

یادداشت تحقیقاتی

پیش بینی مقاومت برشی پانچ در دال های دوطرفه با استفاده از الگوریتم برنامه نویسی ژنتیک و برنامه نویسی جغرافیای زیستی

اشکان آقامحمدی^۱، احسان درویشان^{۲*}

۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۲ استادیار، گروه عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

darvishan@riau.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۷/۱۰/۳]

تاریخ پذیرش: [۹۸/۴/۱۸]

چکیده

دال های دو طرفه بتن آرمه یکی از سیستم های مرسوم سازه ای هستند. مزایای این دال ها باعث کاربرد زیاد آنها در صنعت ساختمان شده است. ولی این سیستم ها با مشکلاتی مانند برش پانچ مواجه هستند. روابط موجود برای پیش بینی برش پانچ بر اساس نتایج آماری آزمایش های موجود در پژوهش های گذشته بدست آمده اند. با این حال این روابط تقریبی بوده و دارای خطای بالا هستند. هدف اصلی این مقاله معرفی روشی قابل اعتماد و کاربردی برای محاسبه برش پانچ برای دال های نازک و ضخیم با استفاده از هوش مصنوعی است. برای این کار از برنامه نویسی ژنتیک و برنامه ریزی جغرافیای زیستی برای پیدار کردن رابطه بین ظرفیت برش پانچ و پارامترهای موثر بر آن استفاده شده است. ابتدا ۲۶۷ داده آزمایشگاهی موجود جمع آوری شده است. سپس با استفاده از روش های مذکور رابطه ای برای پیش بینی مقاومت برش پانچ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که روش های مبتنی بر هوش مصنوعی قادرند با خطای متوسط کمتر از ۲٪ در مقابل خطای ۱۴ الی ۲۸ درصدی روابط سنتی آیین نامه ها مقاومت برش پانچ را پیش بینی کنند.

واژگان کلیدی: برش پانچ، دال دوطرفه، الگوریتم ژنتیک، برنامه نویسی ژنتیک، هوش مصنوعی

۱- مقدمه

ستون باعث می شود این سیستم ها مستعد خرابی پیش رونده باشند. از آنجا که عوامل زیادی بر مقاومت برش پانچ دال ها تاثیر می گذارد، بررسی و پژوهش روی این سیستم ها بسیار اهمیت دارد.

تاکنون برای پیش بینی مقاومت برش پانچ دال ها روابط مختلفی در آیین نامه های طراحی ارائه شده است. با این حال این روابط

دال های بتنی یکی از مهمترین اجزاء سازه های بتن آرمه به حساب می آیند که نه تنها نقش نگهداری بارهای قائم و انتقال آن ها به تکیه گاه ها را دارند بلکه در هنگام زلزله، همراه با سایر اجزاء سازه به عنوان جزیی از سیستم مقاوم در مقابل نیروهای جانبی عمل می کنند. خطر شکست ترد پانچ در اتصالات دال

سنتی دارای خطای بالا بوده و مقادیر برش را دست بالا تخمین می‌زنند. به تازگی با پیشرفت تکنولوژی و بالا رفتن توان محاسباتی کامپیوترها، استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در این زمینه مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم‌های ژنتیک و روش‌های فازی اشاره کرد [1-6].

آگاروال و همکاران [7] از داده‌کاوی برای پیش‌بینی ظرفیت برش پانچ دال‌های بتنی استفاده کردند. آنها با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، شبکه عصبی تعمیم یافته و رابطه فازی توانستند ظرفیت برش پانچ را محاسبه کنند. صفایی و آشور [8] از شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین ظرفیت برش پانچ دال‌ها استفاده کردند. آنها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی پژوهش‌های قبلی توانستند شبکه‌ای را آموزش دهند که دارای خطای کمتری از روابط موجود سنتی است. اکبرپور و اکبرپور [9] از رابطه بهنگام شونده عصبی-فازی برای مدل سازی رابطه مقاومت برش پانچ دال‌های بتنی دوطرفه استفاده کردند. آنها اثر پارامترهایی مانند مقاومت فشاری، عمق موثر دال، درصد فولاد، مقطع ستون و مقاومت آرماتورها را به عنوان متغیرهای موثر بر مقاومت پانچ بررسی کردند. هوانگ [10] از ترکیب برازش چندخطی و شبکه عصبی مصنوعی برای پیدا کردن رابطه‌ای بین مقاومت برش پانچ دال‌های تقویت شده با الیاف و متغیرهای موثر بر آن استفاده کرد. هوانگ و همکاران [11] دقت روابط سنتی آیین‌نامه‌ها را با رابطه حاصل از یک روش ترکیبی مبتنی بر یادگیری آنی وزنی بهنگام شونده و شبکه عصبی مصنوعی مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که روش جدید دارای دقت بالاتری در تخمین ظرفیت برش پانچ دال است.

اگرچه شبکه‌های عصبی مصنوعی در تعداد زیادی از پژوهش‌ها به عنوان یک ابزار پیش‌بینی کننده به کار رفته‌اند. با این حال این شبکه‌ها در هنگام آموزش ممکن است دچار منیمم‌های محلی شوند که همگرایی آنها را با مشکل مواجه می‌کند [12]. از طرف دیگر، روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های ژنتیک نیز به علت استفاده از کروموزوم‌ها با طول ثابت دارای مشکلاتی برای یافتن اکسترمم‌های کلی هستند. یکی از روشهایی که می‌تواند

جایگزین روشهای سنتی شود روش برنامه نویسی ژنتیک^۱ (GP) است. این روش می‌تواند به طور خودکار متغیرها را انتخاب کرده و در نتیجه روابط غیرخطی را به خوبی مدل کند [13]. روش دیگری که به تازگی معرفی شده است روش برنامه ریزی جغرافیای زیستی^۲ (BBP) است که برخلاف سایر روش‌ها دارای رویکرد دامنه متغیر است و می‌تواند کل کلاس مسائل مشابه را حل کند [14]. با این حال این دو روش تاکنون برای پیش‌بینی ظرفیت برش پانچ دال‌های دوطرفه استفاده نشده‌اند.

هدف از این مقاله پیش‌بینی ظرفیت برش پانچ دال‌های دوطرفه با استفاده از هوش مصنوعی است. برای این کار از روش‌های برنامه‌نویسی استفاده شده است. کاربرد اصلی این روش‌ها در رگرسیون‌گیری است. در واقع این روش‌ها با استفاده از جستجوی هدفمند در یک فضای جستجو یک رابطه ریاضی بین ورودی و خروجی پیدا می‌کنند. در این مقاله از یک روش شناخته شده (روش GP) که در پژوهش‌های مشابه به کرات استفاده شده و یک روش جدید (روش BBP) که تاکنون در پژوهش‌های اندکی به کار رفته، استفاده شده است. روش BBP در مقایسه با GP از توزیع جغرافیایی گونه‌ها و چگونگی مهاجرت آنها در اکوسیستم الگوبرداری شده است که پژوهش‌های اندک انجام شده روی آن نشان از برتری‌های نسبی این روش نسبت به سایر روش‌های رایج دارد. در ابتدا ۲۶۷ داده آزمایشگاهی [15-34] از پژوهش‌های گذشته جمع‌آوری شده و پارامترهای موثر بر برش پانچ دال‌ها مشخص شده‌اند. سپس با استفاده از روش GP و BBP رابطه‌ای بین این متغیرها و ظرفیت برش پانچ دال بدست آمده است.

۲- روابط تجربی موجود

از اولین روابط پیشنهادی برای برش پانچ می‌توان به رابطه مورچ [35] اشاره کرد. او یک مدل درباره تنش مورب پیشنهاد کرد و رابطه (۱) را برای تنش برشی ارائه داد.

$$\nu = \frac{V}{bd} \quad (1)$$

1 Genetic Programming (GP)

2 Biogeography-Based Programming (BBP)

اتصالات پیشنهاد کردند، آنها معادله (۴) را برای مقاومت برشی پانچ پیشنهاد دادند.

$$p_{vs} = 1.66\sqrt{f_c} 9(c+d)d^4 \sqrt{100\rho} \quad (۴)$$

که در آن f_c مقاومت مشخصه بتن، c طول ضلع ستون، d عمق موثر و ρ درصد آرماتور است. در همین راستا در سال‌های بعد روابط جدیدی برای اصلاح این رابطه معرفی شد که منجر به ارائه روابط موجود برای برش پانچ توسط آیین‌نامه‌های طراحی شد. از شناخته شده ترین این روابط می توان به رابطه ACI318 [39] و EC2 [40] اشاره کرد.

$$v_c = 0.33\lambda\sqrt{f_c} \quad (۵)$$

$$v_{Rd,c} = c_{Rd,c} k (1000\rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \quad (۶)$$

در این روابط λ ضریب اصلاح، $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$ ، ρ_1 درصد فولادی کششی محصور شده، f_{ck} مقاومت مشخصه بتن،

$$\rho_{ly} \text{ و } \rho_{lz} \text{ که } \rho_1 = \sqrt{\rho_{ly} \cdot \rho_{lz}} \leq 0.02, k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0$$

فولاد کششی محصور شده در جهات y و z است، و σ_{cp} تنش های نرمال بتن در مقطع بحرانی است.

