

تخمین مقاومت برشی بتن با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژنی

حامد قوهانی عرب *

گروه مهندسی عمران، دانشکده شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

مسعود حسین پورفرد

گروه مهندسی عمران، دانشکده شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

محسن راشکی

گروه مهندسی معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

مقاومت بتن در برابر نیروهای برشی یکی از پارامترهای مهم در طراحی سازه‌های بتنی است. شناخت رفتار بتن در برابر برش همواره یکی از مشکلات و معضلات محققین پیرامون این موضوع بوده است. روش‌های مختلف و زیادی در مورد اندازه‌گیری و پیش‌بینی مقاومت برشی مطرح شده است. یکی از معمول‌ترین و رایج‌ترین شیوه‌ها پیدا کردن رابطه‌ای بین مقاومت فشاری و مقاومت برشی می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از طراحی آزمایش در بازه‌ی مقاومت ۳۰-۲۰ مگاپاسکال که منجر به ساخت ۵۰ نمونه‌ی برشی و فشاری گردید، تلاش شده‌است رابطه‌ای کاربردی میان مقاومت فشاری و برشی ارایه گردد. به منظور تخمین مقاومت برشی از روش برنامه‌ریزی بیان ژنی (GEP) استفاده شده و ۵ رابطه پیشنهاد گردیده است. برای انتخاب بهترین رابطه، علاوه بر در نظر گرفتن پارامترهای سنجش خطا نظیر ضریب همبستگی، شاخص ویلموتس و ... معیار سادگی و استفاده آسان از رابطه نیز مد نظر قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: بتن، مقاومت فشاری، مقاومت برشی، برنامه‌ریزی بیان ژنی (GEP).

۱- مقدمه

مطالعه کردند [۵]. walraven یک مدل آماری برای شبیه سازی اندرکنش سنگدانه و سیمان ایجاد نمود که معادلات ارائه شده با push-off به دست آمده از نمونه های آزمایشگاهی بتن مسلح ترک خورده، تطابق خوبی داشت [۶]. Rebeiz و همکاران در پژوهشی به بررسی اثرات نسبت طول به عمق، مقاومت فشاری و درصد تقویت کششی بر روی مقاومت نهایی برشی (V_u) و همچنین مقاومت برشی تامین شده توسط بتن (V_c) بررسی نمودند [۷]. Abdalla & khalil در سال ۲۰۱۶ به بررسی پیرامون مقاومت برشی بتن پرداختند و رابطه ای به منظور تخمین مقاومت برشی براساس مقاومت فشاری ارائه نمودند [۸]. درسالیان اخیر روش برنامه ریزی بیان ژنی مورد اقبال محققین جهت یافتن رابطه بین دو یا چند متغیر قرار گرفته است. برای مثال در سال ۲۰۱۱ Kara در پژوهشی به پیش بینی مقاومت تیرهای بتن مسلح با FRB پرداخت [۹]. در سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۷ گندمی و همکاران به ترتیب رابطه ای برای تیرهای بتن مسلح بدون داشتن آرماتور برشی و تیرهای بتن مسلح همراه آرماتور برشی ارائه کردند [۱۰] [۱۱]. در سال ۲۰۱۷ بهشتی و همکاران به پیش بینی مقاومت برشی ستون های کوتاه بتن آرمه توسط روش برنامه ریزی بیان ژنی و رگرسیون خطی پرداختند [۱۲]. فخاری و همکاران در پژوهشی در سال ۱۳۹۷ با استفاده از همین روش به پیش بینی مقاومت ستون هایی با مقاطع مربع و مستطیل که با الیاف FRP محصور شده اند پرداخته اند [۱۳]. در این پژوهش ۵۰ نمونه بتنی با مقاومت فشاری ۲۰ تا ۳۰ مگاپاسکال ساخته و مقاومت برشی نمونه ها اندازه گیری گردید. با تجمیع نتایج حاصل از آزمایشات انجام گرفته و گزارشات مربوط به سایر پژوهش ها از روش برنامه ریزی بیان ژنی استفاده گردیده و روابطی جهت تخمین مقاومت برشی بر اساس مقاومت فشاری برای محدوده مقاومت فشاری ۲۰ تا ۳۰ مگاپاسکال ارائه گردیده است. در انتها به منظور تعیین محدودیت های روابط ارائه شده، این روابط توسط معیارهای سنجش خطا مقایسه گردیده اند.

بتن یکی از مهم ترین و کاربردی ترین مواد مورد استفاده در مهندسی عمران است. از بتن در ساخت پل ها، راه ها، نیروگاه های هسته ای، تونل ها و ساختمان های تجاری، مسکونی و ... استفاده می شود. حتی در سازه های فلزی که بتن به عنوان ماده اصلی سازه استفاده نمی شود، به عنوان عضو ثانویه مانند دال، پی و دیوار کاربرد دارد. از این رو کاربرد بی حد و حصر بتن در صنعت ساخت و ساز، چه در کشورهای توسعه یافته و چه در کشورهای در حال توسعه با مصرف تقریباً ۳۳ میلیارد تن در هر سال، بتن را به عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح ساخت و ساز معرفی کرده است [۱]. بتن یک ماده ناهمگن و چند فازی می باشد که خصوصیات آن به عوامل متعددی نظیر نسبت آب به سیمان ($\frac{W}{C}$)، نوع سیمان، نوع سنگ دانه و دانه بندی آن، تخلخل، شرایط عمل آوری و ... بستگی دارد. رفتار بتن تحت تنش های وارده پیچیده است، درحالی که بتن در برابر بارهای فشاری مقاومت خوبی از خود نشان می دهد اما در برابر نیروی های کششی و برشی از خود ضعف نشان می دهد. یکی از پارامترهای مبهم در طراحی سازه های بتنی، مقاومت برشی بتن می باشد. بدین منظور روش های مختلف طراحی برشی بسته به مکانیسم انتقال برش توسعه یافته است [۲]. تحقیقات بدست آمده در سال ۱۹۵۰ توسط کمیته ACI نشان داد که درک رفتار مربوط به تنش برشی و قطری یک مساله پیچیده است که به بسیاری از متغیرها بستگی دارد. انجمن مهندسان امریکا بر اساس بررسی های انجام شده توسط Morsch که نشان داد گسیختگی برشی در تیرهای بتن مسلح یک پدیده کششی است، تنش برشی اسمی را به مقاومت فشاری بتن (f_c) مرتبط ساخت [۳]. Hofbeck و همکاران با انجام آزمایش push-off به این نتیجه رسیدند که مقاومت برشی نهایی نمونه ها به مقاومت فشاری تک محوره بتن بستگی دارد و با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت برشی نیز افزایش می یابد [۴]. Paulay و Loeber نخستین کسانی بودند که مکانیسم انتقال برشی را با استفاده از درگیری سنگدانه ها در بتن

