3rd International Conference on Soft Computing
• 20 & 21 Nov. 2019
• Faculty of Technology and Engineering- East of Guilan
انجمن سیستمهای هوشمند ایران
Intelligent Systems Scientific Society of Iran
دانشگاه گیلان
University of Guilan
سومین کنفرانس بین المللی
• ۲۹ و ۳۰ آبان ۱۳۹۸
• دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان

کاربرد الگوریتم ژنتیک در پیش‌بینی خصوصیات مکانیکی ملات سیمان حاوی میکرو و نانوسیلیس

سید علی امامیان[۱]، حمید اسکندری نداف*[۲]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه حکیم سبزواری؛ s.ali.emamian@gmail.com
[۲]دانشیار مهندسی عمران سازه، دانشگاه حکیم سبزواری؛ hamidiisc@yahoo.com

چکیده

ملات سیمان ماده کامپوزیت و از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده‌ی بتن می‌باشد. به همین جهت بررسی خصوصیات مکانیکی یکی از پر کاربردترین مصالح مصرفی در مهندسی عمران از اهمیت زیادی برخوردار است. الگوریتم ژنتیک یکی از جدیدترین از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است که به دلیل عملکرد بهتر نسبت به سایر روش‌های هوش مصنوعی نقشی مهم را در تصمیم‌گیری‌ها ایفا می‌کند. برنامه بیان ژنتیک در بسیاری از مسائل مهندسی عمران به منظور پیش‌بینی خصوصیات مکانیکی (مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی) مواد برپایه سیمان مورد استفاده قرار گرفته است. از این رو در این پژوهش به پیش‌بینی و فرموله کردن مقاومت فشاری و خمشی ملات سیمان حاوی میکرو و نانوسیلیس در سنین مختلف ۷،۳ و ۲۸ روزه و با در نظر گفتن تمامی پارامترهای تاثیرگذار پرداخته شده است.

کلمات کلیدی

برنامه‌نویسی بیان ژنتیک؛ ملات سیمان؛ میکرو و نانوسیلیس؛ خصوصیات مکانیکی

۱- مقدمه

هدف اصلی استفاده از روش‌های هوشمند در هوش مصنوعی حل مسائل مهندسی و یافتن پاسخ بهینه‌ی آن‌هاست. روش‌های کلاسیک بهینه سازی اغلب منجر به دستور العملی خاص برای حل مسئله می‌شود (تنها برای پاسخ‌گویی به مسائل خاص کابرد دارد)، در حالی‌که که روش‌های هوشمند؛ دستورالعمل‌های کلی در حل مسائل مختلف هستند. این روش‌ها الهام گرفته شده از پدیده‌های واقعی در جهان طبیعت هستند. در دهه‌ی ۱۹۶۰ الگوریتم‌هایی برای حل مسائل پیچیده با پیروی کردن از موجودات شکل گرفت. این موضوع منجر به شکل‌گیری الگوریتم‌های مختلف شده است که امروزه ار آن‌ها با نام الگوریتم تکاملی یاد می‌شود [۱, ۲]. از سال ۱۹۶۲ به بعد پژوهشگران زیادی در زمینه محاسبات تکاملی فعالیت داشته‌اند. به طور مثال ریچنبرگ[۱] [۳] و لورنس فوگل[۲] [۴] در سال ۱۹۶۰ به ترتیب به معرفی استراتژی های تکامل و معرفی برنامه نویسی تکاملی پرداختند. جان هلند[۳] [۵] و کوزا[۴] [۶] هر یک به ترتیب در سال ۱۹۷۵ و ۱۹۹۲ به معرفی الگوریتم ژنتیک و برنامه نویسی ژنتیکی پرداختند. نکته حائز اهمیت در مورد روش‌ها ماهیت یکسان آن‌هاست، در واقع هر یک از این روش‌ها بیان‌های مختلفی از یک استراتژی یکسان‌اند که محاسبات تکاملی نامیده می‌شوند [۷]. الگوریتم‌های تکاملی از جمله ابزارهای حل مسائل پیچیده مهندسی می‌باشند که هدایتگر آن‌ها تصادفی و متنوع بودن آن‌هاست.

روش‌های فراابتکاری نظیر الگوریتم ژنتیک، الگوریتم کلونی مورچگان، الگوریتم کلونی زنبور عسل و الگوریتم شبیه سازی تبرید و ... از جمله روش‌هایی هستند که تعدادی انبوهی از حالات ممکن برای یک جواب دقیق را در محدوده زمانی اندکی ارائه می‌دهند. این مسئله نشان‌دهنده

* Corresponding author.
E-mail address: Hamidiisc@yahoo.com, Tel/Fax +985144013386
۱ Rechenberg
۲ Fogel
۳ John Holland 1975
۴ Koza 1992

توسعه استفاده از روش‌های هوش مهندسی در مسائل مهندسی عمران است [۸]، که در این بین برنامه‌نویسی بیان ژنتیکی (GEP)[۱] از روش‌های قدرتمند در این زمینه است [۹]. شایان ذکر است که برنامه‌نویسی بیان ژنتیکی زیر مجوعه‌ای از الگوریتم ژنتیک است که به دلیل طبقه‌بندی داده‌ها و آموزش ارتباط داده‌های ورودی و خروجی برای حل مسائل پیچیده‌ی مهندسی، از محبوبیت و از کارآمدی بیشتری برخوردار بوده و نقشی پررنگ در حل مسایل پیچیده‌ی مهندسی عمران را ایفا می‌کند.

