

مقایسه نتایج مدل‌های رگرسیون خطی و شبکه عصبی مصنوعی برای بررسی نفوذپذیری روسازی بتن نفوذ پذیر

مقاله علمی - پژوهشی

حسن تاجیک قشقائی، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران
امیر اسماعیل فروهید*، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amiresmaelf@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۹ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵

صفحه ۲۱۶-۲۰۵

چکیده

روسازی بتن نفوذ پذیر می‌تواند به عنوان جایگزینی مناسب برای سایر روسازی‌ها در ترافیک سبک شهری کاربرد داشته باشد. با هدف توسعه استفاده از این نوع روسازی شناخت ویژگی‌های آن ضروری و دارای اهمیت است. از آنجا که میزان نفوذپذیری روسازی بتن نفوذ پذیر مهمترین ویژگی عملکردی این نوع روسازی است، شناخت بیشتر این ویژگی و نحوه تاثیرپذیری آن از پارامترهای طرح اختلاط هدف این مطالعه است. به این منظور ترکیب‌های مناسبی از نمونه‌های بتن نفوذ پذیر با دانه‌بندی و نسبت‌های آب به سیمان متفاوت به تعداد ۳۶ نمونه ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. نسبت آب به سیمان جهت ساخت نمونه‌های آزمایشی در محدوده ۰/۲۸ تا ۰/۳۴ در ترکیب با سنگدانه‌های با حداکثر اندازه اسمی ۹/۵ میلی‌متر، ۱۲/۵ میلی‌متر و ۱۹/۵ میلی‌متر انتخاب شده است. به منظور انتخاب مدل مناسب پیش بینی تغییرات نفوذپذیری مقایسه بین تکنیک‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی صورت گرفته است. با استفاده از داده‌های به دست آمده از فعالیت آزمایشگاهی و بررسی برآزش مدل‌ها، مدل بهینه پیشنهاد شده است. مقایسه مدل‌ها نشان داد که رگرسیون خطی در پیش‌بینی تغییرات نفوذپذیری بتن نفوذ پذیر نتایج نزدیک‌تری را تولید کرده است. وجود ضرایب ۵۴،۵ و ۵۲،۵ و ۴۱،۵ برای اندازه سنگدانه‌ها نسبت به ضرایب ثابت حدود نصف اعداد ذکر شده نشان دهنده تاثیر بیشتر این عامل بر نفوذپذیری است.

واژه‌های کلیدی: بتن نفوذ پذیر، رگرسیون خطی، شبکه عصبی مصنوعی، نفوذپذیری، آب به سیمان

۱- مقدمه

زهکشی است. لذا، در هنگام بارش، آبها در سطح جمع شده و به سمت مقاطع زهکشی هدایت می‌شود. این ویژگی بتن معمولی در شهرها منجر به جمع آوری آب‌های سطحی و ایجاد رواناب و انتقال آلودگی فراوان می‌شود. بتن نفوذ پذیر با توجه به ضریب نفوذپذیری بالا به‌عنوان راه حل این معضل در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [ونکور، ۲۰۱۵]. رویه بتن نفوذ پذیر به‌واسطه ظرفیت بالا در جذب و هدایت آبهای سطحی و تامین اصطکاک لازم مصالح نوظهوری است که آینده امیدوارکننده‌ای را در برابر مهندسی

توسعه شهری همراه با توجه بیشتر به استفاده از وسایل نقلیه موتوری منجر به پوشش سطح زمین با مصالح بتنی و قیری شده است. با توجه به بسته شدن محل‌های جذب آب در خاک پتانسیل سیلاب و آلودگی آب‌های سطحی بیشتر شده است [احمد، ۲۰۲۰]. نوعی از روسازی‌های بتنی که دارای حفرات متصل و تخلخل بیشتر از ۱۵ درصد هستند، روسازی بتن نفوذ پذیر نامیده می‌شود. این نوع روسازی امکان عبور آب از جسم راه را فراهم آورده است [چن، ۲۰۱۷ و ترفدر، ۲۰۱۵]. بتن معمولی که برای روسازی‌ها بکار می‌رود غیر

