یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

مروری بر قابلیت‌های بتن خودتراکم الیافی

مصطفی نظری فرخی(نویسنده مسئول)[۱]، حبیب همت‌پوری فرخی[۲]

[۱]دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد mostafanazarifarokhi۱۹۹۵@yahoo.com

[۲] دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان habibanco@yahoo.com

چکیده

بتن خودتراکم یکی از دستاوردهای نوین تکنولوژی می‌باشد که سابقه‌ی استفاده از آن به دهه‌ها قبل برمی‌گردد. این بتن به دلیل تراکم تحت اثر وزن خود، مزایای بسیاری از جهت عدم نیاز به عملیات تراکم در حین بتن‌ریزی و پر کردن قالب دارد. هدف از انجام پژوهش حاضر، مروری بر قابلیت‌ها و موارد استفاده از بتن خودتراکم الیافی و مزایا و معایب استفاده از آن است. در این تحقیق، با انجام مطالعات کتابخانه‌ای از پژوهش‌های پیشین و بررسی و مطالعه‌ی مفاهیم کلیدی در حوزه‌ی بتن‌های خودمتراکم مسلح شده با الیاف فولادی، مطالب مفیدی گردآوری شده است. در نهایت از بررسی و مطالعه‌ی پژوهش‌های اینگونه جمع‌بندی شد که الیاف فولادی، تأثیر مثبتی بر خصوصیات مکانیکی بتن و افزایش شکل‌پذیری دارد. همچنین موجب می‌شود سرعت امواج آلتراسونیک کاهش یابد، و با افزایش میزان جذب انرژی، عمق نفوذ در آزمایش ضربه کم شود.

واژه‌های کلیدی

بتن، الیاف، بتن خودتراکم الیافی

۱. مقدمه

بتن از جمله پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در دنیا شناخته شده است [۱]. امروزه بتن در پروژه‌های مختلف با درجه اهمیت متفاوت، از یک ساختمان مسکونی در مساحت کم تا پروژه‌های عظیم و زیربنایی مانند نیروگاه اتمی، سدها و تونل‌های آبرسانی، اسکله‌ها، پل‌ها و ... که به عنوان سرمایه‌های ملی هر کشوری تلقی می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. در سازه‌های بتنی برای رسیدن به مقاومت مورد نیاز و کاهش هوای درون بتن و تخلخل، بتن باید به روش‌های مختلف متراکم شود. با توسعه روزافزون کارهای بتنی و کمبود نسبی کارگر ماهر و یا سهل‌انگاری و هزینه‌بر بودن ویبره بتن یا در مواردی که تراکم میلگرد زیاد است و یا امکان دسترسی کامل به ویبره کردن در المان‌هایی از سازه همچون دیوار برشی و ستون‌ها که هم تراکم میلگرد زیاد است و هم ابعاد مقطع بتن‌ریزی کوچک می‌باشد دشوار است، لذا عملیات تراکم بتن به‌درستی صورت نگرفته و در نهایت مشخصات مکانیکی مطلوب بتن حاصل نمی‌گردد. لذا ساخت بتنی بدون نیاز به ویبره زدن و با قابلیت خودتراکمی بدون افت در مقاومت، روانی و یا جداشدگی راه‌حلی مناسب برای این معضل به‌نظر می‌رسد [۱].

در این راستا در بسیاری از پروژه‌ها، اعم از مسکونی و صنعتی، از بتن‌های از نوع خودتراکم استفاده می‌شود. نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که وجود الیاف فولادی موجب افزایش مقاومت کششی و مدول الاستیسیته در بتن می‌شود. همچنین انبساط حرارتی بتن الیافی، بیشتر از بتن معمولی است. طبق نتایج کلی بدست آمده از این تحقیقات، الیاف فولادی و الیافPP تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارد. وجود الیاف فولادی در بتن باعث بهبود مقاومت کششی بتن می‌گردد [۳].در این مقاله با توجه به اهمیت کاربرد بتن خودتراکم و تأثیر مثبت الیاف بر خصوصیات مکانیکی بتن، به بررسی مروری بتن خودتراکم الیافی، خصوصیات، مزایا و معایب و همچنین نگاهی بر تحقیقات پیشین بر این نوع بتن پرداخته می‌شود.

۲. بتن خودتراکم

بتن خودتراکم[۱]، بتنی است با کارایی بالا که بدون نیاز به متراکم‌سازی و فقط تحت اثر وزن خود درون قالب حرکت می‌کند و با عبور از مش‌بندی آرماتور، قالب را فرا می‌گیرد. در این نوع بتن هرگونه ناپایداری ازجمله جداشدگی دانه‌ها رخ نمی‌دهد. در بتن‌ریزی سدها و مکان‌هایی که تراکم آرماتور بالاست و متراکم کردن بتن مشکل است و یا دسترسی مستقیم برای تراکم بتن نیست، استفاده از بتن خودتراکم کارآمد خواهد بود. همچنین در مواردی که محل بتن‌ریزی به‌صورت اشکال هندسی پیچیده نظیر قوس‌های بتنی و دیگر اشکال باشد بتن خودتراکم بهترین نوع بتن برای استفاده می‌باشد.

بتن خودمتراکم بایستی دو ویژگی سیالیت مطلوب و لزجت کافی را دارا باشد، به این علت که علاوه بر سیالیت لازم در این نوع بتن، برای جلوگیری از جداشدگی سنگدانه‌ها در مسیر عبور بتن از موانع و رخنه‌دادن بریدگی ملات بتن و توقف جریان بتن، لزجت مناسب لازم است. از دیگر موارد کاربرد این نوع بتن می‌توان به بتن‌ریزی در زیر آب در پروژه‌های ساحلی و سکوهای نفتی و... اشاره کرد [۴].

۱،۲. مزایای بتن خودتراکم

با توجه به خصوصیات بتن خودتراکم در فاز تازه و سخت‌شده و همچنین مزیت‌های فنی و اقتصادی، استفاده کاربردی از این نوع بتن رو به فزونی است. ازجمله ویژگی‌های مثبت بتن خودتراکم، که می‌توان به عنوان مزایای این بتن برشمرد به شرح ذیل است [۶]:

۱. کاهش آلودگی صوتی ناشی از بتن‌ریزی
۲. عدم نیاز به تراکم دستی و کاهش هزینه‌ها
۳. عدم نیاز به نیروی کار ماهر
٤. کاهش خطای انسانی در عملیات بتن‌ریزی
٥. تسریع در زمان مورد نیاز بتن‌ریزی
٦. کاهش حوادث احتمالی در حین بتن‌ریزی و عملیات تراکم
۷. کاهش نقاط بتن‌ریزی و به سبب آن کاهش جابجایی تجهیزات بتن‌ریزی
۸. امکان استفاده از آرماتوربندی متراکم‌تر و اشکال هندسی بتنی پیچیده با توجه به استفاده از بتن خودتراکم

---

۱. Self-Consolidating Concrete

۹. ایجاد سطوحی صاف و عاری از ترک و عدم رخداد پدیده‌ی آب‌افتادگی در بتن.
۱۰. کاهش نفوذپذیری به علت وجود حجم بالای ریز ذرات و بتن همگن [۷].
۱۱. افزایش طول عمر قالب‌ها با حذف ویبره دستی [۸]،[۹].
۱۲. تسریع در کسب مقاومت اولیه و امکان بهره‌برداری سریع از سازه [۱۰].
۱۳. رسیدن به مقاومت بالاتر به علت تراکم بهتر.
۱۴. کاهش مصرف انرژی به دلیل عدم استفاده از ویبراتور.
۱۵. شکل‌پذیری بهتر به سبب پایین‌تر بودن مدول الاستیسیته نسبت به بتن معمولی [۱۱].