که V نیروی برشی، v تنش برشی، b محیط مورد بارگذاری و d عمق موثر است. پس از آن تالبوت [36] آزمایش‌هایی روی ۱۱۴ پایه دیوار و ۸۳ پایه ستون انجام داد و نتیجه گرفت که منطقه عمودی قرار گرفته در فاصله d از سطح ستون، منطقه بحرانی است. او رابطه (۲) را برای برش پانچ پیشنهاد داد که در آن c طول ضلع ستون است.

$$v = \frac{V}{4(c+2d)d} \quad (۲)$$

میر [37] تعداد ۴۳ دال ۶ فوتی مربعی را بررسی کرد و به این نتیجه رسید که تمرکز تقویت کننده‌های خمشی نتیجه‌ای در افزایش مقاومت برشی ندارد اما سختی که از تغییر شکل بار حاصل می‌شود را افزایش می‌دهد. او معادله زیر را برای مقاومت برشی نهایی پیشنهاد داد

$$v = \frac{V_u}{bd} \left[15 \left(1 - 0.75 \frac{c}{d} \right) - 5.25 \phi_0 \right] \sqrt{f_c} \quad (۳)$$

که در آن f_c مقاومت مشخصه بتن و ϕ_0 نسبت بار نهایی به بار خرابی است. در یک پژوهش دیگر رانکین و لانگ [38] یک روش برای مشخص کردن مقاومت برشی پانچ در اتصالات ستون و دال بر اساس مفهوم عقلانی مودهای خرابی این

شکل ۱: چگونگی ترکیب و جهش ژنتیکی در روش GP [13]

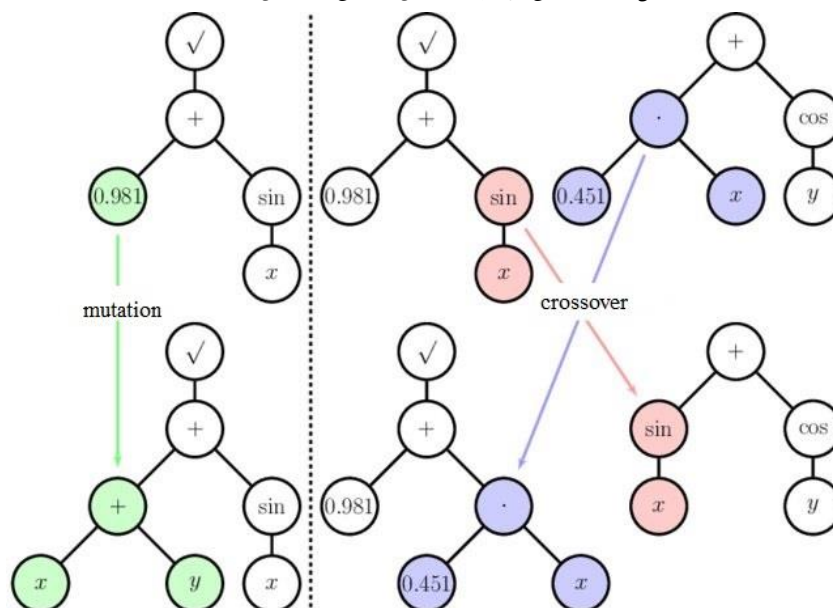


Fig. 1. Crossover and mutation in GP [13]

شکل ۲: چگونگی مهاجرت زیستگاه ها و ایجاد زیستگاه جدید در روش BBP [14]

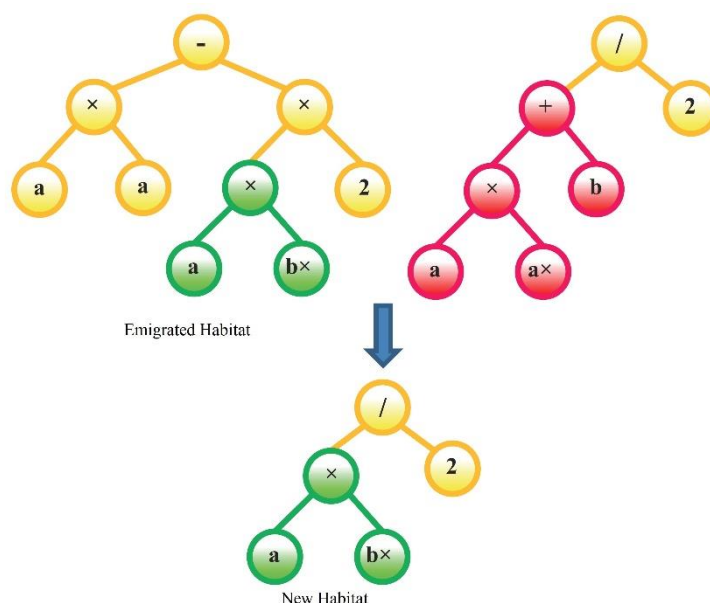


Fig. 2. Emigration and new habitats in BBP [14]

۳-تابع برازندگی

۴-تابع انتخاب

۵-عملگر ادغام

۶-عملگر جهش

۴- الگوریتم های استفاده شده

۴-۱- الگوریتم برنامه نویسی ژنتیک

GP شاخه ای از هوش مصنوعی است. ایده این روش از نظریه تکامل طبیعت الهام گرفته شده و بر اساس وراثت طبیعی استوار است. در واقع GP یک روش خودکار و مستقل قلمروها برای حل مسائل است. این روش کار خود را با تعداد زیادی جواب های تصادفی شروع کرده و با اعمال اصل انتخاب طبیعی داروین شامل بازترکیب، جهش، تکثیر ژن، و دیگر سازوکارهای بیولوژیکی این جواب های اولیه را تکامل می دهد. بنابراین پس از چند نسل جمعیت بهتری تولید می شود. این روش در حقیقت شاخه ای از الگوریتم ژنتیک^۱ به حساب می آید. تفاوت عمده این روش با الگوریتم ژنتیک در فرم جواب بدست آمده است. تغییرات کوچکی در عملگرهای الگوریتم ژنتیک مانند جهش، باز تولید و ارزیابی تابع هزینه برای استفاده از آنها در GP، مورد نیاز هستند. هر عضو در جمعیت اولیه برنامه ریزی ژنتیک، از تعدادی تابع تصادفی و ترمینال تشکیل یافته است. نمونه هایی از این توابع تصادفی، عملیات جمع، تفریق، تقسیم، ضرب و توابع مثلثاتی هستند. ترمینال ها نیز شامل متغیرها و ثابت های برنامه هستند. به طور کلی مراحل الگوریتم برنامه ریزی ژنتیک به شکل زیر است [13]

۱-تولید جمعیت تصادفی

۲-مجموعه پایانه ها و توابع

جدول ۱. پارامترهای آماری مشخصات دال های دو طرفه

parameter	min	max	median	standard deviation
column dimension	80	520	205.01	79.63
effective depth	35	500	126.71	72.38
rebar ration	0.25	5.01	1.20	0.76
compressive strength	13.2	130.1	41.41	24.14
yielding stress	294	720	484.33	99.09
punching shear	36	2681	478	504.51

Table 1. Statistical parameters of properties of two-way slabs

می توان گفت برنامه نویسی ژنتیک مراحل زیر را برای رسیدن به

جواب های مسئله طی می کند

(۱) ایجاد یک مجموعه تصادفی از داده با استفاده از توابع

نمادین همراه با پایانه های ثابت و نمادین

(۲) ارزیابی هر عبارت تولید شده با مقدار تابع برازندگی از پیش

تعریف شده برای بهینه سازی که توانایی عبارت را برای حل

مسائل اندازه می گیرد

۳) استفاده از برخی روش های انتخاب از قبل تعریف شده برای انتخاب برخی والدین برای ترکیب

۴) ترکیب ژنتیکی والد های انتخاب شده با عملگر تولید مثل برای تولید جمعیت جدید

۵) اعمال عملگر جهش روی این جمعیت جدید

۶) تکرار گام دوم تا رسیدن به شرایط پایانی از قبل تعریف شده با رسیدن به بیشینه تعداد نسل ها

۷) جواب مسئله، الگوریتمی است با مقدار بهترین برازندگی در تمام نسل ها.

به عنوان نمونه، شکل (۱) چگونگی ترکیب و جهش ژنتیکی را در برنامه نویسی ژنتیک نشان می دهد. درخت سمت چپ تابع $f(x,y) = 0.981 + \sin(x)$ را نشان می دهد. جهش با انتخاب یک زیر درخت (در اینجا گره 0.981) و جایگزینی آن با یک درخت جدید انجام می شود. به همین ترتیب عملگر ترکیب (درخت سمت راست) دو زیر درخت را با یکدیگر جابه جا می کند.

۴-۲ الگوریتم برنامه ریزی جغرافیای زیستی

مشابه سایر الگوریتم های برنامه ریزی خودکار، هدف الگوریتم BBP رسیدن به یک عبارت ریاضی صریح بین یک یا چند ورودی و یک خروجی با استفاده از توابع ریاضی، متغیرها و ثابت ها است. فرآیند برنامه ریزی، زیر مجموعه ای از شناسایی تابع سمبولیک یا نمادین است و تفاوت آن با برازش معمولی در آن است که این روش ضرایب توابع را محاسبه نمی کند، در واقع روش برنامه ریزی جغرافیای زیستی با یک جستجوی گسترده و ساختار یافته در یک فضای جستجو در حال تکامل، معادلات را پیدا می کند. هدف یافتن زیستگاهی با عملکرد خوب برای کلیه الگوها در پایگاه داده با حداقل خطا است. BBP یک الگو را به عملگرهایی مانند تولید تصادفی، جهش و مهاجرت فراهم می آورد که زیستگاه ها را در جمعیت تولید، تغییر و انتخاب می کند. این روند با ذخیره روابط در ساختار های داده درختی در حافظه کامپیوتری، انجام می شود. ساختارهای درختی به راحتی می توانند بخش هایی از برنامه را مبادله کرده و آنها را اضافه یا حذف نمایند. عملیات اجرا شده

توسط عملگرهای جغرافیای زیستی انجام می شود. عملگر مهاجرت به طور شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است [14]. به طور کلی مراحل الگوریتم به شکل زیر است:

۱- ایجاد جمعیت اولیه

۲- ارزیابی راه حل ها

۳- تعیین نرخ مهاجرت

۴- ایجاد و ارزیابی راه حل های جدید با استفاده از عملگر مهاجرت

۵- ایجاد و ارزیابی راه حل های جدید با استفاده از عملگر جهش

۵- داده های استفاده شده و مشخصات آنها

برای پیش بینی مقاومت برشی پانچ در دال های دو طرفه از ۲۶۷ آزمایش صورت گرفته روی دال های دوطرفه بدون تقویت کننده های برشی بهره گرفته شده است. مشخصات دال های بتنی استفاده شده در این مقاله شامل ابعاد ستون، عمق موثر، مقاومت فشاری بتن، درصد آرماتور و تنش تسلیم فولاد است. جدول (۱) مقادیر پارامترهای آماری آزمایش های استفاده شده را نشان می دهد. مطابق جدول، این مقادیر، گستره نسبتاً بزرگی از داده ها را شامل می شود که باعث افزایش قابلیت اعتماد مدل سازی خواهد شد.

