



Research Paper

Evaluation of the Effects of Microsilica and Rice Husk Ash on the Mechanical Bond Properties of Repair Layers Made of High-Performance Fiber-Reinforced Concrete with Normal Concrete Using Artificial Neural Networks

Yasser Jalalian¹, Ali Delnavaz^{*1}, Amir Hossein Hashemi¹, Reza Farokhzad¹

¹ Department of Civil Engineering and Surveying, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

Keywords

High-performance concrete, fiber-reinforced concrete, steel and polypropylene fibers, microsilica (SF) and rice husk ash (RHA), pull-off test, artificial neural network.



ABSTRACT

This study used high-performance fiber-reinforced concrete as the repair layer. To develop the model, we used 17 mix designs across three categories. We prepared high-performance concrete mixtures with three dosage levels of microsilica (SF) and rice husk ash (RHA): 5%, 10%, and 15% by weight of cement. We produced fiber-reinforced concrete mixtures using two fiber types: steel fibers (StF) and polypropylene fibers (PPF). For specimen preparation, we first cast the substrate concrete in molds for the pull-off test; after 28 days, we overlaid the specimens with other mix designs under two surface-preparation conditions: grooved and wire-brushed. After setting and demolding, we cured the specimens under two conditions: water ponding and open-air exposure. Specimens containing microsilica achieved the highest pull-off strength, and grooved surface preparation improved pull-off strength. Artificial neural networks were used with pull-off and slant shear test results to predict the repair layer's mechanical behavior. The neural network used 408 data points as inputs, including 286 samples for training and 61 for final testing. The inputs were classified into five categories: specimen ages of 28 and 120 days, two surface preparation methods (grooved and wire-brushed), and mix design type, while the output was the test result. For this purpose, two types of neural networks, namely multilayer perceptron (MLP) and radial basis function (RBF), were used. Prediction and validation using the artificial neural networks confirmed that ANN performance in predicting the experimental results is reliable and cost-effective in terms of both time and expense.

*Corresponding Author: Parvaneh Doodman

Email Address: a.delnavaz@qiau.ac.ir

Jalalian, Y., Delnavaz, A., Hashemi, A. H. & Farokhzad, R. (2026). Evaluation of the Effects of Microsilica and Rice Husk Ash on the Mechanical Bond Properties of Repair Layers Made of High-Performance Fiber-Reinforced Concrete with Normal Concrete Using Artificial Neural Networks. *Human Ecology*, 5(14), 2227-2243.

 DOI: <https://doi.org/10.22034/he.2026.571409.1190>



مقاله پژوهشی

ارزیابی تأثیر میکرو سیلیس و خاکستر پسته برنج بر مشخصات مکانیکی پیوند لایه های تعمیری از نوع بتن توانمند و الیافی با بتن معمولی توسط شبکه های عصبی مصنوعی

یاسر جلالیان^۱، علی دلنواز^{۱*}، امیر حسین هاشمی^۱، رضا فرخ زاد^۱

^۱ گروه مهندسی عمران و نقشه برداری، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

واژگان کلیدی

بتن توانمند، بتن الیافی،
الیاف فولادی و پلی پروپیلن،
میکروسیلیس (SF) و
خاکستر پسته برنج
(RHA)، آزمایش Pull
off، شبکه عصبی مصنوعی.

چکیده

در این پژوهش از بتن توانمند و الیافی به عنوان لایه ترمیمی استفاده شده است. به منظور توسعه مدل از ۱۷ طرح مخلوط در سه تیپ مجزا استفاده شده است. بتن توانمند با سه دوز میکروسیلیس (SF) و خاکستر پسته برنج (RHA)، با مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی سیمان ساخته شده است. بتن الیافی با دو نوع الیاف فولادی (StF) و پلی پروپیلن (PPF) ساخته شده اند. برای ساخت نمونه ها، ابتدا بتن بستر در قالب های مشخصی جهت آزمون Pull off ساخته شده و بعد از ۲۸ روز، سطوح نمونه ها با دو حالت شیاردار و برس خورده توسط طرح های مخلوط دیگر پر شدند. بعد از گیرش و باز کردن قالب ها، عمل آوری در دو حالت حوضچه آب و هوای آزاد انجام گرفته است. بیشترین نتایج مقاومت Pull off در نمونه های حاوی میکرو سیلیس حاصل شده و آماده سازی سطوح به صورت شیار زدن تأثیر مثبتی در کسب مقاومت Pull off را نشان می دهد. شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش Pull off و برش سطحی و برای پیش بینی رفتار مکانیکی لایه ترمیمی مورد استفاده قرار گرفته است. تعداد ۴۰۸ داده به عنوان ورودی شبکه عصبی، شامل ۲۸۶ نمونه برای آموزش شبکه و ۶۱ نمونه برای تست نهایی شبکه در نظر گرفته شده است. ورودی های شبکه در ۵ دسته شامل سن ۲۸ و ۱۲۰ روزه نمونه ها، نحوه آماده سازی به دو صورت شیار و برس خورده و نوع طرح مخلوط قرار داده شده و خروجی شامل نتیجه آزمون می باشد. برای این کار از دو نوع شبکه عصبی شامل پرسپترون چند لایه (MLP) و شبکه شعاع مبنا (RBF) استفاده شده است. پیش بینی و صحت سنجی با استفاده از شبکه عصبی موید این مطلب است که کارایی شبکه عصبی برای پیش بینی نتایج آزمایش قابلیت اطمینان دارد و از نظر زمانی و هزینه ای مقرون به صرفه است.

اسکن کنید



ارجاع به این مقاله: جلالیان، یاسر، دلنواز، علی، هاشمی، امیر حسین و فرخ زاد، رضا. (۱۴۰۵). ارزیابی تأثیر میکرو سیلیس و خاکستر پسته برنج بر مشخصات مکانیکی پیوند لایه های تعمیری از نوع بتن توانمند و الیافی با بتن معمولی توسط شبکه های عصبی مصنوعی. اکولوژی انسانی، ۵(۱۴)، ۲۲۲۷-۲۲۴۳.

۱. مقدمه

اتصال بتن جدید و قدیمی یک چالش سازه‌ای است. این اتصال به عوامل مختلفی از جمله زبری سطح مشترک، ریزترک‌ها و آلودگی سطح بتن بستگی دارد. بنابراین، تکنیک‌های آماده‌سازی جهت اتصال مناسب باید صورت گیرد که می‌توان به سیم‌زدن، سندبلاست، سنگ‌زنی، جت آب، خرد کردن، چکش پنوماتیک، آسیاب و تخریب هیدرولیکی اشاره کرد (Soylev, 2003). بررسی هندسه فصل مشترک بتن (Garbacz, 2006)، افزایش زبری سطوح (Júlio, 2005)، استفاده از عوامل چسبنده (Sadrmomtazi, 2019) و رطوبت مناسب (Hu, 2015) می‌تواند مقاومت چسبندگی را افزایش دهد. همچنین بررسی پیوند بتن توانمند و بتن معمولی (Xu, 2023)، اثر خستگی بر پیوند اتصال تعمیری (Guo, 2020)، مقاومت ملات ترمیمی (Albidah, 2020)، مقاومت مواد چسبنده بین بتن قدیمی و جدید (Rashid, 2020)، بررسی تخلخل پیوند بین لایه‌ای بتن (Sadowski, 2017)، بررسی اثر زبری بر چسبندگی بین لایه‌ای (He, 2017) و بررسی دوام پیوند لایه تعمیری (Courard, 2014) از پارامترهایی هستند که در چسبندگی بین لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

بتن‌های توانمند (HPC) به دلیل ترکیب خاص خود، مشخصات مکانیکی، مقاومت و دوام بالاتری نسبت به بتن‌های معمولی دارند. این بتن‌ها در پروژه‌هایی با نیاز خاص (Dushimimana, 2021) و با طرح مخلوط مخصوص و عمل‌آوری ویژه (Janowska-Renkas, 2021) حاصل می‌شوند. افزودنی‌های جایگزین سیمان (Rodrigues, 2022) می‌تواند ضمن افزایش مقاومت و دوام بتن (Wang, 2022)، باعث پرشدن حفرات و متراکم‌تر شدن آن شود (Hasan, 2022). میکروسلیس (Jamali, 2023; Biswas, 2020) (SF) و خاکستر پسته برنج (Yosefi, 2023; Salas Montoya, 2023) (RHA)، زئولیت (Pezeshkian, 2021)، سرباره (Zhang, 2019) و ترکیب مواد مختلف (Wu, 2018) از موارد افزودنی برای تولید بتن توانمند هستند. این مواد با اصلاح ساختار بتن و اثر مثبت بر C-S-H، باعث متراکم‌تر شدن آن می‌شوند.

یکی از معایب اصلی بتن، مقاومت کششی پایین آن است. در بتن الیافی، الیاف پراکنده در بتن باعث بهبود مقاومت کششی می‌شوند (Lantsoght, 2019). شکل و نوع الیاف به کاررفته (Katzner, 2012)، تنظیم حجم الیاف (Kohoutková, 2013) و توزیع مناسب آن (Abrishambaf, 2014) بر خواص مکانیکی آن تأثیر می‌گذارد. قطعات سازه‌ای مناسب برای مسلح شدن با الیاف شامل دال‌ها و کف (Marcalíková, 2022) و تیرهای بدون آرماتور برشی (Zhao, 2018) است. استفاده از الیاف فولادی (Samantaray, 2019)، مواد کامپوزیتی حاصل از چسب پلیمری (Asteris, 2021)، الیاف شیشه (Haque, 2021)، الیاف (FRC) (Fakharifar, 2014; Wang, 2021) و الیاف بازالت و پلی‌پروپیلن (Ayub, 2014; Wang, 2019) در بتن‌ها به منظور کنترل و دوختن ترک‌های ایجادشده در کشش، مورد استفاده قرار می‌گیرد. میزان مصرف الیاف یکی از چالش‌های به کار بردن این مواد است.