ارتباط بین تخلخل و میزان نفوذپذیری برای نمونه‌های بتن نفوذ پذیر خطی نبوده و با افزایش تخلخل میزان نفوذپذیری به میزان بیشتری رشد می‌کند. این موضوع بدلیل کور بودن برخی حفرات در بتن نفوذ پذیر بوده و عملکرد خطی وجود ندارد [جین، ۲۰۱۵ و لیم، ۲۰۱۳]. بتن نفوذ پذیر در خلال ۳۰ سال گذشته در اروپا و آمریکا و ژاپن به کار گرفته شده است. بتن نفوذ پذیر برای محوطه پارکینگ‌ها، پیاده‌روها و جاده‌های کم حجم قابل کاربرد است. در بتن نفوذپذیر خشک شده فضاهای خالی مابین سنگدانه‌ها که با ذرات ریزتر پر نشده نقش تامین فضای عبور آب را برعهده دارد. البته بخشی از این فضای خالی که با هم در ارتباط هستند جهت نفوذپذیری کاربرد دارد و فضاهای بسته کاربردی ندارد. افزایش فضاهای خالی با کاهش ریزدانه‌ها و غلیظ شدن خمیر سیمان فراهم می‌شود. یکی از چالشهای ساخت بتن نفوذ پذیر همواره پر شدن فضاهای خالی با خمیر سیمان و کاهش کارایی نفوذپذیری این نوع روسازی‌ها است. لذا کنترل نسبت آب به سیمان به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای موثر بر میزان نفوذپذیری مد نظر است. با توجه به مطالعات گذشته که نتایج برخی از آنها در بالا ارایه گردیده است، تاثیر میزان نسبت آب به سیمان بر نفوذ پذیری بتن نفوذ پذیر به عنوان یکی از خلاهای علمی جهت توسعه کاربرد این ماده مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش بررسی تاثیر نسبت آب به سیمان بر میزان نفوذپذیری روسازی‌های بتن نفوذ پذیر مد نظر بوده و ارایه مدل پیش بینی میزان نفوذپذیری بتن نفوذ پذیر بر اساس میزان نسبت آب به سیمان از اهداف اصلی است. جهت بررسی ضمنی تاثیر اندازه سنگدانه بر نفوذپذیری، نمونه‌ها با سه اندازه سنگدانه ساخته و آزمایش شده‌اند. لذا در کنار بررسی تاثیر میزان نسبت آب به سیمان تاثیر اندازه سنگدانه در بتن نفوذ پذیر نیز صورت گرفته است. در کنار این فعالیت آزمایشگاهی با استفاده از نتایج این فعالیت مدلسازی تاثیر پارامترهای اختلاط بر میزان نفوذپذیری بتن نفوذ پذیر با تکنیک‌های شبکه عصبی و رگرسیون صورت گرفته است. نتایج به دست آمده از مدل‌ها و داده‌های تجربی مقایسه شده و کیفیت برازش بررسی شده است.

راه قرار داده است. این نوع بتن دارای ظرفیت بالایی برای نفوذ آبهای سطحی است. مطالعات گسترده‌ای برای بررسی و شناخت ویژگی‌های این نوع بتن در حال انجام است [سوماناسوریا، ۲۰۱۱]. هر چند سابقه استفاده از بتن نفوذ پذیر زیاد است ولی استفاده گسترده از آن سابقه کمتری دارد و در دهه‌های اخیر توجه زیادی به آن معطوف شده است. به ویژه با مطرح شدن لزوم تطبیق مصالح با ویژگی‌های توسعه پایدار کاربرد این مصالح در علم مهندسی عمران قابل بررسی است [سوزو، ۲۰۱۲]. از آنجا که مواد متشکله بتن نفوذ پذیر مشابه بتن معمولی است، تفاوت کمی بین این دو نوع بتن است و می‌توان بتن نفوذ پذیر را نوعی بتن معمولی با ریزدانه کم فرض نمود. این نوع بتن در راه‌های با ترافیک کم و پارکینگ و شانه راه‌ها کاربرد دارد [لیان، ۲۰۱۰]. به نظر می‌رسد با رویکرد جدید زیست محیطی اتفاق افتاده در مصالح حمل و نقل باید منتظر توسعه روز افزون استفاده از بتن نفوذ پذیر بود. به همین دلیل تحقیقات زیادی در مورد ویژگی‌های بتن نفوذ پذیر در حال انجام است [واسیلیکو، ۲۰۱۱]. نتایج برخی مطالعات نشان داده است که بتن نفوذ پذیر ساخته شده با خمیر سیمان کمتر، از جهت عملکرد نفوذپذیری مناسب‌تر است. در نمونه های بتن نفوذ پذیر با خمیر سیمان کمتر ارتباط معنی‌دارتری هم بین درصد تخلخل و میزان نفوذپذیری گزارش شده است. افزایش خمیر سیمان منجر به پراکندگی نتایج در مورد بتن نفوذ پذیر ساخته شده گردیده است [شو و هوآنگ، ۲۰۱۱]. در برخی تحقیقات دیده شده است که نمونه‌های با نسبت آب به سیمان زیادتر در انتهای نمونه‌ها دچار گرفتگی و پر شدن حفرات با خمیر سیمان شده‌اند. چنانچه این نمونه‌ها در قسمت بالایی متراکم شوند عملاً نمونه‌ها در دو سر دچار تخلخل کمتری از وسط خواهند بود [بویر، ۲۰۱۲ و گلو، ۲۰۱۱]. برخی محققین در زمینه تاثیر پارامترهای طرح اختلاط بر میزان نفوذپذیری، تاثیر اندازه سنگدانه بر میزان نفوذپذیری را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد که افزایش اندازه سنگدانه منجر به افزایش نفوذپذیری به واسطه افزایش اندازه حفرات در کنار کاهش تعداد حفرات شده است. این افزایش به ویژه در مورد نمونه‌های بتنی حاوی خمیر سیمان کمتر، قابل توجه بوده است. [شن، ۲۰۱۲ و توین، ۲۰۱۲].

۲- برنامه آزمایشگاهی

دانه‌ها در حداقل ممکن استفاده می‌شوند و خلا وجود آنها مسیر مناسبی برای عبور آب از داخل بتن نفوذ پذیر فراهم می‌کند. از اصلی‌ترین موارد در تولید بتن نفوذ پذیر نسبت آب به سیمان است که در فرآیند اختلاط و عملکرد بعدی دارای اهمیت است.

