


Experimental investigation on mechanical and durability properties of twisted basalt fiber reinforced concrete

H. Nasaj Moghadam¹, F. Jandaghi Alaei^{2*} 

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Abstract

The corrosion of steel reinforcement is a major challenge for concrete structures in marine environments, reducing their durability and structural integrity. In such aggressive conditions, chloride ions penetrate the concrete cover and initiate the corrosion of embedded steel bars, leading to surface cracking and loss of bond strength over time. While steel fibers are commonly used in Fiber Reinforced Concrete (FRC), their susceptibility to corrosion and pitting has led researchers to explore non-metallic alternatives. Basalt fiber, a non-metallic material, offers numerous advantages, including high tensile strength, non-toxicity, and excellent resistance to acidic and corrosive environments. In recent years, the global trend toward sustainable and high-durability construction materials has further increased the attention given to basalt fibers, particularly in infrastructures located in coastal or offshore regions. This study investigates the mechanical and durability properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete (BFRC) with twisted basalt fibers at different volume fractions. Four mixtures containing 0%, 0.5%, 1%, and 1.8% fiber content were prepared and compared to Normal Concrete (NC). Mechanical properties, including compressive strength, splitting tensile strength, and modulus of rupture (MOR), were assessed. The results indicated that compressive strength marginally increased from 48.4 MPa for NC to 51.3 MPa for BFRC-1.8, representing a 6% improvement attributed to the crack-bridging action of the fibers. More notable were the enhancements in splitting tensile strength, which increased from 2.8 MPa in NC to 4.1 MPa in BFRC-1.8, reflecting a 46% gain. The incorporation of twisted basalt fibers also shifted the failure mode from brittle to ductile, enabling the concrete to absorb and dissipate more energy before failure. Flexural performance, measured via MOR, improved by 15%, 40%, and 81% for fiber additions of 0.5%, 1%, and 1.8%, respectively, with corresponding increases in toughness values reaching up to 364%. These results demonstrate the superior energy absorption and resilience of BFRC under loading. Durability properties, including water penetration depth, electrical resistivity, and performance under accelerated corrosion testing, were also evaluated. Durability assessments showed marked improvements with increased fiber content. Water penetration depth decreased substantially (by 18–53%), confirming the ability of fibers to reduce porosity and fill microcracks, thereby protecting internal steel from ion ingress. Electrical resistivity tests revealed that greater fiber content produced higher electrical resistance, further impeding the initiation and progression of corrosion. Results from accelerated corrosion testing demonstrated that twisted basalt fibers are highly effective in mitigating steel rebar corrosion. Corrosion rates were substantially reduced from 0.55 mm/year in NC to 0.25, 0.16, and 0.09 mm/year for BFRC-0.5, BFRC-1, and BFRC-1.8, respectively. Similarly, rebar weight loss decreased from 49.9% in NC to 22.7%, 14.1%, and 8.6% in the respective BFRC mixtures. The time to the first visible crack caused by corrosion was delayed, increasing from 55 days in NC to 74 days in BFRC-1.8. These findings indicate that twisted basalt fibers effectively impede the passage of aggressive ions, markedly improving the durability of reinforced concrete in severe environments. In summary, incorporating twisted basalt fibers into concrete blends offers measurable benefits in both mechanical and durability properties, with a pronounced effect in suppressing steel reinforcement corrosion, making BFRC a highly promising, sustainable material for marine infrastructure.

Review History

Received: Mar 15, 2025

Revised: Aug 11, 2025

Accepted: Nov 8, 2025


Keywords

Basalt Fiber Reinforced Concrete (BFRC)
Twisted Basalt Fiber
Crack, Corrosion
Durability
Mechanical properties

* Corresponding Author Email: fjalaei@shahroodut.ac.ir - ORCID: 0000-0001-5236-4445



بررسی آزمایشگاهی ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن مسلح شده با الیاف بازالتی تاییده

حسام الدین نساج مقدم^۱، فرشید جندقی علانی^{۲*} 

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها برای سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی، خوردگی آرماتورهای فولادی است. خوردگی موجب کاهش مقاومت و دوام سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی می‌شود. الیاف فولادی یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین الیاف در بتن الیافی است. معایبی همچون خوردگی الیاف فولادی و وقوع خوردگی تشدید شده در محل تماس الیاف فولادی با آرماتورها منجر به این موضوع شده که پژوهشگران به استفاده از الیاف غیر فلزی روی آورند. الیاف بازالتی نوعی از الیاف غیر فلزی می‌باشند که مزایای فراوانی از جمله غیرسمی بودن، مقاومت کششی بالا و مقاومت در برابر محیط‌های اسیدی را دارند. این پژوهش به بررسی خواص مکانیکی و دوام چهار ترکیب بتن الیافی بازالتی تاییده پرداخته است. در این پژوهش چهار طرح اختلاط با مقادیر مختلف ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۸ درصد از الیاف بازالتی تاییده ساخته شده است. در ادامه پارامترهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول گسیختگی، مقاومت الکتریکی، نفوذ آب و خوردگی تسریع شده مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش حجم الیاف بازالتی تاییده در ماتریس بتنی، هر دو پارامتر مدول گسیختگی و مقاومت کششی بهبود می‌یابند. از سوی دیگر، با افزایش مقدار الیاف تا ۱/۸ درصد، تنها ۶ درصد افزایش در مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی مشاهده می‌شود. نتایج آزمایش‌های دوام نشان می‌دهند که الیاف بازالتی تاییده به خوبی با ماتریس بتنی ترکیب شده و عملکرد پل‌زنی آن‌ها به طور مؤثری ترک‌ها را مهار می‌کند. به همین دلیل، تعداد حفره‌ها و ریزترک‌ها در بتن الیافی بازالتی نسبت به بتن معمولی کاهش یافته و در نتیجه، دوام بتن‌های الیافی بازالتی تاییده در محیط‌های خورنده به مراتب بیشتر از بتن‌های معمولی می‌باشد.

کلمات کلیدی

الیاف بازالتی تاییده

بتن الیافی بازالتی

ترک

خوردگی

دوام

ویژگی‌های مکانیکی

۱- مقدمه

می‌شود [2-4]. وجود حفرات و ریزترک‌های^۱ موجود در بتن باعث می‌شود که بتن قادر به انتقال تنش‌های کششی زیادی نباشد. بنابراین، با افزایش تنش، رشد ترک‌ها و شکست در بتن رخ می‌دهد [5]. از این رو، ضروری است تا ضعف مقاومت کششی در بتن جبران شود [6].

در سال‌های اخیر، یکی از مهم‌ترین مسائل برای پژوهشگران و مهندسان، افزایش مقاومت و دوام سازه‌های بتنی از طریق بهبود ترکیب ساختاری آن‌ها بوده است [1]. بتن به عنوان یک ماده ترد و شکننده با مقاومت فشاری بالا و مقاومت کششی پایین شناخته

¹ Micro cracks

الیاف در سه گروه فلزی، معدنی و آلی طبقه‌بندی می‌شوند. امروزه بتن‌های الیافی از دو نوع الیاف فلزی و غیرفلزی ساخته می‌شوند. برای ساخت بتن الیافی غیرفلزی، معمولاً از الیافی مانند پلی‌پروپیلن^۳، کربن، شیشه و مواد مشابه استفاده می‌شود [16, 17]. استفاده از الیاف فولادی در ساخت بتن‌های الیافی مزایای زیادی از جمله قیمت مناسب آن‌ها در مقایسه با سایر الیاف، در دسترس بودن، پلاستیسیته مناسب، مقاومت کششی بالا و مدول الاستیسیته مناسب را دارد [10]. یکی از معایب اساسی الیاف فولادی، مشکل خوردگی این الیاف در ماتریس بتنی می‌باشد. به این صورت که در طول عملیات پل‌زنی^۴ الیاف در بین وجوه ترک‌ها، الیاف فولادی در معرض نفوذ یون‌های خورنده قرار گرفته و دچار خوردگی می‌شوند. علاوه بر این، الیاف فولادی داخل بتن نیز دچار خوردگی شده و آثار زنگ‌زدگی این خوردگی روی سطوح اجزای بتنی قابل مشاهده می‌باشد. یکی دیگر از معایب استفاده از الیاف فولادی، خوردگی تشدید شده^۵ در محل تلاقی الیاف فولادی با آرماتورهای تقویتی می‌باشد. از این رو، خوردگی عمومی به وجود آمده روی سطح آرماتورها و همچنین خوردگی تشدید شده، منجر به کاهش سطح مقطع میلگردها، تمرکز تنش و کاهش ظرفیت باربری بتن مسلح می‌شود.

الیاف بازالتی، از ماده طبیعی ساخته شده که به گروه الیاف غیرآلی تعلق دارند. این الیاف مزایای زیادی از جمله مقاومت کششی بالا، مدول الاستیسیته بالا، مقاومت عالی در برابر دماهای بالا، عدم خوردگی، وزن سبک، هزینه مقرون به صرفه و سازگاری با محیط زیست را دارا می‌باشند [18]. امروزه، بسیاری از سازه‌های بتنی به دلیل قرار گرفتن در معرض شرایط محیطی خورنده، به دلیل وجود یون‌های کلرید از خوردگی آرماتورها و آسیب‌دیدگی رنج می‌برند [19]. در سال‌های اخیر، پژوهشگران به بررسی نوع جدیدی از الیاف ماکرو بازالت^۶ به نام الیاف بازالتی تاییده^۷ پرداخته‌اند. این نوع الیاف مانند میله‌های پلیمری کوچک درون بتن عمل می‌کنند. الیاف بازالتی تاییده نسبت به الیاف فولادی باعث خوردگی تشدید شده یا کاهش سطح مقطع میلگردها نمی‌شوند.

