مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۶، شماره‌ی ۳، ص. ۳-۱۲

# بررسی امکان‌سنجی تسلیح کامپوزیت‌های سیمانی با برخی از الیاف طبیعی حاصل از ضایعات

**مرتضی خرمی (کارشناس ارشد)**
**مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن**
**ابوالحسن وفایی (استاد)**
**دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف**
**احمد امین خلیلی طبس (کارشناس ارشد)**
**دانشکده‌ی فنی، دانشگاه تهران**

کاربرد الیاف در خمیر سیمان، به‌منظور ارتقاء ویژگی‌های کامپوزیت‌های سیمانی، از مدت‌ها قبل مورد توجه محققین قرار گرفته است. از نظر پایداری در شرایط محیطی و مقاومت در برابر نیروهای وارده، هریک از انواع کامپوزیت‌های سیمانی رفتار متفاوتی دارند. این رفتار به چهار عامل اساسی ارتباط دارد: نوع الیاف، درصد اختلاط، روش ساخت و مواد افزودنی. در تحقیق حاضر، به‌منظور شناخت رفتار خمشی کامپوزیت‌های ساخته‌شده از انواع الیاف طبیعی، نمونه‌های آزمایشگاهی در قالب سه گروه عام طراحی، ساخته و آزمایش شده است: گروه اول شامل ساقه‌ی گیاه نیشکر، گروه دوم شامل ساقه‌ی گیاه اکالیپتوس و گروه سوم شامل الیاف کرافت که حاصلِ ضایعات کاغذهای قهوه‌یی است. در هر گروه درصدهای مختلف وزنی الیاف نسبت به سیمان مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های ساخته شده با این الیاف در کنار نمونه‌ی شاهد (بدون الیاف) از نظر مقاومت خمشی و ضریب کشسانی مقایسه شده‌اند و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مطالعات ریزساختار نیز انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که الیاف کرافت و باگاس در افزایش شکل‌پذیری و مقاومت خمشی کامپوزیت عملکرد مناسبی داشته‌اند و الیاف اکالیپتوس تأثیر زیادی در بهبود رفتار خمشی کامپوزیت سیمانی، در مقایسه با نمونه‌ی شاهد، نداشته است.

mrz_khorrami@yahoo.com
vafai@sharif.edu
ahmadaminkhalili@yahoo.com

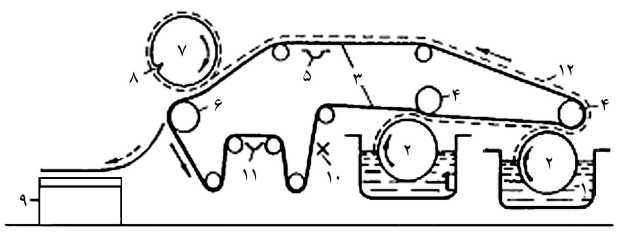
**واژگان کلیدی:** کامپوزیت سیمانی، الیاف، مقاومت خمشی، ضریب کشسانی.

## ۱. مقدمه

ورق‌های سیمانی ساخته شده از سیمان خالص مقاومت خمشی کمی دارند و در کرنش‌های بسیار کم دچار شکست می‌شوند. برای رفع این مشکل و ارتقاء سایر ویژگی‌های مورد نیاز در این ورقه‌ها، در تولید آنها از الیاف و مواد افزودنی استفاده می‌شود.

از جمله الیافی که از دیرباز در تولید کامپوزیت سیمانی کاربرد داشته است، می‌توان به الیاف آزبست اشاره کرد که خصوصیات فیزیکی و مکانیکی منحصر به‌فردی دارد. آزبست نوع خاصی از سیلیکات فیبری موجود در طبیعت است که ساختار آن به‌صورت کریستالی است و با توجه به نوع ترکیبات معدنی به دو گروه تقسیم می‌شود: سرپنتاین‌ها[1] و آمفوبیل‌ها[2]. نام‌تجاری سرپنتاین‌ها، کریزوتایل[3] یا آزبست سفید است. آمفوبیل‌ها متناسب با نوع ساختارشان به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند: کروسیدولایت (آزبست آبی)، آموزیت و آنتوفیلیت.

اولین کامپوزیت سیمانی ساخته‌شده در مقیاس انبوه در قرن بیستم، سیمان آزبستی بود که در اوایل قرن بیستم با اختراع فرایند هچک[4] برای تولید ورقه سیمانی به کار گرفته شد.[1] این فرایند تولید مبتنی بر تهیه‌ی دوغاب از الیاف آزبست، سیمان و آب است (شکل ۱).




