



Proposed Mix Design of Recycled Concrete Used in Urban Concrete Tables Using Neural Networks

Seyed Reza Salim Bahrami^{1*}, Reza Shakeri², Behzad Habibi Hajikolai³

¹PhD, Department of Civil Engineering, Faculty of Imam Mohammad Baqer, Mazandaran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Sari, Iran.

²Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Shahid Montazeri, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Mashhad, Iran.

³M. Sc., Department of Civil Engineering, Faculty of Imam Mohammad Baqer, Mazandaran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Sari, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 02.09.2020

Revised: 06.23.2020

Accepted: 01.17.2021

Keyword:

Recycled concrete
neural network
urban concrete tables
recycling
green concrete

***Corresponding Author:**

Seyed Reza Salim Bahrami

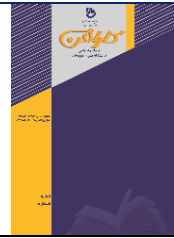
Email:

salimbahrami@semnan.ac.ir

ABSTRACT

The increasing growth of construction and use of concrete tables in urban and inter-city roads have led to the idea of using recycled concrete in urban concrete tables. Therefore, in this research, an attempt was made to investigate the mechanical and economic parameters of using recycled concrete as concrete of urban concrete tables. For this purpose, three types of mixing schemes of natural concrete as control concrete, recycled concrete and recycled fiber concrete including 100% recycled fine-grained and 50% coarse-grained recycled concrete of 7 and 28 days old were tested. Then, the obtained results were compared with national and international regulations and standards in the field of concrete for use in urban tables. In addition, in this paper, the estimation of 28-day compressive strength with the help of neural networks was investigated. The findings showed that recycled concrete and recycled fiber concrete with higher mixing design have higher compressive strength. Furthermore, an almost equal correlation coefficient was observed in the outputs of the 28-day compressive strength test obtained from the artificial neural network and the results of 124 laboratory samples are in good agreement with the results obtained from the neural network.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

ارائه طرح اختلاط پیشنهادی بتن بازیافتی مورد استفاده در جداول بتنی شهری با استفاده از شبکه عصبی

سیدرضا سلیم بهرامی^{۱*}، رضا شاکری^۲، بهزاد حبیبی حاجیکلائی^۳

- ۱- دکتری، دپارتمان مهندسی عمران، دانشکده امام محمد باقر (ع)، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان مازندران، ایران.
- ۲- دانشجوی کارشناسی، دانشکده فنی شهید منتظری مشهد، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان خراسان رضوی، ایران.
- ۳- کارشناسی ارشد، دپارتمان مهندسی عمران، دانشکده امام محمد باقر (ع)، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان مازندران، ایران.

چکیده

رشد روزافزون ساخت و استفاده از جداول بتنی در معابر و راه‌های شهری و بین شهری موجب شد تا ایده استفاده از بتن بازیافتی در جداول بتنی شهری پیشنهاد گردد. بنابراین، در این پژوهش تلاش شده است تا پارامترهای مکانیکی و اقتصادی استفاده از بتن بازیافتی به‌عنوان بتن جداول بتنی شهری بررسی شود. برای این منظور سه نوع طرح اختلاط، شامل بتن طبیعی به‌عنوان بتن شاهد و بتن بازیافتی و بتن الیافی بازیافتی شامل ۱۰۰ درصد ریزدانه بازیافتی و ۵۰ درصد درشت‌دانه بازیافتی برای سنین ۷ و ۲۸ روزه تحت آزمایش قرار گرفت. در ادامه، نتایج با آیین‌نامه و استانداردهای ملی و بین‌المللی در زمینه بتن برای استفاده در جداول شهری مقایسه شد. همچنین در این مقاله تخمین مقاومت فشاری ۲۸ روزه به کمک شبکه‌های عصبی بررسی شده است. نتایج نشان داد که بتن بازیافتی و بتن الیافی بازیافتی با طرح اختلاط پیشنهادی، مقاومت فشاری بالاتری دارد. همچنین ضریب همبستگی تقریباً برابری در خروجی‌های آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه حاصل از شبکه عصبی مصنوعی مشاهده شده است و نتایج ۱۲۴ نمونه آزمایشگاهی با نتایج شبکه عصبی انطباق مناسب دارند.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۰۳

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۸

کلید واژگان:

بتن بازیافتی
شبکه عصبی
جداول بتنی شهری
بازیافت
بتن سبز

*نویسنده مسئول: سیدرضا سلیم بهرامی

پست الکترونیکی:

salimbahrami@semnan.ac.ir



مقدمه

رشد شهرنشینی و تولید انبوه مسکن و استفاده از بتن در نوسازی و بهسازی بافت‌های فرسوده، منجر به تولید حجم انبوهی از زباله‌های ساختمانی شده است. طبق گزارش‌هایی که میر^۱ سالانه منتشر کرده است بیش از ۱۰ میلیارد تن بتن در جهان تولید و مصرف می‌شود که برای تهیه این حجم از بتن در سال، به ترتیب در حدود ۰/۹، ۰/۶ و ۵ میلیارد تن سیمان پرتلند، آب آشامیدنی و سنگدانه نیاز است [۱]. از سوی دیگر در کشورهای صنعتی، بیشترین حجم از زباله‌های ساختمانی را بتن تشکیل می‌دهد [۲]. در اروپا سالانه حدود ۵۰ میلیون تن بتن تخریب می‌شود [۳] اما آمارها در ایران نشان می‌دهد اغلب ساختمان‌هایی که قبل از دهه ۵۰ ساخته شده است، در دست تخریب بودند که بخشی از آن شامل سازه‌های بتنی است [۴].

انباشت روزافزون این حجم از نخاله‌های ساختمانی، در طی زمان مشکلات زیان‌باری در منظر شهری و محیط‌زیست حاشیه شهرها و انتقال و انتشار آلودگی آب و هوا در شهرها به‌وجود آورد. از سوی دیگر، کشور ما معادن مناسب برای تهیه مصالح اولیه ساخت بتن را دارد اما استفاده و تکیه بر آن در هدف‌های دور، خطرآفرین و زیان‌آور خواهد بود. بنابراین، محققان برای حل این موضوع و استفاده بهینه از مصالح بازیافتی و نخاله‌های ساختمانی با عنوان بتن بازیافتی راهکاری ارائه کردند. بازیافت مواد زاید حاصل از تخریب ساختمان به‌عنوان سنگدانه بازیافتی در تولید بتن می‌تواند راه‌حل مناسبی برای حل این مشکل باشد [۵-۸].

نتایج تحقیقات مقیمی [۹] و همکاران در سال ۲۰۱۱ و چوی^۲ [۱۰] و همکاران در سال ۲۰۱۲ نشان داد که سنگدانه بازیافتی بتنی به مراتب کیفیت مکانیکی و دوام کمتری نسبت به سنگدانه طبیعی دارد. همچنین مطالعات عقیلبی لطف و رمضانیان‌پور [۴] در سال ۲۰۱۸ نشان داد که جایگزینی سنگدانه طبیعی با سنگدانه بازیافتی بتنی، منجر به افت مقاومت‌های مکانیکی و همچنین افزایش درصد جذب آب بتن می‌شود. در مجموع ماسه بازیافتی بتنی روی رفتار مکانیکی بتن بازیافتی نسبت به بتن بازیافتی بتنی اثر منفی بیشتری دارد.

نتایج وگی^۳ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۳ نشان داد که مقدار کاهش یا افزایش مقاومت بتن با سنگدانه‌های بازیافتی، بسته به نسبت آب به سیمان، جنس و شرایط رطوبتی سنگدانه‌ها و درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی بستگی دارد. آکاش^۴ و همکاران [۱۲] نیز با بررسی مشخصات مکانیکی بتن بازیافتی دریافتند که در نسبت‌های پایین آب به سیمان، مقاومت بتن بازیافتی نسبت به بتن معمولی کاهش می‌یابد. همچنین رادونجانین^۵ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۳ به این نتیجه رسیدند که استفاده از سنگدانه‌های مرطوب با سطح خشک به علت خلل‌و‌فرج موجود در این گونه از سنگدانه‌ها، باعث نفوذ آب به درون آن‌ها و عمل‌آوری بهتر بتن می‌شود. برای جبران کاهش مقاومت بتن بازیافتی راهکارهای گوناگونی پیشنهاد شده است. از جمله این پیشنهادها، به افزودن خاکستر بادی، میکروسلیس، افزایش مقدار سیمان و استفاده از انواع الیاف می‌توان اشاره کرد [۱۴-۱۶].

ملیسویو^۶ و همکاران [۱۷] یک تحلیل مقایسه‌ای در مورد نتایج تجربی خواص بتن تازه و سخت‌شده با نسبت‌های جایگزینی متفاوت سنگدانه‌های طبیعی با سنگدانه‌های درشت بازیافتی انجام دادند و به این نتیجه دست یافتند که بدون در نظر گرفتن نسبت جایگزینی، بتن دارای سنگدانه‌های بازیافتی، کارایی رضایت‌بخشی دارد.

¹ Meyer

² Choi

³ Wagih

⁴ Rao akash

⁵ Radonjanin

⁶ Malešev

جین و گارج^۱ در سال ۲۰۱۵ با بررسی سنگدانه‌های بازیافتی و استفاده از آن در بلوک‌های سنگ‌فرشی به این نتیجه رسیدند که عملکرد فشاری و خمشی بلوک‌های ساخته‌شده از سنگدانه بازیافتی به نسبت سنگدانه طبیعی، بالاتر است [۱۸].

