Quarterly Journal of the Civil Engineering Department, Faculty of Engineering (2025), I 2, No.3, pp 1-12

NEW APPROACHES in CONSTRUCTION and PROJECT MANAGEMENT

Quarterly Journal of the Civil Engineering Department, Faculty of Engineering

https://cpm.aletaha.ac.ir

Ministry of Science, Research & Technology Ale-Taha Institute of Higher Education

Compressive, tensile and flexural strength of self-compacting concrete made with micro and macro steel fibers

Ali Rostamian[a], Mohammadkazem Sharbatdar[b*], Ali Kheyroddin[c]

[a] PhD student in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Iran, ali.rostamian@semnan.ac.ir.

[b] Professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Iran, msharbatdar@semnan.ac.ir.

[c] Distinguished Professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Iran, kheyroddin@semnan.ac.ir.

Abstract

Steel fiber reinforced concrete has found wide application in concrete and reinforced concrete structures in order to improve the properties of concrete. The reason for this wide application is the numerous technical and economic advantages of using steel fibers in the concrete body. Self-compacting concrete is a new generation of concrete that compacts under its own weight without the need for internal vibration or vibration of the mold body and has acceptable strength and durability. In this study, self-compacting concrete was made using steel fibers with percentages of 0.5 and 0.75, and the concrete mix design was investigated with T50 slump flow tests, L-shaped box, U-shaped box, and J-shaped ring. Then, 15 cylindrical samples with dimensions of 300x150 mm were molded for compressive testing, 9 cylindrical samples for indirect tensile testing or Brazilian testing, and 6 beam samples with dimensions of 500x100x100 mm were fractured at intervals of 7 and 28 days. The results showed that the addition of micro and macro steel fibers increases the compressive strength, tensile strength, and bending strength.

Article history:
Received: 29/03/2025
Revised: 05/04/2025
Accepted: 16/04/2025

Keywords
self-compacting concrete, steel fibers, compressive strength, tensile strength, and flexural strength.

* corresponding author: Professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Iran, msharbatdar@semnan.ac.ir; ORCID: 0000-0001-6106-1235

فصلنامه گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، سال دوم، شماره ۳، تابستان ۱۴۰۴، صص ۱-۱۲

رویکـــردهای نوین در
مدیریت ساخت و پروژه
فصلنامه گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی
https://cpm.aletaha.ac.ir

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
مؤسسه آموزش عالی آل طه

مقاومت فشاری و کششی و خمشی بتن خودمتراکم ساخته شده با الیاف فولادی میکرو و ماکرو

علی رستمیان[۱]، محمدکاظم شربتدار*[۲]، علی خیرالدین[۳]

۱. دانشجوی دکتری سازه دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران، ali.rostamian@semnan.ac.ir.
۲. استاد گروه سازه دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران، msharbatdar@semnan.ac.ir.
۳. استاد ممتاز گروه سازه دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران، kheyroddin@semnan.ac.ir.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷

چکیده فارسی

بتن مسلح با الیاف فولادی به منظور بهبودبخشیدن به خواص بتن، کاربرد وسیعی را در سازه‌های بتنی و بتن مسلح پیدا کرده است. دلیل این کاربرد گسترده مزایای بی‌شمار فنی و اقتصادی در استفاده از الیاف فولادی در جسم بتن است. بتن خودمتراکم نسل جدیدی از بتن است که بدون نیاز به ویبره داخلی یا ویبره بدنه قالب تحت اثر وزن خود، متراکم می‌شود و مقاومت و دوام قابل قبولی دارد. در این پژوهش، بتن خودمتراکم با استفاده از الیاف فولادی با درصدهای ۰/۵ و ۰/۷۵ ساخته شده و طرح اختلاط بتن مورد نظر با آزمایش‌های جریان اسلامپ T50، جعبه L شکل، جعبه Uشکل و حلقه J شکل مورد بررسی قرار گرفت. سپس ۱۵ نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۱۵۰x۳۰۰ mm برای انجام تست فشاری و ۹ نمونه استوانه‌ای برای انجام تست کشش غیرمستقیم یا تست برزیلی و ۶ نمونه تیر به ابعاد ۱۰۰x۱۰۰x۵۰۰ mm قالب‌گیری شد و در فواصل ۷ و ۲۸ روز شکسته شد. نتایج نشان داد با افزودن الیاف فولادی میکرو و ماکرو مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی

بتن خودمتراکم، الیاف فولادی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی.

