

بررسی آزمایشگاهی و تحلیل عددی تأثیر نانوذرات اکسید روی بر نفوذپذیری بتن در کانال‌های هیدرولیکی

کامران رحمتی شادباد*، علی فروغی اصل

دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

بتن به عنوان یکی از مواد ساختمانی پر کاربرد در صنعت ساخت و ساز، در تأمین امنیت سازه‌ها به خصوص کانال‌های هیدرولیکی از نظر مقاومت در برابر نفوذ آب و مواد شیمیایی بسیار حائز اهمیت است. بر این اساس، در تحقیق حاضر برای اولین تأثیر نانوذرات اکسید روی بر روی نفوذپذیری بتن و همچنین مشخصه‌های مکانیکی آن به صورت تجربی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. با انجام تست‌های فشاری تک‌جهته و آزمایش دو نیم شدن استوانه، مقاومت فشاری و کششی بتن حاوی مقادیر 0.1%، 0.5%، 1.0% و 1.5% در سنین ۷ و ۲۸ روزه تعیین شده است. همچنین، نفوذپذیری و میزان جذب آب این نمونه‌ها نیز بررسی شده است. با توجه به نتایج تست‌های تجربی، مقاومت‌های مکانیکی بتن با افزایش نانوذرات تا 1.0% افزایش و به ازای مقادیر بیشتر کاهش می‌یابد. همچنین، در بهترین حالت به ازای 0.1 درصد میزان نانوذرات اکسید روی، نفوذپذیری نسبت به نمونه شاهد ۹۷ درصد کاهش یافته است. علت این امر آن است که نانومواد با ایجاد ساختاری متراکم‌تر و کم تخلخل در مخلوط ملات و بتن باعث بهبود مقاومت‌های مکانیکی می‌شود. در نهایت، مدل‌های رفتاری با استفاده از برنامه‌نویسی الگوریتم ژنتیک برای توصیف ویژگی‌های رفتاری وابسته به زمان نمونه‌های بتن مخلوط شده با نانوذرات در حالت‌های مختلف فشاری و کششی در سنین مختلف توسعه یافت. لذا در این تحقیق سعی شده است با استفاده از شبکه‌های عصبی همراه با روش الگوریتم ژنتیک به پیش‌بینی طرح اختلاط بتن حاوی نانو ذرات پرداخته شود. هدف از این مدل‌سازی ضمن نشان دادن دقت شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی مقاومت فشاری، کششی و نفوذپذیری بتن با درصدهای مختلف نانوذرات اکسید روی است.

کلمات کلیدی

نانوذرات اکسید روی، نفوذپذیری بتن، الگوریتم ژنتیک، مقاومت فشاری، شبکه عصبی.

۱- مقدمه

کاهش نفوذپذیری، کنترل دوام و عمر بتن، از مهمترین مسائل در تهیه بتن محسوب می‌شود. بتن با نفوذپذیری حداقل، در برابر حملات شیمیایی سولفات‌ها، کربنات‌ها و کلر مقاومت خوبی را از خود نشان داده و مانع تخریب بتن و خوردگی فولاد می‌شود. در سازه‌های هیدرولیکی، نظیر سدها، کانال‌ها، زهکش‌ها، بندها، مخازن آب و غیره، نفوذپذیری بتن مهمترین فاکتور در طراحی سازه‌های بتنی می‌باشد. نفوذپذیری بتن در مقابل مواد یا گازهای دیگر در سازه‌هایی همچون مخازن فاضلاب و تصفیه کننده‌های گاز و در مخازن تحت فشار در راکتورهای اتمی و همچنین کانال‌های هیدرولیکی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. از طرف دیگر، با توسعه نانو تکنولوژی، مهندسان و محققان در تلاش هستند تا روش‌های بهینه‌تری برای استفاده از نانومواد در بتن را توسعه دهند و از طریق افزایش کارایی و مقاومت بتن در برابر نفوذ، پایداری و طول عمر سازه‌ها را ارتقاء بخشند [۱-۵].

در سال‌های اخیر استفاده از نانوذرات در زمینه‌های مختلف علوم مهندسی توسعه زیادی پیدا کرده است [۶-۸]. یکی از کاربردهای نانوذرات در تقویت بتن می‌باشد که به علت ویژگی‌های فوق‌العاده مطلوب باعث تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار مکانیکی بتن می‌شوند [۹-۱۱]. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات مختلف مانند TiO_2 ، Fe_3O_4 و Al_2O_3 به طور قابل توجهی خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود می‌بخشد [۱۲]. نشان داده شده است که ذرات نانو سیلیس با پر کردن منافذ خمیر سیمان و تحریک واکنش‌های پوزولانی، خواص مکانیکی را افزایش داده و نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهند [۱۳]. به طور مشابه، استفاده از ذرات نانو SiO_2 برای افزایش

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Rahmati.shadbad@gmail.com

مقاومت فشاری و مقاومت در برابر نفوذ آب بتن و کاهش بیشتر نفوذپذیری آن یافت شده است [۱۴]. ترکیب نانوذرات، همراه با الیاف پلی پروپیلن، همچنین مقاومت در برابر سرما و مقاومت فشاری روسازی بتنی را افزایش می‌دهد و نفوذپذیری و تخلخل آن را کاهش می‌دهد [۱۵]. لی و همکاران [۱۶] به بررسی آماده‌سازی و مشخصات مکانیکی کامپوزیت‌های نانوالومینا پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که استفاده از نانومواد در بتن موجب تغییر و بهبود مقاومت فشاری و کششی می‌گردد و میزان کسب مقاومت بتن را به ازای تغییرات زمان دچار تحول کرده و سرعت کسب مقاومت را تسریع می‌بخشد. بنابراین با افزودن مقادیر اندکی از این ماده تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت کششی و فشاری بتن سبک مشاهده می‌شود. خوش اخلاق و همکاران طی تحقیقاتی تأثیرات نانو ذرات Fe_2O_3 بر نفوذپذیری و ارزیابی مقاومت بتن خود متراکم با مقاومت بالا مورد آزمایش قرار دادند. نادری و همکاران [۱۷] با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای به مطالعه تأثیر سیکل‌های مختلف دمایی بر نفوذپذیری و مقاومت سطحی بتن‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ با نام‌های تجاری سوپرزل و مزوکریت پرداختند. در ادامه نیز با استفاده از نرم‌افزار متلب در فضای سه‌بعدی مشخص گردید که ارتباط نفوذپذیری با مقاومت بتن به یکدیگر نزدیک بوده و از نظر فرمول‌بندی با معادله صفحه درجه یک با ضریب همبستگی حدود ۹۱ درصد برقرار است. استفاده بهینه میکروسیلیس در کاهش خوردگی آرماتور در سازه‌های بتنی دریایی را بر روی خواص بتن سخت شده در ۱۸ ماه و طی زمان‌های مختلف توسط تکایی و همکاران [۱۸] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله مبین آن است که، اثر مخلوط بتن حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس با نسبت آب به سیمان ۳۴٪ دوام آرماتور در برابر خوردگی و عمر مفید سازه‌های دریایی را افزایش می‌دهد.

پیش‌بینی خواص بتن به عنوان یک پارامتر کلیدی و تأثیرگذار در عمق مفید یک سازه بتنی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد [۱۹، ۲۰]. روش‌های تجربی در این زمینه دارای معایبی همچون زمان‌بری بالا، هزینه زیاد، کمیاب بودن ادوات آزمایشگاهی، وجود یون‌های مزاحم در حین آزمایش و ایجاد خطاهای ناخواسته و دور شدن از مدل صحیح می‌باشند. با رشد و توسعه در علم بتن، دستیابی به یک مدل جهت پیش‌بینی و تخمین اثرات این تغییرات جهت صرفه‌جویی در انرژی و زمان می‌تواند اثر بخش باشد. در همین راستا می‌توان شبکه‌های عصبی مصنوعی را به عنوان یک کلید سودمند در زمینه‌های مختلف مهندسی عمران بکار گرفت [۲۱-۲۳]. مطالعات اخیر اثربخشی مدل‌های شبکه عصبی را در پیش‌بینی خواص مختلف بتن نشان داده است. آدامو و همکاران [۲۴] با موفقیت از یک شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی بتن، از جمله مقاومت کششی، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی استفاده کرد. به طور مشابه، گارسیا و همکاران [۲۵] مدل‌های شبکه عصبی را برای پیش‌بینی مقاومت فشاری و جریان اسلامپ بتن فوق‌العاده با کارایی بالا، با ترکیب مواد مختلف مانند پودر شیشه بازیافت شده، بقایای ترک‌خوردگی کاتالیزوری سیال و پودر سنگ آهک توسعه دادند. ژانگ و همکاران [۲۶] یک شبکه عصبی ترکیبی را برای پیش‌بینی فشار منفذی و دمای بتن آتش‌سوزی پیشنهاد کرد که برای جلوگیری از پوسته شدن مواد منفجره بسیار مهم است. در نهایت، بسکوپلنی و همکاران [۲۷] عملکرد سه الگوریتم یادگیری ماشین، از جمله CatBoost، k-نزدیکترین همسایه و رگرسیون بردار پشتیبان را در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن مقایسه کردند. میری و همکاران [۲۸] تأثیر ذرات نانو و لاستونیت را بر روی خواص مکانیکی و اثر آن بر دوام و مقاومت در برابر نفوذ آب در سنین مختلف را با ساخت نمونه‌های بتنی بررسی کردند. نتیجه حاکی از افزایش مقاومت خمشی به میزان ۶۳٪، مقاومت فشاری ۹٪ و مقاومت در برابر نفوذ آب حدود ۵۰٪ با جایگزینی ۱۰٪ نانو و لاستونیت به جای سیمان است. در بخش نهایی مقاله از شبکه‌های عصبی تعمیم یافته نوع-GS GMDH برای مدل‌سازی خصوصیات بتن استفاده شده است. اوکرانچی و همکاران [۲۹] در تحقیقات خود مقاومت فشاری، مقاومت کششی، نفوذپذیری یون کلرید مورد بررسی قرار گرفتند. شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری، مقاومت کششی، نفوذپذیری گاز و یون کلرید نفوذ بکار گرفته شده است. در این تحقیق ساختار شبکه عصبی چند لایه از یک لایه ورودی، دو لایه پنهان و یک لایه خروجی که در هر لایه گره‌ها باهم در ارتباط هستند، تشکیل شده است. داده‌های ورودی در لایه ورودی تعریف می‌شوند و مستقیماً به لایه‌های پنهان انتقال می‌یابند و لایه خروجی داده‌ها را بعد از محاسبه به عنوان خروجی نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که می‌توان برای پیش‌بینی قدرت و نفوذپذیری با کارایی بالا بتن با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی رابطه‌ای پیدا کرد. رشنو و همکاران [۳۰] به بررسی خواص مهندسی بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی و پیش‌بینی خواص رئولوژی آن با شبکه عصبی هیبریدی و RBF پرداختند. تخمین و پیش‌بینی دو شبکه عصبی مورد بررسی از خواص رئولوژی این نوع بتن، نشان‌دهنده دقت قابل قبول پیش‌بینی هر دو شبکه عصبی دارد. در میان این دو شبکه عصبی مصنوعی، دقت پیش‌بینی ANN-GA بیشتر است. این مطالعات در مجموع پتانسیل مدل‌های شبکه عصبی را در پیش‌بینی دقیق طیف وسیعی از خواص بتن برجسته می‌کنند.