در این قسمت انتخاب مواد و مصالح و استانداردهای آزمایشات تعیین شده است. نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها و شرح آزمایشات مورد استفاده نیز در این بخش آورده شده است. مصالح تشکیل دهنده بتن نفوذ پذیر مشابه مصالح تشکیل دهنده بتن متداول است و تفاوت این دو نوع بتن در دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی است. در بتن نفوذ پذیر ریز

۱-۲- انتخاب مصالح

روی الک ۹/۵ میلی‌متر و سنگدانه سوم عبوری از الک ۱۹/۵ میلیمتر و مانده روی الک ۱۲/۵ میلی‌متر است در ساخت مخلوط‌های بتنی استفاده شده است. جنس سنگدانه‌ها سیلیسی است و بر روی آنها آزمایشات ارزش ماسه‌ای (آشتو تی - ۱۷۶)، شکستگی یک وجه سنگ (ای اس تی ام دی - ۵۸۲۱)، تورق (بی اس - ۸۱۲)، سایش لوس آنجلس (آشتو تی - ۹۶)، افت وزنی ناشی از تاثیر سولفات سدیم (آشتو تی - ۱۰۴) صورت گرفته است. نتایج به دست آمده از آزمایشات فوق در جدول ۲ آورده شده است.

مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش مصالح سنگی مورد استفاده در شرق تهران بوده‌اند. سیمان مصرفی سیمان تیپ ۲ شاهرود است که سیمان با کیفیت و مناسبی است. مشخصات سیمان مصرفی جهت تولید نمونه‌های آزمایشی که منطبق با استاندارد ملی شماره ۳۸۹ است در جدول ۱ ارائه شده است. از سه نوع سنگدانه تک سایز با حداکثر اندازه اسمی ۹/۵ میلی‌متر، ۱۲/۵ میلی‌متر و ۱۹/۵ میلی‌متر (سنگدانه ریزتر عبوری از الک ۹/۵ میلی‌متر و مانده روی الک ۴/۷۵ میلی‌متر و سنگدانه دوم عبوری از الک ۱۲/۵ میلی‌متر و مانده

جدول ۱. ویژگی‌های سیمان مصرفی مطابق استاندارد ۳۸۹

نوع سیمان	سطح مخصوص	گیرش اولیه	گیرش نهایی	مقاومت ۷ روزه	مقاومت ۲۸ روزه
تیپ ۲ شاهرود	۳۸۵۰ (سانتی متر مربع بر گرم)	۱۶۵ دقیقه	۲۰۰ دقیقه	۲۱۰ مگاپاسکال	۳۲۵ مگاپاسکال

جدول ۲. نتیجه آزمایشات سنگدانه‌های مصرفی

ردیف	نام آزمایش	شماره استاندارد	حد استاندارد	نتیجه آزمایش (درصد)
۱	ارزش ماسه‌ای	AASHTO T.176	حداقل ۶۵	۷۰
۲	شکستگی یک وجه	ASTM D.5821	حداقل ۶۵	۹۸
۳	تورق	BS - 812	حداکثر ۴۰	۱۰
۴	سایش لوس آنجلس	AASHTO T.96	حداکثر ۴۰	۱۳
۵	افت وزنی	AASHTO T.104	حداکثر ۱۲	۰/۳

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها و شرح آزمایش‌ها

جهت تهیه نمونه‌های آزمایشی مخلوط‌های بتن نفوذ پذیر بررسی شده در این مطالعه با استاندارد CEM 142.5 N تولید شده‌اند. در جدول ۳ طرح مخلوط اولیه مورد استفاده ارائه شده است. جهت بررسی تاثیر میزان نسبت آب به سیمان برای مخلوط‌های آزمایشی این پارامتر بصورت متغییر در نظر گرفته شده است (مطابق توصیه موسسه بتن امریکا نسبت آب به سیمان بهینه برای بتن نفوذپذیر بین ۰/۲۸ تا ۰/۳۴ است). جهت تولید نمونه‌های آزمایشگاهی، آب و سیمان و سنگدانه در مخلوط کن آزمایشگاهی ترکیب شدند. برای هر مخلوط سه نمونه استوانه‌ای

۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده است. که نمونه‌ها در سه لایه با تراکم استاندارد بتن‌ریزی شده‌اند. هر لایه با ۱۵ بار میله متراکم می‌شود که در استاندارد EN 12350-6 و EN 12390-2 مطرح شده است. میله زدن اضافی باید به منظور جلوگیری از گرفتگی اجتناب شود. از یک میله کوچک برای صاف کردن سطح بتن بصورت غلتک استفاده شده است. جهت پیشگیری از خشک شدن سریع، نمونه‌ها بلافاصله پوشانده می‌شوند. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج شده است و به مدت ۷ روز در آب نگهداری شده است.

جدول ۳. طرح اختلاط مورد استفاده برای هر نمونه شامل نام نمونه میزان سیمان و آب و اندازه سنگدانه

سنگدانه (کیلوگرم)	سیمان	آب	جمع وزن اجزای بتن در متر مکعب
۱۴۰۰	۳۵۰	۱۲۰-۹۸	۱۸۷۰-۱۸۴۸

نمونه‌های خشک شده و ۲۸ روزه جهت انجام آزمایش نفوذپذیری مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

بر روی نمونه‌های بتن نفوذ پذیر تازه آزمایش اسلامپ مطابق استاندارد EN 12350-2 انجام گرفته است. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود این نوع بتن دارای اسلامپی نزدیک به صفر است.