۲- برنامه آزمایشگاهی

۱-۲- مصالح مصرفی

حداکثر ۱۹ میلیمتر و شن نخودی با قطر حداکثر ۹/۵ میلیمتر) و ریزدانه، ماسه طبیعی تهیه شده از معدن لار شهرستان زاهدان با مشخصاتی مطابق جدول ۲ می‌باشند. آب مصرفی، آب شرب شهرستان زاهدان با مشخصات مندرج در جدول ۳ می‌باشد و بتن بدون هیچگونه افزودنی ساخته شده است.

سیمان استفاده شده در این تحقیق از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ سیستان با مشخصات مندرج در جدول ۱ می‌باشد. سنگ‌دانه‌های درشت استفاده شده در بتن از مصالح شکسته (شن بادامی با قطر

جدول ۱- مشخصات سیمان تیپ ۲ سیستان

مقدار	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)	انبساط (%)	زمان گیرش (دقیقه)		مقاومت فشاری (MPa)
						ابتدایی	انتهایی	
۴۴/۱۱	۲۷/۶۶	۷/۷۳	۷/۱۱	۰/۰۸	۱۸۷	۲۷۳	۳۱۵۹	۲۸ روزه
								۷ روزه
								۳ روزه
								۲۸ روزه

جدول ۲- مشخصات مصالح سنگی

وزن مخصوص خشک (کیلوگرم بر مترمکعب)	وزن مخصوص اشباع (کیلوگرم بر مترمکعب)	وزن مخصوص ظاهری (کیلوگرم بر مترمکعب)	درصد جذب آب
۲۶۴۵	۲۶۷۲	۲۷۱۰	۱/۰۷
۲۶۲۳	۲۶۵۳	۲۶۸۸	۰/۸۶

جدول ۳- مشخصات آب شرب زاهدان

شوری (Us/cm)	PH (Mg/lit)	CO ₃ (Mg/lit)	HCO ₃ (Mg/lit)	Cl (Mg/lit)	SO ₄ (Mg/lit)	Ca (Mg/lit)	Mg (Mg/lit)	Na (Mg/lit)	سختی کل (ppm)	نسبت سدیوم (٪)	کل املاح جذب محلول سدیوم
۵۷۷۰	۷/۴۳	.	۳۳۵/۵	۹۸۳/۷۶	۱۳۸۹/۶	۱۸۶/۳۷	۱۸۱/۰۳	۸۷۴	۱۲۰۷	۱۰/۹	۳۶۹۳
											۶۱/۱

۲-۲- شرایط آزمایشگاهی

آماده‌سازی نمونه‌ها، نمونه‌ها توسط پلاستیک به مدت ۲۰ ساعت پوشانده شده، تا از تبخیر سطحی آن جلوگیری به عمل آید. عمل-آوری بتن با قرار دادن نمونه‌های ساخته شده به مدت ۲۸ روز درون حوضچه آب آهک اشباع با دمای ۱±۲۴ انجام گردید.

طراحی آزمایش بر اساس محدودیت‌های آزمایشگاهی و مصالح موجود با روش فاکتوریل کامل [۱۴] در بازه مقاومت فشاری ۳۰-۲۰ مگاپاسکال انجام گرفت و نتیجه آن، ساخت ۱۵۰ آزمون مکعبی برای انجام آزمایش مقاومت برشی و ۱۵۰ آزمون استوانه‌ای برای آزمایش مقاومت فشاری شد.

۳-۲- انجام آزمایش و بررسی نمونه‌ها

پس از عمل‌آوری بتن، مقاومت فشاری و برشی به صورت زیر اندازه‌گیری شده است:

روند ساخت نمونه‌ها به شکل مختصر در ادامه تشریح می‌گردد؛ طرح اختلاط بتن بر اساس ACI صورت گرفته است. بتن ریزی در ۵۰ نوبت که هر نوبت شامل ۳ آزمون برشی و ۳ آزمون فشاری می‌باشد، انجام شد. ساخت و تراکم نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتیمتری مطابق استاندارد BSEN12350-1 [۱۵] و نمونه‌های استوانه‌ای مطابق استاندارد ASTM C192 صورت گرفته است [۱۶]. پس از

۱-۳-۲- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C39 اندازه‌گیری شده است. بدین صورت که نمونه‌ها با توجه به شکل ۱، بین دو

ارایه داده‌اند. روش hofbeck یا نمونه Z شکل در سال ۱۹۶۹ ابداع گردید [۳]. و روش تیر Iosipescu توسط Pffire & Bazant برای بررسی مقاومت برشی بتن مورد استفاده قرار گرفت [۱۹]. از دیگر روش‌های موجود، استفاده از سرعت پالس اولتراسونیک برای فهمیدن ارتباط بین مقاومت فشاری و برشی بتن می‌باشد که توسط Nogueira & Rens مورد استفاده قرار گرفته است [۲۰].