یکی از روش‌های رایج برای کاهش تنش‌های کششی در بتن، استفاده از آرماتورهای تقویتی است. اضافه کردن الیاف به بتن یکی دیگر از راهکارهای مناسب برای افزایش ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن می‌باشد [8, 7]. با افزودن الیاف به ماتریس بتنی، می‌توان شکل‌پذیری بتن و ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول گسیختگی^۱ و طاقت^۲ بتن را بهبود بخشید. انتخاب نوع الیاف در ماتریس بتنی مسأله مهم و ضروری است که باید توسط مهندسان و طراحان در نظر گرفته شود.

امروزه مطالعات متعددی توسط پژوهشگران به منظور بررسی تأثیر استفاده از الیاف بر رفتار ماتریس‌های بتنی انجام شده است [9, 10]. خواص مکانیکی الیاف، هندسه، توزیع، جهت‌گیری و مقدار الیاف مصرفی از جمله مهم‌ترین ویژگی‌هایی هستند که برای الیاف در نظر گرفته می‌شوند [11]. از سوی دیگر، ویژگی‌هایی مانند مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و کرنش نهایی الیاف بر رفتار بتن الیافی تأثیر می‌گذارند. الیاف با مدول الاستیسیته بالا، مقاومت بتن در برابر گسیختگی و ضربه را افزایش می‌دهند. از طرفی، الیاف با مدول الاستیسیته پایین، طاقت و مقاومت در برابر ترک‌های اولیه در بتن را بهبود می‌بخشند. از دیگر ویژگی‌های مهم الیاف، هندسه الیاف مانند طول، قطر، نسبت ابعادی (نسبت طول به قطر) و شکل مقطع آن‌ها می‌باشند. با توجه به تحقیقات انجام شده، الیاف با طول بیشتر، در کنترل ترک‌ها می‌توانند بهتر عمل کنند و همچنین با افزایش نسبت ابعادی (طول به قطر الیاف)، مدول گسیختگی افزایش می‌یابد [12]. توجه به این نکته ضروری است که افزایش نسبت ابعادی (طول به قطر الیاف) منجر به افزایش احتمال تجمع الیاف و مشکلات کارایی مخلوط بتنی می‌شود. لازم به توضیح است که برای کنترل و کاهش جمع‌شدگی پلاستیکی، گسترش ترک‌ها و عرض ترک‌ها، معمولاً از حجم‌های کم الیاف (<1٪) استفاده می‌شود. از سوی دیگر، برای افزایش طاقت و کنترل ترک‌ها در اعضای ساخته شده با بتن‌های الیافی درجاریز یا پیش‌ساخته، معمولاً حجم‌های متوسط الیاف (۲-۱ درصد) به‌کار گرفته می‌شوند [13, 14]. همچنین برای بهبود ظرفیت طاقت ماتریس بتنی، شکل‌پذیری و انرژی شکست، از مقادیر بالای الیاف (>۲٪) در سازه‌ها استفاده می‌شود [15].

³ Polypropylene

⁴ Bridging action

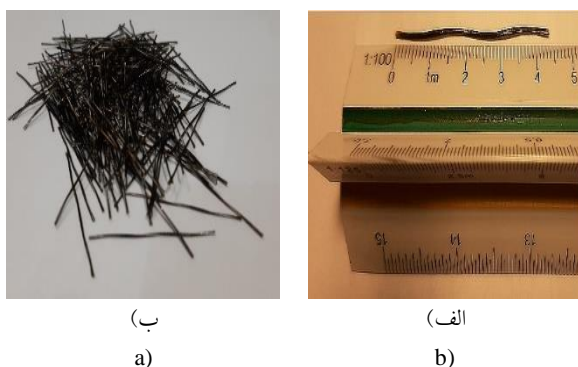
⁵ Pitting corrosion

⁶ Macro basalt

⁷ Twisted basalt fiber

¹ Modulus of rupture

² Toughness



شکل ۱. تصویر ظاهری و طول الیاف بازالتی تابیده: الف) طول الیاف بازالتی تابیده، شکل ظاهری الیاف

Fig. 1. Geometry and size of twisted basalt fibers: a) Twisted basalt fiber; b) Length of twisted basalt fiber

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

بتن مورد آزمایش در این پژوهش با استفاده از سیمان پرتلند نوع II سازه با وزن مخصوص ۳/۱۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، آب، شن، ماسه، ماسه ریزدانه کوارتز (S200)، پودر کوارتز (S400)، میکروسیلیس کارخانه فروآلیاژ کاویان، الیاف بازالتی تابیده و فوق روان کننده‌های (SMF)^۵ و (SNF)^۶ ساخته شده است. مصالح ریزدانه از ماسه طبیعی رودخانه‌ای با مدول نرمی ۳/۷ تشکیل شده است، در حالی که مصالح درشت‌دانه شامل سنگریزه طبیعی خرد شده با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد. مقادیر وزن مخصوص برای شن و ماسه به ترتیب ۲/۲۲ و ۲/۲۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شده است. جدول (۱) ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و شکل (۱) شکل ظاهری الیاف بازالتی تابیده را نشان می‌دهد.

۲-۲- طرح اختلاط

جدول (۲) طرح اختلاط بتن معمولی و بتن الیافی بازالتی تابیده را نشان می‌دهد. برای ارزیابی خواص مکانیکی و دوام BFRCها، سه نوع طرح اختلاط با مقادیر مختلف الیاف بازالتی تابیده ۰/۵، ۱ و ۱/۸ درصد در این مطالعه در نظر گرفته شده است. تمام مصالح مورد استفاده برای ساخت بتن با استفاده از میکسری با ظرفیت ۰/۱ مترمکعب مخلوط شده است. برای کلیه طرح اختلاط‌های BFRC و NC نسبت آب به مجموع سیمان و میکروسیلیس $(\frac{W}{C+M})$ و نسبت میکروسیلیس به سیمان $(\frac{M}{C})$ به

مقطع تابیده این الیاف باعث می‌شود که انرژی زیادی در هنگام فرآیند بیرون کشیدن آن‌ها از ماتریس بتنی مستهلک شود، که منجر به بهبود استحکام و افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی می‌شود. بنابراین، مطالعه و تحقیق در مورد ارزش عملی و عملکرد الیاف بازالتی تابیده در سازه‌های بتنی ضروری است.

امروزه بسیاری از محققان در زمینه ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن الیافی بازالتی تحقیق کرده‌اند [20, 21]. براساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده، پژوهشگران بیان داشتند که درصد مناسب الیاف بازالتی خرد شده برای عملکرد بهینه در بتن، در محدوده ۰/۳-۰/۵ درصد قرار دارد [22;23]. از طرف دیگر، پژوهشگران بیان کرده‌اند که استفاده از الیاف بازالتی تابیده تا ۴ درصد حجمی مفید است [24].

با توجه به تحقیقات انجام شده مشخص می‌شود که افزودن الیاف بازالتی به ماتریس بتنی، بهبود اندکی را بر نتایج مقاومت فشاری به همراه دارد [25, 26]. از طرف دیگر، مطالعات نشان می‌دهند که الیاف بازالتی باعث تغییر شکست فشاری از حالت شکننده^۱ به حالت شکل‌پذیر^۲ می‌شوند [23]. استفاده از الیاف بازالتی در ماتریس بتنی باعث افزایش مقاومت کششی بتن می‌شود [26]. همچنین نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که الیاف بازالتی می‌توانند به طور قابل توجهی مدول گسیختگی را افزایش و عملکرد بتن را پس از ترک‌خوردگی بهبود بخشند [23, 26]. یکی از مزایای استفاده از الیاف، انجام عملیات پل‌زنی روی وجوه ترک‌ها و جلوگیری و یا کنترل گسترش ترک‌ها در ماتریس بتنی می‌باشد. بسیاری از پژوهشگران خواص دوام بتن الیافی بازالتی از جمله جذب آب [27]، نفوذ یون کلرید [28]، مقاومت الکتریکی [27] و نفوذ آب [29] را مطالعه کرده‌اند.

هدف اصلی از این پژوهش آزمایشگاهی، بررسی و ارزیابی خواص مکانیکی و دوام بتن معمولی (NC)^۳ و بتن الیافی بازالتی (BFRC)^۴ است. نوآوری این تحقیق در بهره‌گیری از الیاف بازالتی تابیده در سه درصد حجمی مختلف (۰/۵، ۱ و ۱/۸ درصد) و تحلیل تطبیقی تأثیر این مقادیر بر عملکرد مکانیکی و دوام بتن تعریف می‌شود.