هدف اصلی این پژوهش، معرفی و دستیابی به بهینه‌ترین شرایط استفاده و به‌کارگیری مصالح بازیافتی و بهینه‌کردن هزینه‌های ساخت بتن در تولید جداول بتنی شهری و حفظ محیط زیست و نگهداشت ذخایر سنگی کشور است. ارزیابی میزان تأثیر هریک از پارامترهای بتن سخت‌شده از قبیل خواص مکانیکی و جذب آب در نتیجه به‌کارگیری مقادیر جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی و ارائه طرح اختلاط مناسب بتن بازیافتی برای ساخت جداول بتنی شهری، هدف دیگری است که در این پژوهش دنبال می‌شود.

در این پژوهش از سنگدانه‌های بازیافتی به میزان ۰ درصد و ۵۰ درصد به‌عنوان جایگزین درشت‌دانه طبیعی به همراه ۱۰۰ درصد ریزدانه بازیافتی در نظر گرفته و از مواد دورریز ظروف یک‌بارمصرف به‌عنوان الیاف پلیاستیکی در بتن با سنگدانه‌های بازیافتی با درصد حجمی ۱ درصد استفاده شده است. به منظور بررسی اثر سنگدانه‌ها بر مقاومت بتن از دانه‌بندی یکسان برای مصالح طبیعی و بازیافتی استفاده و پس از ساخت بتن و عمل‌آوری، نمونه‌های مقاومت فشاری بر نمونه‌ها با سنین ۷ و ۲۸ روزه انجام شده است. در پایان، به بررسی نقش سنگدانه‌های بازیافتی و الیاف پلیاستیکی بر عملکرد بتن بازیافتی و مقایسه آن با استانداردها و آیین‌نامه‌های موجود برای استفاده در جداول بتنی شهری پرداخته شده است.

هدف دیگری که در این پژوهش دنبال می‌شود آن است که براساس یک پایگاه داده، برگرفته از نتایج آزمایش‌های معتبر در زمینه مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای نمونه‌های بتن بازیافتی و طبیعی و به کمک مدل‌سازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی، ارتباطی بین داده‌های ورودی (وزن مصالحی که در طرح اختلاط بتن بازیافتی و طبیعی استفاده شده است) و داده هدف (مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بازیافتی و طبیعی) برقرار و مقاومت فشاری ۲۸ روزه را متناسب با وزن مصالح ورودی پیش‌بینی کرد.

با توجه به دستورالعمل تهیه طرح جامع مدیریت پسماند که توسط سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور تدوین شده است، مسئولیت برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری پروژه‌های بازیافت نخاله‌ها بر عهده شهرداری‌ها، دهیاری‌ها و بخش‌داری‌ها است که از طریق برگزاری مناقصه به شرکت‌های پیمانکار این حوزه واگذار می‌شود. بنابراین، نهادهای مذکور و همچنین سازمان حفاظت محیط زیست و شرکت‌های خصوصی پیمانکار می‌توانند از نتایج این مطالعه، بهره‌برداری کنند. از سوی دیگر، نتایج این پژوهش می‌تواند برای تدوین اولین آیین‌نامه کاربرد بتن‌های بازیافتی برای کاربردهای غیرسازه‌ای از جمله جداول بتنی شهری در ایران آغاز مناسبی باشد.

مشخصات فنی مصالح مصرفی

مقاومت مشخصه بتن برای ساخت جداول بتنی شهری مطابق با آیین‌نامه مشخصات فنی و مقاطع همسان جداول و انهار بتنی شهری [۱۹] باید شرایط زیر را تأمین کند:

- مقاومت فشاری میانگین نمونه ۲۸ روزه جداول بتنی براساس روش آزمون استاندارد ملی ایران نباید کمتر از ۳۵ مگاپاسکال و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نظیر نمونه مکعبی مغزه حاصل از جداول بتنی برای نمونه منفرد باید بیش از ۳۰ مگاپاسکال باشد.

همچنین پیشنهاد مشخصات فنی و مقاطع همسان جداول و انهار بتنی شهری [۱۹] برای عیار سیمان در بتن مصرفی حداقل برابر ۴۰۰ کیلوگرم در هر مترمکعب و حداکثر نسبت آب به سیمان با احتساب رطوبت سنگدانه‌ها ۵۰ درصد است.

^۱ Neeraj Jain and Mridul Garg

مطابق مواردی که در بالا بیان شد، در این پژوهش دو نمونه بتن شامل بتن طبیعی (شاهد) و بتن بازیافتی در دو سن ۷ و ۲۸ روزه در نظر گرفته شده است. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ ۲، تولید کارخانه جوین با توده ویژه ۳/۱ گرم بر سانتی مترمکعب و سطح ویژه ۳۸۴۰ گرم بر سانتی مترمربع است. در جدول ۱ مشخصات شیمیایی سیمان نشان داده شده است. عیار سیمان ۴۰ کیلوگرم در هر مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۴۵ است.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲

درصد حضور در سیمان	ترکیبات شیمیایی
۲۰/۷۲	% SiO ₂
۶۳/۱	%CaO
۴/۹۲	%Al ₂ O ₃
۳/۶۸	%Fe ₂ O ₃
۳/۴۶	%Mgo
۲/۸۲	%SO ₃

آب مصرفی برای تولید بتن مطابق با الزامات استاندارد ASTM D 1129 [۲۰]، آب آشامیدنی شهر مشهد می باشد. همچنین در این پژوهش، سنگدانه مصرفی طبیعی از ماسه طبیعی رودخانه‌ای و شن طبیعی شکسته با بزرگ‌ترین اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر استفاده شده است.

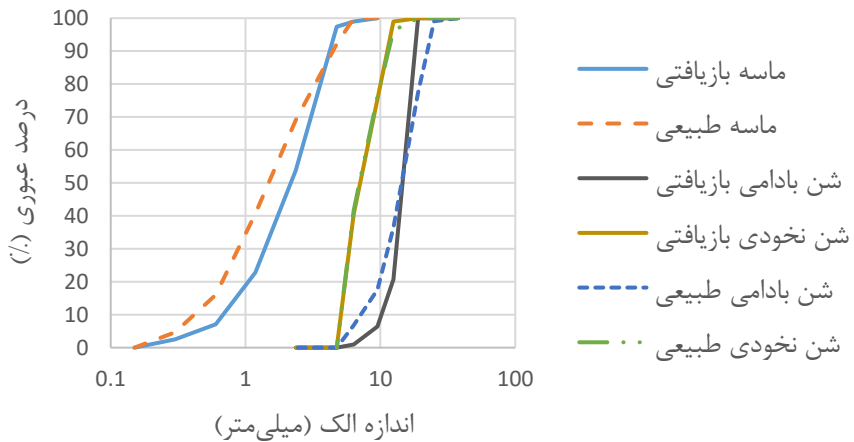
عوامل متعددی بر کیفیت مصالح بازیافتی تولیدی تأثیر دارد که می‌توان به طرح و شیوه ساخت، نوع تخریب، شرایط اقلیمی و نوع کاربری اشاره کرد. یکی از منابع پیشنهادی برای دریافت بتن مستعمل شده مناسب برای تهیه بتن بازیافتی، مراکز آزمایشگاه مقاومت مصالح هستند. در این مراکز آزمایشگاهی بسیاری از بتن‌های آزمایش شده موجود هستند که کاربری مجدد برای صاحبان آزمایشگاه مقاومت مصالح خواهند داشت. بنابراین، در این پژوهش از بتن‌های آزمایش شده با مقاومت‌های متفاوت استفاده شده است. خرد کردن بتن‌های بازیافتی برای تهیه سنگدانه در دو سطح ریزدانه و درشت‌دانه به دو صورت مکانیکی (دستگاه سنگ شکن فکی) و دستی (پتک، چکش، پیستون دستی و قلم) انجام می‌شود.

نکته بااهمیت درمورد میزان کوبش، آن است که با توجه به اینکه کوبش بتن مستعمل باید تا زمانی ادامه یابد که منجر به جدایی کامل یا ۹۰ درصدی سیمان چسبیده به سنگدانه شود اما مشاهده می‌شود که سنگدانه‌های بتن مستعمل، در حین کوبش همراه با سیمان چسبیده، خرد می‌شوند و تبدیل به سنگدانه‌های تیز گوشه می‌گردند. از این‌رو، در حین کوبش باید دقت کرد تا حد تعادل بین سنگدانه تیز گوشه و گرد گوشه در ترکیب دانه‌بندی رعایت شود.

در این پژوهش مطابق شکل ۱، بتن بازیافتی به صورت کوبش دستی خرد شده است و دانه‌بندی آن مطابق با آزمایش‌های مربوط به مصالح ریزدانه (استاندارد ایران با شماره ۴۹۷۷ [۲۱] و ASTM C136/C136M-14 [۲۲]) و درشت‌دانه به دو دسته نخودی و بادامی (استاندارد ایران با شماره ۴۹۷۷ [۲۱] و ASTM C136/C136M-14 [۲۲]) انجام شد. در شکل ۲ منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی ارائه شده است. مطابق شکل ۲، منحنی دانه‌بندی ریزدانه و درشت‌دانه بازیافتی با طبیعی انطباق خوبی دارند.



