

Experimental investigation and prediction of compressive strength of high-strength concrete containing waste ceramic powder using gene expression programming

Babak Behforouz¹, Parham Memarzadeh^{*1}, Mohammadreza Eftekhari², Farshid Fathi¹

1- Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran

ABSTRACT

The high volume of carbon dioxide produced in cement plants and the feasibility of reusing waste materials from factories in recent years has become one of the main concerns of research centers and environmental associations. Therefore, the main purpose of this research is to evaluate the feasibility of reusing waste materials with a focus on waste ceramic powder (WCP), as a semi-active aluminosilicate material that can be replaced as a percentage of cement used in concrete. WCP, in addition to activating the potential of using a waste material in concrete, can also reduce cement consumption. Therefore, in this research, cement replacement percentages between 0 and 50% in three water to cement ratios of 0.3, 0.4 and 0.5 in 24 concrete mixtures have been used to perform compressive strength tests. In order to provide a usable computational model, the gene expression programming (GEP) method has been used to predict the compressive strength of the samples. The results of experimental research indicate that in the ratio of water to cement 0.3 at the age of 90 days, the sample containing 20% of WCP has reached a compressive strength of 72.57 MPa. This result is almost equal to the control sample and therefore the use of this percentage is recommended for this ratio of water to cementitious materials. Finally, the results indicate the very good performance of the GEP method by increasing the number of chromosomes and increasing the correlation coefficient between experimental and numerical data up to 98%. Therefore, the GEP method has a significant advantage over other methods by providing an analytical relationship and high accuracy.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 February 2021

Revise Date: 25 April 2021

Accept Date: 07 May 2021

Keywords:

High strength concrete

Waste ceramic powder

Compressive strength

Water to cement ratio

Gene expression programming

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.273288.2363>

*Corresponding author: Parham Memarzadeh

Email address: p-memar@iaun.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی و پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن پرمقاومت حاوی پودر کاشی

ضایعاتی با استفاده از روش برنامه‌نویسی بیان ژن

بابک بهفروز^۱، پرهام معمارزاده^{۱*}، محمدرضا افتخار^۲، فرشید فتحی^۱

۱- گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

حجم بالای دی‌اکسیدکربن تولید شده در کارخانه‌های تولید سیمان و امکان‌سنجی استفاده مجدد از ضایعات کارخانه‌ها در سال‌های اخیر به یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های مراکز تحقیقاتی و مجامع زیست‌محیطی تبدیل شده است. براین‌اساس هدف اصلی این تحقیق، امکان‌سنجی استفاده مجدد از ضایعات با محوریت کاشی ضایعاتی، به‌عنوان یک ماده آلومینوسیلیکات نیمه‌فعال برای جایگزینی درصدی از سیمان مصرفی در بتن است. پودر کاشی ضایعاتی علاوه بر فعال‌سازی پتانسیل استفاده از یک ضایعات در بتن، مصرف سیمان را نیز کاهش می‌دهد. براین‌اساس در این تحقیق از درصدهای جایگزینی سیمان بین ۰ تا ۵۰ درصد در سه نسبت آب به سیمان ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ در چارچوب ۲۴ طرح اختلاط برای انجام آزمایش مقاومت فشاری استفاده شده است. در ادامه برای ارائه یک مدل محاسباتی قابل‌استفاده، از روش برنامه‌نویسی بیان ژن، برای پیش‌بینی مقاومت فشاری نمونه‌ها استفاده شده است. نتایج تحقیق آزمایشگاهی حاکی از آن است که در نسبت آب به سیمان ۰/۳ در سن ۹۰ روزه، نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی به مقاومت فشاری ۷۲/۵۷ مگا پاسکال رسیده است. این عدد تقریباً با نمونه کنترل برابری نموده و در نتیجه استفاده از این درصد جایگزینی برای این نسبت آب به مواد سیمانی توصیه می‌شود. در نهایت نیز نتایج حاکی از عملکرد بسیار مناسب روش برنامه‌نویسی بیان ژن با افزایش تعداد کروموزوم و افزایش ضریب همبستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی تا ۹۸ درصد می‌باشد. بنابراین روش برنامه‌نویسی بیان ژن به واسطه ارائه یک رابطه تحلیلی و دقت بالا نسبت به سایر روش‌ها از برتری قابل‌توجهی برخوردار است.

کلمات کلیدی: بتن پرمقاومت، پودر کاشی ضایعاتی، مقاومت فشاری، نسبت آب به سیمان، روش برنامه‌نویسی بیان ژن.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.273288.2363	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.273288.2363	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۲/۱۷	۱۴۰۰/۰۲/۱۷	۱۴۰۰/۰۲/۰۵	۱۳۹۹/۱۱/۲۶
			پرهام معمارزاده		*نویسنده مسئول:	
			p-memar@iaun.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

مصالح اصلی تشکیل دهنده بتن یعنی سیمان پرتلند و سنگدانه نسبتاً ارزان و به سهولت در اغلب نقاط جهان قابل تهیه است. به علت دارا بودن خواص و ویژگی‌های ممتاز و نیز در دسترس بودن مصالح آن، پس از آب، پرمصرف‌ترین ماده روی زمین به شمار می‌رود [۱]. از طرفی حجم بالای دی‌اکسید کربن تولید شده در کارخانه‌های تولید سیمان و استفاده مجدد از ضایعات کارخانه‌ها در سال‌های اخیر به یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های مراکز تحقیقاتی و مجامع زیست‌محیطی تبدیل شده است [۲]. براین اساس امکان‌سنجی استفاده مجدد از ضایعات با محوریت ساختار آمورف فعال پوزولانی، به‌عنوان مواد آلومینو سیلیکاتی برای جایگزینی درصدی از سیمان مصرفی در بتن موضوع بسیاری از تحقیقات اخیر را به خود اختصاص داده است [۳]. یکی از این مواد پودر کاشی ضایعاتی است. ساختار فیزیکی این ماده به شکلی است که بخش عمده‌ای از تولید آن به ضایعات تبدیل می‌شود. معمولاً ضایعات مربوط به کاشی، سرامیک و چینی‌های بهداشتی به چندین شکل تولید می‌شوند، بخشی از ضایعات در کارخانه‌ها و در حین و بعد از فرایند تولید به علت خطای ساخت و یا اشتباهات انسانی و مواد اولیه نامناسب و ... بخشی دیگر در مسیرهای حمل‌ونقل و بخش اعظم در اثر تخریب ساختمان‌ها و ضایعات باقی‌مانده از آن ایجاد می‌شوند. ماهیت این مواد به‌گونه‌ای است که نمی‌توان از آن‌ها مجدداً در چرخه تولید استفاده کرد و عملاً بی‌کاربرد باقی می‌مانند و همچنین به‌صورت یک زباله ساختمانی خسارت‌هایی به محیط‌زیست وارد می‌کنند. پیش‌بینی می‌شود که حدود ۳-۷ درصد از تولید روزانه سرامیک در جهان به‌صورت ضایعات درمی‌آید. همچنین میزان ضایعات ناشی از تخریب ساختمان‌ها نیز به این مورد اضافه می‌شود که این میزان ضایعات در سال به میلیون‌ها تن می‌رسد؛ بنابراین با توجه به این میزان تولید و روند روبه‌رشد این صنعت و همچنین استفاده روزافزون از این مواد و همچنین ضایعات قابل توجه آن، توجه به استفاده مجدد از ضایعات حاصل از مواد سرامیکی را بیش‌ازپیش می‌طلبند [۱، ۴-۶].

یکی از راهکارهای ارائه شده جهت استفاده مجدد از سرامیک‌ها و چینی‌های بهداشتی، استفاده از آن‌ها در بتن بوده است. این مواد می‌توانند در بتن به‌عنوان جایگزین سیمان و یا سنگدانه‌ها استفاده شوند. این ماده به دلیل مقدار قابل توجه سیلیس و اکسید آلومینیوم آمورف در بسیاری از تحقیقات قابلیت استفاده به‌عنوان یک ماده پوزولانی در بتن را داراست. از جمله اولین تحقیقاتی که در رابطه با خواص پوزولانی کاشی انجام شد توسط آی و اونال [۵] بوده که در این مطالعه برای اولین بار خواص پوزولانی کاشی به‌صورت علمی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا کاشی در آسیاب فکی پیش آسیاب و سپس حدود ۵۵ دقیقه در بال میل، آسیاب شده است. کاشی پودر شده تحت آنالیز شیمیایی قرار گرفته تا میزان اکسیدهای آن مشخص شود. همچنین مقاومت ۷ روزه نمونه‌ای از بتن با این ماده ساخته شده و مورد تست قرار گرفته است. خواص اولیه ماده جهت یک ماده پوزولانی به‌طور کامل بررسی شده و نتایج نشان‌دهنده آن است که پودر کاشی ضایعاتی کلیه الزامات استاندارد را ارضا می‌کند و مشکلی جهت استفاده به‌عنوان پوزولان را ندارد. در تحقیقاتی که توسط تورگال و جلالی در سال ۲۰۱۰ انجام شده است [۷]، آن‌ها با دسته‌بندی کاشی‌ها، سرامیک‌ها و چینی‌های بهداشتی تحقیقات را بر روی ۴ نمونه از سرامیک‌های تولیدشده انجام داده‌اند. نتایج نشان‌دهنده آن است که نمونه‌ای که توسط آجرهای سرامیکی ساخته شده بالاترین مقاومت را به خود اختصاص داده و در واقع بالاترین فعالیت پوزولانی را داشته است. همچنین ضعیف‌ترین مقاومت مربوط به سرامیک‌های یک‌بار آتش- دیده می‌باشد که در زمان عمل‌آوری ۹۰ روزه به حدود ۹۰ درصد از مقاومت نمونه شاهد دست‌یافته که این مقدار کاهش به‌ازای حذف ۲۰ درصد سیمان بسیار ناچیز می‌باشد. سایر نتایج در این تحقیق نیز نشان‌دهنده آن است که نمونه‌های سرامیکی فعالیت پوزولانی مناسبی داشته‌اند و نتایج مثبتی نیز در جهت استفاده از این مواد به دست آمده است. در تحقیق دیگری که توسط حیدری و توکلی [۸] در زمینه استفاده از کاشی ضایعاتی در بتن به همراه پودر نانوسیلیس به‌عنوان جایگزین سیمان انجام گرفت، درصد‌های کاشی ضایعاتی به ترتیب به میزان ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ درصد سیمان جایگزین گردیده که نتایج نشان‌دهنده آن است که جایگزینی ۲۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی مقاومت فشاری بتن را پس از ۹۱ روز تقریباً به مقاومت فشاری نمونه کنترل می‌رساند. در ادامه در پژوهشی که توسط کنان و همکاران انجام شده است [۹] ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد جایگزینی پودر کاشی ضایعاتی با سیمان مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق با جایگزینی ۲۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی با سیمان مقاومت فشاری نمونه ۹۰ روزه از ۶۳/۸ مگاپاسکال به ۵۲/۳ مگاپاسکال کاهش یافته است. این در حالی است که با جایگزینی ۴۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی این مقاومت مجدداً افزایش یافته و ۵۴/۵ مگاپاسکال رسیده است.