در این مقاله از ست‌آپ استفاده شده توسط Elbakry & Tarabia که در شکل ۲ نشان داده شده است استفاده گردید [۲۱]. نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری و برشی در جدول ۴ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از مقاومت برشی و فشاری نمونه‌ها به منظور مقایسه آسانتر در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. به منظور ارزیابی میزان تطابق نتایج آزمایشگاهی با روابط آیین‌نامه‌ای، مقاومت برشی نمونه‌ها با مقادیر پیشنهادی بتن ایران (آبا) [۲۲] و ACI [۲۳] در اشکال ۴ و ۵ مقایسه گردیده است.

با بررسی شکل ۴ و شکل ۵ مشخص می‌گردد که مقاومت برشی پیشنهاد شده توسط آیین‌نامه‌ها بسیار محافظه‌کارانه است، لذا در بخش بعدی مقاله تلاش می‌گردد با کمک نتایج آزمایش به همراه جمع‌آوری نتایج سایر پژوهشگران و استفاده از هوش مصنوعی مبادرت به ارایه رابطه‌ای جدید برای تخمین مقاومت برشی بتن نمود که همبستگی بهتری با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد.

فک دستگاه جک هیدرولیک به ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن قرار گرفت و با سرعت ۲۴۳۰ N/sec بارگذاری شده، تا نمونه‌ها به گسیختگی کامل برسند [۱۷].



شکل ۱- نمایی از نمونه و آزمایش مقاومت فشاری

۲-۳-۲- مقاومت برشی

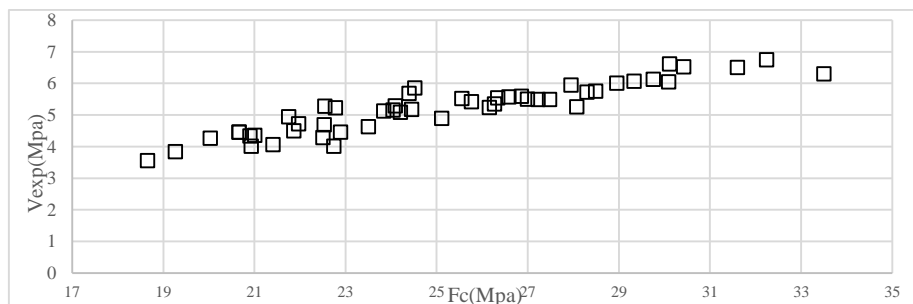
یکی از مشکلات اساسی در زمینه ارزیابی مقاومت برشی بتن، ایجاد روشی مطمئن برای اندازه‌گیری مقاومت و همچنین فهم رفتار بتن در برابر نیروهای برشی می‌باشد [۱۸]. از این رو افراد مختلفی روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری مقاومت برشی بتن



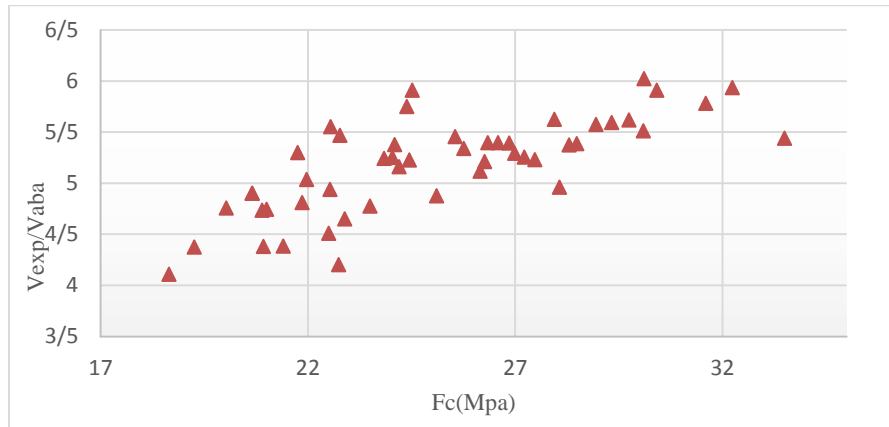
شکل ۲- نمایی از ست‌آپ استفاده شده و نحوه شکست نمونه‌ها در آزمایش مقاومت برشی