۶- ساخت مدل

برای پیش بینی مقاومت برشی پانچ در دال های دو طرفه از نرم افزار MATLAB [41] استفاده شده است. همان گونه که در بخش های پیشتر گفته شد در این پژوهش از ۲۶۷ آزمایش روی دال های دو طرفه برای پیش بینی مقاومت برشی پانچ استفاده شده که شامل ابعاد ضلع ستون، عمق موثر، مقاومت فشاری بتن، درصد آرماتور و تنش تسلیم فولاد به عنوان پارامترهای ورودی و مقاومت برشی پانچ به عنوان پارامتر خروجی است. برای مدل سازی، داده ها در دو گروه آموزش و آزمایش قرار داده شده اند. از ۲۶۷ نمونه، به صورت تصادفی ۸۰ درصد به عنوان داده های آموزش (۲۱۴ داده) و ۲۰ درصد به عنوان داده های آزمایش (۵۳ داده) استفاده شده است.

آماري خطا هستند که در پژوهش‌های متعددی به کار رفته‌اند. در این پارامترها به ترتیب RMSE خطای میانگین جذر مربعی، MAE خطای میانگین مطلق، MAPE درصد خطای میانگین مطلق، R ضریب رگرسیون و OBJ تابع هدف مینیمم شده هست.

۸- نتایج پارامترهای آماری خطا

همان‌گونه که در بخش‌های قبل گفته شد برای پیش‌بینی مقاومت برشی پانچ در دال‌های دوطرفه داده‌ها در دو گروه آموزش و آزمایش مورد پردازش قرار گرفته است. ۱۰ مدل ذکر شده به صورت جداگانه پردازش شده، سپس هر گروه از این مدل‌ها از طریق پارامترهای خروجی خطا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند تا بر اساس اطلاعات آماری خطا، مدل نهایی انتخاب شود. پارامترهای آماری خطا شامل MSE، MAE، MAPE، Rvalue، همچنین پارامترهای آماری شامل کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف معیار هستند که با بررسی آنها بهترین مدل مشخص شده است. نتایج مدل‌سازی در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند. با توجه به پارامترهای آماری خطا و مقادیر کمینه و میانگین، می‌توان مشاهده کرد که بهترین جواب مدل‌های GP3 و BBP9 هستند. پس این مدل‌ها به عنوان مدل بهینه انتخاب شدند. در شکل (۵) نیز به عنوان نمونه، روند همگرایی در روش BBP برای نسل‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل پس از حدود ۱۰۰۰۰ تکرار مقدار خطای RMSE آموزش به حداقل می‌رسد. در ادامه، در جدول (۲) نتایج آموزش و آزمایش مقاومت برشی پانچ مدل سازی شده نسبت به مقاومت برشی پانچ آزمایشگاهی نمایش داده شده‌اند. با توجه به جدول، برای داده‌های آموزش مشاهده می‌شود که خروجی‌های مدل و نتایج آزمایشگاهی نزدیک به هم هستند که دارای میزان Rvalue بالای ۰/۹۹ است که به عدد ۱ بسیار نزدیک است. این نتایج بیانگر دقت پیش‌بینی بسیار مناسب این روش‌ها است.

در تمامی مدل‌های ارائه شده، اندازه جمعیت برابر ۱۰۰، تعداد زیستگاه‌ها برابر ۳، عمق درخت برابر ۷ و عمق جهش برابر ۴ در نظر گرفته شده است. برای پیش‌بینی مقاومت برشی پانچ در دال‌های دوطرفه، ۱۰ مدل متفاوت مورد پردازش قرار گرفته است. هر کدام از این مدل‌ها دارای مقادیر پارامترهای تنظیم یکسان است. از بین این ۱۰ مدل، یک مدل با بهترین نتیجه انتخاب شده است. انتخاب پارامترهای فوق بر اساس آزمون و خطا انجام شده است. قبل از انجام آنالیز اصلی یک آنالیز اولیه انجام شده و پارامترهای فوق مورد آزمایش قرار گرفتند و پارامترهایی که بهترین نتیجه را بدست دادند انتخاب شدند.

۷- معیارهای ارزیابی مدل

برای تجزیه و تحلیل مدل‌ها و انتخاب مدل نهایی از معیارهای متنوعی می‌توان استفاده کرد. در این پژوهش از پارامترهای استاتیکی (پارامترهای آماری خطا) استفاده شده است که عبارتند از:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (h_i^2 - t_i^2)} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - t_i)}{n} \quad (8)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(h_i - t_i)}{t_i} 100 \quad (9)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_i^-)(t_i - t_i^-)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_i - h_i^-)^2 \sum_{i=1}^n (t_i - t_i^-)^2}} \quad (10)$$

$$OBJ = \left(\frac{NO_{train} - NO_{test}}{NO_{train} + NO_{test}} \right) \frac{RMSE_{train} + MAE_{train}}{R_{train} + 1} + \frac{2 NO_{test}}{NO_{train} + NO_{test}} * \frac{RMSE_{test} + MAE_{test}}{R_{test} + 1} \quad (11)$$

جدول ۲. نتایج Rvalue آموزش و آزمایش داده‌ها به روش GP و BBP

	train	test
GP	0.989	0.960
BBP	0.996	0.993

Table 2. Rvalues of training and testing for GP and BBP methods

در این روابط n تعداد داده‌ها، h خروجی واقعی و t خروجی مدل می‌باشد. این روابط از شناخته شده‌ترین پارامترهای