این موضوع نشان دهنده آن است که جایگزینی درصد بالایی پودر کاشی ضایعاتی در بلندمدت اثرات پوزولانی این ماده را همچنان حفظ می نماید.

از آنجاکه مقاومت فشاری بتن تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد، پیش بینی آن مسئله ای جذاب برای بسیاری از تحقیقات بوده است. بر این اساس توجه و ارائه یک روش و الگوریتم پیش بینی کننده همانند روش های محاسبات نرم که قادر باشند به طور مؤثری عملکرد مقاومت فشاری را پیش بینی نمایند بیش از پیش احساس می گردد.

در تحقیقات گذشته از روش های مختلف برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن شامل مواد مختلف استفاده شده است. برای مثال بهفروز و همکاران [۱] در تحقیقی از روش های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون غیرخطی برای پیش بینی خصوصیات مکانیکی از جمله مقاومت فشاری و کششی و همچنین دوام بتن حاوی پودر کاشی ضایعاتی استفاده کرده اند. نتایج نشان دهنده آن است که شبکه عصبی مصنوعی ابزار بسیار مناسبی برای تخمین مقاومت فشاری این نوع از بتن است. اما مشکل اصلی این روش عدم ارائه یک رابطه مشخص برای استفاده پیش از ساخت نمونه بتنی است. در بسیاری از تحقیقات گذشته نیز از سایر روش ها و الگوریتم های پیش بینی کننده برای تخمین مقاومت فشاری بتن استفاده شده است. برخی از این روش ها مانند روش منطق فازی [۱۰، ۱۱]، شبکه عصبی مصنوعی [۱۲، ۱۳] و انواع روش های رگرسیون [۱۴، ۱۵] بیش از سایر روش ها برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن مورد استفاده قرار گرفته اند. مشکل اصلی این روش ها به طور کلی یا دقت نه چندان بالا در روش های رگرسیون و عدم ارائه رابطه ثابت در روش شبکه عصبی و منطق فازی بیان شده است. با توجه به این مشکلات روش برنامه نویسی بیان ژن یکی از روش هایی است که با توجه به دقت بالا و همچنین ارائه یک رابطه ثابت از مزیت رقابتی بالایی نسبت به سایر روش ها برخوردار است [۱۶-۱۸]. در سال های اخیر توجه به این روش بیش از پیش برای پیش بینی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن افزایش یافته است. برای مثال سریر و همکاران [۱۹]، شاه منصور و همکاران [۲۰، ۲۱]، نعمت زاده و همکاران [۲۲]، فخاریان و همکاران [۲۳]، جاوید و همکاران [۲۴] و وانگ [۲۵] در تحقیقات اخیر خود از این روش استفاده نموده و نتایج قابل قبولی را ارائه نموده اند. از این رو در این تحقیق برای اولین بار از این روش به عنوان یک مدل عددی قابل اعتماد برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن های حاوی پودر کاشی ضایعاتی، به عنوان جایگزین درصدی از سیمان مصرفی، با درصد های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و همچنین نسبت های آب به موادسیمانی مختلف پس از انجام مقاومت فشاری استفاده شده است. در پایان لازم به ذکر است که با توجه به اهمیت استفاده مجدد از مواد ضایعاتی در بتن هدف اصلی این تحقیق در درجه اول امکان سنجی استفاده از پودر کاشی ضایعاتی در بتن حتی با فرض جایگزینی با درصد های بالا بوده است و از طرفی پس از این مرحله ارائه یک رابطه تجربی با بهره جویی از یک روش توانمند و قابل اعتماد از دیگر اهداف این تحقیق است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

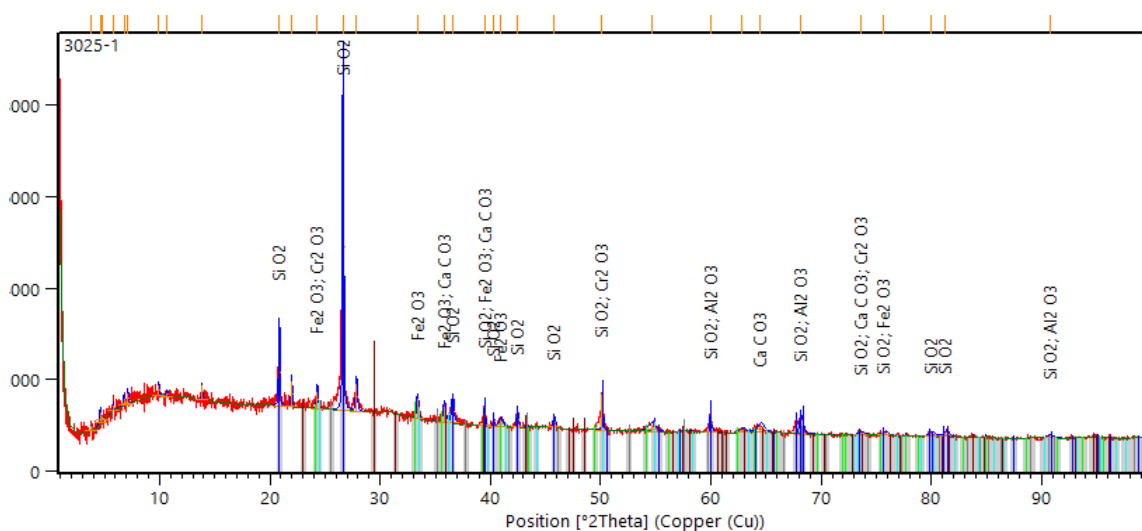
۲-۱ مواد و مصالح

سیمان مورد استفاده در این تحقیق سیمان پرتلند تیپ ۲ می باشد که از کارخانه سیمان سپاهان اصفهان تهیه شده است. آنالیز شیمیایی این سیمان مطابق جدول ۱ می باشد و دارای چگالی ۳/۱۴ گرم بر سانتی متر مکعب و سطح ویژه (بلین) ۳۵۰۰ گرم بر سانتی متر مربع می باشد. دانه بندی پودر کاشی ضایعاتی مشابه تحقیق عامری و همکاران بوده و در این تحقیق قابل مشاهده و پیگیری است [۲۶].

پودر کاشی ضایعاتی مورد استفاده در این تحقیق، از کارخانه کاشی سازی اصفهان به دست آمده است. به منظور خرد کردن سرامیک ها، کاشی های قراضه ابتدا در آسیاب خرد و سپس از الک ۱۰۰ میکرونی عبور داده می شوند. سطح ویژه و وزن مخصوص پودر کاشی در جدول ۲ قابل مشاهده است. همچنین آزمایش XRF نیز برای مقایسه و تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی پودر کاشی ضایعاتی در این تحقیق انجام شده است. طبق جدول ۳، نتایج نشان می دهد که مجموع مقادیر SiO_2 و Al_2O_3 به میزان قابل توجهی بالاتر از مقادیر دیگر است. این ترکیبات اصلی یک ماده پوزولانی مناسب برای استفاده در بتن به عنوان جایگزین های سیمانی است. در ادامه برای تشخیص آمورف بودن، پودر کاشی ضایعاتی برای انجام آزمایش اشعه ایکس به پژوهشگاه رازی در تهران منتقل گردید. نتایج به دست آمده در شکل ۱ نشان دهنده خاصیت آمورف این ماده و مناسب بودن آن به عنوان یک ماده پوزولانی می باشد.

جدول ۱: آنالیز شیمیایی سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان سپاهان اصفهان

C ₃ A	L.O.I	K ₂ O+Na ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اکسید
۶	۱/۰	۰/۷۵	۲/۲	۲/۲	۶۴/۲	۴	۴/۹	۲۱/۲	مقدار اکسید
<۸	<۳		<۳	<۵		<۶	<۶	>۲۰	الزامات استاندارد ایران