شکل ۱. خرد شدن بتن بازیافتی به عنوان سنگدانه بازیافتی



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

همچنین برای تهیه طرح اختلاط، آزمایش‌های چگالی و جذب آب ریزدانه (براساس استاندارد ASTM C 127-15 [۲۳]) انجام شد. در

جدول ۲ مشخصات فنی سنگدانه‌های مصرفی در این مطالعه گزارش شده است. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی، درصد جذب آب بیشتری دارند. همچنین وزن مخصوص سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی کمتر است. مطابق جدول ۲ درصد شکستگی سنگدانه‌های بازیافتی درشت‌دانه به مراتب بیشتر از سنگدانه‌های درشت‌دانه طبیعی هستند که حاکی از کیفیت و مقاومت مکانیکی پایین این نوع از سنگدانه است.

جدول ۲. مشخصات فنی سنگدانه‌های مصرفی

مشخصات فنی	شن بادامی بازیافتی	شن نخودی بازیافتی	ماسه بازیافتی	شن بادامی طبیعی	شن نخودی طبیعی	ماسه طبیعی
درصد جذب آب (%)	۲/۹۹	۳/۵	۷/۴۳	۲/۰۶	۱/۵	۲/۶
وزن مخصوص (kg/m^3)	۲/۴۹	۲/۳۸	۱/۵۹	۲/۵۹	۲/۶۶	۱/۴۸
درصد شکستگی (%)	بیشتر از ۹۰	بیشتر از ۹۰	-	۵۸/۵۲	۵۱/۸۲	-

طرح اختلاط پیشنهادی

برای رسیدن به مقاومت مشخصه مطلوب برای استفاده در جدول‌های بتنی شهری و با توجه به مطالعات گذشته [۲۴-۲۸] و نقش تأثیرگذار درشت‌دانه بازیافتی به نسبت ریزدانه بازیافتی در عملکرد مقاومتی بتن بازیافتی، طرح اختلاط پیشنهادی براساس میزان تغییر در حجم مصالح درشت‌دانه بازیافتی تنظیم می‌شود. بنابر این، در این پژوهش علاوه بر نمونه بتنی طبیعی (شاهد)، نمونه‌های بتن بازیافتی با حضور ۱۰۰ درصد ریزدانه بازیافتی (ماسه) و ۵۰ درصد درشت‌دانه بازیافتی (شن نخودی و شن بادامی) در نظر گرفته شده است. از طرفی با افزایش میزان سنگدانه بازیافتی، مقاومت بتن کاهش می‌یابد [۱۵؛ ۲۹]. از این‌رو، در نمونه دیگر برای افزایش مقاومت بتن بازیافتی، نمونه با ترکیباتی که در بالا بیان شد را به همراه ۱ درصد الیاف پلیاستیکی از مواد دورریز پلیاستیکی مطابق شکل ۳، با طول و عرض به ترتیب ۵۰ و ۵ میلی‌متر تهیه می‌شود. در این مطالعه طرح اختلاط برای نمونه‌های بتن طبیعی، بتن بازیافتی (۱۰۰ درصد ریزدانه+۵۰ درصد درشت‌دانه) و بتن الیافی بازیافتی (۱۰۰ درصد ریزدانه+۵۰ درصد درشت‌دانه+۱ درصد الیاف پلیاستیکی) با دو نسبت آب به سیمنان ۰/۴ و ۰/۴۵ به ترتیب با کدهای NC-0.4، RC-0.4، FRC-0.4، NC-0.45، RC-0.45، FRC-0.45 در نظر گرفته خواهد شد. جدول ۳ مشخصات طرح اختلاط نمونه‌های بتن طبیعی، بازیافتی و الیافی بازیافتی نشان داده شده است. آزمایش اسلامپ براساس استاندارد ASTM C143 [۳۰] مطابق شکل ۴ انجام و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. مواد دورریز پلیاستیکی برای استفاده در بتن بازیافتی

جدول ۳. مشخصات طرح‌های اختلاط بتن طبیعی، بازیافتی و الیافی بازیافتی

ردیف	نام طرح اختلاط	سیمان (Kg/m ³)	آب (Kg/m ³)	ماسه طبیعی (Kg/m ³)	شن نخودی طبیعی (Kg/m ³)	شن بادامی طبیعی (Kg/m ³)	ماسه بازیافتی (Kg/m ³)	شن نخودی بازیافتی (Kg/m ³)	شن بادامی بازیافتی (Kg/m ³)	اسلامپ (cm)
۱	NC-0.4	۴۰۰	۱۸۴/۷۸	۴۷۰/۸۷	۵۱۳/۴۸	۳۳۳/۰۴	۰	۰	۰	۱۴
۲	NC-0.45	۴۰۰	۲۰۴/۳۴	۴۵۶/۵۲	۴۹۷/۸۳	۳۲۳/۰۴	۰	۰	۰	۱۵/۵
۳	RC-0.4	۴۰۰	۱۸۲	۰	۲۵۶/۶۶	۱۶۶/۶۶	۳۱۶	۲۵۶/۶۶	۱۶۶/۶۶	۴/۵
۴	RC-0.45	۴۰۰	۲۰۸	۰	۲۴۹	۱۶۱/۵	۴۸۷	۲۴۹	۱۶۱/۵	۱/۵
۵	FRC-0.4	۴۰۰	۱۸۲	۰	۲۵۶/۶۶	۱۶۶/۶۶	۳۱۶	۲۵۶/۶۶	۱۶۶/۶۶	۳/۵
۶	FRC-0.45	۴۰۰	۲۰۸	۰	۲۴۹	۱۶۱/۵	۴۸۷	۲۴۹	۱۶۱/۵	۱



شکل ۴. آزمایش تعیین روانی به روش اسلامپ

ساخت آزمون‌ها و روش اجرا

برای تأمین روانی بتن از یک نوع فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیک اتر استفاده شده است. به دلیل درصد بالای جذب آب در سنگ‌دانه‌های بازیافتی، اختلاط بتن به صورت پیش‌اشباع‌سازی صورت گرفته است. در پژوهشی که بر روی ناحیه انتقال^۱ در بتن‌های بازیافتی انجام شد، حاکی از ضعف عملکرد در ناحیه انتقال در سنگ‌دانه‌های بازیافتی بتنی اشباع با سطح خشک است [۳۱]. از سوی دیگر، کاربرد سنگ‌دانه‌های بازیافتی کاملاً خشک نیز به دلیل جذب سریع آب آزاد در بتن، منجر به افت شدید کارایی می‌شود [۳۲]. بنابراین، در این مطالعه سنگ‌دانه‌های بازیافتی با درصد رطوبت ۸۰ الی ۹۰ درصد استفاده شده است. از این‌رو، سنگ‌دانه‌های بازیافتی قبل از اختلاط، به مدت ۵ ساعت اشباع، سپس با همان آب در طرح اختلاط استفاده شدند. جهت ساخت بتن بازیافتی همانند بتن طبیعی، ابتدا مصالح سنگی (ریزدانه و درشت‌دانه) را به مدت یک دقیقه در دستگاه مخلوط‌کن ۱۰۰ لیتری مخلوط، سپس سیمان و آب به طرح اختلاط اضافه می‌شوند. بعد از ۲۴ ساعت، نمونه‌های بتنی از قالب (مکعبی، ۱۰ × ۱۰ × ۱۰ سانتی‌متر) خارج می‌شود و در حوضچه‌های آب-آهک تا رسیدن به سن آزمایش، در حوضچه‌های آب عمل‌آوری می‌گردند. تعداد نمونه‌های مورد آزمایش در هر سن ۳ نمونه مدنظر است.

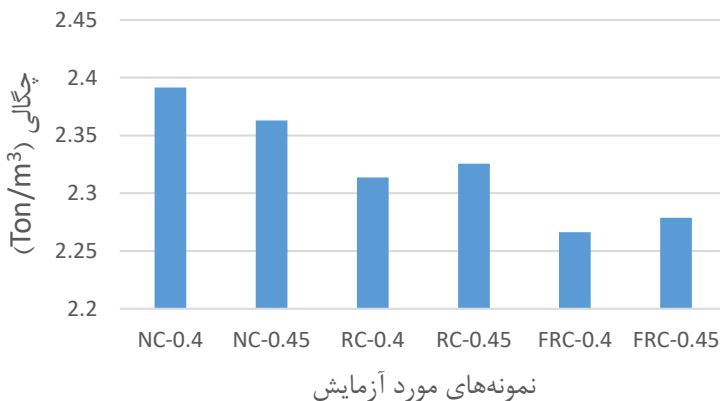
^۱ Interfacial transition zone

نتایج و بررسی

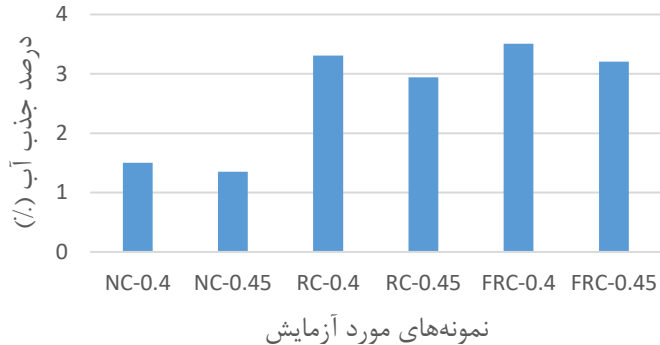
نتایج آزمایش‌های چگالی و جذب آب

آزمایش تعیین چگالی و درصد جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C 642 [۳۳] روی سه نمونه مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر در سن ۲۸ روزه انجام شد. میانگین نتایج انجام آزمایش‌های چگالی و جذب آب در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است. مطابق شکل ۵ نتایج چگالی نمونه‌های مورد آزمایش حاکی از آن است که چگالی بتن بازیافتی نسبت به بتن شاهد کمتر است و در بین بتن‌های بازیافتی نیز نظم خاصی در میزان کاهش یا افزایش دیده نمی‌شود. کمترین چگالی در بین نمونه‌ها مربوط به نمونه بتن الیافی بازیافتی با نسبت آب به سیمان $0.4/0.4$ (FRC-0.4) است. چگالی بتن بازیافتی مورد آزمایش نسبت به بتن طبیعی به‌طور میانگین $2/48$ درصد کاهش یافته است و چگالی بتن الیافی بازیافتی مورد آزمایش نسبت به بتن طبیعی به‌طور میانگین $4/61$ کاهش می‌یابد. علت کاهش چگالی بتن بازیافتی نسبت به بتن طبیعی آن است که تخلخل ملات سیمانی در سنگدانه‌های بازیافتی منجر به کاهش چگالی سنگدانه‌های بازیافتی می‌شود و در نتیجه کاهش چگالی بتن بازیافتی را به دنبال خواهد داشت. همچنین حضور الیاف منجر به اضافه‌شدن فضای متخلخل بتن می‌شود و چگالی بتن الیافی بازیافتی را کاهش می‌دهد.