* نویسنده مسئول: استاد گروه سازه دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران، msharbatdar@semnan.ac.ir.
ORCID: 0000-0001-6106-1235

۱. مقدمه

بتن خودمتراکم بدون نیاز به ویبره توسط وزن خود، متراکم می‌شود و در سازه‌های با تراکم بالای آرماتور بسیار کارآمد است. از مزایای بتن خودمتراکم به اطمینان از تراکم، به‌خصوص در مقاطعی که کاربرد لرزاننده دشوار باشد، جاگیری آسان‌تر در قالب، سطح تمام‌شده بهتر، کاهش نیروی انسانی، اجرای سریع‌تر خصوصاً در مورد مقاطع دیوار و ستون، آزادی عمل بیشتر در طراحی و کاهش آلودگی صوتی ناشی از عملیات ویبره اشاره کرد. برای ساخت یک سازه بتنی با دوام بتن در فاز تازه باید به‌خوبی متراکم و عمل‌آوری شود؛ لذا لزوم شناخت کلیه روش‌ها و آزمایش‌های مربوط به آن ضرورت پیدا می‌کند[۶-۱].

از جمله افزودنی‌های مصرفی در بتن، الیاف بتن است. الیاف بتن دارای انواع مختلفی است. هر یک از الیاف با توجه به مشخصات و توانمندی‌های ایجادکننده، خصوصیات مؤثری در بتن دارند. الیاف افزودنی بتن، شامل الیاف فلزی یا فولادی بتن، الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف فایبرگلاس، الیاف شیشه و ... است. از جمله الیاف پرکاربرد در بتن، الیاف فولادی است. الیاف فولادی به علت مشخصات منحصر به‌فرد، کاربرد روزافزونی در کف‌سازی‌های بتنی و دال‌ها و ... دارند. الیاف فولادی رشته‌های جدا از هم، با طول، سطح مقطع و فرم‌های طولی متفاوتی است. الیاف فولادی غالباً از جنس فولادهای کم کربن (به جهت حفظ انعطاف‌پذیری فولاد و بالطبع خاصیت شکل‌پذیری بتن) می‌باشند. رشته‌های فولادی با پخش غیریکنواخت در بتن باعث مسلح‌شدن بتن در تمامی جهات می‌شود (برخلاف آرماتور که فقط دو جهت طولی و عرضی بتن را مسلح می کند). الیاف‌ها در بتن باعث کنترل و تأخیر در ایجاد ترک می‌شوند و بعد از رخداد ترک، با ایجاد یک پل بر ترک و اتصال ماتریس سیمانی اطراف ترک، مکانیزم انتقال بار و تنش را بر عهده دارند. این مکانیزم انتقال آن‌قدر ادامه می‌یابد تا الیاف، گسیخته و یا از بتن خارج شود. با افزودن الیاف به بتن خاصیت تردی و شکنندگی در بتن کاهش و شکل‌پذیری و میزان جذب انرژی، تحمل در برابر تنش‌های ناگهانی، ضربه، سایش و غیره افزایش می‌یابد[۱۲-۷].

۲. تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از الیاف فولادی در بتن

سونگ و همکاران[۱] در سال ۲۰۰۴ مقاومت فشاری بتن پرمقاومت حاوی الیاف فولادی را مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه از الیاف فولادی با نسبت‌های مختلف ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد در بتن پرمقاومت استفاده شد و نتیجه گرفتند که افزودن ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد الیاف به بتن موجب افزایش مقاومت فشاری به ترتیب تا ۷، ۱۲، ۱۵ و ۱۳ درصد نسبت به نمونه شاهد می‌شود.

ال‌دیب[۲] در سال ۲۰۰۹ اثر الیاف فولادی را بر بتن خودتراکم با مقاومت بالا بررسی کرد. در این مطالعه از الیاف فولادی با درصدهای مختلف حجمی ۰/۰۸، ۰/۱۲ و ۰/۵۲ استفاده شد و با بتن خودتراکم پرمقاومت بدون الیاف مقایسه شد. نتایج نشان داد که استفاده از ۰/۰۸، ۱۲/ ۰و ۰/۵۲ درصد الیاف فولادی در بتن خودتراکم پرمقاومت باعث افزایش مقاومت فشاری به‌ترتیب ۱۲، ۱۹ و ۳۱ درصد در نمونه‌های با سن ۹۰ روز می‌شود.

صدر ممتازی و همکاران[۳] در سال ۱۳۹۷ مطالعه‌ای روی اثر الیاف فولادی بر ترک‌های انقباضی و مقاومت مکانیکی بتن پرمقاومت انجام دادند. در این تحقیق مقاومت فشاری بتن در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها گزارش کردند که مقاومت فشاری نمونه‌های الیافی با درصد حجمی ۰/۱ در سنین ۳ و ۷ روز به‌ترتیب ۱۶ و ۲۰ درصد بیشتر از نمونه‌های بدون الیاف است. این در حالی است که درصد افزایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز تنها ۳ درصد نتیجه شد. همچنین مطالعات آن‌ها نشان داد که وجود الیاف داخل بتن موجب کاهش ترک‌های انقباضی در سنین اولیه می‌شود؛ بنابراین از الیاف می‌توان در بخش‌های مختلفی از جمله دال‌های روی زمین، روکش راه‌ها و پیاده‌روها، سیستم‌های کف و رویه‌های بتنی که کسب مقاومت بالا در سنین اولیه نیاز است، استفاده کرد.

