

پیش‌بینی مقاومت ۲۸ روزه بتن حاوی میکروسیلیس، متاکائولن، خاکستر پوسته برنج، زئولیت براساس مقاومت ۷ روزه با استفاده از شبکه‌های عصبی و منطق فازی

کیهان بهداد^۱، اویس قدوسیان^۲، حسین مهدیخانی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد (سازه)، دانشگاه آزاد واحد تاکستان

۲- مربی گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

۳- استادیار گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

1-k.behdadkb@gmail.com

2-qodousian@hotmail.com

3-amirhossein-me@yahoo.com

چکیده

امروزه بتن به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان شناخته شده است. این نیاز و کاربرد گسترده بتن، لزوم بررسی رفتار و عوامل مؤثر بر رفتار آن را آشکار می‌سازد. لذا در تولید بتن به منظور برآورد ملزومات کارایی و مقاومت، باید دقت بیشتری در ساخت آن صورت گیرد. در زمینه تخمین رفتار بتن، تکنیک‌های ریاضی مختلفی توسط محققین ارائه شده است. به طوری که نظریه مجموعه‌های فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی ابزار بسیار مؤثری را برای مدلسازی و آنالیز مفاهیم مبهم و نادقیق فراهم می‌آورد. هدف از انجام طرح حاضر، پیش‌بینی مقاومت ۲۸ روزه بتن از روی مقاومت ۷ روزه با وجود و عدم وجود پوزولان‌های متاکائولن، میکروسیلیس، خاکستر پوسته برنج و زئولیت به کمک منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد.

کلیدواژه: بتن، پوزولان، منطق فازی، شبکه‌های عصبی، مقاومت فشاری

۱- مقدمه

احتمالاً اولین هدف بشر از ساخت ماشین‌های حسابگر و کامپیوتر، ارائه وسیله‌ای دقیق و در عین حال سریع برای انجام کارهای محاسباتی بوده است که در این میان، مهندسی رشته سازه نیز با تنظیم نرم‌افزارهای تحلیل گر و طراح، بهره فراوانی از این وسیله برده‌اند. اما اکنون پژوهشگران علوم کامپیوتری، در کوشش برای ارائه راه‌هایی برای کاربردهای غیرمحاسباتی از کامپیوتر بوده و می‌باشند، توسعه‌های اخیر در روش هوش مصنوعی، راه‌حل جدیدی در مسائل مربوط به مهندسی عمران در پیش روی ما نهاده است. (مدلسازی مقاومت بتن، توسط شیوه‌های سنتی و رگرسیونی، قادر به ایجاد پیش‌بینی‌های کاملاً دقیق خواهد بود، چرا که رفتار مقاومتی بتن، تحت تأثیر شرایط غیرخطی است). در گذشته، محققین تکنیک‌های مختلفی را در زمینه تخمین رفتار بتن ارائه نموده‌اند که بیشتر آنها بر پایه رگرسیون خطی و غیرخطی استوار بوده‌اند [۱ و ۲]. اما امروزه روش‌هایی بر پایه هوش مصنوعی مانند منطق فازی و شبکه‌های عصبی در این زمینه با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳-۸]. اوزتاس و همکاران [۹] برای تخمین اسلامپ و مقاومت فشاری بتن از مدل سازی به کمک