۲،۲. معایب بتن خودتراکم

پیش‌تر درمورد مزایای بتن خودتراکم صحبت کردیم. این نوع بتن با وجود مزایای زیادی که دارد و می‌تواند در امور عمرانی مفید باشد، دارای معایبی نیز هست. محدودیت‌ها و ضعف‌های بتن خودتراکم را می‌توان در موارد زیر بیان نمود:

۱. در ساخت بتن خودتراکم در قیاس با بتن معمولی باید دقت و مهارت بیشتری دخیل باشد. در صورت عدم دقت و مهارت کافی در ساخت این نوع بتن، بتن با کیفیت مطلوبی تولید نشده و مشکلات فنی عدیده‌ای پدید خواهد آمد.
۲. در صورتی که در ساخت بتن خودتراکم از پودر سنگ و پرکننده‌ی آهکی استفاده شود، مقامت کمتری را در برابر حمله سولفات‌ها خواهیم داشت.
۳. در بتن خودتراکم به دلیل مصرف پرکننده‌ها و همچنین نسبت آب به سیمان پایین، مقاومت در برابر آتش‌سوزی نسبت به بتن معمولی که با ویبره متراکم می‌شود کمتر است.

۳،۲. کارایی بتن خودمتراکم

منظور از خودتراکم شوندگی، توانایی بتن برای جریان یافتن تحت شتاب ثقل بعد از پمپاژ و قابلیت پرکردن فضای قالب و بدست دادن بتنی با کیفیت، صاف و یکنواخت است. این تعریف از نظر کارایی قابل بیان است [۱۲].
به طور کلی می‌توان خصوصیات بتن تازه خودتراکم را به سه دسته‌ی قابلیت جریان و عبور[۱]، قابلیت پرکنندگی[۲] و قابلیت پایداری یا مقاومت در برابر جداشدگی[۳] تقسیم کرد.

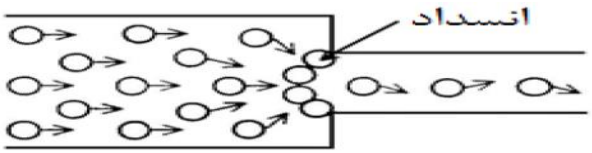
۱،۳،۲. قابلیت جریان و عبور

قابلیتی است که به واسطه‌ی آن بتن تحت اثر وزن خود جریان پیدا می‌کند و از میلگردهای متراکم عبور کرده بی آن‌که اسناد و قفل‌شدگی رخ دهد. عامل تأثیرگذار بر این قابلیت تنش تسلیم یا همان تنش جاری‌شدگی است و هرچه میزان تنش تسلیم بتن تازه کم باشد، بتن راحت‌تر جریان می‌یابد. تنش جاری‌شدگی عبارت است از بیشینه تنشی که باید به بتن اعمال شود تا بتن جریان یابد. تنش تسلیم بتن تازه نیز خود متاثر از اصطکاک درونی بین اجزای بتن و خمیر سیمان است که از آن می‌توان به عنوان لزجت بتن یعنی عامل مقاومت کننده در برابر جریان یاد کرد [۱۳]. اگر تنش تسلیم و لزجت بتن بیش از اندازه کاهش یابد، سنگدانه‌ها تحت اثر وزن خود ته‌نشین می‌شود و خمیر سیمان نمی‌تواند سنگدانه‌ها را نگه دارد. در این حالت بتن همگنی خود را از دست می‌دهد. لازم به ذکر است که تنش جاری‌شدگی در به جریان انداختن سنگدانه و لزجت در روانی و سرعت حرکت سنگدانه‌ها در خمیر سیمان بعد از شروع جاری‌شدن تأثیر دارند [۱۳].

---

۱ . Passing ability
۲ . Filling ability
۳ . Resistance to segregation

لازم به ذکر است که در بتن خودتراکم ممکن است در مسیر حرکت بتن با پدیده‌ی انسداد روبرو شویم. انسداد در بتن خودتراکم زمانی رخ می‌دهد که یا حداکثر اندازه ذرات سنگدانه بسیار بزرگ باشد و یا میزان درشت‌دانه در بتن بسیار زیاد باشد. انسداد بیشتر در مقاطعی از بتن‌ریزی اتفاق می‌افتد که ما با یک بازشو مواجه هستیم. زمانی که حداکثر اندازه ذرات بسیار بزرگ باشد، این ذرات بزرگ در دریچه‌ی بازشو تجمیع شده و از عبور روان بتن جلوگیری می‌کند. در مورد دوم رخداد انسداد یعنی میزان درشت‌دانه بسیار زیاد باشد، آسان‌تر شکل می‌گیرد. در شکل (۳-۱) رخداد پدیده‌ی انسداد نشان داده شده است [۱۲]:



شکل ۱. پدیده انسداد

۲،۳،۲. قابلیت پرکنندگی

قابلیت پرکنندگی عبارت است از توانایی بتن خودتراکم برای تغییر شکل در برخورد با شبکه‌ی آرماتوربندی متراکم به صورتی که قالب به طور کامل و یکنواخت پر شود و سطحی صاف را بدست دهد. عامل مؤثر بر این قابلیت کاهش اصطکاک بین ذرات بتن است. این کاهش اصطکاک ذرات داخلی بتن را می‌توان با انتخاب سنگدانه های گرد گوشه میسر ساخت. این عمل سبب لغزش راحت‌تر سنگدانه‌ها روی هم شده و اصطکاک بین سنگدانه‌ها کاهش می‌یابد. راه دیگر کاهش دادن اصطکاک بین ذرات، کاهش میزان سنگدانه و افزایش خمیر سیمان است. بدیهی است برای داشتن خمیر سیمانی با قابلیت تغییر شکل مناسب استفاده از فوق روان‌کننده الزامی می‌باشد. اثر فوق روان‌کننده بر بتن به این صورت است که تنش تسلیم و لزجت خمیر سیمان را پایین آورده که این امر یعنی سرعت جریان بتن افزایش می‌یابد و از اصطکاک بین ذرات کم می‌شود و بتن قابلیت تغییر شکل بهتری خواهد داشت [۱۳].