۱. ظرف حاوی دوغاب
۲. استوانه ی مشبک
۳. تسمه نقاله
۴. غلتک خنک کننده
۵. دستگاه مکش
۶. غلتک رهنما
۷.استوانه ی تشکیل دهنده
۸. سیم برش
۹. حامل ورقه های جدا شده
۱۰. غلتک کمکی حرکت نقاله
۱۱. دستگاه مکش برای خشک کردن نقاله
۱۲. لایه تشکیل شده از دوغاب بر روی نقاله

**شکل ۱. تولید ورقه‌های سیمانی آزبستی با استفاده از فرایند هچک.**[2]

*تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۱/۲۵، داوری ۱۳۸۷/۱۰/۱، پذیرش ۱۳۸۷/۱۲/۲۰.*

الیاف آزبست با خمیر سیمان سازگار است و به‌علت مقاومت و ضریب کشسانی بالا و گیرداری زیاد آن با خمیر سیمان استحکام زیادی در کامپوزیت سخت‌شده ایجاد می‌کند. به‌علاوه، چون الیاف آزبست در محیط قلیایی سیمان پایدار است، درنتیجه کامپوزیتی با دوام بالا ایجاد می‌کند.[۲] علی‌رغم این ویژگی‌ها، امروزه کاربرد الیاف آزبست در اغلب کشورهای دنیا، به‌لحاظ زیست‌محیطی با محدودیت‌های شدیدی مواجه است و بیش از یک دهه است که به‌دلیل تأثیر الیاف آزبست بر سلامتی انسان، تولید و مصرف آن در صنعت ساخت‌وساز اغلب کشورها ممنوع شده است. این الیاف معمولاً از طریق دستگاه‌های تنفسی و گوارشی به بدن وارد می‌شوند و به بیماری‌های خطرناکی منجر می‌شوند. ورود الیاف آزبست به دستگاه تنفسی، به‌ویژه می‌تواند بیماری‌های مهلکی ایجاد کند.[۳-۵]

شدت بیماری‌های ایجادشده به نوع و میزان الیاف وارده به بدن بستگی دارد. برای همین منظور سازمان بهداشت جهانی محدودیت‌هایی برای کاربرد انواع مختلف آزبست وضع کرده است. بر این اساس، آموزیت به‌میزان ۰٫۵ الیاف بر سانتی‌متر مکعب، و کریزوتایل، کرسیدولایت و انواع دیگر الیاف به‌میزان ۲ الیاف بر سانتی متر مکعب قابل استفاده است.[۳]

از آنجا که یکی از مهم‌ترین کاربرد الیاف آزبستی در تولید ورقه‌های سیمانی است، لذا اولین تحقیقات به‌منظور یافتن جایگزین مناسب این الیاف در تولید ورقه‌های سیمانی انجام شد.[۱] در این راستا یافتن الیافی مد نظر بوده است که بتواند ویژگی‌های مورد انتظار ورقه‌های سیمانی را تأمین کند. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از:

- مقاومت کافی برای مقابله با بارهای وارده؛
- مقاومت در شرایط محیطی مختلف مانند نور خورشید و چرخه‌های یخ‌زدن و ذوب‌شدن؛
- پایداری الیاف در محیط قلیایی سیمان؛
- سازگاری با ماتریس سیمان و امکان ایجاد پیوندهای قوی بین الیاف و خمیر سیمان؛
- مقاومت و پایداری در برابر نفوذپذیری و جذب آب.

بر اساس تحقیقات انجام‌شده در جهان، تاکنون الیاف زیادی برای جایگزینی الیاف آزبست در سیمان پیشنهاد شده است.[۱و۲] این الیاف شامل الیاف فولاد و شیشه، الیاف جدید مانند پلی‌وینیل الکل، کربن و کولار با مدول‌های بالا، سایر الیاف مصنوعی مانند (اکریلیک، پلی‌پروپلین، نایلون) با ضریب کشسانی پایین، یا الیاف طبیعی (سلولزی، سیسال و jute) هستند. خصوصیات و ویژگی‌های اقتصادی این الیاف‌ها تا حد بسیار زیادی با هم تفاوت دارند. در جدول ۱ فهرست تعدادی از این الیاف و خواص آن‌ها، به‌منظور استفاده درکامپوزیت سیمان ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود الیاف سلولزی که عمدتاً از چوب به دست می‌آیند بیشترین زمینه را برای کاربرد درکامپوزیت‌های سیمانی دارند. این الیاف را می‌توان ازگیاهان سوزنی یا پهن‌برگ به روش‌های مختلف شیمیایی یا مکانیکی تهیه کرد. عوامل مختلفی بر خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی تأثیرگذارند. یکی از این عوامل منبع الیاف مورد استفاده (مانند باگاس، گندم و...) و دیگری روش تولید خمیر و الیاف (مانند کرافت، ترمومکانیکی و...) است. شرایط عمل‌آوری کامپوزیت‌های تولیدشده (شامل عمل‌آوری در هوا یا گرمخانه) را نیز می‌توان بر خواص کامپوزیت‌های تولیدشده مؤثر دانست.[۶-۱۲]

درسال‌های اخیر، تحقیقات زیادی درموردکاربرد الیاف‌کشاورزی درکامپوزیت‌های سیمانی انجام شده است.[۹-۱۴] در این تحقیقات سعی شده خواص کامپوزیت‌های

جدول ۱. مقایسه‌ی ویژگی‌های کامپوزیت‌های به‌دست آمده از الیاف مختلف.[۲]

| الیاف | مقاومت قلیایی | مقاومت به حرارت | فرایندپذیری | توزیع تنش | توزیع چقرمگی | قیمت |
|---|---|---|---|---|---|---|
| چوب (شیمیایی) | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۳ |
| چوب (مکانیکی) | ۱ | ۱ | ۲ | ۲ | ۳ | ۳ |
| پلی پروپیلن | ۱ | ۳ | ۳ | ۳ | ۳ | ۲ |
| پلی استر | ۳ | ۳ | ۳ | ۳ | ۳ | ۲ |
| کولار | ۱ | ۱ | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ |
| فولاد | ۱ | ۱ | ۳ | ۳ | ۳ | ۲ |
| کربن | ۱ | ۱ | ۳ | ۱ | ۱ | ۱ |
| شیشه | ۳ | ۱ | ۳ | ۳ | ۳ | ۲ |

چوب شیمیایی و مکانیکی دو فرایند تولید خمیر چوب است.

