

## بررسی عددی-آزمایشگاهی اثر مقاومت فشاری سیمان بر ویژگی مکانیکی بتن به کمک الگوهای مبتنی بر هوش مصنوعی

سحر مهدی نیا

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

محمدرضا توکلی زاده

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

امیررضا مسعودی \*

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

روشن منتظریان

مدیر کنترل کیفیت، کارخانه سیمان زاوه تربت، زاوه، ایران.

### چکیده

نقش مقاومت فشاری ملات ماسه سیمانی استاندارد در مقاومت فشاری بتن غیر قابل انکار است. از همین رو در این پژوهش، روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ژنتیک بیان مسئله (GEP) به عنوان فرایندهای فراتکاملی جهت پیش بینی مقاومت فشاری بتن بر پایه‌ی مقاومت فشاری ملات سیمان متناظر به کار می‌رود. برای رسیدن به این هدف، تعداد ۲۸۶ طرح اختلاط ملات ماسه سیمان دارای نسبت‌های یکسان مواد خام نخستین ورودی به کوره سیمان و در دسته‌بندی سیمان تیپ ۲ (مقاومت ۳۲/۵ مگاپاسکال) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری ملات‌های ماسه سیمان استاندارد (۳ آزمون) و بتن ساخته شده با طرح اختلاط یکسان (۳ آزمون) در سن ۲۸ روز در دسترس قرار گرفتند. بر پایه‌ی همین نتایج الگوی گسترش یافته می‌تواند به پیش بینی مقاومت فشاری بتن بر پایه‌ی مقاومت فشاری ملات متناظر با تمرکز بر نقش نرمی سیمان با دقت و شاخص عملکرد بالا بپردازد.

واژه‌های کلیدی: ملات ماسه سیمان استاندارد، مقاومت فشاری بتن، نرمی سیمان، شبکه عصبی مصنوعی، ژنتیک بیان مسئله.

\* نویسنده مسئول: ar.masoodi@um.ac.ir

## ۱- مقدمه

است و روند مناسبی را دارد. رابطه بین حفره‌های ملات و بتن توسط گانگ و همکارانش [۱۱] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش با استفاده از روش آب منفذی و نفوذ آب به درون حفره‌های نمونه‌های ملات و بتن به دست آمده است که نشان می‌دهد میزان منافذ نانو، میکرو و حتی ماکرو در نمونه‌های ملات و سیمان دارای اثر مشابهی هستند. در پژوهشی دیگر نیگارد و همکارانش [۱۲] به بررسی اثر افزودنی‌های معدنی در ملات سیمان و بتن پرداختند. نتایج حاکی از آن است که در صورت افزودن مواد معدنی، نمونه‌های ملات و بتنی که در معرض کربناته شدن طبیعی و حتی تسریع شده قرار بگیرند، مقاومت نمونه‌ها کاهش می‌یابد و این کاهش مقاومتی در نمونه‌های ملات و بتن با روند مشابهی پدیدار می‌شود. سایکیا و همکارانش [۱۳] به جایگزینی زیاله‌های پلاستیکی و سنگ‌دانه در نمونه‌های ملات و بتن پرداختند. در این پژوهش مشخص گردید استفاده از سنگ‌دانه‌های پلاستیکی باعث کاهش چگالی نمونه‌های ملات و بتن شده و نوعی بتن سبک تولید می‌شود و روند کاهش چگالی در تمامی نمونه‌های ملات و بتن مشهود بوده است.

بر اساس پیشینه پژوهشی بیان شده، تاکنون پژوهشی درباره‌ی رابطه بین مقاومت فشاری سیمان و بتن تهیه شده از آن انجام نشده است. از این رو، هدف پژوهش پیش رو انجام یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی گسترده در طول یک سال به منظور بررسی اثر مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان استاندارد روی مقاومت فشاری بتن ساخته شده متناظر است. در ادامه، یافتن الگویی بر پایه‌ی هوش مصنوعی جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری نمونه بتنی با استفاده از مقاومت ملات ماسه سیمان استاندارد یکی دیگر از اهداف این پژوهش می‌باشد. به این منظور، مطالعه‌ی گسترده‌ای بر روی ۲۸۶ نمونه سیمان تیپ ۲ در طول یک سال فعالیت کارخانه سیمان زاوه تربت صورت گرفته است. یافته‌های این پژوهش به عنوان اطلاعات پایه برای آغاز کار دیگر پژوهشگران و درک بهتر رابطه مستقیم مقاومت فشاری ملات و مخلوط بتنی از یک سیمان ثابت با مواد خام نخستین یکسان کمک خواهد کرد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

در این بخش اطلاعات مربوط به مصالح و مراحل ساخت نمونه‌ها و آزمایش‌های مربوط به نمونه‌های ملات سیمانی و بتنی به طور

امروزه کسب اطلاعات در مورد مواد اولیه ساخت بتن و ملات سیمان به دلایل متعددی از جمله افزایش ساخت‌وساز و کاربرد گسترده بتن در سازه‌های مختلف مانند ساختمان‌ها، سدها، پل‌ها و نیروگاه‌های هسته‌ای ضروری به نظر می‌رسد [۱-۴]. بدیهی است که ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ملات سیمان بر ویژگی‌های بتن تأثیر مستقیم دارد. از سوی دیگر، با توجه به اینکه بتن در زندگی روزمره بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد، بررسی ویژگی‌های ملات به چگونگی رفتار بتن در سازه‌ها کمک شایانی می‌کند [۵]. پژوهشگران در بررسی‌های خود دریافته‌اند که بتن یک ماده همگن و یکپارچه است که از ملات سیمان و سنگ‌دانه‌های درشت‌تر تشکیل شده است و برای به‌دست آوردن اطلاعات مربوط به ملات سیمان، باید ویژگی‌ها و نسبت ترکیب بخش‌های تشکیل دهنده‌ی آن همچون ریزدانه‌ها، سیمان و آب مورد مطالعه قرار گیرد [۶، ۷]. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ملات‌های پایه سیمانی و بتن، مقاومت فشاری است که در تمامی پروژه‌های ساختمانی مورد توجه قرار می‌گیرد و از آن جایی که سیمان نقش چسبندگی و کنار هم نگه‌داشتن مصالح سنگی را دارد، مقاومت فشاری را به‌صورت مستقیم تحت الشعاع قرار می‌دهد [۸]. در حالی که فرایندهای ساخت، عمل‌آوری و آزمایش نمونه‌های ملات و بتن زمان‌بر و پرهزینه هستند، پژوهشگران به دنبال روش‌های دیگری از جمله پیش‌بینی به روش هوش مصنوعی برای دست‌یابی به نیازهای مورد نظر خود هستند.

تاکنون پژوهش‌های زیادی درباره ویژگی‌های ملات و بتن و تأثیر آنها بر یکدیگر انجام شده است. لمان و همکارانش [۹] در پژوهشی به بررسی اثر عوامل مؤثر بر ویسکوزیته در ملات و بتن پرداخته‌اند. نتایج نشان‌دهنده آن است که کاربرد میکروسیلیس، نانوسیلیس و فوق‌روان‌کننده در روند افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های ملات و بتن به میزان متفاوت ولی هم‌سو اثرگذار هستند. در پژوهشی دیگر پایوا و همکارانش [۱۰] کارآیی ملات و بتن دارای درصدهای مختلف متاکائولین، دیاتومیت و فوق‌روان‌کننده را مورد بررسی قرار داده و پس از انجام کار آزمایشگاهی و بررسی نمودارهای طیف‌سنجی پرتوی ایکس (XRD) به این نتیجه رسیدند که اگرچه کارآیی نمونه‌های ملات و بتن از یک رابطه خطی پیروی نمی‌کند، ولی با یک رابطه غیرخطی قابل هم‌پوشانی

کامل تشریح شده و همچنین در هر قسمت مطالب مورد نیاز در جدول گزارش شده است.

طرح اختلاط) با سیمان تیپ ۲ رده‌ی مقاومتی ۳۲/۵ مگاپاسکال با نسبت‌های آب به سیمان و سنگ‌دانه به سیمان ثابت و مواد خام اولیه در بازه قابل قبول استاندارد (جدول ۱) در طول یک سال فعالیت کارخانه سیمان زاوه تربت (سال ۱۴۰۰) برای ملات و بتن تهیه و مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۲).