بطور خلاصه ویژگی‌های زیر برای رسیدن به قابلیت پرکنندگی مناسب بتن خودتراکم قابل بیان است:

- پایین بودن اصطکاک میان ذره‌ای
- خمیر با توانایی تغییر شکل عالی

۳،۳،۲. قابلیت پایداری

عبارت است از قابلیتی که تحت آن بتن خودتراکم در اثر انواع جداشدگی‌ها پایداری خود را حفظ می‌کند. این قابلیت در مراحل ساخت، حمل، بتن‌ریزی و تراکم یکپارچگی بتن را حفظ می‌کند. از جمله جدا شدگی‌هایی که در بتن تازه ممکن است اتفاق بیفتد می‌توان به آب انداختن بتن، جداشدن خمیر سیمان از بتن و جداشدن سنگدانه درشت در حین بتن‌ریزی که منجر به بروز پدیده‌ی انسداد می‌شود، اشاره کرد. یکی از جداشدگی‌هایی که ممکن است در بعد از عملیات بتن‌ریزی پیش آید ته‌نشین شدن سنگدانه‌ها است. جداشدگی دیگری که در مسیر استفاده از بتن خودتراکم ممکن است رخ دهد توزیع غیریکنواخت حفره‌های هوا می‌باشد [۱۳]. برای این‌که بتن خودتراکم در برابر جداشوندگی از یکپارچگی مطلوبی برخوردار باشد می‌توان فاصله بین ذرات جامد را کاهش داد. راه دیگر به حداقل رسانیدن آب انداختگی بتن است. برای کم کردن فاصله ذرات جامد بتن از هم، بایستی اقداماتی از قبیل استفاده از لزج‌کننده، پایین آوردن نسبت آب به مواد پودری، استفاده از سنگدانه‌هایی با ابعاد کوچکتر از حداکثر اندازه سنگدانه‌های مصرفی و کم کردن میزان سنگدانه‌های مصرفی را نام برد. همچنین برای پایین آوردن میزان آب اندختگی در بتن می‌توان به مواردی چون کم کردن نسبت آب به سیمان، استفاده از مواد پودری با سطح مخصوص بالا و نیز استفاده از انواع لزج‌کننده‌ها اشاره کرد [۱۲].

۳. پروژه‌های اجرا شده بتن خودمتراکم

سازه‌های زیادی با استفاده از بتن خودتراکم ساخته شده‌اند که دال بر کاربرد آسان و مفید این نوع بتن می‌باشد. در ادامه به بیان نمونه‌هایی از این سازه‌ها در سطح ایران می‌پردازیم. در ایران استفاده از بتن خودتراکم در ساخت سازه‌های بزرگ موفقیت بسیار خوبی داشته است. در ذیل به بیان چند نمونه از این سازه‌ها خواهیم پرداخت [۱۴].

تونل شهید سلیمانی: در ساخت این پروژه، در بخش لایه سطحی تونل، ابتدا نیم‌مقطع بالایی بتن‌ریزی شده؛ سپس نیم‌مقطع پایینی به قسمت بالایی وصل شده است. به دلیل عدم دسترسی لازم به قسمت پشت نیم‌مقطع پایینی برای ویبره و تراکم بتن، برای ساخت این قسمت از بتن خودتراکم استفاده شده است. تونل شهید سلیمانی درسال ۱۳۸۵ به عنوان پروژه‌ی برتر بتنی کشور شناخته شد.

تونل توحید: در پروژه تونل توحید، در اجرا لاینینگ جداره تونل از بتن خودتراکم استفاده شده است.

پایه‌های ضربدری برج میلاد: از دیگر پروژه‌های داخلی که با استفاده از بتن خودتراکم ساخته شده‌اند می‌توان به پایه‌های ضربدری برج میلاد اشاره کرد. در این پروژه به دلیل شکل خاص و تراکم شبکه‌ی میلگردی، استفاده از بتن خودتراکم الزامی بود.

گنبد مصلی تهران: در ساخت مصلی بزرگ تهران، در قسمت گنبد، چون ضخامت گنبد کم و میلگردهای مسلح کننده متراکم بودند، بتن خودتراکم بهترین انتخاب برای ساخت این بخش از سازه بود.

شکل ۲. تونل شهید سلیمانی

شکل ۳. تونل توحید

شکل ۴. پایه‌های ضربدری برج میلاد

شکل ۵. گنبد مصلی تهران

۴. الیاف فولادی

از گذشته تا کنون برای مسلح کردن مصالح ساختمانی با رفتار ترد، از انواع الیاف استفاده می‌کردند. برای مثال برای مسلح‌کردن آجر از کاه و برای مسلح کردن ملات از موی اسب استفاده شده است. با گذشت زمان و پیشرفت تکنولوژی الیاف‌های نوظهوری مورد استفاده قرار گرفت. از جمله این الیاف‌ها می‌توان به الیاف آزبست اشاره کرد، اما به علت ایجاد مشکلات زیست محیطی منسوخ شد [۱۵].

از جمله االیاف‌های پرکاربرد در عصر حاضر می‌توان الیاف فولادی را نام برد. الیاف فولادی از فولاد کم کربن سرد نورد شده تشکیل شده است. در ادامه ابتدا به بررسی انواع الیاف پرداخته و سپس توضیحات مفصلی در مورد الیاف فولادی ارائه خواهد شد.

۱،۴. انواع الیاف

موسسه بین‌المللی بتن آمریکا[۱] چهار زیرمجموعه برای کامپوزیت‌های الیافی بر اساس انواع مختلف مواد ارائه داده است:

۱. بتن مسلح شده به الیاف فولادی (SFRC) ۲. بتن مسلح شده به الیاف شیشه‌ای و فایبرگلاس (GFRC)

---

۱. American Concrete Institute

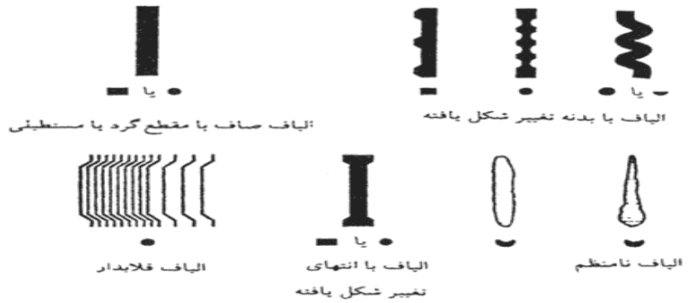
۳. بتن مسلح شده به الیاف مصنوعی (SNFRC) ٤. بتن مسلح سده به الیاف طبیعی (NFRC) [۱۶].

