

# مطالعه تجربی بر روی اثرات ترکیبی محیط اسیدی و چرخه‌های انجماد-ذوب بر مکانیک شکست بتن مسلح با الیاف

## مقاله علمی - پژوهشی

احمدرضا رحیمی چاکدل، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران  
سید محمد میرحسینی\*، دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران  
علی حسینی جوشقانی، استادیار، گروه مهندسی شیمی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران  
محمدرضا محمدعلیها، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
و گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فنی گیزه، ۴۱۴۰۰ گیزه، کوجاییلی، ترکیه

\*پست الکترونیک نویسنده مسئول: mo.mirhosseini@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۱ - پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

صفحه ۱۳۶-۱۲۵

### چکیده

با در نظر گرفتن پیامدها و افزایش قلیائی خاک که در نتیجه رشد صنعت و اتکا به سوخت‌های فسیلی است، ارزیابی دلایلی که منجر به تخریب و فرسودگی بتن می‌شود، ضروری تلقی شد. برای این منظور رفتار مکانیکی بتن الیافی در شرایط محیطی ناپایدار مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های بتنی با درصدهای مختلف الیاف فولادی، شیشه‌ای و بدون الیاف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و دوام نمونه بتنی ترک‌دار و چقرمگی شکست با استفاده از آزمون خم دیسک لبه دار (ENDB) در محیط‌های انجماد، ذوب و اسیدی ارزیابی شد و نتایج با شرایط عادی مقایسه گردید. نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در چرخه‌های مشخص شده از مقاومت کمتری برخوردار بودند در حالی که نمونه‌های حاوی الیاف شیشه روند مقاومتی نرمال داشتند. نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف فولادی نسبت به ۲ درصد این الیاف در ۳۰۰ چرخه، ۱۵ درصد افزایش چقرمگی شکست را نشان داد در حالیکه مقاومت نمونه‌های حاوی ۱ درصد این الیاف در حالت بدون چرخه، ۲۲ درصد افزایش داشت.

واژه‌های کلیدی: اسید، انجماد و ذوب، بتن الیافی، چقرمگی شکست، ENDB

### ۱- مقدمه

سولفوریک تشکیل شود و به صورت باران اسیدی ظاهر گردد (Yogananda and Suedep 2022). این امر باعث افزایش قلیایی خاک می‌شود. بر خلاف دوام ذاتی بتن، بسیاری از سازه‌های بتنی در شرایط مخرب محیطی در آنها آثار شکستگی و تخریب قابل مشاهده است. از مهمترین این شرایط را ذوب و انجماد و اسیدی شدن محیط نامید. از این رو محققان برای دوام و پایداری

گسترش سازه‌های بتنی در سواحل دریا، توسعه سریع صنعت و استفاده از سوخت‌های فسیلی باعث تشدید آلودگی محیط زیست و آسیب رساندن به اکوسیستم شده است. به طور خاص، آلودگی ناشی از باران اسیدی ناشی از دی اکسید گوگرد (SO<sub>2</sub>) در اثر واکنش با کاتالیزورهایی مانند دی اکسید نیتروژن NO<sub>2</sub> در جو باعث می‌شود که این گاز با بخار موجود در هوا واکنش داده و اسید

با درصدهای ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد و با طول ۵۴ میلی‌متر در مقایسه با نمونه‌های بدون الیاف رفتار بهتری در برابر ترک خوردگی تحت بارهای کششی و پیچشی دارند. افزودن الیاف تا ۰/۳ درصد باعث کاهش مقاومت تا ۸ درصد شده بطوریکه با افزایش الیاف هیچ تاثیر مثبتی بر حالت I در برابر ایجاد ترک نداشت. و در صورتی که الیاف تقریباً عمود بر سطح انتشار ترک باشند، رفتار کاملاً خوبی را تحت بارهای کششی پس از شکست نشان می‌دهند.

(Mousavi et al. 2021) اثر ضایعات شیشه را بر رفتار شکستگی نمونه‌های ENDB مورد مطالعه قرار دادند. نمونه‌های حاوی ۲۰ تا ۴۰ درصد ضایعات شیشه رفتار شکست بهتری در برابر بارهای بحرانی نشان می‌دهند و افزایش دوره نگهداری باعث افزایش عملکرد نمونه‌ها در بارگذاریها و مقاومت می‌شود.