شکل ۱: نتایج آزمایش اشعه ایکس پودر کاشی ضایعاتی

جدول ۲: خصوصیات مکانیکی پودر کاشی ضایعاتی

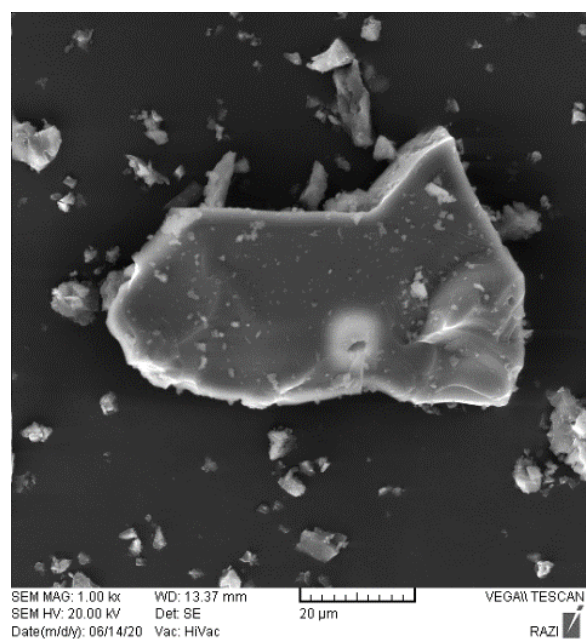
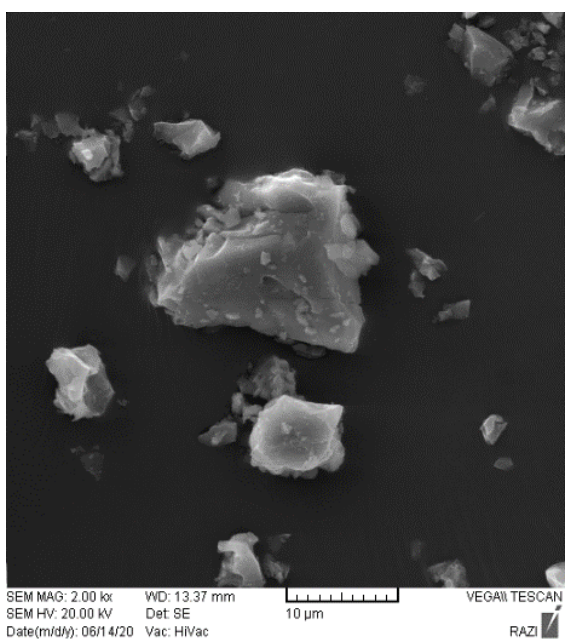
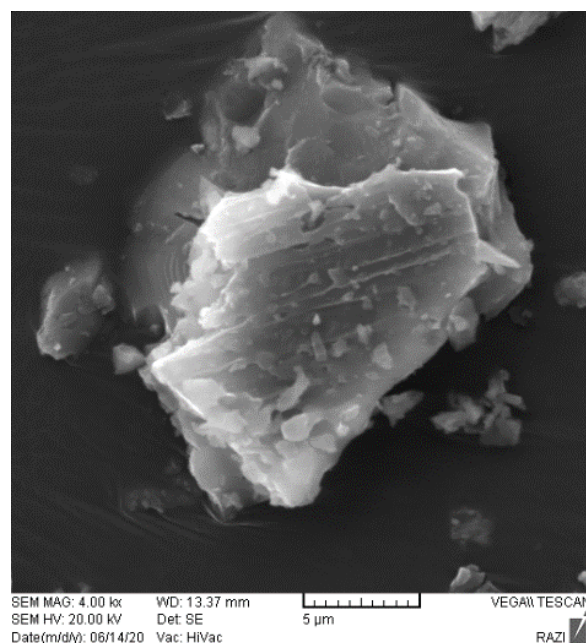
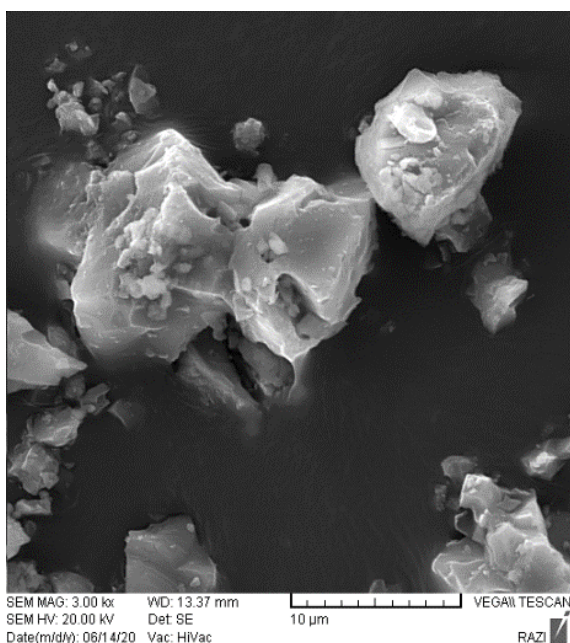
سطح ویژه (m ² /kg)	وزن مخصوص (gr/cm ³)	نوع ماده
۳۲۵	۲/۳۶	پودر کاشی ضایعاتی

جدول ۳: درصدهای مواد شیمیایی تشکیل دهنده پودر کاشی ضایعاتی

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	SrO ₂	MnO	Mn ₂ O ₃	L.O.I	نوع ماده
۶۳/۲۹	۱۸/۲۹	۴/۳۲	۴/۳۲	۰/۷۲	۰/۱۶	۲/۱۸	۰/۷۵	۰/۶۱	۰/۱۰	۰/۰۲	-	۰/۰۵	۱/۶۱	پودر کاشی

در ادامه پیک‌های موجود در آزمایش اشعه ایکس پودر کاشی ضایعاتی نشان‌دهنده وجود ترکیبات غالب سیلیس و اکسید آلومینیوم در این ماده می‌باشد. در ادامه نتایج ریز ساختاری پودر کاشی ضایعاتی لازم به ذکر است که، میکروسکوپ الکترونی روبشی، از مناسب‌ترین وسایل در دسترس برای آزمایش و آنالیز مورفولوژی نانو ساختارها و شناسایی ترکیبات شیمیایی است. توانایی این میکروسکوپ برای بررسی سطح مواد بی‌نظیر بوده و حائز برتری‌های فراوانی نسبت به میکروسکوپ‌های نوری است. در میکروسکوپ نوری تشکیل تصویر با استفاده از نورهای منعکس شده از سطح نمونه صورت می‌گیرد، در حالی که در میکروسکوپ روبشی این مهم با به‌کارگیری الکترون‌ها میسر می‌شود. در واقع این میکروسکوپ یکی از روش‌های تولید تصاویر با روبش یک پرتو الکترونی روی سطح نمونه است. طول موج الکترون‌ها از فوتون‌های نور کوتاه‌تر بوده و طول موج کوتاه‌تر باعث ایجاد وضوح، قدرت تفکیک و حصول اطلاعات مناسب‌تر می‌شود. در حقیقت در این حالت هیچ

سیستم نوری - الکترونی برای تشکیل تصویر و بزرگ‌نمایی وجود ندارد، بلکه تصویر از مشاهده نقطه‌به‌نقطه پدیده‌های سطح منتج از اثر متقابل پرتوی الکترونی با سطح نمونه تشکیل می‌شود [۲۳، ۲۴]. با این روش تصاویر سه‌بعدی از ساختار، نمونه به دست می‌آید. در حالت کلی باید گفت این آزمایش برای مشاهده ریز ساختارهای مواد مورد نظر، استفاده می‌گردد. براین اساس در این تحقیق، پودر کاشی ضایعاتی نمونه‌برداری شده و نتایج در شکل ۲ حاصل گردید. نتایج عکس نشان‌دهنده ساختار شکسته و فشرده پودر کاشی ضایعاتی و مناسب بودن آن برای ایجاد درگیری بیشتر در ماتریس سیمانی است.



شکل ۲: نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی پودر کاشی ضایعاتی

فوق روان کننده استفاده شده در این پژوهش از یک روان کننده ساخت کشور کره بر پایه لیگنوسولفات به رنگ قهوه‌ای روشن به صورت مایع با دانسیته ۱/۰۹ و بر اساس استاندارد ASTM C494 به عنوان ماده مضاف نوع F و سازگار با انواع سیمان‌ها از جمله سیمان تیپ ۲ می‌باشد و بر اساس درصد وزنی (پودر کاشی ضایعاتی+سیمان) در هر طرح اختلاط استفاده شده است [۲۵]. در این پژوهش سنگ‌دانه‌های مصرفی از منابع آهکی دهقان تهیه شده است. مصالح ریزدانه (ماسه) و مصالح درشت‌دانه (شن) از نوع شکسته بودند. مصالح مطابق استاندارد ASTM C33 دانه‌بندی شد [۲۷].

۲-۲ طرح اختلاط

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری ۲۴ مخلوط بتن مختلف برای انجام آزمایش‌ها مختلف طراحی شد. مخلوط‌های بتن به سه دسته با نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی تقسیم شدند. نسبت آب به مواد سیمانی به ترتیب ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ برای به دست آوردن نتایج قابل اعتماد انتخاب شده است. هر نسبت به طور جداگانه به هشت دسته مجزا با درصد‌های مختلف جایگزینی پودر کاشی ضایعاتی تقسیم شد. به طور کلی، علاوه بر نمونه‌های شاهد، به ترتیب ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد از جایگزینی پودر کاشی ضایعاتی استفاده شد. در تمام مخلوط‌های بتنی نسبت ریزدانه به درشت‌دانه و روان کننده نسبت به مواد سیمان به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۰۲ فرض شده است. طرح اختلاط نمونه‌های حاوی پودر کاشی ضایعاتی در جدول ۴ قابل مشاهده است.

جدول ۴: طرح اختلاط نمونه‌های حاوی پودر کاشی ضایعاتی به همراه نحوه نام‌گذاری نمونه‌ها

روان کننده	درشت دانه	ریزدانه	آب	پودر کاشی ضایعاتی	سیمان	نسبت آب به سیمان
۱۰/۶	۹۴۰/۵	۷۷۰	۱۶۰	۰	۵۳۰	۰/۳
۱۰/۶	۹۴۰/۵	۷۷۰	۱۶۰	۲۶/۵	۵۰۴	۰/۳
۱۰/۶	۹۴۰/۵	۷۷۰	۱۶۰	۵۳	۴۷۷	۰/۳
۱۰/۶	۹۴۰/۵	۷۷۰	۱۶۰	۷۹/۵	۴۵۱	۰/۳
۱۰/۶	۹۴۰/۵	۷۷۰	۱۶۰	۱۰۶	۴۲۴	۰/۳
۱۰/۶	۹۴۰/۵	۷۷۰	۱۶۰	۱۵۹	۳۷۱	۰/۳
۱۰/۶	۹۴۰/۵	۷۷۰	۱۶۰	۲۱۲	۳۱۸	۰/۳
۱۰/۶	۹۴۰/۵	۷۷۰	۱۶۰	۲۶۵	۲۵	۰/۳
۸	۱۰۱۰/۳	۸۲۷	۱۶۰	۰	۴۰۰	۰/۴
۸	۱۰۱۰/۳	۸۲۷	۱۶۰	۲۰	۳۸۰	۰/۴
۸	۱۰۱۰/۳	۸۲۷	۱۶۰	۴۰	۳۶۰	۰/۴
۸	۱۰۱۰/۳	۸۲۷	۱۶۰	۶۰	۳۴۰	۰/۴
۸	۱۰۱۰/۳	۸۲۷	۱۶۰	۸۰	۳۲۰	۰/۴
۸	۱۰۱۰/۳	۸۲۷	۱۶۰	۱۲۰	۲۸۰	۰/۴
۸	۱۰۱۰/۳	۸۲۷	۱۶۰	۱۶۰	۲۴۰	۰/۴
۸	۱۰۱۰/۳	۸۲۷	۱۶۰	۲۰۰	۲۰۰	۰/۴
۶/۴	۱۰۵۲/۲	۸۶۱	۱۶۰	۰	۳۲۰	۰/۵
۶/۴	۱۰۵۲/۲	۸۶۱	۱۶۰	۱۶	۳۰۴	۰/۵
۶/۴	۱۰۵۲/۲	۸۶۱	۱۶۰	۳۲	۲۸۸	۰/۵
۶/۴	۱۰۵۲/۲	۸۶۱	۱۶۰	۴۸	۲۷۲	۰/۵
۶/۴	۱۰۵۲/۲	۸۶۱	۱۶۰	۶۴	۲۵۶	۰/۵
۶/۴	۱۰۵۲/۲	۸۶۱	۱۶۰	۹۶	۲۲۴	۰/۵
۶/۴	۱۰۵۲/۲	۸۶۱	۱۶۰	۱۲۸	۱۹۲	۰/۵
۶/۴	۱۰۵۲/۲	۸۶۱	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۰/۵