شبکه های عصبی استفاده نمودند. مالاسری و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۶ توسط شبکه های عصبی مصنوعی به پیش بینی خصوصیات بتن پرداختند. در سال ۲۰۰۸ فاضل زرنندی و همکاران [۱۱] به کمک ترکیب شبکه های عصبی و منطق فازی مدلی کارا برای مقاومت فشاری بتن با شش ورودی و یک خروجی ارائه نمودند. در سال ۲۰۱۱ جیانگ پینگ [۱۲] به کمک شبکه های عصبی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن را پیش بینی نمود. دیاس و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۱ با مطالعه پیش بینی خواص بتن حاوی مواد افزودنی، به وسیله شبکه های عصبی به این نتیجه رسیدند که بکارگیری مدل های پیش بینی مقاومت برای بررسی بیشتر پارامترهای مؤثر بر مقاومت بتن مفید است. زین و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۰۹ به مطالعه پیش بینی مقاومت بتن با استفاده از رگرسیون پرداختند و به این نتیجه رسیدند که هوش مصنوعی نتایج بهتری نسبت به رگرسیون خطی دارد. سردمیر و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۰۹ پیش بینی مقاومت فشاری بتن حاوی متاکا^۲ لِن رابا استفاده از شبکه ها عصبی و منطق فازی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که شبکه عصبی و منطق فازی در پیش بینی مقاومت فشاری بسیار موفق بوده است. باقرزاده و همکاران [۱۶] در سال ۱۳۹۴ برآوردی از مقاومت فشاری بتن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی داشتند و به این نتیجه رسیدند که شبکه عصبی بادقت بالا، قادر به پیش بینی مقاومت فشاری برای مجموعه داده ها بوده است. نجیمی و همکارانش [۱۷] در سال ۱۳۸۹ با استفاده از روش فازی عصبی - تطبیقی مقاومت فشاری بتن و خواص آن را پیش بینی نمودند. سیونگ چنگ لی [۱۸] در سال ۲۰۰۳ نیز با استفاده از شبکه عصبی مقاومت بتن را پیش بینی نمود. حیدری و همکارانش [۱۹] در سال ۱۳۹۴ با به کارگیری منطق فازی، مقاومت فشاری بتن پلیمری را پیش بینی نمودند. در این مطالعه با در نظرگیری اجزای نرمالیزه شده طرح اختلاط بتن و مقاومت ۷ روزه آن به عنوان متغیرهای ورودی از شبکه های عصبی و منطق فازی برای برآورد مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن استفاده می شود.

۲- برنامه آزمایشگاهی

جهت شناخت بهتر خواص مکانیکی بتن حاوی پوزولان های ذکر شده و مقایسه آن با بتن بدون پوزولان، آزمایش های مختلفی در آزمایشگاه انجام گرفت. از جمله آزمایش اسلامپ برای کارایی بتن و انجام آزمون مقاومت فشاری روی نمونه های مکعبی ۱۵ سانتی در سنین ۷، ۲۸ و ۴۲ روزه در کلیه نمونه ها، مقدار پوزولان بکار رفته براساس مقدار کاربردی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد بوده که براساس نتایج مطالعات در دسترس، درصد مناسبی می باشد، و مصالح به شرح زیر می باشد:

در این پژوهش، ماسه مصرفی با اندازه $4/75 \text{ mm}$ -۰ و وزن ظاهری آن در حالت اشباع با سطح خشک برابر 2700 kg/m^3 و جذب آب ۲۴ ساعت آن، ۱/۵ درصد، شن مصرفی عبوری از الک (۱۹ mm) و مانده روی الک (۴/۷۵ mm)، در این پژوهش از سیمان خزر نوع پرتلند ۴۲۵-۱ استفاده گردید. آب مصرفی هم آب شرب می باشد و ترکیب پوزولان های مصرفی براساس مقدار کاربردی ذکر شده مورد استفاده قرار گرفت. در مجموع به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش، ۱۲ طرح اختلاط به علاوه یک طرح کنترل طراحی گردید که در جدول (۱) مشاهده میگردد:

جدول ۱- طرح اختلاط بتن های ساخته شده

ردیف	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
نام طرح	Ctrl	R5	R10	R15	M5	M10	M15	S5	S10	S15	Z5	Z10	Z15
سیمان	۴۰۰	۳۸۰	۳۶۰	۳۴۰	۳۸۰	۳۶۰	۳۴۰	۳۸۰	۳۶۰	۳۴۰	۳۸۰	۳۶۰	۳۴۰
kg/m^3													

نوع پوزولان	خ پ	خ پ	خ پ	متا کائولن	متا کائولن	متا کائولن	سیلیس .م	سیلیس .م	سیلیس .م	زئولیت	زئولیت	زئولیت	kg /m ³
پوزولون	۲۰	۴۰	۶۰	۲۰	۴۰	۶۰	۲۰	۴۰	۶۰	۲۰	۴۰	۶۰	---
شن	۸۸۰	۸۷۶	۸۷۳	۸۸۱	۸۷۹	۸۷۷	۸۷۹	۸۷۶	۸۷۴	۸۸۰	۸۷۷	۸۷۴	۸۸۳
ماسه	۸۸۰	۸۷۶	۸۷۳	۸۸۱	۸۷۹	۸۷۷	۸۷۹	۸۷۶	۸۷۴	۸۸۰	۸۷۷	۸۷۴	۸۸۳
آب	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
w/c	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵

۳- نتایج آزمایش

۳-۱- نتایج آزمایش های اسلامپ

پس از ساخت ۱۳ طرح اشاره شده، آزمایش اسلامپ هر یک از طرح ها انجام گرفت که نتایج حاصله در جدول (۲) مشاهده میشود:

جدول ۲- نتایج اسلامپ تمام طرح های ساخته شد

ردیف	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
نام طرح	Ctrl	R5	R10	R15	M5	M10	M15	S5	S10	S15	Z5	Z10	Z15
اسلامپ (cm)	۱۴	۱۲	۱۹	۹	۱۱	۷	۱۷	۶	۸	۴	۱۲	۳/۵	۴

مشاهده میگردد که طرح های حاوی پوزولان های زئولیت و میکرو سیلیس بیشترین اثر منفی رادر مقدار اسلامپ بتن ایجاد می کنند که در طرح اختلاط بتن حاوی این پوزولان ها، باید به این نکته توجه شود.

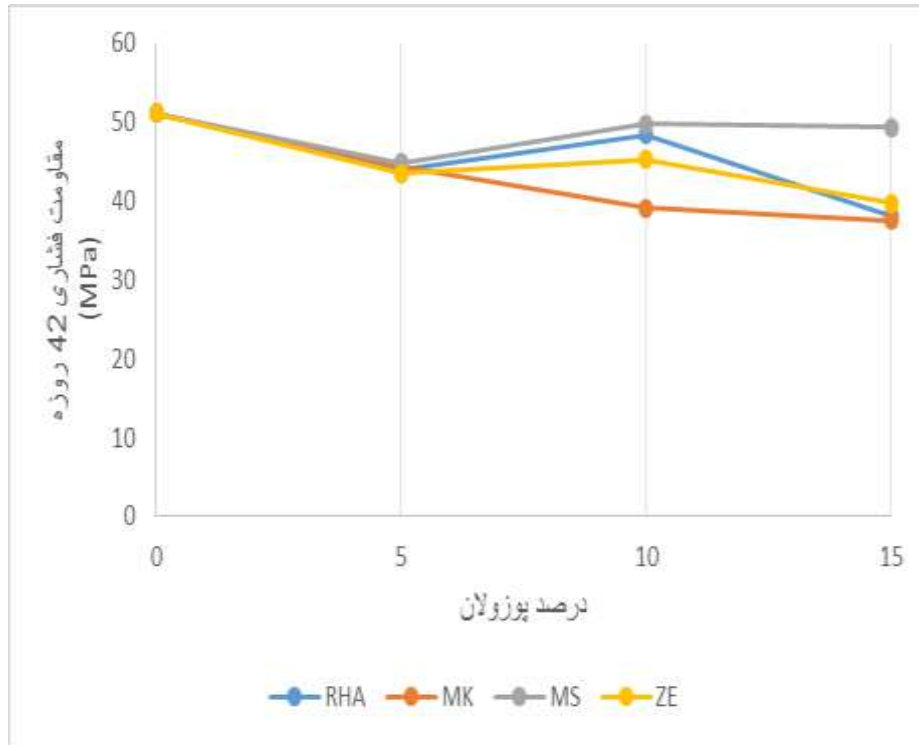
۳-۲- نتایج آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها

در جدول (۳) نتایج آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه آورده شده است:

جدول ۳- نتایج آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها

ردیف	نام طرح	مقاومت فشاری ۷ روزه (مگاپاسکال)	طرح مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری ۴۲ روزه (مگاپاسکال)
۰	Ctrl	۳۳/۲۰	۴۷/۵۰	۵۱/۱۰
۱	R5	۲۲/۵۳	۳۴/۴۷	۴۴/۰۴
۲	R10	۲۵/۲۲	۳۶/۳۶	۴۸/۴۴
۳	R15	۲۰/۹۸	۲۹/۶۰	۳۸/۲۲
۴	M5	۲۲/۰۷	۳۲/۰۰	۴۴/۳۱
۵	M10	۲۱/۲۵۳	۳۰/۵۱	۳۹/۱۱
۶	M15	۱۸/۶۷	۲۸/۲۷	۳۷/۵۶
۷	S5	۲۳/۴۴	۳۶/۶۷	۴۴/۸۹
۸	S10	۳۱/۰۰	۴۲/۷۱	۴۹/۷۸
۹	S15	۳۰/۳۳	۵۱/۵۸	۴۹/۷۸
۱۰	Z5	۲۱/۴۰	۳۲/۲۴	۴۳/۵۶
۱۱	Z10	۲۳/۷۳	۳۲/۶۰	۴۵/۳۳
۱۲	Z15	۱۷/۹۱	۳۰/۰۲	۳۹/۷۸

در شکل (۱) ارتباط بین مقاومت فشاری ۴۲ روزه و درصد پوزولان نشان داده شده است.



شکل ۱- ارتباط بین مقاومت فشاری با نوع و درصد پوزولان

از این نمودار می توان درصد بهینه در نوع پوزولان را برای دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری تعیین کرد. می توان نتیجه گرفت که به جز پوزولان متاکائولن که ۵ درصد استفاده از آن، مقدار بهینه است، در مورد سایر پوزولانها (میکروسیلیس، خاکستر پوسته برنج و زئولیت) با ۱۰ درصد جایگزینی وزنی با سیمان به مقدار مقدار بهینه خود می رسند و استفاده از میکروسیلیس منجر به بیشترین مقاومت فشاری و بکارگیری متاکائولن باعث ایجاد کمترین مقاومت فشاری می شود. مطابق انتظار با افزایش تعداد روزهای عمل آوری شاهد افزایش مقاومت فشاری نمونه ها هستیم. در جدول (۴) نسبت مقاومت ۲۸ به ۷ روزه و ۴۲ به ۲۸ روزه ذکر شده است:

جدول ۴- افزایش مقاومت فشاری نمونه ها با افزایش تعداد روزهای عمل آوری

نام طرح	Ctrl	R5	R10	R15	M5	M10	M15	S5	S10	S15	Z5	Z10	Z15
نسبت مقاومت ۷ روزه به ۲۸ روزه	۰/۷۰	۰/۶۵	۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۶۶	۰/۶۴	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۶۶	۰/۷۳	۰/۶۰
نسبت مقاومت ۴۲ روزه به ۲۸ روزه	۱/۰۸	۱/۲۸	۱/۳۳	۱/۲۹	۱/۳۸	۱/۲۸	۱/۳۳	۱/۲۲	۱/۱۷	۱/۱۹	۱/۳۵	۱/۳۹	۱/۳۲

می توان دید که نسبت مقاومت فشاری ۷ روزه به ۲۸ روزه طرح ها در محدوده ۰/۶ تا ۰/۸ قرار می گیرد و در این بین تفاوت مشخصی بین نمونه بدون پوزولان با نمونه های دارای پوزولان مشاهده نگردید. همچنین طرح های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد میکروسیلیس و ۵ درصد زئولیت، بیشترین مقدار این نسبت را دارند. اما اختلاف نسبت مقاومت ۴۲ روزه به ۲۸ روزه در طرح های مختلف بیشتر است، و نسبت مقاومت فشاری ۴۲ روزه به ۲۸ روزه تمامی طرح ها در محدوده ۱ تا ۱/۴

قرار می‌گیرند، در اینجا طرح بدون پوزولان، با فاصله معناداری، دارای نسبت کمتری در مقایسه با طرح‌های حاوی پوزولان است. دقت شود هرچه روند کسب مقاومت در بتن طولانی‌تر باشد، لزوم عمل‌آوری بیشتر، اهمیت بالاتری می‌یابد.

