



بررسی خواص مهندسی بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی و پیش‌بینی خواص رئولوژی آن با شبکه عصبی هیبریدی و RBF

علیرضا رشنو^{۱*}، محمدرضا عدل پرور^{۲*}، محسن ایزدی نیا^۱

۱- گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم، قم، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۲/۲۱

کلمات کلیدی:

بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی

خواص رئولوژی

پیش‌بینی

ANN-GA

RBF-NN

خلاصه: امروزه استفاده از بتن های نوین در حال گسترش است، یکی از انواع این نوع بتن، بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی است که شناخت خواص رئولوژی و مکانیکی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. ساخت بتن و انجام آزمایش های مربوط به آن هزینه های مختص به خود را داراست، یکی از راه کارهای کاهش این هزینه ها استفاده از روش هایی است که بتواند خواص بتن را پیش بینی کند. در این تحقیق در قسمت اول از سنگدانه های گران و بازالت، میکرو سیلیس، خاکستر بادی، نانو سیلیس و الیاف فولادی جهت ساخت بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی (UHPPSCC) استفاده شده و خواص رئولوژی، مقاومت فشاری، کششی و ریزساختار آن بررسی شده است. جهت صرفه جویی در هزینه های ساخت و در قسمت دوم این تحقیق، پیش بینی و تخمین دو شبکه عصبی مصنوعی ANN-GA (ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک) و RBF-NN (شبکه عصبی توابع بنیادی شعاعی) از خواص رئولوژی بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی بررسی شده است. خواص رئولوژی بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته شامل قطر جریان اسلامپ (D)، زمان جریان اسلامپ (T₅₀)، آزمایش قیف V و آزمایش جعبه L است. نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده مقاومت فشاری و کششی بالا و قرار گرفتن خواص رئولوژی در محدوده مورد پذیرش EFNARC است. تخمین و پیش بینی دو شبکه عصبی مورد بررسی از خواص رئولوژی این نوع بتن، نشان دهنده دقت قابل قبول پیش بینی هر دو شبکه عصبی دارد. در میان این دو شبکه عصبی مصنوعی، دقت پیش بینی ANN-GA بیشتر است.

۱- مقدمه

خود تراکم باگذشت زمان تغییر می کند و تابعی از پدیده های فیزیکی و شیمیایی است. پدیده هیدراتاسیون سیمان باگذشت زمان باعث کاهش کارایی بتن خود تراکم می شود [۵]. مواد پوزولانی و زمان گیرش سیمان در عملکرد بتن تازه و خواص رئولوژی آن تأثیر چشم گیری دارد، البته مقدار این مواد در اثر گذاری آن فاکتور مهمی به شمار می رود [۶]. نوع دیگری از بتن که مقاومت کششی در آن بهبود یافته، بتن الیافی است. بتن مسلح الیافی ماده ای مرکب از سیمان پرتلند معمولی، سنگدانه های ریزودرشت و الیاف است. انواع زیادی از الیاف در مخلوط های بتنی برای استفاده از خواص مختلف آن ها وجود دارد [۷ و ۸]. نوعی از بتن تولید شده است که استفاده از آن در حال گسترش است. بتن فوق توانمند عضو یک کلاس ویژه از مواد سیمانی است که خواص مکانیکی و دوام بسیار بالا را خود نشان می دهد [۹ و ۱۰]. بتن فوق توانمند (UHPC) نسل جدیدی از بتن با مقاومت فشاری بالا و دوام بیشتر است که کاربردهای متنوعی از جمله ساخت سازه هایی مانند پل ها و نیروگاه های هسته ای است. این نوع بتن

بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی تکنولوژی نوین در شاخه بتن های با عملکرد بالا محسوب می شود. بتن پر مقاومت و خود تراکم که از انواع بتن توانمند هستند، هر یک دارای ویژگی های منحصر به فرد بوده و ترکیب آن ها با الیاف بر خواص رئولوژی و مکانیکی و دوام بتن حاصله تأثیر چشم گیری می گذارند. بتن خود تراکم در سازه های بتن مسلح عملیات بتن ریزی را تسهیل و با توجه به روانی مناسب عملکرد مناسبی در نفوذ میان آرماتورها داشته و باعث تقویت سازه شده است [۱]. در بتن خود تراکم عملکرد بتن سخت شده مانند مقاومت، دوام و کیفیت سطحی بهبود یافته است. در این نوع بتن نیاز به عملیات تراکم وجود ندارد [۲]. ویژگی بارز بتن خود تراکم خواص رئولوژی آن است. رئولوژی ابزار منطقی برای شناسایی و توصیف رفتار جریان، اتلاف جرم، پایداری و تراکم پذیری ذرات سیمان تازه بر پایه خمیر سیمان، ملات و بتن است [۳ و ۴]. یکی از عوامل موثر در ویژگی بتن تازه هیدراتاسیون است. خواص رئولوژی بتن



با خواص عالی که دارد می تواند ویژگی های بتن الیافی و خودتراکم را به صورت همزمان تا برآورده سازد [۱۱]. افزودن الیاف به بتن فوق توانمند، باعث افزایش قابل توجه مقاومت آن بعد از ترک خوردن می شود. در این نوع بتن کاهش شکنندگی، افزایش شکل پذیری و دوام بهبود یافته واز نفوذپذیری آن کاسته شده است [۱۲ و ۱۳]. یک ماده ساختمانی پیشرفته به نام بتن فوق توانمند الیافی توسعه یافت که به طور قابل توجهی مزیت رقابتی بودن مواد بر پایه سیمان را هم از نقطه نظر فناوری و هم از نقطه نظر فنی افزایش داده است به نحوی که خواص مختلف در آن از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی و دوام بهبود چشم گیری یافته است [۱۴ و ۱۵]. با توجه به خواص مکانیکی و دوام بالا، بتن فوق توانمند الیافی در سازه های پیچیده و مهم مورد استفاده قرار گرفته است و نیاز رو به گسترش به بتن های با کاربرد های خاص صنعت ساخت و ساز را به خوبی پوشش داده است [۱۶ و ۱۷]. سنگدانه گارنت می تواند به بهبود ویژگی ها بتن کمک نماید. گارنت موجود در بتن باعث کاهش جذب آب و افزایش کارایی می شود [۱۸]. بازالت هم به صورت الیاف و هم به صورت سنگدانه در بتن کاربرد دارد. استفاده از سنگدانه بازالت در بتن فوق توانمند باعث افزایش مقاومت فشاری بتن تا 144 MPa شده است [۱۹]. مواد پوزولانی و الیاف هر کدام به صورت جداگانه ب خواص بتن تاثیر گذار هستند. از این دو نوع مصالح به صورت همزمان هم امکان استفاده وجود دارد. در تحقیقی بتن الیافی حاوی مواد پوزولانی و بتن معمولی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد مواد پوزولانی باعث بهبود خواص بتن شده است [۲۰ و ۲۱]. به عنوان ماده بسیار فعال، مواد مبتنی بر سیلیکا نقش بسیار مهمی در افزایش خواص بتن فوق توانمند الیافی ایفا می کند، چون می تواند حفره های کوچک را در بتن پر کند و هیدراسیون سیمان را تحریک کند بتن فوق توانمند حاوی مواد میوزولانی مبتنی بر سیلیکا کاربردهای متنوعی از جمله استفاده در سازه هایی که در شرایط اقلیمی مهاجم هستند، سازه های دریایی، عرشه پل، تونل ها داشته و کاربرد آن رو به افزایش است [۲۲ و ۲۳]. نانو سیلیس موجب افزایش هیدراسیون سیمان و مقاومت در سنین بالا شده و علاوه بر افزایش مقاومت فشاری در بهبود دوام بتن نیز موثر است [۲۴].

شبکه عصبی مصنوعی (ANN) یک روش مؤثر برای پیش بینی مقادیر خروجی است زمانی که داده های ورودی زیادی برای آن خروجی ها وجود دارد. در تحقیقی که بتن مورد بررسی در آن حاوی میکرو سیلیس بود، صد و پنجاه دسته داده برای آموزش شبکه عصبی استفاده شد و نتایج در یک محدوده قابل قبول قرار گرفت [۲۵]. در پژوهشی دیگر الگوریتم پس انتشار خطا برای آموزش شبکه استفاده و ساختارهای مختلف شبکه عصبی بررسی گردید و نتایج

رضایت بخشی به دست آورده شد [۲۶]. بر آورد مقاومت فشاری با استفاده از روش آزمایش بسیار پرهزینه و زمان بر است و یک خطای کوچک منجر به تکرار کار می شود. برای غلبه بر این مشکل، از روش های جایگزین برای پیش بینی مقادیر مقاومت فشاری استفاده می شود [۲۷]. برای تخمین مقاومت فشاری بتن از دو روش محاسبات نرم استفاده شد، نتایج نشان داد هر دو روش عملکرد موفقی در پیش بینی مقاومت فشاری داشته اند [۲۸]. مقاومت فشاری به عنوان مهم ترین ویژگی خواص مکانیکی بتن شناخته می شود. برای پیش بینی مقاومت فشاری از روش های مختلفی استفاده می شود. استفاده از ANFIS و ANN جهت پیش بینی مقاومت فشاری SCC نتایج نسبتاً دقیقی را حاصل می کند. می توان از شبکه های عصبی مصنوعی ترکیبی برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن خود تراکم روز استفاده کرد. این شبکه ها می توانند روابط غیر خطی و پیچیده را به طور مستقیم دوباره برقرار کنند. در تحقیقی که در ۲۰۲۰ انجام شده شبکه عصبی ترکیبی جهت پیش بینی مقاومت فشاری بتن خود تراکم استفاده شد که دقت نتایج بسیار بالا و قابل قبول بود [۲۹]. در تحقیق دیگری برای پیش بینی مقاومت فشاری بتنی با نسبت آب به سیمان و عبار مختلف سیمان از دو نوع ANN استفاده شد. نتایج حکایت از پیش بینی مطلوب، خطای کم و قابل قبول هر دو شبکه عصبی مصنوعی داشت [۳۰]. برای پیش بینی مدول الاستیک بتن خود تراکم از الگوریتم کلنی زنبور عسل استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد پیش بینی این الگوریتم از مدول الاستیک بتن خود تراکم قابل قبول است [۳۱]. در پژوهشی که در سال ۲۰۱۹ انجام شده، برای پیش بینی ویسکوزیته و جریان اسلامپ بتن خود تراکم در هوای گرم از شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. نتایج حاکی از پیش بینی مطلوب شبکه عصبی از این دو ویژگی بتن خود تراکم است [۳۲]. برای پیش بینی جریان اسلامپ و مقاومت فشاری بتن خود تراکم حاوی میکرو سیلیس و خاکستر بادی از ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شد و نتایج قابل قبولی حاصل شد [۳۳].

