

به نام آفریننده تلاش و پشتکار



فصل بتن

دومین شماره از فصل بتن، بتن الیافی

صاحب امتیاز مجله:

شرکت ساختمانی فهاب بتن

گروه تدوین کننده:

- بخش آکادمی فهاب بتن:
- محمدجواد محمدی
- علیرضا آشناور
- طراحی و صفحه آرایی:
- ساره رستگاری
- مهناز یحیوی
- عرفان راد منفرد

سخنی از گروه آکادمی فهاب بتن:

بسیار خرسندیم که بار دیگر فرصت آن را یافته‌ایم تا در دومین شماره از مجله علمی- تخصصی با نام "فصل بتن" در کنار شما باشیم. این بار موضوعی گسترده و چالش برانگیز با عنوان "بتن الیافی" را برگزیده‌ایم؛ مبحثی که هم از منظر علمی و هم از دیدگاه اجرایی، جایگاهی ارزشمند و آینده‌ساز در صنعت ساخت‌وساز کشور عزیزمان دارد. امیدواریم حاصل تلاش این مجموعه بتواند گامی کوچک در مسیر آگاهی‌بخشی و ارتقای دانش فنی مهندسان، مجریان و پژوهشگران کشور عزیزمان باشد و راهگشای اندیشه‌های نو در این عرصه گردد.

www.fahab.ir

[@fahabbeton](https://www.instagram.com/fahabbeton)

راه‌های ارتباطی با شرکت:

۵ - ۶۶۴۳۷۴۳۴ - ۲۱

دفتر مرکزی: میدان توحید، خیابان پرچم، پلاک ۲۸، طبقه همکف، واحد ۱

۱ - ۸۸۶۸۹۹۹۰ - ۲۱

دفتر سعادت‌آباد (آکادمی): شهرک غرب، بلوار فرحزادی، نرسیده به خروجی نیایش، خیابان تربیت معلم، پلاک ۳۴

۵ - ۵۵۸۸۰۲۸۰ - ۲۱

۰۹۱۲۸۹۸۹۲۹۸

کارخانه: اتوبان سعیدی، نرسیده به آزادگان، جنب بانک ملت، پلاک ۱۳۱

پیشگفتار ۳

بخش یک
پایه‌های دانش ۱۱

بخش دو
گنجینه تجربه‌ها ۱۰۱

بخش سه
آینده سازان بتن ۱۳۵

بخش چهار
فناوری بدون مرز ۱۶۳





پیشگفتار

گزارشی از بازخوردهای نخستین مجله
معرفی دومین نسخه از فصل بتن

مقدمه

پژوهش‌های آینده را نمایان می‌سازند. اندیشه فصل بتن، اندیشه‌ای است که می‌آموزد هیچ نوآوری بدون درک عمیق از تجربه پیشین به بار نمی‌نشیند و هیچ آینده‌ای جز بر شانه‌های گذشته استوار نمی‌گردد.

اثرگذاری بتن در آینده، نه تنها در سازه‌ها و شهرهایی که بنا می‌شوند، بلکه در کیفیت زندگی، ایمنی، پایداری زیست‌محیطی و خلق چشم‌اندازهای نوین در مهندسی است. اگر روزگاری دغدغه ما مقاومت و دوام بود، امروز سخن از بتن‌های خاصی است که فراتر از مرزهای سنتی، تعریفی نو از سازندگی

بتن، این ماده پر رمز و راز صنعت عمران، تنها ترکیبی از سنگدانه، سیمان و آب نیست؛ بلکه **آینه‌ای از تاریخ سازندگی بشر و تجسم اندیشه مهندسی در گذر زمان** است. هر فصل از زندگی بتن، تجربه‌ای تازه بر کتاب دانش ما افزوده و پلی ساخته میان گذشته‌ای سرشار از آزمون و خطا با آینده‌ای مملو از نوآوری و امید.

امروز، ما در نقطه‌ای ایستاده‌ایم که **تجربه‌های دیروز، راهنمای فردای ما** شده است. شکست‌ها و موفقیت‌های گذشته در کارگاه‌ها، آزمایشگاه‌ها و پروژه‌های عمرانی، همچون چراغی روشن مسیر



به دست می‌دهند. پس این فصل از **فصل بتن**، دعوتی است به هم‌نشینی گذشته و آینده؛ جایی که تجربه، سرمایه‌ای ارزشمند است و آینده، صحنه‌ای برای اثرگذاری بیشتر بتن در صنعت، علم و زندگی.

هر حرکت علمی، زمانی معنا می‌یابد که **بازتاب آن در میان جامعه علمی و صنعتی** شنیده شود. انتشار نخستین نسخه فصل بتن نیز از این قاعده مستثنی نبود. تجربه اولین گام ما، فرصتی فراهم آورد تا پژوهاک اندیشه‌ها، نقدها و همراهی‌های جامعه مهندسی را بشنویم و دریابیم که این مسیر، چقدر نیازمند استمرار، عمق و نگاه تازه است. بازخوردهایی که از دانشگاه‌ها، کارگاه‌ها و فعالان صنعت بتن دریافت کردیم، نشان داد که این مجله توانسته است **پلی میان «دانش نظری» و «تجربه عملی»** ایجاد کند. مهندسان اجرایی، پژوهشگران و دانشجویان هر یک از زاویه‌ای به محتوای مجله نگرستند و همین نگاه‌های متنوع، ارزشمندترین سرمایه ما برای تداوم این راه شد.

اکنون، با اتکا به تجربه گذشته و اعتماد به بازخوردهای صادقانه‌ای که دریافت کرده‌ایم، فصل تازه‌ای را آغاز می‌کنیم. فصلی که تلاش دارد گامی بلندتر در جهت آگاهی، آموزش و انتقال تجربه‌های تخصصی در حوزه بتن بردارد؛

چرا که باور داریم **«دانش بدون بازخورد، ایستا می‌ماند و تجربه بدون انتقال، به فراموشی سپرده می‌شود.»**





• گزارشی از بازخوردهای نخستین مجله فصل بتن - بتن خودتراکم

نخستین شماره مجله فصل بتن با موضوع تخصصی بتن خودتراکم در اسفند ماه ۱۴۰۳ منتشر شد. این شماره به همت تیم آکادمی شرکت فهاب بتن تهیه گردید و استقبال گسترده مخاطبان از آن، ما را در مسیر انتشار منظم مجله‌ای که با هدف فرهنگ‌سازی و اطلاع‌رسانی در حوزه صنعت بتن فعالیت می‌کند، مصمم‌تر ساخت. اکنون که شماره دوم این مجله منتشر شده است، بر آن شدیم تا گزارشی از بازخوردها و نتایج انتشار شماره نخست را با شما مخاطبان گرامی در میان بگذاریم.

همچنین، با عرضه این مجله به دانشجویان، امکان آشنایی نسل جوان و مهندسان آینده با مفاهیم نوین و ارزشمند صنعت بتن فراهم گردید. در این رویداد بیش از ۲۰۰ نسخه از مجله در اختیار دانشجویان، فارغ التحصیلان و اساتید دانشکده فنی دانشگاه تهران قرار گرفت. لازم به ذکر است که در این مراسم، تمامی فارغ التحصیلان دانشکده فنی از گذشته تا به امروز حضور داشتند.



رونمایی رسمی از فصل بتن در ششمین کنفرانس ملی بتن خودتراکم که در تاریخ ۶ و ۷ خرداد برگزار شد، انجام گرفت. میزبانی این دوره از کنفرانس بر عهده دانشگاه فردوسی مشهد بود و این رویداد فرصتی کم نظیر فراهم آورد تا ضمن به اشتراک گذاری دانش و تجربه های اجرایی خود، ارتباط گسترده تری با متخصصان و علاقه مندان حوزه بتن در استان های دیگر برقرار کنیم.

به همراه انتشار نخستین کلیپ معرفی مجله، این امکان فراهم شد تا علاقه مندان بتوانند به صورت رایگان یک نسخه فیزیکی از مجله را دریافت کنند. در همان مرحله نخست، بیش از ۱۰۰ درخواست برای دریافت نسخه چاپی ثبت گردید و محتوای مجله توسط بیش از ۲۰ هزار نفر از فعالان و علاقه مندان حوزه بتن مورد توجه قرار گرفت. پس از دریافت نشانی ها، نسخه های فیزیکی برای این عزیزان ارسال شد تا امکان مطالعه و بهره برداری از مطالب آن برایشان فراهم گردد.



مجله فصل بتن نخستین بار در مراسم نودمین سالگرد تأسیس دانشگاه تهران که در تاریخ ۸ اسفند ۱۴۰۴ در دانشکده فنی برگزار شد، در دسترس مخاطبان جامعه مهندسی قرار گرفت. این رویداد فرصت ارزشمندی بود تا تجربه ها و دستاوردهای خود را که در قالب این مجله منتشر شده بود، در اختیار فارغ التحصیلانی قرار دهیم که در توسعه صنعت کشور نقشی بسزا ایفا کرده اند.

در این کنفرانس، شرکت فهاب بتن در کنار پنل ارائه فعالیت‌های خود، مجله فصل بتن را نیز در **حضور برجسته‌ترین اساتید بتن کشور** به‌طور رسمی معرفی کرد که مورد تحسین حضار و اساتید قرار گرفت. در پایان این پنل، تابلو یادبود شماره نخست مجله به‌عنوان یادگار توسط حضار و استادان دانشگاه امضا شد و به **گنجینه افتخارات شرکت فهاب بتن** افزوده گردید.



فصل بتن نه‌تنها در رویدادهای مختلف مورد توجه علاقه‌مندان قرار گرفت، بلکه در فضای مجازی نیز بازخورد چشمگیری داشت. بر اساس آمار به‌دست‌آمده، بخش‌های محبوب این مجله از نگاه مخاطبان محترم شامل موارد زیر بوده است:

- گفت‌وگو با دکتر تدین در بخش «مصاحبه با فرد علمی» با بیش از ۷۰۰۰ بازدید
- گفت‌وگو با مهندس حسین فروتن‌مهر در بخش پیشگفتار با بیش از ۶۰۰۰ بازدید
- تجربه‌های اجرایی شرکت فهاب بتن در پروژه برج‌های دوقلوی سامان‌فراز با بیش از ۳۵۰۰ بازدید
- گفت‌وگو با مهندس عراقیان در بخش «مصاحبه با فرد اجرایی» با بیش از ۲۵۰۰ بازدید
- فهرست استانداردهای بتن خودتراکم در بخش «آینده‌سازان بتن» با بیش از ۲۵۰۰ بازدید
- و موارد متعدد دیگر که در مجموع بیش از ۴۰ هزار بازدید را به ثبت رسانده است.
- تا زمان تهیه این گزارش، بیش از ۵۰۰ نسخه چاپی از مجله در اختیار علاقه‌مندان قرار گرفته و بیش از ۱۲۰۰ نسخه دیجیتال نیز از طریق وبسایت رسمی شرکت فهاب بتن دانلود شده است.
- در پایان، صمیمانه از همراهی و حمایت شما مخاطبان گرامی سپاسگزاریم و امیدواریم شماره دوم مجله فصل نیز همانند شماره نخست مورد توجه شما قرار گیرد و گامی دیگر در مسیر ارتقای دانش و فرهنگ تخصصی صنعت بتن باشد.

میان، «الیاف» به عنوان یکی از مؤثرترین راهکارها، توانست سیمای تازه‌ای از بتن را به نمایش بگذارد.

انتخاب موضوع بتن الیافی، انتخابی نمادین و کاربردی است. از یک سو نشان‌دهنده حرکت مهندسی عمران ایران و جهان به سوی مصالح پیشرفته و پایدار است، از سوی دیگر، پاسخی علمی - اجرایی به دغدغه‌های امروز صنعت ساخت؛ مقاوم‌سازی در برابر بارهای دینامیکی، افزایش دوام در شرایط سخت محیطی، و ارتقای کیفیت عملکردی سازه‌ها.

پرداختن به بتن الیافی در این مجله، تلاشی است برای آن‌که جامعه مهندسی کشور با زبانی ساده و فنی با مفاهیم، کاربردها و چشم‌اندازهای این فناوری آشنا شود؛ فناوری که نه تنها می‌تواند کیفیت سازه‌ها را بهبود بخشد، بلکه در آینده، نقش پررنگی در پایداری و نوآوری در صنعت ساخت ایفا خواهد کرد.

”معرفی دومین نسخه از فصل بتن

در گستره دانش بتن، هر موضوعی فصلی تازه در اندیشه مهندسی عمران می‌گشاید. انتخاب «بتن الیافی» به عنوان موضوع اصلی این شماره، پاسخی است به نیاز روزافزون جامعه مهندسی و صنعت ساخت‌وساز به مصالحی که بتوانند پا را فراتر از محدودیت‌های بتن معمولی بگذارند.

بتن در کنار تمام مزایای خود، ضعف‌هایی دارد که سال‌ها ذهن محققان و مجریان پروژه‌های عمرانی را به خود مشغول کرده است؛ شکنندگی، گسیختگی ناگهانی و ضعف کششی از جمله چالش‌های همیشگی این ماده پرکاربرد بوده است. همین مسئله، اندیشه افزودن مصالحی نوین به بتن را زنده کرد؛ در این





دوام بتن، کلید توسعه پایدار



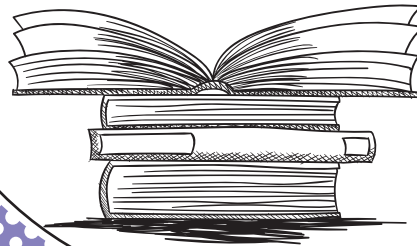
پایه های دانش

{ بخش اول }

بتن الیافی چیست؟

چرا بتن الیافی؟

چگونگی در بتن الیافی؟



۱- بتن الیافی چیست؟

۱-۱- تاریخچه و تعاریف اولیه

استفاده از الیاف برای تقویت مواد شکننده پیشینه‌ای طولانی دارد. به‌عنوان نمونه، خانه‌های سرخ‌پوستی (پوبلو) در آمریکا که حدود سال ۴۵۱ هـ ساخته شدند، از خشت‌های آفتاب‌خشک‌شده با کاه تقویت شده بودند. در گذشته از الیاف گیاهی یا موی حیوانات بهره گرفته می‌شد، اما به‌دلیل فسادپذیری، دوام کافی نداشتند. در دوران معاصر، کاربرد تجاری گسترده الیاف با اختراع فرآیند هاتشک در ۱۸۹۸ و استفاده از پنبه نسوز در خمیر

سیمان آغاز شد؛ هرچند به دلیل مخاطرات بهداشتی، از دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ جایگزین‌های دیگری معرفی گردید. همچنین در هنرهای سنتی، مانند اندودهای گچی آمیخته با موی حیوانات، بهبود ظرفیت باربری مشاهده می‌شد که تا میانه قرن بیستم رایج بود. امروزه طیف وسیعی از مواد مهندسی، از جمله سرامیک‌ها، پلاستیک‌ها و محصولات سیمانی، برای ارتقای خواص خود از الیاف استفاده می‌کنند.

انجمن بتن آمریکا (ACI CT-18) **تقویت‌کننده‌ها** را میله‌ها، سیم‌ها، رشته‌ها یا الیافی می‌داند که در

پراکنده می‌شوند. مهم‌ترین اثر آن‌ها بر منحنی نیرو - تغییرمکان است (شکل ۱-۱)، که بیانگر افزایش چقرمگی خمشی، مقاومت در برابر ضربه و دوام در برابر خستگی خمشی است.

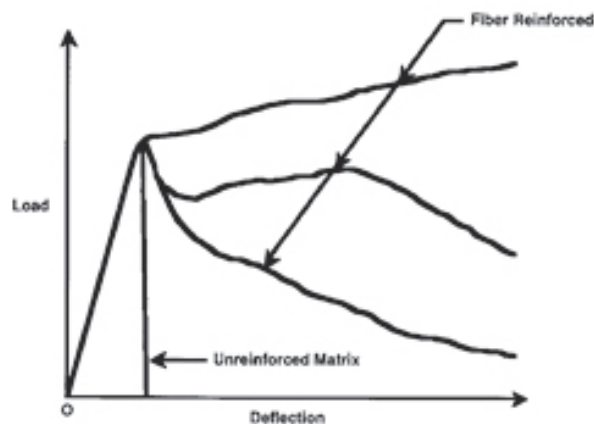
یکی از زمینه‌های اصلی پیدایش بتن الیافی، تلاش محققان برای **جلوگیری از ترک‌خوردگی بتن در زمان گیرش و بهره‌برداری** بود. در پی این تحقیقات، افزودن الیاف به بتن تازه پیشنهاد شد تا **در مرحله خمیری و پس از سخت‌شدن**، از ایجاد ترک جلوگیری کند. بنابراین، **بتن الیافی ماده‌ای کامپوزیتی برپایه سیمان است که به جای میلگردهای سنتی یا در کنار آن‌ها از الیاف بهره می‌گیرد**. این الیاف به‌طور کلی در چهار گروه فولادی، شیشه‌ای مقاوم در برابر قلیا، مصنوعی و طبیعی طبقه‌بندی می‌شوند و در اشکال و اندازه‌های متنوع تولید می‌گردند. امروزه کاربرد بتن الیافی در جهان به‌دلیل دوام بالاتر و صرفه اقتصادی آن، به‌ویژه در مقایسه با برخی مقاطع بتن‌آرمه، بسیار گسترش یافته است.

نخستین آزمایش‌ها با مفتول‌های فولادی کوتاه در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ در آمریکا انجام شد و از دهه ۷۹۱ الیاف فولادی به‌طور رسمی وارد بازار شدند. در ابتدا، به‌دلیل نبود روش طراحی مشخص، استفاده از بتن الیافی تنها به کاربردهای فرعی محدود بود و به‌کارگیری آن در تیرها و دال‌های خمشی منع می‌شد. اما با توسعه روش‌های طراحی، بتن الیافی فولادی اکنون در اجزای باربر مانند ستون‌ها، دال‌ها و سقف‌ها نیز کاربرد دارد و افق‌های گسترده‌ای برای مهندسان

ماتریس تعبیه شده و به‌طور مشترک در برابر نیروها مقاومت می‌کنند. در بتن، این تقویت‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

• **تقویت‌کننده اولیه** برای تحمل بارهای سازه‌ای،

• **تقویت‌کننده افت و حرارت** (یا ثانویه) برای کاهش ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی و تنش‌های حرارتی.



شکل ۱-۱- تفاوت منحنی نیرو-تغییرمکان در بتن معمولی و بتن الیافی

از آن‌جا که بتن غیرمسلح مقاومت کششی و ظرفیت کرنش کمی دارد، به‌طور سنتی از میلگرد یا فولاد پیش‌تنیده استفاده می‌شود. فولاد تقویتی پیوسته و طراحی‌شده در سازه به‌کار می‌رود، در حالی که الیاف به صورت ناپیوسته و تصادفی در ماتریس

ایجاد کرده است. بتن مسلح شده با الیاف فولادی از اواسط دهه ۱۹۶۰ در کف‌سازی‌ها، جاده‌ها، مواد نسوز و محصولات پیش‌ساخته به‌کار رفت. نخستین پروژه تجاری آن در سال ۱۹۷۱ در ایستگاه وزن‌کشی کامیون در اشلند اوهایو اجرا شد. از آن زمان تاکنون، پژوهش‌ها، توسعه و کاربرد صنعتی این فناوری به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است (شکل ۲-۱).



شکل ۲-۱- تصویری از اجرای بتن الیافی فولادی

است. امروزه تنوع الیاف، طیف گسترده‌ای از کاربردها را پوشش می‌دهد؛ الیاف فولادی برای کفسازی صنعتی، روسازی، تونل‌ها و اعضای تحت بارهای زیاد به دلیل مقاومت خمشی و ضربه‌ای زیاد؛ الیاف شیشه‌ای مقاوم در برابر قلیا برای نماهای معماری، قطعات پیش‌ساخته ظریف و محیط‌های خورنده؛ الیاف مصنوعی (مانند پلی‌پروپیلن) برای کنترل ترک‌های جمع‌شدگی در دال‌ها و قطعات سبک؛ و الیاف طبیعی برای پروژه‌های بوم‌سازگار، هرچند نیازمند بررسی دقیق دوام هستند.

استفاده از الیاف شیشه‌ای در بتن نخستین بار در اواخر دهه ۱۹۵۰ در شوروی سابق آزمایش شد و در اوایل دهه ۱۹۶۰ تحقیقات روی خمیر سیمان مسلح به شیشه‌های بروسلیکاتی و قلیا-آهکی-سیلیکاتی آغاز گردید. واکنش الیاف بروسلیکاتی با محیط قلیایی سیمان موجب کاهش مقاومت شد، اما ادامه پژوهش‌ها به تولید الیاف شیشه‌ای مقاوم در برابر قلیا انجامید. در سال ۱۹۶۷ مؤسسه تحقیقات ساختمانی بریتانیا با افزودن ۱۶ درصد زیرکونیا ترکیبی پایدار ساخت و در سال ۱۹۷۱ به همراه شرکت پیلکینگتون این محصول را به‌طور تجاری عرضه کرد. امروزه بتن مسلح به الیاف شیشه‌ای مقاوم در برابر قلیا (AR-Glass FRC) به‌عنوان سیستم اصلی تولید محصولات بتنی شیشه‌ای شناخته می‌شود و در دهه‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای در صنعت ساخت یافته است. بزرگ‌ترین مصرف این نوع بتن در ایالات متحده به تولید پانل‌های نمای خارجی اختصاص دارد (شکل ۳-۱).

با توسعه پژوهش‌های آزمایشگاهی و فناوری بتن، کاربرد بتن الیافی نیز ارتقا یافت. به‌عنوان نمونه، افزودنی‌های کاهنده آب موجب بهبود کارایی مخلوط‌های سفت بتن الیافی و کاهش مقاومت پیمانکاران در استفاده از آن شدند. همچنین، مصرف دوده سیلیس و تندگیرکننده‌ها امکان اجرای لایه‌های ضخیم‌تر بتن پاششی الیافی فولادی را فراهم کرده

مصلح ساختمانی به اواخر دهه ۱۹۶۰ بازمی‌گردد. در سال ۱۹۶۵، الیاف تکرشته‌ای مصنوعی در سازه‌های مقاوم در برابر انفجار به کار رفت و مشخص شد که افزودن مقادیر اندک آن‌ها انعطاف‌پذیری و مقاومت ضربه‌ای بتن را بهبود می‌دهد. هرچند این فناوری ابتدا در مقیاس محدود استفاده شد، اما از دهه ۱۹۷۰ به‌طور گسترده‌تری توسعه یافت و در بهبود توزیع و کاهش اندازه ترک‌ها مؤثر واقع گردید.

الیاف مصنوعی مورد استفاده در بتن باید دارای مستندات معتبر درباره دوام در برابر رطوبت و محیط قلیایی سیمان در طول عمر مفید سازه باشند. تاکنون انواعی همچون **آکریلیک، آرامید، کربن، نایلون، پلی‌استر، پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن** آزمایش شده‌اند. در میان آن‌ها، پلی‌اولفین‌ها (شامل پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن)، نایلون و کربن به‌عنوان الیاف بادوام شناخته می‌شوند. از میان این گروه، **الیاف پلی‌اولفین پرکاربردترین نوع در صنعت** هستند که به صورت رشته‌های خردشده به بتن یا ملات افزوده می‌شوند. طبق تعریف، این الیاف باید دست‌کم ۸۵ درصد وزنی از واحدهای اتیلن، پروپیلن یا دیگر منومرهای اولفینی را شامل شوند. الیاف **پلی‌پروپیلن**، که امروزه بیشترین کاربرد صنعتی را دارند، زیرمجموعه این خانواده محسوب می‌شوند.



شکل ۱-۳- تصویری از اجرای بتن الیافی شیشه‌ای

با گذر زمان و برای بهبود ویژگی‌های بتن الیافی، انواعی از الیاف غیر از فولاد، شیشه یا طبیعی توسعه یافت که به نام **الیاف مصنوعی** شناخته می‌شوند و حاصل تحقیقات صنایع پتروشیمی و نساجی هستند. تلاش‌های اولیه برای استفاده از الیاف مصنوعی مانند نایلون و پلی‌پروپیلن به اندازه الیاف فولادی یا شیشه‌ای موفق نبود، اما درک بهتر سازوکار تقویت و تولید نسل‌های جدید این الیاف نشان داد که هر دو نوع الیاف مصنوعی و طبیعی می‌توانند بتن را به‌طور مؤثری تقویت کنند. استفاده از الیاف مصنوعی در

۱-۲- روش عملکرد الیاف

بتن معمولی علی‌رغم دارا بودن مقاومت فشاری مطلوب، در **کشش بسیار ضعیف و ترد** است (مقاومت کششی در حدود ۱۰ درصد مقاومت فشاری). این ضعف باعث ترک‌خوردگی ناگهانی بتن تحت تنش‌های کششی می‌شود. **افزودن الیاف به مخلوط بتن راهکاری مؤثر برای کنترل ترک‌ها، بهبود ظرفیت کششی و شکل‌پذیری آن است.** بتن مسلح به الیاف با پخش الیاف در ماتریس سیمانی، روش‌های تحمل تنش پس از ترک‌خوردگی را فعال کرده و شکست ترد بتن را به رفتاری نرم و چقرمه تبدیل می‌کند.

ویژگی‌های بتن مسلح به الیاف در هر دو حالت تازه و سخت‌شده، از جمله دوام، حاصل ماهیت کامپوزیتی آن است. روش عملکرد الیاف در تقویت بتن یا ملات، از حالت الاستیک پیش از ترک‌خوردگی تا حالت نیمه‌پلاستیک پس از ترک‌خوردگی، همچنان یکی از مباحث فعال پژوهشی در حوزه فناوری بتن است. یکی از رویکردهای شناخته‌شده برای تحلیل رفتار بتن الیافی، در نظر گرفتن آن به عنوان **یک ماده کامپوزیت** است. در این دیدگاه، خواص نهایی کامپوزیت تابعی از ویژگی‌های الیاف (نظیر درصد حجمی، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و مشخصات پیوستگی با ماتریس)، خواص ماتریس سیمانی (از جمله مقاومت و مدول الاستیسیته)، و کیفیت سطح تماس بین الیاف و ماتریس است. در رویکردی نوین‌تر، تحلیل

مکانیکی بتن مسلح‌شده با الیاف بر اساس **مکانیک شکست** صورت می‌گیرد؛ به این معنا که انرژی لازم برای گسترش ترک و نیز جدایش الیاف از ماتریس، مستقیماً به ویژگی‌های کامپوزیت وابسته است. نمونه از تفاوت گسیختگی آزمون‌های بتن الیافی و معمولی در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.



شکل ۱-۴- تفاوت گسیختگی در آزمون بتن معمولی (سمت چپ) و الیافی (سمت راست)

۱-۲-۱- نقش الیاف قبل و بعد از ترک‌خوردگی

الیاف در بتن هم پیش و هم پس از ترک‌خوردگی نقش‌آفرینی می‌کنند. پیش از ترک، حضور الیاف موجب محدود شدن انتشار ریزترک‌ها می‌شود. در بتن معمولی، ریزترک‌ها در خمیر سیمان یا اطراف

نشان داده‌اند افزودن تنها ۵/۰ درصد حجمی الیاف فولادی می‌تواند انرژی شکست بتن را بیش از دو برابر کند. مقدار مشابهی از الیاف پلی‌پروپیلن نیز اثر مشابهی داشته، هرچند کارایی الیاف فولادی معمولاً بیشتر گزارش شده است. این اثر علاوه بر افزایش انرژی شکست، موجب بالا رفتن مقاومت باقیمانده نیز می‌شود؛ به گونه‌ای که بتن الیافی پس از ترک همچنان قادر به تحمل تنش است، در حالی که بتن معمولی پس از ترک تقریباً فاقد مقاومت است. بدین ترتیب، **گسیختگی بتن از حالت ترد و ناگهانی به نرم و تدریجی تغییر می‌یابد.**



شکل ۱-۵- تصویری از گسیختگی خمشی تیر بتن الیافی

در آزمایش‌های خمشی تیرهای بتن الیافی (شکل ۱-۵)، به جای یک ترک عمیق و گسیختگی کامل، شبکه‌ای از ترک‌های ریز ایجاد می‌شود که توسط الیاف مهار شده‌اند. این ویژگی امکان تغییر شکل‌های

سنگدانه‌ها تشکیل شده و با افزایش بار به ترک اصلی تبدیل می‌شوند؛ اما الیاف با پراکندگی در ماتریس همچون دوخت‌های میکروسکوپی عمل کرده و از گسترش این ریزترک‌ها جلوگیری می‌کنند. اگر مدول الاستیسیته الیاف بیشتر از ماتریس باشد، بخشی از تنش پیش از ترک‌خوردگی توسط الیاف جذب شده و تنش از ریزترک‌ها منحرف می‌شود. این پدیده موجب **افزایش جزئی مقاومت کششی و تأخیر در شروع ترک** می‌شود. برای نمونه، گزارش شده است که افزودن ۵/۰ درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن بار خمشی ترک‌خوردگی را تا حدود ۴۰ درصد افزایش می‌دهد. در سنین اولیه بتن نیز میکروالیاف پلیمری به‌طور مؤثر ترک‌های خمیری ناشی از حرارت یا جمع‌شدگی را کنترل می‌کنند. هرچند سهم اصلی الیاف در بهبود عملکرد بتن پس از ترک‌خوردگی بروز می‌کند، اما همین تأثیرات اولیه نیز در افزایش دوام و یکپارچگی بتن الیافی اهمیت دارند.

پس از ترک‌خوردگی بتن، نقش اصلی الیاف آغاز می‌شود. با تشکیل ترک، تنش کششی از ماتریس بتنی به الیاف منتقل شده و آن‌ها همچون پل، دو سوی ترک را متصل نگه می‌دارند. این پدیده پل‌زنی مانع گسترش ترک شده و باعث می‌شود بتن حتی پس از ترک‌خوردگی نیز تنش قابل توجهی را تحمل کند. در نتیجه، **چقرمگی شکست و انرژی جذب‌شده بتن الیافی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد؛** به‌طوری‌که سطح زیر نمودار تنش-کرنش در آن بسیار بزرگ‌تر از بتن معمولی است. آزمایش‌ها

بزرگ بدون فروپاشی را فراهم می‌کند و برای سازه‌های تحت بارهای ضربه‌ای، زلزله یا متناوب بسیار ارزشمند است، زیرا انرژی زیادی جذب و از شکست ناگهانی جلوگیری می‌شود.

۱-۲-۲- عوامل مؤثر بر عملکرد الیاف

مؤثر بودن الیاف در بهبود عملکرد مکانیکی ماتریس‌های شکننده به شدت به **اندرکنش بین الیاف و ماتریس** وابسته است. کنش میان الیاف و ماتریس بتن از طریق **پیوستگی سطح** تأمین می‌شود که خود شامل سه جزء اصلی است؛ **چسبندگی شیمیایی- فیزیکی، اصطکاک و مهار مکانیکی**. در مراحل اولیه پس از ساخت بتن، خمیر سیمان تازه با سطح الیاف پیوند شیمیایی و فیزیکی برقرار می‌کند (**چسبندگی اولیه**). پس از سخت‌شدن ماتریس، الیاف در جای خود قرار می‌گیرد و **نیروهای اصطکاکی در سطح تماس الیاف- ماتریس** پدید می‌آید. این اصطکاک، نیروی قابل ملاحظه‌ای برای مقاومت در برابر لغزش الیاف فراهم می‌کند. علاوه بر این دو روش، اگر الیاف دارای شکل خاص (مانند قلاب، چین‌خوردگی، تابیدگی یا برجستگی سطحی) باشند، **اتصال مکانیکی یا مهار فیزیکی** نیز به پیوستگی اضافه می‌شود. مهار مکانیکی به این معناست که الیاف به صورت مکانیکی در ماتریس قفل

می‌شوند و برای بیرون کشیده‌شدن باید تغییر شکل دهند یا ماتریس اطراف خود را بشکنند. به عنوان مثال، **الیاف فولادی قلاب‌دار همچون یک «چنگک»** در بتن گیر می‌کنند و برای بیرون کشیدن آن‌ها باید قلاب باز شود یا بتن اطراف آن گسیخته گردد. بنابراین، چنین الیافی نیاز به نیروی بسیار بیشتری برای کشیده‌شدن دارند.



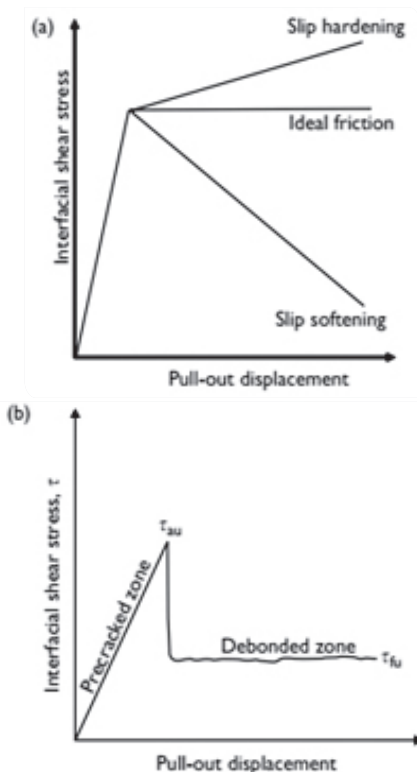
در هنگام اعمال تنش کششی و تشکیل ترک، **مقاومت در برابر لغزش الیاف از طریق همین روش‌های پیوستگی تأمین می‌شود**. ابتدا **چسبندگی شیمیایی تا حد تنش معینی برقرار است**، ولی با رشد ترک ممکن است این چسبندگی گسیخته شود.



به‌طور کلی، پیوند چسبندگی و اصطکاکی میان الیاف و ماتریس سیمانی نسبتاً ضعیف است. با این حال، در کامپوزیت‌هایی که از الیاف با سطح مقطع بالا و ماتریس‌های سیمانی متراکم و پیشرفته با نسبت آب به مواد چسباننده کمتر از $\frac{3}{4}$ استفاده می‌شود، همین اندرکنش‌ها می‌توانند نقش مؤثری ایفا کنند. در مقابل، در بتن‌های متداول با نسبت آب به مواد چسباننده بیش از $\frac{4}{10}$ و الیاف با قطر بیش از $\frac{1}{16}$ میلی‌متر، این پیوندها به‌تنهایی قادر به ایجاد تقویت مؤثر نیستند و استفاده از مهار مکانیکی اجتناب‌ناپذیر است. به همین دلیل، اشکال گوناگونی از الیاف تغییرشکل‌یافته توسعه یافته و به‌صورت تجاری به‌کار گرفته شده‌اند.

شکل و سطح الیاف تأثیر چشمگیری بر نحوه عملکرد آن‌ها در بتن دارد. الیاف صاف (با سطح بدون عاج یا قلاب) نسبت به انواع تغییرشکل‌یافته، پیوستگی کمتری با ماتریس دارند و عمدتاً از طریق اصطکاک سطحی و چسبندگی شیمیایی مهار می‌شوند. در مقابل، الیاف تغییرشکل‌یافته (مانند الیاف فولادی قلاب‌دار، موج‌دار،

پس از آن اصطکاک و مهار مکانیکی نقش عمده را در نگهداشتن الیاف ایفا می‌کنند. هرچه زبری سطح الیاف یا شکل ویژه انتهایی آن (مانند قلاب یا خم) بیشتر باشد، سهم مهار مکانیکی و اصطکاک در پیوستگی افزایش یافته و الیاف دیرتر از ماتریس جدا می‌شوند. به همین دلیل، بسیاری از الیاف فولادی با تغییر شکل‌های سطحی (مانند قلاب‌دار کردن دو سر، موج‌دار کردن یا تراشیدن سطح) تولید می‌شوند تا چسبندگی مکانیکی آن‌ها تقویت شود. در مقابل، الیاف صاف بدون برآمدگی، عمدتاً متکی بر چسبندگی و اصطکاک هستند و تمایل بیشتری به لغزش در سطوح ترک دارند. در مجموع، **پیوستگی مناسب میان الیاف و ماتریس یک عامل تعیین‌کننده در عملکرد الیاف است**، چرا که انتقال تنش از بتن به الیاف تنها از طریق این پیوند امکان‌پذیر می‌شود. اگر پیوستگی ناکافی باشد، الیاف قبل از مشارکت مؤثر در تحمل بار، از ماتریس بیرون کشیده می‌شوند و نقش تقویتی‌شان کاهش می‌یابد. در سوی مقابل، پیوستگی بیش‌ازحد قوی (مثلاً ناشی از قلاب‌های بسیار محکم) نیز ممکن است منجر به گسیختن خود الیاف به‌جای لغزش‌شان شود که این امر نیز مطلوب نیست؛ زیرا **گسیختن ترد الیاف انرژی کمتری نسبت به لغزش اصطکاکی جذب می‌کند**. تحقیقات نشان داده‌اند برای بهره‌گیری بهینه از مقاومت الیاف، باید پیوستگی الیاف-ماتریس به‌اندازه‌ای باشد که تا نزدیکی تنش تسلیم یا گسیختن الیاف مقاومت کند ولی نهایتاً قبل از پاره‌شدن الیاف، اجازه لغزش (یا همان pull-out) بدهد.



شکل ۱-۶- نمونه‌ای از منحنی لغزش - تنش برشی

تغییر شکل یافته که در آن مهار مکانیکی نقش اصلی دارد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه، تمایز میان دو مرحله اساسی (**پیش از ترک خوردگی و پس از ترک خوردگی ماتریس**) به‌وضوح دیده می‌شود. نقش الیاف، به‌ویژه در مرحله دوم یعنی پس از ایجاد ترک، بسیار حیاتی است؛ چرا که پل زنی الیاف، تداوم باربری و افزایش شکل‌پذیری بتن را تضمین می‌کند.

تابیده یا دارای زبری سطح) علاوه بر اصطکاک، از روش مهار مکانیکی بهره می‌برند که به‌طور قابل توجهی ظرفیت آن‌ها را در پل زنی ترک افزایش می‌دهد. برای نمونه، در الیاف فولادی قلاب‌دار مشاهده شده است که نیروی بیرون کشیدن حداکثر تا بیش از دو برابر حالت الیاف صاف افزایش می‌یابد و انرژی جذب‌شده در طی خروج الیاف نیز به مراتب بیشتر است. قلاب‌ها یا تغییر شکل‌های روی الیاف هنگام کشیده شدن درون بتن باز شده یا باید ماتریس اطراف خود را بشکنند؛ بدین ترتیب منحنی نیرو-تغییر مکان خروج الیاف یک مقاومت پایدارتر و طولانی‌تر را نشان می‌دهد. این امر به **ظهور تنش بعد از مقاومت نهایی بالا در بتن الیافی** منجر می‌شود که یکی از ویژگی‌های مطلوب در **طراحی اعضای بتنی شکل‌پذیر است**. به بیان ساده، الیاف صاف ممکن است بلافاصله پس از ترک خوردگی بتن شروع به لغزش کرده و تنش را سریع کاهش دهند، در حالی که الیاف قلاب‌دار با گیرداری مکانیکی، تنش باقی‌مانده بالاتری را تا کرنش‌های بزرگ‌تر تأمین می‌کنند. البته باید توجه داشت الیاف صاف معمولاً سطح مقطع یا تعداد بیشتری در واحد حجم دارند (مثلاً ممکن است قطر کمتر یا طول کوتاه‌تری داشته باشند) و در بعضی آزمایش‌ها دیده شده که همین موضوع می‌تواند در مقاومت کششی اولیه بتن مؤثر باشد.

برای تحلیل دقیق‌تر، مدل‌سازی بیرون کشیدگی الیاف صاف (در حالت هم‌راستا و مایل) به عنوان نقطه آغاز در نظر گرفته می‌شود. سپس، رفتار الیاف

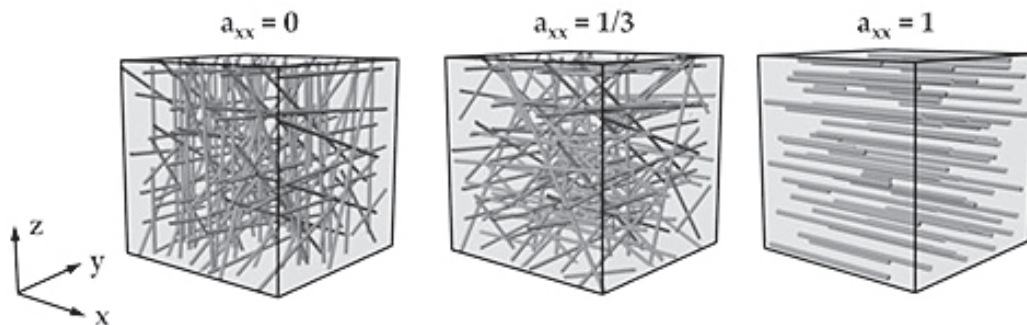
عامل به‌ویژه زمانی آشکار می‌شود که ترک ایجاد شده و الیاف نقش پل‌زنی روی ترک‌ها را بر عهده می‌گیرند. در چنین شرایطی، جهت‌گیری الیاف می‌تواند تفاوت چشمگیری در مقاومت و سختی پس از ترک‌خوردگی ایجاد کند.

نحوه قرارگیری و جهت‌گیری الیاف در داخل بتن تأثیر زیادی بر عملکرد مکانیکی بتن الیافی دارد. برخلاف میلگردهای فولادی که در جهت‌های دلخواه چیدمان می‌شوند، الیاف در بتن معمولاً به‌صورت تصادفی پخش می‌شوند. با این حال، مطالعات نشان می‌دهد الیاف هم‌جهت با تنش نسبت به الیاف با توزیع کاملاً تصادفی یا جهت‌گیری عمود بر تنش، مقاومت کششی و چقرمگی بسیار بیشتری ایجاد می‌کنند. فاکتور جهت‌گیری معیاری برای سنجش میزان تراز بودن الیاف در راستای مشخص است که کارایی مشارکت الیاف را می‌سنجد. **روش‌های ساخت و اجرای بتن** (مانند روش مخلوط‌کردن، ریختن، تراکم و حتی شکل قالب) می‌توانند جهت‌گیری میانگین الیاف

در تمامی تحلیل‌ها، سنجش پیوند الیاف و ماتریس از طریق آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی با هندسه ساده انجام می‌شود. این آزمایش امکان دستیابی به رابطه «نیروی بیرون‌کشیدگی - لغزش» را فراهم می‌کند و مبنای مدل‌سازی‌های تحلیلی در مکانیک کامپوزیت‌های سیمانی است. ایده‌آل‌ترین حالت، ارائه یک منحنی مشخصه تنش - لغزش برشی در سطح تماس الیاف و ماتریس است که طیف متنوعی از رفتارها، از لغزش نرم تا لغزش سخت را نشان می‌دهد. این موضوع در شکل ۱-۶ نشان داده شده است.

۱-۲-۳- اثرات نحوه قرارگیری الیاف

یکی دیگر از عوامل تعیین‌کننده در عملکرد الیاف در بتن الیافی، **زاویه قرارگیری الیاف نسبت به جهت بارگذاری** است. در ماتریس‌های سیمانی شکننده، اهمیت این



شکل ۱-۷- تصویری از انواع جهت‌گیری الیاف در مقطع بتن

را تغییر دهند. برای مثال، جریان بتن خودتراکم در قالب یا پمپ کردن بتن الیافی ممکن است الیاف را در جهت جریان تمایل دهد. **هرچه الیاف موازی‌تر با جهت تنش اصلی قرار گیرند، سهم آن‌ها در تحمل تنش بیشتر خواهد بود.** بنابراین، برای حصول بهترین نتایج، باید حتی‌الامکان از جهت‌گیری مناسب و یکنواخت الیاف در راستای نیروهای وارد بر عضو بتنی اطمینان حاصل کرد. شکل ۱-۷ انواع جهت‌گیری الیاف را نشان می‌دهد.

توزیع یکنواخت الیاف در سراسر حجم بتن شرطی اساسی برای بهره‌گیری کامل از ظرفیت تقویتی الیاف است. اگر الیاف در نواحی معینی تجمع کنند یا اصطلاحاً «گلوله» شوند، برخی مناطق بتن فاقد تقویت مناسب باقی می‌مانند و نقاط ضعف موضعی ایجاد می‌شود. به همین دلیل، روش‌های مناسب مخلوط کردن بتن الیافی اهمیت دارند تا الیاف به‌خوبی پخش شوند. **افزایش میزان الیاف** (مثلاً بیشتر از ۲ درصد حجمی برای الیاف فولادی) یا استفاده از **الیاف بسیار بلند** (نسبت طول به قطر بسیار بزرگ) می‌تواند **کارایی مخلوط کردن را کاهش داده و منجر به گلوله شدن الیاف** گردد. برای جلوگیری از این مشکل باید طرح مخلوط بتن از نظر کارایی (اسلامپ) و حداکثر اندازه سنگدانه‌ها بهینه شود تا فضا و روانی کافی برای پراکندگی الیاف فراهم باشد. معمولاً **توصیه می‌شود حداکثر اندازه سنگدانه در بتن الیافی کاهش یابد** (مثلاً زیر ۱۰ میلی‌متر)، چراکه درشت‌دانه‌ها می‌توانند مانع توزیع همگن الیاف شوند و جهت‌گیری تصادفی آن‌ها را برهم بزنند.

لازم به ذکر است که اگر کاهش کارایی بتن تازه (افت اسلامپ) بر اثر حضور الیاف جبران نشود، ممکن است به توزیع غیریکنواخت بینجامد؛ از این رو **استفاده از روان‌کننده‌ها یا افزایش جزیی نسبت آب به سیمان برای حفظ روانی مخلوط ضرورت می‌یابد.** در مجموع، برای دستیابی به کامپوزیت سیمانی همگن با عملکرد مطلوب، باید الیاف به‌صورت پراکنده و یکنواخت در تمام حجم بتن توزیع شوند به‌نحوی که هر مقطع بتن تعداد کافی الیاف در راستاهای مختلف داشته باشد.

در مجموع، **عملکرد مکانیکی الیاف در بتن تابع عوامل متعدد و درهم‌تنیده‌ای** است. از مهم‌ترین این عوامل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- مشخصات الیاف (شامل جنس، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته، طول و قطر یا نسبت منظر، شکل و بافت سطحی)،

- مقدار الیاف (درصد حجمی)،

- کیفیت توزیع و جهت‌گیری الیاف.

به‌طورکلی، هرچه مقاومت کششی و مدول الیاف بالاتر باشد، توان بالقوه بیشتری برای تحمل بار پس از ترک در بتن خواهند داشت. البته برای بهره‌گیری از این توانایی باید پیوستگی کافی نیز موجود باشد تا تنش واقعاً به الیاف منتقل شود. یکی دیگر از موارد تعیین‌کننده، **نسبت طول به قطر (نسبت منظر) الیاف** است؛ الیاف بلندتر (با نسبت منظر بالاتر) سطح تماس بیشتری با ماتریس دارند و توان پل‌زنی ترک بهتری

فراهم می‌کنند. با این وجود، طول بیش‌ازحد زیاد می‌تواند مشکلات مخلوط‌کردن و پراکندگی ایجاد کند و حتی موجب کاهش مقاومت شود (معمولاً نسبت منظر بهینه کمتر از ۱۰۰ توصیه می‌شود). نکته دیگر، **حجم الیاف** است که تأثیر مستقیمی بر مقاومت و ظرفیت جذب انرژی بتن دارد؛ افزایش درصد حجمی الیاف معمولاً منجر به مقاومت کششی پس از ترک و جذب انرژی بیشتر می‌شود. با این حال، از یک حدی بیشتر (مثلاً بیشتر از ۲ درصد حجمی برای الیاف فولادی)، مشکلات اجرایی از جمله افت کارایی مخلوط، تراکم موضعی الیاف و کاهش روانی شدید مشاهده می‌شود که خود می‌تواند به کاهش مقاومت منجر شود. **جنس الیاف** عامل مهم دیگری است؛ الیاف فولادی با مدول و مقاومت زیاد بیشترین بهبود را در ظرفیت باربری پس از ترک نشان می‌دهند، در حالی که الیاف پلیمری (مانند پلی‌پروپیلن یا پلی‌وینیل‌الکل) با این که مقاومت کمتری دارند، به دلیل چقرمگی ذاتی و خاصیت تغییرشکل‌پذیری خود، در جذب انرژی و کنترل ترک‌های ریز نقش به‌سزایی دارند. الیاف شیشه‌ای و کربنی نیز هر یک خواص ویژه‌ای دارند (الیاف شیشه‌ای مقاومت کششی مناسب ولی حساسیت قلیایی، الیاف کربن مدول بسیار زیاد ولی ترد و گران‌قیمت) که کاربردهای آن را در بتن محدود می‌کند. **کیفیت ماتریس بتن** نیز بی‌تأثیر نیست؛ یک ماتریس قوی‌تر (مثلاً بتن پر مقاومت یا فوق توانمند) پیوستگی بهتری با الیاف ایجاد می‌کند و می‌تواند تنش بیشتری را قبل از ترک‌خوردگی منتقل کند. اما از سوی دیگر، ماتریس بسیار سخت و ترد ممکن است

تمایل به شکست الیاف (خصوصاً پلیمری) به‌جای لغزش آن‌ها داشته باشد. برای دستیابی به بهترین عملکرد، گاهی از ترکیب چند نوع الیاف (Hybrid FRC) استفاده می‌شود تا مزایای هر کدام (مثلاً الیاف فولادی بلند برای مقاومت پس از ترک و الیاف پلیمری ریز برای کنترل ترک‌های اولیه) با هم حاصل گردد.

۱- ۳- انواع الیاف و بتن الیافی

شاخص‌ترین و متفاوت‌ترین جزء تشکیل‌دهنده بتن الیافی نسبت به بتن معمولی، الیاف است. با توجه به این که انواع متعددی از الیاف در صنعت بتن به‌صورت تجاری در دسترس هستند، نه‌تنها درک تفاوت‌ها بین الیاف و آرماتور فولادی سنتی، بلکه بین خود انواع الیاف نیز بسیار حائز اهمیت است. بنابراین، در این بخش، به بررسی الیاف مختلف و ویژگی‌های آن‌ها پرداخته می‌شود. الیاف با بافت و شکل‌های مختلف با مقادیر مصرف متنوع، عملکردهای متفاوتی در مخلوط بتن دارند. طول الیاف معمولاً بین ۶ میلی‌متر تا ۶۰ میلی‌متر متغیر است، اما گاهی الیاف طبیعی نیز می‌توانند حتی به کوتاهی ۲ میلی‌متر باشند. الیاف مورد استفاده در بتن بر اساس قطر معادل آن‌ها، طبق تعریف ACI CT-18 به دو دسته تقسیم می‌شوند:

(۱) **میکروالیاف** با قطر معادل کمتر از ۳/۰ میلی‌متر و

(۲) **ماکروالیاف** با قطر معادل برابر یا بیشتر از ۳/۰ میلی‌متر.

همچنین از نظر ساختار، الیاف می‌تواند متفاوت باشد. مثلاً الیاف شیشه‌ای مقاوم در برابر قلیا می‌توانند به صورت رشته‌های پیوسته، به‌ویژه در ساختارهای توری یا مشبک مورد استفاده قرار گیرند. الیاف عناصری جداگانه با سطح مقطع نسبتاً کوچک هستند که در خمیره بتن در حالت تازه قرار می‌گیرند. در نتیجه، به جای آن که مانند تقویت‌کننده‌های فولادی پیش از بتن‌ریزی در قالب قرار گیرند، در مرحله مخلوط کردن بتن به مخلوط اضافه می‌شوند. این موضوع باعث می‌شود که تقویت در سراسر ماتریس بتن به طور تقریباً یکنواخت پخش شود و به بخشی جدایی‌ناپذیر از بتن تبدیل گردد. **مواد الیاف مورد استفاده در بتن** شامل فولاد، شیشه مقاوم در برابر قلیا، پلیمرهای آلی (مانند پلی‌اولفین‌ها، نایلون و کربن) و منابع طبیعی است. اما، الیاف فولادی بیشترین کاربرد در بتن را دارند. بنابراین، بتن‌های الیافی با استفاده از الیاف مختلف می‌تواند عملکرد متفاوتی در شرایط مختلف داشته باشد. در ادامه مشخصات مختلف انواع الیاف و به تبع آن، بتن الیافی، ارائه می‌شود.

۱-۳-۱- بتن مسلح به الیاف طبیعی

بتن‌هایی که با الیاف طبیعی مسلح شده‌اند، تحت عنوان بتن مسلح به الیاف طبیعی

(NFRC - Natural Fiber Reinforced Concrete) شناخته می‌شوند. بسیاری از مواد مسلح‌کننده طبیعی با هزینه، انرژی پایین و با استفاده از نیروی کار محلی و دانش فنی در دسترس قابل تهیه هستند. این الیاف در تولید بتن‌های مسلح به الیاف با مقدار کم و گاهی اوقات در تولید بتن‌های مسلح به الیاف زیاد در ورق‌های نازک استفاده شده‌اند. این الیاف معمولاً به عنوان **الیاف طبیعی پردازش نشده** (UNF) شناخته می‌شوند. با این حال، الیاف طبیعی دیگری نیز موجود است که برای بهبود خواص آن‌ها پردازش شده‌اند. این الیاف از چوب از طریق فرآیندهای شیمیایی مانند فرآیند کرافت به دست می‌آیند. الیاف پالپ کرافت در فرآیندهای تولید پیشرفته مانند فرآیند هاتچک برای تولید بتن‌های مسلح به الیاف زیاد در ورق‌های نازک استفاده می‌شوند. این الیاف معمولاً به عنوان الیاف طبیعی پردازش شده شناخته می‌شوند و بتن‌های ساخته شده از آن‌ها به عنوان بتن مسلح به **الیاف طبیعی پردازش شده** (PNFRC) نامیده می‌شوند.

الیاف طبیعی پردازش نشده در مقادیر نسبتاً زیادی در بسیاری از کشورها موجود هستند و یک منبع تجدیدپذیر پیوسته به شمار می‌آیند. الیاف طبیعی پردازش نشده نسبت به برخی از انواع دیگر الیاف، انرژی و دانش فنی کمتری برای تولید نیاز دارند. از نظر تاریخی، استفاده از الیاف طبیعی خام در ساخت و ساز به طور قابل توجهی پیش از ظهور بتن مسلح معمولی بوده است. استفاده از الیاف کاه در برخی آجرها برای ساخت دیوارها و استفاده از موی اسب در ملات، نمونه‌هایی

موفقیت آمیز برای ساخت ورق های گچ پلاستر استفاده شده است. تحقیقات قابل توجهی در سوئد برای توسعه محصولات بتنی با کیفیت بالا تقویت شده با الیاف سیسال انجام شده است. این الیاف مقاوم تر از اکثر دیگر الیاف طبیعی هستند.

• **الیاف تفاله نیشکر:** نیشکر در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری کشت می شود. تفاله نیشکر باقی مانده ای است که پس از استخراج عصاره آن به دست می آید و حاوی حدود ۵۰ درصد الیاف است. خواص الیاف تفاله نیشکر بستگی زیادی به نوع آن ها دارد.

• **الیاف بامبو:** بامبو به خانواده گیاهان علفی تعلق دارد و می تواند به ارتفاع ۱۵ متر، با قطرهایی در بازه ۲۵ تا ۱۰۰ میلی متر رشد کند. این گیاه به طور طبیعی در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری رشد می کند. ساقه های خشک شده بامبو معمولاً برای ساخت سازه های موقت مانند داربست استفاده می شوند. همچنین، می توانند به شکل یک ماده تقویت کننده پیوسته برای بتن ساخته شوند. الیاف بامبو در کشش قوی هستند و می توانند به عنوان ماده تقویت کننده استفاده شوند. با این حال، آن ها ظرفیت جذب آب بالایی دارند، مدول الاستیسیته کمتری دارند و برای استخراج آن ها از ساقه ها به تجهیزات خاص نیاز است.

• **الیاف جوت:** جوت عمده تاً در هند، بنگلادش، چین و تایلند کشت می شود. این گیاه به طور خاص برای الیاف آن کشت می شود که به طور سنتی برای ساخت

از نحوه استفاده از الیاف طبیعی در گذشته هستند. فرآیندهای تولید مناسب برای تولید تجاری این الیاف در کشورهای مختلف آمریکای مرکزی، آفریقا و آسیا توسعه یافت. محصولات که با سیمان پرتلند و الیاف طبیعی پردازش نشده مانند **فیبر نارگیل، سیسال، تفاله نیشکر، بامبو، جوت، کتان و دیگر الیاف گیاهی** ساخته شده اند، برای خواص مهندسی آن ها و استفاده احتمالی در ساختمان ها، در بیش از ۴۰ کشور مختلف آزمایش شده اند. اگرچه نتایج امیدوارکننده بودند، ولی برخی از نقص ها در دوام آن ها مشاهده شد. به نظر می رسد که این نقص ها ناشی از واکنش بین ملات سیمان و الیاف و تورم الیاف در حضور رطوبت باشد.

در این بخش، خلاصه ای از نتایج تحقیقات مختلف برای تعیین خواص مکانیکی انواع مختلف الیاف طبیعی پردازش نشده ارائه می شود. شرح مختصری از برخی از الیاف طبیعی رایج در ادامه ارائه شده است:

• **الیاف نارگیل:** نارگیل بالغ دارای پوسته ای از جنس الیاف است. این بخش از نارگیل که به نام پوست شناخته می شود، شامل یک پوست سخت و مقدار زیادی الیاف است که در ماده نرم قرار دارند. الیاف می توانند به راحتی با خیساندن پوست در آب برای تجزیه ماده نرم اطراف الیاف استخراج شوند. این فرآیند که به آن "ریتنینگ" گفته می شود، در کشورهای کمتر توسعه یافته به طور گسترده ای استفاده می شود.

• **الیاف سیسال:** در استرالیا، الیاف سیسال به طور

طناب‌ها و کیسه‌ها برای حمل غلات و مواد دیگر از جمله سیمان و شکر استفاده می‌شود. الیاف جوت در کشش قوی هستند و می‌توانند در ماتریس سیمانی استفاده شوند. فرآیند به دست آوردن الیاف جوت بسیار ساده است. گیاهان بالغ قطع شده و برای مدت حدود ۴ هفته در آب خیسانده می‌شوند که پوسته آن‌ها به طور کامل تجزیه می‌شود. سپس الیاف از ساقه جدا، شسته و خشک می‌شوند.

• **کتان:** کتان یک گیاه لاغر و ایستاده است که عمدتاً برای الیاف آن کشت می‌شود. هر دو مقاومت کششی و مدول الاستیسیته کتان نسبت به سایر الیاف طبیعی بسیار بیشتر است.

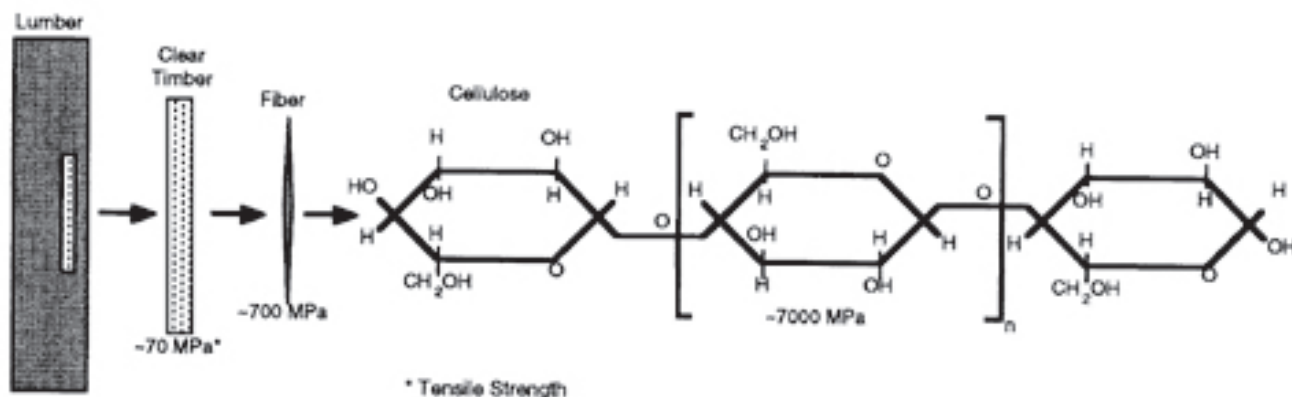
• **دیگر الیاف گیاهی:** از میان انواع مختلف الیاف گیاهی، تنها تعداد کمی از آن‌ها به عنوان مواد تقویت‌کننده بالقوه مناسب مانند علف فیل، نی آبی، موز و موسامبا شناخته شده‌اند. تحقیقات دیگری نیز برای بررسی امکان استفاده از الیاف طبیعی دیگر مانند الیاف نخل و الیاف آکوارا به عنوان مواد تقویت‌کننده بتن انجام شده است. این الیاف معمولاً به صورت دستی از ساقه گیاه استخراج می‌شوند.

الیاف طبیعی پردازش شده از دهه ۱۹۶۰ میلادی برای تولید محصولات سیمانی مسلح به الیاف نازک ورقی به صورت تجاری استفاده شده‌اند. این الیاف ابتدا به عنوان مکملی برای آریست و از اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی به عنوان تنها الیاف مسلح‌کننده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. استفاده تجربی از این الیاف به مراتب

پیش از استفاده تجاری وسیع آن‌ها بوده است. اولین آزمایش با استفاده از پالپ چوب به عنوان جایگزینی برای آریست در سیمان آریستی به دوران جنگ جهانی اول بازمی‌گردد. صنعت سیمان نروژ مجبور شد در این دوره ورق‌های سیمانی تقویت شده با پالپ چوب را برای استفاده تجاری تولید کند زیرا به دلیل جنگ قادر به تأمین آریست معمولی خود نبودند.

پردازش مواد گیاهی برای استخراج الیاف، **پالپینگ** نامیده می‌شود و منبع اصلی آن درختان هستند. در این فرآیند، پیوند بین الیاف در چوب‌های نرم و سخت شکسته می‌شود. پالپینگ به سه روش کلی **مکانیکی، شیمیایی و نیمه‌شیمیایی** انجام می‌گیرد. در روش مکانیکی، الیاف با خردکردن چوب جدا می‌شوند؛ در روش شیمیایی، چوب به قطعات حدود ۲/۵ سانتی‌متری تقسیم و در قلیاها پخته می‌شود تا مواد نگهدارنده الیاف حل شوند؛ در روش نیمه‌شیمیایی، ترکیبی از پخت شیمیایی (برای نرم کردن الیاف) و خردکردن مکانیکی به کار می‌رود. تحقیقات نشان داده‌اند اجزایی از چوب که در فرآیند شیمیایی حذف می‌شوند، در تخریب سیمان و بتن حاوی الیاف طبیعی خام نقش دارند؛ به همین دلیل، **پالپ‌های شیمیایی (کرفت)** برای تقویت سیمان مناسب‌ترند.