عباس و همکاران[۴] در سال ۲۰۱۸ اثر الیاف با نسبت‌های مختلف ۰/۵ تا ۱/۵ درصد را بر بتن معمولی و پرمقاومت ارزیابی کردند. در این مطالعه از الیاف فولادی دو سر قالب‌دار استفاده شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از الیاف فولادی با درصدهای مختلف ذکر شده باعث افزایش مقاومت فشاری تا ۸ درصد در بتن معمولی و تا ۲۵ درصد در بتن پرمقاومت می‌شود.

۳. مصالح مصرفی

۳-۱. شن مصرفی

شن به‌کارگرفته شده از نوع شکسته با حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵میلی‌متر بوده است. منحنی دانه‌بندی شن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات دانه‌بندی شن

درصد ردشده حجمی	درصد مانده	وزن مانده (gr)	سایز الک (mm)	شماره الک
		یک الک		
۹۴	۶	۶۰	۹/۵	۳/۸
۵۱	۴۹	۴۳۰	۸	۵/۱۶
۱	۹۹	۵۰۰	۴/۷۵	۴
۰	۱۰۰	۱۰	-	سینی
-	-	۱۰۰۰	وزن کل	

۳-۲. ماسه مصرفی

جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از ماسه شکسته استفاده شد. مطابق با استاندارد ASTM C-125 مدول نرمی سنگدانه‌های ریز یا درشت با جمع کردن درصدهای وزنی مانده تجمعی هر یک از الک‌ها در یک گروه مشخص از الک‌ها و تقسیم حاصل‌جمع بر عدد ۱۰۰ به‌دست می‌آید. دانه‌بندی ماسه در جدول ۲ نشان داده شده است. در ضمن در این پژوهش از دستگاه لرزاننده جهت الک نمونه دانه‌ها استفاده شده است.

جدول ۲: مشخصات دانه‌بندی ماسه

درصد ردشده حجمی	درصد مانده	وزن مانده (gr)		سایز الک (mm)	شماره الک
		همه الک‌ها	یک الک		
۶۳/۴	۳۶/۶	۳۶۶	۳۱۲	۲/۳۵	۸
۳۹/۳	۶۰/۷	۶۰۷	۲۴۱	۱/۲	۱۶
۲۳/۲	۷۶/۸	۷۶۸	۱۶۱	۰/۶	۳۰
۱۱/۲	۸۸/۸	۸۸۸	۱۲۰	۰/۳	۵۰
۴/۹	۹۵/۱	۹۵۱	۶۳	۰/۱۵	۱۰۰
۰	-	۱۰۰۰	۴۹	-	سینی
-	۳۶۳/۴	-	۱۰۰۰	وزن کل	
۳/۶ ~ مدول نرمی					

۳-۳. سیمان

سیمان مورد استفاده از نوع سیمان پرتلند تیپ۲ ساخت کارخانه سیمان شاهرود مطابق با استاندارد ASTM C150 است. سیمان شاهرود تیپ ۲ در شرایطی به‌کار می‌رود که حرارت هیدراتاسیون متوسط و مقاومت در برابر حمله سولفات‌های در حد متوسط لازم باشد. به‌دلیل محدودیت فاز آلومینات و کمتر بودن فاز C3S در این سیمان که سبب ایجاد خواص ویژه مزبور می‌شود، مقاومت فشاری اولیه و نهایی آن کمتر از سیمان تیپ ۱ است. سیمان شاهرود تیپ ۲ معمولاً کندتر از سیمان تیپ ۱ می‌گیرد و درگیرش حرارت کمتری تولید می‌کند.

۳-۴. آب

در این تحقیق برای ساخت بتن از آب لوله‌کشی (آب شرب) استفاده شده است.

۳-۵. فوق روان‌کننده

فوق روان‌کننده مصرفی در این پژوهش براساس استاندارد ASTM C494 و برپایه کربوکسیلات انتخاب شد. این نوع روان‌کننده به‌صورت مایع و با رنگ قهوه‌ای تولید می‌شود و فاقد یون کلر است؛ لذا خواص نهایی بتن را تغییر نمی‌دهد. وزن مخصوص آن برابر با ۱۱۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و PH آن برابر با ۷ است.