شبکه عصبی مصنوعی زیرمجموعه محاسبات نرم است. شبکه عصبی مصنوعی با الگوبرداری از مغز انسان به حل مسائل غیرخطی و پیچیده می‌پردازد. شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی، طبقه‌بندی و خوشه‌بندی اطلاعات استفاده می‌شود (Cihan, 2019). شبکه عصبی جهت پیش‌بینی، نیاز به یادگیری دارد. یادگیری شبکه عصبی به صورت نظارت‌شده، نظارت‌نشده و تقویت‌شده است. یکی از الگوریتم‌های یادگیری، الگوریتم پس‌انتشار است. این الگوریتم برای شبکه‌های تک یا دولایه استفاده می‌شود (Krose and van der Smagt, 1996). برای حصول بهترین نتیجه، این الگوریتم با بازپخش خطاها و تکنیک گرادینان نزولی برای به حداقل رساندن خطا با تنظیم تدریجی وزن بین لایه‌ها عمل می‌کند. یکی از انواع شبکه‌های عصبی، پرسپترون چندلایه (MLP) است. روش محاسباتی MLP در مهندسی عمران از جمله پایش سلامت سازه (Matos, 2019)، مهندسی سازه (Fahmy, 2016)، مهندسی زلزله (Shin, 2020)، تحلیل حساسیت (Cao, 2016)، پیش‌بینی اثر مواد مختلف مانند FRP (Rahman, 2021)، SRP (Kekez, 2022) و خاکستر پسته برنج (Li, 2023) بر مقاومت و چسبندگی بتن، بهبود توسعه منحنی شکنندگی برای پل‌های بتنی (Yazdankhah, 2022) و ترکیب شبکه‌های عصبی با منطق فازی جهت تحلیل دقیق‌تر نتایج (Khademi, 2017) به کار گرفته شده است.

در این پژوهش، تأثیر میکروسلیس (SF) و خاکستر پسته برنج (RHA) بر مشخصات مکانیکی لایه‌های ترمیمی از نوع بتن توانمند و الیافی همراه با بتن معمولی بررسی شده است. بتن توانمند با میکروسلیس و خاکستر پسته برنج، با مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی سیمان ساخته شده‌اند. بتن الیافی با دو نوع الیاف فولادی (StF) و پلی‌پروپیلن (PPF) ساخته شده‌اند.

از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی لایه ترمیمی با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش Pull-off و برش سطحی استفاده شده است. همچنین برای مقایسه و کنترل، دو نوع شبکه عصبی شامل پرسپترون چندلایه (MLP) و شبکه شعاع مبنا (RBF) به کار گرفته شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مشخصات مصالح مصرفی

سیمان تیپ ۲ هگمتانه، آب آشامیدنی، ریزدانه و درشت‌دانه مناسب با دانه‌بندی براساس ASTM C33 (ASTM, 2016) برای تهیه بتن استفاده شده است. برای آماده‌سازی بتن با مقاومت بالا، میکروسیلیس شرکت فروسیلیس ایران (سمنان) که منطبق با استاندارد ASTM C150 (ASTM, 2007) است، به کار رفته است. فوق‌روان‌کننده (FARCO PLAST P10-3R) برای افزایش کارایی به همراه میکروسیلیس استفاده شده است. الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن پلیمری (PPF) مطابق استاندارد EN 14889-2 به کار رفته‌اند.

۲-۲. طرح مخلوط، مراحل ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

در این تحقیق ۱۷ طرح مخلوط در سه تیپ طراحی و ساخته شده‌اند. بتن معمولی به عنوان بتن کنترلی (CS)، بتن توانمند و بتن الیافی جهت لایه تعمیر، سه تیپ کلی طرح مخلوط هستند. نسبت آب به مواد سیمانی (w/b) برابر ۰.۳ در نظر گرفته شده است. بتن توانمند با سه دوز میکروسیلیس (SF) و خاکستر پوسته برنج (RHA) به مقدار ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی مواد سیمانی ساخته شده‌اند. بتن الیافی با الیاف فولادی 0 (StF) و ۱ درصد و پلی‌پروپیلن 0 (PPF)، ۲ و ۴ درصد وزنی مواد سیمانی تهیه شده‌اند.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی سیمان و میکرو سیلیس سمنان

ترکیبات	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	C	IR	L.O.I
درصد تشکیل دهنده سیمان	۶۴.۳۸	۲۱.۰۸	۵.۳۶	۳.۶۴	۲	۰.۸۲	۰.۵	۲.۱	-	۰.۲۸	۰.۹
درصد تشکیل دهنده میکرو سیلیس سمنان	۱.۵	۸۵	۱	۲	۲	-	-	-	۳	-	۳.۵

جدول ۲. مشخصات الیاف فولادی و پلی پروپیلن

مشخصات	طول (mm)	قطر (mm)	طول/قطر	مقاومت کششی (Mpa)	مدول الاستیسیته (Gpa)	چگالی (Kg/m ³)
الیاف فولادی	۳۶	۰.۸	۴۵	۱۲۰۰	-	۷۸۵۰
الیاف پلی پروپیلن	۳۶	بسیار ناچیز	-	۴۰۰	۳.۵-۳.۹	-

۲-۳. طرح مخلوط، مراحل ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

در این تحقیق ۱۷ طرح مخلوط در سه تیپ طراحی و ساخته شده‌اند. بتن معمولی به عنوان بتن کنترلی (CS)، بتن توانمند و بتن الیافی جهت لایه تعمیر، سه تیپ کلی طرح مخلوط هستند. نسبت آب به مواد سیمانی (w/b) برابر ۰.۳ در نظر گرفته شده است. بتن توانمند با سه دوز میکروسیلیس (SF) و خاکستر پوسته برنج (RHA) به مقدار ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی مواد سیمانی ساخته شده‌اند. بتن الیافی با الیاف فولادی 0 (StF) و ۱ درصد و پلی پروپیلن (PPF) ۰، ۲ و ۴ درصد وزنی مواد سیمانی تهیه شده‌اند.

۳. یافته‌ها

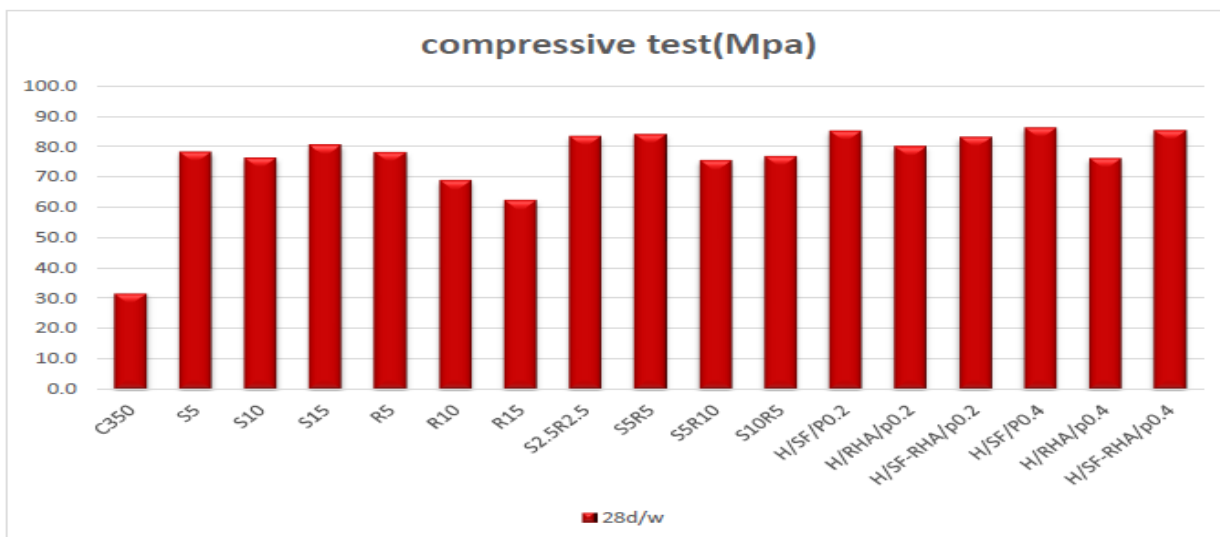
برای ساخت نمونه‌های بتنی ابتدا مواد سیمانی، سنگدانه و الیاف با هم مخلوط شده‌اند. سپس آب و فوق‌روان‌کننده به آن‌ها اضافه شده و ترکیب با سرعت بیشتری انجام شده است. قالب‌ها بعد از تمیز شدن و روغن‌کاری با مخلوط پر شده‌اند. ابتدا بتن بستر در قالب نیمه‌منشوری ۷×۷×۲۷ cm و ۱۰×۱۰×۱۰ cm به ترتیب برای آزمون برش سطحی و Pull-off ساخته شده و سپس عمل‌آوری در دو حالت حوضچه آب با دمای ۲۳±۲ درجه سانتی‌گراد و هوای آزاد انجام گرفته است.