امروزه هزینه ساخت بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی (UHPSCC) روبه افزایش است. از طرف دیگر درک خواص مکانیکی و رئولوژی UHP-SCC و پیش بینی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر با استفاده از انواع مختلف شبکه عصبی بتوان خواص رئولوژی UHPSCC را بادقت بالایی پیش بینی کرد، در هزینه و زمان ساخت این نوع بتن صرفه جویی خواهد شد. به همین دلیل در این تحقیق علاوه بر انجام آزمایش های رئولوژی، مقاومت فشاری و کششی روی بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی (UHPSCC) به صورت آزمایشگاهی، با استفاده از نرم افزار متلب^۲ میزان دقت پیش بینی و عملکرد ترکیب

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی مصالح پوزولانی مورد استفاده

Table 1. Chemical compositions of pozzolanic materials used

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Mgo	ZRO ₂	LOI
سیمان	۲۰/۶	۴/۸۳	۶۳/۵۶	۰/۵۲	۰/۳۴	-	۲/۴۱	۳/۳۷	۲/۲۳	-	۲/۱
خاکستر بادی	۴۹/۶۸	۲۴/۲۳	۴/۱۷	۶/۱۵	۰/۸۸	۰/۰۲۰۵	۱/۰۶	۶/۵۴	۲/۱۳	-	۳/۵۵
نانو سیلیس	۹۹/۹	۰/۰۷۹	-	-	۰/۴۶	-	-	-	-	-	۰/۲
میکرو سیلیس	۹۶	۰/۲۵	۰/۴۸	-	-	-	-	۰/۱۵	۰/۱۲	۳	-

جدول ۲. مشخصات الیاف فولادی مصرفی

Table 2. Specifications of used steel fiber

طول (mm)	قطر (mm)	وزن مخصوص (g/cm ³)	مقاومت کششی (MPa)
۳۵	۰/۸	۷/۸	۱۰۰۰

جدول ۳. مشخصات مکانیکی سنگدانه‌های مصرفی

Table 3. Mechanical specifications of used aggregates

مصالح	درصد جذب آب
ماسه	۲/۸
گازنت	۰/۸
بازالت	۲

است. ترکیبات شیمیایی پوزولان مورد استفاده در این پژوهش به شرح جدول ۱ است [۳۵].

مشخصات الیاف فولادی دوسر قلاب مورد استفاده در جدول ۲، مشخصات مکانیکی و ترکیبات شیمیایی سنگدانه‌ها در جدول ۳ و ۴ بیان شده است.

۲-۲- ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

باتوجه به اینکه هدف، ساخت بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی است، علاوه بر مقاومت فشاری و کششی بالا، ویژگی‌های رئولوژی این نوع بتن از اهمیت بالایی برخوردار است. به استناد تحقیقات گذشته و تجربیات آزمایشگاهی مجموع مواد پوزولانی، ۶۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب در تمام مخلوط‌ها ثابت در نظر گرفته شده است [۳۶ و ۳۷]. میزان مصرف خاکستر بادی و میکرو سیلیس به

شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک^۱ (ANN-GA) و شبکه عصبی توابع بنیادی شعاعی^۲ (RBF-NN) از خواص رئولوژی بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی بررسی شده است.

۲- مواد و مصالح

۲-۱- مصالح مصرفی

منحنی دانه‌بندی درشت‌دانه مصرفی (شامل سنگدانه‌های گازنت و بازالت) در محدوده استاندارد ASTM C33 بوده و ماسه مصرفی زیر دارای مدول نرمی ۲/۱۷ است. سیمان استفاده شده در ساخت نمونه‌های بتنی از نوع سیمان پرتلند تیپ ۱-۵۲۵ مطابق ASTM C 150 است [۳۴]. نانو سیلیس مورد استفاده در این پژوهش با خلوص ۹۹/۹۹٪ و مطابق ASTM C1240 است که ترکیبات شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. در این پژوهش از میکرو سیلیسی که ۹۸٪ اندازه ذرات آن کمتر از ۴۵ میکرون و مطابق استاندارد ASTM C1240، استفاده شده است. خاکستر بادی مورد استفاده در این تحقیق پوزوکریت ۱۰۰ و مطابق ASTM C 618 است که از ۱۰۰٪ خاکستر بادی کلاس F با اندازه دانه‌های ریزتر از ۱۰ میکرون و میانگین ۳ میکرون تشکیل شده است. در ساخت مخلوط‌ها از فوق روان‌کننده بر پایه پلی کربوکسیلیک اتر استفاده شده

1 Artificial Neural Network - Genetic Algorithm

2 Radial Basis Function- Neural Network

جدول ۴. ترکیبات شیمیایی سنگدانه‌های مصرفی

Table 4. Chemical compositions of used aggregates

	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	TiO_2	$Fe_2O_3 + FeO$	MnO
گازنت	۳۷/۲	۲	۲۰/۶	۶/۱	-	-	۳۳/۲	۰/۶
بازالت	۵۰/۵	۸/۵۱۶	۱۷/۳۹	۳/۷۰۳	۱۱/۸۰	۰/۶۷۳	-	-

جدول ۵. طرح اختلاط بتن فوق توانمند خود تراکم مرجع (kg / m^3)

Table 5. Reference mix design of ultra-high performance self-compacting concrete (kg / m^3)

طرح	ماسه	گازنت	بازالت	میکروسیلیس	خاکستر بادی	فوق روان کننده	سیمان	W/B
UHPSCC (1)	۷۰۰	۵۲۵	۵۲۵	۶۳	۹۴/۵	5	۴۷۲/۵	۰/۴
UHPSCC (2)	۷۰۰	۵۲۵	۵۲۵	۶۳	۹۴/۵	۶/۳	۴۷۲/۵	۰/۳۵
UHPSCC (3)	۷۰۰	۵۲۵	۵۲۵	۶۳	۹۴/۵	۸/۲	۴۷۲/۵	۰/۳
UHPSCC(C)	۷۰۰	۵۲۵	۵۲۵	۶۳	۹۴/۵	۱۰/۰۸	۴۷۲/۵	۰/۲۵

از برداشتن مخروط أبرام^۲ است. برای این آزمایش باید بتن را درون مخروط اسلامپ ریخت سپس با بلند کردن مخروط اجازه داد تا بتن در سطح افق جاری شود در انتها میانگین دو قطر عمود بر هم بتن خود تراکم به عنوان قطر جریان اسلامپ گزارش می‌شود. آزمایش زمان جریان اسلامپ (T50) معیاری برای تعیین میزان ویسکوزیته بتن خود تراکم است. این آزمایش مشابه به آزمایش قطر جریان اسلامپ است با این تفاوت که زمان لازم برای اینکه قطر بتن بعد از برداشتن مخروط اسلامپ به ۵۰ سانتی متر برسد، را باید اندازه گیری نمود. آزمایش جعبه L^۳ برای تعیین توانایی عبور و پراکندگی بتن خود تراکم محصور شده، از میلگرد است. جعبه L از ۲ قسمت مکعب مستطیلی تشکیل شده است که به صورت L به هم متصل شده‌اند و توسط یک دریچه متحرک از هم جدا هستند. قسمت قائم آن با بتن خود تراکم پر می‌شود و بعد از برداشتن دریچه، بتن با عبور از میلگردها وارد قسمت افقی جعبه L می‌شود. بعد از توقف حرکت بتن ارتفاع بتن در دو انتهای قسمت افقی جعبه L اندازه گیری می‌شود. نسبت ارتفاع بتن در دو انتهای افقی جعبه L نشان دهنده توانایی عبور بتن از میلگرد است. از آزمایش قیف V^۴ برای ارزیابی لزجت خمیری و قابلیت پر کردن مخلوط بتن استفاده می‌شود. در این آزمایش بعد از ریختن بتن خود تراکم در محفظه

ترتیب ۱۵ و ۱۰ درصد وزنی سیمان است [۳۸]. ابتدا مطابق طرح‌های اختلاط جدول شماره ۵ چهار طرح با نسبت آب به مواد سیمانی مختلف ساخته شد، سپس از میان آنها طرح مخلوط بتن خود تراکم فوق توانمندی را که بیشترین مقاومت فشاری را داشت به اختصار UHPSCC نام گذاری و به عنوان بتن مرجع در نظر گرفته شد.

به بتن C (UHPSCC) به مقدار ۱، ۱/۵، ۲ درصد وزنی مواد سیمانی و الیاف فولادی با مقادیر ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد حجمی الیاف فولادی افزوده شده است [۱۰]. پس از مخلوط کردن مصالح و ساخت بتن، بخشی از بتن تولید شده جهت انجام آزمایش‌های بتن تازه در نظر گرفته شد. بخش دیگر بتن جهت انجام آزمایش‌های بتن سخت شده در قالب‌های مکعبی و استوانه‌ای ریخته شد و پس از ۲۴ ساعت قالب‌ها باز و نمونه تا زمان انجام آزمایش‌ها در حوضچه آب با دمای 23 ± 2 °C عمل‌آوری شدند.