۳-۶. الیاف فولادی

الیاف فولادی مورد استفاده در این پژوهش به‌صورت دو نوع الیاف ماکرو و میکرو که به ترتیب دارای طول و قطر ۳۵ و ۰/۶ میلی‌متر و ۱۵ و ۰/۲۵ میلی‌متر است. نسبت ابعادی الیاف که نسبت طول به قطر آن‌ها در نظر گرفته می‌شود برای الیاف ماکرو برابر ۵۸ و برای الیاف میکرو برابر ۶۴ است. الیاف‌های فولادی مورد استفاده دارای مقاومت کششی به ترتیب حدود ۲۶۷۰ و ۲۷۲۰ مگاپاسکال، چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول آلاستیسیته حدود ۲۱۰ گیگاپاسکال که از شرکت فراتاو تهیه شده است. این نوع الیاف از جنس فولاد کربنی با درصد بسیار جزئی از عناصری مانند منگنز، نیکل، کرم و مس که جمع این عناصر کمتر از ۱ درصد است ساخته شده است. الیاف‌های مورد استفاده در شکل ۱ آمده است[۱۳].

شکل ۱: الیاف‌های مورد استفاده برای ساخت نمونه

۳-۷. پودر سنگ

پودر سنگ مورد استفاده ساخت کارخانه قم می‌باشد که از الک نمره ۱۲ رد شده است.

۴. طرح اختلاط

با توجه به توضیحات قبلی و براساس روش حجمی، سه طرح آزمایشی از بتن خودمتراکم تهیه و آزمایشات Box-L، اسلامپ و T50 انجام شده است.

در جدول ۳ درصد وزنی مصالح مورد استفاده در طرح‌های آزمایشی ساخته شده ارائه شده و روش ساخت و مخلوط کردن نمونه‌ها در بخش بعدی توضیح داده شده است.

جدول ۳: طرح‌های اختلاط به‌کاررفته در پژوهش

گروه‌بندی	مقاومت مشخصه (MPa)	سیمان (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	شن (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	پودرسنگ (kg/m^3)	فوق‌روان‌کننده (٪)	فوق‌روان‌کننده (kg/m^3)	الیاف (٪)	الیاف (kg/m^3)
بتن خودمتراکم	۳۰	۵۰۰	۲۵۰	۵۹۶	۸۹۴	۲۶۳	۰/۸	۴	۰	۰
بتن خودمتراکم با الیاف میکرو	۳۰	۵۰۰	۲۵۰	۵۹۶	۸۹۴	۲۶۳	۰/۸	۴	۰/۵	۳۹/۲۵
بتن خودمتراکم با الیاف ماکرو	۳۰	۵۰۰	۲۵۰	۵۹۶	۸۹۴	۲۶۳	۰/۸	۴	۰/۷۵	۵۸/۸۷۵

به منظور بررسی مشخصات بتن تازه آزمون‌های تعیین روانی به‌وسیله اسلامپ و قابلیت عبورکنندگی، انسداد و جداشدگی به‌وسیله Box-Lو Box-U و حلقه J انجام شده است.

شکل ۲: انجام آزمایش اسلامپ روانی با کمک مخروط آبرامز

شکل ۳: دستگاه Box-L و Box-U

شکل ۴: حلقه J

جدول ۴: نتایج آزمایشات بتن تازه

گروه‌بندی	جریان اسلامپ (mm)	T50 (SEC)	جعبه L	جعبه U (mm)	حلقه J (mm)
بتن خودمتراکم	۷۰۰	۳/۵	۰/۸	۱۵	۹
بتن خودمتراکم با الیاف میکرو	۶۶۵	۴	۰/۸۲	۲۰	۱۱
بتن خودمتراکم با الیاف ماکرو	۶۶۰	۴/۲	۰/۸۴	۲۳	۱۲

با توجه به نتایج آزمایشات بتن تازه که در جدول ۴ مشخص است، طرح‌های اختلاط در محدوده SF2-VF2 مطابق با استاندارد EFNARC 2005 قرار دارند[۲۲].

۵. نگهداری نمونه‌ها

همان‌طور که در قسمت‌های قبل نیز گفته شد کار آزمایشگاهی در این پروژه در دو فاز مختلف انجام گرفت. در فاز اول طرح اختلاط‌های مناسب برای بتن خودمتراکم به‌دست آمد، سپس در فاز دوم با توجه به طرح به‌دست آمده برای آزمایشات مختلف از قالب‌های استاندارد مربوط به هر آزمایش به قرار زیر جهت نمونه‌گیری استفاده شد و به مدت ۲۴ ساعت جهت سخت شدن در درجه حرارت و رطوبت ثابت نگهداری شد. یادآور می‌شود برای هر آزمایش از سه آزمونه استوانه‌ای و ۲ آزمونه تیر استفاده شده است[۱۷].