۳-۱. مقاومت فشاری

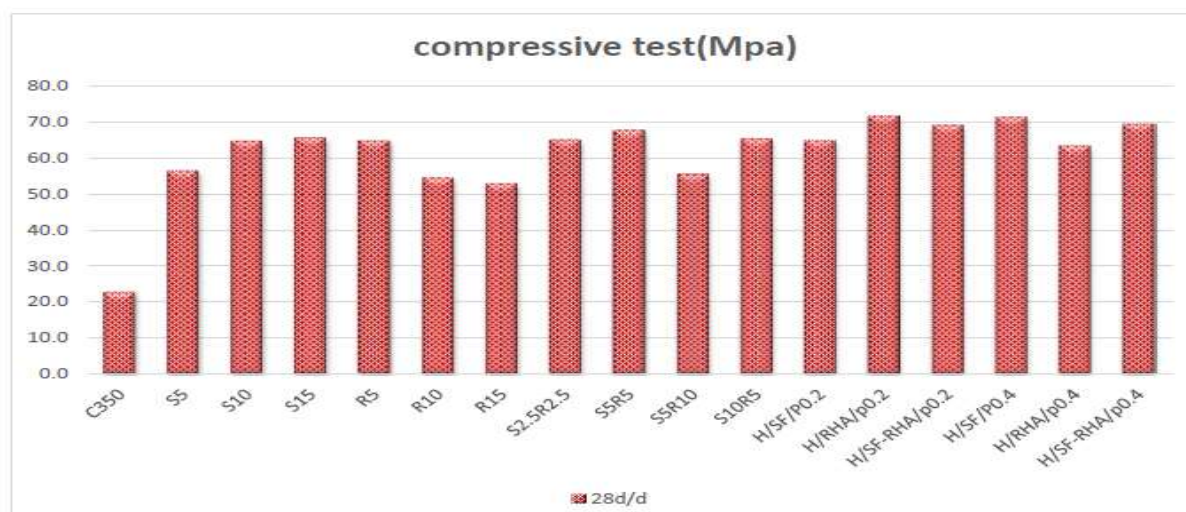
این آزمایش براساس ASTM C39 (ASTM, 2005) تحت بارگذاری تک‌محوره انجام گرفته است. نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه در شرایط عمل‌آوری مرطوب و هوای آزاد در شکل ۱ و ۲ نمایش داده شده است. اضافه کردن میکروسیلیس حداقل ۱۱۰ درصد مقاومت فشاری را افزایش داده است. همچنین افزودن خاکستر پوسته برنج باعث افزایش بیش از ۱۰۰ درصدی شده است. اگرچه افزودن الیاف و خاکستر

پوسته برنج باعث کاهش خفیف کارایی شده است، ولی مقاومت فشاری در همه نمونه‌ها رشد بسیار خوبی داشته است. بیشترین مقاومت نمونه بتن توانمند، ترکیب S5R5 در شرایط مرطوب و هوای آزاد، ۸۴ و ۶۷.۷ مگاپاسکال و بتن الیافی ترکیب H/SF/P0.4 در شرایط مرطوب و هوای آزاد، ۸۶.۳ و ۷۱.۴ مگاپاسکال حاصل شده است.

ارتقا مقاومت فشاری می تواند به عوامل گوناگونی مانند مقاومت الیاف فولادی، پلی پروپیلن، درصد میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج نسبت داده شود. این مواد باعث افزایش چسبندگی خمیر سیمان و مخلوط بتن شده و در نتیجه مقاومت بیشتر پیوندهای بتن می شود. میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج به دلیل ریز تر بودن از مواد سیمانی فضاهای بین دانه های سیمان را پر کرده و چگالی محصول را افزایش می دهند. که منجر به مقاومت فشاری بیشتر می شوند.



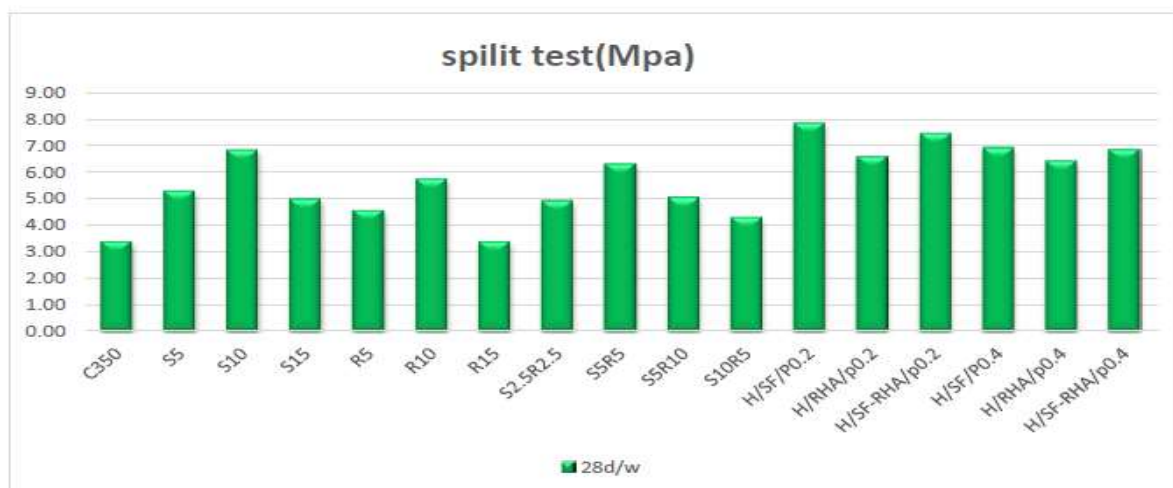
شکل ۱. نتایج مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری مرطوب



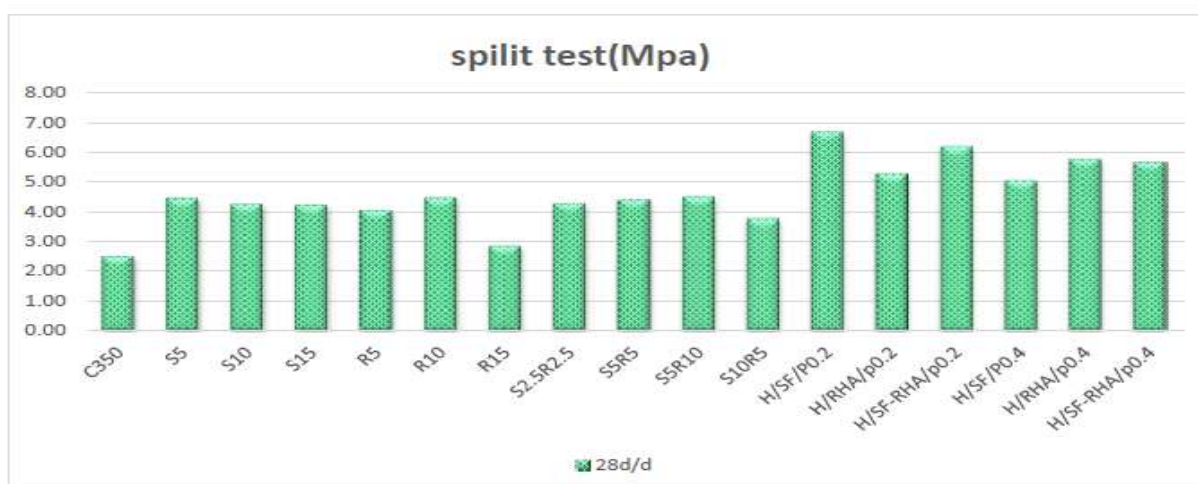
شکل ۲. نتایج مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری هوای آزاد

۳-۲. آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

برای این آزمایش نمونه های استوانه ای $30 \times 15 \text{ cm}$ ساخته و بکار رفته است. این آزمایش براساس $ASTM C496$ [۵۲] انجام گرفته است. نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری مرطوب و هوای آزاد در شکل ۳ و ۴ نمایش داده شده است. اضافه کردن میکروسیلیس حداقل ۶۰ درصد مقاومت کششی غیر مستقیم را افزایش داده است. همچنین افزودن خاکستر پوسته برنج باعث افزایش بیش از ۸۰ درصدی شده است. بیشترین مقاومت نمونه بتن توانمند، ترکیب S10 و S5R5 در شرایط مرطوب ۶.۳ و ۴.۲۸ و ۵.۳۶ مگاپاسکال و بتن الیافی ترکیب H/SF/P0.2 در شرایط مرطوب ۷.۸۶ و هوای آزاد ۶.۶۹ مگاپاسکال حاصل شده است.