جدول ۴- نتایج آزمایش‌ها

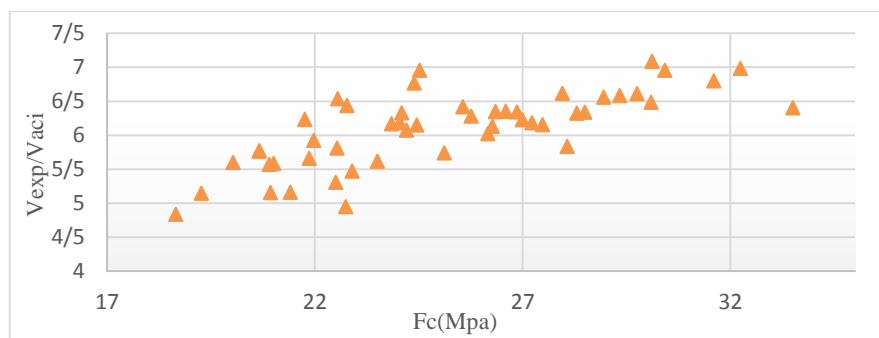
شماره نمونه	مقاومت فشاری (Mpa)	مقاومت برشی (Mpa)	شماره نمونه	مقاومت فشاری (Mpa)	مقاومت برشی (Mpa)
۱	۲۱	۴/۳۵	۲	۳۱/۶	۶/۵
۳	۲۴/۴۵	۵/۱۷	۴	۲۲/۷۴	۴/۰۱
۵	۲۶/۲۶	۵/۳۴	۶	۲۷/۹۴	۵/۹۴
۷	۲۲/۷۷	۵/۲۲	۸	۲۱/۷۵	۴/۹۴
۹	۳۲/۲۴	۶/۷۴	۱۰	۲۴/۵۱	۵/۸۵
۱۱	۲۰/۰۳	۴/۲۶	۱۲	۳۳/۵	۶/۵
۱۳	۱۸/۶۵	۳/۵۵	۱۴	۲۶/۱۵	۵/۲۳
۱۵	۲۶/۳۴	۵/۵۴	۱۶	۲۴/۲	۵/۰۸
۱۷	۲۸/۰۷	۵/۲۵	۱۸	۲۰/۹۳	۴/۰۱
۱۹	۲۶/۵۸	۵/۵۶	۲۰	۳۰/۴۲	۶/۵۲
۲۱	۲۵/۱	۴/۸۸	۲۲	۲۶/۹۹	۵/۵
۲۳	۲۱/۸۶	۴/۵	۲۴	۲۸/۴۹	۵/۷۵
۲۵	۲۷/۲۲	۵/۴۸	۲۶	۲۲/۵۳	۴/۶۹
۲۷	۲۴/۰۴	۵/۱۵	۲۸	۲۹/۳۳	۶/۰۶
۲۹	۲۸/۳	۵/۷۲	۳۰	۲۱/۴	۴/۰۵
۳۱	۲۳/۵	۴/۶۳	۳۲	۲۴/۰۴	۵/۲۸
۳۳	۲۰/۹	۴/۳۳	۳۴	۲۷/۴۷	۵/۴۸
۳۵	۳۰/۰۹	۶/۰۴	۳۶	۲۲/۴۵	۵/۲۷
۳۷	۲۲/۸۹	۴/۴۵	۳۸	۲۶/۸۶	۵/۵۹
۳۹	۲۹/۶۵	۶/۰۲	۴۰	۲۰/۶۵	۴/۴۵
۴۱	۲۵/۷۶	۵/۴۲	۴۲	۲۴/۳۹	۵/۶۸
۴۳	۲۲/۵	۴/۲۸	۴۴	۲۸/۹۵	۶
۴۵	۲۱/۹۶	۴/۷۲	۴۶	۲۳/۸۴	۵/۱۲
۴۷	۲۵/۵۵	۵/۱۵	۴۸	۳۰/۱۱	۶/۶۱
۴۹	۲۹/۷۵	۶/۱۳	۵۰	۱۹/۲۶	۳/۸۴



شکل ۳- رابطه مقاومت فشاری و مقاومت برشی حاصل از انجام آزمایش



شکل ۴- نسبت مقاومت برشی آزمایشگاهی به مقاومت برشی حاصل از رابطه آبا



شکل ۵- نسبت مقاومت برشی آزمایشگاهی به مقاومت برشی حاصل از رابطه ACI

۳- برنامه ریزی بیان ژنی (GEP)

فعلی به نسل آینده می‌باشد. هدف عملگر جهش، بهینه‌سازی درون کروموزوم‌های معین به صورت تصادفی می‌باشد. این روند در شکل ۶ نمایش داده شده است.

برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) که روشی تعمیم یافته از برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) می‌باشد، برای اولین بار توسط فریرا در سال ۲۰۰۱ ارائه گردید [۲۴]. این روش از شاخه‌های الگوریتم ژنتیک (GA) می‌باشد. مبنای این روش بر اساس نظریه تکاملی داروین است که در آن افراد جامعه به صورت تصادفی انتخاب شده بهترین آن‌ها برای تولید نسل بعدی برگزیده می‌شوند. تفاوت اصلی این سه الگوریتم بدین صورت است که در (GA) افراد، رشته‌های خطی با طول ثابت هستند درحالی‌که در (GP) افراد غیرخطی با اندازه و اشکال متفاوت می‌باشند و در (GEP) افراد به صورت رشته‌های خطی که طول ثابتی دارند کدگذاری می‌گردند سپس به صورت غیر خطی با اندازه و شکل‌های متفاوت نمایان می‌شوند. در GEP برای انتخاب افراد از روش چرخ رولت برای گزینش افراد استفاده می‌شود. در این روش بر خلاف GA و GP از چندین عملگر ژنتیکی برای تکثیر افراد به صورت همزمان استفاده می‌گردد [۱۳]. تکثیر فرآیندی است که هدف آن نگهداری افراد مناسب از نسل

۳-۱- نتایج برنامه‌ریزی ژنی

در این بخش برای پیش‌بینی مقاومت برشی بتن بر اساس مقاومت فشاری، از ۵۰ داده بدست آمده از آزمایش‌های این تحقیق و همچنین از ۲۳ داده‌های بدست آمده از پژوهش طوفانی میلانی مطابق جدول ۵ استفاده گردیده است [۲۵]. در الگوریتم تدوین شده بر اساس روش برنامه‌ریزی بیان ژنی جهت تخمین مقاومت برشی بر اساس مقاومت فشاری، علاوه بر چهار عملگر اصلی (+ - × ÷) از عملگرهای root, square, power نیز استفاده شده است. همچنین توابع پیوند ضرب و جمع برای برقراری ارتباط بین ژن‌ها استفاده گردیده است. در این الگوریتم معیار شایستگی، کمینه کردن ریشه میانگین خطای مربعات انتخاب شده است. در برنامه نوشته شده جهت تخمین مقاومت برشی بتن بر

جدول ۵- تعداد داده‌های آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی

نوع داده‌ها	تعداد	درصد٪
آموزش	۳۹	۵۳
آزمایش	۱۱	۱۵
اعتبارسنجی	۲۳	۳۲

خروجی‌های بدست آمده از برنامه‌ریزی بیان‌ژنی براساس ۲۰ اجرای مختلف با توجه به تعداد سرشاخه‌ها، تعداد ژن‌ها و ... منجر به ارایه‌ی روابط مختلفی برای تخمین مقاومت برشی بتن براساس مقاومت فشاری گردید. ۵ رابطه‌ی منتخب حاصل از برنامه‌ریزی بیان‌ژنی براساس کمیته‌ی ریشه میانگین خطای مربعات در روابط ۱ تا ۵ ارائه گردیده است.