شکل ۳. مقادیر پارامترهای خطای مدل GP

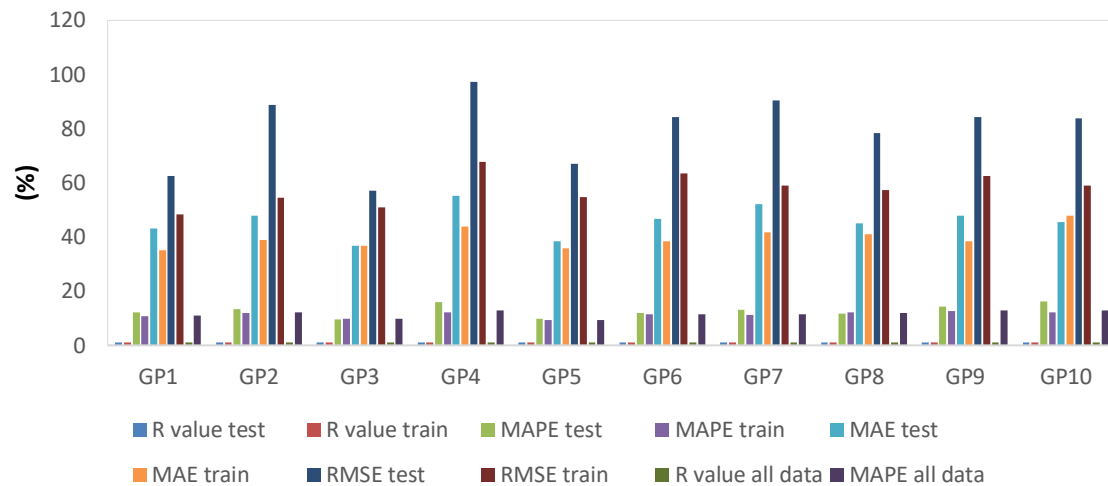


Fig. 3. Error values of GP model

شکل ۴: مقادیر پارامترهای خطای مدل BBP

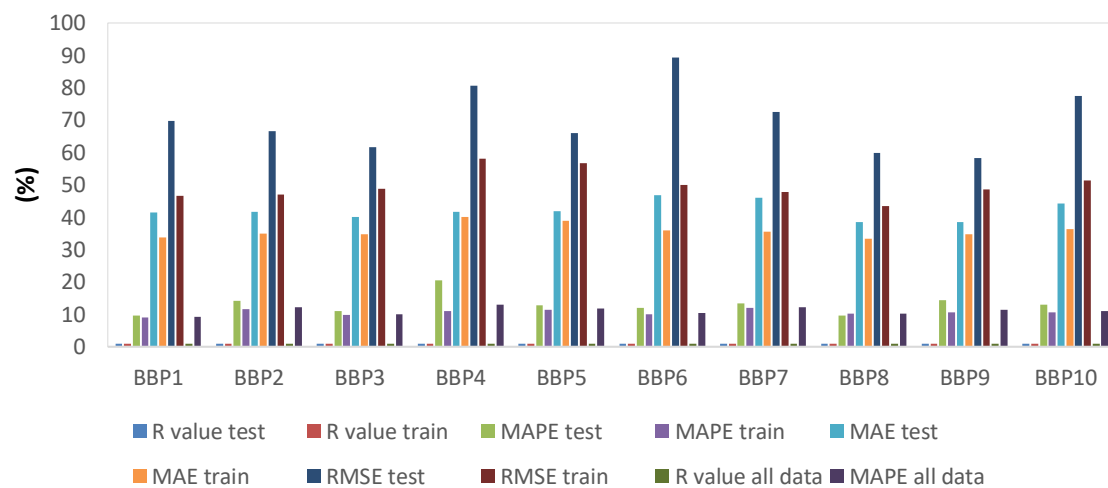


Fig. 4. Error values of BBP model

شکل ۵. روند همگرایی روش BBP برای آموزش و آزمایش

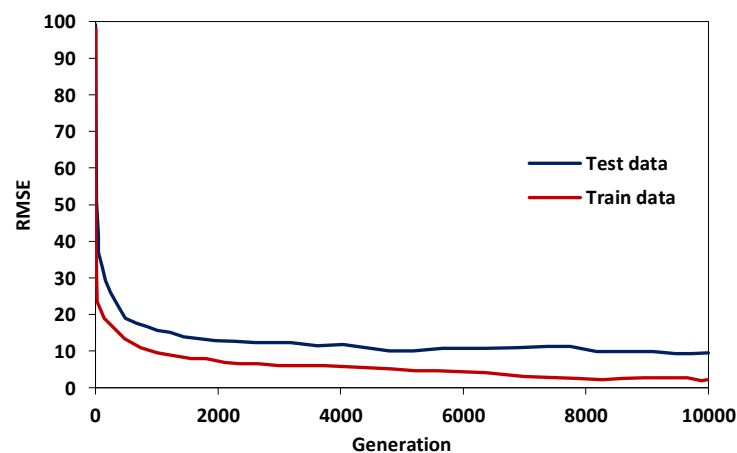


Fig. 5. Convergence of BBP method for train and test

۹- ساختار درختی مدل نهایی

در این بخش ساختار درختی مدل‌های برگزیده (مدل‌های GP3 و BBP9) نشان داده شده است. ساختار درختی مدل برگزیده

ستون (X1)، عمق موثر (X2)، درصد آرماتور (X3)، مقاومت فشاری بتن (X4) و تنش تسلیم فولاد (X5) هستند.

۱۰- مقایسه نتایج مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی و آیین نامه های موجود

در این بخش نتایج مقاومت برشی پانچ دال های دو طرفه در مدل سازی، نتایج آزمایشگاهی و مقادیر توصیه شده در آیین نامه های ACI 318 و EC 2 با یکدیگر مقایسه شده اند.

شامل مجموع سه زیر درخت ۱ الی ۳ است که در شکل های (۶ و ۷) نشان داده شده است. عملگرهای ریاضی به کار برده شده در این مدل ها عبارتند از جمع، تفریق، ضرب، تقسیم، ln، سینوس، توان ۲، توان ۵، توان ۰٫۵، توان ۰٫۳۳، توان ۰٫۲ و توان ۰٫۲۵. به طور کلی ساختار درخت مدل نهایی شامل تعدادی پارامتر متغیر و تعدادی عدد صحیح است. پارامترهای متغیر همان پارامترهای موثر بر برش پانچ هستند و شامل ابعاد ضلع