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- آزمایش‌های صورت گرفته روی بتن تازه

آزمایش قطر جریان اسلامپ^۱ یک روش معمول برای تعیین ویژگی جاری شدن بتن تازه در سطح افقی بدون مانع است و برابر قطر میانگین بتن پس

2 Abram
3 L-box
4 V-funnel flow

1 Slump flow

جدول ۶. خواص رئولوژی بتن فوق توانمند خود تراکم الیافی

Table 6. Rheological properties of fiber-reinforced ultra-high performance self-compacting concrete

مخلوط	جریان اسلامپ D (mm)	جریان اسلامپ T50 (s)	جریان قیف V Time (s)	جعبه L H ₂ /H ₁
UHPSCC (1)	۸۱۰	۹/۱	۴/۳	۱/۲
UHPSCC (2)	۷۷۰	۲/۷	۴/۹	۱
UHPSCC (3)	۷۴۰	۳/۴	۵/۷	۰/۹۹
UHPSCC (C)	۷۲۰	۳/۸	۶/۱	۰/۹۷
C+(1NS-1SF)	۷۰۰	۴/۶	۷/۵	۰/۹۱
C+(1NS-1.5SF)	۶۹۰	۴/۸	۸/۶	۰/۸۸
C+(1NS-2SF)	۶۶۰	۵	۹/۳	۰/۸۷
C+(1NS-2.5SF)	۶۵۰	۵/۱	۱۰/۷	۰/۸۵
C+(1NS-3SF)	۵۸۰	۵/۳	۱۱/۹	۰/۸۱
C+(1.5NS-1SF)	۶۷۰	۴/۷	۷/۹	۰/۸۹
C+(1.5NS-1.5SF)	۶۶۰	۴/۸	۸/۸	۰/۸۸
C+(1.5NS-2SF)	۶۶۰	۵	۹/۷	۰/۸۵
C+(1.5NS-2.5SF)	۶۵۰	۵/۲	۱۱/۲	۰/۸۲
C+(1.5NS-3SF)	۶۲۰	۵/۴	۱۲/۱	۰/۷۸
C+(2NS-1SF)	۶۶۰	۴/۸	۸/۴	۰/۸۵
C+(2NS-1.5SF)	۶۶۰	۴/۹	۹/۵	۰/۸۲
C+(2NS-2SF)	۶۵۰	۵/۲	۱۰/۹	۰/۷۹
C+(2NS-2.5SF)	۶۱۰	۵/۵	۱۲/۲	۰/۷۵
C+(2NS-3SF)	۶۰۰	۵/۹	۱۲/۹	۰/۷۱
Acceptance criteria of SCC suggested by EFNARC	۸۰۰-۶۵۰	۵-۲	۱۲-۶	۰/۸-۱

در بتن مرجع (C) مورد آزمایش پارامترهای مربوط به بتن تازه در محدوده مورد پذیرش EFNARC قرار دارد. با افزایش میزان نانو سیلیس و الیاف فولادی به بتن مرجع کارایی بتن کاهش یافته است به طوری که در آزمایش قطر جریان اسلامپ وجود ۳٪ الیاف فولادی، در آزمایش (T50 (s) جریان اسلامپ وجود ۲/۵٪ الیاف فولادی و در آزمایش قیف V افزودن ۳٪ الیاف فولادی به طرح سبب خروج از محدوده پذیرش شده است. در آزمایش قیف V کاملاً مشهود است الیاف فولادی تأثیر منفی در خواص بتن تازه داشته و نانو سیلیس نیز سبب کاهش کارایی و افزایش لزجت بتن تازه شده است. باتوجه به این واقعیت که نانوذرات سیلیس آب بیشتری جذب می کنند قطر جریان اسلامپ کاهش می یابد. با افزایش نانو سیلیس به طرح، زمان آزمایش قیف V و جریان اسلامپ T50 افزایش یافته است. افزایش میزان نانو سیلیس و الیاف فولادی در طرح ها باعث کاهش نسبت H₂/H₁ در آزمایش L-box شده است.

قیف مانند، زمان لازم برای تخلیه بتن اندازه گیری می شود و به عنوان زمان جریان قیف V ثبت می شود. آزمایش های رئولوژی در این تحقیق بر اساس EFNARC صورت گرفته است [۳۹ و ۴۰] هر کدام از آزمایش های انجام شده خواص رئولوژی سه بار انجام شده است. در جدول شماره ۶ میانگین خواص رئولوژی مربوط به طرح های مختلف ارائه شده است.

در جدول شماره ۶ نام گذاری و معرفی طرح ها به صورت زیر است:

UHPSCC(C): بتن خود تراکم فوق توانمند (بتن مرجع)

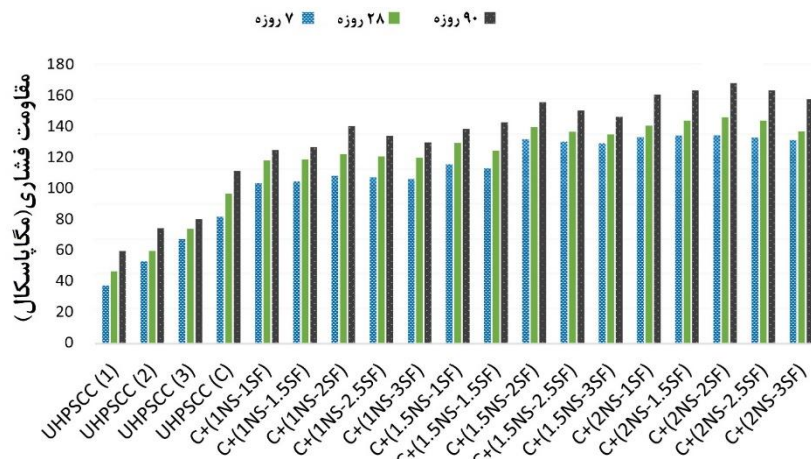
C+(2NS-1SF): بتن مرجع حاوی ۲٪ وزنی مواد سیمانی نانو سیلیس

و ۱٪ حجمی الیاف فولادی

NS: نانو سیلیس

SF: الیاف فولادی.

تحلیل نتایج حاصل از آزمایش های بتن تازه نشان داد با وجود مواد پوزولانی



شکل ۱. مقاومت فشاری بتن فوق توانمند خود تراکم الیافی

Fig. 1. Compressive strength of fiber-reinforced ultra-high performance self-compacting concrete

(C) و بتنی که در آن ۱٪ نانو سیلیس و ۱٪ الیاف فولادی استفاده شده است ۲۶٪ اختلاف مقاومت فشاری قابل مشاهده است. با افزایش درصد نانو سیلیس و الیاف فولادی این میزان افزایش مقاومت فشاری بیشتر شده به طوری که درصد افزایش مقاومت فشاری بتن مرجع و مقاومترین بتن بررسی شده در این تحقیق به بیش از ۳۰٪ می‌رسد. طرح شامل ۲٪ نانو سیلیس و ۲٪ الیاف فولادی بیشترین مقاومت فشاری را در میان طرح‌ها داشته و نسبت به طرح حاوی ۱٪ نانو سیلیس و ۱٪ الیاف فولادی ۲۴٪ افزایش را نشان می‌دهد. در طرح‌های حاوی ۲٪ نانو سیلیس با افزایش بیش از ۲٪ الیاف فولادی مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد طرح C+(2NS-2SF) از نظر مقاومت فشاری طرح بهینه است.

۳-۲-۲- آزمایش مقاومت کششی

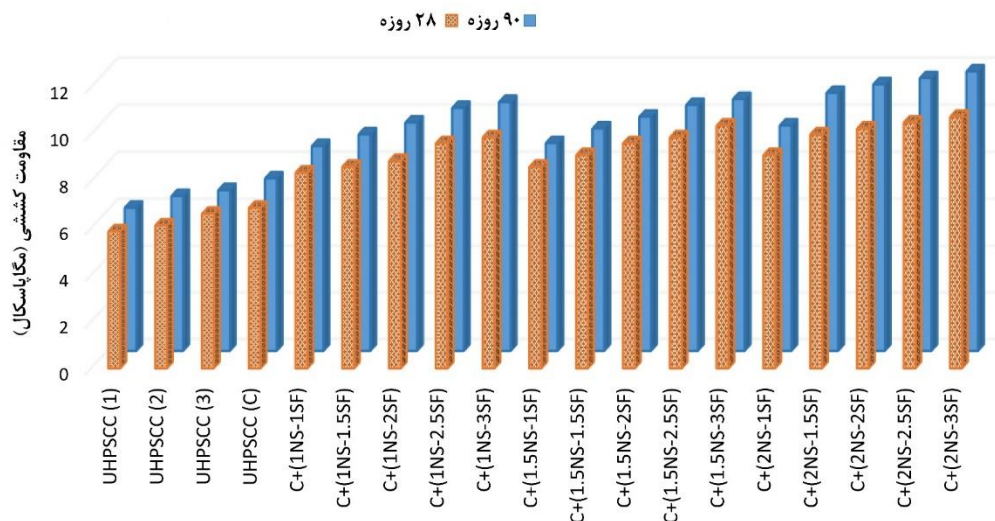
مقاومت کششی بتن معمولاً به صورت مستقیم و با شکافت کششی که به نام آزمایش برزیلی نیز شناخته می‌شود، تعیین می‌گردد. در این تحقیق مقاومت کششی بر روی نمونه استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتی متر و بر مبنای استاندارد ASTM C496 انجام شده است [۴۴]. جهت انجام آزمایش مقاومت کششی برای هر طرح و در هر سن سه نمونه در نظر گرفته شده و میانگین نتایج آن در شکل ۲ ارائه شده است. واکنش‌های پوزولانی، اثرات آن بر روی ناحیه انتقال و وجود الیاف باعث افزایش مقاومت کششی شده است. به دلیل واکنش پوزولانی، هیدروکسید کلسیم موجود در بتن کاهش پیدا کرده و ضمن بهبود ناحیه انتقال در بتن، باعث افزایش مقاومت کششی شده است. نتایج آزمایش مقاومت کششی بیانگر این موضوع

۳-۲- آزمایش‌های صورت گرفته روی بتن سخت شده

۳-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری به عنوان مهم‌ترین نماینده رفتار مکانیکی بتن بر روی نمونه‌های مکعبی و بر اساس استاندارد BS EN-12390 صورت پذیرفت [۴۱]. در این آزمایش از نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شد. برای انجام این آزمایش در هر سن و برای هر طرح سه نمونه در نظر گرفته شده است. نتایج میانگین مقاومت فشاری آزمونه‌های UHPSCC در شکل ۱ ارائه شده است.