(Karimi et al. 2023) استفاده از گرانول لاستیکی تایرهای بازیافتی با درصدهای وزنی ۰، ۱، ۲، ۴ و ۱۲، رفتار شکست در حالت‌های مود I و III را در نمونه‌های سیمانی در قالبهای ENDB مورد بررسی قرار دادند. برای مقاومت فشاری از قالبهای مکعبی و استوانه‌ای برای چقرمگی شکست استفاده نمودند. نتایج نشان داد که با اضافه نمودن ۴ درصد الیاف به مخلوط مقاومت بهتر خواهد شد با این حال استفاده از گرانول با درصد بیشتر موجب کاهش ترک خوردگی می‌شود. با توجه به نتایج همبستگی‌های نسبتاً خطی بین شاخص‌های مقاومت در چقرمگی شکست و مقاومت فشاری بدست آمد. (Motamedi et al. 2020) از قالبهای ENDB با ضخامت ۴ سانتیمتر و با عمق ترک ۲ سانتیمتر جهت تحقیق استفاده نمودند و همچنین الیاف آرامید را با درصدهای ۰، ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد و قیر با درصدهای ۳، ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۵ و ۵/۵ در نمونه‌ها مورد بررسی قرار دادند. و در دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سانتیگراد و نمونه‌ها را در دو حالت I و III مورد بارگذاری قرار دادند. نتایج حاکی از یک رفتار خطی بعنوان یک ماده شکننده نشان می‌داد و مشخص شد که با افزایش الیاف در دمای ۵ درجه سانتیگراد مقاومت افزایش یافته، بطوریکه با کاهش دمای آزمایش از ۵- تا ۲۵- درجه سانتیگراد تمامی نمونه‌های شاهد و اصلاح شده با درصدهای مختلف الیاف، مقدار تنش افزایش می‌یابد و با افزایش ۱۰ درصد الیاف در مخلوط در حالت مود I باعث افزایش مقاومت چقرمگی ۸ تا ۳۵ درصد شد.

بتن، استفاده از پوشش اپوکسی (Nematzadeh, Hosseini, and Ozbakkaloglu 2021)، دود سیلیس و خاکستر بادی (Raza et al. 2021) و کاشت نمونه‌ها در باکتری‌ها (Karimi and Mostofinejad 2020) را مورد مطالعه قرار دادند. (Zhang et al. 2022) دوام بتن را با ۱ و ۲ درصد الیاف فولادی در سولفات سدیم، کلرید کلسیم و اسید سولفوریک بررسی کرد. نتایج نشان داد که الیاف فولادی به طور موثر فرسایش بتن را در شرایط نامساعد محیطی مهار می‌کنند. علاوه بر این، افزودن الیاف در یک محیط متخاصم می‌تواند مقاومت فشاری بتن را از ۲/۶ به ۶۹/۲ درصد و در محیط انجماد از ۱۷/۶ به ۶۹/۲ درصد افزایش دهد. (Yu et al. 2021) استفاده از الیاف فولادی و بازالت با حجم ۱٪ و ۲٪ و خاکستر بادی را برای تعیین مقاومت فشاری و ارزیابی مدول دینامیکی نسبی الاستیسیته در شرایط محیطی باران اسیدی و ذوب و انجماد مورد مطالعه قرار دادند. مشاهده نمودند که با ادغام ۲ درصد الیاف فولادی و ۰/۱ درصد بازالت، در خردگی و آسیب بتن نقش بازدارنده دارند. (Abdollahnejad et al. 2021) الیاف فولادی، پلی وینیل الکل، سلولز و بازالت را با ۰/۵ و ۱ درصد حجم در شرایط اسیدی، ذوب و انجماد بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف منفرد حاوی سرباره و قلیایی باعث کاهش استحکام می‌شود، اما در نمونه‌های الیافدار کاهش مقاومت در آنها متغیر بوده است. (Kim et al. 2014) برای تعیین دوام بتن و مدول دینامیکی نسبی الاستیسیته در شرایط ذوب و انجماد و سولفات از ضایعات لجن شیشه و خاکستر بادی مورد استفاده قرار دادند. یافته‌ها نشان داد که مدول الاستیسیته نمونه‌های بدون الیاف پس از ۱۲۰ چرخه به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد، در حالی که نمونه‌های حاوی ۴۵ درصد ضایعات شیشه و ۱۰ درصد خاکستر بادی بیشترین مقاومت را نشان می‌دهند. اصولاً بتن هنگامی که تحت بارهای مختلف قرار می‌گیرد رفتار شکنندگی از خود نشان می‌دهد. این تخریب عمدتاً از نوع جوانه زنی و رشد ترک است. در نتیجه رفتار شکستگی و اولین آسیب ایجاد شده در آنها به تخریب آنها کمک می‌کند. از این رو، محققان رفتار شکست مواد مختلف را مورد بررسی قرار دادند. (Aliha, Razmi, and Mousavi 2018) شکستگی نمونه‌های ENDB را با افزودن الیاف مصنوعی در حالت کششی I و حالت پیچشی III بررسی کردند و نتایج نشان داد که استفاده از الیاف فورتا (SFF Ferro)