شکل ۶. نمایش درختی مدل GP3 الف) زیردرخت ۱ ب) زیردرخت ۲ پ) زیردرخت ۳

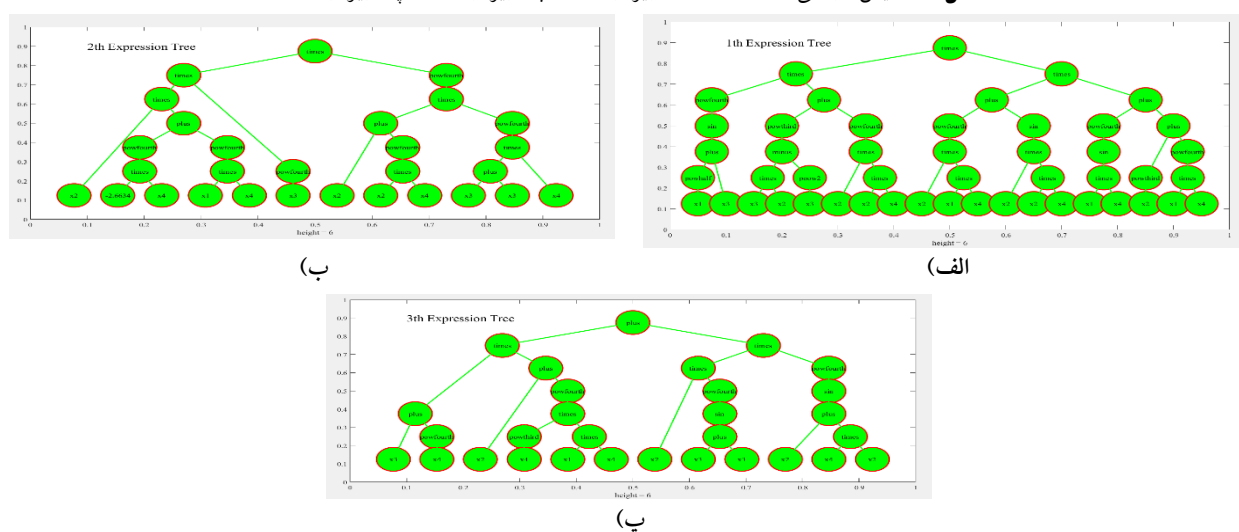


Fig. 6. Tree view of GP3 model a) sub-tree 1 b) sub-tree 2 c) sub-tree 3

شکل ۷. نمایش درختی مدل BBP الف) زیردرخت ۱ ب) زیردرخت ۲ پ) زیردرخت ۳

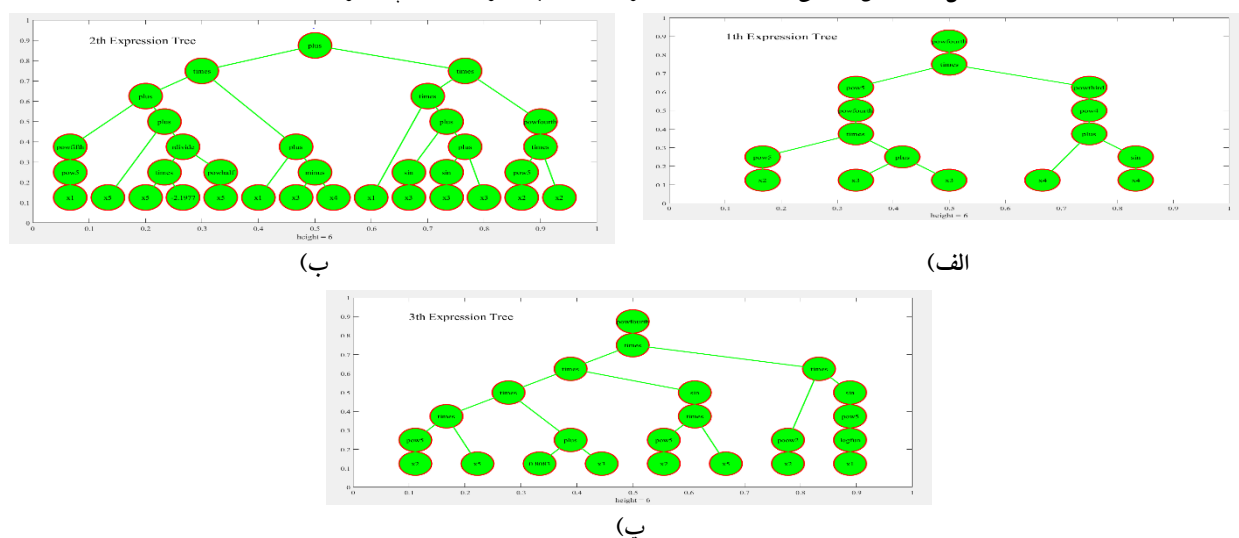


Fig. 7. Tree view of BBP model a) sub-tree 1 b) sub-tree 2 c) sub-tree 3

جدول ۳. مقایسه نتایج مدل سازی، آزمایشگاهی و روابط آیین نامه ها

	V_{test}	f_y	f'_c	%p	d	c	$\frac{V_{test}}{V_{ec2}}$	$\frac{V_{test}}{V_{ACI}}$	$\frac{V_{test}}{V_{BBP}}$	$\frac{V_{test}}{V_{GP}}$
[15]	365/00	332/00	25/20	1/16	118/00	254/00	1/13	1/25	1/030	1/013
	356/00	332/00	29/00	1/16	118/00	254/00	1/05	1/14	0/954	0/963
	351/00	332/00	36/80	1/16	118/00	254/00	0/96	1	0/867	1/000
	356/00	332/00	20/30	1/16	118/00	254/00	1/18	1/36	1/095	1/062
	400/00	321/00	19/50	2/50	114/00	254/00	1/1	1/64	1/087	0/890
	467/00	321/00	37/40	2/50	114/00	254/00	1/04	1/38	0/954	0/907
	512/00	321/00	27/90	2/50	114/00	254/00	1/26	1/75	1/177	1/044
	445/00	321/00	22/60	3/74	114/00	254/00	1/02	1/69	1/046	0/917
	534/00	321/00	26/50	3/74	114/00	254/00	1/17	1/87	1/157	1/033
	547/00	321/00	34/50	3/74	114/00	254/00	1/1	1/68	1/048	1/004
	400/00	332/00	26/10	1/18	118/00	356/00	1/05	1/06	0/973	0/929
	534/00	321/00	27/80	2/50	114/00	356/00	1/12	1/43	1/051	0/965
	498/00	321/00	25/00	3/74	114/00	356/00	0/95	1/41	0/937	1/266
	236/00	294/00	26/20	0/55	121/00	356/00	0/76	0/61	0/783	0/485
	178/00	324/00	14/20	0/48	114/00	254/00	0/94	0/85	1/019	0/603
	200/00	321/00	47/60	0/48	114/00	254/00	0/71	0/52	0/721	0/721
	334/00	303/00	47/70	1/01	114/00	254/00	0/93	0/87	0/873	0/768
	505/00	341/00	43/90	2/00	114/00	254/00	1/15	1/38	1/055	1/258
	578/00	325/00	50/50	3/02	114/00	254/00	1/1	1/47	1/001	0/985
[16]	255/00	441/00	26/80	0/80	117/00	150/00	1/06	1/19	0/918	0/864
	275/00	454/00	26/20	0/79	118/00	150/00	1/14	1/29	0/991	0/991
	430/00	455/00	26/40	1/01	128/00	300/00	1/12	1/16	1/131	0/989
	408/00	451/00	25/10	1/04	124/00	300/00	1/13	1/17	1/111	1/016
	258/00	448/00	26/30	0/49	123/00	300/00	0/91	0/73	0/940	0/829
	258/00	462/00	26/60	0/48	125/00	300/00	0/89	0/71	0/824	0/851
	255/00	441/00	23/60	0/80	117/00	106/00	1/21	1/52	1/140	0/977
	275/00	454/00	23/00	0/79	118/00	106/00	1/3	1/64	1/234	1/101
	330/00	436/00	28/80	1/53	121/00	106/00	1/13	1/71	1/117	0/823
	331/00	439/00	27/70	1/54	122/00	106/00	1/12	1/71	1/131	0/850
	430/00	455/00	23/20	1/01	128/00	212/00	1/34	1/55	1/152	1/156
	408/00	451/00	21/90	1/04	124/00	212/00	1/35	1/59	1/147	1/205
	490/00	434/00	26/80	2/16	120/00	212/00	1/26	1/8	0/988	1/098
	539/00	448/00	26/80	2/18	119/00	212/00	1/4	2	1/111	1/124
	258/00	448/00	23/10	0/49	123/00	212/00	1/09	0/99	1/008	1/000
	258/00	461/00	23/40	0/48	125/00	212/00	1/07	0/96	0/977	1/034
	331/00	460/00	24/20	1/00	120/00	212/00	1/14	1/28	0/949	1/113
	331/00	458/00	21/80	0/98	122/00	212/00	1/15	1/32	0/988	1/116
[17]	394/00	400/00	27/50	1/38	114/00	305/00	1/09	1/19	1/054	0/949
	312/00	400/00	26/50	1/38	114/00	152/00	1/13	1/51	0/952	0/869
	390/00	400/00	23/20	1/06	114/00	254/00	1/34	1/46	1/275	1/165
	356/00	400/00	22/00	1/03	114/00	254/00	1/26	1/37	1/202	1/064
	334/00	400/00	23/80	1/13	114/00	254/00	1/12	1/23	1/056	0/972
	393/00	400/00	24/40	1/06	114/00	254/00	1/33	1/43	1/260	1/149
	379/00	400/00	25/30	1/02	114/00	254/00	1/28	1/35	1/216	1/089
	374/00	400/00	35/10	1/13	114/00	254/00	1/1	1/14	1/024	1/030
	312/00	400/00	20/40	1/13	114/00	254/00	1/1	1/24	1/050	0/967
	343/00	400/00	22/10	1/06	114/00	203/00	1/31	1/52	1/050	1/101
	379/00	400/00	24/20	1/06	114/00	203/00	1/4	1/61	1/122	1/168
	433/00	400/00	23/00	1/50	114/00	305/00	1/23	1/43	1/208	1/049
[18]	182/00	457/00	13/90	1/21	82/00	221/00	1/26	1/48	1/065	1/002
	245/00	559/00	23/80	0/89	82/00	221/00	1/58	1/53	1/313	1/411
	152/00	471/00	22/80	0/53	82/00	221/00	1/18	0/97	1/045	1/094
	157/00	456/00	12/30	1/33	82/00	221/00	1/1	1/36	0/966	0/878
	219/00	500/00	24/80	0/59	82/00	333/00	1/29	0/98	1/153	1/189
	307/00	491/00	19/80	0/93	109/00	201/00	1/39	1/56	1/030	1/132

	201/00	456/00	24/00	1/21	82/00	221/00	1/16	1/25	0/956	1/030
	118/00	386/00	13/20	0/74	82/00	119/00	1/24	1/48	1/213	1/002
	79/00	336/00	21/10	1/10	51/00	152/00	1/23	1/27	0/941	0/963
	99/00	386/00	18/00	2/20	51/00	152/00	1/29	1/72	1/061	0/959
	93/00	386/00	15/50	1/10	51/00	203/00	1/37	1/38	1/044	1/066
	133/00	336/00	27/20	2/20	50/00	203/00	1/31	1/51	0/921	1/089
	109/00	386/00	23/30	1/10	51/00	254/00	1/24	1/11	1/108	1/084
	152/00	386/00	22/90	2/20	51/00	254/00	1/38	1/55	1/253	1/168
	114/00	386/00	23/00	1/10	51/00	305/00	1/15	1	1/067	1/019
	159/00	386/00	26/40	2/20	50/00	305/00	1/24	1/31	1/074	1/121
[19]	139/00	386/00	27/70	1/10	51/00	356/00	1/19	0/97	1/039	1/110
	184/00	386/00	25/00	2/20	51/00	356/00	1/3	1/35	1/160	1/133
	145/00	386/00	24/90	1/10	51/00	406/00	1/18	0/95	0/988	1/035
	185/00	386/00	24/60	2/20	50/00	406/00	1/21	1/23	0/889	1/082
	102/00	386/00	27/00	1/10	50/00	152/00	1/48	1/46	1/126	1/100
	86/00	386/00	28/50	1/10	50/00	102/00	1/46	1/59	1/154	0/951
	102/00	386/00	24/90	2/20	50/00	102/00	1/45	2/02	1/409	0/945
	172/00	386/00	53/80	2/20	50/00	152/00	1/58	1/74	1/174	1/203
	99/00	386/00	21/10	1/10	50/00	152/00	1/56	1/6	1/213	1/134
	112/00	386/00	20/00	1/10	50/00	152/00	1/8	1/86	1/405	1/299
	105/00	386/00	17/00	2/20	50/00	152/00	1/42	1/9	1/193	1/029
	216/00	706/00	35/70	0/80	100/00	125/00	1/13	1/22	0/968	0/891
	194/00	701/00	28/60	0/81	99/00	125/00	1/11	1/24	0/960	0/947
	603/00	657/00	30/30	0/80	200/00	250/00	0/83	0/92	0/845	0/945
[20]	600/00	670/00	28/60	0/80	199/00	250/00	0/85	0/95	0/896	0/875
	145/00	720/00	33/30	0/35	98/00	125/00	1/06	0/87	0/961	0/940
	148/00	712/00	31/40	0/34	99/00	125/00	1/09	0/9	0/999	1/015
	489/00	668/00	31/70	0/34	200/00	250/00	0/88	0/73	1/039	1/006
	444/00	664/00	30/20	0/35	197/00	250/00	0/83	0/7	0/986	0/930
	176/00	500/00	23/30	1/20	77/00	200/00	1/2	1/3	0/870	1/052
	194/00	500/00	33/40	0/92	77/00	200/00	1/28	1/19	0/959	1/153
	165/00	480/00	21/70	0/75	79/00	200/00	1/29	1/22	0/992	1/047
	186/00	480/00	31/20	0/80	79/00	200/00	1/26	1/14	0/960	1/092
[21]	825/00	530/00	36/30	0/98	200/00	250/00	1	1/15	1/023	1/015
	390/00	485/00	34/50	0/98	128/00	160/00	1/18	1/36	0/976	0/989
	365/00	485/00	35/70	0/98	128/00	160/00	1/09	1/26	0/903	0/920
	117/00	480/00	34/50	0/98	64/00	80/00	1/41	1/64	0/952	0/947
	105/00	480/00	35/70	0/98	64/00	80/00	1/25	1/44	0/843	0/840
	105/00	480/00	37/80	0/98	64/00	80/00	1/23	1/4	0/824	0/825
	36/00	530/00	31/50	0/42	41/00	100/00	1/14	0/84	0/837	0/783
	49/00	530/00	31/50	0/56	41/00	100/00	1/41	1/14	1/017	0/912
	57/00	530/00	31/50	0/69	41/00	100/00	1/53	1/33	1/101	1/016
	56/00	530/00	36/20	0/82	41/00	100/00	1/35	1/22	0/968	0/844
	57/00	530/00	36/20	0/88	41/00	100/00	1/35	1/24	0/965	0/836
	66/00	530/00	36/20	1/03	41/00	100/00	1/48	1/44	1/070	0/914
	71/00	530/00	30/40	1/16	41/00	100/00	1/62	1/69	1/210	0/993
	71/00	530/00	30/40	1/29	41/00	100/00	1/57	1/69	1/186	0/971
[22]	79/00	530/00	30/40	1/45	41/00	100/00	1/68	1/88	1/296	1/026
	44/00	530/00	30/60	0/52	41/00	100/00	1/31	1/04	0/950	0/857
	55/00	530/00	30/60	0/80	41/00	100/00	1/42	1/3	1/027	0/878
	67/00	530/00	30/60	1/11	41/00	100/00	1/55	1/59	1/149	0/944
	49/00	530/00	35/30	0/60	41/00	100/00	1/32	1/08	0/949	0/861
	52/00	530/00	35/30	0/69	41/00	100/00	1/34	1/15	0/959	0/893
	85/00	530/00	35/30	1/99	41/00	100/00	1/55	1/87	1/253	0/962
	45/00	530/00	29/40	0/44	47/00	100/00	1/15	0/91	0/863	0/913
	66/00	530/00	29/40	0/69	47/00	100/00	1/46	1/33	1/075	1/082
	90/00	530/00	29/40	1/29	47/00	100/00	1/62	1/82	1/253	1/149