$$v = 0.9052 \times f_c^{0.5406} \quad (1)$$

در رابطه ۱، v مقاومت برشی بتن و f_c مقاومت فشاری بتن می‌باشد.

$$v = 0.978 \times f_c^{0.5278} - 0.1956 \quad (2)$$

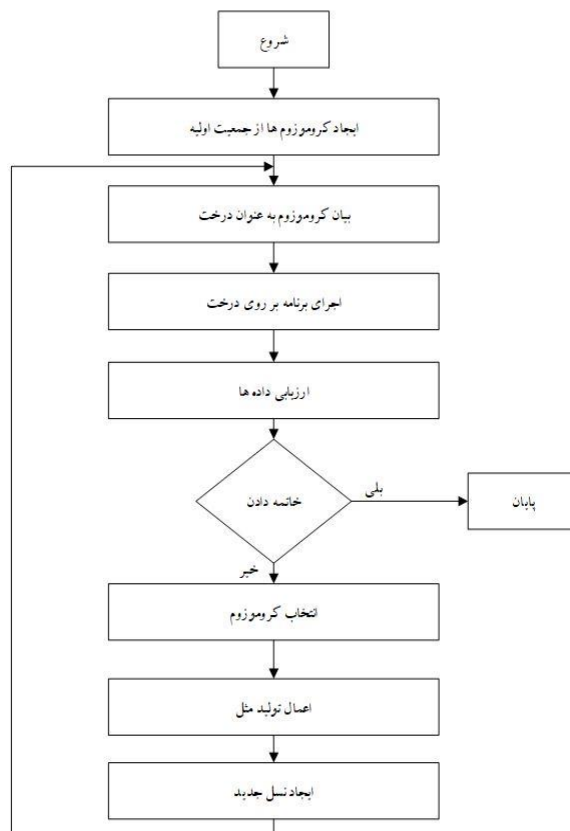
$$v = 0.06994 \times f_c + 3.569 \quad (3)$$

$$v = -21.56 \times 10^{-5} \times f_c^2 + 0.1042 f_c + 2.719 \quad (4)$$

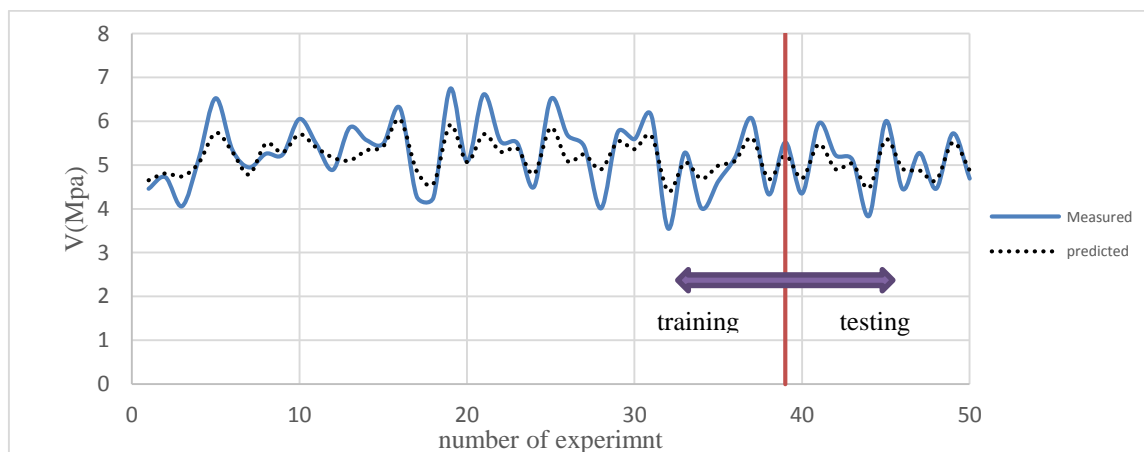
$$v = 6.4 \times 10^{-6} \times f_c^3 - 16.52 \times 10^{-4} f_c^2 + 0.1923 f_c + 1.276 \quad (5)$$

به‌عنوان نمونه، در شکل ۷ مقایسه‌ای از نتایج داده‌های پیش‌بینی شده توسط برنامه‌ریزی بیان‌ژنی در رابطه ۱ با داده‌های بدست آمده از آزمایشگاه نشان داده شده است.

اساس مقاومت فشاری که برپایه برنامه‌ریزی بیان‌ژنی تدوین گردیده؛ تعداد کروموزوم‌ها ۵۰، تعداد ژن‌ها ۱۰-۱، اندازه-سرشاخه ۱۰-۲، نرخ جهش ۰/۰۰۱، نرخ وارون‌سازی ۰/۰۰۶، نرخ ترکیب ژن ۰/۰۰۲ و نرخ ترانهش ژن ۰/۰۰۲ انتخاب گردیده است.



شکل ۶- نمایی از الگوریتم GEP



شکل ۷- داده‌های بدست آمده آزمایشگاهی در کنار داده‌های تخمین زده شده توسط رابطه شماره ۱

۲-۳- سنجش پارامترهای خطا

می‌گردد. این شاخص‌ها عبارتند از: ضریب همبستگی، ریشه میانگین خطای مربعات، میانگین درصد مطلق خطا، ضریب نش، شاخص ویلموتس و شاخص عملکرد.