۲-۳ آزمایش مقاومت فشاری در بتن

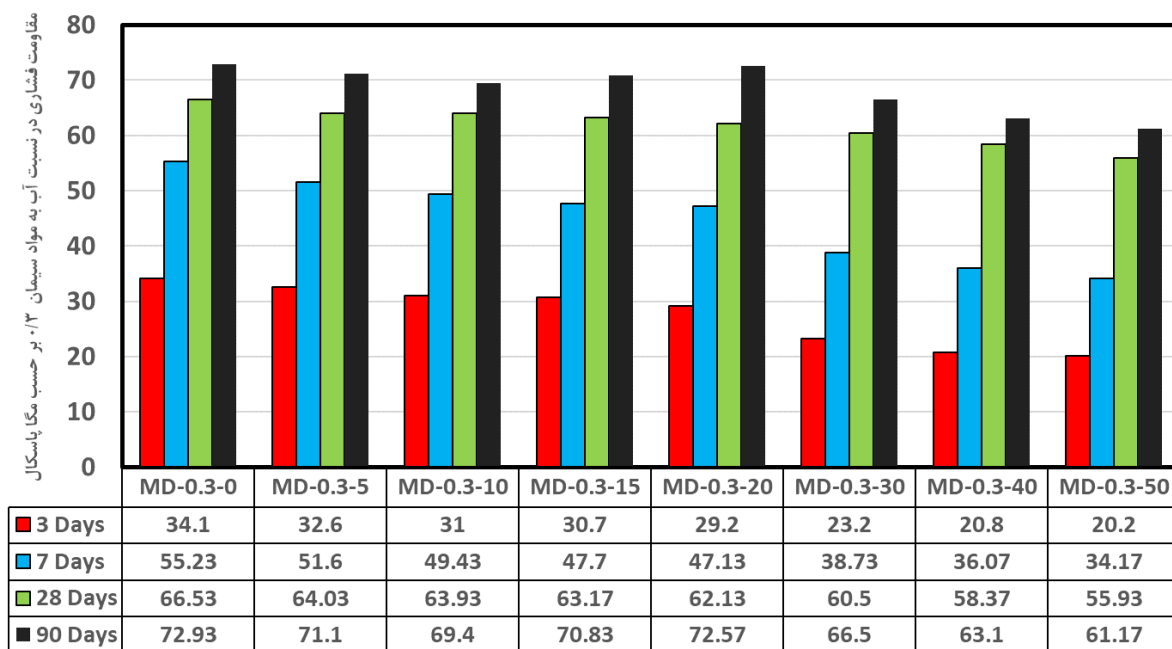
آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن یکی از متداولترین آزمایش‌هایی است که بر روی بتن انجام می‌شود. این آزمایش چنان به تغییرات در روش آزمایش حساس است که لازم است دقیقاً بر اساس روش استاندارد انجام پذیرد تا نتایج به دست آمده در آزمایش‌های مختلف (حتی در یک آزمایشگاه) با یکدیگر قابل مقایسه باشد. دستگاه آزمایش مقاومت فشاری باید منطبق با استاندارد ASTM-C39 کالیبره شده باشد. ظرفیت دستگاه باید برای تعیین مقاومت آزمون‌های مورد نظر کافی باشد. وقتی آزمون‌ها از مخزن آب یا اتاق مرطوب خارج می‌شود حداکثر ۳ ساعت می‌تواند قبل از آزمایش در محیطی با دمای ۲۰ تا ۳۰ درجه قرار گیرد ولی سطح آن در هنگام آزمایش باید مرطوب بوده ولی آب چکان نباشد. صرفاً در مواردی که سروه آزمون‌ها با ملات ماسه و گوگرد کلاهیگذاری می‌شود سروه آزمون باید خشک باشد. در این تحقیق به واسطه تعدد نمونه‌ها و حجم بالای بتن ساختنی نمونه‌های مکعبی با ابعاد هر ضلع ۱۰ سانتی‌متر ساخته و در آب عمل‌آوری هریک به مدت به ترتیب ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری کردید.

۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

همان گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مقاومت نمونه‌های ۳ روزه در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳ با افزایش جایگزینی پودر کاشی ضایعاتی کاهش می‌یابد که این مقدار به ترتیب با جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ درصد پودر کاشی به ترتیب برابر ۴/۶، ۵/۱۶، ۵/۸۸، ۱۰/۴۲، ۲۸/۸۳، ۳۶/۱۹، ۳۸/۰۳ درصد می‌باشد. همان گونه که از این اعداد مشخص است، با توجه به درصد پایین نسبت آب به سیمان که برابر ۰/۳ است، با جایگزینی بیش از ۲۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی فرایند اولیه هیدراتاسیون با مشکل مواجه شده و در سنین اولیه پرتلندایت به صورت کامل تشکیل نمی‌گردد؛ بنابراین برای قضاوت بر عملکرد جایگزینی پودر کاشی ضایعاتی سن ۳ روز معیار درستی نیست و باید تا سنین بالاتر از ۳ روز صبر نمود. در مورد مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷ روز نیز روند کاهش به ترتیب بر اساس درصد جایگزینی مذکور، ۶/۵۷، ۱۰/۵۰، ۱۳/۶۳، ۱۴/۶۳، ۲۹/۸۷، ۳۴/۶۹، ۳۸/۱۳ درصد می‌باشد. با توجه به روند کاهشی تقریباً مشابه در سنین ۳ و ۷ روزه می‌توان نتیجه گرفت که شروع فعالیت پوزولانی در پودر کاشی ضایعاتی به همراه سیمان در نسبت آب به سیمان ۰/۳ پس از این سنین اتفاق می‌افتد و در واقع کاشی هنوز فعالیت خود را آغاز نکرده است. با استناد به همین نتایج لازم به ذکر است که نمونه حاوی ۵۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی دارای مقاومتی برابر ۳۴/۱۷ مگا پاسکال است که این عدد برای استفاده در بتن سازه‌ای عددی قابل توجه بوده و با توجه به کاهش ۵۰ درصدی هزینه سیمان، حتی استفاده از این درصد جایگزینی برای سازه‌ها در این نسبت آب به سیمان توصیه می‌شود.

درباره مقاومت فشاری نمونه‌ها در این نسبت آب به سیمان برای سن ۲۸ روزه نتایج حاکی از آن است که، فعالیت پوزولانی و تبدیل پرتلندایت به سیلیکات کلسیم هیدراته در حال شکل‌گیری می‌باشد. زیرا کاهش مقاومت فشاری برای مثال نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی برای ۶/۶۱ درصد است که این عدد در سن ۷ روزه برابر با ۱۴/۶۳ درصد بود و این موضوع شروع فعالیت پوزولانی را تصدیق می‌نماید. این عدد برای نمونه حاوی ۵۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی ۱۵/۹۳ درصد می‌باشد که برای نمونه ۷ روزه برابر ۳۸/۱۳ بود. این اعداد حاکی از آن است که با افزایش درصد پودر کاشی ضایعاتی در این نسبت آب به سیمان فعالیت پوزولانی در این سن تسریع می‌یابد.

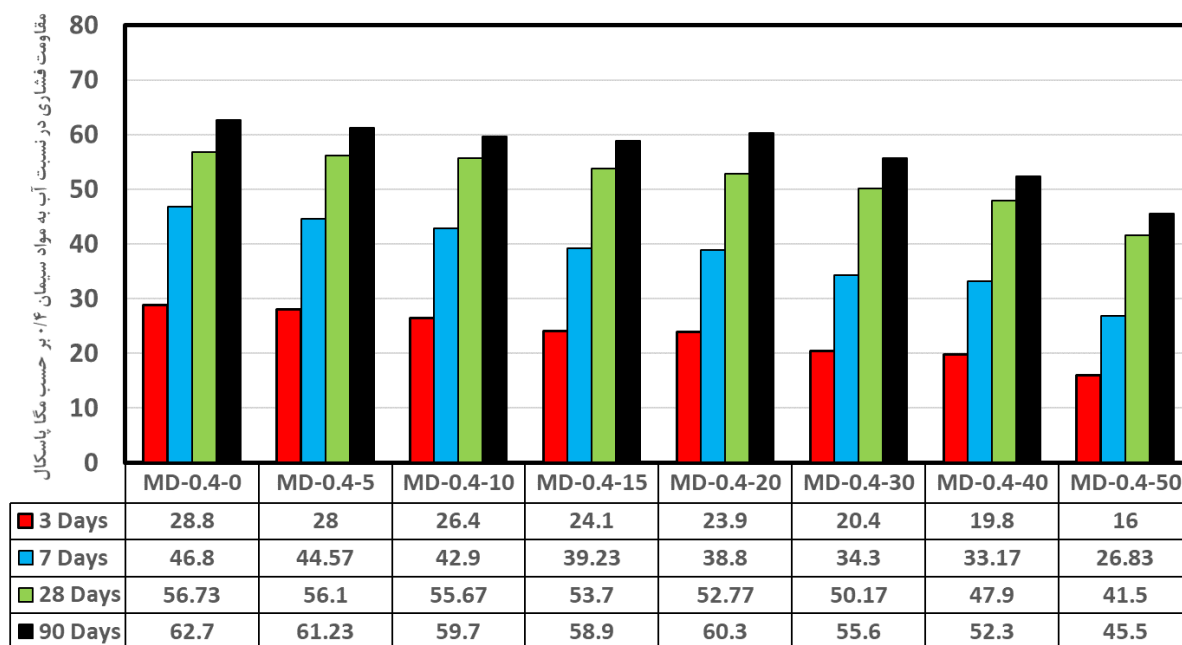
پیرامون مقاومت فشاری نمونه‌ها در نسبت آب به سیمان ۰/۳ در سن ۹۰ روزه نتایج بسیار درخور توجه است. زیرا نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی به مقاومت فشاری ۷۲/۵۷ مگا پاسکال رسیده است که این عدد تقریباً برابر با نمونه کنترل می‌باشد. با این تفاوت که به واسطه وجود فعالیت‌های پوزولانی طبیعتاً مقدار سیلیکات کلسیم هیدراته که از مقاومت بیشتری برخوردار است، از پرتلندایت در این نمونه به مراتب بیشتر است و این طرح اختلاط برای کار در مناطق خورنده و همچنین با توجه به کاهش ۲۰ درصدی سیمان بسیار توصیه می‌گردد. از طرفی کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی ۳۰، ۴۰، ۵۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی به ترتیب برابر ۸/۸۸، ۱۳/۴۷، ۱۵/۳۹ درصد است که با توجه به مقاومت بالای نمونه کنترل، استفاده از هر ۳ طرح اختلاط با هدف بهره‌جویی از بتن پر مقاومت و به صرفه اقتصادی و همچنین دوستدار محیط‌زیست توصیه می‌گردد.