شکل ۱. تصویر آزمایش اسلامپ نمونه بتن نفوذ پذیر حداکثر اندازه سنگدانه ۱۲/۵

۲-۲-۱- آزمایش نفوذپذیری

ارتفاع ۳۰ سانتیمتر می‌رسانیم. با رها کردن قسمت پایینی نمونه سرریز آب شروع می‌شود و ارتفاع آب روی نمونه با عبور از جسم بتن کاهش می‌یابد تا به ارتفاع ۱۰ سانتیمتری می‌رسد. مدت زمان این کاهش ارتفاع ثبت می‌شود. با قرار دادن این داده‌ها در رابطه میزان نفوذپذیری به دست می‌آید. یک دستگاه نفوذپذیری هد متغییر مانند شکل (۲) برای تعیین نرخ نفوذپذیری (k) پس از ۲۸ روزگی بتن استفاده می‌شود. نمونه‌ها باید از کنار در ارتفاع آب بند شوند. یک لایه پلاستیک نایلون جهت ممانعت از نفوذ جانبی آب استفاده می‌شود. زمان افت آب از ارتفاع اولیه به ثانویه ضرب نفوذپذیری است. با توجه به قانون داری رابطه زیر ضرب نفوذ را می‌دهد:

$$K = \frac{al}{At} \log \frac{h_1}{h_2}$$

لوله (سانتی‌متر) - h_2 : ارتفاع ثانویه آب در لوله (سانتی‌متر) و t زمان افت آب (ثانیه).

نرخ نفوذپذیری نشان دهنده میزان ارتباط بین منافذ و حجم آنها است. این ویژگی‌ها باعث تشکیل مسیرهایی جهت عبور آب می‌شوند. ضریب نفوذپذیری میزان جریان آب در واحد زمان از واحد سطح مقطع است. میزان نفوذپذیری با استفاده از آزمایش نفوذپذیری هد متغییر آب بدست می‌آید که نتایج آن نسبی است. جریان آب در داخل نمونه باید پایدار و با فرض جریان لایه‌ای باشد. متوسط میزان نفوذپذیری سه نمونه با طرح اختلاط یکسان بعنوان نفوذپذیری گزارش می‌شود. جهت انجام آزمایش آب از قسمت انتهایی به داخل کیت ریخته می‌شود تا حفرات موجود در نمونه بتن پر شوند. وقتی سطح آب به بالای نمونه رسید اینکار متوقف می‌شود. سپس با اضافه کردن آب از قسمت بالای نمونه و مسدود کردن قسمت پایینی سطح آب بالای نمونه را به

(۱)

که در رابطه فوق K نرخ جریان (سانتی‌متر بر ثانیه) - a سطح داخلی لوله - (سانتی متر مربع) A سطح نمونه (سانتی متر مربع) - l طول نمونه (سانتی‌متر) - h_1 ارتفاع اولیه آب در



شکل ۲. تصویر وسیله اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه بتن نفوذ پذیر

۲-۲-۲- آزمایش تخلخل

تخلخل کل در نمونه‌های بتنی با محاسبه تفاوت وزن غوطه ور در آب و وزن نمونه خشک شده به مدت ۲۴ ساعت و تقسیم این عدد بر حجم کل نمونه به دست می‌آید. [پارک، ۲۰۰۴] که در رابطه

تخلخل کل در نمونه‌های بتنی با محاسبه تفاوت وزن غوطه ور در آب و وزن نمونه خشک شده به مدت ۲۴ ساعت و تقسیم این عدد بر حجم کل نمونه به دست می‌آید. [پارک، ۲۰۰۴] که در رابطه

$$p = 1 - (((w_1 - w_2)/\rho_w)/v) * 100$$

(۲)

۳- معرفی شبکه عصبی مصنوعی

ارتباطات موازی قابل توجه بین آنها، می‌توان برای مسائل پیچیده دارای خطا نیز پاسخ مناسب در زمان کم استخراج نمود. در این مطالعه برای مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی، مدل شبکه عصبی سه لایه در این مطالعه استفاده شده است. متغیر خروجی با معادله زیر به دست می‌آید.

شبکه عصبی مصنوعی سیستم‌های تحلیل داده‌ها بر اساس تحلیل پی در پی واحدهای پردازش (نرون‌های عصبی) در یک ساختار معماری شده مشابه مغز است [هولا، ۲۰۰۵ و منصور، ۲۰۰۴]. با بکارگیری یک شبکه عصبی مصنوعی با تعداد قابل توجهی از واحدهای پردازش به نام نرون به همراه

$$y_k = f_o \left(\sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot f_h \left(\sum_{i=1}^n w_{ji} \cdot x_i + w_{j0} \right) \right) + w_{ko}$$

(۳)

تطبيق داده‌های تجربی و مقادیر پیش بینی شده توسط مدل، معیارهای مختلفی قابل استفاده هستند. دو معیار متداول کیفیت برازش شامل معیارهای آماری و تصویری هستند. با توجه به دقت بیشتر معیارهای آماری این معیار مد نظر است. ریشه میانگین مجذور خطاها بعنوان یک معیار آماری مناسب جهت تعیین کیفیت برازش انتخاب شده است. رابطه ξ نحوه محاسبه این معیار را ارایه می‌دهد.

که در آن w_{ji} وزن لایه پنهان متصل به نرون i ام در لایه ورودی و نرون j ام در لایه پنهان است، w_{j0} میزان انحراف برای نرون پنهان j ام است. f_h تابع فعال‌ساز نرون پنهان است. w_{kj} وزن لایه خروجی متصل به نرون j ام در لایه پنهان و نرون k ام در لایه خروجی است. w_{k0} میزان خطا در نرون خروجی k ام است. f_o تابع فعال‌ساز برای نرون خروجی است. وزن‌ها در لایه‌های خروجی و پنهان متفاوت هستند و میزان آنها در خلال پردازش شبکه متغیر است. برای آزمایش

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_s - x_e)^2 \right)^{0.5}$$

(۴)

که در آن x_e داده تخمین زده شده است و x_s داده تجربی است و n تعداد داده‌ها است.