یک قطعه چوب سالم می‌تواند مقاومت کششی حدود **۶۹ مگاپاسکال** داشته باشد، در حالی که الیاف منفرد چوب استحکامی تا **۶۹۰ مگاپاسکال** و سلولز، ترکیب اصلی الیاف طبیعی، مقاومتی در حدود **۶۴۰۰ مگاپاسکال** دارد. چوب‌های نرم، منبع



شکل ۱-۸- ساختار چوب

ASTM C 94 و بخش‌هایی از توصیه‌های ACI 304 باشد. انجام آزمایش‌های اولیه توصیه می‌شود و نیاز به یک ایستگاه مخلوط‌کردن است. روش مخلوط‌کردن پیشنهادی این است که ابتدا سیمان همراه با آب و افزودنی‌ها برای تشکیل یک دوغاب اضافه شوند. سپس مصالح ریزدانه اضافه می‌شود. در نهایت الیاف اضافه شده و در دوغاب پخش می‌شود.

مخلوط فشرده خشک عموماً برای پروژه‌های صنعتی یا نیمه‌صنعتی استفاده می‌شود. در این نوع مخلوط، حجم الیاف استفاده‌شده تقریباً ۱۰ برابر حجم استفاده‌شده در مخلوط مرطوب است. روش مخلوط‌کردن پیشنهادی این است که الیاف در وضعیت اشباع با سطح خشک به سیمان و مصالح ریزدانه اضافه شوند و سپس مقدار بسیار کمی آب اضافه گردد. مخلوط‌کردن می‌تواند به صورت دستی انجام شود، هرچند که لازم است تا مطابق با ASTM C 94

الیاف بلند (۲ تا ۷ میلی‌متر) با عرض ۱۵ تا ۸۰ میکرون هستند؛ در حالی‌که چوب‌های سخت الیافی کوتاه‌تر و باریک‌تر تولید می‌کنند (حدود یک‌سوم تا نصف طول و عرض الیاف چوب نرم). حتی در یک گونه درخت نیز، مقاومت الیاف می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی متفاوت باشد. شکل ۱-۸ به‌طور مختصر ساختار چوب را نشان می‌دهد.

دو روش مخلوط‌کردن و اجرا برای بتن‌های مسلح به الیاف طبیعی وجود دارد:

(۱) مخلوط مرطوب و

(۲) مخلوط فشرده خشک.

در **مخلوط مرطوب**، از حجم کمی از الیاف استفاده می‌شود. مقدار آب اضافه‌شده به مخلوط باید با در نظر گرفتن مقدار زیاد آب طبیعی در الیاف طبیعی تعیین شود. روش مخلوط‌کردن باید مطابق با فرآیند

انجام می‌شود. نمونه‌های مخلوط خشک ریخته شده و پس از آن اعمال فشار صورت می‌گیرد، زیرا مقدار بسیار کم یا هیچ آبی به مخلوط اضافه نمی‌شود.

ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن مسلح به الیاف طبیعی به شدت وابسته به نوع الیاف، درصد مصرف و نحوه پیوند الیاف با خمیر سیمان است. از نظر مکانیکی، الیاف طبیعی معمولاً تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارند و در بسیاری موارد حتی باعث کاهش جزئی آن می‌شوند، هرچند در مقادیر بهینه می‌توانند اندکی بهبود ایجاد کنند. در مقابل، بزرگ‌ترین مزیت آن‌ها افزایش مقاومت کششی و خمشی پس از ترک و ارتقای شکل‌پذیری است؛ به‌ویژه به دلیل پدیده پل‌زنی ترک‌ها که مانع گسیختگی ناگهانی بتن می‌شود. مدول الاستیسیته تغییر محسوسی نمی‌کند، اما چقرمگی و ظرفیت جذب انرژی بتن به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و شکست بتن از حالت ترد به حالت تدریجی و مقاوم‌تر تبدیل می‌شود.

از نظر دوام، الیاف طبیعی ماهیتی آب‌دوست دارند و معمولاً جذب آب و نفوذپذیری بتن را افزایش می‌دهند، مگر آن که با روش‌های شیمیایی یا پوشش‌های مقاوم اصلاح شوند. در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن، وجود مقدار مناسب الیاف می‌تواند دوام بتن را بهبود بخشد. با این حال، الیاف گیاهی در محیط‌های مرطوب یا قلیایی، مستعد تخریب زیستی و شیمیایی هستند و نیازمند تمهیداتی مانند استفاده از پوزولان‌ها یا بهبودهای سطحی‌اند. همچنین، در دماهای بیشتر از حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس مقاومت خود

را از دست می‌دهند و در برابر اشعه فرابنفش نیز آسیب‌پذیرند مگر آن که درون بتن مدفون یا با روکش محافظ پوشانده شوند.

با وجود این چالش‌ها، بتن الیاف طبیعی در بسیاری کاربردهای سبک و غیرسازه‌ای نظیر دال‌های کم‌بار، قطعات پیش‌ساخته سبک، پانل‌های فایبرسمنت، روسازی‌های کم‌ترافیک، و پروژه‌های ساخت‌وساز پایدار و روستایی می‌تواند جایگزینی مناسب و کم‌هزینه باشد. همچنین، در شرایط اضطراری و موقت به دلیل در دسترس بودن و قیمت پایین الیاف طبیعی، این نوع بتن گزینه‌ای ارزشمند محسوب می‌شود. در جمع‌بندی، اگرچه الیاف طبیعی به اندازه الیاف فولادی یا مصنوعی عملکرد مکانیکی و دوام بلندمدت ندارند، اما می‌توانند با بهبود شکل‌پذیری، افزایش انرژی شکست و مزایای زیست‌محیطی، بخشی از نیازهای ساخت‌وساز پایدار را تأمین کنند. **موفقیت گسترده این مصالح منوط به توسعه روش‌های بهبود دوام و استانداردسازی در سطح صنعتی است.**

۱- ۲- ۳- بتن مسلح به الیاف شیشه‌ای

بتن مسلح به الیاف شیشه‌ای که به اختصار (GFRC- Glass Fiber Reinforced Concrete) نامیده می‌شود، نوعی مواد کامپوزیتی حاوی الیاف شیشه‌ای

مقاوم در برابر قلیا است. به کارگیری الیاف شیشه‌ای در ماتریس سیمانی باعث بهبود ظرفیت تحمل تنش کششی بتن و کنترل ترک‌ها می‌گردد. برخلاف الیاف فولادی، الیاف شیشه‌ای دچار زنگ‌زدگی و خوردگی در محیط بتن نمی‌شوند و چگالی کمتری دارند. همچنین، در مقایسه با الیاف پلیمری (مانند پلی‌پروپیلن)، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بیشتری دارند که امکان تحمل تنش در بتن سخت‌شده را فراهم می‌کند. البته الیاف شیشه‌ای رفتار ترد و غیرچکش‌خوار داشته و دچار تسلیم پلاستیک نمی‌شوند، از این رو طراحی مخلوط و سازه باید به گونه‌ای باشد که تنش‌های کششی در محدوده الاستیک الیاف باقی بماند. نکته مهم دیگر آن است که شیشه معمولی در محیط قلیایی سیمان ناپایدار است و واکنش شیمیایی بین قلیای سیمان و سیلیس الیاف شیشه، موجب افت مقاومت الیاف و خرد شدن آن‌ها می‌شود. بنابراین، تنها الیاف شیشه‌ای با ترکیب ویژه مقاوم در برابر قلیا (الیاف AR) برای مسلح کردن بتن مناسب بوده و به کار می‌روند. انواع الیاف شیشه‌ای به شرح زیر است:

• الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا (AR-Glass): تقریباً تمامی الیاف شیشه‌ای که در بتن مصرف می‌شوند از نوع AR هستند. این الیاف با افزودن اکسید زیرکن (ZrO_2) به ترکیب شیشه تولید می‌شوند تا در محیط قلیایی بتن پایدار بمانند. طبق استانداردهای بین‌المللی، حداقل ۱۶ درصد وزنی ترکیب شیشه باید از اکسید زیرکن باشد تا الیاف به عنوان نوع AR و

پایا در بتن شناخته شوند. الیاف شیشه‌ای AR تجاری معمولاً درصد زیرکن بیشتری (حدود ۱۹ درصد یا بیشتر) دارند که دوام و عمر مفید آن‌ها را در بتن بهبود می‌بخشد. این الیاف به طور اختصاصی برای استفاده در بتن طراحی شده‌اند و دارای مقاومت کششی و مدول بیشتری بوده و برخلاف فولاد دچار زنگ‌زدگی نمی‌شوند.

• الیاف شیشه کوتاه (چاپد یا خردشده): این دسته شامل الیاف شیشه‌ای بریده شده در طول‌های کوتاه است که عمدتاً در مخلوط بتن به صورت مستقیم اضافه می‌شوند. طول این الیاف بسته به محصول بین حدود ۶ تا ۳۸ میلی‌متر متغیر است، اما طول‌های متداول برای بتن معمولاً ۱۲، ۱۹ یا ۲۵ میلی‌متر است. الیاف چاپد به صورت رشته‌های نازک دسته‌بندی شده، عرضه می‌شوند که هر رشته ممکن است ده‌ها تا صدها فیلامنت شیشه‌ای نازک را شامل شود. وجود این رشته‌های چندفیلامانی به ایجاد رفتاری شبه‌شکل‌پذیر در مقیاس ریزساختار کمک می‌کند، زیرا در هنگام گسیختگی بتن، فیلامنت‌ها به تدریج از ماتریس بیرون کشیده شده و انرژی زیادی را جذب می‌کنند. الیاف شیشه‌ای کوتاه AR برای روش مخلوط از پیش آماده‌شده بسیار مناسب هستند و در تولید قطعات پیش‌ساخته بتن الیافی به کار می‌روند.

• الیاف شیشه بلند (پیوسته): این نوع به صورت الیاف پیوسته (مثلاً کلاف) عرضه می‌شود که معمولاً حین فرآیند پاشش بتن به طول‌های دلخواه بریده

می‌شوند. در این روش، الیاف شیشه‌ای از قرقره به داخل تفنگ پاشش کشیده شده و به صورت قطعات بلند (مثلاً ۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر) همزمان با ملات تازه به داخل قالب پاشیده می‌شوند. وجود الیاف بلند و حجم زیاد الیاف در روش پاششی باعث افزایش قابل توجه مقاومت و ظرفیت تحمل بار در قطعات پیش‌ساخته می‌شود. الیاف پیوسته AR به شکل نخ‌های تابیده‌شده (متشکل از چندین رشته شیشه‌ای) عرضه می‌گردند و فقط با تجهیزات ویژه پاشش قابل استفاده‌اند.

• مش و شبکه‌های الیاف شیشه‌ای: این نوع الیاف شیشه‌ای نیز در برخی کاربردهای بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند. مش فایبرگلاس مقاوم در برابر قلیا (توری‌های بافته یا چسبانده‌شده از الیاف شیشه) می‌تواند به عنوان تقویت‌کننده سطحی در قطعات گسترده برای کنترل ترک عمل کند. همچنین، شبکه‌های پیش‌ساخته الیاف شیشه‌ای در لایه‌های نزدیک به سطح قطعات پیش‌ساخته قرار داده می‌شوند تا ظرفیت کنترل ترک‌خوردگی در سطح عناصر معماری افزایش یابد.

الیاف شیشه‌ای AR دارای خصوصیات فیزیکی و مکانیکی قابل توجهی هستند که بر رفتار بتن تأثیر مثبت می‌گذارد. چگالی این الیاف حدود ۲/۶ گرم بر سانتیمتر مکعب است که در حد چگالی سنگدانه‌های معمول (مانند ماسه) بوده و بسیار کمتر از فولاد (۷/۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب) است. مقاومت کششی تک‌محوری الیاف شیشه‌ای عموماً

در بازه ۱۰۰۰ تا ۱۷۰۰ مگاپاسکال قرار دارد که بیشتر از تنش تسلیم فولاد معمول ساختمانی است. مدول الاستیسیته این الیاف حدود ۷۰ گیگاپاسکال (تقریباً معادل ۳ برابر مدول خمیر سیمان/بتن) است. این مدول بیشتر نسبت به ماتریس بتن موجب می‌شود تحت بارگذاری، سهم قابل توجهی از تنش کششی توسط الیاف جذب شود و از گسترش ترک جلوگیری گردد. در عین حال مدول الیاف شیشه‌ای از فولاد کمتر است (حدود یک‌سوم)، بنابراین، سختی کمتری نسبت به میلگرد یا الیاف فولادی دارند و برای دستیابی به ظرفیت مشابه، ممکن است درصد حجمی الیاف بیشتری نیاز باشد.

از دیگر ویژگی‌های مهم الیاف شیشه‌ای، **دوام شیمیایی و پایداری در محیط قلیایی** آن‌ها است. همان‌گونه که اشاره شد، استفاده از الیاف شیشه‌ای معمولی (نوع E-glass) در بتن به دلیل حمله شدید قلیاهای سیمان به سیلیس شیشه، با شکست و کاهش مقاومت الیاف همراه است. این مشکل با توسعه الیاف شیشه‌ای مقاوم قلیا حل شده است؛ البته توجه به این نکته ضروری است که حتی الیاف AR نیز در شرایط بسیار قلیایی و دمای بالا ممکن است اندکی از مقاومت خود را در طول زمان از دست بدهند، لذا رعایت حدود مجاز طرح مخلوط و کیفیت الیاف اهمیت دارد.

خواص کامپوزیت‌های مسلح به الیاف شیشه‌ای تحت تأثیر فرآیند تولید، مقدار و طول الیاف شیشه‌ای قرار دارند. نوع الیاف E یا AR و همچنین شرایط

محیطی تأثیرگذار هستند. قرار گرفتن بتن مسلح به الیاف شیشه‌ای در معرض شرایط جوی طبیعی می‌تواند ویژگی‌های مکانیکی آن را تغییر دهد و به‌ویژه در اثر تغییرات رطوبت و دما، ابعاد آن دچار تغییر می‌شود. با گذشت زمان و در نتیجه قرارگیری در معرض محیط، اکثر کامپوزیت‌های بتن مسلح به الیاف شیشه‌ای، کاهش در مقاومت کششی، خمشی و شکل‌پذیری را تجربه می‌کنند. بعد از مدت طولانی، مقاومت این کامپوزیت‌ها می‌تواند به حدود ۴۰ درصد مقاومت اولیه کاهش یابد و ظرفیت کرنش آن‌ها به حدود ۲۰ درصد کاهش پیدا کند. این کاهش ظرفیت معمولاً به‌عنوان شکنندگی شناخته می‌شود و در طراحی اجزای بتن مسلح به الیاف شیشه‌ای باید مدنظر قرار گیرد.

عدم خوردگی و مقاومت در برابر شرایط محیطی از مزایای بارز الیاف شیشه‌ای نسبت به الیاف فولادی است. این الیاف ماهیت غیر فلزی داشته و در نتیجه در برابر زنگ‌زدگی و خوردگی الکتروشیمیایی مصون هستند. در محیط‌های مرطوب یا خورنده، الیاف شیشه‌ای برخلاف فولاد، بدون نیاز به پوشش یا تمهید خاصی پایدار می‌مانند و از این منظور دوام بتن مسلح شده را افزایش می‌دهند. همچنین، الیاف شیشه‌ای برخلاف الیاف پلیمری در برابر حرارت غیرقابل اشتعال بوده و تا دماهای نسبتاً بالاتری پایداری خود را حفظ می‌کنند. این ویژگی در کاربردهای در معرض حریق یا دمای بالا (نسبت به پلیمرهایی که در دمای حدود ۱۶۰-۱۷۰ درجه سلسیوس ذوب می‌شوند) مزیت مهمی به‌شمار می‌رود.

لازم به ذکر است که افزودن درصد بالاتر الیاف شیشه‌ای تا حدی خواص مقاومتی بتن را ارتقاء می‌دهد اما از سوی دیگر می‌تواند کارایی مخلوط تازه را کاهش دهد. معمولاً مقدار بهینه الیاف شیشه‌ای بسته به طرح مخلوط بین ۳ تا ۷ درصد وزن سیمان (معادل حدود ۱ تا ۵ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن) توصیه شده است. افزایش بیش از حد مقدار الیاف (فراتر از حدود طرح مخلوط) ممکن است موجب گره‌شدن و گلوله‌شدن الیاف در بتن و افت کارپذیری شود. بنابراین، برای حصول بهترین عملکرد، باید مقدار و نوع الیاف طبق توصیه‌های فنی و متناسب با نیاز پروژه انتخاب گردد.

بهره‌گیری مؤثر از الیاف شیشه‌ای در بتن مستلزم رعایت اصول فنی در مرحله مخلوط‌کردن است. مخلوط‌کن باید توان کافی برای پراکندگی یکنواخت الیاف داشته باشد، زیرا این الیاف سبک و ظریف‌اند و در صورت افزودن نادرست، به‌سرعت گلوله می‌شوند. برای پیشگیری، الیاف بهتر است تدریجی و در دو تا سه مرحله به مخلوط افزوده شوند تا هر بخش به‌خوبی پخش شود. معمولاً ابتدا مصالح خشک همراه بخشی از آب و روان‌کننده‌ها مخلوط شده و سپس الیاف به‌تدریج اضافه می‌شوند؛ در پایان باقی‌مانده آب وارد مخلوط شده و مخلوط کردن تا رسیدن به یکنواختی ادامه می‌یابد. کنترل نسبت آب به سیمان در این مخلوط‌ها اهمیت ویژه دارد. وجود الیاف کارایی بتن تازه را کاهش داده و مقداری از آب آزاد را جذب می‌کند. برای حفظ روانی مناسب، به‌کارگیری فوق‌روان‌کننده‌ها یا پلیمرهای سازگار توصیه می‌شود،

نه افزایش آب که موجب افت مقاومت و دوام خواهد شد. همچنین، استفاده از افزودنی‌های معدنی ریزدانه مانند میکروسیلیس، متاکاؤلن یا خاکستر بادی رایج است تا کارپذیری، تراکم‌پذیری و پرشدن فضای بین الیاف بهبود یابد.

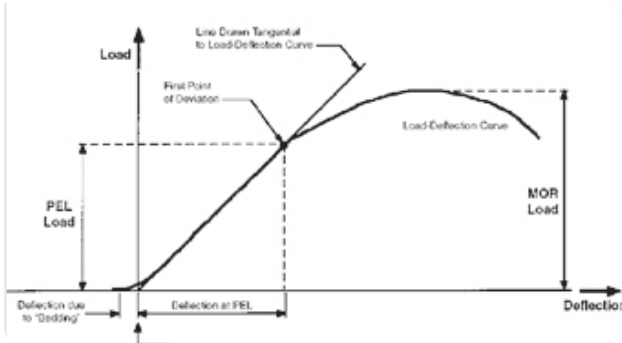
در روش‌های کارگاهی (اجرا در محل) مانند افزودن الیاف به دیگ کامیون حمل بتن، باید پس از ریختن الیاف، مخلوط‌کردن اضافی **حداقل پنج دقیقه در دور تند** انجام شود تا از کلوخه‌شدن جلوگیری گردد. در روش پاششی نیز تنظیم صحیح دستگاه (سرعت برش و شدت پاشش) اهمیت دارد تا طول الیاف یکنواخت شده و به‌طور همگن در مقطع توزیع شوند. معمولاً ابتدا یک لایه ملات بدون الیاف به ضخامت چند میلی‌متر به‌عنوان پوشش نما پاشیده شده و سپس لایه اصلی حاوی الیاف اجرا می‌گردد تا سطح کار یکنواخت و بدون الیاف نمایان حاصل شود.

از آن‌جا که **بتن مسلح به الیاف شیشه‌ای بیشتر در مقاطع نازک** به‌کار می‌رود، یکنواختی خواص در کل پانل ضروری است. **فرآیند پاششی** روشی مؤثر برای این هدف است و بیشترین کاربرد را در تولیدات ایالات متحده دارد. در این روش ملات سیمان، ماسه و الیاف خردشده شیشه به‌طور هم‌زمان با تفنگ پاششی روی قالب اعمال می‌شود. در صنعت معماری، حداقل چهار درصد وزنی الیاف شیشه‌ای مقاوم در برابر قلیا به‌عنوان الزام کیفی در نظر گرفته می‌شود. ساخت به‌صورت لایه‌لایه انجام می‌گیرد؛ هر عبور تفنگ پاششی ۴ تا ۶ میلی‌متر ضخامت ایجاد کرده و برای رسیدن به

ضخامت معمول ۱۳ میلی‌متر دو تا سه عبور لازم است. پس از هر لایه، غلتک‌زنی برای خروج هوا و پوشش کامل الیاف ضروری است. در مراحل اولیه تولید، از فرآیند آب‌گیری برای حذف آب اضافی و افزایش تراکم استفاده می‌شد که امکان خودکارسازی خط تولید را نیز فراهم می‌کرد.

روش دیگر، **پیش‌مخلوط‌کردن** است که در آن سیمان، ماسه، الیاف، آب و افزودنی‌ها در مخلوط‌کن‌های استاندارد ترکیب شده و ملات از طریق قالب‌گیری فشاری، اکستروژن یا لغزش شکل می‌گیرد. تولیدکنندگان ادعا می‌کنند تا ۵ درصد وزنی الیاف قلیامقاوم بدون گلوله‌شدن قابل استفاده است؛ مقادیر بالاتر نیازمند مخلوط‌کن‌های پر قدرت است. در این فرآیند کنترل دقیق مخلوط‌کردن برای جلوگیری از آسیب به الیاف ضروری بوده و به‌کارگیری روان‌کننده‌ها امکان حفظ نسبت آب به سیمان پایین را فراهم می‌کند. ترکیبات حاصل معمولاً ۲ تا ۳ درصد وزنی الیاف دارند و از نظر مقاومت ضعیف‌تر از محصولات پاششی‌اند؛ بنابراین بیشتر برای قطعات کوچک با شکل‌های پیچیده یا پانل‌های پوششی خاص کاربرد دارند.

ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت‌های بتنی مسلح شده با الیاف شیشه‌ای به مقدار الیاف، مقدار پلیمر (در صورت استفاده)، نسبت آب به سیمان، تخلخل، مقدار ماسه، جهت‌گیری الیاف، طول الیاف و عمل‌آوری بستگی دارد. ویژگی‌های اصلی بتن مسلح شده با الیاف شیشه‌ای تولیدشده به روش پاششی که در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارت‌اند از حد



شکل ۱-۹- منحنی نیرو - تغییرمکان بتن مسلح به الیاف شیشه‌ای تحت بارگذاری خمشی

تغییرات ابعادی در بتن مسلح به الیاف شیشه‌ای

نسبت به بتن معمولی به دلیل مقدار زیاد سیمان در ماتریس ملات بیشتر است. کرنش‌های ناشی از خشک و مرطوب‌شدن ممکن است به ۱۵/۰ درصد برسند که می‌تواند در طول عمر پنل‌های نما قابل مشاهده باشد. این حساسیت ابعادی اگر در طراحی پیش‌بینی نشود، می‌تواند به بروز بارهای اضافی منجر شود. عملکرد دوام کامپوزیت معمولاً از طریق ارزیابی تغییرات در مقاومت و چقرمگی تحت شرایط جوی طبیعی یا فرسودگی تسریع شده بررسی می‌شود. دو نظریه برای توضیح کاهش مقاومت و ظرفیت کرنش در بتن مسلح به الیاف شیشه‌ای وجود دارد:

- **حمله قلیایی:** قلیای موجود در محیط می‌تواند به سطوح الیاف شیشه‌ای آسیب بزند و منجر به کاهش مقاومت کششی آن‌ها شود.

تناسب الاستیک خمشی ۲۸ روزه و مدول گسیختگی خمشی ۲۸ روزه. حد تناسب الاستیک در سن ۲۸ روز در طراحی به عنوان تنش حدی به‌کار می‌رود تا اطمینان حاصل شود که تنش‌های بلندمدت و بهره‌برداری در پنل، کمتر از مقاومت ترک‌خوردگی کامپوزیت باقی می‌مانند. علاوه‌براین، تنش‌های ناشی از بازکردن قالب و سایر تنش‌های حاصل از جابه‌جایی نیز باید کمتر از مقدار حد تناسب الاستیک در زمانی باشند که این رویدادها رخ می‌دهند.

یک منحنی کلی بار-تغییرشکل برای یک کامپوزیت بتن مسلح شده با الیاف شیشه‌ای با عمر ۲۸ روز که تحت آزمایش خمش قرار گرفته، در شکل ۱-۹ نشان داده شده است. همان‌طور که این منحنی نشان می‌دهد، کامپوزیت‌های بتن مسلح شده با الیاف شیشه‌ای معمولاً ظرفیت باربری و تغییرشکل قابل‌توجهی فراتر از مقاومت ترک‌خوردگی ماتریس دارند. مکانیزم اصلی مسئول این مقاومت و شکل‌پذیری اضافی، بیرون‌کشیده‌شدن الیاف است. با ایجاد ترک اولیه، بخش زیادی از تغییرشکل به کشیدگی الیاف نسبت داده می‌شود. با ادامه افزایش بار و تغییرشکل و وقوع ترک‌های متعدد پس از حد تناسب الاستیک، الیاف شروع به جداشدن کرده و سپس لغزش یا بیرون‌کشیده شدن را تجربه می‌کنند تا ترک‌ها را پل زده و در برابر بار اعمال‌شده مقاومت کنند. مقاومت در برابر بار از طریق اصطکاک بین الیاف شیشه‌ای و ماتریس سیمانی، در هنگام جدا شدن و بیرون‌کشیده شدن الیاف ایجاد می‌شود.

- هیدراتاسیون مداوم: نفوذ محصولات هیدراسیون به فضاهای بین الیاف شیشه‌ای می‌تواند منجر به افزایش پیوستگی و کاهش امکان بیرون کشیدگی الیاف شود، که این امر کاهش مقاومت و شکل‌پذیری را به همراه دارد.

این دو پدیده ممکن است همزمان و با سرعت‌های متفاوتی اتفاق بیفتند. کاهش چقرمگی در بتن مسلح به الیاف شیشه‌ای به عنوان یک چالش اساسی در کاربردهای ساخت‌وساز مطرح است و برای مقابله با آن دو رویکرد پیشنهاد می‌شود:

- توسعه کامپوزیت‌های با عملکرد دوام بهتر با فرمولاسیون‌های اصلاح شده شیشه و ماتریس.
- طراحی اجزای بتن مسلح به الیاف شیشه‌ای با در نظر گرفتن تغییرات خواص آن‌ها در طول فرآیند پیرشدگی.

۱- ۳- ۳- بتن مسلح به الیاف مصنوعی

الیاف مصنوعی محصول صنایع پتروشیمی و نساجی هستند و در بتن به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌شوند. بتن مسلح به الیاف مصنوعی (SNFRC- Synthetic Fiber Reinforced Concrete) شامل الیافی از جنس پلیمرهای آلی مانند آکریلیک، آرامید، کربن، نایلون، پلی‌استر، پلی‌اتیلن

و پلی‌پروپیلن است. برخی از این الیاف تنها در حد تحقیق بررسی شده‌اند و برخی دیگر به‌طور تجاری به کار رفته‌اند. الیاف مصنوعی با **توزیع سه‌بعدی در مخلوط بتن، نقش شبکه‌ای چندجهته را ایفا کرده** و از ایجاد و گسترش ترک‌ها جلوگیری کرده و در **سنین اولیه جمع‌شدگی پلاستیک** را کاهش می‌دهند. در **درازمدت نیز با محدودکردن عرض و تعداد ترک‌ها**، دوام بتن را افزایش می‌دهند. این الیاف شکل‌پذیری، چقرمگی و مقاومت ضربه‌ای بتن را بهبود می‌دهند و برخلاف فولاد دچار خوردگی نمی‌شوند. برخی انواع مانند الیاف پلی‌پروپیلن ریز در برابر آتش نیز مفیدند، زیرا با ذوب‌شدن در دمای حدود ۱۶۰ درجه سلسیوس، مسیر خروج بخار را فراهم می‌کنند و از ترکیدگی بتن می‌کاهند. الیاف مصنوعی که برای مسلح‌کردن بتن به کار می‌روند، متنوع بوده و هر کدام خواص مخصوص به خود را دارند. مهم‌ترین الیاف پلیمری مورد استفاده در بتن عبارت‌اند از:

- **الیاف پلی‌پروپیلن (PP):** پرکاربردترین نوع الیاف مصنوعی در بتن است. این الیاف از جنس پلیمر پلی‌پروپیلن بوده و به دلیل قیمت پایین، دسترسی آسان و پایداری شیمیایی در محیط قلیایی بتن بسیار مورد توجه هستند. الیاف PP معمولاً به دو صورت الیاف بسیار ریز (میکرو) و درشت (ماکرو) تولید می‌شوند؛ نوع میکرو (با قطر معمولاً کمتر از ۳/۰ میلی‌متر) برای کنترل ترک‌های خمیری و کاهش جمع‌شدگی پلاستیک کاربرد دارد، در حالی که الیاف ماکرو PP (طول معمولاً ۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر) به‌عنوان

جایگزین بخشی از آرماتور حرارتی (مش بافی) در دال‌ها و سایر اعضا به کار می‌رود. مقاومت کششی الیاف PP بین حدود ۶۰ تا ۷۰۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته آن‌ها حدود ۱/۵ تا ۱۰ گیگاپاسکال است؛ بنابراین، نسبت به الیاف دیگر مانند فولاد یا شیشه مقاومت و سختی کمتری دارند. با این حال، کرنش نهایی زیادی (حدود ۸ تا ۱۵ درصد) دارند و رفتار نرم‌شوندگی مناسبی دارند که همین مشخصه به بتن امکان جذب انرژی و تغییر شکل بیشتری می‌دهد. پلی‌پروپیلن در محیط قلیایی بتن تخریب نمی‌شود و آب نیز جذب نمی‌کند (آبدوست نیست)، لذا دوام طولانی‌مدت در بتن دارد. به علت آب‌گریز بودن و سطح صاف، چسبندگی شیمیایی کمی با خمیر سیمان دارد و اتصال آن بیشتر از نوع اصطکاکی-مکانیکی است؛ از این رو بسیاری از الیاف PP ماکرو را با شکل‌های ویژه (صاف، موج‌دار، پیچ‌خورده و غیره) می‌سازند تا گیرایی مکانیکی آن‌ها افزایش یابد. به‌طور کلی، پلی‌پروپیلن به عنوان یک الیاف همه‌منظوره، ارزان‌قیمت و مؤثر در کنترل ترک‌های بتن شناخته می‌شود و تقریباً تمامی تولیدکنندگان الیاف آن را عرضه می‌کنند.

■ **الیاف پلی‌اتیلن (PE):** پلی‌اتیلن یکی دیگر از پلیمرهای متداول برای ساخت الیاف است. الیاف PE معمولی از نظر مقاومت و سختی نزدیک به PP و PO (پلی‌اولفین) هستند و در گذشته عمدتاً مدول و مقاومت کمی داشتند. اما با توسعه پلی‌اتیلن با وزن مولکولی فوق‌العاده بالا، الیاف پلی‌اتیلنی تولید شده‌اند که استحکام و صلبیت بسیار زیادی دارند.

به این نوع، الیاف پلی‌اتیلن پرمقاومت گفته می‌شود که با فرآورده‌های ویژه (مانند ژل-اسپینینگ) تولید می‌گردند. مقاومت کششی الیاف می‌تواند تا حدود ۳۰۰۰ مگاپاسکال باشد و مدول آن‌ها نیز حتی از سایر الیاف پلیمری بیشتر است (تا صدها گیگاپاسکال). البته این محصولات بسیار گران‌قیمت‌اند و کاربردشان محدود به مصارف خاص مهندسی است. در مقابل، الیاف PE بازیافتی از پلاستیک‌های ضایعاتی (مانند بطری‌ها) نیز برای بتن به کار رفته‌اند؛ اگرچه مقاومت و مدول نسبتاً کمتری دارند اما از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی گزینه‌های جذابی هستند. پلی‌اتیلن نیز مانند PP در برابر محیط قلیایی بتن پایدار و خنثی است و آب یا مواد شیمیایی را جذب نمی‌کند؛ لذا در بتن دچار پوسیدگی نمی‌شود. ضعف اصلی آن ضریب اصطکاک کم و سطح بسیار صاف الیاف است که منجر به چسبندگی ضعیف با خمیر سیمان می‌شود. برای بهبود این وضعیت، روش‌هایی چون اصلاح سطحی، پوشش‌دهی یا استفاده از الیاف با سطح برجسته (بافت‌دار) به کار گرفته شده است تا اتصال مکانیکی-اصطکاکی الیاف PE به ماتریس سیمانی تقویت شود.

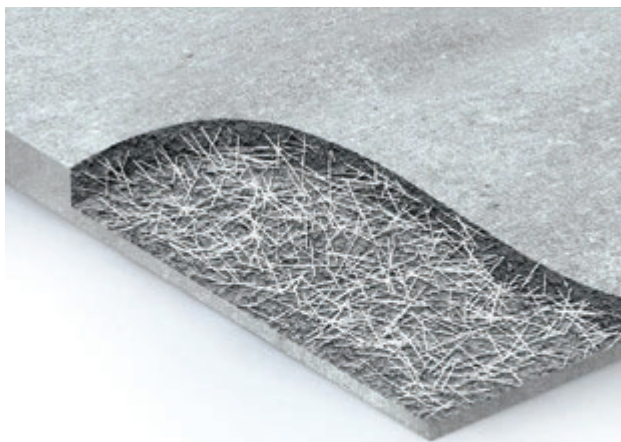
■ **الیاف نایلون (پلی‌آمید):** نایلون (polyamide) نخستین الیاف مصنوعی ساخته‌شده به دست بشر است که در بتن نیز کاربرد دارد. مقاومت کششی الیاف نایلون حدود ۳۰۰ تا ۹۵۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته حدود ۳ تا ۵ گیگاپاسکال است که از این نظر در رده مشابه با PP قرار می‌گیرند. وجه تمایز نایلون جذب آب جزئی آن است (حدود ۲ تا ۵ درصد

وزن خود آب جذب می‌کند) که به واسطه گروه‌های آمیدی در ساختارش رخ می‌دهد. حضور آب می‌تواند باعث تورم جزئی الیاف نایلون در بتن شود و همین تورم در حین تماس با خمیر سیمان، اتصال فیزیکی الیاف و ماتریس را افزایش می‌دهد. مطالعات نشان داده‌اند که در حین بارگذاری، سطح الیاف نایلون توسط خمیر سیمان خراشیده می‌شود و زبری آن افزایش می‌یابد که این نیز به بالارفتن مقاومت کششی بیرون کشیدگی کمک می‌کند. به بیان دیگر، الیاف نایلون برخلاف PP کاملاً آب‌گریز نیست و این ویژگی سبب گیرش بهتر آن در بتن می‌شود. البته به علت قیمت بیشتر نایلون نسبت به پلی‌پروپیلن، کاربرد آن کمتر رایج بوده و بیشتر در پروژه‌های خاص یا پژوهش‌ها استفاده شده است. اخیراً رویکرد بازیافت نایلون (مثلاً الیاف حاصل از بازیافت فرش یا محصولات نساجی) برای استفاده در بتن مطرح شده که می‌تواند از نظر هزینه و محیط‌زیست مفید باشد.

■ **الیاف پلی‌وینیل الکل (PVA):** الیاف PVA از جنس پلیمر Polyvinyl Alcohol هستند و به علت مقاومت نسبتاً زیاد و پیوند شیمیایی با ماتریس سیمانی شناخته می‌شوند. مقاومت کششی این الیاف معمولاً بین ۸۵۰ تا ۱۶۰۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته آن‌ها حدود ۲۵ تا ۴۰ گیگاپاسکال است که به مراتب بیشتر از PP و نایلون است. ویژگی منحصر به فرد PVA ماهیت آبدوست (هیدروفیل) آن است که موجب می‌شود پیوند هیدروژنی و چسبندگی شیمیایی با محصولات هیدراتاسیون سیمان (به ویژه ژل C-S-H) برقرار کند.

تحقیقات نشان داده است که مقاومت پیوند الیاف PVA با خمیر سیمان تا ۸ برابر بیشتر از PP است. این الیاف جذب آب چندانی ندارند (حدود ۰/۱ تا ۱ درصد) اما همان مقدار کم برای ایجاد پیوند شیمیایی و تر شدگی سطحشان کافی است. به دلیل چسبندگی زیاد PVA با ماتریس، معمولاً الیاف را به صورت تکرشته (مونوفیلانمنت) و سطح صاف تولید می‌کنند و نیازی به قلاب یا برجستگی هندسی برای درگیر کردن آن‌ها نیست. الیاف PVA اغلب در اندازه‌های ریز (مثلاً طول ۶ تا ۲۱ میلی‌متر و قطر زیر ۰/۰۴ میلی‌متر) به کار می‌روند و جزء اجزای اصلی بتن‌های شکل‌پذیر (مانند کامپوزیت سیمانی مهندسی‌شده یا ECC) هستند که قابلیت شکل‌پذیری خمیری زیادی دارند. دوام الیاف PVA در محیط قلیایی بتن عالی گزارش شده است؛ به طوری که در آزمایش‌های تسریع‌شده معادل ۱۰۰ سال عمر بتن، تقریباً هیچ کاهش مقاومتی در این الیاف مشاهده نشده است. البته محیط‌های بسیار خورنده مثل آب دریا همراه چرخه‌های تر و خشک ممکن است به مرور موجب افت جزئی در خواص PVA شوند. نقطه ضعف PVA قیمت بیشتر و دسترسی محدودتر آن است که باعث شده بیشتر در پروژه‌های خاص یا محصولات پیش‌ساخته تخصصی (مثلاً صفحه‌های مقاوم جایگزین پنبه‌نسوز) استفاده شود.

■ **الیاف پلی‌استر (PET):** منظور از پلی‌استر در بتن معمولاً الیاف تهیه‌شده از پلی‌اتیلن تری‌فتالات (PET) است که ماده اولیه بطری‌های پلاستیکی است. این الیاف چه به صورت صنعتی و چه بازیافتی در بتن به



روسازی‌های ثانویه یا به عنوان مکمل با سایر الیاف).

■ **الیاف کربنی و دیگر الیاف مهندسی:** الیاف کربن از کربنیزه کردن الیاف آلی (معمولاً PAN یا Pitch) ساخته می‌شوند و به خاطر مقاومت کششی زیاد (معمولاً ۱۵۰۰ تا ۷۰۰۰ مگاپاسکال) و مدول بسیار زیاد (۳۰ تا ۵۰۰ گیگاپاسکال) شناخته می‌شوند. این الیاف در صنایع هوافضا و کامپوزیت‌های پلیمری کاربرد گسترده دارند و در بتن نیز به صورت محدود مورد تحقیق بوده‌اند. مهم‌ترین مزیت الیاف کربن پایداری کامل شیمیایی آن‌ها در بتن است؛ کربن ماده‌ای خنثی است و در محیط قلیایی دچار زوال یا کاهش مقاومت نمی‌شود. همچنین، رسانایی الکتریکی آن باعث شده در بتن‌های هوشمند (مثلاً برای حسگرهای کرنش یا گرم‌کننده‌ها) مفید باشد. با این وجود، به دلیل قطر

کار رفته‌اند. مقاومت کششی الیاف PET در محدوده ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مگاپاسکال و مدول آن‌ها حدود ۱۰ تا ۲۰ گیگاپاسکال است که نسبت به سایر الیاف مصنوعی مقدار متوسطی محسوب می‌شود. مزیت مهم PET امکان تولید از مواد دور ریختنی است که آن را گزینه‌ای سازگار با محیط‌زیست می‌سازد. اضافه کردن الیاف PET به بتن می‌تواند ترک‌های جمع‌شدگی را کاهش داده و تا حدی چقرمگی پس از ترک را بهبود دهد. با این حال، چالش اصلی درباره الیاف پلی‌استر، دوام آن‌ها در محیط قلیایی بتن است. تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که قرارگیری طولانی‌مدت این الیاف در بتن می‌تواند منجر به افت مقاومت و چقرمگی کامپوزیت شود. برای مثال، در مطالعه‌ای مشاهده شده که نمونه‌های بتن مسلح به الیاف PET بازیافتی پس از ۱۲ ماه قرارگیری در آب دریا بیش از ۵۰ درصد افت در مقاومت ضربه‌پذیری (چقرمگی) داشتند. بررسی‌های میکروسکوپی ریزساختار نیز تخریب و خورده‌شدن سطح این الیاف را پس از مدت طولانی در بتن نشان داده‌اند. علت این پدیده حمله قلیایی به اتصالات استری در زنجیره پلی‌استر است که منجر به هیدرولیز و تضعیف الیاف می‌شود. البته برخی آزمایش‌های کوتاه‌مدت (مثلاً ۱۲۰ ساعت در محلول قلیایی ۶۰ درجه سلسیوس، حاکی از مقاومت قابل قبول TEP بودند، ولی در مجموع شواهد کافی بر امکان تخریب تدریجی این الیاف طی سالیان در بتن وجود دارد. به همین دلیل، کاربرد الیاف پلی‌استر بیشتر در مصارفی است که عمر طرح پایین‌تر یا حساسیت کمتری به کاهش مقاومت درازمدت دارند (مانند برخی قطعات موقت،

بسیار کم (فیلامنت‌های ۵ تا ۱۵ میکرونی) و سطح صاف، چسبندگی الیاف کربن با خمیر سیمان صرفاً از نوع مکانیکی است و نسبت به بسیاری از الیاف دیگر ضعیف‌تر است. در نتیجه، در بتن معمولی، تحت بارگذاری اغلب این الیاف قبل از گسیختگی به صورت اصطکاکی از ماتریس بیرون کشیده می‌شوند مگر آن‌که با روش‌هایی مانند پوشش‌دهی لاتکس، رزین اپوکسی یا فرم شبکه‌ای (مش فیبری) به کار روند تا اتصال بهبود یابد. هزینه بسیار زیاد الیاف کربن نیز کاربرد گسترده آن‌ها را در سازه‌های معمول محدود کرده است. تنها در موارد خاص مانند بتن‌های فوق‌توانمند یا سازه‌های کامپوزیتی پیش‌ساخته خاص، از مزایای بی‌نظیر این الیاف استفاده می‌شود. علاوه بر کربن، الیاف پلیمری مهندسی دیگری مانند آرامید (آرامید معروف به کولار یا تکنورا)، الیاف آکریلیک (پلی‌آکریلونیتریل-PAN) و پلی‌اولفین‌های ویژه (نوع PO) نیز گاهی در بتن به کار رفته‌اند. الیاف آرامید به خاطر مقاومت کششی بسیار زیاد (۲۳۰۰ تا ۳۴۰۰ مگاپاسکال) و مدول زیاد (۷۰ تا ۱۴۰ گیگاپاسکال) شناخته می‌شوند و در واحد وزن چندین برابر قوی‌تر از فولاد هستند. این الیاف در محیط قلیایی عملکرد نسبتاً پایداری دارند اما رطوبت و اشعه UV می‌تواند به مرور بر آن‌ها اثرگذار باشد. به دلیل قیمت زیاد و سختی تأمین، کاربرد آرامید در بتن تجاری بسیار محدود است. الیاف آکریلیک (PAN) نیز که ماده پایه تولید الیاف کربن است، در نسخه‌های با مقاومت زیاد برای جایگزینی پنبه‌نسوز در محصولات سیمانی (ورق‌ها و لوله‌ها) توسعه یافته است. این الیاف مدول و مقاومت متوسط (بسته به نوع بین

۳۰۰ تا ۱۰۰۰ مگاپاسکال) دارند و به صورت میکروالیاف در برخی ملات‌ها و بتن‌های سبک به کار رفته‌اند.

روش‌های طراحی اختصاصی برای مصرف کم‌حجم الیاف مصنوعی هنوز تدوین نشده است؛ بسته به کاربرد مورد نظر، تولیدکنندگان مختلف ممکن است مقدار حجمی و هندسه الیاف متفاوتی را پیشنهاد کنند. لازم به ذکر است که معیارهای پذیرش در ASTM C1116 آمده است. نتایج آزمون‌های فشار، کشش و خمش نشان می‌دهد در مقدارهای مصرف کم (۱/۰ تا ۲/۰ درصد حجمی) بهبود معنی‌داری در این مقاومت‌ها رخ نمی‌دهد. با این حال، در سنین اولیه، زمانی که ماتریس ضعیف و شکننده است، الیاف مصنوعی مؤثرند. در بتن بالغ، بهبود سختی تابع مقدار حجمی الیاف و دوام الیاف در ماتریس است. برای برخی الیاف، بهبود سختی و کنترل ترک نشان داده شده است. پیوند الیاف مصنوعی (نایلون، پلی‌استر، پلی‌پروپیلن) در بتن عمدتاً مکانیکی است و پیوند شیمیایی ندارد. مدول الاستیسیته و ضریب پواسون الیاف/ماتریس، همچنین هندسه و تکرشته‌ای یا رشته‌وار بودن، بر رفتار پیوند اثر می‌گذارند. آزمون‌هایی مانند ضربه با وزنه سقوطی و شاخص سختی توان پیوند انواع الیاف را می‌سنجند و اثر حجم، آرایش و طول الیاف را نیز آشکار می‌کنند.

میکروالیاف مصنوعی کم‌حجم و الیاف طبیعی معمولاً با مقدار کمتر از ۱/۲ کیلوگرم بر مترمکعب افزوده می‌شوند و هدف اصلی‌شان کنترل ترک‌های جمع‌شدگی پلاستیک است. جز میکروالیاف رشته‌وار، سایر میکروالیاف در بتن سخت‌شده اثر قابل‌توجهی

ندارند. بر پایه عملکرد میدانی، میکروالیاف رشته‌وار گاهی به‌جای سبک‌ترین مش فولادی جوش‌شده در دال‌های روی زمین به‌کار می‌روند و سازندگان، راهنمای جایگزینی ارائه می‌کنند. ماکروالیاف از نظر جنس، اندازه، شکل، ویژگی‌های پیوستگی و خواص فیزیکی متنوع‌اند؛ این عوامل همراه با مقدار مصرف، مقاومت پس از ترک‌خوردگی بتن را تعیین می‌کنند. بسته به الزامات پروژه، برای انتخاب نوع الیاف انجام آزمون‌های خمش، چقرمگی و... ضروری است. بنابراین، عملکرد بتن مسلح به الیاف را می‌توان در سه مرحله یا فاز رفتاری بررسی کرد؛ الیاف مصنوعی در هر یک از این مراحل نقش‌های متفاوتی ایفا می‌کنند:

(۱) مرحله پیش از ترک‌خوردن: در آغاز بارگذاری، ماتریس یکپارچه است و ترک قابل‌مشاهده‌ای وجود ندارد. الیاف می‌کوشند با ماتریس هم‌تغییرشکل شوند و تنش را تقسیم کنند. الیاف مدول با مدول زیاد (مانند PVA، آرامید و کربن) بخشی از تنش کششی را پیش از گسیختگی ماتریس حمل کرده و تنش ترک‌خوردگی نخستین را افزایش می‌دهند یا به تعویق می‌اندازند؛ از این‌رو بتن حاوی PVA در لحظه نخستین ترک، تنش بیشتری نسبت به بتن بدون الیاف یا با PP تحمل می‌کند. الیاف با مدول کم (مثل PP و PE) عمدتاً همراه ماتریس کشیده می‌شوند و جذب نیروی چشمگیری ندارند، پس اثر اندکی بر مقاومت کششی اولیه دارند؛ با این‌همه، همین الیاف نرم ریزترک‌های اولیه ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک و تنش حرارتی را مهار می‌کنند. مثلاً میکروالیاف‌های PP ترک‌های

موبین ساعات ابتدایی گیرش را کاهش می‌دهند.

(۲) کنترل ریزترک‌ها و عرض ترک: با افزایش بار، ریزترک‌ها در خمیر سیمان پدید می‌آیند. در این مرحله تمام انواع الیاف مانند پل‌های میکروسکوپی بین لبه‌های ترک عمل کرده و از گشایش و هم‌پیوستن آن‌ها می‌کاهند. تعداد زیاد میکروالیاف سبب می‌شود هر ریزترک خیلی زود به الیاف برخورد و متوقف شود. آزمایش‌ها نشان داده‌اند افزودن حتی ۵٪ درصد حجمی الیاف PP عرض ترک‌های خمشی را به‌طور چشمگیری کاهش و توزیع ترک را یکنواخت‌تر می‌کند. به‌دلیل چسبندگی بالاتر، الیاف PVA در مهار رشد ترک‌های اولیه مؤثرترند. نتیجه آن‌که مسیر رشد از ریزترک تا ترک بزرگ طولانی‌تر و تدریجی‌تر می‌شود، شکست نهایی به تعویق می‌افتد و مخلوط کرنش و انرژی بیشتری را تحمل می‌کند.

(۳) رفتار پس از ترک و پل‌زنی ترک: پس از تشکیل ترک‌های عمده و عبور از نقطه اوج بار در کشش یا خمش، بتن بدون الیاف تقریباً ظرفیت کششی ندارد؛ اما در بتن الیافی، مکانیزم پل‌زنی ترک فعال است و بار کششی توسط الیاف در دو سوی ترک حمل می‌شود. منحنی تنش-کرنش وارد شاخه‌ای نزولی ملایم یا تقریباً افقی می‌شود که بیان‌گر چقرمگی و ظرفیت جذب انرژی است. اندازه مقاومت پس از ترک تابع نوع و حجم الیاف مصنوعی است: برای الیاف با مدول کم ممکن است به نزدیک صفر برسد، ولی برای ماکروالیاف‌های مصنوعی یا PVA پرمقاومت مقدار قابل‌ملاحظه دارد. به‌عنوان

مثال، ۱ درصد حجمی ماکروالیاف مصنوعی می تواند مقاومت پس از ترک هم تراز الیاف فولادی با حجم مشابه ایجاد کند و نمودار بار-تغییر مکان خمشی پس از ترک را تقریباً مسطح سازد (رفتار شبه پلاستیک). هرچه مقاومت کششی و چسبندگی الیاف بیشتر باشد، تنش پس از ترک بیشتری تحمل می شود؛ الیاف PVA به سبب مدول و چسبندگی زیاد سهم بالایی در ظرفیت خمشی پس از ترک دارند، در حالی که الیاف PP عمدتاً از رهاشدگی ترک جلوگیری می کند و بار قابل توجهی حمل نمی نماید.

برای بهره گیری مؤثر از الیاف مصنوعی در بتن، رعایت اصول انتخاب، مقدار مصرف، مخلوط کردن و اجرا ضروری است. به طور مثال، برای انتخاب نوع الیاف، میکروالیاف ها (مانند پلی پروپیلن کوتاه یا پلی استر رشته ای) برای کنترل ترک های پلاستیک و حرارتی و افزایش یکپارچگی بتن مناسب اند. ماکروالیاف ها (مانند پلی پروپیلن یا پلی اتیلن) در افزایش چقرمگی و مقاومت پس از ترک مؤثر بوده و گاهی جایگزین بخشی از مش فولادی یا میلگردهای حرارتی می شوند (مثلاً در کف های صنعتی یا شاتکریت تونل). مقدار مصرف برای میکروالیاف ها معمولاً ۵/۵ تا ۹/۹ کیلوگرم در مترمکعب کافی است؛ مقادیر بیشتر موجب کلوخه شدن و افت کارایی می شود. برای ماکروالیاف ها دامنه مصرف ۲ تا ۱۰ کیلوگرم در مترمکعب بسته به نوع کاربرد متداول است (مثلاً، ۴ کیلوگرم برای کف سازی، تا ۹ کیلوگرم برای شاتکریت تونل). الیاف باید به صورت تدریجی به مخلوط اضافه شوند و زمان مخلوط کردن حداقل ۵

دقیقه پس از افزودن آخرین الیاف ادامه یابد. افزودن روان کننده ها برای حفظ کارایی و پراکندگی بهتر توصیه می شود. از مخلوط کردن سریع یا افزودن ناگهانی حجم زیادی الیاف باید پرهیز کرد تا از تشکیل گلوله جلوگیری شود. بتن الیافی مشابه بتن معمولی اجرا می شود، با این تفاوت که ممکن است اسلامپ کاهش یابد و نیاز به فوق روان کننده وجود داشته باشد. تراکم با ویبراتور مشکل خاصی ندارد. میکروالیاف ها معمولاً در بتن مدفون می شوند؛ ولی در ماکروالیاف ها ممکن است تعدادی اندک در سطح دیده شود که با پرداخت نهایی یا در گذر زمان برطرف می گردد. بتن الیاف دار را می توان مشروط بر انتخاب لوله مناسب برای جلوگیری از گیرکردن الیاف بلند پمپ کرد.

۱-۳-۴- بتن مسلح به الیاف فولادی

بتن مسلح شده با الیاف فولادی (SFRC- Steel Fiber Reinforced Concrete) نوعی بتن است که از سیمان های هیدرولیکی، به همراه مصالح ریزدانه یا ترکیبی از ریزدانه، درشت دانه، الیاف فولادی گسسته و ناپیوسته تشکیل می شود. در این بتن، الیاف فولادی به شکل تصادفی در حجم بتن پخش می گردند و به صورت سه بعدی و ایزوتروپ در ماتریس بتن عمل می کنند. حضور این الیاف باعث انتقال تنش

الیاف فولادی مورد استفاده برای مسلح‌سازی بتن، به صورت قطعات کوتاه و گسسته‌ای از فولاد تعریف می‌شوند که نسبت طول به قطر آن‌ها در حدود ۲۰ تا ۱۰۰ است. این الیاف می‌توانند دارای مقاطع مختلفی باشند و اندازه آن‌ها به‌گونه‌ای است که با استفاده از روش‌های متداول مخلوط‌کردن، به‌طور یکنواخت در مخلوط بتن تازه توزیع می‌شوند. ASTM A820، الیاف فولادی را بر اساس روش تولید، به چهار نوع کلی تقسیم‌بندی می‌کند:

• نوع ۱: سیم سردکشیده شده (Cold-drawn wire)

الیاف تولیدشده از سیم سردکشیده متداول‌ترین نوع در بازار هستند. این الیاف معمولاً به قطر ۰/۲۵ تا ۱ میلی‌متر و طولی در حدود ۲۵ تا ۶۰ میلی‌متر ساخته می‌شوند و می‌توانند به صورت صاف یا با تغییر شکل در سطح یا انتها (مانند قلاب‌دار) عرضه شوند. مقاومت کششی این الیاف بالاست (بیش از ۱۰۰۰ مگاپاسکال در بسیاری موارد) و بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت خمشی و ظرفیت باربری پس از ترک دارند (شکل ۱-۱۱ الف/ب).

• نوع ۲: ورق‌های برش‌خورده (Cut sheet)

این نوع الیاف با برش نوارهای فولادی نازک تولید می‌شوند. مقطع آن‌ها معمولاً تخت و مستطیلی است و ضخامت ۰/۱۵ تا ۰/۶۴ میلی‌متر و عرض ۰/۲۵ تا ۲ میلی‌متر دارند. مقاومت کششی آن‌ها به اندازه نوع ۱ نیست، اما در کنترل ترک‌های جمع‌شدگی و حرارتی مؤثر هستند (شکل ۱-۱۱ ج/د).

و محدود کردن گسترش ترک‌ها در بتن می‌شود، به طوری که عرض ترک‌های ایجاد شده به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. به دلیل همین کنترل ترک و بهبود مقاومت پس از ترک‌خوردگی، بتن الیاف فولادی برای بهبود شکل‌پذیری، مقاومت ضربه‌ای و دوام بتن در کاربردهای گوناگون (از دال‌های صنعتی گرفته تا پوشش تونل‌ها و سازه‌های مقاوم در برابر زلزله) مورد توجه ویژه قرار گرفته است. در حالت کششی، بتن مسلح‌شده با الیاف فولادی تنها زمانی دچار شکست می‌شود که یا الیاف فولادی بشکنند یا از ماتریس سیمانی بیرون کشیده شوند. شکل ۱-۱۰ از سطح شکست نمونه‌ای از بتن مسلح‌شده با الیاف فولادی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۰ سطح شکست نمونه‌ای از بتن مسلح‌شده با الیاف فولادی

• نوع III: الیاف استخراج شده از ذوب (Melt-extracted)

در این روش، فولاد مذاب روی سطحی دوار ریخته می‌شود و در اثر سرد شدن سریع به الیاف بسیار نازک با سطح ناهموار تبدیل می‌گردد. این الیاف سطح زبری بالایی دارند و در برابر دماهای بالا و محیط‌های خورنده مقاوم‌ترند. بنابراین، بیشتر در بتن‌های نسوز و مقاوم در برابر حرارت به کار می‌روند (شکل ۱-۱۱ ه).

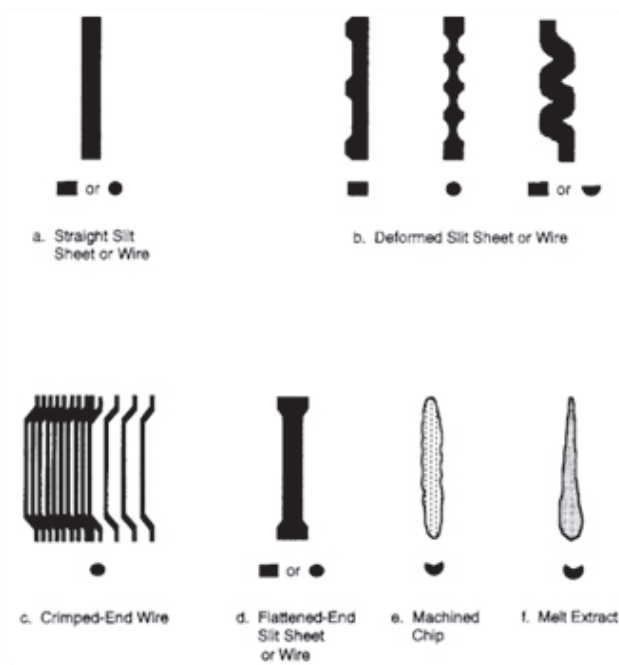
• نوع IV: سایر انواع الیاف (Other fibers)

شامل الیاف حاصل از تراشکاری (براده‌ها و تراشه‌های فولادی با سطح زبر و مقطع هلالی (شکل ۱-۱۱ ه)، الیاف دسته‌بندی شده با چسب موقت برای سهولت حمل، مخلوط کردن و الیاف با سطح تغییرشکل یافته (مثل الیاف آجدار یا مارپیچی). هرکدام از این‌ها ویژگی‌های خاص خود را دارند و معمولاً در کاربردهای خاص یا به صورت ترکیبی با سایر الیاف استفاده می‌شوند.

این درحالی است که انجمن مهندسان عمران ژاپن (JSCE)، الیاف فولادی را بر اساس شکل مقطع عرضی به سه دسته؛ نوع (۱) مقطع مربع‌شکل، نوع (۲) مقطع دایره‌ای و نوع (۳) مقطع هلالی طبقه‌بندی کرده است.

یکی از معیارهای طبقه‌بندی الیاف فولادی، شکل سطحی و نوع تغییر شکل در انتهای آن‌ها است. شکل هندسی الیاف فولادی تأثیر زیادی بر اتصال الیاف به ماتریس سیمانی و نحوه عملکرد آن‌ها در مهار ترک دارد. مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

• **الیاف صاف (Straight):** این الیاف به صورت مفتول‌های مستقیم و بدون هیچ تغییر شکل در طول یا انتها هستند. سطح آن‌ها معمولاً صاف و بدون برجستگی است. الیاف صاف به دلیل نداشتن مهار مکانیکی در انتها، اتصال خود به بتن را صرفاً از طریق اصطکاک و چسبندگی شیمیایی تأمین می‌کنند. در نتیجه، مقاومت کششی قابل ملاحظه‌ای دارند اما در برابر بیرون کشیدگی از بتن مقاومت کمتری نسبت به انواع دارای قلاب یا تغییرشکل دارند. از این الیاف



شکل ۱-۱۱- اشکال مختلف هندسی الیاف فولادی.

گاهی برای کنترل ترک‌های اولیه (مانند ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک) یا در ترکیب با الیاف‌های دیگر استفاده می‌شود.

• **الیاف قلاب‌دار (Hooked-End):** این الیاف در انتهای خود دارای خمیدگی به شکل قلاب یا چنگک هستند. وجود قلاب در دو سر الیاف باعث ایجاد نوعی مهار مکانیکی در داخل بتن می‌شود که در هنگام تلاش الیاف برای خروج از ماتریس، درگیری مکانیکی قابل توجهی با بتن ایجاد می‌کند. بنابراین، الیاف قلاب‌دار ظرفیت مهار ترک و انرژی جذب‌شده زیادی را پس از ترک‌خوردگی فراهم می‌کنند. مطالعات نشان داده‌اند که به دلیل همین گیرکردن مکانیکی، الیاف قلاب‌دار عملکرد بهتری نسبت به الیاف ساده یا موج‌دار در افزایش مقاومت باقیمانده و جذب انرژی شکست بتن دارند. این نوع الیاف بسیار پرکاربرد بوده و نوع رایج در پروژه‌های سازه‌ای (مانند دال‌ها، تیرها و قطعات پیش‌ساخته) محسوب می‌شود.

• **الیاف موج‌دار یا چین‌دار (Crimped/Wavy):** این دسته از الیاف در طول خود دارای اعوجاج‌ها یا انحناهای منظم به صورت موج یا طرح زیگزاگی هستند. انحنای طولی الیاف موجب افزایش اصطکاک مکانیکی بین الیاف و بتن می‌شود و عملکردی شبیه میلگرد آجدار (در مقابل میلگرد صاف) ایجاد می‌کند. هرچند گیرایی الیاف موج‌دار معمولاً به اندازه قلاب انتهایی مؤثر نیست، اما نسبت به الیاف کاملاً صاف، مقاومت به کشیده‌شدن بهتری فراهم می‌کنند و می‌توانند در کنترل ترک‌های بتن مؤثر باشند. این الیاف به ویژه

برای کنترل ترک‌های حرارتی و جمع‌شدگی در اجزایی مثل روسازی‌ها یا پانل‌های بتنی استفاده شده‌اند.

• **الیاف تابیده (Twisted):** الیاف تابیده دارای سطح مقطع یا شکل پیچ‌خورده حول محور طولی خود هستند (شکل مارپیچی یا پیچ مانند). این پیچش در هندسه الیاف باعث می‌شود زمانی که الیاف از داخل ترک بیرون کشیده می‌شوند، نوعی روش عملکرد "پیچ و مهره" ایجاد شود که مقاومت در برابر بیرون کشیدگی را افزایش می‌دهد. به عبارتی، سطح تماس مؤثر و درگیری مکانیکی الیاف تابیده با بتن بیشتر بوده و برای خارج شدن، باید بازتابیده شوند که انرژی زیادی مصرف می‌کند. الیاف تابیده در بهبود مقاومت خمشی و کششی بعد از ترک‌خوردن بتن بسیار مؤثر گزارش شده‌اند و می‌توانند عملکردی هم‌تراز یا حتی بهتر از الیاف قلاب‌دار فراهم کنند، به‌ویژه در بتن‌های توانمند و فوق توانمند.