شکل ۳: مقاومت فشاری نمونه‌ها در نسبت آب به سیمان ۰/۳

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف کاشی ضایعاتی در نسبت آب به سیمان ۰/۴ در شکل ۴ قابل مشاهده است. در ابتدا باتوجه به نتایج شایان ذکر است، در این نسبت آب به سیمان مقاومت فشاری نمونه کنترل در سن ۲۸ روز نسبت به حالت قبل، یعنی نسبت آب به سیمان ۰/۳، ۱۴/۷۳ درصد کاهش یافته است. دلیل این موضوع طبیعتاً وجود نسبت آب به سیمان کمتر است، اما باین وجود این عدد برابر ۵۶/۷۳ مگا پاسکال است که کفایت سازه‌ای این بتن را به راحتی به عنوان یک نمونه توانمند نشان می‌دهد. در مورد مقاومت فشاری نمونه‌های ۳ روزه به ترتیب با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی میزان کاهش برابر با ۲/۷۷، ۸/۳۳، ۱۴/۳۱، ۱۷/۰۱، ۲۹/۱، ۳۱/۲۵، ۴۴/۴۴ را تجربه نموده است که باتوجه به میزان بیشتر نسبت آب به سیمان روند کاهشی در این حالت نسبت به زمانی که نسبت ۰/۳ است، بیشتر می‌باشد. در این حالت نیز با جایگزینی بیش از ۲۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی روند کاهشی شدیدتر شده است که دلیل آن جلوگیری از تسریع فرایند هیدراتاسیون اولیه به واسطه وجود پودر کاشی ضایعاتی می‌باشد. در ادامه لازم به ذکر است که نمونه‌های حاوی ۴۰ و ۵۰ درصد پودر مقاومتی کمتر از ۲۰ مگا پاسکال در سن ۳ روز کسب نموده‌اند که البته مقاومت ۳ روزه نیز در آزمایش‌های مقاومت فشاری در تمامی استانداردها ملاک ارزیابی و عمل نمی‌باشد. در خصوص نمونه‌های ۷ روزه کاهش مقاومت فشاری به ترتیب جایگزینی مذکور در این بخش به ترتیب ۴/۷۶، ۸/۳۳، ۱۶/۱، ۱۷/۰۹، ۲۶/۷۰، ۲۹/۱، ۴۲/۶۷ درصد می‌باشد که در این حالت نیز با افزایش درصد جایگزین به بیش از ۲۰ درصد، مقدار کاهش مقاومت فشاری شدت گرفته است. پیرامون مقاومت فشاری در نمونه‌های ۲۸ روزه، مشابه سایر نسبت‌های آب به سیمان، آغاز فرایند واکنش پوزولانی به وضوح قابل مشاهده است به صورتی که درصد کاهش مقاومت فشاری در نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی فقط ۶/۹۸ درصد می‌باشد که باتوجه به مقاومت این نمونه که برابر ۵۲/۷۷ مگا پاسکال است، این عدد کاملاً منطقی و قابل استفاده است. نتایجی مشابه در تحقیقات حیدری و همکاران و همچنین تورگال و همکاران در این باره و در این نسبت آب به سیمان گزارش شده است [۷]. آنها درصد بهینه جایگزینی در این نسبت آب به سیمان را ۲۰ درصد گزارش نموده‌اند. در این تحقیق باتوجه به اختلاف کم مقاومت فشاری بین نمونه‌های حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی، برای اهداف مقاومتی و مکانیکی در این نسبت آب به سیمان ۳۰ درصد جایگزینی نیز قابل توصیه است. اما جایگزینی بیش از ۳۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی در سن ۲۸ روز، تا حدی روند کاهش مقاومت فشاری را تسریع می‌نماید.

در مورد نمونه‌های عمل‌آوری شده ۹۰ روز پس از ساخت (شکل ۴)، مقدار کاهش مقاومت فشاری برای ۲۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی ۳/۸۲ درصد می‌باشد. این عدد نشان‌دهنده آن است که با افزایش نسبت آب به سیمان فعالیت پوزولانی بین کاشی ضایعاتی و سیمان تاحدی کاهش می‌یابد که این موضوع به دلیل کاهش مقدار پرتلندایت یا همان هیدروکسید کلسیم اولیه در فرایند هیدراتاسیون اولیه بوده که به تبع آن تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته در واکنش‌های ثانویه را با کندی مواجه می‌سازد. در حالت کلی می‌توان گفت، با هدف نیل به اهداف مقاومتی در نسبت آب به سیمان ۰/۴، درصد جایگزینی بین ۲۰ تا ۳۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی، برای مقاومت فشاری میان‌مدت و بلندمدت در حوزه تحقیقات این پژوهش توصیه می‌گردد.



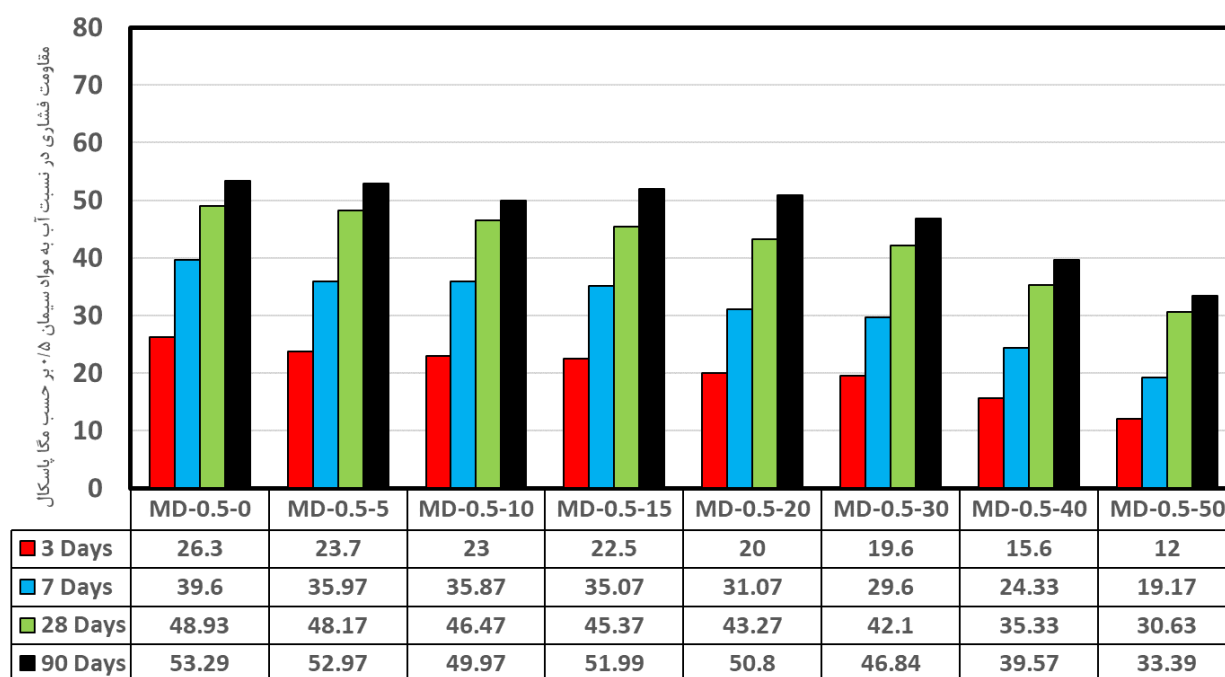
شکل ۴: مقاومت فشاری نمونه در نسبت آب به سیمان ۰/۴

در ادامه در شکل ۵ نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری بروی نمونه‌های بتنی در نسبت آب به سیمان ۰/۵ مشاهده می‌گردد. نتایج در این نسبت آب به سیمان حاکی از آن است که، در نمونه شاهد یا کنترل مقاومت فشاری نمونه ۳ روزه برابر با ۲۶/۳ مگاپاسکال می‌باشد که این عدد نسبت به نمونه شاهد در حالت قبل، یعنی نسبت آب به سیمان ۰/۴ به مقدار ۸/۶۸ درصد کاهش یافته است. این در حالی است که در حالت قبل درصد کاهش نسبت به حالت ۰/۳، ۱۴/۷۳ می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده آن است که، هرچه نسبت آب به سیمان افزایش یابد، میزان روند کاهشی در مقاومت فشاری از شیب کمتری برخوردار خواهد بود.

درباره نمونه‌های عمل‌آوری شده ۳ روز پس از عمل‌آوری در نسبت آب به سیمان ۰/۵، میزان کاهش مقاومت فشاری به ترتیب برای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی برابر ۹/۸۸، ۱۲/۵۴، ۱۴/۴۴، ۲۳/۹۵، ۲۵/۴۷، ۴۰/۶۸ و ۵۴/۳۷ می‌باشد. همان گونه که از نتایج قابل نتیجه‌گیری است، درصد کاهش مقاومت فشاری در این نسبت آب به سیمان نسبت به حالت‌های قبل بیشتر است که طبیعتاً به واسطه افزایش نسبت آب به سیمان و کاهش مقدار سیمان فرایند هیدراتاسیون در روزهای اول عمل‌آوری به واسطه جایگزینی پودر کاشی ضایعاتی با سیمان با مشکل مواجه بوده و پرتلندایت یا همان چسب اولیه سیمان آبدیده برای تشکیل به زمان بیشتری نیازمند است.

در سن ۷ روزه نیز روند کاهش مقاومت با افزایش بیش از ۳۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی با سرعت بیشتری روبرو بوده است. به گونه‌ای که با جایگزینی بیش از ۳۰ درصد و ۴۰ و ۵۰ درصد این میزان کاهش مقاومت فشاری به ترتیب ۲۵/۲۵، ۳۸/۵۶ و ۵۱/۵۹ درصد بوده است. اما در مورد بتن با درصد جایگزینی ۵۰ درصد مقاومت فشاری ۷ روز پس از عمل‌آوری در حدود ۲۰ مگا پاسکال می‌باشد. این عدد نشان‌دهنده آن است که حتی با این درصد جایگزینی و نسبت آب به سیمان ۰/۵، بتن حداقل مقاومت فشاری بتن سازه‌ای را احراز نموده است.