## ۱-۲- مواد و مراحل آماده سازی نمونه‌ها

تعداد ۸۵۸ آزمون از مجموع ۲۸۶ طرح اختلاط (۳ نمونه برای هر

جدول ۱- بازه کمینه و بیشینه ترکیب‌های مواد خام نخستین

مواد خام نخستین									ترکیب
Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	نرمی - بلین (m <sup>2</sup> /g)	
(%)									
۰/۲۰	۰/۵۵	۱/۵۵	۲/۰۷	۶۱/۹۴	۳/۷۷	۴/۲۶	۲۰/۴۵	۰/۳۰۶۶	کمترین مقدار
۰/۴۲	۰/۷۳	۲/۷	۳/۴۴	۶۳/۵۴	۴/۶۰	۵/۰۰	۲۱/۵۹	۰/۳۶۱۲	بیشترین مقدار
۰/۲۹	۰/۶۶	۲/۳۲	۲/۹۷	۶۲/۴۵	۳/۹۵	۴/۷۸	۲۰/۶۸	۰/۳۲۸۳	میانگین

جدول ۲- تعداد نمونه‌های ساخته شده ملات و بتن در هر ماه

سیمان	سیلو	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
۳۲/۵	۱	۱۴	۱۸	۲۰	۲۲	۱۷	۱۸	۲۱	۲۵	۲۶	۲۳	۲۳	۲۱
MPa	۲	۲	۴	۱	-	۶	۴	۳	۵	۵	۴	۱	۳

## ۲-۲- آزمایش‌های انجام شده

در این بخش آزمایش‌های نمونه‌های ملات و بتن به تفکیک ارائه شده است. این آزمایش‌ها شامل نرمی ذرات سیمان، تحلیل طیف نگاری فلئورسانس اشعه ایکس (XRF) و مقاومت فشاری نمونه‌ها است.

### ۱-۲-۲- درجه نرمی سیمان

برای تعیین میزان نرمی سیمان از دستگاه نفوذپذیری هوا (دستگاه بلین) مطابق با استاندارد ASTM C204-07 استفاده می‌گردد [۱۷]. دستگاه از بخش‌های مختلف سلول نفوذپذیر (یک استوانه صلب به قطر داخلی ۱۰/۱ ± ۱۲/۷ میلی‌متر)، دیسک (صفحه فولادی دارای ۳۰ تا ۴۰ سوراخ ۱ میلی‌متری با ضخامت ۰/۱ ± ۰/۹ میلی‌متر)، کاغذ صافی (قطر آن برابر با قطر داخل سلول)، فشارسنج (روش ارتفاع سیال با وزن مخصوص و لزجت کم مانند دی‌بوتیل فتالیت یا یک روغن معدنی سبک) و زمان‌سنج (دارای حافظه برای ذخیره زمان) تشکیل شده است. نحوه عملکرد دستگاه به گونه‌ای است که مقدار معینی هوا از یک سطح پرداخت شده سیمان با تخلخل مشخص مکیده می‌شود و نرمی سیمان بر حسب مساحت کل ذرات بر حسب سانتیمترمربع در یک گرم سیمان بیان

ریزدانه مورد استفاده در ساخت نمونه‌های ملات از ماسه استاندارد اتاوا با وزن مخصوص ۲/۶ و مدول نرمی ۲/۴۸ بوده و نمونه‌های ملات طبق استاندارد ASTM C305 ساخته شده است [۱۴]. برای ساخت نمونه‌های ملات، ابتدا مقدار آب محاسبه شده (نسبت آب به سیمان استاندارد ۰/۴۸۵) درون جام مخلوط کن ریخته و سپس به ترتیب سیمان و ریزدانه (نسبت ریزدانه به سیمان ۲/۷۵) را در دو مرحله اضافه و پس از آن ملات درون قالب قرار داده شد. نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM C109 [۱۵] عمل‌آوری و پس از ۲۸ روز از زمان ساخت، از آب خارج و برای اعمال بارگذاری آماده‌سازی شدند.

در ادامه برای ساخت نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط استاندارد با نسبت ماسه به سیمان ۲/۷۵، نسبت آب به سیمان ۰/۴۸۵ و نسبت ریزدانه به درشت‌دانه ۰/۵۵ از استاندارد INSO581-2 استفاده شده است [۱۶].

ریزدانه و درشت‌دانه مورد استفاده از سنگ‌دانه‌های شکسته و شسته شده با دانه‌بندی استاندارد ASTM بود [۱۴]. لازم به ذکر است که از آب آشامیدنی شهری برای تمامی طرح‌های اختلاط استفاده شد.

می گردد. در جدول ۳ مقادیر نرمی سیمان تولید شده در ماه‌های مختلف سال به تفکیک نشان داده شده است.

جدول ۳- مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین نرمی سیمان

شماره سیلو	مقادیر	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	کل سال
سیلو ۱	کمترین	۳۲۴۸	۳۲۱۹	۳۲۱۹	۳۱۸۹	۳۱۵۸	۳۱۲۸	۳۱۸۹	۳۲۱۹	۳۲۱۹	۳۲۱۹	۳۲۴۸	۳۲۱۹	۳۱۲۸
	بیشترین	۳۴۴۹	۳۳۶۴	۳۴۲۱	۳۳۹۳	۳۳۳۶	۳۲۷۸	۳۳۹۳	۳۴۲۱	۳۳۹۳	۳۴۴۹	۳۵۰۴	۳۴۴۹	۳۵۸۵
	میانگین	۳۳۴۳	۳۲۸۷	۳۲۷۹	۳۲۹۳	۳۲۱۳	۳۱۹۹	۳۳۰۱	۳۳۱۶	۳۳۰۸	۳۳۵۷	۳۳۶۸	۳۳۰۵	۳۲۹۷
سیلو ۲	کمترین	۳۲۱۹	۳۰۶۶	۳۲۷۸	-	۳۱۲۸	۳۰۹۷	۳۰۹۷	۳۰۹۷	۳۱۲۸	۳۱۲۸	۳۱۸۹	۳۱۵۸	۳۰۶۶
	بیشترین	۳۳۹۳	۳۳۰۷	۳۲۷۸	-	۳۲۴۸	۳۲۷۸	۳۲۷۸	۳۱۸۹	۳۲۷۸	۳۲۷۸	۳۳۰۷	۳۳۶۴	۳۶۱۲
	میانگین	۳۳۳۲	۳۱۸۸	۳۲۷۸	-	۳۲۴۶	۳۱۷۵	۳۱۶۵	۳۱۳۸	۳۲۰۸	۳۳۷۱	۳۲۸۲	۳۲۶۲	۳۲۴۰

## ۲-۲-۲- تحلیل XRF

شدن الکترون‌ها در لایه‌های مختلف، پرتوهای دیگری تولید می‌شوند. پرتوهای تولید شده و طول موج آنها مشخصه هر اتم بوده و از طریق آن می‌توان مقدار عناصر موجود در نمونه مورد نظر را به دست آورد. در طیفی که توسط این روش به دست می‌آید موقعیت و ارتفاع هر قله به ترتیب نشان دهنده نوع و میزان وجود عنصرهای گوناگون است که با مقایسه آن با طیف‌های استاندارد می‌توان گونه و میزان وجود هر عنصر و از روی آن ترکیب‌های مورد نظر را مشخص کرد. داده‌های به دست آمده از تحلیلگر دستگاه پرتوی اکس در طول یک سال در جدول ۴ به تفکیک هر سیلو گزارش شده است.

