود و با پیش رفتن نسل به جلو، انتظار می‌رود که کیفیت جمعیت نیز به طور متوسط بهبود یابد [۸]. مراحل اصلی برنامه‌ریزی بیان ژن به طور شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است.

۲-۱-۲- عملگرهای برنامه‌ریزی بیان ژن

GEP از روش معروف چرخ-رولت، برای انتخاب افراد استفاده می‌کند. GEP برخلاف GA و GP، چندین عملگر ژنتیکی برای تکثیر افراد با اصلاحات دارد [۸]. تکثیر، عملیاتی است که هدفش نگهداری چندین فرد مناسب از نسل حاضر برای نسل بعدی است. هدف عملگر جهش، بهسازی تصادفی داخل کروموزوم‌های معین است. این عملگر برای جلوگیری از ایجاد افراد معیوب از نظر قواعد، برخی عملیات بدون نقص را اجرا می‌نماید. GEP، مشابه GA، از ترکیب تک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای استفاده می‌کند. نوع ترکیب دو نقطه‌ای تا حدی جالب‌تر است چون می‌تواند نواحی کدگذاری نشده در داخل کروموزوم‌ها را به مراتب زیادی روشن و خاموش کند. به علاوه در GEP نوع دیگری از ترکیب، به نام ترکیب ژنی نیز اجرا می‌شود که در آن‌ها ژن‌ها به طور کامل ترکیب می‌شوند. این عملگر، به طور تصادفی ژن‌ها را در موقعیت یکسانی در دو کروموزوم والد انتخاب می‌کند تا دو فرزند جدید را تشکیل دهد.

از ویژگی برتری برخوردارند و بقای نسل بیشتری دارند؛ لذا تخمین نزدیک‌تری از پاسخ بهینه به دست می‌دهند. الگوریتم تکاملی تفاوت اساسی با دیگر روش‌های بهینه‌سازی دارد. چرا که تنها یک نقطه را جستجو نمی‌کند، بلکه جمعیتی از نقاط را به صورت موازی بررسی می‌نماید و نیاز به اطلاعات ضمنی و دیگر دانش‌های مکمل ندارد. فقط تابع هدف و شایستگی مربوطه در جهت‌های جستجو تأثیر گذارند.

در این تحقیق، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و میدانی، قابلیت و کارایی روش تکاملی برنامه‌ریزی بیان ژن^۱ (GEP) در تخمین عمق آبشستگی پایه‌های پل در مقایسه با روابط تجربی موجود در بسترهای با خاک چسبنده و غیر چسبنده ارزیابی شده و همچنین اثر پارامترهای هیدرولیکی، مشخصات پایه و بستر مورد بررسی قرار گرفته است. تاکنون تحقیقات محدودی در خصوص به کارگیری از روش GEP انجام یافته است. از جمله AYTEK و Kisi [۵] روش جدید GEP را برای فرموله نمودن رابطه رسوبات معلق و دبی روزانه به کار گرفتند که نتیجه مقایسه‌ها توانایی این روش را در تخمین رسوبات معلق تأیید کرد. همچنین AYTEK و همکاران [۶] برای مدل‌سازی بارش-رواناب، دو روش GEP و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)^۲ را مقایسه کردند که نتیجه برتری برنامه‌ریزی بیان ژن را اثبات کرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- برنامه‌ریزی بیان ژن

برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) تعمیم یافته الگوریتم ژنتیک (GA)^۳ است که بر اساس تئوری داروین ارائه شده و توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ ابداع شد. برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) نیز همانند الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)^۴، یک الگوریتم ژنتیکی است که از جمعیتی از افراد استفاده کرده و آن‌ها را مطابق برازندگی انتخاب می‌کند و تغییرات ژنتیکی را با استفاده از یک یا چند عملگر ژنتیکی اعمال می‌نماید. تفاوت اساسی بین این سه الگوریتم، مربوط به ماهیت افراد آن‌هاست؛ به طوری که در GA افراد رشته‌های خطی با طول ثابت (کروموزوم) و در GP نهادهای غیر خطی با اندازه‌ها و اشکال متفاوت (درختان تجزیه) می‌باشند؛ در حالی که در GEP، افراد به صورت رشته‌های خطی با طول ثابت (ژنوم یا کروموزوم) کدگذاری شده (مشابه با آن چه که در الگوریتم ژنتیک استفاده

- 1- Gene Expression Programming
- 2- Artificial Neural Network
- 3- Genetic Algorithm
- 4- Genetic Programming

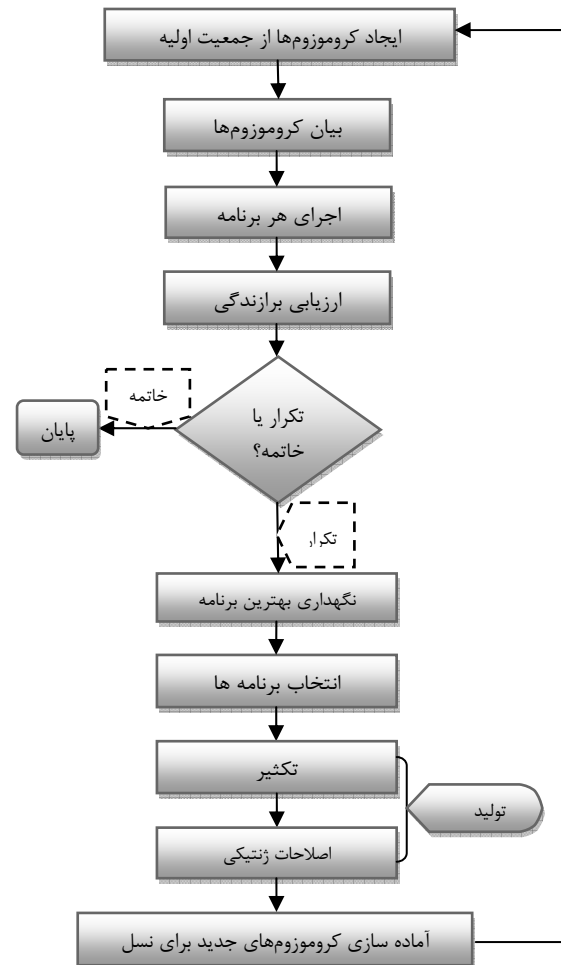
بنابراین برای یک برازش کامل که در آن $P_{ij}=T_j$ است، عبارت داخل قدر مطلق صفر و $f_i=f_{max}=nR$ خواهد شد [۹].

۲-۱-۴- ساختار افراد GEP

۲-۱-۴-۱- ORF^۱ و بیان درختی (ET)^۲ ژن‌ها

در GEP، هر ژن به صورت بیان درختی کدگذاری می‌شود. در مورد کروموزوم‌های چند ژنی، تمامی بیان درختی‌ها با استفاده از تابع پیوند، از محل گره ریشه خود به یکدیگر متصل می‌شوند. هر ژن، ناحیه کدگذاری به نام ORF (چارچوب تفسیر باز) دارد، که بعد از کدگذاری (رمزگشایی) به صورت ET بیان می‌شود و نشان دهنده یک راه حل کاندید، برای مسئله است. شکل (۲) نشان می‌دهد چگونه یک کروموزوم با دو ژن به صورت یک رشته خطی کدگذاری شده و چطور به صورت ET بیان شده است. قابل ذکر است در این مثال هر دو ژن، درست مثل توالی-های ژن‌های بیولوژیکی، نواحی کدگذاری شده (بیان شده) و کدگذاری نشده دارند [۸].

در GEP، کروموزوم‌ها طول ثابتی دارند و از یک یا چند ژن با طول مساوی تشکیل شده‌اند. بنابراین آنچه تغییر می‌کند طول ژن‌ها نیست، بلکه طول ORF است که تغییر می‌کند. در واقع طول ORF ممکن است مساوی یا کمتر از طول ژن باشد. اگر چه در GEP، محل شروع همیشه اولین نقطه از یک ژن است، ولی نقطه انتهایی همیشه منطبق با آخرین محل یک ژن نیست. و نواحی کدگذاری نشده در قسمت بعد از نقطه انتهایی وجود دارد که درحقیقت، ماهیت GEP و قدرت استنتاج آن هستند. چون اجازه اصلاحات و بهسازی ژنوم‌ها را بدون محدودیت، با استفاده از هر عملگر ژنتیکی می‌دهند و همیشه از نظر قواعد برنامه‌های صحیحی را تولید می‌کنند، بدون این که نیاز به فرآیند ویرایشی پیچیده یا روش‌های تحمیلی در جهت اجرای عملگرهای ژنتیکی داشته باشند. در حقیقت این بزرگ‌ترین تفاوت بین GEP و GP با یا بدون ژنوم‌های خطی است.