از سوی دیگر ملات سیمان و بتن دارای ساختاری کامپوزیت (مرکب از چند جز) است که افزودنی‌های گوناگون سبب ایجاد خصوصیات متنوع در آن می‌شود [۱۰]. بنابراین خصوصیات مکانیکی ملات سیمان و یا بتن وابسته به یک پارامتر نیست بلکه تحت تاثیر روابط بین چندین پارامتر است؛ از جمله‌ی این پارامترها می‌توان به نسبت آب به سیمان [۱۱]، نسبت سنگدانه به سیمان [۱۲]، سن نمونه [۱۳]، و دیگر افزودنی‌ها [۱۴] ملات سیمان و یا بتن اشاره کرد. به طور مثال، مطالعاتی توسط کیم و همکاران[۲] [۱۵] به بررسی تاثرات دانه‌بندی سنگدانه‌ها و نسبت آب به سیمان بر روی خصوصیات مکانیکی ملات سیمان پرداخته اند. نتایج نشان داد که کاهش اندازه سنگدانه‌های مصرفی و نسبت آب به سیمان منجر به افزایش مقاومت شده است. امروزه افزودنی‌های فراوانی برای بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد سیمانی وجود دارد، که این موضوع از طریق جانشینی مصالح پوزولانی با سیمان در بتن یا ملات و یا بتن رخ می‌دهد [۱۶]. مصالح پوزولانی مانند میکرو و نانوسیلیس از اجزای تاثیرگذار در کیفیت ملات سیمان و یا بتن هستند که می‌توانند اثرات منحصر به فردی را در مقاومت، نفوذپذیری، خوردگی و دوام ملات سیمان داشته باشند [۱۷]. با توجه به این موضوع که مواد با پایه سیمانی غیر همگن بوده و در نتیجه رفتار غیر خطی از خود نشان می‌دهند؛ بکارگیری روشی که بتواند این خواص را به درستی پیش‌بینی کند کاربرد فراوانی در صرفه جویی هزینه‌ها و زمان خواهد داشت. لذا در این پژوهش سعی شده است که با بهره‌گیری از روش بیان ژنتیکی و در نظر گرفتن پارامترهای تاثیرگذار ورودی به پیش‌بینی خصوصیات مکانیکی ملات سیمان و یا بتن به عنوان یکی از اصلی‌ترین چالش‌های علم مهندسی عمران پرداخته شود.

۲- برنامه آزمایشگاهی

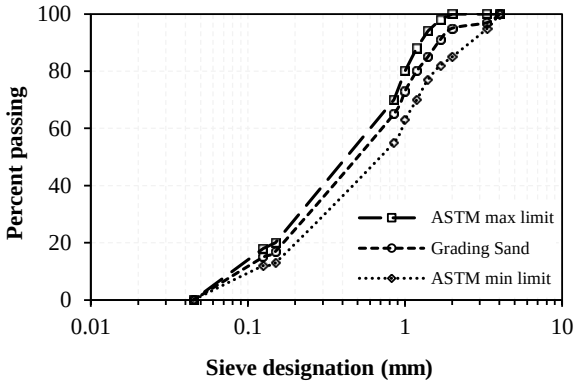
در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ ۱ ساخت کارخانه سبزوار با رده‌ی مقاومتی ۵۲/۵ مگاپاسکال برای ساخت تمامی نمونه‌ها استفاده شده ااست. از ۴ درصد مختلف میکرو سیلیس برای جایگزینی با سیمان استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و شیمایی سیمان و میکرو و نانوسیلیس در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین سنگدانه مورد استفاده از نوع سیلیسی با حداکثر اندازه و مدول ۴/۷۵ و ۲/۶ می‌باشد. شایان ذکر است که پراکندگی ابعادی سنگدانه مطابق با محدودیت‌های استاندارد ASTM C778 بوده و در شکل ۱ نیز قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمایی سیمان پرتلند با رده‌ی مقاومتی ۵۲/۵ مگاپاسکال

	ترکیبات											
خصوصیات شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	F.CaO	LOI	C_3A	C_3S
	۲۱	۴/۷	۳/۵۲	۶۴/۱۸	۱/۹۳	۲/۵۳	۰/۳۲	۰/۶۵	۱/۲	۱/۲	۶/۵	۵۷/۸۵

خصوصیات فیزیکی	مانده روی الک ۹۰ میلی‌متر (٪)	وزن مخصوص (تن بر مترمربع)	آزمایش بلین (سانتی‌مترمربع بر گرم)
	۰/۱۰	۳/۱۵	۳۶۰۰

[۱] Genetic Expression Program (GEP)
[۲] Kim et al.



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی سنگدانه مورد استفاده

جزئیات تمامی ۱۶ طرح اختلاط با درصدهای مختلف جایگزینی میکرو سیلیس (۰، ۴، ۹ و ۱۳ درصد) و نانوسیلیس (۰، ۱/۴، ۲/۸ و ۴/۲ درصد) در نسبت آب به مواد پودری ۰/۵۰ در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. طرح اختلاط ملات سیمان حاوی میکرو و نانوسیلیس.