طیف نگاری فلوروسنس اشعه اکس، از روش‌های غیرمخرب آنالیز عنصری است که اطلاعات عناصر شیمیایی تشکیل دهنده مواد را در اختیار قرار می‌دهد. این روش آزمایشگاهی با دقت و سرعت بالایی که در شناسایی ترکیب‌های معدنی دارد، دارای کاربردهای فراوانی در صنعت و مرکزهای پژوهشی است. برای انجام این آزمایش به حداقل یک گرم ماده جامد یا مایع از نمونه‌ی مورد نظر نیاز است. در این پژوهش، از یک گرم نمونه پودر سیمان (عبور کرده از الک ۲۰۰) استفاده گردید. در این آزمایش «پرتوی اکس» به نمونه تابانده می‌شود و پس از برانگیخته شدن اتم‌ها و جابه‌جا

جدول ۴- مقادیر کمینه و بیشینه مواد خام نخستین سیلوهای متفاوت

سیلو	مقدار	مواد خام نخستین (%)							
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
۱	کمترین	۲۰/۴۵	۴/۶۳	۳/۷۵	۶۲/۰۹	۲/۱۵	۲	۰/۵۶	۰/۲۲
	بیشترین	۲۰/۹۸	۵	۴/۱	۶۲/۹۹	۳/۴۴	۲/۵۲	۰/۷۳	۰/۳۴
	میانگین	۲۰/۶۹	۴/۷۸	۳/۹۴	۶۲/۴۶	۳	۲/۳۲	۰/۶۶	۰/۲۹
۲	کمترین	۲۰/۴۵	۴/۶۵	۳/۷۹	۶۱/۹۴	۲/۲۲	۲/۱۴	۰/۵۶	۰/۲۲
	بیشترین	۲۰/۹۳	۴/۸۹	۴/۱	۶۲/۸۲	۳/۳۶	۲/۷	۰/۷۲	۰/۴۲
	میانگین	۲۰/۶۸	۴/۷۹	۳/۹۶	۶۲/۴۳	۲/۹	۲/۳۳	۰/۶۶	۰/۳

## ۲-۲-۳- مقاومت فشاری ملات

C349-02 و روند کار در آزمایشگاه کارخانه سیمان از بخش‌های شکسته شده آزمون‌های شکسته شده در آزمایش مقاومت خمشی بودند [۱۸]. برای انجام این آزمایش سطح نمونه‌ها پس از خارج شده از مخزن آب خشک گردید و ذرات سست

نمونه‌های ملات سیمان مورد آزمایش از ترکیب یک واحد وزنی سیمان و ۲/۷۵ واحد وزنی ماسه ساخته شده‌اند. آزمون‌های مورد استفاده برای تعیین مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM

بنابراین وارد کردن داده‌های ثابت تأثیری در نتیجه نهایی خروجی ندارد. در هر دو روش تعداد ۷۰٪ نمونه‌ها برای آموزش، ۱۵٪ برای آزمایش و ۱۵٪ برای اعتبارسنجی استفاده شد و مقدار همگرایی و دقت با استفاده از معادله‌های ۱ تا ۷ که معرف مقادیر ضریب تعیین  $(R^2)$ ، خطای جذر میانگین مربع‌ها (RMSE)، میانگین درصد مطلق خطا (MAPE)، خطای مطلق نسبی (RAE) و شاخص عملکرد (PI) محاسبه شده که در هر معادله پارامتر  $n$  تعداد کل داده‌ها و  $A_i$  مقادیر واقعی داده‌ها و  $P_i$  مقادیر پیش‌بینی شده داده‌ها می‌باشند به دست آمد.

$$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum_i (A_i - P_i)^2}{\sum_i (P_i)^2} \right) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - P_i)^2} \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_i \left| \frac{A_i - P_i}{A_i} \right| * 100 \quad (3)$$

$$RAE = \frac{\sum_{i=1}^n |A_i - P_i|}{\sum_{i=1}^n \left| A_i - \left( \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \right) \right|} \quad (4)$$

$$PI = \frac{RRMSE}{R + 1} \quad (5)$$

$$RRMSE = \frac{1}{|A_i|} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - P_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - A'_i)(P_i - P'_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - A'_i)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P'_i)^2}} \quad (7)$$

#### ۴- تحلیل و تفسیر داده‌ها

در این بخش، نخست نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌شوند. در ادامه، به کمک الگوهای عددی ساده و فراتکاملی به پیش‌بینی پاسخ نسبت مقاومت فشاری بتن به ملات در برابر درجه نرمی سیمان پرداخته می‌شود.

#### ۴-۱- داده‌های آزمایشگاهی

شکل ۱ نتیجه‌ی آزمایش‌های فشاری نمونه‌های ملات استاندارد و بتن را نشان می‌دهد. در این شکل مقاومت فشاری ملات سیمان و

چسبیده به دو سطح قابل بارگذاری جدا شدند و آزمون‌ها تحت بارگذاری قرار گرفتند. بارگذاری روی دو سطح که در تماس با بدنه قالب بوده‌اند، اعمال گردید و نرخ بارگذاری تا رسیدن به نیمی از بار نهایی پیش‌بینی شده به صورت دلخواه و برای ادامه تا شکست آزمون به گونه‌ای تنظیم شد که طول کل زمان بارگذاری از ابتدا تا انتها بدون وقفه و بین ۲۰ تا ۸۰ ثانیه باشد (استاندارد ASTM C109) [۱۵].

#### ۲-۲-۴- مقاومت فشاری بتن

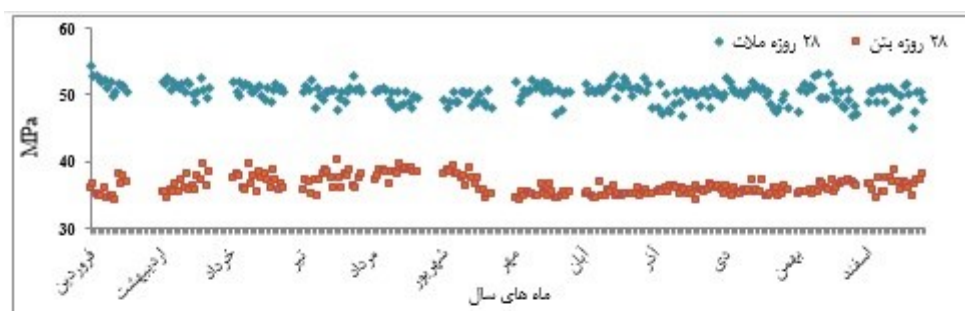
نمونه‌های بتن پس از ۲۸ روز عمل‌آوری استاندارد برای تعیین مقاومت فشاری مورد آزمایش قرار گرفتند. طرح اختلاط تمامی نمونه‌ها یکسان با نسبت آب به سیمان ۰/۴۸۵ و نسبت ریزدانه به درشت‌دانه ۰/۵۵ بود. تنها تفاوت نمونه‌ها استفاده از سیمان تولید شده در روز ساخت آنها است. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های بتنی، پس از بیرون آوردن نمونه‌ها از مخزن آب سطح آنها خشک شده و وجه‌هایی که در تماس با قالب بودند برای بارگذاری زیر جک فشاری با ظرفیت ۲۰۰ تن قرار گرفت. آزمایش فشاری بر اساس استاندارد INSO 1608-3 انجام گرفت [۱۹].

#### ۳- الگوسازی فراتکاملی

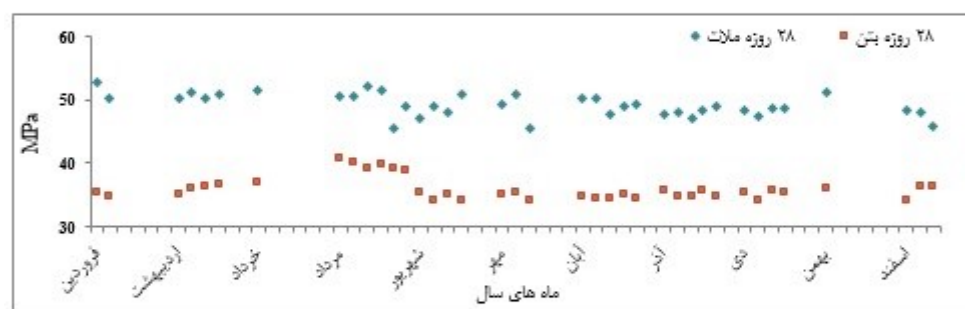
با توجه به آنکه هر کدام از روش‌های هوش مصنوعی قابلیت‌های متفاوتی در ارائه نتایج از قبیل معرفی فرمول و دقت همگرایی را دارند، بنابراین استفاده از چند روش برای ارزیابی بهتر پیش‌بینی حائز اهمیت است. در همین راستا برای اجرای مدل‌سازی از دو روش پیش‌بینی هوش مصنوعی با نام‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ژنتیک بیان مسئله (GEP) استفاده شده است. در هر دو روش یک پارامتر ورودی و یک پارامتر خروجی برای رسیدن به بهترین پاسخ به کار گرفته شده است. ویژگی‌های این دو الگوی فراتکاملی در پیوست یک آمده است. پارامتر نرمی سیمان (بلین) ورودی نرم افزار و نسبت مقاومت ملات به بتن به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه از داده‌های کارخانه‌ی سیمان استفاده شده و مواد ورودی در روزهای مختلف یکسان بوده است، تنها پارامتر متفاوت تأثیرگذار بر روی مقاومت فشاری ملات سیمان و بتن، مقدار نرمی سیمان می‌باشد و با توجه به اینکه هوش مصنوعی پارامترهای ورودی یکسان را وارد معادلات نمی‌کند.