۲،۴. انواع الیاف فولادی

الیاف‌های فولادی را بر حسب شکل ظاهری می‌توان به پنج دسته تقسیم نمود:

۱. الیاف فولادی با بدنه‌ی صاف و سطح مقطع دایروی یا مستطیلی
۲. الیاف فولادی با بدنه‌ی تغییر شکل یافته
۳. الیاف فولادی با انتهای تغییر شکل یافته
٤. الیاف فولادی دو انتها قلاب
۵. الیاف فولادی نامنظم در طول

در شکل زیر تصویری از انواع الیاف فولادی قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۶. انواع الیاف فولادی

۳،۴. مشخصات الیاف فولادی

در ادامه، به بیان مشخصات الیاف فولادی می‌پردازیم.

۱،۳،۴. هندسه، شکل ظاهری و اندازه

هرچه الیاف دارای قطر کمتری باشد، سطح جانبی بیشتری در واحد حجم دارد. با توجه به موضوع بیان شده، الیاف با سطح مقطع پایین‌تر، بازدهی بهتری نسبت به الیاف با سطح مقطع بزرگ دارد. بنابراین بایستی نسبت طول به قطر الیاف به حد کافی بزرگ باشد که در هنگام ترک‌خوردن بتن، الیاف به بیشینه مقاومت کششی خود نزدیک شده باشد. اما به دلیل پخش ناهمگن الیاف در بتن، ارضای شرایط بیان شده در عمل ممکن نیست. الیاف‌های فولادی از نظر سطح مقطع، انواع مختلفی داشته و با مقاطع دایره‌ای، چندضلعی، نامنظم و با سطح مقطع متغییر تولید می‌شود. از نظر شکل الیاف در طول خود نیز به صورت صاف، موج‌دار(سینوسی) و قلاب‌دار موجود می‌باشد. لازم به ذکر است که الیاف فولادی در طول‌های مختلف تولید و مورد استفاده قرار می‌گیرد.
تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد که الیاف‌های دو سر قلاب نسبت به الیاف‌های سینوسی و الیاف‌های با سطح مقطع تغییریافته مقاومت بیشتری دارند. همچنین این تحقیقات شان می‌دهند که الیاف نامنظم کمینه مقاومت را دارند. این مهم ممکن است به علت پراکندگی غیریکنواخت و بروز پدیده‌ی گلوله‌شدن الیاف در بتن است [۱۷].

۲،۳،۴. نسبت ظاهری

این ویژگی به نسبت ظاهری الیاف بستگی دارد. نسبت ظاهری الیاف یعنی نسبت طول به قطر الیاف. الیاف‌های فولادی دارای نسبت طول به قطر معمول ۵۰ تا ۱۰۰ می‌باشد. شایان ذکر است که هرچه نسبت ظاهری الیاف بیشتر باشد، احتمال تجمیع حاصل از توزیع غیریکنواخت الیاف بیشتر است. همچنین از دیگر تأثیرات نسبت ظاهری الیاف بر رفتار بتن را می‌توان در روانی بتن دید. بدین معنی که

استفاده از الیاف روانی بتن را حد بالایی و تقریبا حدود ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. البته میزان کاهش روانی به نوع الیاف، شکل الیاف و حجم الیاف مصرفی بستگی دارد. این تأثیر منفی الیاف بر روانی بتن را می‌توان با استفاده از فوق روان‌کننده‌ها جبران کرد [۱۷].

۳،۳،۴. پیوستگی

منظور از پیوستگی، پیوستگی میان الیاف و خمیر سیمان است. از جمله عوامل تأثیر گذار بر چسبندگی بین الیاف و بتن، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون هریک از اجزای تشکیل‌دهنده‌ی بتن و نیز هندسه و شکل الیاف است [۱۸].

۴،۳،۴. ضریب ارتجاعی

ضریب ارتجاعی الیاف تأثیر مستقیمی بر تنش‌های تحمل شده‌ی بتن دارد. هرچه ضریب ارتجاعی الیاف بیشتر باشد، تنش‌های تحمل شده بیشتر است. البته این امر وابسته به پیوستگی الیاف و خمیر سیمان دارد [۱۸].

۵،۳،۴. ضریب پواسون

ضریب پواسون الیاف تأثیر مستقیمی بر پیوستگی میان الیاف و خمیر سیمان دارد. اختلاف میان ضریب پواسون الیاف و خمیر سیمان، تولید تنش می‌کند. این تنش‌ها عمود بر سطح پیوند الیاف و خمیر سیمان است. هرگاه الیاف تمایل به جداشدن از خمیر سیمان را داشته باشد، ضریب پواسون الیاف از ضریب پواسون خمیر سیمان بیشتر است. این حالت سبب جدایی خمیر سیمان و الیاف از هم شده و سبب گسیختگی بتن می‌شود. اما هرگاه ضریب پواسون الیاف از ضریب پواسون خمیر سیمان کمتر باشد، در بتن پیوستگی مطلوب اصطکاکی برقرار می‌شود و این سبب انسجام بتن خواهد شد [۱۹].

۶،۳،۴. قابلیت تغییرشکل پذیری

به دلیل ضعف بتن در کشش، الیاف با تحمل نیروی کششی، قابلیت باربری بتن را افزایش می‌دهد. با بیشتر شدن میزان بارگذاری، الیاف تنش‌های متحمل شده را از طریق تنش‌های پیوستگی خود با بتن، به بتن منتقل می‌کند. اگر مقاومت پیوستگی بتن و الیاف بیشتر از تنش‌های پیوستگی میان آن‌دو باشد، با ادامه‌ی بارگذاری صعودی، آنها پیوستگی خود را حفظ کرده و بتن دچار ترک‌خوردگی‌های بیشتری می‌شود. در این حالت گسیتخگی بتن با گسیختگی الیاف رخ می‌دهد. اما اگر مقاومت پیوستگی بتن کمتر از تنش‌های پیوستگی باشد، با بیشتر شدن نیروهای اعمالی الیاف از بتن جدا شده و بتن نیز تحمل نیروی کششی ندارد و درنتیجه گسیختگی در بتن رخ می‌دهد. نکات ذکر شده بیانگر تأثیر قابلیت تغییرشکل‌پذیری الیاف در مقاومت بتن است. مشخص است که بتن مسلح شده با الیاف، شکل‌پذیری بیشتری نسبت به بتن معمولی غیر مسلح دارد [۲۰].