این موضوع در تحقیق و توسعه بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بعلت عدم دسترسی محققین به نتایجی که ماهیت تحقیق حاضر را داشته باشد از این رو در این تحقیق نمونه‌های بتن الیافی برای تعیین چقرمگی شکست نمونه ترکدار و تعیین شدت تنش در نوک ترک و دوام آن در شرایط ناپایدار مورد بررسی قرار گرفت. الیاف فولادی (۰ تا ۲ درصد کسر حجمی) و الیاف شیشه (۰ تا ۱ درصد کسر حجمی) به مخلوط بتن اضافه شدند. نقاط قوت در شرایط عادی و تا ۳۰۰ سیکل ذوب، انجماد و اسید به دست آمد. از استوانه‌ای ترکدار (ENDB) برای تعیین چقرمگی شکست نمونه‌های بتنی استفاده شد. تخریب بتن الیافی و عدم مقاومت نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در برابر عوامل مخرب محیطی و توزیع نامناسب این الیاف در بتن پیش‌بینی شده بود. با این وجود سعی شد در ساخت نمونه‌های بتنی الیافدار از نظر نوع الیاف و بتن بر اساس عملکرد اقتصادی و مکانیکی از مواد ارزان و در دسترس عموم ساخته شوند تا به مقاومت مطلوب دست یافته و با توجه به تغییرات بیولوژیکی و اسیدی شدن محیط و بررسی مدت زمان فرآیند تخریب، میزان خسارت سنجیده و با این اطلاعات، دوام و پایداری بتن الیافی برای محققین آشکار شود و مرجع مناسبی برای مهندسیین طراح قرار گیرد.

اسلامپ آن بیشتر از ۸ سانتی‌متر نشود آب شرب ( بدون هر گونه مواد مضر ) اضافه شد. برای ساخت، بتن را بصورت لایه لایه در داخل قالب‌ها ریخته و در هر لایه برای ایجاد تراکم، با میله ۲۵ ضربه کوبیده شد تا از هوا تخلیه گردد. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها را از قالبها جدا نموده و برای عمل آوری طبق استاندارد (ASTM C192 2016) در حوضچه‌های آب در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد در بازه  $\pm 2$  به مدت ۲۸ روز نگهداری گردید. ضمناً برخی از نمونه‌ها برای تعیین مقدار دوام بتن در محیط قلیایی زیاد بعد از مقاومت ۲۸ روزه به مدت ۲۴ ساعت پس از اشباع خشک در محلول آب و آهک ۵ درصد قرار داده شدند. نمونه‌های الیافی ساخته شده با رده بتنی C40 با وزن مخصوص ۲۴۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مطابق با طرح اختلاط در جدول ۱ محاسبه و انجام گردید.

(Zarei, Abdi Kordani, and Zahedi 2022) شکستگی

نمونه‌های ENDB را با افزودن الیاف پلی استر و سولفات کلسیم برای حالت مود I و III برای ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده نمودند. برای ساخت با نسبت وزنی ۰/۲۵ درصد سنگدانه با قطر ۸ میلی‌متر در نظر گرفت. نمونه‌های آسفالتی بصورت استوانه‌ای و به قطر ۱۵ سانتیمتر ساخته شد و در دمای ۱۸- تا ۲۵ درجه سانتیگراد قرار دادند. نتایج مقاومت چقرمگی برای مود I با درصد‌های الیاف ۲/۵، ۳ و ۶ درصد الیاف پلی استر در دمای ۱۸- به ترتیب  $0.5 \text{ MPa.m}$  (۰/۱۹، ۰/۲۴ و ۰/۳۷) بدست آمد و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد با همان درصد الیاف مقاومت چقرمگی به ترتیب  $0.5 \text{ MPa.m}$  (۰/۲۳، ۰/۲۲ و ۰/۳۵) رسید و مقاومت چقرمگی با ترکیب این الیاف در دمای ۱۸- درجه سانتیگراد،  $0.5 \text{ MPa.m}$  ۰/۲۸ و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد  $0.5 \text{ MPa.m}$  ۰/۲۴ را نشان داد و همچنین نمونه‌های الیافدار آسفالتی در دمای پایین از مقاومت بهتری برخوردار بودند. همانطور که می‌دانیم از بتن‌های الیافی در کف سالن‌ها، باند فرودگاهها و جاده‌ها استفاده می‌شود و دانستن این موضوع که لایه‌های بتن ساخته شده در اثر اعمال نیرو بصورت یک تیر خمشی عمل نموده بطوریکه در سطح بتن تنشهای فشاری و در لایه‌های زیرین آن کرنش‌های کششی بوجود خواهد آمد. بنابراین اهمیت