شکل ۳. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری مرطوب

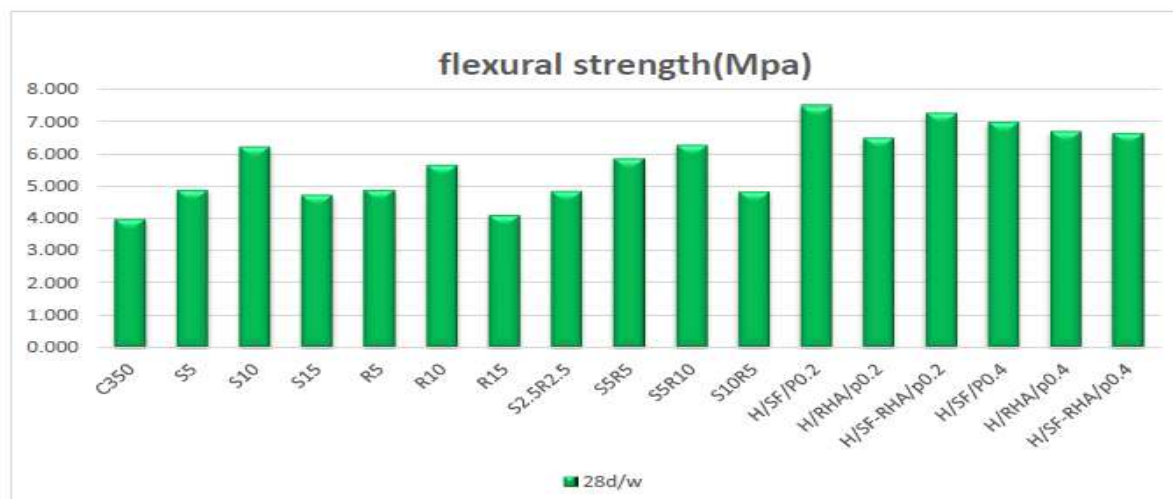


شکل ۴. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری هوای آزاد

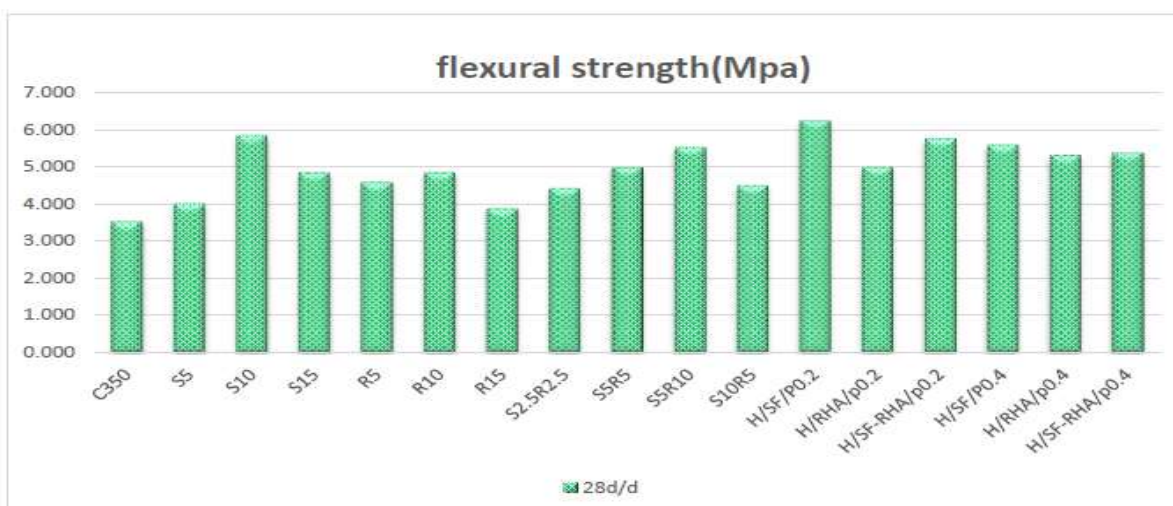
۳-۳. مقاومت خمشی

آزمایش خمش سه نقطه ای عملکرد خمشی بتن مسلح با الیاف فولادی را بدست می آورد. پارامترهای مورد نیاز این آزمایش، از منحنی بار-تغییر مکان استخراج می شود. آزمایش روی یک تیر با تکیه گاه های ساده تحت بارگذاری سه نقطه ای به کمک یک سیستم کنترلی جهت ثبت پارامترها انجام می شود. این آزمایش، برای پیک بارها و جابجایی های متناظر با آنها را براساس استاندارد ASTM1609 [۵۲] بکار گرفته شده است. تعیین چقرمگی نمونه بتن براساس سطح زیر نمودار بار-تغییر مکان با معیاری از توانایی جذب انرژی امکان پذیر است. نتایج مقاومت خمشی ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری مرطوب و هوای آزاد در شکل ۵ و ۶ نمایش داده شده است. اضافه کردن میکروسیلیس حداقل ۱۵ درصد مقاومت خمشی را افزایش داده است. افزودن ۵ و ۱۰ درصدی میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج باعث افزایش مقاومت خمشی شده اند. اما افزایش ۱۵ درصدی این مواد باعث کاهش مقاومت شده است. این موضوع ممکن است به دلیل عدم توزیع مناسب مواد اضافه شده باشد. بیشترین مقاومت نمونه بتن توانمند، ترکیب S10 در شرایط مرطوب ۶.۲۲۶ و هوای آزاد ۵.۸۴۶ مگاپاسکال و بتن الیافی ترکیب H/SF/P0.2 در شرایط مرطوب ۷.۵۰۳ و هوای آزاد ۶.۲۴ مگاپاسکال حاصل شده است.

الیاف، میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج به کار رفته باعث جلوگیری از گسترش ترک های عمیق و مقاومت بیشتر پیوندهای بتن می شود. این موضوع باعث افزایش جذب انرژی و توانایی خمش بیشتر بتن می شود. فعالیت شیمیایی میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج باعث تولید C-S-H بیشتر (ثانویه) و در نتیجه پیوندهای مستحکم تر مواد سیمانی می شود.



شکل ۵. نتایج مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری مرطوب



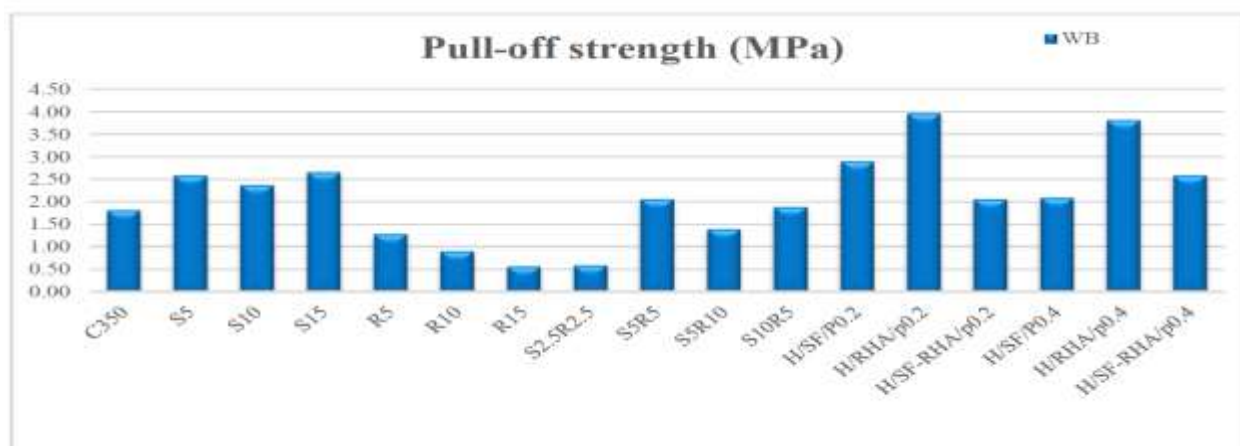
شکل ۶. نتایج مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری هوای آزاد

۳-۴. مقاومت Pull off

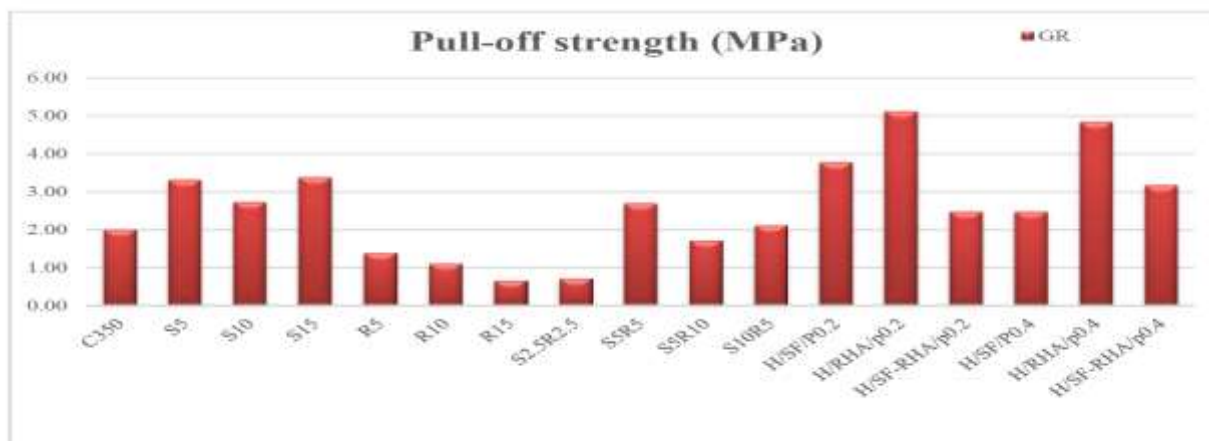
برای بررسی چسبندگی لایه های بتن از آزمایش Pull off استفاده می شود. این تست بزرگترین نیروی عمودی وارد بر سطح بتن و ماده چسبنده را مشخص می کند. این آزمایش براساس *ASTM C1583* [۵۳] انجام گرفته است. آزمایش Pull off دو نتیجه مهم دارد. اول مقدار حداکثر نیرویی که مصالح در آن گسیخته می شوند. دوم نحوه گسیختگی و شکست مصالح است. نتایج مقاومت Pull off برای عمل آوری ۲۸ روز در شرایط عمل آوری مرطوب و هوای آزاد در شکل ۷ تا ۱۲ نمایش داده شده است. اضافه کردن میکروسیلیس حداقل ۳۰ درصد مقاومت Pull off را افزایش داده است. خاکستر پوسته برنج باعث کاهش در مقاومت Pull off شده است. این کاهش به اندازه ای است که نسبت به بتن معمولی هم مقاومت کمتری را نشان می دهد. حتی برای حالت ترکیب میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج شاهد کاهش مقاومت Pull off هستیم. بیشترین مقاومت در ترکیبات H/RHA/P0.2 و S15 در شرایط مرطوب در سطوح عادی ۲.۶ و ۳.۸۸ مگاپاسکال، در سطوح برس خورده ۲.۶۵ و ۳.۹۵ مگاپاسکال و در سطوح شیار زده ۳.۳۷ و ۵.۱۲ مگاپاسکال رخ داده است. بیشترین مقاومت در ترکیب H/RHA/P0.2 و S15 در شرایط هوای آزاد در سطوح عادی ۲.۱۴ و ۳.۱۶ مگاپاسکال، در سطوح برس خورده ۲.۲۴ و ۳.۲۳ مگاپاسکال و در سطوح شیار زده ۲.۸۸ و ۴.۱۴ مگاپاسکال می باشد. با توجه بت نتایج، نحوه آماده سازی شیار زدن تاثیر مثبت در کسب مقاومت Pull off داشته است. مقاومت Pull off شیار زده شده به طور میانگین نسبت به سطوح بدون آماده سازی حداکثر ۲۸ درصد افزایش داشته است.