۱: بالا، ۲: متوسط، ۳: پایین

حاصل، با تغییردادن درصد الیاف مورد استفاده و عمل‌آوری سطحی آن‌ها به‌منظور افزایش سطح تماس بیشتر با خمیر سیمان ارتقا یابد. این تحقیقات نشان می‌دهد که متناسب با نوع و ویژگی‌های الیاف طبیعی می‌توان درصد بهینه‌یی را برای ترکیب آن‌ها در خمیر سیمان یافت. به‌عنوان مثال برخی از الیاف سلولزی یا طبیعی را که از نظر طول، نسبت قطر به طول و سایر ویژگی‌های ظاهری در محدوده‌های معینی قرار دارند، می‌توان تا حدود ۸ درصد در ترکیب با خمیر سیمان مورد استفاده قرار داد، در حالی که برخی دیگر از الیاف طبیعی مانند باگاس یا اکالیپتوس را بیشتر از حدود چهار درصد نمی‌توان در ترکیب با سیمان به کار برد. چنانچه از این مواد به میزان بیش از ۴٪ به سیمان افزوده شود، به بیرون‌زدگی الیاف از خمیر سیمان منجر شده و عملاً همگنی مخلوط و ویژگی‌های مقاومتی آن به‌شدت کاهش می‌یابد. مهم‌ترین دلایل این پدیده، افزایش تخلخل نمونه‌ها و ایجاد ضعف در پیوند بین الیاف و خمیر سیمان است؛ با افزودن الیاف، سطح جانبی الیاف که باید در خمیر سیمان محصور شود افزایش می‌یابد و خمیر سیمان موجود نمی‌تواند به‌مقدار کافی دور تا دور الیاف را محصور کند. همچنین برخی از تحقیقات نشان داده است، استفاده از الیاف حاصل از روش‌های شیمیایی بهتر از الیاف حاصل از روش‌های مکانیکی عمل می‌کنند.[۸-۱۱] زیرا در روش‌های شیمیاییِ تهیه‌ی الیاف، لیگنین که ماده‌یی مضر بر خواص مکانیکی ورقه‌های سیمانی است، تا حدود زیادی از الیاف خارج می‌شود. در این تحقیقات نشان داده شده است که عمل‌آوری سطحی الیاف طبیعی نیز می‌تواند در بهبود رفتار خمشی ورقه‌های سیمانی مؤثر باشد، چراکه این پدیده به ارتقاء قابلیت الیاف برای ایجاد یک شبکه‌ی هم‌بند به‌منظور نگه‌داری ذرات خمیر سیمان و نیز افزایش تعادل در نرخ فرایند زه‌کشی منجر می‌شود و بدین‌ترتیب بر مقاومت خمشی می‌افزاید.

در تحقیق حاضر، تأثیر سه نوع از الیاف طبیعی در خمیر سیمان، از نقطه‌نظر اصلاح مقاومت خمشی کامپوزیت‌های سیمانی با انجام تحقیقات آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. دو نمونه از الیاف به دست آمده از ضایعات کشاورزی در ایران شامل: نیشکر (باگاس)، ساقه‌ی گیاه اکالیپتوس و همچنین یک نمونه از الیاف

حاصل از ضایعات کاغذهای قهوه‌یی موجود که در کارخانه‌های کاغذسازی کاربرد دارد، انتخاب و مورد آزمایش قرارگرفته است. همچنین رفتار این نمونه‌ها با نمونه‌های حاوی الیاف آزبست نیز مقایسه شده است.

## ۲. مصالح مورد استفاده

**سیمان:** سیمان استفاده‌شده، سیمان تیپ II کارخانه‌ی تهران است که آزمون‌های لازم برای شناخت ویژگی‌های آن براساس استاندارد ۳۹۸ ایران انجام و مورد تأیید قرارگرفت.

**الیاف:** الیاف استفاده شده در این تحقیق عمدتاً با هدف کاربرد ضایعات است. بدیهی است به‌منظور به‌کارگیری الیاف حاصل از ضایعات با رعایت کم‌ترین اصلاح و عمل‌آوری سطحی، از آنها در ابعاد وسیعی از ضخامت و طول استفاده شده است. توضیحات بیشتر در این خصوص، در ادامه ارائه شده است.