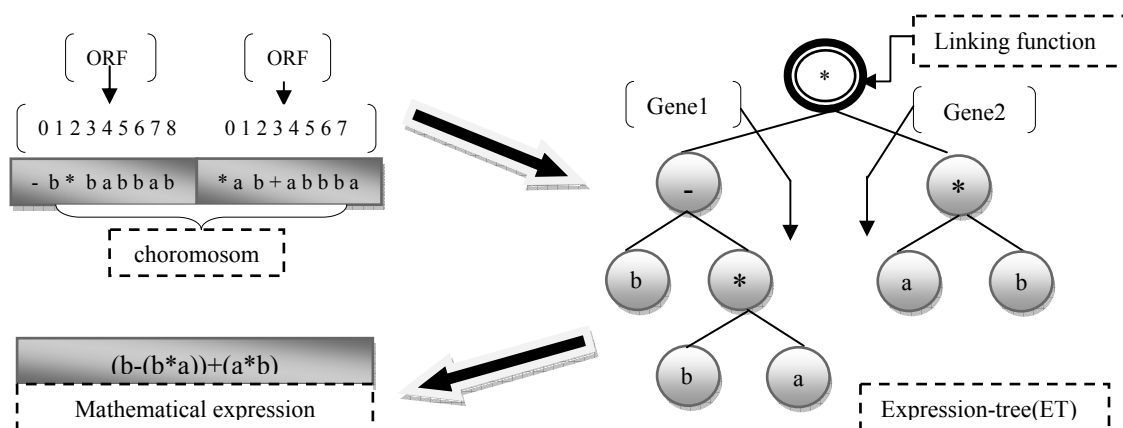
شکل ۱- فلوچارت برنامه‌ریزی بیان ژن

۲-۱-۳- تابع برازش

یکی از موارد مهم در GEP، تعیین تابع برازش است و هدف آن، یافتن راه حلی است که برای تمامی موارد برازش به اندازه یک خطای معین به خوبی عمل کند. از لحاظ ریاضی، برازش f_i از یک برنامه انفرادی i به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود.

$$f_i = \sum_{j=1}^n \left(R - \left| 100 \times \frac{P_{ij} - T_j}{T_j} \right| \right) \quad (1)$$

که در آن R محدوده انتخابی، P_{ij} مقدار پیش‌بینی شده به وسیله برنامه انفرادی i برای مورد برازش j (از میان n مورد برازش) و T_j مقدار هدف برای مورد برازش j است. قابل توجه است که عبارت داخل قدر مطلق متناظر با درصد خطای نسبی است که این عبارت را دقت می‌نامند اگر $P_{ij}=T_j$ باشد، خطا صفر می‌شود.



شکل ۲- کدگذاری به فرم رشته خطی و کدگذاری به صورت ET یک کروموزوم با دو ژن در GEP

کروموزوم در نهایت ۴ ژن در نظر گرفته شده است. همچنین در هر اجرا تعداد ۳۰ کروموزوم انتخاب گردیده است. مرحله چهارم، انتخاب تابع پیوند است که تعیین کننده ارتباط بین زیر درخت‌هاست. در این تحقیق، عملگر جمع، به عنوان تابع پیوند برای پیوند ۴ ژن انتخابی (زیر درخت‌ها یا همان ET ها) تعیین شد.

مرحله پنجم، انتخاب عملگرهای ژنتیکی و نرخ آن‌هاست. در این مورد ترکیبی از کلیه عملگرهای بهسازی از قبیل جهش، وارون‌سازی، سه نوع ترانهش و سه نوع ترکیب استفاده شده است.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در تخمین عمق آبهستگی با استفاده از GEP

مقدار	پارامتر
۷	اندازه سر (Head Size)
۳۰	تعداد کروموزوم‌ها (Chromosomes)
۳-۴-۵	تعداد ژن‌ها در هر کروموزوم‌ها (Number of genes)
۰/۰۴۴	نرخ جهش (Mutation Rate)
۰/۱	نرخ وارون‌سازی (Inversion Rate)
۰/۳	نرخ ترکیب تک نقطه‌ای (One-Point Recombination Rate)
۰/۳	نرخ ترکیب دو نقطه‌ای (Two-Point Recombination Rate)
۰/۱	نرخ ترکیب ژن (Gene Recombination Rate)
۰/۱	نرخ ترانهش درج متوالی (IS Transposition Rate)
۰/۱	نرخ ترانهش ریشه درج (RIS Transposition Rate)
۰/۱	نرخ ترانهش ژن (Gene Transposition Rate)
RMSE	معیار خطای تابع (Fitness Function Error Type)
جمع (+)	تابع پیوند (Linking Function)

۲-۵- طراحی برنامه‌ریزی بیان ژن

در این تحقیق از نرم‌افزار GeneXproTools 4.0 استفاده شد. GeneXproTools نرم‌افزاری برای انواع مدل‌سازی داده‌ها است. روند برآورد عمق آبهستگی پایه پل با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن به صورت زیر می‌باشد:

مرحله نخست، شامل تعیین تابع برازش است. در این تحقیق طول محدوده انتخابی برابر با ۱۰۰ (R=100) و مجموعه‌ای شامل ۱۰ برازش (n=10) انتخاب گردیده است، بنابر این مقدار تابع برازش برابر با ۱۰۰۰ خواهد بود (f_{max}=1000). مزیت این نوع تابع برازش این است که سیستم می‌تواند با استفاده از آن راه حل بهینه را پیدا کند.

مرحله دوم، شامل انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و مجموعه توابع برای ایجاد کروموزوم‌ها است. مجموعه ترمینال‌ها همان متغیرهای مستقل که شامل پارامترهای مختلف تأثیرگذار در برآورد عمق آبهستگی پایه پل می‌باشد. انتخاب مجموعه توابع مناسب نیز کاملاً مشخص نیست و در پژوهش‌های مختلف توابع متفاوتی در نظر گرفته شده است. اما تقریباً در تمامی موارد عملگرهای اصلی حساسی به کار گرفته شده‌اند.

در این تحقیق نیز چهار عملگر {+، -، ×، ÷} به عنوان عملگرهای اصلی و عملگرهای دیگری همچون روابط مثلثاتی {Sin، Cos} و عملگر {Log} به عنوان عملگرهای فرعی انتخاب شدند. بنابراین سه اپراتور زیر مورد ارزیابی قرار گرفت:

$$F1 = \{+, -, \times, \div\}$$

$$F2 = \{+, -, \times, \div, \sin, \cos\}$$

$$F3 = \{+, -, \times, \div, \sin, \cos, \log\}$$

مرحله سوم، انتخاب ساختار کروموزوم‌ها است که شامل طول سر و تعداد ژن‌هاست. طول سر برابر با ۷ (h=7) انتخاب شده و با انجام آزمون و خطا از بین ۳، ۴ یا ۵ ژن در هر

در آزمایشگاه مکانیک سیالات و هیدرولیک دانشگاه مهندسی بنگال و دانشگاه علوم هند انجام دادند، به دست آمد [۱۵]. با پیشفرض اولیه تأثیر تمام پارامترها بر نرخ آبشستگی، پارامترهای اندازه‌گیری شده به صورت تابع زیر در نظر گرفته شد:

$$Y_s = f(\rho, \mu, g, V, D, Y, \tau, D_{50}, C_p, W_c, S_o) \quad (2)$$

که در آن Y_s عمق آبشستگی، ρ جرم مخصوص آب، μ لزجت دینامیکی آب، g شتاب ثقل زمین، V سرعت جریان در بالادست پایه، D قطر پایه، Y عمق جریان در بالادست پایه، τ تنش برشی بستر، D_{50} اندازه متوسط ذرات، S_o شیب بستر، C_p مقدار رس در ترکیب رس-ماسه و W_c درصد آب ترکیب رس-ماسه است. با استفاده از تحلیل ابعادی و انتخاب D ، ρ و μ به عنوان متغیرهای تکراری داریم:

$$Y_s = f\left(Fr_p, Re_p, \frac{Y}{D}, \frac{D}{D_{50}}, \hat{\tau}, C_p, W_c, S_o\right) \quad (3)$$

$$\hat{\tau} = \frac{\tau}{\rho V^2} \quad (4)$$

$$Fr_p = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (5)$$

$$Re_p = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (6)$$

Fr_p عدد فرود پایه، Re_p عدد رینولدز پایه و $\hat{\tau}$ تنش برشی بی-بعد می‌باشد.

دسته‌ی دوم داده‌ها از گزارش آزمایشاتی که سازمان بزرگراه-های آمریکا در خصوص آبشستگی موضعی پایه استوانه‌ای در بستر رسی در مرکز تحقیقات مهندسی در CSU انجام داده بود، تهیه شد [۱۶].