از قالب‌های استوانه‌ای به ابعاد ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه، قالب‌های استوانه‌ای به ابعاد ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت‌های کششی ۲۸ روزه و قالب‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰x۱۰۰x۵۰۰ میلی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت خمشی تیر استفاده شده است.

کلیه نمونه‌ها پس از یک روز از قالب خارج و سپس به حوضچه عمل‌آوری با آب معمولی با دمای ۱۸-۲۵درجه سانتی‌گراد (محیط شاهد) انتقال یافته‌اند و پس از عمل‌آوری به مدت ۷ و ۲۸ روز از حوضچه خارج و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

۶. آزمایش‌های بتن سخت شده

۶-۱. آزمایش مقاومت فشاری

نمونه‌ها قبل از آزمایش از حوضچه خارج شده و خشک می‌شوند. تعداد آنها جهت آزمایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه با درصدهای مختلف الیاف فولادی در شرایط نگهداری محیط شاهد ۱۵ نمونه است. شکل ۵ نمونه گسیخته شده را نشان می‌دهد[۲۱-۱۸].

شکل ۵: آزمایش مقاومت فشاری و نمونه گسیخته شده در آزمایش مقاومت فشاری

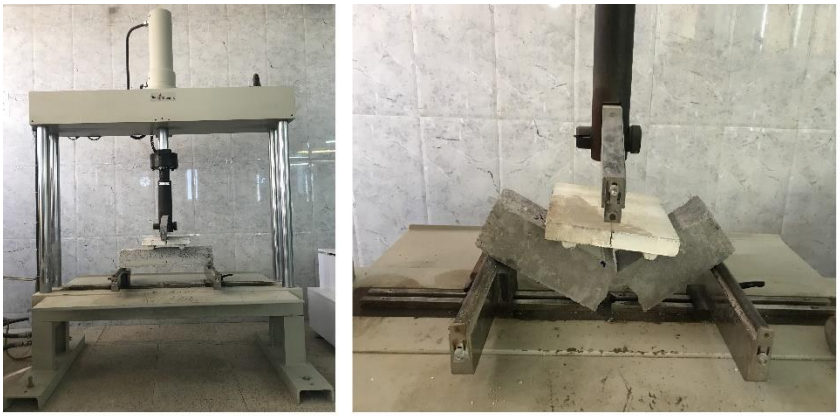
۶-۲. آزمایش مقاومت کششی

در این پروژه آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر انجام شده است. نمونه‌ها قبل از آزمایش از حوضچه خارج شده و سطح آن‌ها خشک می‌شود. تعداد نمونه‌ها جهت آزمایش مقاومت کششی ۲۸ روزه با درصدهای مختلف الیاف فولادی در شرایط نگهداری محیط شاهد ۹ نمونه می‌باشد. شکل ۶ نمونه گسیخته شده را نشان می‌دهد.

شکل ۶: نمونه گسیخته شده در آزمایش مقاومت کششی و آزمایش مقاومت کششی (تست برزیلی)

۶-۳. آزمایش مقاومت خمشی

در این پروژه آزمایش مقاومت خمشی بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰x۱۰۰x۵۰۰ میلی‌متر انجام شده است. نمونه‌ها قبل از آزمایش از حوضچه خارج شده و سطح آن‌ها خشک می‌شود. تعداد نمونه‌ها جهت آزمایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه با درصدهای مختلف الیاف فولادی در شرایط نگهداری محیط شاهد ۶ نمونه می‌باشد. شکل ۷ نمونه گسیخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۷: نمونه گسیخته شده در آزمایش مقاومت خمشی و آزمایش مقاومت خمشی