۴- پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن

۴-۱- پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی

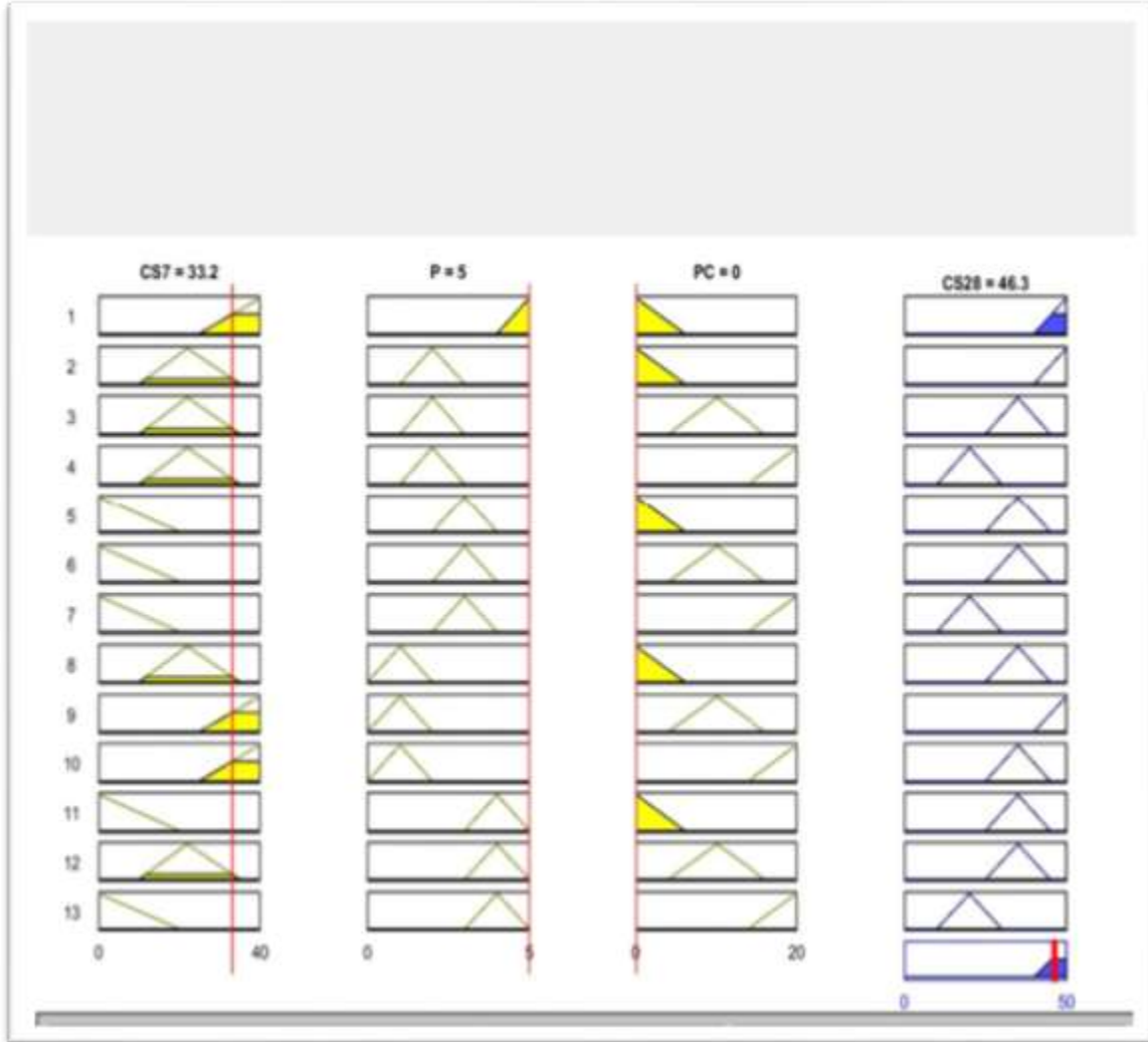
تحلیل رگرسیون خطی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بر مبنای مقاومت فشاری ۷ روزه، مقدار پوزولان و نوع پوزولان انجام شد. با کمک نرم افزار SPSS ضریب R^2 بدست آمد که برابر با ۰/۹۴۸ شده است. دقت رابطه بدست آمده بسیار مناسب می‌باشد. رابطه زیر از نتایج تحلیل رگرسیون خطی بدست آمد.