بتن در روزهای یکسان در ۲ سیلو مورد مطالعه و به صورت مجزا و سپس با هم آورده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری نمونه‌های ملات استاندارد سیمان برای سیلوی ۱، سیلوی ۲ و در مجموع به ترتیب در بازه‌های ۴۴/۹-۵۲/۸، ۴۵/۳-۵۴/۵ و ۴۴/۹-۵۴/۵ است. از سوی دیگر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی ساخته شده با سیمان از سیلوی ۱، سیلوی ۲ و در مجموع به ترتیب

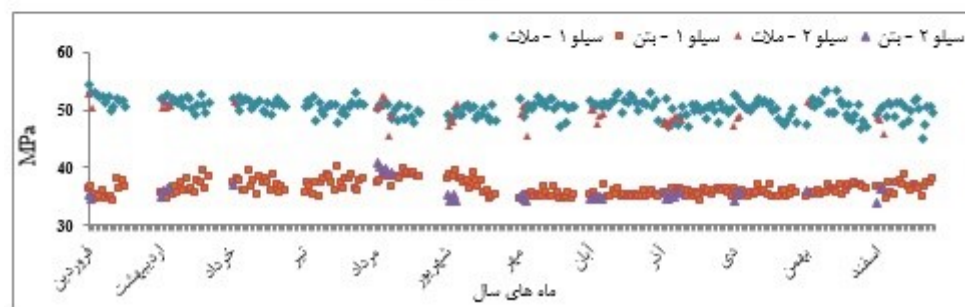
در بازه‌های ۳۴/۱-۴۰/۲، ۳۴/۱-۴۰/۶ و ۳۴/۱-۴۰/۶ است. در مجموع مقادارهای بیشینه، کمینه، میانگین و پراکندگی مقاومت فشاری ملات استاندارد با سیمان‌های تولید شده در طول یک سال ۵۴/۵، ۴۴/۹، ۵۰/۱ و ۰/۳۱ بوده و مقادارهای بیشینه، کمینه، میانگین و پراکندگی مقاومت فشاری بتن ساخته شده با سیمان‌های تولید شده در طول یک سال ۴۰/۶، ۳۴/۱، ۳۶/۳ و ۰/۰۴ می‌باشد.



سیلوی ۱



سیلوی ۲



مجموع سیلوها

شکل ۱- نمودارهای مقاومت فشاری نمونه‌های ملات و بتن

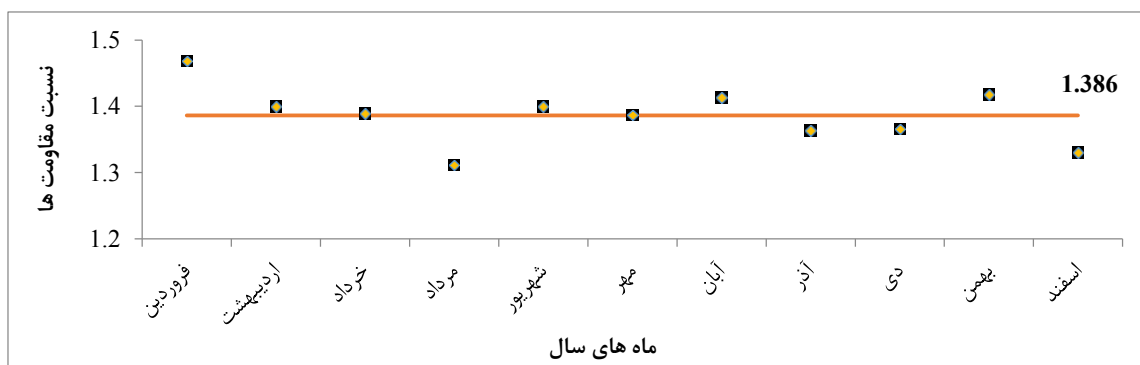
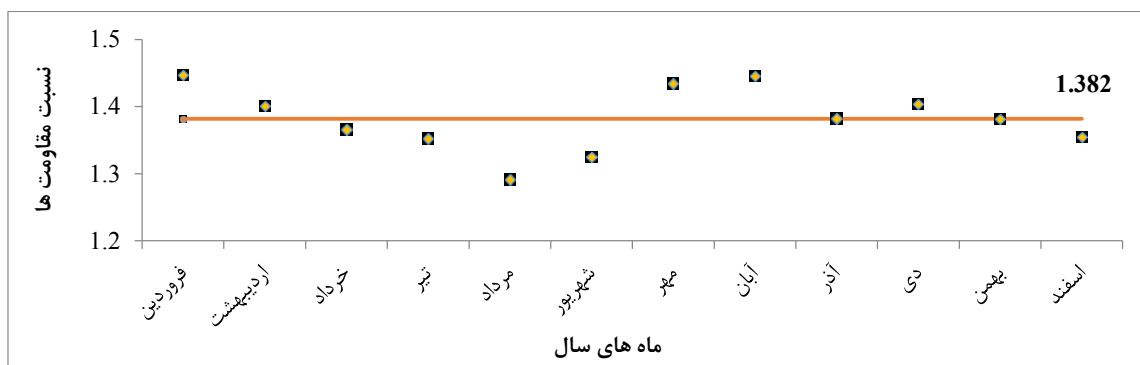
آزمایش‌هایی که هم نیازمند نیروی کار می‌باشد و هم با هزینه روبه‌رو می‌شود نسبت مقاومت فشاری ملات سیمان به مقاومت فشاری بتن در شکل‌های ۲ و ۳ به صورت ماهانه و روزانه به دست آورده و گزارش شده است. این کار باعث می‌شود تا با یک نسبت مشخص و ضریب اطمینان بالا بتوان در نمونه‌های مشابه در پژوهش‌های آینده از انجام آزمایش‌های اضافی جلوگیری کرد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در هر کدام از سیلوها

همانطور که در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده [۲۰] در مقایسه این نمودارها با یکدیگر نمی‌توان از اثر نرمی سیمان چشم‌پوشی کرد. همانطور که در جدول ۳ گزارش شده است در سیلوی ۱ در شهر یور، خرداد و مردادماه که کمترین نرمی‌ها از سیمان تولید شده به دست آمده مقادیر مقاومت فشاری ملات و بتن به یکدیگر نزدیک‌تر شده‌اند و این رابطه در سیلوی ۲ نیز برقرار است.

برای جلوگیری از صرف هزینه‌های زیاد و انجام مکرر

خرداد و تیر یا بهمن و اسفند). با توجه به نسبت های به دست آمده در سیلوهای مختلف با سیمان متفاوت مشاهده می گردد که بیشترین بازه تغییرات نسبت مقاومت فشاری ملات سیمان به مقاومت فشاری بتن حدود ۰/۳ می باشد که این مقدار برای خودداری از انجام آزمایش در پژوهش های مشابه قابل قبول می باشد.