۷. نتایج آزمایشات بتن سخت شده

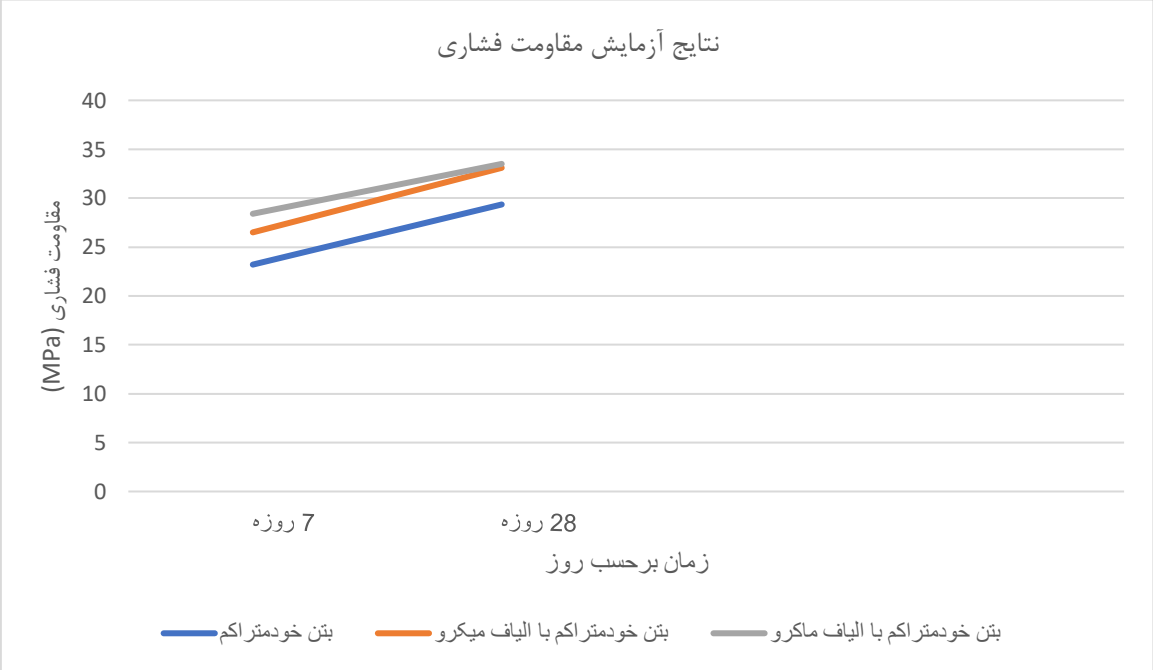
برای بتن سخت شده آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم (تست برزیلی) و مقاومت خمشی در نظر گرفته شده است که نتایج آزمایشات و بحث در مورد آن‌ها در ادامه ارائه می‌شود[۱۶-۱۴].

۷-۱. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایشات مقاومت فشاری برای بتن خودمتراکم در سنین ۷ و ۲۸ روزه در جدول ۵ و به‌صورت گرافیکی در شکل ۸ ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

گروه‌بندی	مقاومت ۷ روزه (MPa)	مقاومت ۲۸ روزه (MPa)
بتن خودمتراکم	۲۳/۲	۲۹/۳۵
بتن خودمتراکم با الیاف میکرو	۲۶/۵	۳۳/۱
بتن خودمتراکم با الیاف ماکرو	۲۸/۴	۳۳/۵



شکل ۸. نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها برحسب روز

همان‌طور که در جدول ۵ و شکل ۸ مشاهده می‌شود با اضافه کردن الیاف، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد که این افزایش در مقاومت ۷ روزه برای الیاف میکرو و ماکرو به ترتیب ۱۴ و ۲۲ درصد و در مقاومت ۲۸ روزه به ترتیب ۱۲ و ۱۴ درصد است.

۷-۲. نتایج آزمایش مقاومت کششی

نتایج آزمایشات مقاومت کششی برای بتن خودمتراکم در سنین ۲۸ روزه در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. نتایج آزمایش مقاومت کششی

گروه‌بندی	مقاومت ۲۸ روزه (MPa)
بتن خودمتراکم	۳/۴
بتن خودمتراکم با الیاف میکرو	۳/۷۵
بتن خودمتراکم با الیاف ماکرو	۳/۹

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود با اضافه کردن الیاف، مقاومت کششی نمونه‌ها افزایش می‌یابد که این افزایش در مقاومت ۲۸ روزه برای الیاف میکرو و ماکرو به ترتیب ۱۰ و ۱۴ درصد است.

۷-۳. نتایج آزمایش مقاومت خمشی

نتایج آزمایشات مقاومت خمشی برای بتن خودمتراکم در سنین ۲۸ روزه در جدول ۷-۳ ارائه شده است.

جدول ۷: نتایج آزمایش مقاومت خمشی

گروه‌بندی	مقاومت ۲۸ روزه (MPa)
بتن خودمتراکم	۴/۴
بتن خودمتراکم با الیاف میکرو	۴/۶
بتن خودمتراکم با الیاف ماکرو	۴/۷۵

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود با اضافه کردن الیاف، مقاومت کششی نمونه‌ها افزایش می‌یابد که این افزایش در مقاومت ۲۸ روزه برای الیاف میکرو و ماکرو به ترتیب ۵ و ۸ درصد است[۲۶-۲۳].