¹ Brittle

² Ductile

³ Normal concrete

⁴ Basalt fiber reinforced concrete

⁵ Sulfonate Melamine Formaldehyde

⁶ Sulfonate Naphthalene Formaldehyde

جدول ۱. مشخصات مکانیکی و فیزیکی الیاف بازالتی تابیده

Table 1. Physical and mechanical properties of twisted basalt fiber

Sample	Length (mm)	Aspect Ratio (L/d)	Density (gr/m ³)	Tensile strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Number of fiber per Kg
Twisted basalt fiber	43	61	2.1	1000	44	27400

جدول ۲. ترکیب بکار رفته برای ساخت بتن (کیلوگرم بر متر مکعب)

Table 2. Mix proportions of concrete (kg/m³)

Specimen	Cement	Water	Sand	Gravel	S200	S400	Microsilica	SMF	SNF	Fiber
NC	424	208	1066	458	130	43.5	43	7.5	-	-
BFRC-0.5	424	208	1066	458	130	43.5	43	9	1.2	10.5
BFRC-1.0	424	208	1066	458	130	43.5	43	10.55	2.4	21
BFRC-1.8	424	208	1066	458	130	43.5	43	13	4.3	38

است. این آزمایش با استفاده از دستگاه جک فشاری با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن و نرخ بارگذاری ۱ کیلونیوتن در ثانیه انجام شده است. متوسط مقاومت کششی سه استوانه به عنوان مقاومت کششی هر طرح اختلاط در نظر گرفته شده است. برای انجام این آزمایش، آزمون‌ها به‌طور افقی زیر جک قرار گرفته و به منظور توزیع یکنواخت تنش، دو تخته چوبی با عرض و طول تقریبی ۲۵ و ۳۴ میلی‌متر در بالا و پایین آزمون‌ها قرار داده شده است.

۲-۳-۳- مدول گسیختگی

آزمایش مدول گسیختگی در سن ۲۸ روزگی طبق استاندارد ASTM C1609/C1609M-07 [33] انجام شده است. برای هر دو نوع بتن معمولی و بتن الیافی بازالتی تابیده، یک تیر با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰ میلی‌متر تهیه و تحت آزمایش با نرخ کنترل جابه‌جایی ۰٫۱ میلی‌متر در دقیقه قرار گرفته شده است. این روش آزمایش (آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای) رفتار BFRCها و NC را تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای مقایسه کرده و از این طریق مقدار طاقت از طریق منحنی بار-انحراف به دست آورده شده است.

۲-۳-۴- عمق نفوذ آب

برای آزمایش نفوذ آب، سه آزمون به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر ساخته شده است. پس از ۲۸ روز، آزمون‌ها به مدت ۳ روز در کوره قرار گرفتند تا کاملاً خشک شوند. پس از خنک شدن آزمون‌ها به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد، تحت فشار آب به مدت ۷۲ ساعت با فشار ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع قرار گرفته شده است. در ادامه، برای اندازه‌گیری عمق نفوذ آب، استوانه‌ها از وسط با استفاده از جک فشاری به دو قسمت شکسته شده است. برای محاسبه نفوذ آب، میانگین سه مقدار حداکثر ثبت شده اندازه‌گیری شده است.

ترتیب ۰/۴۵ و ۰/۱ در نظر گرفته شده است. همچنین در کلیه طرح‌های اختلاط، مقدار استفاده شده از مصالح ریزدانه و درشت‌دانه در ترکیب یکسان می‌باشد. لازم به توضیح است که با افزایش مقدار الیاف، خواص مکانیکی بتن بهبود می‌یابد، اما در عین حال کارایی آن کاهش می‌یابد. مطابق نتایج سایر محققان مشخص می‌شود که با افزایش مقدار الیاف میزان کارایی بتن کاهش می‌یابد [30]. در این پژوهش، با هدف دستیابی به سلامتی یکنواخت در حدود 120 ± 5 میلی‌متر برای کلیه طرح‌های اختلاط، از دو نوع فوق‌روان‌کننده بر پایه نفتالین (SNF) و ملامین (SMF) استفاده شده است.

۲-۳-۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی

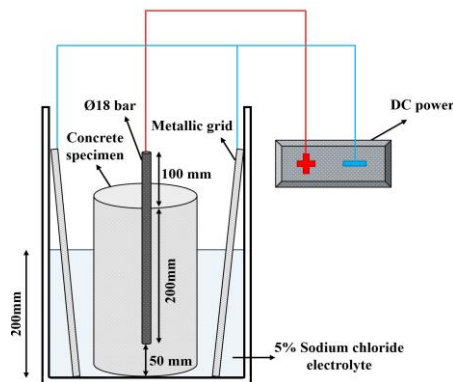
۲-۳-۲-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری طبق استاندارد BS 1881-116:1983 [31] با استفاده از آزمون‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری به دست آمده است. این آزمایش با استفاده از دستگاه جک هیدرولیک مقاومت فشاری با ظرفیت ۳۰۰۰ کیلونیوتن و نرخ بارگذاری ۰/۳N/(mm².s) برای آزمون‌های ساخته شده انجام شده است. برای انجام این آزمایش، سه آزمون برای هر طرح اختلاط ساخته شده و میانگین آزمون‌ها برای بیان مقاومت فشاری استفاده شده است.

۲-۳-۲-۲- مقاومت کششی

مقاومت کششی برزیلی روی آزمون‌های استوانه‌ای با استفاده از استاندارد ASTM C 496/C 496M-04 [32] صورت پذیرفته است. سه آزمون استوانه‌ای با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر برای هر طرح اختلاط تهیه و پس از ۲۸ روز تحت آزمایش قرار گرفته شده

اجرای آزمایش خوردگی تسریع شده بر نمونه‌های دارای الیاف بازالتی تابیده ضروری می‌باشد. هدف این آزمایش، بررسی سرعت شروع و پیشرفت خوردگی میلگرد، نرخ افت وزن، نرخ خوردگی و تأثیر حضور الیاف بازالتی تابیده بر محافظت آرماتور در محیطی مهاجم است. انجام این آزمایش بر اساس الگوبرداری از مطالعات گذشته انجام شده است [35]. در شکل (۲) نمایی شماتیک از انجام آزمایش خوردگی تسریع شده نشان داده شده است. سیستم خوردگی تسریع شده شامل یک سطل پلاستیکی به همراه شبکه فلزی در سطل و یک منبع تغذیه ۱۲ ولتی DC می‌باشد. قطب مثبت منبع تغذیه به بالای میلگرد هر نمونه و قطب منفی به شبکه فلزی واقع در سطل متصل شده است.

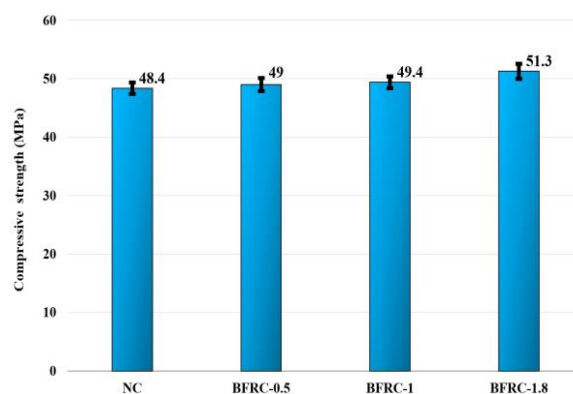


شکل ۲. نمایی شماتیک از آزمایش خوردگی تسریع شده

Fig. 2. Schematic representation of the accelerated corrosion test setup

۳- بحث در خصوص نتایج آزمایشات

نتایج آزمایش‌های انجام شده، شامل آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی، پاسخ نیرو-جابجایی، مقاومت الکتریکی، نفوذ آب و خوردگی تسریع شده برای هر دو نوع بتن معمولی و بتن الیافی بازالتی تابیده در این بخش ارائه و مورد بحث قرار گرفته شده است.



شکل ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای نمونه‌های NC و BFRC

Fig. 3. Compressive strength test results for NC and BFRCs

۳-۱- ویژگی‌های مکانیکی

۳-۱-۱- مقاومت فشاری

شکل (۳) نشان‌دهنده مقاومت فشاری NC و BFRC با درصدهای مختلف الیاف بازالتی تابیده است. با توجه به شکل (۳)، افزایش مقدار الیاف بازالتی تابیده در NC تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری نداشته است. با توجه به شکل (۳) مشخص می‌شود که مقاومت فشاری برای NC و BFRC-1.8 به ترتیب ۴۸/۴ و ۵۱/۳ مگاپاسکال است. با افزودن ۱/۵، ۱ و ۱/۸ درصد الیاف بازالتی تابیده به NC، مقاومت فشاری به ترتیب ۱/۲، ۲/۱ و ۶ درصد افزایش یافته است. همان‌طور که مشخص است الیاف بازالتی تابیده تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت فشاری نداشته است. از سوی دیگر، افزایش جزئی مقاومت فشاری مشاهده شده، به نقش الیاف در بهبود اثر پواسن^۱ در ماتریس بتنی و حفظ یکپارچگی بتن مرتبط می‌باشد. دلیل دیگر افزایش مقاومت فشاری در ماتریس بتنی، عمل پل زدن الیاف در بین وجوه ریزترک‌ها در

۳-۲- مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی بتن برای بررسی نفوذ یون‌های کلریدی به بتن انجام می‌شود. این آزمایش غیر مخرب، طبق استاندارد AASHTO T 358-15 [34] انجام شده است. در این آزمایش، مقاومت بتن اشباع شده در برابر نفوذ یون‌های کلرید اندازه‌گیری می‌شود. سه نمونه استوانه‌ای با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر برای تعیین مقاومت الکتریکی در ۲۸ روز برای هر دو نوع NC و BFRCها با استفاده از پروب چهارپینی و نر مورد آزمایش قرار گرفته شده است.