مطابق شکل ۶ نتایج آزمایش جذب آب حاکی از آن است که با توجه به جایگزینی سنگدانه طبیعی با سنگدانه بازیافتی بتنی، درصد جذب آب افزایش می‌یابد. همچنین مقدار جذب آب نمونه بتن بازیافتی نسبت به بتن طبیعی در حدود ۵۴ درصد و این مقدار برای نمونه بتن الیافی بازیافتی نسبت به بتن طبیعی در حدود ۵۷٪ است. بنابر این، کمترین درصد جذب آب در همه سنین برای طرح شاهد یعنی نمونه‌های فاقد مصالح بازیافتی اندازه‌گیری شده است.



شکل ۵. چگالی نمونه‌های مورد آزمایش



شکل ۶. درصد جذب آب نمونه‌های مورد آزمایش

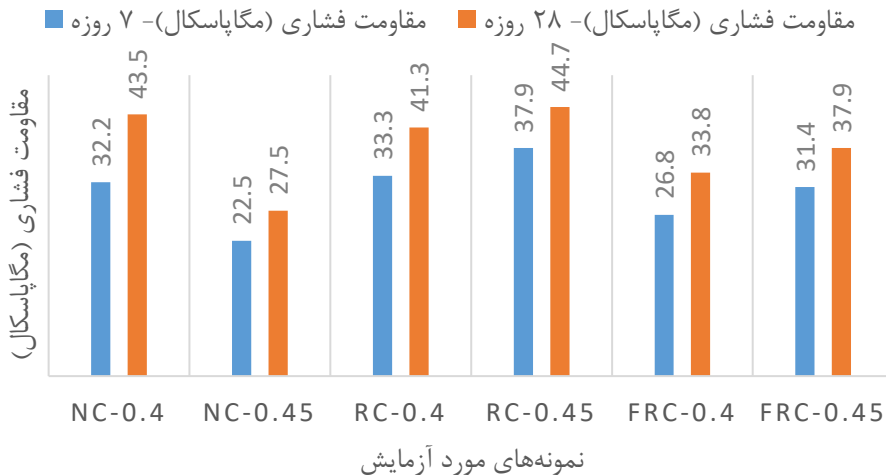
طبق بند ۲-۳-۵ استاندارد ملی ایران به شماره ۱۲۷۲۸ حداکثر میانگین درصد وزنی جذب آب برای نمونه‌های بتنی در سه رده ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۷، ۶ و ۶ در نظر گرفته است. با توجه به نمودار شکل ۶، درصد جذب آب بتن بازیافتی و بتن الیافی بازیافتی در محدوده معین استاندارد ملی ایران قرار دارد.

نتایج آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد EN BS 12390-3 [۳۴] روی سه نمونه مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر در سنین ۷ و ۲۸ روزه با سرعت بارگذاری $2/5$ کیلوگرم بر ثانیه مطابق شکل ۷ انجام شد. میانگین نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه در شکل ۸ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با جایگزینی سنگدانه طبیعی با سنگدانه بازیافتی در نسبت آب به سیمان $0/4$ ، به‌طور میانگین ۴ درصد اختلاف دارد و در نسبت آب به سیمان $0/45$ ، این اختلاف در حدود ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین بتن الیافی بازیافتی نسبت به بتن طبیعی با نسبت آب به سیمان $0/4$ ، به‌طور میانگین ۲۴ درصد کاهش و با نسبت آب به سیمان $0/45$ ، میانگین ۲۸ درصد افزایش دارد. بتن الیافی بازیافتی نسبت به بتن بازیافتی فاقد الیاف با نسبت آب به سیمان $0/4$ ، به‌طور میانگین ۲۳ درصد کاهش و با نسبت آب به سیمان $0/45$ ، میانگین ۱۹ درصد کاهش دارد. همان‌طور که از نتایج نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت آب به سیمان بر میزان مقاومت فشاری بتن بازیافتی افزوده خواهد شد. همچنین حضور الیاف پلیاستیکی در بتن بازیافتی به نسبت بتن شاهد با افزایش نسبت آب به سیمان تا حدودی موجب بهبود عملکرد مقاومت فشاری می‌شود.



شکل ۷. آزمایش مقاومت فشاری

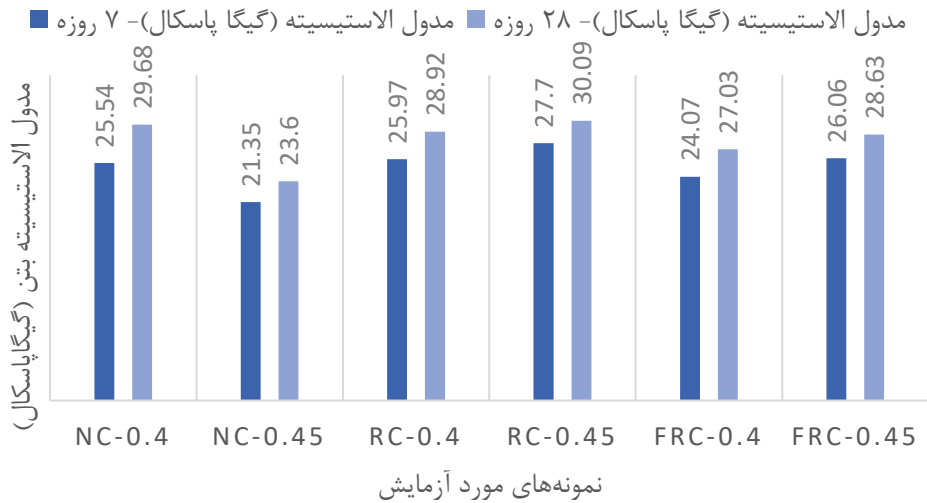


شکل ۸. نمودار تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش در سنین ۷ و ۲۸ روزه

علت اصلی مقاومت فشاری بتن، مقاومت سنگدانه‌ها، خمیر سیمان و اتصال بین این دو ناحیه است و افزودن الیاف در صورتی که نمونه‌ها به خوبی متراکم شده باشند، تأثیر اندکی بر بهبود مقاومت فشاری خواهد گذاشت. همچنین کاهش مقاومت فشاری بتن الیافی در نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف به نسبت بتن بازیافتی فاقد الیاف، به دلیل حفره‌های موجود، ناشی از افزودن این مقدار الیاف است.

برای ساخت جداول بتنی شهری مطابق با مشخصات فنی و مقاطع همسان جدول‌ها و انهار بتنی شهری [۳۵] نباید مقاومت فشاری میانگین نمونه ۲۸ روزه جدول‌های بتنی براساس روش آزمون استاندارد ملی ایران کمتر از ۳۵ مگاپاسکال یا مقاومت فشاری ۲۸ روزه نظیر نمونه مکعبی مغزه حاصل از جدول‌های بتنی برای نمونه منفرد باید بیش از ۳۰ مگاپاسکال در نظر گرفت. همچنین در استاندارد اروپایی BSEN 12390 [۳۶]، مقدار مقاومت فشاری ۲۸ روزه حاصل از نمونه مکعبی مغزه در سه رده ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر ۳۰، ۳۵ و ۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته است. همان‌طور که از نتایج آزمایش مقاومت فشاری در نمودار شکل ۸ استخراج می‌شود، مقاومت فشاری نمونه بتن بازیافتی و بتن الیافی بازیافتی در محدوده معین، آیین‌نامه‌های فوق‌الذکر است و قابلیت بهره‌گیری در جدول‌های بتنی شهری را دارند.

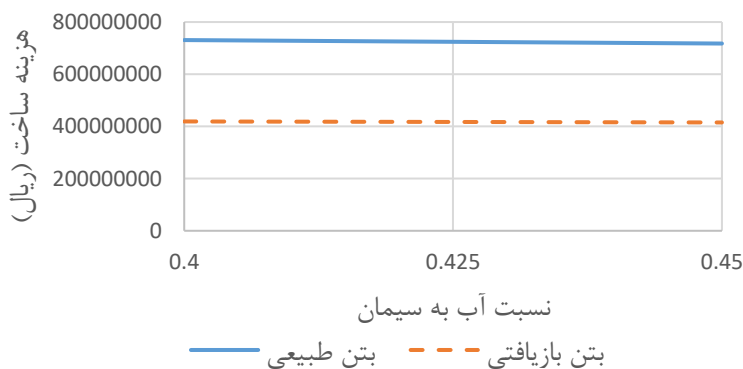
آزمایش مدول الاستیسیته بتن مطابق استاندارد ۵۲۵ [۳۷] نمودار تعیین مدول الاستیسیته نمونه‌های مورد آزمایش در سنین ۷ و ۲۸ روزه در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج شکل ۹ حاکی از آن است که با افزایش نسبت آب به سیمان و سن آزمایش، نتیجه مدول الاستیسیته در بتن بازیافتی و بتن بازیافتی الیافی افزایش می‌یابد.