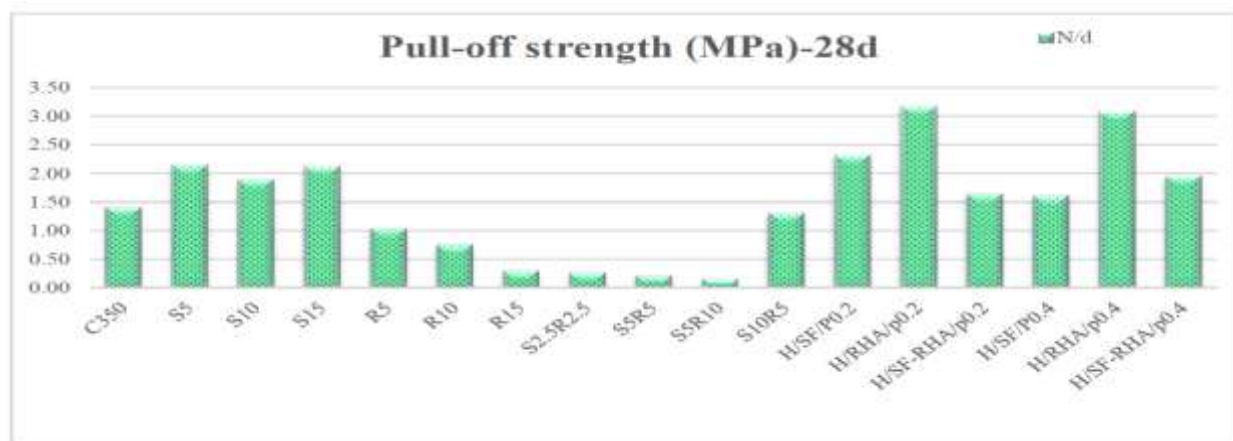
شکل ۷. نتایج مقاومت Pull off نمونه های عادی در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری مرطوب



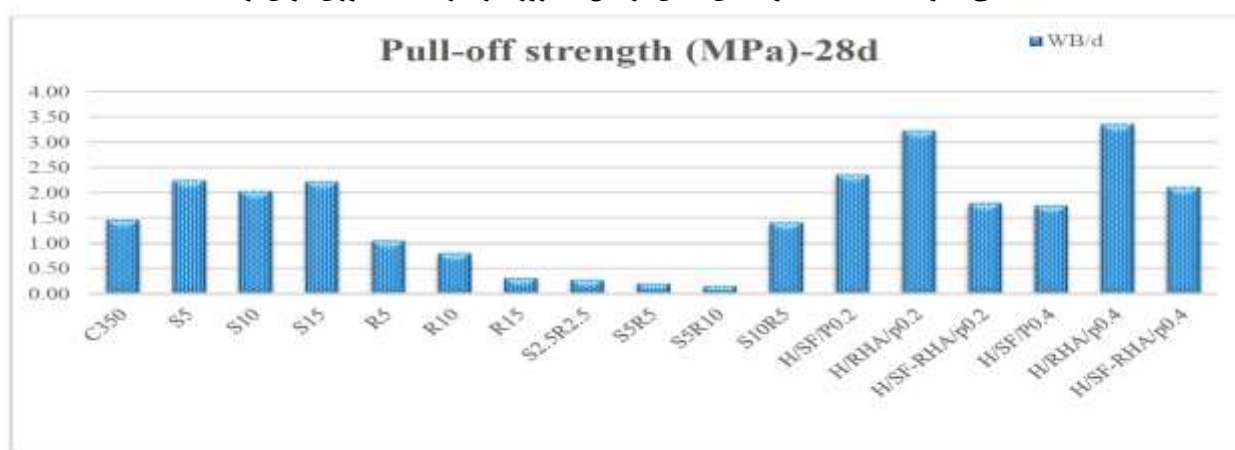
شکل ۸. نتایج مقاومت Pull off نمونه های برس خورده در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری مرطوب



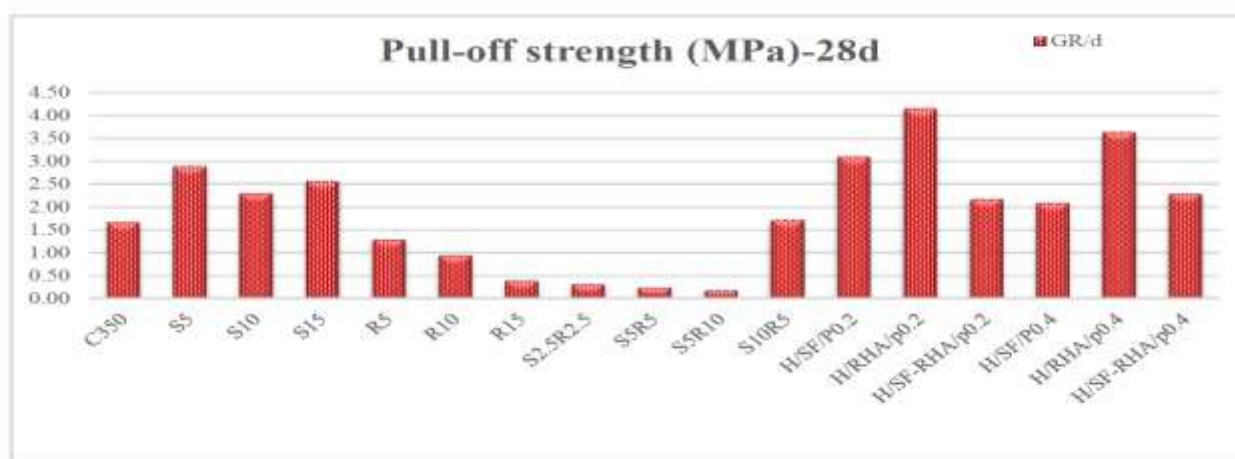
شکل ۹. نتایج مقاومت Pull off نمونه های شیار زده در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری مرطوب



شکل ۱۰. نتایج مقاومت Pull off نمونه های عادی در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری هوای آزاد



شکل ۱۱. نتایج مقاومت Pull off نمونه های برس خورده در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری هوای آزاد

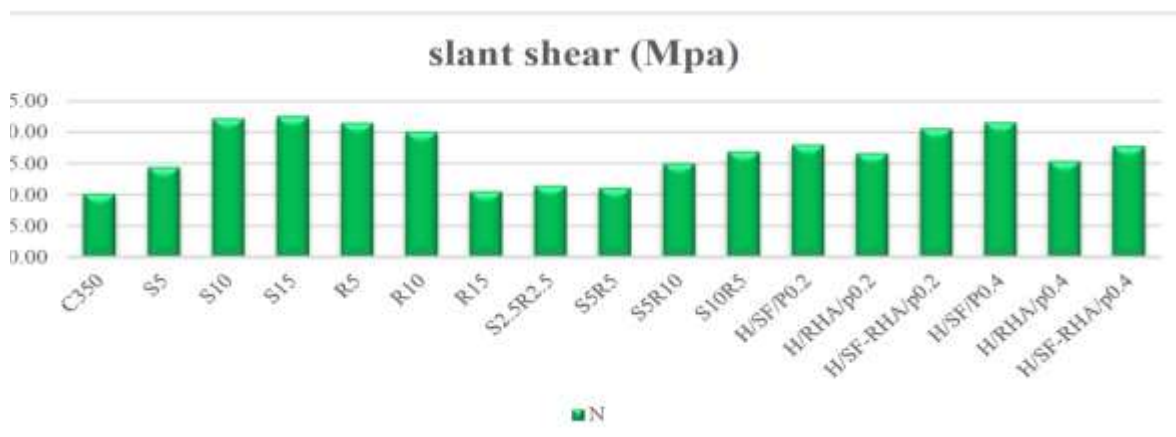


شکل ۱۲. نتایج مقاومت Pull off نمونه های شیار زده در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری هوای آزاد

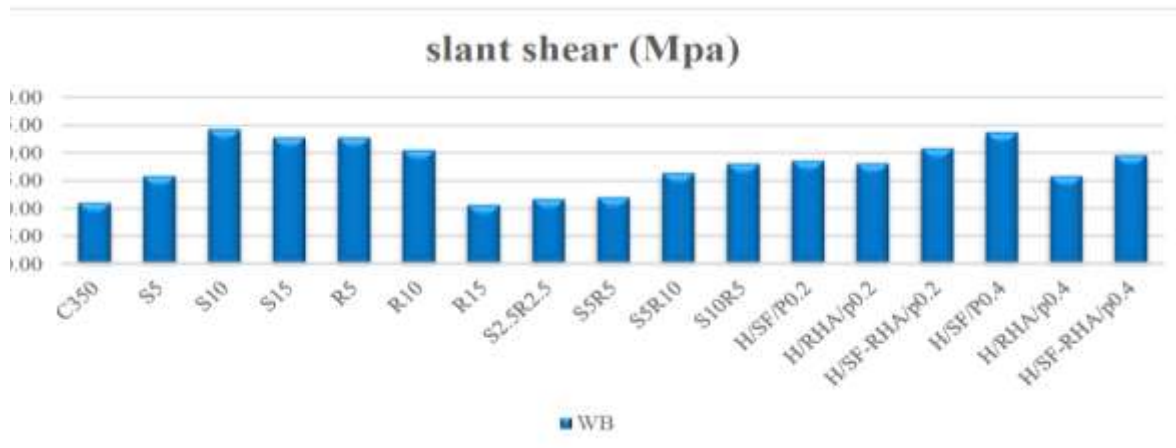
۳-۵. مقاومت برش سطحی

این آزمایش رایج ترین روش آزمایش برای ارزیابی مقاومت پیوند لایه هاست. نتایج این آزمون نسبت به سایر آزمون ها اعتبار بیشتری دارد. این آزمایش براساس *ASTM C882-13* انجام گرفته است. نتایج مقاومت برش سطحی برای عمل آوری ۲۸ روز در شرایط عمل آوری مرطوب و هوای آزاد در شکل ۱۳ تا ۱۸ نمایش داده شده است. اضافه کردن میکروسیلیس حداقل ۴۰ درصد مقاومت برش سطحی را افزایش داده است. خاکستر پوسته برنج برای دوز های ۵ و ۱۰ درصد باعث افزایش بیشتر از ۱۰۰ درصدی مقاومت برش سطحی شده اما در ۱۵ درصد افزایشی اتفاق نیافتاده است. بیشترین مقاومت در ترکیب S15 و H/RHA/P0.4 در شرایط مرطوب در سطوح عادی ۲۲.۵۱ و ۲۱.۵۱ مگاپاسکال، در سطوح برس خورده ۲۲.۷۳ و ۲۳.۶۹ مگاپاسکال و در سطوح شیار زده ۳۱.۵۱ و ۲۹.۲۹ مگاپاسکال