بررسی مطالعات نشان می‌دهد که هر چند تأثیر انواع مختلف نانوذرات بر مشخصه‌های مکانیکی بتن و نفوذپذیری آن بررسی شده است، اما اثر نانوذرات اکسید روی مورد توجه قرار نگرفته است. در این پژوهش نانوذرات اکسید روی در طرح اختلاط‌های بتن به جای سیمان جایگزین شده است. سپس تأثیر افزودن این نانوذرات با استفاده از آزمایش‌های تعیین مقاومت‌های مکانیکی در سنین مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای نشان دادن چگونگی عملکرد نانوذرات و نحوه قرارگیری و آرایش آن‌ها در بتن از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. جنبه نوآوری بودن این پژوهش، مطالعه تأثیر نانوذرات اکسید روی بر نفوذپذیری سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد. به منظور بررسی تأثیر درصد افزایش نانوذرات مدنظر بر روی خواص مکانیکی بتن و یافتن درصد افزایش بهینه، از نسبت‌های مختلف آب به سیمان استفاده می‌شود. همچنین به دلیل پیچیدگی رفتار بتن و تغییر در مشخصات آن که ناشی از تغییر در کیفیت و کمیت مصالح و شرایط حاکم بر مسئله می‌باشد، ارائه طرح اختلاط مناسب با توجه به شرایط اجرا و نیازهای طرح بسیار پیچیده است. این پیچیدگی همزمان با افزایش تعداد پارامترهای مؤثر بر مسئله در حالتی مانند بتن حجیم، نمود بیشتری می‌یابد. با پیشرفت علم، از شبکه‌های عصبی به منظور مدل نمودن معادلات چند مجهولی غیرخطی در زمینه‌های مختلف علوم مهندسی استفاده شده است که بحث طرح اختلاط بتن حجیم نیز مطمئناً از این قاعده مستثنا نیست. با توجه به کارایی این روش در مورد طرح اختلاط بتن‌ها که قبلاً توسط دیگر محققان به اثبات رسیده است می‌توان با استفاده از این روش امکان صرفه‌جویی در هزینه و زمان پروژه‌های بزرگ را فراهم آورد. لذا در این تحقیق سعی شده است با استفاده از شبکه‌های عصبی همراه با روش الگوریتم ژنتیک به پیش‌بینی طرح اختلاط بتن حاوی نانو ذرات پرداخته شود. پارامترهای ورودی مدل در نظر گرفته شده شامل وزن مصالح درشت دانه و ریزدانه (به تفکیک دانه‌بندی)، وزن آب، سیمان، نسبت آب به سیمان، درصد نانوذرات و مواد افزودنی دیگر می‌باشد.

۲- تست‌های تجربی

۲-۱ مواد مصرفی

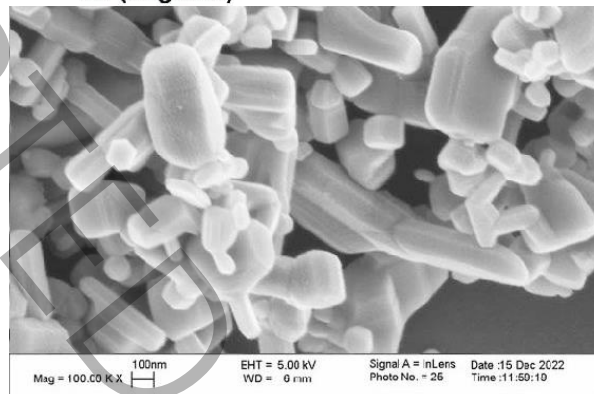
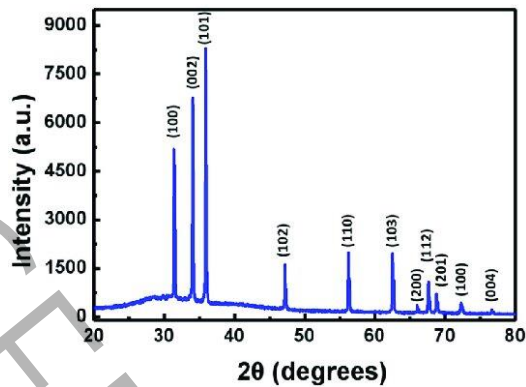
نانوذرات اکسید روی استفاده شده در تمام نمونه‌ها از شرکت مهرگان شیمی تهران خریداری شده است. نانو مواد اکسید روی به جهت پخش مناسب و همگن در اختلاط‌های ملات و بتن و مقرون به صرفه شدن آن، به صورت نانو محلول کلئیدی* بر پایه آب ppm 1000 که 0/1 درصد آن نانوذرات و مابقی آب می‌باشد، استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانوذرات اکسید روی در جدول ۱ و تصویر پودر نانوذرات اکسید روی و تصاویر TEM و XRD مربوط به آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانوذرات ZnO

Table 1 Physical and chemical characteristics of ZnO nanoparticles

20 nm	اندازه نانوذره
90 m ² /gr	سطح ویژه
99%	درصد خلوص
0.65 gr/m ³	چگالی ظاهری
تک کریستالی	نوع فاز کریستالی
تقریباً کروی	شکل ظاهری
سفید شیری	رنگ

* Nano Dispersions ZnO (Liquid)



شکل ۱ پودر نانوذرات اکسید روی و تصاویر TEM و XRD

Figure 1 ZnO nanoparticles powder and TEM and XRD images

سیمان‌هایی که در کلیه آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان صوفیان و از نوع کیسه‌ای می‌باشد. آب مورد استفاده در ساخت نمونه‌های این پروژه از شبکه آبرسانی شهری آزمایشگاه بتن دانشگاه تبریز می‌باشد. ماسه مصرفی در ملات سیمان، ماسه استاندارد می‌باشد. مصالحی که به عنوان ریزدانه (ماسه) در نمونه‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفته است، ماسه کارخانه سرام با درصد جذب آب ۰/۹٪، مدول نرمی ۳/۱۲ و وزن مخصوص ۲/۸۱ می‌باشد. مصالح سنگی که در این پروژه به عنوان شن مورد استفاده قرار گرفته است، شامل شن‌های ریز و درشت کارخانه سرام با درصد جذب آب ۰/۶۵٪، وزن مخصوص خشک شن ۲/۶۹ و بزرگترین قطر دانه مصرفی ۱۹ mm می‌باشد که بعد از دانه‌بندی و مورد قبول بودن آن در محل آزمایشگاه دیو گردیده و در تمامی آزمایش‌ها از آن‌ها استفاده شده است. فوق روان کننده مصرفی در این پروژه از نوع E.M. POWERPLAST و منطبق بر استاندارد ASTM-C494 می‌باشد که برای ساخت بتن‌های پر مقاومت و خود تراکم توسط شرکت آبادگران تولید شده است. در جدول ۲ مشخصات فوق روان کننده ارائه شده است.

جدول ۲ مشخصات فوق روان کننده

Table 2 Super plasticizer specifications

۳۰٪	مقدار ذرات جامد
۱/۱۵ kg/m ³	چگالی
۰/۱ - ۰/۱۵٪	درصد استفاده در طرح اختلاطها
مایع با رنگ زرد متمایل به نارنجی	شکل ظاهری

نمونه‌های بتنی طبق آیین‌نامه ACI 211 و به روش وزنی ترکیب شده‌اند [۳۱]. در این پروژه عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب انتخاب شده است. نسبت مصالح سنگی درشت به ریزدانه برابر با ۱:۱، بزرگترین اندازه ۱۹ mm و وزن کل مخلوط برابر kg/m^3 ۲۳۴۵ می‌باشد. جدول ۳ طرح اختلاط نمونه‌های بتنی با نسبت تقریبی $W/C=0.61$ را نشان می‌دهد.