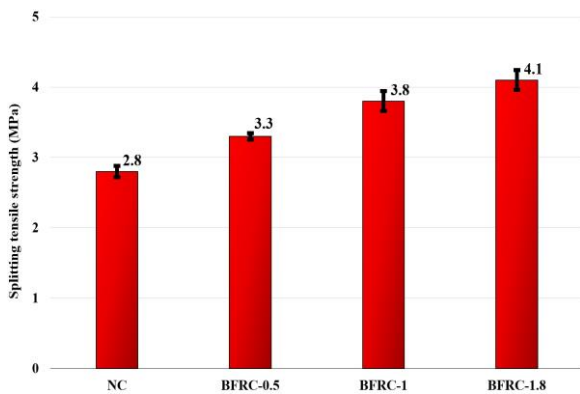
۳-۲-۶- خوردگی تسریع شده

خوردگی آرماتور در بتن یکی از اساسی‌ترین معضلات دوام سازه‌های بتن مسلح است که در مناطق مرطوب، دریایی، یا مواجهه با یون کلر اهمیت دوچندان می‌یابد.

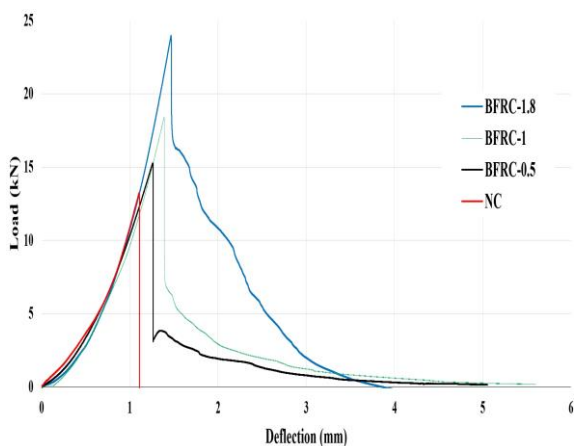
با توجه به ارتقای دوام بتن با استفاده از الیاف بازالتی تابیده و نیاز به ارزیابی اثر این الیاف بر مقاومت سازه در برابر خوردگی،

¹ Poisson's ratio

بازالتهی تابیده تأثیر متفاوتی بر طاقت NC داشتند و آزمون‌هـ BFRC 1.8 نسبت به سایر بتن‌ها استحکام و طاقت بالاتری را نشان داده است. با افزودن ۰/۵، ۱ و ۱/۸ درصد الیاف بازالتهی تابیده به ماتریس بتنی، مقادیر طاقت به ترتیب ۱۰۹، ۱۷۳ و ۳۶۴ درصد نسبت به آزمون‌هـ NC بهبود پیدا کرده است. با توجه به آزمایش انجام شده مشاهده می‌شود که الیاف بازالتهی تابیده عرض ترک‌ها را متوقف و از گسترش ترک‌ها در ماتریس بتن جلوگیری کرده است. در نتیجه، حالت شکست در BFRC‌ها نسبت به NC از شکننده به انعطاف‌پذیر تغییر پیدا کرده است. دلیل این تغییر حالت، اثر پل‌زنی الیاف در BFRC‌ها است، جایی که الیاف بازالتهی تابیده، رشد ترک‌ها را متوقف کرده و تنش‌ها را در دو طرف ترک‌ها تحمل می‌کنند. نتایج سایر پژوهشگران نیز نشان می‌دهند که با افزودن انواع مختلف الیاف به ماتریس بتنی، مدول گسیختگی افزایش می‌یابد [37, 38].



شکل ۴. نتایج آزمایش مقاومت کششی برای آزمون‌های NC و BFRC
Fig. 4. Splitting tensile strength test results for NC and BFRCs



شکل ۵. نتایج آزمایش مدول گسیختگی برای آزمون‌های NC و BFRC
Fig. 5. MOR test results for NC and BFRCs

مراحل گیرش اولیه بتن می‌باشد که این امر منجر به افزایش سختی بتن و در نهایت منجر به افزایش مقاومت فشاری پس از ۲۸ روز می‌شود.

۳-۱-۲- مقاومت کششی

مطابق تحقیقات انجام شده، با افزایش مقدار الیاف، انعطاف‌پذیری بتن بهبود یافته و مقاومت آن در برابر ترک‌های طولی افزایش می‌یابد [10]. همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، افزودن الیاف بازالتهی تابیده به NC منجر به بهبود استحکام کششی می‌شود. با افزودن ۰/۵، ۱ و ۱/۸ درصد الیاف بازالتهی تابیده به NC، مقاومت کششی به ترتیب ۱۸، ۳۶ و ۴۶ درصد نسبت به NC افزایش پیدا کرده است. بهبود مقاومت کششی مشاهده شده در BFRC‌ها نسبت به NC، در ارتباط با الیاف در تحمل تنش‌ها بین وجوه ترک‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر، الیاف در BFRC‌ها باعث تاخیر در وقوع ترک‌خوردگی و رشد ترک‌های ماکرو می‌شوند و در نتیجه، مقاومت کششی افزایش می‌یابد [36] طبق نتایج آزمایش انجام شده، عملیات پل‌زنی ترک‌ها توسط الیاف بازالتهی تابیده در BFRC‌ها منجر به تغییر رفتار شکننده NC از شکست ناگهانی و ترد به رفتار انعطاف‌پذیر شده است.

۳-۱-۳- مدول گسیختگی

شکل (۵) نتایج آزمایش مدول گسیختگی را نشان می‌دهد. جدول (۳) خلاصه‌ای از مقادیر مدول گسیختگی و طاقت در آزمایش حاضر را نشان می‌دهد که شامل حداکثر بار و انحراف مربوطه، همچنین شاخص‌های طاقت مانند $P-600$ ، $P-150$ ، $f-150$ ، $f-600$ و $T-150$ می‌شود. طبق شکل (۵)، آزمون‌های BFRC واکنش بار و انحراف بالاتری در مراحل ترک‌خوردگی و شکست نسبت به آزمون‌هـ NC را از خود نشان می‌دهند. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، مدول گسیختگی بتن معمولی برابر با ۵/۳ مگاپاسکال می‌باشد، در حالی که برای BFRC‌ها مقدار آن بین ۶/۱ تا ۹/۶ مگاپاسکال متغیر می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود آزمون‌های BFRC با مقدار بالاتر الیاف بازالتهی تابیده، دارای مدول گسیختگی بالاتری می‌باشند. مقدار مدول گسیختگی برای مقدار الیاف بازالتهی تابیده ۰/۵، ۱ و ۱/۸ درصد به ترتیب ۱۵، ۴۰ و ۸۱ درصد نسبت به NC افزایش پیدا کرده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، مقادیر مختلف الیاف

جدول ۳. نتایج آزمایش مدول گسیختگی برای آزمون‌های NC و BFRC

Table 3. Flexural properties of NC and BFRCs

Mix	Maximum load and corresponding deflection		Modulus of Rupture (MOR) (MPa)	Toughness	Toughness indices					
	Load (kN)	Deflection (mm)			P_{600} (kN)	P_{150} (kN)	f_{600} (kN)	f_{150} (kN)	T_{600} (kN)	T_{150} (kN)
BFRC-1.8	24	1.496	9.6	25.5	4.9	4.2	1.96	1.7	1.2	23.9
BFRC-1.0	18.4	1.391	7.4	15	4.9	1.8	1.95	0.7	1.1	13.2
BFRC-0.5	15.3	1.262	6.1	11.5	5.3	1.1	2.12	0.4	1.4	10.4
NC	13.2	1.107	5.3	5.5	5.3	-	2.14	-	1.6	5.5

زیادی است که در هنگام ساخت و عمل‌آوری و همچنین حرارت هیدراتاسیون در زمان گیرش اولیه سیمان به وجود می‌آید. از سوی دیگر، وجود تنش‌های فشاری و کششی اعمال شده به بتن نیز باعث ایجاد ترک‌های بزرگ‌تری می‌شود. وجود این فضاهای خالی و ترک‌های ناشی از آن‌ها باعث افزایش نفوذپذیری می‌شود که به نوبه خود منجر به کاهش دوام بتن می‌شود [42]. نفوذ آب به بتن، یون‌های خورنده را به داخل بتن هدایت کرده و پس از رسیدن به سطح میلگردها موجب ترک‌خوردگی بتن و خوردگی آن می‌شود. بنابراین، دوام بتن ارتباط نزدیکی با نفوذ آب دارد و این امر از اهمیت بالایی برخوردار است. در نتیجه، با کاهش تعداد ترک‌ها و افزایش یکپارچگی بتن، مقدار نفوذ آب کاهش یافته و دوام بتن افزایش می‌یابد. یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش مقاومت بتن در برابر ترک خوردگی استفاده از الیاف است [43].