- **الیاف باگاس (نیشکر):** الیاف باگاس به‌طول ۰٫۵ تا ۳ میلی‌متر و قطر حدود ۰٫۳ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. این الیاف قبل از استفاده مدت ۲۴ ساعت در آب قرارگرفت و سپس در آزمایشگاه آسیاب شد. عمل آسیاب سبب رشته‌رشته‌شدن این الیاف شد. الیاف ریز (خاکه‌ها) با الک ۱۵۰ میکرون جدا شد.
- **الیاف اکالیپتوس:** این الیاف دارای ذرات ریز (خاکه) بود. پس از جداکردن ذرات کوچک‌تر از ۱۵۰ میکرون، الیاف بزرگ‌تر به‌مدت ۲۴ ساعت در آب قرار گرفت. طول آن‌ها در محدوده‌ی ۰٫۸ تا ۱٫۶ میلی‌متر و قطر آن‌ها حدود ۰٫۴۸ میلی‌متر است.
- **الیاف سلولزی تهیه‌شده به‌روش کرافت:** این الیاف که از ضایعات کاغذ قهوه‌یی تهیه شده بود به مدت ۲۴ ساعت در آب قرار گرفت. طول آن‌ها در محدوده‌ی ۰٫۶ تا ۱ میلی‌متر و قطر آن‌ها حدود ۰٫۰۳۵ میلی‌متر بود. در این تحقیق برای تولید الیاف کرافت، ضایعات پاکت‌های سیمان و کارتن‌های قهوه‌یی بعد از خرد شدن به ابعاد حدود ۲ سانتی‌متر برای مدت دو روز در محلول سود (با نسبت وزنی مایع به کاغذ یک سوم) مغروق شده و سپس به‌مدت یک ساعت در دستگاه همزن مخلوط شدند. خمیر حاصل، موسوم به پالپ، در دستگاه تصفیه بین دو غلتک متحرک عبور داده شد تا الیاف رشته‌رشته شود. سپس تا حد امکان آبکشی شده و در محلی با دمای ۵-۱۰ درجه سانتی‌گراد نگه‌داری می‌شود. قبل از اضافه‌شدن آن به دوغاب سیمان نیز به‌مدت پنج دقیقه در یک هاون چینی کوبیده شدند و سپس به مخلوط سیمان اضافه شد. در ادامه‌ی این نوشتار، برای سهولت از این الیاف به‌عنوان الیاف کرافت نام برده می‌شود.
- **الیاف آزبست:** این الیاف از نوع کریسوتایل است و طول آن ۳ تا ۵ میلی‌متر و قطرش حدود یک میکرون است. این الیاف از نوع الیاف وارداتی است که در حال حاضر در کارخانه‌های تولید ورق سیمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

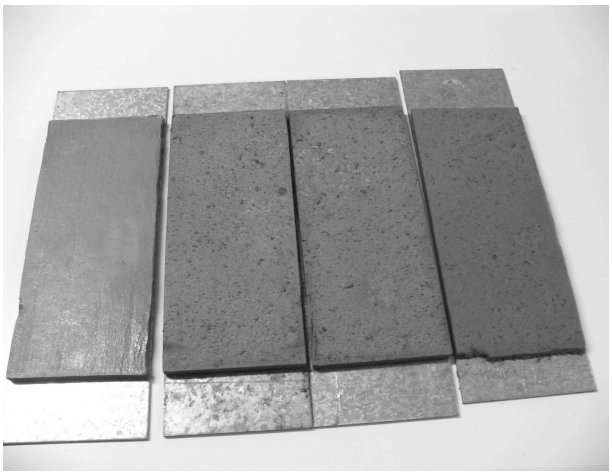
**آب:** آب استفاده شده، آب شرب است.

## ۳. طرح اختلاط و نحوه‌ی ساخت نمونه‌ها

در تحقیق حاضر که طی آن برخی از انواع الیاف موجود در ایران به‌عنوان مسلح‌کننده‌ی ورقه‌های سیمانی مورد بررسی قرار گرفت، پارامتر اصلی مورد آزمون نوع و درصد افزودن الیاف بوده است. این الیاف عبارت‌اند از: الیاف اکالیپتوس، باگاس و کرافت. در برخی از نمونه‌ها نیز تأثیر میکروسیلیس به‌عنوان یک ماده‌ی افزودنی مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۲ مشخصات نمونه‌های ساخته‌شده و نحوه‌ی نام‌گذاری آن‌ها ارائه شده است.

کامپوزیت‌های سیمانی با نسبت آب به سیمان برابر ۳ ساخته شدند. ابتدا الیاف به‌مدت ۵ دقیقه در هم‌زنی که دارای پره‌های افقی به‌شعاع ۲ میلی‌متر است از یکدیگر جدا شدند. علت این امر بازکردن الیاف به‌هم پیچیده برای توزیع مناسب در خمیر سیمان است. سپس سیمان، آب و الیاف در محفظه‌یی به‌مدت ۵ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. در برخی نمونه‌ها ۵ درصد وزنی سیمان با میکروسیلس جایگزین شد. پس از آماده‌سازی مصالح و مخلوط‌کردن آن‌ها، دوغاب به‌دست آمده در داخل قالب مکعب مستطیلی به‌ابعاد $۱۵cm \times ۱۸ \times ۸$ ریخته شد (شکل ۲). در این قالب، آب اضافی از طریق مکش از پائین به‌وسیله‌ی پمپی با قدرت ۰٫۹ بار خلاء از نمونه‌ها خارج شد. در حین آب‌کشی، برای متراکم‌کردن نمونه‌ها، وزنه‌یی به وزن ۱۰ کیلوگرم روی نمونه‌ها قرارگرفت. سپس نمونه‌ها از قالب خارج شدند (شکل ۳). پس از حدود ۲ ساعت نگه‌داری نمونه‌ها در هوای آزاد، این نمونه‌ها به‌مدت ۲۸ روز در رطوبت ۱۰۰ درصد در اتاق بخار نگه‌داری شدند. سپس نمونه‌ها را در گرم‌خانه‌یی با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۶ ساعت خشک و برای انجام آزمایش آماده کردند.