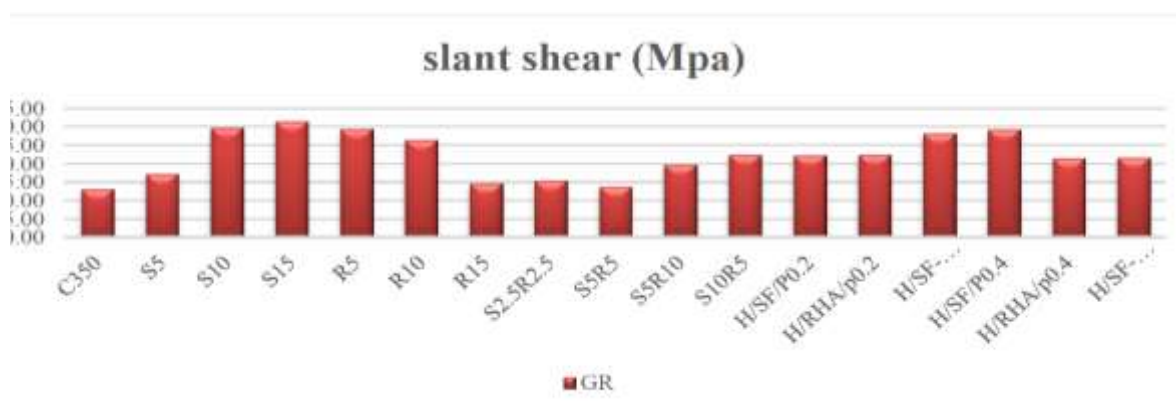
رخ داده است. بیشترین مقاومت در ترکیب H/RHA/P0.4 و S15 در شرایط هوای آزاد در سطوح عادی ۲۱.۲۹ و ۱۸.۳۷ مگاپاسکال، در سطوح برس خورده ۲۳.۴۲ و ۱۹.۱۰ مگاپاسکال و در سطوح شیار زده ۲۷.۲۵ و ۲۳.۱۴ مگاپاسکال می باشد.



شکل ۱۳. نتایج مقاومت برشی سطحی نمونه های عادی در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری مرطوب



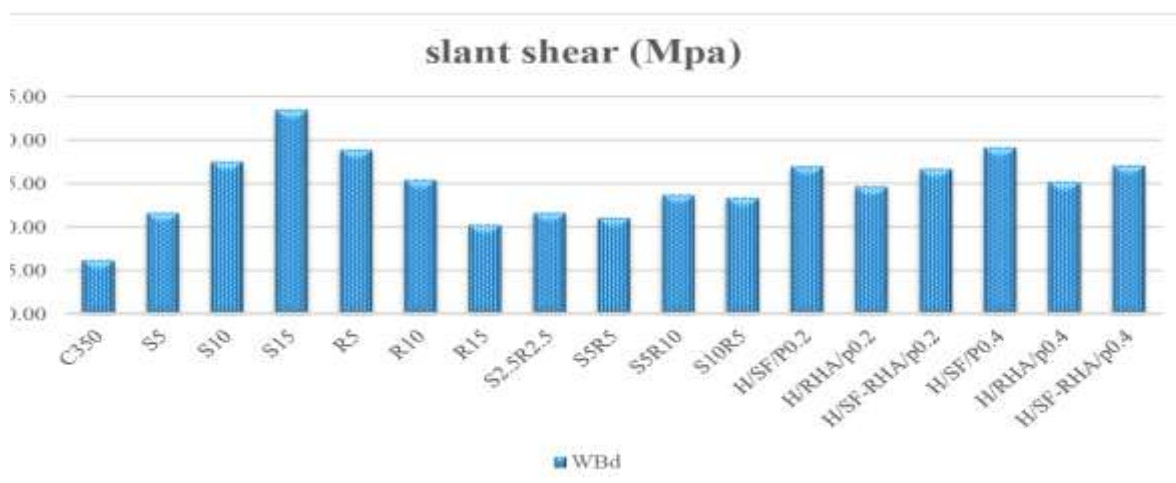
شکل ۱۴. نتایج مقاومت برشی سطحی نمونه های برس خورده در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری مرطوب



شکل ۱۵. نتایج مقاومت برشی سطحی نمونه های شیار زده در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری مرطوب



شکل ۱۶. نتایج مقاومت برشی سطحی نمونه های عادی در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری هوای آزاد



شکل ۱۷. نتایج مقاومت برشی سطحی نمونه های برس خورده در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری هوای آزاد



شکل ۱۸. نتایج مقاومت برشی سطحی نمونه های شیار زده در سن ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری هوای آزاد

۳-۶. شبکه عصبی مصنوعی

پارامترهای اصلی یک شبکه عصبی مصنوعی شامل اطلاعات ورودی، معماری شبکه، الگوی یادگیری و کنترل خطاها می باشند. شبکه بعد از آموزش و تنظیم پارامترها، منجر به پاسخ خاصی به بواسطه ورودی اعمال شده می شود. الگوی یادگیری، نحوه اتصال و وزن دهی گره ها برای معماری های مختلف، متفاوت هستند. یکی از انواع شناخته شده و پرکاربرد معماری شبکه عصبی، پرسپترون چندلایه (MLP) است. این نوع شبکه برای تفکیک و دسته بندی اطلاعات و همچنین پیش بینی رفتار کاربرد دارد. الگوریتم یادگیری وزن دهی نرون ها را

براساس حداقل میزان خطا، در حین فرایند آموزش انجام می دهد. استفاده از خطای مربع میانه (MSE) یکی از روش ها است که از معادلات زیر قابل محاسبه است.

$$e_i = target_i - output_i \quad (1)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (2)$$

به علاوه انحراف معیار (σ) واریانس جزء مطلق (R) از معادلات زیر بدست می آیند:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - o_i)^2} \quad (3)$$

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i)^2} \quad (4)$$

۳-۷. شبکه عصبی مصنوعی چند لایه پرسپترون (MLP)

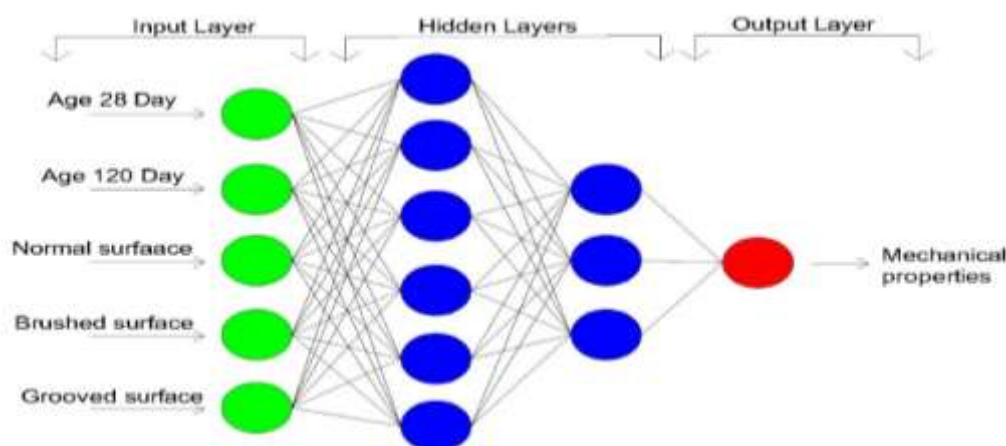
معماری این شبکه شامل لایه ورودی، لایه های پنهان و لایه خروجی است. تعداد نرون های لایه های ورودی و خروجی براساس مسئله تعیین می شود. تعداد نرون های لایه میانی با بهینه ترین پاسخ و لحاظ کردن کمترین خطا تنظیم می شود. هر لایه دارای ماتریس وزن می باشد. وزن ها براساس کمینه خطا مقدار دهی می شوند.

در پژوهش حاضر، برای آموزش شبکه از داده های ۴۰۸ نمونه استفاده شده است. که شامل ۷۰ درصد (۲۸۶ نمونه) برای آموزش شبکه و ۱۵ درصد (۶۱ نمونه) برای آزمایش و ۱۵ درصد (۶۱ نمونه) را برای اعتبار سنجی شبکه می باشد. در حین آموزش شبکه، وزن بین نرون ها در لایه های مختلف براساس کمترین خطای حاصل در خروجی ها تعیین می شود. در جدول ۳ برآورد میزان خطای سه گروه آموزش نمایش داده شده است. خطای هر سه گروه بسیار کم و نزدیک به صفر است.