جدول ۳ طرح اختلاط نمونه‌های بتنی با نسبت تقریبی $W/C=0.61$

Table 3 Mixing plan of concrete samples with approximate ratio $W/C=0.61$

شماره طرح	نانو (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	شن (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	آب (kg/m^3)
نمونه شاهد	۰	۳۳۶	۶۸۴	۱۱۵۵	۲۰۵
CZ1	۰/۳۵	۳۳۵/۶۵	۶۸۴	۱۱۵۵	۲۰۵
CZ2	۱/۷۵	۳۳۴/۲۵	۶۸۴	۱۱۵۵	۲۰۵
CZ3	۳/۵۰	۳۳۲/۵۰	۶۸۴	۱۱۵۵	۲۰۵
CZ4	۵/۲۵	۳۳۰/۷۵	۶۸۴	۱۱۵۵	۲۰۵

مشکل اساسی نانوذرات پخش ضعیف و نامناسب و عدم ایجاد محیط همگن در مخلوط ملات و بتن و به اصطلاح پدیده توده‌ای شدن می‌باشد. در اثر این پدیده نانوذرات به صورت توده در می‌آیند و تشکیل حفراتی را در خمیر سیمان می‌دهند که موجب کاهش مقاومت‌های مکانیکی ملات و بتن می‌شود. به منظور پخش مناسب نانومواد در اختلاط‌های ملات و بتن و ایجاد محیط همگن، باید ابتدا نانومواد را در آب ریخته و سپس سیمان را به مخلوط اضافه کرد و مجموعه را برای مدت ۵ دقیقه در دستگاه تراسونیک باهم مخلوط نمود. جهت حصول اطمینان از پخش مطلوب و همگن نانوذرات در اختلاط‌های ملات و بتن، از نمونه‌های شکسته شده بتن تصاویر SEM گرفته شده است. کلیه عملیات مربوط به آماده کردن نمونه‌های ملات شامل طرح اختلاط ملات، نحوه اختلاط، قالب‌گذاری، نگهداری قالب‌ها، نحوه انجام آزمایش‌ها و دما و رطوبت محیط طبق استاندارد ASTM می‌باشد. قالب‌های نمونه‌های فشاری مکعب‌هایی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند. ۳ نمونه برای انجام آزمایش ۷ روزه مقاومت فشاری و ۳ نمونه برای انجام آزمایش ۲۸ روزه مقاومت فشاری ساخته شده است. در این تحقیق برای نمونه‌های کششی بتن، از قالب‌های استوانه‌ای به ابعاد 300×150 میلی‌متر استفاده شده است. نمونه‌ها بعد از بیرون آوردن از منبع آب، طبق استاندارد ASTM مورد آزمایش قرار می‌گیرند. تغییرات مجاز زمان شکستن نمونه‌ها که باید در سن مشخصی شکسته شوند.

مقاومت فشاری بر اساس استاندارد BS 12390-3 [۳۲] و با قرار دادن نمونه زیر رکاب‌های دستگاه و اعمال بارگذاری تا حد گسیختگی انجام و نتایج به دست آمده یادداشت می‌گردد. لازم به یادآوری است که درجه حرارت در تمام مراحل انجام آزمایش‌ها ۱۸ تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در شکل ۲ حالت گسیختگی استاندارد و نمونه تحت آزمایش آن دیده می‌شود. در این تحقیق از روش آزمایش دو نیم شدن استوانه* (آزمایش برزیلی) مطابق استاندارد ASTM C496 [۳۳] برای تعیین مقاومت کششی استفاده شده است. مطابق شکل ۳ با استفاده از گیره‌ی نگهدارنده نوارهای تکیه‌گاهی، نمونه آزمایش و میله‌ی تکیه‌گاهی در جای خودشان قرار می‌گیرند به طوری که میله‌ی تکیه‌گاهی و محور نمونه مستقیماً زیر مرکز بلوک تکیه‌گاهی کروی قرار بگیرند. بار به طور یکنواخت و بدون تغییرات ناگهانی با سرعتی ثابت ۹۰۰ کیلو پاسکال بر دقیقه تا هنگام گسیختگی نمونه اعمال می‌شود. بیشترین بار اعمال شده در زمان گسیختگی که توسط دستگاه آزمایش نشان داده می‌شود، ثبت می‌شود.

* Splitting Test



(ب)



(الف)

شکل ۲ (الف) نمونه مکعبی تحت آزمایش فشاری و (ب) حالت رضایت بخش گسیختگی نمونه‌های مورد آزمایش

Figure 2 (a) cubic sample under compression test and (b) satisfactory state of rupture of the tested samples



شکل ۳ نحوه قرارگیری نمونه استوانه‌ای در آزمایش دو نیم شدن

Figure 3. Cylindrical sample in the splitting test

تست میزان جذب آب بر اساس استاندارد BS 1881-122 [۳۴] بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۰۰*۵۰ میلی‌متر در سنین ۷ روزه و ۲۸ روزه انجام پذیرفته است. میزان جذب آب نمونه‌ها به صورت افزایش جرم نمونه خشک و بر اساس رابطه زیر و مطابق استاندارد BS 1881-122 محاسبه شده است:

$$W = \frac{w_l - w_i}{w_i} \times 100 \quad (1)$$

که در آن W درصد جذب آب پس از غوطه‌ورسازی، w_i وزن نمونه خشک و w_l وزن نمونه قرار گرفته داخل آب در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه تا زمان ۲۴۰ دقیقه می‌باشد.

همچنین، نفوذپذیری مطابق استاندارد BS-EN 12390-8 صورت پذیرفته است. در این روش، یک وجه نمونه مکعبی ۱۵۰ میلیمتری تحت آب با فشار ۰/۵ مگاپاسکال قرار داده می‌شود. این فشار برای مدت ۷۲ ساعت اعمال و نتایج از میانگین‌گیری برای ۳ نمونه به دست آورده می‌شود. پس از اتمام آزمایش، نمونه‌ها از دستگاه خارج و به ۲ نیم تقسیم می‌شوند. سپس، با توجه به پروفیل نفوذ آب به بتن، حداکثر عمق نفوذ آب ثبت می‌شود و به عنوان شاخصی برای نفوذپذیری بتن در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است، برای همگرایی بیشتر نتایج، در این تحقیق میانگین عمق نفوذ استفاده شده است.

۳- بررسی نتایج

در این بخش کارهای آزمایشگاهی انجام یافته در این تحقیق و نتایج حاصل از آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. به علت کثرت طرح اختلاط‌ها و نمونه‌های ساخته شده (در کل ۵ طرح اختلاط و ۱۲۰ نمونه مختلف ساخته شده برای بتن)، لذا در اینجا مقادیر میانگین نتایج حاصل از شکستن نمونه‌ها که مقاومت‌های مکانیکی در مورد آن‌ها بهینه می‌باشد، اکتفا شده است.

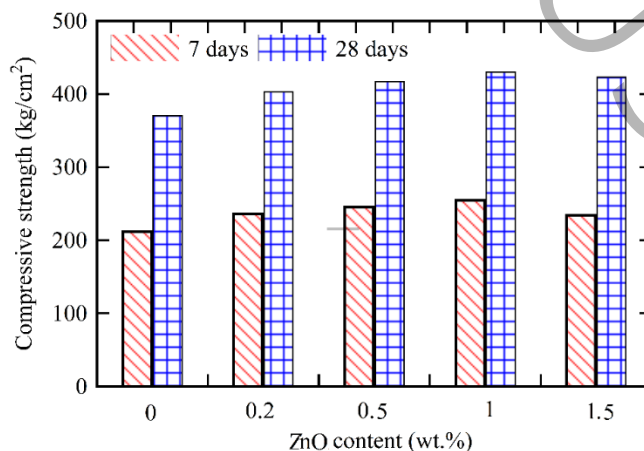
۳-۱ آزمایش مقاومت فشاری

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف بتن، اقدام به ساخت ۳۰ نمونه مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر (۳ نمونه برای هر یک از سنین ۷ و ۲۸ روزه) گردیده است. میانگین سه مقاومت به دست آمده برای حالت $W/C = 0.61$ در جدول ۴ درج گردیده است. شکل ۴ نمودار تغییرات مقاومت فشاری را نسبت به درصد جایگزینی نانوذرات نشان می‌دهد. در این نمودارها محور افقی درصد جایگزینی نانوذرات و محور قائم میانگین مقاومت فشاری را برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که افزودن نانوذرات اکسید روی باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی نانوذرات اکسید روی در سنین ۷ و ۲۸ روزه به ازای ۱ درصد نانوذرات اکسید روی به ترتیب ۲۰ درصد و ۱۶ درصد می‌باشد. این را می‌توان به اثر سازگار عامل نانوذرات اکسید روی با هیدراسیون سیمان نسبت داد که منجر به تسریع فرآیند هیدراسیون سیمان می‌شود. عامل بعدی در افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی می‌توان پایداری بالا و توزیع یکنواخت نانوذرات اکسید روی باشد که باعث بهبود خواص مکانیکی بتن شده است. در شکل ۵ تصاویر SEM نشان دهنده توزیع یکنواخت نانوذرات داخل بتن می‌باشد. علاوه بر این، افزایش در مقاومت فشاری بتن حاوی نانوذرات اکسید روی نسبت به بتن معمولی به علت خاصیت پرکنندگی این نانوذرات و مکانیزم اتصال و پل زدن ریز ترک‌ها می‌باشد. تصاویر SEM گرفته شده از سطوح شکست خورده نمونه‌های فشاری بتن حاوی مقادیر مختلف نانوذرات نشان که با استفاده از امواج التراسونیک عمل پخش نانوذرات در اختلاط بتن به خوبی انجام گرفته است. همچنین از شکل ۵ می‌توان دید که سوراخ‌های کوچکی در بتن خالص و بتن تقویت شده با ۰/۵ درصد نانوذرات اکسید روی وجود دارد، اما نقص‌های کمی در نمونه حاوی ۱ درصد نانوذرات اکسید روی دارد. با توجه به تفاوت در ریزساختار، استحکام بتن با ۱ درصد نانوذرات اکسید روی را می‌توان به بیشترین میزان بهبود داد. با توجه به ریزساختار خوب و مقاومت فشاری، بتن اصلاح شده با ۱ درصد نانوذرات اکسید روی به عنوان بتنی مناسب شناخته می‌شود.