پیرامون سن عمل‌آوری ۲۸ روزه، در این نسبت آب به سیمان نیز روند کاهش مقاومت فشاری به میزان محسوسی کند شده است که این موضوع نشان‌دهنده شروع واکنش پوزولانی در این نسبت آب به سیمان برای نمونه‌های حاوی پودر کاشی ضایعاتی می‌باشد. به گونه‌ای که در نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی درصد کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد برابر ۱۱/۵۶ درصد گزارش شده است. در نمونه‌هایی که ۹۰ روز عمل‌آوری شده‌اند، نمونه حاوی ۲۰ درصد کاشی ضایعاتی تقریباً نتایج مشابه با نمونه شاهد را داشته است. این موضوع نشان‌دهنده آن است که، تقریباً در تمامی نسبت‌های آب به سیمان میزان بهینه جایگزینی پودر کاشی ضایعاتی به میزان ۲۰ درصد و حداکثر ۳۰ درصد برای مقاصد سازه‌ای می‌باشد. زیرا در این درصد جایگزینی تقریباً فرایند پوزولانی به گونه‌ای است که کاهش مقاومت فشاری از کمبود سیمان به میزان قابل ملاحظه‌ای جبران شده است.



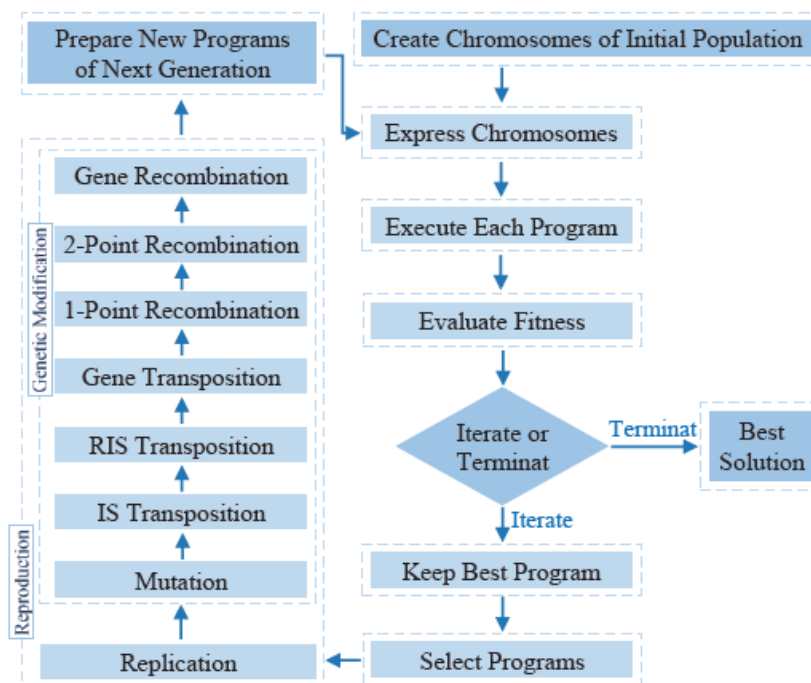
شکل ۵: مقاومت فشاری نمونه‌ها در نسبت آب به سیمان ۰/۵

۴- مدل‌ها و پارامترهای روش برنامه‌نویسی بیان ژن

۴-۱ برنامه‌نویسی بیان ژن

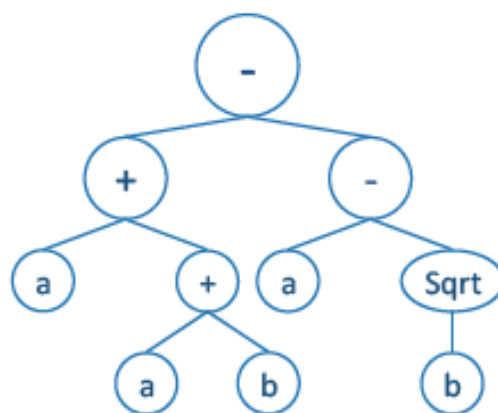
روش برنامه‌نویسی بیان ژن در واقع تلفیقی از برنامه‌نویسی ژنتیک و الگوریتم ژنتیک می‌باشد، زیرا در این روش نیز به صورت مشابه جمعیت، در یک جامعه آماری به کار گرفته می‌شود. سپس الگوریتم مورد نظر بر مبنای سازگاری درصدی از جامعه آماری را انتخاب می‌کند و سپس با استفاده از عملگرهای ژنتیکی، تنوع ژنتیکی را معرفی می‌نماید. در حقیقت این روش نوعی الگوریتم تکاملی است که از به هم پیوستگی کروموزوم‌های خطی با طول ثابت از الگوریتم ژنتیک و بیان درختان با اشکال و اندازه‌های مختلف از روش

برنامه‌نویسی ژنتیک شکل گرفته است. زبان برنامه‌نویسی این روش Karva نام دارد که شباهت زیادی با زبان‌های LISP دارد. مراحل اصلی این روش در شکل ۶ با عنوان نمودار جریان قابل مشاهده است. در این شکل فرآیندهای سعی و خطا برای چندین نسل تا زمانی که یک راه حل با درصد خطای مورد نظر حاصل شود ادامه می‌یابد [۲۸-۳۰].



شکل ۶: نمودار برنامه‌نویسی بیان ژن [۳۱]

در این روش تمامی ژن‌ها دارای طول یکسان هستند. اما باین وجود این ژن‌ها می‌توانند درختان بیان ژن را در اندازه‌ها و شکل‌های گوناگونی رمزگذاری کند. سپس توابع پیوند موجود ژن‌های گوناگون را برای ساختن یک کروموزوم در کنار یکدیگر قرار می‌دهند. نکته شایان ذکر این است که در روش برنامه‌نویسی بیان ژن تمامی وسایل در چارچوب درختان بیان ژن که شامل ترکیبی از عملگرها، توابع، اعداد ثابت و متغیرها است بیان می‌شود. شکل ۷ نمودار درخت بیان یک کروموزوم را نشان می‌دهد که در آن فرمول ریاضی به صورت $[a + (a + b)] - [a - \sqrt{b}]$ بیان شده است [۳۰].



شکل ۷: نمودار درخت بیان کروموزوم [۳۱]

تحقیقات گذشته نشان دهنده آن است که برای به دست آوردن روابط ریاضی برای مطالعات آزمایشگاهی با چندین ورودی، این روش از سایر روش‌های رگرسیونی و همچنین شبکه‌های عصبی مصنوعی، خروجی‌های دقیق‌تری را ارائه می‌کند برای استفاده از روش برنامه‌نویسی بیان ژن ۵ مرحله که دارای اهمیت فراوانی است، وجود دارد که سه مورد اول فضای جستجوی الگوریتم را مشخص می‌کند و دو مورد بعدی به ترتیب میزان کیفیت و سرعت جستجو را تعیین می‌کند که این پنج مرحله به شرح زیر می‌باشد:

- انتخاب یک تابع سازگاری. یکی از محاسن این مرحله این است که سیستم به تنهایی می‌تواند راه‌حل بهینه را پیدا کند
- انتخاب تابع ورودی‌ها برای تولید کروموزوم.
- انتخاب معماری کروموزومی؛ یعنی طول سر و تعداد شماره. در این تحقیق تعداد ژن‌ها یا همان شاخه درخت بیان ژن ۳ و ۵ با طول سر ۱۰ و ۱۵ به طور تصادفی در نظر گرفته شده است.
- انتخاب تابع پیوند. در این تحقیق از عملگرهای جمع و ضرب برای پیوند ژن‌ها استفاده شده است.
- استفاده از یک ترکیب مناسب از کل عملگرهای ژنتیک

۲-۴ مدل‌ها و پارامترهای پیشنهادی

داده‌های این تحقیق شامل ۹۶ نمونه آزمایشگاهی ساخته شده از ۲۴ طرح اختلاط است. برای مدل‌سازی داده‌ها از نرم‌افزار GenXpro Tools-Ver 5.0 استفاده شده است. در کل با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف مقاومت فشاری پیش‌بینی و سپس نتایج با نتایج آزمایشگاهی راستی‌آزمایی شده است. در این تحقیق پارامترهای ورودی شامل نسبت آب به مواد سیمانی ($\frac{W}{C}$)، مقدار سیمان مصرفی در هر متر مکعب از بتن بر حسب کیلوگرم (c)، سن نمونه‌ها عمل‌آوری شده بر حسب روز (age) و مقدار پودر کاشی ضایعاتی مصرفی در هر متر مکعب از بتن بر حسب کیلوگرم (wcp) و پارامتر خروجی مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال (fc) می‌باشد. دلیل انتخاب این پارامترها وابستگی آنها به واکنش‌های پزولانی و تاثیر در تبدیل هیدروکسید کلسیم به سیلیکات کلسیم هیدراته در عین مستقل بودن هریک از پارامترها بوده است. در کل مجموعه‌ی داده‌ها نیز ۸۰ درصد برای آموزش مدل و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفته است. محدوده‌ی متغیرهای ورودی و خروجی نیز در جدول ۵ قابل مشاهده است.