• **الیاف با سطح زیر یا تغییر شکل سطحی:** دسته‌ای از الیاف نیز هستند که با روش‌های مختلف دارای سطحی زیر، آج‌دار یا شاخه‌شاخه هستند. برای مثال، برخی الیاف از جنس ضدزنگ که با روش استخراج مذاب تولید می‌شوند، سطحی ناهموار و مقطع نامنظم دارند. همچنین، برخی الیاف ممکن است دارای برجستگی‌ها یا عاج‌های سطحی ریز باشند. زبری سطح الیاف باعث افزایش اصطکاک و چسبندگی بین فولاد و خمیر سیمان می‌شود و نیروی بیشتری برای جدا شدن الیاف از بتن نیاز است. بنابراین، چنین الیافی می‌توانند بهبود در

طاقة بتن را سبب شوند. با این حال، دستیابی به سطح بسیار زبر معمولاً به روش تولید بستگی دارد (مثلاً الیاف حاصل از مذاب فولاد یا الیاف حاصل از تراشه‌های فولادی معمولاً سطح زبر دارند).

به‌طور کلی، هرچه روش‌های گیرایی مکانیکی الیاف در بتن بیشتر باشد (نظیر قلاب انتهایی، پیچ‌خوردگی یا موج‌دار بودن)، انرژی مصرفی برای بیرون کشیدگی الیاف افزایش یافته و عملکرد الیاف در کنترل ترک و افزایش چقرمگی بتن بهتر خواهد بود. در مقابل، الیاف صاف با این که مقاومت کششی ذاتی زیادی دارند، اما به دلیل عدم وجود قفل و بست مکانیکی، در زمان ترک‌خوردن بتن زودتر از ماتریس خارج می‌شوند و سهم کمتری در ظرفیت پس از تنش نهایی بتن ایفا می‌کنند. بنابراین، برای کاربردهای سازه‌ای که چقرمگی و شکل‌پذیری بیشتری نیاز است، معمولاً از الیاف قلاب‌دار یا انواع دارای تغییر شکل استفاده می‌گردد. الیاف موج‌دار و تابیده نیز در مرتبه بعدی قرار می‌گیرند و بیشتر برای کنترل ترک‌های پخش‌شده و کاهش جمع‌شدگی به کار می‌روند. ترکیب انواع مختلف الیاف نیز رویکردی است که گاهی به منظور بهره‌گیری از مزایای هر کدام در بتن صورت می‌گیرد.

نسبت منظر یا نسبت طول به قطر (L/D) یکی از مهم‌ترین مشخصات هندسی الیاف است که نقش بسزایی در عملکرد آن‌ها در بتن دارد. منظور از نسبت منظر، نسبت طول الیاف (L) به قطر معادل مقطع آن (D) است. معمولاً الیاف فولادی تجاری دارای طولی

بین ۶ تا ۶۰ میلی‌متر و قطر (یا ضخامت) بین حدود ۰/۲ تا ۱ میلی‌متر هستند. برای مثال، الیافی با قطر ۵/۰ میلی‌متر و طول ۳۰ میلی‌متر نسبت منظر ۶۰ دارند؛ یا الیاف بسیار ریز با قطر ۰/۲ میلی‌متر و طول ۱۳ میلی‌متر در بتن‌های فوق توانمند مورد استفاده قرار می‌گیرند که نسبت منظر حدود ۶۵ دارند. به‌طور کلی، بر اساس ابعاد هندسی می‌توان الیاف فولادی را به دو زیر گروه کلی تقسیم کرد:

• **الیاف کوتاه (ریز) با نسبت منظر کم:** این دسته معمولاً شامل الیاف با طول کمتر از ۲۰ میلی‌متر و نسبت منظر پایین‌تر (حدود ۳۰ تا ۵۰) است. این الیاف به علت کوتاه بودن، کارایی مخلوط‌کردن بهتری دارند و خطر گیرکردن یا گلوله‌شدن آن‌ها در بتن کم است. هرچند به دلیل طول کم، توانایی پل زدن ترک‌های عریض را ندارند، اما می‌توانند تعداد زیادی ترک‌های ریز و موین را مهار کرده و از گسترش آن‌ها جلوگیری کنند. از الیاف کوتاه و ریز بیشتر در بتن‌های خاص (مثل بتن فوق توانمند) یا برای کنترل ترک‌های پلاستیک و حرارتی در سنین اولیه بتن استفاده می‌شود. برای نمونه، در بتن‌های فوق توانمند اغلب از میکروالیاف فولادی به طول حدود ۱۳ میلی‌متر و قطر ۰/۲ میلی‌متر استفاده می‌گردد.

• **الیاف بلند (درشت) با نسبت منظر زیاد:** این گروه الیاف‌هایی را شامل می‌شود که طول آن‌ها معمولاً ۳۰ میلی‌متر یا بیشتر بوده و نسبت منظر زیادی (اغلب بین ۵۰ تا ۱۰۰ و بالاتر) دارند. هرچه

الیاف بلندتر و نازک‌تر باشد (L/D بزرگتر)، در صورت پراکندگی مناسب می‌تواند ترک‌های بازتر و بزرگتری را پل بزند و انرژی بیشتری را پس از ترک‌خوردگی بتن جذب کند. بنابراین، الیاف با نسبت منظر زیاد معمولاً تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت پس از ترک‌خوردگی و طاقت بتن دارند. به‌عنوان مثال، الیاف قلاب‌دار متداول اغلب دارای طول ۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر و نسبت منظر ۵۰ تا ۸۰ هستند که برای بهبود مقاومت خمشی و برشی بتن بسیار مؤثرند. البته باید توجه داشت که افزایش بیش از حد طول الیاف می‌تواند مشکلاتی در مخلوط‌کردن و کارایی بتن ایجاد کند (مثلاً تمایل به درهم‌تنیدگی الیاف و تشکیل گلوله). از این رو، یک حد بهینه برای طول و نسبت منظر بسته به طرح مخلوط بتن وجود دارد که در آن همزمان هم‌پوشانی عملکردی و سهولت اجرای بتن تأمین شود.

در مجموع، هرچه نسبت منظر الیاف فولادی بیشتر باشد، عملکرد آن در مسلح‌سازی بتن (از نظر انتقال تنش و کنترل ترک) بهتر است، به شرط آن‌که مقدار و نحوه مخلوط‌کردن الیاف مناسب مشخصات پروژه باشد. الیاف بلند و نازک قادرند تنش‌های بیشتری را در ناحیه کششی بتن پس از ترک تحمل کنند، در حالی که الیاف کوتاه‌تر بیشتر نقش کاهش ترک‌های مویین و بهبود یکنواختی ریزساختار را دارند. در پروژه‌های بتن الیافی معمول، گاهی **ترکیبی از الیاف با ابعاد مختلف (Hybrid Fibers)** به کار می‌رود تا هم ترک‌های ریز و هم ترک‌های درشت به خوبی

کنترل شوند. به عنوان یک قاعده کلی، طرح‌های متداول بتن مسلح به الیاف فولادی، از الیافی با طول حدود ۳۰ تا ۶۰ میلی‌متر و قطر ۵/۰ تا ۱ میلی‌متر (نسبت منظر ۶۰ تا ۸۰) بهره می‌گیرند که بهترین توازن را بین عملکرد و قابلیت مخلوط‌کردن فراهم می‌کنند.

در موضوع **طراحی مخلوط بتن مسلح به الیاف فولادی** در مقایسه با بتن معمولی، برخی مخلوط‌های حاوی الیاف فولادی دارای مقدار بیشتر سیمان، مقدار بیشتر مصالح ریزدانه هستند که به ازای افزایش الیاف در مخلوط، کاهش اسلامپ مخلوط مشاهده می‌شود. بنابراین، میزان جایگزینی آرماتور فولادی با ماکروالیاف دارای محدودیت است. در صورت امکان، این مشکل می‌تواند با اصلاح طرح مخلوط بتن و استفاده از افزودنی‌های کاهنده آب برطرف شود. هرگز نباید از آب اضافی (بیش از مقدار طرح مخلوط) برای افزایش کارایی استفاده کرد. افزودنی‌های رایج و پوزولان‌ها به‌طور گسترده در مخلوط‌های بتن مسلح‌شده با الیاف فولادی به منظور هوازایی، کاهش آب، بهبود کارایی و کنترل جمع‌شدگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تجربیات نشان داده‌اند که اگر منحنی دانه‌بندی ترکیبی مصالح ریز و درشت مطابق شکل ۱-۱۲ رعایت شود، احتمال گلوله شدن الیاف کاهش یافته و کارایی مخلوط بهبود می‌یابد. از سوی دیگر، می‌توان از مخلوط‌های تجربی مانند آنچه در شکل ۱-۱۳ آمده، برای ساخت مخلوط آزمایشی استفاده کرد. پس از

درصد عبوری برای حداکثر اندازه ذرات					اندازه ذرات (میلی‌متر)
۳۸ میلی‌متر	۲۵ میلی‌متر	۱۹ میلی‌متر	۱۳ میلی‌متر	۱۰ میلی‌متر	
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۵۱
۸۵-۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۳۸
۶۵-۸۵	۹۴-۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۵
۵۸-۷۷	۷۶-۸۲	۹۴-۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۹
۵۰-۶۸	۶۵-۷۶	۷۰-۸۸	۹۳-۱۰۰	۱۰۰	۱۳
۴۶-۵۸	۵۶-۶۶	۶۱-۷۳	۸۵-۹۶	۹۶-۱۰۰	۱۰
۳۸-۵۰	۴۵-۵۳	۴۸-۵۶	۵۸-۷۸	۷۲-۸۴	۵
۲۹-۴۳	۳۶-۴۴	۴۰-۴۷	۴۱-۵۳	۴۶-۵۷	۲/۴
۲۱-۳۴	۲۹-۳۸	۳۲-۴۰	۳۲-۴۲	۳۴-۴۴	۱/۱
۱۳-۲۷	۱۹-۲۸	۲۰-۳۲	۱۹-۳۰	۲۲-۳۳	۰/۶
۷-۱۹	۸-۲۰	۱۰-۲۰	۸-۱۵	۱۰-۱۸	۰/۳
۲-۸	۲-۸	۳-۹	۱-۵	۲-۷	۰/۱۵
۰-۲	۰-۲	۰-۲	۰-۲	۰-۲	۰/۰۷۵

شکل ۱-۱۲- دانه‌بندی پیشنهادی ترکیبی مصالح سنگی برای بتن مسلح به الیاف فولادی.

Mix parameters	3/8 in. maximum-size aggregate	3/4 in. maximum-size aggregate	1-1/2 in. maximum-size aggregate
Cement, lb/yd ³	600-1000	500-900	470-700
w/c	0.35-0.45	0.35-0.50	0.35-0.55
Percent of fine to coarse aggregate	45-60	45-55	40-55
Entrained air content, percent	4-8	4-6	4-5
Fiber content, vol. percent			
Deformed fiber	0.4-1.0	0.3-0.8	0.2-0.7
Smooth fiber	0.8-2.0	0.6-1.6	0.4-1.4

شکل ۱-۱۳- محدوده نسبت‌های مخلوط برای بتن مسلح به الیاف فولادی.

انتخاب مخلوط نهایی، توصیه می‌شود پیش از آغاز عملیات اجرایی، یک تولید کامل در شرایط کارگاهی و با استفاده از تجهیزات مخلوط‌کن موردنظر پروژه آماده‌سازی شود. همچنین، توصیه‌هایی درباره ساخت مخلوط‌های آزمایشی و حداکثر میزان الیاف برای حفظ کارایی مناسب از سوی تولیدکنندگان الیاف فولادی ارائه می‌شود.

ترکیب شیمیایی الیاف فولادی معمولاً شامل فولاد کربنی (یا فولاد کم‌کربن، گاهی همراه با عناصر آلیاژی) یا فولاد ضد زنگ (Stainless steel) است. البته، لازم به ذکر است که بسته به نوع کاربرد، ممکن است ترکیب‌های متفاوتی از الیاف مورد نیاز باشد. در محیط‌های خاص، به‌ویژه در بتن‌های نسوز یا بتن‌هایی که در معرض عوامل خوردنده قرار دارند، استفاده از فولاد ضدزنگ ضروری است. انواع مختلف فولاد ضدزنگ در برابر دماهای بالا و محیط‌های خوردنده رفتار متفاوتی دارند و انتخاب آن‌ها باید با توجه به شرایط پروژه صورت گیرد. ماتریس سیمانی قلیایی به طور طبیعی لایه‌ای محافظ روی فولاد ایجاد می‌کند و اغلب مانع خوردگی می‌شود، هرچند در بتن‌های با تخلخل زیاد یا در مجاورت سطح، خطر زنگ‌زدگی موضعی وجود دارد.

مقاومت، سختی و توانایی الیاف برای چسبندگی با بتن از خواص مهم تقویت‌کنندگی الیاف هستند. چسبندگی به نسبت ابعاد الیاف بستگی دارد. نسبت‌های ابعاد معمولی از حدود ۲۰ تا ۱۰۰ متغیر است، در حالی که ابعاد طولی الیاف از ۶/۴ تا ۷۶

میلی‌متر متغیر است. الیاف فولادی دارای مقاومت و مدول الاستیسیته نسبتاً بالایی هستند و توسط محیط قلیایی ماتریس سیمانی از خوردگی محافظت می‌شوند و چسبندگی آن‌ها با ماتریس می‌تواند با استفاده از مهار مکانیکی یا زبری سطح تقویت شود. بارگذاری بلندمدت تأثیری منفی بر خواص مکانیکی الیاف فولادی ندارد. در محیط‌های خاص مانند کاربردهای نسوز با دمای بالا، استفاده از الیاف فولاد ضدزنگ ممکن است ضروری باشد. انواع مختلف فولاد ضد زنگ که به صورت الیاف در دسترس هستند، در برابر قرار گرفتن در معرض دمای بالا و محیط‌های احتمالی خوردنده واکنش‌های متفاوتی نشان می‌دهند. مصرف‌کننده باید تمام این عوامل را هنگام طراحی با بتن نسوز تقویت‌شده با الیاف فولادی، برای کاربردهای خاص در نظر بگیرد. ASTM A 820 حداقل مقاومت کششی و الزامات خمش برای الیاف فولادی، همچنین رواداری مربوط به طول، قطر (یا قطر معادل) و نسبت طول به قطر را تعیین می‌کند. حداقل مقاومت تسلیم کششی مورد نیاز طبق ASTM A 820 ، ۳۴۵ مگاپاسکال است، در حالی که این مقدار در مشخصات JSCE برابر با ۵۵۲ مگاپاسکال است.

به دلیل گستردگی مطالب در موضوع بتن مسلح به الیاف فولادی و تمرکز بیشتر این مجله در این موضوع، اطلاعات بیشتر در بخش‌های بعدی مجله فصل بتن ارائه می‌شود.

۱-۴- ویژگی‌های بتن الیافی

بتن الیافی علاوه بر بهبود کلی عملکرد نسبت به بتن معمولی، بسته به نوع، مقدار و پراکندگی الیاف، ویژگی‌های منحصربه‌فردی ایجاد می‌کند. در صورت طراحی و اجرای صحیح، در عین حفظ مشخصات بتن تازه، مشخصات بتن سخت‌شده ارتقا می‌یابد؛ از این رو پیروی از توصیه‌های تولیدکننده در انتخاب نوع و مقدار الیاف، اصلاح طرح مخلوط و روش‌های مخلوط‌کردن و پرداخت ضروری است. الیاف با توجه به جنس، شکل، طول و نسبت حجمی، رفتارهای متنوعی از کنترل ترک‌های زودرس تا افزایش مقاومت ضربه‌ای و بهبود شکل‌پذیری نشان می‌دهند. به‌طور کلی، نقش اصلی آن‌ها در دو فاز بتن تازه و سخت‌شده بروز می‌کند و بر پارامترهایی چون روانی، آب‌انداختگی، مقاومت، دوام و تاب‌آوری اثرگذار است. فرآیندهای پیمان‌کردن، مخلوط‌کردن، تحویل و نمونه‌گیری بتن الیافی باید بر اساس ASTM C1116/ C1116M انجام گیرد. این بخش بیشتر بر مشخصات بتن مسلح به الیاف فولادی تمرکز دارد.

۱-۴-۱- بتن تازه

برای اندازه‌گیری خواص حالت تازه بتن مسلح به الیاف، باید از روش‌های نمونه‌برداری ASTM C172/

C172M و EN 12350-1 استفاده کرد. تجهیزات متداول بتن معمولی نیز برای تعیین مقدار هوا، کارایی و وزن واحد حجم بتن الیافی کاربرد دارند. به دلیل امکان تغییر در پراکندگی و جهت‌گیری الیاف هنگام نمونه‌گیری، قالب‌ها باید در یک مرحله پر شوند. تراکم می‌تواند این جهت‌گیری را تغییر دهد؛ بنابراین در صورت لزوم از ارتعاش خارجی طبق ASTM C31/C31M و ASTM C192/C192M استفاده می‌شود، به شرطی که جهت‌گیری الیاف برای خاصیت موردنظر اهمیت نداشته باشد. لازم به ذکر است که استفاده از میله‌زنی توصیه نمی‌شود.

کارایی بتن سهولت مخلوط‌کردن، حمل، تراکم و پرداخت تا رسیدن به یکنواختی است. وجود الیاف می‌تواند بر این ویژگی اثر بگذارد و لازم است در تعریف گسترده کارایی لحاظ شود. کارایی معمولاً با آزمایش‌های اسلامپ و وی‌بی ارزیابی می‌شود. آزمایش اسلامپ رایج و ارزان است اما شاخص دقیقی برای بتن الیافی نیست. افزودن الیاف بر جریان بتن تازه اثر گذاشته و نرخ این تغییرات وابسته به نوع الیاف است. بنابراین، مقایسه مستقیم اسلامپ بتن الیافی با بتن بدون الیاف می‌تواند گمراه‌کننده باشد. با این حال، پس از تأیید اولیه یک مخلوط، آزمایش اسلامپ به‌عنوان ابزار کنترل کیفیت در تولید قابل استفاده است. آزمایش وی‌بی (EN 12350-3) رفتار بتن تحت ارتعاش را می‌سنجد و برای بتن الیافی نیز مناسب است. این روش توانایی بتن در جریان‌یافتن تحت ارتعاش و خروج هوای محبوس را ارزیابی

می‌کند. مشابه اسلامپ، افزودن الیاف معمولاً زمان وی‌بی را افزایش می‌دهد. اطلاعات حاصل از اسلامپ و وی‌بی برای مقایسه مخلوط‌ها، ارزیابی اثر تغییرات طرح و فرآیند و در نهایت دستیابی به کارایی مطلوب در حالت تازه مفید است.

الیاف سطح تماس مواد در مخلوط بتن را افزایش می‌دهند و باید با خمیر سیمان پوشیده شوند؛ بنابراین در صورت اصلاح‌نشدن طرح مخلوط، اثر اصلی الیاف در بتن تازه **کاهش روانی یا اسلامپ** است. شدت این کاهش به نوع، خواص فیزیکی، مقدار الیاف و نسبت‌های اولیه مخلوط بستگی دارد. در مقادیر متعارف، **میکروالیاف مصنوعی** تغییر چندانی در طرح ایجاد نکرده و تنها اسلامپ را اندکی کاهش می‌دهند، اما **ماکروالیاف‌ها** در مقدار زیاد تأثیر بیشتری دارند. این اثرات با اصلاح نسبت‌های مخلوط (افزودن ریزدانه یا مواد سیمانی) یا استفاده از افزودنی‌های شیمیایی کنترل می‌شود. پیروی از دستورالعمل‌های تأمین‌کننده برای حفظ کارایی ضروری است.

نوع ماده الیاف، شکل هندسی آن، ابعاد و مقدار مصرف، به‌همراه روش‌های جای‌دهی، تراکم و پرداخت سطحی، همگی ممکن است بر کیفیت سطح نهایی بتن مسلح‌شده با الیاف تأثیرگذار باشند. به‌طورکلی، افزودن میکروالیاف یا ماکروالیاف‌های مصنوعی با مقدار کمتر از ۳ کیلوگرم در متر مکعب، نیاز به اصلاحات در طرح مخلوط ندارد. با این حال، مصرف مقادیر زیاد از ماکروالیاف‌های مصنوعی یا فولادی ممکن است نیازمند اصلاحاتی در مخلوط باشد. در کف‌سازی‌های

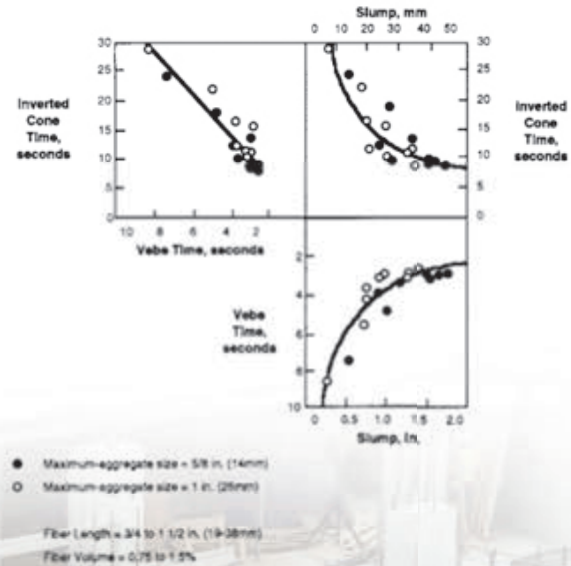
صنعتی، تجاری یا انبارها که مقادیر زیاد ماکروالیاف استفاده می‌شود، استفاده از ابزارهای پرداخت مانند شمشه لیزری یا شمشه لرزشی توصیه می‌شود. با این وجود، برای هر پروژه، پیروی از توصیه‌های تأمین‌کننده الیاف و بتن به منظور دستیابی به سطح نهایی رضایت‌بخش ضروری است.

برای کاربردهای معمول باید علاوه‌بر توزیع یکنواخت و حداقل جداشدگی در بتن تازه مسلح به الیاف فولادی، **کارایی کافی** برای جای‌دهی و پرداخت فراهم شود؛ زیرا تراکم مناسب بر مقاومت و دوام بتن سخت‌شده اثر مستقیم دارد. در محدوده‌های متداول مصرف (۲۵٪ تا ۱/۵ درصد حجمی)، الیاف فولادی معمولاً اسلامپ را ۲۵ تا ۱۰۲ میلی‌متر کاهش می‌دهند. چون تراکم بیشتر با ارتعاش انجام می‌شود، روش‌های ارزیابی مانند **وی‌بی یا اسلامپ معکوس** مناسب‌تر از اسلامپ معمولی هستند. یک رابطه معمولی بین روانی، زمان وی‌بی و زمان روانی اسلامپ معکوس در شکل ۱-۱۴ نشان داده شده است. **یک مخلوط با اسلامپ کم هم می‌تواند تحت ارتعاش تراکم‌پذیری خوبی داشته باشد.** رفتار کاهش اسلامپ با زمان در بتن الیافی مشابه بتن معمولی است.

در بتن تازه لازم است تا از **توده‌شدن الیاف** جلوگیری شود؛ الیاف بلند و باریک با نسبت منظر بیش از ۱۰۰ تمایل به قفل‌شدن و تشکیل گلوله دارند که جداسازی آن‌ها دشوار است، در حالی‌که الیاف کوتاه‌تر (نسبت منظر کمتر از ۵۰) به‌راحتی پراکنده می‌شوند. با این حال، نسبت منظر زیاد به‌رای بسیاری از خواص

الیاف، توده‌های متراکم و نواحی با غلظت بالای الیاف اجتناب شود؛ چه این موارد ناشی از بچینگ و اختلاط نامناسب، تراکم و جایگذاری (متراکم سازی و جابجایی غیر اصولی)، یا کارپذیری ناکافی مخلوط باشند. نواحی با مقدار الیاف کاهش یافته یا بدون الیاف در برابر مکانیزم‌های شکست غیرقابل پیش‌بینی آسیب‌پذیر بوده و این موضوع ممکن است بر ظرفیت باربری، سختی خمشی، مقاومت در برابر شکست و شکل‌پذیری سازه تأثیر بگذارد.

از زمان ظهور **بتن خودتراکم** در ژاپن در اواسط دهه ۱۹۸۰، این نوع بتن محبوبیت زیادی یافته و هم‌اکنون به طور گسترده‌ای در صنعت ساخت استفاده می‌شود. به لطف **هم‌افزایی تکنولوژی‌های بتن خودتراکم و بتن مسلح به الیاف**، دسته جدیدی از کامپوزیت‌های سیمانی به نام **بتن خودتراکم مسلح به الیاف (FR-SCC)** توسعه یافته است. بتن‌های خودتراکم مسلح شده به الیاف عملکرد عالی در هر دو حالت تازه و سخت شده نشان می‌دهند. به دلیل رئولوژی بهینه‌شده آن‌ها، بتن‌های خودتراکم مسلح شده به الیاف می‌توانند پراکندگی الیاف بهتری نسبت به بتن معمولی مسلح‌شده به الیاف داشته باشند. در این حالت، مفهوم کارایی که قبلاً در ارتباط با بتن‌های معمولی تعریف شده است، برای توصیف جنبه‌های مختلف عملکرد حالت تازه بتن خودتراکم کافی نیست. ویژگی‌های مهم دیگر شامل قابلیت جریان، توانایی پر کردن و عبور از قالب و مسائل مرتبط با کاربردهای خاص، از جمله مقاومت در برابر جداشدگی استاتیکی



شکل ۱-۱۴ رابطه بین روانی، زمان وی بی و زمان مخروط معکوس.

مکانیکی بتن سخت‌شده مطلوب است. تمایل به توده‌شدن وابسته به **اندازه سنگدانه، دانه‌بندی، نسبت منظر و حجم الیاف، شکل و روش افزودن آن‌ها** است. هرچه سنگدانه و نسبت منظر بزرگ‌تر باشد، حجم قابل مصرف الیاف محدودتر خواهد بود. دستورالعمل‌های دقیق برای تعیین حجم و ابعاد الیاف و تعادل آن‌ها با طرح مخلوط در بخش اصول طراحی و تولید ارائه می‌شود.

داشتن توزیع قابل قبول الیاف در داخل یک المان سازه‌ای بتن مسلح به الیاف اهمیت زیادی برای رسیدن به عملکرد مورد انتظار دارد. باید از تشکیل گلوله‌های

عضو، که از طریق فرآیندهای ریختن و تراکم حاصل می‌شود، باید با دقت و از طریق آزمون‌های مناسب روی بتن تازه و سخت‌شده مورد راستی‌آزمایی قرار گیرد.

مقدار واقعی و پراکندگی الیاف در حالت سخت‌شده، در اکثر تحقیقات انجام شده، از طریق روش‌های مخرب راستی‌آزمایی شده است. این روش‌ها معمولاً شامل برش مغزه‌های استخراج شده از نقاط مختلف عضو، وزن کردن الیاف پس از جدا شدن از بقایای بتن یا شمارش الیاف در مقاطع هستند. نیاز به روش‌های غیرمخرب که از نظر زمان و هزینه بهینه باشند، برای ارزیابی پراکندگی و جهت‌گیری الیاف اهمیت یافته است، به طوری که هدف، توسعه روش‌های کنترل کیفیت میدانی باشد که بتوانند نواحی که احتمالاً به دلیل پراکندگی نامناسب الیاف دارای خواص مکانیکی کاهش‌یافته هستند، شناسایی کنند. روش‌های غیر مخرب می‌تواند شامل پرتو ایکس، روش‌های الکتریکی و مغناطیسی باشد.

۱- ۴- ۲- اتصال، لغزش پیوند و خروج الیاف

ویژگی‌ها و رفتار اتصال بین الیاف و ماتریس در کامپوزیت‌های سیمانی تقویت‌شده با الیاف، نقش اساسی در کنترل عملکرد مکانیکی این مصالح ایفا می‌کند. مطالعه رفتار و ویژگی‌های پیوند

و دینامیکی الیاف است. توانایی پراکندن الیاف در طول جریان قالب‌گیری، ویژگی متمایز کلیدی بتن خودتراکم مسلح شده به الیاف را تشکیل می‌دهد. برای ارزیابی ویژگی‌های مذکور، هم به‌طور کیفی و هم کمی، روش‌های آزمایشی و تجهیزات تخصصی طراحی و کالیبره شده‌اند که در ACI 237R و ACI 238.1R مرور شده است.

پیشرفت‌های اخیر در فناوری افزودنی‌های کاهنده آب، به حل بسیاری از مشکلات کارایی ناشی از افزودن الیاف کمک کرده‌اند. با این حال، روش‌های اجرایی رایج مانند تراکم به وسیله لرزاننده، حتی در صورت اجرای صحیح، خود موجب پراکندگی نامناسب الیاف می‌شوند؛ حتی در دال‌های نازک. از این نظر، استفاده از بتن‌های خودتراکم تقویت‌شده با الیاف می‌تواند به دستیابی به پراکندگی تصادفی الیاف کمک کند. این موضوع به دلیل حذف عملیات تراکم و پایداری رئولوژیکی ماتریس بتن خودتراکم است.

در برخی موارد نشان داده شده که می‌توان جهت‌گیری الیاف را با استفاده از جهت جریان ریختن (قالب‌ریزی) کنترل کرد. این موضوع منجر به رفتاری ناهمسانگرد در ماده تقویت‌شده با الیاف می‌شود؛ به طوری که اگرچه این ماده در هنگام اعمال تنش در جهت موازی با راستای قرارگیری الیاف عملکرد برتری از خود نشان می‌دهد، اما ممکن است در صورت اعمال تنش عمود بر آن جهت، پاسخ بسیار ضعیف‌تری ارائه دهد این نتیجه باید هنگام تعیین خواص ماده برای طراحی سازه‌ای مورد توجه قرار گیرد. توزیع صحیح الیاف در

سیستم‌های الیاف-ماتریس سیمانی از طریق روش‌های تحلیلی-عددی و تجربی انجام شده است. همچنین، آزمایش‌های کشش خروج الیاف به‌منظور تعیین رفتار اتصال الیاف-ماتریس و شناسایی پارامترهایی که بر رفتار خروج الیاف از سیستم‌های سیمانی تأثیرگذار هستند، انجام گرفته‌اند. این پارامترها شامل انواع مختلف الیاف، ترکیبات مختلف مخلوط‌ها، طول‌های مختلف الیاف مدفون در ماتریس و روش‌های مختلف پردازش هستند.

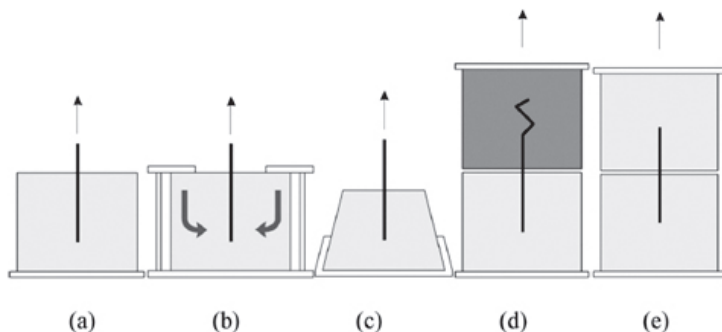
تا به امروز، بیشتر مطالعات مربوط به شبیه‌سازی اتصال در سیستم‌های سیمانی تقویت‌شده با الیاف روی الیاف فولادی، شیشه‌ای، پلیمری و به‌تازگی الیاف طبیعی متمرکز بوده است. در این تحقیق‌ها، هندسه‌های مختلف الیاف از جمله الیاف مستقیم، الیاف قلاب‌دار و الیاف با شکل‌های فرمی مانند الیاف موجی و پیچ‌خورده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این مطالعات به‌منظور درک بهتر رفتار پیوند بین الیاف و ماتریس، تأثیرات طول و نوع الیاف، ترکیب مخلوط‌های سیمانی و روش‌های تولید بر رفتار روش‌های پیوند و لغزش در طول بارگذاری‌های مکانیکی صورت پذیرفته است. رویکردهای مبتنی بر مدل خروج الیاف از طریق تحلیل تنش، مکانیک شکست غیرخطی یا مدل‌های اجزای محدود توسعه یافته و به مشاهدات تجربی پاسخ‌های بار-لغزش سیستم‌های الیاف-ماتریس اعمال شده‌اند.

چهار عامل اصلی بر پیوند بین الیاف و ماتریس تأثیر می‌گذارند: (۱) چسبندگی فیزیکی و شیمیایی؛ (۲)

جزء مکانیکی پیوند، مانند الیاف تغییرشکل‌یافته، پیچ‌خورده و با انتهای قلاب‌دار؛ (۳) اصطکاک؛ (۴) قفل شدن بین الیاف.

اگرچه استاندارد مشخصی در ASTM یا EN برای آزمایش خروج الیاف از ماتریس‌های سیمانی به‌منظور تعیین مقاومت پیوند وجود ندارد، اما منابعی نحوه انجام این آزمایش و اثر شرایط بارگذاری را تشریح کرده‌اند. نتایج آزمایش به‌ویژه به تنش‌های عمود بر جهت بارگذاری حساس‌اند؛ این تنش‌ها ممکن است در اثر تنظیمات آزمایش یا انقباض ماتریس طی سخت‌شدن ایجاد شوند. بنابراین، ثابت نگه‌داشتن شرایط عمل‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌ها برای کاهش پراکندگی نتایج ضروری است. دو گروه اصلی از پیکربندی‌های آزمایش خروج الیاف برای ماکروالیاف وجود دارد: **آزمونه‌های یک‌طرفه یا دو‌طرفه** که می‌توانند با یک یا چند الیاف اجرا شوند. در شکل ۱-۱۵ نمونه‌هایی از این روش‌ها نشان داده شده است. آزمونه‌ها معمولاً به شکل استوانه‌ای، منشوری یا استخوان‌سگی ساخته می‌شوند و نرخ جابه‌جایی خروج الیاف در محدوده ۵/۰ تا ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه برای شرایط شبه‌استاتیک متغیر است. این پیکربندی‌ها عمدتاً در سه عامل تفاوت دارند: **نحوه خروج الیاف از ماتریس، روش نگه‌داری نمونه در حین آزمون و موقعیت‌دهی الیاف در هنگام ساخت**. هدف اصلی آن‌ها نیز یکی از دو مورد زیر است:

(۱) تعیین نیروی لازم برای بیرون کشیدن یا گسیختن الیاف؛



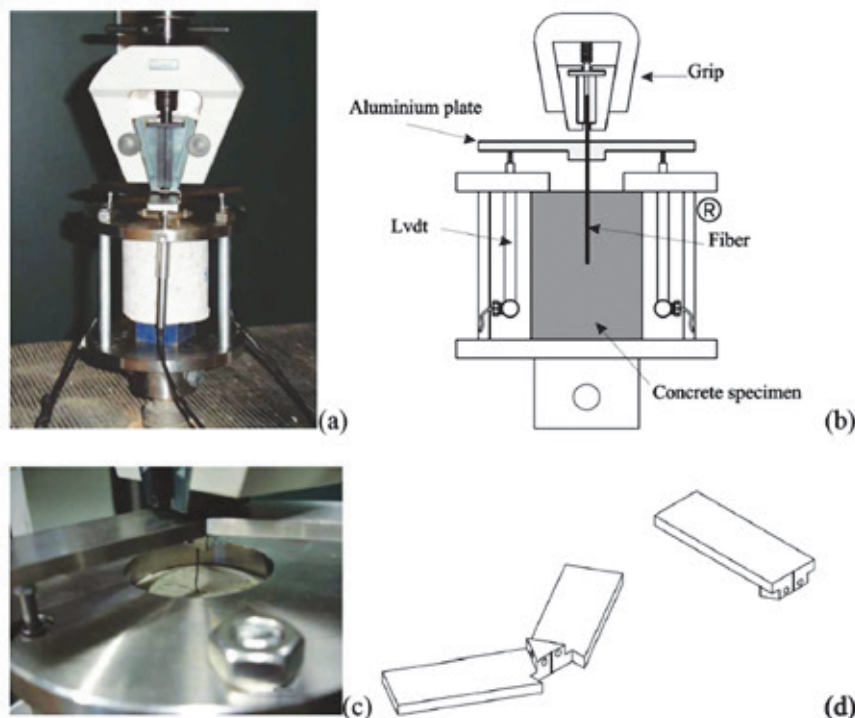
شکل ۱- ۱۵- نمونه‌هایی از پیکربندی آزمایش کشش خروج الیاف: (a) تا (c) نمونه تک‌طرفه؛ و (d) و (e) نمونه‌های دوطرفه.

(۲) به‌دست‌آوردن رابطه کامل بار-لغزش در فرآیند خروج.

یک چیدمان آزمایش خروج الیاف که اخیراً برای الیاف فولادی پیشنهاد شده است، اثر زاویه جهت‌گیری الیاف (۵، ۳۰ و ۶۰ درجه) را بر رفتار بار-لغزش مورد بررسی قرار داد. مطابق شکل ۱- ۱۶، نمونه یک‌طرفه در یک قاب فولادی نصب می‌شود. این قاب شامل یک صفحه فولادی است که به قاب دستگاه آزمایش متصل شده و یک حلقه فولادی که با سه پیچ فولادی به صفحه فولادی متصل می‌شود. انتهای بیرون‌زده الیاف فولادی به یک گیره استاندارد بسته می‌شود تا مهار مطمئنی فراهم گردد. هنگام استفاده از الیاف با قطر کم، باید توجه ویژه‌ای به محکم بستن آن‌ها داشت، زیرا تغییر شکل انتهای الیاف می‌تواند موجب شکست الیاف در محل گیره شود.

در اطراف هر الیاف در بتن، لایه نازک به ضخامت چند ده میکرومتر تشکیل می‌شود که به آن **ناحیه انتقالی بین سطحی (ITZ)** می‌گویند. ریزساختار

ITZ معمولاً نسبت به ماتریس عمده ضعیف‌تر و متخلخل‌تر است، زیرا حضور الیاف در خمیر سیمان موجب تغییر در نحوه آب‌گیری و تجمع محصولات سیمانی در نزدیکی سطح الیاف می‌شود. این ناحیه فصل مشترک الیاف-ماتریس را تشکیل داده و به دلیل چسبندگی ناکامل یا ریزترک‌های اولیه، به عنوان نقطه ضعف بالقوه شناخته می‌شود. در واقع بسیاری از ریزترک‌ها تحت تنش ابتدا در ITZ ایجاد می‌شوند پیش از آن که در حجم ماتریس گسترش یابند. مشاهدات میکروسکوپی الکترونی نشان داده است که اطراف الیاف فولادی یک منطقه آسیب‌پذیر وجود دارد که مستعد ریزترک ناشی از جداسازی الیاف از بتن است. با این حال، ویژگی‌های ITZ قابل بهبود است؛ مثلاً استفاده از مواد پوزولانی ریزدانه (مانند دوده سیلیس) یا بهبود سطح الیاف می‌تواند این ناحیه را متراکم‌تر و مستحکم‌تر کند. ایجاد محصولات هیدراته بیشتر در تماس با الیاف، پیوستگی را افزایش می‌دهد. همچنین، شکل الیاف بر رفتار ITZ مؤثر است؛ به عنوان مثال، بررسی‌ها



شکل ۱-۱۶- پیکربندی آزمون کشش خروج تک‌الیاف: (a) و (b) نمای کلی؛ و (c) و (d) نمای جزئی از صفحه آلومینیومی متصل به الیاف.

هنگام ترک‌خوردگی بتن، الیاف تحت کشش وارد فاز **لغزش پیوند** می‌شوند. در این مرحله، پیوند شیمیایی فصل مشترک تدریجاً گسسته شده و الیاف اندکی نسبت به ماتریس حرکت می‌کنند. ابتدا با لغزش محدود، تنش بین الیاف و ماتریس افزایش یافته و به **حداکثر مقاومت پیوند** می‌رسد. سپس با کاهش تدریجی چسبندگی، الیاف درون ماتریس

نشان داده‌اند که الیاف فولادی تابیده‌شده به دلیل سطح تماس بیشتر با ماتریس، پیوند قوی‌تری ایجاد کرده و عرض ترک‌های فصل مشترک را نسبت به الیاف قلاب‌دار به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهند (تقریباً تا هفت برابر کمتر). بنابراین، کنترل ریزساختار و ترک‌های ITZ برای تضمین پیوند مناسب و عملکرد بهینه بتن الیافی ضروری است.

می‌لغزند. منحنی نیرو-لغزش عموماً تا رسیدن به حداکثر نیرو رفتاری تقریباً خطی دارد و پس از آن به فازی پایدار می‌رسد که ناشی از **اصطکاک سطحی** است. سطح زبر یا آج‌دار اصطکاک را افزایش داده و قفل‌شدگی موضعی ایجاد می‌کند و منحنی رفتاری نسبتاً ثابت یا سخت‌شونده خواهد بود. **اصطکاک حین لغزش** مکانیزم مهمی در جذب انرژی است و مانع خروج ناگهانی الیاف می‌شود. در الیاف صاف، اصطکاک صرفاً ناشی از ناهمواری‌های میکروسکوپی سطح است، اما در الیاف دارای قلاب یا تابیدگی، مقاومت اصطکاکی بیشتر بوده و حتی با افزایش لغزش، نیرو افزایش می‌یابد. **برخی از الیاف مصنوعی، از زبر شدن سطح یا رشته‌رشته شدن الیاف حین فرآیند مخلوط کردن بهره‌مند می‌شوند که می‌تواند مقاومت کششی خروج الیاف را در مقایسه با الیاف خام به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. بنابراین، هنگام ارزیابی خروج الیاف مصنوعی، الیاف باید در یک مخلوط معمولی ترکیب شوند تا زبری سطح مورد انتظار در شرایط میدانی ایجاد شود.**

مرحله نهایی، **بیرون‌کشیدگی الیاف** است. در بتن مطلوب است که الیاف به‌صورت تدریجی بیرون کشیده شوند نه این که در محل خود بشکنند، زیرا بیرون‌کشیدگی همراه با اصطکاک انرژی زیادی مستهلک می‌کند. اگر پیوند بسیار ضعیف باشد، الیاف با کمترین مقاومت خارج شده و ظرفیت پس‌ازترک کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که پیوند بیش‌ازحد قوی می‌تواند موجب **شکست الیاف**

پیش از لغزش شود و رفتار تردی به همراه داشته باشد. بنابراین، **پیوند بهینه** حالتی است که الیاف ابتدا لغزش کنترل‌شده‌ای داشته و سپس با نیروی اصطکاکی تقریباً ثابت خارج شوند، بدون پارگی ناگهانی. این رفتار افت ناگهانی تنش در منحنی تنش-کرنش کامپوزیت را کاهش می‌دهد. برای مثال، در الیاف فولادی صاف مقاومت بیرون‌کشیدگی ناشی از اصطکاک سطحی است، اما در الیاف قلاب‌دار یا تغییرشکل‌یافته، مهار مکانیکی نیز دخیل بوده و نیاز به نیروی بیشتری دارد. این الیاف پیش از خروج کامل دچار تغییرشکل پلاستیک (بازشدن قلاب یا کشیدگی موضعی) می‌شوند که خود به جذب انرژی بیشتر کمک می‌کند. هرچه طول بیشتری از الیاف در برابر بیرون‌کشیده‌شدن مقاومت کند، **انرژی جذب‌شده در حین شکست** بیشتر خواهد بود.

۱- ۴- ۳- بتن سخت‌شده؛ مکانیکی و دینامیکی

در بتن سخت‌شده، مزایای اصلی استفاده از الیاف در بتن، **افزایش ظرفیت جذب انرژی، توانایی تحمل بار پس از شکست و ترک‌خوردگی** است. به‌واسطه این جذب انرژی بیشتر یا طاقت، الیاف مقاومت بتن در برابر خرد شدن و ضربه را بهبود می‌بخشند. بهبود ظرفیت تحمل بار پس از شکست و ترک‌خوردگی که توسط بتن الیافی فراهم می‌شود، باعث شده است

که استفاده از الیاف به جای میلگردهای سنتی مربوط به کنترل افت و حرارت، در بسیاری از کاربردها به‌ویژه در کفسازی‌های بتنی روی زمین، معادن و تونل‌ها و سازه‌های حائل خاک‌برداری به‌طور گسترده‌ای رایج شود. در ادامه مشخصه‌های مختلف مکانیکی و دینامیکی بتن الیافی ارائه می‌شود:

■ رفتار تحت بارگذاری استاتیکی

مکانیزم تقویت الیاف در ماتریس سیمانی، به طور گسترده‌ای از نظر مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن از ماتریس ناشی از خرابی چسبندگی بین الیاف و ماتریس مطالعه شده است. همچنین، تلاش‌هایی برای ارتباط دادن مقاومت اتصالی با خواص مکانیکی کامپوزیت‌های بتن مسلح به الیاف فولادی انجام شده است. فرآیند بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس سیمانی، نشان از ماهیت تدریجی آن دارد. نتیجه این ماهیت تدریجی، **قابلیت شکل‌پذیری ماتریس سیمانی پس از ترک‌خوردگی** است که در غیر این صورت، ماتریس سیمانی رفتاری شکننده خواهد داشت.

همان‌طور که پیش‌تر در بخش اتصال، لغزش پیوند و خروج الیاف ذکر شد، بهبود شکل‌پذیری ماتریس وابسته به نوع و حجم الیاف مصرفی است. الیاف تغییرشکل یافته (الیاف با مهار فیزیکی مثل الیاف قلاب‌دار و ...)، مقاومت بهتری در برابر بیرون کشیدگی از خود نشان داده‌اند. در طول و قطر ثابت، الیاف تغییرشکل یافته نسبت به الیاف صاف

عملکرد مؤثرتری دارند. در نتیجه، برای دستیابی به خواص مکانیکی موردنظر، مقدار الیاف تغییرشکل یافته کمتری نسبت به الیاف صاف موردنیاز است. **الیاف فولادی** موجب بهبود خاصیت شکل‌پذیری بتن تحت هر نوع بارگذاری (فشاری، کششی، برش، پیچش و خمش) می‌شود، اما مقدار تأثیر در هر نوع بارگذاری متفاوت است.

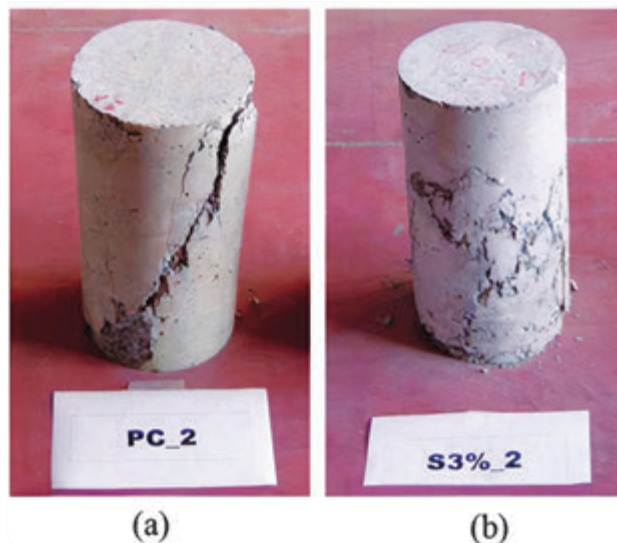
■ مقاومت فشاری

در بتن حاوی الیاف فولادی، مقاومت نهایی فقط به مقدار جزئی تقریباً ۰ تا ۲۳ درصد (با استفاده از مقدار الیاف تا ۲ درصد حجمی الیاف با نسبت منظر ۱۰۰) افزایش پیدا می‌کند. **حتی استفاده از الیاف با مقدار زیاد، موجب افزایش مقاومت فشاری در حد مورد انتظار نمی‌شود.** الیاف به‌طور قابل توجهی شکل‌پذیری پس از وقوع ترک یا جذب انرژی را افزایش می‌دهند. افزایش نسبت منظر الیاف موجب افزایش شکل‌پذیری فشاری می‌شود، اما همچنان تأثیر کمی بر مقاومت فشاری دارد. وجود الیاف می‌تواند حالت گسیختگی نمونه‌های استوانه‌ای را تغییر دهد و در جلوگیری از شکست‌های کاذب از نوع برشی در بتن بدون الیاف مؤثر باشد. در نتیجه، حالتی از گسیختگی حاصل می‌شود که شامل ترک‌های ریزتر و موازی با تنش اعمال شده است (شکل ۱-۱۷).

پل زنی ترک‌ها که توسط الیاف فراهم می‌شود، تداخل داشته باشند و در نتیجه منجر به برآورد بیش از حد مقاومت شوند. با این حال، داده‌های مرجع بسیار محدودی برای آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی وجود دارد و رابطه مشخصی بین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای برای بتن‌های مسلح به الیاف تعیین نشده است.

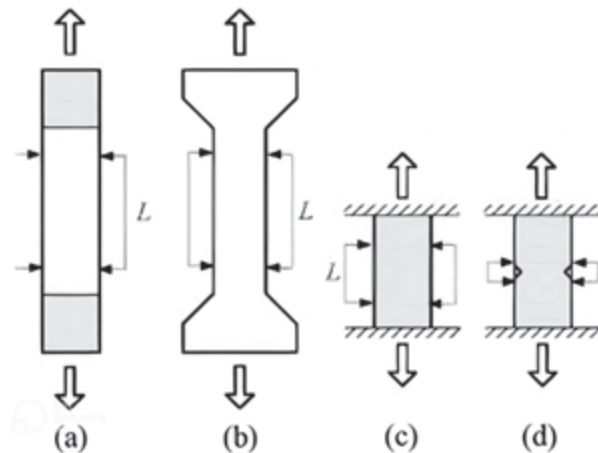
■ مقاومت کششی

توانایی حفظ مقاومت کششی قابل توجه و قابل اعتماد در مرحله پس از ترک خوردگی، یکی از ویژگی‌های بارز بتن مسلح به الیاف (بتن الیافی) است. از این رو، شناسایی آزمایشگاهی رفتار کششی پس از ترک خوردگی و تعریف پارامترهایی برای توصیف مناسب بتن مسلح به الیاف از دیدگاه طراحی، اهمیت بالایی دارد. آزمایش‌های مختلفی برای بررسی رفتار کششی به کار گرفته شده‌اند که به صورت مستقیم یا غیرمستقیم انجام می‌شوند؛ با این حال تاکنون استاندارد مشخصی برای آزمایش کشش تدوین نشده است. چندین سازمان فنی، از جمله انجمن آزمون و مواد آمریکا (ASTM)، مؤسسه بتن ژاپن (JCI) و انجمن بین‌المللی مواد و سازه‌ها (RILEM)، آزمایش‌های خمشی توسعه داده‌اند که هدف آن‌ها شبیه‌سازی ویژگی‌های بتن مسلح به الیاف در شرایط کششی است. نمونه‌ای از این آزمون‌ها در شکل ۱-۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۷- الگوی شکست برای: (a) بتن معمولی؛ و (b) استوانه‌های بتن الیافی مسلح به الیاف فولادی در فشار (حجم الیاف = ۳ درصد؛ طول الیاف = ۲۲ میلی‌متر؛ نسبت ظاهری = ۴۰)

استفاده از **آزمون‌های مکعبی برای آزمایش مقاومت فشاری بتن‌های مسلح به الیاف توصیه نمی‌شود**. هم‌راستایی عمود بین جهت ریختن و تراکم نمونه و جهت اعمال بار می‌تواند بر نقش الیاف در مقاومت در برابر بارگذاری، زمانی که الیاف در راستای مشخصی قرار گرفته‌اند تأثیر بگذارد. تنش‌های اصطکاکی که در ناحیه تماس بین سطح نمونه و صفحه بارگذاری دستگاه ایجاد می‌شوند نیز ممکن است با مکانیزم



شکل ۱-۱۸- نمونه‌هایی از آزمون کشش بتن الیافی؛ (a) ورق‌های نازک؛ (b) آزمون‌های استخوان‌سگی؛

مقدار بتن غیرمسلح است که در محدوده بین ۲ تا ۶ مگاپاسکال است. پارامتر طاق‌ت بتن الیافی می‌تواند در حدود دو تا سه برابر بتن غیرمسلح باشد.

اگرچه آزمون کشش مستقیم، مناسب‌ترین روش برای تعیین مقاومت کششی و روابط تنش-کرنش یا بازشدگی ترک در بتن‌های الیافی (روابط سازگاری) است، اما برای استانداردسازی مخلوط‌های جدید بتن الیافی توصیه نمی‌شود. انجام این آزمون‌ها دشوار است و تفسیر نتایج آن‌ها پیچیدگی دارد. از آن‌جا که آزمون‌های آزمایشگاهی معمولاً کوچک‌اند، تعداد الیاف موجود در صفحه شکست اصلی نیز کم بوده و ممکن است به دلیل روش ساخت، نماینده مناسبی از اثر جهت‌گیری الیاف نباشند. با این حال، جهت‌گیری الیاف را می‌توان به‌طور مؤثر از طریق جریان بتن هنگام ریختن و با بهره‌گیری مناسب از ویژگی‌های بتن تازه، مانند روانی زیاد یا قابلیت خودتراکمی، کنترل کرد. از دیدگاه طراحی، مشکلات مربوط به پراکندگی و جهت‌گیری الیاف باید هنگام مشخصه‌یابی رفتار مکانیکی ماده در نظر گرفته شوند. به دلیل حساسیت بالای خواص مکانیکی بتن الیافی نسبت به جهت‌گیری الیاف در برابر تنش کششی اعمال‌شده، ممکن است نتایج به ناهمسانگردی شدیدتری منجر شوند.

برای غلبه بر دشواری‌های ذاتی آزمون کشش مستقیم، روش‌های آزمایشی جایگزینی معرفی شده‌اند که در دسته آزمون‌های **کشش غیرمستقیم** قرار می‌گیرند (شکل ۱-۱۹). این روش‌ها مشابه آزمون شکافت برزبلی (بر اساس ASTM C496/C496M و EN 12390-6) هستند

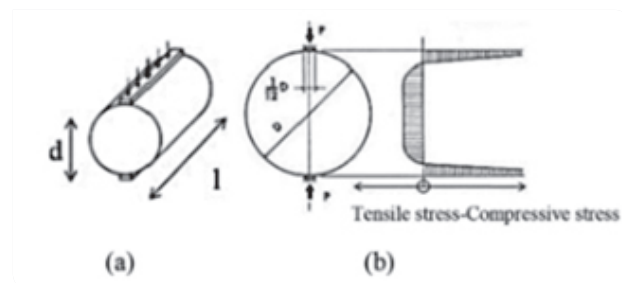
در **کشش مستقیم**، بهبود مقاومت قابل توجهی در حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد (با استفاده از مقدار الیاف تا ۱/۵ درصد حجمی الیاف) در ملات یا بتن گزارش شده است. الیاف‌های قرار گرفته در جهت اعمال بار تنش کششی می‌توانند افزایش‌های بسیار زیادی در مقاومت کششی مستقیم ایجاد کنند، به‌طوری که برای ۵ درصد حجمی از الیاف فولادی صاف، این افزایش ممکن است به ۱۳۳ درصد برسد. با این حال، برای الیاف با توزیع تصادفی یا نسبتاً تصادفی، افزایش مقاومت به مراتب کمتر است، به‌طوری که در برخی موارد هیچ افزایشی مشاهده نمی‌شود و در برخی دیگر ممکن است تا حدود ۶۰ درصد باشد. مقاومت بتن الیافی در کشش مستقیم (قبل از ترک‌خوردگی) عموماً با همان

جان و بال در تیرها. علاوه‌براین، عملکرد مهارى الیاف در صفحه برشى مى‌تواند مقاومت باقى‌مانده بیشترى نسبت به قفل‌شدگى سنگدانه‌ای در بتن معمولی ایجاد کند. در حالی که روش استانداردى برای آزمون برش یا پیچش در بتن الیافى وجود ندارد، آزمون‌های مربوط به رفتار برشى بتن الیافى به دو گروه تقسیم مى‌شوند: (۱) آزمون‌های برش مستقیم؛ (۲) آزمون‌های مربوط به تیرها و کنسول‌ها. آزمون‌های برش مستقیم به‌منظور درک رفتار پایه‌ای انتقال برش در بتن انجام مى‌شوند، در حالی که آزمون‌های مربوط به تیرها برای درک رفتار سازه‌های بتن الیافى ضرورى‌اند.

اگرچه داده‌های کمی در مورد مقاومت برشى و پیچشى بتن الیافى فولادى وجود دارد، اما الیاف فولادى معمولاً مقاومت برشى و پیچشى بتن را افزایش مى‌دهند. افزایش مقاومت بتن الیافى فولادى در برش خالص، وابسته به روش آزمایش (هندسه و ابعاد نمونه) و جهت‌گیرى الیاف در سطح برش دارد. با استفاده از ۱ درصد حجمى از الیاف، افزایش مقاومت از مقدار ۰ تا ۳۰ درصد متغیر است. استفاده از الیاف فولادى همراه با تقویت‌کننده‌های فولادى معمولی (آرماتور) به طور گسترده برای بهبود مقاومت برشى المان سازه‌ای توصیه مى‌شوند. همچنین، الیاف فولادى مزایای متعددى برای تقویت یا جایگزین کردن خاموت‌ها در تیرها دارند. این مزایا عبارتند از:

- توزیع الیاف فولادى در حجم بتن به صورت تصادفى و در فواصل نزدیک به هم است که مى‌تواند منجر به توزیع ترک با اندازه ترک کاهش یافته شود،

که در آن، بار فشارى در امتداد دو خط مولد قطرى و متقابل، به یک آزمون استوانه‌ای اعمال مى‌شود. در نتیجه، حالت تنش کششى عرضى یکنواختى تقریباً در امتداد صفحه قطرى موازى با نیروهای اعمال‌شده ایجاد مى‌شود که با رسیدن به مقاومت کششى ماده، موجب شکست نمونه خواهد شد. این روش، نیاز به چسباندن سطوح انتهایی آزمون به صفحات دستگاه پرس یا طراحی خاص انتهای آزمون برای جلوگیری از شکست در انتها را از میان بر مى‌دارد.



شکل ۱-۱۹- (a) شمانیکی از آزمون کشش شکاف برشى؛ و (b) توزیع تنش در امتداد صفحه شکست قطرى

■ مقاومت برشى و پیچشى

مقاومت انتقال برش در اعضای بتن مسلح مى‌تواند از طریق عملکرد خریایی ایجاد شود. افزودن الیاف منجر به عملکرد مکانیکی بهتر در برابر برش مى‌شود، مانند کلیدهای برشى، گره‌های تیر-ستون یا ترک‌خوردگى

- موجب افزایش مقاومت کششی در ترک اولیه و مقاومت کششی نهایی می‌شود،

- مقاومت برشی اصطکاکی به واسطه مقاومت در برابر بیرون کشیدگی و پل زدن الیاف، افزایش پیدا می‌کند.

الیاف فولادی در مقدار کافی، بسته به شکل هندسی الیاف، می‌توانند مقاومت برشی تیرهای بتن را به اندازه‌ای افزایش دهند که از شکست کشش قطری جلوگیری کنند و باعث شکست انعطاف‌پذیر تیر شوند. بیشتر داده‌های آزمایش موجود برای ظرفیت برش تیرهای بتن الیاف فولادی برای تیرهایی با اندازه کوچکتر از اندازه‌های نمونه اصلی هستند. داده‌های آزمایشی محدود برای تیرهای با اندازه نمونه اصلی نشان می‌دهند که **الیاف فولادی به عنوان تقویت‌کننده برشی مؤثر هستند**. همچنین، مطالعات دیگری نیز نشان دادند که ماکروالیاف پلیمری نیز باعث افزایش مقاومت برشی تیر تا ۳۰ درصد نسبت به نمونه شاهد شدند.

■ مقاومت خمشی

الیاف فولادی معمولاً تأثیر بسیار بیشتری بر **مقاومت خمشی بتن مسلح به الیاف فولادی** نسبت به مقاومت فشاری یا کششی دارند، به طوری که افزایش‌های بیشتر از ۱۰۰ درصد گزارش شده است. زیرا رفتار شکل‌پذیر بتن مسلح‌شده با الیاف فولادی در سمت کششی تیر، توزیع تنش و کرنش را که معمولاً الاستیک است، در عمق عضو تغییر می‌دهد. برای تعیین رفتار خمشی بتن الیافی معمولاً دو مقدار گزارش می‌شود: مقاومت خمشی اولیه

(مربوط به اولین ترک) و مقاومت خمشی نهایی یا مدول گسیختگی که با حداکثر بار و روابط ASTM C78/ C7M یا ASTM C1609/C1609M محاسبه می‌شود. یکی از شاخصه‌های مهم بتن الیافی، طاقت یا جذب انرژی است که از مساحت زیر منحنی بار-تغییر مکان یا بار-بازشدگی ترک در آزمایش خمشی تیر به دست می‌آید و بیانگر انرژی جذب‌شده تا شکست کامل نمونه است. در سال‌های اخیر، به جای شاخص طاقت، از **مفهوم مقاومت باقی‌مانده** استفاده می‌شود که بیانگر توان تحمل بتن الیافی پس از ترک‌خوردگی است.

مطالعات نشان می‌دهند که در آزمایش خمشی سه نقطه‌ای، مقاومت خمشی بتن الیافی فولادی حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد بیشتر از ماتریس بتن تقویت نشده (بتن معمولی) است. استفاده از الیاف با درصد حجمی بیشتر، یا بارگذاری در نقطه مرکزی، یا آزمون‌های کوچک و الیاف بلند با هم‌راستایی در جهت طولی، موجب افزایش بیشتر تا ۱۵۰ درصد می‌شود. در مقادیر کمتر الیاف، ممکن است افزایش قابل توجهی در مقاومت خمشی با استفاده از نمونه‌های تیر شکل مشاهده نشود. افزایش مقاومت خمشی نه تنها به حجم الیاف، بلکه به نسبت منظر الیاف نیز وابسته است، به طوری که نسبت‌های ابعادی بالاتر منجر به افزایش بیشتری در مقاومت می‌شوند. اگرچه مطالعات اولیه نشان داده است که مقاومت خمشی می‌تواند با حدود ۴ درصد حجمی الیاف در ملات بیش از دو برابر شود، ولی اکنون شناخته شده است که حضور سنگدانه درشت به همراه ملاحظات معمول در مخلوط کردن و

انرژی شکست تحت ضربه، کمتر از بهبود حاصل در بارگذاری استاتیکی بود که احتمالاً به دلیل شکست بیشتر الیاف تحت بارگذاری ضربه‌ای است.

در مقایسه رفتار بتن الیافی فولادی تحت بارگذاری ضربه‌ای با بارگذاری استاتیکی، الیاف فولادی بارهای حداکثر را برای بتن با مقاومت معمولی حدود ۲ تا ۳ برابر و برای بتن پرمقاومت حدود ۱/۵ برابر افزایش دادند. همچنین، الیاف فولادی انرژی شکست را برای بتن با مقاومت معمولی حدود ۵ برابر و برای بتن پرمقاومت حدود ۴ برابر افزایش دادند.