شکل ۹. نمودار تعیین مدول الاستیسیته نمونه‌های مورد آزمایش در سنین ۷ و ۲۸ روزه

ارزیابی اقتصادی

برای ارزیابی اقتصادی طرح‌های اختلاط بتن طبیعی و بازیافتی و الیافی بازیافتی که جزئیات آن در جدول ۳ آورده شده است، براساس فهرست بهای مصالح ساختمانی در سال ۹۸ [۳۸]، هزینه‌ها در سال مبدا که تنها شامل هزینه مورد نیاز برای تولید یک مترمکعب بتن با طرح اختلاط مورد نظر است، محاسبه خواهد شد. با توجه به حضور سنگ‌دانه‌های بازیافتی و الیاف پلاستیکی در بتن بازیافتی و بتن الیافی بازیافتی، هزینه تهیه مواد بازیافتی رایگان در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۰. نمودار برآورد هزینه ساخت نمونه‌های بتن طبیعی و بازیافتی براساس فهرست بهای سال ۹۸

شکل ۱۰ نمودار هزینه ساخت نمونه‌های بتن طبیعی و بازیافتی به نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴ و ۰/۴۵ در واحد مترمکعب ارائه شده است. ارزیابی نتایج شکل ۱۰ حاکی از کاهش هزینه‌های ساخت بتن با حضور مواد بازیافتی تا ۷۴ درصد است که اقتصادی بودن طرح پژوهش را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد ساخت جدول‌های بتنی شهری با حضور مواد بازیافتی علاوه بر حفظ محیط زیست، منجر به کاهش هزینه ساخت هم می‌گردد.

پیش‌بینی طرح اختلاط پیشنهادی

معرفی ساختار شبکه عصبی مصنوعی

یکی از مدل‌های پرکاربرد در محاسبات نرم شبکه عصبی است که الهام‌گرفته از مغز انسان و شامل اتصالات وزن‌دار بین نرون‌های مصنوعی است. به‌طور کلی، در شبکه‌های عصبی سه نوع لایه نورونی وجود دارد: لایه ورودی که وظیفه دریافت اطلاعات خام را بر عهده دارد. لایه‌های پنهان که عملکرد این لایه‌ها به‌وسیله ورودی‌ها و وزن ارتباط بین آن‌ها و لایه‌های پنهان تعیین می‌شود. عملکرد لایه خروجی نیز به فعالیت واحد پنهان و وزن ارتباطی بین واحد پنهان و خروجی وابسته است. اختلاف بین خروجی شبکه عصبی و خروجی مطلوب، تابع خطا تعریف می‌شود. سپس خطا برمی‌گردد و وزن‌ها و بایاس‌ها اصلاح می‌شود تا خطا را کاهش دهد. این پروسه که به گام یادگیری معروف است، آنقدر تکرار می‌شود تا بیشترین دقت در تعیین خروجی‌ها ایجاد شود. صحت‌سنجی نیز در حین یادگیری به‌صورت غیرمستقیم انجام می‌شود تا بیش‌برازش^۱ شبکه عصبی را نشان دهد و نقطه توقف فرایند یادگیری زمانی است که خطای صحت‌سنجی افزایش پیدا می‌کند. آخرین گام مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی، آزمایش است که تنها برای تعیین میزان کارایی شبکه آموزش‌دیده انجام می‌شود [۳۹]. شکل ۱۱ نمای شماتیکی از یک نرون محاسباتی و اجزای آن را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی

برای آموزش شبکه عصبی از اطلاعات آزمایش‌هایی با موضوع بتن بازیافتی استفاده شده است. طبق این مطالعات علاوه بر نتایج طرح‌های اختلاط پیشنهادی در این پژوهش، از طرح‌های اختلاط آزمایش توسط اتربریا^۲ و همکاران [۴۰]، ایوانجلیستا و د بریتو^۳ [۴۱]، یانگ^۴ و همکاران [۴۲]، والرینا کورینالدسی^۵ [۴۳]، فونسکا^۶ و همکاران [۴۴]، فریرا^۷ و همکاران [۴۵]، کو و پون^۸ [۴۶]، پون و همکاران [۴۷]، گومز سوپرون^۹ [۴۸]، خطیب [۴۹] و فان^{۱۰} و همکاران [۵۰] استفاده شده است. بنابر این، در این تحقیق ۱۲۴ نمونه آزمایشگاهی شبکه عصبی مصنوعی آموزش داده شده است. وزن مصالح مورد استفاده در طرح اختلاط، شامل سنگدانه درشت‌دانه طبیعی و بازیافتی، سنگدانه ریزدانه طبیعی و بازیافتی، سیمان، آب و مواد افزودنی از نوع فوق روان‌کننده به‌عنوان پارامترهای ورودی به شبکه عصبی و خروجی آن مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن است. در ادامه مشخصات آماری و حدود تغییرات پارامترهای ورودی و خروجی به شبکه عصبی مصنوعی در جدول ۴ ارائه شده است.

¹ Overfitting

² Etxeberria

³ Evangelista and de Brito

⁴ Yang

⁵ Valeria Corinaldesi

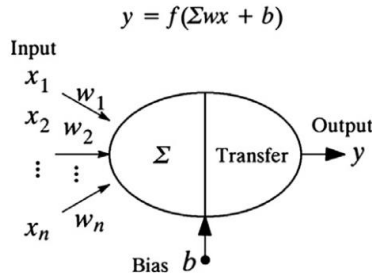
⁶ Fonseca

⁷ Ferreira

⁸ Kou and Poon

⁹ Go´mez-Soberon´n

¹⁰ Fan



شکل ۱۱. نمای شماتیکی از یک نورون محاسباتی شبکه عصبی و اجزای آن [۵۱]

برای کاستن اثرات شاخصه‌های ناخواسته در نتایج آزمایشگاهی، تمامی پارامترهای ورودی و هدف قبل از آموزش در شبکه عصبی مصنوعی نرمال‌سازی و مقیاس‌سازی می‌شوند. مرحله مقیاس‌سازی از آن‌رو مهم است که تابع تبدیل لوگ-سیگموئید^۱ تنها مقادیر بین ۰ تا ۱ را شناسایی می‌کند و برای مقیاس‌سازی داده‌ها از کمترین و بیشترین مقدار مقدار ۰/۱ تا ۰/۹ استفاده می‌شود. توابع مقیاس‌سازی برای داده‌های ورودی و هدف در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۴. مشخصات آماری و حدود تغییرات پارامترهای ورودی و خروجی

مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	مواد افزودنی (kg)	آب (kg)	سیمان (kg)	ماسه باز یافتی (kg)	شن باز یافتی (kg)	ماسه طبیعی (kg)	شن طبیعی (kg)
۴۲/۸۸	۰/۸۶۵	۱۸۶/۳۱	۳۷۴/۵۱	۳۱/۲۹	۳۸۰/۳۰	۵۲۱/۵۴	۷۸۱/۱۵
۶۰	۴/۹	۲۷۱	۴۴۹	۶۶۸	۱۱۲۶/۸	۸۹۸	۱۵۱۴
۱۷/۷۶	۰	۱۴۰	۳۰۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۵. توابع مقیاس‌سازی برای داده‌های ورودی و هدف

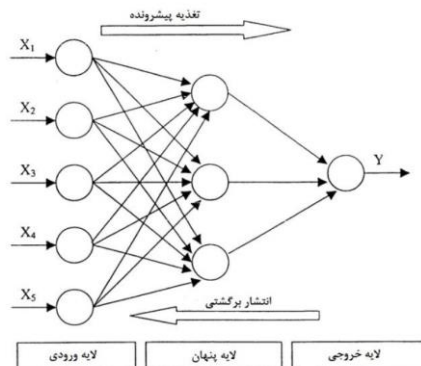
پارامتر	تابع مقیاس‌سازی
شن طبیعی (NCA)	$NCA_{scaled} = [(0.9 - 0.1)(NCA - NCA_{min}) / (NCA_{max} - NCA_{min})] + 0.1$
ماسه طبیعی (NFA)	$NFA_{scaled} = [(0.9 - 0.1)(NFA - NFA_{min}) / (NFA_{max} - NFA_{min})] + 0.1$
شن باز یافتی (RCA)	$RCA_{scaled} = [(0.9 - 0.1)(RCA - RCA_{min}) / (RCA_{max} - RCA_{min})] + 0.1$
ماسه باز یافتی (RFA)	$RFA_{scaled} = [(0.9 - 0.1)(RFA - RFA_{min}) / (RFA_{max} - RFA_{min})] + 0.1$
سیمان (C)	$C_{scaled} = [(0.9 - 0.1)(C - C_{min}) / (C_{max} - C_{min})] + 0.1$
آب (W)	$W_{scaled} = [(0.9 - 0.1)(W - W_{min}) / (W_{max} - W_{min})] + 0.1$
مواد افزودنی (ADD)	$ADD_{scaled} = [(0.9 - 0.1)(ADD - ADD_{min}) / (ADD_{max} - ADD_{min})] + 0.1$
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (f_{cu})	$f_{cu\ scaled} = [(0.9 - 0.1)(f_{cu} - f_{cu\ min}) / (f_{cu\ max} - f_{cu\ min})] + 0.1$