هرچه تعداد نمونه ها برای یک روز کمتر بوده نسبت میانگین مقاومت فشاری ملات به بتن از مقدار بالاتری برخوردار است. به عنوان مثال فروردین ماه در سیلوی یک کمترین تعداد نمونه را به خود اختصاص داده و از نسبت بالاتر و بنابراین خطای بیشتری برخوردار است. هر چه تعداد نمونه های ماهانه به هم نزدیک تر باشد نسبت های به دست آمده نیز به همدیگر نزدیک می باشند (سیلوی ۱)



شکل ۲- نسبت میانگین مقاومت ملات به بتن ماهانه

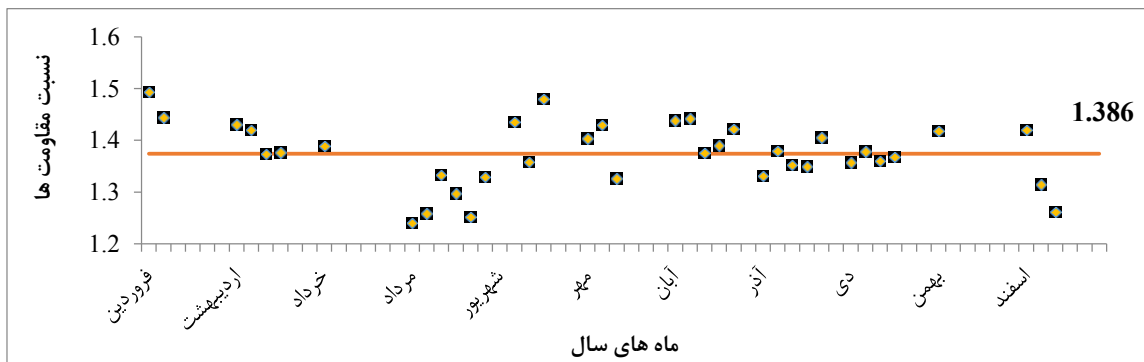
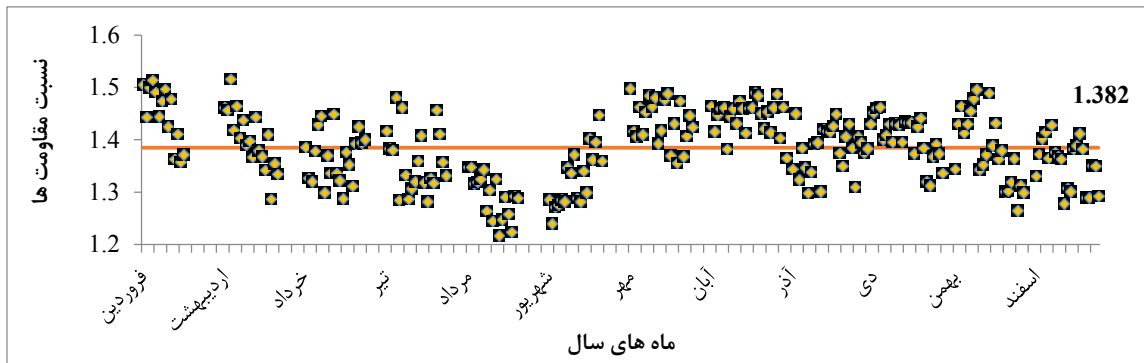
کرد. همانطور که مشاهده می شود، نسبت مقاومت فشاری نمونه های ملات استاندارد سیمان به بتن برای سیلوی ۱، سیلوی ۲ و در مجموع به ترتیب در بازه های ۱/۱۹-۱/۵۲، ۱/۱۵-۱/۴۹ و ۱/۱۵-۱/۵۲ است. در مجموع مقادیر بیشینه، کمینه، میانگین و پراکنندگی نسبت مقاومت فشاری ملات استاندارد با سیمان های تولید شده در طول یک سال به بتن ۱/۵۲، ۱/۱۵، ۱/۳۸ و ۰/۴۸ بود. جدول ۵ بیشترین، کمترین و میانگین مقدار مقاومت فشاری ملات سیمان و بتن مربوط به هر سیلو را نشان داده است.

#### ۴-۲- کاربرد الگوهای عددی

در شکل ۴ الف مربوط به سیلوی شماره ۱ و شکل ۴ ب مربوط به سیلوی شماره ۲، ابتدا مقادیر نسبت مقاومت فشاری ملات به بتن بر حسب مقدار نرمی سیمان (بلین) براساس مقادیر میانگین ماهانه با

شکل ۳ نشان دهنده نسبت مقاومت فشاری ملات سیمان به بتن به صورت روزانه می باشد. همانطور که مشاهده می شود تعداد نمونه ها در ماه های مختلف متفاوت است و به دست آوردن این نسبت باعث می شود اطلاعات جامعی درباره ویژگی های روزانه نمونه ها به دست آورد و چنانچه در سال های آینده سیمانی با مواد اولیه ثابت و مشابه با سیمان های کنونی در دسترس باشد و مقاومت فشاری ملات سیمان و یا بتن آن را داشته باشیم با توجه به این نسبت ها می توانیم با دقتی خوب مقدار مقاومت فشاری بتن یا ملات را به دست آوریم. با توجه به شکل مشاهده می گردد سیلوی ۱ به این خاطر که تعداد آزمون های بیشتری در طی روز و ماه ساخته شده و شرایط آب و هوایی روزانه بیشتری در آن لحاظ شده نسبت مقاومت های فشاری در بازه کمتری قرار دارد و برای این سیلو می توان با اطمینان بیشتری مقدار مقاومت مورد نیاز را پیش بینی

استفاده از رگرسیون غیر خطی درجه ۳ ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می شود، رگرسیون انجام شده از دقت خوبی برخوردار است و داده های میانگین هر ماه نماینده خوبی برای استفاده در سال های آینده می باشند.

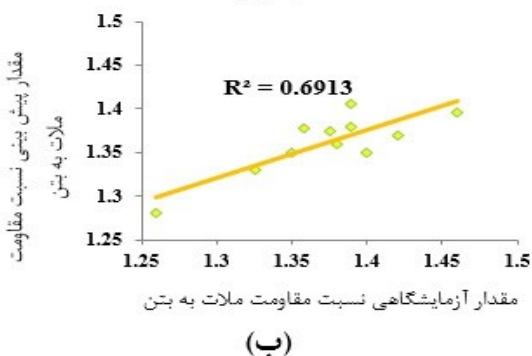
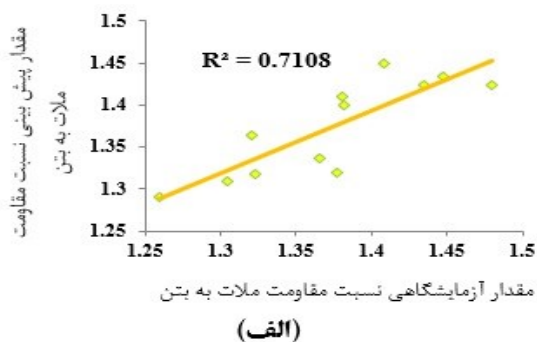


شکل ۳- نسبت میانگین مقاومت ملات به بتن روزانه

سال های آینده می باشند.

جدول ۵- بازه کمینه و بیشینه مقاومت فشاری

مقاومت فشاری (MPa)				پارامترها
بتن		ملات		
سیلوی ۱	سیلوی ۲	سیلوی ۱	سیلوی ۲	
۳۴/۱	۳۴/۱	۴۴/۹	۴۵/۳	کمترین مقدار
۴۰/۶	۴۰/۲	۵۲/۸	۵۴/۵	بیشترین مقدار
۳۶/۰	۳۶/۴	۴۹/۱	۵۰/۳	میانگین



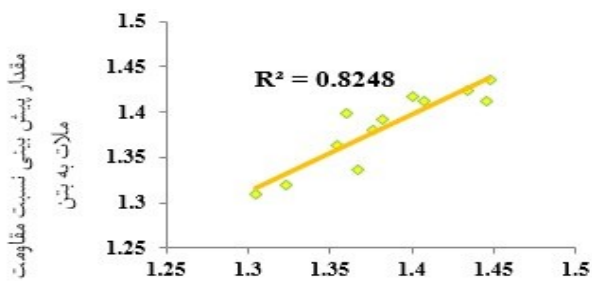
شکل ۴- رگرسیون غیر خطی، الف: سیلوی شماره ۱ ب: سیلوی شماره ۲