جدول ۵: محدوده پارامترهای ورودی و خروجی

متغیرهای ورودی و خروجی	حداقل	حد میانه	حداکثر
سن نمونه‌ها بر حسب روز (ورودی)	۳	۲۸	۹۰
مقدار سیمان مصرفی بر حسب کیلوگرم (ورودی)	۱۶۰	۳۱۸	۵۳۰
نسبت آب به سیمان (ورودی)	۰/۳	۰/۴	۰/۵
مقدار پودر کاشی ضایعاتی بر حسب کیلوگرم (ورودی)	۰	۷۹/۵	۲۶۵
مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال (خروجی)	۱۲	۴۵/۳۶	۷۲/۹۳

در این تحقیق از ۸ مدل برنامه‌نویسی بیان ژن استفاده شده است. میزان خطا نیز با استفاده از کمینه‌سازی رابطه جذر میانگین مربع خطاها به عنوان معیار انتخاب بهترین مدل در نظر گرفته شده است که بر اساس رابطه‌ی ۱ قابل مشاهده است، لازم به ذکر است که واحد این کمیت بر اساس مقایسه مقاومت فشاری پیش‌بینی شده و آزمایشگاهی بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. در این رابطه t مقدار هدف (نتیجه آزمایشگاهی)، O مقدار خروجی مدل و n تعداد کل داده‌های جمع‌آوری شده است. بر این اساس بهترین رابطه برای پیش‌بینی

مقاومت فشاری بتن پرمقاومت حاوی پودر کاشی ضایعاتی ارائه شده است. جدول ۶ پارامترهای تنظیمی برای هر مدل برنامه نویسی بیان ژن را نشان می دهد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - o_i)^2}$$

رابطه ۱

جدول ۶: پارامترهای تنظیم شده مدل ها

	GEP30-10-3-1-A	GEP30-10-3-1-M	GEP30-10-3-2-A	GEP30-10-3-2-M	GEP45-15-5-1-A	GEP45-15-5-1-M	GEP45-15-5-2-A	GEP45-15-5-2-M
تعداد کروموزوم	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵
اندازه سر	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
تعداد ژن	۳	۳	۳	۳	۵	۵	۵	۵
تابع پیوند	جمع	ضرب	جمع	ضرب	جمع	ضرب	جمع	ضرب
تابع سازگاری	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE
نرخ انتقال	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
نرخ جهش	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴
نرخ آمیزش	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
تعداد ثابت ژن	۱	۱	۲	۲	۱	۱	۲	۲
تعداد توابع	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
توابع استفاده شده: جمع، تفریق، ضرب، تقسیم، pow، Sqrt، exp، pow10، ln، x ² ، x ³ ، x ⁴ ، x ⁵ ، 3RT، ATan، Tan، Cos، Sin، 5RT، 4RT								

۳-۴ نتایج مدل سازی

معادلات به دست آمده از مدل GEP45-15-5-2-M پیشنهادی برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن پرمقاومت حاوی پودر کاشی ضایعاتی، به عنوان دقیق ترین مدل برنامه نویسی بیان ژن در شکل ۸ به فرم درخت بیان ارائه شده است. این مدل بر اساس عملکرد توابع تخمین خطا از بین ۸ مدل پیشنهادی انتخاب شده است. باتوجه به اشکال و نوع مدل که در آن دو مقدار ثابت وجود دارد. مقادیر ثابت به

ترتیب $c_0 = -7.519$ در ژن ET1، $c_1 = -3.212$ در ژن ET2، $c_0 = 3.114$ در ژن ET3، $c_1 = -0.738$ در ژن ET4 و $c_1 = -3.883$ در ژن ET5 می باشد. بر این اساس روابط بدست آمده در هر ژن به صورت روابط ۲ تا ۷ قابل مشاهده است.

$$ET1 = \frac{\text{Arctan}(((\ln(\text{age}))^5))}{-7.519} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$ET2 = -3.212 \quad \text{رابطه ۳}$$

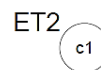
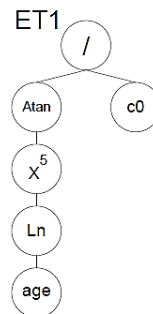
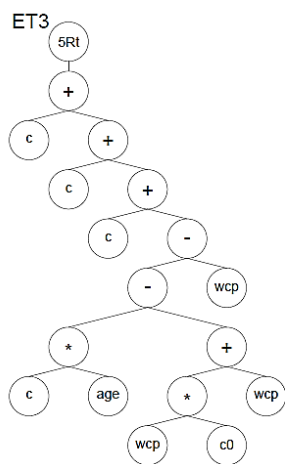
$$ET3 = \sqrt[5]{(\text{Age} \times c - 5.115 \text{wcp} + 3c)} \quad \text{رابطه ۴}$$

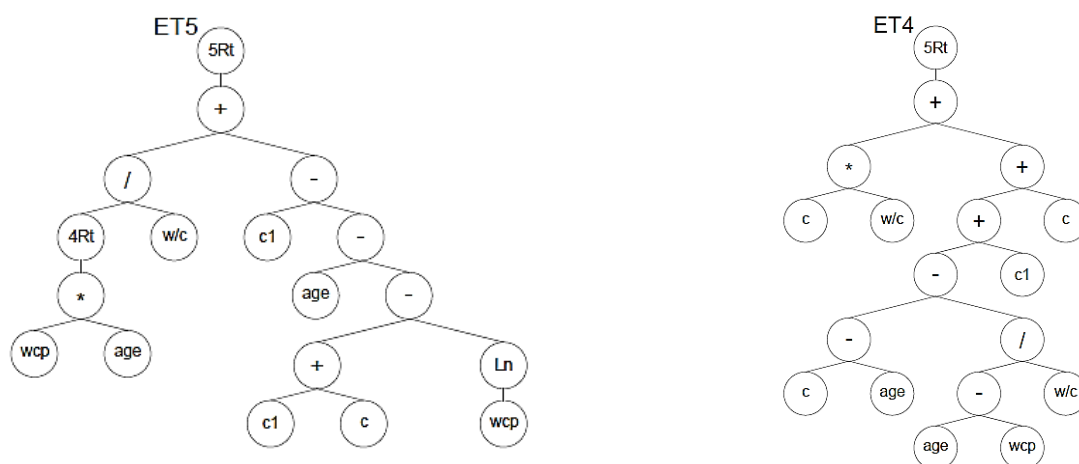
$$ET4 = \left[c \times \left(\frac{w}{c} \right) \right] + \left[(c - \text{age}) - \frac{(\text{age} - \text{wcp})}{\left(\frac{w}{c} \right)} \right] - 0.738 + c \quad \text{رابطه ۵}$$

$$ET5 = \sqrt[5]{\frac{\sqrt[4]{(\text{age} \times \text{wcp})}}{\left(\frac{w}{c} \right)} + \left[-3.883 - \left[\text{age} - \left[c - 3.883 - \ln(\text{wcp}) \right] \right] \right]} \quad \text{رابطه ۶}$$

پس از استخراج روابط پیشنهادی در هر ژن در این مدل می توان مقاومت فشاری را از رابطه ۷ استخراج نمود.

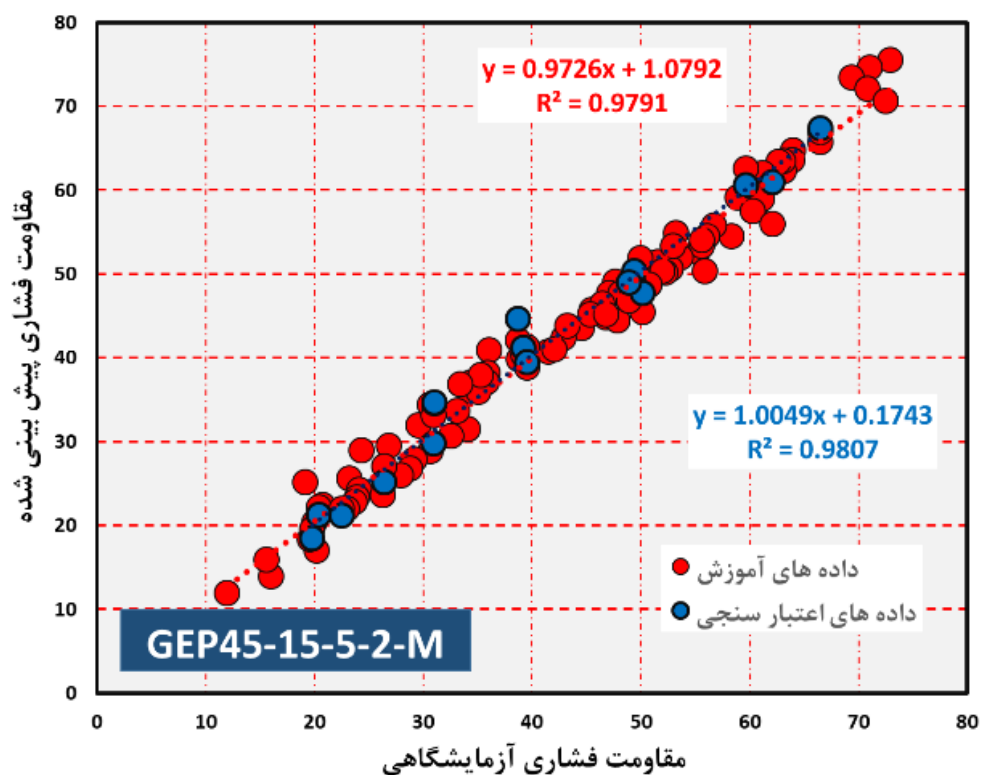
$$f_c = ET1 \times ET2 \times ET3 \times ET4 \times ET5 \quad \text{رابطه ۷}$$





شکل ۸: درخت بیان مدل GEP45-15-5-2-M

باتوجه به معادلات به دست آمده از مدل GEP45-15-5-2-M پیشنهادی برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن پر مقاومت حاوی پودر کاشی ضایعاتی، نمودار همبستگی نتایج آزمایشگاهی و نتایج پیش بینی شده در این مدل برای داده های آموزش و داده های اعتبارسنجی در شکل ۹ قابل مشاهده است.



شکل ۹: نتایج مقایسه داده ها در مدل GEP45-15-5-2-M

شکل ۹ به وضوح نشان می دهد که نتایج حاصل از پیش بینی این مدل و داده های آزمایشگاهی از همبستگی بسیار مناسبی برخوردار است.

مقادیر ضریب همبستگی در مراحل آموزش و اعتبارسنجی از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر این مقدار بالای ۰/۷ باشد نتایج پیش‌بینی شده به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر خواهد بود و هر چه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد مدل از دقت بالاتری برخوردار است. از طرفی عدم در نظر گرفتن میزان مناسب ضریب همبستگی در داده‌های اعتبارسنجی ممکن است از احتمال انحراف در داده‌ها خبر دهد. براین اساس معیار انتخاب مدل برتر اختلاف کم ضریب همبستگی در داده‌های آموزش و اعتبارسنجی در این تحقیق است. مقدار ضریب همبستگی و همچنین جذر میانگین مربعات خطاها برای همه مدل‌ها در جدول ۷ قابل مشاهده است. نتایج حاکی از آن است که تمامی مدل‌ها با دقت مناسبی داده‌ها را پیش‌بینی نموده‌اند. براین اساس در این تحقیق بهترین مدل با عملکرد ضرب بین ژن‌ها مدل GEP45-15-5-2-M و 5-2-M و بهترین مدل با عملکرد جمع بین ژن‌ها مدل GEP45-15-5-2-A تشخیص داده شده است. این نتایج حاکی از آن است که در چارچوب این تحقیق با افزایش تعداد کروموزوم و تعداد سر، خطای مدل‌ها کاهش می‌یابد.