■ رفتار خستگی

خستگی در بتن به معنای کاهش تدریجی مقاومت و سختی بتن در اثر بارهای تکرارشونده یا نوسانی است. این نوع آسیب، بر خلاف شکست ناگهانی در بارهای استاتیکی، در اثر اعمال بارهایی کمتر از مقاومت نهایی بتن ولی در دفعات زیاد به وجود می‌آید. حال وقتی از بتن الیافی صحبت می‌شود، موضوع خستگی یک جنبه کلیدی در پایداری بلندمدت آن محسوب می‌شود. در سازه‌هایی مانند روسازی راه‌ها، عرشه‌های پل، کف‌های صنعتی، دال‌های فرودگاهی، تونل‌ها و سازه‌های در معرض بارهای تکرارشونده، بتن مدام تحت بارهایی با دامنه نوسان است. در این شرایط، بتن معمولی ممکن است ترک بخورد و عملکردش افت کند. اما بتن الیافی، با حضور الیاف فولادی، پلیمری یا شیشه‌ای، توانایی جذب انرژی و کنترل ترک‌ها را دارد و می‌تواند مقاومت خستگی بالاتری از خود نشان دهد.

جای‌دهی، حداکثر حجم عملی الیاف در بتن را به ۱/۵ تا ۲ درصد محدود می‌کند.

■ تحت بارگذاری دینامیکی (بار ضربه‌ای)

برای توصیف رفتار بتن تحت بارگذاری ضربه‌ای، دو پارامتر مهم عبارتند از **مقاومت و انرژی شکست**. رفتار بتن مسلح به انواع مختلف الیاف فولادی و تحت بارهای ضربه‌ای ناشی از انفجارها، به وسیله دستگاه‌های ضربه‌ای سقوط وزنه یا بارهای کششی و فشاری دینامیکی به روش‌های مختلفی اندازه‌گیری شده است. به‌طور کلی، در این زمینه دو نوع مقایسه قابل انجام است:

(۱) تفاوت بین رفتار بتن مسلح به الیاف فولادی و بتن معمولی تحت بارگذاری ضربه‌ای،

(۲) تفاوت بین رفتار بتن مسلح به الیاف فولادی تحت بارگذاری ضربه‌ای و بارگذاری استاتیکی.

در مقایسه بین بتن الیافی فولادی و بتن معمولی تحت بارگذاری خمشی ضربه‌ای، مطالعات نشان داده است که برای بتن با مقاومت معمولی، بارهای حداکثر برای بتن الیافی فولادی حدود ۴۰ درصد بیشتر از مقادیر مربوط به بتن معمولی بوده است. برای بتن پرمقاومت، بهبود مشابهی در بار حداکثر مشاهده شد. الیاف فولادی انرژی شکست تحت ضربه را برای بتن با مقاومت معمولی حدود ۲/۵ برابر و برای بتن پرمقاومت حدود ۳/۵ برابر افزایش دادند. با این حال، در برخی موارد، بهبود مشاهده‌شده در بار حداکثر و

در بتن الیافی، **مکانیزم خستگی** به ترتیب شامل موارد زیر است؛ (۱) شروع ریزترک‌ها در ماتریس سیمانی در اثر بارگذاری تکراری؛ (۲) انتقال تنش به الیاف در اطراف ترک‌ها و تلاش الیاف برای جلوگیری از رشد آن‌ها؛ (۳) توقف ترک‌ها یا کاهش رشد ترک در صورت چسبندگی مناسب الیاف با ماتریس؛ و (۴) در ادامه بارگذاری، اگر الیاف به تدریج کشیده یا جدا شوند، ترک‌ها گسترش می‌یابد و در نهایت منجر به شکست خستگی می‌شود.

مطالعات تجربی نشان می‌دهند که برای نوع خاصی از الیاف، با افزایش درصد الیاف فولادی، مقاومت خمشی خستگی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. بسته به نوع و مقدار الیاف، یک مخلوط طراحی‌شده مناسب از بتن الیافی فولادی در بارگذاری غیرمعکوس، مقاومت خستگی حدود ۶۵ تا ۹۰ درصد از مقاومت خمشی استاتیک را در دو میلیون سیکل داراست، در حالی که در بارگذاری کاملاً معکوس، مقاومت خستگی اندکی کمتر است. در بارگذاری خستگی کششی مستقیم، بهبودهای قابل توجهی در رفتار خستگی مشاهده شده است که مشابه رفتار بتن الیاف فولادی تحت بارگذاری کششی استاتیکی است. افزودن الیاف به تیرهای بتنی معمولی (آرماتوربندی شده)، عمر خستگی را افزایش داده و عرض ترک‌ها را در بارگذاری خستگی کاهش می‌دهد. همچنین، مقاومت خستگی تیرهای بتنی معمولی که با بتن الیافی فولادی ساخته شده‌اند، افزایش می‌یابد. علاوه‌براین، تغییرات شکل ناشی از بارگذاری خستگی نیز کاهش پیدا می‌کند.

■ مدول الاستیسته و نسبت پواسون

در عمل، هنگامی که درصد حجمی الیاف کمتر از ۲ درصد باشد، مدول الاستیسته و نسبت پواسون بتن با الیاف فولادی، مساوی با بتن بدون الیاف یا ملات در نظر گرفته می‌شود. در مقادیر بیشتر، بسته به جنس الیاف، نتایج متفاوت است.

■ چقرمگی یا طاقت

در مراحل اولیه توسعه بتن الیافی فولادی، چقرمگی به عنوان وجه تمایز آن با بتن معمولی شناخته می‌شد. عمدتاً الیاف به منظور **بهبود چقرمگی یا ظرفیت جذب انرژی** به بتن اضافه می‌شوند. چقرمگی را می‌توان به دو روش به صورت کیفی بررسی کرد. روش اول شامل بارگذاری سریع (ضربه‌ای) و یک یا چندباره است و روش دوم بارگذاری تک مرحله‌ای با نرخ کند یا آهسته (مانند بارگذاری خمشی). تحت شرایط ضربه‌ای، طاقت می‌تواند به‌طور کیفی با تلاش برای شکستن بخشی از بتن مسلح‌شده با الیاف فولادی با چکش نشان داده شود. به‌عنوان مثال، **یک گلدان ملات تقویت‌شده با الیاف فولادی** چندین ضربه چکش را تحمل می‌کند قبل از اینکه سوراخی در نقطه برخورد ایجاد شود. حتی در این صورت، باقی‌مانده گلدان یکپارچگی ساختار خود را حفظ می‌کند. در مقابل، یک گلدان مشابه ساخته‌شده از ملات بدون الیاف فولادی پس از یک ضربه چکش به چندین قطعه شکسته می‌شود و یکپارچگی ساختار خود را از دست می‌دهد.

نتایج به دست آمده در بارگذاری خمشی، مقادیر حد پایینی هستند که برای استفاده در طراحی ایمن هستند. جزئیات این روش آزمون در ASTM C1609 و JSCE SF4 آمده است.

■ مقاومت در برابر سایش، لغزش و اصطکاک

الیاف فولادی تأثیری بر مقاومت بتن در برابر سایش ناشی از ذرات جامد حمل شده در آب های کم جریان ندارند. با این حال، در شرایط جریان با سرعت بالا که باعث کاویتاسیون و نیروهای برخورد شدید ناشی از ذرات جامد می شود، بتن الیافی فولادی به طور قابل توجهی مقاومت در برابر سایش و جداسازی را بهبود می بخشد. مقاومت در برابر سایش، در شرایطی که به سایش آسفالت و دال ها تحت ترافیک چرخ دار مربوط شود، الیاف فولادی عمدتاً تأثیر زیادی ندارند.

اصطکاکی ایستایی، مقاومت لغزش و غلتش بتن مسلح به الیاف فولادی و بتن معمولی که در دال هایی با اندازه آزمایشگاهی قالب گیری شده بودند، در یک آزمون شبیه سازی شده ی لغزش، با هم مقایسه شدند. نتایج آزمون نشان داد که ضریب اصطکاک ایستایی در سطوح خشک بتن، بدون پوشش، فرسایش یا خرابی سطح، مستقل از مقدار الیاف فولادی است. اما پس از سایش و فرسایش شبیه سازی شده سطح، سطح های بتن دارای الیاف فولادی در شرایط خشک، مرطوب و یخ زده، تا ۱۵ درصد مقاومت لغزش و غلتش بیشتری نسبت به بتن معمولی داشتند.



به طور معمول، چقرمگی خمشی به عنوان مساحت زیر منحنی بار- تغییر شکل در خمشی تعریف می شود. منحنی های بار- تغییر شکل برای انواع و حجم های مختلف الیاف فولادی می توانند به طور قابل توجهی متفاوت باشند. یک تیر بتنی حاوی الیاف فولادی تحت خرابی ناشی از توسعه تدریجی ترک های چندگانه یا منفرد با افزایش خیز قرار می گیرد، اما هنوز برخی از ویژگی های یکپارچگی ساختاری و مقاومت پس از ترک را حتی با خیز قابل توجه حفظ می کند. به طور کلی، روش تعیین چقرمگی بتن الیافی فولادی با استفاده از روش بارگذاری خمشی ترجیح داده می شود. زیرا این روش شرایط تنش در اکثر کاربردها مانند کف سازی و پوشش های بتن پاششی را نشان می دهد. همچنین،

۱- ۴- ۴- بتن سخت شده؛ دوام

■ خوردگی الیاف

در نگاه اول، به نظر می‌رسد که الیاف فولادی به شدت در معرض خوردگی باشند، به‌ویژه در نزدیکی سطح بتن، جایی که پوشش بسیار کم است. بنابراین، این موضوع اهمیت دوام در بتن الیافی را دو چندان می‌کند. از آنجایی که قطر الیاف به‌طور مؤثری توسط خوردگی کاهش می‌یابد، هرگونه خوردگی در الیاف منجر به کاهش قابل توجهی در هر دو ویژگی مقاومت و چقرمگی بتن الیافی فولادی خواهد شد. در این شرایط، حالت شکست ممکن است از بیرون کشیدگی الیاف به شکست الیاف تغییر کند که این امر دلیل کاهش چقرمگی را توضیح می‌دهد. با این حال، بعضی تحقیقات نشان داده‌اند که **خوردگی الیاف سطحی نه تأثیر منفی قابل توجهی بر یکپارچگی سازه‌ای بتن دارد و نه منجر به پوسته‌شدگی سطحی می‌شود.** خوردگی الیاف تنها به الیاف سطحی محدود شده و منجر به تغییر رنگ سطح می‌شود، اما موجب کاهش مقاومت خمشی یا چقرمگی نمی‌شود. همچنین، بعضی تحقیقات نشان داده‌اند که افزودن الیاف فولادی تفاوت قابل توجهی در دوام بتن ایجاد نمی‌کند.

در تحقیقات، توجه زیادی به خوردگی بتن الیافی فولادی در محیط‌های که در معرض خوردگی شدید (به ویژه سازه‌های دریایی) بودند، معطوف شده است.

در بتن‌های کاملاً غوطه‌ور، مشکلی در دوام مشاهده نشد. در ناحیه پاشش، **خوردگی عمدتاً به میزان ترک‌های سطحی وابسته بود.** در اجزاء سالم و بدون ترک، هیچ تأثیر منفی از محیط دریایی مشاهده نشده است. اما هنگامی که ترک‌هایی در سطح ایجاد شده، تمایل به خوردگی در الیاف فولادی معمولی مشاهده شده است. به‌طور کلی، با کاربرد الیاف فولادی ضد زنگ می‌توان از بروز این مشکل جلوگیری کرد. عرض ترک بحرانی پارامتری مهم در دوام الیاف فولادی است و میزان خوردگی تابعی از عرض ترک اولیه است. **حساسیت بسیار کمتر الیاف فولادی به خوردگی در بتن الیافی فولادی نسبت به میلگردهای فولادی در بتن،** را می‌توان با چندین عملکرد توجیه کرد: (۱) تمایل کمتر به ترک خوردن و تمایل بیشتر به خود ترمیمی ترک‌ها در کامپوزیت‌های بتن الیافی؛ (۲) قطر کوچک الیاف که منجر به تشکیل زنگ‌زدگی کافی برای پوسته‌شدگی بتن نمی‌شود؛ (۳) عدم هدایت الکتریکی به‌دلیل ماهیت گسسته الیاف فولادی؛ (۴) بهبود ریزساختار ماتریس و ناحیه انتقال متراکم‌تر در الیاف نسبت به فولاد معمولی.

■ خوردگی الیاف؛ بتن بدون ترک خوردگی

تحقیقات انجام شده تاکنون نشان داده است در بتن‌های با مقاومت فشاری ۲۸ روزه، بیشتر از ۲۱ مگاپاسکال که به خوبی طراحی و عمل‌آوری شده باشند، خوردگی الیاف محدود به لایه‌های سطحی بتن خواهد بود. هنگامی که الیاف سطحی دچار خوردگی

■ جمع‌شدگی و خزش

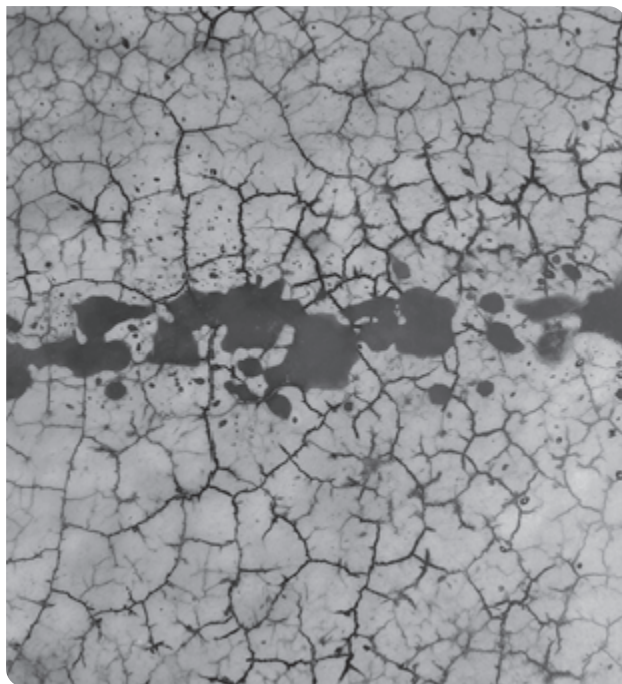
داده‌های آزمایشی محدود نشان می‌دهند که **تقویت بتن با الیاف فولادی در حجم‌های کمتر از ۱ درصد، اثر قابل توجهی بر رفتار خزش و جمع‌شدگی آزاد ملات و بتن ندارد.** با این حال، تحقیقات گزارش کرده‌اند که **الیاف تغییر شکل یافته** می‌توانند جمع‌شدگی آزاد را تا حدود ۴۰ درصد کاهش دهند و این کاهش با افزایش حجم الیاف بیشتر می‌شود. باید توجه داشت که جمع‌شدگی آزاد معیار مناسبی برای سنجش تأثیر الیاف نیست؛ آنچه اهمیت دارد کاهش ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی مقید است. در این حالت، الیاف فولادی تعداد و عرض ترک‌ها را کم کرده و با ۱ درصد مصرف، جمع‌شدگی خشک‌شدگی حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش یافته است.

به دلیل مقادیر کم الیاف مصرفی (۱/۰ تا ۱ درصد حجمی)، **تأثیر الیاف**، اعم از فولادی، مصنوعی، شیشه‌ای یا سلولزی، بر **خزش فشاری بتن اندک** است. در تیرهای بتن مسلح، افزودن الیاف فولادی موجب کاهش خیز بلندمدت خمشی نسبت به تیرهای بدون الیاف شده است. مطالعات خزش پس از ترک خوردگی نشان می‌دهد که در بتن الیافی میکروپلیمری ترک‌خورده، شکست خزشی در سطوح تنش پایدار رخ می‌دهد و این بتن تنها درصد کمی از تنش پس از ترک را تحمل می‌کند. عامل مهم در این زمینه خزش در ناحیه پیوند الیاف و ماتریس است، زیرا معمولاً طراحی مخلوط‌ها بر پایه بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس و نه گسیختگی خود الیاف صورت می‌گیرد.

می‌شوند، به نظر نمی‌رسد که خوردگی بیشتر از ۲/۵ میلی‌متر زیر سطح گسترش یابد. این خوردگی سطحی محدود، حتی زمانی که بتن به شدت در معرض خوردگی باشد نیز در همین حد مشاهده می‌شود. از آن‌جا که الیاف کوتاه، گسسته و به ندرت با یکدیگر تماس دارند، هیچ مسیر هدایتی پیوسته‌ای بین نواحی مختلف بتن وجود ندارد. بنابراین، از آنجایی که عملکرد خوردگی در نواحی جداشده اتفاق می‌افتد، بتن الیافی فولادی دوام بهتری نسبت به بتن مسلح معمولی برای این نوع کاربردها دارد.

■ خوردگی الیاف؛ بتن ترک‌خورده

آزمون‌های آزمایشگاهی و میدانی بتن الیافی ترک‌خورده در محیطی حاوی کلریدها نشان داده است که ترک‌ها در بتن می‌توانند منجر به خوردگی الیاف عبوری از ترک شوند. با این حال، عرض ترک‌های کمتر از ۱/۰ میلی‌متر اجازه خوردگی الیاف فولادی عبوری از ترک را نمی‌دهد. اگر ترک‌هایی که عرض آن‌ها بیشتر از ۱/۰ میلی‌متر و محدود به سطح بتن باشد، عواقب این خوردگی موضعی ممکن است از نظر ساختاری اهمیت زیادی نداشته باشد. با این حال، اگر ترک‌های خمشی یا کششی بتن الیافی فولادی منجر به بروز شرایط نامطلوب سازه‌ای شوند، احتمال بروز ترک باید به طور کامل بررسی و مورد توجه قرار بگیرد. برای کاهش توانایی خوردگی در ترک‌ها یا لکه‌دار شدن سطح، استفاده از الیاف فولادی آلیاژی، الیاف فولادی ضد زنگ یا الیاف فولادی کربنی گالوانیزه به عنوان گزینه‌های جایگزین ممکن است.



در آزمایش‌های خزش، بارگذاری نمونه‌ها بر اساس مقاومت باقی‌مانده (ARS) طبق ASTM C1399 تعیین شد. تیرها با ابعاد $350 \times 100 \times 100$ میلی‌متر ابتدا تا خیز $0/2$ میلی‌متر ترک‌دار شدند. آزمون‌های بتن الیافی مصنوعی تحت بارهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد ARS و آزمون‌های بتن الیافی فولادی تحت بارهای ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد ARS آزمایش شدند. نتایج نشان داد در شرایط مشابه، بتن الیافی مصنوعی ترک‌خورده ضریب خزشی حدود دو برابر بتن الیافی فولادی دارد.

■ ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی

الیاف می‌توانند پتانسیل ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی بتن را کاهش دهند. جمع‌شدگی پلاستیک در ساعات اولیه و هنگام پایین بودن مقاومت خمیر رخ می‌دهد و جمع‌شدگی خشک‌شدگی پس از سخت‌شدن بتن و تغییر حجم در محیط خشک اتفاق می‌افتد. اگر تغییر شکل جمع‌شدگی مهار شود، تنش‌های کششی ایجاد شده می‌توانند منجر به ترک شوند. افزودن میکروالیاف مصنوعی یا سلولزی مقاومت و ظرفیت کرنش بتن را در ساعات اولیه (تا ۱۲ ساعت) بالا می‌برد و احتمال ترک ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک را کم می‌کند. همچنین، الیاف فولادی و ماکروالیاف مصنوعی پس از سخت‌شدن بتن، ظرفیت تحمل تنش و کرنش را افزایش داده و جمع‌شدگی خشک‌شدگی را کنترل می‌کنند. درک این اصول برای طراحی سازه‌های بادوام ضروری است.

از آن‌جا که بتن اغلب مقید است، ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی در دیوارها، دال‌ها و روسازی‌ها شایع است. الیاف فولادی در این شرایط سه نقش دارند:

- (۱) اجازه به تشکیل ترک‌های متعدد،
 - (۲) انتقال تنش از طریق ترک‌ها و حفظ مقاومت کششی پسماند،
 - (۳) تداوم انتقال تنش برای امکان ترمیم یا بسته‌شدن ترک‌ها.
- استاندارد مشخصی برای ارزیابی ترک‌خوردگی مقید

وجود ندارد. در ASTM C157 استفاده از آزمون‌های منشوری بلند برای اندازه‌گیری جمع‌شدگی آزاد توصیه شده است. در صورت مهار این نمونه‌ها، تنش کششی ایجاد می‌شود و آزمون مشابه کشش تک‌محوری خواهد بود. روش جایگزین، استفاده از نمونه‌های حلقه‌ای است. اگرچه افزودن الیاف فولادی مقدار جمع‌شدگی مقید را کم نمی‌کند، اما می‌تواند تعداد ترک‌ها را افزایش و عرض متوسط آن‌ها را کاهش دهد. برای نمونه، با افزودن فقط ۲۵٪ درصد حجمی الیاف فولادی صاف (۲۵ میلی‌متر طول، ۴/۰ میلی‌متر قطر)، عرض ترک‌ها تا یک‌پنجم مقدار بتن بدون الیاف کاهش یافته است.

تحقیقات متعدد نشان می‌دهد که الیاف ریز به‌ویژه میکروالیاف با قطر کم و سطح ویژه بالا، در کاهش عرض ترک‌های جمع‌شدگی پلاستیک بسیار مؤثرند. مطالعه نعمان و همکاران (۲۰۰۵) اثر الیاف مختلف از جمله پلی‌پروپیلن، PVA، اسپکتر، کربن و فولاد را بررسی کرد. آزمون‌های منشوری بتن تازه در شرایط نامطلوب محیطی (دمای زیاد، رطوبت نسبی کم و جریان هوای شدید) آزمایش شدند. نتایج نشان داد درصد حجمی و قطر الیاف بیشترین تأثیر را دارند. برای حجم ثابت، تغییر طول یا نسبت طول به قطر اثر چندانی نداشت، اما کاهش قطر و افزایش تعداد الیاف کنترل ترک‌ها را به‌طور معناداری بهبود داد. در حدود ۲/۰ درصد حجمی، بیشتر الیاف پلیمری با قطر کم توانستند ترک‌های جمع‌شدگی پلاستیک را تا حدود ۱۰ درصد بتن کنترل کاهش دهند

■ یخ‌زدن و آب‌شدن

تمام روش‌های ساخت بتن بادوام برای بتن الیافی نیز صادق‌اند. برای مقاومت در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن، رعایت معیارهای مقدار هوای توصیه‌شده در ACI 201 ضروری است. آزمایش‌های محیطی نشان می‌دهند که بتن مسلح‌شده به الیاف فولادی نیز همانند بتن معمولی تنها با وجود هوای محبوس عمده‌ی در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن دوام کافی دارد. ویژگی‌های حباب هوا در هر دو بتن مشابه است و این موضوع را تأیید می‌کند. محققین اثر مقدار هوا (تقریباً ۱ تا ۱۱ درصد حجمی)، سیمان (۳۶۲ تا ۴۷۳ کیلوگرم بر مترمکعب)، الیاف قلاب‌دار (۴۴/۴ و ۵۹/۲ کیلوگرم بر مترمکعب) و نسبت آب به سیمان را در بتن الیافی تحت آزمون ASTM C666/C666M روش A ارزیابی کردند. در این آزمایش، برای هر طرح مخلوط، دو تیر بتنی تحت بیش از ۳۰۰ چرخه یخ‌زدن و آب‌شدن قرار گرفتند. نتایج نشان داد **مقدار هوای محبوس مهم‌ترین عامل** است و دوام بتن الیافی و معمولی با هوای مشابه تقریباً یکسان است. با تکرار چرخه‌ها، مدول گسیختگی در هر دو نوع بتن کاهش یافت اما افت در بتن الیافی کمتر بود.

مطالعات دیگر کاهش مقاومت خمشی بتن فولادی و مصنوعی تحت یخبندان و ذوب را بررسی کرده و نشان دادند که تمامی آزمون‌ها بر اساس ASTM C666 مقاومت خوبی داشته‌اند. همچنین، گزارش شد که در بتن بدون هوا تفاوتی میان بتن الیافی و معمولی نیست، اما در بتن‌های دارای ۵ تا ۶

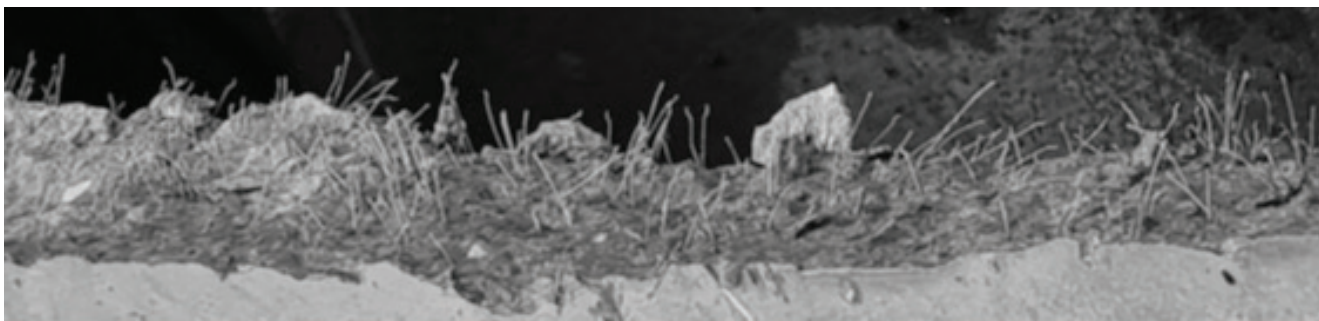
درصد هوا، مقاومت بتن الیافی به‌طور قابل‌توجهی بیشتر است. در تحقیقات دیگر، بیان شد که الیاف مصنوعی مقاومت بتن را در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن و پوسته‌شدن ناشی از یخ‌زدا (ASTM C672) بهبود می‌دهند. آزمون‌های دارای الیاف پلی‌پروپیلن پس از ۵۰ چرخه پوسته‌پوسته شدن کمتری نسبت به بتن شاهد پس از ۳۵ چرخه نشان دادند. در هر دو آزمایش، نقش حیاتی هوای محبوس تأیید شد. بررسی‌های دیگر روی دوغاب‌های سیمانی هوادار با الیاف فیبریل پلی‌پروپیلن (۱۹ میلی‌متر، ۱/۰ و ۲/۰ درصد حجمی) نشان داد که **این الیاف اثری بر مقاومت در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن ندارند و نمی‌توانند جایگزین هوای محبوس باشند**. تحقیقی دیگر اثر الیاف ماکروسنتتیک پلی‌اولفینی (۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب) را بررسی کردند. تحت چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن، کاهش مقاومت خمشی بتن شاهد ۳۰ درصد بود، درحالی‌که در بتن الیافی تنها ۵۱ درصد گزارش شد. همچنین، کاهش سختی خمشی در بتن معمولی و الیافی به ترتیب ۳۲ و ۱۳ درصد بدست آمد. برخلاف الیاف فولادی، چقرمگی خمشی بتن الیافی پلی‌اولفینی پس از چرخه‌ها حدود ۱۷ درصد کمتر از شاهد بود.

■ دماهای شدید و آتش

بتن نسبت به چوب و فولاد به‌سبب رسانایی گرمایی کم، ظرفیت گرمایی زیاد و عدم سوخت‌رسانی به فرآیند احتراق، در برابر دماهای شدید مقاوم‌تر است. برخی اجزای بتن (مانند کلینکر سیمان و برخی سنگدانه‌ها)

در دماهای زیاد پایداری دارند، اما محصولات هیدراتاسیون به‌واسطه ازدست‌دادن رطوبت، ریزش خوردگی و انبساط غیریکتواخت آسیب‌پذیرند. **افزودن الیاف فولادی، الیاف مصنوعی یا دیگر الیاف‌ها در کل عملکرد اعضای بتنی در برابر آتش را بهبود می‌دهد**، هرچند مستندات آزمایشگاهی- میدانی موجود محدود است. بتن معمولی در گرمایش طولانی‌مدت بخش قابل‌توجهی از مقاومت خود را از دست می‌دهد: حدود ۲۰۰ درجه سلسیوس افت کیفیت آغاز می‌شود (تخریب پیوند خمیر و سنگدانه)، در ۴۵۰ درجه سلسیوس معمولاً نزدیک ۵۰ درصد مقاومت فشاری اولیه باقی می‌ماند و با عبور دمای داخلی از ۹۵۰ درجه سلسیوس، بیش از ۹۰ درصد یکپارچگی بتن بدون مقیدسازی از بین می‌رود. **الیاف جلوی تخریب در این شرایط بسیار شدید را نمی‌گیرند**، اما در کاربردهای عملی زمان ایمن مواجهه را افزایش می‌دهند و فرصت بیشتری برای تخلیه و مهار فراهم می‌کنند.

از دهه ۱۹۶۰، استفاده از الیاف پلیمری برای مقاومت در برابر انفجار و ضربه و سپس در سیلوها و سکوها برای کاهش شوک حرارتی و پوسته‌پوسته‌شدن دنبال شد. آزمایش‌ها نشان دادند **الیاف پلی‌پروپیلن با ذوب در دمای تقریباً ۱۶۰ درجه سلسیوس تبخیر، کانال‌های ریز برای تخلیه‌ی فشار بخار می‌سازند و از ریزش انفجاری می‌کاهند**. در اواخر دهه ۱۹۸۰ روش‌های ترکیبی الیاف فولادی و PP، در قطعات پیش‌ساخته پوسته‌پوسته‌شدن را بسیار کاهش دادند. الیاف پلی‌پروپیلن به‌طور قابل توجهی خطر پوسته‌پوسته



مسلح به الیاف فولادی افزایش جزئی هدایت حرارتی با افزایش مقدار الیاف (۵/۰ تا ۵/۱ درصد حجمی) مشاهده شده است. در دماهای بیشتر از ۶۰۰ درجه سلسیوس، عملکرد بتن الیافی بهتر از بتن معمولی گزارش شده است. بر اساس نتایج تحقیقات گذشته روی آزمون‌های بتن حاوی الیافی فولادی در دماهای بالاتر (۸۰۰ درجه سلسیوس) و شرایط آتش، مشخص شده است که مقاومت بتن حاوی الیافی فولادی در برابر آتش به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. با این حال، سعی در نتیجه‌گیری کلی در مورد مقاومت در برابر آتش در بتن الیافی فولادی کار آسانی نیست و جنبه‌های مختلف بتن الیافی فولادی در برابر آتش و دماهای بالا هنوز به تحقیق بیشتری نیاز دارد. تحقیقات نشان داده است که در دماهای بسیار پایین، نزدیک به دماهای گاز طبیعی مایع، افزودن الیاف فولادی به طور قابل توجهی از افت مقاومت فشاری و کششی تحت چرخه‌های حرارتی مکرر جلوگیری می‌کند.

شدن را کاهش می‌دهند. مقدار مصرف ۴/۰ کیلوگرم بر متر مکعب از الیاف PP باعث کاهش ریزش قطعات و همچنین پدیده پوسته‌پوسته شدن شده است. اثربخشی الیاف PP در کاهش خطر پوسته‌پوسته شدن نه تنها به مقدار حجمی الیاف بستگی دارد، بلکه طول و قطر الیاف نیز نقش مهمی ایفا می‌کنند. به طور کلی، الیاف با قطر کمتر مقاومت بهتری در برابر پوسته‌پوسته شدن ایجاد می‌کنند.

الیاف از سه مسیر مقاومت در آتش را بهبود می‌دهند: **حفظ مقاومت و سختی باقی‌مانده، کاهش پوسته‌پوسته شدن انفجاری و پل زنی ترک‌ها** برای یکپارچگی. **الیاف فولادی** در حفظ مقاومت باقی‌مانده مؤثرند ولی غالباً به **حجم‌های زیاد (تقریباً ۲ درصد)** نیاز دارند؛ گزارش شده تیرهای دارای الیاف فولادی **۳ تا ۹ برابر** آزمون‌های شاهد بدون الیاف، بار ناشی از آتش را تحمل کردند. ACI 216.1 چارچوب تعیین مقاومت آتش اعضای بتنی را ارائه می‌دهد. در بتن

۲- چرا بتن الیافی؟

۲-۱- مزایا

راهنمای ساخت کف‌ها و دال‌های بتنی، ACI 330.2R راهنمای طراحی و ساخت روسازی بتنی برای تأسیسات صنعتی و حمل‌ونقل سنگین، ACI 332.1R راهنمای ساخت‌وساز بتن مسکونی، ACI 360R راهنمای طراحی دال‌های روی زمین و ACI 544.1R گزارش درباره بتن مسلح به الیاف.

استفاده از الیاف نسبت به آرماتور فولادی سنتی به‌عنوان تقویت‌کننده ثانویه مزایای مختلفی دارد:

در ابتدای این بخش، لازم است تا به بررسی **مزایای الیاف نسبت به تقویت‌کننده‌های دیگر** پرداخته شود. الیاف تقویت‌کننده، به‌ویژه ماکروالیاف، به‌راحتی می‌تواند در طیف گسترده‌ای از کاربردهایی که امروزه **آرماتور فولادی سنتی به‌عنوان تقویت‌کننده ثانویه** مورد استفاده قرار می‌گیرد، به کار رود. این موضوع در گزارش‌های راهنمای مختلف مؤسسه بتن آمریکا شناسایی شده است؛ به‌طورخاص، ACI 302.1R

سرعت بیشتر در ساخت؛
زیاد بتن ریزی می‌تواند
بلافاصله پس از
آماده‌سازی بستر شروع
شود

آزادی بیشتر در نحوه
تخلیه بتن؛
زیاد هیچ مانع فیزیکی
مثل ارماتور در مسیر
نیست

کاهش خطرات لغزش
و افزایش ایمنی محل
اجرا

کاهش جمع‌شدگی
پلاستیک بتن

کاهش آب‌انداختگی
بتن و حذف ترک‌های
ناشی از نشست

افزایش طاقت و
شکل‌پذیری بتن که
منجر به مقاومت
بیشتر در برابر ضربه،
خستگی، فرسایش و
سایش می‌شود

امکان کاهش
ضخامت مقاطع
بتنی به دلیل افزایش
ظرفیت خمشی
آنها

صرفه‌جویی
اقتصادی از طریق
کاهش هزینه‌های
اجرائی

ارزشمند در ساخت‌وساز مدرن تبدیل می‌کند.

**دلایل زیادی در حالت تازه و سخت‌شده برای استفاده
از بتن الیافی وجود دارد.** برخی از این مزایا شامل
موارد زیر است:

• **کاهش ترک‌های پلاستیک در بتن و افزایش مقاومت
اولیه** که موجب کاهش خردشدن قطعات بزرگ به
قطعات ریز می‌شود.

• **بهبود دوام بلندمدت سازه یا محصول؛** بتن در معرض
تخریب ناشی از خوردگی، واکنش قلیایی-سیلیسی،
حمله سولفاتی، چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن در شرایط

علاوه‌براین، به‌جز الیاف فولادی که ممکن است در
سطح بتن دچار خوردگی شوند، دیگر الیاف در برابر
خوردگی مقاوم هستند. در بسیاری از موارد، **مقاطع
بتنی مسلح به الیاف می‌توانند عملکردی برابر یا حتی
بهبود یافته‌تر از مقاطع مسلح به فولاد سنتی از خود نشان
دهند**، به‌ویژه در زمینه **تقویت ثانویه مانند دال‌های
روی زمین، دال‌های عرشه کامپوزیت فلزی و سایر
اجزای بتنی**. از مزایای استفاده از الیاف در بتن معمولی،
می‌توان به افزایش مقاومت کششی، مقاومت در برابر
ترک و بهبود دوام کلی اشاره کرد. این بهبودها منجر
به ساخت سازه‌های با دوام بیشتر، کاهش هزینه‌های
نگهداری شده و بتن مسلح شده با الیاف را به گزینه‌ای

اشباع و روش‌هایی که از نفوذ محلول‌های مهاجم دیگر ناشی می‌شوند، قرار دارد. بنابراین، با کاهش نفوذ آب و سایر محلول‌های تهاجمی، می‌توان دوام بتن را افزایش داد. بتن الیافی به کنترل دقیق‌تر ترک‌ها کمک می‌کند که این امر باعث کاهش عرض ترک‌ها و در نتیجه، کاهش نفوذ آب می‌شود.

• **افزایش مقاومت در برابر خردشدگی و ضربه** که ناشی از افزایش سختی (معیار ظرفیت جذب انرژی) است.

• **کاهش پوسته‌شدن بتن‌های پرمقاومت و با نفوذپذیری کم در برابر آتش.**

• **بهبود مقاومت در برابر سایش و فرسایش ناشی از جریان؛** از بتن الیافی در سازه‌های هیدرولیکی برای تعمیر آسیب‌های ناشی از فرسایش- سایشی در حوضچه‌های آرام، کانال‌ها، دریچه‌ها و مناطق خروجی استفاده شده است.

• **جایگزینی آرماتورهای سنتی افت و حرارت؛** استفاده از الیاف به جای مش‌های جوش‌خورده و میلگردهای قطر کم که برای کنترل افت و حرارت به کار می‌روند، به‌عنوان گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه اثبات شده است.

• **کاهش ضخامت اجزای بتنی در کاربردهای کف روی زمین و تونل‌سازی؛** استفاده از بتن الیافی، امکان تولید بتن‌های نازک (معمولاً حدود ۱۵ میلی‌متر) را فراهم کرده است. بتن الیافی محصولاتی هستند که در عین داشتن دوام و پایداری مناسب، وزن بسیار کمتری را برای مقطع محصول ممکن ساخته‌اند.

• **افزایش فاصله بین درزها در کاربردهای کفسازی روی زمین؛** استفاده از حجم زیاد الیاف فولادی و الیاف مصنوعی ماکرو باعث افزایش فاصله درزها در کفسازی‌های بتنی شده است. همچنین در بسیاری از موارد، استفاده از حجم زیاد این الیاف نیاز به درزهای انقباضی را به‌طور کامل از بین برده است.

• **ایمنی در محل پروژه؛** استفاده از بتن الیافی به‌جای آرماتورهای سنتی، خطر سرخوردن را کاهش می‌دهد. این اتفاق به‌ویژه در سقف کامپوزیت عرشه فولادی پر رنگ‌تر است و محیط کاری ایمن‌تری را برای کارگران ساختمانی فراهم می‌کند.

۲-۲- کاربردها

از اواسط دهه ۱۹۶۰ میلادی، بتن مسلح‌شده به الیاف فولادی در جاده‌ها، دال‌های کف، مواد نسوز و محصولات بتنی مورد استفاده قرار گرفت. در محیط‌های خاص مانند کاربری‌های نسوز با دمای بالا، استفاده از الیاف فولادی ضدزنگ ضروری به نظر می‌رسد. انواع الیاف ضدزنگ به روش‌های مختلفی در برابر دماهای بالا و شرایط خورنده محیطی واکنش نشان می‌دهند. در اجزای بتنی غیرمسلح، به‌ویژه کارهای سطحی مانند روسازی‌ها، پوشش‌های نازک، لایه‌های رویین، پارکینگ‌ها، دال‌های سازه‌های مسکونی که در آن‌ها آرماتور فولادی تعبیه نشده، در

صورت وجود شرایط محیطی مستعد ترک خوردگی پلاستیک، استفاده از حداقل یک میکروالیاف مصنوعی توصیه می‌شود. همچنین، در دال‌های روی زمین، دال‌های عرشه کامپوزیت فولادی و سایر اعضای بتنی، استفاده از ماکروالیاف به‌عنوان جایگزینی برای آرماتور فولادی سنتی باید همواره به عنوان یک گزینه مدنظر قرار گیرد.

با فناوری فعلی الیاف، در تیرها، ستون‌ها، دال‌های معلق و مقاطع طره‌ای که مطابق با آیین‌نامه ACI 318 طراحی می‌شوند، نمی‌توان آرماتور فولادی سازه‌ای را به‌طور کامل با الیاف جایگزین کرد. با این حال، **ACI 318 استفاده از الیاف فولادی خاص به‌عنوان آرماتور برشی را مجاز می‌داند.** افزون‌براین، ماکروالیاف می‌توانند در کنار آرماتور فولادی سنتی برای تقویت ظرفیت باربری، بهبود خواص مکانیکی،

کاهش تراکم آرماتور به منظور تسهیل بتن‌ریزی و تراکم بهتر یا کاهش هزینه‌ها مورد استفاده قرار بگیرند.

به‌دلیل انعطاف‌پذیری که بتن الیافی فراهم می‌کند، این نوع بتن به‌عنوان یک مصالح ساختمانی مقرون‌به‌صرفه و کاربردی اثبات شده است. **بتن الیافی می‌تواند در کاربردهای شکل زیر مورد استفاده قرار گیرد.**

در این مجله، الیاف مختلفی از جمله الیاف فولادی، شیشه‌ای، مصنوعی و طبیعی مورد بحث قرار گرفته است. هر نوع الیاف دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی است که به‌طور متفاوتی به خواص مکانیکی و دوام بتن کمک می‌کند. این قسمت از مجله بر اهمیت کاربرد متناسب با نوع الیاف بر اساس نیازهای خاص پروژه‌های ساختمانی تأکید دارد.

محصولات بتنی تولیدشده (Manufactured concrete products) مانند محصول‌های محوطه‌سازی، تایل‌ها و پوشش‌های بتنی (shingles)

بتن پاششی مرطوب (Wet-mix shotcrete) مانند معادن و تونل‌سازی

بتن پیش‌ساخته (Precast concrete) مانند محصولات معماری، مخزن فاضلاب، تاق‌های قوسی

بتن درجا (Cast-in-place) مانند کف‌سازی‌های بتنی روی زمین (slab-on-ground)، عرشه‌های فلزی مرکب، روسازی‌ها و خاک‌ریزها.

۲-۲-۱- کاربرد بتن مسلح به الیاف فولادی

کاربرد بتن با الیاف فولادی وابسته به خلاقیت طراح و سازنده است که چگونه از ویژگی‌های مقاومت کششی استاتیک و دینامیک، چقرمگی، جذب انرژی و مقاومت در برابر خستگی این ماده کامپوزیتی بهره‌برداری می‌کند. توزیع یکنواخت الیاف در بتن موجب ایجاد ویژگی‌های مقاومت همسانگرد می‌شود که در بتن‌های معمولی رایج نیست. همچنین، تحت شرایط به خصوصی، استفاده از بتن مسلح به الیاف فولادی برای مقاومت در برابر نیروهای برشی، بدون استفاده از آرماتورهای فولادی معمولی، مجاز است. به دلیل خصوصیات

برجسته بتن الیافی فولادی، از آن در کاربردهای مختلفی استفاده می‌شود. در کاربردهایی که نیاز به استفاده از تقویت پیوسته (آرماتور) برای مقاومت در برابر بارهای کششی نیست، مانند روسازی‌ها، پوشش‌های لایه نازک، در دال‌های مسطح روی سطح زمین که تحت بارهای سنگین و ضربه‌ای قرار دارند، برخی محصولات پیش‌ساخته و پوشش‌های بتن پاششی، بهبود چقرمگی خمشی مرتبط با الیاف می‌تواند برای کاهش ضخامت مقطع یا بهبود عملکرد و یا هر دو استفاده شود.

بتن مسلح‌شده به الیاف فولادی در مقایسه با بتن مسلح معمولی، در برخی کاربردهای ساختمانی مزایای قابل‌توجهی دارد. به‌عنوان نمونه، می‌توان به استفاده از بتن پاششی مسلح به الیاف فولادی در پوشش تونل‌ها، پایدارسازی شیب‌های سنگی و مهاربندی

کاربرد بتن با الیاف فولادی به صورت درجا



برخی از کاربردهای موجود برای بتن با الیاف فولادی به تفکیک اجرا به صورت درجا و پیش‌ساخته عبارتند از:

موقت حائل گودبرداری اشاره کرد. در این حالت، نیروی کار مورد استفاده برای نصب شبکه‌های مش یا میلگرد در این کاربردها ممکن است حذف شود.



کاربرد بتن با الیاف فولادی به صورت پیش‌ساخته

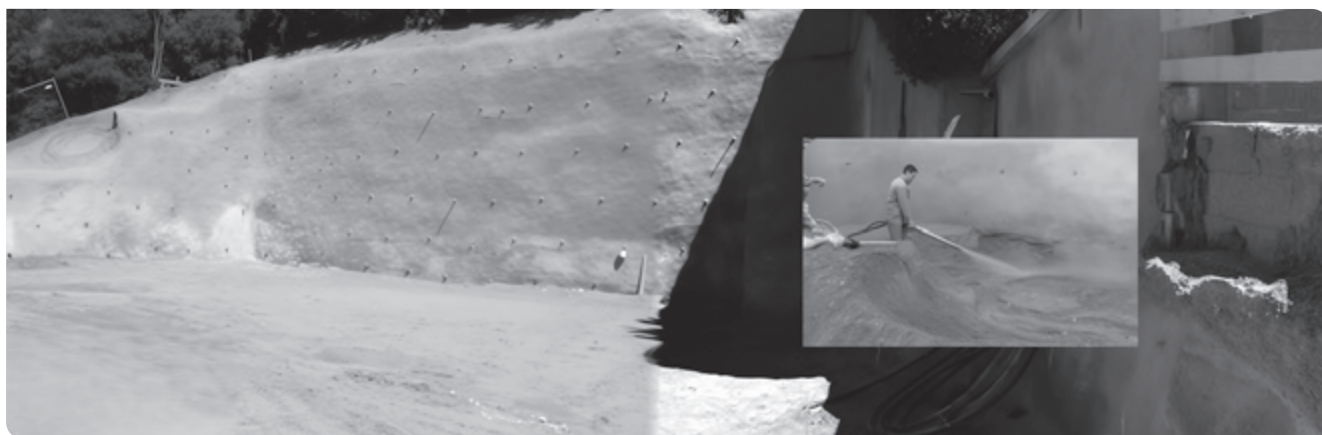
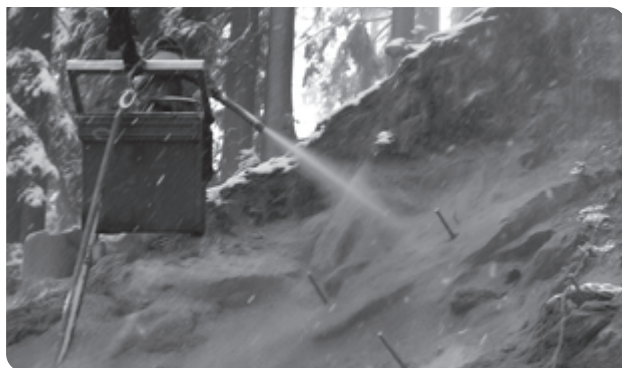
- 1 استفاده از الیاف فولادی برای جایگزینی تقویت‌کننده‌های معمولی در جعبه‌های خدماتی و مخزن فاضلاب
- 2 استفاده در سازه‌های بتنی پیش‌ساخته برای جلوگیری از فرسایش سواحل و تثبیت بستر دریا تحت ضربات موج
- 3 استفاده در بلوک‌های سقف معدن با تولید توسط ماشین‌آلات معمولی بتن‌سازی و برای ساخت تقویت‌کننده سقف در معادن زغال سنگ
- 4 استفاده در کاو و صندوق‌ها و خزانه‌های پیش‌ساخته، با امکان کاهش ضخامت قطعات
- 5 استفاده در پنل‌های ساختمانی برای جایگزین کردن آرماتور در پنل‌ها
- 6 قطعات پیش‌ساخته با کاربری‌های مختلف سازه‌ای مانند: باکس، دریچه، کالورت و ...

■ بتن پاششی

بتن پاششی مسلح به الیاف فولادی ابتدا در کاربردهای سازه‌های حائل استفاده شد. اولین کاربرد عملی آن، استفاده آزمایشی برای تثبیت شیب‌های صخره‌ای در سال ۱۹۷۴ در کنار رودخانه اسنیک، واشنگتن بود که نتایج بسیار خوبی نشان داد. از آن زمان، بسیاری از کاربردها در تثبیت شیب‌ها، حائل تونل‌های هیدروالکتریکی، حمل‌ونقل و معدن و در دیوارهای نگهدارنده پشته‌های سربار به‌عنوان پوشش بتنی که به‌صورت ساخت از بالا به پایین نصب می‌شود، صورت گرفته است. منابع اضافی و اطلاعات کامل‌تری در مورد بتن پاششی مسلح به الیاف فولادی را می‌توان در ACI 506.1R یافت.

علاوه‌بر سازه حائل، کاربردهای بتن پاششی مسلح به الیاف فولادی شامل گنبدهای نازک هم‌کروی ریخته‌شده

روی ساختارهای بادکنکی، منظرهای مصنوعی سنگی با استفاده از بتن پاششی فولادی با مخلوط خشک و مرطوب، خانه‌ها، تعمیر و تقویت سازه‌هایی مانند فانوس‌های دریایی، پایه‌های پل و تکیه‌گاه‌ها، پوشش کانال و تثبیت شیب در ساختار کنترل رسوبات کوه، پوشش غارهای ذخیره‌سازی نفت، پوشش‌دادن به شیرهای شعله‌ای موشک و شکل‌دهی بدنه قایق‌ها.



۲-۲-۲- کاربرد بتن مسلح به الیاف شیشه‌ای

کاربردهای بتن با الیاف شیشه‌ای عبارتند از:

01

کاربرد در تولید پانل‌های نما برای ساختمان‌ها؛ مشکلات اولیه در کاربرد این پانل‌ها کنترل اعوجاج آن‌ها بوده است که با استفاده از قاب‌های فولادی رفع شد و همچنین امکان اتصال گارامد به سازه‌های ساختمانی را فراهم می‌کرد.

02

کاربرد در تجهیزات تأمین، توزیع و مدیریت انرژی الکتریکی مانند سیستم‌های ترانشه و جعبه‌های توزیع

03

ساخت اسکله‌های شناور

04

ترمیم ساختمان‌ها و جایگزین کردن دیوارهای موجود و کاشی‌های نمای تزئین‌شده با این کامپوزیت‌های سبک وزن با شکل‌های متنوع

05

حوزه پوشش‌های معماری شامل پانل‌های داخلی و خارجی به صورت یک لایه، دو لایه و پوشش‌های رنگی، کاشی و سنگدانه،

06

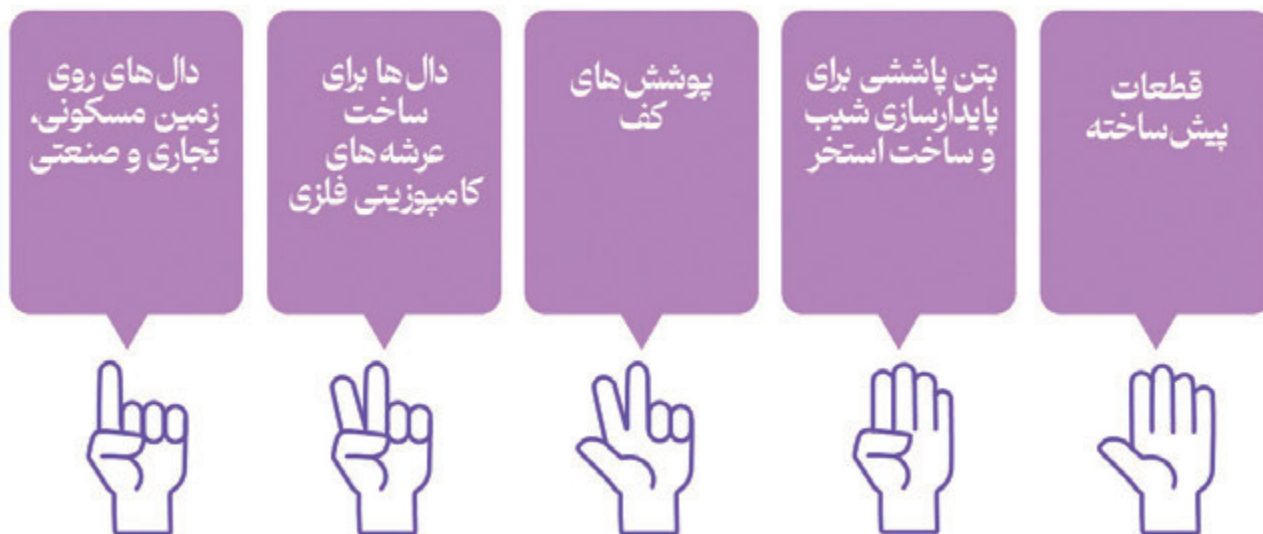
از اجزای سقف‌های معلق، تجهیزات داخلی (حمام، سرویس بهداشتی پیش‌ساخته، فشه) و پوسته‌ها

۲-۲-۳- کاربرد بتن مسلح به الیاف مصنوعی

نوار فبریلاته. بیشتر کاربردهای الیاف مصنوعی به مقدار ۱/۰ درصد به منظور کنترل ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک استفاده می‌شود. این کاربردها شامل محصولات پیش‌ساخته، بتن پاششی و بتن‌ریزی درجا است.

تا به امروز، در بیشتر کاربردهای تجاری بتن با الیاف پلی‌پروپیلن و نایلون، از الیاف با دنیر کم و درصد حجمی کم (۱/۰ درصد) استفاده شده است که شامل الیاف مونوفیلامنت (در مورد الیاف پلی‌پروپیلن و نایلون) یا الیاف فبریلاته (در مورد پلی‌پروپیلن) است. این الیاف در کاربردهای غیرسازه‌ای و غیرباربر اولیه محدود شده‌اند. کاربردهای بتن الیافی پلی‌پروپیلن و نایلون عبارتند از:

استفاده تجاری از بتن با الیاف مصنوعی در سطح جهانی در کاربردهای بتن اجرا شده در محل (مانند دال‌های سطحی، آسفالت‌ها و پوشش‌های تونل) و محصولات تولید شده در کارخانه (مانند پنل‌های پوششی، نمای ساختمان) مشاهده می‌شود. در حال حاضر، دو نوع مقدار الیاف مصنوعی کاربرد دارد. معمولاً دو حالت فیزیکی متفاوت الیاف مصنوعی کاربرد دارد: مونوفیلامنت و الیاف تولید شده از



۲-۲-۴- کاربرد دیگر بتن‌های الیافی

یکی از بتن‌های الیافی که در شرایط خاص، کاربردهای متفاوتی دارد، بتن مسلح به الیاف کربنی است. هزینه زیاد الیاف کربنی در حال حاضر، موجب محدودیت در کاربرد گسترده آن شده است. کاربردهای بتن با الیاف کربنی عبارت است از:

پژوهش‌ها نشان می‌دهند که علاقه به سیستم‌های هیبریدی الیاف که ترکیبی از انواع مختلف الیاف را به کار می‌برند، در حال افزایش است. این رویکرد می‌تواند به بهبود ویژگی‌های عملکردی مانند افزایش چقرمگی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی منجر شود و آن را به حوزه‌ای نویدبخش برای پژوهش‌های آینده تبدیل کند.

01

یونیت‌های موج‌دار برای ساخت کف

02

سازه‌های غشایی با انحنای یگانه و دوگانه

03

بدنه قایق‌ها

04

تخته‌های داربست

۳- چگونگی در بتن الیافی؟

۳-۱- اصول دانش طراحی مقطع

قابل توجه بار به فولاد ایجاد می‌شوند. از گذشته، الیاف طبیعی برای بهبود رفتار مصالح شکننده به کار رفته (مانند خشت) و امروزه الیاف می‌توانند تردی و ضعف کششی بتن را کاهش دهند. با تکیه بر تجربه‌های میدانی و پژوهش‌های متعدد، **استفاده از الیاف به عنوان جایگزین آرماتورهای افت و حرارت و در برخی کاربردها حتی به عنوان مسلح کننده اصلی رو به افزایش است.** کمیته ACI 544 اسناد مرجع بتن مسلح به الیاف را منتشر کرده است (از جمله ACI 544.4R). در ACI 318 معیارهایی برای به کارگیری الیاف فولادی به عنوان تقویت برشی ارائه شده و

بتن ماده‌ای ترد است که در فشار مستحکم ولی در کشش ضعیف است. در سازه‌های بتن مسلح، میلگردهای فولادی پس از ترک خوردگی بتن، بارهای کششی را تحمل می‌کنند و برای محدود کردن عرض ترک‌ها در بارهای بهره‌برداری به کار می‌روند. از آنجایی که کرنش کششی بتن ترک خورده بسیار کمتر از کرنش تسلیم فولاد است، ترک‌ها پیش از انتقال

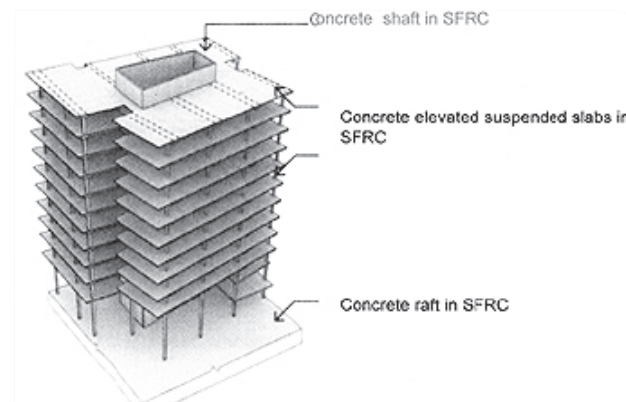
جداگانه راستی‌آزمایی شوند. تأکید می‌شود که طراحی بر پایه رفتار کامپوزیتی بتن الیافی انجام می‌گیرد، نه ویژگی‌های یک محصول خاص؛ بنابراین در طرح، علاوه بر نوع و جنس الیاف، خواص مورد انتظار بتن الیافی نیز باید صریحاً تعیین شود تا دستیابی به عملکرد مطلوب ممکن گردد.

۳-۱-۱- ملاحظات طراحی

طراح می‌تواند بتن مسلح به الیاف فولادی را ماده‌ای با ظرفیت کرنش بیشتر، مقاومت زیاد در برابر ضربه، جذب انرژی، خستگی و کشش بیشتر در نظر گیرد. میزان این بهبودها به نوع و مقدار الیاف بستگی دارد، اما همواره تناسب مستقیم با حجم الیاف افزوده شده ندارد.

چندین رویکرد طراحی برای اعضای بتن الیافی وجود دارد که عمدتاً بر پایه روش‌های متداول بوده و با رویه‌های ویژه برای لحاظ کردن اثر الیاف تکمیل می‌شوند. زمانی که این رویکردها توسط داده‌های آزمایش شده با مقیاس کامل پشتیبانی شوند، می‌توانند طراحی‌های رضایت‌بخشی ارائه دهند. تفاوت اصلی این روش‌ها در نحوه محاسبه سهم تنش کششی ناشی از الیاف و روش تعیین نیروی کل است. در برخی رویکردها، ترک‌ها به عنوان مفاصل پلاستیک در نظر گرفته می‌شوند که ظرفیت

برای کاربردهای غیرسازه‌ای نیز راهنماهایی در ACI 360R (دال‌های روی زمین) و ACI 506.1R (بتن پاششی مسلح به الیاف) موجود است.



هدف این بخش، ارائه دستورالعمل‌های طراحی ساده و کارآمد برای مهندسانی است که طراحی بتن مسلح سنتی را می‌شناسند اما در طراحی بتن الیافی به راهنمای بیشتری نیاز دارند. تمرکز بر تبیین مفاهیم و دستورالعمل‌های موجود در مسلح‌سازی با الیاف است: **قوانین سازگاری ماده (-constitutive)، طراحی خمش، طراحی برش و کنترل عرض ترک.** دامنه این بخش به ماکروالیاف فولادی و الیاف مصنوعی پلی‌اولفینی محدود می‌شود که مطابق ASTM C1116/C1116M هستند. فرمول‌ها و کاربردهای بیان‌شده برای سایر انواع الیاف باید

لنگر باقی‌مانده به نوع و مقدار الیاف وابسته است. سایر روش‌ها عمدتاً تجربی بوده و باید فقط با پشتیبانی داده‌های آزمایشگاهی کافی به کار روند.

به‌طورکلی، **در اجزای خمشی باید الیاف فولادی همراه با آرماتورهای پیوسته به کار روند.** این الیاف به‌طور مؤثر ترک‌خوردگی را مهار کرده و مقاومت بتن را در برابر خستگی، ضربه و تنش‌های ناشی از جمع‌شدگی یا حرارت افزایش می‌دهند. با این حال، در اعضای مانند تیرها، ستون‌ها یا دال‌های مرتفع (سقف‌ها، کف‌ها یا سایر دال‌ها که روی زمین نیستند)، استفاده از میلگردهای تقویتی برای تحمل کامل بارهای کششی ضروری است؛ زیرا توزیع غیریکنواخت الیاف می‌تواند در نواحی بحرانی موجب کاهش مقاومت غیرقابل قبول شود.

در کاربردهایی که وجود تقویت‌کننده‌های کششی پیوسته برای ایمنی و یکپارچگی سازه ضروری نیست، مانند کف‌ها روی زمین، روسازی‌ها، روکش‌ها، حائل‌ها و پوشش‌های شاتکریت، بهبودهایی که در مقاومت خمشی، مقاومت در برابر ضربه، استحکام و عملکرد خستگی به‌واسطه الیاف ایجاد می‌شود، می‌تواند برای کاهش ضخامت مقطع، بهبود عملکرد یا هر دو استفاده شود. برای بتن سازه‌ای، ACI 318 استفاده از مقاومت کششی اضافی بتن مسلح به الیاف فولادی را در طراحی ساختمان‌ها پیش‌بینی نمی‌کند، بنابراین، طراحی تقویت‌کننده‌ها باید همچنان طبق روال معمول انجام شود. سایر کاربردها، همان‌طور که ذکر شد، آزادی بیشتری

برای استفاده کامل از ویژگی‌های بهبود یافته بتن مسلح‌شده با الیاف فولادی فراهم می‌کنند. برخی از کاربردها وجود دارند که در آن‌ها الیاف فولادی بدون میله‌های تقویتی برای تحمل بارها استفاده شده‌اند. این‌ها شامل دال‌های با دهانه کم و مرتفع، مانند پارکینگ فرودگاه هیترو است که دارای دال‌هایی به ابعاد ۱ متر مربع و ضخامت ۱۰ سانتی‌متر هستند که از چهار طرف تکیه‌گاه دارند. در چنین مواردی، باید قابلیت اطمینان اعضا با آزمایش‌های بار با مقیاس کامل نشان داده شود و فرایند ساخت باید از کنترل کیفیت سختگیرانه‌ای برخوردار باشد.