### ۳-۴- کاربرد الگوهای عددی

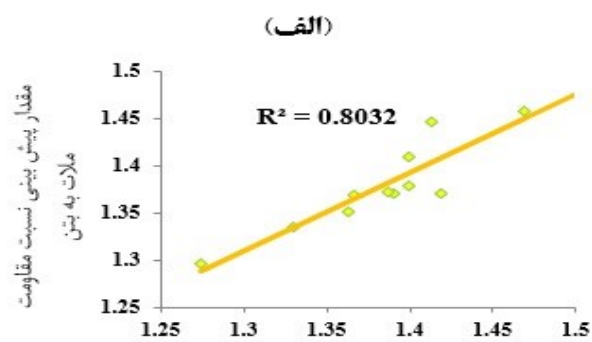
در شکل ۴ الف مربوط به سیلوی شماره ۱ و شکل ۴ ب مربوط به سیلوی شماره ۲، ابتدا مقادیر نسبت مقاومت فشاری ملات به بتن بر حسب مقدار نرمی سیمان (بلین) براساس مقادیر میانگین ماهانه با استفاده از رگرسیون غیر خطی درجه ۳ ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می شود، رگرسیون انجام شده از دقت خوبی برخوردار است و داده های میانگین هر ماه نماینده خوبی برای استفاده در



با توجه به پژوهش‌های گذشته روش ژنتیک بیان مسئله نسبت به سایر روش‌های هوش مصنوعی و رگرسیون‌های غیرخطی ابزار قوی‌تری برای انجام پیش‌بینی می‌باشد [۲۱] که این تفاوت در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نیز مشهود است. برای نشان دادن تفاوت روش‌ها و دقت هر روش مقادیر آماری آن‌ها در جدول ۶ گزارش شده و با توجه به اینکه روش رگرسیون غیرخطی و روش ژنتیک بیان مسئله معادله‌هایی را ارائه می‌کنند که در پژوهش‌های آینده مورد استفاده قرار می‌گیرد، در معادله‌های ۸ تا ۱۱ فرمول مربوط به هر سیلوی گزارش شده است. در معادله‌های ارائه شده پارامتر  $d_0$  نشان دهنده مقدار نرمی سیمان است که به‌عنوان پارامتر ورودی در پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفته و همانطور که مشاهده می‌شود معادله ۸ و ۱۰ مربوط به سیلوی ۱ و معادله ۹ و ۱۱ مربوط به سیلوی ۲ می‌باشد.



مقدار آزمایشگاهی نسبت مقاومت ملات به بتن



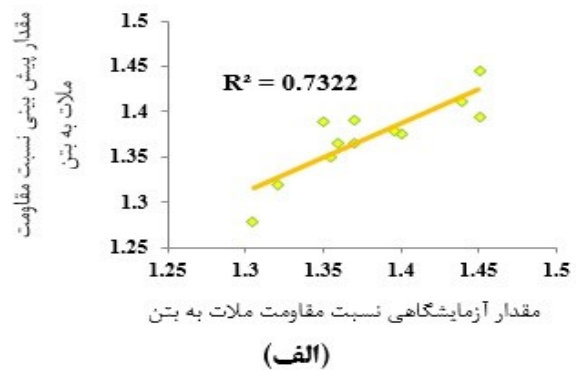
مقدار آزمایشگاهی نسبت مقاومت ملات به بتن

(ب)

شکل ۶- ژنتیک بیان مسئله، الف: سیلوی شماره ۱ ب: سیلوی شماره ۲

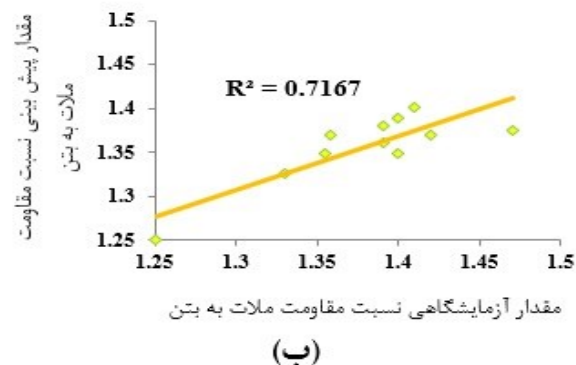
شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب هیستوگرام مربوط به متغیرهای سیلوی ۱ و سیلوی ۲ را نشان می‌دهد. بخش الف هر دو شکل مربوط به حساسیت پارامتر تأثیرگذار نرمی سیمان می‌باشد، همانطور که نشان داده شده بیشترین مقدار در این پارامتر تکرار شده و در بخش‌های ب و ج که مربوط به مقاومت فشاری ملات سیمان و مقاومت

در شکل ۵ پیش‌بینی به روش شبکه عصبی مصنوعی انجام شده و بخش الف و ب به ترتیب نماینده سیلوی شماره ۱ و سیلوی شماره ۲ می‌باشد. در پیش‌بینی انجام شده که بر مبنای پارامتر ورودی نرمی سیمان بوده مقادیر پیش‌بینی و آزمایشگاهی نسبت مقاومت فشاری ملات به بتن به صورت میانگین ماهانه نمایش داده شده‌اند. مقدار  $R^2$  به دست آمده از دقت بالایی برخوردار است که معیار خوبی برای استفاده از آن در پژوهش‌های آینده می‌باشد. شکل ۶ الف و ب به ترتیب مربوط به مقادیر سیلوی شماره ۱ و سیلوی شماره ۲ می‌باشد که اطلاعات مربوط به نسبت مقاومت فشاری ملات به بتن بر حسب ماه‌های سال بر اساس پارامتر تأثیرگذار نرمی سیمان با استفاده از روش هوش مصنوعی ژنتیک بیان مسئله پیش‌بینی شده است. در هر دو نمودار مشاهده می‌شود که  $R^2$  از مقدار بالایی برخوردار است و از آنجایی که تعداد بالاتر پارامترهای ورودی و خروجی در روش‌های هوش مصنوعی و رگرسیون‌های غیرخطی تاثیر مستقیم بر نتایج دارد، مشاهده می‌شود در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ سیلوی ۲ که از تعداد کمتری داده ماهانه برخوردار است و مشخصات مقاومت فشاری ملات و بتن آن در تیرماه ثبت نشده از دقت پایین‌تری برخوردار است.



مقدار آزمایشگاهی نسبت مقاومت ملات به بتن

(الف)



مقدار آزمایشگاهی نسبت مقاومت ملات به بتن

(ب)

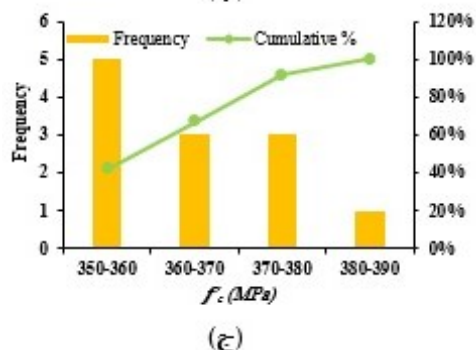
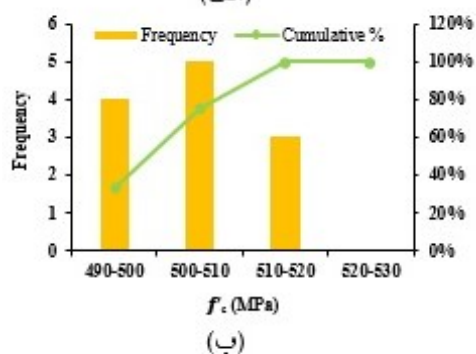
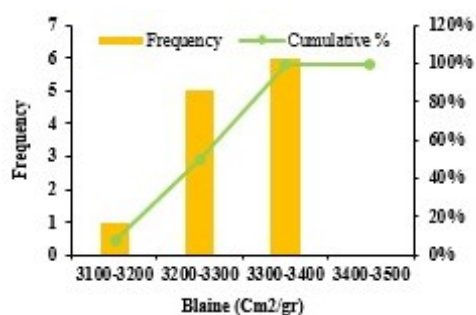
شکل ۵- پیش‌بینی شبکه عصبی مصنوعی، الف: سیلوی شماره ۱ ب: سیلوی شماره ۲

فشاری بتن می‌باشد، مشاهده می‌گردد که داده‌ها از پراکندگی بیشتری برخوردار هستند.