جدول ۴ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتن

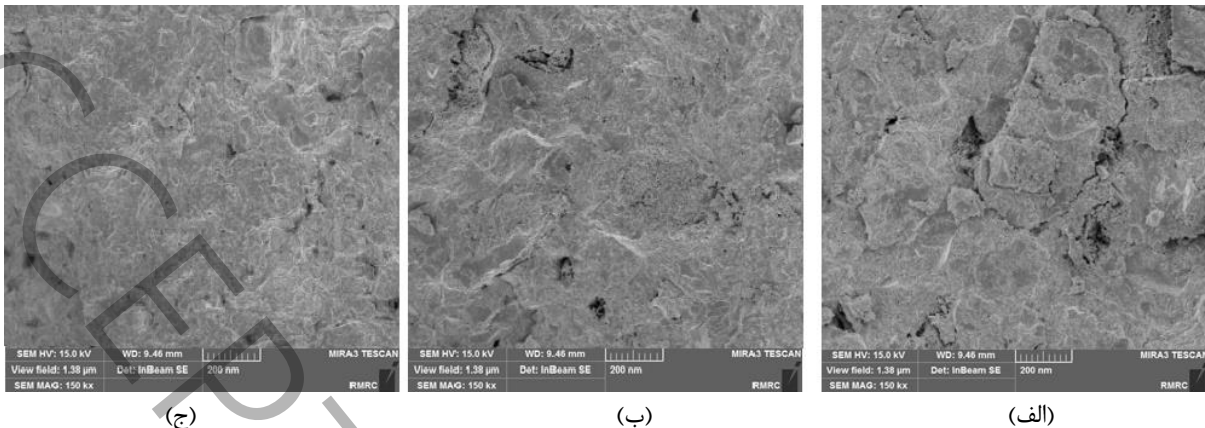
Table 4 Compressive strength of concrete samples

شماره طرح	مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ²)
نمونه شاهد	۲۱۲	۳۷۰
CZ1	۲۳۶	۴۰۳/۷
CZ2	۲۴۵	۴۱۷/۲
CZ3	۲۵۵	۴۳۰
CZ4	۲۳۴	۴۲۳/۱



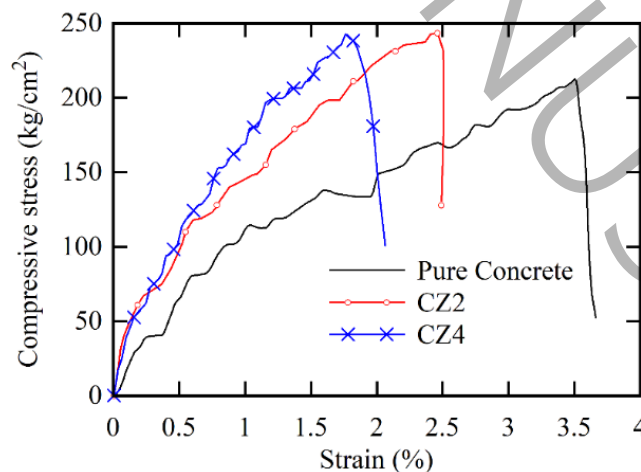
شکل ۴ نمودار مقاومت فشاری بتن حاوی نانوذرات اکسید روی با $w/c = 0.61$

Figure 4 Compressive strength diagram of concrete containing zinc oxide nanoparticles with $w/c = 0.61$



شکل ۵ تصویر SEM از سطوح شکست خورده نمونه فشاری بتن حاوی مقادیر مختلف نانو اکسید روی (الف) 0 wt.%، (ب) 0.5 wt.% و (ج) 1 wt.%
 Figure 5 SEM image of the failed surfaces of the concrete compression sample containing different amounts of nano zinc oxide (a) 0 wt.%, (b) 0.5 wt% and (c) 1 wt%.

در شکل ۶ منحنی تنش- کرنش به دست آمده از تست‌های تجربی برای سه نمونه بتن خالص و بتن تقویت شده با ۱ درصد و ۱/۵ درصد نانو اکسید روی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت کلی نانو اکسید روی علاوه بر افزایش استحکام فشاری، باعث ایجاد رفتار سخت‌شدگی کرنش و کاهش کرنش شکست شده و نانوکامپوزیت حالت ترد به خود می‌گیرد. کرنش شکست برای نمونه‌های بتن تقویت شده با ۱ درصد و ۱/۵ درصد نانو اکسید روی به ترتیب ۳۰٪ و ۳۸٪ نسبت به نمونه بتن خالص کاهش می‌یابد. این نتایج نشان دهنده شکنندگی بیشتر نمونه‌های بتن تقویت شده با نانو اکسید روی می‌باشد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که استحکام شکست نمونه بتن دارای ۱ درصد نانو اکسید روی در حدود ۳۸ درصد و نمونه دارای ۱/۵ درصد نانو اکسید روی در حدود ۲۹ درصد افزایش نسبت به نمونه بتن خالص داشته است. با توجه به اینکه نانو اکسید روی به صورت الیاف می‌باشند بنابراین مکانیزم مقاوم‌سازی عمدتاً ناشی از انتقال قابل توجهی از بار بین نانوذرات پر استحکام نانو اکسید روی و ماتریس بتنی می‌باشد.



شکل ۶ منحنی تنش- کرنش فشاری به دست آمده از تست‌های تجربی نمونه‌های مختلف در سن ۷ روزه

Figure 6 Compressive stress-strain curve obtained from experimental tests of different samples at the age of 7 days

برای انجام آزمایش مقاومت کششی مخلوط‌های مختلف بتن، اقدام به ساخت ۳۰ نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۳۰×۱۵ سانتی‌متر (۳) نمونه برای هر یک از سنین ۷ و ۲۸ روزه) گردیده است. لازم به یادآوری است که این نمونه‌ها از همان مخلوط تهیه شده برای نمونه‌های فشاری و همزمان با آن‌ها ساخته شده‌اند. میانگین سه مقاومت به دست آمده برای حالت $W/C = 0.61$ در جدول ۵ درج گردیده است. همچنین، شکل ۶ تغییرات مقاومت کششی را نسبت به درصد جایگزینی نانوذرات نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان نانوذرات تا ۱ درصد، استحکام کششی افزایش می‌یابد و سپس کاهش پیدا می‌کند. تقریباً میزان مقاومت با اختلاط این ماده در بتن ثابت است، اما با افزایش بیشتر نانوذرات مقاومت کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند در نتیجه آگلومراسیون و تجمع نانوذرات در درصدهای وزنی بالا باشد. با توجه به اینکه نانوذرات اکسید روی دارای نیروی چسبندگی سطحی بیشتری می‌باشند، لذا تمایل به تجمع آنها در درصدهای وزنی بالا بیشتر می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که مقاومت کششی با افزایش میزان نانوذرات ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. افزایش مقاومت کششی نمونه‌های بتنی حاوی نانوذرات اکسید روی در سنین ۷ و ۲۸ روزه به ازای ۱ درصد نانوذرات اکسید روی به ترتیب ۳۹ درصد و ۲۲ درصد می‌باشد. بنابراین، این افزایش در سنین بالاتر کمتر و در سنین پایین افزایش مقاومت کششی بیشتر است که این حاکی از تأثیر زود سفت شدن خمیر سیمان در بتن و افزایش گیرایش اولیه بتن می‌باشد. همچنین، در بدترین حالت مقاومت کششی بتن به ازای ۰/۲ درصد نانوذرات در حدود ۶ درصد بهبود می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که نانوذرات اکسید روی به علت سطح مخصوص زیادی که دارند، پیوند خوبی بین اجزای تشکیل دهنده بتن ایجاد کرده و در نتیجه مانع از رشد ریز ترک‌ها در بتن می‌شوند.

جدول ۵ نتایج مقاومت کششی نمونه‌های بتنی

Table 5 Tensile strength of concrete samples

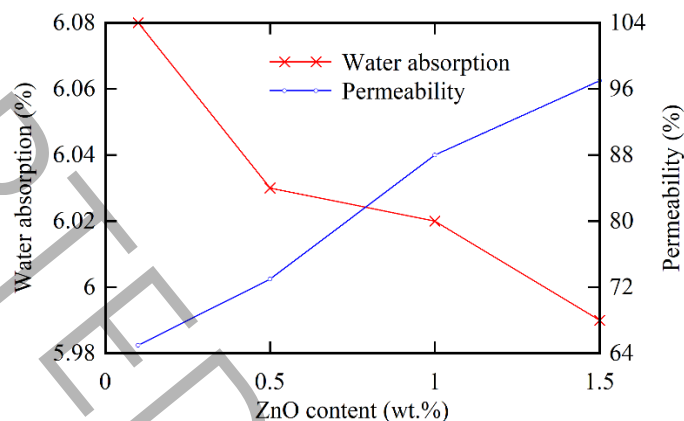
شماره طرح	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)
نمونه شاهد	۲۶	۴۰
CZ1	۲۸/۶	۴۲/۸
CZ2	۳۵/۸	۴۷
CZ3	۳۶/۱	۴۹
CZ4	۳۴/۴	۴۵

۳-۲ نفوذپذیری و جذب آب

نتایج آزمایش جذب آب و نفوذپذیری در شکل ۷ نشان داده شده است. علت بهبود نفوذپذیری نمونه‌های شامل نانوذرات اکسید روی را می‌توان به نقش مؤثر و پراکندگی مطلوب نانوذرات اکسید روی دانست به طوری که باعث پر کردن بهتر منافذ و در نتیجه کاهش تخلخل ماتریس شده و نهایتاً به تشکیل کامپوزیت‌های سیمانی متراکم با نفوذپذیری و جذب رطوبت کم می‌شود. در این شکل درصد بهبود آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش نانوذرات میزان جذب آب و نفوذپذیری کاهش می‌یابد که این نتیجه به علت خاصیت پرکنندگی نانوذرات می‌باشد. مشاهده می‌شود که میانگین جذب آب و نفوذپذیری برای نمونه دارای ۱/۵ درصد نانوذرات اکسید روی به ترتیب برابر ۵/۹۹ درصد و ۶۵ درصد می‌باشد. با توجه به اینکه نانوذرات اکسید روی به صورت فیلر عمل کرده و خلل و فرج‌های بتن را پر می‌کنند، بنابراین باعث انسجام بیشتر بتن و کاهش نفوذپذیری می‌شود. خلاصه‌ای از درصد افزایش مقاومت مکانیکی نمونه‌های بتنی ساخته شده با نانومواد نسبت به نمونه شاهد در جدول ۶ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان درصد بهینه برای نانوذرات اکسید روی برابر ۱ درصد وزنی سیمان می‌باشد.