۴- نتایج و تفسیر داده‌ها

نمونه‌های مورد قبول برای میزان نفوذ پذیری بر اساس مطالعات انجام شده بین ۵ تا ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه متغیر است. در این مطالعه میانگین میزان نفوذپذیری نمونه‌های مختلف که با نسبت‌های مختلف آب به سیمان و اندازه‌های متفاوت سنگدانه ساخته شده‌اند برداشت شده‌اند. در جدول ۴ نتایج آزمایشات

نمونه‌های بتن نفوذ پذیر با سنگدانه ۱۹/۵ میلی‌متر است. این نتایج میانگین اعداد بدست آمده روی سه نمونه مشابه برای هر طرح اختلاط است. در شکل ۳ تصویر نمونه بتن نفوذ پذیر تولید شده ارایه شده است. در ادامه تاثیر پارامترها بر نتایج و تحلیل آماری بررسی شده است.



شکل ۳. تصویر نمونه استوانه‌ای ۲۰ در ۱۰ سانتی‌متر بتن نفوذ پذیر با سنگدانه ۱۹/۵ میلی‌متر

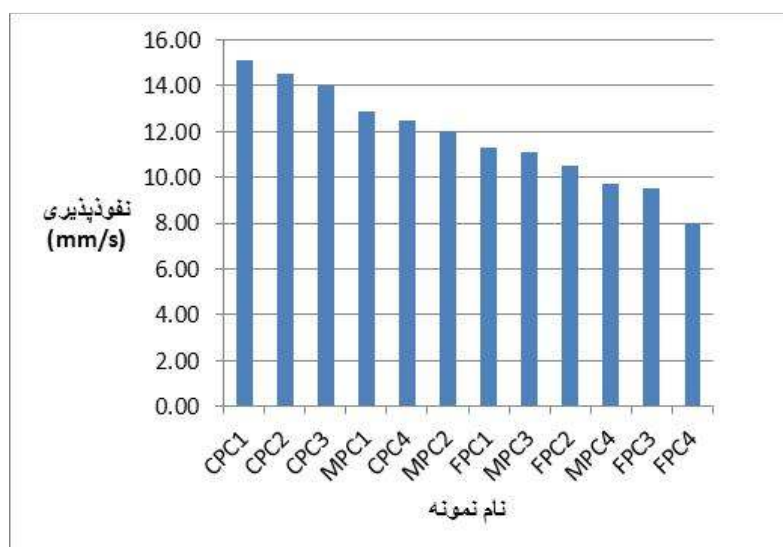
جدول ۴. نتایج آزمایشات نفوذپذیری نمونه‌های بتن نفوذ پذیر

نمونه	اندازه سنگدانه (میلی‌متر)	آب به سیمان	تخلخل	نفوذپذیری (میلی‌متر بر ثانیه)
FPC1	۹/۵	۰/۲۸	۰/۳۹۰	۱۱/۳
FPC2	۹/۵	۰/۳۰	۰/۳۸۶	۱۰/۵
FPC3	۹/۵	۰/۳۲	۰/۳۷۵	۹/۵
FPC4	۹/۵	۰/۳۴	۰/۳۵۰	۸/۰
MPC1	۱۲/۵	۰/۲۸	۰/۴۰۰	۱۲/۹
MPC2	۱۲/۵	۰/۳۰	۰/۳۹۵	۱۲/۰
MPC3	۱۲/۵	۰/۳۲	۰/۳۹۰	۱۱/۱
MPC4	۱۲/۵	۰/۳۴	۰/۳۸۰	۹/۷
CPC1	۱۹/۵	۰/۲۸	۰/۴۱۰	۱۵/۱
CPC2	۱۹/۵	۰/۳۰	۰/۴۰۵	۱۴/۵
CPC3	۱۹/۵	۰/۳۲	۰/۴۰۰	۱۴/۰
CPC4	۱۹/۵	۰/۳۴	۰/۳۹۰	۱۲/۵

۴-۱- تاثیر طرح اختلاط بر میزان نفوذپذیری

همانطور که گفته شد، میانگین میزان نفوذپذیری بدست آمده از سه نمونه مشابه به‌عنوان میزان نفوذپذیری مخلوط آزمایشی ثبت شده است. میزان نفوذپذیری نمونه‌های آزمایشی ساخته شده در این مطالعه بر اساس ترتیب نزولی در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. نتایج نشان دهنده اهمیت و نقش بالای دانه‌بندی و همینطور نسبت آب به سیمان در میزان نفوذپذیری به عنوان اصلی‌ترین وظیفه این نوع بتن است. نمونه‌های بتن نفوذ پذیر ساخته شده با سنگدانه درشت دارای نفوذپذیری بیشتری نسبت به نمونه‌های مشابه ساخته شده با سنگدانه ریز هستند.