جدول ۶- محاسبه مقادیر ضریب تعیین، خطای جذر میانگین مربع‌ها، میانگین درصد مطلق خطا، خطای مطلق نسبی و شاخص عملکرد

		$R^2$	RMSE	MAPE	RAE	PI
ANN	سیلوی ۱	۰/۷۳	۲/۵	٪ ۱/۴	۰/۵۰۲	۰/۰۱۴
	سیلوی ۲	۰/۷۲	۳/۷	٪ ۱/۷۷	۰/۶۱۷	۰/۰۱۴
GEP	سیلوی ۱	۰/۸۲	۱/۸	٪ ۱/۰۴	۰/۳۱۸	۰/۰۱۰
	سیلوی ۲	۰/۸۰	۲/۲	٪ ۱/۲۸	۰/۴۰۶	۰/۰۱۳
NL	سیلوی ۱	۰/۷۱	۳/۵	٪ ۱/۸۲	۰/۶۳۱	۰/۰۱۴
	سیلوی ۲	۰/۶۹	۳/۲	٪ ۱/۸۷	۰/۶۴۰	۰/۰۱۵

شده است. نتیجه گیری‌های زیر را می‌توان دست‌آوردهای مهم این پژوهش دانست:



شکل ۷- هیستوگرام متغیرهای سیلوی ۱، الف: نرمی سیمان ب: مقاومت فشاری ملات سیمان ج: مقاومت فشاری بتن

$$GEPsilo1 = [((\sin(976.2 \times \sin(\cos(-9.92d_0)))) + (d_0 + ((\sqrt[3]{2d_0} - 3.15) + (18.88 - \ln d_0))))^{0.5} + [-0.92(\frac{d_0^2}{95} + \ln 2d_0)^2 + d_0] \quad (8)$$

$$GEPsilo2 = \left[ (d_0^2 - (d_0^3 \times (e^{d_0})^3)^2) \times (\sin(-0.174d_0 + (-9.87d_0)^3))^3 \right] + [e^{d_0}] \quad (9)$$

$$NLsilo1 = -2E - 07d_0^3 + 0.002d_0^2 - 6.6103d_0 + 7218.5 \quad (10)$$

$$NLsilo2 = -0.0004d_0^3 + 0.00005d_0^2 - 0.1742d_0 + 219.67 \quad (11)$$

باید افزود، به منظور مقایسه مقادیر پیش بینی و آزمایشگاهی به تفکیک سیلوی ۱ و سیلوی ۲، جدول آن در پیوست دو ارائه شده است.

### ۵- نتیجه گیری

هدف از این مطالعه بررسی نسبت مقاومت فشاری ملات سیمان و بتن در سن ۲۸ روز می‌باشد. برای این هدف اطلاعات مقاومت فشاری ۸۵۸ آزمونه از مجموع ۲۸۶ طرح اختلاط (از هر نمونه ۳ عدد) با نسبت‌های آب به سیمان و ماسه به سیمان ثابت و سیمان‌های متفاوت در طول یک سال فعالیت کارخانه از ۲ سیلوی مختلف با درصد‌های یکسان مواد خام ورودی به کوره پخت سیمان شامل  $K_2O$ ،  $SO_3$ ،  $MgO$ ،  $CaO$ ،  $Fe_2O_3$ ،  $Al_2O_3$ ،  $SiO_2$  و  $Na_2O$  مورد استفاده قرار گرفته و با روش‌های رگرسیون غیرخطی، شبکه عصبی مصنوعی و ژنتیک بیان مسئله مدل‌سازی

فروردین ماه دو نمونه ملات و بتنی گزارش شده که مقاومت ملات به صورت نزولی دیده می شود که عینا این روند در مقاومت بتن نیز وجود دارد.

- تعداد بیشتر نمونه ها در هر ماه برای هر سیلوی مجزا باعث می شود بازه نسبت ها بسته تر باشد و خطای کمتری در تبدیل نسبت مقاومت فشاری ملات سیمان به بتن و یا بالعکس ایجاد شود.

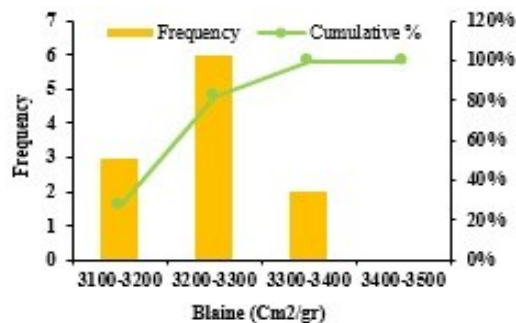
- روش هوش مصنوعی ژنتیک بیان مسئله قدرت بالاتری به نسبت روش های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون غیرخطی در پیش بینی نسبت مقاومت فشاری ملات به بتن را دارد.

## ۶- سپاسگزاری

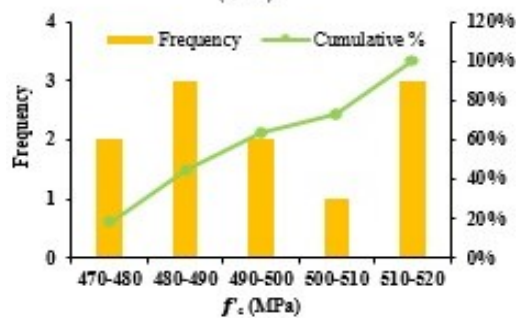
آزمایش ها و نمونه برداری ها در آزمایشگاه شیمی-فیزیک کارخانه سیمان زاوه تربت انجام شده است و بی شک بدون همکاری مدیران و کارکنان این مجموعه انجام این پژوهش مقدور نبود. به این وسیله نویسندگان از حمایت های ارزنده شرکت سیمان زاوه تربت و معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد برای فراهم کردن انجام این پژوهش قدردانی می کنند.

## ۷- مراجع

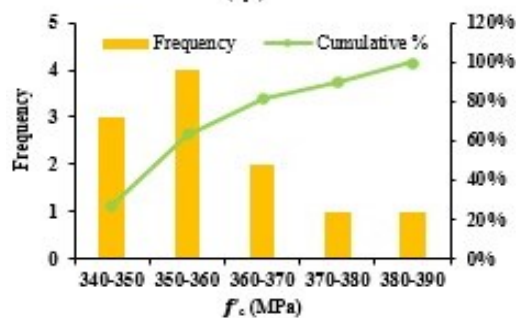
- [1] Yazdani A., Nicknam A., Dadras E. Y., Eftekhari S.N., Entropy-based sensitivity analysis of global seismic demand of concrete structures, *Engineering Structures* 146 (2017) 118-126.
- [2] Wang G., Wang Y., Lu W., Yu M., Wang C., Deterministic 3D seismic damage analysis of Guandi concrete gravity dam: A case study, *Engineering Structures* 148 (2017) 263-276.
- [3] Cassese P., Ricci P., Verderame G.M., Experimental study on the seismic performance of existing reinforced concrete bridge piers with hollow rectangular section, *Engineering Structures* 144 (2017) 88-106.
- [4] Kim B.-J., Yi C., Experimental study on the shrinkage properties and cracking potential of high strength concrete containing industrial by-products for nuclear power plant concrete, *Nuclear Engineering and Technology* 49(1) (2017) 224-233.
- [5] Mahdinia S., Eskandari-Naddaf H., Shadnia R., Effect of cement strength class on the prediction of compressive strength of cement mortar using GEP method, *Construction and Building Materials* 198 (2019) 27-41.
- [6] Akalin O., Akay K.U., Sennaroglu B., Tez M., Optimization of chemical admixture for concrete on



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸- هیستوگرام متغیرهای سیلوی ۲، الف: نرمی سیمان ب: مقاومت فشاری ملات سیمان ج: مقاومت فشاری بتن

- بازه تغییرات نسبت مقاومت فشاری ملات سیمان به مقاومت فشاری بتن در محدوده ۱/۲ تا ۱/۵ قرار می گیرد که بیشترین بازه تغییرات کمتر از ۰/۳ می باشد که این مقدار برای جلوگیری از انجام آزمایش های تکراری قابل قبول می باشد.