جدول ۳. برآورد میزان خطا در سه گروه آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی

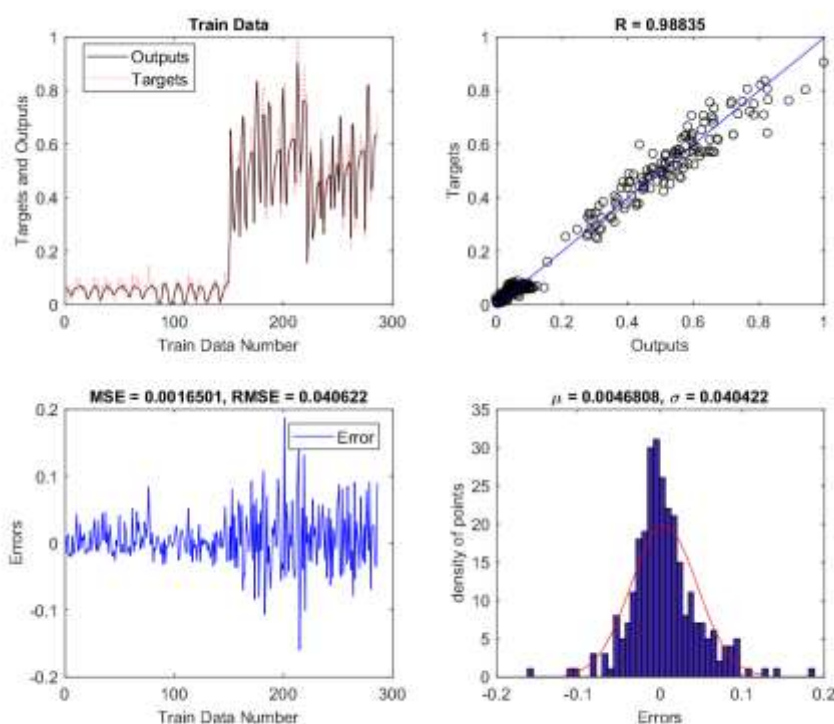
نمونه	نمونه		
	آموزشی	اعتبارسنجی	آزمایشی
تعداد	۲۸۶	۱۶	۱۶
درصد	۷۰	۱۵	۱۵
MSE	۰.۰۰۱۶۵۰۱	۰.۰۰۲۹۱۴۴	۰.۰۰۲۴۵۱۲

برای محاسبه بهترین معماری، از چند معماری متفاوت استفاده شده است که براساس کمترین خطای MSE و بیشترین رگرسیون R در نظر گرفته می شود، که بهترین ساختار ۱-۳-۶-۵ می باشد. شکل ۱۹ معماری کلی شبکه پرسپترون را نمایش می دهد.



شکل ۱۹. معماری کلی شبکه پرسپترون

کیفیت عملکرد شبکه عصبی براساس اندازه رگرسیون خطی تعیین می شود. هر چه R به یک نزدیک تر باشد عملکرد بهتری را نشان می دهد. در شکل ۲۰ عملکرد شبکه نشان داده شده است. مقدار $R = 0.98835$ است که بسیار مناسب است.



شکل ۲۰. توزیع پیش بینی شبکه و وضعیت واقعی

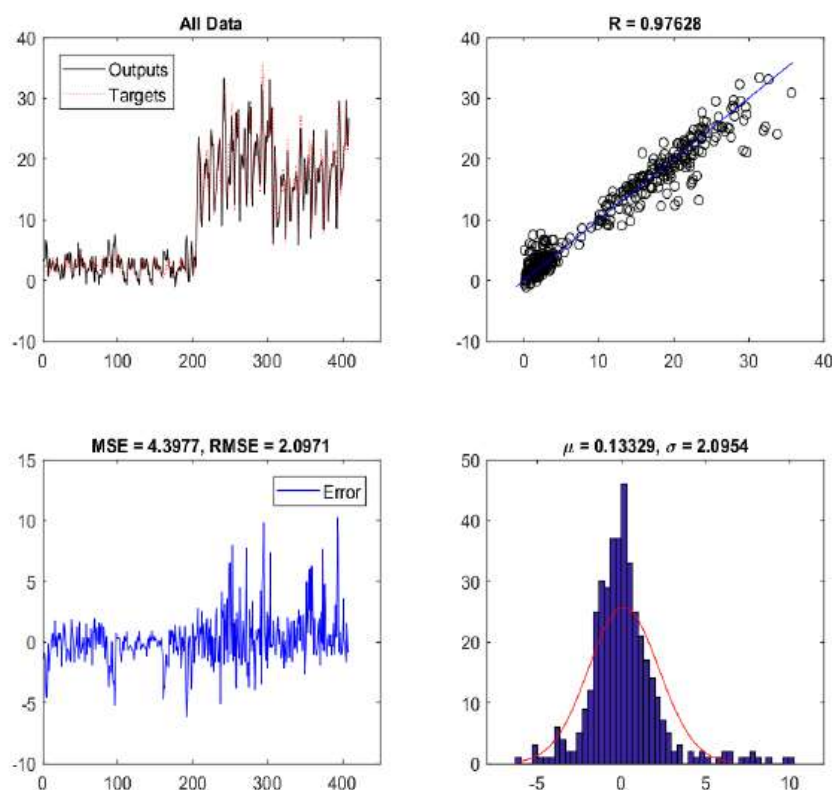
۳-۸. شبکه عصبی مصنوعی پایه ای شعاعی (RBF)

معماری این شبکه اغلب به صورت دو لایه است. ارتباط بین لایه ورودی و پنهان به سادگی پرسپترون نیست. به علت نوع خاص تابع انتقال، این شبکه قادر است نگاشت های پیچیده را با تعداد کم لایه ها پیش بینی کند. هدف از ایجاد این شبکه ها، ایجاد روش جامع برای تقریب مسائل در فضای چند بعدی است. سرعت همگرایی شبکه RBF از MLP بیشتر است. دلیل این مسئله در دو مرحله ای بودن فرآیند یادگیری و کارا بودن الگوریتم دو مرحله ای است. به منظور آموزش شبکه عصبی RBF، داده ها بصورت تصادفی به دو دسته آموزش شامل ۷۰ درصد داده و آزمایش شامل ۳۰ درصد تقسیم بندی شده اند. برای ارزیابی دقت شبکه از معیار جذب میانگین مربعات MSE و ضریب همبستگی استفاده شده است که در جدول ۴ مقادیر آنها نمایش داده شده است. مقدار R برای هر سه گروه نزدیک به ۱ است. برای آموزش شبکه، از الگوریتم پس انتشار خطا استفاده شده است.

جدول ۴. جذر میانگین مربعات خطا، ضریب همبستگی، میانگین و انحراف از معیار استاندارد خطا

داده ها	RMSE	R	μ	σ
همه داده ها	۲.۰۹۷۱	۰.۹۷۶۲۸	۰.۱۳۳۲۹	۲.۰۹۵۴
داده های آموزشی	۱.۳۲۲۴	۰.۹۹۰۱۶	.	۱.۳۲۴۷
داده های آزمایشی	۳.۲۵۶۲	۰.۹۵۲۸۴	۰.۴۴۵۷۴	۳.۲۳۹۶

عملکرد کلی شبکه RBF در شکل ۲۱ نمایش داده شده است. مشاهده می شود که ضریب همبستگی $R=0.9762$ می باشد. این نتیجه نشان دهنده عملکرد بسیار خوب شبکه بوده و موید این مطلب است که پیش بینی شبکه RBF دارای قابلیت اطمینان برای پیش بینی رفتار مکانیکی بتن است.



شکل ۲۱. نتایج حاصل از مقایسه خروجی شبکه عصبی RBF با نتایج تجربی برای همه داده ها

۴. نتیجه گیری

این پژوهش نمونه‌ای از کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش بینی مشخصات مکانیکی بتن بود. ابتدا براساس آزمایشات فشاری، کششی غیر مستقیم، خمشی، Pull off و برشی سطحی در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه نتایج حاصل و پایش شد. سپس با استفاده از دو نوع شبکه عصبی MLP و RBF، داده های حاصل از نتایج آزمایش‌ها، جهت پیش بینی رفتار مکانیکی بتن مورد استفاده قرار گرفت. مهم ترین یافته‌های پژوهش در زیر آمده است:

- ۱- همانطور که انتظار می رفت افزایش سن نمونه‌ها، باعث افزایش مقاومت‌ها شده است.
- ۲- در اکثر نمونه‌ها افزایش خاکستر پوسته برنج باعث کاهش مقاومت شده است.
- ۳- شرایط عمل آوری در هوای آزاد موجب کاهش نتایج نسبت به شرایط مرطوب به طور میانگین ۲۸.۵ درصد در مقاومت فشاری، ۱۷.۶ درصد در مقاومت کششی غیر مستقیم، ۱۰.۲ درصد در مقاومت خمشی، ۱۱ درصد در جذب انرژی شده است. این کاهش را می‌توان مرتبط با تبخیر سطحی آب که منجر به تاخیر یا توقف فرآیند هیدراتاسیون می شود دانست.
- ۴- در نمونه‌های بتن الیافی، شاهد افزایش مقاومت کششی و جذب انرژی نسبت به بتن بدون الیاف بودیم که ناشی از اثر الیاف بوده است.
- ۵- در آزمایش Pull off و برش سطحی، نحوه آماده سازی شیار زدن تأثیر مثبتی در کسب مقاومت به اندازه ۲۸ درصد داشته اند.

۶- با توجه به عملکرد شبکه های عصبی MLP و RBF در پیش بینی مناسب مشخصات مکانیکی بتن، می توان گفت، نتایج حاصل از آنها دارای قابلیت اطمینان است.