برای تحلیل و بررسی دقیق‌تر مقدار نفوذپذیری نمونه‌های بتنی می‌توان از تصاویر ریزساختار SEM نمونه‌های بتنی بدون افزودنی و با افزودنی استفاده نمود. همانگونه که از تصاویر SEM نمونه‌های بتنی مختلف در شکل ۵ دیده می‌شود، بتن حاوی نانوذرات اکسید روی ساختار بسیار متراکم‌تری نسبت به نمونه‌های بتنی بدون نانوذرات دارند. علت این ساختار متراکم، خاصیت پرکنندگی نانوذرات به دلیل سطح مخصوص بسیار بالای ذرات آن است. علاوه بر این، دلیل دیگر می‌تواند به علت ایجاد خاصیت پوزولانی این نانوذرات باشد که

باعث ایجاد ژل ثانویه C-S-H شده و فضاهای خالی در نمونه‌های بتنی با این ژل پر می‌شوند. همچنین، مشاهده می‌شود که بتن بدون نانوذرات ساختار متخلخل‌تری نسبت به نمونه‌های حاوی نانوذرات دارد. بر این اساس، با افزایش میزان نانوذرات اکسید روی حفرات و منافذ موجود در بتن پر شده و ارتباط بین منافذ و کانال‌های پیوسته درون بتن قطع می‌شود و در نتیجه از نفوذپذیری بتن تقویت شده با نانوذرات کاسته می‌شود. چنین نتایج مشابهی در مورد بررسی اثر سایر نانوذرات بر روی نفوذپذیری و جذب آب بتن در تحقیقات پیشین به چشم می‌خورد [۳۵-۳۷].



شکل ۷ تأثیر کسر وزنی نانوذرات اکسید روی بر روی جذب آب و نفوذپذیری نمونه‌های بتنی

Figure 7. The effect of weight fraction of zinc oxide nanoparticles on water absorption and permeability of concrete samples

جدول ۶ درصد تغییرات مشخصه‌های مکانیکی نمونه‌های بتنی ساخته شده با نانومواد نسبت به نمونه شاهد

Table 6 Mechanical characteristics of concrete samples made with nanomaterials compared to the control sample

مقاومت فشاری		مقاومت کششی		کاهش جذب		کاهش نفوذپذیری	میزان نانوذرات
۷ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۲۸ روز	۲۸ روز	۲۸ روز	
%۱۱	%۹	%۱۰	%۷	%۶.۰۷	%۶۵		۰/۱ درصد نانو اکسید روی
%۱۵	%۱۲	%۳۷	%۱۷	%۶.۰۳	%۷۳		۰/۵ درصد نانو اکسید روی
%۲۰	%۱۶	%۳۸	%۲۲	%۶.۰۲	%۸۸		۱/۰ درصد نانو اکسید روی
%۱۰	%۱۴	%۳۲	%۱۲	%۵.۹۹	%۹۷		۱/۵ درصد نانو اکسید روی

۴- مدل شبکه عصبی

در تحقیق حاضر پیش‌بینی اثرات نانوذرات اکسید روی بر خواص مکانیکی بتن با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام می‌شود. در این راستا مدل‌سازی عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی انجام یافته و سپس نتایج که به صورت سری زمانی می‌باشند در شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل‌سازی می‌گردند. داده‌های اخذ شده از آزمایشگاه با در نظر اثرات نانوذرات اکسید روی انجام خواهد یافت.

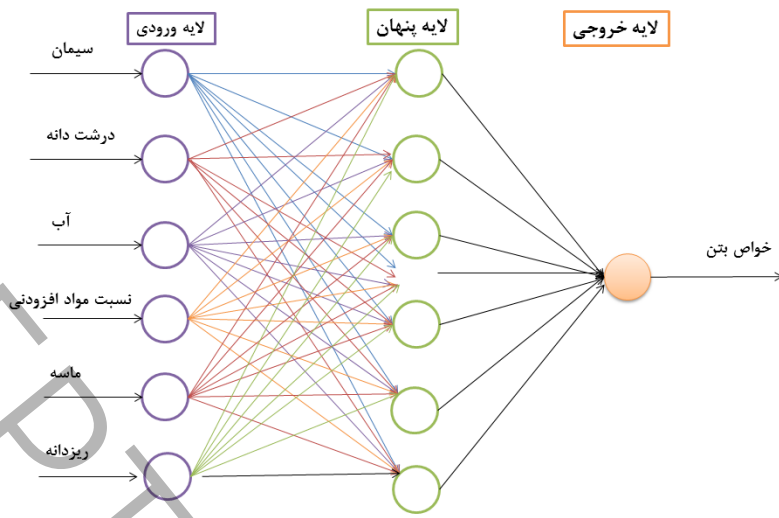
در حالت کلی یک شبکه عصبی زیستی از مجموعه یا مجموعه‌ای از نورون‌ها به صورت فیزیکی به هم متصل یا از لحاظ عملکردی به هم وابسته تشکیل شده است. هر نورون می‌تواند به تعداد بسیار زیادی از نورون‌ها وصل باشد و تعداد کل نورون‌ها و اتصالات بین آنها می‌تواند بسیار زیاد باشد. عملکرد شبکه عصبی برگرفته از کارایی نورون‌های زیستی است. نقطه مقابل نورون‌های زیستی نورون‌های مصنوعی است. ساختار نورون‌های مصنوعی شامل دو بخش آموزشی و عملکردی است. در حالت آموزش نورون یاد می‌گیرد در مقابل الگوهای ورودی خاص برانگیخته شود و در حالت عملکرد وقتی یک الگوی ورودی شناسایی شده وارد شود خروجی متناظر با آن ارائه می‌شود.

شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از مهمترین سیستم‌های هوشمند هستند که کاربردهای گوناگون علمی و مهندسی دارند. این ابزار قادر هستند بین اطلاعاتی که از طراحی محاسبات و آزمایش‌ها دست آمده است ارتباط نهفته‌ای تعیین کنند که در حل مسائل مشابه دیگر مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش برای پیش‌بینی خواص مکانیکی بتن تقویت شده با نانوذرات اکسید روی از شبکه عصبی استفاده شده است. شبکه عصبی مصنوعی که در این پژوهش استفاده شده ترکیب شبکه عصبی با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک است. الگوریتم ژنتیک را می‌توان یک روش بهینه‌سازی تصادفی جهت‌دار دانست که به تدریج به سمت نقطه بهینه حرکت می‌کند. برای ارزیابی کارایی مدل‌های شبکه‌های عصبی مورد استفاده نیاز به شاخص‌های زیر برای ارزیابی مدل‌ها و در نهایت مقایسه کارایی آنها نسبت به یکدیگر استفاده شده است. حداکثر مقدار، حداقل مقدار، میانگین و انحراف معیار که برای هر کدام به صورت جداگانه محاسبه خواهد شد. در این پژوهش عملکرد شبکه‌های عصبی طراحی شده بر پایه محاسبات مفاهیمی چون میانگین مربعات خطا (MAE^*) و ریشه دوم میانگین کمترین مربعات خطا ($RMSE^{\square}$) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بعلاوه ضریب تعیین به همراه ضریب همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده از شبکه عصبی و داده‌های خروجی حاصل از مدل‌سازی عددی نیز به عنوان معیار مناسبی جهت ارزیابی توانایی شبکه مدنظر گرفته می‌شود.

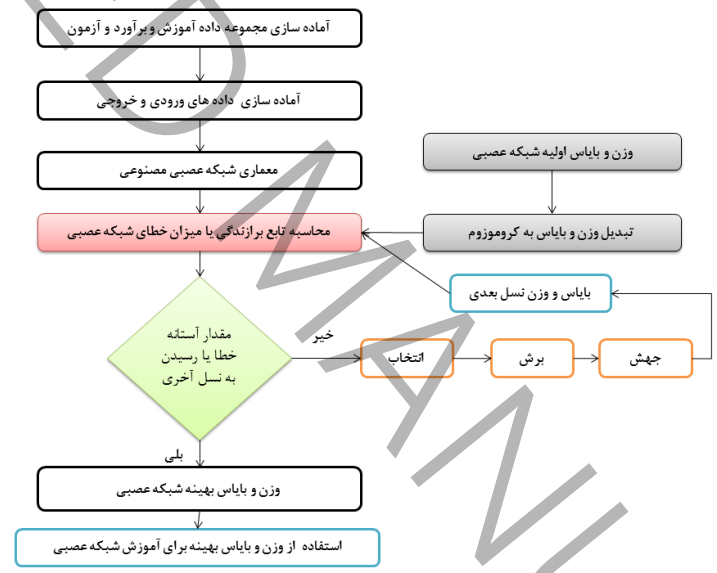
در این پژوهش با در نظرگیری پارامترهای مقادیر نانوذرات برحسب درصد وزن سیمان، مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان، که این پارامترها مربوط به طرح‌های اختلاط مختلف بتن می‌باشند، به عنوان ورودی، از الگوریتم ژنتیک برای به دست آوردن مقدار بیشینه و کمینه مقاومت و نفوذپذیری در سنین مختلف، استفاده می‌کنیم. علاوه بر مشخص گردیدن مقادیر بهینه توسط الگوریتم ژنتیک، مقادیر بهینه اجزای بتن یعنی سیمان، آب و نانوذرات که سبب می‌شوند تا اهداف بهینه‌سازی همزمان با همدیگر تأمین گردند، نیز توسط الگوریتم ژنتیک تعیین می‌شوند. لازم به ذکر است که تجزیه و تحلیل داده‌ها در نرم‌افزار متلب صورت می‌گیرد. در این پژوهش، بعد از چندین بار آموزش شبکه تحت توپولوژی‌های مختلف (شبکه‌های عصبی با یک، دو و سه لایه پنهان، و در هر حالت از تعداد نرون‌های مختلف در هر لایه پنهان)، نسبت به یافتن توپولوژی اقدام خواهد شد. منظور از جواب بهتر تعداد دوره‌های کمتر و زمان مورد نیاز کمتر برای رسیدن به حد خطای شبکه می‌باشد. البته با توجه به اینکه اوزان و بایاس‌های اولیه شبکه به صورت تصادفی انتخاب می‌گردند، بنابراین معیار بهتر بودن شبکه به صورت شهودی در چندین بار اجرای شبکه تحت اوزان و بایاس‌های اولیه متفاوت، ارزیابی می‌گردد. برای تسهیل آموزش و تست شبکه‌های عصبی، داده‌های جمع‌آوری شده به صورت تصادفی انتخاب و به آموزش، برآورد و آزمون داده مجموعه تقسیم خواهد شد. ۷۰ درصد از داده‌ها برای اهداف آموزشی و باقی مانده آن یعنی ۳۰ درصد اطلاعات به طور مساوی برای اعتبارسنجی و آزمایش بکار گرفته می‌شوند. در شکل ۸ نمونه ساختار شبکه عصبی مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود معماری یک ANN متشکل از تعدادی نرون مصنوعی است که از طریق اتصالات وزن‌دار به هم وصل می‌باشند هر یک از این سلول‌های عصبی (گره) دارای وزن ورودی، تابع انتقال و خروجی هستند. فلوچارت الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی آموزش شبکه عصبی در شکل ۹ آورده شده است.