بتن توانمند بتنی است که ویژگی‌های معینی برای یک کاربرد و شرایط خاص در آن گسترش یافته است. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به سهولت در بتن‌ریزی، تراکم بدون جداسدگی، مقاومت فشاری اولیه بالا و مقاومت کششی قابل توجه اشاره کرد [۴۲]. اگر مقاومت فشاری از ۸۰ MPa بیشتر شود این بتن در دسته فوق توانمند قرار می‌گیرد [۴۳]. شکل ۱ نشان‌دهنده مقاومت فشاری بسیار بالا و قابل توجه این نوع بتن است. یکی از دلایل این مقاومت فشاری بالا علاوه بر وجود مواد پوزولانی در طرح مخلوط، سنگدانه‌های مورد استفاده در این نوع بتن است. سنگدانه‌های گارنت و بازالت دارای عناصری هستند که باعث سختی و استحکام بالای این سنگدانه‌ها شده است. اکسید آهن موجود در سنگدانه گارنت، شکست‌های درون دانه‌ای و فرا دانه‌ای را کاهش می‌دهد. وجود سنگدانه‌های گارنت و بازالت باعث افزایش مقاومت فشاری بتن و ارتقا استحکام بتن تولیدی شده است. باتوجه به شکل ۱ بین مقاومت فشاری بتن کنترلی



شکل ۲. مقاومت کششی بتن فوق توانمند خود تراکم فیافی

Fig. 2. Tensile strength of fiber-reinforced ultra-high performance self-compacting concrete

است و در ناحیه انتقال میان سطحی (ITZ) غلظت بالایی دارد وارد واکنش شده‌اند. محصول این واکنش، تولید ژل کلسیم هیدرات سیلیکات است که سبب کاهش تخلخل و افزایش قدرت پیوند خمیر سیمان و سنگدانه است. در واقع افزودن نانوسیلیس به ذرات سیمان موجب شکل‌گیری $H_2(SiO_4)^{(2-)}$ شده و با Ca^{2+} موجود شروع به واکنش می‌کند و C-S-H اضافی تولید می‌شود. تشکیل تعداد زیادی از این ذرات در شکل ۳ (ت) موجب شتاب بخشیدن در زمان هیدراسیون بتن شده است. توده آمورف در تمامی سطح شکست، یکپارچه و متصل است. ذرات ریز نانو موجب پل بندی درزها در سطح مشترک بین سنگدانه و ماتریس سیمان شده است. سنگدانه‌های مصرفی موجب افزایش تراکم پذیری، کاهش جدا شدگی و جمع شدگی شده و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری، کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام را به دنبال دارد.

۵- شاخص‌های عملکرد مدل و ساختار ANN-GA و RBF-NN

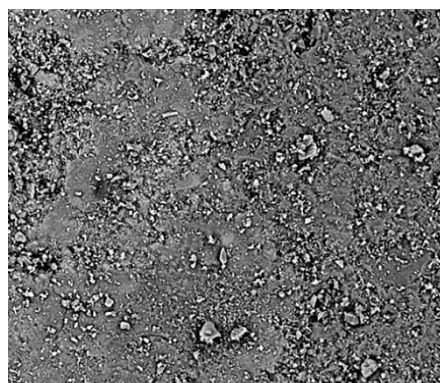
در حالت کلی، یک شبکه عصبی زیستی از مجموعه یا مجموعه‌ای از نورون‌ها به صورت فیزیکی به هم متصل یا از لحاظ عملکردی به هم وابسته تشکیل شده است. هر نورون می‌تواند به تعداد بسیار زیادی از نورون‌ها وصل باش دو تعداد کل نورون‌ها و اتصالات بین آن‌ها می‌تواند بسیار زیاد باشد. عملکرد شبکه عصبی برگرفته از کارایی نورون‌های زیستی است. نقطه مقابل نورون‌های زیستی نورون‌های مصنوعی است. ساختار نورون‌های مصنوعی شامل دو بخش آموزشی

است که با افزایش میزان الیاف فولادی در طرح مخلوط، مقاومت کششی در طرح C+(1NS-1SF) در قیاس با طرح کنترلی ۰.۲۱٪ افزایش را نشان می‌دهد. مقاومت کششی در هر دو سن (۲۸ و ۹۰ روز) بهبود یافته است، برای نمونه در قیاس طرحی که ۱٪ نانوسیلیس و ۱٪ الیاف فولادی دارد با طرح C+(1NS-3SF) افزایش مقاومت کششی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب ۰.۲۲٪ و ۰.۲۰٪ افزایش یافته است.

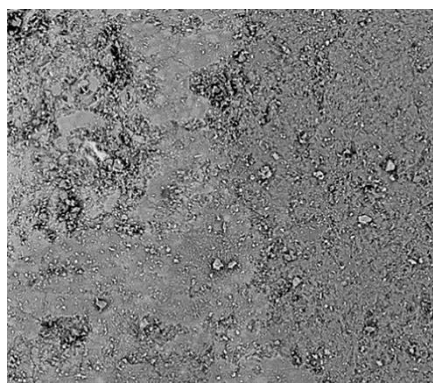
۴- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بتن خود تراکم فوق توانمند فیافی در شکل ۳ آورده شده است. تصاویر مربوط به طرح C+(2NS-2SF)، شامل ۲٪ نانو سیلیس و ۲٪ الیاف فولادی است که از نظر مقاومت فشاری دارای بیشترین مقاومت و بهترین عملکرد است. بررسی ریزساختار این طرح از بتن خود تراکم فوق توانمند فیافی در شکل ۳ (الف) نشان می‌دهد که ذرات نانو سیلیس موجب ریزتر شدن منافذ شده و از توسعه ریز ترک‌ها جلوگیری کرده، بنابراین مقاومت این نمونه‌ها با توجه به وجود نانو سیلیس افزایش یافته است. با توجه به شکل ۳ (ب) نوع، شکل، بافت سطح دانه‌ها و کانی‌های تشکیل دهنده سنگدانه‌ها موجب کاهش تخلخل و افزایش چسبندگی مصالح به خمیر سیمان شده است. در شکل ۳ (پ) وجود نانو سیلیس و خاکستر بادی موجب شده تا با انجام واکنش پوزولانی مواد چسباننده تولید شوند. این مواد با کلسیم هیدروکسید که ماده‌ای غیر چسباننده

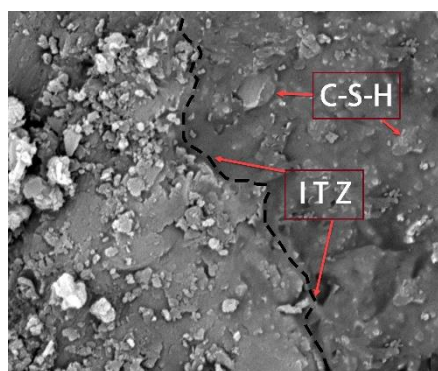
1 Scanning Electron Microscope



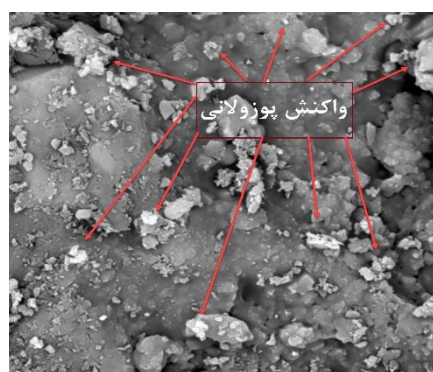
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۳. تصاویر SEM بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی؛ (الف) بزرگنمایی $\times 250$ ، (ب) بزرگنمایی $\times 1000$ ، (پ) بزرگنمایی $\times 15000$ ، (ت) بزرگنمایی $\times 20000$

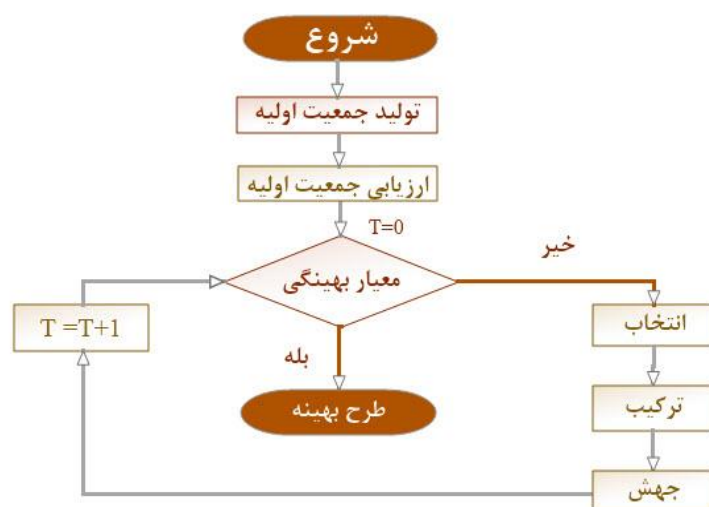
Fig. 3. SEM of fiber-reinforced ultra-high performance self-compacting concrete; (a) magnification $\times 250$, (b) magnification $\times 1000$, (c) magnification $\times 15000$, (d) magnification $\times 20000$

که به اختصار ANN-GA نام‌گذاری شده است. الگوریتم ژنتیک^۲ را می‌توان یک روش بهینه‌سازی تصادفی جهت‌دار دانست که به تدریج به سمت نقطه بهینه حرکت می‌کند. فلوجارت مراحل مختلف الگوریتم ژنتیک در شکل ۴ نشان داده شده است. نوع دیگری از شبکه‌های عصبی که در این پژوهش استفاده شده است که در آن، واحدهای پردازنده، از نظر پردازشی بر موقعیت خاصی متمرکز هستند. این تمرکز، از طریق توابع بنیادی شعاعی^۳ مدل‌سازی می‌شود. شبکه عصبی توابع شعاعی در این پژوهش به صورت RBF-NN نشان داده شده است. این شبکه از شبکه‌های عصبی آماری است که از تکنیک‌های آماری برای طبقه‌بندی الگوها الهام گرفته و یادگیری آن‌ها بر منطق شبکه‌های بیولوژیکی استوار نیست.

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^۱ 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 رئولوژی بتن فوق توانمند الیافی از دو نوع شبکه عصبی استفاده شده است. یکی از شبکه‌های عصبی مصنوعی که در این پژوهش استفاده شده ترکیب شبکه عصبی با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک است

2 Genetic Algorithms
3 Radial Basis Function

1 Artificial Neural Network



شکل ۴. فلوچارت مراحل مختلف الگوریتم ژنتیک

Fig. 4. The flowchart of different stages of the genetic algorithm

در روابط فوق به ترتیب ρ ، S_f ، \hat{S}_t ، \bar{S} ، \bar{S} تعداد نمونه ها، مقدار واقعی، خروجی مدل، میانگین ورودی ها، میانگین خروجی ها و $e_t = \hat{S}_t - \bar{S}$ می باشد.

ساختار اساسی ANN-GA و RBF-NN استفاده شده در این مطالعه شامل سیمان، نانو سیلیس، فوق روان کننده، سنگدانه های گارنت و بازالیت، الیاف فولادی و W/B به عنوان ورودی و چهار آزمایش قطر جریان اسلامپ (D)، زمان جریان اسلامپ (T50)، جریان قیف V و جعبه L به صورت جداگانه به عنوان خروجی شبکه های عصبی در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر در طراحی شبکه عصبی از کل داده ها، ۷۰ درصد آن ها به عنوان داده های آموزش، ۱۵ درصد داده ها به عنوان داده های اعتبارسنجی و ۱۵ درصد داده ها به عنوان داده های تست استفاده شده است. در این تحقیق معماری های مختلف شبکه عصبی از ۲ تا ۱۰ نورون در لایه پنهان در نظر گرفته شد. پس از ۱۵ بار ران کردن هر کدام از معماری شبکه ها و باتوجه به مقادیر $MAPE$ ، $RMSE$ و R^2 تعداد بهینه نورون در لایه پنهان برای هر شبکه مشخص شد. ساختار و پارامترهای ورودی شبکه های عصبی مصنوعی استفاده شده در این پژوهش در شکل ۵ ارائه شده است.