NO.	C (gr)	W/C	S/C	Ns/C	Ms/C
۱	۱۲۰۰	۰/۵۰	۲/۶۶۷	۰/۰۰	۰/۰۰
۲	۱۱۵۲	۰/۵۲۱	۲/۷۷۸	۰/۰۰	۰/۰۴۲
۳	۱۰۹۲	۰/۵۴۹	۲/۹۳۰	۰/۰۰	۰/۰۹۹
۴	۱۰۴۴	۰/۵۷۵	۳/۰۶۵	۰/۰۰	۰/۱۴۹
۵	۱۱۸۳/۲	۰/۵۰۷	۲/۷۰۵	۰/۰۱۴	۰/۰۰
۶	۱۱۶۶/۴	۰/۵۱۴	۲/۷۴۳	۰/۰۲۹	۰/۰۰
۷	۱۱۴۹/۳	۰/۵۲۲	۲/۷۸۴	۰/۰۴۴	۰/۰۰
۸	۱۱۳۵/۲	۰/۵۲۹	۲/۸۱۹	۰/۰۱۵	۰/۰۴۲
۹	۱۱۱۸/۴	۰/۵۳۶	۲/۸۶۱	۰/۰۳۰	۰/۰۴۳
۱۰	۱۱۰۱/۳	۰/۵۴۵	۲/۹۰۶	۰/۰۴۶	۰/۰۴۴
۱۱	۱۰۷۵/۲	۰/۵۵۸	۲/۹۷۶	۰/۰۱۶	۰/۱۰۰
۱۲	۱۰۵۸/۴	۰/۵۶۷	۳/۰۲۳	۰/۰۳۲	۰/۱۰۲
۱۳	۱۰۴۱/۳	۰/۵۷۶	۳/۰۷۳	۰/۰۴۹	۰/۱۰۴
۱۴	۱۰۲۷/۲	۰/۵۸۴	۳/۱۱۵	۰/۰۱۶	۰/۱۵۲
۱۵	۱۰۱۰/۴	۰/۵۹۴	۳/۱۶۷	۰/۰۳۳	۰/۱۵۴
۱۶	۹۹۳/۳	۰/۶۰۴	۳/۲۲۲	۰/۰۵۱	۰/۱۵۷

C = Cement, W/C = Water to Cement ratio, S/C = Sand to Cement ratio, Ns/C = Nano silica to Cement ratio and Ms/C = Micro silica to Cement ratio

۳- تاریخچه علم ژنتیک

چارز داروین در نظریه تکامل موجودات زنده، به نوعی مبارزه با محیط اطراف برای بقا اشاره کرده است. او معتقد است که موجوداتی که ساختار، قابلیت‌ها و عملکرد بهتری نسبت به محیط پیرامونشان داشته باشند شانس و احتمال پیروزی بیشتری برای بقا و زندگی دارند. از همین رو از میان افراد موجود در یک جمعیت افراد شایسته‌تر به تعداد بیشتر رشد کرده و فرزند آوری بیشتری هم دارند، بنابراین در طول نسل‌ها گونه‌های شایسته‌تر نسبت به گونه‌های ضعیف‌تر، از شانس بیشتری برای بقا برخوردار هستند [۵]. در اواخر قرن بیست میلادی علاقه روزافزونی در پیروی از موجودات زنده جهت ارائه الگوریتم‌های برای حل مسئله پیچیده موجود در دنیای واقعی شکل گرفت. این امر سبب شکل گیری الگوریتم‌های مختلف شد که

امروزه از آن‌ها به نام الگوریتم‌های تکاملی یاد می‌شود. امروزه یکی از پرکاربردترین و آسان‌ترین الگوریتم تکاملی شناخته شده، الگوریتم ژنتیک است [۱۸].

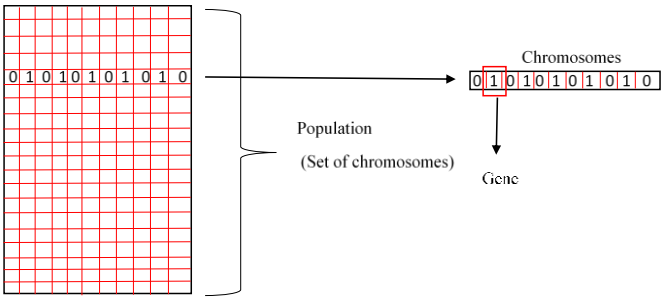
۴- برنامه الگوریتم ژنتیک

جان هلند چگونگی استفاده از یک فرآیند پردازش تکاملی را براساس نظریه چارز داروین برای حل مسائل گونه ارائه کرد [۱۹]. این مسائل با استفاده از تکنیک به شدت موازی حل می شوند که اکنون الگوریتم ژنتیک (GA) نامیده می شود. الگوریتم ژنتیک ابزاری پیشرفته برای شبیه‌سازی مکانیزیم انتخاب طبیعی است که با جستجو در حوزه مسائل به دنبال بهترین پاسخ است. الگوریتم ژنتیک برای حل یک مسئله مجموعه‌ای از راه حل‌های امکان‌پذیر را با استفاده از توابع برازندگی مورد بررسی قرار می‌دهد. آنگاه تعدادی از بهترین راه حل‌های موجود سبب تشکیل راه حل‌هایی تازه می‌شوند که این امر نیز سبب تکامل راه حل‌های ارئه شده می‌شود. در GA به هر جواب یک کروموزوم گفته می‌شود و با توجه به تابع هدف مسئله، یک مقدار برازندگی[۱] به آن نسبت داده می‌شود. به مجوعه جواب‌ها؛ جمعیت گفته می‌شود که در تکرارهای متوالی به نام نسل توسط عملگرهای ژنتیکی انتخاب[۲]، جهش[۳] و تقاطع[۴] بهبود می‌یابند. در هر نسل از GA با اعمال عملگرها بر روی جواب والد، جواب فرزند ایجاد می‌شود و جهت تعیین جمعیت با جمعیت موجود به رقابت می‌پردازد. ساختار عمومی GA در شکل ۲ ارائه شده است. الگوریتم ژنتیک یک رشته از اعداد است که به منظور توسعه برنامه ژنتیکی (GP) پیشنهاد شده توسط کوزا در سال ۱۹۹۲ مورد استفاده قرار گرفته است [۶]. در حقیقت برنامه ژنتیک (GP) یک الگوریتم تکاملی است که الهام گرفته شده از نظریه داروین است که افراد را با یک ویژگی‌های متفاوت به یک مجموعه جدید از افراد با ویژگی‌های متفاوتی دارند اختصاص می‌دهد. برنامه ژنتیک (GP) با تعریف یک تابع هدف و حل آن در یک فرآیند گام به گام، سبب تصحیح ساختار داده‌های به کار گرفتـه شده و در نهایت ارائه روش حل مناسب می‌شوند. پیشگامان اولیه در GP متوجه شدند که با استفاده از روش‌های زیست شناسی فراگشتی جهش و تقاطع قادر یافتن فرمولی بهینه جهت پیش‌بینی و یا حل مسائل هستند (به شکل ۳ و ۴ رجوع شود). گام‌های موجود برای حل مسائل گوناگون بر اساس برنامه ژنتیک به شرح زیر می‌باشد:

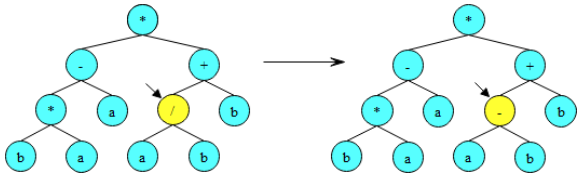
۱. ابتدا با ا ستفاده از اعداد تصادفی چند جواب اولیه ایجاد نموده و سپس با کدگذاری کردن آن‌ها جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها را ایجاد می شود (در حقیقت جمعیت اولیه برای والدین از نسل اولیه تشکیل شده است).
۲. تا رسیدن به معیار خاتمه باید گام‌های زیر تکرار شود.
   ۲,۱. از جمعیت موجود دو کروموزوم برای انجام عمل تلفیق انتخاب شوند تا کروموزوم‌های فرزندی به وجود آیند.
   ۲,۲. از جمعیت موجود یک کروموزوم برای انجام عمل جهش به صورت تصادفی انتخاب شود تا کروموزومی جدید به وجود آید.
   ۲,۳. با استفاده از عملگرهای انتخاب تعدادی از اعضای جمعیت برای انتقال به نسل انتخاب شوند.
   ۲,۴. معیار خاتمه مورد بررسی قرار گیرد.
۳. بهترین عضو جمعیت به عنوان خروجی معرفی شود.

شایان ذکر است که GA و GP در بسیاری از جنبه‌ها شبیه هم می‌باشند و تمایز آن‌ها در نمایندگان انحصاری (Individual representations) آن‌ها است. در حقیقت افراد در GA و GP به ترتیب رشته‌هایی دودویی با طول ثابت و جفت‌هایی دوتایی به دست آمده از درختان با اشکال و ابعاد مختلف هستند.

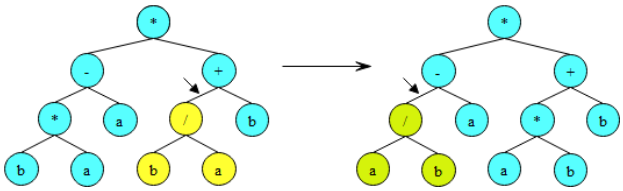
[۱] Fitness value
[۲] Selection
[۳] Mutation
[۴] Crossover