در این مطالعه میانگین میزان نفوذپذیری نمونه‌های مختلف که با نسبت‌های مختلف آب به سیمان و اندازه‌های متفاوت سنگدانه ساخته شده‌اند برداشت شده‌اند. در جدول ۴ نتایج آزمایشات



شکل ۴. میزان نفوذپذیری نمونه های متفاوت به ترتیب بزرگ به کوچک

۴-۲- بررسی آماری نتایج

به عنوان متغیر وابسته منظور شده‌اند. در جدول ۵ نتایج حاصل از رگرسیون خطی ارایه شده است. نهایتاً پس از بررسی مدل‌های مناسب شکل کلی مدل حاصل شده است. لازم به ذکر است مدل‌ها با نتایج نسبتاً محدودی به دست آمده و برای تعمیم آن قطعیت بالا وجود ندارد.

با فرض اینکه داده‌های به دست آمده متغیرهای تصادفی هستند. بررسی آماری تاثیر گذاری عوامل مختلف دخیل در نتایج در یکدیگر صورت گرفته است. با استفاده از رگرسیون خطی ارتباط بین میزان نفوذپذیری و نسبت آب به سیمان برای هر دانه‌بندی تحلیل شده است. جهت مدلسازی نسبت آب به سیمان به عنوان متغیر مستقل و میزان نفوذپذیری

جدول ۵. نتایج حاصل از رگرسیون داده‌های آزمایشات

R2	آزمون t	ضرایب رگرسیون	نوع متغیر	تعداد نمونه	اندازه سنگدانه (میلی‌متر)
۰/۹۷	۱۵/۲۶	۲۶/۷۲	ثابت	۱۲	۹/۵
	-۹/۶۷	-۵۴/۵	ضریب		
۰/۹۸	۲۰/۵۸	۲۷/۷	ثابت	۱۲	۱۲/۵
	-۱۲/۱۲	-۵۲/۵	ضریب		
۰/۸۹	۱۰/۶۷	۲۶/۸۹	ثابت	۱۲	۱۹/۵
	-۵/۱۲	-۴۱/۵	ضریب		

نشان دهنده سهم کمتر سایر عوامل و پارامترها بر نفوذپذیری است.

همانگونه که از نتیجه مدل رگرسیون خطی ارایه شده مشخص است کیفیت برازش دو مدل به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۹۷ است که اعداد مناسبی است. با توجه به نتایج حاصل شده موارد زیر به عنوان تحلیل ارایه می‌شود. آزمون t معنی داری بیش از ۹۰ درصد برای ضرایب دو رابطه ارایه کرده است که مناسب است. کم بودن نسبت اعداد ثابت به ضرایب

۴-۳- مدل شبکه عصبی

در این مطالعه ۶۵٪ داده‌های برای آموزش مدل و ۳۵٪ داده‌ها برای آزمون استفاده شده است. داده‌ها جهت مدلسازی

سازی داده از مقادیر اولیه بکارگرفته شده است.

$$y_i = \frac{x_i}{x_{max}}, i = 1, 2, \dots, n$$

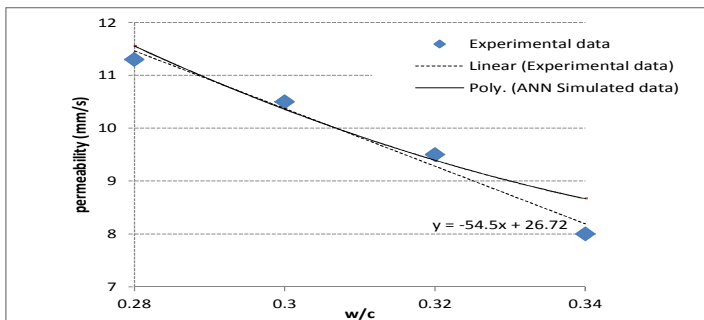
مطالعه شامل یک لایه ورودی، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی است. مدلسازی شبکه عصبی جهت پیش بینی نفوذپذیری بر اساس نسبت آب به سیمان و اندازه سنگدانه توسط رابطه زیر صورت گرفته است.

$$\text{permeability coefficient} = f \left(\text{aggregate size}, \frac{w}{c} \right)$$

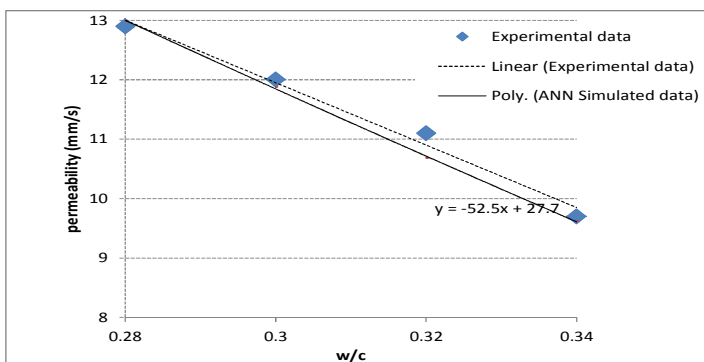
بصورت نسبی استفاده شده‌اند. رابطه زیر به منظور نسبی

(۵)

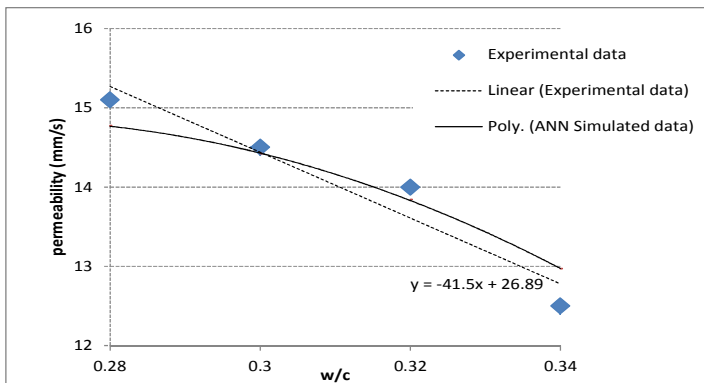
پروسه آموزش شبکه توسط یک الگوریتم بازگشتی تقویت شده است. این الگوریتم بر مبنای اصلاح خطاها و کوچک سازی پی در پی آنها تنظیم شده است. تابع فعالساز سهمی در این مطالعه بکارگرفته شده است. مدل مد نظر در این