برای ارزیابی کارایی مدل های شبکه های عصبی مورد استفاده نیاز به شاخص های است که بتوان کارکرد مدل ها را در مقایسه با مجموعه داده ها و همچنین نتایج تجربی مورد قضاوت قرارداد. از این رو از شاخص های زیر برای ارزیابی مدل ها و در نهایت مقایسه کارایی آنها نسبت به یکدیگر استفاده شده است:

ضریب همبستگی: (R^2)

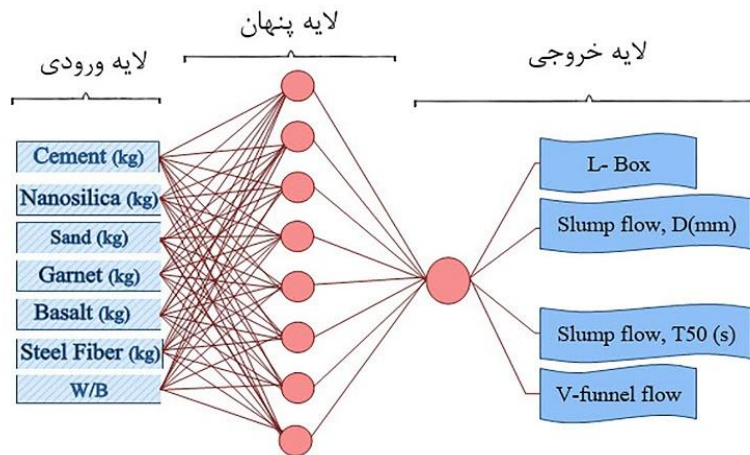
$$R^2 = \left(\frac{\sum_{t=1}^p (s_t - \bar{s})(\hat{s}_t - \bar{\hat{s}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^p (s_t - \bar{s})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^p (\hat{s}_t - \bar{\hat{s}})^2}} \right)^2 \quad (1)$$

میانگین قدر مطلق درصد خطا (MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{\rho} \sum_{t=1}^p \left| \frac{e_t}{s_t} \right| \times 100\% \quad (2)$$

جذر متوسط مربعات خطا (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{\rho} \sum_{t=1}^p e_t^2} \quad (3)$$



شکل ۵. ساختار و پارامترهای ورودی و خروجی شبکه‌های عصبی مصنوعی

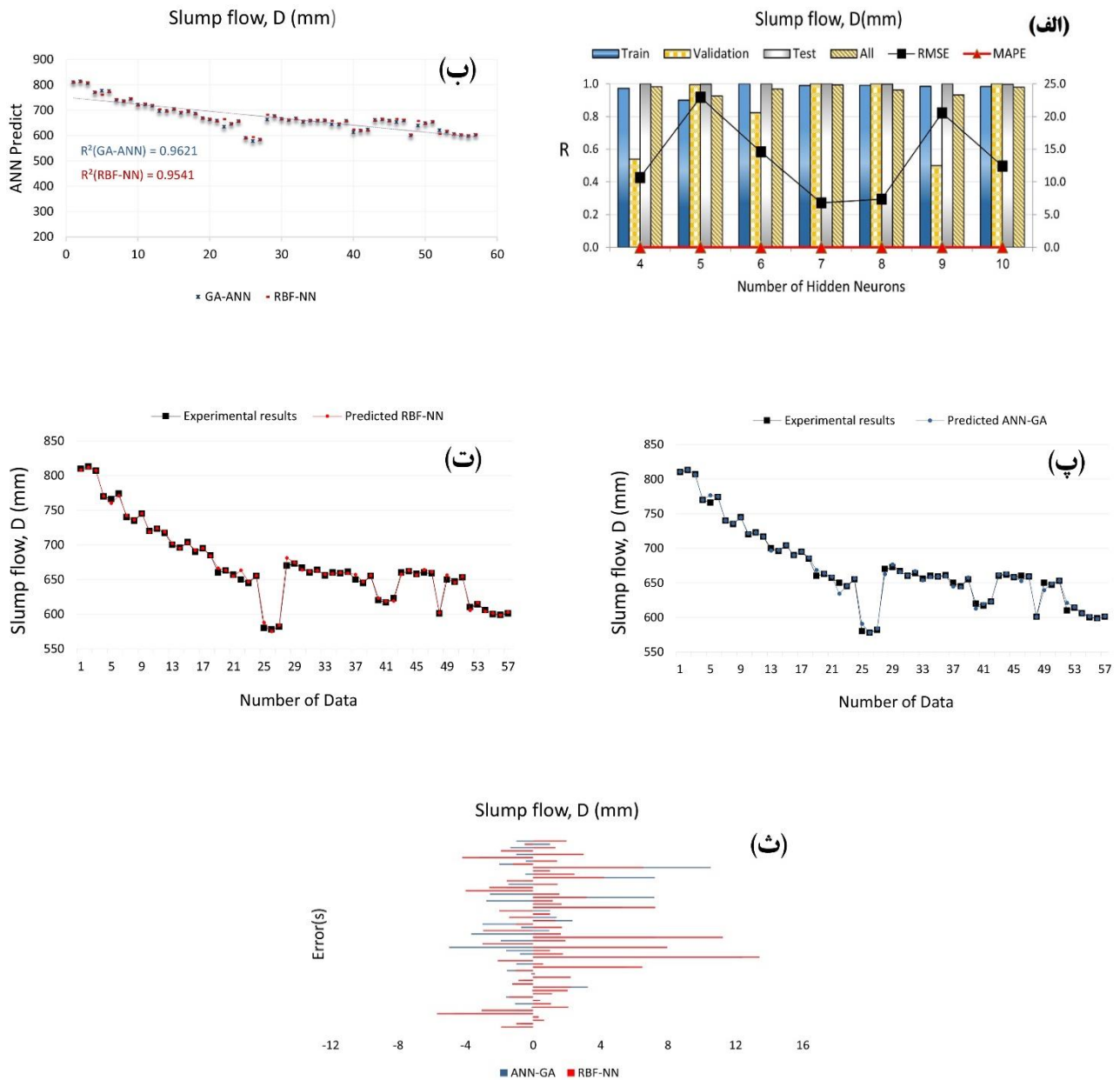
Fig. 5. Structures and input/output parameters of artificial neural networks

شده است. با مقایسه مقادیر خطا و پراکندگی خطاهای حاصل از پیش‌بینی توسط دو شبکه عصبی، میزان خطا در شبکه ANN-GA تقریباً یک‌سوم میزان خطا در RBF-NN است، بنابراین واضح است که در پیش‌بینی مقادیر قطر جریان اسلامپ (D)، شبکه ANN-GA عملکرد مطلوب‌تری داشته است. باتوجه به نتایج فوق بهترین نتیجه پیش‌بینی جریان اسلامپ (D) از شبکه ANN-GA به دست می‌آید و دقت پیش‌بینی این شبکه در این آزمایش دقیق‌تر است.

در شکل ۷ (الف) برای پیش‌بینی زمان جریان اسلامپ (T50) بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی، استفاده از ۹ نورون در لایه پنهان در شبکه عصبی ANN-GA بهترین عملکرد را دارد چون نزدیک‌ترین R^2 را به یک داشته، MAPE و RMSE در آن کمترین مقدار را دارد. شکل ۷ (ب) نشان می‌دهد که ضریب همبستگی در ANN-GA بیشتر است. باتوجه به شکل ۷ (پ) و (ت) نتایج پیش‌بینی شده توسط شبکه‌های ANN-GA و RBF-NN به ترتیب دقتی در حدود ۹۹/۳٪ و ۹۷/۱٪ در مقایسه با داده‌های حاصل از آزمایش زمان جریان اسلامپ (T50) دارند که نشان می‌دهد که شبکه ANN-GA پیش‌بینی دقیق‌تری را ارائه داده است. با مقایسه برآزش داده‌های پیش‌بینی شده مقدار و پراکندگی خطاها توسط دو شبکه عصبی در شکل ۷ (ت) به طور متوسط میانگین خطاها و پراکندگی آن در شبکه ANN-GA کمتر است. واضح است که در پیش‌بینی مقادیر زمان جریان اسلامپ (T50)، شبکه ANN-GA دقت بالاتری داشته است. نتایج نشان می‌دهد که هر دو شبکه برای برآورد جریان اسلامپ (T50) از دقت بالایی برخوردار هستند و هر