شکل ۲: ساختار کلی الگوریتم ژنتیک



شکل ۳: عملیات جهش



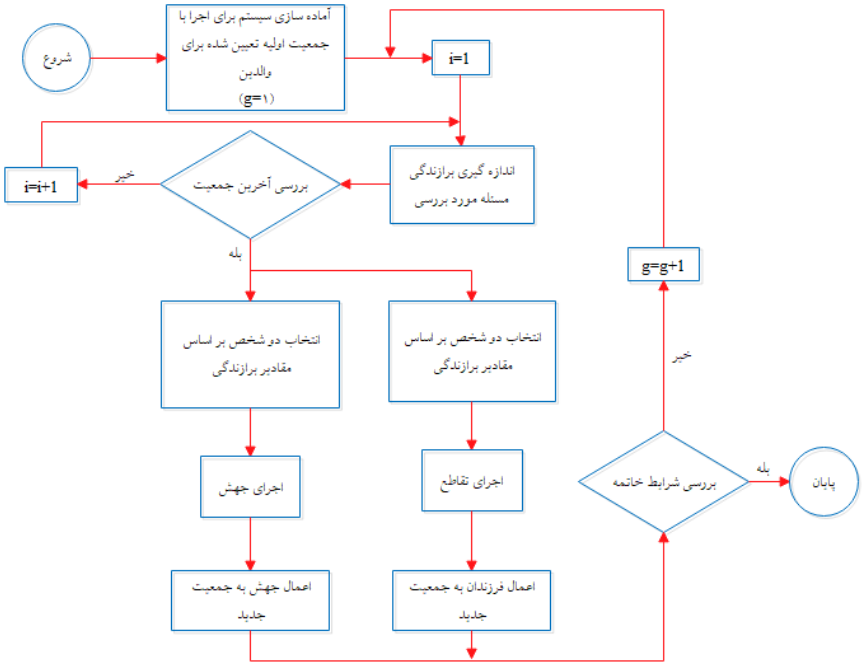
شکل ۴: عملیات تقاطع

۵- تئوری برنامه‌نویسی بیان ژنتیک

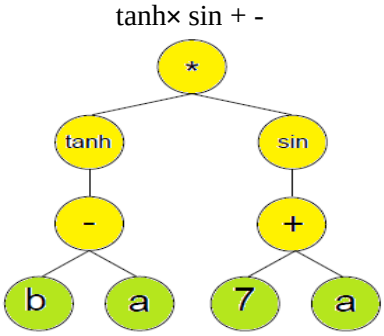
به دنبال توسعه و گسترش GA و GP برنامه بیان ژنتیک (GEP)، که روشی برای توسعه برنامه‌های کامپیوتری و مدلسازی ریاضی بر اساس محاسبات تکاملی و با الهام از تکامل طبیعی است در سال ۲۰۰۱ توسط فریرا[۱] معرفی شد [۲۰]. در حقیقت الگوریتمGEP نگاه حاکم بر دو الگوریتم وراثتی پیش از خود را در راستای پوشش نقاط ضعف این دو، تجمیع می‌کند. به‌طور کلی فرآیند اجرای برنامه‌نویسی بیان ژنتیک در به صورت فلوچارت ارائه‌شده در شکل ۵ می‌باشد. GEP هم دارای کروموزوم‌های خطی است و هم غیر خطی؛ از این رو به لحاظ برخورداری از کروموزوم‌های خطی (ژنوتایپ) شبیه به GA و از جنبه داشتن کروموزوم‌های غیر خطی (فنوتایپ) شبیه به GP است. افراد در GEP و GP به صورت نمایندگانی درختی نمایش داده می‌شوند؛ پس از این حیث بسیار شبیه یکدیگر هستند، این در حالی است که تفاوت عمده‌ی GEP و GP در وجود فضای خالی (دم) برای هر ژن پس از قسمت های کدگذاری شده (سر) است. بعد از ایجاد کروموزوم‌ها و پرکردن جایگاه‌های آن نوبت آن می‌رسد که برازندگی هر فرد (کروموزوم) مورد ارزیابی قرار گیرد. در واقع، کروموزوم‌های کد گذاری شده‌ی در الگوریتم GEP به صورت درختی (ETs)[۲] بیان می‌شوند. قسمت سر ژن‌های درخت بیان ژنتیکی (ETs) رمزگشایی می‌شوند؛ این برنامه سبب اتصال ورودی‌های خطی به خروجی‌های غیر خطی توسط المان‌های موجود در دُم می‌شوند. در حقیقت در برنامه بیان ژنتیک فرض می‌شود که مقادیر ورودی و خروجی وجود دارد ولی ارتباط بین آن‌ها نامشخص است. علاوه براین فریرا از یک زبان ساده و کارآمد به نام Karva برای بیان ژن‌ها و ایجاد ETs ها استفاده کرد که براساس آن از هر کروموزوم متشکل از گره‌ها و توابع تصادفی یک معادله ریاضی مستخرج می‌گردد (به شکل ۶ رجوع شود). برنامه بیان ژنتیک به دنبال بهترین تابع برای اتصال داده‌های

[۱] Ferreira
[۲] Expression Trees

ورودی به متغییر خروجی است. در نهایت، اتصال ژن ها با استفاده از توابع اتصال به تشکیل کروموزوم ها انجام می شود. شایان ذکر است که در این توابع از عملگرهای جبری (+ - × /)، عملگرهای منطقی بولی (OR، AND و IF) و یا توابع جبری (مثلثاتی، نمایی و درجه ۲ و۳) نقشی مهم را ایفا می‌کنند.



شکل ۵: فلوچارت برنامه‌نویسی بیان ژنتیک



شکل ۶: شکل عمومی زبان برنامه‌نویسی Karva

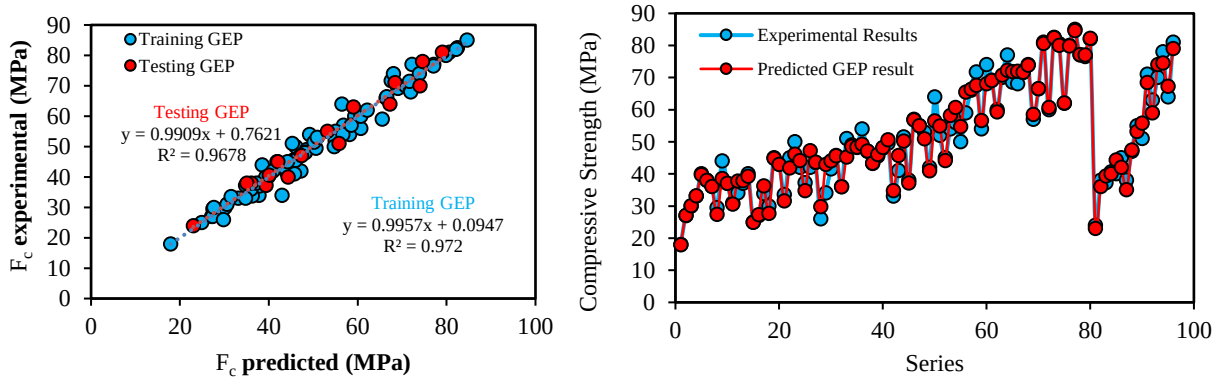
۶- نتایج مدل‌سازی برنامه‌نویسی بیان ژنتیک

شکل ۷ و ۸ نشان‌دهنده‌ی مقادیر آموزشی و آزمون در مدل GEP برای پیش‌بینی مقاومت فشاری (۳، ۷ و ۲۸ روزه) و خمشی (۲۸ روزه) ملات سیمان حاوی درصدهای مختلف میکرو و نانوسلیس با رویکرد اتصالی جمع است. نتایج مدل GEP نشان‌دهنده‌ی کمترین میزان خطا، کمترین پراکندگی و بهترین همبستگی بین نتایج آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده، به دلیل استفاده از تمامی پارامترهای تاثیرگذار همچون تخلخل در ورودی مدل می‌باشد. در حقیقت نتایج به دست‌آمده از بخش‌های آموزشی و آزمون، گویای ارتباط کارآمد و موثر بین پارامترهای ورودی و خروجی توسط مدل پیشنهادی می‌باشد. عملکرد آماری مجموعه‌ی داده‌های آموزشی و آزمون در پیش‌بینی مقاومت فشاری و خمشی ملات سیمان توسط مدل GEP در جدول ۳ ارائه شده است. همانطور که نتایج نشان مقادیر بالای R^2 و مقادیر پایین خطا (MAPE و RMSE) حاکی از قابل اتکا بودن مدل و فرمول‌های پیشنهادی می‌باشد. شایان ذکر است که مقادیر آموزشی و آزمون R^2، MAPE و RMSE برای پیش‌بینی مقاومت فشاری برابر