برای ارزیابی و مقایسه دقت روابط ارایه شده در قسمت قبل و همچنین انتخاب بهترین رابطه، از ۶ پارامتر سنجش خطا استفاده

۱-۲-۳- ضریب همبستگی^۱ (R)

این ضریب که توسط رابطه ۶ محاسبه می‌گردد، ابزاری برای نشان دادن ارتباط خطی بین دو متغیر می‌باشد. مقدار ضریب همبستگی عددی بین -۱ تا +۱ می‌باشد. مقادیر مثبت و منفی یک بیانگر ارتباط کامل خطی بین دو متغیر و مقدار صفر نشان دهنده این است که هیچ ارتباطی بین دو متغیر وجود ندارد.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{\text{exp}} - \bar{V}_{\text{exp}})(V_{\text{pre}} - \bar{V}_{\text{pre}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{\text{exp}} - \bar{V}_{\text{exp}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{\text{pre}} - \bar{V}_{\text{pre}})^2}} \quad (6)$$

در رابطه (۶) V_{pre} ، \bar{V}_{pre} ، V_{exp} ، \bar{V}_{exp} و n به ترتیب مقاومت برشی تجربی، مقاومت برشی پیش‌بینی شده، میانگین مقاومت برشی پیش‌بینی شده و تعداد کل نمونه‌ها می‌باشد.

۲-۲-۳- ریشه میانگین خطای مربعات^۲ (RMSE)

یکی از پرکاربردترین معیارهای خطا برای اندازه‌گیری دقت روابط می‌باشد. این معیار که توسط رابطه ۷ محاسبه می‌شود، شاخصی برای سنجش دقت نتایج می‌باشد و هرچه مدل بهتر بر داده‌ها منطبق باشد مقدار آن کمتر می‌شود.

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{\text{exp}} - V_{\text{pre}})^2}}{n} \quad (7)$$

۳-۲-۳- میانگین درصد مطلق خطا^۳ (MAPE)

این شاخص که مطابق رابطه ۸ محاسبه می‌شود، میانگین درصد مطلق خطا را در یک مجموعه از مقادیر پیش‌بینی شده محاسبه می‌کند. مقدار این شاخص آماری که به صورت درصد است هرچه کم‌تر باشد دلالت بر عملکرد بهتر مدل دارد.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{V_{\text{exp}} - V_{\text{pre}}}{V_{\text{exp}}} \right|}{n} \times 100 \quad (8)$$

۳-۲-۴- ضریب نش^۴ (NSE)

این معیار برای ارزیابی توانایی تخمین فرمول ارایه شده می‌باشد. محدوده این پارامتر از ۱ تا منفی بی‌نهایت می‌باشد. مقدار ۱ نشان دهنده عملکرد خوب و منفی بی‌نهایت نشان دهنده دقت پایین مدل می‌باشد. این شاخص توسط رابطه ۹ محاسبه می‌گردد.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_{\text{exp}} - V_{\text{pre}})^2}{\sum_{i=1}^n (V_{\text{exp}} - \bar{V}_{\text{exp}})^2} \quad (9)$$

۵-۲-۳- شاخص ویلموتس^۵ (WI)

یک شاخص استاندارد برای پیش‌بینی خطای مدل ارایه شده می‌باشد که مقدار آن بین صفر تا ۱ می‌باشد. بدین صورت که مقادیر نزدیک به صفر نشان دهنده دقت پایین مدل و مقادیر نزدیک به یک نشان دهنده عملکرد خوب مدل می‌باشد. این شاخص مطابق رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$WI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_{\text{exp}} - V_{\text{pre}})^2}{\sum_{i=1}^n (|V_{\text{pre}} - \bar{V}_{\text{exp}}| + |V_{\text{exp}} - \bar{V}_{\text{exp}}|)^2} \quad (10)$$

۶-۲-۳- شاخص عملکرد^۶ (OI)

روشی برای سنجش میزان خوب بودن عملکرد مدل است که این شاخص همانند شاخص ویلموتس در محدوده ۰ تا ۱ می‌باشد. شاخص عملکرد (OI) توسط رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$OI = \frac{1}{2} \left[2 - \frac{RMSE}{V_{\text{exp}}^{\max} - V_{\text{pre}}^{\min}} - \frac{\sum_{i=1}^n (V_{\text{exp}} - V_{\text{pre}})^2}{\sum_{i=1}^n (V_{\text{exp}} - \bar{V}_{\text{exp}})^2} \right] \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) V_{pre}^{\min} ، V_{exp}^{\max} به ترتیب بزرگ‌ترین مقاومت برشی تجربی، کوچک‌ترین مقاومت برشی پیش‌بینی شده می‌باشد. نتایج و مقایسه این ضرایب بصورت جداگانه برای داده‌های آموزشی، آزمایشی و اعتبارسنجی بترتیب در جداول ۶، ۷ و ۸ ارائه شده است.