* Mean Absolute Error

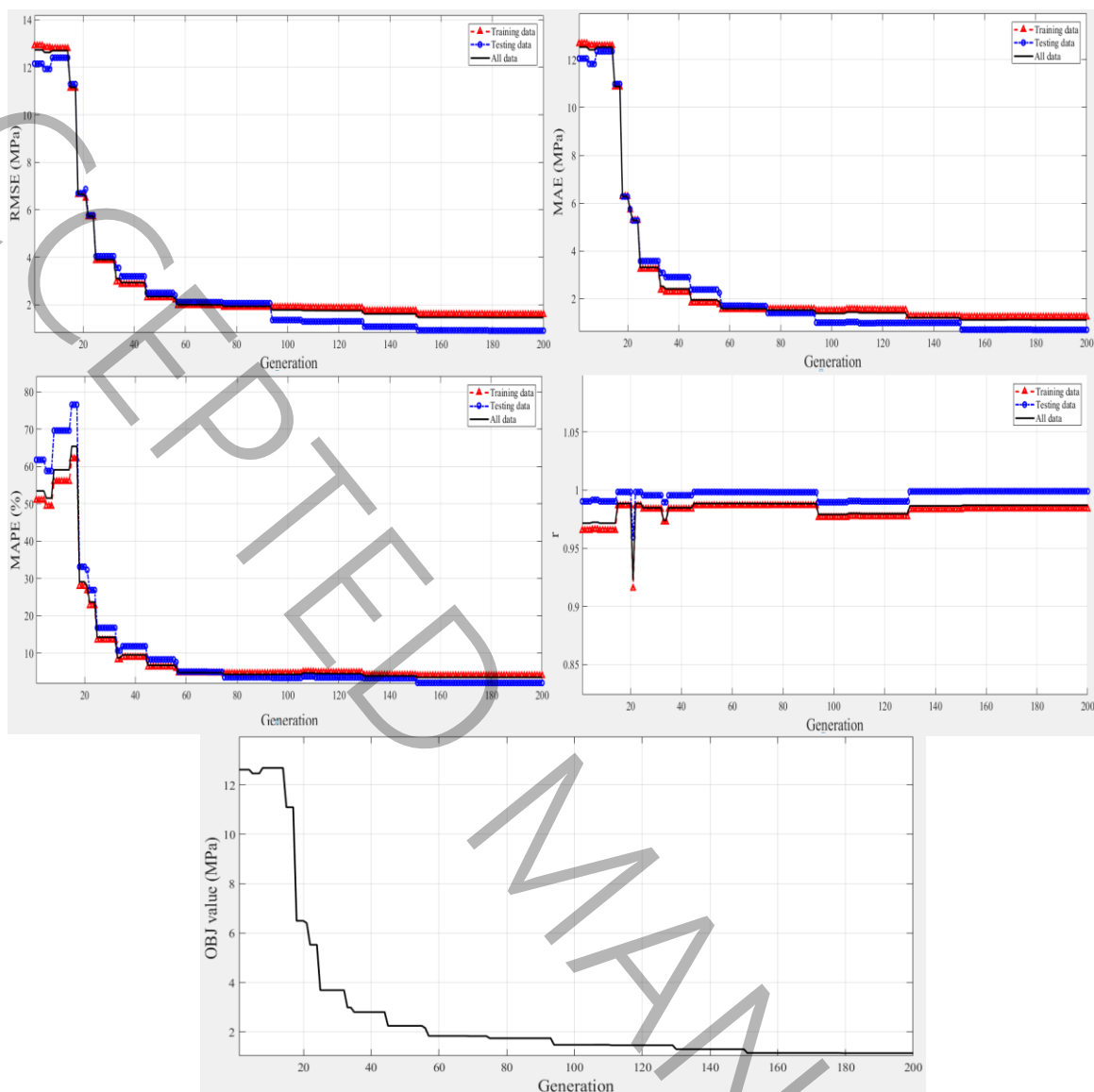
† Root Mean Square Error



شکل ۸ نمونه ساختار شبکه عصبی مورد استفاده در پژوهش
 Figure 8 An example of the structure of the neural network used in the research



شکل ۹ فلوجارت الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی آموزش شبکه عصبی در پژوهش
 Figure 9 Flowchart of genetic algorithm to optimize neural network training in research



شکل ۱۰ پارامترهای استاتیکی مربوط به مدل مقاومت فشاری بتن تقویت شده با نانوذرات اکسید روی

Figure 10 Static parameters related to the compressive strength model of concrete reinforced with zinc oxide nanoparticles

در تحقیق حاضر به منظور ارائه رابطه ریاضی بین دو متغیر وردی میزان نانوذرات اکسید روی و سن بتن از مدل درختی برنامه ریزی ژنتیک استفاده شده است. برنامه‌ریزی ژنتیک* که با علامت GP نمایش داده می‌شود، یک رویکرد مدل‌سازی رفتاری با ویژگی‌های کاملاً جدید می‌باشد. در واقع برنامه‌ریزی ژنتیک توسعه یافته الگوریتم ژنتیک می‌باشد و به طور کلی آن را می‌توان به صورت تکنیک یادگیری ماشین تحت نظارت بیان کرد که به جای فضای داده‌ها در فضای جستجو می‌کند. برنامه‌های ایجاد شده با برنامه‌ریزی ژنتیک ساختار درختی دارند و زبان برنامه‌نویسی آن‌ها به صورت تابع است [۳۸-۴۱]. برنامه‌ریزی ژنتیک اولین بار توسط کوزا[†] به عنوان توسعه‌ای از الگوریتم ژنتیک معرفی شد. اکثر عملگرهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک در برنامه‌ریزی ژنتیک نیز با تغییرات جزئی قابل استفاده می‌باشد [۳۸]. مدل برنامه‌ریزی ژنتیک برای مقاومت فشاری بتن در محیط متلب به اجرا در آمده و پس از ده بار اجرای برنامه بهترین مدل انتخاب گردید.

* Genetic Programming

† Koza

به منظور استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک، پارامترهای تنظیم این الگوریتم قبل از اجرا باید مشخص گردد که این مقادیر با استفاده از روش سعی و خطا و مطابق جدول ۷ می‌باشد. همانطوریکه در جدول مشخص است به دلیل ماهیت تصادفی ساختار روابط ریاضیاتی الگوریتم مذکور ده بار اجرا و در نهایت بهترین رابطه گزارش شده است. به منظور ارزیابی نتایج مدل، توجه به این امر ضروری است که معیارهایی به جهت ارزیابی عملکرد و دقت پیش‌بینی مدل تعیین شود. بنابراین بهترین مدل بر اساس معیارهای زیر انتخاب می‌شود [۴۲]:

- ساده‌ترین مدل، اگرچه این معیار بر تصمیم‌گیری غالب نمی‌شود.
- مدلی که بهترین مقدار خطا را در داده‌های آموزش ارائه دهد.
- مدلی که بهترین مقدار خطا را در داده‌های اعتبار سنجی ارائه دهد.

جدول ۷ پارامترهای تنظیم مدل درختی برنامه‌ریزی ژنتیک
Table 7 parameters of genetic programming tree model regulation

مقدار	پارامتر
۲۰۰	تعداد نسل
۵۰	تعداد اعضای جمعیت (کروموزوم‌ها)
۵	عمق درخت
۴	عمق جهش
مسابقه‌ای	روش انتخاب
۵	درصد نخبه‌گرایی
۸۵	درصد تقاطع
۱۰	درصد جهش
جمع، تفریق، ضرب، تقسیم	توابع مورد استفاده
[-۱, ۱]	اعداد ثابت
۱۰	تعداد تکرار الگوریتم

در این روش، اولین معیار سادگی مدل بوده که از طریق تنظیم پارامترهای عمق درخت و توابع ساده ریاضیاتی بکار رفته توسط کاربر کنترل می‌شود. برای دو معیار دیگر، پارامترهای استاتیکی زیادی از جمله جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^*$)، میانگین خطای مطلق (MAE^{\square})، درصد میانگین خطای مطلق ($MAPE^{\square}$)، ضریب همبستگی پیرسون (r) و OBJ وجود دارد. روابط ریاضیاتی مربوط به این پارامترهای استاتیکی به صورت زیر است:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |h_i - t_i|}{n}, \quad MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|h_i - t_i|}{t_i} \times 100 \quad (2)$$

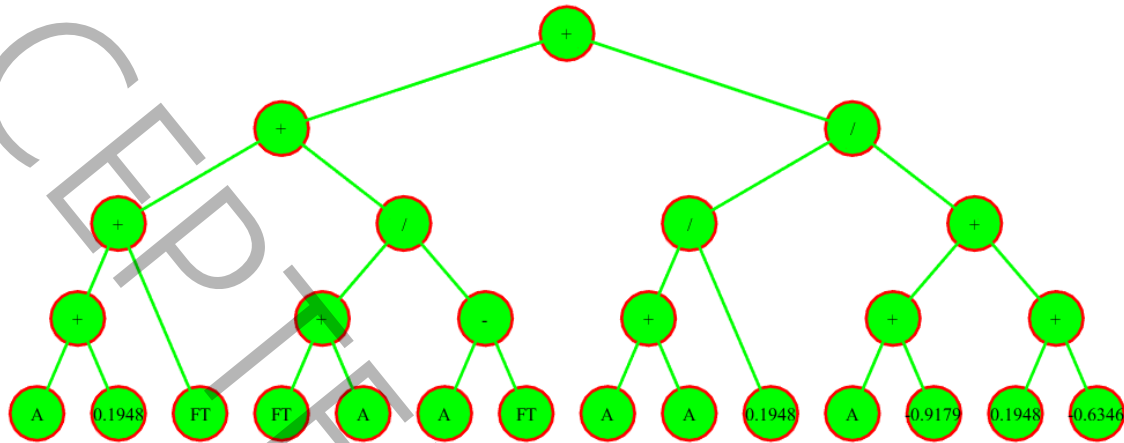
که در آن h_i و t_i به ترتیب خروجی واقعی و محاسبه شده برای داده‌ی i ام می‌باشد. معیار پارامتر استاتیکی OBJ تلفیقی از پارامترهای استاتیکی داده‌های آموزش و آزمون بوده که به طور همزمان مقادیر جذر میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق و ضریب همبستگی پیرسون را در نظر می‌گیرد. هرچه مقدار ضریب همبستگی پیرسون بیشتر و مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق کمتر باشد، منجر به کاهش مقدار OBJ خواهد شد که نشان دهنده دقیق‌تر بودن مدل است.