## ۲- مواد و روش

در این مطالعه از سیمان پرتلند ضد سولفات تپ دو طبق استاندارد (ASTM C150/C150M-20 2020) را با سنگدانه‌های طبیعی، درشت دانه با قطر ۱۹ میلی‌متر و ریز دانه با قطر ۴/۷۵ میلی‌متر (دو بار شور) مطابق با استاندارد (ASTM C33/C33M - 18 2018) را با میکروسیلیس (دوده سیلیس) که باعث افزایش مقاومت، کاهش نفوذ پذیری و دوام بتن در شرایط مخرب می‌شود را طبق استاندارد (ASTM C1240 2003) به مدت ۲ دقیقه بصورت خشک مخلوط شد. همچنین مطابق با مشخصات فنی در جدول ۲ و با توجه به کسر حجمی بین ۱ تا ۲ درصد، الیاف فولادی با درصد‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ و الیافهای شیشه با درصد‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ به مخلوط اضافه گردید شکل ۱. این الیاف در حالت خشک با توجه به درصد وزنی نمونه‌ها مخلوط شدند. سپس به مخلوط با رعایت اسلامپ بتن مطابق با استاندارد (ASTM C143 International 2009) بطوریکه

جدول ۱. طرح اختلاط بتن

سیمان (کیلوگرم)	شن (کیلوگرم)	ماسه (کیلوگرم)	آب (کیلوگرم)	میکرو سیلیس (کیلوگرم)
۵۰۰	۶۶۰	۱۰۰۰	۲۳۵	۲۵

جدول ۲. مشخصات فنی الیاف

الیاف	وزن مخصوص ( $gr/cccc3$ )	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	تنش کششی (مگاپاسکال)	قطر الیاف (میلی متر)	رنگ	طول (میلی متر)
الیاف فولادی قلابدار Hooked Steel fibers	۷/۸	۲۰۰	۱۲۰۰	۰/۸	سیاه	۴۰
الیاف شیشه Glass fibers	۱/۶	۳/۴-۵/۵	۴۰۰-۶۰۰	۰/۴	سفید	۱۲



شکل ۱. الیاف فولادی و شیشه‌ای مورد استفاده در کامپوزیت‌های سیمانی

## ۲-۱- روش

### ۲-۱-۱- ذوب و انجماد

در نظر گرفته شده که ۲۰٪ این زمان حدود ۲۴ دقیقه در حالت ذوب یعنی ۵ درجه سانتیگراد در بازه  $\pm 2$  در اسید و مابقی این زمان در حالت انجماد در دمای ۱۸- درجه سانتیگراد در بازه  $\pm 2$  مطابق شکل ۲ قرار گرفتند.

نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در چرخه‌های ذوب، انجماد و اسید در ۵۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ مطابق با استاندارد (ASTM C666/C666M 2003) قرار گرفتند. برای ایجاد محیط اسیدی از اسید سولفوریک ۲۵ درصد محلول در آب شرب استفاده شد که مطابق این استاندارد در این پژوهش، مدت زمان هر چرخه ۲ ساعت



شکل ۲. ذوب و انجماد

## ۲-۱-۲- آزمایش چقرمگی شکست

ضخامت ترک،  $a/B=0/4$  برابر ۲ سانتی‌متر تعیین شد. محل تکیه گاه ها نسبت به اعمال نیرو از هر طرف  $S/R=0/8$  در نظر گرفته شد، یعنی ۶ سانتی‌متر از هر طرف تیغه مطابق با شکل ۳ انتخاب و بارگذاری گردید. برای تعیین میزان باز شدن ترک در نمونه‌ها با سرعت ۱ میلی‌متر در دقیقه با دستگاه تست-سرو (GALDABINI, ITALY) بارگذاری فشار و کشش طبق شکل ۴ انجام شد و برای محاسبه تنش و چقرمگی شکست از فرمول زیر استفاده گردید (Bahmani et al. 2020).