^۱ log-sigmoid

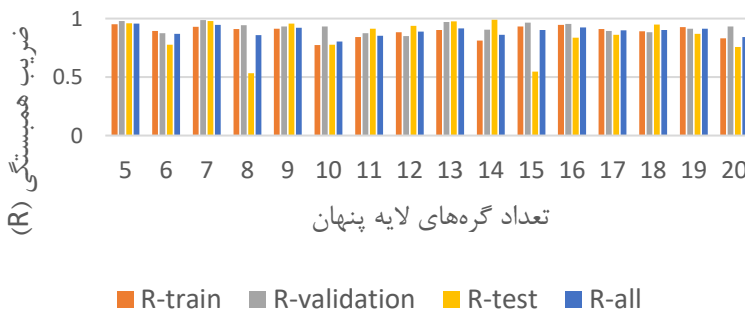
اجرای شبکه عصبی

برای اجرای طرح اختلاط پیشنهادی، از نمونه‌های آزمایشگاهی شبکه پس‌انتشار برگشتی [۵۱] استفاده شده است. شبکه پس‌انتشار برگشتی به‌عنوان آسان‌ترین و مؤثرترین مدل در میان شبکه‌های چندلایه، داده‌های مورد نیاز در شبکه را به دو گروه داده‌های آموزشی که حدود ۷۰ درصد از کل داده‌ها را برای آموزش و وزن‌دهی و داده‌های آزمایشی که حدود ۳۰ درصد از کل داده‌ها که در آموزش نقش ندارند و به‌عنوان راندمان شبکه آموزش‌دیده می‌باشند، تقسیم می‌کند. این شبکه از یک لایه ورودی که تعداد ورودی‌های شبکه، بیانگر تعداد پارامترهای موجود در بخش ورودی شبکه است و از یک یا چند لایه پنهان که هرکدام دارای تعدادی نورون هستند که تعداد این نورون‌ها و نوع تابع رفتاری در رفتار شبکه مورد نظر تأثیرگذار است، مطابق شکل ۱۲ تشکیل شده‌اند. شکل ۱۲ نمونه شماتیک از لایه ورودی و پنهان شبکه عصبی مصنوعی را مشخص کرده است.

یک شبکه با تعداد گره بهینه در لایه پنهان، شبکه‌ای است که قادر باشد با حداقل مقدار خطای ممکن، همبستگی قابل قبولی بین مقادیر خروجی شبکه و مقادیر هدف برقرار کند. در این پژوهش شبکه‌هایی با تعداد ۵ تا ۲۰ گره در لایه پنهان آموزش شدند. مقادیر ضرایب همبستگی و خطای این شبکه‌ها در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. همچنین تابع انتقال به‌کاررفته در لایه خروجی از نوع خطی ساده و در لایه پنهان از نوع تانژانت سیگموئید است.

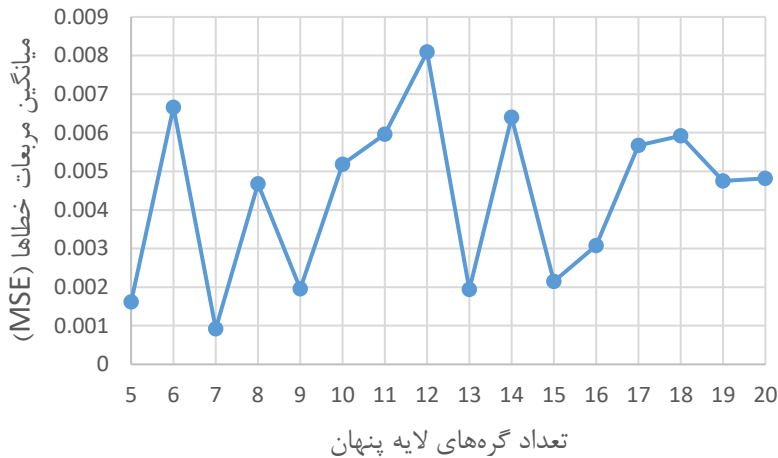


شکل ۱۲. نمونه شماتیک از ساختار شبکه عصبی مصنوعی



شکل ۱۳. ضرایب همبستگی به ازای تعداد گره‌های لایه پنهان

با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴ اغلب شبکه‌ها دارای ضرایب همبستگی بالایی هستند و از این میان شبکه‌ای با ۷ گره در لایه پنجم، علاوه بر بیشترین مقدار ضرایب همبستگی (R)، کمترین خطا را نیز دارد. بنابر این، شبکه با ۷ گره در لایه پنجم به‌عنوان شبکه بهینه برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه انتخاب می‌شود.



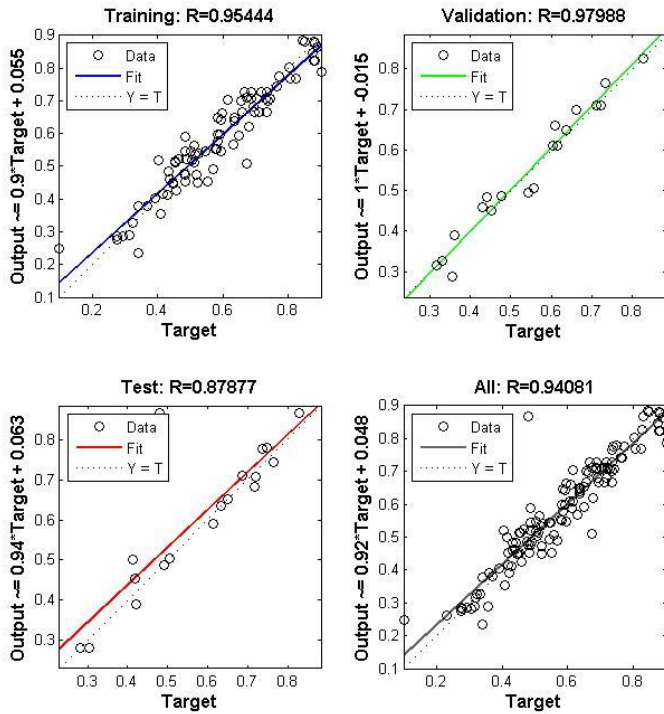
شکل ۱۴. میانگین مربعات خطاها به ازای تعداد گره‌های پنجم

صحت‌سنجی روش شبکه عصبی با نتایج آزمایشگاهی

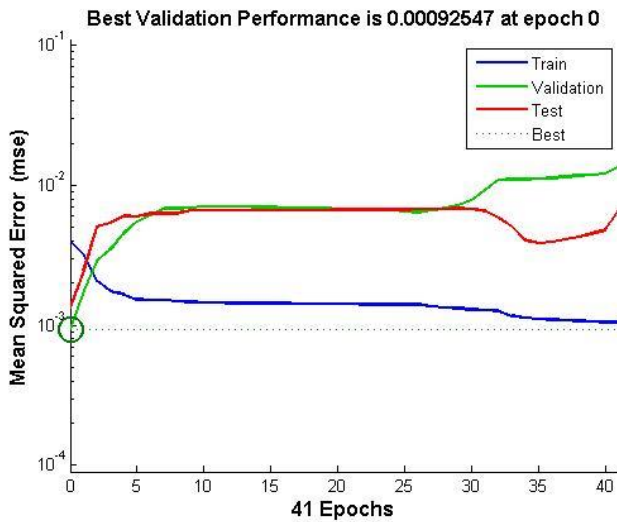
پس از انتخاب هندسه شبکه عصبی مصنوعی، داده‌های مورد استفاده در قسمت صحت‌سنجی نباید در بخش آموزش شبکه استفاده شوند. علت این کار آن است که سنجش صحت شبکه عصبی در ارائه تخمین دقیق از مقاومت فشاری ۲۸ روزه داده‌هایی است که در قسمت آموزش به‌کار گرفته نشده‌اند.

شکل ۱۵ نمودارهای عملکرد شبکه عصبی طراحی‌شده، شامل نمودار رگرسیون (R) داده‌های آموزش، صحت‌سنجی و آزمون و تمامی داده‌ها ارائه شده است. همچنین در شکل ۱۶ نمودار میانگین مربعات خطا در فرآیند آموزش شبکه جهت تخمین مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح اختلاط نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۵، ضریب رگرسیون برای گروه آموزشی برابر ۰/۹۵۴، برای گروه ارزیابی برابر ۰/۹۷۹ و برای گروه آزمایشی برابر ۰/۸۷۸ به‌دست آمده است. مقادیر حاصله در نمودار شکل ۱۵، نزدیک به ۱ و حاکی از یادگیری و عملکرد بسیار خوب شبکه عصبی و ضریب خطی همبستگی بین داده‌های مدل‌سازی و مقادیر پیش‌بینی‌شده بالا است.