پارامترهای اندازه‌گیری شده برای آبشستگی به صورت تابع (۲) و (۳) در نظر گرفته شد. فقط پارامتر C درصد تراکم رس به جای پارامتر C_p می‌باشد. به عنوان مدل‌های اولیه با ورودی‌های مختلف، هفت مدل مطابق جداول (۳) و (۴) برای داده‌های با بعد و بی‌بعد در بسترهای با خاک چسبنده انتخاب شده است.

پارامترهای مورد استفاده و نرخ آن‌ها در مراحل مختلف استفاده از نرم‌افزار GeneXproTools 4.0 جهت تخمین عمق آبشستگی پایه پل با استفاده از روش GEP در جدول (۱) به طور خلاصه ارائه گردیده است.

۲-۲- معادلات تجربی آبشستگی

تاکنون روابط تجربی و نیمه تجربی متعددی برای برآورد آبشستگی پایه پل ارائه شده است که روابط CSU و فروهلیچ توصیه کاربردی در نرم‌افزار HEC-RAS4 و رابطه CSU توصیه نرم‌افزار HEC-18 است. معادلات تجربی مختلف به کار رفته در این تحقیق در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- معادلات برای تخمین آبشستگی پایه پل

نام محقق یا مؤسسه	شماره منابع	معادلات تجربی
Shen et.al	[2]	$\frac{Y_s}{b} = 11 \times Fr_p^{-2}$, $Fr_p < 0.2$ $\frac{Y_s}{b} = 3.4 \times Fr_p^{-0.67}$, $Fr_p > 0.2$
Hancu	[10]	$\frac{Y_s}{b} = 3.3 \times \left(\frac{D_{50}}{b}\right)^{0.2} \times \left(\frac{Y}{b}\right)^{0.13}$
CSU	[11]	$\frac{Y_s}{b} = 2 \times K_1 \times K_2 \times \left(\frac{b'}{Y}\right)^{0.65} \times Fr^{0.43}$
Froehlich	[12]	$\frac{Y_s}{b} = 0.32 \varphi \times \left(\frac{b'}{b}\right)^{0.65} \times \left(\frac{Y}{b}\right)^{0.46} \times \left(\frac{b}{D_{50}}\right)^{0.08} \times Fr^{0.2} + 1$
Ettema	[13]	$\frac{Y_s}{b} = \left(\frac{Y}{b}\right)^{0.62} \times \left(\frac{b}{D_{50}}\right)^{0.08} \times Fr^{0.2}$
Breusers	[14]	$Y_s = 1.4b$

پارامترهای به کار رفته در جدول (۲):
 K_1 : ضریب شکل پایه، φ : ضریب شکل پایه، K_2 : ضریب زاویه برخورد جریان با پایه
 $K_2 = \left(\sin \theta_p + \frac{l}{a} \cos \theta_p\right)^{0.65}$
 $b' = b \cos \theta_p + l \sin \theta_p$: تأثیر طول پایه و هجوم آب به پایه

۳-۲- داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی

۳-۲-۱- بسترهای با خاک چسبنده

برای بسترهای با خاک چسبنده، دسته اول داده‌ها از آزمایشاتی که Depnath و Chaudhari در خصوص آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های استوانه‌ای برای بستر ترکیب رس-ماسه

دسته دوم از گزارش سازمان نقشه‌برداری آمریکا از پلی با پایه‌های مستطیلی شکل از رودخانه South platte در نزدیکی شهر Masters تهیه شد که دقت عمق آبشستگی اندازه‌گیری شده طبق گزارش، ۰/۵ فوت (حدود ۱۵ سانتی‌متر) می‌باشد [۱۸]. پارامترهای اندازه‌گیری شده به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$Y_S = f(\rho, \mu, g, V, D, D', Y, \tau, D_{50}, \sigma) \quad (9)$$

D عرض مؤثر پایه تحت تأثیر زاویه برخورد جریان با پایه تابع کلی آبشستگی در حالت بی‌بعد به صورت زیر است:

$$Y_S = f\left(Fr_p, Re_p, \frac{Y}{D}, \frac{D}{D_{50}}, \frac{D}{D'}, \hat{\tau}, \sigma\right) \quad (10)$$

به عنوان مدل‌های اولیه با ورودی‌های مختلف، هفت مدل مطابق جداول (۵) و (۶) برای داده‌های با بعد و بی‌بعد در بسترهای با خاک غیر چسبنده انتخاب شده است.

۴-۲- پیش‌پردازش داده‌ها

برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر، روند تقسیم‌بندی داده‌ها به دو دسته آموزش و تست تحت دو الگوی D_1 و D_2 انجام شد:

۱- الگوی D_1 : ۳۰٪ داده‌ها جهت تست و ۷۰٪ داده‌ها جهت آموزش به صورت تصادفی انتخاب شدند.

۲- الگوی D_2 : ۴۰٪ داده‌ها جهت تست و ۶۰٪ داده‌ها جهت آموزش به صورت تصادفی انتخاب شدند.

آموزش نرم‌افزار در صورت اعمال یک سری پیش‌پردازش‌ها بر روی ورودی‌ها و هدف می‌تواند کارایی بالاتری داشته باشد. دو روش استفاده شده برای پیش‌پردازش داده‌ها به شرح زیر است:

$$X = 0.05 + 0.95 \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (\text{الف})$$

$$X = 0.1 + 0.9 \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (\text{ب})$$

جدول ۳- مدل‌های مختلف برای ورودی‌های با بعد

(داده‌ها برای بستر با خاک چسبنده)

مدل	ورودی‌های با بعد	تعداد متغیرها
Model (I)	$(V, D, Y, \tau, D_{50}, S_o, \sigma)$	۸
Model (II)	$(V, D, Y, \tau, D_{50}, \sigma)$	۶
Model (III)	(V, D, Y, D_{50})	۴
Model (IV)	$(Y, \tau, D_{50}, \sigma)$	۵
Model (V)	(D, Y, D_{50}, σ)	۵
Model (VI)	(V, τ, σ)	۳
Model (VII)	(V, D, Y)	۴

جدول ۴- مدل‌های مختلف ورودی حالت بی‌بعد

(داده‌ها برای بستر با خاک چسبنده)

مدل	ورودی‌های بی‌بعد	تعداد متغیرها
Model (I)	$\left(Fr_p, Re_p, \frac{Y}{D}, \frac{D}{D_{50}}, \hat{\tau}, \sigma\right)$	۸
Model (II)	$\left(Fr_p, \frac{Y}{D}, \frac{D}{D_{50}}, \hat{\tau}, \sigma\right)$	۷
Model (III)	$\left(Fr_p, \frac{Y}{D}, \frac{D}{D_{50}}, \sigma\right)$	۵
Model (IV)	$\left(\frac{Y}{D}, \frac{D}{D_{50}}, \hat{\tau}, \sigma\right)$	۳
Model (V)	$\left(Fr_p, Re_p, \frac{Y}{D}\right)$	۴
Model (VI)	$(Fr_p, \hat{\tau}, \sigma)$	۵
Model (VII)	$\left(\frac{D}{D_{50}}, \hat{\tau}, \sigma\right)$	۴

۲-۳-۲- بسترهای با خاک غیر چسبنده

دسته اول داده‌ها از گزارش آزمایشی که سازمان بزرگراه‌های آمریکا در خصوص آبشستگی موضعی پایه استوانه‌ای در بسترهای با خاک غیرچسبنده در مرکز تحقیقات مهندسی در CSU انجام داده بود، تهیه شد [۱۷].

پارامترهای اندازه‌گیری شده به صورت تابع زیر تعریف شد:

$$Y_S = f(\rho, \mu, g, V, D, Y, \tau, D_{50}, S_o, \sigma) \quad (7)$$

که در آن σ توزیع دانه‌بندی مواد بستر است و پارامترهای بی‌بعد به شرح زیر است:

$$Y_S = f\left(Fr_p, Re_p, \frac{Y}{D}, \frac{D}{D_{50}}, \hat{\tau}, S_o, \sigma\right) \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(Y_m - Y_p)^2}{N}} \quad (12)$$

$$MARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\left| \frac{Y_m - Y_p}{Y_m} \right| \times 100 \right) \quad (13)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_m - Y_p| \quad (14)$$