$$\sigma_{Ic} = \frac{3PS_1S_2}{RB^2(S_1 + S_2)}$$

$$K_{Ic} = \sigma_{Ic} \sqrt{\pi * a}$$

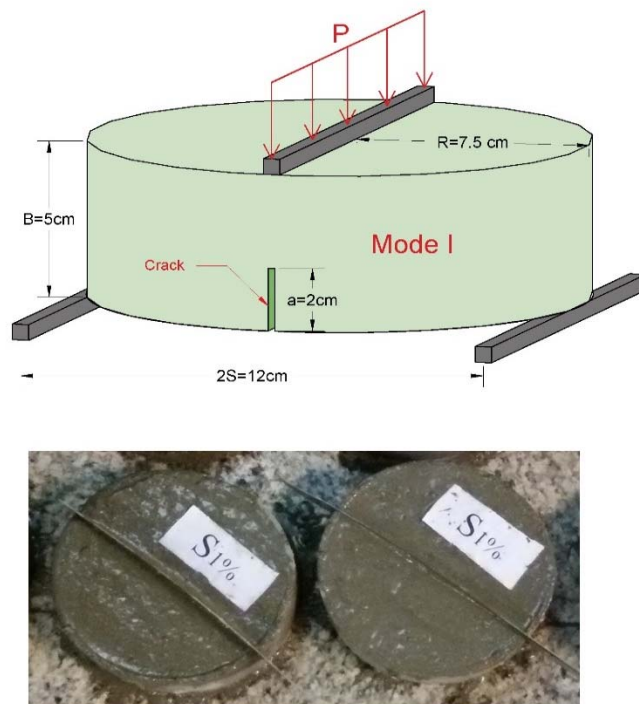
در این تحقیق برای تعیین چقرمگی شکست بتن الیافی در نمونه‌های ترکدار در شرایط ذوب، انجماد و اسیدی استفاده شد. در این علم، وضعیت بحرانی یک قطعه ترک خورده با استفاده از شدت تنش در نوک ترک برآورد می‌شود. چقرمگی شکست راهی برای بیان استحکام یک ماده در انتشار ترک است. برای تعیین رفتار شکست حالت I از قالب‌های استوانه‌ای  $5 \times 5 \times 15$  سانتی‌متر (ENDB) استفاده و برای ایجاد ترک اولیه، در قطر نمونه‌ها از تیغه فلزی به ضخامت  $0/2$  میلی‌متر مطابق با شکل ۳ استفاده شد و

(۱)

(۲)

$S/R=0/8$ : عمق ترک بر حسب متر B: ارتفاع نمونه استوانه‌ای R: شعاع بر حسب سانتی‌متر P: نیروی اعمال شده بر حسب نیوتن

$K_{Ic}$ : چقرمگی شکست بر حسب  $MPa.m^{0.5}$ : تنش چقرمگی  $\sigma_{Ic}$ : تنش چقرمگی بر حسب  $Y_1 MPa$ :  $1/2$  از روی نمودار در مرجع  $S_1S_2$ : فاصله تکیه‌گاه تا محل بارگذاری که از هر طرف ۶ سانتی‌متر است که



شکل ۳. شرایط بارگذاری و ایجاد ترک اولیه در نمونه‌های ENDB

### ۳- بحث و نتایج

#### ۳-۱- ارزیابی نتایج چقرمگی شکست

درصد الیاف افزایش داد. در چرخه‌های ۱۵۰ و ۳۰۰، نمونه‌های دارای ۱ درصد الیاف به ترتیب مقاومت  $0.81 \text{ MPa.m}^{0.5}$  و  $0.68 \text{ MPa.m}^{0.5}$  را نشان دادند که نسبت به نمونه‌های حاوی ۱/۵ و ۲ درصد الیاف به ترتیب ۸، ۹، ۱۰ و ۱۵ درصد افزایش چقرمگی شکست را نشان می‌دهند. کاهش مقاومت نمونه‌های حاوی ۱، ۱،۵ و ۲ درصد الیاف در مقایسه با ۱ درصد الیاف در نمونه‌ها، تجمع الیاف (پدیده توپی شدن) (Naaman 2003) که موجب ایجاد منافذ و تخلخل شده و بر اثر تبخیر آب در اطراف الیاف، ترک‌های داخلی بوجود آمده که در ذوب و انجمادهای مکرر و محیط سولفاته بوجود آمده در این پژوهش باعث تخریب ریزساختارهای بتن شده است. اما نمونه‌هایی که در معرض اشباع خشک در محلول آب و آهک قرار گرفته بودند از افزایش مقاومت ۰/۵ درصدی برخوردار بودند. که دلیل آن را می‌توان تاثیر و نفوذ آهک در ریز ساختارهای بتن در برابر اسید دانست.

نمونه‌های الیافدار نسبت به نمونه‌های بدون الیاف، مقاومت چقرمگی بالاتری را نشان دادند که دلیل آن اثر پل زدن الیاف در نمونه‌های سیمانی می‌باشد که نمونه‌ها در اوج بارگذاریها از خود رفتار غیرخطی نشان می‌دهند. همچنین نتایج مقاومت در نمونه‌های ENDB در بارگذاری چرخه‌ای و اسیدی نشان داد که نمونه حاوی الیاف شیشه از استحکام کمتری نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف فولادی برخوردار بودند. علت آن مقاومت کششی و مدول الاستیسیته پایین این الیاف دانست. در شکل ۴-الف بیشترین مقاومت مربوط به نمونه‌های حاوی ۲ درصد الیاف فولادی که چقرمگی شکست  $1.38 \text{ MPa.m}^{0.5}$  در حالت بدون چرخه را نشان داد چون الیاف موجود در بتن علاوه بر پل زدن شکل ۵، انبساط داخلی را نیز کاهش می‌دهند. اما در ۵۰ سیکل، نمونه حاوی ۱/۵ درصد الیاف، چقرمگی شکست  $0.95 \text{ MPa.m}^{0.5}$  را نشان داد که ۷ درصد مقاومت چقرمگی را در مقایسه با نمونه‌های حاوی ۲