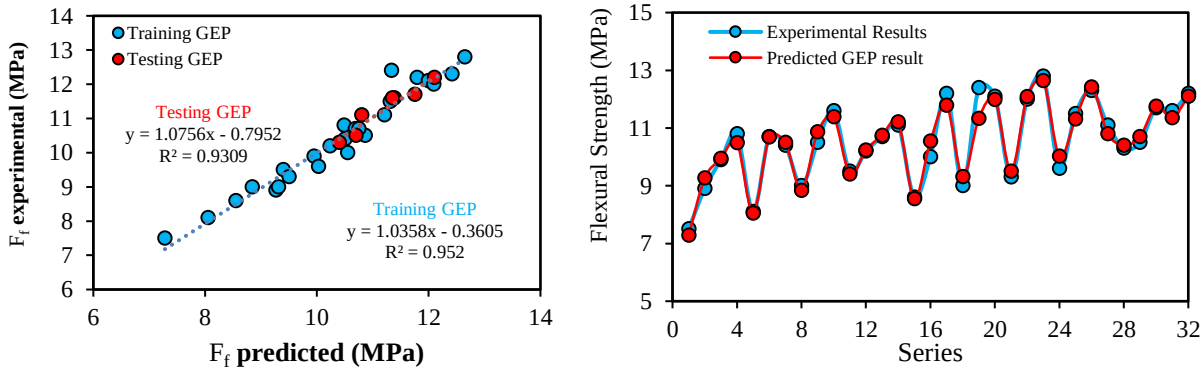
(۰/۹۷۲۰، ۳/۸۵۳ و ۲/۲۵۶) و (۰/۹۶۷۸، ۳/۹۲۳ و ۲/۴۹۶) و برای پیش‌بینی مقاومت خمشی برابر (۰/۹۵۲۰، ۴/۱۲۳ و ۳/۴۷۸) و (۰/۹۳۰۹، ۴/۵۴۸ و ۳/۷۲۱) می‌باشد. مقادیر آماری مجموعه‌ی داده‌های آموزشی و آزمون در مدل GEP در جدول ۳ ارائه شده است. فرمول‌های غیرخطی ریاضی برای پیش‌بینی ارتباط بین خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری و خمشی) و متغییرهای ورودی درخت بیان ژنتیک به ترتیب در معادلات ۱ و ۲ ارائه شده است. همچنین درخت بیان ژنتیکی مربوط به معادلات ۱ و ۲ به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقادیر d_0، d_1، d_2، d_3، d_4، d_5 و d_6 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی پارامترهای ورودی مدل شامل نسبت آب به سیمان (W/C)، نسبت سنگدانه به سیمان (S/C)، نسبت نانوسیلیس به سیمان (Ns/C)، نسبت میکروسیلیس به سیمان (Ms/C)، وزن سیمان (C)، سن (Age) و تخلخل (P) می‌باشد. سن تمامی نمونه‌های خمشی ۲۸ روز می‌باشد بنابراین مدل GEP ارائه شده فاقد پارامتر سن می‌باشد.

جدول ۳. مقادیر آماری خطا و ضریب همبستگی در مدل‌های GEP_{Fc} و GEP_{Ff}

مدل	R^2		MAPE		RMSE	
	آموزشی	آزمون	آموزشی	آزمون	آموزشی	آزمون
GEP_{Fc}	۰/۹۷۲۰	۰/۹۶۷۸	۳/۸۵۳	۳/۹۲۳	۲/۲۵۶	۲/۴۹۶
GEP_{FF}	۰/۹۵۲۰	۰/۹۳۰۹	۴/۱۲۳	۴/۵۴۸	۳/۴۷۸	۳/۷۲۱



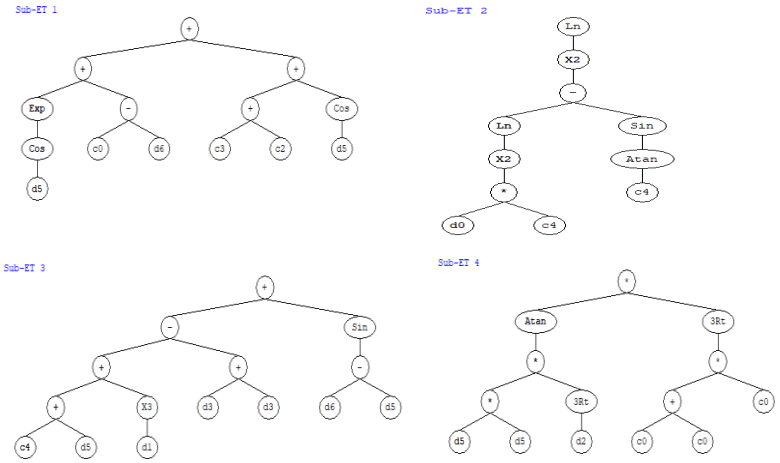
شکل ۷: ارزیابی مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده‌ی مقاومت فشاری نمونه‌های ملات سیمان