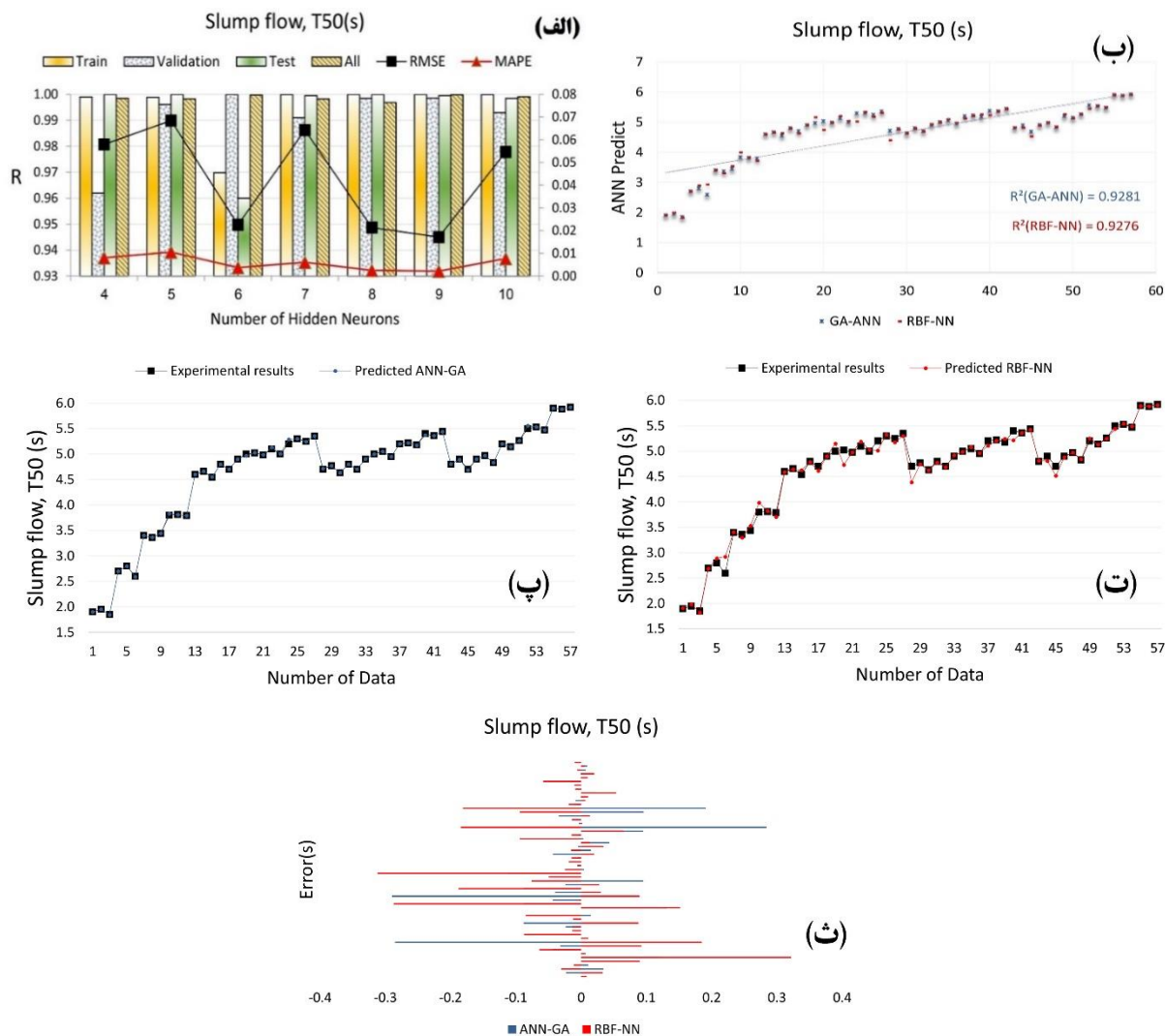
۶- مقایسه و ارزیابی پیش‌بینی‌های شبکه‌های ANN-GA و RBF-NN با نتایج آزمایشگاهی

نتایج مقایسه آزمایش قطر جریان اسلامپ (D) و خروجی‌های شبکه‌های عصبی با تعداد نورون‌های مختلف در لایه پنهان در شکل ۶ (الف) نشان داده شده است. مطابق شکل ۶ (الف)، کمترین میزان RMSE و MAPE، و بیشترین میزان R مربوط به تعداد ۷ نورون در لایه پنهان است؛ بنابراین استفاده از ۷ نورون در لایه پنهان، دقیق‌ترین پیش‌بینی در بین شبکه عصبی برای برآورد جریان اسلامپ (D) بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی را دارد. ضریب همبستگی که معمولاً با R^2 نمایش داده می‌شود، معروف‌ترین معیار سنجش دقت برآزش مدل است. ضریب همبستگی همیشه بین ۰ و ۱ است. غالباً هر قدر این معیار به ۱ نزدیک‌تر باشد، دقت برآزش بیشتر است. نتایج پیش‌بینی و مقایسه هر دو شبکه ANN-GA و RBF-NN برای جریان اسلامپ (D) بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی در شکل ۶ (ب) نشان داده شده است. R^2 در شبکه ANN-GA برابر با ۰/۹۶۲۱ بوده که در مقایسه با ضریب تعیین ۰/۹۵۴۱ در شبکه RBF-NN نشان‌دهنده عملکرد بهتر شبکه ANN-GA است. شکل ۶ (پ) و (ت) نشان می‌دهند که نتایج پیش‌بینی شده توسط شبکه‌های ANN-GA و RBF-NN به ترتیب دقتی در حدود ۹۹٪ و ۹۸/۲٪ در مقایسه با داده‌های حاصل از آزمایش قطر جریان اسلامپ (D) دارند که نشان می‌دهد شبکه ANN-GA پیش‌بینی مطلوب‌تری را ارائه داده است. در شکل ۶ (ث) میزان و پراکندگی خطاها در دو شبکه ANN-GA و RBF-NN آورده



شکل ۶. مقایسه نتایج آزمایش قطر جریان اسلامپ و خروجی دو شبکه ANN-GA و RBF-NN (الف) مقادیر RMSE و R، MAPE در تعداد نوروں‌های مختلف در لایه پنهان. (ب)، (پ) و (ت) مقایسه پیش‌بینی دو شبکه عصبی با نتایج آزمایشگاهی. (ث) مقایسه میزان خطای پیش‌بینی دو شبکه عصبی.

Fig. 6. Comparison of the results of slump flow test and the output of two neural network models, ANN-GA and RBF-NN: (a) values of R, RMSE, and MAPE for different numbers of neurons in the hidden layer; (b), (c), and (d) comparison of the prediction of two neural networks with experimental results; (e) comparison of the prediction error of two neural networks



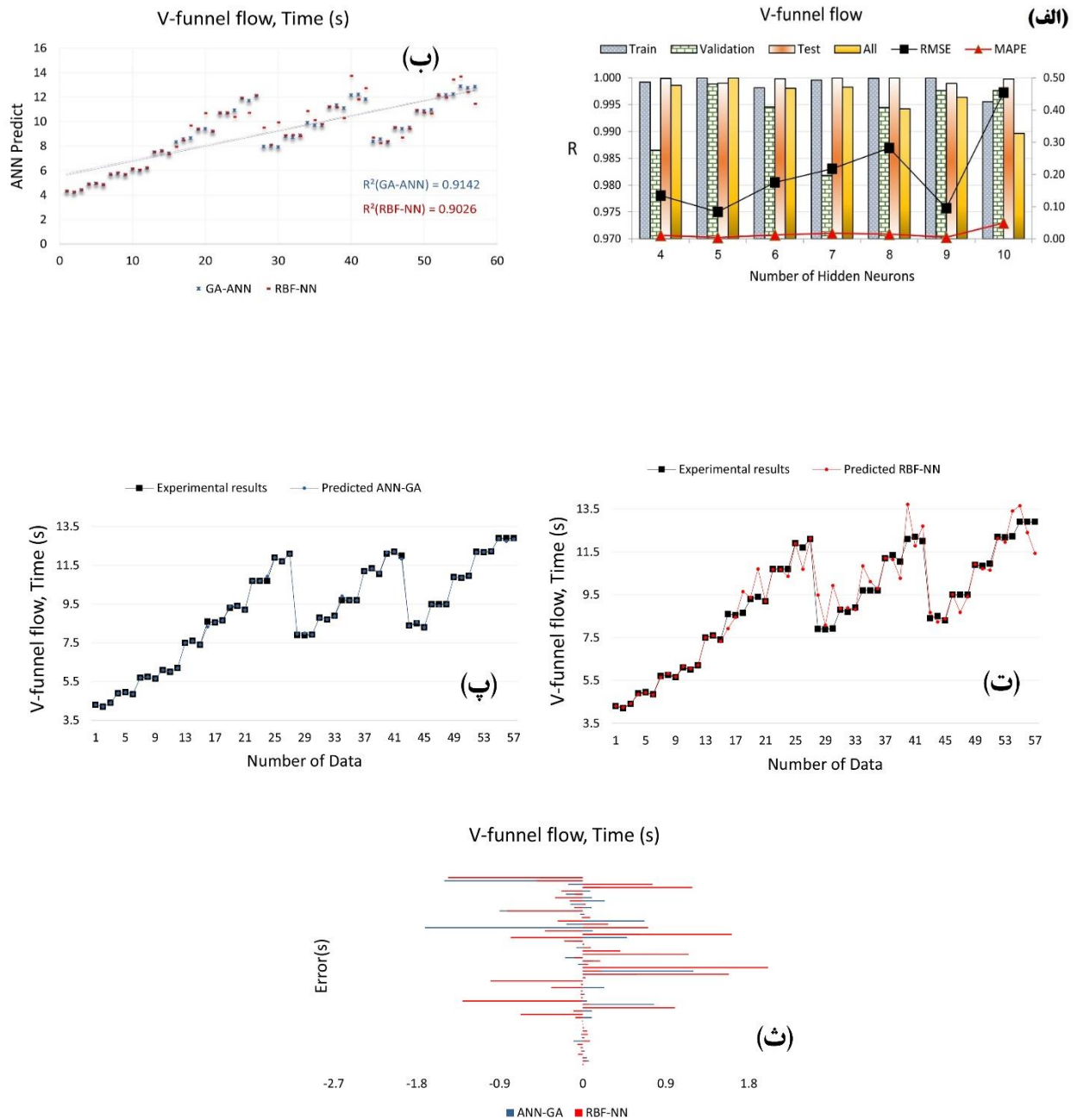
شکل ۷. مقایسه نتایج آزمایش زمان جریان اسلامپ و خروجی دو شبکه ANN-GA و RBF-NN (الف) مقادیر RMSE، R، و MAPE در تعداد نورون‌های مختلف در لایه پنهان. (ب)، (پ) و (ت) مقایسه پیش‌بینی دو شبکه عصبی با نتایج آزمایشگاهی. (ث) مقایسه میزان خطای پیش‌بینی دو شبکه عصبی.