⁴ Nash-Sutcliffe Efficiency

⁵ Willmott's index of agreement

⁶ overall index

¹ Correlation coefficient

² Root-Mean-Square Error

³ Mean Absolute Percentage Error

جدول ۶- شاخص‌های سنجش خطا برای داده‌های آموزش

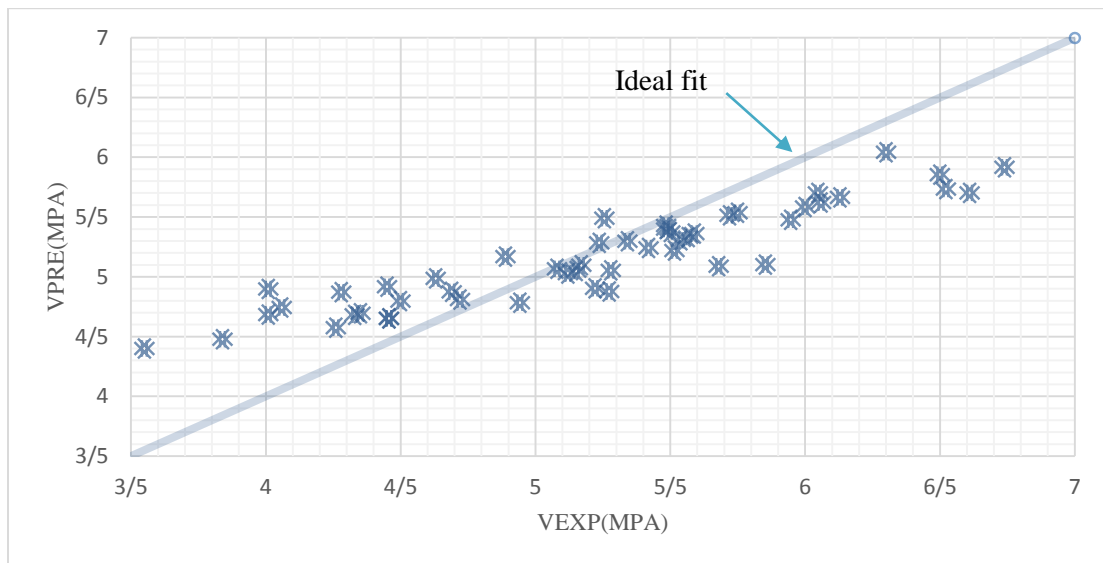
شاخص / رابطه	R	RMSE	MAPE	NSE	WI	OI
۱	۰/۹۲۵	۰/۴۵۳	۷/۱۸۴	۰/۷۰۷	۰/۸۶۲	۰/۷۸۲
۲	۰/۹۲۵	۰/۴۵۰	۷/۱۳۶	۰/۷۱۱	۰/۸۶۵	۰/۷۸۵
۳	۰/۹۲۲	۰/۵۷۶	۹/۳۰۸	۰/۵۲۷	۰/۷۱۲	۰/۶۷۳
۴	۰/۹۲۳	۰/۴۹۹	۷/۹۷۷	۰/۶۴۴	۰/۸۱۳	۰/۷۴۴
۵	۰/۹۲۵	۰/۴۲۸	۶/۷۵۰	۰/۷۳۸	۰/۸۸۳	۰/۸۰۲

جدول ۷- شاخص‌های سنجش خطا برای داده‌های آزمایشی

شاخص / فرمول	R	RMSE	MAPE	NSE	WI	OI
۱	۰/۹۳۰	۰/۳۶۵	۶/۸۸	۰/۶۹۳	۰/۸۶۶	۰/۷۶۲
۲	۰/۹۳۰	۰/۳۶۳	۶/۸۲۳	۰/۶۹۸	۰/۸۶۹	۰/۷۶۴
۳	۰/۹۲۶	۰/۵۰۸	۸/۹۸۲	۰/۴۱۰	۰/۶۸۲	۰/۵۸۷
۴	۰/۹۲۷	۰/۴۱۳	۷/۷۰۹	۰/۶۰۹	۰/۸۰۵	۰/۷۰۹
۵	۰/۹۳۰	۰/۳۴۶	۶/۴۵۵	۰/۷۲۶	۰/۸۸۷	۰/۷۸۲

جدول ۸- شاخص‌های سنجش خطا برای داده‌های اعتبارسنجی

شاخص / فرمول	R	RMSE	MAPE	NSE	WI	OI
۱	۰/۹۹۰	۰/۱۷۸	۱/۶۷۹	۰/۹۶۹	۰/۹۹۱	۰/۹۵۲
۲	۰/۹۹۰	۰/۱۸۵	۱/۷۴۹	۰/۹۶۱	۰/۹۹۱	۰/۹۵۰
۳	۰/۹۹۴	۰/۳۸۴	۴/۱۴۶	۰/۸۵۸	۰/۹۵۸	۰/۸۶۰
۴	۰/۹۹۲	۰/۱۲۹	۱/۲۶۱	۰/۹۸۴	۰/۹۹۵	۰/۹۶۹
۵	۰/۹۸۵	۰/۲۲۵	۲/۲۸۷	۰/۹۵۱	۰/۹۸۶	۰/۹۳۵



شکل ۸- داده‌های آزمایشگاهی در برابر داده‌های تخمین زده شده توسط رابطه شماره ۱

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش پس از انجام آزمایشات فشاری و برشی بر روی نمونه‌های بتنی، به ارزیابی مدل‌هایی جهت پیش‌بینی مقاومت برشی بر اساس مقاومت فشاری، بر مبنای برنامه‌ریزی بیان ژنی پرداخته شد است. در این مقاله از داده‌های حاصل از ۵۰ نمونه بتنی و همچنین داده‌های ارزیابی شده در سایر تحقیقات برای ارائه مدل استفاده گردید. نتایج بدست آمده از بررسی معیارهای خطا نشان می‌دهد از میان روابط ارزیابی شده، رابطه شماره ۳ عملکرد ضعیف‌تری برای پیش‌بینی مقاومت برشی دارد. از طرفی رابطه شماره ۵ بهترین عملکرد بین روابط ارزیابی شده را دارد، اما باید توجه داشت که این رابطه چندجمله‌ای درجه ۳ می‌باشد و استفاده از این نوع روابط برای مهندسان رضایت بخش نمی‌باشد. لذا با بررسی روابط ارزیابی شده و مقایسه پارامترهای سنجش خطای بین روابط ارزیابی شده و همچنین با در نظر گرفتن سهولت استفاده از رابطه، معادله شماره ۱ جهت تخمین مقاومت برشی بتن بر اساس مقاومت فشاری پیشنهاد می‌گردد. در شکل ۸ مقایسه بین مقاومت برشی حاصل از نتایج آزمایش و مقاومت برشی تخمین زده شده توسط رابطه ۱ ارزیابی گردیده است.

مقادیر معیارهای ضریب همبستگی، ریشه میانگین خطای مربعات، میانگین درصد مطلق خطا، ضریب نش، شاخص ویلموتس و شاخص عملکرد برای رابطه ۱ به ترتیب ۰/۹۲۵، ۰/۴۵۳، ۰/۱۸۴، ۰/۷۰۷، ۰/۸۶۲ و ۰/۷۸۲ می‌باشد. از طرفی شکل کلی رابطه پیشنهادی شبیه روابط آیین‌نامه‌ها می‌باشد و با تغییر ضرایب ثابت بدست آمده از این تحقیق، امکان تخمین بهتر مقاومت برشی توسط روابط آیین‌نامه امکان پذیر است.