برخی از آزمایش‌های مقیاس کامل نشان داده‌اند که **الیاف فولادی در تکمیل یا جایگزینی خاموت‌ها در تیرها مؤثر هستند،** اگرچه در حال حاضر تکمیل یا جایگزینی خاموت با الیاف فولادی به‌عنوان یک روش پذیرفته‌شده در نظر گرفته نمی‌شود. این آزمایش‌های مقیاس کامل نشان داده‌اند که الیاف فولادی در ترکیب با میله‌های تقویتی می‌توانند ظرفیت ممان تیرهای بتن مسلح و پیش‌تنیده را نیز افزایش دهند. همچنین، الیاف فولادی می‌توانند **روش عملکرد داخلی مناسب برای جلوگیری از جمع‌شدگی** در زمان استفاده از سیمان‌های منبسط‌شونده فراهم کنند، به‌طوری که سیستم بتنی عملکرد کنترل ترک خود را حتی زمانی که مقاومتی از تقویت‌کننده‌های معمولی فراهم نشده باشد، انجام دهد. راهنمایی در مورد بتن‌های جبران‌کننده جمع‌شدگی در ACI 223 موجود است.

۳- ۱- ۲- تعیین عملکرد بتن الیافی

به طور کلی در عملکرد بتن الیافی، در اغلب موارد الیاف باعث تغییر رفتار بتن در حالت ترک نخورده نمی شوند. اما پس از ترک خوردگی، الیاف ترک ها را پل زده و تنش های کششی را تحمل می کنند. این عملکرد باعث می شود بتن الیافی در حالت ترک خورده نیز ظرفیت باربری داشته باشد. این رفتار معمولاً به عنوان "مقاومت پسماند" یا "مقاومت پس از ترک" شناخته می شود. میزان این مقاومت پسماند به عواملی چون نوع و خواص مواد الیاف، اندازه، هندسه، ویژگی های پیوستگی با بتن، میزان مصرف و مهم تر از همه، اثر ترکیبی آن ها در بتن سخت شده بستگی دارد. مشخصات پیشنهاد بتن الیافی برای عملکرد پس از ترک به دسته بندی زیر تقسیم می شود:

الف) الیاف فولادی:

- باید مطابق با ASTM C1116/C1116M، نوع I باشند و حاوی الیاف فولادی باشند که با ASTM A820/A820M، نوع I، II یا V مطابقت دارند.

- باید میانگین حداقل مقاومت خمشی معادل پس از ترک (fe,3) برابر با عددی را فراهم کنند که طبق ASTM C1609/C1609M و با استفاده از سیستم تکیه گاهی غلتکی مطابق با ASTM C1812/C1812M

اندازه گیری می شود.

- مقدار مصرفی باید طبق توصیه تولیدکننده باشد.

ب) ماکروالیاف مصنوعی

- باید مطابق با ASTM C1116/C1116M، نوع III باشند و شامل الیاف ماکروسنتتیک باشند که با ASTM D7508/D750A برای ماکرو رشته خرد شده یا رشته های ترکیبی خرد شده مطابقت دارند.

- باید میانگین حداقل مقاومت خمشی معادل پس از ترک (fe,3) برابر با عددی را فراهم کنند، که طبق ASTM C1609/C1609M و با استفاده از سیستم تکیه گاهی غلتکی مطابق با ASTM C1812/C1812M اندازه گیری می شود.

- مقدار مصرفی باید طبق توصیه تولیدکننده باشد.

مشخصات بتن الیافی باید مبتنی بر عملکرد و متناسب با کاربرد آن باشد. اگر هدف از استفاده از الیاف، افزایش ظرفیت خمشی و کششی پس از ترک خوردگی باشد، الیاف باید بر اساس عملکرد مهندسی مورد انتظار تعیین شوند. پس از انجام محاسبات طراحی بتن الیافی، باید پارامترهایی مانند مقاومت پسماند در مشخصات ذکر شود. برای مثال، استفاده از الیاف با مقدار مناسب به گونه ای که حداقل مقاومت خمشی باقی مانده (f_{150}^{150}) برابر با $1/4$ مگاپاسکال در بتن با مقاومت فشاری ۲۸ مگاپاسکال فراهم گردد. در مثالی دیگر، در کاربردهای بتن پاششی، آزمون پنل ها برای ارزیابی عملکرد پس از ترک توصیه می شود؛ گاهی

نمونه‌های تیرچه‌ای ۱۰۰ میلی‌متری از پنل‌ها استخراج و آزمایش می‌شوند.

مقدار الیاف بر اساس داده‌های آزمایش ASTM C1609/C1609M برای الیاف خاص و در مخلوط بتنی با مقاومت فشاری مشابه تعیین می‌شود. همچنین، به‌جای استفاده از معیار خمش و تغییر مکان در ASTM C1609/C1609M، می‌توان مشخصات بتن الیافی را بر اساس قابلیت بهره‌برداری مشخص کرد تا به عرض ترک مشخصی برسد. این روش جایگزین، معمولاً در سازه‌های زیرزمینی و سایر سازه‌های پیش‌ساخته استفاده می‌شود. در این حالت، برای تعیین مقاومت پسماند در عرض ترک‌های مشخص، معمولاً از آزمایش تیر با شیار (طبق BS EN 14651) استفاده می‌شود. در تعیین مشخصات بتن مسلح‌شده با الیاف، می‌توان سایر خواص بتن مانند مقاومت فشاری، مقاومت خمشی یا جمع‌شدگی را نیز بسته به کاربرد مورد نظر، در نظر گرفت. برای اطلاعات بیشتر در مورد مشخصات بتن الیافی، به نشریه ACI 544.3R-08 مراجعه شود.

برای تعیین دقیق مشخصات بتن الیافی، آزمون‌های خمشی انجام می‌شود و پارامترهای عملکرد پس‌از ترک به‌دست‌آمده، در طراحی به کار می‌روند. آزمایش‌های رایج در این زمینه عبارت‌اند از؛ ASTM C1609/C1609M برای ارزیابی عملکرد خمشی با استفاده از تیر بتنی و ASTM C1550 برای سنجش چقرمگی خمشی در کاربرد بتن پاششی (با استفاده از پنل دایره‌ای). با استفاده از روابط ارائه‌شده در ACI 544.4R، طراحی و مشخصات بتن الیافی، می‌توان

مقدار مقاومت خمشی پسماند لازم به منظور جایگزینی یک آرماتور فولادی مشخص را محاسبه کرد. سپس، با استفاده از داده‌های آزمون ASTM C1609/C1609M برای یک نوع ماکروالیاف مشخص، مقدار متناظر مصرف الیاف تعیین می‌شود. بدیهی است که با افزایش میزان آرماتور فولادی مورد نظر، مقدار لازم الیاف نیز افزایش می‌یابد.

در آزمون ASTM C1609/C1609M، یک تیر بتنی مسلح شده به الیاف به ابعاد $150 \times 150 \times 500$ میلی‌متر و با دهانه ۴۵۰ میلی‌متر تا خیز خالص معادل ۳ میلی‌متر بارگذاری می‌شود و مقاومت خمشی پسماند در دو نقطه تغییر شکل 0.75 میلی‌متر (معادل $1/600$ ام طول دهانه با نماد f_{600}^{150}) و ۳ میلی‌متر (معادل $1/150$ ام طول دهانه با نماد f_{150}^{150}) اندازه‌گیری می‌شود. معمولاً، پارامتر دوم در طراحی بتن الیافی استفاده می‌شود. برای تعیین مقاومت باید حداقل ۳ تیر مشابه آزمایش شوند. نسبت مقاومت خمشی معادل در خیز معادل $1/150$ ام طول دهانه بر حسب درصد معادله (۱) و با استفاده از مقدار طاقت خمشی بدست می‌آید. در این معادله، T_{150}^D طاقت خمشی یا انرژی جذب شده در بتن الیافی تا خیز f_p ، $L/150$ ، مقاومت خمشی حداکثر، h ارتفاع مقطع تیر و b عرض مقطع تیر را نشان می‌دهد.

$$R_{T,150}^D = \frac{150 \times T_{150}^D}{f_p \cdot b h^2} \quad (1)$$

۳- ۱- ۴- طراحی

دستورالعمل‌های طراحی ارائه شده تنها برای **بتن مسلح شده با ماکروالیاف فولادی و پلیمری** تهیه شده است. الیاف فولادی باید طبق ASTM A820/A820M، نباید مقاومت کششی متوسط کمتر از ۳۴۵ مگاپاسکال داشته باشد. قطر ماکروالیاف فولادی معمولاً بین ۳/۰ تا ۱/۳ میلی‌متر و طول آن‌ها بین ۳۰ تا ۶۵ میلی‌متر است. الیاف پلیمری از مواد پلی‌اولفین ساخته می‌شوند. ASTM D7508/D7508M حداقل مقاومت کششی ماکروالیاف پلیمری را ۳۴۵ مگاپاسکال بیان می‌کند. قطر ماکروالیاف پلیمری معمولاً بین ۳/۰ تا ۱ میلی‌متر و طول آن‌ها بین ۱۲ تا ۶۵ میلی‌متر است.

رویکرد طراحی مقطع بتن الیافی، همان مفهوم بلوک تنش است که می‌توان برای مقطع بتن الیافی به کار برد. همان‌طور که در بخش قبل ارائه شد، از ASTM C1609/C1609M برای بدست آوردن پارامترهای مورد نیاز طراحی استفاده می‌شود. لنگر خمشی اسمی مقطع بتن الیافی طبق معادله‌های (۳) و (۴) و از تعادل نیروها در مقطع، مطابق شکل ۱- ۲۰ محاسبه می‌شود. همان‌طور که به صورت شماتیک نشان داده شده است، شکل ۱- ۲۰ (a) مقطع تیر بتن الیافی، شکل ۱- ۲۰ (b) توزیع واقعی تنش‌های نرمال و شکل ۱- ۲۰ (c) توزیع ساده شده تنش‌های نرمال در مقطع ترک‌خورده را نشان می‌دهد. تنش‌های

دیگر آزمایش برای بررسی عملکرد خمشی بتن الیافی، روش ارائه شده بر اساس BS EN 14651 است. این آزمایش اولین بار در سال ۲۰۰۳ معرفی شد. این آزمایش روی تیرهای بتن الیافی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۵۵۰ میلی‌متر و دهانه ۵۰۰ میلی‌متر و یک شکاف به عمق ۲۵ میلی‌متر در وسط دهانه تیر انجام می‌شود. این شکاف برای شروع ترک‌خوردگی استفاده می‌شود. تغییر مکان بازشدگی دهانه ترک به عنوان پارامتری با نام (CMOD) در مدت زمان انجام آزمایش در وسط دهانه اندازه‌گیری می‌گردد. تیر مورد آزمایش تحت کنترل حلقه بسته و با یک نقطه بارگذاری (خمشی سه نقطه‌ای) تا رسیدن مقدار CMOD به ۳/۵ میلی‌متر مورد آزمایش قرار می‌گیرد. F_{Ri} نیروی باقی‌مانده نظیر نقطه i روی منحنی بار- تغییر مکان بازشدگی دهانه ترک و F_{Ri} مقاومت باقی‌مانده خمشی معادل را نشان می‌دهد. مقادیر i مساوی ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب به مقادیر بازشدگی ترک یا CMOD برابر ۰/۵، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ میلی‌متر اشاره می‌کند. برای تعیین این پارامترها باید حداقل ۳ عدد تیر مشابه آزمایش شود. مقاومت خمشی باقی‌مانده بتن الیافی در نقطه i توسط معادله (۲) محاسبه می‌شود. در این معادله، F_{Ri} نیروی باقی‌مانده نظیر نقطه i ، L طول دهانه بارگذاری، b عرض مقطع و h_{sp}^2 ارتفاع خالص تیر (ارتفاع کلی منهای ارتفاع شکاف) است.

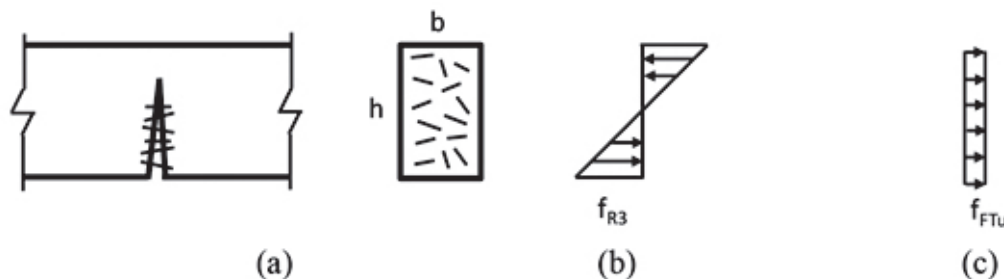
$$f_{R,i} = \frac{3F_{R,i} \cdot L}{2b \cdot h_{sp}^2} \quad (2)$$

فشاری توسط بتن و تنش‌های کششی توسط الیاف تحمل می‌شوند. توزیع ساده‌شده تنش‌های فشاری بتن الیافی، به‌علت عملکرد ترکیبی الیاف‌ها و بتن در بالای تار خنثی به صورت مثلثی در نظر گرفته می‌شود (در حالی‌که در زمان استفاده از میلگرد به صورت مستطیلی در نظر گرفته می‌شد). مقاومت کششی بتن الیافی بسیار بیشتر از مقاومت کششی بتن غیر مسلح است، بنابراین، در محاسبات لحاظ می‌گردد. در حالت حدی نهایی، مقاومت کششی نهایی بتن الیافی ترک خورده، f_{ut-FRC} ، را می‌توان مطابق رابطه (۳)، 0.37 برابر مقاومت باقیمانده خمشی آن، f_{150}^D (یا پارامتر $f_{e,3}$) که از آزمایش $ASTM C1609/C1609M$ بدست می‌آید، در نظر گرفت. از این معادله می‌توان برای تبدیل آرماتور فولادی یا مش جوش‌شده به مسلح‌سازی الیافی بر اساس ظرفیت کششی استفاده کرد.

$$f_{ut-FRC} = 0.37 \times f_{150}^D \quad (3)$$

ظرفیت خمشی مقطع بتن الیافی ترک‌خورده بر اساس مقاومت پسماند آن از معادله (۴) که در ارتباط با روش مشابه مورد استفاده توسط RILEM TC 162-TDF 2003 و ونیدیوال (۲۰۰۳) ایجاد شده، محاسبه می‌شود. در معادله (۴) که برای طراحی در حالت حدی نهایی است، b عرض (یا عرض واحد) و h ارتفاع مقطع بتنی است. اگر بتن الیافی برای عرض ترک کوچک‌تر تحت الزامات حالت حدی بهره‌برداری طراحی شود، می‌توان از پارامترهای دیگری مانند f_{D600} که مطابق با خیز کوچک‌تر در آزمایش (خمشی) تیر هستند، استفاده کرد. انتخاب حالت طراحی (حالت حدی نهایی در مقابل حالت حدی بهره‌برداری) و پارامتر طراحی مربوط به آن بستگی به کاربرد و الزامات بهره‌برداری دارد.

$$M_{n-FRC} = \frac{b \cdot h^2}{6} \times f_{150}^D \quad (4)$$



شکل ۱- ۲۰- شماتیک بلوک تنش برای یک عضو خمشی ترک‌خورده بتن الیافی: (a) مقطع تیر بتن الیافی؛ (b) توزیع تنش‌های خمشی؛ (c) توزیع ساده‌شده تنش‌های نرمال.

گاهی اوقات در معادلات (۳) و (۴)، مقاومت باقیمانده معادل $f_{e,3}$ ، به جای مقاومت باقیمانده f_{150}^D استفاده می‌شود. پارامتر $f_{e,3}$ شاخصی برای جذب انرژی کل (طاقة خمشی) در تغییر شکل ۳ میلی‌متر در آزمایش تیر خمشی است و معمولاً برای طراحی اعضای بتن الیافی که تکیه‌گاه سرتاسری دارند مانند دال‌های روی زمین و بتن پاششی، استفاده می‌شود. پارامتر f_{150}^D مقدار واقعی مقاومت باقیمانده خمشی در یک خیز یا عرض ترک مشخص است. این پارامتر معمولاً برای اعضای بتن الیافی که بدون تکیه‌گاه سرتاسری هستند از جمله تیرها، دال‌های معلق و قطعات پیش‌ساخته، استفاده می‌گردد. مقدار f_{150}^D می‌تواند کمی کمتر از $f_{e,3}$ باشد که باعث طراحی محافظه کارانه می‌شود. انتخاب بین دو پارامتر بستگی به کاربرد، معیارهای طراحی و الزامات ایمنی دارد.

ظرفیت خمشی طراحی بتن الیافی، ϕM_{n-FRC} باید بزرگ‌تر از لنگر M_u که به مقطع وارد می‌شود باشد، یعنی: $\phi M_{n-FRC} > M_u$. لازم به ذکر است که در مقایسه با بتن مسلح شده با آرماتور، ضرایب ϕ ممکن است قبل از استفاده برای اعضای بتن الیافی در حالت‌های خرابی فشار کنترل و کشش کنترل، نیاز به اصلاح (تعدیل) داشته باشند. برای اعضای بتن الیافی که بدون تکیه‌گاه سرتاسری هستند از جمله تیرها، دال‌های معلق و قطعات پیش‌ساخته، باید ضرایب ϕ محافظه کارانه‌تر (مقادیر کمتر) استفاده گردد. برای اعضای بتن الیافی که تکیه‌گاه سرتاسری دارند، مانند دال‌ها روی زمین و بتن پاششی، از ضرایب ϕ بزرگ‌تر

می‌توان استفاده کرد.

برای **طراحی دال‌های روی زمین با استفاده از مسلح‌کننده‌های الیافی**، فصل ۱۱ از نشریه ACI 360R اطلاعات و محاسبات دقیقی ارائه می‌دهد. ظرفیت باربری یک دال روی زمین تابعی از ضخامت دال، مدول بستر و تعامل بین دال و بستر است. بر اساس فرض واقع‌بینانه‌ای که دال‌های بتنی ترک می‌خورند، توزیع مجدد تنش‌ها و شکل‌گیری مفصل‌های پلاستیک در مقاطع ترک‌خورده بتن، می‌تواند نقشی کلیدی در طراحی داشته باشد. ماکروالیاف می‌تواند در توزیع مجدد تنش‌ها مشارکت کرده و در نتیجه، طاقت خمشی دال پس از ترک‌خوردگی را افزایش دهند. از این رو، یک پارامتر برای طاقت به نام "نسبت مقاومت پسماند" یا $R_{T,150}^{150}$ (همچنین، با R_{e3} نیز شناخته می‌شود) به‌طور معمول استفاده می‌گردد. طبق معادله ۵، این پارامتر نسبت بین f_{e3} ، مقاومت خمشی معادل (پس از ترک‌خوردگی) و f_r ، مقاومت خمشی اندازه‌گیری‌شده در لحظه ترک‌خوردگی است. برای یک مخلوط بتن با مقاومت خمشی مشخص، افزایش مقدار ماکروالیاف باعث افزایش مقدار طاقت خواهد شد.

$$R_{e3} = \frac{f_{e3}}{f_r} \quad (5)$$

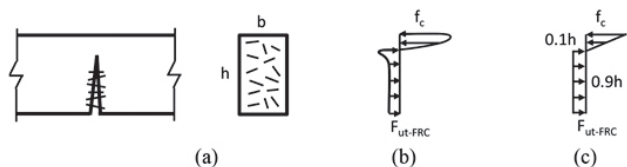
روش خط تسلیم معمولاً برای در نظر گرفتن طراحی بتن الیافی در دال‌های روی زمین پس از ترک‌خوردگی استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که دال‌ها می‌توانند به دلایل مختلفی مانند جمع‌شدگی

پلاستیک، جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدگی، تنش‌های حرارتی یا بارهای نهایی دچار ترک‌خوردگی شوند. مقدار R_{e3} را می‌توان برای یک دال مشخص با مدول بستر معلوم و بارهای اعمال‌شده محاسبه کرد. ضخامت دال ممکن است با مقادیر بسیار بالای R_{e3} کاهش یابد.

• طراحی بتن الیافی در خمش بر اساس دستورالعمل fib

طراحی بتن الیافی در خمش بر مبنای دستورالعمل fib با استفاده از رابطه لنگر خمشی عرض ترک خوردگی که از آزمایش BS EN14651 روی تیرهای شیاردار انجام می‌شود، صورت می‌گیرد. لنگر اسمی مقطع بتن الیافی Mn-FRC طبق معادله‌های ۶ تا ۱۲ و از تعادل نیروها در مقطع مطابق شکل ۱-۲۱ محاسبه می‌شود. شکل ۱-۲۱ (a) مقطع تیر بتن الیافی، شکل ۱-۲۱ (b) توزیع تنش‌های خمشی و شکل ۱-۲۱ (c) توزیع ساده شده تنش‌های نرمال در مقطع ترک‌خورده را نشان می‌دهد. مقدار ثابتی از مقاومت باقیمانده کششی f_{Ftu} برای طراحی حالت نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، دو مدل برای محاسبه مقاومت کششی پس از ترک‌خوردگی بتن الیافی پیشنهاد شده است. در مدل اول که صلب پلاستیک نامیده می‌شود، مقاومت کششی نهایی بتن الیافی را $f_{Ftu-FRC}$ ، مقداری ثابت و برابر یک سوم مقاومت باقیمانده خمشی بتن الیافی حاصل از آزمایش تیر خمشی مطابق استاندارد BS EN14651، در نظر می‌گیرد. فرمول‌های محاسبه

مقاومت کششی و لنگر خمشی اسمی در این مدل به ترتیب در معادله‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. در مدل دوم، یک رابطه خطی میان مقاومت باقیمانده و عرض ترک‌خوردگی برای طراحی در حالت حدی بهره‌برداری و حدی نهایی در یک مقطع بتن الیافی فرض می‌شود. فرمول‌های محاسبه مقاومت کششی و لنگر خمشی اسمی به ترتیب در معادله‌های ۸ الی ۱۰ ارائه شده است. لازم به ذکر است که حالت طراحی باید در انتخاب درست روابط حالت حدی بهره‌برداری یا حالت حدی نهایی مورد توجه قرار گیرد. باید توجه شود که طراحی طبق دستورالعمل fib 2013 تنها برای الیاف‌هایی کاربرد دارد که مدول یانگ آن‌ها به طور قابل توجه تحت تأثیر زمان، دما یا هر دو نباشد. به علاوه حداقل الزاماتی مانند $\frac{f_{R,1}}{f_L} > 0.5$ و $\frac{f_{R,3}}{f_{R,1}}$ اعمال می‌شود که در آن L_f حد تناسب نامیده شده و از معادله ۲ بدست می‌آید. قواعدی که توسط دستورالعمل fib 2013 ارائه شده است، تنها بر اساس تجربه به دست آمده از بتن الیافی فولادی است.



شکل ۱-۲۱- شماتیک بلوک تنش برای یک عضو خمشی ترک‌خورده بتن الیافی: (الف) مقطع تیر بتن الیافی؛ (ب) توزیع واقعی تنش‌های نرمال؛ (ج) توزیع ساده‌شده تنش‌های نرمال.

توجه بسیاری از مطالعات قرار گرفته است. با استناد به نتایج تحقیقاتی در مقیاس واقعی که توسط پارامونتسینوس (۲۰۰۶) انجام شد، آیین‌نامه ACI 318 استفاده از الیاف‌های فولادی به جای خاموت برای مسلح‌سازی برشی در اعضای خمشی با $f_c < 40 \text{ MPa}$ و حداکثر ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر را تأیید می‌کند. طبق آیین‌نامه ACI 318 بخش R26.12.5، الیاف فولادی هنگامی که مطابق ASTM C1609M C1609M آزمایش می‌شوند، باید دارای نسبت منظر طول به قطر بین ۵۰ تا ۱۰۰ و حداقل پارامتر $R_{T,150}^D$ برابر با ۷۵ درصد باشد. حد پایین ظرفیت برشی تأمین شده توسط بتن الیافی فولادی از رابطه $f_c b_w$ $d \sqrt{0.29}$ بر حسب مگاپاسکال است که در آن عرض و ارتفاع مؤثر تیر است. شعیب و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که تیرهای بتنی با f_c و ارتفاع کل بیشتر از محدوده آیین‌نامه ACI 318 و آن دسته از تیرهایی که معیارهای $R_{T,150}^D$ را ارضا نمی‌کنند، قادر به تأمین ظرفیت برشی حداقل $f_c b_w d \sqrt{0.17}$ مگاپاسکال هستند.

دستور العمل fib 2013، الزامات طراحی برشی برای بتن الیافی فولادی را خلاصه کرده است. برای اعضای بتنی با آرما توره‌های طولی و بدون مسلح‌سازی برشی، از معادله‌های ۱۲ الی ۱۴ می‌توان برای محاسبه ظرفیت برشی استفاده کرد. طبق این دستورالعمل، اگر مقاومت باقیمانده نهایی بتن الیافی به اندازه کافی باشد، $f_{ut-FRC} > \frac{f_c^{1/2}}{20}$ ، امکان حذف حداقل آرما تور برشی (خاموت) وجود دارد.

استفاده از مدل صلب-پلاستیک (تنها در حالت حدی نهایی):

$$f_{Ftu-FRC} = \frac{f_{R,3}}{3} \quad (۶)$$

$$M_{n-FRC} = f_{R,3} \cdot \frac{bh_{sp}^2}{6} \quad (۷)$$

استفاده از مدل خطی (برای حالت حدی بهره برداری و حالت حدی نهایی):

$$f_{Fts-FRC} = 0.45 f_{R,1} \quad (۸)$$

$$(۹)$$

$$f_{Ftu-FRC} = (0.45 f_{R,1}) - \frac{w_u}{CMOD_3} (0.45 f_{R,1} - 0.5 f_{R,3} + 0.2 f_{R,1}) \geq 0$$

$$M_{ns-FRC} = f_{R,1} \cdot \frac{bh_{sp}^2}{6} \quad (۱۰)$$

$$M_{nu-FRC} = f_{R,3} \frac{bh_{sp}^2}{6} \quad (۱۱)$$

• طراحی بتن الیافی در برش

اصول طراحی بتن الیافی در برش برای اعضای خمشی که در آن‌ها از آرما توره‌های طولی به همراه الیاف برای مسلح‌سازی برشی استفاده شده است، در این بخش ارائه می‌شود. استفاده از الیاف برای مسلح‌سازی برشی در تیرهای بتنی مسلح مورد

(۱۲)

$$V_{FRC} = \left\{ \frac{0.18}{\gamma_c} k_s \left[100\rho \left(1 + 7.5 \frac{f_{ut-FRC}}{f_t} \right) f_c \right]^{\frac{1}{3}} + 0.15 \sigma_{cp} \right\} \cdot b \cdot d$$

(۱۳)

$$V_{FRC} > (v_{min} + 0.15\sigma_{cp})bd$$

(۱۴)

$$v_{min} = 0.035 k_s^{\frac{3}{2}} f_c^{1.2}$$

۳-۲- تولید و اجرا

ورود الیاف به صنعت بتن نقطه عطفی در فناوری مصالح ساختمانی است که علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، دامنه کاربرد بتن را گسترش داده است. اساس عملکرد بتن الیافی بر ایجاد ماتریسی سه‌بعدی و تقویت‌شده استوار است که ضعف‌های بتن معمولی، به‌ویژه در برابر ترک‌خوردگی و گسیختگی، را کاهش می‌دهد. برای دستیابی به ساخت‌وسازی بادوام و مقرون‌به‌صرفه با استفاده از این بتن، رعایت روش‌های استاندارد در مخلوط‌کردن، اجرا، پرداخت و کنترل کیفیت ضروری است. در اغلب موارد، تجهیزات متداول ساخت بتن معمولی بدون تغییر خاصی برای بتن الیافی قابل استفاده‌اند، اما آموزش نیروهای اجرایی می‌تواند به بهبود نتایج کمک کند.

در فرآیند تولید و اجرا، الیاف با دقت به مخلوط بتن اضافه می‌شوند؛ این افزودن **یا در کارخانه، هنگام ساخت بتن آماده، یا در محل پروژه و بر اساس الزامات اجرایی** صورت می‌گیرد. مهم‌ترین نکته در عملکرد بتن الیافی، توزیع یکنواخت این الیاف در سراسر حجم بتن است تا هریک از قسمت‌ها از مزایای تقویت سه‌بعدی بهره‌مند شوند. این توزیع الیاف درون ماتریس بتن تأثیرات مختلفی بلافاصله در بتن تازه، سخت‌شده یا هر دو، می‌گذارد. با توجه به تنوع گسترده در انواع الیاف و ابزارهای مخلوط‌کردن بتن، انجام آزمایش‌های پیش از پروژه همواره توصیه می‌شود تا نقطه بهینه افزودن الیاف، زمان و سرعت مخلوط‌کردن و سیستم‌های توزین و افزودن تعیین شوند. با توجه به نوع خاص الیاف و مقدار مصرف آن، این آزمایش‌ها می‌توانند از اتلاف وقت و ایجاد تأخیرهای غیرضروری در پروژه جلوگیری کرده و به فرآیند ملایم مخلوط‌کردن الیاف و توزیع یکنواخت و بهینه آن‌ها در بتن کمک شایانی کنند.

چندین **توالی مخلوط‌کردن با موفقیت** استفاده شده‌اند که عبارتند از:

(۱) افزودن الیاف به کامیون مخلوط‌کن پس از این که تمام اجزای بتن از جمله آب اضافه و مخلوط شدند. الیاف فولادی باید با سرعت حدود ۴۵ کیلوگرم در دقیقه به هاپر مخلوط‌کن اضافه شوند، در حالی که میکسر با سرعت کامل می‌چرخد. الیاف باید در حالت بدون توده اضافه شوند تا تیغه‌های میکسر بتوانند آن‌ها را به داخل

(۳) افزودن الیاف پس از وزن شدن در توزین‌کننده روی مصالح روش دیگری است که انجام می‌شود. جریان طبیعی مصالح از داخل توزین‌کننده، الیاف را در سراسر مصالح توزیع می‌کند. الیاف فولادی می‌توانند به صورت دستی یا از طریق نوار نقاله همان‌طور که در شکل ۱-۲۳ نشان داده شده است، اضافه شوند.

بتن حاوی الیاف فولادی تحویل داده شده به پروژه‌ها باید با مقررات قابل اجرا در ASTM C1116 مطابقت داشته باشد. برای روش‌های دستی اضافه کردن الیاف فولادی که در حال حاضر استفاده می‌شوند، کارگران باید دستکش و عینک محافظ داشته باشند. لازم است که توده‌های الیاف، باز شوند یا از وارد شدن به مخلوط جلوگیری شود. توصیه می‌شود که روش افزودن الیاف فولادی به مخلوط در حین مخلوط آزمایشی بررسی شود.



شکل ۱-۲۳- اضافه کردن الیاف فولادی به وی بچر

میکسر حمل کنند. سپس میکسر باید به سرعت مخلوط کردن توصیه شده کند شود و به مدت ۴۰ تا ۵۰ دور مخلوط شود. الیاف فولادی به صورت دستی از طریق تخلیه محفظه‌ها به هاپر کامیون یا از طریق نوار نقاله یا بلور اضافه می‌شود. با استفاده از این روش، الیاف فولادی می‌توانند در کارخانه یا در محل پروژه اضافه شوند.

(۲) افزودن الیاف به جریان مصالح در کارخانه قبل از اینکه مصالح به مخلوط‌کن اضافه شوند. الیاف فولادی می‌توانند به صورت دستی روی مصالح در نوار نقاله بارگذاری یا از طریق نوار نقاله دیگری که روی نوار نقاله بارگذاری تخلیه می‌شود، همان‌طور که در شکل ۱-۲۲ نشان داده شده است، اضافه شوند. الیاف باید به طور یکنواخت در طول نوار نقاله پخش شوند تا از ایجاد توده جلوگیری شود.



شکل ۱-۲۲- اضافه کردن الیاف فولادی از طریق نوار نقاله

۳-۲-۱- فرآیند مخلوط کردن

فرآیند مخلوط کردن مناسب برای بتن الیافی تا حد زیادی به نوع، ویژگی‌ها و مقدار مصرفی الیاف انتخاب شده برای یک پروژه خاص و همچنین نوع سیستم مخلوط کردن که برای تولید بتن استفاده می‌شود، بستگی دارد. از این رو، پیروی از ترتیب مخلوط کردن توصیه شده برای هر نوع الیاف اهمیت زیادی دارد تا از تشکیل توده‌ها یا گلوله‌های الیاف در مخلوط جلوگیری شود و توزیع یکنواخت سه بعدی الیاف در بتن به حداکثر برسد. معمولاً بهترین مرجع برای دستورالعمل‌های مربوط به مخلوط کردن، تأمین کننده الیاف یا بتن است. نمونه‌ای تنوع نوع مخلوط کردن بسته به نوع الیاف در ادامه بررسی می‌شود:

■ الیاف مصنوعی و سلولزی

میکروالیاف مصنوعی و الیاف سلولزی که دارای طول کوتاه و مقدار مصرفی نسبتاً کم هستند، به طور معمول باید همراه با سایر مواد تشکیل دهنده بتن در سیستم مخلوط کن مرکزی یا کامیون مخلوط کن اضافه شوند. برخی میکروالیاف بهتر است به عنوان اولین یا آخرین ماده تشکیل دهنده وارد کامیون مخلوط کن شوند، اما برای هر نوع خاصی از الیاف، باید با تأمین کننده مشورت شود تا بهترین روش مشخص گردد. ماکروالیاف مصنوعی معمولاً باید

همراه با سنگدانه‌ها و سایر مواد به مخلوط افزوده شوند تا خطر گلوله شدن (توده شدن) یا انباشتگی سیمان در قسمت جلوی مخروط مخلوط کن به حداقل برسد. الیاف مصنوعی بر پایه پلی‌اولفین آب جذب نمی‌کنند؛ بنابراین، از پیش مرطوب کردن یا افزودن آن‌ها به همراه بخشی از آب مخلوط، کمکی به توزیع بهتر آن‌ها نمی‌کند. میکروالیاف سلولزی نیز نیازی به از پیش مرطوب کردن ندارند. برای الیاف جاذب، توصیه‌های مربوطه ممکن است متفاوت باشد و باید دستورالعمل‌های تأمین کننده با دقت دنبال شود.

اکثر الیاف مصنوعی و سلولزی در کیسه‌های کاغذی محلول در آب یا کیسه‌هایی که در بتن تجزیه می‌شوند، بسته بندی می‌شوند که این امکان را فراهم می‌آورد تا کیسه‌ها بدون باز شدن مستقیماً به مخلوط اضافه شوند. برخی الیاف نیز در قالب بلوک‌های فشرده یا به صورت فله در کیسه‌های بزرگ عرضه می‌شوند و از طریق سیستم‌های توزیع الیاف به مخلوط اضافه می‌گردند. کیسه‌های الیاف باید یک به یک، یا تعدادی در یک نوبت و در حالی که مخروط مخلوط کن در حال چرخش است، اضافه شوند تا به توزیع یکنواخت آن‌ها در مخلوط کمک شود. به ویژه در مقدارهای زیاد الیاف یعنی بیشتر از ۱/۸ تا ۲/۴ کیلوگرم در متر مکعب، باید دستورالعمل‌های تأمین کننده به طور دقیق رعایت شود. در مورد حجم‌های تولید کم یا حجم‌های تولید با ظرفیت کمتر از حالت کامل، باید احتیاط شود تا الیاف یا کیسه‌های الیاف به دیواره مخروط مخلوط کن نچسبند، چرا که این امر

روش مناسب به الزامات پروژه و امکانات موجود بستگی دارد. در این فرآیند، دستیابی به توزیع یکنواخت الیاف و جلوگیری از تجمع یا گلوله شدن (توده شدن) آن‌ها در حین مخلوط کردن اهمیت دارد. گلوله شدن الیاف در هنگام مخلوط کردن، به عوامل متعددی بستگی دارد. مهم‌ترین این عوامل عبارت‌اند از: نسبت منظر الیاف، درصد حجمی الیاف، حداکثر اندازه و دانه‌بندی سنگدانه‌ها و نحوه افزودن الیاف به مخلوط. با افزایش هر یک از این سه عامل نخست، احتمال گلوله شدن نیز بیشتر می‌شود.

۳-۲-۲- زمان و سرعت مخلوط کردن

■ الیاف مصنوعی و سلولزی

زمان و سرعت مخلوط کردن برای توزیع یکنواخت الیاف به **نوع و مقدار مصرفی** الیاف بستگی دارد. تمام الیاف ممکن است کم‌مخلوط شوند و برخی حتی ممکن است زیاد مخلوط شوند. به‌طور معمول، زمان مخلوط کردن معمولی در سیستم مخلوط‌کن مرکزی برای توزیع یکنواخت الیاف مصنوعی و سلولزی کافی است. برای سیستم مخلوط‌کردن در کامیون، الیاف مصنوعی و سلولزی معمولاً در مدت ۴ تا ۵ دقیقه در سرعت چرخش

باعث اختلال در توزیع الیاف و یکنواختی مخلوط خواهد شد. برای این‌گونه تولیدها یا حجم‌های تولید کمتر از ۵۰ درصد ظرفیت مخلوط‌کن، توصیه کلی این است که بتن را تا نزدیک محل تخلیه منتقل کنید، الیاف یا کیسه‌های الیاف را مستقیماً روی بتن بریزید و سپس بتن را دوباره به انتهای مخروط مخلوط‌کن هدایت کرده و فرآیند مخلوط کردن را آغاز کنید.

■ الیاف فولادی

از نظر ایمنی در هنگام استفاده، همیشه باید از دستکش و محافظ چشم مناسب هنگام جابه‌جایی و افزودن الیاف فولادی به سیستم مخلوط کردن استفاده شود. به‌طور کلی، **اسلامپ بهینه بتن پیش از افزودن الیاف فولادی، ۱۲۵ میلی‌متر** است تا مخلوط کردن و توزیع یکنواخت تضمین شود. **الیاف فولادی هرگز نباید به‌عنوان اولین ماده به مخلوط‌کن مرکزی یا کامیونی اضافه شوند و معمولاً بهترین روش، افزودن آن‌ها به همراه ماسه و سنگدانه‌های درشت یا به بتن تازه مخلوط شده است.** افزودن الیاف فولادی باید به‌صورت پیوسته انجام گیرد و نرخ حداکثر وزنی مجاز در دقیقه طبق راهنمای تأمین‌کننده الیاف و بتن رعایت شود. به‌طور کلی، نرخ افزودن الیاف فولادی بین ۲ تا ۳۴ کیلوگرم در دقیقه است که به نوع و ویژگی‌های فیزیکی الیاف بستگی دارد.

مخلوط کردن بتن مسلح به الیاف فولادی را می‌توان به روش‌های مختلفی انجام داد و انتخاب



۳-۲-۳- سیستم‌های توزیع الیاف

برای الیاف فولادی، مصنوعی و سلولزی، انواع مختلفی از سیستم‌های حمل و توزیع در دسترس هستند و برای دریافت توصیه‌های دقیق، باید با تأمین‌کننده الیاف و بتن مشورت شود. برخی از این روش‌ها، سیستم‌های انتقال ساده‌ای هستند که امکان حمل سریع و آسان الیاف از پیش توزین‌شده یا بسته‌های الیاف را از سطح زمین به سیستم‌های مخلوط‌کن مرکزی یا به درون کامیون‌های مخلوط‌کن بتن آماده فراهم می‌کنند. برخی سیستم‌های دیگر نیز که شامل دمنده‌ها یا لرزاننده‌ها هستند، برای توزین و انتقال الیاف به‌کار می‌روند و معمولاً از فرآیند کاهش وزن رایانه‌ای بهره می‌برند. دستگاه‌های توزیع‌کننده خودکار الیاف باید طوری تنظیم شوند که الیاف را در نقطه بهینه موردنیاز برای نوع خاص الیاف مورد استفاده، وارد سیستم مخلوط‌کن بتن کنند.

معمولی مخلوط‌کن یا سرعت مخلوط‌کردن بهینه که توسط تولیدکننده مخلوط‌کن مشخص و روی شاسی کامیون درج شده، به‌خوبی مخلوط و توزیع می‌شوند. توجه داشته باشید که **سرعت کند چرخش در زمان حمل بتن برای مخلوط‌کردن الیاف کافی نیست**؛ بنابراین زمان حمل بتن نباید به‌عنوان بخشی از زمان موردنیاز برای مخلوط‌کردن الیاف در نظر گرفته شود. این توصیه‌ها در صورت افزودن الیاف در محل پروژه نیز صادق هستند و نباید زمان مخلوط‌کردن کاهش یابد، حتی اگر پروژه در شرایط اضطراری باشد. سرعت بیش‌ازحد مخلوط‌کن به همان اندازه سرعت پایین مشکل‌ساز است؛ چرا که ممکن است عمل "**چین‌خوردگی یا folding**" کافی برای مخلوط‌کردن مناسب ایجاد نشود. **افزایش سرعت مخلوط‌کن نباید به‌عنوان جایگزینی برای کاهش زمان مخلوط‌کردن استفاده شود.**

■ الیاف فولادی

زمان مخلوط‌کردن برای الیاف فولادی بسته به شکل، طول و پیکربندی آن‌ها متفاوت است. به‌طورکلی، حداقل **یک دقیقه مخلوط‌کردن واقعی به ازای هر متر مکعب بتن برای توزیع کامل الیاف** لازم است و حداقل زمان کل مخلوط‌کردن پس از افزودن همه الیاف، ۵ دقیقه باید باشد. **سرعت مخلوط‌کردن باید معمولاً بیشتر از ۱۲ دور در دقیقه** باشد، هر چند سرعت بهینه مخلوط‌کردن بستگی زیادی به کارایی سیستم مخلوط‌کردن خاص دارد.

است که الیاف به‌درستی به مخلوط بتن اضافه و به‌طور یکنواخت ترکیب شوند تا شرایط مطلوبی برای جای‌دهی، پمپاژ و پرداخت فراهم گردد. توصیه‌های تأمین‌کننده الیاف و بتن، معتبرترین منبع اطلاعاتی در این زمینه هستند. با این حال، پیشنهادهای عمومی زیر می‌توانند به پیمانکاران در جلوگیری از مشکلات مربوط به استفاده از الیاف در محل پروژه کمک کنند.

۳-۳-۱- جای‌دهی بتن الیافی

به‌طور معمول، مقادیر مصرفی بیشتر و الیاف بلندتر، رئولوژی بتن تازه را بیش‌تر از مقادیر مصرفی کمتر و الیاف کوتاه‌تر تحت تأثیر قرار می‌دهند. در نتیجه، الیاف سلولزی و الیاف مصنوعی میکرو، به‌دلیل طول کوتاه و مقدار مصرفی کم، معمولاً تأثیر قابل توجهی بر رئولوژی بتن تازه ندارند. به‌طورکلی، **اغلب الیاف فولادی و ماکروالیاف مصنوعی به‌ویژه در مقادیر مصرف زیاد، بر مقدار اسلامپ ظاهری یا جریان اسلامپ بتن تازه تأثیر می‌گذارند.** مهم است که بدانیم اندازه‌گیری اسلامپ صرفاً به‌منظور سنجش یکنواختی بین کامیون‌های مختلف بتن استفاده می‌شود، نه برای سنجش واقعی کارایی مخلوط بتن. با این‌که الیاف پلی‌اولفینی مصنوعی و الیاف فولادی، آب مخلوط را جذب نمی‌کنند، اما در بتن تازه به‌عنوان عامل چسبنده عمل کرده و در حالت ساکن نیز ممکن



۳-۳- نحوه استفاده و کنترل کیفیت

الیاف با مواد، شکل هندسی و ابعاد مختلف، در هنگام جای‌دهی، پمپ‌کردن و پرداخت بتن الیافی، رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. بنابراین، بسیار مهم



کاهنده آب به‌ویژه فوق‌روان‌کننده یا از افزودنی‌های حفظ کارایی استفاده شود.

۳-۲-۳- پمپ کردن بتن الیافی

پمپ کردن بتن الیافی نیز به تفاوت بین اسلامپ ظاهری و کارایی واقعی بتن تازه مرتبط است. با وجود این که الیاف با توزیع سه‌بعدی در بتن به‌عنوان عامل چسبنده عمل می‌کنند، زمانی که انرژی لازم برای پمپاژ به بتن وارد شود، بتن الیافی به راحتی حرکت می‌کند. الیاف به درستی پراکنده شده معمولاً مانعی برای پمپاژ ایجاد نمی‌کنند و در برخی موارد حتی فشار پمپ را

است باعث شوند بتن الیافی از نظر بصری سفت‌تر به نظر برسد که ممکن است موجب نگرانی‌هایی در خصوص کارایی بتن شود.

با این حال، این الیاف در عمل نسبت به آنچه در آزمایش اسلامپ مشاهده می‌شود، تأثیر بسیار کم‌تری بر کارایی واقعی بتن دارند. بنابراین، تولیدکننده و پیمانکار بتن باید از این موضوع آگاه باشند و نباید برای جبران این کاهش ظاهری اسلامپ، آب اضافی به مخلوط اضافه کنند، زیرا این کار نسبت آب به مواد سیمانی طراحی شده را تغییر می‌دهد. معمولاً بتن الیافی در هنگام جای‌دهی با استفاده از لرزاننده به خوبی حرکت می‌کند. اما اگر در زمان جای‌دهی نیاز به اسلامپ یا کارایی بیشتر باشد، باید از افزودنی‌های

در همه موارد، آزمایش‌های پیش‌پروژه‌ای با استفاده از ترکیب واقعی بتن پمپ‌پذیر به‌همراه مقدار الیاف مشخص‌شده توصیه می‌شود تا از بروز مشکلات پمپاژ در حین پروژه جلوگیری شود. یکی از مواردی که باید در جلسات پیش‌ساخت پروژه مورد بررسی قرار گیرد، **نوع شبکه یا توری ورودی پمپ** است که در پروژه استفاده خواهد شد. با افزایش مقدار الیاف و چسبندگی بتن بدست آمده، ممکن است بتن الیافی به‌جای عبور آسان، روی شبکه پمپ جمع شده و مسدودیت ایجاد کند. در این شرایط، شبکه‌های میله‌ای گرد به‌جای توری‌های شیاردار مرسوم ترجیح داده می‌شوند، چون **اجازه عبور آسان‌تری به بتن الیافی** می‌دهند. همچنین، باید از لرزش کافی در قیف پمپ اطمینان حاصل شود تا بتن الیافی از روی آن عبور کرده و به محفظه پمپ منتقل شود. توصیه‌های تولیدکننده الیاف و بتن در مورد شبکه پمپ و فرآیند پمپاژ برای نوع الیاف خاص، باید با دقت مدنظر قرار گیرد.



کاهش می‌دهد. با این حال، در مقادیر مصرف زیاد و برای الیاف با مدول زیاد (سخت‌تر)، مانند الیاف فولادی یا برخی الیاف پلی‌اولفینی، ممکن است پمپاژ تحت تأثیر قرار گیرد. بنابراین، لازم است اقدامات پیشگیرانه‌ای برای جلوگیری از گرفتگی لوله‌ها یا توقف جریان مواد انجام شود. این اقدامات می‌تواند شامل افزایش حجم ملات به میزان ۱۰ درصد، مطابق با توصیه‌های ACI 211.1 یا تغییراتی بر اساس تجربه‌های قبلی با آن نوع خاص از الیاف باشد.



۳-۳-۳- پرداخت بتن الیافی

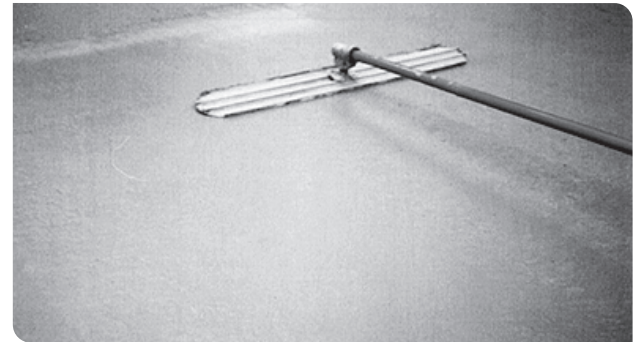
نوع ماده الیاف، شکل هندسی، ابعاد و مقدار مصرف آن‌ها، همگی می‌توانند بر **ظاهر نهایی سطح بتن الیافی** و همچنین **روش‌های پرداخت مورد نیاز در یک پروژه خاص** تأثیرگذار باشند. به عنوان مثال، الیاف سخت یا صلب ممکن است نسبت به الیاف انعطاف‌پذیر با مدول کم، تمایل بیشتری به بیرون زدن از سطح بتن داشته باشند. با توجه به نوع ماده الیاف، شکل هندسی، ابعاد و مقدار مصرفی، ظاهر نهایی سطح بتن می‌تواند متفاوت باشد (مثلاً نشسته روی زانو یا از حالت ایستاده به سطح نگاه می‌شود). در برخی موارد، یک الیاف خاص در طول‌های کوتاه‌تر بهتر روی سطح می‌چسبد، در حالی که شکل الیاف متفاوت ممکن است در طول‌های بلندتر بهتر در سطح بتن قرار گیرد.



بار دیگر، آزمایش‌های پیش از پروژه با استفاده از الیاف و مقدار انتخاب شده، باید انجام شود تا انتظارات کارفرما و توانایی‌های مجری تأیید شود. توصیه‌های تأمین‌کنندگان الیاف و بتن باید برای بهترین شیوه‌های پرداخت سطح برای انواع مختلف الیاف رعایت شود. این نکته اهمیت دارد که **الیاف در کل مقطع بتن به طور سه بعدی توزیع** شده‌اند و بنابراین الیاف ممکن است در بالا، وسط و پایین دال‌ها قرار داشته باشند و می‌تواند نیاز به عملیات ویژه‌ای برای اطمینان از پرداخت سطح مناسب داشته باشند. الیافی که در سطح دال نمایان می‌شوند ممکن است بر عملکرد کلی بتن تأثیر نگذارند، اما ترجیحات زیبایی‌شناسی کارفرما باید مورد توجه و تأیید قرار گیرد. روش‌هایی که در پرداخت سطح دال، اختلال ایجاد می‌کنند، به طور طبیعی روی ظاهر الیاف در سطح یا نزدیک سطح تأثیر خواهد گذاشت. به عنوان مثال، سطوح با پرداخت شیاردار یا برس‌خورده، معمولاً بیشتر از یک سطح تراش‌خورده و صاف الیاف سطحی را نمایان می‌کنند.

برای بهبود ظاهر سطح بتن الیافی، روش‌های مختلف برس‌کشی توسط تأمین‌کنندگان پیشنهاد می‌شود؛ از جمله برس‌کشی در یک جهت مشخص یا استفاده از برس‌های ویژه برای هم‌راستایی الیاف سطحی. در صورت نیاز، می‌توان از مشعل برای سوزاندن الیاف مصنوعی سطح استفاده کرد. در کف‌های صنعتی، تجاری و انبارها که مقادیر

زیادی ماکروالیاف مصنوعی یا فولادی به کار می‌رود، استفاده از **شمشه لیزری یا شمشه لرزشی** توصیه می‌شود تا تراکم یکنواخت بتن و دستیابی به سطح نهایی مطلوب تضمین شود.



۳-۴- مسئولیت‌های محیط‌زیستی و ایمنی

انجمن‌های بین‌المللی و اعضای آن متعهد به رعایت اصول محیط‌زیستی و ایمنی در استفاده از الیاف تقویت‌کننده بتن هستند و دیگر فعالان صنعت را نیز به همین رویکرد دعوت می‌کنند. گرچه مسلح‌سازی توسط الیاف مزایای زیادی برای دوام و عملکرد بتن دارند، اما نباید **این مزایا موجب غفلت از مسئولیت‌های محیط‌زیستی و ایمنی** در فرآیند ساخت شوند. تولیدکنندگان، تأمین‌کنندگان و مصرف‌کنندگان الیاف مسلح‌کننده باید نسبت به

اثرات احتمالی محیط‌زیستی الیاف و تأثیرات بالقوه آن بر ایمنی آگاه باشند و نقش خود را در ممانعت از ورود بی‌رویه آن‌ها به محیط در حین فرایند ساخت اجرا کنند و نقش مشخصی در تضمین استفاده ایمن از آن داشته باشد. در ادامه اقداماتی را تشریح می‌شود که می‌تواند استفاده مسئولانه از تقویت‌کننده‌های الیافی در کاربردهای بتن را تضمین کند.

در هر کارگاه ساختمانی که بتن‌ریزی انجام می‌شود، باید مدیریت پسماند بتن و آب شست‌وشو مطابق با مقررات داخلی، ملی یا بین‌المللی انجام شود. در ادامه، توصیه‌هایی برای مدیریت صحیح در مراحل مختلف استفاده از بتن الیافی آمده است:

• اطمینان حاصل شود که همه الیاف در داخل مخزن مخلوط‌کن بتن باقی بمانند و از ریزش آن‌ها جلوگیری شود. در صورت بروز ریزش، باید اقدامات لازم برای پاک‌سازی سریع و مناسب الیاف انجام شود.

• مهم است که اطمینان حاصل شود که تمام آب‌های خروجی کارخانه بتن، به حوضچه‌های جمع‌آوری تصفیه‌خانه کارخانه هدایت شوند، نه به فاضلاب شهری یا آب‌های سطحی.

• در صورت لزوم، می‌توان الیاف را از آب جدا کرده و به شکل مناسب دفع یا بازیافت نمود.

• بتن باقی‌مانده در کامیون‌های حمل بتن، مخازن پمپ‌ها و سایر تجهیزات باید در یک محل

شست‌وشوی مناسب و سازگار با محیط زیست تخلیه شود.

• الیاف شناور را می‌توان در مراحل پایانی شست‌وشو از سطح آب جمع‌آوری کرد.

• الیاف غیرشناور نیز می‌توانند همراه سایر ذرات، فیلتر شده و به درستی دفع یا بازیافت شوند.

• در پروژه‌های بتن پاششی، پسماندهای بتن پاششی، مواد برگشتی و نخاله‌های دارای الیاف باید به‌صورت کنترل‌شده به مکان‌های دفن مجاز منتقل شوند. این پسماندها نباید به آب‌های آزاد یا دریاها تخلیه شوند، چرا که می‌توانند تأثیرات منفی بر محیط‌های طبیعی اطراف بگذارند.

استفاده از الیاف باید به‌گونه‌ای باشد که نه‌تنها عملکرد سازه بهبود یابد، بلکه **محیط زیست نیز از آسیب در امان بماند**.

مدیریت درست پسماند و شست‌وشو، اقدامات پیشگیرانه در کارخانه و دفع اصولی الیاف همگی گام‌هایی اساسی در این مسیر هستند. در محل‌هایی که بتن شسته می‌شود و الیاف در پساب وجود دارند، اگر از پمپ‌های مستغرق برای انتقال آب استفاده می‌شود، باید نکات زیر رعایت شود:

• نصب توری محافظ با مش مناسب در اطراف دهانه ورودی پمپ الزامی است.

• توری از ورود الیاف به داخل پمپ جلوگیری کرده

و مانع از انتقال الیاف به سایر بخش‌ها یا محیط اطراف می‌شود.

برای تمام انواع الیاف، برگه ایمنی محصول باید پیش از استفاده مطالعه شود تا اطلاعات کافی در مورد خطرات بهداشتی و اقدامات ایمنی به دست آید. **نکات کلی ایمنی در کار با الیاف** به شرح زیر است:

• استفاده از تجهیزات حفاظت فردی، به‌ویژه محافظ چشم (عینک ایمنی)، برای تمام انواع الیاف توصیه می‌شود.

• در مورد الیاف فولادی به دلیل داشتن لبه‌های تیز و قابلیت آسیب‌رسانی بیشتر؛ استفاده از دستکش ایمنی مقاوم و استفاده از عینک محافظ الزامی است.

رعایت این توصیه‌ها به پیشگیری از آسیب‌های احتمالی به تجهیزات و پرسنل کمک کرده و در حفظ سلامت محیط زیست نیز مؤثر است. پیش از استفاده از هر نوع محصول الیاف، باید برگه اطلاعات ایمنی محصول مربوطه که توسط تولیدکننده ارائه می‌شود، مورد بررسی قرار گیرد. همانند سایر پروژه‌های ساخت‌که شامل کار با بتن هستند، مدیریت ایمنی در بتن مسلح به الیاف باید مطابق با مقررات داخلی، ملی یا بین‌المللی انجام شود.

گنجینه تجرب‌ها

{ بخش دوم }

تجربه های علمی

تجربه های اجرایی



۱- تجربه‌های علمی

برای تصمیم‌های مهندسی خلاصه می‌کند.

۱-۱- پمپ‌پذیری بتن الیافی

پمپ‌پذیری بتن به توانایی انتقال بتن تازه در سیستم پمپاژ (پمپ و لوله‌ها) بدون بروز جداسدگی، گرفتگی یا افت فشار بیش‌ازحد اطلاق می‌شود. این ویژگی در پروژه‌هایی با انتقال بتن در مسافت‌های طولانی یا ارتفاع زیاد، مانند برج‌ها، پل‌ها و تونل‌ها، اهمیت حیاتی دارد. بتن الیافی به دلیل مزایایی همچون کنترل ترک و افزایش چقرمگی به‌طور گسترده به کار

این بخش بر خروجی یک برنامه پژوهشی هدفمند در واحد تحقیق و توسعه و کنترل کیفیت فهاب بتن تکیه دارد. ابتدا با مرور نظام‌مند منابع و استانداردهای معتبر، نقشه‌ای از متغیرهای مؤثر بر رفتار بتن الیافی ترسیم شد؛ سپس چالش‌های اساسی که در این زمینه بر مشخصات بتن الیافی تأثیرگذار است، شناسایی گردید. دو چالش اصلی در زمینه بتن الیافی، **چالش پمپ‌پذیری بتن الیافی، توزیع و جهت‌گیری الیاف** است که مانع گسترش بیش‌ازپیش بتن الیافی در صنعت ساخت‌وساز بتن آماده و حتی پیش‌ساخته شده است. بنابراین، این بخش، یافته‌ها را به زبان قابل استفاده

تنش لازم برای شروع جریان و ویسکوزیته پلاستیک (η_{pl}) به عنوان مقاومت در برابر جریان پس از آغاز حرکت. هر دو پارامتر اثر مستقیمی بر پمپ‌پذیری دارند؛ به طور کلی، مقادیر کمتر تنش تسلیم و لزجت، سیالیت بهتر و فشار پمپاژ کمتر را به همراه دارند. با این حال، کاهش بیش از حد این مقادیر می‌تواند خطراتی مانند **جداشدگی یا گلوله شدن الیاف** ایجاد کند. بنابراین، پمپ‌پذیری بتن الیافی نتیجه تعامل پیچیده **شرایط محیطی، پارامترهای طراحی مخلوط و ویژگی‌های الیاف مصرفی** است. درک دقیق این عوامل و کنترل آن‌ها برای دستیابی به بتن الیافی قابل پمپاژ، ضروری و پیش شرط اجرای موفق پروژه‌های مقیاس بزرگ به شمار می‌رود.

عوامل زیر به طور قابل توجهی بر پمپ‌پذیری و ویژگی‌های تازه، رئولوژی بتن الیافی تأثیر می‌گذارند:

۱-۱-۱- شرایط محیطی و پمپاژ

■ دما

دمای بتن و محیط بر حفظ روانی بتن تازه در حین پمپاژ اثر مستقیم دارد. در **هوای گرم**، بتن سریع‌تر آب خود را از دست می‌دهد و افت اسلامپ بیشتری رخ می‌دهد. همچنین، دمای زیاد می‌تواند باعث شود مواد شیمیایی (مانند فوق‌روان‌کننده‌ها) سریع‌تر تأثیر خود را از دست بدهند. تحقیقات میدانی نشان می‌دهد **درجه حرارت زیاد محیط منجر به کاهش اسلامپ محسوس در طول شیلنگ پمپ می‌شود**. در **هوای سرد**، معمولاً حفظ کارایی بتن راحت‌تر است،

می‌رود، اما حضور الیاف باعث تغییر رفتار رئولوژی و ایجاد چالش‌هایی در فرآیند پمپاژ می‌شود.



رفتار بتن الیافی تازه معمولاً بر پایه **مدل بینگهام** توصیف می‌شود که توسط دو پارامتر رئولوژی کلیدی تعریف می‌گردد: **تنش تسلیم (T_0)** به عنوان حداقل

اما باید دقت کرد که بتن در لوله یخ نزند. دمای پایین می‌تواند باعث افزایش لزجت خمیر سیمان شود؛ لذا در سرما نیز بهتر است دمای مصالح در محدوده مناسب (مثلاً حداقل ۱۰ درجه سلسیوس) باشد تا پمپاژ روان بماند.

دمای بتن پس از پمپاژ معمولاً افزایش می‌یابد که احتمالاً به دلیل هدایت گرمای خارجی، گرمای اصطکاکی و گرمای هیدراسیون است. افزایش دما می‌تواند لزجت بتن را افزایش داده و پمپاژ را سخت‌تر کند. با این حال، در برخی آزمایش‌ها، کاهش قابل توجهی در لزجت پس از پمپاژ مشاهده شده است که نشان می‌دهد اثر کلی دما بر لزجت ممکن است ناچیز باشد یا توسط عوامل دیگر جبران شود. دماهای بیشتر می‌توانند هیدراسیون سیمان را تسریع کرده و ویژگی‌های رئولوژی خمیر را تغییر دهند که در صورت عدم مقابله با عوامل دیگر، ممکن است لزجت را افزایش دهد.

■ قطر لوله و فشار پمپاژ

اندازه‌های کوچک‌تر دانه‌های سنگی، به‌ویژه برای پمپاژ سریع یا مسافت‌های طولانی، به‌طور تجربی برای تسهیل پمپاژ بتن استفاده می‌شوند. حداکثر اندازه ذره سنگدانه باید محدود باشد؛ به‌عنوان مثال، حداکثر اندازه ۲۰ میلی‌متر برای لوله‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر در بتن الیافی فولادی. پمپاژ شامل افت فشار اولیه قابل توجهی در ورودی لوله است که پس از آن کاهش خطی فشار در طول لوله رخ می‌دهد. فشار پمپاژ بیشتر معمولاً منجر به کاهش بیشتر لزجت می‌شود. نرخ تخلیه به‌طور معکوس با لزجت و به‌طور مستقیم

با افت فشار مرتبط است. برای لوله‌ای به طول ۱۰ متر با حجم پمپاژ ۴۴ مترمکعب در ساعت، تنش تسلیم مناسب نباید بیشتر از ۱۵۰۰ پاسکال باشد و لزجت نباید بیشتر از ۴۵ پاسکال در ثانیه باشد تا افت فشار لوله کمتر از ۱۰ بار حفظ شود.

یک **لایه روان‌کاری** در محل تلاقی بتن و دیواره لوله حین پمپاژ تشکیل می‌شود که عمدتاً از خمیر چسبنده با تعداد کمتری ذرات شن تشکیل شده است. این **لایه لزجت و تنش تسلیمی کمتری** نسبت به بتن دارد و به‌طور قابل توجهی اصطکاک را کاهش می‌دهد. تشکیل این لایه به حرکت ذرات ناشی از برش نسبت داده می‌شود، جایی که ذرات از نواحی با تنش برشی بیشتر (نزدیک دیواره) به نواحی با تنش برشی کمتر (مرکز لوله) منتقل می‌شوند. این حرکت تحت تأثیر گرادیان تنش است، اما با افزایش ویژگی‌های رئولوژی در نواحی با تراکم ذرات زیاد، محدود می‌شود. همچنین، به دلیل تعادل بین حرکت ذرات و موانع موجود (صرف‌نظر از اندازه دانه‌ها)، ضخامت لایه روان‌کاری تقریباً ثابت می‌ماند.