Y_m : عمق آبشستگی اندازه گیری شده

$\bar{Y}_m$: متوسط عمق آبشستگی اندازه گیری شده

Y_p : عمق آبشستگی پیش بینی شده

$\bar{Y}_p$: متوسط عمق آبشستگی پیش بینی شده

۳- نتایج و بحث

جهت بررسی کارائی روش برنامه ریزی بیان ژن، در این تحقیق از چهار سری داده شامل بسترهای با خاک چسبنده و غیر چسبنده استفاده گردید. داده ها به دو دسته ی با بعد و بی بعد تقسیم و مطابق با دو الگوی D_1 و D_2 پیش پردازش شد. همچنین انواع متغیرها در قالب ۷ مدل ورودی مختلف و ۳ ترکیب از عملگرهای متفاوت مورد استفاده قرار گرفت. با انجام شبیه سازی و مقایسه معیارهای ارزیابی در مرحله آموزش و تست برای تمامی مدل ها، مدل برتر برای هر سری داده (هر نوع بستر) به دست آمد. به طور کلی از بین مدل ها، مدلی به عنوان مدل برتر انتخاب شده است که معیارهای جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطاها (MARE) و میانگین قدر مطلق خطاها (MAE) آن نزدیک ترین مقدار به صفر، و ضریب همبستگی (R) آن نزدیک ترین مقدار به یک را دارد. نتایج کلی حاصل از شبیه سازی مدل های مختلف در جدول (۷) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۷) برای بستر با ترکیب رس-ماسه در حالت با بعد، مدل (I) که شامل ۸ متغیر ورودی مطابق جدول (۳) می باشد، به عنوان بهترین مدل انتخاب شده است. همچنین معیارهای ارزیابی این مدل برای مرحله آموزش $RMSE=0.1218$ ، $R=0.909$ ، $MARE=28.3\%$ ، $MAE=0.1044$ و برای مرحله تست $RMSE=0.1961$ ، $R=0.909$ ، $MARE=30.5\%$ و $MAE=0.1474$ است. این مدل به صورت پیش پردازش شده از

جدول ۵- مدل های مختلف برای ورودی های با بعد

(داده ها برای بستر با خاک غیر چسبنده)

مدل	ورودی های بایعد	تعداد متغیرها
Model (I)	$(V, D, Y, \tau, D_{50}, S_o, \sigma)$	۷
Model (II)	$(V, D, Y, \tau, D_{50}, \sigma)$	۶
Model (III)	(V, D, Y, D_{50})	۴
Model (IV)	$(Y, \tau, D_{50}, \sigma)$	۴
Model (V)	(D, Y, D_{50}, σ)	۴
Model (VI)	(V, τ, σ)	۳
Model (VII)	(V, D, Y)	۳

جدول ۶- مدل های مختلف ورودی حالت بی بعد

(داده ها برای بستر با خاک غیر چسبنده)

مدل	ورودی های بی بعد	تعداد متغیرها
Model (I)	$(Fr_p, Re_p, \frac{Y}{D}, \frac{D}{D_{50}}, \hat{\tau}, \sigma)$	۷
Model (II)	$(Fr_p, \frac{Y}{D}, \frac{D}{D_{50}}, \hat{\tau}, \sigma)$	۶
Model (III)	$(Fr_p, \frac{Y}{D}, \frac{D}{D_{50}}, \sigma)$	۴
Model (IV)	$(\frac{Y}{D}, \frac{D}{D_{50}}, \hat{\tau}, \sigma)$	۴
Model (V)	$(Fr_p, Re_p, \frac{Y}{D})$	۳
Model (VI)	$(Fr_p, \hat{\tau}, \sigma)$	۳
Model (VII)	$(\frac{D}{D_{50}}, \hat{\tau}, \sigma)$	۳

۲-۵- معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی و بررسی کارآیی روش استفاده شده برای تخمین عمق آبشستگی، در این تحقیق از معیارهای، جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE)^۱، ضریب همبستگی (R)^۲، میانگین قدر مطلق خطاها (MAE)^۳ و میانگین قدر مطلق نسبت خطاها (MARE)^۴ استفاده شده است.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_m - \bar{Y}_m) \times (Y_p - \bar{Y}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_m - \bar{Y}_m)^2 \times \sum_{i=1}^N (Y_p - \bar{Y}_p)^2}} \quad (11)$$

1- Root mean square error

2- Correlation coefficient

3- Mean absolute error

4- Mean absolute relative error

فرمول ریاضی ساده شده برای محاسبه عمق آبستستگی پایه پل برای داده‌های مورد استفاده در این تحقیق با بستر رسی در حالت بی‌بعد نیز طبق رابطه (۱۶) ارائه شده است:

$$\frac{Y_s}{D} = \frac{0.227}{C_p + W_c} - \frac{C_p \times Fr_p}{1.98} + Fr_p + \frac{\left(\frac{T_s}{\rho V^2}\right)^2 \times \left(\frac{T_s}{\rho V^2} - C_p\right) \times D \times Fr_p}{0.89 \times Y} \quad (16)$$

مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده عمق آبستستگی پایه پل توسط GEP در مرحله تست برای بسترهای با خاک چسبنده در دو حالت با بعد و بی‌بعد در شکل (۳) نشان داده شده است.

برای داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق مطابق جدول (۷)، مدل (VII) برای بسترهای با خاک غیرچسبنده در حالت با بعد منجر به نتایج بهتری شده است که بدون پیش‌پردازش و دارای الگوی D_I و اپراتور نوع ۱ (F_I) می‌باشد. اما در حالت بی‌بعد مدل (III)، دارای متغیرهای عدد فرود پایه، نسبت قطر پایه به اندازه متوسط ذرات، نسبت عمق جریان به قطر پایه و توزیع دانه‌بندی مواد بستر، مدل برتر برای بستر با خاک غیرچسبنده می‌باشد. این مدل به صورت پیش‌پردازش شده از نوع (الف) بوده و دارای الگوی D_I با انتخاب تصادفی ۳۰٪ داده‌ها جهت تست و ۷۰٪ داده‌ها جهت آموزش می‌باشد، و نیز از اپراتور نوع ۳ (F_3)، شامل ۷ عملگر، در آن استفاده شده است.

همانند فرمول‌های ریاضی به دست آمده به منظور محاسبه میزان عمق آبستستگی برای بسترهای با خاک چسبنده، برای بستر با خاک غیر چسبنده نیز با استفاده از نمودارهای درختی حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن و با قرار دادن مقادیر ثابت و متغیرها، فرم ریاضی جهت تخمین عمق آبستستگی پایه پل برای داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق درحالت بی‌بعد به صورت ساده شده در رابطه (۱۷) ارائه گردیده است:

$$\frac{Y_s}{D} = \sin \left(\frac{Y \times \sin \left(\frac{Y}{D} \right)}{D \times \sigma} \right) + \cos \left(\log \left(\frac{D}{D_{50}} \right) \right) + \left(Fr_p \times \cos \left(\frac{D}{D_{50}} \right) \right) + \frac{Y}{D \times (Fr_p + 7.48)} + \cos \left(\sin \left(\frac{Y \times D}{D^2 \times D_{50} \times Fr_p} \right) \right) - \frac{Y}{D} - 1.43 \quad (17)$$

نوع (الف) می‌باشد، که الگوی D_2 ، ۴۰٪ داده‌ها جهت تست و ۶۰٪ داده‌ها جهت آموزش به صورت تصادفی انتخاب شدند و از اپراتور نوع ۲ (F_2)، شامل ۶ عملگر در آن استفاده شده است.

همچنین برای بستر با ترکیب رس-ماسه در حالت بی‌بعد، مدل (VI) که شامل متغیرهای ورودی عدد فرود پایه، عدد رینولدز پایه، مقدار رس در ترکیب رس-ماسه، شیب بستر و درصد آب در ترکیب رس-ماسه می‌باشد، به عنوان بهترین مدل انتخاب شده است که معیارهای ارزیابی برای مرحله آموزش و تست مطابق جدول (۷) است. این مدل به صورت بدون پیش‌پردازش می‌باشد که الگوی D_I ۳۰٪ داده‌ها جهت تست و ۷۰٪ داده‌ها جهت آموزش به صورت تصادفی انتخاب شدند و از اپراتور نوع ۱ (F_I)، شامل ۴ عملگر استفاده شده است. نمودار درختی حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن شامل ۵ زیر درخت (ژن) برای این مدل به دست آمد که با قرار دادن مقادیر ثابت و متغیرها، فرمول ریاضی به منظور تخمین عمق آبستستگی پایه‌ی پل برای داده‌های مورد استفاده در این تحقیق در بستر با ترکیب رس-ماسه در حالت بی‌بعد به صورت ساده شده در رابطه (۱۵) ارائه گردیده است:

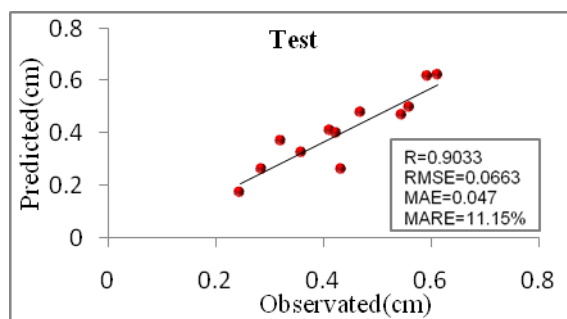
$$\frac{Y_s}{D} = (1.38 \times W_c - C_p) \times (Fr_p - W_c) + 2 \times (Fr_p - C_p) + (C_p + S_o) \times (W_c + C_p) \times (C_p)^2 + W_c - 5.92 \times S_o \quad (15)$$

مطابق جدول (۷) برای داده‌ها با بستر رسی در حالت با بعد مدل (VII) شامل ۴ متغیر ورودی سرعت جریان، درصد تراکم رس، شیب کف و رطوبت نمونه، مدل برتر می‌باشد. این مدل به صورت پیش‌پردازش شده از نوع (ب) بوده که در آن طبق الگوی D_I ۳۰٪ داده‌ها به صورت تصادفی برای مرحله تست و ۷۰٪ داده‌ها جهت آموزش انتخاب شدند، و نیز از اپراتور نوع ۳ (F_3)، شامل ۷ عملگر، در آن استفاده شده است. و نیز مدل (II) شامل متغیرهای درصد تراکم رس، تنش برشی بی‌بعد، نسبت عمق جریان به قطر پایه، عدد فرود پایه، نسبت قطر پایه به اندازه متوسط ذرات، درصد رطوبت و شیب کف برای داده‌ها با بستر رسی در حالت بی‌بعد به عنوان مدل برتر انتخاب شده است.