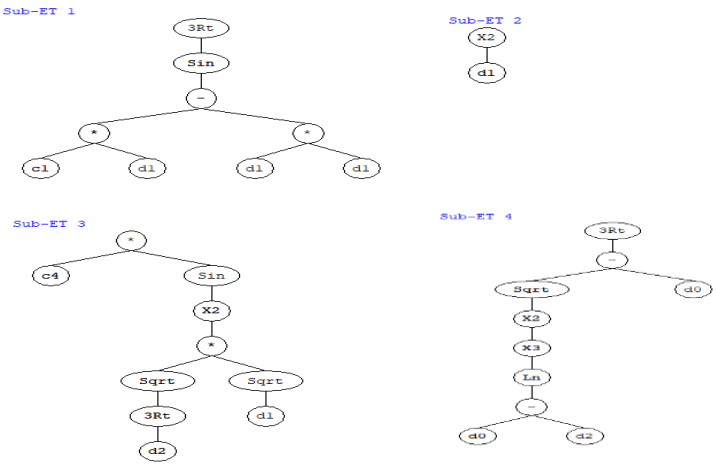
شکل ۸: ارزیابی مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده‌ی مقاومت خمشی نمونه‌های ملات سیمان

$$F_C = \left[e^{\cos(Age)} + (7.84 - P) + 8.84 + \cos(Age)\right] + \left[\ln\left[\ln\left(2.66 \times \frac{W}{C}\right)^2 - 0.9360\right]^2\right] + \left[2.82 + Age + \left(\frac{S}{C}\right)^3 - 2\left(\frac{Ms}{C}\right) + \sin(P - Age)\right] + \left[6.29 \times \arctan\left((Age)^2 \times \sqrt[3]{\frac{Ns}{C}}\right)\right] \quad (۱)$$

$$F_f = \left[\sqrt[3]{\mathrm{Sin}\left(-\left(\frac{S}{C}\right)-\left(\frac{S}{C}\right)^2\right)}\right]+\left[\left(\frac{S}{C}\right)^2\right]+\left[2.70\times\mathrm{Sin}\left(\sqrt[6]{\left(\frac{Ns}{C}\right)}\times\sqrt{\left(\frac{S}{C}\right)}\right)^2\right] + \left[\sqrt[3]{\left(\mathrm{Ln}\left(\frac{W}{C}-\frac{Ns}{C}\right)\right)^{4.5}-\left(\frac{W}{C}\right)}\right] \quad (۲)$$



شکل ۹: درخت بیان‌ژنتیکی مدل GEP_{Fc}



شکل ۱۰: درخت بیان‌ژنتیکی مدل GEP_{Ff}

خصوصیات مکانیکی مواد پایه سیمان پیش‌بینی شده توسط مدل‌های ژنتیک پیشینان در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج به دست آمده از جدول ۴ حاکی از اهمیت در نظر گرفتن پارامترهای تاثیرگذار برای پیش‌بینی با اعتبار و دقیق می‌باشد. بنابراین مقایسه نتایج حاصل از پیش‌بینی خصوصیات مکانیکی توسط مدل‌های گذشتگان و مدل حاضر ارائه شده توسط روش GEP، صحت و دقت مدل ارائه شده مورد تصدیق قرار گرفت. از این رو با دقت و اعتبار بالایی می‌توان خصوصیات مکانیکی ملات سیمان حاوی میکرو و نانوسیلیس در سنین مختلف را با فرمول‌های ارائه شده پیش‌بینی نمود.

جدول ۴. اطلاعات آماری از پیش‌بینی خصوصیات مکانیکی ملات سیمان و بتن توسط پژوهشگران پیشین

MAPE	RMSE	R^2	Model	Materials	خروجی	پژوهشگران
11.1759	5.4727	0.9386	Training set	concrete containing fly ash	Compressive strength	Mustafa Sarıdemir [21, 22]
11.6023	8.0779	0.9080	Testing set			
17.3961	8.2033	0.8885	Validating set			
8.2102	4.1156	0.9720	Training set	concretes containing rice husk ash		
8.5900	4.6221	0.9639	Testing set			
15.2352	9.0532	0.8953	Validating set			
NR	0.7528	0.7965	Training set	Concrete	Tensile strength	Fatih Özcan [23]
	0.7568	0.8008	Testing set			
	0.6203	0.9319	Validating set			
2.6387	3.6027	0.9509	Training set	Geopolymeric binders	Compressive strength	Ali Nazari and F. Pacheco Torga [24]
2.9270	4.0093	0.9441	Testing set			
NR		0.95	Training set	Reinforced concrete beams without stirrups	Compressive strength	Amir H. Gandomi et al. [25]
		0.95	Testing set			
		0.95	Overall			
NR		0.90	Training set		splitting tensile strength	
		0.87	Testing set			
		0.89	Overall			
1.051	1.280	0.9688	Training set	Geopolymers produced by ordinary Portland cement	Compressive strength	Ali Nazari [26]
1.490	1.809	0.9530	Testing set			
NR	NR	0.9739	Training set	High strength concrete containing TiO2 nanoparticles	Split Tensile Strength	Ali Nazari and Shadi Riahi [27]
		0.9520	Training set			
2.1477	1.3674	0.9334	Training set	Cement mortar containing micro and nano silica	Compressive strength	Eskandari and Azimi-Pour [28]
		0.9397	Testing set			
1.7900	0.1378	0.9750	Training set		Flexural strength	
		0.9380	Testing set			

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی کاربرد برنامه بیان ژنتیک در پیش‌بینی خصوصیات مکانیکی ملات سیمان و بتن پرداخته شده است که نتایاج به صورت زیر خلاصه می‌شود.

۱. برنامه بیان ژنتیک یکی از روش‌های نسبتا جدید و کاربردی در پیش‌بینی خصوصیات مکانیکی مواد با پایه سیمان است که آموزش و فراگیری آن نسبتاً آسان و ساده است.

۲. مدل و فرمول ارائه شده برای پیش‌بینی مقاومت فشاری و خمشی ملات سیمان حاوی میکرو و نانوسیلس از دقت و اعتبار بالایی برخوردار است.

۳. برنامه بیان ژنتیک به دلیل طبقه‌بندی داده‌ها و آموزش ارتباط داده‌های ورودی و خروجی یکی از روش‌های دقیق پیش‌بینی است ؛ که کاربران را مجاب به استفاده از آن می‌کند.