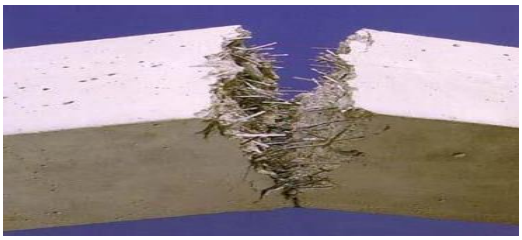
۷،۳،۴. سطح ویژه

یکی از ویژگی‌های الیاف فولادی که بر فواصل و عرض ترک‌ها تأثیر بسزایی دارد، سطح ویژه‌ی الیاف می‌باشد. هرچه سطح ویژه‌ی الیاف بیشتر باشد، فاصله‌ی ترک‌ها و عرض ترک‌ها کاهش می‌یابد. سطح ویژه‌ی الیاف‌های موجود در بتن، به سطح ویژه‌ی تک تک الیاف‌های موجود در بتن و تعداد آن‌ها در واحد حجم وابسته است [۱۹].

۴،۴. مزایای الیاف فولادی

همانطور که می‌دانیم بتن معمولی غیرمسلح به دلیل ضعف در کشش رفتاری ترد دارد در کشش ضعیف است. استفاده از بتن غیرمسلح به جهت رفتار ترد بتن، غالبا در سازه‌های وزنی مرسوم است. تا کنون روش‌های زیادی برای حل این مشکل مطرح و عملی شده است. یکی از این روش‌ها بهبود مقاومت کششی بتن با استفاده از میلگرد مسلح‌کننده می‌باشد. در این روش میلگردها در فواصل مشخص و با نظمی معین و با ارضای الزامات آئین نامه‌های بتنی در قالب جانمایی می‌شوند. اما از روش دیگری برای جبران ضعف مقاومت کششی بتن می‌توان نام برد. این روش استفاده از انواع الیاف به جای میلگرد در بتن است. به منظور ایجاد شرایط ایزوتروپی و کاهش ضعف شکنندگی

و تردی بتن، استفاده از الیاف با سطح مقطع خیلی کم و طول نسبتا زیاد که به صورت پراکنده و تصادفی در حجم بتن توزیع می‌شوند مرسوم است. از تفاوت‌های استفاده از میلگرد و الیاف در بتن می‌توان گفت برخلاف میلگردها که با نظم و فواصل خاصی در بتن استفاده می‌شوند، الیاف‌ها بدون هیچ نظم خاصی و فاصله معینی و در همه‌ی جهات در بتن پخش می‌شوند. به عبارتی توزیع الیاف در بتن به‌صورت نامنظم است. شکل ۷ توزیع الیاف فولادی را در جهات مختلف نشان می‌دهد [۲۱].



شکل ۷. توزیع الیاف فولادی در جهات مختلف

نقش الیاف در بتن تازه شامل کاهش ترک‌ها به میزان قابل توجهی و نیز کاهش جمع‌شدگی بتن تا حد نسبتا بالایی است. همچنین در بتن سخت‌شده، الیاف از پیش‌روی ترک‌های ریز و گسترش آنها جلوگیری می‌کند و در مواجه با ترک‌های بزرگ نیز با پل زدن، نیروهای موجود در ناحیه‌ی ترک‌خوردگی را در عرض ترک منتقل می‌کند. این مکانیزم سبب کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود [۲۲]. به عبارت دیگر الیاف در مواجه با ترک، به دلیل توزیع چند بعدی در بتن، به دلیل داشتن چسبندگی و اتصال خوب با بتن، از گسترش عرض ترک‌ها جلوگیری کرده و با تشکیل ریز ترک‌های زیاد قابلیت بهره‌برداری بتن را افزایش می‌دهد. از جمله دیگر ویژگی‌های الیاف می‌توان به چسبندگی بالا با بتن اشاره کرد. الیاف سبب می‌شود که بتن تحت سیکل‌های ذوب و انجماد مقاومت بیشتری داشته باشد. علت این است که الیاف نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهد. از دیگر ویژگی‌هایی که استفاده از الیاف در بتن بوجود می‌آورد مقاومت بالاتر در برابر خستگی است. از دیگر مزایای استفاده از الیاف در بتن می‌توان موارد زیر را نام برد.

- سرعت اجرای بالا
- مقاومت ضربه‌ای بالا
- افزایش باربری بعد از ترک خوردگی
- مقاومت بالا در برابر تورق و هوازدگی
- مقاومت بالا در برابر سایش
- افزایش دوام و طاقت بتن
- افزایش جذب انرژی بتن
- جلوگیری از ایجاد ترک‌های حرارتی
- افزایش مقاومت کششی بتن
- افزایش مقاومت خمشی و برشی بتن
- افزایش ظرفیت تغییر شکل نسبی
- افزایش شکل‌پذیری
- جلوگیری از آب انداختگی بتن و انتقال آب به سطح بتن [۲۲].

۵. تأثیر استفاده از الیاف فولادی بر مقاومت بتن

۱،۵. مقاومت فشاری

استفاده از الیاف فولادی، مقاومت فشاری بتن را حدودا تا ۲۵ درصد افزایش می‌دهد. در واقع تأثیر بیشتر الیاف فولادی در جذب انرژی و شکل پذیری بتن است. از آنجایی که بتن‌های پرمقاومت رفتار نسبتا تردی دارند، لذا استفاده از الیاف فولادی با درصدهای بیشتر د رشکل پذیری این نوع بتن مؤثرتر است [۲۳].

۲،۵. مقاومت خمشی

مقاومت خمشی زیاد و مقاومت بالای در برابر ترک خوردگی بتن حاوی الیاف فولادی نشان از تأثیر بالای این نوع الیاف بر مقاومت‌های خمشی و ترک خوردگی بتن است. مقاومت خمشی و ترک خوردگی بتن معمولا تحت تأثیر شکل الیاف فولادی و نسبت ظاهری الیاف است. به عنوان مثال الیاف فولادی دو سر قلاب تأثیر بیشتری بر مقاومت خمشی بتن دارند. لازم به ذکر است که تأثیر الیاف در مقاومت خمشی بتن بیشتر از تأثیر این الیاف بر مقاومت فشاری و کششی بتن می‌باشد [۲۳].

۳،۵. مقاومت ترک خوردگی

با شروع ترک‌خوردگی، الیاف از گسترش ترک با قابلیت چسبندگی خوبی که با بتن دارد جلوگیری کرده و سبب می‌شود در ادامه با افزایش بار وارده نیز نقش مقاوم خود را ایفا کند و باربری بتن را حتی در حالت ترک‌خوردگی حفظ نماید.

۴،۵. مقاومت کششی

زمانی که نمونه بتنی تحت کشش، اولین ترک را متحمل می‌شود، الیاف دو طرف ترک را اصطلاحا با پل‌زدن به هم وصل می‌کند و از بیشتر شدن عرض ترک جلوگیری می‌کند. می‌دانیم که در آزمون کشش نمونه‌های بتنی بدون الیاف، نمونه‌ی استوانه‌ای در راستای طول استوانه، به دو نیم تقسیم می‌شود. این دو نیم شدن بعد از بار نهایی وارد بر نمونه رخ می‌دهد. اما در نمونه‌های بتن الیافی استوانه‌ای، نمونه بدون دو نیم شدن و بعد از اولین ترک، با دخالت الیاف و جلوگیری از گسترش ترک، شروع به تغییر شکل می‌کند و بدون آن‌که دچار گسیختگی کامل شود آنقدر تغییرشکل می‌دهد تا سطح مقطع دایروی نمونه استوانه‌ای به سطح مقطع بیضوی تبدیل شود.