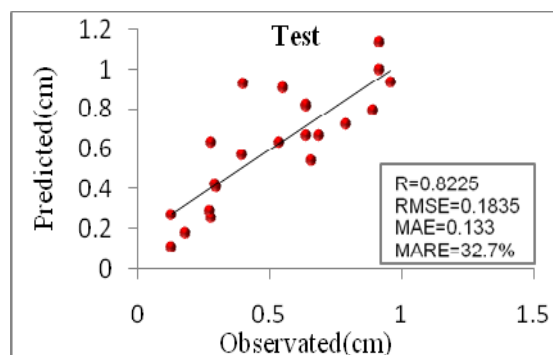
این مدل به صورت پیش‌پردازش شده از نوع (ب) بوده و دارای الگوی D_I با انتخاب تصادفی ۳۰٪ داده‌ها جهت تست و ۷۰٪ داده‌ها جهت آموزش می‌باشد، و نیز از اپراتور نوع ۱ (F_I)، شامل ۴ عملگر، در آن استفاده شده است. با قرار دادن مقادیر ثابت و متغیرها در نمودار درختی حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن،

جدول ۷- جدول کلی برای بهترین مدل‌های انتخاب شده در بسترهای با خاک چسبنده و غیر چسبنده

نوع خاک	ترکیب	نوع داده	مرحله آموزش				مرحله تست				کل		مدل برتر
			R	MARE	MAE	RMSE	R	MARE	MAE	RMSE	R	MARE	
چسبنده	بستر رس	بایعد	۰/۹۰۹	۲۸/۳	۰/۱۰۴	۰/۱۲۱	۰/۷۹۶	۳۰/۵	۰/۱۴۷	۰/۱۹۶	۰/۸۴۹	۳۰/۱	مدل (I)
	ماسه	بی‌بعد	۰/۸۹۶	۳۰/۷	۰/۱۲۳	۰/۱۵۶	۰/۷۸	۲۶/۲	۰/۱۶۲	۰/۱۹۴	۰/۸۶۸	۲۸/۸	مدل (VI)
	بستر رسی	بایعد	۰/۹۷۵	۱۵/۱	۰/۰۴	۰/۰۴۷	۰/۹۳۱	۱۳/۴	۰/۰۵۷	۰/۰۷۸	۰/۹۵۸	۱۴/۶	مدل (VII)
		بی‌بعد	۰/۹۸۶	۱۶/۹	۰/۰۳۶	۰/۰۴۵	۰/۹۰۳	۱۱/۱۵	۰/۰۴۷	۰/۰۶۶	۰/۹۶۶	۱۵/۴	مدل (II)
غیر چسبنده	داده‌های آزمایشگاهی	بایعد	۰/۹	۲۱/۹	۲/۰۹	۲/۸۳	۰/۹۳	۲۰/۸	۱/۵۶	۱/۹۲	۰/۹۰۷	۲۹/۸	مدل (VII)
		بی‌بعد	۰/۸	۳۳	۰/۰۵	۰/۱۵۷	۰/۷۴۷	۲۰/۵۸	۰/۰۹۹	۰/۲۰۶	۰/۸۲۶	۲۹/۴	مدل (III)
	داده‌های میدانی	بایعد	۰/۷۱۳	۲۲/۶	۹/۵۷	۱۱/۹۲	۰/۸۲۴	۶۶/۷	۱۲/۷	۲۳/۷	۰/۷۶۴	۳۳/۳	مدل (I)

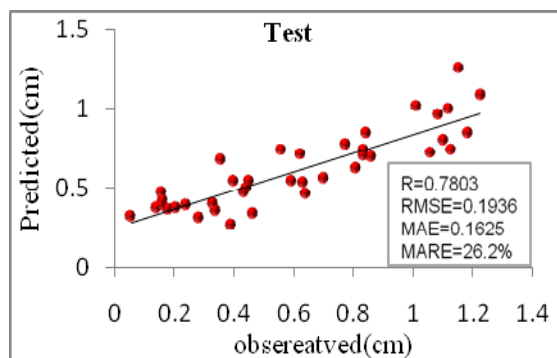


(د)



(الف)

شکل ۳- Y_s مشاهداتی و پیش‌بینی شده در مرحله تست توسط GEP برای بستر با خاک چسبنده: (الف) بستر رس- ماسه حالت بایعد، (ب) بستر رس- ماسه حالت بی‌بعد، (ج) بستر رسی حالت بایعد، (د) بستر رسی حالت بی‌بعد



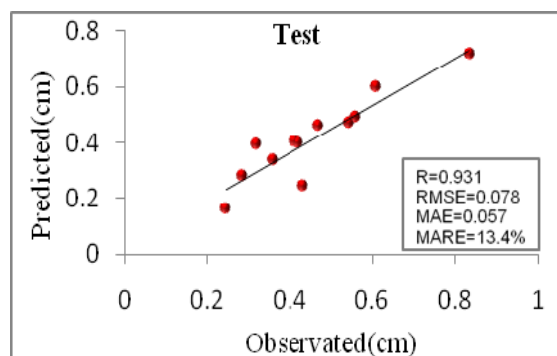
(ب)

برای داده‌های میدانی در حالت با بعد، مدل (I)، شامل ۷ متغیر قطر پایه، عمق و سرعت جریان در بالادست، شیب بستر و توزیع دانه‌بندی مواد بستر تنش برشی، اندازه متوسط ذرات به عنوان ورودی‌های مختلف، بهترین مدل می‌باشد. در حالی که به هنگام بی‌بعد کردن این داده‌ها مدل (III)، مدل برتر است. بنابراین با استفاده از نمودارهای درختی در نهایت فرم ریاضی جهت تخمین عمق آبشستگی پایه‌ی پل برای داده‌های میدانی مورد استفاده در این تحقیق در حالت بی‌بعد به صورت ساده شده در رابطه (۱۸) ارائه گردیده است:

$$\frac{Y_s}{b} = \cos \left(\cos \left(\frac{Y \times \sin \left(\frac{b}{D_{50}} \right)}{b} \right) \right) + \sin \sigma + \cos \quad (18)$$

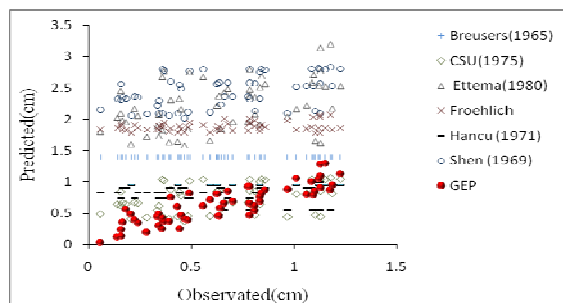
$$\left(\cos \left(\frac{Y}{b} - \sin \left(\cos \left(\sin \frac{b^2 + (Y \times D_{50})}{b \times D_{50}} \right) \right) \right) \right)$$

$$+ \frac{\sigma \times Y \times D_{50} \times \left(\cos \left(\frac{b}{D_{50}} \right) + 5.34 \right) - Fr \cdot p}{\sigma \times b^2}$$

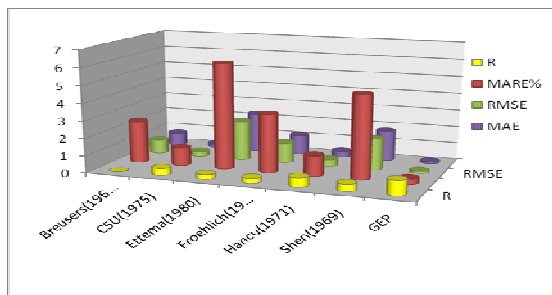


(ج)

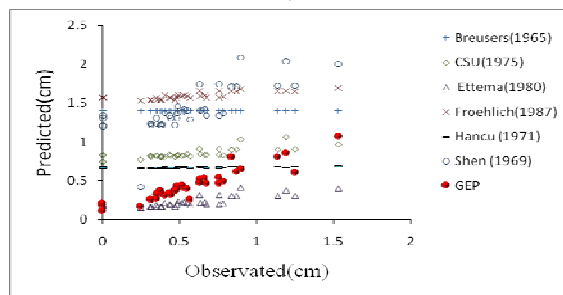
با مقایسه نتایج تخمین عمق آبستگي حاصل از برنامه ریزی بیان ژن و نتایج معادلات تجربی، برتری روش GEP نسبت به روابط تجربی اثبات شد. همچنین معادله CSU برای بستر با خاکهای چسبنده و غیرچسبنده، مطرح در این تحقیق و معادله Hancu برای بسترهای با خاک چسبنده نتایج بهتری نسبت به سایر معادلات داشته‌اند. اشکال (۵) و (۶) عملکرد مناسب GEP را در مقایسه با معادلات تجربی، به ترتیب برای بسترهای با خاک چسبنده و غیر چسبنده نشان می‌دهند.