■ مسافت و ارتفاع پمپاژ

مسافت‌های پمپاژ طولانی‌تر یا ارتفاعات بالاتر، **خطر گرفتگی و فشارهای بالاتر در لوله‌ها** را افزایش می‌دهند. برای لوله‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر، مسافت پمپاژ افقی می‌تواند از ارتفاع پمپاژ عمودی با نسبت‌های ۳، ۴ یا ۵ بسته به قطر لوله تبدیل شود. **بیشترین ارتفاع‌های پمپاژ ثبت‌شده تا ۶۲۱ متر برای ساختمان‌های بلند و مسافت‌های ۵۵۰ متر برای پل‌ها هستند.** زمان و

مسافت طولانی‌تر در لوله‌کشی می‌تواند منجر به تغییرات در ویژگی‌های بتن تازه به دلیل اصطکاک داخلی، عمل برشی و احتمال از دست رفتن یا جذب مجدد آب شود.

■ روان‌وردی (Thixotropy)

روان‌وردی یا تیکسوتروپی به ویژگی بتن تازه اشاره دارد که در آن ساختار تراکم بتن احیا می‌شود و هم لزجت و هم تنش تسلیم هنگامی که تنش برشی متوقف می‌شود، افزایش می‌یابند. زمانی که پس از یک دوره پایدار، مخلوط‌کردن از سر گرفته می‌شود، این افزایش در تنش تسلیم به‌ویژه بر بار پمپاژ تأثیر می‌گذارد. به‌طور کلی، **بتن با تیکسوتروپی کم برای پمپاژهای طولانی‌مدت ترجیح داده می‌شود.** در واقع، کنترل جریان ملات توسط مخلوط‌کردن نسبت به روش‌های استاتیک یا بارگذاری ترجیح داده می‌شود. افزودنی‌های مخصوص پمپاژ، به‌ویژه تحت شرایط بارگذاری، می‌توانند مقدار تنش تسلیم ملات را کاهش دهند، به طوری که ملات مرطوب‌تر به نظر می‌رسد و جریان آن افزایش می‌یابد.

تیکسوتروپی عمدتاً از **تراکم ذرات** ناشی می‌شود که یک ساختار شبکه ضعیف تشکیل می‌دهند که توسط **نیروی خارجی** (مخلوط کردن، لرزش) از بین می‌رود، اما با گذشت زمان، دوباره متراکم می‌شود. افزودنی‌های پمپاژ و افزودنی‌های هوازا با حفظ کارایی زیاد، می‌توانند با کنترل فرآیند تراکم مجدد، تیکسوتروپی را کاهش دهند. این افزودنی‌ها به‌عنوان یک روان‌ساز عمل کرده و آب محدود شده بین ذرات را آزاد می‌کنند. **افزودن الیاف و افزایش سطح مخصوص مخلوط** سبب افزایش

چسبندگی و قوام بتن می‌شود و اسلامپ بتن در حالت ایستا کاهش می‌یابد. **این افت اسلامپ نشانه کاهش واقعی کارایی نیست؛** بلکه «یک اثر تیکسوتروپیک ناشی از الیاف است» که با انتخاب طرح مخلوط مناسب و افزودنی‌های شیمیایی (فوق‌روان‌کننده‌ها) می‌توان آن را اصلاح کرد. بنابراین نباید صرفاً به استناد اسلامپ کم، آب اضافی به مخلوط اضافه کرد؛ زیرا بتن تحت برش یا فشار تراکم به‌خوبی جاری می‌شود. در طول پمپاژ مستمر، بتن تحت برش، ساختار تیکسوتروپیک خود را می‌شکند و به‌صورت پایدار جریان می‌یابد. اما اگر عملیات پمپاژ برای چند دقیقه متوقف شود، ساختار داخلی بتن دوباره ساخته می‌شود و مقاومت جریان آن افزایش می‌یابد. آزمایشی در یک مدار پمپاژ ۶۰۰ متری نشان داد که پس از توقف ۲۰ دقیقه‌ای، در حالی که فشار پمپ در شرایط پایدار حدود ۱۴۰ بار بود، با افزایش فشار تا حداکثر توان پمپ (۳۵۰ بار) نیز نتوانستند بتن را به حرکت درآورند و مجبور شدند خط را باز کرده و تمیز کنند.

۱-۱-۲- پارامترهای طراحی مخلوط

■ خمیره بتن

یک **مخلوط بتن قابل پمپ** باید **خمیر کافی** برای روانسازی سنگدانه‌ها و الیاف داشته باشد. برای بتن الیافی، به دلیل افزایش انسجام توسط الیاف، این موضوع اهمیت بیشتری دارد. طبق توصیه‌ها، **۱۰ درصد افزایش در حجم خمیر** نسبت به طرح معمول می‌تواند

به جبران اثر الیاف کمک کند. این توصیه که در راهنمای ACI 211 نیز آمده است، تضمین می‌کند که فضای کافی برای لغزش اجزای جامد در لوله وجود داشته باشد.

افزایش مقدار سیمان معمولاً لزجت و تنش تسلیم را افزایش می‌دهد. اثر **افزودنی‌های معدنی**، روان‌کننده و الیاف بستگی به مقدار سیمان دارد. مقدار سیمان بیشتر اطمینان حاصل می‌کند که روان‌سازی کافی برای مخلوط بتن الیافی فراهم می‌شود. خاکستربادی و دوده سیلیس معمولاً به‌عنوان مواد سیمانی و پرکننده استفاده می‌شوند. دوده سیلیس در مخلوط‌هایی با مقدار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تنش تسلیم را افزایش می‌دهد، اما در مخلوط‌هایی با مقدار سیمان ۳۰۰ و ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب آن را کاهش می‌دهد. اثر آن بر لزجت بسته به نوع روان‌کننده یا نوع دانه سنگی می‌تواند معکوس شود. سیمان به‌عنوان یک روان‌ساز عمل می‌کند و دانه‌های ریز و درشت و سطح الیاف را می‌پوشاند. همچنین، افزایش مقدار مواد سیمانی می‌تواند تنش تسلیم را افزایش دهد.

کاهش نسبت آب به مواد سیمانی بتن با مقاومت بالاتر منجر می‌شود که معمولاً لزجت بیشتری دارد. افزایش نسبت آب به مواد سیمانی باعث کاهش همزمان تنش تسلیم و لزجت می‌شود و در نتیجه سیالیت بتن افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که نسبت بالاتر آب به مواد سیمانی، تمایل به افزایش آب انداختگی و جداسدگی را افزایش می‌دهد. نسبت بالاتر آب به مواد سیمانی به معنای وجود آب آزاد بیشتر است که به‌عنوان یک روان‌ساز عمل کرده و لزجت و تنش تسلیم را کاهش

می‌دهد. با این حال، اگر ملات نتواند آن را نگه دارد، آب آزاد زیاد می‌تواند باعث آب انداختگی و جداسدگی شود.

■ سنگدانه

اندازه درشت‌دانه‌ها تأثیر زیادی بر پمپ‌پذیری دارد. اندازه‌های بزرگتر دانه‌های درشت ویژگی‌های رئولوژی (لزجت و تنش تسلیم) بتن و لایه روان‌سازی را افزایش می‌دهند. دانه‌های سنگ طبیعی معمولاً نسبت به دانه‌های شکسته، تنش تسلیم و لزجت کمتری دارند. **دانه‌های گرد کارایی را بهبود می‌بخشند**، در حالی که **ذرات تیز و زاویه‌دار جریان بتن را مختل می‌کنند**. پارامترهای رئولوژی به تغییرات مقدار سیمان حساس‌تر از نوع دانه‌ها هستند و نوع دانه‌ها اثر کمتری دارند. در مخلوط‌های با سیمان کم، نوع دانه تنها بر پارامترهای رئولوژی تأثیر می‌گذارد. همچنین، **دانه‌های بزرگ‌تر نیاز به سازگاری بالاتری برای ماتریس همگن دارند** که منجر به ویژگی‌های رئولوژی بالاتر می‌شود. شکل دانه‌ها بر تماس بین ذرات و قفل شدن سطحی تأثیر می‌گذارد که بر لزجت تأثیر می‌گذارد. در بتن الیافی ترجیحاً از **سنگدانه‌های با دانه‌بندی پیوسته** استفاده شود تا مخلوط پرکنندگی بهتری داشته باشد. همچنین، وجود ریزدانه کافی نیز می‌تواند جلوی آب‌انداختگی را بگیرد. پارامتر مهم دیگر، نسبت ماسه به سنگدانه است. با افزایش این نسبت از ۳۵/۰ به ۶۳/۰، تنش تسلیم و لزجت به‌طور کلی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده مخلوط بهتر و احاطه بهتر دانه‌های درشت توسط ماسه است و در نتیجه مخلوط پایدارتر می‌شود. اگر نسبت **ماسه به سنگدانه** خیلی زیاد باشد، اصطکاک داخلی

می‌تواند به‌طور قابل توجهی افزایش یابد که باعث افزایش تنش تسلیم و احتمالاً افزایش سایش لوله می‌شود. مقدار بهینه ماسه اطمینان حاصل می‌کند که فضاهای خالی بین دانه‌های درشت به‌طور مناسب پر می‌شود و به ایجاد فاز ملات یکپارچه کمک می‌کند.

■ افزودنی‌های شیمیایی

روان‌کننده‌ها یا فوق روان‌کننده‌ها برای کاهش تجمع ذرات سیمان استفاده می‌شوند که باعث بهبود کارایی و سیالیت می‌شوند. آن‌ها می‌توانند به‌طور قابل توجهی تنش تسلیم را کاهش داده و سیالیت را افزایش دهند، بدون آن‌که اثر زیادی بر لزجت داشته باشند. اثر روان‌کننده‌ها به‌ویژه مخلوط‌های با مقدار سیمان زیاد، بر کارایی به مقدار سیمان و نوع دانه سنگی بستگی دارد. افزایش اندک در روان‌کننده می‌تواند سیالیت را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد، اما اثر آن در مقادیر بیشتر کاهش می‌یابد. استفاده زیاد از روان‌کننده‌ها می‌تواند باعث آب انداختگی شود. دیگر افزودنی شیمیایی، عامل‌های اصلاح‌کننده لزجت هستند. این افزودنی می‌تواند مقاومت بتن را در برابر جداسازی بهبود بخشد. اصلاح‌کننده لزجت با افزایش چسبندگی مخلوط از ته‌نشینی ذرات جلوگیری می‌کند.

در صورت وجود شیب منفی یا پمپاژ رو به پایین که خطر جدایش دارد، افزودن عامل اصلاح‌کننده لزجت مفید است تا مخلوط همگن بماند. از آن‌سو، اگر مخلوط خیلی غلیظ و چسبنده شده (مثلاً به علت پودر زیاد یا الیاف فراوان)، افزودنی‌های کاهش‌دهنده چسبندگی (مانند برخی پلیمرها یا پودرهای روان‌کننده) می‌تواند کمک کند

اصطکاک داخلی بتن کم شود. لازم به ذکر است که هرگز برای بهبود روانی بتن الیافی از افزودن آب بیش از طرح مجاز استفاده نشود؛ این کار اگرچه در کوتاه‌مدت اسلایپ را بالا می‌برد، ولی ریسک جداسازی و ته‌نشینی را شدیداً افزایش می‌دهد. بهتر است همیشه تنظیم اسلایپ از طریق افزودنی‌ها صورت گیرد نه آب.

۱-۱-۳- ویژگی‌های الیاف

■ نوع و مقدار الیاف

اضافه کردن الیاف معمولاً لزجت و تنش تسلیم را افزایش می‌دهد که پمپاژ را دشوارتر می‌کند. تأثیر الیاف بر پارامترهای رئولوژی بسته به میزان سیمان و نوع سنگدانه متفاوت است. به‌طورمثال، الیاف پلی‌پروپیلن که به‌طور یکنواخت توزیع شده‌اند، انتقال آب را سخت‌تر کرده و از جداسازی و آب انداختگی جلوگیری می‌کنند. الیاف فولادی پیوندی میان دانه‌های درشت ایجاد می‌کنند که جریان را مختل کرده و مانع تغییر شکل خمیر چسبیده می‌شوند.

افزایش مقدار الیاف فولادی معمولاً جریان اسلایپ را کاهش می‌دهد. همچنین، **نرخ جداسازی استاتیک** را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. نرخ آب انداختگی بتن الیافی فولادی ممکن است با افزایش مقدار الیاف فولادی افزایش یابد، اما همچنان در زیر محدودیت‌های مشخص باقی می‌ماند. تنش تسلیم و لزجت بتن الیافی فولادی عمدتاً با افزایش مقدار الیاف فولادی افزایش می‌یابد. با این حال، تنش تسلیم و لزجت

ملات (که لایه روان‌سازی را تشکیل می‌دهد)، صرف‌نظر از مقدار الیاف فولادی، عمدتاً ثابت باقی می‌ماند. مقدار بیشتر الیاف **موانع فیزیکی** بیشتری برای جریان ایجاد می‌کند که اصطکاک داخلی را افزایش می‌دهد و در نتیجه پارامترهای رئولوژی مانند تنش تسلیم و لزجت را افزایش می‌دهد. الیاف فولادی به نگهداشتن درشت‌دانه و الیاف مصنوعی به‌طورکلی به نگهداری خمیر چسبنده در مخلوط تازه کمک می‌کنند. حجم بیشتر خمیر چسباننده (که برای جریان‌پذیری تنظیم شده است) اطمینان حاصل می‌کند که پوشش کافی برای دانه‌ها و الیاف فراهم می‌شود.

■ طول، قطر و نسبت منظر الیاف

این ویژگی‌ها بر تنظیم میزان آب و نسبت سنگدانه در طراحی مخلوط بتن الیافی فولادی برای پمپ‌پذیری تأثیر می‌گذارد. الیاف بلندتر یا نسبت منظر بالاتر می‌توانند بیشتر به‌هم قفل شوند و در صورتی که به‌درستی مدیریت نشوند، ممکن است تنش برشی استاتیکی و لزجت را افزایش دهند. هندسه الیاف (طول، قطر، نسبت ابعادی) بر نحوه تعامل الیاف با ماتریس بتن تازه تأثیر می‌گذارد و مقاومت در برابر جریان، توزیع و کارایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. الیاف با **طول بلند** (مثلاً بیشتر از ۵۰ درصد قطر لوله) و **مدول زیاد** (مانند فولاد، شیشه، بازالت) بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت جریان و سایدگی تجهیزات دارند. الیاف با **انعطاف‌پذیری بالا و طول کوتاه** (مانند میکروپلیمرها و الیاف PVA کوتاه) معمولاً اثر منفی ناچیزی بر پمپ‌پذیری می‌گذارند. در مقدارهای مصرفی

زیاد، حتی الیاف مصنوعی نیز می‌توانند موجب افزایش لزجت و نیاز به فشار بیشتر شوند. مهم این است که برای هر نوع الیاف، **حداکثر طول و مقدار مناسب نسبت به قطر لوله پمپ در نظر گرفته شود**. طول الیاف برای پمپاژ بهتر است حداقل نصف قطر لوله باشد؛ زیرا الیاف خیلی کوتاه در جریان چرخیده و تمایل به گلوله‌شدگی دارند، در حالی که الیاف بلندتر تمایل دارند در امتداد جریان قرار گیرند و احتمال انسداد کمتر می‌شود. به عنوان مثال برای لوله ۱۰ سانتی‌متری، الیاف کوتاه‌تر از ۵ سانتی‌متر می‌توانند در اثر چرخش در لوله دور هم جمع شوند، در حالی که الیاف بلندتر (مثلاً ۵ تا ۷ سانتی‌متری) عمدتاً در جهت جریان کشیده می‌شوند و عبور می‌کنند. البته بلند شدن بیش از حد الیاف نیز مشکلات دیگری در بتن سخت‌شده ایجاد می‌کند و معمولاً توصیه نمی‌شود. در نهایت، دستیابی به پمپ‌پذیری بهینه برای بتن الیافی یک چالش چندوجهی است. عوامل کلیدی شامل کاهش پارامترهای رئولوژی بتن در حالی که لایه روان‌سازی پایدار حفظ شود، است. این تعادل عمدتاً تحت تأثیر پارامترهای طراحی مخلوط مانند نسبت آب به مصالح چسباننده، نوع و مقدار مواد سیمانی، ویژگی‌های دانه‌ها (اندازه و شکل) و به‌ویژه ویژگی‌های الیاف (نوع، مقدار و هندسه) قرار دارد. شرایط محیطی و پمپاژ مانند دما، ابعاد لوله، فشار پمپاژ و تیکسوتروپی نیز نقش‌های قابل توجهی ایفا می‌کنند. اضافه کردن الیاف، در حالی که برای ویژگی‌های سخت‌شده مانند مقاومت در برابر ترک و مقاومت ضربه‌ای مفید است، به‌طور ذاتی پارامترهای رئولوژی

۱-۲-۱- عوامل کلیدی مؤثر بر جهت‌گیری الیاف

جهت‌گیری و توزیع الیاف تحت‌تأثیر عوامل متعددی قرار دارد که به‌طور کلی به بخش‌های زیر دسته‌بندی می‌شوند:

■ ویژگی‌های مخلوط بتن (رفتار رئولوژی)

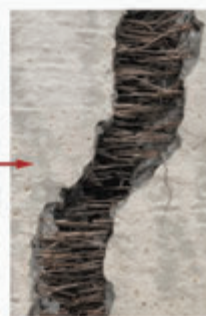
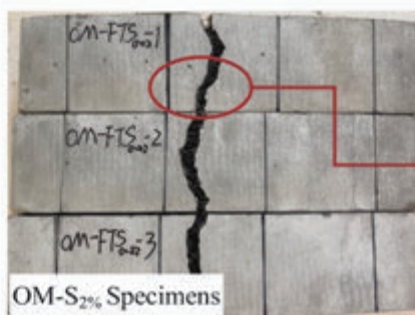
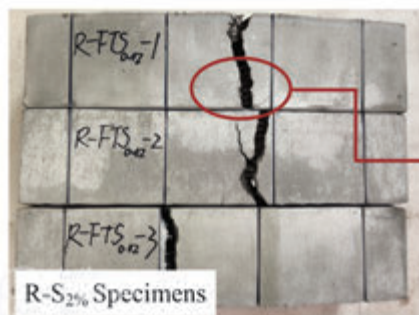
رفتار رئولوژی و طراحی مخلوط نقش عمده‌ای در توزیع الیاف ایفا می‌کنند و اغلب از روش‌های پرکردن قالب مهم‌تر هستند.

کارایی و لزجت: جریان اسلامپ زیاد می‌تواند خطر جداسازی الیاف از ماتریس بتن را افزایش دهد. برای جلوگیری از این پدیده، توصیه می‌شود بتن مسلح به الیاف، حداکثر مقدار جریان اسلامپ ۶۰ سانتی‌متر را تجربه کند. لزجت کم، به ویژه در بتن خود تراکم، می‌تواند فرایندهای هم‌راستایی الیاف، به ویژه تحت تأثیر نیروهای خارجی مانند میدان‌های مغناطیسی را

حالت تازه را تغییر می‌دهد. این امر نیاز به تناسب دقیق مخلوط و استفاده از افزودنی‌های مختلف (مانند فوق روان‌کننده‌ها، افزودنی‌های پمپاژ، عوامل انبساطی) دارد تا پمپ‌پذیری را حفظ کرده و در عین حال عملکرد سخت‌شده را بدون ایجاد پدیده‌های نامطلوب مانند آب انداختگی یا جداسدگی حفظ کند. **تحقیقات مستمر، به‌ویژه در مورد تعاملات پیچیده بین ویژگی‌های الیاف و رئولوژی لایه روان‌سازی، برای پیشرفت‌های بیشتر در فناوری پمپاژ بتن الیافی حیاتی است.**

۱-۲-۲- جهت‌گیری الیاف

جهت‌گیری الیاف در بتن مسلح به الیاف، عامل مهمی است که تأثیر زیادی بر رفتارهای مکانیکی و دوام پس از ترک‌خوردگی دارد. درحالی‌که معمولاً فرض می‌شود **الیاف به‌طور تصادفی** توزیع شده‌اند، عوامل مختلفی می‌توانند باعث هم‌راستایی ترجیحی شوند که به طور مستقیم بر عملکرد اجزای سازه‌ای تأثیر می‌گذارد. این بخش عوامل کلیدی مؤثر بر جهت‌گیری الیاف را شناسایی کرده و روندها و اثرات آن‌ها را شرح می‌دهد.



افزایش دهد.

حداکثر اندازه درشت‌دانه: دانه‌های بزرگ‌تر می‌توانند به‌عنوان لایه‌ای فیلترکننده یا مسدودکننده برای الیاف عمل کنند که این مسئله منجر به تفکیک الیاف در توزیع و جهت‌گیری می‌شود. این تفکیک می‌تواند باعث عبور الیاف از یک بخش کوچک بتن شود. این شرایط منجر به تفاوت‌های قابل‌توجه در مقدار الیاف در مکان‌های مختلف می‌شود. به‌عنوان مثال، یک مخلوط با حداکثر اندازه دانه ۱۶ میلی‌متر پایداری بیشتر و توزیع و جهت‌گیری یکنواخت‌تری از الیاف را نسبت به مخلوطی با دانه‌های ۲۲ میلی‌متری نشان می‌دهد.

محتوای سیمان، نسبت آب به مواد سیمانی، نسبت

ماسه به شن: درحالی‌که اثر مستقیم این عوامل بر جهت‌گیری الیاف به طور واضح تشریح نشده است؛ اما این عوامل برای کنترل خواص رئولوژیک مخلوط بتن اساسی هستند که به نوبه خود بر هم‌راستایی الیاف تأثیر می‌گذارند. لزجت پلاستیک بالا به طور معمول منجر به جهت‌گیری الیاف یکنواخت‌تر برای بتن می‌شود.

■ روش‌های اجرا

روش‌های اجرایی تأثیر زیادی بر موقعیت نهایی الیاف دارند.

روش‌های جایگذاری و پرکردن قالب

"تک نقطه‌ای"

این روش بیشتر در معرض انسداد الیاف، جداشدگی و تغییرات عمده در مقدار الیاف در یک محدوده قرار دارد. معمولاً اگر هدف یکنواخت بودن مقدار الیاف در سراسر عضو سازه‌ای باشد، توصیه نمی‌شود.



"دو نقطه‌ای"

این روش منجر به توزیع یکنواخت‌تری از الیاف نسبت به روش تک نقطه‌ای می‌شود.



"پیوسته و ارتعاشی"

می‌تواند باعث هم‌راستایی بیشتر الیاف در جهت افقی شود.



"لوله در مقایسه با قیف"

در اجرای دیوار با ورودی لوله منجر به توزیع بهتر الیاف نسبت به قیف می‌شود. جابه‌جایی ورودی لوله به جلو و عقب حین ریختن بتن، توزیع یکنواخت‌تری را ایجاد می‌کند.



دستگاه‌های تخصصی (اشکل، قیف)

دستگاه‌هایی مانند دستگاه‌های L-shape یا قیف با ارتعاش می‌توانند مسیر جریان را کنترل کرده و جهت‌گیری الیاف فولادی را بهبود بخشند.



ابعاد عنصر/اندازه مقطع (اثر دیواره): هندسه عضو سازه‌ای، به‌ویژه عمق و عرض آن نسبت به طول الیاف، به طور قابل‌توجهی بر توزیع و جهت‌گیری الیاف تأثیر می‌گذارد. «اثر دیواره» به این معنی است که الیاف تمایل دارند موازی با دیوارها قالب‌گیری شوند. این اثر در مقاطع کوچک یا نزدیکی به مرزها برجسته‌تر است. برای عناصر نازک، خواص مکانیکی پسماند می‌تواند بسته به مناطق و جهات مختلف، به طور قابل‌توجهی متفاوت باشد.

زبری سطح قالب: سطوح زبر قالب می‌توانند نرخ برش سیال را کاهش دهند، به‌طوری‌که تمایل الیاف به جهت‌گیری در جهت جریان کاهش یابد.

وجود موانع (میلگردها، میلگردهای اتصال): حتی با وجود توصیه فاصله میلگردها که حداقل سه برابر طول الیاف برای بتن مسلح به الیاف فولادی باشد، وجود موانعی مانند میلگردها می‌تواند موجب توزیع نامساوی الیاف شود. همچنین، میلگردهای اتصال می‌توانند بر توزیع و جهت‌گیری الیاف تأثیر بگذارند.

ویژگی‌های الیاف

نوع الیاف (ماده): مواد مختلف پایه الیاف (مثلاً فولاد، مصنوعی و...) رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. الیاف فولادی سنگین‌تر از الیاف مصنوعی هستند. نوع الیاف بر توزیع و جهت‌گیری آن‌ها در بتن تأثیر می‌گذارد.

طول و قطر الیاف (نسبت ابعادی): این دو عامل به طور مستقیم بر توانایی الیاف برای هم‌راستا شدن و تعامل آن‌ها با ماتریس و جریان تأثیر می‌گذارند. طول‌های کوتاه‌تر بیشتر در معرض لغزش هستند، درحالی‌که طول‌های بلندتر می‌توانند طراحی مخلوط خود متراکم را پیچیده‌تر کنند. الیاف میکرو معمولاً کمتر در معرض جهت‌گیری در یک‌جهت خاص نسبت به الیاف ماکرو قرار دارند؛ یکی از دلایل این پدیده این است که الیاف کوچک‌تر بیشتر تحت تأثیر اختلالات ناشی از دانه‌ها قرار می‌گیرند. طول الیاف یک پارامتر کلیدی در مدل‌هایی است که موقعیت الیاف را پیش‌بینی می‌کنند، زیرا این طول محدودیت تأثیر مرزی را تعیین می‌کند.

سختی/انعطاف‌پذیری الیاف: الیاف انعطاف‌پذیر (مانند پلی‌اولفین) می‌توانند خم شده و به تغییر شکل‌ها سازگار شوند که بر موقعیت نهایی آن‌ها و قابلیت کاربرد مدل‌هایی که الیاف سخت را فرض می‌کنند، تأثیر می‌گذارد. الیاف فولادی که سخت‌تر هستند، تمایل دارند در جهت عمود بر جهت جایگذاری هنگام ارتعاش توزیع شوند.

چگالی الیاف: چگالی‌های مختلف الیاف می‌تواند منجر به توزیع غیرهمگن شود. الیاف با چگالی پایین، مانند پلی‌اولفین، ممکن است در بتن ارتعاشی بالا بروند، اگرچه این اثر هنوز به طور کامل مشخص نشده است.

میدان‌های خارجی (میدان مغناطیسی)

هم‌راستایی مغناطیسی: میدان‌های مغناطیسی

می‌توانند برای هم‌راستاسازی الیاف فولادی فرومغناطیس در جهت مطلوب با در نظر گرفتن خط بار اعمالی و توزیع تشکیل ترک‌ها استفاده شوند. این روش به‌عنوان یک روش بسیار مؤثر شناخته شده است.

■ دیگر ملاحظات

اثر گرانشی: در عناصر عمودی، گرانش می‌تواند از بالارفتن الیاف جلوگیری کند که باعث ایجاد تفاوت‌هایی در مقدار الیاف می‌شود.

وضعیت‌های دینامیکی سیال/تنش‌های برشی: ویژگی‌های جریان بتن، مانند سرعت‌های خروجی متغیر، می‌توانند وضعیت‌های دینامیکی مختلفی در اطراف نقاط تخلیه ایجاد کنند که بر توزیع الیاف تأثیر می‌گذارد. در جریانی که تحت تنش‌های برشی است، الیاف تمایل دارند با جریان هم‌راستا شوند. این جهت‌گیری الیاف ناشی از برش در اعضای مانند تیرها یا ستون‌ها غالب است.

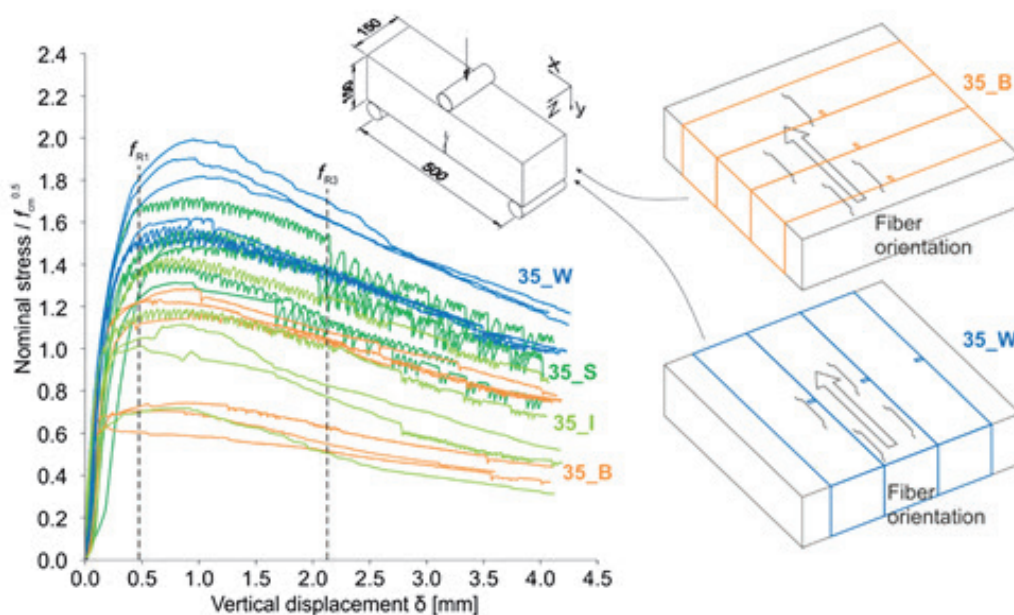
۱-۲-۲- تأثیر جهت‌گیری بر خواص سخت‌شده بتن

جهت‌گیری الیاف تأثیر عمیقی بر عملکرد مکانیکی و دوام بتن مسلح به الیاف به‌ویژه در حالت سخت شده دارد.

■ خواص مکانیکی

مقاومت کششی و خمشی: هم‌راستایی مناسب الیاف در جهت نیروی کششی، مقاومت کششی و خمشی بتن الیافی را به طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. الیاف عمود بر سطح ترک بسیار کاراتر از الیافی هستند که موازی با آن قرار دارند. مقادیر بالاتر الیاف هم‌راستا با جهت کشش باعث افزایش مقادیر مقاومت خمشی و کششی می‌شود. شکل ۲ نشان می‌دهد که قرارگیری الیاف در جهت عمود بر راستای ترک‌های ایجاد شده در آزمون خمشی سه نقطه ای می‌تواند مقاومت خمشی و طاقت بیشتری را فراهم کند. الیاف فولادی هم‌راستا منجر به افزایش قابل‌توجهی در مقاومت اولین ترک‌خوردگی و مقاومت کششی اوج در آزمایش کشش یک‌محوره می‌شود. تأثیر جهت‌گیری الیاف فولادی در مقاومت پس از ترک بیشتر از تأثیر آن در رفتارهای اولین ترک‌خوردگی است. خواص بهبودیافته به پدیده پل‌زدگی الیاف نسبت داده می‌شود که در آن الیاف بین سطح ترک‌ها را پل می‌زنند و از گسترش ترک جلوگیری می‌کنند. هم‌راستایی خوب الیاف باعث می‌شود که الیاف بیشتری به طور مؤثر از صفحات ترک احتمالی عبور کنند و به‌درستی برای انتقال تنش هم‌راستا شوند.

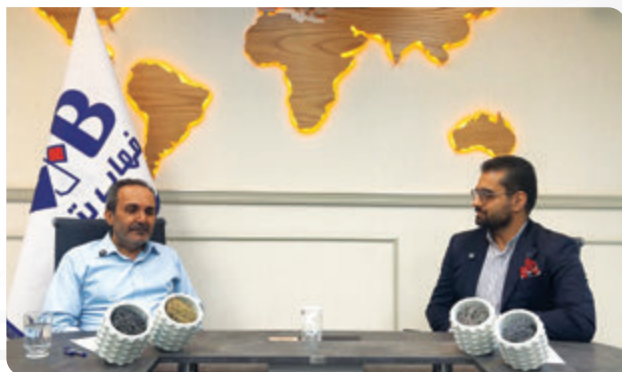
مقاومت فشاری: تأثیر جهت‌گیری الیاف بر مقاومت فشاری نسبت به تأثیر آن بر خواص کششی و خمشی محدود است. برای الیاف فولادی هم‌راستای عمود بر جهت بار، افزایش‌های جزئی مشاهده شده است،



شکل ۲-۱ جهت قرارگیری الیاف نسبت به راستای ترک‌های خمشی و اثر آن بر مقاومت خمشی.

قابل‌توجهی در کرنش کششی اوج با الیاف هم‌راستا مشاهده شده است. طاقت نیز بهبودهای قابل‌توجهی نشان می‌دهد. توانایی الیاف در پل‌زنی ترک‌ها منجر به ترک‌های نازک‌تر و پراکنده‌تر و رفتار چندتکه‌ای می‌شود که ظرفیت دفع انرژی ماده و شکل‌پذیری کلی آن را افزایش می‌دهد.

زیرا الیاف هم‌راستا می‌توانند کمی از تغییر شکل جانبی نمونه در حین فشرده‌سازی جلوگیری کنند. با این حال، برخی مطالعات نیز گزارش می‌دهند که برای الیاف هم‌راستا در برخی سناریوها، مقادیر مقاومت فشاری پایین‌تر مشاهده شده است. **شکل‌پذیری و سختی:** جهت‌گیری الیاف منجر به بهبود شکل‌پذیری و طاقت می‌شود. تغییرات



از این مصاحبه ارائه شده است. برای مشاهده کامل این گفت‌وگو، بارکد را اسکن کنید.

سه دهه زندگی با بتن!

آقای دکتر باقری در ابتدا فرمودند که بتن الیافی یکی از زمینه‌های نوین و پرتحرک در مهندسی عمران است که تحقیقات گسترده‌ای در جهان روی آن انجام شده است و همچنان ادامه دارد. ایشان خاطرنشان کردند که حدود ۱۸ تا ۲۰ سال پیش، یک پروژه کارشناسی ارشد روی **اثر الیاف بر مقاومت خمشی و دوام بتن** انجام دادند و در آن انواع الیاف فولادی و ماکرو بررسی شد.

در ادامه مسیر تحقیقاتی، تیم ایشان پروژه‌هایی را در زمینه جذب انرژی و مقاومت بتن در برابر بارهای ضربه‌ای انجام داد که در آن، عملکرد انواع مختلف الیاف با دقت ارزیابی شد. یکی دیگر از کاربردهای مهم الیاف، کنترل ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی و



گفت‌وگو با دکتر باقری، عضو هیئت علمی دانشگاه

خواجه نصیرالدین طوسی

در دومین نسخه از مجله فصل بتن، در خدمت جناب آقای دکتر باقری، استاد متخصص در زمینه فناوری بتن، به ویژه بتن‌های الیافی بودیم. بدین منظور، به بررسی موضوعات مختلفی از گذشته تا آینده این نوع بتن خاص از دیدگاه ایشان پرداختیم. در ادامه، مختصری

به شکل امروزی خود درآمد و طی ۱۷۰ سال گذشته به‌طور گسترده به کار رفته است. با این حال، **یکی از محدودیت‌های مهم بتن، مقاومت کششی پایین و شکنندگی آن است.** به همین دلیل، وقتی بخواهیم یک تیر بتنی بسازیم و بار زیادی روی آن وارد کنیم، بدون تقویت، بتن به سرعت ترک می‌خورد. راه‌حل این محدودیت، از حدود ۲۰ سال پس از ابداع بتن، استفاده از **بتن مسلح با فولاد** بود. دکتر باقری توضیح دادند: «فولاد در کشش بسیار مقاوم و شکل‌پذیر است، بنابراین با ترکیب آن با بتن، امکان ساخت سازه‌های بزرگ و مقاوم فراهم شد. **از حدود ۶۰ سال پیش، الیاف نیز وارد عرصه شدند تا نقطه ضعف تردی بتن را کاهش دهند.**» اما این به معنای جایگزینی الیاف با آرماتور نیست؛ بتن الیافی مزایای خاص خود را دارد اما نمی‌تواند جای بتن مسلح در سازه‌های عمده را بگیرد.

وی افزودند: **الیاف در تمام حجم بتن پراکنده می‌شوند، در حالی که آرماتورها دقیقاً در مناطقی که بیشترین تنش کششی وجود دارد قرار می‌گیرند.** این دقت موجب بهره‌وری زیاد آرماتورها می‌شود که الیاف نمی‌تواند به همان شکل ارائه دهد. بنابراین **استفاده از بتن الیافی محدود به کاربردهای خاص** است که در آن مزایایی نسبت به بتن مسلح برجسته می‌شود.

علاوه‌براین، دکتر باقری به ویژگی‌های بتن خودتراکم اشاره کردند: بتن خودتراکم تنها در حالت تازه روان‌تر است، اما پس از سخت شدن، خواصش مشابه بتن معمولی است. وقتی الیاف به بتن اضافه

تغییرات حجم بتن بر اثر تغییرات دما است. دکتر باقری اشاره کردند که چندین پایان‌نامه دانشجویی نیز به بررسی تأثیر الیاف در کاهش ترک‌های ناشی از خشک شدن بتن اختصاص یافت و نتایج قابل توجهی به دست آمد. تجارب بین‌المللی هم بخش مهمی از فعالیت‌های ایشان را شکل داده است. همچنین، پروژه‌هایی از خارج کشور به این تیم واگذار شد تا **عملکرد الیاف در جذب انرژی و کنترل جمع‌شدگی** ارزیابی شود؛ از جمله یک پروژه مرتبط با بیمه که برای بررسی مقاومت بتن در برابر جمع‌شدگی اجرا شد.

در مجموع، دکتر باقری خاطرنشان کردند که با توجه به تجربیات و پروژه‌های انجام شده، سابقه و تجربه مناسبی در زمینه تحقیق و کاربرد الیاف در بتن در دانشکده مهندسی ایجاد شده و مسیر تحقیقات آینده در این حوزه همچنان باز و جذاب باقی مانده است.

بتن؛ رقیب غذا در مصرف جهانی!

بتن، بعد از آب، پرمصرف‌ترین ماده جهان است. دکتر باقری خاطرنشان کردند: «بشر ابتدا آب مصرف می‌کند و پس از آن، بیشترین مصرف مربوط به بتن است. اگر حساب کنیم، تقریباً به ازای هر نفر، یک متر مکعب بتن طی ۲۰۰ سال اخیر استفاده شده است.»

ایشان به تاریخچه بتن اشاره کردند: پس از ابداع سیمان پرتلند، حدود ۳۰ سال طول کشید تا بتن

می‌شود، کارایی بتن تازه کمی کاهش می‌یابد و برخی انواع الیاف فقط به مقدار محدودی قابل استفاده هستند. اثر اصلی الیاف در بتن سخت‌شده ظاهر می‌شود و بیشتر در طراحی مقاطع اهمیت دارد تا در تکنولوژی بتن تازه. همچنین، ایشان نکته‌ای مهم را خاطرنشان کردند: **مهندسين در آموزش‌های کلاسیک معمولاً طراحی مقاطع با تسلیح الیافی را آموزش ندیده‌اند**، زیرا آیین‌نامه‌های مربوط به آن تا حدود هفت تا ده سال پیش منتشر نشده بودند. خوشبختانه، با انتشار آیین‌نامه‌های آمریکا، اروپا و مدل‌کدها از حدود سال ۲۰۱۵ میلادی، بستر قانونی و فنی برای استفاده گسترده از بتن الیافی فراهم شد.

الیاف؛ ناجی بتن یا رقیب آرماتور؟

بتن حاوی الیاف یکی از مصالح نوین و تخصصی است که مزایای خاص خود را در پروژه‌های عمرانی و صنعتی دارد، اما محدودیت‌هایی نیز در کاربرد آن وجود دارد. در مقاطع سازه‌ای مانند تیرها، ستون‌ها، دال‌ها و دیوارهای برشی، جایگزینی آرماتور با الیاف به‌صورت کامل غیرممکن است، زیرا آرماتورها به‌طور دقیق در موقعیت‌های مورد نظر قرار می‌گیرند و درصد آن‌ها در مقطع قابل توجه است. در مقابل، الیاف به‌صورت پراکنده در حجم بتن پخش می‌شوند و امکان تمرکز در نقاط خاص مقطع برای تحمل بارهای خمشی محدود است.

از کفسازی تا دیوار تونل؛ قلمرو واقعی بتن الیافی

با این حال، کاربرد الیاف در دال‌های روی کف، به ویژه در کارخانه‌ها و انبارها، بسیار مؤثر است. دال‌های روی کف معمولاً به‌طور اقتصادی بدون آرماتور طراحی می‌شوند و ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی بتن از طریق الیاف قابل کنترل هستند. استفاده از بتن الیافی در این دال‌ها موجب حذف مرحله آرماتورگذاری، کاهش هزینه‌ها و تسریع فرآیند اجرایی می‌شود. علاوه‌بر دال‌های روی کف، قطعات پیش‌ساخته تونلی نیز زمینه مناسبی برای استفاده از الیاف دارند، زیرا مقطع در این عناصر تحت فشار یکنواخت قرار دارد و الیاف می‌توانند نقش آرماتور را در کنترل ترک و افزایش تحمل بار ایفا کنند. در پروژه‌هایی مانند مترو تبریز و مترو مشهد، از این قابلیت استفاده شده است.

فولاد و پلیمر؛ کدام الیاف برنده‌اند؟

الیاف مورد استفاده در بتن می‌توانند فولادی، پلیمری، سلولزی یا شیشه‌ای باشند. الیاف فولادی به دلیل مدول الاستیسیته و مقاومت زیاد، بیشترین اثر را در افزایش طاقت خمشی بتن دارند، اما مستعد خوردگی هستند. در مقابل، الیاف پلیمری با مدول کمتر (۵ تا ۷ گیگاپاسکال) نسبت به فولاد (۲۰۰

اما از سال ۲۰۱۵ به بعد، اروپا و آمریکا نخستین آیین‌نامه‌های طراحی را تدوین کردند. حالا نوبت ایران است که **آیین‌نامه‌های بومی** را تهیه کند و این فناوری را در پروژه‌های ملی به کار گیرد.

از چالش‌های اجرایی؛ تا آینده‌ای روشن

کاربرد بتن الیافی چالش‌های خود را دارد. یکی از مسائل مهم، اطمینان از پخش یکنواخت الیاف در حجم بتن است، زیرا کیفیت عملکرد بتن سخت‌شده به این پخش وابسته است. در درصد‌های کم، اثرات محدود هستند و در درصد‌های زیاد، کنترل اجرایی دشوار می‌شود. به همین دلیل، الیاف به‌عنوان مکمل آرماتورها استفاده می‌شوند و نمی‌توانند جایگزین کامل آن‌ها شوند.

پژوهش‌های آینده بر توسعه الیاف جدید مانند بازالت و پلیمرهای توانمند متمرکز خواهد بود. همچنین کاهش ردپای کربن، استفاده از مواد بازیافتی، بتن‌های ژئوپلیمری و ورود هوش مصنوعی به طراحی مخلوط‌ها، افق‌های تازه‌ای برای صنعت بتن ترسیم می‌کنند. **بتن آینده، بتنی هوشمند، سبز و کارآمد خواهد بود.**

گیگاپاسکال) توان مشابهی ندارند و برای عملکرد مشابه باید در درصد‌های بیشتری استفاده شوند که گران‌تر تمام می‌شود. الیاف طبیعی و شیشه‌ای نیز گزینه‌هایی برای کاربردهای خاص هستند، هرچند محدودیت‌های اقتصادی و عملکردی دارند.

علاوه‌براین، **ابعاد و شکل الیاف نیز اهمیت زیادی دارند.** نسبت طول به قطر الیاف باید به گونه‌ای باشد که جذب انرژی کافی ایجاد کند. اگر طول خیلی کوتاه باشد، الیاف به‌سرعت از بتن خارج می‌شوند و اثرات آن کاهش می‌یابد؛ اگر خیلی بلند باشد، تمرکز تنش ایجاد می‌شود و مکانیزم جذب انرژی مختل می‌شود. به همین دلیل الیاف ماکرو برای کاربردهای ساختاری و جذب انرژی مناسب‌تر از الیاف میکرو هستند.

آیین‌نامه‌ها؛ حلقه مفقوده توسعه

بتن الیافی

دهه‌ها تحقیق آزمایشگاهی بدون آیین‌نامه‌های طراحی، کاربرد عملی بتن الیافی را محدود کرده بود.

۲- تجربه‌های اجرایی

۲-۱- بتن الیافی در بازاریابی

در بازار و فرایند سفارش بتن الیافی، رویکردهای سنتی مبتنی بر مقاومت فشاری به تنهایی نمی‌توانند شاخص دقیقی برای ارزیابی کیفیت و عملکرد این نوع بتن باشند. اهمیت واقعی بتن الیافی در ارتقای دوام، کنترل ترک‌ها، افزایش مقاومت خمشی و کششی و بهبود رفتار بتن در برابر بارهای ضربه‌ای و دینامیکی نهفته است. ازاین‌رو، هنگام سفارش و انتخاب بتن الیافی، ضروری است که نیازهای خاص هر پروژه به‌دقت شناسایی شود و نوع و مقدار الیاف بر اساس

در این بخش، دستاوردهای شاخص اجرایی شرکت فهاب بتن به طور خلاصه ارائه می‌شود. مرکز تحقیق، توسعه و نوآوری فهاب بتن این دستاوردها را در پاسخ به نیازهای متنوع بخش‌های تولید، فروش و اجرا به دست آورده است. موضوع اصلی این بخش، تفاوت‌های بتن الیافی در امور بازاریابی و چالش اجرایی انتخاب نوع الیاف بر اساس عملکرد مورد انتظار بتن است. به بیان دیگر، هدف آن است که کارفرما بتواند با توجه به نوع پروژه و الزامات آن، نوع الیاف و مقدار مصرف را متناسب با شاخص‌های عملکردی طراحی‌شده انتخاب کند.

شرایط بهره‌برداری، محیطی و اجرایی تعیین گردد. این بخش به بررسی ابعاد مختلف کاربرد بتن الیافی در پروژه‌های گوناگون می‌پردازد و نشان می‌دهد که چگونه انتخاب صحیح الیاف می‌تواند علاوه بر بهبود عملکرد فنی، موجب صرفه‌جویی اقتصادی و افزایش عمر مفید سازه شود.

هنگام سفارش بتن الیافی، لازم است بدانیم که عدد مقاومت فشاری تنها ملاک سنجش کیفیت و عملکرد بتن نیست. برای مثال، ممکن است یک بتن با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال که مقدار مناسبی الیاف در آن به‌کار رفته است، عملکردی بهتر و دوام بیشتری نسبت به یک بتن معمولی ۵۰ مگاپاسکالی بدون الیاف برای آن پروژه داشته باشد. علت این امر آن است که الیاف ضمن افزایش مقاومت خمشی و کششی، کنترل ترک‌های ریز و مقاومت بتن در برابر ضربه را بهبود می‌بخشد، در حالی که بتن بدون الیاف عمدتاً بر اساس مقاومت فشاری ارزیابی می‌شود و در برابر ترک‌خوردگی و ضربه حساس است. بنابراین در هنگام سفارش، همکاری نزدیک با کارفرما و پیمانکار ضروری است تا مشخص شود کدام ویژگی برای پروژه اولویت دارد.

*** نمونه‌هایی از این که بسته به پروژه‌های مختلف می‌تواند نوع بتن الیافی تغییر کند در ادامه ذکر شده است:**

برای مثال، در کف سالن‌های صنعتی که تحت بارهای دینامیکی و ضربه‌های مکرر هستند، بهتر است به جای تمرکز صرف بر مقاومت فشاری، نوع و میزان الیاف به دقت انتخاب شود تا دوام و عمر مفید بتن افزایش

یابد. در چنین مواردی، الیاف فولادی به دلیل مقاومت زیاد در برابر تنش‌های کششی و ضربه، گزینه بسیار مناسبی هستند. معمولاً مقدار مصرف این الیاف بین ۳۰ تا ۴۰ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن در نظر گرفته می‌شود تا علاوه بر افزایش مقاومت خمشی، دوام کلی بتن نیز بهبود یابد. در این پروژه‌ها، طراحی بتن باید به‌گونه‌ای باشد که قابلیت پمپ‌پذیری خوبی داشته باشد تا اجرای بتن در حجم زیاد بدون جداشدگی مصالح امکان‌پذیر شود.

در پروژه‌هایی مانند **کف پارکینگ‌ها که کنترل ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی و تغییرات دمایی** اهمیت بیشتری دارد، استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن کفایت می‌کند. این الیاف به کاهش ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک کمک کرده و دوام بتن را در برابر چرخه‌های حرارتی نیز افزایش می‌دهند. اجرای این نوع بتن‌ها نیازمند دقت در کنترل روانی مخلوط است. باید توجه شود که بتن از رئولوژی مناسبی برخوردار باشد تا پمپ‌پذیری و عملیات اجرایی بدون مشکل انجام شود.

در **پروژه‌های حساس‌تری مانند باند فرودگاه که بارهای دینامیکی شدید، سایش و چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن** وجود دارد، ترکیبی از مقاومت سایشی بالا، دوام و مقاومت ضربه‌ای مورد نیاز است. در این شرایط، ترکیب الیاف فولادی با الیاف پلی‌پروپیلن معمولاً بهترین عملکرد را ارائه می‌دهند؛ به‌طوری‌که هم مقاومت خمشی و کششی افزایش یافته و هم ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی به خوبی کنترل می‌شوند. چنین پروژه‌هایی نیازمند **آزمایش‌های دقیق** مقاومت خمشی، مقاومت سایشی و دوام در

برابر یخ‌زدگی هستند تا اطمینان حاصل شود بتن یافی، تمامی نیازهای فنی را برآورده می‌کند.

در کاربردهای خاص مانند تونل‌ها و اجرای بتن پاششی (شاتکریت)، علاوه بر مقاومت فشاری و کششی، پمپ‌پذیری بتن اهمیت زیادی دارد زیرا اجرای سریع و اقتصادی از اولویتهای اصلی است. انتخاب الیاف مناسب که ضمن افزایش دوام و کنترل ترک‌ها، باعث ایجاد مشکلاتی در فرآیند پمپاژ نشود، اهمیت فراوان دارد. استفاده از الیاف با طول و شکل متناسب، به همراه افزودنی‌های روان‌کننده استاندارد و طراحی دقیق طرح اختلاط، امکان اجرای آسان بتن یافی به وسیله پمپ را فراهم می‌کند، بدون اینکه گرفتگی لوله‌ها یا جداشدگی رخ دهد.

در **سازه‌های دریایی** که در معرض خوردگی شدید ناشی از نفوذ یون‌های کلراید و شرایط خورنده محیطی هستند، شاخص دوام و مقاومت شیمیایی بتن اهمیت بالایی دارد. در این شرایط، الیاف شیشه‌ای یا بازالت که مقاومت خوبی در برابر عوامل شیمیایی دارند، انتخاب مناسبی محسوب می‌شوند. این الیاف با کاهش ریز ترک‌ها از نفوذ یون‌های مضر به داخل بتن جلوگیری کرده و عمر مفید سازه را افزایش می‌دهند. علاوه‌براین، برای **قطعات پیش‌ساخته** که در کارخانه تولید شده و سپس به محل نصب منتقل می‌شوند، شاخص‌های مهم شامل مقاومت خمشی و کششی، کنترل ترک‌های ناشی از جابجایی و دوام در برابر شرایط محیطی است. در این موارد استفاده از الیاف فولادی یا ترکیبی با الیاف پلی‌پروپیلن توصیه می‌شود تا

مقاومت مکانیکی و دوام قطعات حداکثر شده و در حمل و نقل دچار آسیب نشوند.

یکی دیگر از کاربردهای خاص بتن یافی، **سازه‌های ضد انفجار** است که الیاف نقش کلیدی در جذب و توزیع انرژی موج انفجار ایفا می‌کنند و از خرد شدن و پرتاب قطعات بتن جلوگیری می‌کنند. برای مثال در ساخت دیوارهای حفاظتی اطراف تأسیسات حساس، ترکیب الیاف فولادی و پلیمری هم مقاومت کششی و خمشی را افزایش داده و در عین حال شکل‌پذیری بتن را بهبود می‌بخشد تا در مواجهه با انفجار، سازه دچار شکست ناگهانی نشود.

مشتریان باید بدانند که انتخاب نوع و میزان الیاف کاملاً به نیازهای پروژه بستگی دارد و نسخه کلی و واحدی برای همه کاربردها وجود ندارد. همچنین، افزودن بیش از حد الیاف ممکن است باعث کاهش کارایی بتن، مشکلات پمپ‌پذیری و هزینه‌های اضافی غیرضروری شود، در حالی که مصرف ناکافی الیاف، خواص و مزایای مورد انتظار را فراهم نمی‌کند.

در کنار نوع و میزان الیاف، **شرایط اجرا و قابلیت پمپ‌پذیری بتن یافی** باید با دقت مورد توجه قرار گیرد. برخی انواع الیاف به ویژه در مقادیر زیاد، می‌توانند روانی مخلوط را کاهش داده و حتی موجب گرفتگی لوله‌های پمپ شوند. در پروژه‌هایی که نیاز به انتقال بتن با پمپ زمینی در مسافت طولانی وجود دارد، **انتخاب طول مناسب الیاف و طراحی دقیق طرح مخلوط** اهمیت ویژه‌ای دارد. تجربه نشان داده است که استفاده از فوق‌روان‌کننده‌های

استاندارد و رعایت دقیق مقدار الیاف می‌تواند پمپ‌پذیری بتن الیافی را به سطح بتن معمولی نزدیک کند.

نکات اجرایی اهمیت تعیین‌کننده‌ای دارند. **توزیع یکنواخت الیاف در مخلوط شرط اول است؛** افزودن ناگهانی کل الیاف در مخلوط‌کن می‌تواند منجر به گلوله‌شدن یا تشکیل توده شود که هم کیفیت مکانیکی را کاهش می‌دهد و هم پمپ‌پذیری را مختل می‌کند. شکل ۲-۲ توده‌شدگی الیاف در محل ورودی پمپ را نشان می‌دهد. روش معمول مناسب این است که الیاف در کارخانه یا مخلوط‌کن مرکزی با دور مناسب و در چند مرحله افزوده شوند تا از توده‌شدگی جلوگیری شود. زمان مخلوط‌کردن پس از افزودن الیاف باید کافی باشد. نکات اجرایی به طور کامل در **بخش اول، قسمت چگونگی در بتن الیافی** ذکر شده است.



شکل ۲-۲- توده‌شدگی الیاف در محل ورودی پمپ.

ظاهر سطح و عملیات تکمیلی نیز نیاز به برنامه‌ریزی دقیق و طراحی دارد. در پروژه‌هایی که سطح صاف و بدون برجستگی ضرورت دارد، مقدار و طول الیاف باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که الیاف در سطح بیرون نزنند؛ در غیر این صورت ممکن است نیاز به پرداخت سطحی مانند پرداخت یا ملات روکش باشد. هنگام عملیات تراز کردن و ماله‌کشی، از کارکرد بیش‌ازحد ترویلر باید اجتناب شود؛ زیرا باعث جابه‌جایی الیاف به سطح و ایجاد نواقص ظاهری می‌شود. همچنین، عمل‌آوری مناسب برای عملکرد بلندمدت اهمیت دارد.

یکی از **دغدغه‌های اصلی در انتخاب بتن الیافی، تصور عمومی از هزینه بالاتر آن نسبت به بتن معمولی** است. واقعیت این است که افزودن الیاف به بتن، هزینه اولیه مصالح را تا حدودی افزایش می‌دهد، اما این افزایش قیمت در نهایت باعث صرفه‌جویی‌های قابل توجه در کل هزینه‌های پروژه می‌شود. برای مثال، در یک پروژه کفسازی صنعتی که مقاومت بتن حدود ۴۰ مگاپاسکال مدنظر است، استفاده از بتن معمولی مستلزم اجرای کامل آرماتوربندی است که علاوه‌بر هزینه خرید میلگرد، هزینه نصب و نیروی کار قابل توجهی دارد. در مقابل، بتن الیافی با مقاومت حدود ۳۵ مگاپاسکال اما با افزودن مقدار مناسبی الیاف فولادی می‌تواند **بخش عمده‌ای از نیاز به آرماتوربندی و نیروی کار را کاهش دهد**. این کاهش آرماتوربندی به طور مستقیم هزینه‌های نیروی کار، زمان اجرا و خطرات ناشی از نصب غلط میلگرد را کم می‌کند. به طور تقریبی،

اگر هزینه تمام‌شده یک کف با بتن معمولی را ۱۰۰ واحد در نظر بگیریم، هزینه اجرای همان کف با بتن الیافی به حدود ۸۵ تا ۹۰ واحد می‌رسد؛ یعنی صرفه‌جویی ۱۰ تا ۱۵ درصدی در هزینه‌های کلی اجرا.

علاوه‌براین، دوام و مقاومت بیشتر بتن الیافی در برابر ترک‌خوردگی، ضربه و سایش بهتر آن، باعث کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری در طول عمر سازه می‌شود که ممکن است تا ۳۰ درصد هزینه‌های بعدی پروژه را کاهش دهد. این موضوع به خصوص در پروژه‌های با بار دینامیکی زیاد، مانند کف‌های صنعتی، پارکینگ‌ها و فرودگاه‌ها اهمیت بسیار بالایی دارد. همچنین در پروژه‌هایی که محدودیت ضخامت دارند، مانند کف‌های با ضخامت کم که امکان قرار دادن آرماتور به صورت کامل وجود ندارد، بتن الیافی گزینه‌ای منحصربه‌فرد برای حفظ عملکرد در این مقاطع است. این قابلیت باعث می‌شود ضخامت کف تا ۱۵ درصد کاهش یابد و در نتیجه مصرف مصالح و وزن سازه کم شده و هزینه‌های کلی پروژه کاهش یابد.

در مجموع، اگر کل چرخه اقتصادی پروژه، از هزینه خرید مصالح، نیروی انسانی، زمان اجرا تا نگهداری و عمر مفید سازه، به دقت بررسی شود، بتن الیافی نه تنها هزینه اضافی نیست، بلکه گزینه‌ای مقرون و به صرفه برای کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت است. در نهایت، موفقیت پروژه‌های استفاده‌کننده از بتن الیافی، تنها به کیفیت تولید کارخانه وابسته نیست، بلکه نیازمند درک دقیق نیازهای پروژه،

انتخاب صحیح نوع و مقدار الیاف و اجرای دقیق در محل است. پروژه‌هایی که این هماهنگی را رعایت کرده‌اند نه تنها از نظر فنی موفق‌تر بوده‌اند، بلکه رضایت کارفرما و کاهش هزینه‌های بلندمدت را نیز به همراه داشته‌اند. بنابراین در زمان انتخاب و سفارش بتن الیافی، مشورت با متخصصان فنی و آگاهی از شرایط پروژه، کلید رسیدن به نتایج مطلوب و اقتصادی است.

۲-۲- انتخاب الیاف براساس عملکرد مورد نیاز

پیش از انتخاب الیاف متناسب با عملکرد مورد انتظار، لازم است شناخت کافی از ویژگی‌ها به دست آید؛ چراکه این شناخت پیش‌زمینه‌ای برای درک صحیح عملکرد هر نوع الیاف در بتن الیافی محسوب می‌شود. عوامل گوناگونی همچون جنس، خواص مکانیکی ویژه، هندسه، ابعاد و نسبت منظر و میزان مصرف، بر خواص نهایی و در نتیجه بر عملکرد بتن الیافی تأثیرگذار هستند. بر همین اساس، یک ماتریس تصمیم طراحی شده که این عوامل را در نظر می‌گیرد و با راهنمایی کارفرما و مدیران پروژه، انتخاب نوع الیاف و مقدار مصرف بهینه را تسهیل می‌کند. در نهایت توصیه‌های عملیاتی لازم برای انتخاب نوع و ویژگی‌های مناسب الیاف متناسب با اهداف عملکردی مشخص ارائه می‌شود.



الیاف فولادی (ماکرو، قلاب‌دار)

عملکرد عالی. ترکیب بهینه با قلاب‌دار و نسبت منظر زیاد (۶۰-۸۰). مقدار مصرف: ۵/۰٪ الی ۲ درصد حجمی. خواص: طول ۳۵-۶۰ میلی‌متر، قطر ۵/۰ الی ۱/۰ میلی‌متر. حدود ۷۴-۱۶۵ درصد افزایش در مقاومت خمشی.

الیاف ماکرو مصنوعی

عملکرد خوب. ظرفیت باقیمانده قابل‌توجه بدون نگرانی از خطر خوردگی. مقدار مصرف: ۲/۰٪ الی ۱/۰ درصد حجمی. خواص کلیدی: مقاطع برجسته/پیچ‌خورده برای افزایش پیوستگی، نسبت منظر ۵۰-۱۰۰.

الیاف میکرو مصنوعی

محدود در مقیاس سازه‌ای؛ عمدتاً برای پل‌زنی اولیه ترک‌ها. به‌عنوان هدف اصلی مناسب نیست.

الیاف شیشه‌ای مقاوم به قلیا

عملکرد محدود برای مقاطع ضخیم؛ عمدتاً در سیستم‌های GFRC نازک کاربرد دارد. سهم اندک در تحمل بار پس از ترک.

الیاف هیبریدی

عملکرد عالی. ترکیب مزایای چند نوع الیاف و بهبود طاقت و کنترل ترک. مقدار مصرف: ۱/۵٪ الی ۲/۰ درصد حجمی (فولاد + PP) ۵/۰٪ الی ۲/۵ درصد حجمی.

الیاف طبیعی

عملکرد خوب. افزایش مقاومت خمشی. مقدار ≈ 3 درصد حجمی. محدودیت: دوام کمتر و تخریب‌پذیری زیستی، نامناسب برای کاربردهای سازه‌ای حساس یا محیط‌های مرطوب.

مقاومت باقیمانده خمشی / کششی و طاقت (پس از ترک خوردگی)

الیاف فولادی (ماکرو، قلاب دار)

عملکرد متوسط، کاهش ترک های اولیه، مقدار مصرف: $1/10$ الی $3/10$ درصد حجمی. معمولاً همراه با PP میکرو به کار می رود، اثر کم به تنهایی.

الیاف ماکرو مصنوعی

عملکرد متوسط، مقدار مصرف: $1/10$ الی $3/10$ درصد حجمی حجمی. غالباً همراه با PP میکرو استفاده می شود.

الیاف میکرو مصنوعی

عملکرد عالی و مؤثر، کاهش چشمگیر سطح/عرض ترک ها، مقدار مصرف: $1/10$ الی $2/10$ درصد حجمی. قطر ریزتر و طول بیشتر عملکرد بهتری دارند، مقدار زیاد PP می تواند نفوذپذیری را افزایش دهد.