	97/00	530/00	31/70	1/99	47/00	100/00	1/47	1/89	1/243	1/056
	29/00	530/00	39/60	0/42	35/00	100/00	1/08	0/74	0/782	0/924
	38/00	530/00	39/60	0/69	35/00	100/00	1/21	0/97	0/844	0/926
	57/00	530/00	39/60	1/29	35/00	100/00	1/47	1/45	1/063	1/095
	73/00	530/00	31/70	1/99	35/00	100/00	1/76	2/08	1/437	1/306
	63/00	530/00	28/30	0/42	54/00	100/00	1/33	1/08	1/023	1/116
	88/00	530/00	33/50	0/69	54/00	100/00	1/49	1/39	1/110	1/186
	124/00	530/00	33/50	1/29	54/00	100/00	1/71	1/95	1/326	1/306
	126/00	530/00	28/30	1/99	54/00	100/00	1/59	2/16	1/412	1/206
[23]	216/00	706/00	28/60	0/80	100/00	125/00	1/22	1/36	1/060	0/949
	194/00	701/00	22/90	0/81	99/00	125/00	1/19	1/38	1/061	0/968
	603/00	657/00	24/20	0/80	200/00	250/00	0/9	1/03	0/916	1/052
	600/00	670/00	22/90	0/80	199/00	250/00	0/92	1/06	0/975	0/956
	145/00	720/00	26/60	0/35	98/00	125/00	1/14	0/97	1/048	0/984
	148/00	712/00	25/10	0/34	99/00	125/00	1/17	1/01	1/091	1/049
	489/00	668/00	25/40	0/34	200/00	250/00	0/95	0/82	1/124	1/111
	444/00	664/00	24/20	0/35	197/00	250/00	0/89	0/78	1/070	1/030
[24]	129/00	430/00	24/10	2/05	76/00	102/00	0/96	1/47	0/979	0/636
	136/00	430/00	22/60	2/05	76/00	102/00	1/03	1/6	1/080	0/682
	129/00	430/00	24/60	2/05	76/00	102/00	0/95	1/46	0/965	0/632
	311/00	430/00	22/60	2/14	113/00	152/00	1/05	1/66	0/923	0/955
	357/00	430/00	24/80	2/14	113/00	203/00	1/06	1/52	0/796	0/985
	271/00	430/00	24/80	0/66	122/00	203/00	1/05	1/04	0/879	0/984
	202/00	430/00	25/00	5/01	73/00	152/00	1/02	1/86	0/968	0/841
	160/00	430/00	25/00	1/47	81/00	152/00	1/03	1/28	0/816	0/785
	107/00	430/00	23/20	0/45	86/00	152/00	0/94	0/82	0/797	0/776
	121/00	430/00	25/50	1/47	81/00	102/00	0/88	1/22	0/805	0/608
	271/00	430/00	22/10	0/47	123/00	203/00	1/2	1/09	1/020	1/097
	278/00	430/00	15/10	2/14	113/00	203/00	0/97	1/52	0/764	1/031
	230/00	430/00	16/10	0/66	122/00	203/00	1/02	1/1	0/877	0/991
	108/00	430/00	14/50	1/47	81/00	152/00	0/83	1/14	0/723	0/619
	306/00	430/00	52/10	0/66	122/00	203/00	0/92	0/81	0/791	0/921
	323/00	430/00	52/10	5/01	73/00	203/00	1/13	1/68	0/739	1/055
	243/00	430/00	52/10	1/47	81/00	152/00	1/22	1/35	0/938	0/958
	148/00	430/00	52/10	0/45	86/00	152/00	1	0/76	0/840	0/867
[25]	320/00	490/00	42/00	1/47	95/00	150/00	1/34	1/61	1/033	1/040
	178/00	490/00	67/00	0/49	95/00	150/00	0/92	0/71	0/773	0/778
	249/00	490/00	70/00	0/84	95/00	150/00	1/06	0/97	0/844	0/865
	356/00	490/00	74/00	1/19	95/00	150/00	1/32	1/35	1/036	1/072
	356/00	490/00	69/00	1/47	95/00	150/00	1/26	1/39	0/979	0/989
	418/00	490/00	66/00	2/37	90/00	150/00	1/41	1/8	1/092	1/136
	396/00	490/00	30/00	0/94	120/00	150/00	1/44	1/69	1/205	1/272
	365/00	490/00	68/00	0/64	125/00	150/00	1/08	0/98	0/957	1/017
	489/00	490/00	70/00	0/94	120/00	150/00	1/35	1/37	1/128	1/246
	436/00	490/00	69/00	1/11	120/00	150/00	1/14	1/23	0/946	1/051
	543/00	490/00	74/00	1/61	120/00	150/00	1/23	1/48	1/007	1/093
	645/00	490/00	80/00	2/33	120/00	150/00	1/26	1/69	1/035	1/205
	196/00	490/00	70/00	0/95	70/00	150/00	1/32	1/15	0/982	1/171
	258/00	490/00	75/00	1/52	70/00	150/00	1/45	1/47	1/063	1/258
	267/00	490/00	68/00	1/87	70/00	150/00	1/45	1/59	1/057	1/229
	498/00	490/00	72/00	1/47	95/00	220/00	1/51	1/49	1/198	1/323
[26]	560/00	490/00	71/00	1/47	95/00	300/00	1/47	1/34	1/286	1/423
	2050/00	500/00	64/00	1/49	275/00	200/00	1/17	1/49	1/025	0/995
	2250/00	500/00	84/00	1/49	275/00	200/00	1/17	1/42	1/048	1/062
	2450/00	500/00	112/00	1/49	275/00	200/00	1/16	1/34	1/065	1/056
	2400/00	500/00	90/00	2/55	275/00	200/00	1/02	1/47	0/870	0/913
	1200/00	500/00	70/00	1/75	200/00	150/00	1/1	1/55	1/040	1/006

	1100/00	500/00	88/00	1/75	200/00	150/00	0/93	1/27	0/889	0/856
	1300/00	500/00	87/00	1/75	200/00	150/00	1/1	1/51	1/054	1/015
	1400/00	500/00	119/00	1/75	200/00	150/00	1/07	1/39	1/040	0/981
	1450/00	500/00	90/00	2/62	200/00	150/00	1/07	1/65	1/021	0/969
	1250/00	500/00	80/00	2/62	200/00	150/00	0/96	1/51	0/914	0/868
	1450/00	500/00	98/00	2/62	200/00	150/00	1/04	1/59	0/995	0/942
	1550/00	500/00	108/00	2/62	200/00	150/00	1/07	1/61	1/033	0/973
	330/00	500/00	85/00	1/84	88/00	100/00	1/31	1/64	1/087	0/878
	965/00	643/00	90/00	0/80	200/00	250/00	0/93	0/86	1/002	1/017
	1021/00	627/00	91/00	0/80	200/00	250/00	0/98	0/9	1/054	1/072
	889/00	620/00	86/00	0/82	194/00	250/00	0/91	0/84	0/942	0/937
[27]	1041/00	596/00	92/00	1/19	200/00	250/00	0/87	0/91	0/910	0/908
	960/00	633/00	109/00	0/60	201/00	250/00	0/95	0/77	1/029	1/011
	565/00	634/00	84/00	0/33	202/00	250/00	0/73	0/51	0/866	0/833
	944/00	631/00	95/00	0/80	198/00	250/00	0/91	0/83	0/989	0/982
	224/00	550/00	88/20	0/58	98/00	150/00	0/95	0/74	0/822	0/822
	212/00	550/00	56/20	0/58	98/00	150/00	1/04	0/88	0/882	0/913
	169/00	550/00	26/90	0/58	98/00	150/00	1/06	1/02	0/902	0/891
	233/00	550/00	58/70	0/58	98/00	150/00	1/13	0/95	0/957	0/989
	233/00	550/00	101/80	0/58	98/00	150/00	0/94	0/72	0/824	0/809
	319/00	550/00	60/40	1/28	98/00	150/00	1/18	1/28	0/940	0/978
	297/00	550/00	43/40	1/28	98/00	150/00	1/22	1/4	0/977	1/013
[28]	341/00	550/00	60/80	1/28	98/00	150/00	1/25	1/36	1/003	1/043
	362/00	550/00	98/40	1/28	98/00	150/00	1/14	1/14	0/925	0/934
	286/00	650/00	41/90	1/28	98/00	150/00	1/19	1/38	0/950	0/986
	405/00	650/00	84/20	1/28	98/00	150/00	1/34	1/38	1/079	1/106
	341/00	650/00	56/40	0/87	100/00	150/00	1/41	1/38	1/148	1/144
	244/00	650/00	32/90	1/27	100/00	150/00	1/07	1/29	0/857	0/830
	294/00	650/00	37/60	1/27	100/00	150/00	1/23	1/45	0/982	0/965
	227/00	650/00	33/70	1/03	102/00	150/00	1/02	1/15	0/832	0/818
	330/00	488/00	39/40	0/97	100/00	200/00	1/34	1/33	0/993	1/157
	583/00	465/00	39/40	0/90	150/00	200/00	1/24	1/34	1/042	1/162
[29]	904/00	465/00	39/40	0/83	200/00	200/00	1/2	1/36	1/098	1/186
	1381/00	468/00	39/40	0/76	300/00	200/00	1	1/11	0/946	1/044
	2224/00	433/00	39/40	0/76	400/00	300/00	0/95	0/96	1/091	1/030
	2681/00	433/00	39/40	0/76	500/00	300/00	0/79	0/81	0/944	0/984
	1024/00	400/00	27/60	1/50	210/00	260/00	1/09	1/5	1/138	1/100
	445/00	400/00	28/50	0/25	210/00	260/00	0/85	0/64	1/107	1/065
	439/00	400/00	40/50	0/25	210/00	260/00	0/74	0/53	0/967	0/873
	2153/00	400/00	32/40	0/33	464/00	520/00	0/9	0/63	0/990	1/011
	408/00	400/00	32/20	0/25	210/00	260/00	0/75	0/55	0/971	0/920
[30]	550/00	400/00	29/30	0/33	210/00	260/00	0/95	0/78	1/154	1/154
	236/00	400/00	34/70	1/50	96/00	130/00	1/07	1/4	0/932	0/889
	243/00	400/00	34/70	0/75	100/00	130/00	1/29	1/36	1/077	1/023
	141/00	400/00	34/70	0/33	102/00	130/00	0/96	0/77	0/883	0/827
	118/00	400/00	34/70	0/25	102/00	130/00	0/87	0/64	0/851	0/827
	540/00	400/00	28/50	0/33	210/00	260/00	0/94	0/78	1/144	1/148
	270/00	718/00	24/00	0/80	100/00	250/00	1/25	1/19	1/148	1/147
[31]	250/00	718/00	24/40	0/80	100/00	250/00	1/15	1/1	1/057	1/062
	265/00	718/00	27/20	0/64	125/00	150/00	1/06	1/12	0/940	0/954
	483/00	488/00	33/10	1/54	124/00	250/00	1/16	1/37	1/050	1/038
[32]	825/00	531/00	33/50	1/30	190/00	300/00	0/97	1/16	1/028	0/928
	1046/00	524/00	31/00	1/10	260/00	350/00	0/8	0/9	0/864	0/840
	678/00	490/00	35/00	2/17	158/00	250/00	0/96	1/35	0/874	0/899
[33]	788/00	490/00	68/50	2/48	138/00	250/00	1/07	1/35	0/971	1/009
	801/00	490/00	70/00	2/68	128/00	250/00	1/19	1/51	1/077	1/095
	802/00	490/00	66/70	1/67	158/00	250/00	1	1/16	0/916	1/049