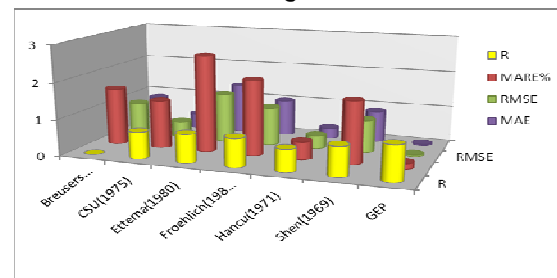
(الف)



(ب)



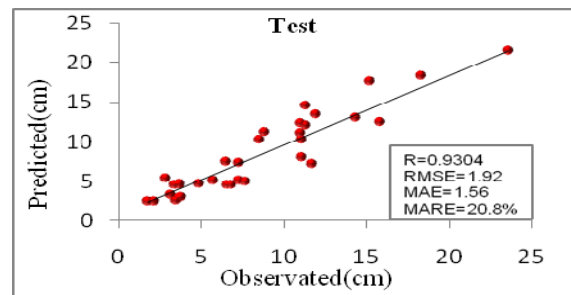
(ج)



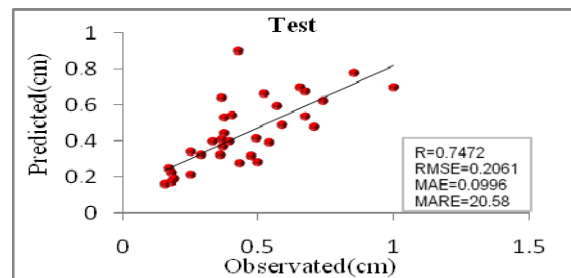
(د)

شکل ۵- عملکرد GEP در مقایسه با معادلات تجربی برای بستر با خاک چسبنده: الف و ب) بستر رس- ماسه، ج و د) بستر رسی

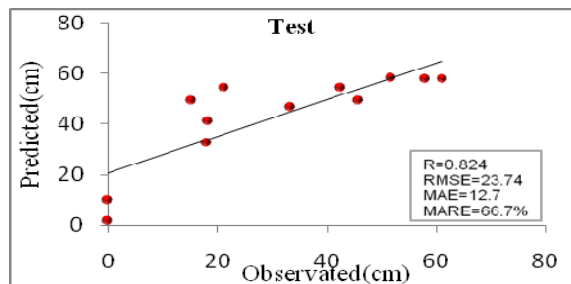
که متغیرهای نسبت عمق جریان به قطر پایه، نسبت قطر پایه به اندازه متوسط ذرات، عدد فرود پایه و توزیع دانه‌بندی مواد بستر در آن استفاده شده است. مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده عمق آبستگي پایه پل توسط GEP در مرحله تست برای بسترهای با خاک غیر چسبنده در دو حالت با بعد و بی بعد در شکل (۴) نشان داده شده است.



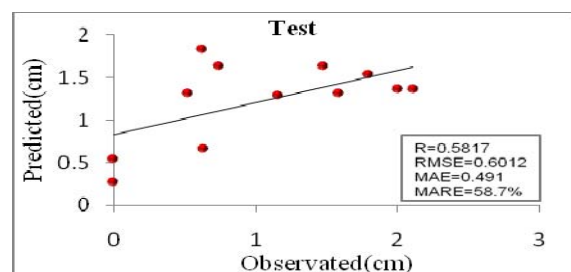
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۴- Y_s مشاهداتی و پیش‌بینی شده در مرحله تست توسط GEP برای بستر با خاک غیر چسبنده:

الف) داده آزمایشگاهی حالت با بعد، ب) داده آزمایشگاهی حالت بی بعد، ج) داده میدانی حالت با بعد، د) داده میدانی حالت بی بعد

مطابق جدول (۸) برای مدل‌های برتر در دو حالت با بعد و بی‌بعد با حذف تک تک پارامترهای مدل، میزان تأثیر هر یک از این پارامترها، در افزایش و کاهش قابلیت و کارایی روش برنامه‌ریزی بیان ژن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل حساسیت نشان دادند که سرعت بیشترین تأثیر را بر روی عمق آبستگي پایه پل برای بسترهای با خاک چسبنده و غیر چسبنده دارد؛ به جز برای داده‌های میدانی که عمق جریان در دو حالت با بعد و بی‌بعد مؤثرتر است.

همچنین برای بستر رس-ماسه و بستر رسی در حالت با بعد رطوبت نمونه و به هنگام بی‌بعد کردن داده‌ها، شیب بستر تأثیر کمی در محاسبه عمق آبستگي دارد و نیز توزیع دانه‌بندی مواد بستر تأثیر کمی در عمق آبستگي برای خاک‌های غیر چسبنده در حالت بی‌بعد دارد.

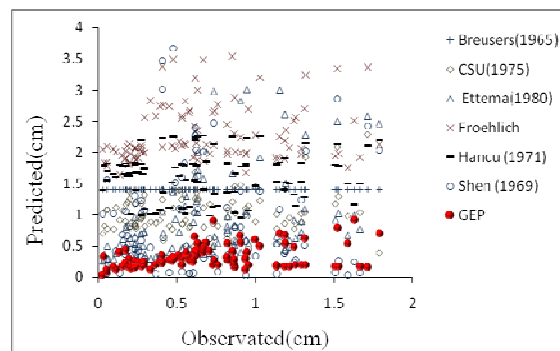
۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، قابلیت و کارایی برنامه‌ریزی بیان ژن برای شبیه‌سازی عمق آبستگي پایه پل مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در مجموع برای بسترهای با خاک چسبنده و غیر چسبنده از داده‌های به دست آمده در آزمایشگاه مکانیک سیالات و هیدرولیک دانشگاه مهندسی بنگال و دانشگاه علوم هند استفاده شد و نیز داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده توسط سازمان بزرگراه‌های آمریکا در خصوص آبستگي موضعی پایه استوانه‌ای در بستر رسی مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت داده‌های میدانی از گزارشی که سازمان نقشه‌برداری آمریکا در مورد پلی با پایه‌های مستطیلی از رودخانه South platte تهیه کرده بود، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که:

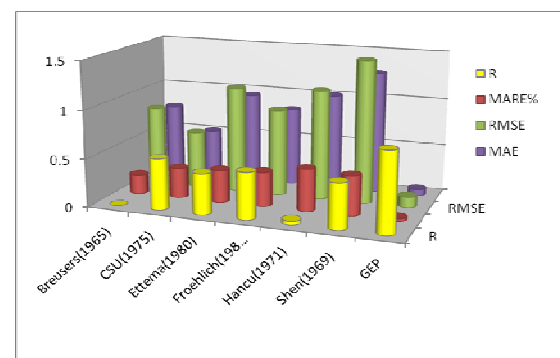
- روش برنامه‌ریزی بیان ژن نسبت به روابط تجربی در تخمین عمق آبستگي پایه‌های پل از قابلیت خوبی برخوردار بوده و همچنین معادله CSU برای بسترهای با خاک چسبنده و غیر چسبنده مطرح در این تحقیق و معادله Hancu برای بستر با خاک‌های چسبنده نتایج قابل قبول‌تری نسبت به سایر معادلات داشته‌اند.

- با توجه به نتایج، الگوی D_1 که در آن ۳۰٪ داده‌ها جهت تست و ۷۰٪ داده‌ها جهت آموزش به صورت تصادفی انتخاب شده است، موجب بهبود عملکرد سیستم GEP می‌شود.