الیاف شیشه ای مقاوم به قلیا

متداول نیست؛ عمدتاً در لایه های GFRC

الیاف هیبریدی

عملکرد خوب، ترکیب کنترل ترک اولیه با ظرفیت باقیمانده سازه ای

الیاف طبیعی

عمدتاً برای کاهش جمع شدگی؛ قابلیت اطمینان کمتر از الیاف مصنوعی

کنترل ترک جمع شدگی پلاستیک (سنین اولیه)

الیاف فولادی (ماکرو، قلاب‌دار)

عملکرد متوسط، محدودکننده رشد ترک، مقدار مصرف: $3/0$ الی $8/0$ درصد حجمی. همراه با PP میکرو مؤثرتر است

الیاف ماکرو مصنوعی

عملکرد خوب، مشابه فولاد، در کنترل عرض ترک مؤثر بدون خطر خوردگی. مقدار مصرف: $3/0$ الی $8/0$ درصد حجمی

الیاف میکرو مصنوعی

عملکرد خوب، کاهش ترک‌های پخش‌شده، مقدار مصرف: $5/0$ الی $2/0$ درصد حجمی. اثربخشی با افزایش درصد حجمی و پیوستگی بیشتر می‌شود

الیاف شیشه‌ای مقاوم به قلیا

عملکرد نامشخصی در این زمینه دارد.

الیاف هیبریدی

عملکرد متوسط، هم‌افزایی در کنترل جمع‌شدگی

الیاف طبیعی

عملکرد خوب، عمدتاً برای کاهش جمع‌شدگی

کاهش ترک‌های جمع‌شدگی خشک‌شدن / خودبه‌خودی

الیاف فولادی (ماکرو، قلاب دار)

بهبود بسیار زیاد. عملکرد عالی در محیط‌های پر ضربه. مقدار مصرف: $0/5$ الی $2/0$ درصد حجمی.

الیاف ماکرو مصنوعی

بهبود مناسب. مقدار مصرف: $0/4$ الی $0/8$ درصد حجمی

الیاف میکرو مصنوعی

اثر اندک. نایلون یا $0/5$ الی $1/0$ درصد وزنی می‌تواند مقاومت ضربه را افزایش دهد. PP می‌تواند انرژی شکست ضربه را افزایش دهد.

الیاف شیشه‌ای مقاوم به قلیا

عملکرد خوب. برای دوام سطحی. مقدار مصرف: $0/1$ الی $0/2$ درصد

الیاف هیبریدی

عملکرد عالی. با l/d بالا زیاد توصیه می‌شوند. مقدار مصرف: 2 الی 3 درصد حجمی (فولاد + مصنوعی).

الیاف طبیعی

مقاومت ضربه‌ای و شکست بسیار زیاد

مقاومت ضربه‌ای



مقاومت سایشی

الیاف فولادی (ماکرو، قلابدار)

ظرفیت باقیمانده مؤثر. بهبود برش/خستگی از طریق پل زنی ترک. مقدار مصرف:
 0.4 الی 0.8 درصد حجمی

الیاف ماکرو مصنوعی

مشابه فولاد ولی با طاقت کمتر. مقدار مصرف: 0.4 الی 0.8 درصد حجمی

الیاف میکرو مصنوعی

هدف اصلی نیست

الیاف شیشه‌ای مقاوم به قلیا

معمولاً استفاده نمی‌شود

الیاف هیبریدی

بهبود عملکرد خستگی. مقدار مصرف: 0.4 الی 0.8 درصد حجمی

الیاف طبیعی

بهبود مقاومت خستگی

افزایش مقاومت برشی / خستگی

الیاف فولادی (ماکرو، قلاب‌دار)

ترک‌ها را محدود نگه می‌دارد. احتمال ایجاد لکه زنگ‌زدگی در سطح وجود دارد اما در بتن با آب به مواد سیمانی پایین، خوردگی جدی گزارش نشده است. عرض ترک بزرگتر از ۱ میلی‌متر می‌تواند خوردگی موضعی ایجاد کند. مقدار مصرف: ۱ الی ۲ درصد حجمی فولاد ضدزنگ.

الیاف ماکرو مصنوعی

عملکرد خوب در کنترل ترک بدون نگرانی خوردگی. مقدار مصرف: ۱ الی ۱/۵ درصد حجمی.

الیاف میکرو مصنوعی

کمک به کنترل ترک‌های اولیه؛ همراه با الیاف ماکرو مؤثرتر است. مقاومت شیمیایی بالا، بدون خوردگی.

الیاف شیشه‌ای مقاوم به قلیا

عملکرد عالی. مقاومت بالا در شرایط سخت محیطی. مقدار مصرف: ۰/۰۹ الی ۰/۱۷ درصد حجمی.

الیاف همبریدی

عملکرد خوب. ترکیب مزایا مانند کنترل ترک و مقاومت در برابر خوردگی. مقدار مصرف: ۱ الی ۱/۵ درصد حجمی (شیشه + PP).

الیاف طبیعی

مناسب برای کاربردهای سازه‌ای سنگین نیست.

دوام در برابر یون کلراید

الیاف فولادی (ماکرو، قلاب دار)

مؤثر همراه با افزودنی هوازا مناسب در برابر یخ زدن و آب شدن. احتمال مشاهده الیاف در سطح. / در مقادیر بالا ($\approx 2\%$ درصد حجمی) می تواند مقاومت باقیمانده را پس از حرارت حفظ کند.

الیاف ماکرو مصنوعی

عملکرد بهتر نسبت به بتن معمولی در یخ زدن و آب شدن. مقدار مصرف $1/7$ درصد حجمی. / صریحاً برای مقاومت در برابر پوسته شدن در برابر آتش ذکر نشده.

الیاف میکرو مصنوعی

PP میکرو می تواند از ترک خوردگی سطحی و پوسته شدن در یخ زدن و آب شدن بکاهد. / بسیار مؤثر در کاهش خطر پوسته شدن انفجاری در آتش. مقدار مصرف: $\approx 4/0$ کیلوگرم بر مترمکعب.

الیاف شیشه ای مقاوم به قلیا

عملکرد مشخصی در هر دو پارامتر ندارد.

الیاف همبریدی

عملکرد خوب در یخ زدن و آب شدن. / ترکیب PP و فولاد عملکرد قابل قبولی در آتش دارد.

الیاف طبیعی

دوام کمتر در یخ زدن و آب شدن / عملکرد مشخصی در آتش ذکر نشده است.

مقاومت در برابر یخ زدن و آب شدن / آتش (پوسته شدن انفجاری)



نشست تخصصی با مهندس بابک فروتن مهر و مهندس صدرا عزیزپور

عزیزپور، برگزار شد تا در زمینه از تولید تا اجرا بتن الیافی و موضوعات وابسته گفت‌وگو شود. در ادامه به طور خلاصه گزارش این نشست تخصصی ارائه می‌شود.

در دومین مجله علمی- تخصصی فصل بتن، نشست تخصصی به میزبانی مدیر تحقیق و توسعه شرکت فهاب بتن، مهندس امیرهمایون ثابتی مطلق، میان مدیر جوان شرکت فهاب بتن، مهندس بابک فروتن مهر و مجری جوان با تجربه، مهندس صدرا

بتن الیافی؛ نوآوری، چالش‌ها و آینده صنعت ساخت و ساز ایران

مسیر نوآوری در صنعت بتن ایران

جناب آقای مهندس فروتن‌مهر، در رابطه با مسیری که شرکت فهاب از زمان تأسیس تا امروز طی کرده فرمودند؛ شرکت فهاب در سال ۱۳۵۴ توسط پدرم تأسیس شد و در همان سال‌ها نقش مهمی در صنعت بتن کشور ایفا کرد. پس از بازگشت به ایران، متوجه شدم که بتن در کشور بدون افزودنی عرضه می‌شود و شرکت‌های تولیدی مسئولیت کیفیت افزودنی‌ها را بر عهده نمی‌گیرند. از آن زمان تلاش کردیم بتن را همراه با افزودنی و با مسئولیت کامل عرضه کنیم. برای ارتقای دانش شرکت، از همکاری اساتید دانشگاه و مشاوران متخصص بهره گرفتیم و گروه تحقیق و توسعه را تشکیل دادیم تا تمامی پروژه‌ها و تجربیات ثبت و مستندسازی شوند. خرید تجهیزات مدرن مانند پمپ‌های بلند، افزایش تعداد میکسرها و به‌روزرسانی بچینگ‌ها از دیگر اقدامات ما بود. چشم‌انداز آینده شرکت تولید بتن‌های خاص از جمله بتن‌های مقاوم در برابر ضربه، بتن‌های سبک و بتن‌های دفع‌کننده اشعه است که علاوه بر تنوع در سبد محصولات، نقش مهمی در ارتقای دانش فنی کشور خواهد داشت.

تمایز فهاب؛ ترکیب صنعت و دانشگاه

وی خاطر نشان کردند، رویکرد ما بر پایه تعامل با دانشگاه‌ها شکل گرفت. تاکنون با هفت دانشگاه معتبر کشور شامل تهران، شریف، علم و صنعت، خواجه نصیر و امیرکبیر تفاهم‌نامه همکاری امضا کرده‌ایم. این ارتباط موجب شد در همایش‌ها حضور یابیم و به مسائل و نیازهای واقعی مهندسان پاسخ دهیم. ما همواره به دنبال دانش روز بوده‌ایم و این مسیر جایگاه ویژه‌ای برای ما در صنعت ایجاد کرده است.

نخستین تجربه‌ها در کاربرد بتن الیافی

نخستین مواجهه مهندس عزیزپور با الیاف در اجرای نما و سیمان‌کاری بود، جایی که ترک‌های سطحی به‌عنوان یک مشکل جدی ظاهر می‌شد. ایشان در این زمینه اشاره کردند که با پیشنهاد مشاوران، استفاده از الیاف را آغاز کردیم و نتیجه آن کاهش چشمگیر ترک‌ها بود. این تجربه حدود شش سال پیش به دست آمد و نقطه عطفی برای ورود جدی‌تر به حوزه بتن الیافی شد.

وی در رابطه با نقش الیاف در طراحی و اجرای سازه‌ها افزود الیاف با تقویت مقاومت کششی و خمشی بتن، امکان دستیابی به مقاومت مورد نظر طراحان را فراهم می‌آورد. این موضوع باعث کاهش ضخامت دال‌ها و حتی کاهش مصرف میلگرد می‌شود. اگرچه استفاده از الیاف می‌تواند به‌عنوان مکمل میلگرد باشد، اما نقش آن در بهینه‌سازی طراحی و کاهش هزینه‌ها برای کارفرمایان بسیار چشمگیر است.

فصل بتن؛ پلی میان تجربه و دانش مهندسی

مهندس فروتن‌مهر در مورد ایده شکل‌گیری مجله «فصل بتن» فرمودند؛ همان‌طور که **تکامل انسان‌ها از انتقال تجربه نسل‌ها** حاصل می‌شود، ما نیز تصمیم گرفتیم تجربیات خود را مستندسازی کنیم و در اختیار جامعه مهندسی قرار دهیم. هدف ما این است که مسیر طی‌شده را ثبت کنیم تا **نسل‌های آینده** بتوانند آن را تکمیل و ارتقا دهند.

همچنین وی خاطر نشان کرد **فعالیت در انجمن بتن و سازمان استاندارد** فرصتی برای ترویج استانداردها و فرهنگ‌سازی ایجاد کرد. زمانی که جامعه مهندسی از اهمیت دوام بتن آگاه شود، سطح توقع از تولیدکنندگان بالا می‌رود. از آن‌جا که بتن سرمایه ملی است و برای تولید هر تن سیمان، مصرف بالای انرژی و منابع صورت می‌گیرد، افزایش دوام سازه‌ها اهمیت حیاتی دارد.

بتن معمولی یا بتن الیافی؟

نظر مهندس عزیزپور در مورد مقایسه کاربرد و اجرای بتن الیافی و بتن معمولی بدین شکل است که **کنترل کیفیت در بتن الیافی** پیچیده‌تر است. یکنواختی پخش الیاف، جلوگیری از گلوله‌شدن و عبور مناسب بتن از میان آرماتورها نیازمند نیروی انسانی آموزش‌دیده است. در مقابل، بتن معمولی به دلیل تجربه گسترده نیروهای

اجرایی، کمتر با این مشکلات مواجه می‌شود. هرچند هزینه اولیه بتن الیافی بالاتر است، اما در طراحی بهینه می‌تواند جبران شود و در نهایت ارزش افزوده ایجاد کند.

فرهنگ‌سازی؛ کلیدپذیرش بتن الیافی

یکی از چالش‌های اصلی، **نبود دستورالعمل‌های کافی در مقررات ملی ساختمان** است. همین امر باعث می‌شود مهندسان ناظر و کارفرمایان اعتماد کافی نداشته باشند. تدوین آیین‌نامه‌های اجرایی و گنجانیدن مباحث اختصاصی درباره بتن الیافی در مقررات ملی، راهی مؤثر برای افزایش آگاهی و پذیرش این فناوری است.

چشم‌انداز صنعت بتن در ایران

مهندس فروتن‌مهر در رابطه با مسیری که صنعت بتن ایران تا کنون طی کرده و آینده آن چگونه خواهد بود بدین شکل پاسخ دادند که **سرانه مصرف بتن یکی از شاخص‌های توسعه کشورهاست**. هرچه کیفیت بتن ارتقا یابد، دوام سازه‌ها و تاب‌آوری پروژه‌ها افزایش می‌یابد. برای دستیابی به توسعه پایدار باید از دانش روز دنیا بهره گرفت، اساتید دانشگاه و دانشجویان را وارد فرآیند کرد و انتظارات بیشتری از کارخانه‌های بتن داشت. مهندس فروتن‌مهر به عنوان **توصیه‌ای برای نسل جوان مهندسی**، فرمودند کارآموزی در شرکت‌های بتنی یک ضرورت است. همان‌طور که برای یادگیری شنا باید بدن خیس شود، برای یادگیری بتن نیز باید درگیر طرح مخلوط و فرآیند واقعی شد. تجربه عملی در کنار دانش تئوری مسیر موفقیت را هموار می‌کند.



آینده سازان بتن

{ بخش سوم }

استاندارد؛ مسیر آینده صنعت بتن

صدای نسل نو

۱- استاندارد؛ مسیر آینده صنعت بتن

قرار گرفته است. با این حال، تحقق توانایی‌های زیاد این نوع بتن بدون رعایت استانداردهای لازم و استفاده صحیح از آن، ممکن نیست. بنابراین، رعایت الزامات استانداردهای آزمایشگاهی و اجرایی برای بتن الیافی، به دلیل ویژگی‌های خاص این نوع بتن، ضروری است.

در این بخش، به بررسی مفاهیم کلیدی موجود در استانداردهای ملی و بین‌المللی مرتبط با بتن الیافی، به‌ویژه آیین‌نامه بتن ایران (آبا) پرداخته می‌شود. این اطلاعات به‌عنوان یک راهنمای علمی-اجرایی برای مهندسان و متخصصان علاقه‌مند به

در دنیای امروز، پیشرفت و نوآوری در صنعت ساختمان، به‌ویژه صنعت بتن، وابستگی زیادی به الزامات استانداردها و آیین‌نامه‌های معتبر دارد. بنابراین، مسیر آینده‌سازی در بتن، مسیر استانداردها و چهارچوب‌هایی برای شناخت صحیح، آزمون‌های معتبر، تضمین کیفیت و ایمنی است. علاوه‌براین، استانداردها در صنعت نقش حیاتی در توسعه پایدار و نوآوری در صنعت بتن ایفا می‌نمایند. بتن الیافی، به عنوان یک نوآوری در تکنولوژی بتن، به‌ویژه در ارتقای مقاومت و کاهش ترک‌خوردگی سازه‌ها، در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از مهندسان و طراحان

استفاده از بتن الیافی فراهم می‌شود و به آن‌ها کمک می‌کند تا با رعایت اصول استاندارد، به ارتقای کیفیت و پایداری سازه‌های بتنی خود دست

یابند. جدول ۳-۱ مطالب دسته‌بندی شده مربوط به بتن الیافی که در آبا ذکر شده است را ارائه می‌دهد.



جدول ۳-۱- مطالب مربوط به بتن الیافی در آیین نامه بتن ایران

شماره بند (عنوان)	متن اصلی	تفسیر / توضیح
	کلیات- الیاف مورد استفاده در بتن عمدتاً به منظور بهبود رفتار کششی و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی و بارگذاری و عوامل محیطی بکار برده می شود. این الیاف از انواع فولادی، شیشه ای، پلیمری، کربنی و سرباره ای تولید می شوند. از بین این انواع، الیاف فولادی بیشترین کاربرد را در بتن دارند.	
۳-۳-۱۰ (الیاف مصرفی بتن)	الیاف فولادی- الیاف فولادی با بدنه های صاف یا آجدار و به شکل معمولاً استوانه ای با قطر قاعده $\phi/4$ تا $1/3$ میلی متر و طول های ۲۵ تا ۶۳ میلی متر تولید می شوند. ضوابط کاربرد این الیاف در استاندارد ملی ۱۷۶۹۷ ارائه شده است.	الیاف فولادی به روش های مختلفی تولید شده و در اشکال و ابعاد متنوعی در دسترس هستند. همان طور که در شکل ۳-۱۰ مشاهده می شود، الیاف فولادی در دو گروه الیاف صاف و شکل دار طبقه بندی می شوند. این الیاف اغلب دارای سطح مقطع دایره ای با قطر $\phi/4$ تا $1/3$ میلی متر و طول ۲۵ الی ۶۳ میلی متر هستند. مقاومت کششی الیاف فولادی معمولاً ۲ الی ۳ برابر شبکه فولادی بوده و به دلیل سطح جانبی بیشتر نسبت به شبکه (با فرض ثابت ماندن وزن فولاد)، چسبندگی بهتری با خمیر سیمان ایجاد می کنند. از موارد مصرف الیاف فولادی می توان به دال های متکی بر زمین (رویه های بتنی)، دال های معلق، بتن درجا، دال های مرکب (کامپوزیت) با عرشه فولادی، قطعات پیش ساخته، بتن پاششی و سازه های در معرض انفجار اشاره کرد.



ادامه جدول ۱-۳- مطالب مربوط به بتن الیافی در آیین نامه بتن ایران

شماره بند (عنوان)	متن اصلی	تفسیر / توضیح
۱۰-۳-۳ (الیاف) مصرفی (بتن)	الیاف فولادی- الیاف فولادی با بدنه های صاف یا آج دار و به شکل معمولاً استوانه ای با قطر قاعده ۴/۰ تا ۳/۱ میلی متر و طول های ۲۵ تا ۶۳ میلی متر تولید می شوند. ضوابط کاربرد این الیاف در استاندارد ملی ۱۷۶۹۷ ارائه شده است.	استاندارد ASTM A820 الیاف فولادی را بر اساس روش ساخت در چهار نوع زیر طبقه بندی کرده و حداقل الزاماتی را برای مقاومت کششی، رواداری ابعادی، خلوص و ... تعیین نموده است: نوع ۱- سیم های بریده شده، نوع ۲- الیاف تولید شده از ورقه کردن صفحات فلزی، نوع ۳- الیاف تولید شده از فلز مذاب و نوع ۴- سایر. استاندارد ملی ایران به شماره ۱۷۶۹۷ الیاف فولادی را بر اساس روش ساخت در پنج گروه زیر طبقه بندی می کند: گروه I: سیم های بریده شده، گروه II: الیاف تولید شده از ورقه کردن صفحات فلزی، گروه III: الیاف تولید شده از فلز مذاب، گروه IV: سیم های بریده شده و تراشیده شده و گروه V: الیاف تراشیده شده از بلوک فولادی.  شکل ۳-۱- شکل برخی انواع الیاف



ادامه جدول ۳-۱- مطالب مربوط به بتن الیافی در آیین نامه بتن ایران

شماره بند (عنوان)	متن اصلی	تفسیر / توضیح
۳-۳-۱۰ (الیاف مصرفی بتن)	الیاف فولادی قابل استفاده در بتن آرمه باید آجدار بوده و نسبت طول به قطر آن‌ها بین ۵۰ تا ۱۰۰ باشد.	برخی مشخصات فیزیکی الیاف به طور مستقیم عملکرد بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهند، این در حالی است که برخی مشخصات دارای اهمیت کمتری هستند. همچنین مقاومت کششی و مدول الاستیسیته الیاف به همراه خواص سطحی یا شکل آن‌ها بر خواص مکانیکی بتن و زمان ترک‌خوردگی تأثیر دارد.
		پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر عملکرد الیاف فولادی در بتن دارند عبارتند از: مکانیزم‌های چسبندگی و مهار الیاف در خمیر (تفاوت میان الیاف صاف با الیاف شکل‌دار با انتهای مخروطی شکل و قالب‌دار) طول و قطر الیاف و در نتیجه نسبت طول به قطر آن، مقدار مصرف الیاف، تعداد الیاف در هر کیلوگرم الیاف که تابعی از ابعاد و مقدار الیاف می‌باشد، مقاومت کششی الیاف و مدول الاستیسیته الیاف.
		ابعاد الیاف نقش مهمی در زمان بروز ترک خوردگی بتن تازه دارد. الیاف میکرو (با قطر کمتر از ۰/۰۵ میلی‌متر) با ایجاد پل میان ریزترک‌ها حد الاستیک و مقاومت بتن را افزایش می‌دهند. این در حالی است که الیاف ماکرو (با قطر بیشتر از ۰/۵ میلی‌متر) با ایجاد پل میان ترک‌های بزرگ‌تر، طاقت بتن پس از ترک‌خوردگی را بهبود می‌بخشند. در نتیجه با کاربرد الیاف دارای ابعاد و مدول الاستیسیته متفاوت برای کنترل ترک خوردگی بتن در مراحل مختلف بارگذاری می‌توان عملکرد مصالح را بهینه کرد.
	الیاف شیشه‌ای- این الیاف عموماً به سه رده A (سودا سیلیکات کلسیم و یا شیشه معمولی)، E (بروسیلیکات) و AR (مقاوم در محیط قلیایی) تقسیم می‌شوند.	معمولاً خواص این الیاف در بتن در درازمدت تغییر می‌کند و باید در طراحی مدنظر قرار گیرد.



ادامه جدول ۱-۳- مطالب مربوط به بتن الیافی در آیین نامه بتن ایران

شماره بند (عنوان)	متن اصلی	تفسیر / توضیح
۳-۳- ۱۰ (الیاف مصرفی بتن)	الیاف شیشه‌ای- نوع E در محیط قلیایی با دوام نیست، A تا حدی می‌تواند مقاوم باشد، ولی نوع AR در داخل بتن از دوام خوبی برخوردار است.	
	الیاف شیشه‌ای- ویژگی‌های الیاف شیشه‌ای پایا در بتن باید مطابق با استاندارد ملی ۱۷۵۴۰ برای الیاف باشد.	
	الیاف پلیمری- انواع مختلفی از این الیاف پلیمری ساخته شده که متداول‌ترین آن‌ها برای بتن عبارت‌اند از: آکریلیک، آرامید، نایلون، پلی‌استر، پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن هستند. گاه الیاف کربن را نیز به عنوان الیاف پلیمری قلمداد می‌کنند.	از الیاف پلی‌پروپیلن برای افزایش مقاومت در برابر قلوه‌کن شدن بتن‌های پرمقاومت و توانمند به‌ویژه در آتش‌سوزی استفاده می‌شود.
	با توجه به خواص مختلف انواع الیاف پلیمری، باید قبل از مصرف تأثیر آن‌ها را بر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن مورد بررسی آزمایشگاهی قرار داد.	برخی از خصوصیات الیاف مصنوعی بر اساس ACI 544.1 در جدول ۳-۳- ۳ ارائه شده است.
۳-۴- ۱۱ (نگهداری الیاف مصرفی بتن)	بسته‌های حاوی الیاف باید دور از رطوبت نگهداری شوند.	الیاف فولادی در اثر رطوبت دچار زنگ‌زدگی می‌شوند. سایر الیاف نیز ممکن است در اثر رطوبت گلوله‌شده و به خوبی با سایر اجزای بتن مخلوط نگردند.
	الیاف پلیمری باید دور از تابش مستقیم آفتاب نگهداری شوند.	مواد پلیمری به پرتوهای فرابنفش حساس هستند و ممکن است دچار تغییراتی در خواص فیزیکی و شیمیایی شوند.

جدول ت ۳-۳ برخی از خصوصیات انواع الیاف پلیمری (اطلاعات موردی بر اساس برخی محصولات رایج در بازار)

نوع الیاف	قطر معادل (میکرومتر)	چگالی نسبی	مقاومت کششی (MPa)	ضریب ارتجاعی (GPa)	حداکثر کرنش (درصد)	دمای احتراق (سلسیوس)	دمای ذوب، اکسیده شدن یا تجزیه (سلسیوس)	درصد وزنی جذب آب طبق ASTM D570
آکریلیک	۱۰۵-۱۳	۱/۱۸ - ۱/۱۶	۱۰۰۰ - ۲۷۰	۱۹- ۱۴	۵۰- ۷/۵	-	۲۳۰ - ۲۲۰	۲/۵ - ۱/۰
آراهید	۱۲	۱/۴۴	۲۹۴۰	۶۲	۴/۴	زیاد	۴۸۰	۴/۳
آراهید با ضریب ارتجاعی زیاد	۱۰	۱/۴۴	۲۳۴۵	۱۱۷	۲/۵	زیاد	۴۸۰	۱/۲
کوبین با مدول زیاد و با پایه پلی اکریلونیتریل	۸	۱/۷ - ۱/۶	۳۰۳۰ - ۲۴۸۰	۳۸۰	-/۷ - -/۵	زیاد	۴۰۰	ناچیز
کوبین مقاومت کششی زیاد و با پایه پلی اکریلونیتریل	۹	۱/۷ - ۱/۶	۷۹۰۰ - ۴۸۰	۲۳۰	۱/۵ - ۱/۰	زیاد	۴۰۰	ناچیز
کوبین ایزوتروپیک با پایه هیدروکربن‌های آروماتیک	۱۳-۱۰	۱/۷ - ۱/۶	۴۰۰۰ - ۳۴۵۰	۳۵- ۲۷	۲/۴ - ۲/۰	زیاد	۴۰۰	۷- ۳
کوبین نیمه چگند با پایه هیدروکربن‌های آروماتیک	۱۸-۹	۲/۱۵ - ۱/۸	۳۱۰۰ - ۱۵۱۵	۴۸۰- ۱۵۰	۱/۱ - -/۵	زیاد	۵۰۰	ناچیز
نایلون	۲۳	۱/۱۴	۱۶۵	۵/۲	۲۰	-	۲۲۰۰ - ۲۰۰	۵/۰ - ۲/۸
پلی استر	۲۰	۱/۲۹ - ۱/۲۴	۱۱۰۰۰ - ۲۲۵	۱۷	۱۵۰ - ۱۲	۵۱۳	۲۶۰	-/۴
پلی اتیلن	۱۰۰۰-۲۵	-/۹۶ - -/۹۲	۵۸۵- ۷۵	۵/۰	۸۰- ۳	-	۱۲۵	ناچیز
پلی پروپیلن	-	-/۹۱ - -/۹	۶۹۰۰ - ۱۴۰	۴/۸- ۲/۵	۱۵	۵۱۳	۱۶۵	ناچیز

ادامه جدول ۳-۱- مطالب مربوط به بتن الیافی در آیین نامه بتن ایران

شماره بند (عنوان)	متن اصلی	تفسیر / توضیح
۷-۱۱-۵ (بتن ریزی)	در مواردی که نرخ تبخیر در حد زیاد است و امکان کاهش وجود ندارد، می‌توان از انواع الیاف استفاده کرد. استفاده از الیاف حتی به مقدار حدود ۱/۱۰ تا ۲/۱۰ درصد حجم بتن می‌تواند بروز ترک‌های ناشی از جمع شدگی خمیری را به تأخیر انداخته و یا کاهش دهد. هر چند به کارگیری تمهیدات کاهش نرخ تبخیر، کمک بزرگی در کاهش احتمال ترک خوردگی است.	وزن الیاف با توجه به حجم آن می‌تواند به صورت درصدی از حجم بتن بدست آید. برای این منظور می‌توان حجم الیاف را در چگالی آن ضرب نمود تا وزن الیاف محاسبه شود.
۸-۳-۲ (محل و تواتر نمونه‌برداری برای مقاومت)	نمونه‌برداری برای مقاومت در هر سازه و از هر نوع و هر رده بتن باید در پای کار صورت گیرد. پذیرش بتن از نظر مقاومت نیز برای هر نوع و رده در هر سازه نیز به صورت جداگانه انجام می‌شود. در نوبت‌های نمونه‌برداری برای تعیین مقاومت بتن، لازم است، نمونه‌برداری از بتن تازه طبق استاندارد ملی ۳۲۰۱-۱، از وسیله حمل بتن به صورت مرکب باشد.	در صورت انتقال بتن به کارگاه توسط کامیون مخلوط‌کن، نمونه‌گیری باید پس از افزودن تمام اجزای بتن (از جمله افزودنی‌های شیمیایی یا معدنی، الیاف و غیره) به صورت مرکب از کامیون مخلوط کن انجام شود. در صورتی که از دو یا چند نوع بتن مختلف (سبک، سنگین، حبابدار، الیافی و خودتراکم، همچنین بدون افزودنی و با افزودنی) در یک سازه استفاده شود، نمونه‌برداری مورد نظر باید جداگانه انجام شود.
۱۱-۳-۲ (مصالح مصرفی - بتن پرمقاومت)	الیاف فولادی - استفاده از الیاف فولادی با نظر مهندس مشاور یا دستگاه نظارت و رعایت تمهیدات مندرج در بخش بتن الیافی، در بتن‌های با مقاومت بیشتر از ۶۵ مگاپاسکال، توصیه می‌شود. استفاده از سایر انواع الیاف، با در نظر گرفتن عملکرد آن‌ها از نظر مقاومت و غیره بلامانع است.	به ویژه در مناطق زلزله خیز با خطر نسبی زیاد و بسیار زیاد استفاده از الیاف فولادی توصیه می‌شود.

ادامه جدول ۳-۱- مطالب مربوط به بتن الیافی در آیین نامه بتن ایران

شماره بند (عنوان)	متن اصلی	تفسیر / توضیح
۱۱-۴-۱۱ (کلیات)	بتن الیافی از اضافه کردن الیاف به انواع بتن، ساخته می‌شود. الیاف مورد استفاده می‌تواند از نوع فلزی، پلیمری، کربنی، شیشه‌ای، گیاهی و سلولزی یا ترکیب چند نوع از آن‌ها باشد. در این بخش، عمدتاً به الیاف فولادی پرداخته می‌شود.	کاربردهای عمده الیاف فولادی شامل قطعات بتنی پیش ساخته، دال‌های بتنی متکی به زمین (نظیر کف کارخانه‌ها، انبارها و زیرزمین‌ها) در مناطق دارای خاک ضعیف و دال‌های بتنی متکی به ستون یا شمع است.
		در قطعات بتنی پیش ساخته، استفاده از آرماتور برای مقاومت در برابر تنش‌های موضعی، نظیر تنش‌های ناشی از بارهای متمرکز وارده در هنگام تولید قطعات مناسب است. اما در تنش‌های توزیع شده نظیر تنش‌های ناشی از فشار خاک و آب‌های زیرزمینی در مرحله بهره‌برداری، الیاف فولادی عملکرد بهتری دارند. از آن جا که معمولاً هم تنش‌های موضعی و هم تنش‌های توزیع شده در قطعات پوشش سازه‌های زیر زمینی وجود دارد، این قطعات را می‌توان به صورت یک سیستم ترکیبی از آرماتور و الیاف فولادی تولید نمود.
		انواع الیاف، به ویژه الیاف پلی پروپیلن در اغلب اوقات به منظور کنترل عرض ترک و زمان ترك خوردگی دال‌های بتنی و کف‌های صنعتی در سنین اولیه و ترك‌های ناشی از جمع‌شدگی خمیری (پلاستیک) استفاده می‌شود.
		استفاده از الیاف برای مسلح کردن دال‌های بتنی به دلیل داشتن مزایایی از جمله کنترل ترك‌های ناشی از جمع‌شدگی، بهبود طاقت، دارا بودن مقاومت پسماند، کاهش نیروی انسانی و تجهیزات و همچنین سهولت اجرای آن، راهکاری مناسب است.



ادامه جدول ۱-۳- مطالب مربوط به بتن الیافی در آیین نامه بتن ایران

شماره بند (عنوان)	متن اصلی	تفسیر / توضیح
۱۱-۴-۲	مشخصات الیاف شامل نوع الیاف، طول، قطر یا نسبت طول به قطر (ضریب شکل)، شکل، بافت سطحی، مدول الاستیسیته و حداقل مقاومت کششی نهایی، باید قبل از استفاده مشخص شود.	انواعی از الیاف فولادی معمولاً با مقاومت کششی نهایی تا حدود ۱۱۰۰ مگاپاسکال و حتی تا ۲۳۰۰ مگاپاسکال تولید می‌شوند. الیاف با مقاومت ۱۱۰۰ مگاپاسکال بیشتر در دسترس می‌باشد و الیاف با مقاومت بیشتر به صورت سفارشی تولید می‌شود. طول معمول این الیاف در محدوده ۱۳ الی ۶۵ میلی‌متر و نسبت طول به قطر (ضریب شکل) آن‌ها نیز در محدوده ۳۰ الی ۱۰۰ و ترجیحاً ۸۰ قرار دارد. الیاف فولادی به شکل‌های صاف، موج‌دار، قالب‌دار و با انتهای برآمده تولید می‌شوند. طول الیاف فولادی علاوه بر تعیین نسبت طول به قطر، در کنترل محدودیت به کارگیری آن در بتن آرمه کاربرد دارد. الیاف پلی‌پروپیلن نیز به لحاظ هندسی در سه گروه تک رشته‌ای، چندرشته‌ای و نواری جای می‌گیرند.
	توصیه می‌شود، طول الیاف با انعطاف‌پذیری کم مانند الیاف فولادی از نصف فاصله آزاد آرماتورها یا شبکه سیم جوش‌شده، بیشتر نباشد. همچنین توصیه می‌شود طول الیاف فولادی بیشتر از ۱/۵ برابر حداکثر اندازه اسمی سنگدانه باشد.	در مورد الیاف کاملاً انعطاف‌پذیر ضابطه خاصی ارایه نشده است. در مورد الیاف فولادی، این محدودیت به مقدار الیاف، نوع آرماتوربندی یا شبکه آرماتور بستگی دارد. چنان‌چه با آزمایش بتوان نشان داد که الیاف بلندتر از نصف فاصله آزاد آرماتورها مشکلی را در عملیات بتن‌ریزی بوجود نمی‌آورند، استفاده از آن‌ها بلامانع است. در مورد رابطه طول الیاف دارای انعطاف‌پذیری کم با ضخامت پوشش روی میلگردها اطلاعاتی در دسترس نیست. در بتن‌های معمولی طول الیاف بیش از ۳۰ میلی‌متر بکار می‌رود و برای بتن پاشیدنی از طول کمتر از ۲۰ میلی‌متر استفاده می‌شود. در دال‌ها طول حدود ۶۰ میلی‌متر کاربرد بیشتری دارد. الیاف به طول حدود ۱۳ میلی‌متر، صرفاً برای بتن‌های فوق توانمند و مقاوم در برابر انفجار به کار گرفته می‌شود.



ادامه جدول ۳-۱- مطالب مربوط به بتن الیافی در آیین نامه بتن ایران

شماره بند (عنوان)	متن اصلی	تفسیر / توضیح
	طرح مخلوط بتن الیافی باید به صورت خاص، با توجه به شرایط پروژه و با در نظر گرفتن مشخصات الیاف، طبق بند ۳-۳-۱ تعیین و یا از مخلوط های اجرا شده در پروژه های قبلی، انتخاب شود. در هر صورت طرح مخلوط باید علاوه بر تأمین کارایی، مقاومت فشاری، موارد دیگر نظیر طاقت خمشی و مقاومت خمشی مورد نیاز را برآورده کند.	به هر حال ساخت مخلوط آزمایشی در آزمایشگاه و کنترل کارایی بتن و عملکرد آن از نظر مکانیکی ضرورت دارد. میزان مصرف معمول الیاف فولادی برای مقاصد مختلف، بین ۰/۲۵ تا ۱/۰ درصد حجم بتن می باشد که معمولاً حدود ۲۰ تا ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب خواهد بود.
۱۱-۴-۳ (طرح مخلوط)	الیاف مصرفی، به لحاظ نوع، طول، قطر و شکل الیاف، در روانی بتن تغییراتی ایجاد می کند و معمولاً روانی بتن را کاهش می دهد. از این رو باید بر اساس مخلوط های آزمایشی، علاوه بر مصرف افزودنی های مناسب مانند روان کننده، بافت دانه بندی مخلوط سنگدانه ها را نیز ریزتر نمود.	به منظور دستیابی به روانی مورد نظر در بتن الیافی می توان از افزودنی های روان کننده و خاکستربادی استفاده نمود. همچنین، کاهش سهم شن و افزایش سهم ماسه کارایی مناسبی را علی رغم کاهش روانی به وجود آورد. توصیه می شود اسلامپ بتن پیش از افزودن الیاف، ۲۵ الی ۷۵ میلی متر (با توجه به مقدار الیاف مصرفی) بیشتر از اسلامپ نهایی مورد نظر باشد، زیرا با افزودن الیاف از مقدار اسلامپ بتن کاسته می شود. وجود الیاف در بتن ممکن است باعث افزایش آب انداختن شود. همچنین، با کاهش حداکثر اندازه سنگدانه می توان مقدار الیاف بیشتری را با نگرانی کمتر در ارتباط با گلوله شدگی آن ها به کار برد. لازم به ذکر است که گلوله شدگی الیاف می تواند آب انداختن را نیز افزایش دهد.



ادامه جدول ۳-۱- مطالب مربوط به بتن الیافی در آیین نامه بتن ایران

شماره بند (عنوان)	متن اصلی	تفسیر / توضیح
	به منظور کاهش مشکلات ناشی از بیرون زدن الیاف فولادی از گوشه‌های قالب، گوشه‌ها و لبه‌های تیز قالب باید پخ شوند. راه حل دیگر، بتونه‌کاری یا استفاده از نوارهای مخصوص در داخل گوشه‌ها و لبه‌های تیز قالب است.	
۴-۱۱-۴ (الزامات اجرایی)	افزودن الیاف باید به یکی از سه روش زیر انجام شود: روش اول- الیاف در ایستگاه مرکزی بتن به تدریج به جریان سنگدانه، پیش از ورود به مخلوط اضافه شود. روش دوم- الیاف در ایستگاه مرکزی بتن، ابتدا با سنگدانه و سیمان و سپس به آن‌ها آب اضافه شود. روش سوم- الیاف در مرحله آخر پس از اختلاط تمام اجزای تشکیل‌دهنده بتن به تدریج به مخلوط‌کن اضافه شود.	در روش اول الیاف را می‌توان به صورت دستی یا از طریق قیف مخزن الیاف به سنگدانه‌های در حال حرکت روی نوار نقاله (به ویژه درشت‌دانه) به تدریج اضافه کرد یا آن‌ها را روی نوار نقاله دیگری ریخت که به نوار نقاله حامل سنگدانه منتهی می‌شود. این روش به ویژه برای الیاف فولادی به صورت دسته‌ای (بسته‌ای) و الیاف پلی‌پروپیلن تک رشته‌ای توصیه می‌شود. در روش سوم، الیاف با نرخ حدود ۵۰ کیلوگرم در دقیقه به داخل قیف کامیون مخلوط‌کن یا دیگ مخلوط‌کن ایستگاه مرکزی، در حالی که با سرعت حداکثر می‌چرخد، اضافه می‌شود. سپس سرعت دیگ کامیون مخلوط‌کن به سرعت متوسط برای اختلاط کاهش یافته و باید حداقل ۵۰ دور با این سرعت بچرخد. استفاده از این روش زمانی مجاز است که کامیون مخلوط‌کن بیش از دو سوم ظرفیت اسمی خود بارگیری نشده باشد.



ادامه جدول ۱-۳-۱ مطالب مربوط به بتن الیافی در آیین نامه بتن ایران

شماره بند (عنوان)	متن اصلی	تفسیر / توضیح
۱۱-۴-۴ (الزامات اجرایی)	قالب بندی و آرماتورگذاری- به منظور کاهش مشکلات ناشی از بیرون زدن الیاف فولادی از گوشه های قالب، گوشه ها و لبه های تیز قالب باید پخ شوند. راه حل دیگر، بتونه کاری یا استفاده از نوارهای مخصوص در داخل گوشه ها و لبه های تیز قالب است.	
	قالب بندی و آرماتورگذاری- افزودن الیاف باید به یکی از سه روش زیر انجام شود: روش اول- الیاف در ایستگاه مرکزی بتن به تدریج به جریان سنگدانه، پیش از ورود به مخلوط اضافه شود. روش دوم- الیاف در ایستگاه مرکزی بتن، ابتدا با سنگدانه و سیمان و سپس به آن ها آب اضافه شود. روش سوم- الیاف در مرحله آخر پس از اختلاط تمام اجزای تشکیل دهنده بتن به تدریج به مخلوطکن اضافه شود.	در روش اول الیاف را می توان به صورت دستی یا از طریق قیف مخزن الیاف به سنگدانه های در حال حرکت روی نوار نقاله (به ویژه درشت دانه) به تدریج اضافه کرد یا آن ها را روی نوار نقاله دیگری ریخت که به نوار نقاله حامل سنگدانه منتهی می شود. این روش به ویژه برای الیاف فولادی به صورت دسته ای (بسته ای) و الیاف پلی پروپیلن تک رشته ای توصیه می شود. در روش سوم، الیاف با نرخ حدود ۵۰ کیلوگرم در دقیقه به داخل قیف کامیون مخلوطکن یا دیگ مخلوطکن ایستگاه مرکزی، در حالی که با سرعت حداکثر می چرخد، اضافه می شود. سپس سرعت دیگ کامیون مخلوطکن به سرعت متوسط برای اختلاط کاهش یافته و باید حداقل ۵۰ دور با این سرعت بچرخد. استفاده از این روش زمانی مجاز است که کامیون مخلوطکن بیش از دو سوم ظرفیت اسمی خود بارگیری نشده باشد.



ادامه جدول ۳-۱- مطالب مربوط به بتن الیافی در آیین نامه بتن ایران

شماره بند (عنوان)	متن اصلی	تفسیر / توضیح
۱۱-۴-۴ (الزامات اجرایی)	بتن ریزی- حمل و ریختن بتن های الیافی می تواند با تجهیزات متداول و با در نظر گرفتن نکات زیر انجام شود: الف- با توجه به ضرورت افزایش شیب ناوه کامیون مخلوط کن، ممکن است نتوان بتن الیافی را به خوبی تخلیه کرد. در این موارد نیاز به استفاده از یک سکو برای استقرار کامیون مخلوط کن وجود دارد. ب- جام باید دارای قیفی با شیب تند و سطح داخلی تمیز و هموار باشد. همچنین حداقل اندازه دهانه بازشو باید ۳۰۰ میلی متر یا ۱۲ برابر حداکثر اندازه سنگدانه، هرکدام بیشتر است، باشد. پ- برای پمپ کردن بتن حاوی الیاف فولادی بلند، بیشتر از ۵۰ میلی متر، به ویژه در مقادیر مصرف بیش از ۵۰ کیلوگرم در متر مکعب، باید تمهیدات لازم در نظر گرفته شود.	ب- در صورت انسداد بازشو توسط الیاف و به منظور تخلیه آسان بتن می توان از لرزاننده بدنه روی جام استفاده نمود. پ- برای الیاف با طول کمتر از ۵۰ میلی متر، ضابطه خاصی ارایه نشده است. برای الیاف با طول بیش از ۵۰ میلی متر، از لوله های با قطر حداقل ۱۲۵ میلی متر استفاده می شود. توصیه می شود طول لوله های انعطاف پذیر پمپ تا حد امکان به حداقل برسد. انتهای شوت کامیون مخلوط کن باید حدود ۳۰۰ میلی متر بالاتر از شبکه فلزی تعبیه شده روی قیف پمپ باشد. شبکه فلزی روی قیف نباید هنگام پمپ کردن بتن های الیافی برداشته شود. با اتصال یک لرزاننده کوچک به شبکه فلزی قیف می توان عبور جریان بتن الیافی از آن را تسهیل نمود. استفاده از سنگدانه با دانه بندی گسسته توصیه نمی شود. در مخلوط های بتن الیافی بسیار روان، انتقال بتن به روش پمپاژ چندان مناسب نیست. توصیه می شود حداکثر مقدار اسلایم بتن الیافی برای پمپ کردن برابر با ۱۵۰ میلی متر باشد.



ادامه جدول ۳-۱- مطالب مربوط به بتن الیافی در آیین نامه بتن ایران

شماره بند (عنوان)	متن اصلی	تفسیر / توضیح
۱۱- ۴- ۴ (الزامات اجرایی)	تراکم و پرداخت سطح بتن- تمام روش‌های تراکم و پرداخت بتن معمولی، با اعمال تغییرات جزئی، برای بتن الیافی نیز قابل استفاده است.	برای متراکم کردن بتن و فرو بردن الیاف موجود در سطح دال‌های بتنی از شمشه لرزان و یا شمشه لیزری استفاده می‌شود. به منظور ایجاد سطحی هموار و بستن پارگی‌ها و بازشدگی‌های موجود در سطح بتن از ابزارهای پرداخت فلزی انعطاف‌پذیر مانند تخته ماله دسته بلند، ماله با دو لبه گرد و برنده و شمشه روسازی استفاده می‌شود. ماله‌های چوبی سبب کنده‌شدن لایه سطحی بتن و در نتیجه بیرون آمدن الیاف می‌شود و به همین دلیل کاربرد آن‌ها توصیه نمی‌شود.
	تراکم و پرداخت سطح بتن- در کف‌های بتنی، در صورت نیاز به زبر کردن سطح بتن، ابزارهای مورد استفاده نباید موجب ظاهر شدن الیاف شوند. برای زبر کردن سطح نباید از چتایی استفاده کرد.	کشیدن چتایی سبب بلند شدن و ظاهر گشتن الیاف در سطح بتن می‌شود.
۱۱- ۴- ۵ (الزامات اجرایی)	آزمایش‌های خاص بتن الیافی فولادی علاوه بر آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری، کششی و مدول ارتجاعی، عمدتاً مربوط به تعیین مقاومت خمشی و شکل‌پذیری بتن است، این آزمایش‌ها باید طبق ضوابط استانداردهای «الف» تا «پ» انجام شود. الف- آزمایش تیر بتنی برای تعیین مقاومت خمشی باقیمانده مطابق استاندارد ملی ۱۷۲۰۷؛ ب- آزمایش عملکرد خمشی مطابق ASTM C1609؛ پ- آزمایش تعیین طاقت خمشی مطابق ASTM C1550.	در تهیه آزمون‌های مختلف برای انجام آزمایش‌های بتن الیافی سخت شده، لازم است بتن‌ها در یک مرحله در قالب ریخته و از لرزش خارجی (میز لرزان) استفاده شود. استفاده از لرزانده‌های داخلی یا میله‌زدن برای تراکم بتن، بدلیل عملکرد لایه‌ای بتن و جهت‌دهی الیاف و عدم یکنواختی توزیع آن‌ها، مجاز نیست.

در این بخش، به منظور تسهیل دسترسی پژوهشگران و علاقه‌مندان به منابع معتبر، لیستی جامع از استانداردهای ملی و بین‌المللی مرتبط با بتن الیافی تهیه و در جدول ۳-۲ ارائه شده است. این استانداردها شامل دستورالعمل‌ها، الزامات فنی و

مشخصات مرتبط با موضوع بتن الیافی و کنترل کیفیت در مصالح مصرفی، تولید و اجرا هستند که می‌توانند راهنمایی ارزشمند برای مطالعات علمی و کاربردهای عملی باشند.



جدول ۳-۲- لیست استانداردهای ملی و بین‌المللی مربوط به بتن الیافی

ردیف	عنوان استاندارد	شماره
۱	بتن مسلح الیافی عملکرد خمشی (با استفاده از تیر با بارگذاری در نقاط یک سوم دهانه) - روش آزمون	۱۰۵۰
۲	بتن - بتن تقویت شده با الیاف - ویژگی‌ها	۱۲۵۹۹
۳	بتن - ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک در بتن الیافی گیردار شده (با استفاده از ابزار فولادی جاگذاری شده) - روش آزمون	۱۲۶۰۴
۴	بتن مسلح شده با الیاف شیشه - تعیین درصد الیاف شیشه به روش شستن - روش آزمون	۱۶۳۸۵
۵	بتن - مقاومت قلبیایی میله‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف با زمینه کامپوزیتی مورد استفاده در سازه‌های بتنی - روش آزمون	۱۷۰۶۲
۶	بتن مسلح شده با الیاف - روش تعیین مقاومت پسماند متوسط	۱۷۲۰۷
۷	الیاف شیشه‌ای مقاوم در برابر قلیا برای بتن تقویت شده با الیاف شیشه‌ای و بتن تقویت شده با الیاف و سیمان - ویژگی‌ها	۱۷۵۴۰
۸	بتن - خواص کششی میله‌های پلیمری تقویت شده با الیاف با زمینه کامپوزیتی - روش آزمون	۱۷۵۴۲
۹	محصولات سیمانی تقویت شده با الیاف - نمونه‌برداری و بازرسی	۱۷۷۲۷
۱۰	فراورده‌های بتنی پیش ساخته - طبقه‌بندی عملکرد بتن تقویت شده با الیاف شیشه‌ای	۱۷۸۱۷
۱۱	بتن پاششی - قسمت ۳- تعیین مقاومت‌های خمشی (مقاومت حداکثر اولیه، نهایی و پسماند) آزمون‌های تیر تقویت شده الیافی - روش آزمون	۱۸۷۱۷-۳
۱۲	بتن-چگالی انبوهی مرطوب و خشک، جذب آب و تخلخل ظاهری مقاطع نازک بتن تقویت شده با الیاف شیشه - روش آزمون	۱۹۲۴۹
۱۳	بتن-خواص خمشی مقطع نازک بتن تقویت شده با الیاف شیشه (با استفاده از تیر ساده با بارگذاری در نقاط یک‌سوم) روش آزمون	۱۹۲۴۱

جدول ۳-۲- لیست استانداردهای ملی و بین‌المللی مربوط به بتن الیافی

ردیف	عنوان استاندارد	شماره
۱۴	روش آزمون استاندارد برای عملکرد خمشی بتن مسلح‌شده با الیاف (استفاده از تیر با بارگذاری در یک‌سوم نقطه)	ASTM C1609/ C1609M
۱۵	مشخصات استاندارد برای بتن مسلح‌شده با الیاف	ASTM C1116/ C1116M
۱۶	روش آزمون استاندارد برای طاقت خمشی بتن الیافی (با استفاده از صفحه گرد با بارگذاری مرکزی)	ASTM C1550
۱۷	روش آزمون استاندارد برای ارزیابی ترک‌های جمع‌شدگی پلاستیک در بتن مسلح‌شده با الیاف (با استفاده از قالب فولادی)	ASTM C1579
۱۸	مشخصات استاندارد برای الیاف فولادی مورد استفاده در بتن مسلح‌شده با الیاف	ASTM A820
۱۹	مشخصات استاندارد برای الیاف شیشه‌ای مورد استفاده در بتن مسلح‌شده با الیاف	ASTM C1666
۲۰	مشخصات استاندارد برای الیاف مصنوعی (پایه پلی‌اولفین) مورد استفاده در بتن	ASTM D7508
۲۱	مشخصات استاندارد برای الیاف طبیعی مورد استفاده در بتن	ASTM D7357
۲۲	روش آزمون استاندارد برای طاقت خمشی و مقاومت ترک‌اولیه بتن الیافی (با استفاده از تیر و بارگذاری در یک‌سوم نقطه)	ASTM C1018
۲۳	روش آزمون زمان جریان بتن مسلح‌شده با الیاف از طریق مخروط اسلامپ وارونه	ASTM C995
۲۴	راهنمای طراحی تکیه‌گاه‌های غلطکی برای آزمون تیرهای بتن الیافی	ASTM C1812/ C1812M
۲۵	آزمون مقاومت خمشی (اولین پیک، مقاومت نهایی و باقی‌مانده) در نمونه‌های تیر پرشده با بتن الیافی پاشیده	BS EN 14488-3
۲۶	کنترل تولید کارخانه‌ای برای محصولات سیمانی تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای	BS EN 1169
۲۷	روش اندازه‌گیری محتوای الیاف فلزی در بتن تازه و سخت‌شده	BS EN 14721:2005 + A1

۲- صدای نسل نو

در این بخش با دو نفر از فارغ التحصیلان برجسته دانشگاه‌های برتر کشور که تجربه فعالیت در حوزه بتن؛ به ویژه بتن الیافی را دارند، مصاحبه‌ای انجام شده است. این افراد با بهره‌گیری از دانش آکادمیک و تجربه عملی خود، دیدگاه‌های ارزشمند خود را ارائه کرده‌اند. در ابتدا به معرفی این دو متخصص جوان پرداخته و سپس به بررسی نظرات و تحلیل‌های آن‌ها در خصوص آینده این فناوری و نقش آن در توسعه صنعت ساخت‌وساز خواهیم پرداخت.

■ یاسمن قابچی باقرزاده



اطلاعات شخصی	
نام و نام خانوادگی	یاسمن قابچی باقرزاده
سن	۲۶
ایمیل	Yasaman.bagherzadeh@gmail.com

تحصیلات		
مدرک تحصیلی	رشته تحصیلی	دانشگاه
کارشناسی ارشد	دانشگاه تهران	مهندسی عمران - سازه
کارشناسی	دانشگاه زنجان	مهندسی عمران

اطلاعات پایان نامه	
عنوان پایان نامه	طراحی بتن فوق توانمند با کاربرد بهینه الیاف با استفاده از روش چگالی تراکمی
استاد راهنما	دکتر محمد شکرچی زاده و دکتر هوشنگ دولتشاهی
تاریخ دفاع	۱۴۰۴/۰۶/۳۱
دلایل انتخاب موضوع	دلیل اصلی علاقه مندی من به بتن الیافی این است که بتن معمولی ذاتاً ماده‌ای ترد و شکننده محسوب می‌شود و هنگام ایجاد ترک، ضعف زیادی از خود نشان می‌دهد. اما با افزودن الیاف، می‌توان بخش قابل توجهی از این ضعف ذاتی را برطرف کرد. الیاف نه تنها به کنترل و محدود کردن گسترش ترک‌ها کمک می‌کنند، بلکه باعث افزایش شکل پذیری، مقاومت و دوام بتن می‌شوند. همین موضوع باعث می‌شود بتن الیافی در برابر بارهای دینامیکی مانند زلزله یا ضربه، عملکرد بسیار بهتری نسبت به بتن معمولی داشته باشد. از سوی دیگر، استفاده از الیاف بازیافتی، مانند الیاف فولادی به دست آمده از تایرهای فرسوده، علاوه بر صرفه جویی اقتصادی، نقشی مهم در مدیریت پسماند و حفاظت از محیط زیست ایفا می‌کند. به همین دلیل، بتن الیافی برای من از جنبه های فنی، اقتصادی و زیست محیطی جذابیت ویژه ای دارد و معتقدم آینده صنعت ساخت و ساز به طور جدی به سمت بهره گیری گسترده تر از این نوع بتن حرکت خواهد کرد.
نتایج پایان نامه	ارائه یک روش جامع طراحی مخلوط کارآمد با مدل سازی الیاف در چگالی تراکمی خشک و مرطوب که می‌توان اهداف عملکردی را برای آن تعریف کرد. اهداف عملکردی می‌تواند روانی و مقاومت مدنظر باشد. در واقع با ارائه این روش، می‌توان بتن فوق توانمند را بر اساس خصوصیات مختلف مدنظر، مثلاً خودتراکم بودن، طراحی کرد.

مسیر حرفه ای و پژوهشی، از دانشگاه تا صنعت
فعالیت های علمی من عمدتاً در زمینه بتن فوق توانمند بوده است. به ویژه روی بهینه سازی طرح مخلوط با استفاده از مدل های تراکم ذرات و بررسی اثر الیاف صنعتی و بازیافتی بر خواص مکانیکی و رئولوژیکی بتن کار کرده ام. از نظر صنعتی نیز مدتی در کارخانه بتن آماده، فهاب بتن، در زمینه تحقیق و توسعه الیاف در بتن فعالیت داشته ام. علاوه بر این در آنجا با فرایندهای اجرایی، کنترل کیفیت و چالش های عملی تولید بتن آشنا شدم. این تجربه به من کمک کرد تا نتایج پژوهش هایم را بهتر با شرایط واقعی صنعت تطبیق دهم.

جایگاه بتن الیافی در ایران و چالش‌های آن

به نظر من، بتن الیافی در شرایط فعلی کشور هنوز نتوانسته جایگاه شایسته و گسترده‌ای در صنعت ساخت‌وساز به دست بیاورد و بیشتر کاربرد آن به پروژه‌های خاص، آزمایشی یا پژوهشی محدود شده است. یکی از دلایل اصلی این موضوع، هزینه زیاد الیاف صنعتی و نبود آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های بومی و جامع برای طراحی و اجرای این نوع بتن است. علاوه‌براین، کمبود دانش فنی و تجربه کافی در میان پیمانکاران، مهندسان و مجریان پروژه نیز مانع بزرگی برای ورود جدی این فناوری به فاز اجرایی محسوب می‌شود.

با این حال، واقعیت این است که کشور ما به شدت نیازمند ارتقای کیفیت و دوام سازه‌ها و همچنین مقاوم‌سازی آن‌ها در برابر بارهای دینامیکی به‌ویژه زلزله است. در چنین شرایطی، بتن الیافی می‌تواند نقش بسیار مهمی ایفا کند. به‌کارگیری الیاف در بتن، نه تنها باعث افزایش شکل‌پذیری و طول عمر مفید سازه‌ها می‌شود، بلکه اگر از الیاف بازیافتی، مانند الیاف فولادی حاصل از تایلرهای فرسوده، استفاده شود، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، به مدیریت پسماند و حفاظت از محیط‌زیست نیز کمک شایانی خواهد کرد.

به اعتقاد من، حل این چالش‌ها منوط به چند شرط اساسی است: کاهش هزینه‌های تولید و تأمین الیاف، تدوین و بومی‌سازی استانداردها و دستورالعمل‌های اجرایی، و از همه مهم‌تر فرهنگ‌سازی و افزایش آگاهی در میان فعالان صنعت ساخت‌وساز. اگر این چالش‌ها برطرف شوند، می‌توان انتظار داشت بتن الیافی به یکی از مصالح کلیدی و پیرکاربرد در پروژه‌های عمرانی کشور تبدیل شود.

پژوهش‌های مورد نیاز بتن الیافی و آینده آن

حوزه بتن الیافی ظرفیت‌های پژوهشی بسیار گسترده و متنوعی دارد. یکی از زمینه‌های اصلی تحقیق، بررسی اثر نوع، شکل، اندازه و درصد استفاده از الیاف بر خواص مکانیکی و دوام بتن است. این موضوع می‌تواند به درک بهتر نقش الیاف در کنترل ترک‌ها، افزایش مقاومت و بهبود عملکرد سازه‌ها کمک کند. علاوه بر آن، بهینه‌سازی طرح اختلاط با استفاده از الیاف بازیافتی، به‌ویژه الیاف فولادی حاصل از تایلرهای فرسوده، اهمیت زیادی دارد، چرا که نه تنها موجب کاهش هزینه‌ها می‌شود، بلکه اثرات مثبت زیست‌محیطی قابل‌توجهی نیز به همراه دارد.

بررسی رفتار بتن الیافی در برابر بارهای دینامیکی مانند زلزله، ضربه و خستگی نیز یکی دیگر از حوزه‌های بسیار مهم پژوهشی است که می‌تواند زمینه‌ساز کاربرد گسترده‌تر این فناوری در پروژه‌های عمرانی شود. همچنین، طراحی مخلوط متناسب با شرایط و نیازهای هر پروژه و تطبیق آن با نوع الیاف در دسترس در کشور، از دیگر محوره‌های تحقیقاتی کاربردی و ضروری به شمار می‌آید.

از منظر آینده، به اعتقاد من بتن الیافی جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساخت‌وساز خواهد داشت. با توجه به نیاز روزافزون کشور به سازه‌های بادوام‌تر و مقاوم‌تر در برابر مخاطرات طبیعی، این نوع بتن می‌تواند به یکی از مصالح کلیدی آینده تبدیل شود. البته تحقق این چشم‌انداز نیازمند سرمایه‌گذاری در تحقیقات بنیادی و کاربردی، تدوین استانداردهای بومی و افزایش آگاهی و اعتماد فعالان صنعت به این فناوری است.

آینده صنعت بتن

به نظر من، آینده صنعت بتن به طور جدی به سمت توسعه بتن‌های پیشرفته و پایدار حرکت خواهد کرد. بتن‌های فوق توانمند، بتن‌های الیافی و همچنین استفاده از مواد جایگزین سیمان و مصالح بازیافتی، هر روز جایگاه پررنگ‌تری در این صنعت پیدا می‌کنند؛ چرا که این نوع بتن‌ها علاوه بر برخورداری از عملکرد مکانیکی و دوام بالاتر، اثرات زیست‌محیطی کمتری نیز به همراه دارند.

با این حال، جایگزینی کامل بتن در مقیاس وسیع، دست‌کم در کوتاه‌مدت چندان محتمل به نظر نمی‌رسد. دلیل اصلی آن، ویژگی‌های منحصر به فرد بتن است؛ از جمله اقتصادی بودن، دسترسی آسان به مواد اولیه و امکان طراحی و شکل‌پذیری بالا، که باعث می‌شود این ماده همچنان جایگاه خود را در صنعت ساخت‌وساز حفظ کند.

به طور کلی، می‌توان گفت آینده صنعت بتن آینده‌ای روشن است؛ آینده‌ای که با نوآوری در ترکیبات، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و رویکردهای پایدار گره خورده است. در این مسیر، بتن نه تنها نقش کلیدی خود را در توسعه زیرساخت‌ها و احداث سازه‌های مقاوم ایفا خواهد کرد، بلکه بیش از گذشته با اصول زیست‌محیطی و توسعه پایدار همسو خواهد شد.