۸. تحلیل اقتصادی و بهره‌وری ساخت

بتن خودمتراکم مزایای متعددی دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به سهولت و سرعت اجرا، بهبود کیفیت سطح نهایی بتن، افزایش دوام و طول عمر سازه، کاهش نیروی کار ماهر و کاهش آلودگی صوتی اشاره کرد. مهم‌ترین مزایای آن به شرح زیر است:

- سروصدای ناشی از عملیات متراکم‌سازی بتن به‌صورت چشمگیری کاهش یافته است؛
- اجرای این نوع بتن در مقاطع با تراکم آرماتور بالا، بسیار آسان است و کیفیت ساخت هم بالاست؛
- با استفاده از این نوع بتن، می‌توان سطوحی صاف و نمایان داشت؛
- با استفاده از بتن خودتراکم، به‌دلیل شکل‌پذیری و روانی بالا، می‌توان طرح‌های مختلف معماری را پیاده‌سازی کرد؛
- چون بتن خود متراکم نیاز به ویبراتور برای ایجاد تراکم ندارد، در نتیجه نیاز به نیروی کار ماهر هم ندارد؛
- بتن SCC همگنی بالایی دارد. مسئله کم‌شدن دوام بتن به‌دلیل ناهمگنی اجزای آن، یکی از نگرانی‌ها در مورد استفاده از بتن بوده که با این نوع بتن، چون خودش متراکم می‌شود و نیاز به نیروی انسانی برای نظارت بر روند متراکم‌سازی نیست، این نگرانی برطرف شده است؛
- سرعت اجرای سازه‌های بتنی با استفاده از بتن خود تراکم بسیار بالاست که باعث می‌شود در زمان کمتری عملیات بتن‌ریزی انجام شود و کار سریع‌تر پیش برود؛
- درست است که بتن خودمتراکم از نظر قیمتی هزینه بالاتری دارد، اما در مجموع به‌دلیل این‌که زمان انجام پروژه را کاهش می‌دهد و نیاز به تجهیزات و نیروی انسانی کمتری برای تراکم، تسطیح و نظارت دارد، در کل باعث صرفه‌جویی اقتصادی می‌شود.

در کل، بتن خودتراکم مانند بتن معمولی کارایی بالا دارد؛ البته چون میزان پرکننده‌هایی مانند پودرسنگ آهک و خاکستر بادی در آن بالاست، ریزساختار متفاوت‌تری از آن‌ها دارد. بتن خودمتراکم نسبت آب به سیمان پایین‌تری در مقایسه با بتن معمولی دارد و توانایی ایجاد مقاومت بالا را نیز داراست.

بتن الیافی یا بتن تقویت‌شده توسط فیبر به‌عنوان یک مصالح نوین و پیشرفته در صنعت ساختمان، توانسته است جایگاه ویژه‌ای در پروژه‌های عمرانی و سازه‌ای پیدا کند. استفاده از انواع مختلف الیاف همچون فولادی، شیشه‌ای، پلی‌پروپیلن، کربنی و حتی آلی، موجب بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی، دوام، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، ضربه و سایش بتن شده است. هر یک از این الیاف، ویژگی‌ها، کاربردها و مزایای خاص خود را دارند که بسته به نیاز پروژه انتخاب می‌شوند. با وجود آن‌که بتن الیافی نمی‌تواند جایگزین کامل میلگردهای سازه‌ای باشد، اما به‌عنوان یک راهکار مکمل، به افزایش عمر مفید سازه، کاهش هزینه‌های نگهداری و ارتقاء عملکرد بتن در شرایط سخت کمک شایانی می‌کند. ازاین‌رو، شناخت کامل انواع بتن الیافی و نحوه استفاده از آن‌ها، می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی ساخت‌وسازهای مدرن ایفا کند.

۹. نتیجه‌گیری

با توجه به مشاهدات و بررسی‌های انجام شده از آزمایشات می‌توان به‌صورت خلاصه نتایج زیر را بیان کرد:

۱. با انجام آزمایش مقاومت فشاری مشاهده می‌شود که با افزایش درصد الیاف فولادی مقاومت فشاری افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش مقاومت در۰/۷۵ درصد الیاف فولادی ماکرو است و به نظر می‌رسد با افزایش مصرف الیاف فولادی بیش از آن نیز مقاومت فشاری افزایش می‌یابد.

۲. با انجام آزمایش مقاومت کششی مشاهده می‌شود که با افزایش درصد الیاف فولادی مقاومت کششی نیز افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش مقاومت در ۰/۷۵ درصد الیاف فولادی ماکرو است. در ضمن تأثیر الیاف فولادی در مقاومت فشاری نسبت به مقاومت کششی بیشتر قابل توجه می‌باشد.

۳. با انجام آزمایش مقاومت خمشی مشاهده می‌شود که با افزایش درصد الیاف فولادی مقاومت خمشی افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش مقاومت در۰/۷۵ درصد الیاف فولادی ماکرو است. به‌طور کلی با توجه به نتایج به‌دست آمده از این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که جایگزینی الیاف فولادی به‌جای درصدی از سنگدانه‌ها و سیمان در بتن اثر مطلوبی را بر روی مقاومت فشاری و مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن دارد.