$$C_{S28} = 9.526 - 0.081P - 0.038P_C + 1.127C_{S7}$$

که در این رابطه C_{S28} : مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعبی ۱۵ سانتی برحسب مگاپاسکال، P : نوع پوزولان ($P=1$ برای میکروسیلیس $P=2$ برای متاکائولن، $P=3$ برای خاکستر پوسته برنج، $P=4$ برای زئولیت، $P=5$ برای حالت بدون پوزولان)، P_C : درصد جایگزینی پوزولان با سیمان و C_{S7} : مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه مکعبی ۱۵ سانتی برحسب مگاپاسکال

۴-۲- پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه با استفاده از منطق فازی

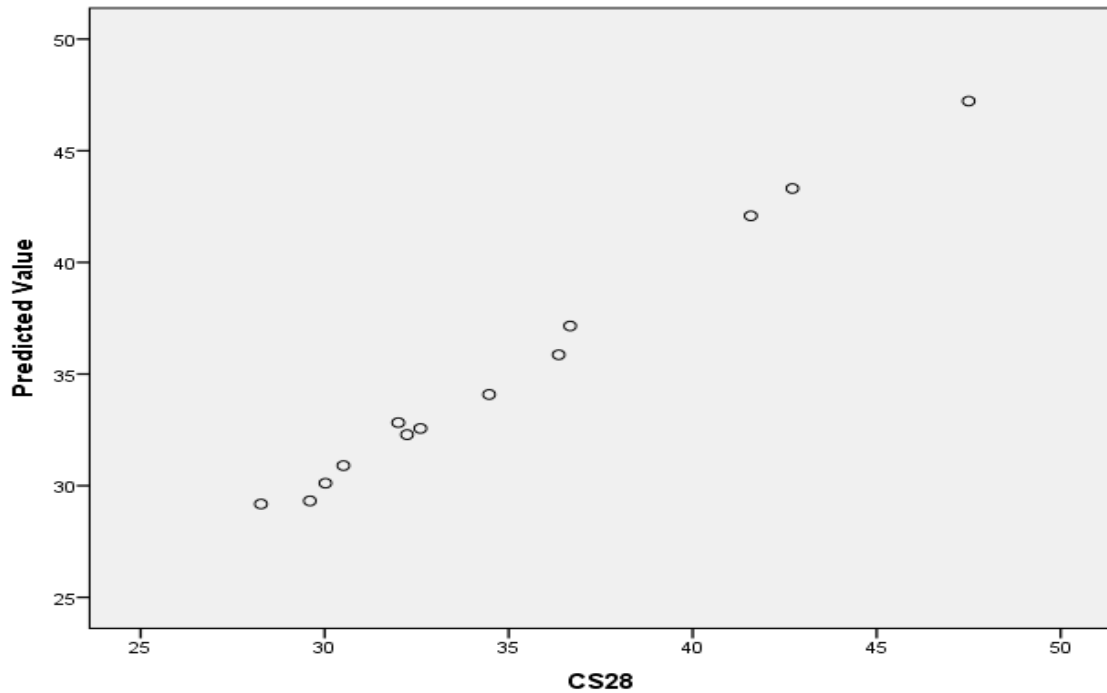
با استفاده از منطق فازی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر یعنی مقاومت فشاری ۷ روزه و نوع پوزولان و مقدار پوزولان پیش‌بینی شد. در این تحقیق از سیستم استنتاج فازی با رابطه فازی مینیمم-ماکزیمم برای غیرفازی کردن نتایج از روش مرکز سطح استفاده شده است. توابع عضویت ورودی ما شامل مقاومت فشاری ۷ روزه (C_{S7})، نوع پوزولان (P) و مقدار پوزولان (P_C) و خروجی سیستم فازی مقاومت فشاری ۲۸ روزه (C_{S28}) می‌باشد. مقدار پوزولان برحسب درصد وزنی جایگزین سیمان لحاظ شده است، شکل (۲) توابع عضویت ورودی ها و خروجی و قوانین اگر-آنگاه ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲- توابع عضویت ورودی ها و خروجی و قوانین اگر- آنگاه

۴-۳- پیش بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی

در این پژوهش با استفاده از نرم افزار SPSS و شبکه های عصبی مصنوعی به صورت پرسپترون چندلایه (آموزش دسته ای) مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه ها بر مبنای پارامترهای مقاومت فشاری ۷ روزه، نوع پوزولان و مقدار پوزولان پیش بینی شد. مقایسه نتایج آزمایشگاهی در شکل (۳) آورده شده است.