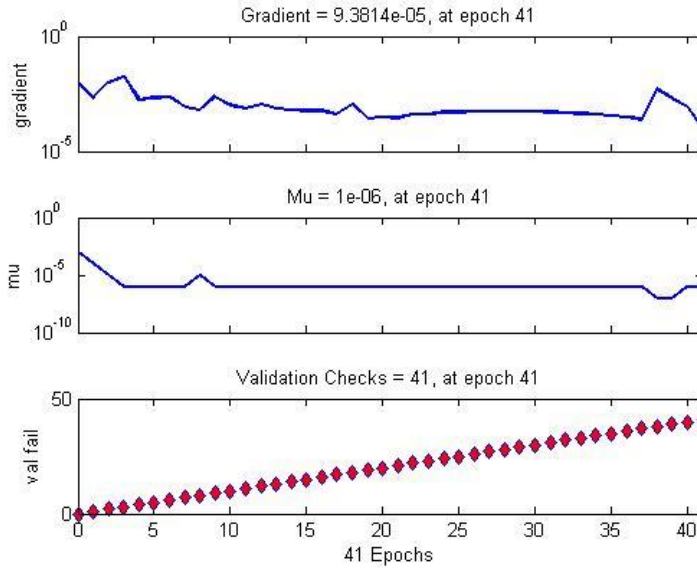
در شکل ۱۶ مقدار رگرسیون شبکه انتخابی در مراحل مختلف مدل‌سازی بررسی شده است. شکل ۱۶ حاکی از افت حداقل مربعات خطاست. شکل ۱۷ روند تغییرات شبکه طی اپوک‌های مختلف را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۸ نمودار مقایسه مقادیر مقاومت فشاری ۲۸ روزه حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی با مقادیر پیش‌بینی‌شده از شبکه عصبی است. همان‌طور که از شکل ۱۸ مشاهده می‌شود انطباق خوبی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر آزمایشگاهی وجود دارد.



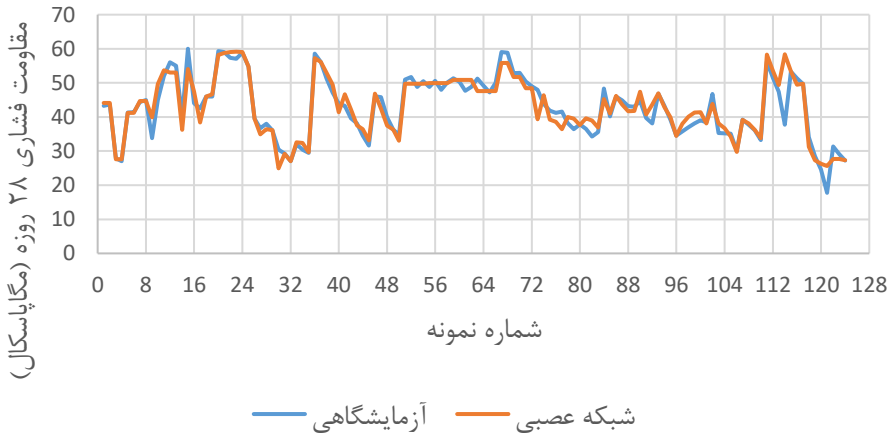
شکل ۱۵. نمودار رگرسیون (R) داده‌های آموزش، صحت‌سنجی و آزمون و تمامی داده‌ها



شکل ۱۶. نمودار میانگین مربعات خطا در فرایند آموزش شبکه



شکل ۱۷. روند تغییرات شبکه در مراحل آموزش شبکه



شکل ۱۸. نمودار مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج شبکه عصبی

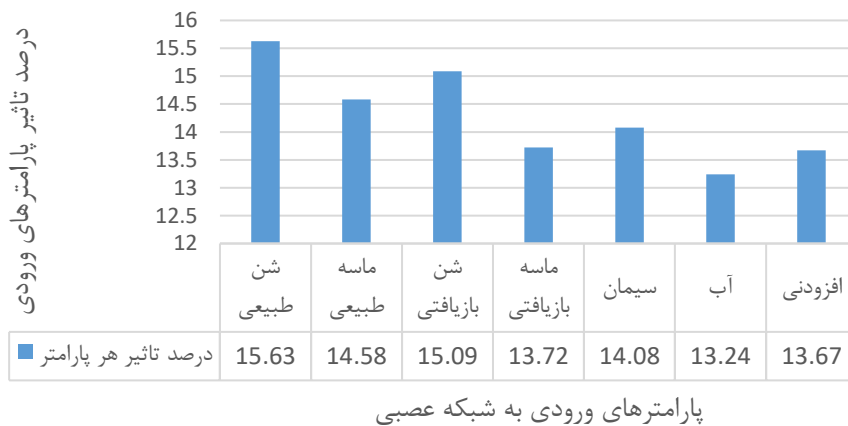
آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی

تا پایان سال ۱۹۸۰، برای تفسیر شبکه‌های عصبی مصنوعی که دارای نورون‌های ورودی (N)، نورون‌های پنهان (L) و نورون‌های خروجی (M) هستند، برای تحلیل اثر متغیرهای ورودی بر خروجی این شبکه، روش‌های مختلفی ارائه شده است. آنالیز براساس مقادیر وزن، تنها بر مبنای مقادیر ذخیره در ماتریس استاتیک وزن‌ها برای تعیین تأثیر نسبی هر یک از داده‌های ورودی بر داده‌های خروجی شبکه است. معادلات مختلفی مبتنی بر مقادیر وزن‌ها ارائه شده است که تمامی آن‌ها با محاسبه حاصل ضرب وزن‌ها W_{ij} (وزن اتصال بین نورون ورودی i و

نورون مخفی j و v_{jk} (وزن اتصال بین نورون مخفی j و نورون خروجی k) برای هریک از نورون‌های مخفی شبکه به صورت مجموع حاصل ضرب‌های محاسبه شده به دست می‌آید. یکی از کاربردی‌ترین معادلات، معادله میلن^۱ [۵۲] است. معادله میلن روش اصلاحی روش گارسون^۲ است که با استفاده از قدر مطلق وزن‌ها، نسبت صحیحی را به دست آورد. رابطه ۱ معادله میلن را نشان می‌دهد.

$$IIF = \frac{\sum_{j=1}^{n_{hidden}} \frac{w_{jk}}{\sum_{l=1}^{n_{inputs}} |w_{jl}|} \cdot w_{oj}}{\sum_{k=1}^{n_{inputs}} \left(\sum_{j=1}^{n_{hidden}} \frac{w_{jk}}{\sum_{l=1}^{n_{inputs}} |w_{jl}|} \cdot w_{oj} \right)} \quad (1)$$

مطابق با رابطه ۱، درصد اهمیت پارامترهای ورودی^۳ به شبکه عصبی در شکل ۱۹ محاسبه و ارائه شده است. نتایج آنالیز حساسیت در شکل ۱۹، حاکی از تأثیر بالای مقدار شن طبیعی و تأثیر کم مقدار وزنی آب بر تابع هدف شبکه عصبی است.



شکل ۱۹. درصد اهمیت پارامترهای ورودی به شبکه عصبی

نتیجه گیری

پس از انجام آزمایش‌ها و تحلیل آن، نتایج زیر به عنوان یافته‌های پژوهش ارائه می‌شود:

- ۱- بتن بازیافتی به علت تخلل بالا، چگالی کمتر و در نتیجه جذب آب بیشتری نسبت به بتن طبیعی دارد. همچنین سنگ‌دانه درشت‌دانه بازیافتی در حدود ۲ برابر سنگ‌دانه درشت‌دانه طبیعی و سنگ‌دانه ریزدانه

¹ Milne

² Garson

³ Importance of Input Factors (IIF)

- بازیافتی، ۲/۸۵ برابر سنگدانه ریزدانه طبیعی جذب آب دارد و وزن مخصوص سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی کمتر است. از طرفی، به علت کیفیت و مقاومت مکانیکی پایین سنگدانه درشت‌دانه بازیافتی، درصد شکستگی این نوع سنگدانه به مراتب بیشتر از سنگدانه‌های درشت‌دانه طبیعی است.
- ۲- مقدار تغییرات مقاومت بتن بازیافتی بسته به نسبت آب به سیمان، درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، جنس و شرایط رطوبتی سنگدانه‌ها است. به‌طور کلی، با کاهش نسبت آب به سیمان، کاهش مقاومت بتن با سنگدانه بازیافتی محسوس‌تر است. همچنین با حضور سنگدانه بازیافتی در بتن مقاومت فشاری در نمونه‌های مورد آزمایش افزایش یافته است.
- ۳- حضور الیاف پلاستیکی در بتن بازیافتی، اندکی بهبود در مقاومت فشاری به نسبت بتن طبیعی دارد و به نسبت بتن بازیافتی منجر به کاهش مقاومت شده است. علل این کاهش، به‌کارگیری ۱ درصد الیاف در بتن است که منجر به ایجاد تخلخل در فضای بتن می‌شود و در نتیجه عملکرد مناسبی در مقابل مقاومت فشاری نخواهد داشت.
- ۴- ارزیابی اقتصادی طرح‌های اختلاط بتن بازیافتی و بتن الیافی بازیافتی براساس فهرست بهای مصالح ساختمانی در سال ۹۸ نشان داد که حضور مصالح بازیافتی منجر به کاهش ۷۴ درصد هزینه‌های ساخت بتن می‌شود که علاوه بر کاهش هزینه‌ها، محیط زیست و منابع سنگی کشور را حفظ می‌کند.
- ۵- مقایسه نتایج طرح اختلاط پیشنهادی برای بتن بازیافتی و الیافی بازیافتی با استانداردهای مربوط به جدول‌های بتنی شهری، حاکی از قبولی مشخصات مکانیکی بتن بازیافتی برای استفاده در بتن جدول‌های شهری است.
- ۶- با استفاده از روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم و با داشتن تعداد کافی داده‌های آزمایشگاهی، ضمن لحاظ نمودن خطا و عدم قطعیت موجود در داده‌ها، می‌توان بدون صرف زمان و هزینه میزان مقاومت فشاری را برای مصارف مختلف بتن بازیافتی پیش‌بینی کرد.
- ۷- ضریب همبستگی تقریباً برابری در خروجی‌های آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه حاصل از شبکه عصبی مصنوعی موجود است؛ بنابراین، این روش می‌تواند قابلیت پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه را در حد مطلوب و مناسب داشته باشد.
- ۸- نتایج آنالیز حساسیت، حاکی از تأثیر بالای مقدار شن طبیعی و تأثیر کم مقدار آب بر روی تابع هدف شبکه عصبی است. از این‌رو، برای داشتن یک طرح اختلاط مفید باید بر روی درشت‌دانه طبیعی و بازیافتی حساسیت بیشتری اعمال کرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از هیئت محترم داوری به دلیل مطالعه و راهنمایی‌های ارزنده برای بهبود این مقاله و همچنین از مسئولین محترم دانشگاه فنی و حرفه‌ای مازندران تشکر می‌کنند. شایان یادآوری است انجام این طرح از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه فنی و حرفه‌ای تأمین شده است.