	811/00	490/00	61/20	1/13	158/00	250/00	1/19	1/22	1/099	1/209
	480/00	490/00	70/00	1/88	113/00	250/00	0/98	1/07	0/856	1/021
	479/00	490/00	33/00	0/52	163/00	250/00	1/05	0/94	1/081	1/088
	228/00	490/00	34/00	0/40	105/00	250/00	1/1	0/79	1/146	1/072
	219/00	400/00	44/70	0/45	105/00	250/00	0/93	0/67	0/924	0/935
	491/00	400/00	50/20	0/55	153/00	250/00	1/02	0/86	1/072	1/078
	438/00	400/00	35/00	0/35	183/00	250/00	0/89	0/71	0/984	0/908
	574/00	400/00	70/00	0/35	183/00	250/00	0/93	0/66	1/056	0/984
	882/00	400/00	40/00	0/73	218/00	250/00	1/01	1/04	1/067	1/010
[34]	1023/00	400/00	64/70	0/73	218/00	250/00	1	0/95	1/072	0/993
	886/00	400/00	76/00	0/43	220/00	250/00	0/96	0/74	1/074	1/032
	1721/00	400/00	75/00	1/13	268/00	400/00	0/89	0/84	0/965	0/913
	2090/00	400/00	65/40	1/44	263/00	400/00	1/08	1/13	1/030	1/061
	2234/00	400/00	40/00	1/57	313/00	400/00	1/02	1/2	0/980	1/037
	2513/00	400/00	60/00	1/57	313/00	400/00	1	1/1	0/985	1/008

Table 3. Comparison of the results of modeling, experimental tests and code equations

جدول ۴. مقادیر آماری خلاصه نتایج مدل سازی و توصیه شده آیین نامه ها

$\frac{V_{test}}{V_{ec2}}$	$\frac{V_{test}}{V_{ACI}}$	$\frac{V_{test}}{V_{GP}}$	$\frac{V_{test}}{V_{GP}}$	
0.71	0.51	0.721	0.485	minimum
1.80	2.16	1.437	1.423	maximum
1.157	1.255	1.019	1.000	mean
1.140	1.280	1.021	1.004	median
0.208	0.340	0.129	0.138	standard deviation

Table 4. Statistical results of modeling and code recommendations

زده شده نیز مربوط به آیین نامه ACI است که مقدار برش را تا بیش از ۲ برابر تخمین زده است. پراکندگی نتایج مربوط به رابطه آیین نامه ACI نیز از سایرین بیشتر است به طوری که در پژوهش مرجع [21] مقدار انحراف معیار خطای نتایج آیین نامه ACI نزدیک به ۲ برابر انحراف معیار روش های دیگر است. به طور کلی می توان گفت که از میان روابط آیین نامه ها، رابطه آیین نامه EC2 نتایج بهتری نسبت به آیین نامه ACI بدست می دهد. برای خلاصه کردن نتایج آزمایش های فوق، کمیت های آماری شکل (۶) در جدول (۴) نشان داده شده اند. مطابق جدول، روش های GP و BBP مقادیر متوسط خطای به مراتب بهتری نسبت به روابط آیین نامه ها ارائه می دهند. ضمناً انحراف معیار کلی این روش ها کمتر از انحراف معیار روابط پیشنهادی آیین نامه ها است که نشان دهنده دقت بالاتر این روش ها نسبت به روابط سنتی است. با این حال

مینیم خطای روش GP پایین است که همان گونه که ذکر شد مربوط پژوهش مرجع [15] است که در آن مقاومت آرماتورها پایین تر از سایر پژوهش ها است.

روابط آیین نامه ای مذکور همان روابط (۵ و ۶) در بخش ۱ مقاله است. تست های آزمایشگاهی نیز از مراجع [15-34] انتخاب شده اند که همگی از مقالات و گزارش های معتبر علمی استخراج شده و در دانشگاه ها و مجلات معتبر به چاپ رسیده اند. با توجه به جدول (۳) مشاهده می شود که روابط آیین نامه ها دارای نوسانات زیادی هستند که باعث می شود این روش ها چندان قابل اعتماد نباشند. بیشترین خطا هم در مدل سازی و هم در روابط آیین نامه ها مربوط به آزمایش های مرجع [15] و [21] ACI است. در پژوهش مرجع [15] مقاومت تسلیم آرماتورها (f_y) از سایر پژوهش ها کمتر است که باعث انحراف نتایج شده است. کمترین برش تخمین شده شده مربوط به روش GP و آیین نامه با نسبت به ترتیب برابر ۰,۴۸۵ و ۰,۵۲ است که مربوط به پژوهش مرجع [22] است. در این پژوهش، نیز ضخامت دال بسیار کم است (دال نازک با ضخامت ۴۱-۵۵ میلی متر). با این حال مقادیر مقاومت برش پانچ بدست آمده در آزمایش تفاوت چندانی با سایر پژوهش ها ندارد. این مسئله باعث خطا در برآورد روش ها شده است. بیشترین برش تخمین

- compensated operational amplifiers, *Journal of Modeling in Engineering*, 17(58), 20 (In Persian).
- [2] Mirakhorloo F. & Najafi Kani E. (2019) Investigation and Prediction of Physical and Mechanical Properties of Gypsum/Rice Straw Composite Using ANFIS Model, *Journal of Modeling in Engineering*, 17(58), 11 (In Persian).
- [3] Bibak H., khazaie J. & Moayedi H. (2019) Prediction of optimal mixing design for stabilized soft clay soil using Artificial Neural Networks, *Journal of Modeling in Engineering*, 17(57), 147-158 (In Persian).
- [4] Bekdaş G., Nigdeli S. M., Kayabekir A. E. & Yang, X. S. (2019) Optimization in Civil Engineering and Metaheuristic Algorithms: A Review of State-of-the-Art Developments. *Computational Intelligence, Optimization and Inverse Problems with Applications in Engineering*, 2019, 111-137. Springer, Cham.
- [5] Waszczyszyn Z. (2017) Artificial neural networks in civil engineering: another five years of research in Poland. *Computer Assisted Methods in Engineering and Science*, 18(3), 131-146.
- [6] Zavadskas K., Antucheviciene J., Adeli H. & Turskis Z. (2016) Hybrid multiple criteria decision making methods: A review of applications in engineering, *Scientia Iranica*, 23(1), 1-20.
- [7] Aggarwal Y., Aggarwal P., Sihag P., Pal M. & Kumar A. (2019) Estimation of Punching Shear Capacity of Concrete Slabs Using Data Mining Techniques, *International Journal of Engineering*, 32(7), 908-914.
- [8] Safiee N. A. & Ashour A. (2017) Prediction of punching shear capacity of RC flat slabs using artificial neural network" *Asian Journal of Civil Engineering*, 18(2), 285-309.
- [9] Akbarpour H. & Akbarpour M. (2017) Prediction of punching shear strength of two-way slabs using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system, *Neural Computing and Applications*, 28(11), 3273-3284.
- [10] Hoang N. D. (2019) Estimating punching shear capacity of steel fiber reinforced concrete slabs using sequential piecewise multiple linear regression and artificial neural network, *Measurement*, 137, 58-70.
- [11] Hoang, N. D., Vu D. T., Tran X. L. & Tran V. D. (2017) Modeling punching shear capacity of fiber-reinforced polymer concrete slabs: a comparative study of instance-based and neural network learning, *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 9897078.
- [12] Ledesma S., Torres M., Hernández D., Aviña G. & García G. (2017) Temperature cycling on simulated annealing for neural network learning, *Mexican International Conference on Artificial Intelligence*, (pp. 161-171), Springer, Berlin, Heidelberg.