شکل (۶) نتایج آزمایش نفوذ آب را برای هر دو نوع NC و BFRCها بر اساس استاندارد BS EN 12390-8:2009 [44] نشان می‌دهد. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که با افزودن الیاف بازالتی تابیده به NC، نفوذ آب در بتن بهبود یافته است. همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، بیشترین مقدار نفوذ آب مربوط به آزمون‌های NC می‌باشد. از سوی دیگر، با افزایش مقدار الیاف بازالتی تابیده به ماتریس بتنی، مقدار نفوذ آب کاهش می‌یابد. عمق نفوذ آب در BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 به ترتیب ۱۸، ۲۹ و ۵۳ درصد نسبت به NC کاهش یافته است. کاهش نفوذ آب در بتن به عملکرد الیاف بازالتی تابیده مربوط می‌شود. نتایج آزمایش نشان دهنده توزیع مناسب الیاف در مخلوط و یکپارچگی ماتریس بتن می‌باشد. از سوی دیگر، با افزایش مقدار الیاف در ماتریس بتنی، منافذ و ریزترک‌های BFRCها نسبت به NC کاهش می‌یابد. در نتیجه، دوام BFRCها در محیط‌های خورنده بیشتر از آزمون‌های بدون الیاف است.

دلیل دیگر افزایش مدول گسیختگی در BFRCها، حفظ یکپارچگی بتن پس از ترک‌های اولیه در ماتریس از طریق الیاف بازالتی تابیده و جذب تنش‌ها در محل وقوع ترک‌ها می‌باشد. در نتیجه، ناحیه انتقال بین سیمان و مصالح (ITZ)^۱ بهبود می‌یابد [39]. همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، منحنی بار-انحراف NC در هنگام شکست یک افت ناگهانی را نشان می‌دهد. از طرفی، آزمون‌های BFRC پس از شکست، مقاومت بیشتری از خود نشان داده است که این نتیجه به وسیله عملکرد الیاف در ماتریس بتنی توجیه پذیر می‌باشد. همچنین می‌توان گفت که BFRC-1.8 نسبت به سایر BFRCها و NC دارای سختی بالاتری است. علاوه بر این، BFRC-1.8 پس از بار اوج، کاهش کمتری نسبت به سایر BFRCها از خود نشان می‌دهد که نشان‌دهنده میزان انرژی بیشتری است که در هنگام جداشدگی و کشش الیاف بازالتی تابیده از ماتریس بتن آزاد می‌شود که این واکنش در ارتباط مستقیم با مقاومت کششی و استهلاک انرژی الیاف بازالتی تابیده در ماتریس بتنی می‌باشد. در نتیجه، انرژی صرف شده برای کشش و بیرون کشیدگی الیاف بازالتی تابیده از ماتریس بتنی باعث تأخیر در شکست آزمون‌های BFRC نسبت به NC می‌شود.

۲-۳- ویژگی‌های دوام

۲-۳-۱- عمق نفوذ آب

مقاومت بتن در برابر شرایط محیطی مختلف به طور مستقیم به نفوذپذیری آن مرتبط است. از این رو، دوام بتن می‌تواند از طریق آزمایش نفوذ آب ارزیابی و تحلیل شود [40، 41]. نفوذپذیری بتن به میزان ارتباط ترک‌های داخلی و ساختار منافذ آن بستگی دارد. نفوذپذیری بالا باعث نفوذ یون‌های خورنده و رطوبت به داخل بتن می‌شود. بتن به طور ذاتی دارای منافذ، حفرات و ریزترک‌های

^۱ Interfacial Transition Zone

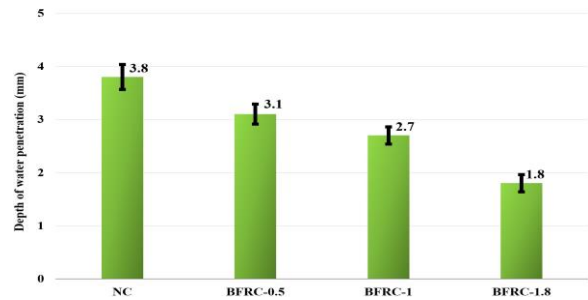
دلیل دیگر افزایش مقاومت الکتریکی بتن، کاهش فضاهای خالی و ترک‌های میکروسکوپی در ماتریس بتنی است که از طریق استفاده از الیاف بازالتی تابیده حاصل می‌شود. به عبارت دیگر، اختلاط خوب و عملیات پل زنی الیاف روی وجوه ترک‌ها موجب تقویت چسبندگی و یکپارچگی درون ماتریس بتنی می‌شود که در نتیجه باعث افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. در نتیجه، با افزایش مقاومت الکتریکی در BFRCها، نفوذ یون‌های کلریدی به داخل ماتریس بتن کاهش یافته و دوام بتن بهبود می‌یابد.

۳-۲-۳- خوردگی تسریع شده

شکل (۸) نتایج به دست آمده از پایش جریان عبوری آزمون‌های استوانه‌ای دارای میلگرد فولادی در سن ۲۸ روز و تحت اختلاف پتانسیل ثابت ۱۲ ولت در محلول ۵ درصد NaCl را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مبنای خاتمه این آزمایش، پایدار شدن تغییرات جریان در آزمون NC و تخریب آن در نظر گرفته شده و در همان زمان آزمایش برای سایر آزمون‌ها نیز پایان یافته است.

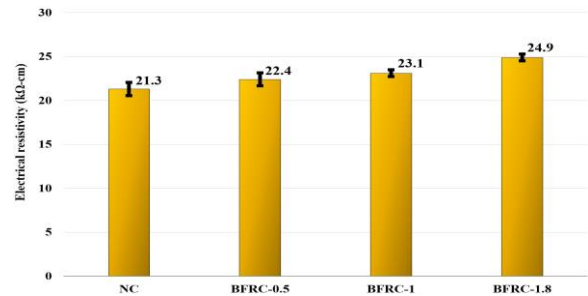
با توجه به شکل (۸) مشخص می‌شود که مقدار جریان عبوری در طول زمان برای آزمون NC نسبت به آزمون‌های حاوی الیاف بازالتی تابیده BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 بیشتر بوده است. کاهش جریان در آزمون‌های دارای الیاف را می‌توان به نقش برجسته الیاف بازالتی تابیده در اصلاح ریزساختار بتن نسبت داد؛ به گونه‌ای که حضور این الیاف با پر کردن و انسداد بخشی از حفرات و ترک‌های ماتریس بتنی، و همچنین قطع اتصال زنجیره‌ای بین حفرات، زمینه کاهش رسانایی و به تبع آن کاهش سرعت انتقال یون‌های مهاجم به سمت میلگردها را فراهم نموده است. از سوی دیگر، الیاف تابیده باعث بهبود تراکم، کاهش تخلخل و افزایش یکنواختی توزیع اجزای داخلی بتن می‌گردد که این موضوع مستقیماً بر تاخیر در شروع خوردگی و کاهش نرخ آن اثرگذار است [45].

سازوکار انتقال جریان به سطح میلگرد عمدتاً از طریق شبکه حفرات و منافذ بتن صورت می‌گیرد؛ در نتیجه، با به کارگیری الیاف بازالتی تابیده که انسداد مؤثر این مسیرها را ایجاد می‌نماید، مسیر حرکت یون‌های کلر محدود و جریان عبوری کاهش می‌یابد. وقوع تغییرات ناگهانی و افزایشی در نمودار جریان معمولاً زمانی ثبت می‌شود که ترک‌های ریز در سطح بتن ظاهر شده و این ترک‌ها



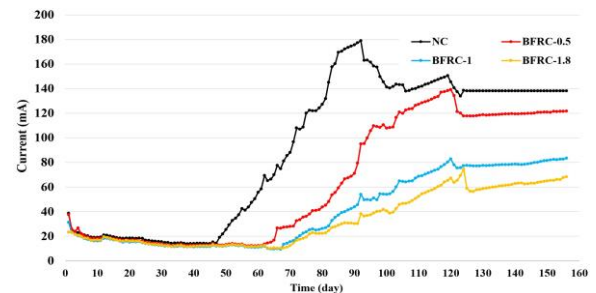
شکل ۶. نتایج آزمایش نفوذ آب برای آزمون‌های NC و BFRC

Fig. 6. Depth of water penetration test results for NC and BFRCs



شکل ۷. نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی برای آزمون‌های NC و BFRC

Fig. 7. Electrical resistivity test results for NC and BFRCs

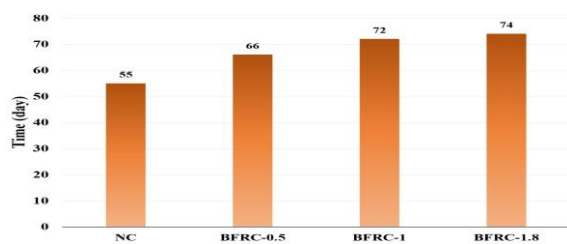


شکل ۸. نتایج آزمایش خوردگی تسریع شده تحت اختلاف پتانسیل ثابت ۱۲ ولت

Fig. 8. Results of the accelerated corrosion test under a constant potential difference of 12 V