Fig. 7. Comparison of the results of the slump flow time test and the output of two neural network models, ANN-GA and RBF-NN: (a) values of R, RMSE, and MAPE for different numbers of neurons in the hidden layer; (b), (c), and (d) comparison of the prediction of two neural networks with experimental results; (e) comparison of the prediction error of two neural networks

جریان قیف V، با توجه به مقادیر R، RMSE و MAPE، ۵ نورون است. در شکل ۸ (ب) ضریب R^2 شبکه ANN-GA نسبت به RBF-NN به عدد یک نزدیک‌تر است که نشان‌دهنده برازش بهتر در این شبکه است. در شکل ۸ (پ) و (ت) مقایسه داده‌های آزمایشگاهی حاصل از آزمایش زمان جریان قیف

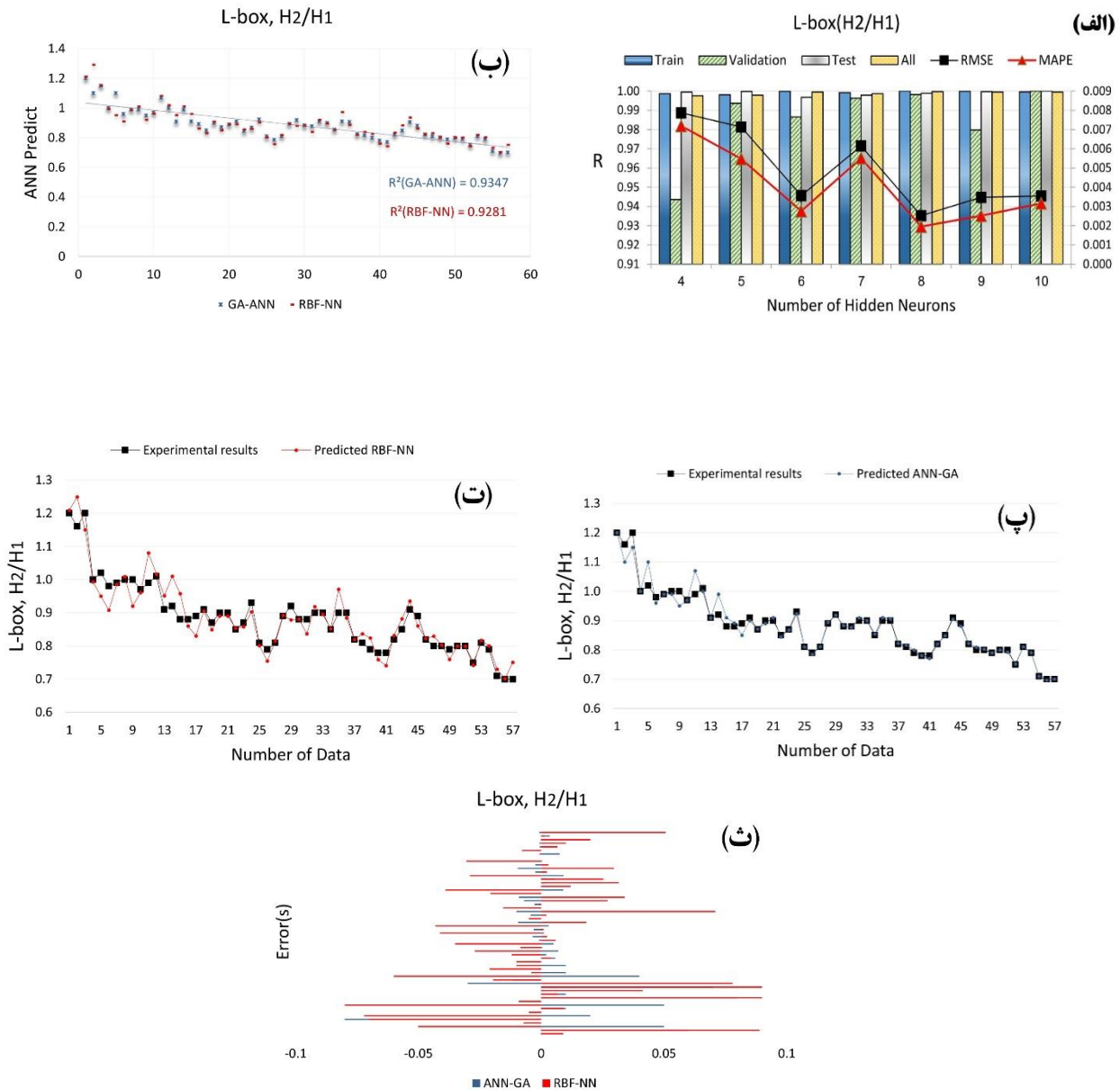
دو شبکه نتایج رضایت‌بخشی را ارائه داده‌اند.

نتایج آزمایش زمان جریان قیف V و خروجی‌های شبکه‌های ANN-GA و RBF-NN، با تعداد نورون‌های مختلف در ۸ (الف) آورده شده‌اند. تعداد بهینه نورون‌های لایه پنهان در شبکه عصبی ANN-GA برای پیش‌بینی زمان



شکل ۸. مقایسه نتایج آزمایش زمان جریان قیف V و خروجی دو شبکه ANN-GA و RBF-NN (الف) مقادیر RMSE، MAPE و مقایسه میزان خطای تعداد نورون‌های مختلف در لایه پنهان. (ب)، (پ) و (ت) مقایسه پیش‌بینی دو شبکه عصبی با نتایج آزمایشگاهی. (ث) مقایسه میزان خطای پیش‌بینی دو شبکه عصبی.

Fig. 8. Comparison of the results of the V-funnel flow time test and the output of two neural network models, ANN-GA and RBF-NN: (a) values of R, RMSE, and MAPE for different numbers of neurons in the hidden layer; (b), (c), and (d) comparison of the prediction of two neural networks with experimental results; (e) comparison of the prediction error of two neural networks



شکل ۹. مقایسه نتایج آزمایش جعبه L و خروجی دو شبکه ANN-GA و RBF-NN (الف) مقادیر RMSE، MAPE و R در تعداد نوروں‌های مختلف در لایه پنهان. (ب)، (پ) و (ت) مقایسه پیش‌بینی دو شبکه عصبی با نتایج آزمایشگاهی. (ث) مقایسه میزان خطای پیش‌بینی دو شبکه عصبی.

Fig. 9. Comparison of the results of the L-box test and the output of two neural network models, ANN-GA and RBF-NN: (a) values of R, RMSE, and MAPE for different numbers of neurons in the hidden layer; (b), (c), and (d) comparison of the prediction of two neural networks with experimental results; (e) comparison of the prediction error of two neural networks

پراکندگی خطاها در دو شبکه ANN-GA و RBF-NN آورده شده است. با مقایسه مقادیر خطا و پراکندگی خطاهای حاصل از پیش‌بینی شبکه ANN-GA بسیار کمتر از RBF-NN است. همانطور که در شکل ۹ (الف) مشاهده می‌شود، دقیق‌ترین تخمین آزمایش جعبه L در شبکه ANN-GA وقتی

V و نتایج پیش‌بینی شده توسط شبکه‌های ANN-GA و RBF-NN مشاهده می‌شود. با بررسی این شکل‌ها مشخص می‌شود دقت پیش‌بینی در شبکه ANN-GA در مقایسه با داده‌های حاصل از آزمایش زمان جریان قیف V نسبت به RBF-NN بسیار بالاتر است. در شکل ۸ (ت)، میزان و

NARC خارج شده است.

- اکسید آهن موجود در سنگدانه گارنت شکست‌های درون دانه‌ای و فرا دانه‌ای را کاهش داده است. به دلیل وجود سنگدانه‌های گارنت و بازالت و پوزولان، بتن مطالعه شده در این پژوهش دارای مقاومت فشاری بسیار بالا است. انجام واکنش پوزولانی منجر به تولید مواد چسباننده شده است و با هیدروکسید کلسیم $Ca(OH)_2$ که ماده‌ای غیرچسباننده است و در ناحیه انتقالی (ITZ) غلظت بالایی دارد، وارد واکنش می‌شود. محصول این واکنش تولید ژل کلسیم هیدرات سیلیکات (C-S-H) است که سبب کاهش تخلخل بتن شده و ناحیه انتقال را متراکم می‌کند که باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. این فرآیند همزمان با وجود الیاف فولادی در این نوع بتن باعث افزایش مقاومت کششی شده است. افزودن ذرات نانوسیلیس و الیاف فولادی نیز موجب بهبود مقاومت فشاری این نوع بتن شده، به عنوان نمونه مقاومت فشاری در طرح $C+(1NS-1SF)$ نسبت به بتن مرجع حدود ۲۶٪ افزایش را نشان می‌دهد. همچنین مقاومت کششی در طرح $C+(1NS-1SF)$ در مقایسه با $C+(1NS-1SF)$ (UHPSCC) به میزان قابل توجه و در حدود ۲۱٪ افزایش یافته است.

- در آزمایش اندازه‌گیری قطر و زمان جریان اسلامپ، پیش‌بینی ترکیب شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک (ANN-GA) با اختلاف کمی دقیق‌تر از شبکه عصبی توابع بنیادی شعاعی (RBF-NN) است. تخمین و پیش‌بینی ANN-GA از آزمایش زمان جریان قیف V و آزمایش جعبه L بسیار دقیق‌تر از پیش‌بینی شبکه RBF-NN است. دقیق‌ترین تخمین و پیش‌بینی شبکه‌های ANN-GA و RBF-NN در میان همه آزمایش‌ها، مربوط به آزمایش‌های قطر و زمان جریان اسلامپ به ترتیب با دقت ۹۹٪ و ۹۶٪ بوده و بیشترین مقدار R^2 در این آزمایش‌ها مربوط به شبکه ANN-GA و برابر با ۰/۹۶۲۱ است. بالاترین دقت پیش‌بینی شبکه ANN-GA در میان آزمایش‌های بررسی شده در این پژوهش مربوط به آزمایش اندازه‌گیری قطر جریان اسلامپ و دقت پیش‌بینی آن نسبت به داده‌های آزمایشگاهی برابر ۹۹٪ است. در مجموع دقت تخمین ANN-GA در پیش‌بینی خواص رئولوژی بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی از RBF-NN بالاتر است.

منابع

- [1][1] H. Song, K. Byun, S. Kim, D. Choi, Early-age creep and shrinkage in self-compacting concrete incorporating GGBFS, in: Proceedings of the 2nd international RILEM symposium on self-compacting concrete. Tokyo: COMS Engineering Corporation, 2001, pp. 413-422.

رخ می‌دهد که ۸ نورون در لایه پنهان وجود دارد چون R بزرگتر و RMSE و MAPE کمتری دارد. در شکل ۹ (ب) ضریب همبستگی در شبکه ANN-GA برابر ۰/۹۱۴۲ و در شبکه RBF-NN برابر ۰/۹۰۲۶ است که نشان دهنده عملکرد مناسب تر شبکه ANN-GA در این آزمایش است. مطابق شکل ۹ (پ) و (ت) دقت پیش‌بینی شبکه ANN-GA و شبکه RBF-NN در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی برای آزمایش جعبه L به ترتیب ۹۷/۸٪ و ۸۹/۶٪ است. با مقایسه برازش داده‌های پیش‌بینی شده مقدار و پراکندگی خطاها توسط دو شبکه عصبی ANN-GA و RBF-NN در شکل ۹ (ث) واضح است که در آزمایش جعبه L، به دلیل میزان و پراکندگی خطای کمتر شبکه ANN-GA عملکرد بهتری داشته است. در نهایت، پس از بررسی مطالب فوق در مورد پیش‌بینی شبکه‌های ANN-GA و RBF-NN، می‌توان نتیجه گرفت که تقریباً هر دو شبکه تخمین قابل قبولی برای پیش‌بینی آزمایش جعبه L در این نوع بتن دارند.