* Root Mean Squared Error

† Mean Absolute Error

‡ Mean Absolute Percentage Error

نمودارهای تغییرات پارامترهای استاتیکی با نسل‌های مختلف مطابق شکل ۱۰ است. همانگونه که انتظار می‌رود عملکرد الگوریتم با افزایش نسل‌ها بهبود می‌یابد. بر این اساس، ساختار درختی پیشنهادی مدل مقاومت فشاری بتن تقویت شده با نانوذرات اکسید روی مطابق شکل ۱۱ می‌باشد. در این شکل A و FT به ترتیب بیانگر میزان نانوذرات و سن بتن می‌باشند.



شکل ۱۱ ساختار درختی نهایی مربوط به مدل مقاومت فشاری بتن تقویت شده با نانوذرات اکسید روی

Figure 11 The final tree structure related to the compressive strength model of concrete reinforced with zinc oxide nanoparticles

پس از اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیک، رابطه ریاضیاتی مربوط به درخت آزمون برای مقاومت فشاری بتن تقویت شده با نانوذرات اکسید روی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f'_c = 0.1099A + 22.8912FT + \frac{0.5528A}{0.2321FT + 1} + 21.82 \quad (3)$$

که در آن A و FT به ترتیب بیانگر میزان نانوذرات و سن بتن می‌باشد. همانگونه که در این رابطه مشخص است مقدار نانوذرات در مقایسه با سایر عوامل تأثیر بسزایی بر روی مقاومت فشاری بتن تقویت شده با نانوذرات اکسید روی داشته به گونه‌ای که از رابطه پیشنهادی حذف شده است. پارامترهای استاتیکی مربوط به مدل پیشنهادی در جدول ۸ آورده شده است. همانطور که در جدول مشخص است همبستگی بسیار خوبی (۰/۹۸۳۷ برای داده‌های آموزش و ۰/۹۹۹۰ برای داده‌های آزمون) بین نتایج به دست آمده از مدل و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد که این موضوع دقت مدل را به اثبات می‌رساند. همچنین درصد خطای مدل پیشنهادی برای کل دادگان ۳/۵۰۶۱ درصد می‌باشد.

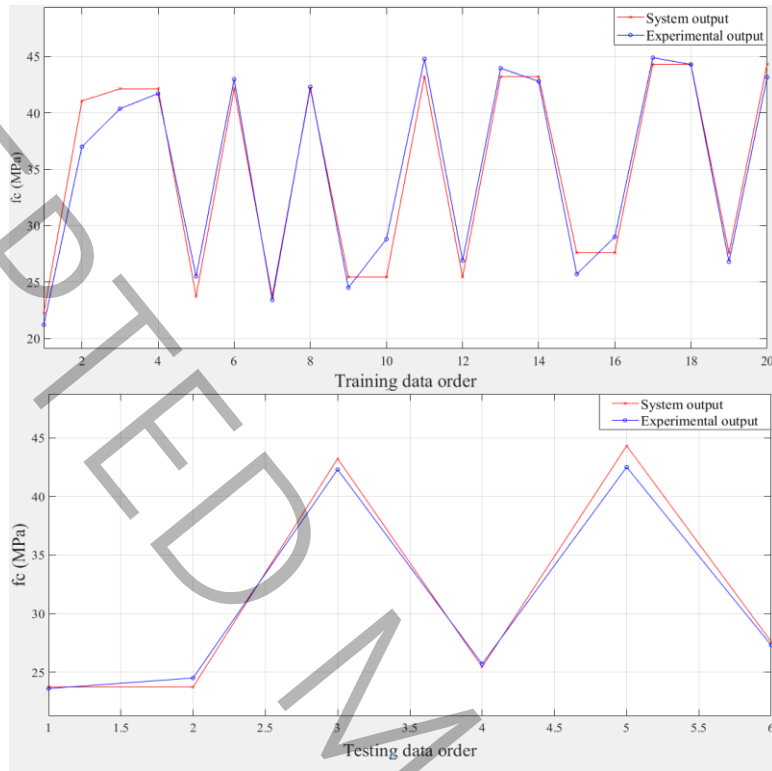
جدول ۸ مقادیر پارامترهای استاتیکی مدل مقاومت فشاری بتن با لیاف نانو

Table 8 Static parameters of the compressive strength model of concrete with ZnO nanoparticles

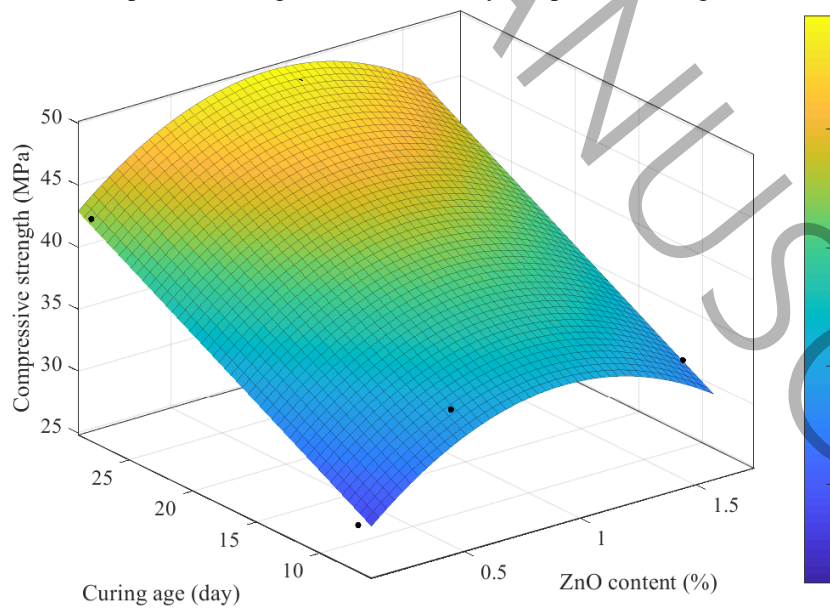
	RMSE (MPa)	MAE (MPa)	MAPE (%)	R	OBJ (MPa)
داده‌های آموزش	۱/۵۸۶۸	۱/۲۴۰۲	۳/۹۴۹۴	۰/۹۸۳۷	
داده‌های آزمون	۰/۹۰۶۴	۰/۷۰۱۶	۲/۰۲۸۵	۰/۹۹۹۰	۱/۱۳۸۷
کل داده‌ها	۱/۴۵۸۲	۱/۱۱۵۹	۳/۵۰۶۱	۰/۹۸۶۹	

نمودار مقادیر مقاومت فشاری آزمایشگاهی و مقاومت فشاری پیش‌بینی شده بتن تقویت شده با نانوذرات اکسید روی برای دادگان آموزش و آزمون مطابق شکل ۱۲ می‌باشد. همانگونه که در این شکل مشخص است سازگاری مناسبی بین مقادیر مقاومت پیش‌بینی شده و نتایج آزمایشگاهی برای دادگان آموزش و آزمون وجود دارد. همچنین، در شکل ۱۳ آنالیز حساسیت

سه بعدی مقاومت فشاری بتن تقویت شده با نانوذرات اکسید روی برحسب میزان نانوذرات (FT) و سن بتن (A) نشان داده شده است. همان طوری که انتظار می‌رود با افزایش سن بتن مقاومت فشاری بتن افزایش یافته و این نرخ افزایش از میزان تأثیر نوع نانوذرات بیشتر است.



شکل ۱۲ مقاومت فشاری پیش‌بینی شده در مقابل مقاومت فشاری آزمایشگاهی برای دادگان آموزش و آزمون
Figure 12 Predicted compressive strength versus laboratory compressive strength for training and test data



شکل ۱۳ آنالیز حساسیت سه بعدی مقاومت فشاری بتن بر اساس میزان نانوذرات و سن بتن
Figure 13 Three-dimensional sensitivity analysis of concrete compressive strength based on the amount of nanoparticles and age of concrete

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر نانوذرات اکسید روی بر روی نفوذپذیری و ویژگی‌های مکانیکی بتن به صورت تجربی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. از طریق انجام تست‌های فشاری تک‌جهته و آزمون دو نیم‌شدن استوانه، مقاومت فشاری و کششی بتن حاوی مقادیر مختلفی از نانوذرات اکسید روی (از ۰٪ تا ۱.۵٪) در سنین ۷ و ۲۸ روزه بررسی شد. همچنین، نفوذپذیری و جذب آب نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مقاومت‌های مکانیکی نمونه‌های بتنی نشان می‌دهد که با افزایش مقدار جایگزینی نانوماده تا حد مشخصی، مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتن افزایش می‌یابد. جایگزینی درصد بالای نانوذرات اکسید روی به جای اثر مطلوب بر روی خواص مکانیکی بتن، اثر نامطلوبی بر ساختار و در نتیجه خواص مکانیکی ملات و بتن می‌گذارد. علت این امر را می‌توان در انرژی سطحی زیاد نانوذرات به علت سطح ویژه بالای آن‌ها جستجو کرد. این امر باعث ایجاد توده‌های کم مقاومت در ساختار ملات و بتن می‌گردد که در نتیجه موجب ایجاد ساختاری به ظاهر متراکم ولی سست می‌شود. افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی نانوذرات اکسید روی در سنین ۷ و ۲۸ روزه به ازای ۱ درصد نانوذرات اکسید روی به ترتیب ۲۰ درصد و ۱۶ درصد می‌باشد و افزایش مقاومت کششی نمونه‌های بتنی حاوی نانوذرات اکسید روی در سنین ۷ و ۲۸ روزه به ازای ۱ درصد نانوذرات اکسید روی به ترتیب ۳۹ درصد و ۲۲ درصد می‌باشد. در مرحله بعد، به منظور پیش‌بینی خواص مکانیکی بتن از ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک استفاده شد. مشاهده می‌شود که همبستگی بسیار خوبی (۰/۹۸۳۷ برای داده‌های آموزش و ۰/۹۹۹۰ برای داده‌های آزمون) بین نتایج به دست آمده از مدل و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد که این موضوع دقت مدل را به اثبات می‌رساند. همچنین درصد خطای مدل پیشنهادی برای کل دادگان ۳/۵۰۶۱ درصد می‌باشد.