۱۱- نتیجه گیری

در این پژوهش از هوش مصنوعی برای پیش بینی مقاومت برشی پانچ در دال های دو طرفه استفاده شد. از میان روش های متعدد ارایه شده برای برازش داده، دو روش GP و BBP استفاده شد. سپس نتایج مدل سازی با نتایج واقعی آزمایشگاهی و همین طور روابط توصیه شده در آیین نامه ها مقایسه شد. بر اساس نتایج می توان به طور خلاصه موارد ذیل را نتیجه گرفت:

۱- با بررسی نتایج ارائه شده در بخش ۱ و ۲ و مقایسه این نتایج با پژوهش های آزمایشگاهی می توان نتیجه گرفت که در مدل های مبتنی بر هوش مصنوعی نتایج پیش بینی شده بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی بوده و به طور متوسط دارای خطایی در حدود ۰,۲ درصد است که بسیار قابل توجه است. در مقابل نتایج ارائه شده در آیین نامه ها دارای ۱۵ الی ۲۵ درصد خطا است که بیانگر تقریبی بودن این روابط است. ضمناً پراکندگی روش های هوش مصنوعی به مراتب کمتر از روابط آیین نامه ها است (۱۳ درصد در مقابل ۲۰ و ۳۴ درصد) که نشان از قابلیت اعتماد بالاتر این روش ها دارد.

۲- از بین دو روش GP و BBP می توان گفت که این دو روش نتایج تقریباً مشابهی ارائه می دهند به جز در مورد حداکثر خطا که روش BBP دارای برتری ملموسی است (۰,۷۲۱ در مقابل ۰,۴۸۵).

۳- روابط ارائه شده در روش های مبتنی بر هوش مصنوعی از پارامترهای ابعاد ضلع ستون، عمق موثر، مقاومت فشاری بتن، درصد آرماتور و تنش تسلیم فولاد به عنوان متغیرهای موثر در برش پانچ استفاده می کند که نسبت به روابط آیین نامه ها که فقط از مقاومت فشاری بتن استفاده می کنند روابط معنادارتری است.

References

۱۲- مراجع

- [1] Ranjbar E., Danaei M. & Ahmadi Khanezar M. (2019) Extraction of circuit parameters using multi-objective genetic algorithm for design of non-linearly

- [29] Rankin G. I. B., and Long A. E. (1987) Predicting the punching strength of conventional slab-column specimens, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 82(1), 327-346.
- [30] Tolf P. (1988) Plattjocklekens inverkan på betongplattors hållfasthet vid genomstansning: försök med cirkulära plattor. Institutionen för byggnadsstatik, Tekniska högsk.
- [31] Gardner N. J. (1990) Relationship of the punching shear capacity of reinforced concrete slabs with concrete strength, *Structural Journal*, 87(1), 66-71.
- [32] Marzouk H. & Hussein A. (1991) Experimental investigation on the behavior of high-strength concrete slabs, *ACI Structural Journal*, 88(6), pp. 701-713.
- [33] Hoang L. C., & Pop A. (2015) Punching shear capacity of reinforced concrete slabs with headed shear studs, *Magazine of Concrete Research*, 68(3), pp. 118-126.
- [34] Hallgren M. (1996) Punching Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Slabs [doctoral thesis], Stockholm: Royal Institute of Technology in Stockholm (KTH).
- [35] Ramdane K. E. (1996) Punching shear of high performance concrete slabs, *Proceedings of the fourth international symposium on utilization of high-strength/high performance concrete*, (Vol. 3, pp. 1015-1026).
- [36] Li K. & Lun K. (2000) Influence of size on punching shear strength of concrete slabs, MEng dissertation, Department of Civil Engineering, and Applied Mechanics, McGill University, Montréal, QC, Canada, pp. 26-44
- [37] Guandalini S. & Muttoni A. (2004) symmetrical punching tests on slabs without transverse reinforcement, Test Report, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 85 (in French)
- [38] Sundquist H. & Kinnunen S. (2004) The effect of column head and drop panels on the punching capacity of flat slabs, Bulletin No. 82. Department of Civil and Architectural Engineering. Royal Institute of Technology. Stockholm, 24 (in Swedish).
- [39] Birkle G. & Dilger W. H. (2008) Influence of slab thickness on punching shear strength, *ACI Structural Journal*, 105(2), 180.
- [40] Marzouk, H., and M. Hossin. (2007) Crack analysis of reinforced concrete two-way slabs. Research Report, 2007.
- [41] Marzouk R. & Rizk E. (2009) Punching analysis of reinforced concrete two-way slabs. Research Report RCS01, Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, St. John's, Newfoundland, Canada.
- [13] Koza J. R. (1994) Genetic programming as a means for programming computers by natural selection." *Statistics and computing*, 4(2), 87-112.
- [14] Golafshani E. M. (2015) Introduction of Biogeography-Based Programming as a new algorithm for solving problems, *Applied Mathematics and Computation*, 270, 1-12.
- [15] Morsch E. (1912) Seine Theorie und Anwendung,, Reinforced Concrete Theory and Application, Der Eisenbetonbau, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart.
- [16] Talbot A. N. (1913), Reinforced concrete wall footings and columns under concentrated loads, *Research and Development Bulletin D47*, Illinois.
- [17] Moe J. (1961) Shearing strength of reinforced concrete slabs and footings under concentrated loads, *Portland Cement Association, Research and Development Laboratories*.
- [18] Rankin G. I. B. & Long A. E. (1987) Predicting the punching strength of conventional slab-column specimens, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 82(1), 327-346.
- [19] ACI 318-08, (2008) ACI Committee, and International Organization for Standardization. Building code requirements for structural concrete and commentary, *American Concrete Institute*.
- [20] EN 1992-1-2, (2004) Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-2. 1st ed., Brussels.
- [21] Novak, P. R., Mendes, N., & Oliveira, G. H., (1999) MATLAB/SIMULINK.
- [22] Elstner R. C. & Hognestad E. (1956), Shearing strength of reinforced concrete slabs. *Journal Proceedings*, 53(7), 29-58.
- [23] Sven K. & Nylander H. (1960) Punching of concrete slabs without shear reinforcement. Elander.
- [24] Moe, J. (1961). Shearing strength of reinforced concrete slabs and footings under concentrated loads. Portland Cement Association, Research and Development Laboratories.
- [25] Topcu I. B. & Sarıdemir M. (2008) Prediction of compressive strength of concrete containing fly ash using artificial neural networks and fuzzy logic, *Computational Materials Science* 41(3), 305-311.
- [26] Mowrer, R. D. & M. D. Vanderbilt. (1967) Shear strength of lightweight aggregate reinforced concrete flat plates, *Journal Proceedings*, 64(11), 722-729.
- [27] Kinnunen S., Nylander H. & Tolf P. (1978) Investigations on punching at the division of building statics and structural engineering, Nordisk Betong, 3, 25-27.
- [28] Regan P. E., Walker P. R. & Zakaria K. A. A., (1979), Tests of reinforced concrete flat slabs, CIRIA Project RP 220.

Prediction of Pushing Shear Capacity in Two-way Slabs Using Genetic Programming and Biogeography-Based Programming

Ashkan Agha Mohammadi¹, Ehsan Darvishan^{2*}

1. MSc, Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

darvishan@riau.ac.ir

Abstracts

Two-way slabs are one of the common structural systems. The benefits of such systems have led to extensive use of them in building construction. However, these systems are prone to pushing shear problem which causes sudden failure. There are lots of equations to predict punching shear of slabs. The main proportion of the existing equations are based on statistical results from previous experimental studies. However, these equations are approximate and have large errors. Therefore, more exact and reliable equations that can estimate punching shear capacity are desirable. The aim of this study is to propose an applicable method to predict punching shear in thin and thick slabs using artificial intelligence. For this reason Genetic Programming (GP) and Biogeography-Based Programming (BBP) are employed to find a relationship between punching shear and the corresponding effective parameters. GP that is inspired by natural genetic process, searches for an optimum population among the various probable ones. Two main operations of GP are crossover and mutation which make it possible to form new generations with better fitnesses. Unlike the GP, BBP is a Biogeography-Based Optimization (BBO) technique which is inspired by the geographical distribution in an ecosystem. BBP employs principles of biogeography to create computer programs. First, 267 experimental data is collected from the past studies. Next, using the aforementioned algorithms, a relationship to predict punching shear is proposed. To evaluate the error of prediction, several error functions including RMSE, MAE, MAPE, R, and OBJ are utilized. Matlab software is used to build the models of prediction. 10 different models are built and the one with the minimum error is selected. Based on the results, GP3 and BBP9 models could reach the best fitness. These models contain 3 sub-trees that use operators of plus, minus, multiplication, division, ln, sin, power 2, power 5 power 0.5, power 0.33, power 0.2, and power 0.25. Overall, the final tree includes several variables and integers, the variables are inputs of column dimension, effective depth, rebar ratio, compressive strength of concrete, and yielding strength of the rebars, and the output of punching shear capacity. The results of modeling are compared with recommended values of the ACI318 and EC2 codes. Comparison shows that code equations are scattered and therefore are not very reliable. Maximum error for both model and code equations occurs when the yielding strength of the rebars is low. Minimum estimation is related to GP and ACI codes with the ratio of 0.485 and 0.52, respectively which is due to very low thickness of the slab (41 to 55 mm). The maximum estimated shear belongs to ACI code in which the estimated value is two times the real one. Also, standard deviation of ACI values is about two times the others. Among the code equations, EC2 values yield more accurate results. However, GP and BBP models give much less mean error. Also, standard deviation of these methods is less than code values. In total, results show that the methods based on artificial intelligence are able to estimate pushing shear with around 2% error, compared to existing code equations which give 14-28% error.

Keywords: Punching shear, Two-way slab, Genetic algorithm, Genetic programming, Artificial intelligence