٤. افزایش میزان آب در بتن خودمتراکم نه‌تنها نقش چندان مؤثری در روانی و کارایی بتن نداشته، بلکه باعث افزایش احتمال پدیده جداشدگی در بتن می‌شود.

٥. الیاف در بتن الیافی برای کنترل ترک‌خوردگی ناشی از انقباض پلاستیکی (plastic shrinkage) و ترک‌خوردگی ناشی از انقباض هنگام خشک‌شدن (drying shrinkage) استفاده می‌شود. الیاف همچنین نفوذپذیری بتن را کاهش داده و در نتیجه نفوذ آب را کم می‌کنند.

مراجع

[1]. Song, P. S., & Hwang, S. (2004). “Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete,” *Construction and Building Materials*, 18(9), pp. 669-673

[2]. El-Dieb, A. S. (2009). “Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers,” *Materials & Design*, 30(10), pp. 4286-4292

[3]. Momtazi, Sadr, Ali,. Tahmoursi, Behzad,. Saradar, Ashkan (2018). “The effect of different fibers on early-age shrinkage cracks and mechanical strength of high-strength concrete,” *Journal of Structures and Construction.*

[4]. Abbass, W., Khan, M. I., & Mourad, S. (2018). “Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete,” *Construction and building materials*, pp. 168, 556-569.

[5]. Setti, F., Ezziane, K., Setti, B. (2020). “Investigation of mechanical characteristics and specimen size effect of steel fibers reinforced concrete”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, pp. 1-16.

[6]. Ghanem, S. Y., Bowling, J. (2019). “Mechanical Properties of Carbon-Fiber–Reinforced Concrete,” *Advances in Civil Engineering Materials*, 8(3), pp. 224-234.

[7]. Shen, D., Shi, X., Zhang, H., Duan, X., Jiang, G. (2016). “Experimental study of early-age bond behavior between high strength concrete and steel bars using a pull-out test,” *Construction and Building materials*, 113, pp. 653-663.

[8]. Bilek,V., Bonczkova,S., Hurta, J., Pytlika, D., Mrovec, M. (2017).“Bond Strength Between Reinforsing Steel and Defferent Types of Concrete,” *Procedia Engineering*, 190, pp.243-247.

[9]. Hamdy, M., Afefy and El-Tony M. El Tony,(2015).“Bond Behavior of Embedded Reinforcing Steel Bars for Varying Levels of Transveral Pressure” *Journal of Performance of Constructed Facilities*,© ASCE, ISSN 0887-3828/04015023(10).

[10]. Başpınar, M.S., Ergün, A., Kürklü, G. (2016). “The effects of material properties on bond strength between reinforcing bar and concrete exposed to high temperature,” *Construction and Building Materials*, 112, pp. 691-698.

[11]. Jones, J., Ramirez, J. A. (2016). ”Bond of reinforcement in high-strength concrete,” *ACI Structural Journal*, 113(3), p. 549.

[12]. ACI 318-19 (2019). *Building code requirements for structural concrete and commentary*, Farmington Hills, USA.

[13]. ASTM C494, (2011). *Standard specification for chemical admixtures for concrete*, Annual Book of ASTM Standards.

[14]. ASTM A615, (2016). *Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement*, (ASTM A615/615M-16), ASTM International, West Conshohocken PA. 2016.

[15]. ASTM A370, (2014). *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*.

[16]. RILEM 7-II-128. RC6: (1994). *Bond Test for Reinforcing Steel*, 1. Pull-Out Test. RILEM technical recommendations for the testing and use of construction materials, E & FN Spon, U.K., pp. 102-105.
[17]. ASTM C192, (2018). "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory," *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
[18]. ASTM International Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates (2014). "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens," *ASTM International*.
[19]. ASTM C496. *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylinderical Concrete*, Speciment.
[20]. ASTM C1609, (2006). *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete* (using Beam with Third-point Loading).
[21]. ASTM, C642, (2006). *Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*, Annual book of ASTM standards, 4, 02.
[22]. EFNARC (2005) *Specification and Guidelines for Self-Compacting.*
[23]. FIP. The International Federation for Structural Concrete, (2000). FIB Bulletin No. 10: Bond of reinforcement in concrete. Lausanne, Switzerland, 434.
[24]. CEB-FIP, *Model Code 1990*, London, (1993).
[25]. Canadian Standards Association. (2004). *Design of Concrete Standards for Buildings*, Rexdale, Ontario, Canada, (CSA) CAN3-A23.3.
[26]. Japan Society of Civil Engineers. (2007). *Standard Specification for Concrete Structure*.