۵. منابع

1. Abrishambaf, A., Cunha, V. M. C. F., & Barros, J. A. O. (2014). The influence of fibre orientation on the post-cracking tensile behaviour of steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 9(31), 38-53. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.31.04>
2. Albidah, A., Abadel, A., Alrshoudi, F., Altheeb, A., Abbas, H., & Al-Salloum, Y. (2020). Bond strength between concrete substrate and metakaolin geopolymer repair mortars at ambient and elevated temperatures. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 10732-10745. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.092>
3. Asteris, P., Naseri, H., Hajihassani, M., Kharghani, M., & Chalioris, C. (2021). On the mechanical characteristics of fiber reinforced polymer concrete. *Advances in Concrete Construction*, 12, 271-282. <https://doi.org/10.12989/acc.2021.12.4.271>
4. ASTM. (n.d.). C33/C33M-16: Standard specification for concrete aggregates.
5. ASTM. (n.d.). C39/C39M-05: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.
6. ASTM. (n.d.). C150-07: Standard specification for Portland cement.
7. ASTM. (n.d.). C1583/C1583M: Standard test method for tensile strength of concrete surfaces and the bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by direct tension (pull-off method).
8. ASTM. (n.d.). C496/C496M: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens.
9. ASTM. (n.d.). C882/C882M: Standard test method for bond strength of epoxy-resin systems used with concrete by slant shear.
10. Ayub, T., Shafiq, N., & Nuruddin, M. F. (2014). Mechanical properties of high-performance concrete reinforced with basalt fibers. *Procedia Engineering*, 77, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.07.029>
11. Bentz, D. P., et al. (2018). Influence of substrate moisture state and roughness on interface microstructure and bond strength: Slant shear vs. pull-off testing. *Cement and Concrete Composites*, 87, 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.005>
12. Biswas, R., & Rai, B. (2020). Effect of cementing efficiency factor on the mechanical properties of concrete incorporating silica fume. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 5(3), 190-203. <https://doi.org/10.1080/24705314.2020.1765269>
13. Cao, M., Alkayem, N. F., Pan, L., & Novák, D. (2016). Advanced methods in neural networks-based sensitivity analysis with their applications in civil engineering. In *Artificial neural networks - Models and applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/64026>
14. Cihan, M. T. (2019). Prediction of concrete compressive strength and slump by machine learning methods. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2019/3069046>
15. Courard, L., Piotrowski, T., & Garbacz, A. (2014). Near-to-surface properties affecting bond strength in concrete repair. *Cement and Concrete Composites*, 46, 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.005>
16. Dushimimana, A., Niyonsenga, A. A., & Nzamurambaho, F. (2021). A review on strength development of high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 307, Article 124865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124865>
17. Fahmy, A. S., El-Madawy, M. E.-T., & Gobran, Y. A. (2016). Using artificial neural networks in the design of orthotropic bridge decks. *Alexandria Engineering Journal*, 55(4), 3195-3203. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.06.034>
18. Fakharifar, M., Dalvand, A., Arezoumandi, M., Sharbatdar, M. K., Chen, G., & Kheyroddin, A. (2014). Mechanical properties of high performance fiber reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 71, 510-520. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.068>
19. Garbacz, A., Courard, L., & Kostana, K. (2006). Characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems. *Materials Characterization*, 56(4-5), 281-289. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2005.10.014>
20. Guo, T., Weng, X., Liu, C., Yu, Q., Zhang, C., & Li, Y. (2020). Evaluation of the bonding and fatigue properties of an innovative rapid repair structure for concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 235, Article 117484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117484>
21. Haque, M., Ray, S., Mita, A. F., Bhattacharjee, S., & Shams, M. J. B. (2021). Prediction and optimization of the fresh and hardened properties of concrete containing rice husk ash and glass fiber using response surface

- methodology. Case Studies in Construction Materials, 14, Article e00505. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00505>
22. Hasan, N. Md. S., et al. (2022). Integration of rice husk ash as supplementary cementitious material in the production of sustainable high-strength concrete. Materials, 15(22), 8171. <https://doi.org/10.3390/ma15228171>
23. He, Y., Zhang, X., Hooton, R. D., & Zhang, X. (2017). Effects of interface roughness and interface adhesion on new-to-old concrete bonding. Construction and Building Materials, 151, 582-590. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.049>
24. Hu, C., & Li, Z. (2015). Property investigation of individual phases in cementitious composites containing silica fume and fly ash. Cement and Concrete Composites, 57, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.011>
25. Jamali, M., & Gupta, S. (2023). Utilization of silica fume with fly ash and properties of Portland cement-silica fume-fly ash-concrete. In [Conference proceedings] (p. 020025). <https://doi.org/10.1063/5.0119884>
26. Janowska-Renkas, E., Jakiel, P., Fabianowski, D., & Matyjaszczyk, D. (2021). Optimal selection of high-performance concrete for post-tensioned girder bridge using advanced hybrid MCDA method. Materials, 14(21), 6553. <https://doi.org/10.3390/ma14216553>
27. Júlio, E. N. B. S., Branco, F. A. B., & Silva, V. D. (2005). Concrete-to-concrete bond strength: Influence of an epoxy-based bonding agent on a roughened substrate surface. Magazine of Concrete Research, 57(8), 463-468. <https://doi.org/10.1680/mac.2005.57.8.463>
28. Katzer, J., & Domski, J. (2012). Quality and mechanical properties of engineered steel fibres used as reinforcement for concrete. Construction and Building Materials, 34, 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.058>
29. Kekez, S., & Krzywoń, R. (2022). Prediction of bonding strength of externally bonded SRP composites using artificial neural networks. Materials, 15(4), 1314. <https://doi.org/10.3390/ma15041314>
30. Khademi, F., Akbari, M., Jamal, S. M., & Nikoo, M. (2017). Multiple linear regression, artificial neural network, and fuzzy logic prediction of 28 days compressive strength of concrete. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 11(1), 90-99. <https://doi.org/10.1007/s11709-016-0363-9>
31. Kohoutková, A., & Broukalová, I. (2013). Optimization of fibre reinforced concrete structural members. Procedia Engineering, 65, 100-106. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.018>
32. Krose, B., & van der Smagt, P. (1996). An introduction to neural networks. University of Amsterdam.
33. Lantsoght, E. (2019). Database of shear experiments on steel fiber reinforced concrete beams without stirrups. Materials, 12(6), 917. <https://doi.org/10.3390/ma12060917>
34. Li, C., Mei, X., Dias, D., Cui, Z., & Zhou, J. (2023). Compressive strength prediction of rice husk ash concrete using a hybrid artificial neural network model. Materials, 16(8), 3135. <https://doi.org/10.3390/ma16083135>
35. Marcalíková, Z., & Čajka, R. (2022). Numerical modeling and diagnostic of FRC slab under centric and eccentric load. Civil and Environmental Engineering, 18(1), 17-28. <https://doi.org/10.2478/cee-2022-0002>
36. Matos, M. A. S., Pinho, S. T., & Tagarielli, V. L. (2019). Application of machine learning to predict the multiaxial strain-sensing response of CNT-polymer composites. Carbon, 146, 265-275. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.02.001>
37. Pezeshkian, M., Delnavaz, A., & Delnavaz, M. (2021). Development of UHPC mixtures using natural zeolite and glass sand as replacements of silica fume and quartz sand. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 25(11), 2023-2038. <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1610074>
38. Rahman, S. K., & Al-Ameri, R. (2021). Experimental investigation and artificial neural network based prediction of bond strength in self-compacting geopolymer concrete reinforced with basalt FRP bars. Applied Sciences, 11(11), 4889. <https://doi.org/10.3390/app11114889>
39. Rashid, K., et al. (2020). Experimental investigation of the bond strength between new to old concrete using different adhesive layers. Construction and Building Materials, 249, Article 118798. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118798>
40. Rodrigues, A. L. M. V., Mendes, Á. Á. F., Gomes, V., Battagin, A. F., Saade, M. R. M., & Da Silva, M. G. (2022). Environmental and mechanical evaluation of blended cements with high mineral admixture content. Frontiers in Materials, 9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.880986>
41. Sadowski, Ł., Stefaniuk, D., & Hoła, J. (2017). The effect of the porosity within the interfacial zone between layers on pull-off adhesion. Construction and Building Materials, 152, 887-897. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.080>
42. Salas Montoya, A., Chung, C.-W., & Kim, J.-H. (2023). High performance concretes with highly reactive rice husk ash and silica fume. Materials, 16(11), 3903. <https://doi.org/10.3390/ma16113903>
43. Sadrmomtazi, A., & Khoshkbijari, R. K. (2019). Determination and prediction of bonding strength of polymer modified concrete (PMC) as the repair overlay on the conventional concrete substrate. KSCE Journal of Civil Engineering, 23(3), 1141-1149. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0113-3>

44. Samantaray, S. (2019). Study of combined effect of metakaolin and steel fiber on mechanical properties of concrete. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 27(3), 1381-1396.
45. Shin, J., Scott, D. W., Stewart, L. K., & Jeon, J.-S. (2020). Multi-hazard assessment and mitigation for seismically-deficient RC building frames using artificial neural network models. *Engineering Structures*, 207, Article 110204. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110204>
46. Soylev, T. A., & François, R. (2003). Quality of steel-concrete interface and corrosion of reinforcing steel. *Cement and Concrete Research*, 33(9), 1407-1415. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00087-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00087-5)
47. Wang, D., & Jia, H. (2022). A quantitative study on the synergistic effect between limestone powder and supplementary cementitious materials. *Advances in Cement Research*, 34(7), 324-330. <https://doi.org/10.1680/jadcr.21.00027>
48. Wang, D., Ju, Y., Shen, H., & Xu, L. (2019). Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*, 197, 464-473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.181>
49. Wang, W., Shen, A., Lyu, Z., He, Z., & Nguyen, K. T. Q. (2021). Fresh and rheological characteristics of fiber reinforced concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 296, Article 123734. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123734>
50. Wu, Z., Shi, C., Khayat, K. H., & Xie, L. (2018). Effect of SCM and nano-particles on static and dynamic mechanical properties of UHPC. *Construction and Building Materials*, 182, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.126>
51. Xu, L., Yao, Y., Li, Y., Su, J., & Wu, Y. (2023). Review of the interfacial bonding properties between ultrahigh-performance concrete and normal concrete. *Applied Sciences*, 13(11), 6697. <https://doi.org/10.3390/app13116697>
52. Yazdankhah, A., Mosleh, A., Manjily, F. P., & Razzaghi, M. S. (2022). Seismic fragility analysis of RC continuous girder bridges using artificial neural network. *Winter & Spring 2022*.
53. Yosefi, A., & Jahangir, H. (2023). The influence of natural additives on mechanical properties of concrete specimens: A review. 5, 11-20. <https://doi.org/10.22034/CPJ.2023.398231.1200>
54. Zhang, X., Zhao, S., Liu, Z., & Wang, F. (2019). Utilization of steel slag in ultra-high performance concrete with enhanced eco-friendliness. *Construction and Building Materials*, 214, 28-36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.106>
55. Zhao, J., Liang, J., Chu, L., & Shen, F. (2018). Experimental study on shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams with high-strength reinforcement. *Materials*, 11(9), 1682. <https://doi.org/10.3390/ma11091682>