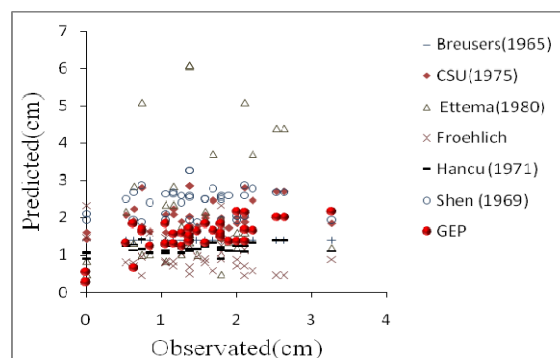
- به طور کلی پیش‌پردازش داده‌ها موجب افزایش کارایی مدل برای بسترهای با خاک چسبنده مورد استفاده در این تحقیق شده است.



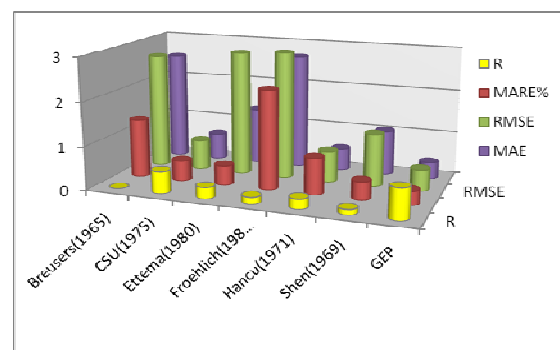
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۶- عملکرد GEP در مقایسه با معادلات تجربی برای بستر با خاک غیر چسبنده: (الف و ب) داده آزمایشگاهی، (ج و د) داده میدانی

ترین تأثیر را در محاسبه عمق آبخستگی پایه پل داشته‌اند. این در حالی است که به هنگام بی‌بعد کردن داده‌ها، شیب بستر کم-ترین تأثیر را بر عمق آبخستگی دارد.

- به طور کلی برای بستر با خاک غیرچسبنده در حالت با بعد، توزیع دانه‌بندی مواد بستر کم‌ترین تأثیر را در تخمین عمق آبخستگی پایه پل دارد.

- برای داده‌های میدانی عمق جریان در بالادست در دو حالت با بعد و بی‌بعد در محاسبه میزان عمق آبخستگی مؤثرتر است.

- با توجه به نتایج، نوع عملگرهای به کار رفته در قالب دو اپراتور F_1 و F_3 موجب بهبود عملکرد سیستم GEP شده است.

- نتایج نشان می‌دهند که به طور کلی برای بسترهای با خاک غیرچسبنده در حالت بی‌بعد، مدل (III) با متغیرهای عدد فرود پایه، نسبت قطر پایه به اندازه متوسط ذرات، نسبت عمق جریان به قطر پایه و توزیع دانه‌بندی مواد بستر مدل مناسبی می‌باشد.

- در داده‌های با بعد مورد استفاده در بستر با خاک چسبنده، سرعت جریان در بالادست پایه بیش‌ترین و رطوبت نمونه کم-

جدول ۸- نتایج آنالیز حساسیت بسترهای با خاک چسبنده و غیر چسبنده

نوع خاک	ترکیب	نوع داده	پارامتری که بیشترین تأثیر را داشته است.	پارامتری که کمترین تأثیر را داشته است.
چسبنده	بستر رس- ماسه	داده با بعد	سرعت (V)	رطوبت نمونه (W_c)
		داده بی‌بعد	رطوبت نمونه (W_c)	شیب بستر (S_0)
	بستر رسی	داده با بعد	سرعت (V)	رطوبت نمونه (W_c)
		داده بی‌بعد	تنش برشی بی بعد ($\hat{\tau}$)	شیب بستر (S_0)
غیر چسبنده	داده‌های آزمایشگاهی	داده با بعد	سرعت (V)	عمق جریان (Y)
		داده بی‌بعد	عدد فرود پایه (Fr_p)	توزیع دانه بندی مواد بستر (σ)
	داده‌های میدانی	داده با بعد	عمق جریان (Y)	شیب بستر (S_0)
		داده بی‌بعد	نسبت عمق جریان به قطر پایه ($\frac{Y}{D}$)	توزیع دانه‌بندی مواد بستر (σ)

۵- مراجع

- [7] Ferreira, C., "Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems", Complex Systems, 2005, 13 (2), 87-129.
- [8] Lopes, H. S., Weinert, W. R., "EGIPSYS: Anenhanced Gene Expression Programming Approach for Symbolic Regression Problems", International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 14 (3), 375-384.
- [9] Ferreira, C., "Automaticlly Defined Functionsin Gene Expression Programming", Genetic Systems Programming: Theory and Experiences, Studies in Computational Intelligence, Springer-Verlag, 2006, pp 21-56.
- [10] Hancu, S., "Sur Le Calcul Des Affouillements Locaux Dans La Zone Des Piles Des Ponts", The 14th International Association of Hydraulic Research Congress, Paris, France, 1971, pp 299-313.
- [11] US Department of Transportation, "Evaluating Scour at Bridges", Federal Highway Administration (FHWA),
- [۱] شفاعی بجستان، م.، "مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال سوب"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۸۷.
- [2] Shen, H. W., Schneider, V. R., Karaki, S. S., "Local Scour around Bridge Piers", ASCE Journal of Hydraulic Division, 1969, 95 (11), 1919-1940.
- [3] Jain, S. C., Fischer, E. E., "Scour around Circular Bridge Pier at High Froude Number", Report of Federal Highway Administration, 1979a, FHWA-RD-79-104, pp 308-317.
- [4] Grade, R. J., Kothiyari, U. C., "Scour Around Bridge Pier", PINSA, 64 (4), 596-580.
- [5] Aytek, A., Kisi, O., "A Genetic Approach Programming to Suspended Sediment Modeling", Journal of Hydrology, 2008, 351, 288-298.
- [6] Aytek, A., Alp, M., "An Application of Artificial Intelligence for Rainfall Runoff Modeling", Journal of Earth System Science, 2008, 117 (2), 145-155.

- [16] Federal Highway Administration, "Experimental Study of Scour around Circular Pier in Cohesive Soils", FHWA- RD-99-186, 1999.
- [17] Federal Highway Administration, "Bridge Scour in Nonuniform Sediment Mixtures and in Cohesive Materials", FHWA-RD-03-083, 2003.
- [18] BSDMS Summary Report, "South Platte River", <http://water.usgs.gov/site-list.htm>, 1984.
- Washington DC, US, 1993.
- [12] Froehlich, D. C., "Local Scour at Bridge Piers from Onsite Measurements", US Geological Survey, Water Resources Division, 1987.
- [13] Ettema, R. E., "Scour at Bridge Piers", Report 216, University of Auckland, Auckland, New Zealand, 1980.
- [14] Breusers, H. N. C., "Scour around Drilling Platforms", International Association of Hydraulic Reserches, 1965.
- [15] Depnath, K., Chaudhuri, S., "Laboratory Experimental on Local Scour around Cylinder for Clay-sand Mixed Beds", Engineering Geology, 2010, 51 (61), 1-11.

EXTENDED ABSTRACT

The Efficiency of Gene Expression Programming Method to Estimate the Scour Depth in Cohesive and Non-Cohesive Soil Beds at the Bridge Piers

Kiyoumars Roushangar*, Mohammad Taghi Aalami, Shabnam Mirheidarian

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Received: 28 November 2012; **Accepted:** 02 July 2013

Keywords:

Local scour, Bridge pier, Cohesive soils, Non-cohesive soils, Gene expression programming

1. Introduction

Bridge pier foundation scour depth prediction for safe and economic design of the bridge is essential. In fact, a type of scour erosion around the pier which is complicated due to vortex flaws occurs and generally causes a trench around the base of the bridge. So far, field and laboratory research of scour around bridge pier and foundations have resulted in presenting the multiple equations for estimation of the maximum depth of scour. The results of the mentioned equations are not generally and acceptable due to the uncertainty about the function.

Gene Expression Programming (GEP) method is the new evolutionary method which can be used in the majority of natural phenomena due to high accuracy computational convergence and stimulation. In this research, GEP method for estimating the bridge pier scouring for cohesive and non-cohesive soil beds has been used. Also, sensitivity analysis has been conducted to prove the effect of various parameters for bridge pier estimating.

2. Methodology

2.1. Gene Expression Programming (GEP)

Generally, the procedure to model bridge pier scouring by using GEP is as follows:

1. Selection of fitness function,
2. Choosing the set of terminals T and the set of functions F to create the chromosomes,
3. Choosing the chromosomal architecture,
4. Choosing the linking function,
5. Choosing the genetic operators.

2.2. Semi empirical methods

Numerous empirical formulae have been presented to estimate equilibrium scour depth at bridge piers, including Shen et al. [1], Hancu [2], US Department of Transportation [3], Froehlich [4], Ettema [5] and Breusers [6].