References

- [1] Myers, T. (2019). *The Greening of the Concrete Jungle: The Connection between Young Farmers and the Remediating of Food Deserts* [Senior Independent Study Theses,

- Department of Earth Sciences, The College of Wooster]. United States. <https://openworks.wooster.edu/independentstudy/8582/>
- [2] Frondistion, K., & Yannas, S. (1980). Economics of Concrete Recycling in United States. *Advanced Research institute problems in the recycling concrete, France*, 163-168.
- [3] Hansen, T. C. (1992, April 21). *Recycling of demolished concrete and masonry* (1st ed.). CRC Press, Taylor & Francis. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781482267075>
- [4] Aghili Lotf, M., & Ramezaniapour, A. M. (2018). Investigation on the Correlations Between Different Physical and Mechanical Properties of Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate. *MODARES CIVIL ENGINEERING JOURNAL*, 18(3), 153-167. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-25738-en.html>
- [5] de Brito, J., & Saikia, N. (2012). *Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste*. Springer London. <https://books.google.com/books?id=gt5SDopv2hwC>
- [6] Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., & Degeimbre, R. (2009). Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3382-3387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.031>
- [7] Dilbas, H., Çakır, Ö., & Atis, C. (2019). Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized Ball Milling Method. *Construction and Building Materials*, 212, 716-726. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.007>
- [8] Dimitriou, G., Savva, P., & Petrou, M. F. (2018). Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 158, 228-235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.137>
- [9] Moghimi, M., Shafiq, P., Baranjian, J., & Nemati, K. (2010). Experimental study of the effect of using microsilica and superplasticizer on some mechanical properties of recycled concrete made of crushed concrete. *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, 21(2), 153-162. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=134394>
- [10] Choi, W.-C., & Yun, H.-D. (2012). Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading. *Engineering Structures*, 41, 285-293. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.037>
- [11] Wagih, A. M., El-Karmoty, H. Z., Ebid, M., & Okba, S. H. (2013). Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. *HBRC Journal*, 9(3), 193-200. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.08.007>
- [12] Rao, A., Jha, K. N., & Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.010>
- [13] Radonjanin, V., Malešev, M., Marinković, S., & Al Malty, A. E. S. (2013). Green recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 1503-1511. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.076>
- [14] González-Fonteboa, B., & Abella, F. (2008). Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. *Building and Environment*, 43(4), 429-437. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.008>
- [15] Heeralal, M., Pancharathi, R., & Rao, Y. V. (2009). Flexural fatigue characteristics of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete (SFRRAC). *Facta Universitatis - series : Architecture and Civil Engineering*, 7(1), 19-33. <https://doi.org/10.2298/FUACE0901019H>

- [16] Umadevi, C., & Gowda, M. (2014). Study on strength characteristics of recycled aggregate concrete using polypropylene fiber. *Journal of Civil Engineering Technology and Research*, 2(1), 259-266.
- [17] Malešev, M., Radonjanin, V., & Marinković, S. (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Sustainability*, 2(5), 1204-1225. <https://doi.org/10.3390/su2051204>
- [18] Jain, N., & Garg, M. (2015). Development of Green Paving Blocks Using Recycled Aggregates: An Approach towards Sustainability. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 9(1), 52-61. <https://doi.org/10.9790/2402-09125261>
- [19] Ahrari Fard Sarab, H. R., Berggol, I., Manzoori, A., Mesbahpour, M., Nouri Sultan, J., & Motavali, M. (2013, March). *Technical specifications and matching sections of urban concrete tables and streams*. T. T. a. E. C. O. Technical and Civil Deputy of Tehran, Technical and executive system of Tehran Municipality, Technical criteria and standards. https://shaghoor.ir/Files/818089_6-8-61.pdf
- [20] Committee, D. (1960). D 1129 - 60 Standard Definitions of Terms Relating to Industrial Water and Industrial Waste Water. In (pp. 391-397). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP48545S>
- [21] National Standard Organization of Iran. (2015). Granulation test of fine and coarse aggregates - National Standard No. 4977. In: Teknobatar.
- [22] ASTM International. (2017, August 16). *ASTM C136-01- Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International. <https://www.astm.org/c0136-01.html>
- [23] ASTM International. (2015, March 09). *ASTM C127-12- Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*. ASTM International. <https://www.astm.org/c0127-12.html>
- [24] Awasthi, A., & Goyal, S. (2017). Recycled aggregate from C&D waste modified by dry processing and used as a partial replacement of coarse aggregate in concrete. *J Mater Sci Surf Eng*, 5, 671-678.
- [25] Li, T., Xiao, J., Zhu, C., & Zhong, Z. (2016). Experimental study on mechanical behaviors of concrete with large-size recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 120, 321-328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.110>
- [26] Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., & Xu, W. (2015). Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 81, 179-186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037>
- [27] Zhou, C., & Chen, Z. (2017). Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 134, 497-506. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.163>
- [28] Salimbahrami, S. R., Shakeri, R., & Rezapour, M. A. (2017). *A review of the mechanical properties of concrete with recycled aggregates* The International Conference on Contemporary Iranian Civil, Architecture and Urban Development, Tehran, Iran,
- [29] Awchat, G., & Kanhe, N. (2013). Experimental studies on polymer modified steel fibre reinforced recycled aggregate concrete. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)*, 2(12), 126-134. <https://www.ijaiem.org/volume2issue12/IJAIEM-2013-12-04-005.pdf>
- [30] C143/C143M-15a, A. (2015). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. *West Conshohocken, PA: ASTM International*.

- [31] Casuccio, M., Torrijos, M. C., Giaccio, G., & Zerbino, R. (2008). Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1500-1506. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.032>
- [32] Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18(6), 461-468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005>
- [33] ASTM International. (2013). *ASTM C642-13- Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*. American National Standards Institute (ANSI) Webstore. <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmc64213>
- [34] British Standards Institution (BSI). (2019, October). *BS EN 12390-3:2019 Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens* Civilnode. <https://civilnode.com/download-standard/10640443541281/bs-en-12390-32019-testing-hardened-concrete-part-3-compressive-strength-of-test-specimens>
- [35] Tehran, T. a. C. D. o. (2014). Technical specifications and matching sections of urban concrete tables and streams. In. Tehran.
- [36] Institution, B. S. (2011). *Testing hardened concrete: Compressive strength of test specimens*. BSi.
- [37] Iran, N. S. O. o. (2015). *Concrete - Determination of elastic modulus and Poisson's coefficient of concrete - Test method*. Tehran
- [38] *Price list of the basic unit of buildings in 2019*. (2019). Tehran: Country Program and Budget Organization.
- [39] Naderpour, H., Kheyroddin, A., & Amiri, G. G. (2010). Prediction of FRP-confined compressive strength of concrete using artificial neural networks. *Composite Structures*, 92(12), 2817-2829. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.04.008>
- [40] Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735-742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
- [41] Evangelista, L., & de Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 397-401. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004>
- [42] Yang, K.-H., Chung, H.-S., & Ashour, A. F. (2008). Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. *ACI Materials Journal*, 105(3), 289-296.
- [43] Corinaldesi, V. (2010). Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1616-1620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.031>
- [44] Fonseca, N., de Brito, J., & Evangelista, L. (2011). The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. *Cement and Concrete Composites*, 33(6), 637-643. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.002>
- [45] Ferreira, L., de Brito, J., & Barra Bizinotto, M. (2011). Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, 63(8), 617-627. <https://doi.org/10.1680/mac.2011.63.8.617>
- [46] Kou, S. C., & Poon, C. S. (2008). Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources. *Magazine of Concrete Research*, 60(1), 57-64. <https://doi.org/10.1680/mac.2007.00052>

- [47] Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H., & Kou, S. C. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 31-36. [https://doi.org/10.1016/S008-8846\(03\)00186-8](https://doi.org/10.1016/S008-8846(03)00186-8)
- [48] Gómez-Soberón, J. M. V. (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cement and Concrete Research*, 32(8), 1301-1311. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00795-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00795-0)
- [49] Khatib, J. M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 763-769. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.017>
- [50] Fan, C.-C., Huang, R., Hwang, H., & Chao, S.-J. (2016). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. *Construction and Building Materials*, 112, 708-715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.154>
- [51] Bosscher, P. J., Edil, T. B., & Kuraoka, S. (1997). Design of highway embankments using tire chips. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 123(4), 295-304. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:4\(295\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:4(295))
- [52] Milne, L. (1995). *Feature selection using neural networks with contribution measures* AI-CONFERENCE- World Scientific Publishing. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.45.9756&rep=rep1&type=pdf>