وجود  $C_3A$  در این نوع سیمان دانست که بعد از واکنش با خمیر سیمان ژل آلومینات تولید نموده که پس از کاهش گرما (هیدراتاسیون) با ژل‌های انیدریت و گچ واکنش نشان داده و اترینگیت تاخیری بوجود آورده که باعث کاهش مدول الاستیک دینامیک بتن شده که در نتیجه ریزترک در پیرامون الیاف ایجاد می‌گردد. ضمناً (Sanjeewa and Asamoto (2024) در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که تبلور ناقص اترینگیت در مرحله اولیه هیدراتاسیون به دلیل افزایش دما و محتوای قلیایی، حلالیت اترینگیت را افزایش می‌دهد و بلورهای اترینگیت در سنین بعدی در هنگام سخت شدن مواد در مجاورت آب تشکیل می‌شود. سولفات در داخل بتن باعث انبساط مواد شده و منجر به تورم بتن سخت شده و ترک خوردگی بتن می‌شود.

همانگونه که در شکل ۶ تصاویر ریزساختاری ملاحظه می‌شود تشدید این لایه‌های کریستالی در محیط سولفات بیشتر خواهد بود و C-S-H بوجود آمده در اثر هیدراتاسیون سیمان پرتلند می‌باشد. با این وجود نمونه‌هایی که در محلول آب و آهک قرار گرفتند، افزایش مقاومت ۰/۸ درصدی از خود نشان دادند. ضمناً با بررسی مقاومت نمونه‌های این تحقیق ملاحظه شد که مقاومت نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف شیشه در حالت بدون سیکل  $MPa \cdot m^{0.5}$  ۱/۱۳ بدست آمد در حالیکه مقاومت چقرمگی با ۳۰ درصد الیاف فورتا-فرو که در مرجع (Aliha, Razmi, and Mousavi (2018) که  $MPa \cdot m^{0.5}$  ۱/۱۲ ملاحظه می‌شود از چقرمگی بالاتری برخوردار بوده است. این مقایسه بدلیل نزدیک بودن مقاومت کششی و مدول الاستیسیته الیاف فورتا - فرو با الیاف شیشه انجام شد.



شکل ۴. بارگذاری و پل زدن الیاف فولادی

در شکل بیشترین مقاومت مربوط به نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف شیشه  $MPa \cdot m^{0.5}$  ۱/۱۳ بود و مقاومت نمونه‌ها با همان درصد الیاف شیشه در سیکل‌های ۵۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ به ترتیب ۳۱، ۵۵ و ۸۵ درصد کاهش یافت. نمونه‌های حاوی الیاف شیشه پس از تحمل حداکثر بار دچار افت ناگهانی شدند و یک رفتار خطی در بارگذاری‌های چرخه‌ای (ذوب، انجماد و اسید) از خود نشان دادند و نتوانستند تا شکست نهایی مانند الیاف فولادی جابجایی بیشتری را تحمل نمایند این رفتار الیاف شیشه، علاوه بر مدول الاستیسیته و مقاومت کششی پایین می‌تواند باعث استفاده از سیمان پرتلند و