**شکل ۲. قالب استفاده‌شده برای ساخت نمونه‌ها.**



**شکل ۳. ورقه‌های سیمانی پس از خارج ساختن از قالب.**

جدول ۲. طرح اختلاط نمونه‌ها و چگونگی نام‌گذاری آن‌ها.

| نام آزمون | سیمان gr | آب gr | میکروسیلیس gr | الیاف gr | توضیحات |
|---|---|---|---|---|---|
| کنترل (شاهد) | ۱۵۰ | ۴۵۰ | - | - | نمونه‌ی سیمانی بدون الیاف |
| $B2$ | ۱۵۰ | ۴۵۰ | - | ۳ | نمونه‌ی سیمانی حاوی ۲ درصد باگاس |
| $B2M5$ | ۱۴۲/۵ | ۴۵۰ | ۷/۵ | ۳ | نمونه‌ی سیمانی حاوی ۲ درصد باگاس و ۵ درصد میکروسیلیس |
| $B4$ | ۱۵۰ | ۴۵۰ | - | ۶ | نمونه‌ی سیمانی حاوی ۴ درصد باگاس |
| $B4M5$ | ۱۴۲/۵ | ۴۵۰ | ۷/۵ | ۶ | نمونه‌ی سیمانی حاوی ۴ درصد باگاس و ۵ درصد میکروسیلیس |
| $O2$ | ۱۵۰ | ۴۵۰ | | ۳ | کامپوزیت سیمانی حاوی ۲ درصد اکالیپتوس |
| $O4$ | ۱۵۰ | ۴۵۰ | | ۳ | کامپوزیت سیمانی حاوی ۴ درصد اکالیپتوس |
| $K2$ | ۱۵۰ | ۴۵۰ | | ۳ | کامپوزیت سیمانی حاوی ۲ درصد الیاف کرافت |
| $K4$ | ۱۵۰ | ۴۵۰ | | ۶ | کامپوزیت سیمانی حاوی ۴ درصد الیاف کرافت |
| $K4M5$ | ۱۴۲/۵ | ۴۵۰ | ۷/۵ | ۶ | کامپوزیت سیمانی حاوی ۴ درصد الیاف کرافت و ۵ درصد میکروسیلیس |
| $AZ2$ | ۱۵۰ | ۴۵۰ | - | ۳ | کامپوزیت سیمانی حاوی ۲ درصد الیاف آزبست سفید |
| $AZ4$ | ۱۵۰ | ۴۵۰ | - | ۶ | کامپوزیت سیمانی حاوی ۴ درصد الیاف الیاف آزبست سفید |

جدول ۳. نتایج آزمایش‌ها فیزیکی الیاف.

| نوع الیاف | میانگین طول (میلی‌متر) | میانگین قطر (میلی‌متر) | میانگین ضریب کشسانی (MPa) | میانگین مقاومت کششی (MPa) | نسبت طول به قطر |
|---|---|---|---|---|---|
| باگاس | ۱/۳۰ | ۰/۳۴ | ۱۵/۲ | ۱۱۵/۹ | ۳/۷ |
| اکالیپتوس | ۱/۴۶ | ۰/۴۸ | ۲۸/۸ | ۳۵/۴ | ۳/۰ |
| کرافت* | ۰/۸۷ | ۰/۰۳۸ | ۸۵/۳ | - | ۲۲/۶ |
| ازبست سفید** | ۴ | ۰/۰۰۰۸ | ۱۶۰ | ۳۰۰ | ۵۰۰۰ |

* به‌دلیل قطر بسیار نازک الیاف کرافت و کوتاه‌بودن طول آن‌ها، آزمایش مقاومت کششی و ضریب کشسانی با توجه به امکانات آزمایشگاهی موجود کشور امکان‌پذیر نبود و لذا از منابع موجود در این خصوص استفاده شد.[۲]

**به‌دلیل وجود اطلاعات در مراجع و شرکت‌های صادرکننده‌ی این محصول به ایران، نتایج از آن‌ها استخراج شده است.

## ۴. آزمایش‌ها

### ۱.۴. آزمایش الیاف

#### ۱.۱.۴. آزمایش درجه‌ی روانی استاندارد

یکی از مهم‌ترین مشخصات الیاف برای استفاده در ماتریس سیمانی «درجه‌ی روانی» استاندارد کانادایی (CSF)[5] است که روشی برای اندازه‌گیری خواص زه‌کشی خمیر چوب است. نتایج درجه‌ی روانی به‌مقدار زیادی به وجود ذرات ریز و خرده‌چوب‌های موجود، درجه‌ی رشته‌رشته‌شدن، انعطاف‌پذیری الیاف و درجه‌ی ریزی آن‌ها بستگی دارد. این آزمایش براساس استاندارد AS/NZS ۱۳۰۱/۲۰۶s:۲۰۰۲ انجام شد.