جدول ۷: عملکرد مدل‌های پیشنهادی در این تحقیق

		RMSE	R2
GEP30-10-3-1-A	داده‌های آموزشی	۳/۴۵۳	۰/۹۵۵۸
	داده‌های اعتبارسنجی	۲/۶۸	۰/۹۶۸۷
GEP30-10-3-1-M	داده‌های آموزشی	۳/۷۹۸	۰/۹۴۵۹
	داده‌های اعتبارسنجی	۲/۷۳۶۵	۰/۹۶۸
GEP30-10-3-2-A	داده‌های آموزشی	۳/۸۶۷۹	۰/۹۵۰۸
	داده‌های اعتبارسنجی	۳/۷۰۵۷	۰/۹۶۰۲۲
GEP30-10-3-2-M	داده‌های آموزشی	۲/۹۴۶۷	۰/۹۶۵۶
	داده‌های اعتبارسنجی	۲/۱۵۲۷	۰/۹۸۰۷
GEP45-15-5-1-A	داده‌های آموزشی	۳/۳۶۴۵	۰/۹۵۶۵
	داده‌های اعتبارسنجی	۱/۹۷۹۵	۰/۹۸۲۴
GEP45-15-5-1-M	داده‌های آموزشی	۳/۲۲۱	۰/۹۵۹۹
	داده‌های اعتبارسنجی	۲/۶۱۳۸	۰/۹۷
GEP45-15-5-2-A	داده‌های آموزشی	۲/۵۱۲	۰/۹۷۳۷
	داده‌های اعتبارسنجی	۲/۰۳۶	۰/۹۸۱۲
GEP45-15-5-2-M	داده‌های آموزشی	۲/۱۸۱	۰/۹۷۹۱
	داده‌های اعتبارسنجی	۲/۱۲۴	۰/۹۸۰۶

۱۰- نتیجه‌گیری

- در این تحقیق مقاومت فشاری بتن پرمقاومت حاوی پودر کاشی ضایعاتی ابتدا به روش آزمایشگاهی و سپس با استفاده از پیش‌بینی به روش برنامه‌نویسی بیان ژن مورد بررسی قرار گرفته است، در چارچوب این تحقیق نتایج زیر قابل توجه می‌باشد:
- در نمونه‌های حاوی پودر کاشی ضایعاتی با افزایش سن عمل‌آوری مقاومت فشاری از رشد قابل توجهی برخوردار است. دلیل این موضوع فعالیت پوزولانی حاوی پودر کاشی ضایعاتی می‌باشد.
 - پیرامون مقاومت فشاری نمونه‌ها در نسبت آب به سیمان ۰/۳ در سن ۹۰ روزه، نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی به مقاومت فشاری ۷۲/۵۷ مگا پاسکال رسیده است. این عدد تقریباً با نمونه کنترل برابری نموده و در نتیجه استفاده از این درصد

جایگزینی برای این نسبت آب به مواد سیمانی توصیه می‌شود. این نتایج با نتایج تحقیق حیدری و توکلی هم‌خوانی معناداری را داشته است [۸].

- با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی مقدار مقاومت فشاری کاهش می‌یابد اما بازهم با جایگزینی ۲۰ درصد پودر کاشی ضایعاتی نتایج در سنین بالا قابل قبول است.
- با افزایش درصد جایگزینی به بیش از ۲۰ درصد مقاومت فشاری در سنین اولیه و همچنین ۹۰ روز پس از عمل‌آوری از افت محسوسی برخوردار است.
- روش برنامه‌نویسی بیان ژن با دقت بسیار مناسبی قادر به پیش‌بینی مقاومت فشاری حاوی پودر کاشی ضایعاتی است.
- با افزایش تعداد کروموزوم و تعداد سر در روش بیان ژن، خطای مدل‌ها در این تحقیق به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. این نتایج با نتایج تحقیق بهفرز و همکاران در حوزه افزایش تعداد نرون در لایه پنهان برای افزایش دقت روش شبکه عصبی پیرامون پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن حاوی پودر کاشی ضایعاتی، هم‌خوانی معناداری داشته است [۱].

مراجع

- [1] B. Behforouz, P. Memarzadeh, M. Eftekhari, F. Fathi, Regression and ANN models for durability and mechanical characteristics of waste ceramic powder high performance sustainable concrete, *Computers and Concrete* 25(2) (2020) 119-132.
- [2] M. Batayneh, I. Marie, I. Asi, Use of selected waste materials in concrete mixes, *Waste management* 27(12) (2007) 1870-1876.
- [3] M. Carsana, M. Frassoni, L. Bertolini, Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials, *Cement and Concrete Composites* 45 (2014) 39-45.
- [4] A. Mansoori, M.M. Moein, E. Mohseni, Effect of micro silica on fiber-reinforced self-compacting composites containing ceramic waste, *Journal of Composite Materials* (2020).
- [5] N. Ay, M. Ünal, The use of waste ceramic tile in cement production, *Cement and Concrete Research* 30(3) (2000) 497-499.
- [6] D.J. Anderson, S.T. Smith, F.T. Au, Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate, *Construction and Building Materials* 117 (2016) 20-28.
- [7] F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, Reusing ceramic wastes in concrete, *Construction and Building Materials* 24(5) (2010) 832-838.
- [8] A. Heidari, D. Tavakoli, A study of the mechanical properties of ground ceramic powder concrete incorporating nano-SiO₂ particles, *Construction and Building Materials* 38 (2013) 255-264.
- [9] D.M. Kannan, S.H. Aboubakr, A.S. El-Dieb, M.M.R. Taha, High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement, *Construction and Building Materials* 144 (2017) 35-41.
- [10] J. Sobhani, M. Najimi, A.R. Pourkhorshidi, T. Parhizkar, Prediction of the compressive strength of no-slump concrete: A comparative study of regression, neural network and ANFIS models, *Construction and Building Materials* 24(5) (2010) 709-718.
- [11] H. Naderpour, M. Mirrashid, Shear failure capacity prediction of concrete beam-column joints in terms of ANFIS and GMDH, *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 24(2) (2019) 04019006.
- [12] S.-C. Lee, Prediction of concrete strength using artificial neural networks, *Engineering structures* 25(7) (2003) 849-857.
- [13] K.O. Akande, T.O. Owolabi, S. Twaha, S.O. Olatunji, Performance comparison of SVM and ANN in predicting compressive strength of concrete, *IOSR Journal of Computer Engineering* 16(5) (2014) 88-94.
- [14] F. Khademi, M. Akbari, S.M. Jamal, M. Nikoo, Multiple linear regression, artificial neural network, and fuzzy logic prediction of 28 days compressive strength of concrete, *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 11(1) (2017) 90-99.
- [15] F. Khademi, S.M. Jamal, Estimating the compressive strength of concrete using multiple linear regression and adaptive neuro-fuzzy inference system, *International Journal of Structural Engineering* 8(1) (2017) 20-31.
- [16] S.M. Mousavi, P. Aminian, A.H. Gandomi, A.H. Alavi, H. Bolandi, A new predictive model for compressive strength of HPC using gene expression programming, *Advances in Engineering Software* 45(1) (2012) 105-114.
- [17] A. Mollahasani, A.H. Alavi, A.H. Gandomi, Empirical modeling of plate load test moduli of soil via gene expression programming, *Computers and Geotechnics* 38(2) (2011) 281-286.
- [18] A.H. Gandomi, A.H. Alavi, M.G. Sahab, New formulation for compressive strength of CFRP confined concrete cylinders using linear genetic programming, *Materials and Structures* 43(7) (2010) 963-983.
- [19] P. Sarir, J. Chen, P.G. Asteris, D.J. Armaghani, M. Tahir, Developing GEP tree-based, neuro-swarm, and whale optimization models for evaluation of bearing capacity of concrete-filled steel tube columns, *Engineering with Computers* (2019) 1-19.
- [20] A.A. Shahmansouri, H.A. Bengar, E. Jahani, Predicting compressive strength and electrical resistivity of eco-friendly concrete containing natural zeolite via GEP algorithm, *Construction and Building Materials* 229 (2019) 116883.
- [21] A.A. Shahmansouri, H.A. Bengar, S. Ghanbari, Compressive strength prediction of eco-efficient GGBS-based geopolymer concrete using GEP method, *Journal of Building Engineering* (2020) 101326.
- [22] M. Nematzadeh, A.A. Shahmansouri, M. Fakoor, Post-fire compressive strength of recycled PET aggregate concrete reinforced with steel fibers: Optimization and prediction via RSM and GEP, *Construction and Building Materials* 252 (2020) 119057.

- [23] S. Fakhrian, H. Behbahani, S. Mashhadi, Predicting post-fire behavior of green geopolymer mortar containing recycled concrete aggregate via GEP approach, *Journal of Soft Computing in Civil Engineering* 4(2) (2020) 22-45.
- [24] M.F. Javed, M.N. Amin, M.I. Shah, K. Khan, B. Iftikhar, F. Farooq, F. Aslam, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, Applications of gene expression programming and regression techniques for estimating compressive strength of bagasse ash based concrete, *Crystals* 10(9) (2020) 737.
- [25] X.-Y. Wang, Prediction of flexural strength of natural pozzolana and limestone blended concrete using machine learning based models, *MS&E* 784(1) (2020) 012005.
- [26] F. Ameri, P. Shoaeei, S.A. Zareei, B. Behforouz, Geopolymers vs. alkali-activated materials (AAMs): A comparative study on durability, microstructure, and resistance to elevated temperatures of lightweight mortars, *Construction and Building Materials* 222 (2019) 49-63.
- [27] D. Nasr, B. Behforouz, P.R. Borujeni, S.A. Borujeni, B. Zehtab, Effect of nano-silica on mechanical properties and durability of self-compacting mortar containing natural zeolite: Experimental investigations and artificial neural network modeling, *Construction and Building Materials* 229 (2019) 116888.
- [28] A.A. Shahmansouri, H.A. Bengar, H. AzariJafari, Life cycle assessment of eco-friendly concrete mixtures incorporating natural zeolite in sulfate-aggressive environment, *Construction and Building Materials* 268 (2021) 121136.
- [29] M. Nematzadeh, A.A. Shahmansouri, R. Zabihi, Innovative models for predicting post-fire bond behavior of steel rebar embedded in steel fiber reinforced rubberized concrete using soft computing methods, *Structures*, Elsevier, 2021, pp. 1141-1162.
- [30] A.A. Shahmansouri, M. Nematzadeh, A. Behnood, Mechanical properties of GGBFS-based geopolymer concrete incorporating natural zeolite and silica fume with an optimum design using response surface method, *Journal of Building Engineering* 36 (2021) 102138.
- [31] A.A. Shahmansouri, H. Akbarzadeh Bengar, S. Ghanbari, Experimental investigation and predictive modeling of compressive strength of pozzolanic geopolymer concrete using gene expression programming, *Journal of Concrete Structures and Materials* 5(1) (2020) 92-117.