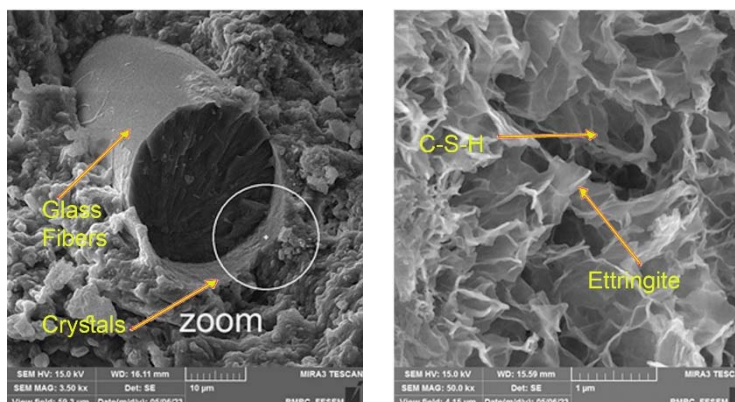


ب



الف

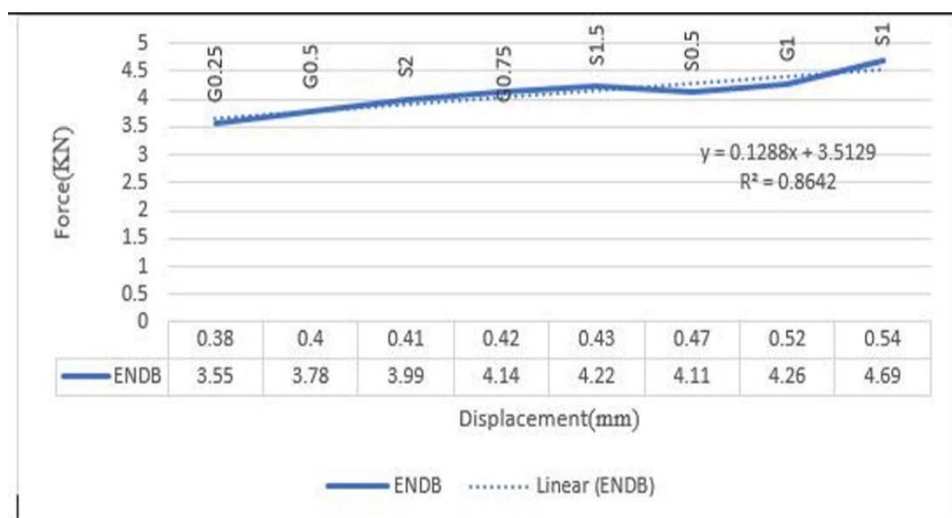
شکل ۵. چقرمگی شکست (الف) الیاف فولادی (ب) الیاف شیشه



شکل ۶. تشکیل کریستال در اطراف الیاف شیشه و اترینگایت

### ۲-۳- ارتباط و رفتار الیاف در چقرمگی شکست

برای درک بهتر رفتار شکست الیاف شیشه و فولاد در نمونه‌های بتنی، تغییر شکل - نیرو مطابق با شکل ۷ و رابطه آنها با استفاده از برازش خطی مورد مطالعه قرار گرفت.



شکل ۷. نیرو به حداکثر تغییر شکل در آزمایش چقرمگی با نمونه‌های (ENDB)

نمودار بالا بر حسب نرخ فزاینده تغییر شکل و اعمال نیرو به نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و شیشه که تحت ۳۰۰ چرخه ذوب و انجماد و اسید قرار می‌گیرند، تفسیر شده است.

- خط برازش یک شیب رو به بالا، با شیب مثبت را نشان می‌دهد.
- در پارامتر، تأثیر الیاف فولادی در بارگذاری بیشتر از الیاف شیشه است.
- با توجه به خط برازش چقرمگی شکست الیاف (فولاد و شیشه)، ضریب تعیین ( $R^2$ ) نزدیک به یک است و نشان می‌دهد که پارامتر فوق از رابطه خوبی برخوردار می‌باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

-نمونه‌های حاوی الیاف از مقاومت بهتری نسبت به بدون الیاف در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد و بدون چرخه برخورداند.  
-نمونه‌هایی که در اشباع خشک محلول آب و آهک قرار گرفتند در شرایط محیطی اسیدی از دوام بهتری برخوردار بودند.  
-مقاومت نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف فولادی نسبت به نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف شیشه در ۱۵۰ و ۳۰۰ چرخه به ترتیب ۱۱ و ۱۱ درصد افزایش نشان داد.  
-نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف شیشه نسبت به نمونه‌های حاوی ۲ درصد الیاف فولادی در ۳۰۰ چرخه از چقرمگی شکست بالاتری برخوردار بودند.  
-تصاویر SEM نشان می‌دهد که اترینگایت تاخیری در محیط سولفات‌ها افزایش می‌یابد و باعث تشکیل کریستالهای بیشتر در اطراف الیاف شیشه خواهد شد.

#### ۵ - پی‌نوشت‌ها

1-Edge Notched Disc Bend (ENDB)

2-Steel fibers (S)

3-Glass fibers (G)

#### ۶ - مراجع

-Bahmani, A., Aliha, M. R. M., Sarbijan, M. J., & Mousavi, S. S. (2020). An extended edge-notched disc bend (ENDB) specimen for mixed-mode I+ II fracture assessments. *International Journal of Solids and Structures*. 193, 239-250.

- Karimi, H. R., Aliha, M. R. M., Ebneabbasi, P., Salehi, S. M., Khedri, E., & Haghghatpour, P. J. (2023). Mode I and mode II fracture toughness and fracture energy of cement concrete containing different percentages of coarse and fine recycled tire rubber granules. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 123, 103722.

- Karimi, N., & Mostofinejad, D. (2020). Bacillus subtilis bacteria used in fiber reinforced concrete and their effects on concrete penetrability. *Construction and Building Materials*. 230, 117051.

- Kim, J., Moon, J. H., Shim, J. W., Sim, J., Lee, H. G., & Zi, G. (2014). Durability properties of a concrete with waste glass sludge exposed to freeze-and-thaw condition and de-icing salt. *Construction and Building Materials*. 66, 398-402.

- Motamedi, H., Fazaeli, H., Aliha, M. R. M., & Amiri, H. R. (2020). Evaluation of temperature and loading rate effect on fracture toughness of fiber reinforced asphalt mixture using edge notched disc bend (ENDB) specimen. *Construction and Building Materials*. 234, 117365.