۵- مراجع

- [4] Hofbeck, J., et al., Shear transfer in reinforced concrete, Journal Proceedings, Vol. 66, No. 2, pp. 1248-1256, 1969.
- [5] Paulay, T. and P. Loeber, Shear transfer by aggregate interlock, Special Publication, Vol. 42, No. pp. 1-16, 1974.
- [6] Walraven, J. C., Fundamental analysis of aggregate interlock, Journal of the Structural Division, Vol. 107, No. 11, pp. 2245-2270, 1981.
- [7] Rebeiz, K. S., et al., Effect of variables on shear strength of concrete beams, Journal of materials in civil engineering, Vol. 13, No. 6, pp. 467-470, 2001.
- [8] Elsadeg A. Abdalla, F. O. K., Shear Strength of Self Compacting Concrete, International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology, Vol. 3, No. 2, pp. 17-13, 2016.
- [9] Kara, I. F., Prediction of shear strength of FRP-reinforced concrete beams without stirrups based on genetic programming, Advances in Engineering Software, Vol. 42, No. 6, pp. 295-304, 2011.
- [10] Gandomi, A. H., et al., Formulation of shear strength of slender RC beams using gene expression programming, part I: Without shear reinforcement, Automation in Construction, Vol. 42, No. pp. 112-121, 2014.
- [11] Gandomi, A. H., et al., Formulation of shear strength of slender RC beams using gene expression programming, part II: With shear reinforcement, Measurement, Vol. 95, No. pp. 367-376, 2017.
- [12] Aval, S. B., et al., Estimating shear strength of short rectangular reinforced concrete columns using nonlinear regression and gene expression programming, Structures, Elsevier, Vol. 12, pp. 13-23, 2017.
- [۱۳] فخاریان، پ.، همکاران.، ارائه مدل پیش‌بینی مقاومت فشاری ستون‌های با مقاطع مستطیل محصور شده با الیاف پلیمری (FRP) به وسیله روش برنامه‌نویسی عبارتی ژنتیک (GEP).، تحقیقات بتن.، سال یازدهم.، شماره اول.، صفحات: ۵-۱۸.، ۱۳۹۶.
- [14] Siebertz, K., D. Van Beber, and T. Hochkirchen. "Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)", 2010.
- [15] EN, B., 12350-1: Testing fresh concrete-Part 1: Sampling., European Committee for Standardization 2009.
- [16] Standard, A. S. T. M., C192/C192M, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken PA 2007.
- [17] Standard, A. S. T. M., Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens., ASTM C39 2010.
- [18] Boulifa, R., et al., A new technique for studying the behaviour of concrete in shear, Journal of King

[1] Nogueira, C. L., A New Method to Test Concrete Tensile and Shear Strength with Cylindrical Specimens, ACI Materials Journal, Vol. 115, No. 6, pp. 909-923, 2018.

[2] Wong, R., et al., Shear strength components of concrete under direct shearing, Cement and Concrete Research, Vol. 37, No. 8, pp. 1248-1256, 2007.

[3] ACI-ASCE COMMITTEE 326., Shear and diagonal tension: Part 2-Beams and Frames, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 59, No. 3, pp. 279-333, 1962.

Saud University-Engineering Sciences, Vol. 25, No. 2, pp. 149-159, 2013.

[19] Rao, G. A. and A. Rao, Toughness indices of fiber reinforced concrete subjected to mode II loading, Proceedings of FraMCoS-7, Vol., No. pp. 112-117, 2010.

[20] Nogueira, C. L. and K. L. Rens, Experimental analysis of cement-based materials under shear stress, Construction and Building Materials, Vol. 170, No. pp. 392-401, 2018.

[21] Elbakry, H. M. and A. M. Tarabia, Factors affecting bond strength of RC column jackets, Alexandria Engineering Journal, Vol. 55, No. 1, pp. 57-67, 2016.

[۲۲] دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، آیین نامه بتن ایران (آبا)، تجدیدنظر اول، چاپ هفتم، ۱۳۸۳.

[23] ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)[and] Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14). 2014.

[24] Ferreira, C. Gene expression programming in problem solving. Soft computing and industry, Springer, pp.635-653, 2002.

[۲۵] طوفانی میلانی، ا.، همکاران، بررسی مقاومت برشی بتن پودری واکنش پذیر تحت اثر برش خالص و مقایسه‌ی آن با بتن معمولی، مجله تحقیقات بتن، سال هشتم، شماره اول، صفحات: ۲۵-۱۵، ۱۳۹۴.

Estimation of concrete shear strength using gene expression programming algorithm

Hamed Ghohani Arab *

Civil engineering department, university of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Masoud Hossein Pour Fard

Civil engineering department, university of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Mohsen Rashki

Architecture engineering department, university of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Abstract

Concrete shear resistance is one of the most important parameters in concrete structures design. Suitable understanding of concrete behavior against shear forces has always been a problem for researchers. Many different methods have been developed for measuring and predicting shear strength. One of the most common method, is to find a relationship between compressive and shear strength. In this study, an attempt was made to provide a practical relationship between compressive and shear strength using an experimental design with compressive strength in the range of 20-30 MPa which resulted in 50 specimens. Gene expression Programming (GEP) method has been used to estimate shear resistance and five relationships have been provided. In order to select the best relationship, in addition to considering error measurement parameters such as correlation coefficient, Willmotts index, etc., the criterion of simplicity and easy use of the relation is also considered.

Keywords: Concrete, Compressive strength, Shear strength, Gene expression Programming (GEP).

* Corresponding Author: ghohani@eng.usb.ac.ir