۵،۵. مقاومت در برابر پوسیدگی و زنگ زدگی

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که اثر خورندگی و پوسیدگی آب شور بر ملات سیمانی مسلح شده به الیاف با میزان ۲ درصد حجمی ناچیز بوده است. در این مطالعات نمونه‌ها بعد از ۹۰ روز قرارگیری در داخل و خارج آب نمک، اشباع شده، تغییری در مقاومت خمشی بتن الیافی دیده نشده است. آزمایشات دراز مدت در مورد دوام و پایداری بتن الیافی خورندگی خیلی کمی را در الیاف نشان می‌دهد، به‌طوری که بعد از ۷ سال تماس بتن الیافی با نمک‌های ضد یخ، هیچ اثر منفی بر مقاومت خمشی نداشته است. اما درصد زیاد کلراید محلول، باعث خوردگی الیاف در داخل و یا نزدیک سطوح تماس شده بود. تحقیقات نشان می‌دهد که قرار گرفتن ملات الیافی در معرض فرسایش جوی و در محیطی صنعتی به مدت ۱۰ سال، در مقاومت ملات اثر منفی نداشته است. به‌علاوه می‌توان گفت که خوردگی و پوسیدگی الیاف فقط محدود به قسمت سطوح خارجی نمونه می‌شود و الیاف درونی بتن درگیر هیچ پوسیدگی نمی‌شوند.

۶. کاربرد الیاف فولادی

بتن‌های مسلح‌شده به الیاف فولادی در امور عمرانی کاربردهای فراوانی دارد. همانگونه که پیشتر هم بیان شد، یکی از تأثیرگذارترین اثرات الیاف فولادی بهبود رفتار کششی بتن و جبران ضعف کششی بتن است. بتن الیافی کاربردهای فراوانی دارد که به شرح زیر است:

- مرمت و بازسازی ابنیه
- شاتکریت برای تثبیت پایداری شیروانی‌ها و شیب‌ها
- فونداسیون سازه‌ها
- کف سالن‌های با کاربرد صنعتی
- روسازی بتنی فرودگاه‌ها، بزرگراه‌ها و جاده‌ها
- تثبیت دیواره‌ی تونل معادن به صورت بتن پرتابی
- ساخت لوله‌های بتنی
- شاتکریت دیواره و سقف تونل‌ها
- سکو و بارانداز بنادر
- کف ودیواره‌ی کانال‌های آبرو
- پناهگاه‌ها و آشیانه پرندگان
- قطعه‌های پیش‌ساخته بتنی
- فونداسیون ماشین‌الات عظیم صنعتی مثل توربین‌ها
- ساخت تیرهای پیش تنیده‌ی بتنی
- تعمیرات بخش‌های آسیب دیده‌ی سازه‌هایی همچون سدها و پل‌ها به صورت بتن پرتابی [۱۴].

۷.مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی نقش الیاف بر مقاومت بتن

- خدارحمی و همکاران (۱۳۹۳) در مقاله‌ای با عنوان مطالعه آزمایشگاهی نفوذ پرتابه‌ها در اهداف پرمقاومت الیافی، عملکرد بتن‌های معمولی، بتن‌های توانمند و بتن‌های الیافی را تحت ضربه بررسی کرد. این پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که افزایش مقاومت فشاری و افزودن الیاف فولادی در کاهش عمق نفوذ و قطر حفره‌ی ایجاد شده در نمونه‌های بتنی تقریبا یکسان است، اما افزودن الیاف فولادی باعث کاهش حجم حفره‌ی ایجاد شده و جلوگیری از گسترش ترک‌ها و حفظ انبساط بیشتر نمونه شده است [۲۴].