برای انجام آزمایش، حجم مشخصی از مایه‌ی خمیر چوب، داخل استوانه‌یی که در زیر محفظه‌یی مخروطی قرار دارد، وارد می‌شود. در این محفظه دو سوراخ (روزنه)، یکی در کف و دیگری در کنار محفظه‌ی مخروطی، قرار گرفته است. میزان حجم مایع عبوری از سوراخ کناری، بعد از تصحیح ضرایب دما و غلظت مایه خمیر، به‌عنوان درجه‌ی روانی گزارش می‌شود. در این تحقیق پس از عمل‌آوری الیاف، آزمایش درجه‌ی روانی طبق روش مذکور انجام شد. میانگین نتایج CSF ۵۰۰ بود که براساس نتایج سایر محققین باید در محدوده‌ی CSF ۷۰۰-۴۰۰ باشد.[۲]

#### ۲.۱.۴. ویژگی‌های فیزیکی الیاف

از آنجا که رفتار الیاف در کامپوزیت به ویژگی‌های الیاف بستگی دارد، به‌منظور شناخت این ویژگی‌ها در حد امکانات آزمایشگاهی موجود، آزمایش‌ها انجام و نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

### ۲.۴. آزمایش ورق‌های سیمانی

چنان که پیش‌تر اشاره شد، کاربرد الیاف در ساخت ورق‌های سیمانی از دو منظر کلی مورد بررسی قرار می‌گیرد: ۱. مقاومت در برابر بارهای وارده؛ ۲. دوام و پایداری در شرایط محیطی.

### ۳.۴. آزمون مقاومت خمشی

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مورد نیاز در ورقه‌های سیمانی، قابلیت مقاومت آن‌ها در برابر بارهای وارده است. مهم‌ترین آزمونی که در این زمینه انجام می‌شود آزمون بارگذاری خمشی یک‌نقطه‌یی است. ورقه‌های سیمانی را می‌توان متناسب با قدرت تحمل‌شان در برابر بار خمشی در کارهای مختلف به کار گرفت. نمونه‌های ساخته‌شده برای مقاومت خمشی به‌صورت صفحه‌یی بوده و به روش بارگذاری یک‌نقطه‌یی مطابق استاندارد EN ۱۲۴۶۷:۲۰۰۴ آزمایش می‌شوند. براساس این استاندارد ورقه‌های سیمانی از نقطه‌نظر مقاومت خمشی کمینه به ۵ گروه تقسیم می‌شوند (جدول ۴).

جدول ۴. مقاومت خمشی کمینه درگروه‌های مختلف طبق استاندارد ۱۲۴۶۷:۲۰۰۴ EN.

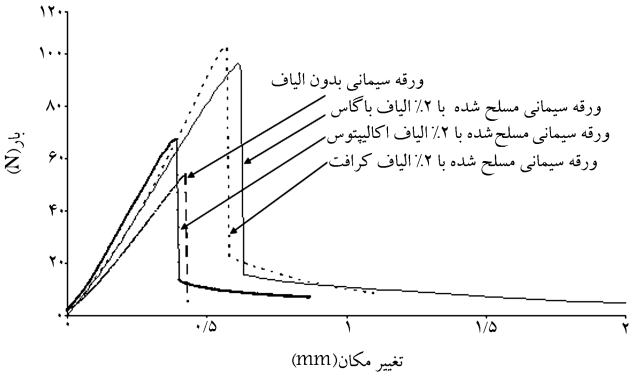
| گروه | مقاومت خمشی کمینه (MPa) |
|---|---|
| ۱ | ۴ |
| ۲ | ۷ |
| ۳ | ۱۰ |
| ۴ | ۱۶ |
| ۵ | ۲۲ |

## ۵. نتایج آزمایش‌ها

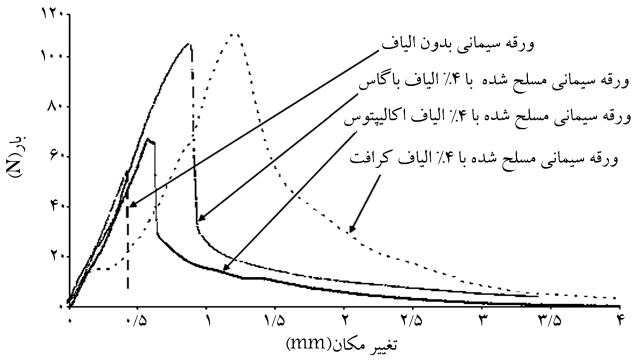
### ۱.۵. بررسی منحنی تنش ـ تغییر مکان

در شکل ۴ نمودار بار خمشی ـ تغییر مکان کامپوزیت‌های سیمانی را برای نمونه‌ی شاهد و سایر نمونه‌ها نشان داده شده است. افزودن الیاف به این نمونه‌ها به افزایش بیشینه بار قابل حمل منجر شده است. بیش‌ترین بار قابل حمل در نمونه‌ی شاهد (کنترل) که بدون الیاف است ۵۴٫۴۲ نیوتن است؛ این مقدار در نمونه‌های حاوی ۲ درصد الیاف اکالیپتوس، باگاس و کرافت به‌ترتیب برابر ۷۶٫۵۶، ۹۶٫۴ و ۱۰۲٫۸۸ نیوتن می‌شود.