- Mousavi, S. R., Afshoon, I., Bayatpour, M. A., TQ, A. D., & Miri, M. (2021). Effect of waste glass and curing aging on fracture toughness of self-compacting mortars using ENDB specimen. *Construction and*

-Abdollahnejad, Z., Mastali, M., Falah, M., Shaad, K. M., Luukkonen, T., and Illikainen, M. (2021). Durability of the reinforced one-part alkali-activated slag mortars with different fibers. *Waste and Biomass Valorization*. 12. 487-501.

-Aliha, M. R. M., Razmi, A., & Mousavi, A. (2018). Fracture study of concrete composites with synthetic fibers additive under modes I and III using ENDB specimen. *Construction and Building Materials*. 190, 612-622.

-ASTM C33/C33M-18; (2018). Standard Specification for Concrete Aggregates. *ASTM International*, 1-8.

-ASTM C1240, (2003). Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures. *Annual Book of ASTM Standards* 15, 1-6.

-ASTM C666/C666M; (2003). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. *ASTM International: West Conshohocken, PA* 03 (Reapproved), 1-6.

-ASTM C150/C150M-20; (2020). Standard Specification for Portland Cement. *Technical Report, ASTM International, West Conshohocken, PA*.

-ASTM C192; (2016). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, *ASTM Standard Book*, 4-9.

-ASTM C143/C143M-09, (2009). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. *ASTM International West Conshohocken, PA*.

Subjected to Synthetic Acid Rain. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*. 10 (5): 56–59.

- Yu, J., Qiao, H., Zhu, F., & Wang, X. (2021). Research on damage and deterioration of fiber concrete under acid rain environment based on GM (1, 1)-Markov. *Materials*. 14(21), 6326.

- Zarei, M., Abdi Kordani, A., & Zahedi, M. (2022). Evaluating the fracture behavior of modified asphalt concrete composites (ACC) at low and intermediate temperatures using edge notched disc bend (ENDB) specimen. *Road Materials and Pavement Design*, 23(8). 1917-1941.

-Zhang, Q., Xu, W., Sun, Y., & Ji, Y. (2022). Investigation on mechanical and microstructure properties of steel fiber reinforced concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2022, 18-19.

*Building Materials*. 282, 122711.

-Naaman, A. E. (2003). Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 241-252.

-Nematzadeh, M., Hosseini, S. A., & Ozbakkaloglu, T. (2021). The combined effect of crumb rubber aggregates and steel fibers on shear behavior of GFRP bar-reinforced high-strength concrete beams. *Journal of Building Engineering*. 44, 102981.

- Raza, S. S., Qureshi, L. A., Ali, B., Raza, A., & Khan, M. M. (2021). Effect of different fibers (steel fibers, glass fibers, and carbon fibers) on mechanical properties of reactive powder concrete". *Structural Concrete*. 22(1), 334-346.

- Sanjeewa, H. V. A. N., & Asamoto, S. (2024). A review of mechanical properties of deteriorated concrete due to delayed ettringite formation and its influence on the structural behavior of reinforced concrete members. *Construction and Building Materials*. 422, 135795.

-Yogananda, M., & Suedep, Y. H. (2022). Durability Characteristics of Reinforced Concrete

# **An Experimental Study on the Combined Effects of Acidic Environment and Freeze-Thaw Cycles on the Fracture Mechanics of Fiber-Reinforced Concrete**

*Ahmad Reza Rahimi Chakdel, Ph.D., Candidate, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.*

*Seyed Mohammad Mirhosseini, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.*

*Ali Hasani Joshagani, Assistant professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.*

*Mohammad Reza Mohammad Aliha, Associate Professor, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Gebze Technical University, 41400 Gebze, Kocaeli, Turkey.*

*E-mail: mo.mirhosseini@iau.ac.ir*

Received: November 2024- Accepted: February 2025

## **ABSTRACT**

By taking into consideration the consequences and rise in soil alkalinity that is a result of industry growth and reliance on fossil fuels, evaluating the reasons that lead to concrete degradation and deterioration was considered crucial. For this purpose, the mechanical behavior of fiber concrete under unstable environmental conditions was probed. Concrete composites with varying percentages of steel and glass fibers and no fibers were analyzed. Compressive, indirect tensile, and fracture toughness properties were evaluated using the Edge Notched Disc Bend (ENDB) test under freezing-thawing and acidic environments and the results were compared with normal conditions. Steel fibers decreased the strength in the specified cycles, while glass fibers showed a normal strength trend. Samples containing 1% of steel fibers showed a 15% increase in fracture toughness compared to 2% of these fibers in 300 cycles, while the strength of samples containing 1% of these fibers increased by 22% in the non-cycled state.

**Keywords:** Freeze/thaw, Fibrous Concrete, Fracture Toughness, Acid, ENDB