- رخشانی‌مهر و همکاران (۱۳۹۴) تأثیر الیاف فولادی با درصدهای مختلف در خصوصیات مکانیکی بتن‌های با رده‌ی مقاومتی مختلف و بطور ویژه مقاومت ضربه‌ای را مورد کنکاش قراردادند. مشاهدات حاصل از تست‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و تست ضربه‌ی وزنه‌ی افتان نشان داد که افزودن الیاف فولادی می‌تواند منتج به افزایش چشمگیر مقاومت کششی شود. همچنین مشاهده شد با افزایش میزان الیاف فولادی مقاومت فشاری تغییر زیادی نمی‌کند. بعلاوه الیاف فولادی در بتن، مقاومت خمشی را افزایش داد. مشاهده شد حتی استفاده کمی از الیاف فولادی تأثیر قابل توجهی بر مقاومت ضربه‌ای دارد و این تأثیر از الیاف فولادی در افزایش مقاومت ضربه‌ای نمونه‌ها تا بروز اولین ترک‌ها و رسیدن به گسیختگی نهایی نمونه‌ها است [۲۵].
- سروش‌نیا و همکاران (۱۳۹۲) تأثیر الیاف فولادی را بر مقاومت خمشی و مقاومت ضربه‌ای بتن الیافی بررسی کردند. نتایج به این صورت بود تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت ضربه‌ای بتن به‌مراتب بیشتر از مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی الیافی است. به‌گونه‌ای که ۱ درصد الیاف فولادی سبب افزایش ۲۵ برابری مقاومت اولین ترک و افزایش ۴۰برابری مقاومت نهایی در تست ضربه شد. این در حالی بود که همین میزان ۱ درصد الیاف فولادی بین ۱/۵ تا ۲ برابر مقاومت خمشی و طاقت خمشی بتن الیافی را افزایش داد که این به وضوح نمایانگر تأثیر بهتر الیاف فولادی در تست ضربه بود [۲۶].
- نقیب‌دهی و همکاران ۳ نوع دال بتنی و در مجموع ۲۱ دال به ابعاد در برابر بار ضربه ناشی از وزنه افتان مورد بررسی قرار داده و با هم مقایسه کردند. نوع اول دال‌های بدون الیاف، نوع دوم دال‌های الیافی(فولادی، پلی پروپیلن و ترکیبی) که درصد الیاف در راستای ضخامت یکنواخت بوده و نوع سوم که درصد الیاف در لایه‌ها به صورت غیر یکنواخت و متغیر بودند. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف سبب افزایش قابل ملاحظه مقاومت در برابر ضربه دال‌های نوع دوم و سوم نسبت به دال‌های نوع اول می‌گردند. این مطالعه همچنین نشان داد که کارآیی دال‌های مورد آزمایش تحت تأثیر سه عامل شامل نوع الیاف، درصد الیاف و نیز موقعیت قرارگیری لایه‌ها می‌باشد. نحوه قرارگیری لایه‌ها به‌صورت FG به نحوی که لایه‌های بیرونی درصد الیاف بیشتر و لایه‌های درونی درصد الیاف کمتری دارند، سبب افزایش قابل ملاحظه جذب انرژی در مقایسه با دال‌های نوع دوم شده است و این در حالی است که کل الیاف مورد استفاده در دال‌های مذکور یکسان بوده است. همچنین نتایج حاصل از آزمایش آلتراسونیک نشان داد که سرعت پالس با افزایش میزان الیاف کاهش می‌یابد و سرعت پالس در نمونه های FG با توجه به حجم متفاوت الیاف در هر لایه متغیر است [۲۷].
- مستعلی و همکاران [۲۷] دال‌های با درصد الیاف‌های مختلف ۰.۵ تا ۲ درصد و همچنین دال‌های با ساختار لایه‌ای را مورد آزمون ضربه وزنه افتان و آزمون اصابت گلوله قرار دادند و نتیجه گرفتند که دال‌های بتنی مسلح شده به الیاف فولادی تحت تعداد ضربات بیشتری دچار ایجاد اولین ترک و همچنین ایجاد گسیختگی می‌شوند و می‌تواند سبب تخریب کمتر نمونه‌ها در آزمون اصابت گلوله شود. به‌علاوه به‌کاربردن الیاف به صورت لایه‌ای، عمق نفوذ گلوله را در بتن کاهش داده است.
- راو[۱] و همکاران (۲۰۱۰) با ساخت تیرهایی از بتن خودتراکم با درصد الیاف‌های ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد از نوع الیاف فولادی دوسر قلاب به بررسی رفتار سازه‌ای این تیرها پرداختند. این تیرها تحت آزمایش مقاومت خمشی قرار گرفتند و با استخراج نمودار بار-تغییرمکان مشاهده شد با افزایش میزان الیاف فولادی شکل‌پذیری و جذب‌انرژی این تیرها نسبت به حالت بدون الیاف به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و رفتار ترد تیرهای بتنی غیرمسلح را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد [۲۸].
- حسین[۲] و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر نوع، اندازه و درصد الیاف و ترکیب الیاف بر خواص بتن تازه و بتن سخت‌شده را بررسی کردند. بررسی‌ها نشان داد که الیاف فولادی، باعث افزایش انرژی شکست تا ۵۰ درصد می‌شود. ولی مقاومت خمشی را حداکثر ۱۰ درصد افزایش می‌دهند [۲۹].
- مک‌ری[۳] و همکاران(۲۰۱۶) در تحقیقی پیرامون مقاومت دال‌های پیوسته‌ی بتن الیافی جهت بررسی عرض ترک ناشی از آب‌رفتگی پرداختند. در این تحقیق شانزده نمونه دال بتنی در مقیاس واقعی و با حالات مختلف پیوستگی دال و عرشه و درصد الیاف‌های مختلف

---

۱. Rao
۲ . Hossain
۳ . MacRae

ساخته شد و تحت بارگذاری یکنواخت قرار گرفت. مشاهدات حاکی از این بود که در نمونه‌های ساخته شده از بتن الیافی، عرض ترک تا پنجاه درصد کاهش می‌یابد [۳۰].

- پلیزاری[۱] و همکاران(۲۰۱۶) تعداد ۱۱ دال بتنی در گروه‌های مختلفی ساختند. در گروهی از این دال‌ها از دو نوع الیاف با درصدهای مختلف و در گروهی دیگر برای ساخت از بتن معمولی استفاده شد. گروه سوم این دال‌ها آن‌هایی بودند که دارای بازشو بودند. الیاف‌های مورد استفاده در این تحقیق دونوع الیاف فولادی قلاب‌دار یکی به طول ۵۰ میلی‌متر و دیگری به طول ۳۰ میلی‌متر بود. در نمونه‌های تست شده مشاهده شد که دال‌ها رفتار خمشی تحت بارگذاری از خود نشان می‌دهند به گونه‌ای که جابجایی نهایی تقریبا سی برابر جابجایی متناظر اولین ترک‌خوردگی خواهد بود [۳۱].

۸.جمع بندی

با توجه به مطالب گردآوری شده و مداقه بر روی پژوهش‌های پیشین، موارد زیر درخصوص استفاده از الیاف فولادی در بتن‌های خودتراکم دریافت شده است.

۱- استفاده از الیاف میزان جذب انرژی را افزایش می‌دهد. این مسئله بیشتر در آزمایشات ضربه‌ای مشهود است که مقاومت ضربه‌ای را افزایش داده و عمق نفوذ را کاهش می‌دهد.

۲- مسلح‌کردن بتن با الیاف فولادی، سبب افزایش مقاومت فشاری بتن و و کاهش عمق نفوذ پرتابه می‌شود.

۳- تأثیر جذب انرژی الیاف فولادی در بتن الیافی بیشتر از سایر انواع الیاف از جمله الیاف پلیمری است.

۴- الیاف فولادی خصوصیات مکانیکی بتن ازجمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی را افزایش داده و هرچه میزان الیاف بیشتر باشد، تأثیر الیاف بر خصوصیات مکانیکی بتن نیز بیشتر است. بیشینه میزان الیاف پیشنهادی ۲ درصد می‌باشد.

۵- به منظور ساخت بتن با شکل‌پذیری بالا و کاهش تردی بتن، استفاده از الیاف از جمله الیاف فولادی راهکار مناسبی خواهد بود.

۶- افزودن ۰.۵ تا ۲ درصد الیاف فولادی می‌تواند ۲ تا ۴ درصد مقاومت اولین ترک و مقاومت نهایی بتن را افزایش دهد.

۷- لایه‌بندی کردن بتن و استفاده از الیاف با میزان متفاوت در لایه‌های مختلف (میزان بیشتر الیاف در لایه‌های بالایی) جذب انرژی بتن را افزایش می‌دهد.

۸- سرعت امواج در آزمون آلتراسونیک با افزایش میزان الیاف، کاهش می‌یابد.

۹- بتن الیافی به دلیل مقاومت در برابر حملات شیمیایی، اتصال مناسب با بتن موجود و انطباق شیمیایی، الکتریکی و ابعادی با بتن موجود در مصارف مقاوم‌سازی مناسب است.

۹. منابع

[۱] حسین محلوجی‌کیا، هرمز فامیلی، ۱۳۹۵. بررسی عملکرد ضایعات سنگبری‌ها به‌عنوان جایگزین درشت‌دانه در بتن خودتراکم، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی علاءالدوله سمنانی.