2.3. Laboratory and field data

a) Cohesive soils: for cohesive soil beds we used two sets of laboratory data from references. For clay soils, 38 data patterns derived from the experiments of Federal Highway Administration [7] in three different test flumes were applied and for clay-sand mixtures, 56 data patterns captured from experimental studies of Debnath and Chaudhuri [8] were used.

b) Non-cohesive soils: 105 data patterns collected from experimental studies of Federal Highway Administration [9] in three different test flumes were applied, and 39 field data patterns collected by U.S. Geological Survey were applied (BSDMS Summary Report [10]).

* Corresponding Author

E-mail addresses: roshangari@tabrizu.ac.ir (Kiyoumars Roushangar), mtaalami@tabrizu.ac.ir (Mohammad Taghi Aalami), shabnam_shm15@yahoo.com (Shabnam Mirheidarian).

The scour around bridge piers is so complicated, because it depends on many variables such as characteristics of the water flow, piers and bed materials; and studying the impact of all of them simultaneously is extremely difficult and impossible. Hence, we organized 7 input models included off different parameters that represented in the references. Then all of the datasets were divided to dimensional and dimensionless forms using dimensional analysis.

In order to introduce the data inputs to models, a trial and error procedure was used to obtain the best percent of data blocks for training and testing stages. In this paper two modes were considered that includes 30–70 (i.e. 30% of data for validation and 70% of them for calibration) that was called D_1 and 40–60 modes that was called D_2 .

3. Results and discussion

The performances of GEP model were assessed through using four statistical measures, namely, the correlation coefficient (R), the root mean square error (RMSE), the mean absolute error (MAE) and the mean absolute relative error (MARE). The results are presented in Table 1.

Table 1. Total schedule for the best selected models in the cohesive and non-cohesive soil beds

Types of soil	Kind of data	Dataset	Training phase				Testing phase				Total		Best model
			RMSE	MAE	MARE	R	RMSE	MAE	MARE	R	MARE	R	
Cohesive	clay–sand	dimensional	0.121	0.104	28.3	0.909	0.196	0.147	30.5	0.796	30.1	0.849	Model (I)
		dimensionless	0.156	0.123	30.7	0.896	0.194	0.162	26.2	0.78	28.8	0.868	Model (VI)
	clay	dimensional	0.047	0.04	15.1	0.975	0.078	0.057	13.4	0.931	14.6	0.958	Model (VII)
		dimensionless	0.045	0.036	16.9	0.986	0.066	0.047	11.15	0.903	15.4	0.966	Model (II)
Non-cohesive	Laboratory data	dimensional	2.83	2.09	21.9	0.9	1.92	1.56	20.8	0.93	29.8	0.907	Model (VII)
		dimensionless	0.157	0.05	33	0.8	0.206	0.099	20.58	0.747	29.4	0.826	Model (III)
	field data	dimensional	11.92	9.57	22.6	0.713	23.7	12.7	66.7	0.824	33.3	0.764	Model (I)
		dimensionless	0.427	0.336	22.6	0.684	0.601	0.491	58.7	0.582	31.3	0.704	Model (III)

Comparing the results of estimating the scour depth with GEP and empirical equations confirms the superiority of GEP method as shown in Fig. 1.

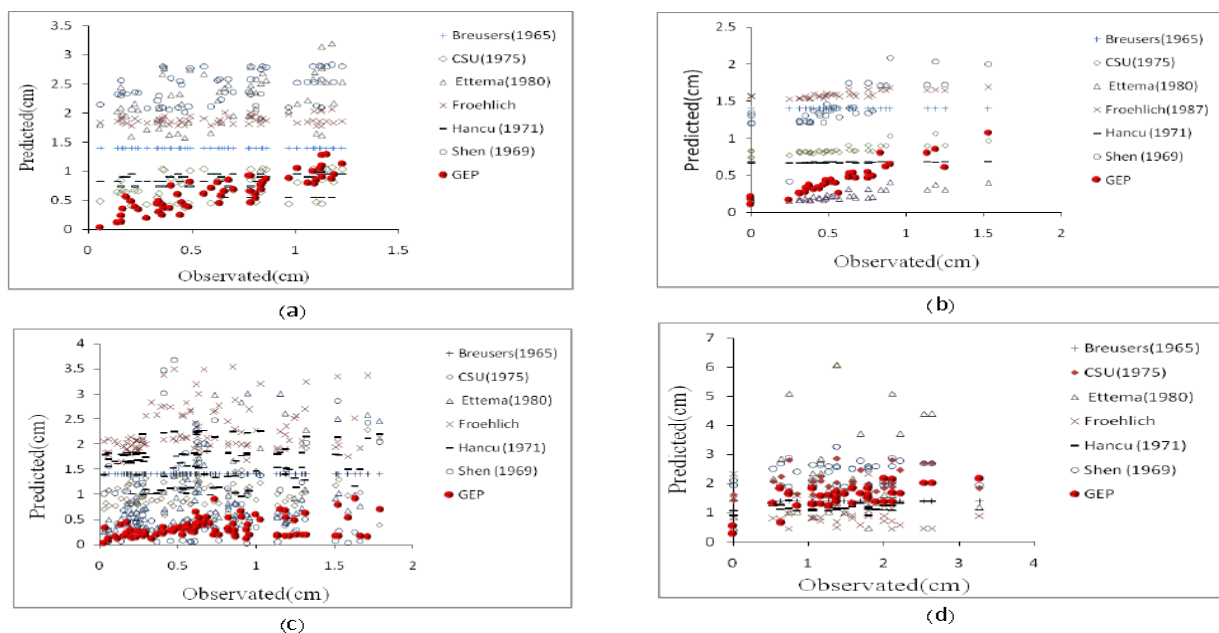


Fig. 1. Comparing the results of GEP and empirical equations with measured data: (a) clay-sand Cohesive soil beds, (b) clay sand cohesive soil beds, (c) Laboratory data for non-cohesive soil beds, (d) field data for non-cohesive soil beds

Also the results of sensitivity analysis are shown in Table 2.

Table 2. Results of the sensitivity analysis for both cohesive and Non-cohesive soil beds

Type of soil	Kind of data	Dataset	The most effective parameter	Parameter with the least effect
cohesive	Clay-sand	dimensional	depth averaged velocity (v)	water content (W_c)
		dimensionless	water content (W_c)	bed slope (S_0)
	clay	dimensional	depth averaged velocity (v)	water content (W_c)
		dimensionless	dimensionless bed shear strength (τ)	bed slope (S_0)
non-cohesive	laboratory data	dimensional	depth averaged velocity (v)	approach flow depth (Y)
		dimensionless	Pier Froude number (Fr_p)	denotes the non-uniformity parameter (σ)
	field data	dimensional	approach flow depth (Y)	bed slope (S_0)
		dimensionless	dimensionless approach flow depth (Y/D)	denotes the non-uniformity parameter (σ)

4. Conclusions

In this research, GEP method for estimating the bridge pier scouring for cohesive and non-cohesive soil beds was used. Stimulation results showed that the Gene Expression Programming (GEP) model in comparison with the nonlinear equations was found to be more effective in estimating the scour depth at bridge piers in cohesive and non-cohesive soil beds. Also, between the equations, the CSU equation led to better results for both cohesive and non-cohesive soil beds and Hancu equation was in good agreement with cohesive soil beds data. Based on sensitivity analysis, flow velocity in dimensional data had the most influence on scour depth for cohesive and non-cohesive soil beds; however, flow depth was more influential on field data.

5. References

- [1] Shen, H. W., Schneider, V. R., Karaki, S. S., "Local Scour around Bridge Piers", ASCE Journal of Hydraulic Division, 1969, 95 (11), 1919-1940.
- [2] Hancu, S., "Sur Le Calcul Des Affouillements Locaux Dans La Zone Des Piles Des Ponts", The 14th International Association of Hydraulic Research Congress, Paris, France, 1971, pp 299-313.
- [3] US Department of Transportation, "Evaluating Scour at Bridges", Federal Highway Administration (FHWA), Washington, DC, US, 1993.
- [4] Froehlich, D. C., "Local Scour at Bridge Piers from Onsite Measurements", US Geological Survey, Water Resources Division, US. 1987.
- [5] Ettema, R. E., "Scour at bridge piers", Report 216, University of Auckland, Auckland, New Zealand, 1980.
- [6] Breusers, H. N. C., "Scour around Drilling Platforms", International Association of Hydraulic Researches, 1965.
- [7] Federal Highway Administration, "Experimental Study of Scour around Circular Pier in Cohesive Soils", Vol. 4, No. FHWA-RD-99-186, US, 1999.
- [8] Depnath, K., Chaudhuri, S., "Laboratory Experimental on Local Scour around Cylinder for Clay-Sand Mixed Beds", Engineering Geology, 2010, 51 (61), 1-11.
- [9] BSDMS Summary Report, "South Platte River", <http://water.usgs.gov/site-list.htm>, 1984.