- در ماه های سرد سال به دلیل شرایط آب و هوایی و امکان خطای بیشتر در انجام آزمایش ها نسبت مقاومت فشاری ملات سیمان به بتن از مقدار بالاتری برخوردار است و خطای تبدیل این دو پارامتر به یکدیگر را افزایش می دهد.

- در هر دو سیلو در ماه های ابتدایی سال روند افزایش یا کاهش مقاومت فشاری ملات سیمان و بتن با نظم بهتری به نسبت سایر ماه ها دیده می شود بنابراین ضریب تبدیل مقاومت فشاری ملات سیمان به بتن منطقی تر است. به عنوان مثال در سیلو دوم در

- [20] Mahdinia S., Tavakkolizadeh M., Ahmadi Jalayer M., Prediction of Standard Sand cement Mortar Compressive Strength Using Artificial Neural Network and Considering the Effect of Cement Fineness, *Journal of Concrete Structures and Materials* 7(2) (2022) 111-127.
- [21] Azimi-Pour M., Eskandari-Naddaf H., 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.
- mortar performance tests using mixture experiments, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 104(2) (2010) 233-242.
- [7] Sikora P., El-Khayatt A.M., Saudi H., Liard M., Lootens D., Chung S.-Y., Woliński P., Abd Elrahman M., Rheological, Mechanical, Microstructural and Radiation Shielding Properties of Cement Pastes Containing Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) Nanoparticles, *International Journal of Concrete Structures and Materials* 17(1) (2023) 7.
- [8] Liao L., Wu S., Hao R., Zhou Y., Xie P., The compressive strength and damage mechanisms of pervious concrete based on 2D mesoscale pore characteristics, *Construction and Building Materials* 386 (2023) 131561.
- [9] Leemann A., Winnefeld F., The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete, *Cement and Concrete Composites* 29(5) (2007) 341-349.
- [10] Paiva H., Velosa A., Cachim P., Ferreira V., Correlation between mortar and concrete behavior using rheological analysis, *Journal of Building Engineering* 4 (2015) 177-188.
- [11] Gong F., Zhang D., Sicat E., Ueda T., Empirical estimation of pore size distribution in cement, mortar, and concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering* 26(7) (2014) 04014023.
- [12] Leemann A., Nygaard P., Kaufmann J., Loser R., Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete, *Cement and Concrete Composites* 62 (2015) 33-43.
- [13] Saikia N., De Brito J., Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review, *Construction and Building Materials* 34 (2012) 385-401.
- [14] ASTM C., 33, Method for Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International (2001).
- [15] ASTM C., 109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, Annual book of ASTM standards 4 (2008).
- [16] INSO, 581-2, Preparing and processing concrete samples in the laboratory, Iranian National Standardization Organization (1393).
- [17] ASTM C., 204-07, Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus, Annual book of ASTM standards 7 (2007).
- [18] ASTM C., 349-02. Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure), Annual book of ASTM 4 (2002).
- [19] INSO, 1608-3, Hardened Concrete Part 3: Compressive Strength of Test Specimens, Iranian National Standardization Organization (1393).

### پیوست یک

ویژگی های دو الگوی فرانتکاملی به کار رفته در این پژوهش به قرار زیر می باشد:

	تعداد پارامتر ورودی	۱	تعداد پارامتر خروجی	۱	تعداد پارامتر ورودی	۸
		۴	تعداد ژن	۲	تابع اتصال	جمع
۱۲	تعداد پارامتر ورودی	۱	تعداد پارامتر خروجی	۱	تعداد لایه های پنهان	تعداد نورون اولین لایه پنهان
	تعداد نورون دومین لایه پنهان	۶	تابع آموزش	تابع انتقال	سیگموئید	

### پیوست دو

جدول زیر به مقایسه مقادیر پیش بینی و آزمایشگاهی به تفکیک در سیلوی ۱ و سیلوی ۲ می پردازد:

ژنتیک بیان مسئله		شبکه عصبی مصنوعی		غیر خطی		
پیش بینی	آزمایشگاهی	پیش بینی	آزمایشگاهی	پیش بینی	آزمایشگاهی	
۱/۴۴	۱/۴۵	۱/۲۸	۱/۳۱	۱/۴۴	۱/۴۵	سیلوی ۱
۱/۴۲	۱/۴۰	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۳۸	
۱/۳۴	۱/۳۷	۱/۳۸	۱/۴۰	۱/۳۴	۱/۳۷	
۱/۴۰	۱/۳۶	۱/۳۸	۱/۴۰	۱/۲۹	۱/۲۶	
۱/۳۱	۱/۳۰	۱/۳۷	۱/۳۷	۱/۳۱	۱/۳۰	
۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۷	۱/۳۶	۱/۳۲	۱/۳۲	
۱/۴۲	۱/۴۳	۱/۳۵	۱/۳۶	۱/۴۱	۱/۴۳	
۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۳۹	۱/۳۷	۱/۴۳	۱/۴۸	
۱/۳۹	۱/۳۸	۱/۳۹	۱/۳۵	۱/۴۰	۱/۳۸	
۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۴	۱/۴۵	۱/۴۱	
۱/۳۸	۱/۳۸	۱/۴۰	۱/۴۵	۱/۳۲	۱/۳۸	
۱/۳۶	۱/۳۵	۱/۴۵	۱/۴۵	۱/۳۶	۱/۳۲	
۱/۴۶	۱/۴۷	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۸	۱/۲۶	سیلوی ۲
۱/۴۱	۱/۴۰	۱/۳۸	۱/۴۷	۱/۳۸	۱/۳۸	
۱/۳۷	۱/۳۹	۱/۳۳	۱/۳۳	۱/۳۳	۱/۳۳	
۱/۳۰	۱/۲۷	۱/۳۵	۱/۳۶	۱/۳۵	۱/۳۵	
۱/۳۸	۱/۴۰	۱/۳۷	۱/۳۶	۱/۳۸	۱/۳۶	
۱/۳۷	۱/۳۹	۱/۳۶	۱/۳۹	۱/۳۶	۱/۳۸	
۱/۴۵	۱/۴۱	۱/۳۸	۱/۳۹	۱/۴۰	۱/۴۶	
۱/۳۵	۱/۳۶	۱/۳۵	۱/۴۰	۱/۳۵	۱/۴۰	
۱/۳۷	۱/۳۷	۱/۳۹	۱/۴۰	۱/۳۸	۱/۳۹	
۱/۳۷	۱/۴۲	۱/۴۰	۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۳۹	
۱/۳۳	۱/۳۳	۱/۳۷	۱/۴۲	۱/۳۷	۱/۴۲	

## Numerical and Experimental Investigation of the Influence of Cement Compressive Strength on the Mechanical Properties of Concrete Using Artificial Intelligence-Based Models

Sahar Mahdinia

PhD Student, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.  
Mohammadreza Tavakkolizadeh

Assistant Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

Amirreza Masoodi \*

Assistant Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

Roshan Montazerian

Quality control manager, Zaveh Torbat Cement Factory, Zaveh, Iran.

### Abstract

The role of compressive strength of standard sand-cement mortar in the undeniable strength of concrete is crucial. Additionally, the Blaine of cement is one of the key factors in the compressive strength of cement mortar and concrete. In this research, the Artificial Neural Network (ANN) and Gene Expression Programming (GEP) methods are employed as comprehensive processes to predict the compressive strength of concrete based on the compressive strength of corresponding cement mortar. To achieve this goal, 286 mixed designs of sand-cement mortar with consistent ratios of raw materials were introduced into the cement kiln, focusing on Type 2 cement (32.5 MPa strength). The results of compressive strength tests on standard sand-cement mortar samples (3 specimens) and concrete produced with consistent mix designs (3 specimens) at the age of 28 days were obtained. Based on these results, the developed model can accurately and effectively predict the compressive strength of concrete based on the compressive strength of corresponding mortar, emphasizing the role of cement Blaine.

**Keywords:** Standard sand-cement mortar; concrete compressive strength; cement Blaine; Artificial Neural Network (ANN); Genetic Expression Programming (GEP).

---

\* Corresponding Author: ar.masoodi@um.ac.ir