۴. با توجه به تحقیقات پژوهشگران گذشته، برنامه بیان ژنتیک یکی از کاربردی‌تری ابزار برای حل مسائل مهندسی عمران است که می‌تواند جایگزینی برای آزمایش‌های تکراری و خسته کننده باشد که با دقت بسیار بالایی خصوصیات مکانیکی ملات سیمان و بتن را پیش‌بینی کند.

۵. از بارزترین ویژگی‌های برنامه بیان ژنتیک نسبت به دیگر روش‌های هوش مصنوعی ارائه فرمولیاسونی برای پیش‌بینی پارامتر مفروض در قالب زبان‌های برنامه نویسی متعدد (Matlab، Fortran، C++ و ..) شناخته است. بدین ترتیب دیگر نیازی به انجام آزمایش‌های متعدد جهت اندازه‌گیری مقاومت نیست.

۶. ارائه فرمول‌های پیش بینی شده به صورت درختی نشان دهنده‌ی رابط گرافیکی بسیار قوی نرم افزار با کاربر است.

۸- مراجع

[1] P.A. Vikhar, Evolutionary algorithms: A critical review and its future prospects, 2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC), IEEE, 2016, pp. 261-265.
[2] S.H. Zegordi, M.A.B. Nia, Integrating production and transportation scheduling in a two-stage supply chain considering order assignment, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 44(9-10) (2009) 928-939.
[3] I. Rechenberg, Evolutionsstrategie\'94, (1994).
[4] L.J. Fogel, A.J. Owens, M.J. Walsh, Artificial intelligence through simulated evolution, (1966).
[5] J. Holland, adaptation in natural and artificial systems, university of michigan press, ann arbor," Cité page 100 (1975).
[6] J.R. Koza, J.R. Koza, Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection, MIT press1992.
[7] D. Ashlock, Evolutionary computation for modeling and optimization, Springer Science & Business Media2006.
[8] S. Akkurt, S. Ozdemir, G. Tayfur, B. Akyol, The use of GA–ANNs in the modelling of compressive strength of cement mortar, Cement concrete research 33(7) (2003) 973-979.
[9] L. Zapata, G. Portela, O. Suárez, O.J.C. Carrasquillo, Rheological performance and compressive strength of superplasticized cementitious mixtures with micro/nano-SiO2 additions, Construction and Building Materials 41 (2013) 708-716.
[10] V. Afroughsabet, L. Biolzi, P.J. Monteiro, The effect of steel and polypropylene fibers on the chloride diffusivity and drying shrinkage of high-strength concrete, Composites Part B: Engineering 139 (2018) 84-96.
[11] X. Chen, S. Wu, Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar, Construction and Building Materials 38 (2013) 804-812.
[12] V.G. Haach, G. Vasconcelos, P.B. Lourenço, Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars, Construction and Building Materials 25(6) (2011) 2980-2987.
[13] G.A. Rao, Development of strength with age of mortars containing silica fume, Cement Concrete Research 31(8) (2001) 1141-1146.
[14] M. Lezgy-Nazargah, S. Emamian, E. Aghasizadeh, M. Khani, Predicting the mechanical properties of ordinary concrete and nano-silica concrete using micromechanical methods, Sādhanā 43(12) (2018) 196.
[15] Y.-Y. Kim, K.-M. Lee, J.-W. Bang, S.-J. Kwon, Effect of W/C ratio on durability and porosity in cement mortar with constant cement amount, Advances in Materials Science Engineering 2014 (2014).
[16] S. Fallah, M. Nematzadeh, Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume, Construction and building materials 132 (2017) 170-187.
[17] Y. Su, J. Li, C. Wu, P. Wu, Z.-X. Li, Influences of nano-particles on dynamic strength of ultra-high performance concrete, Composites Part B: Engineering 91 (2016) 595-609.
[18] D.E. Goldberg, The design of innovation: Lessons from and for competent genetic algorithms, Springer Science & Business Media2013.
[19] J.H. Holland, Genetic algorithms, Scientific american 267(1) (1992) 66-73.
[20] C. Ferreira, Gene expression programming: mathematical modeling by an artificial intelligence, Springer2006.
[21] M. Sarıdemir, Effect of specimen size and shape on compressive strength of concrete containing fly ash: Application of genetic programming for design, Materials & Design 56 (2014) 297-304.
[22] M. Sarıdemir, Genetic programming approach for prediction of compressive strength of concretes containing rice husk ash, Construction and Building Materials 24(10) (2010) 1911-1919.
[23] F.C. Özcan, Gene expression programming based formulations for splitting tensile strength of concrete, Construction and Building Materials 26(1) (2012) 404-410.
[24] A. Nazari, F.P. Torgal, Modeling the compressive strength of geopolymeric binders by gene expression programming-GEP, Expert systems with applications 40(14) (2013) 5427-5438.
[25] A.H. Gandomi, D. Mohammadzadeh, J.L. Pérez-Ordóñez, A.H. Alavi, Linear genetic programming for shear strength prediction of reinforced concrete beams without stirrups, Applied Soft Computing 19 (2014) 112-120.
[26] A. Nazari, Compressive strength of geopolymers produced by ordinary Portland cement: Application of genetic programming for design, Materials & Design 43 (2013) 356-366.
[27] A. Nazari, S. Riahi, Prediction split tensile strength and water permeability of high strength concrete containing TiO2 nanoparticles by artificial neural network and genetic programming, Composites Part B: Engineering 42(3) (2011) 473-488.
[28] M. Azimi-Pour, H. Eskandari-Naddaf, ANN and GEP prediction for simultaneous effect of nano and micro silica on the compressive and flexural strength of cement mortar, Construction and Building Materials 189 (2018) 978-992.