برای شناخت دقیق‌تر رفتار نمونه‌ها، نمودارهای تنش ـ تغییر مکان باید ترسیم شود. برای یافتن این نمودار می‌توان از روابط ۱ تا ۴ استفاده کرد:




الف) حاوی ۲٪ الیاف؛




ب) حاوی ۴٪ الیاف.

**شکل ۴. نمودار بار تغییر ـ مکان ورقه‌های سیمانی مسلح شده با الیاف گیاهی و مقایسه با نمونه‌ی شاهد.**

مقدار تنش در بارگذاری خمشی

$$\sigma = M/W \qquad (۱)$$

مقدار گشتاور خمشی حاصل از بارگذاری نقطه‌یی با تکیه‌گاه ساده

$$M = PL/۴ \qquad (۲)$$

اساس سطح مقطع مستطیلی

$$W = \frac{BH^۲}{۶} \qquad (۳)$$

رابطه‌ی تنش ـ کرنش و ضریب کشسانی

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \qquad (۴)$$

با قراردادن مقادیر $M$ و $W$ در رابطه‌ی ۱ مقدار تنش براساس رابطه‌ی ۵ قابل محاسبه است. همچنین در محدوده‌ی ارتجاعی مقدار خیز براساس رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید.

$$\sigma = \frac{۳PL}{۲BH^۲} \qquad (۵)$$

$$\delta = \frac{PL^۳}{۴۸EI} \qquad (۶)$$

لذا با افزایش بار $P$ مقدار $\delta$ در هر لحظه توسط دستگاه قابل اندازه‌گیری است. چنانچه در رابطه‌ی ۶ مقدار ضریب کشسانی در محدوده‌ی ارتجاعی براساس تغییر مکان ایجادشده براثر بارگذاری خمشی مد نظر باشد، می‌توان آن را مطابق رابطه‌ی ۷ محاسبه کرد:

$$E = \frac{PL^۳}{۴۸\delta I} \qquad (۷)$$

و برای محاسبه‌ی ممان اینرسی مقطع مستطیلی:

$$I = \frac{۱}{۱۲}BH^۳ \qquad (۸)$$

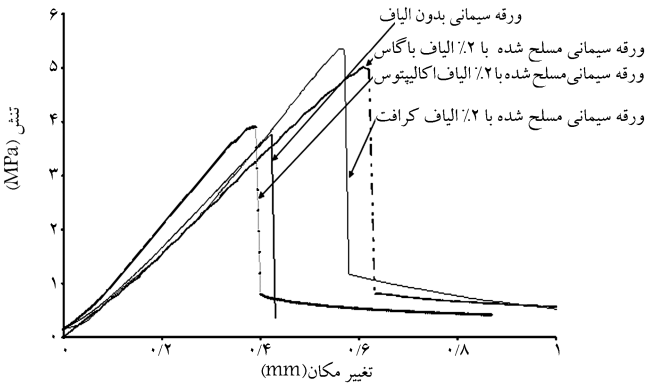
بنابراین با داشتن مقدار $E$ از رابطه‌ی ۷ و $I$ از رابطه‌ی ۸، در هر لحظه بارگذاری می‌توان مقدار $\varepsilon$ را از رابطه‌ی ۹ حساب کرد:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \qquad (۹)$$

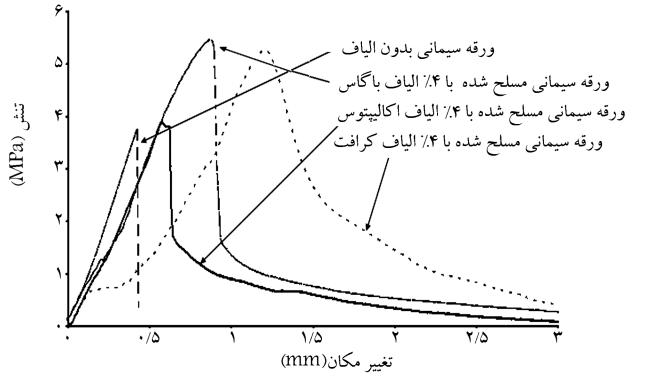
با به‌دست آوردن مقدار $\varepsilon$، می‌توان نمودار $\sigma - \varepsilon$ را رسم کرد. با توجه به این که براساس استاندارد EN ۱۲۴۶۷:۲۰۰۴ نمودار تنش ـ تغییر مکان می‌تواند برای مقایسه‌ی رفتار خمشی نمونه‌ها مورد استفاده قرارگیرد، در شکل ۵ این نمودارها رسم شده است.