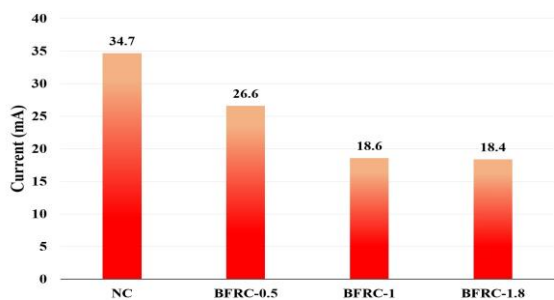
۳-۲-۳- مقاومت الکتریکی

شکل (۷) نتایج مقاومت الکتریکی BFRCها و NC را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، افزایش مقدار الیاف در ماتریس بتنی منجر به افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. با افزودن ۰/۵، ۱ و ۱/۸ درصد الیاف بازالتی تابیده به NC، مقاومت الکتریکی به ترتیب ۵، ۹ و ۱۷ درصد نسبت به آزمون NC بهبود یافته است. بیشترین افزایش مقاومت الکتریکی برای آزمون BFRC-1.8 مشاهده می‌شود که می‌توان آن را به تاثیر مستقیم الیاف بازالتی تابیده روی ماتریس بتنی نسبت داد. با افزودن الیاف بازالتی تابیده به NC، چسبندگی و یکپارچگی ماتریس بتنی افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به بهبود مقاومت الکتریکی می‌شود.



شکل ۹. سن مشاهده ترک در آزمون‌های NC, BFRC-0.5, BFRC-1, BFRC-1.8

Fig. 9. Crack initiation time in NC, BFRC-0.5, BFRC-1, and BFRC-1.8 specimens



شکل ۱۰. جریان اولیه در آزمون‌های NC, BFRC-0.5, BFRC-1, BFRC-1.8

Fig. 10. Initial current in NC, BFRC-0.5, BFRC-1, and BFRC-1.8 specimens

ایجاد تأخیر در بروز ترک و نیز کاهش معنی‌دار جریان عبوری در سن معادل، به‌طور مستقیم از کیفیت اختلاط، سازگاری ریزساختاری و عملکرد پل‌زنی و انتقال تنش الیاف بازالتی تابیده در درون ماتریس بتنی ناشی می‌شود. این ویژگی باعث افزایش چسبندگی، یکپارچگی و مقاومت در برابر نفوذ عوامل مهاجم، به‌ویژه یون‌های کلر، می‌شود و در نهایت ارتقاء مقاومت بتن در برابر خوردگی را به‌دنبال دارد [45, 46].

یکی از پارامترهای مهم در آزمایش خوردگی تسریع شده بررسی نرخ خوردگی می‌باشد که با استفاده از آیین‌نامه ASTM G1-90 [47] و معادله ۱ محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته شده است.

$$\text{Corrosion Rate} = \frac{(K * W)}{(A * T * D)} \quad (1)$$

در معادله فوق K ضریب ثابت تبدیل واحدها برابر با ۸۷۶۰۰، W جرم از دست رفته آزمون برحسب گرم، A سطح آزمون (سطح در معرض محیط) برحسب سانتی‌متر مربع، T مدت زمان آزمون بر حسب ساعت و D چگالی میلگرد مطابق با آیین‌نامه ۷/۸۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده است. با توجه به معادله مذکور مقدار نرخ خوردگی برای آزمون‌های NC، BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 به‌ترتیب ۹/۳، ۴/۲، ۲/۶ و ۱/۶ میلی‌متر در سال محاسبه شده است.

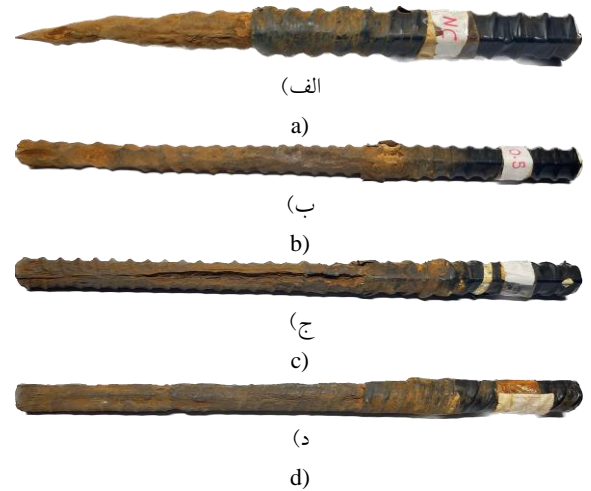
ارتباط بیشتری بین محلول خورنده و میلگرد برقرار می‌نمایند. با ادامه روند خوردگی و افزایش محصولات ناشی از فرآیند خوردگی، این ترک‌ها افزایش یافته و در نهایت به صورت ترک‌های ماکروسکوپی قابل مشاهده می‌شوند. بررسی‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد که خوردگی ناشی از مهاجرت یون‌های مخرب و تأثیر آن بر میلگرد در آزمون بتنی NC منجر به وقوع ترک خوردگی شدید و در نهایت شکست سازه‌ای نمونه شده است. این موضوع بیانگر حساسیت بتن فاقد الیاف به پیشرفت فرآیند خوردگی و بروز ترک‌های سازه‌ای می‌باشد.

از سوی دیگر، مقاومت قابل توجه آزمون‌های حاوی الیاف بازالتی تابیده در این مرحله کاملاً مشهود است، به طوری که حضور این الیاف با کنترل و محدودسازی ریزترک‌ها و بهبود یکپارچگی ماتریس بتن، مانع از توسعه ترک‌های اصلی و بروز شکست ناگهانی شده است. ثبت این رفتار در پایان دوره آزمایش نشان می‌دهد که به کارگیری الیاف بازالتی تابیده نقش مؤثری در ارتقاء مقاومت بتن در برابر پیشرفت ترک خوردگی ناشی از فرآیندهای خوردگی ایفا نموده است.

شکل (۹ و ۱۰) نشان‌دهنده سن بروز نخستین ترک در آزمون‌ها و جریان ثبت‌شده در آن روز می‌باشند. همان‌گونه که از تحلیل داده‌ها برمی‌آید، سن بروز نخستین ترک در آزمون‌ها متناسب با نوع و میزان مصرف الیاف به‌طور قابل توجهی به تعویق افتاده است. به‌عبارت دیگر، زمان مشاهده ترک اولیه در آزمون‌های NC، BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 به‌ترتیب در روزهای ۵۵، ۶۶، ۷۲ و ۷۴ رخ داده است. این نتایج به صورت روشن اثبات می‌نماید که اضافه کردن الیاف بازالتی تابیده تأثیری مثبت و پایدار بر به‌تعویق انداختن فرآیند ترک‌زایی سطحی بتن دارد. تجزیه و تحلیل تغییرات جریان عبوری نیز مؤید آن است که میزان جریان در آزمون‌های حاوی الیاف نسبت به آزمون شاهد (NC) در لحظه بروز ترک اولیه، کاهش معناداری یافته است؛ به گونه‌ای که این کاهش به ترتیب برای آزمون‌های BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 معادل ۲۳/۳، ۴۶/۴ و ۴۷ درصد نسبت به آزمون NC بوده که اثبات‌کننده نقش مهارکننده و عملکرد موثر الیاف بازالتی تابیده در کنترل نفوذپذیری و پیشگیری از رشد ترک‌ها در محیط خورنده می‌باشد.

فشاری، مقاومت کششی و مدول گسیختگی به عنوان ویژگی‌های مکانیکی و نفوذ آب، مقاومت الکتریکی و خوردگی تسریع شده به عنوان ویژگی‌های دوام در نظر گرفته شده است. نتایج اصلی این پژوهش به شرح زیر است:

- افزودن الیاف بازالتی تابیده به ماتریس بتنی منجر به بهبود ویژگی‌های مکانیکی و دوام شده است.
- الیاف بازالتی تابیده دارای مقاومت کششی بالایی هستند و استفاده از آن‌ها تاثیر زیادی در بهبود مقاومت فشاری ندارد؛ با این حال، این الیاف می‌توانند از رشد ترک‌های اولیه جلوگیری کنند که باعث بهبود مقاومت فشاری می‌شود. مقدار مقاومت فشاری برای NC برابر $48/4$ مگاپاسکال و برای بیش‌ترین مقدار الیاف استفاده شده به میزان $1/8$ درصد (BFRC-1.8) برابر $51/3$ مگاپاسکال بدست آمده است. به عبارت دیگر، بیشترین استفاده از الیاف در ماتریس بتنی تنها ۶ درصد افزایش در مقاومت فشاری ایجاد کرده است.
- افزودن الیاف بازالتی تابیده به ماتریس بتنی منجر به افزایش قابل توجهی در مقاومت کششی شده است. مقادیر ثبت شده مقاومت کششی برای NC، BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 به ترتیب $2/8$ ، $3/3$ ، $3/8$ و $4/1$ مگاپاسکال بوده است. بیشترین افزایش در مقاومت کششی برای BFRC-1.8 حدود ۴۶ درصد نسبت به NC بوده است. طبق نتایج آزمایش مقاومت کششی، مشخص می‌شود که با افزودن الیاف بازالتی تابیده به ماتریس بتنی، حالت شکست از رفتار ترد و شکننده به رفتار شکل‌پذیر تغییر پیدا کرده است.
- با افزایش میزان الیاف بازالتی تابیده در ماتریس بتنی، مدول گسیختگی افزایش یافته است. نتایج آزمایش‌های مدول گسیختگی نشان می‌دهد که الیاف بازالتی تابیده با ایجاد عملیات پل زنی روی وجوه ترک‌ها، از رشد ترک‌ها جلوگیری کرده و از گسترش ترک‌ها در بتن جلوگیری می‌نماید. با افزودن $0/5$ ، 1 و $1/8$ درصد الیاف بازالتی تابیده، مدول گسیختگی به ترتیب ۱۵، ۴۰ و ۸۱ درصد نسبت به NC افزایش یافته است. بهبود در انعطاف‌پذیری باعث شد تا BFRC‌ها انرژی و نیروهای بیشتری را تحمل کرده و در نتیجه تحمل نیروهای بیشتری نسبت به NC قبل از وقوع شکست را از خود نشان دهند.