شکل ۳- مقایسه نتایج پیش بینی شده به کمک شبکه عصبی با مقادیر آزمایشگاهی

۴-۴- مقایسه نتایج حاصل از رگرسیون خطی، منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی

در جدول (۵) نتایج حاصل از پیش‌بینی هر سه روش مشاهده می‌گردد

جدول ۵- پیش‌بینی مقاومت ۲۸ روزه (برحسب مگاپاسکال) و مقدار خطای هر روش (برحسب درصد)

نام طرح	پیش‌بینی رگرسیون خطی	پیش‌بینی شبکه‌های عصبی	پیش‌بینی منطق فازی	خطای رگرسیون خطی	خطای شبکه‌های عصبی	خطای منطق فازی
Ctrl	۴۶/۵۴	۴۷/۲۳	۴۶/۳	۲/۰۳	۰/۵۷	۲/۵۳
R5	۳۴/۰۰	۳۴/۰۹	۳۸	۱/۳۸	۱/۱۰	۱۰/۲۴
R10	۳۶/۲۷	۳۵/۸۷	۳۵	۰/۲۶	۱/۳۵	۳/۷۴
R15	۳۰/۷۳	۲۹/۳۲	۲۷/۵	۳/۸۱	۰/۹۵	۷/۰۹
M5	۳۳/۴۰	۳۲/۸۲	۲۵	۴/۳۶	۲/۵۶	۲۱/۸۸
M10	۳۲/۰۳	۳۰/۹۰	۲۵	۴/۹۷	۱/۲۸	۱۸/۰۶
M15	۲۸/۰۴	۲۹/۱۸	۲۷/۵	۰/۸۰	۳/۲۲	۲/۷۲
S5	۳۵/۱۰	۳۷/۱۵	۳۵	۴/۲۸	۱/۳۱	۴/۵۵

۷/۷۰	۱/۴۰	۰/۳۶	۴۶	۴۳/۳۱	۴۲/۸۶	S10
۸/۶۱	۱/۲۳	۰/۵۶	۳۸	۴۲/۰۹	۴۱/۳۵	S15
۸/۵۶	۰/۱۶	۰/۹۹	۳۵	۳۲/۲۹	۳۲/۵۶	Z5
۷/۳۶	۰/۱۲	۵/۶۰	۳۵	۳۲/۵۶	۳۴/۴۳	Z10
۲/۷۳	۰/۳۰	۹/۷۰	۲۹/۲	۳۰/۱۱	۲۷/۱۱	Z15
۸/۱۴	۱/۲۰	۳/۰۱				میانگین خطا

ملاحظه می‌گردد که خطای هر سه روش زیر ده درصد است، لذا دارای دقت مناسبی می‌باشند. ولی در این بین بهترین روش، روش شبکه‌های عصبی مصنوعی است که تنها ۱/۲ درصد خطا دارد.

۵- نتیجه‌گیری

- ۱- پوزولان‌های میکروسیلیس و ژئولیت بیشترین اثر منفی را در مقدار اسلامپ بتن ایجاد می‌کنند.
- ۲- به جز پوزولان متاکائولن که مقدار بهینه آن برای دستیابی به بالاترین مقاومت فشاری، ۵ درصد است، سایر پوزولان‌ها مورد استفاده در این مطالعه، یعنی میکروسیلیس خاکستر پیوسته برنج و ژئولیت با ۱۰ درصد جایگزینی وزنی با سیمان به مقدار بهینه خود می‌رسند.
- ۳- استفاده از میکروسیلیس منجر به بیشترین مقاومت فشاری و بکارگیری متاکائولن باعث ایجاد کمترین مقاومت فشاری می‌شود.
- ۴- نسبت مقاومت فشاری ۷ روزه به ۲۸ روزه طرح‌ها در محدوده ۰/۶ تا ۰/۸ قرار می‌گیرد و در این بین تفاوت مشخصی بین نمونه بدون پوزولان با نمونه‌های دارای پوزولان مشاهده نگردید. همچنین طرح‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد میکروسیلیس و ۵ درصد ژئولیت، بیشترین مقدار این نسبت را دارند.
- ۵- نسبت مقاومت فشاری ۴۲ روزه به ۲۸ روزه تمامی طرح‌ها در محدوده ۱ تا ۱/۴ قرار می‌گیرند، در اینجا طرح بدون پوزولان، با فاصله معناداری، دارای نسبت کمتری در مقایسه با طرح‌های حاوی پوزولان است.