[۲] سیدمحمدرضا حجت نجفی، محمدرضا عدل‌پرور، ۱۳۹۴. تولید بتن خودتراکم با استفاده از لاشه‌سنگ‌ها و پودرسنگ کارخانجات سنگبری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه قم.

[۳] مهران شیرانی بیدآبادی، محمود اکبری، ۱۳۹۵. خواص مکانیکی بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان.

[۴] Persson, B., ۲۰۰۱. A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete, Cement and concrete Research, ۳۱, ۱۹۳-۱۹۸.

[۵] Schindler, A. K., Barnes, R. W., Roberts, J. B., Rodriguez, S., ۲۰۰۷. Properties of self-consolidating concrete for prestressed members, ACI Materials Journal, ۱۰٤, ٥۳-٦۱.

---

۱. Plizzari

[۶] Persson, B., ۱۹۹۹. Tunnel Through Water-distributing Sediments–Without Injection in Advance, Bygg & Teknik, Stockholm, ۱, ۲۸-۲۹.

[۷] Borroni, M . ۲۰۰٦.Self Compacting Concrete for high performance structures, in Proceedings of the ۲nd International Congress, ٥-۸.

[۸] Proske, T., Graubner, C.-A., ۲۰۰۲. Self-compacting concrete-pressure on formwork and ability to deaerated, Darmstadt Concrete, ۱۷, ۱-۱٥.

[۹] Zhu, W., Gibbs, J. C., Bartos, P. J., ۲۰۰۱. Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements, Cement and concrete composites, ۲۳, ٥۷-٦٤.

[۱۰] Schlumpf, J., ۲۰۰٤. Self-compacting concrete structures in Switzerland, in Tummelling and underground space technology; Underground space for sustainable urban development. Proccedings of the ۳۰th ITA-AITES World Tunnel Congress Singapore, ۲۲-۲۷.

[۱۱] RILEM, T., ۲۰۰۱. Self-compacting concrete, State-of-the-art report ۲۳, ed: Paris.

[۱۲] Feys, D., Verhoeven, R. De Schutter, G., ۲۰۰٦. Fundamental study of the rheology of Self Compacting Concrete, composed with Belgian materials, in Proceedings National Congress on Theoretical and Applied Mechanics.

[۱۳] مصطفی نظری فرخی، احمد دالوند، مسعود احمدی، ۱۳۹۷. بررسی رفتار دال‌های بتنی چندلایه با سنگدانه بازیافتی و مسلح به صفحات فولادی مشبک تحت اثر برش پانچ، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه لرستان.

[۱۴] Miyamoto, A. Nakamura, H., ۲۰۰۱. Visualization of impact failure behavior for RC slabs, Third International Conference on Concrete Under Severe Conditions of environment and loading(CONSEC'۰۱), Vancouver, Canada, ٦۹۱-٦۹۸.

[۱۵] James, I., ۱۹۹٦. American Concrete Institute(ACI) Committee; State-ofthe-art report on fiber reinforced concrete, ACI Committee report ٥٤٤,۱ R-۹٦," Detroit.

[۱۶] Johnston, C. D., ۱۹۷٤. Steel fiber reinforced mortar and concrete: a review of mechanical properties, Special Publication, ٤٤, ۱۲۷-۱٤۲.

[۱۷] Brandt, A., ۱۹۹٥. Cement-based composites: Materials, mechanical properties and performance, Kindle., E & FN SPON, London.

[۱۸] Bentur, A., Wu, S., Banthia, N., Baggott, R., Hansen, W., Katz, A., ۱۹۹٦. Fiber–matrix interfaces, in High performance fiber reinforced cement composites, ۱٤۹-۱۹۱.

[۱۹] Gopalaratnam, V. S., Shah, S. P., Batson, G., Criswell, M., Ramakishnan, V., Wecharatana, M., ۱۹۹۱. Fracture toughness of fiber reinforced concrete, Materials Journal, ۸۸, ۳۳۹-۳٥۳.

[۲۰] Song, P., Hwang, S., Sheu, B., ۲۰۰٥. Strength properties of nylon-and polypropylene-fiber-reinforced concretes, Cement and Concrete Research, ۳٥, ۱٥٤٦-۱٥٥۰.

[۲۱] Passuello, A. Moriconi, G. Shah, S. P., ۲۰۰۹. Cracking behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures and PVA fibers, Cement and Concrete Composites, ۳۱, ٦۹۹-۷۰٤.

[۲۲] سجاد صنعتی منفرد، سید حسین جاهد، ۱۳۸۲. بتن های الیافی و کاربردهای آن، دهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی عمران.

[۲۳] حسین خدارحمی، علی عزیزیان، مصطفی امینی مزرعه نو، ۱۳۹۴. مطالعه آزمایشگاهی نفوذ پرتابه ها در اهداف بتن پرمقاومت الیافی، مجله عمران مدرس، ۱۵(۳)، ۱۴۱-۱۴۸.

[۲۴] علی حیدری، فاطمه غفاری، ۱۳۹۵. بررسی خصوصیات بتن خودمتراکم پلیمری، نشریه مهندسی عمران شریف، ۳۲-۲(۳.۱)، .

[۲۵] Soroushian, P., Khan, A. Hsu, J.-W. ۱۹۹۲. Mechanical properties of concrete materials reinforced with polypropylene or polyethylene fibers, Materials Journal, ۸۹, ۵۳۵-۵٤۰.

[۲۶] Mastali, M. Naghibdehi, M. G., Naghipour, M., Rabiee, S., ۲۰۱۵. Experimental assessment of functionally graded reinforced concrete (FGRC) slabs under drop weight and projectile impacts, Construction and Building Materials, ۹۵, ۲۹٦-۳۱۱.

[۲۷] Rao, H. S., Ghorpade, V. G., Ramana, N., Gnaneswar, K., ۲۰۱۰. Response of SIFCON two-way slabs under impact loading, International Journal of Impact Engineering, ۳۷, ٤۵۲-٤۵۸.

[۲۸] Hossain, K., Lachemi, M., Sammour, M., Sonebi, M., ۲۰۱۳. Strength and fracture energy characteristics of self-consolidating concrete incorporating polyvinyl alcohol, steel and hybrid fibres, Construction and Building Materials, ٤۵, ۲۰-۲۹.

[۲۹] Gholamhoseini, A., Khanlou, A., MacRae, G. Scott, A., Hicks, S., Leon, R., ۲۰۱٦. An experimental study on strength and serviceability of reinforced and steel fibre reinforced concrete (SFRC) continuous composite slabs, Engineering Structures, ۱۱٤, ۱۷۱-۱۸۰.

[۳۰] Facconi, L., Minelli, F., Plizzari, G., ۲۰۱٦. Steel fiber reinforced self-compacting concrete thin slabs–Experimental study and verification against Model Code ۲۰۱۰ provisions, Engineering Structures, ۱۲۲, ۲۲۶-۲۳۷.