شکل ۵. نتایج تجربی نفوذپذیری بر حسب آب به سیمان همراه برازش رگرسیون و مدل شبکه عصبی برای نمونه‌های FPC



شکل ۶. نتایج تجربی نفوذپذیری بر حسب آب به سیمان همراه برازش رگرسیون و مدل شبکه عصبی برای نمونه‌های MPC



شکل ۷. نتایج تجربی نفوذپذیری بر حسب آب به سیمان همراه برازش رگرسیون و مدل شبکه عصبی برای نمونه‌های CPC

جدول ۶. کیفیت برازش مدل شبکه عصبی

حالت آزمایش	درصد داده‌های مصرفی	خطای نسبی
آموزش	٪۶۵	۰/۰۲۴
آزمون	٪۳۵	۰/۰۱۷

۵- نتیجه گیری

باشد خمیر فضاهاى خالى را پر کرده و عملکرد نفوذپذیری را مختل می‌کند. نسبت آب به سیمان خیلی کم هم می‌تواند منجر به عدم کارایی مخلوط شود. میزان مناسب نسبت آب به سیمان بسته به میزان نفوذپذیری قابل تعیین است. با افزایش نسبت آب به سیمان میزان نفوذپذیری بتن نفوذ پذیر کاهش می‌یابد که نشان دهنده پر شدن فضاهاى خالى در بتن با خمیر سیمان است.

- در مقایسه مدل‌های پیش بینی کننده ارتباط میزان نفوذپذیری و نسبت آب به سیمان، مدل رگرسیون خطی نتایج نزدیک‌تری نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی تولید کرده است.

- وجود ضرایب ۵۴/۵، ۵۲/۵ و ۴۱/۵ برای اندازه سنگدانه‌ها نسبت به ضرایب ثابت حدود نصف اعداد ذکر شده نشان دهنده تاثیر بیشتر این عامل بر نفوذپذیری است.

۶- سپاسگزاری

بدینوسیله از دانشگاه آزاد اسلامی جهت حمایت از این تحقیق و از شرکت قائم بتن به دلیل در اختیار قرار دادن مصالح قدرانی می‌شود.

۷- مراجع

- "دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه‌ها"، (۱۳۹۶)، ضابطه ۷۳۱، معاونت فنی، امور نظام فنی و اجرا.

-Ahmed T.,Hoque S., (2020), "Study on Pervious Concrete Pavement Mix Designs", IOP conf. series: earth and Environmental Science 476.

در این مطالعه، ویژگی مهم بتن نفوذپذیر (میزان نفوذپذیری) ساخته شده با سه نوع دانه بندی و نسبت‌های آب به سیمان مختلف بررسی شده است. ۳۶ نمونه مختلف بتن نفوذ پذیر در این مطالعه ساخته و آزمایش شدند. نسبت آب به سیمان و دانه‌بندی با توجه به تاثیر آنها بر ضریب نفوذپذیری و تخلخل مد نظر قرار گرفتند. مقایسه مدل‌های شبکه عصبی و رگرسیون و قابلیت هر یک در مدلسازی میزان نفوذپذیری بتن نفوذ پذیر بررسی شده است. پس از انجام آزمایشات پژوهش و بررسی نتایج، یافته‌های زیر به عنوان دستاوردهای تحقیق اخیر ارایه می‌شود.

-میزان نفوذپذیری نمونه‌های بتن نفوذ پذیر ساخته شده با سنگدانه بزرگتر بیشتر است که نشان دهنده حفرات بزرگتر ایجاد شده بین سنگدانه در این نمونه‌ها است. البته الگوی کاهشی میزان نفوذپذیری بر اساس افزایش نسبت آب به سیمان برای نمونه‌های بتن نفوذ پذیر ساخته شده با هر سه نوع دانه بندی مشابه است.

- ارتباط بین میزان نسبت آب به سیمان و میزان نفوذپذیری در مدل رگرسیون پیشنهادی برای سنگدانه با حداکثر اندازه ۹/۵ میلی‌متر با ضریب برازش ۰/۹۷، برای سنگدانه با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر با ضریب برازش ۰/۹۸ و برای سنگدانه با حداکثر اندازه ۱۹/۵ میلی‌متر با ضریب برازش ۰/۸۹ به دست آمده است. برازش بهتر نتایج نمونه‌های بتن نفوذ پذیر ساخته شده با سنگدانه ریزتر نشان دهنده عملکرد بهتر نمونه‌های بتن نفوذ پذیر ساخته شده با سنگدانه ریزتر است.