منابع

- [1] M. Zain and S. Abd, "Multi PLe regression model for compressive strength prediction of high performance concrete." J ApplSci, P. 60-155,(2009).
- [2] S. Tsivilis and G. Parissaki, "A mathematical model for tee prediction of cement strength." Cemconer Res. P. 9-140,(1995).
- [3] N. hong – Guang and W. Ji- Zonm, "Prediction of Compressive strength of concrete by neural networks". Cemconer Res, P. 50-1245,(2000).
- [4] A. Oztas, M. Pala, E. Ozbaj, E. Kanca, N. Caglar and M. Bhatti, "Predicting the compressive strength and slump of high strength concrete using neural network. Constr bulid mater, p. 75-769, (2006).
- [5] C. bilim, G. Atis, H, Tanyjlidizi and O Karakhan, predicting the compressive strength of ground granulated blast fortune slag concrete using artificial neural network." Adv Eng Soft, P. 40-334,(2009).
- [6] A. Ramezaniapour, M. Sobhani and J. Sobhani, "Application of network based neuro-fuzzy system for prediction of the strength of high strength concrete," Amirkabir J Sci Technol, p. 78-93,(2004).

[7] M. Sarıdemir, "Predicting the compressive strength of mortars containing metakaolin by artificial neural networks and fuzzy logic," Adv Eng Soft, p. ۷-۹۲۰, (2009)..

[8] T. Ji, T. Lin and X. Lin, "A concrete mix proportion design algorithm based on artificial neural networks," Cement Concrete Res, p. ۴۰۸-۱۳۹۹.,(2006).

[9] A. Oztas, M. Pala, E. Ozbay, A. Caglar and M. Bhatti, "Predicting the compressive strength and slump of high strength concrete using neural network," Constr Build Mater, p. 769-75,(2006).

[10] S. Malasri, E. Thorsteinsdottir, J. Malasri, "Concrete Strength Prediction Using a Neural Network", MAESC 2006 Conference, USA, (2006).

[11] M. H. Fazel Zarandi, I. B. Turksen, J. Sobhani, A.A. Ramezaniapour, "Fuzzy polynomial of the compressive strength of concrete", Applied Soft Computing Vol. 8, pp. 488- 498, (2008).

[12] Jian Ping Jiang, "Prediction of Concrete Strength Based on BP Neural Network", Advanced Materials Research, Vol. 341- 342, pp. 58- 62,(2011).

[13] Dias, W.P.S. and Pooliyadda, s.p, "Neural network for predicting properties of concrete with admixtures", Construction and Building Materials, 15,(2001), 371-379.

[14] M. Zain and S. Abd (2009), "Multiple regression model for compressive strength prediction of high performance concrete," J Appl Sci, p. 155-60.

[15] M. Sarıdemir. (2009), "Predicting the compressive strength of mortars containing metakaolin by artificial neural networks and fuzzy logic," Adv Eng Soft, p. 920-7.

[۱۶] باقرزاده، سینا و محمود اکبری. (۱۳۹۴). "برآورد مقاومت فشاری بتن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی عصبی - تطبیقی". دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران. تبریز، دانشگاه تبریز دانشکده مهندسی عمران.

[۱۷] نجیمی، میثم؛ سبحانی، جعفر؛ پورخورشیدی، علیرضا؛ "طراحی و اصلاح خواص بتن بدون اسلامپ و پیش بینی مقاومت فشاری آن با استفاده از روش فازی عصبی تطبیقی"، علمی پژوهشی تحقیقات بتن، گیلان، (۱۳۸۹)

[18] Seung-Chang Lee, "Prediction of concrete strength using artificial neural networks", Engineering Structures 25 (2003) 849-857.

[۱۹] حیدری، علی؛ حیدری، ندا؛ "کاربرد منطق فازی در پیش بینی مقاومت فشاری بتن پلیمری" دهمین سمپوزیوم پیشرفت های علوم