شکل ۱۱. وضعیت ظاهری نمونه‌ها در انتهای آزمایش خوردگی تسریع شده.

الف: NC، ب: BFRC-0.5، ج: BFRC-1 و د: BFRC-1.8

Fig. 11. Surface condition of the specimens at the end of the accelerated corrosion test: a) NC, b) BFRC-0.5, c) BFRC-1, and d) BFRC-1.

در انتها و پس از اتمام دوره آزمایش، میلگردهای جاسازی شده در بتن استخراج و با استفاده از برس سیمی، تمامی خرده‌های بتنی و محصولات زنگ‌زدگی به دقت پاک‌سازی شده‌اند، سپس با ترازوی دیجیتال عملیات وزن‌کشی انجام گرفته است. ارزیابی اختلاف وزن ابتدایی و نهایی میلگردها در این آزمایش نشان می‌دهد که افت وزنی و به تبع آن کاهش مقطع میلگرد در نمونه‌های NC، BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 به ترتیب معادل $49/9$ ، $22/7$ ، $14/2$ و $8/6$ درصد بوده است (شکل ۱۱). این نتایج ضمن تأیید نقش اثربخش الیاف بازالتی تابیده بر کاهش نفوذپذیری و کنترل آسیب خوردگی میلگردها، حاکی از ارتقاء عملکرد سازه‌ای نمونه‌های بتنی تقویت‌شده با این نوع الیاف در محیط‌های خورنده می‌باشد. در مجموع، نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که استفاده از الیاف بازالتی تابیده علاوه بر تأخیر انداختن شروع خوردگی و کاهش سرعت پیشرفت آن، با بهبود ساختار داخلی بتن، زمینه‌ساز افزایش دوام و طول عمر سازه‌های بتن مسلح در محیط‌های خورنده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آزمایش‌های مختلفی برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی و دوام NC و BFRC‌ها انجام شده است. این مطالعه با استفاده از مقادیر مختلف الیاف بازالتی تابیده به میزان $0/5$ ، 1 و $1/8$ درصد انجام شده و نتایج با NC مقایسه شده است. مقاومت

کردن منافذ، ایجاد انسداد در مسیرهای نفوذپذیر و افزایش یکنواختی ماتریس، مانع انتقال مؤثر یون‌های مهاجم به سطح میلگرد می‌شود و بدین ترتیب نرخ خوردگی کاهش یافته است.

- مطابق با آزمایش خوردگی تسریع شده مشخص می‌گردد که پس از پایان آزمایش، کاهش وزن میلگرد در نمونه‌های دارای الیاف بازالتی تابیده نسبت به بتن شاهد کمتر بوده است؛ به طوری که درصد کاهش وزن میلگرد در نمونه‌های NC، BFRC-0.5، BFRC-1، و BFRC-1.8 به ترتیب برابر با ۲۹/۹، ۲۲/۷، ۱۴/۱ و ۸/۶ درصد به دست آمده است. این روند کاهش را می‌توان نتیجه تاثیر الیاف بازالتی در بهبود تراکم و یکنواختی ساختار داخلی بتن دانست؛ به گونه‌ای که این الیاف با پر کردن حفرات و محدود کردن مسیرهای نفوذ یون‌های مخرب، سبب کاهش دسترسی یون‌های خورنده به سطح میلگرد و افزایش حفاظت فولاد در برابر خوردگی می‌شوند. از سوی دیگر مشاهده سطح میلگردها پس از پایان آزمون نیز نشان می‌دهد که حضور الیاف به حفظ یکپارچگی و کاهش آثار خوردگی کمک کرده است.
- مطابق با نتایج آزمایش خوردگی تسریع شده، افزایش تاخیر در بروز ترک‌های سطحی ناشی از خوردگی در نمونه‌های حاوی الیاف بازالتی تابیده قابل توجه بوده است. زمان بروز نخستین ترک برای نمونه‌های NC، BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 به ترتیب در روزهای ۵۵، ۶۶، ۷۲ و ۷۴ به دست آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان الیاف، مدت زمان مورد نیاز برای ایجاد ترک روی سطح بتن بیشتر شده است. علت این رفتار را می‌توان به نقش الیاف در کاهش تخلخل و ایجاد محدودیت در مسیرهای نفوذ عوامل خورنده نسبت داد؛ به طوری که حضور الیاف بازالتی در ماتریس بتن، با محدود کردن انتقال یون‌های مخرب، آغاز ترک خوردگی ناشی از خوردگی میلگرد را به تأخیر انداخته است.
- با استفاده از الیاف بازالتی تابیده در ماتریس بتنی، ویژگی‌های مکانیکی و دوام کلی سازه بهبود می‌یابد. این الیاف می‌توانند مقاومت بتن را در برابر عوامل محیطی مختلف، از جمله خوردگی، که می‌تواند منجر به ترک خوردگی و آسیب‌های دیگر در طول زمان شود را افزایش دهند. استفاده از الیاف

- طبق نتایج آزمایش مدول گسیختگی، الیاف بازالتی تابیده در BFRCها به عنوان یک سازوکار پل زنی عمل کرده که تنش‌های هر دو طرف ترک‌ها را تحمل کرده و انرژی بیشتری برای جدا شدن و کشیدن الیاف از ماتریس بتنی آزاد می‌کند. در نتیجه، مقادیر سختی و طاقت برای BFRC-1.8، BFRC-1 و BFRC-0.5 به ترتیب ۱۰۹، ۱۷۳ و ۳۶۴ درصد نسبت به NC افزایش یافته است.
- طبق نتایج آزمایش نفوذ آب، مشخص می‌شود که با افزودن الیاف بازالتی تابیده به ماتریس بتنی، نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن ۰/۵ تا ۱/۸ درصد الیاف بازالتی تابیده، عمق نفوذ آب به ترتیب ۱۸ تا ۵۳ درصد نسبت به NC بهبود یافته است. این کاهش در نفوذ به دلیل مهار ترک‌های میکروسکوپی و چسبندگی قوی بین الیاف و ماتریس بتنی می‌باشد. علاوه بر این، الیاف باعث کاهش تخلخل و افزایش یکپارچگی بتن شده است. در نتیجه، کاهش نفوذ آب در بتن موجب افزایش عمر مفید و دوام سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی می‌شود.
- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی نشان می‌دهد که افزودن الیاف بازالتی تابیده به ماتریس بتنی منجر به افزایش این پارامتر می‌شود. به عبارت دیگر، الیاف به طور مؤثر با ماتریس بتنی مخلوط شده که این امر به افزایش چسبندگی و کاهش فضای خالی در ماتریس بتنی می‌شود. همچنین، الیاف روی وجوه ترک به عملیات پل زنی پرداخته و از رشد و گسترش آن‌ها در ماتریس بتنی جلوگیری بعمل می‌آورند. در نتیجه، با افزایش مقاومت الکتریکی در BFRCها، پتانسیل ورود یون‌های خورنده به داخل بتن کاهش یافته و عمر مفید سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی و خورنده افزایش می‌یابد.
- با توجه به آزمایش خوردگی تسریع شده مشخص شد که افزودن الیاف بازالتی تابیده به ماتریس بتنی باعث کاهش نرخ خوردگی میلگردها در محیط خورنده شده است. مقادیر به دست آمده برای نمونه‌های بدون الیاف تا بیشترین درصد الیاف NC، BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 به ترتیب برابر با ۹/۳، ۴/۲، ۲/۶ و ۱/۶ میلی‌متر در سال بدست آمده است. این روند کاهش را می‌توان به نقش الیاف در اصلاح ریزساختار بتن نسبت داد؛ به گونه‌ای که حضور الیاف با پر

سهم نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان در مقاله یکسان است.

منابع مالی

برای نوشتن این مقاله از هیچ منبع مالی استفاده نشده است.

بازالتی تابیده می‌تواند از تشکیل ترک‌های با عرض زیاد در محیط‌های دریایی جلوگیری کرده و دوام بتن را بهبود بخشد.

قدردانی نویسندگان

از حمایت مادی و معنوی قدردانی می‌کنند.