■ حمیدرضا رجبلو



اطلاعات شخصی	
نام و نام خانوادگی	حمیدرضا رجبلو
سن	۲۶
ایمیل	Hamidrajablou@ut.ac.ir

تحصیلات		
مدرک تحصیلی	رشته تحصیلی	دانشگاه
کارشناسی ارشد	دانشگاه تهران	مهندسی عمران - سازه
کارشناسی	دانشگاه تهران	مهندسی عمران

اطلاعات پایان نامه	
عنوان پایان نامه	امکان سنجی تولید بتن فوق توانمند خودتراکم از طریق اصلاح طرح مخلوط از دیدگاه رئولوژی
استاد راهنما	دکتر محمد شکرچی زاده و دکتر هوشنگ دولتشاهی
تاریخ دفاع	۱۴۰۴/۰۶/۳۱
دلایل انتخاب موضوع	دلیل انتخاب بتن الیافی برای من این بود که قبل از آشنایی دقیق با بتن، آن را همواره همراه با ترک می شناختم و این موضوع نشان دهنده ضعف کیفیت آن در ذهنم بود. با پیشرفت در مهندسی عمران، برایم جذاب شد بدانم آیا می توان از الیاف به عنوان جایگزین آرماتور یا در استفاده روزمره در سازه ها بهره برد. خاصیت الیاف در کنترل و تأخیر ترک، مقاومت پس از ترک و جلوگیری از گسیختگی، مهم ترین انگیزه من بود. در پایان نامه ام از انواع الیاف فولادی (میکرو و ماکرو) و حتی الیاف ضایعات لاستیک استفاده کردم و تجربه عملی با الیاف مختلف مانند پلی پروپیلن باعث شد شناخت و درک کامل تری از نقش الیاف در بتن پیدا کنم.
نتایج پایان نامه	نتیجه کار من این است که بتن فوق توانمند را می توان طوری اصلاح کرد که در حالت تازه رفتار رئولوژیکی بهتری داشته باشد و در عین حال خواص مکانیکی و دوامی آن حفظ شود. ما با تغییر در ترکیب مصالح و استفاده از انواع الیاف، توانستیم لزجت بالای این بتن را تا حدی کنترل کنیم تا اجرای آن ساده تر شود؛ به طوری که تیم اجرایی بتواند بدون نگرانی از حبس هوا یا جهت گیری نامناسب الیاف با بتن کار کند. از طرف دیگر تلاش کردم مصالحی انتخاب شوند که هزینه تولید را کاهش دهند، چون به نظرم مسئله اقتصادی اولین مانع برای کاربرد گسترده این بتن در کشور است. تجربه ای که از قبل در کار با الیاف داشتم، به من کمک کرد تا این بار هم از الیاف فولادی میکرو و ماکرو و حتی ضایعات لاستیک استفاده کنم و شناخت دقیق تری از نقش آن ها در کنترل ترک و بهبود عملکرد بتن به دست بیاورم. جمع بندی من این است که می توان به بتنی فوق توانمند دست یافت که علاوه بر مقاومت و دوام بالا، از نظر اجرایی ساده تر و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه تر باشد؛ و همین موضوع می تواند راه را برای استفاده گسترده تر از این بتن در کشور هموار کند.

مسیر حرفه‌ای و پژوهشی، از دانشگاه تا صنعت

در رابطه با بخش فعالیت های صنعتی به مدت یک سال به عنوان کارشناس آزمایشگاه و کنترل کیفی در شرکت فهاب بتن فعالیت داشتم و توی این مدت روی انواع بتن های خاص کار کردیم که یکی از پررنگ ترین نوع بتنی که من روش کار کردم بتن سنگین بود که برای بیمارستان کودکان کار می شد. روی طرح مخلوط کار کردیم تا بتوانیم به یه بتن سنگینی برسیم که از لحاظ خواص وزن مخصوص قابل تأیید باشه و هم از لحاظ رئولوژیکی به منظور پمپ پذیری بهتر سر پروژه که خیلی کار چالش برانگیز و جذابی بود. به طور کل و پروژه برج اداری سامان فراز که در اجرای بتن ریزی این پروژه من شرکت داشتم و پرژه اپال، پارکینگ طبقاتی جوادیه، بیمارستان فیروزآبادی شهری و و شرکت کوا برای شرکت گاز پروژه‌های مهمی بود که من در آن ها شرکت داشتم.

جایگاه بتن الیافی در ایران و چالش‌های آن

از نظر مفهومی، برخی طراحان برای جبران ضعف کششی بتن، به اشتباه افزایش مقاومت فشاری را توصیه می‌کنند، در حالی‌که این رویکرد شکنندگی و گسیختگی انفجاری بتن را تشدید می‌کند. این موضوع نشان‌دهنده درک ناقص از ماهیت بتن الیافی در کشور است و لزوم توسعه دانش مفهومی آن را آشکار می‌سازد. مسئله دیگر نبود الگو و مرجع طراحی مناسب برای انتخاب نوع و مقدار الیاف است. هرچند استاندارد ملی بتن الیافی وجود دارد، اما هنوز ظرفیت کافی برای استفاده عملی و تجویز به‌عنوان مرجع طراحی ایجاد نشده است. همچنین، موضوع اطمینان از تولید بتن الیافی با کیفیت چالش مهمی محسوب می‌شود؛ زیرا بسیاری از سازندگان و پیمانکاران با وجود شناخت از مزایا، نسبت به کیفیت تولید و کارپذیری آن تردید دارند. استفاده از روان‌کننده‌ها برای بهبود کارایی ضروری است و عدم استفاده صحیح از آن می‌تواند منجر به افزایش آب و افت کیفیت بتن شود.

در حوزه تولید، مشکلاتی همچون افزودن یکنواخت الیاف در بچینگ‌ها، نحوه توزین و تزریق اتوماتیک، و مدیریت درصد حجمی بالا (۱ تا ۲ درصد) مطرح است. همچنین انتخاب روش مناسب افزودن الیاف (در بچینگ، تراک میکسر یا محل پروژه) اهمیت زیادی دارد. در اجرا، نحوه پمپاژ بتن الیافی، آشنایی اپراتورها با ویژگی‌های این نوع بتن و اجتناب از ویبره داخلی از نکات کلیدی است؛ زیرا ویبره موجب جهت‌گیری ناخواسته الیاف و کاهش کارایی مکانیکی آن‌ها می‌شود. بنابراین، بتن الیافی باید به سمت خودتراکمی هدایت شود. به عنوان تجربه عملی، در پروژه‌ای مربوط به کف‌سازی نمایشگاه ماشین‌آلات سنگین، از بتن الیافی استفاده شد تا کف مقاومت بالایی در برابر بارهای سنگین و ترک‌خوردگی داشته باشد. این تجربه نشان داد که آگاهی تولیدکنندگان و پیمانکاران از نوع مناسب الیاف و نحوه صحیح افزودن آن‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت پروژه دارد.

یژوهش‌های مورد نیاز بتن الیافی و آینده آن

با توجه به ویژگی‌های الیاف، باید تأکید شود که عملکرد آن‌ها را نمی‌توان با آرماتور مقایسه کرد. آرماتور به‌طور متمرکز در بخشی از مقطع قرار می‌گیرد و به همین دلیل، اثر آن در کل مقطع به صورت یکنواخت مشاهده نمی‌شود. هرچند آرماتور در تأمین مقاومت کششی و خمشی نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند، اما در زمینه شکل‌پذیری و افزایش ظرفیت تغییرشکل خمشی عملکرد قابل توجهی ندارد. در مقابل، الیاف به‌ویژه در کاهش شکنندگی ترد بتن تأثیر بسزایی دارند.

ترکیب اهمیت عملکرد الیاف با موضوع صرفه‌جویی اقتصادی در بتن‌های الیافی می‌تواند زمینه‌ساز توسعه کاربرد آن‌ها در سازه‌ها باشد. استفاده از الیاف این امکان را فراهم می‌آورد که گسیختگی ترد سازه‌ها تا حد زیادی کنترل شود. با توجه به حوادثی همچون زمین‌لرزه و رخدادهای مشابه، استفاده از الیاف می‌تواند زمان بیشتری برای دستیابی به وضعیت ایمن در اختیار بهره‌برداران قرار دهد و به افزایش سطح اطمینان آن‌ها کمک کند. بدین ترتیب، ترویج کاربرد الیاف در بتن، چه در ایران و چه در سطح بین‌المللی، می‌تواند گامی مؤثر در ارتقای ایمنی و دوام سازه‌ها به شمار آید.

آینده صنعت بتن

با توجه به پیشرفت‌هایی که تاکنون در حوزه تکنولوژی بتن حاصل شده است، می‌توان گفت این ماده جایگاه خود را در پروژه‌های عمرانی، سازه‌ای و سایر مصارف مرتبط بیش از پیش تثبیت کرده است. در حال حاضر به سختی می‌توان رقیب جدی و تأثیرگذاری برای بتن متصور شد و اگر چنین رقیبی نیز در آینده ظهور کند، به نظر نمی‌رسد که این اتفاق در کوتاه‌مدت رخ دهد.

با این وجود، در میان گزینه‌های بالقوه برای جایگزینی بتن، خانواده پلیمرها بیشترین پتانسیل را دارا هستند. یکی از مهم‌ترین اعضای این خانواده، مواد پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف می‌باشند که تاکنون کاربرد آن‌ها در زمینه تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌ها به خوبی مشاهده شده است. این مواد قادرند با وجود ضخامت بسیار اندک، افزایش چندانبرابری مقاومت را برای مقاطع آسیب‌دیده فراهم سازند. این ویژگی، پدیده‌ای بسیار چشمگیر و جالب توجه به شمار می‌رود. البته باید توجه داشت که هزینه این مواد نسبتاً بالا است و این مسئله، به عنوان بخشی از خانواده بزرگ پلیمرها، همواره مطرح بوده است.

چالش اساسی آینده در این زمینه آن است که آیا می‌توان پلیمرهایی را توسعه داد که امکان احداث مستقیم سازه‌ها بر پایه آن‌ها فراهم شود و در عین حال از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه باشند. ممکن است در آینده موادی پدید آیند که هرچند چندین برابر بتن هزینه اولیه داشته باشند، اما با کاهش سایر هزینه‌ها در طول عمر پروژه، توجیه اقتصادی پیدا کنند. با این حال، تحقق چنین تحولی در کوتاه‌مدت چندان محتمل به نظر نمی‌رسد و می‌توان انتظار داشت که این مسیر زمان‌بر باشد.

{بخش چهارم}

جایگاه علمی

نوآوری های علمی

فناوری بدون مرز



۱- جایگاه علمی

روند توسعه علمی بتن الیافی از دهه ۱۹۶۰ میلادی آغاز شد و با پیشرفت فناوری‌های تولید الیاف و شناخت بهتر رفتار بتن، به یکی از **محورهای اصلی تحقیقات مهندسی عمران** تبدیل گردید. امروزه، با گسترش پایگاه‌های داده علمی و ابزارهای تحلیل علم‌سنجی، امکان بررسی دقیق‌تر ساختار مفهومی، روندهای پژوهشی و همکاری‌های علمی در این حوزه فراهم شده است.

مطابق با شکل ۴-۱ روند رشد **تعداد اسناد در زمینه بتن الیافی از سال ۲۰۰۵ میلادی** به بعد بسیار افزایش یافته و به عنوان یک موضوع جدید و مهم در سطح جهانی مورد توجه قرار گرفته است.

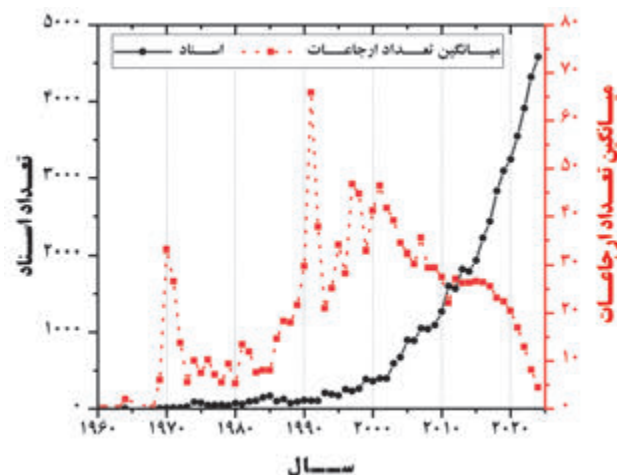
بتن الیافی یکی از مهم‌ترین تحولات در حوزه مصالح ساختمانی است که طی دهه‌های اخیر به‌طور گسترده در تحقیقات علمی و پروژه‌های عمرانی مورد توجه قرار گرفته است. این نوع بتن با ترکیب الیاف مختلف در ساختار خود، توانسته است خواصی چون مقاومت کششی، شکل‌پذیری، دوام، و مقاومت در برابر ضربه و ترک‌خوردگی را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد. استفاده از الیاف فولادی، پلیمری، شیشه‌ای و کربنی در بتن، امکان طراحی سازه‌هایی با عملکرد بالا را فراهم کرده و نقش مهمی در افزایش عمر مفید سازه‌ها ایفا کرده است.



شکل ۴-۲- نقشه علمی مصورسازی شبکه‌ای
هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها

جایگاه نشان‌دهنده نقش محوری این مفاهیم در ادبیات علمی بتن الیافی است. نکته مهم دیگر، ارتباط نزدیک مفاهیم در این شبکه است. واژه‌هایی که با خطوط متعدد به یکدیگر متصل‌اند، بیانگر آن هستند که در بسیاری از مقالات علمی به صورت هم‌زمان به کار رفته‌اند و میان آن‌ها پیوند مفهومی وجود دارد. به عنوان نمونه، "reinforced concrete" با واژه‌هایی مانند "tensile"، "steel fibers"، "fibers"، "strength" و "bending strength" ارتباط‌های متعددی دارد که نشان می‌دهد تحقیقات زیادی به بررسی رفتار مکانیکی بتن مسلح با استفاده از انواع مختلف الیاف پرداخته‌اند. همچنین، واژه‌هایی مانند "reinforced concrete"، "forced plastics"، "carbon fibers" و "glass fibers" در

علاوه‌براین، در سال ۱۹۹۱ میلادی مقاله با عنوان "تیرهای بتنی مسلح تقویت‌شده با صفحات پلیمر مسلح‌شده با الیاف شیشه" بیشترین ارجاع را از بین تمام اسناد داشته و باعث افزایش چشمگیر میانگین تعداد ارجاعات در سال ۱۹۹۱ میلادی نسبت به دیگر سال‌ها شده است.



شکل ۴-۱- روند توسعه اسناد در زمینه بتن الیافی

بررسی روند پژوهش‌های علمی در این حوزه نشان می‌دهد که مفاهیم کلیدی مشخصی به‌عنوان محورهای اصلی مطالعات شناخته شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۴-۲ مشاهده می‌شود، واژگانی مانند "steel fiber"، "reinforced concrete"، "high performance concrete"، "fibers" و "ers" با دایره‌های بزرگ‌تر و موقعیت مرکزی در شبکه هم‌زمانی کلمات کلیدی نمایش داده شده‌اند. این

کنار مفاهیمی چون "corrosion resistance" و "durability" قرار دارند که نشان‌دهنده نقش این مواد در بهبود دوام و عملکرد بتن است.

در مجموع، این تصاویر نمای روشنی از تحولات علمی در حوزه بتن الیافی ارائه می‌دهند و نشان می‌دهند که تحقیقات این حوزه از جنبه‌های متنوعی همچون خواص مکانیکی، دوام، فناوری الیاف، و مسائل زیست محیطی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اما این تصویر، زمانی معنا و عمق بیشتری پیدا می‌کند که با تحلیل زمانی کلمات کلیدی (شکل ۴-۳) ترکیب شود. در تصویری که با تحلیل زمانی همراه است، رنگ‌ها از آبی تا زرد تغییر می‌کنند که بیانگر بازه‌های زمانی متفاوت در زمینه استفاده از کلمات کلیدی در مقالات علمی است. به‌طور مشخص، کلماتی که با رنگ‌های زرد و سبز مشخص شده‌اند، بیشتر در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این روند نشان می‌دهد که موضوعاتی مانند "high performance concrete"، "steel fibers"، "fibers" و "concrete" در سال‌های اخیر به شکل چشم‌گیری رشد داشته‌اند و سهم قابل توجهی در پژوهش‌های جدید ایفا کرده‌اند. در مقابل، کلمات کلیدی مانند "finite element"، "seismic response"، "numerical model" و "method" که با رنگ‌های آبی مشخص شده‌اند، بیشتر در سال‌های گذشته کاربرد داشته‌اند و به نوعی نشان‌دهنده تحقیقات اولیه و نوین در این حوزه‌اند.

از طرفی، حضور مفاهیمی مانند "self-compacting"، "sustainable development"، "concrete" و "recycling"

در میان کلمات کلیدی نشان‌دهنده توجه روزافزون پژوهشگران به موضوعات نوآورانه و محیط‌زیست‌محور در صنعت بتن است. این نکته، خود مؤید این واقعیت است که روند تحقیقاتی به‌تدریج از تمرکز صرف بر خواص مکانیکی، به سوی توسعه پایدار و کاربردهای سازگار با محیط‌زیست در حرکت است. واژه‌هایی که در سال‌های اخیر بیشتر استفاده شده‌اند، می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های مناسبی برای شناسایی موضوعات روز و اولویت‌دار در نگارش مقالات و طرح‌های پژوهشی مورد استفاده قرار گیرند. این تحلیل‌ها می‌توانند مبنای مفیدی برای جهت‌گیری آینده پژوهش‌ها و انتخاب موضوعات نوآورانه باشند.



شکل ۴-۳- نقشه علمی مصورسازی هم‌پوشانی
هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها

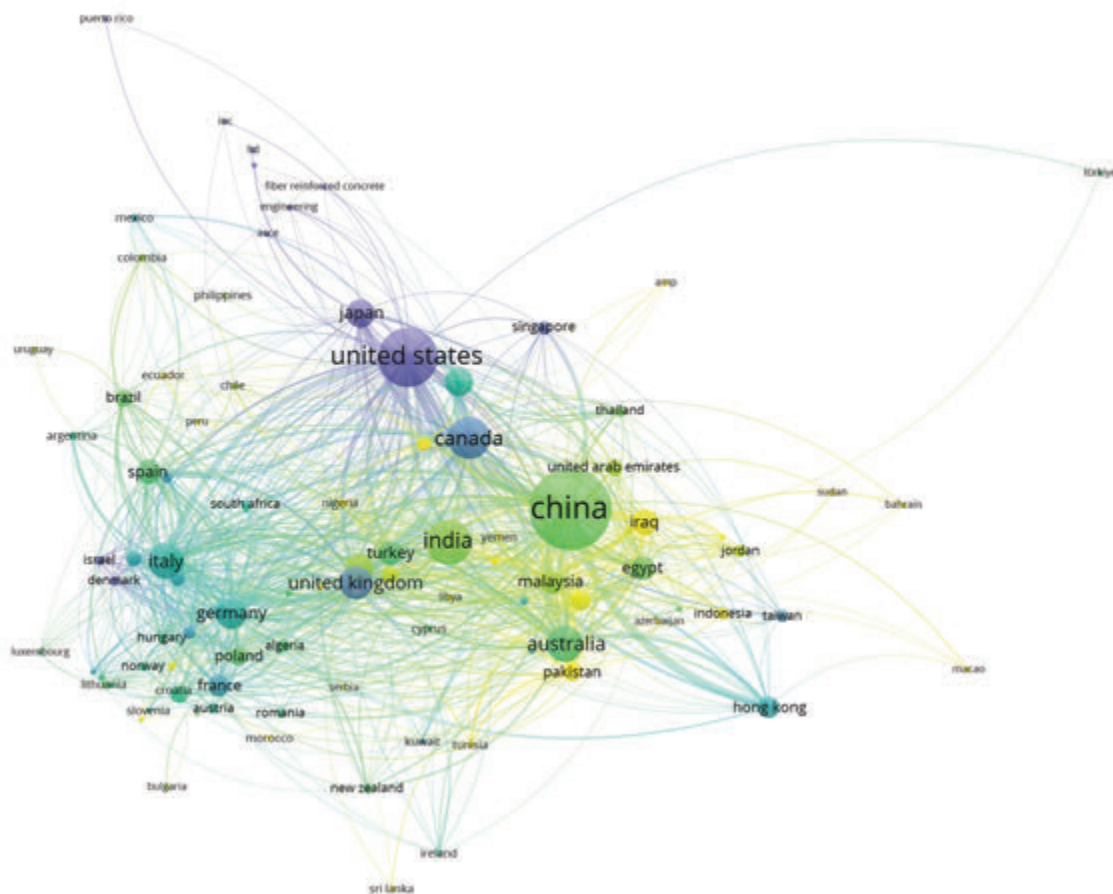


شکل ۴-۴- نقشه علمی مصورسازی شبکه‌ای
هم‌رخدادی کشورها

اما برای درک بهتر پویایی این شبکه، شکل ۴-۵ اهمیت ویژه‌ای دارد. این تصویر با استفاده از رنگ‌بندی زمانی، روند تحول همکاری‌های علمی را نشان می‌دهد. کشورهای با رنگ‌های سبز و زرد، نشان‌دهنده همکاری‌های بیشتر در سال‌های اخیر هستند. در مقایسه با کشورهایی که به رنگ آبی و بنفش دیده می‌شوند (که به سال‌های ابتدایی‌تر مربوط هستند)، کشورهای آسیایی مانند چین و هند در سال‌های اخیر بیشترین رشد را در همکاری‌های تحقیقاتی تجربه کرده‌اند. کشورهای هند، مالزی و استرالیا نیز در حال افزایش نقش خود در همکاری‌های تحقیقاتی هستند. تحلیل‌های مربوط به همکاری‌های بین‌المللی کشورها در سال‌های اخیر

شکل ۴-۴- نقشه مصورسازی هم‌پوشانی و هم‌رخدادی کشورها را نشان می‌دهد. کشورها با دایره‌های بزرگتر، بیشترین نقش را در تحقیقات مربوط به بتن الیافی دارند. ایالات متحده و چین در مرکز قرار دارند و حجم ارتباطات زیادی با کشورهای دیگر دارند. ایالات متحده بیشترین میزان همکاری را با کشورهای مختلف، از جمله آلمان، فرانسه، ژاپن و بریتانیا دارد. همچنین، این تصویر نشان‌دهنده ارتباطات اخیر در سال‌های مختلف است. کشورهای آمریکای جنوبی مانند برزیل و آرژانتین در مقایسه با کشورهای آسیایی یا اروپایی، ارتباطات کمتری دارند. ایران، پاکستان و عربستان سعودی نیز به‌وضوح ارتباطات زیادی با کشورهای آسیایی و اروپایی برقرار کرده‌اند. کشورهای اروپایی، به‌ویژه ایتالیا، آلمان و فرانسه، در مرکز قرار دارند و ارتباطات خوبی با کشورهای مختلف ایجاد کردند، به‌ویژه در همکاری با کشورهای آسیایی و آفریقایی. چین نیز با کشورهای بسیاری ارتباط دارد، به‌ویژه با کشورهای آسیایی و آفریقایی. کشورهای اروپایی، به‌ویژه ایتالیا، آلمان و فرانسه، در مرکز قرار دارند و ارتباطات خوبی با کشورهای مختلف دارند، به‌ویژه در همکاری با کشورهای آسیایی و آفریقایی. علاوه‌براین، چین نیز با کشورهای بسیاری ارتباط دارد، به‌ویژه با کشورهای آسیایی و آفریقایی.

به‌طور کلی، شکل ۴-۴ به‌وضوح نشان می‌دهد که ایالات متحده و چین به‌عنوان **دو بازیگر اصلی در تحقیق و همکاری‌های علمی جهانی در زمینه بتن الیافی** و دیگر شاخه‌های علمی برجسته هستند.

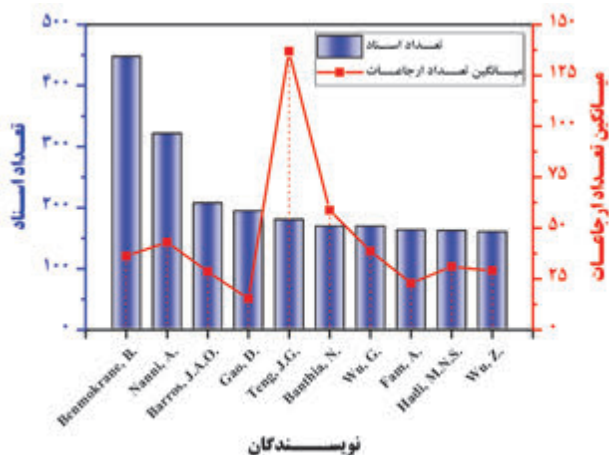


شکل ۴-۵ نقشه علمی مصورسازی هم‌پوشانی هم‌رخدای کشورها

در ادامه بررسی پیشینه پژوهش در زمین بتن الیافی به کشورهای پیش‌تاز در این زمینه اشاره می‌شود. مطابق شکل ۴-۶، ده کشور برتر از نظر تعداد اسناد در زمینه بتن الیافی را مشاهده می‌شود که کشور

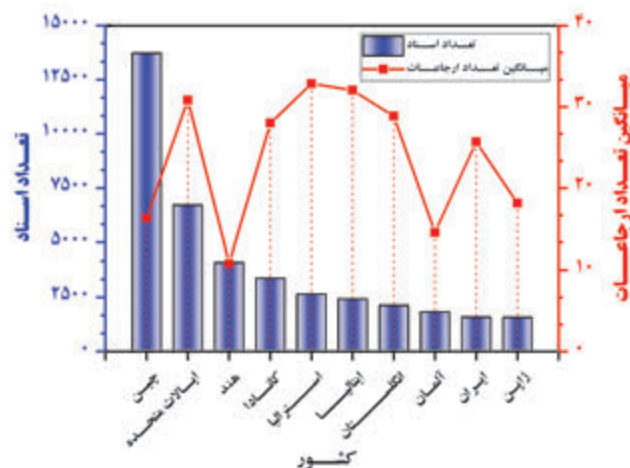
نشان می‌دهند که همکاری‌های کشورهای آسیایی به‌طور خاص در حال افزایش است، در حالی که کشورهای اروپایی همچنان در صدر ارتباطات علمی جهانی قرار دارند.

دارد. به طور مثال، مقاله با عنوان «مدل تنش- کرنش با گرایش طراحی برای بتن محصورشده توسط پلیمر مسلح شده با الیاف» از این پژوهشگر بیشترین تعداد ارجاع و توجه را دارد.



شکل ۴-۷- تعداد اسناد و میانگین تعداد ارجاعات اسناد پژوهشگران در زمینه بتن الیافی.

چین بیشترین تعداد اسناد را در زمینه بتن الیافی منتشر کرده است. قابل توجه است که کشور ایران در جایگاه نهم قرار دارد. کشور چین با وجود تعداد اسناد بالا، تعداد ارجاعات بسیار کمتری نسبت به کشورهای همچون استرالیا، ایتالیا و ایران دارد.



شکل ۴-۶- تعداد اسناد و میانگین تعداد ارجاعات اسناد کشورها در زمینه بتن الیافی

همچنین، شکل ۴-۷، ده نویسنده برتر در زمینه بتن الیافی با بیشترین تعداد اسناد چاپ شده را نمایش می دهد. پژوهشگر Benmokrane, B بیشترین تعداد اسناد را چاپ کرده است، اما به نسبت تعداد اسناد زیاد، ارجاعات مقالات کمتری داشته است، در حالی که پژوهشگر Teng J,G بیشترین تعداد ارجاع به نسبت تعداد اسناد را

۲- نوآوری‌های علمی

و سدها برای افزایش دوام و باربری؛ در قطعات پیش‌ساخته مانند پانل‌های معماری، لوله‌ها و المان‌های نما برای کاهش جمع‌شدگی و ارتقای کیفیت سطحی؛ و در سازه‌های خاص نظیر تأسیسات دریایی، سازه‌های مقاوم در برابر زلزله و انفجار به دلیل توانایی بالا در جذب انرژی. در این بخش از مجله، به بررسی سه مقاله علمی و نوآورانه پرداخته‌ایم که هر یک به ابعاد جدیدی از فناوری مرتبط با بتن الیافی پرداخته‌اند.

در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در حوزه بتن الیافی صورت گرفته است که تمرکز اصلی آن‌ها بر ارتقای مقاومت مکانیکی، دوام و پایداری سازه‌ای بوده است. نوآوری‌های علمی در این مطالعات عمدتاً در سه محور قابل شناسایی‌اند: نخست، کاربردهای نوین در فناوری‌های ساخت پیشرفته نظیر چاپ سه‌بعدی بتن؛ دوم، ظرفیت برشی بتن سبک خودتراکم پرمقاومت مسلح به الیاف و سوم، عملکرد بتن الیافی در آتش است. این نوع بتن در صنایع گوناگون به کار گرفته شده است؛ از جمله در زیرساخت‌های عمرانی مانند کف‌سازی‌های صنعتی، روسازی‌ها، پل‌ها، تونل‌ها

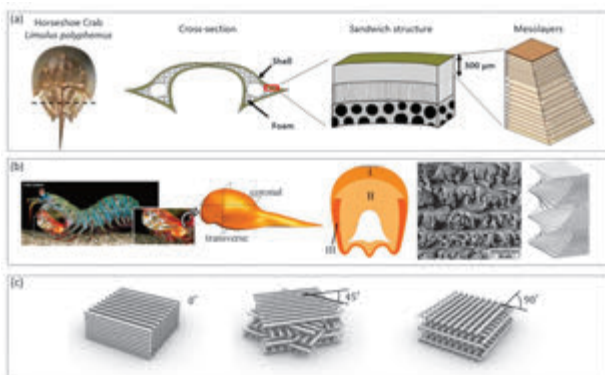
۴-۱- طراحی و عملکرد تیرهای خمیده کامپوزیت سیمانی تقویت شده با الیاف فولادی در چاپ سه بعدی شده به الگوی بولیگاند

• مقدمه

چاپ سه بعدی بتن امکان ساخت معماری‌های پیچیده الهام گرفته از طبیعت را فراهم می‌کند که خواص مکانیکی و سازه‌ای را بهبود می‌بخشند. این پژوهش چارچوبی دیجیتال برای تولید معماری‌های داخلی بتن مسلح به الیاف روی سطوح غیرتخت ارائه می‌دهد. تیرهای قوسی با الگوی بولیگاند چاپ و ریزساختار و خواص آن‌ها بررسی شدند. نتایج نشان داد این ساختار تخلخل را کاهش داده و مقاومت برشی خمشی را افزایش می‌دهد. در مقایسه با تیرهای تخت، تأثیر بولیگاند در تیرهای قوسی برجسته‌تر است و الگوی شکست را از ترد به شکل پذیر با ترک‌های متعدد تغییر می‌دهد. همچنین، «انحنای قوس» و «الگوی پرکننده» در حفظ یکپارچگی سازه حیاتی هستند. **تردی و مقاومت کششی پایین از ضعف‌های بتن است و به دلیل محدودیت هندسی، مسلح‌سازی سازه‌های چاپ سه بعدی بتن با میلگرد دشوار است؛ بنابراین استفاده از بتن مسلح به الیاف اهمیت یافته است.** مزیت کلیدی این کامپوزیت، امکان کنترل جهت‌گیری الیاف از طریق «طراحی مسیر ابزار» است که مشابه لمینیت‌های پلیمری بر عملکرد سازه اثرگذار

است. با این حال، به دلیل پیوند ضعیف فلامان‌ها و کوتاهی الیاف، دستیابی به تداوم تنش دشوار می‌ماند و رفتار ناهمسانگردی مشابه مواد طبیعی پدید می‌آورد. از این رو «طراحی زیست‌الهام» جایگاهی محوری در چاپ سه بعدی بتن یافته است. طبیعت طی تکامل طولانی ساختارهایی بهینه برای حفاظت ایجاد کرده و منبع غنی الهام طراحی محسوب می‌شود. نمونه شاخص آن، «ساختار بولیگاند» است که **چینش مارپیچی الیاف** در پوسته خرچنگ نعل اسبی، گرز میگو و عاج فیل را تقلید می‌کند.

شکل ۴-۸ ساختار بولیگاند را نشان می‌دهند که در (a) لایه‌های میانی برون اسکلت قوسی خرچنگ نعل اسبی، (b) ناحیه تناوبی (II) در گرز پنجه میگو که به دلیل جذب انرژی زیاد و مقاومت در برابر آسیب شناخته می‌شود نیز شامل ساختار بولیگاند است. همچنین، (c) طرح واره‌ای از ساختار بولیگاند با زاویه‌های گام (P) برابر با صفر درجه، ۴۵ درجه و ۹۰ درجه است.



شکل ۴-۸ - ساختار بولیگاند

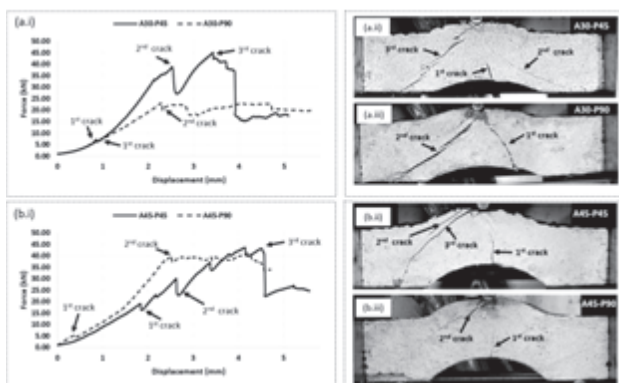
ویسکوریولوژی بتن تازه در آزادی هندسی چاپ نقش تعیین کننده دارد: مخلوط باید میان پمپاژپذیری و پایداری لایه ها تعادل برقرار کند. محدودیت های ذاتی ساخت، تولید سازه های اورهنگ (نظیر قوس ها) را دشوار کرده است. دل اندیچه و همکاران پلی قوسی را مشابه منطق آجری مونتاژ کردند، همچنین، لی و همکاران قوس های بتنی با الگوی زیگزاگ چاپ نمودند. باین حال، به علت ضعف مقاومت بتن تازه، بازتولید معماری سه بعدی الیاف هنوز چالش برانگیز است و اغلب مطالعات پیشین به تیرها، منشورها و دیسک های تخت محدود مانده اند. اگرچه قابلیت چاپ روی سطوح غیرتخت نشان داده شده، اغلب پژوهش ها بر پوسته های نازک و سازه های توخالی با ملات ساده متمرکز بوده اند و بتن مسلح به الیاف کمتر بررسی شده است. همچنین پژوهش های اندکی به عملکرد مکانیکی، جهت گیری الیاف و ریزساختار مصنوعات هم پیکره پرداخته اند؛ در نتیجه، اثر چاپ سه بعدی روی سطوح غیرتخت همچنان مبهم مانده و کمبود داده های آزمایشگاهی مانعی جدی برای توسعه آینده است.

• روش تحقیق

این بخش گام های ایجاد مسیر ابزار (toolpath) روی سطح غیر تخت بر مبنای راهبرد «جهت موازی» و تبدیل مدل های دیجیتالی به GCode برای چاپ سه بعدی را تشریح می کند. سپس نمونه ها برای تحلیل Micro-CT و آزمون خمش سه نقطه ای

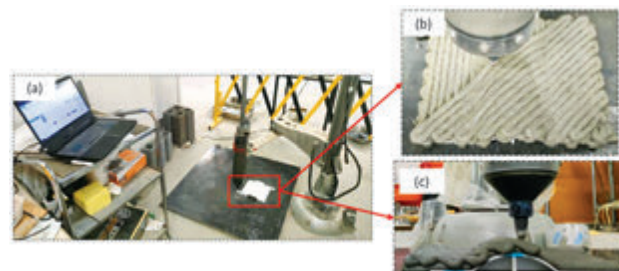
با قيود افقی آماده می شوند و چیدمان آزمایش توضیح داده می شود. فرآیند معمول با مدل سازی CAD آغاز می شود؛ برش های لایه ای به مقاطع دوبعدی تبدیل و در نهایت به کدهای کنترلی ماشین ترجمه می شوند که نوع حرکت، مختصات نقاط هدف، سرعت و حجم برون ریزی را تعریف می کند. اما برای چاپ سه بعدی روی سطح غیر تخت باید راهبردی متفاوت به کار برد، زیرا نازل باید انحنای تکیه گاه را دنبال کند.

در این پژوهش پس از ایجاد هندسه تکیه گاه، مسیر پرکننده زیگزاگ (راهبرد جهت موازی) روی انحنای تکیه گاه ساخته می شود تا هم آرایش هلیکویی الیاف و هم انحنای برون اسکلت های طبیعی تقلید گردد. الگوریتم، آرایه ای از خطوط راست با فواصل ثابت را در راستای عمود بر «جهت مرجع» تولید می کند و نقاط ابتدا/انتها را به صورت زیگزاگ پیوست می دهد. در لایه های متوالی، جهت مرجع به اندازه «زاویه گام» به صورت پادساعتگرد می چرخد، مسیر دوبعدی ساخته شده روی سطح تکیه گاه پرتو افکنی و به اندازه «ارتفاع لایه» افست عمودی داده می شود. این عملیات برای همه لایه ها تکرار می شود تا آرایش بولیگاند شکل گیرد. همه نمونه ها ۷ لایه دارند و زاویه گام P در سه حالت صفر درجه، ۴۵ درجه یا ۹۰ درجه تنظیم شده است. و در پایان، مسیر ابزار به GCode گردآوری شده است. شکل ۴-۹ فرآیند چاپ سه بعدی بتن را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۰- منحنی‌های نیرو-جابجایی

متعدد انرژی بیشتری جذب می‌کند. شکل ۴-۱۰ نشان می‌دهد زاویه گام اثرگذار است؛ زاویه ۴۵ درجه بهترین عملکرد را دارد، در حالی که زاویه ۹۰ درجه با وجود بهبود نسبت به زیگزاگ، کارایی کمتری نشان می‌دهد. تصاویر شکست حاکی از آن بود که الیاف فولادی در مقاطع ترک خورده نقش پل ایفا کرده و از بازشدگی سریع ترک جلوگیری می‌کنند؛ ترکیب این اثر با الگوی بولیگاند موجب شکل‌پذیری و جذب انرژی بیشتر شد. همچنین، آزمایش‌ها نشان دادند اعمال قید افقی در دو انتهای قوس حیاتی است؛ بدون آن، جدایش سریع از تکیه‌گاه و گسیختگی ناگهانی رخ می‌دهد. با وجود بهبود رفتار مکانیکی، ناهمسانگردی همچنان شدید است و مقاومت خمشی در برخی آرایش‌ها کمتر از بتن معمولی باقی می‌ماند؛ از این رو، بهینه‌سازی طراحی مسیر و ترکیب مواد ضروری است. در مجموع، الگوی بولیگاند (به‌ویژه در زاویه ۴۵ درجه) همراه با انحنای مناسب



شکل ۴-۹- فرآیند چاپ سه‌بعدی بتن

• نتیجه‌گیری

ریزساختار تیرهای قوسی چاپ‌شده، شامل تخلخل کلی، توزیع اندازه حفرات، و مورفولوژی ترک‌مانند، به کمک Micro-CT بازسازی و تحلیل شد. این ارزیابی نشان داد که افزودن ساختار بولیگاند در مقایسه با الگوی زیگزاگ معمولی، تخلخل کلی را کاهش می‌دهد و آرایش حفرات یکنواخت‌تر می‌شود. بولیگاند باعث کاهش تخلخل، توزیع یکنواخت‌تر حفرات و حذف کانال‌های ضعیف‌کننده می‌شود. این موضوع می‌تواند مقاومت مکانیکی و پایداری ترک‌ها را بهبود دهد.

نمونه‌های قوسی با الگوهای مختلف تحت بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای آزمایش شدند. نتایج هم منحنی‌های نیرو-جابجایی و هم الگوهای ترک را پوشش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد، قوس‌های بولیگاند در مقایسه با زیگزاگ ظرفیت باربری بالاتری دارند و رفتار نرم‌تر از خود نشان می‌دهند. نمونه‌های زیگزاگ پس از رسیدن به بار اوج به سرعت گسیخته می‌شوند، در حالی که بولیگاند با ایجاد ترک‌های

و حضور الیاف فولادی، شکست ترد را به شکست شکل‌پذیر با ترک‌های متعدد تغییر داده و ظرفیت جذب انرژی را به‌طور چشمگیر افزایش می‌دهد.

۴-۲- ظرفیت برشی بتن سبک خودتراکم پرمقاومت مسلح شده با الیاف

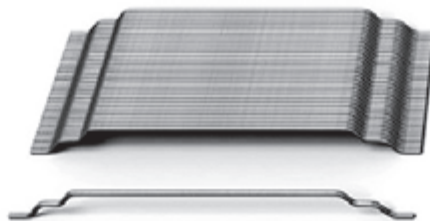
• مقدمه

در این پژوهش، اثر جایگزینی جزئی سنگدانه سبک با معمولی و نیز نوع و ترکیب الیاف بر ظرفیت برشی بتن خودتراکم سبک پرمقاومت بررسی شد. برای این منظور، ۱۲ تیر مستطیلی بدون آرماتور برشی با نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر $3/1$ ساخته و آزمایش گردید. نتایج نشان داد جایگزینی

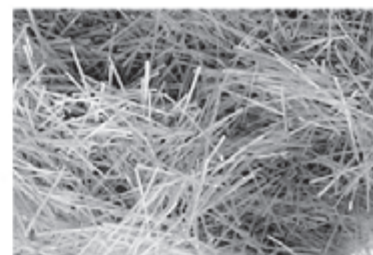
سنگدانه سبک با معمولی موجب کاهش اندک مقاومت فشاری، اما بهبود مقاومت خمشی و برشی شد. افزودن الیاف فولادی سه‌بعدی، پنج‌بعدی و الیاف مصنوعی (به‌صورت منفرد یا ترکیبی با سهم حجمی ۷۵/۰ درصد) باعث افزایش مقاومت برشی، سختی، شکل‌پذیری و بهبود الگوی ترک‌ها گردید. با توسعه سازه‌های بلند، دریایی و پل‌های بزرگ، بتن سبک به‌عنوان مصالح نوین مورد توجه است. مزایای اصلی آن شامل عایق حرارتی و صوتی، کاهش بار مرده، مقاومت در برابر آتش، نسبت مقاومت به وزن بیشتر، انبساط حرارتی کمتر، دوام در چرخه یخ‌زدگی و کاهش هزینه‌ها است؛ هرچند ظرفیت برشی کمتر نسبت به بتن معمولی محدودیت ایجاد می‌کند. بتن خودتراکم با روانی زیاد، قابلیت پر کردن قالب‌های پیچیده، کاهش هزینه و زمان اجرا و بهبود دوام و کیفیت سطح نهایی را دارد. ترکیب



(a) 3D SF



(b) 5D SF



(c) SY

شکل ۴-۱۱- انواع الیاف مورد استفاده فولادی و مصنوعی پلی‌پروپیلن

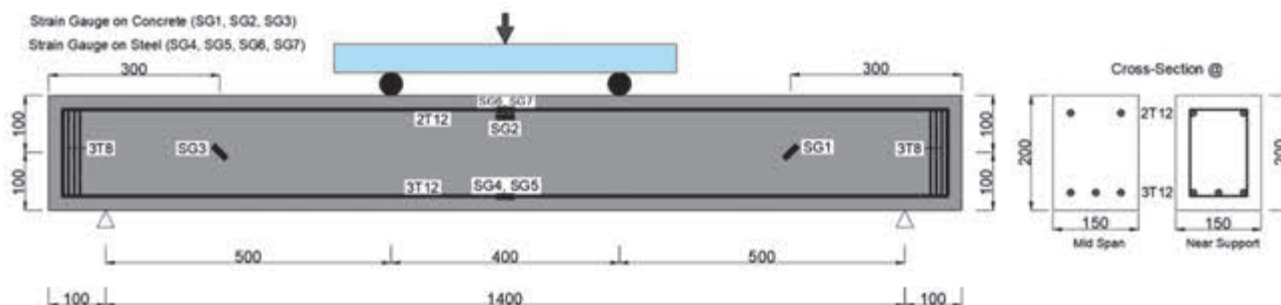
ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر مطابق شکل ۴-۱۲ ساخته شد. جزئیات طرح مخلوط این تیرها در جدول ۴-۱ قابل مشاهده است.

چون سنگدانه سبک جذب آب زیاد (۱۵ درصد) دارد، برای کنترل کارایی بتن، پیش‌اشباع‌سازی سنگدانه‌های سبک انجام شد. این کار با ترکیب ۱۰ درصد آب مخلوط، ۱۰ درصد دوده سیلیس و ۱۰ درصد سیمان به مدت ۳۰ دقیقه قبل از مخلوط‌کردن اصلی صورت گرفت. این روش باعث بهبود منطقه انتقالی (ITZ) و پیوند بهتر خمیر سیمان با سطح سنگدانه شد. همچنین، برای جلوگیری از تمرکز تنش و شکست در محل بارگذاری یا حمل‌ونقل، در دو انتهای تیرها از ۳ عدد خاموت بسته $\Phi 8$ با فاصله ۳۰ میلی‌متر استفاده شد. در ناحیه برشی (دهانه برشی) خاموتی وجود نداشت تا اثر الیاف بر ظرفیت برشی ارزیابی شود.

این فناوری با بتن سبک، بتن سبک خودتراکم را پدید آورده که مزایای هر دو سیستم را دارد. اخیراً با افزودن الیاف، بتن سبک خودتراکم الیافی معرفی شده است که ویژگی‌هایی نظیر مقاومت کششی، مدول گسیختگی، چقرمگی، مقاومت خستگی و ضربه، مقاومت سایشی و ظرفیت برشی را ارتقا می‌دهد. این اثرات عمدتاً از قطع مسیر انتشار ریزترک‌ها ناشی می‌شوند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند الیاف فولادی ظرفیت برشی و تغییرمکان نهایی را به‌طور چشمگیر افزایش می‌دهند، در حالی‌که الیاف مصنوعی شکل‌پذیری، کنترل ترک و دوام بتن را بهبود می‌بخشند. استفاده از الیاف هیبریدی نیز اثر هم‌افزایی داشته و موجب افزایش مقاومت فشاری، کششی و برشی می‌شود.

• روش تحقیق

تعداد ۱۲ تیر مستطیلی (۲ تیر از هر مخلوط) با ابعاد طول ۱۶۰۰ میلی‌متر، عرض مقطع ۱۵۰ میلی‌متر،



شکل ۴-۱۲- جزئیات ابعاد تیر و آرماتورگذاری

Mix	سیمان	دوده سیلیس	LWA	NWA	ماسه بادی	ماسه درشت	آب	3D SF	5D SF	SY
M1	+۰/۱۲	+۰/۰۵	+۰/۳۷	-	+۰/۱۳۵	+۰/۱۳۵	+۰/۱۹	-	-	-
M2	+۰/۱۲	+۰/۰۵	+۰/۳۲۶	+۰/۰۴۴	+۰/۱۳۵	+۰/۱۳۵	+۰/۱۹	-	-	-
M3	+۰/۱۲	+۰/۰۵	+۰/۳۲۶	+۰/۰۴۴	+۰/۱۳۱	+۰/۱۳۱	+۰/۱۹	+۰/۰۷۵	-	-
M4	+۰/۱۲	+۰/۰۵	+۰/۳۲۶	+۰/۰۴۴	+۰/۱۳۱	+۰/۱۳۱	+۰/۱۹	-	+۰/۰۷۵	-
M5	+۰/۱۲	+۰/۰۵	+۰/۳۲۶	+۰/۰۴۴	+۰/۱۳۱	+۰/۱۳۱	+۰/۱۹	-	-	+۰/۰۷۵
M6	+۰/۱۲	+۰/۰۵	+۰/۳۲۶	+۰/۰۴۴	+۰/۱۳۱	+۰/۱۳۱	+۰/۱۹	-	+۰/۰۳۷۵	+۰/۰۳۷۵

جدول ۴-۱ طرح مخلوط‌ها (نسبت حجمی)

نتیجه‌گیری

جایگزینی ۱۲ درصد سنگدانه سبک به جای سنگدانه معمولی، باعث کاهش جزئی مقاومت فشاری شد با این حال مقاومت خمشی افزایش پیدا کرد. همچنین، افزودن الیاف باعث افزایش چشمگیر هر دو مقاومت، به ویژه مقاومت خمشی شده است. الیاف فولادی 5D به دلیل مقاومت کششی زیاد و قلاب دار بودن، پیوستگی قوی تری با ماتریس سیمانی ایجاد کرده اند و بهترین عملکرد را داشتند. همچنین، ترکیب هیبریدی (5D+SY) به خاطر اثر هم افزایی، عملکرد بالایی داشته است. الیاف مصنوعی به دلیل مدول کم و احتمال لغزش بیشتر، اثر کمتری گذاشتند.

واضح است که تیرهای دارای الیاف پس از ترک خوردگی نیز توانایی تحمل بار اضافی و تغییر مکان بیشتر دارند. بهترین عملکرد مربوط به الیاف هیبریدی، ترکیب فولادی (سختی و مقاومت اولیه) + مصنوعی (چقرمگی و کنترل ترک)، است. جالب این که 3D و 5D فولادی عملکرد تقریباً مشابهی داشتند، ولی 3D در مقایسه با مقاومت فشاری، بهبود نسبی بیشتری نشان داد. دلیل آن توزیع بهتر و تعداد بیشتر الیاف 3D در مقطع بوده است. الیاف مصنوعی به دلیل مدول کم و پراکنش کمتر، اثرگذاری ضعیف تری نسبت به فولادی‌ها داشتند.

در همه تیرها، ترک‌های خمشی در وسط دهانه در بارهای اولیه ظاهر شدند. با افزایش بار، ترک‌ها در

ناحیه برشی توسعه یافته و به صورت مورب به سمت نقطه بارگذاری حرکت کردند و ترک‌های برشی قطری تشکیل دادند. تیرهای دارای الیاف ترک‌های بیشتری داشتند اما فاصله ترک‌ها کمتر بود و به ناحیه فشاری هم کشیده شدند که موجب رفتار شکل‌پذیرتر و کنترل ترک بهتر می‌شوند. تیر کنترل (بدون الیاف) خیلی زود پس از ترک قطری شکست ترد داد.

این پژوهش نشان داد که جایگزینی جزئی سنگدانه معمولی در بتن سبک باعث بهبود رفتار برشی و کنترل ترک‌ها می‌شود، هرچند مقاومت فشاری کمی کاهش می‌یابد. افزودن الیاف (به‌ویژه فولادی و هیبریدی) به‌طور چشمگیری ظرفیت برشی، مقاومت خمشی، سختی و شکل‌پذیری را بهبود می‌دهد. الیاف هیبریدی بهترین گزینه برای دستیابی به عملکرد متوازن بین مقاومت و شکل‌پذیری هستند. برای طراحی این نوع بتن‌ها، استفاده از آیین‌نامه‌ها نیازمند ضرایب اصلاحی است تا پیش‌بینی دقیق‌تر حاصل شود.

۴-۳- حالت‌های خرابی تیرهای بتن خودتراکم مسلح شده با الیاف فولادی دورریز تحت شرایط آتش

• مقدمه

آتش از شدیدترین شرایط بارگذاری برای سازه‌های بتنی است و اعضا باید الزامات مقاومت در برابر آن را تأمین کنند. بتن خودتراکم با مقاومت زیاد (حدود

۸۰ مگاپاسکال) مزایایی چون عدم نیاز به تراکم دارد و تمام سطح آرماتورها را پوشش می‌دهد، اما شکننده‌تر از بتن معمولی است و جمع‌شدگی بیشتری نشان می‌دهد. افزودن الیاف فولادی به‌طور تصادفی می‌تواند مقاومت و انعطاف‌پذیری را افزایش داده و از شکنندگی جلوگیری کند. با این حال، استفاده گسترده از این الیاف به‌دلیل هزینه و مسائل زیست‌محیطی محدود است. جایگزینی مؤثر آن، پسماند الیاف فولادی بازیافتی از کارخانه‌های تایر است. استفاده از ۱ درصد حجمی این الیاف در پژوهش حاضر نشان داد حالت شکست تیرها می‌تواند حتی بدون خاموت از برشی به خمشی تغییر کند.

مطالعات پیشین تأیید کرده‌اند که الیاف فولادی موجب کاهش عرض ترک، بهبود رفتار خمشی و افزایش شکل‌پذیری می‌شود؛ هرچند تحت تنش برشی زیاد جایگزین کامل خاموت‌ها نیست. در سازه‌های بلند، پل‌ها و شمع‌ها که بتن خودتراکم با مقاومت زیاد به‌کار می‌رود، آتش تهدیدی جدی محسوب می‌شود، زیرا دمای مقاومت بتن و فولاد را کاهش داده و پیوند میلگرد و خمیر سیمان را تضعیف می‌کند. تحقیقات نشان داده‌اند که الیاف فولادی می‌تواند از پوسته‌پوسته شدن و انفجار بتن در دماهای زیاد جلوگیری کرده و رفتار سازه‌ای را بهبود دهد.

با وجود این، مطالعات مستقیم روی تیرهای بتن خودتراکم با مقاومت زیاد در شرایط آتش محدود است. در این پژوهش، رفتار تیرهای بدون خاموت تقویت‌شده با ۱ درصد الیاف فولادی بازیافتی در دمای محیط، پس از حرارت‌دهی تا ۶۰۰ درجه سلسیوس

به مدت ۶۰ دقیقه و نیز تحت بارگذاری همزمان حرارتی-مکانیکی (آتش مستقیم) بررسی شد. نتایج به اثر الیاف فولادی بر مقاومت، سختی، شکل پذیری و حالت شکست تیرها و نیز تفاوت عملکرد نمونه‌های حرارت دیده و تحت آتش مستقیم پرداخت.

• روش تحقیق

برای تولید بتن خودتراکم با مقاومت زیاد از سیمان پرتلند نوع ۱ مطابق ASTM C114، میکروسیلیس مطابق ASTM C1240، سنگدانه‌های درشت و ریز مطابق ASTM C۳۳ با وزن مخصوص به ترتیب ۲/۶۵ و ۲/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و فوق‌روان‌کننده نوع G مطابق ASTM C۴۹۴ استفاده شد. سنگدانه درشت شن شکسته محلی با حداکثر اندازه ۱۰ میلی‌متر و جذب آب ۴/۴۴ درصد و سنگدانه ریز ماسه طبیعی با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر، جذب آب ۱ درصد و مدول نرمی ۲/۷ انتخاب گردید. برای افزایش مقاومت کششی و برشی، الیاف فولادی بازیافتی حاصل از ضایعات تیر به میزان ۱ درصد حجم بتن، معادل حدود ۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب، در دو حالت تک‌طول و ترکیبی به مخلوط افزوده شد. میلگردهای آجدار گرید ۶۰ مطابق ASTM A615 با قطرهای ۶ و ۱۲ میلی‌متر و مقاومت تسلیم متوسط به ترتیب ۵۱۵ و ۵۸۰ مگاپاسکال نیز برای آرماتورگذاری طولی مورد استفاده قرار گرفت.

فرایند مخلوط کردن بتن طی حدود ۷ دقیقه در چند مرحله انجام شد. ابتدا سنگدانه‌ها به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شدند و سپس سیمان و میکروسیلیس

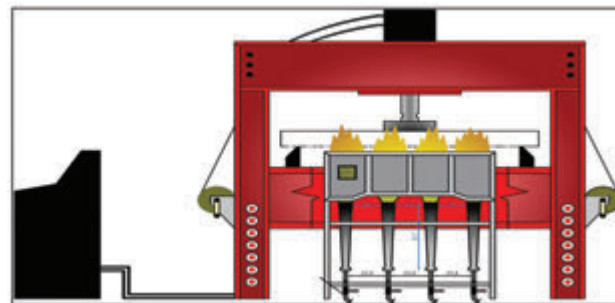
افزوده شد و پس از ۶۰ ثانیه مخلوط کردن، ۷۰ درصد آب اضافه گردید. در ادامه، فوق‌روان‌کننده در بخش باقیمانده آب حل شد و به تدریج به مخلوط افزوده شد و عملیات مخلوط کردن برای ۱۲۰ ثانیه ادامه یافت. در مرحله پایانی، الیاف فولادی به تدریج وارد مخلوط شدند و پس از ۱۲۰ ثانیه مخلوط کردن و ۳۰ ثانیه استراحت، مخلوط آماده گردید. سه طرح مخلوط شامل نمونه شاهد بدون الیاف، نمونه حاوی الیاف ترکیبی و نمونه حاوی الیاف تک‌طول ساخته شد. نتایج آزمایش‌های رئولوژی شامل جریان اسلامپ، آزمون جعبه L، قیف V و آزمون جداسدگی نشان داد که افزودن الیاف موجب کاهش محدود روانی و قابلیت عبور و افزایش ویسکوزیته و مقاومت در برابر جداسدگی می‌شود، به گونه‌ای که تنها مخلوط نمونه حاوی الیاف تک‌طول در آزمون قیف V فراتر از حدود تعیین شده در EFNARC 2005 قرار گرفت. برای بررسی رفتار سازه‌ای، ۹ تیر بتن مسلح با ابعاد ۱۵۰×۱۷۰×۱۱۰۰ میلی‌متر ساخته شد. تمامی تیرها دارای ۲ میلگرد ۶ میلی‌متری در ناحیه فشاری و ۳ میلگرد ۱۲ میلی‌متری در ناحیه کششی بودند و پوشش بتن برای آرماتورهای فوقانی، تحتانی و جانبی ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. به منظور حذف نقش خاموت‌ها در مقاومت برشی، تنها در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها سه خاموت ۶ میلی‌متری قرار داده شد. تیرها تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای با دهانه خالص ۱۰۰۰ میلی‌متر و طول دهانه برشی ۳۰۰ میلی‌متر آزمایش شدند.

در برابر آتش و نحوه گسیختگی شد. این برنامه آزمایشگاهی نشان داد که الیاف فولادی ضایعاتی می‌تواند با موفقیت به‌عنوان الیاف در تولید بتن خودتراکم پرمقاومت الیافی مورد استفاده قرار گیرد و کاربرد سازه‌ای داشته باشد. این بتن توانست تا حدود ۸۵ دقیقه بدون شکست، مقاومت در برابر آتش را تأمین کند، حتی زمانی که دمای آرماتور از ۴۰۰ درجه سلسیوس فراتر رفت.



شکل ۴-۱۴- نمای ظاهری تیرهای حرارت‌دیده پس از کوره ۶۰۰ درجه سلسیوس برای ۶۰ دقیقه - a تیر شاهد بدون الیاف، b تیر حاوی الیاف ترکیبی و c تیر حاوی الیاف تک‌طول

ضروری است که ویژگی‌های مقاومت باقیمانده نرمال‌شده این ماده در نظر گرفته شود تا بتوان کاهش خواص مکانیکی و سازه‌ای را به‌وضوح مشاهده کرد. این خواص پس از قرارگیری در معرض دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۶۰ دقیقه، کاهش چشمگیری داشتند. نمای ظاهری



شکل ۴-۱۳- دستگاه بارگذاری همراه با مشعل زیر تیر (برای سناریوی واقعی آتش)

برنامه آزمایش شامل سه گروه بود. در گروه R1 تیرها تحت بارگذاری خمشی در دمای محیط آزمایش شدند و به‌عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شدند. در گروه R2 تیرها در کوره الکتریکی با دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت حرارت داده شدند و پس از خنک‌سازی طبیعی تحت بارگذاری قرار گرفتند. و مطابق شکل ۴-۱۳ گروه R3 تیرها تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای هم‌زمان با حرارت ناشی از مشعل قرار گرفتند تا شرایط واقعی آتش‌سوزی شبیه‌سازی شود. این تقسیم‌بندی امکان ارزیابی رفتار تیرها در شرایط عادی، پس از حرارت‌دیدگی و تحت اثر هم‌زمان حرارت و بارگذاری را فراهم ساخت.

• نتیجه‌گیری

در این تحقیق، افزودن الیاف فولادی ضایعاتی به بتن خودتراکم پرمقاومت موجب بهبود قابل‌توجه رفتار سازه‌ای آن از نظر چقرمگی، شکل‌پذیری، مقاومت

این تیرها در شکل ۴-۱۴ مشخص شده است. در این دما، برای تیرهای حرارت داده شده در کوره، بار نهایی حدود ۲۷ درصد نسبت به تیرهای بدون حرارت کاهش یافت. همچنین، شاخص چقرمگی تیرهای شاهد بدون الیاف، تیر حاوی الیاف ترکیبی و تیر حاوی الیاف تک طول به ترتیب ۳۹، ۴۳ و ۳۳ درصد نسبت به تیرهای بدون حرارت کاهش نشان داد. شاخص شکل پذیری این تیرها نیز به ترتیب ۶۱، ۶۷ و ۵۰ درصد نسبت به تیرهای بدون حرارت کاهش یافت.

با این حال، آزمایش‌های سازه‌ای تا شکست نشان داد که الیاف فولادی ضایعاتی در جلوگیری از کاهش مقاومت تیرهای بتن خودتراکم با مقاومت زیاد پس از قرارگیری در معرض دماهای بالاتر از ۶۰۰ درجه سلسیوس مؤثر نبود. در این سطح، کارایی سازه‌ای الیاف به‌طور قابل توجهی کاهش یافت و ظرفیت مکانیکی بتن خودتراکم با مقاومت بالا به شدت افت کرد.

علاوه بر این، نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که افزودن ادرصد الیاف فولادی در تیرهای تحت بارگذاری حرارتی- مکانیکی (شبیه سازی آتش)، تغییر مکان نهایی آزمون‌های حاوی الیاف ترکیبی و تک طول را به ترتیب حدود ۱۰۰ و ۸۳ درصد افزایش داد. این امر شاخص چقرمگی را به ترتیب ۱۴۲ و ۹۲ درصد و شاخص شکل پذیری را ۷۶ و ۶۵ درصد بیشتر از آزمون‌های شاهد کرد. بنابراین، استفاده از الیاف فولادی می‌تواند خواص مکانیکی و سازه‌ای بتن خودتراکم پرمقاومت را در برابر آتش بهبود

دهد، هرچند این اثر تنها تا ۶۰ دقیقه قرارگیری در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس پایدار بوده و پس از آن کارایی الیاف کاهش می‌یابد؛ موضوعی که نیازمند پژوهش‌های بیشتر است.

تمرکز این مطالعه بر مقایسه رفتار تیرها در دو حالت حرارت‌دهی کوره‌ای و بارگذاری حرارتی-مکانیکی بود. نتایج نشان داد ظرفیت سازه‌ای در حالت دوم کاملاً از بین رفت، در حالی که تیرهای کوره‌ای تنها بخشی از ظرفیت خود را از دست دادند. علاوه بر این، الگوهای گسیختگی نیز یکسان نبودند، به گونه‌ای که آزمایش کوره‌ای توان بازتاب شرایط واقعی آتش را نداشت. لذا توصیه می‌شود در مطالعات آینده از روش بارگذاری حرارتی-مکانیکی استفاده شود. علت این تفاوت به ماهیت آزمایش باز می‌گردد؛ تیرهای کوره‌ای به دلیل فاز خنک‌سازی بخشی از ظرفیت خود را بازیابی می‌کنند، در حالی که در بارگذاری حرارتی-مکانیکی، خزش و کرنش گذرا در دماهای بالا شرایط بسیار سخت‌تری ایجاد می‌کند.