مراجع

- [1] M. Parhizkari, A. Saberi Vaezaneh, M. Naderi, The effect of penetration-reducing materials on concrete permeability and strength with "cylindrical chamber" and "Twist-off" tests, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(1) (2023) 19-40.
- [2] J. Esmaeili, K. Andalibi, Investigation of the effects of nano-silica on the properties of concrete in comparison with micro-silica, *International Journal of Nano Dimension*, 3(4) (2013) 321-328.
- [3] J. Esmaeili, V. Romouzi, J. Kasaei, K. Andalibi, An investigation of durability and the mechanical properties of ultra-high performance concrete (UHPC) modified with economical graphene oxide nano-sheets, *Journal of Building Engineering*, 80 (2023) 107908.
- [4] M. Jafari Nadoushan, A. Ramezaniapor, Performance of alkali-activated slag and pumice mortars against chloride ions penetration in the Persian Gulf, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(3) (2023) 531-554.
- [5] S.H. Ghasemzadeh Mosavinejad, A. Darvishalinezhad, Durability of geopolymers mortars based on recommended slag and kaolin percentages containing polymer, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(11) (2024) 2243-2262.
- [6] F.K. Maleki, M.K. Nasution, M.S. Gok, V.A. Maleki, An experimental investigation on mechanical properties of Fe₂O₃ microparticles reinforced polypropylene, *Journal of materials research and technology*, 16 (2022) 229-237.
- [7] M. Hoseinzadeh, R. Pilafkan, V.A. Maleki, Size-dependent linear and nonlinear vibration of functionally graded CNT reinforced imperfect microplates submerged in fluid medium, *Ocean Engineering*, 268 (2023) 113257.
- [8] P. Vahidi Pashaki, M. Pouya, V.A. Maleki, High-speed cryogenic machining of the carbon nanotube reinforced nanocomposites: Finite element analysis and simulation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(11) (2018) 1927-1936.
- [9] M. Tabish, M.M. Zaheer, A. Baqi, Effect of nano-silica on mechanical, microstructural and durability properties of cement-based materials: A review, *Journal of Building Engineering*, 65 (2023) 10565767.

- [10] K. Abu el-Hassan, I.Y. Hakeem, M. Amin, B.A. Tayeh, A.M. Zeyad, I.S. Agwa, Y. Elsakhawy, Effects of nano titanium and nano silica on high-strength concrete properties incorporating heavyweight aggregate, *Structural Concrete* 36 (2023) 14-26.
- [11] F. Althoey, O. Zaid, R. Martínez-García, F. Alsharari, M. Ahmed, M.M. Arbili, Impact of Nano-silica on the hydration, strength, durability, and microstructural properties of concrete: A state-of-the-art review, *Case Studies in Construction Materials*, (2023) e0199.^v
- [12] A.S. Dahlan, Impact of nanotechnology on high performance cement and concrete, *Journal of molecular structure*, 1223 (2021) 128896.
- [13] A. Jagadisha, K.B. Rao, G. Nayak, M. Kamath, Influence of nano-silica on the microstructural and mechanical properties of high-performance concrete of containing EAF aggregate and processed quarry dust, *Construction and Building Materials*, 304 (2021) 124392.
- [14] P. Zhang, D. Sha, Q. Li, S. Zhao, Y. Ling, Effect of nano silica particles on impact resistance and durability of concrete containing coal fly ash, *Nanomaterials*, 11(5) (2021) 1296.
- [15] P. Zhang, H. Zhang, G. Cui, X. Yue, J. Guo, D. Hui, Effect of steel fiber on impact resistance and durability of concrete containing nano-SiO₂, *Nanotechnology Reviews*, 10(1) (2021) 504-517.
- [16] C. Li, G. Li, D. Chen, K. Gao, Y. Mao, S. Fan, L. Tang, H. Jia, Influencing mechanism of nano-Al₂O₃ on concrete performance based on multi-scale experiments, *Construction and Building Materials*, 384 (2023) 131402.
- [17] M. Naderi, A. Saberi Vaezaneh, m. parhizkari, The effect of different temperature cycles on permeability and surface resistance of concretes containing permeability-reducing materials, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(9) (2023) 1845-1862.
- [18] A. Tangtakabi, M.H. Ramesht, A. Golsoorat Pahlaviani, T. Pourroostam, Optimum Use of Microsilica in Reducing Corrosion Reinforcing Steel of Marine Concrete Structures, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(8) (2022) 2953-2968.
- [19] S. Khosravi, M.A. Goudarzi, Seismic risk assessment of on-ground concrete cylindrical water tanks, *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1) (2023) 68.
- [20] Komasi, M., khosravi, S., chobkar, H., Laboratory study for optimal mixing scheme of pervious concrete containing additive of microsilica fume based on maximum compressive strength and permeability, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(4) (2021) 42-61.
- [21] M.R. Mohammadizadeh, F. Esfandnia, Prediction of shear strength of deep beams of the reinforced concrete using weighted least squares support vector machine method, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(9) (2021) 3867-3882.
- [22] A. Hakimi Khansar, J. Parsa, A. Hoseinzadeh dalir, J. Shiri, Simulation of soil stress in earth dams using artificial intelligence models and determination of effective features, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(1) (2022) 247-262.
- [23] F. Salmasi, F. Nahrain, A. Taheri aghdam, Prediction of discharge coefficients for broad-crested weirs using expert systems, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(12) (2023) 4435-4458.
- [24] M. Adamu, A.B. Çolak, Y.E. Ibrahim, S.I. Haruna, M.F. Hamza, Prediction of mechanical properties of rubberized concrete incorporating fly ash and nano silica by artificial neural network technique, *Axioms*, 12(1) (2023) 81.
- [25] J. Abellán García, J. Fernandez Gomez, N. Torres Castellanos, Properties prediction of environmentally friendly ultra-high-performance concrete using artificial neural networks, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(6) (2022) 2319-2343.
- [26] Y. Zhang, Z. Gao, X. Wang, Q. Liu, Predicting the pore-pressure and temperature of fire-loaded concrete by a hybrid neural network, *International Journal of Computational Methods*, 19(08) (2022) 2142011.
- [27] A.N. Beskopylny, S.A. Stel'makh, E.M. Shcherban', L.R. Mailyan, B. Meskhi, I. Razveeva, A. Chernil'nik, N. Beskopylny, Concrete strength prediction using machine learning methods CatBoost, k-Nearest Neighbors, Support Vector Regression, *Applied Sciences*, 12(21) (2022) 10864.

- [28] M. miri, H. Beheshti nezhad, M. Jafari, Experimental Investigation on Mechanical Properties of Concrete containing Nano Wollastonite and Modeling with GMDH-type Neural Networks, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 46(2) (2015) 143-156.
- [29] N. Ukrainczyk, V. Ukrainczyk, A neural network method for analysing concrete durability, *Magazine of Concrete Research*, 60(7) (2008) 475-486.
- [30] A. Rashno, M. Adlparvar, M. Izadinia, Investigating the engineering properties of fiber-reinforced ultra-high performance self-compacting concrete and predicting its rheological properties using a hybrid neural network and RBF, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(5) (2023) 1103-1120.
- [31] M. Nataraja, L. Das, Concrete mix proportioning as per IS 10262: 2009–Comparison with IS 10262: 1982 and ACI 211.1-91, *The Indian Concrete Journal*, 35 (2010) 64-70.
- [32] B. En, 12390-3, Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens, *British Standards Institution*, (2003).
- [33] C. Astm, 496/C 496M, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” *ASTM International*, West Conshohocken, PA (2004).
- [34] B. Standard, Testing concrete: Method for determination of water absorption, *BSI 12*, 1998.
- [35] V. Rathi, C. Modhera, An overview on the influence of nano materials on properties of concrete, *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, 3(2) (2014) 36-59.
- [36] J.A. Abdalla, B.S. Thomas, R.A. Hawileh, K.S.A. Kabeer, Influence of nanomaterials on the water absorption and chloride penetration of cement-based concrete, *Materials Today: Proceedings*, 65 (2022) 2066-2069.
- [37] M. Ashok, A. Parande, P. Jayabalan, Strength and durability study on cement mortar containing nano materials, *Advances in nano research*, 5(2) (2017) 99.
- [38] J.R. Koza, *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*, MIT press, 1992.
- [39] P. Chopra, R.K. Sharma, M. Kumar, Prediction of compressive strength of concrete using artificial neural network and genetic programming, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016 (2016) 36-56.
- [40] W.B. Langdon, R. Poli, *Foundations of genetic programming*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [41] H.A. Shah, M.L. Nehdi, M.I. Khan, U. Akmal, H. Alabduljabbar, A. Mohamed, M. Sheraz, Predicting Compressive and Splitting Tensile Strengths of Silica Fume Concrete Using M5P Model Tree Algorithm, *Materials*, 15(15) (2022) 5436.
- [42] 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*, 31 (2020) 101326.