تعارض منافع

برای نویسندگان تعارض منافی وجود ندارد.

References

- [1] Smirnova, O.M., Menéndez Pidal de Navascués, I., Mikhailevskii, V.R., Kolosov, O.I., and Skolota, N.S., 2021. Sound-absorbing composites with rubber crumb from used tires. *Applied Sciences*, 11(16), p.7347.
- [2] Ahmad, J., Aslam, F., Martinez-Garcia, R., Hechmi El Ouni, M., and Mohamed Khedher, K., 2021. Performance of sustainable self-compacting fiber reinforced concrete with substitution of marble waste (MW) and coconut fibers (CFs). *Scientific Reports*, 11(1), p.23184.
- [3] Said, A., Elsayed, Ma., Abd El-Azim A., Althoey, F., and Tayeh B.A., 2022. Using ultra-high performance fiber reinforced concrete in improvement shear strength of reinforced concrete beams. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01009.
- [4] Ahmad, J., Majdi A., Al-Fakih, A., Farouk Deifalla, A., Althoey, F., Hechmi El Ouni, M., and A. El-Shorbagy, M., 2022. Mechanical and durability performance of coconut fiber reinforced concrete: a state-of-the-art review. *Materials*, 15(10), p.3601.
- [5] Kayali, O., 2016. Sustainability of fibre composite concrete construction. *In Sustainability of construction materials*, pp.539-566.
- [6] Ahmad, J., Majdi, A., Farouk Deifalla, A., F. Isleem, H., and Rahmawati, C., 2022. Concrete made with partially substitutions of copper slag (CPS): State of the art review. *Materials*, 15(15), p.5196.
- [7] Mahmoud, A.A., and Elkatatny, S., 2020. Improving class G cement carbonation resistance for applications of geologic carbon sequestration using synthetic polypropylene fiber. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 76, pp.103184.
- [8] Faridul Hasan, K.M., György Horváth, P., and Alpár, T., 2022. Lignocellulosic fiber cement compatibility: a state of the art review. *Journal of Natural Fibers*, 19(14), pp.5409-5434.
- [9] Guerini, V., Conforti, A., Plizzari, G., and Kawashima, S., 2018. Influence of steel and macro-synthetic fibers on concrete properties. *Fibers*, 6(3), p.47.
- [10] Eisa, A.S., Elshazli, M.T., and Nawar, M.T., 2020. Experimental investigation on the effect of using crumb rubber and steel fibers on the structural behavior of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 252, p.119078.
- [11] Halvaei, M. Jamshidi, M., and Latifi, M., 2016. Effect of fiber geometry and tenacity on the mechanical properties of fine aggregates concrete. *Journal of Industrial Textiles*, 45(5), pp.1083-1099.
- [12] Yazıcı, Ş., İnan, G., and Tabak, V., 2007. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21(6), pp.1250-1253.
- [13] Barluenga, G., and Hernández-Olivares, F., 2007. Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC. *Cement and Concrete Research*, 37(12), pp.1624-1638.
- [14] Hao, Y., and Hao, H., 2013. Dynamic compressive behaviour of spiral steel fibre reinforced concrete in split Hopkinson pressure bar tests. *Construction and Building Materials*, 48, pp.521-532.
- [15] Aydin, A.C., 2007. Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 21(6), pp.1149-1154.
- [16] Ibrahim, K. I. M., 2017. The combined influence of polypropylene fibers [PPF] and silica fume [SF] on concrete strength. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6(8), pp.106-112.
- [17] Gu, M., Ahmad, W., M. A.T., Zia, A. Akmal, U., Awad, Y.A., and Alabduljabbar, H., 2022. Scientometric analysis and research mapping knowledge of coconut fibers in concrete. *Materials*, 15(16), p.5639.
- [18] Dilbas, H., and Çakır, Ö., 2020. Influence of basalt fiber on physical and mechanical properties of treated recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 254, p.119216.
- [19] Angst, U., Elsener, B., K. Larsen, C., and Vennesland, Ø., 2009. Critical chloride content in reinforced

- concrete—A review. *Cement and concrete research*, 39(9), pp.1122-1138.
- [20] Al-Kharabsheh, B.N., Moafak Arbili, M. Majdi, A., M. Alogla, S., Hakamy, A., Ahmad, J., and Farouk Deifalla, A., 2023. Basalt Fiber Reinforced Concrete: A Compressive Review on Durability Aspects. *Materials*, 16(1), p.429.
- [21] John, V.J., and Dharmar, B., 2021. Influence of basalt fibers on the mechanical behavior of concrete—A review. *Structural Concrete*, 22(1), pp.491-502.
- [22] Iyer, P., Y. Kenno, S., and Das, S., 2015. Mechanical properties of fiber-reinforced concrete made with basalt filament fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(11), p.04015015.
- [23] Jiang, C. Fan, K., Wu, F., and Chen, D., 2014. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Materials & Design*, 58, pp.187-193.
- [24] Adhikari, S., 2013. Mechanical and structural characterization of mini-bar reinforced concrete beams, The University of Akron, Ohio.
- [25] Lipatov, Y.V., Gutnikov, S.I., Manylov, M.S., Zhukovskaya E.S., and Lazoryak B.I., 2015. High alkali-resistant basalt fiber for reinforcing concrete. *Materials & Design*, 73, pp.60-66.
- [26] Wang, D., Ju, Y., Shen, H., and Xu, L., 2019. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*, 197, pp.464-473.
- [27] Sadrumontazi, A., Tahmouresi, B., and Saradar, A., 2018. Effects of silica fume on mechanical strength and microstructure of basalt fiber reinforced cementitious composites (BFRCC). *Construction and Building Materials*, 162, pp.321-333.
- [28] Niu, D. Su, L., Luo, Y., Huang, D., and Luo, D., 2020. Experimental study on mechanical properties and durability of basalt fiber reinforced coral aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 237, p.117628.
- [29] Wu, H., Zhao, J., and Wang, Z., 2013. Study on micro-structure and durability of fiber concrete. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5(2), pp:659-664.
- [30] Kirthika, S.K., and Singh, S.K., 2018. Experimental investigations on basalt fibre-reinforced concrete. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 99, pp.661-670.
- [31] BS 1881-116, 1983. Testing concrete-Part 116: method for determination of compressive strength of concrete cubes, London, UK.
- [32] ASTM C 496/C 496M-04, 2004. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, West Conshohocken (PA), USA.
- [33] ASTM C1609/C1609M-07, 2010. Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading), West Conshohocken (PA), USA.
- [34] AASHTO Designation: T 358-15, 2019. Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, Washington, D.C, USA.
- [35] Boğa, A.R. and Topçu, I.B., 2012. Influence of fly ash on corrosion resistance and chloride ion permeability of concrete. *Construction and Building Materials*, 31, pp.258-264.
- [36] Ayub, T., Shafiq, N., and Fadhil Nuruddin, M., 2014. Mechanical properties of high-performance concrete reinforced with basalt fibers. *Procedia Engineering*, 77, pp.131-139.
- [37] Abbas, S., M.Soliman, A., and L.Nehdi, M., 2015. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages. *Construction and Building Materials*, 75, pp.429-441.
- [38] Abushanab, A., Alnahhal, W., and Farraj, M., 2021. Structural performance and moment redistribution of basalt FRC continuous beams reinforced with basalt FRP bars. *Engineering Structures*, 240, p.112390.
- [39] Larsen, I.L., and Thorstensen R.T., 2020. The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 256, p.119459.
- [40] Qin, Y. Li, M., Li, Y., Ma, W., Xu, Z., Chai, J., and Zhou, H., 2021. Effects of nylon fiber and nylon fiber fabric on the permeability of cracked concrete. *Construction and building materials*, 274, p.121786.
- [41] Ma, Z., Liu, M., Duan Z., Liang, C., and Wu, H., 2020. Effects of active waste powder obtained from C&D waste on the microproperties and water permeability of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 257, p.120518.
- [42] Li, X. Xu, Q., and Chen, S., 2016. An experimental and numerical study on water permeability of concrete. *Construction and building materials*, 105, pp.503-510.
- [43] Chahal, N., Siddique, R., and Rajor, A., 2012. Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp.351-356.
- [44] BS EN 12390-8, 2009. Testing hardened concrete—Part 8: depth of penetration of water under pressure,

- London, UK.
- [45] Chen, Z., Wang, X., Ding, L., Jiang, K., Su, C., Liu, J. and Wu, Z., 2023. Mechanical properties of a novel UHPC reinforced with macro basalt fibers. *Construction and Building Materials*, 377, p.131107.
- [46] Muhammad, J.H. and Yousif, A.R., 2023. Effect of basalt minibars on the shear strength of BFRP-reinforced high-strength concrete beams. *Case Studies in Construction Materials*, 18, p.e02020.
- [47] ASTM G1-90, Reapproved 1999. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, West Conshohocken (PA), USA.
- [46] Muhammad, J.H. and Yousif, A.R., 2023. Effect of

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Nasaj Moghadam, H. and Jandaghi Alaei, F., 2026. Experimental investigation on mechanical and durability properties of twisted basalt fiber reinforced concrete. *Modares Civil Engineering journal*, 26(2), pp.79-93.