- با توجه به عدم حضور ریزدانه‌ها به عنوان پر کننده در ساختار بتن نفوذ پذیر نقش خمیر سیمان بسیار با اهمیت و حیاتی است. نسبت آب به سیمان می‌تواند روانی خمیر سیمان را مشخص کند. در صورتی که آب به سیمان زیاد

- Park, SB. and Tia, M., (2004), "An experimental study on the water-purification properties of porous concrete", *Cement Concrete Res.*, 34, pp.177-184.
- Shen, S., Burton, M., Jobson, B., Haselbach, L., (2012), "Pervious Concrete with Titanium Dioxide as a Photo Catalyst Compound for a Greener Urban Road Environment", TRB 91th Annual Meeting.
- Shu, X., Huang, B., Wu H, Dong Q., Burdette, E.G., (2011), "Performance Comparison of Laboratory and Field Produced Pervious Concrete Mixtures", *Constr Build Mater.*, 25, pp.3187-3192.
- Sumanasooriya, M.S., Neithalath, N., (2011), "Pore Structure Features of Pervious Concrete Proportioned for Desired Porosities and their Performance Prediction", *Cement Concrete Comp.*, 33, pp.778-787.
- Suozzo, M., Dewoolkar, M., (2012), "Long-Term Field Monitoring and Evaluation of Maintenance Practice of Pervious Concrete Pavements in Vermont", TRB 91th Annual Meeting.
- Tarefder J. and Ahmad M., (2015), "Evaluation of Pore Structure and its Influence on Permeability and Moisture damage in Asphalt Concrete", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol.18, No.3, pp.274-283.
- Tho-in, T., Sata, V., Chindprasirt, P., Jaturapitakkul, C., (2012), "Pervious High-Clacium Fly Ash Geopolymer Concrete", *Constr Build Mater.*, 30, pp.366-371.
- Vancura, M., Mc Donald, K., Khazanovich, L., (2011), "Microscopic Analysis of Paste and Aggregate Distress in Pervious Concrete in a Wet, Hard Freeze Climate", *Cement Concrete Comp.*, 33, pp.1080-1085.
- Vassilikou, F., Kringos, N., Kotsovos, M., Scarpes, A., (2011), "Application of Pervious Concrete for Sustainable Pavements: A Micro – Mechanical Investigation", TRB 90th Annual Meeting.
- Boyer, M., Haselbach, L., Cofer, W., (2012), "Heat Transfer Finite Element Modeling in Pervious Concrete: Impacts of Vertical Porosity Distributions", TRB 91th Annual Meeting.
- Chen J.S., Lee C.T. and Lin Y.Y., (2017), "Influence of Engineering Properties of Porous Asphalt Concrete on Long-Term Performance", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.29, No.4.
- Gin Y., Yang H., Deng Zh., He J., (2015), "water permeability of pervious concrete is dependent on the applied pressure and testing methods", *ADV materials sci. eng.*, 1, pp.1-6. (<http://dx.doi.org/10.1155/2015/404136>).
- Golroo, A., Tighe, S., (2011), "Alternative Modeling Framework for Pervious Concrete Pavement Condition Analysis", *Constr Build Mater.*, 25, pp.4043-4051.
- Hola J. & Schabowicz K., (2005), "Application of artificial neural networks to determine concrete compressive strength based on non-destructive test", *J civ eng. manag.*, 11(1), pp.23-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.011>.
- <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.06.002>.
- <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057>.
- <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.002>.
- [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00223-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00223-0).
- <http://dx.doi.org/10.3141/2292-12>.
- Lian, C. and Zhuge, Y., (2010), "Optimum mix design of enhanced permeable concrete-An experimental investigation", *Constr Build Mater.*, 24, pp.2664-2671.
- Lim E., Tan K.H., Fwa T.F., (2013), "Effect of mix proportion on strength and permeability of pervious concrete for use in pavement", *Proceeding of the eastern Asia for transportation studies*, 9, pp.1-11.
- Lippmann, R., (1987), "An introduction to computing with neural nets", *ASSP Magazine, IEEE*, 4, pp.4-22.
- Mansour M.Y, Dicleli M, lee Y. J. and Zhang J., (2004), "Predicting the shear strength of reinforced concrete beam using artificial neural networks", *Eng Struct.* 26, pp.781-799.

Comparison of the Results of Linear Regression Models and Artificial Neural Network to Predict the Permeability of Sponge Concrete Pavement

Hassan Tajik Ghashghaei, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Parand Branch, Islamic Azad University, Parand, Iran.

Amir Esmael Forouhid, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Parand Branch, Islamic Azad University, Parand, Iran.

E-mail: amiresmaelf@yahoo.com

Received: September 2022- Accepted: February 2023

ABSTRACT

Foam concrete pavement can be used as a suitable alternative to other pavements in light urban traffic. In order to develop the use of this type of pavement, recognizing its features is necessary and important. Since the permeability of spongy concrete pavement is the most important functional feature of this type of pavement, further understanding of this feature and how it is affected by the parameters of the mixing design is the aim of this study. For this purpose, suitable combinations of foam concrete samples with granulation and different water-to-cement ratios of 36 samples have been made and tested. The ratio of water to cement for making experimental samples in the range of 0.28 to 0.34 in combination with aggregates with maximum nominal size of 9.5 mm, 12.5 mm and 19.5 mm has been selected. In order to select the appropriate model for predicting permeability changes, a comparison has been made between artificial neural network techniques and linear regression. Using the data obtained from laboratory activities and examining the fit of the models, the optimal model is proposed. Comparison of models showed that linear regression produced closer results in predicting changes in the permeability of sponge concrete. The use of linear regression can reduce the number of test specimens to achieve the optimal mixing design for foam concrete.

Keywords: Foam Concrete, Linear Regression, Artificial Neural Network, Permeability, Water to Cement