۷- نتیجه‌گیری

درک رفتار بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی (UHPSCC) از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق به منظور صرفه‌جویی در هزینه‌ها و زمان ساخت از شبکه عصبی مصنوعی جهت پیش‌بینی رفتار رئولوژی این نوع بتن بهره گرفته شده است. در این پژوهش علاوه بر انجام آزمایش‌های رئولوژی، مقاومت فشاری و کششی روی بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی حاوی سنگدانه‌های گارنت و بازالت، میکرو سیلیس، نانو سیلیس، خاکستر بادی و الیاف فولادی، دقت پیش‌بینی و تخمین شبکه عصبی مصنوعی هیبریدی ANN-GA (ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک) و RBF-NN (شبکه عصبی توابع بنیادی شعاعی) از خواص رئولوژی بتن خود تراکم فوق توانمند الیافی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی بررسی شده است و نتایج آن به صورت زیر ارائه شده است:

- با وجود میکرو سیلیس و خاکستر بادی در بتن مرجع مورد مطالعه، خواص رئولوژی در محدوده مورد پذیرش EFNARC قرار گرفته است. افزودن نانو سیلیس به طرح تا ۲٪، تأثیر منفی بر خواص رئولوژی بتن نداشته اما با افزایش بیش از ۲٪ نانو سیلیس به طرح نتایج آزمایش‌های بتن تازه نشان داد خواص رئولوژی بتن از محدوده مورد پذیرش EFNARC خارج شده است. تأثیر افزودن هم‌زمان نانو سیلیس و الیاف فولادی به طرح تا ۲٪ تأثیر مثبتی در خواص رئولوژی بتن مطالعه شده در این پژوهش داشته اما با افزایش بیش از ۲٪ الیاف فولادی، خواص رئولوژی بتن تازه را از محدوده مورد پذیرش EF-

- International Journal of Concrete Structures and Materials, 10 (2016) 271-295.
- [12] V. Afroughsabet, L. Biolzi, T. Ozbakkaloglu, High-performance fiber-reinforced concrete: a review, *Journal of materials science*, 51 (2016) 6517-6551.
- [13] V. Afroughsabet, T. Ozbakkaloglu, Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers, *Construction and building materials*, 94 (2015) 73-82.
- [14] N. Van Tuan, G. Ye, K. Van Breugel, A.L. Fraaij, D. Dai Bui, The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete, *Construction and Building Materials*, 25(4) (2011) 2030-2035.
- [15] Q. Song, R. Yu, X. Wang, S. Rao, Z. Shui, A novel self-compacting ultra-high performance fibre reinforced concrete (SCUHPFRC) derived from compounded high-active powders, *Construction and Building Materials*, 158 (2018) 883-893.
- [16] E. Fehling, M. Schmidt, S. Stürwald, Ultra High Performance Concrete:(UHPC); Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05-07, 2008, kassel university press GmbH, 2008.
- [17] E. Brühwiler, E. Denarié, Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete, *Structural Engineering International*, 23(4) (2013) 450-457.
- [18] H.L. Muttashar, M.A. Mohd Ariffin, M.W. Hussin, S.B. Ishaq, Realisation of enhanced self-compacting geopolymer concrete using spent garnet as sand replacement, *Magazine of Concrete Research*, 70 (2018) 558-569.
- [19] P. Li, Q. Yu, H. Brouwers, Effect of coarse basalt aggregates on the properties of Ultra-high Performance Concrete (UHPC), *Construction and Building Materials*, 170 (2018) 649-659.
- [20] K.H. Mo, S.P. Yap, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, C.H. Bu, Impact resistance of hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete, *Construction and Building Materials*, 50 (2014) 499-507.
- [2] T.R. Naik, R. Kumar, B.W. Ramme, F. Canpolat, Development of high-strength, economical self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials*, 30 (2012) 463-469.
- [3] O.H. Wallevik, J.E. Wallevik, Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes, *Cement and concrete research*, 41(12) (2011) 1279-1288.
- [4] M. Cyr, C. Legrand, M. Mouret, Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives, *Cement and concrete research*, 30 (2000) 1477-1483.
- [5] T. Lecompte, A. Perrot, Non-linear modeling of yield stress increase due to SCC structural build-up at rest, *Cement and Concrete Research*, 92 (2017) 92-97.
- [6] M. Alkaysi, S. El-Tawil, Z. Liu, W. Hansen, Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC), *Cement and Concrete Composites*, 66 (2016) 47-56.
- [7] W.H. Kwan, M. Ramli, C.B. Cheah, Flexural strength and impact resistance study of fibre reinforced concrete in simulated aggressive environment, *Construction and Building Materials*, 63 (2014) 62-71.
- [8] M. Nili, A. Ghorbankhani, A. AlaviNia, M. Zolfaghari, Assessing the impact strength of steel fibre-reinforced concrete under quasi-static and high velocity dynamic impacts, *Construction and Building Materials*, 107 (2016) 264-271.
- [9] D.-Y. Yoo, N. Banthia, Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review, *Cement and Concrete Composites*, 73 (2016) 267-280.
- [10] A. Arora, M. Aguayo, H. Hansen, C. Castro, E. Federspiel, B. Mobasher, N. Neithalath, Microstructural packing-and rheology-based binder selection and characterization for Ultra-high Performance Concrete (UHPC), *Cement and Concrete Research*, 103 (2018) 179-190.
- [11] S. Abbas, M. Nehdi, M. Saleem, Ultra-high performance concrete: Mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges,

- International Journal, 25(5) (2020) 401-409.
- [30]H. Eskandari-Naddaf, R. Kazemi, ANN prediction of cement mortar compressive strength, influence of cement strength class, *Construction and Building Materials*, 138 (2017) 1-11.
- [31]E.M. Golafshani, A. Ashour, Prediction of self-compacting concrete elastic modulus using two symbolic regression techniques, *Automation in Construction*, 64 (2016) 7-19.
- [32]M.I. Al-Khatib, S. Al-Martini, Predicting the rheology of self-consolidating concrete under hot weather, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 172(5) (2019) 235-245.
- [33]M.R. Kaloop, P. Samui, M. Shafeek, J.W. Hu, Estimating slump flow and compressive strength of self-compacting concrete using emotional neural networks, *Applied Sciences*, 10(23) (2020) 8543.
- [34]F. Zahiri, H. Eskandari-Naddaf, Optimizing the compressive strength of concrete containing micro-silica, nano-silica, and polypropylene fibers using extreme vertices mixture design, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13 (2019) 821-830.
- [35]A. Rashno, A. Saghaeifar, Durability of ultra-high-performance self-compacting concrete with hybrid fibers, *Emerging Materials Research*, 9(2) (2020) 331-341.
- [36]R. Parichatprecha, P. Nimityongskul, Analysis of durability of high performance concrete using artificial neural networks, *Construction and Building Materials*, 23(2) (2009) 910-917.
- [37]R. Venkatakrishnaiah, G. Sakthivel, Bulk utilization of flyash in self compacting concrete. *KSCE J, Civil Eng*, (2017).
- [38]K. Janković, S. Stanković, D. Bojović, M. Stojanović, L. Antić, The influence of nano-silica and barite aggregate on properties of ultra high performance concrete, *Construction and Building Materials*, 126 (2016) 147-156.
- [39]S. EFNARC, Guidelines for self-compacting concrete, London, UK: Association House, 32 (2002) 34.
- [40]C. Bibm, E. Ermco, EFNARC: The European guidelines
- [21]B. Balakrishnan, A. Awal, Mechanical properties and thermal resistance of high volume fly ash concrete for energy efficiency in building construction, in: *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publ, pp. , (2016) 99-108.
- [22]A. Muller, K. Scrivener, J. Skibsted, A. Gajewicz, P. McDonald, Influence of silica fume on the microstructure of cement pastes: New insights from 1H NMR relaxometry, *Cement and Concrete Research*, 74 (2015) 116-125.
- [23]Y. Cai, P. Hou, X. Cheng, P. Du, Z. Ye, The effects of nanoSiO₂ on the properties of fresh and hardened cement-based materials through its dispersion with silica fume, *Construction and Building Materials*, 148 (2017) 770-780.
- [24]F. Shaikh, S. Supit, P. Sarker, A study on the effect of nano silica on compressive strength of high volume fly ash mortars and concretes, *Materials & Design*, 60 (2014) 433-442.
- [25]A.J. Paulson, R.A. Prabhavathy, S. Rekh, E. Brindha, Application of neural network for prediction of compressive strength of silica fume concrete, *Int. J. Civ. Eng. Technol*, 10(2) (2019) 1859-1867.
- [26]F.X. Li, Q.J. Yu, J.X. Wei, J.X. Li, Predicting the workability of self-compacting concrete using artificial neural network, in: *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, 2011, pp. 1730-1734.
- [27]M.A. Getahun, S.M. Shitote, Z.C.A. Gariy, Artificial neural network based modelling approach for strength prediction of concrete incorporating agricultural and construction wastes, *Construction and Building Materials*, 190 (2018) 517-525.
- [28]Z. Keshavarz, H. Torkian, Application of ANN and ANFIS models in determining compressive strength of concrete, *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 2(1) (2018) 62-70.
- [29]M. Mazloom, S.F. Tajar, F. Mahboubi, Long-term quality control of self-compacting semi-lightweight concrete using short-term compressive strength and combinatorial artificial neural networks, *Computers and Concrete, An*

- characteristics of steel and polypropylene fiber reinforced concrete exposed to natural weathering action, *Construction and Building Materials*, 250 (2020) 118910.
- [44] ASTM C496. Testing, M.C.C.-o. Concrete, C. Aggregates, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International, (2011).
- for self compacting concrete, *Specification, Production and Use*, 63 (2005).
- [41] BS EN 12390-3, Testing Hardened Concrete. Part 3: Compressive Strength of Test Specimens, BSI British Standards Institution, (2019).
- [42] ACI 318M-08, A. Standard, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, Reported by ACI Committee, 318 (2008).
- [43] M.U. Rashid, Experimental investigation on durability

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. R. Rashno, M. R. Adlparvar, M. Izadina, *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 J. Civil Eng.*, 55(5) (2023) 1103-1120.

DOI: 10.22060/ceej.2023.20292.7394