در روابط ۱ تا ۹، $\sigma$ تنش وارده به نمونه‌ها (MPa)، $B$ عرض نمونه (mm)، $M$ گشتاور خمشی (N-mm)، $L$ طول نمونه(mm)، $W$ اساس مقطع ($mm^۳$)، $H$ ضخامت نمونه (mm)، $\varepsilon$ کرنش، $I$ ممان اینرسی مقطع ($mm^۴$)، $P$ بار اعمالی (N)، $E$ ضریب کشسانی (MPa)، $\delta$ جابه‌جایی نمونه (خیز) در محل اعمال بار (mm).

در شکل ۵ منحنی‌های تنش ـ تغییر مکان کامپوزیت‌های حاوی الیاف و نمونه‌ی شاهد رسم شده است. مشاهدات انجام‌شده در هنگام انجام آزمایش‌ها و بررسی نمودارها نشان می‌دهد که ورقه‌های سیمانی بدون الیاف (نمونه‌ی شاهد) هنگام اعمال




**الف) حاوی ۲٪ الیاف؛**

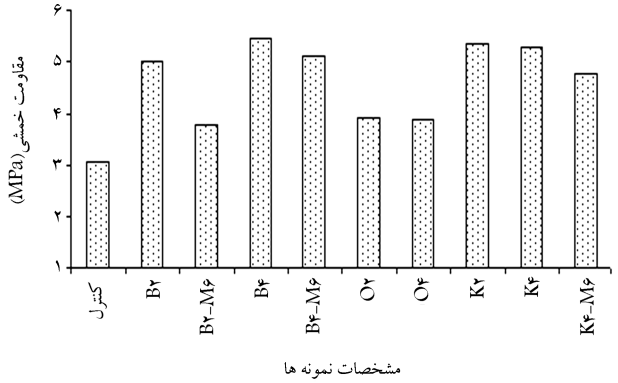



**ب) حاوی ۴٪ الیاف.**

**شکل ۵. نمودار تنش ـ تغییر مکان ورقه‌های سیمانی مسلح‌شده با الیاف گیاهی و مقایسه با نمونه‌ی شاهد.**

بار رفتاری کاملاً شکننده و ترد دارند. به‌عبارت دیگر، هنگام افزایش بار و رسیدن به نقطه‌ی تسلیم، ورقه‌ی سیمانی ناگهان گسیخته می‌شود. با افزودن الیاف به ورقه‌های سیمانی رفتار خمشی نمونه‌ها تغییر می‌کند، به‌طوری که شیب قسمت اول نمودار (در مرحله‌ی صعودی) کاهش یافته و همچنین بعد از رسیدن به بار بیشینه، شکست آن‌ها به‌صورت ترد نبوده و انعطاف‌پذیری نسبتاً زیادی در آن‌ها ایجاد می‌شود (این رفتار در نمونه‌های حاوی ۴ درصد الیاف بهتر نمایان است). انتظار اولیه آن است که الیاف تا قبل از اولین ترک مویی در نمونه‌ها وارد عمل نشوند، اما در اینجا مشاهده می‌شود که از ابتدای مراحل بارگذاری الیاف در باربری کامپوزیت نقش مؤثری دارند.

همچنین با دقت در این نمودارها (در قسمت کشسان) مشخص می‌شود که ورقه‌های سیمانی بدون الیاف، نسبت به ورقه‌های کامپوزیتی حاوی الیاف، رفتار ارتجاعی خطی بیشتری دارند. این نمودارها نشان می‌دهند که استفاده از الیاف طبیعی در ورقه‌های سیمانی می‌تواند علاوه برکاهش شیب منحنی بار ـ تغییر مکان، سبب افزایش تنش تسلیم بیشینه در آن‌ها شود که این موضوع به نوع و درصد الیاف مورد استفاده ارتباط دارد. برای مثال در این نمودارها تأثیر الیاف کرافت نسبت به اکالیپتوس در بهبود مقاومت خمشی بیشتر بوده است. مهم‌ترین تفاوت در نمودارهای تنش ـ تغییر مکان این ورقه‌ها، رفتار آن‌ها بعد از تحمل بیشترین بار وارده است. در نمونه‌های شاهد (کنترل) که در آن‌ها از الیاف استفاده نشده است، بلافاصله بعد از رسیدن به نقطه‌ی اوج، نمونه به‌طور ناگهانی شکسته شده و توانایی باربری را کاملاً از دست داده است. درکامپوزیت‌های حاوی الیاف، بعد از تحمل بار بیشینه، کاهش ناگهانی در ظرفیت باربری مشاهده نمی‌شود و نمونه‌ها می‌توانند به تحمل بار ادامه دهند؛ البته مقدار آن در نمونه‌های مختلف، متفاوت است. این رفتار به‌علت پل‌زدن




**شکل ۶. بیشترین مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف در مقایسه با نمونه‌ی شاهد.**

الیاف بین دو ترک ایجاد شده است. تقریباً در تمام نمونه‌ها با اضافه‌کردن الیاف به ورقه‌های سیمانی، رفتار ترد و شکننده‌ی این مواد طی اِعمال بار خمشی به سمت رفتار شکل‌پذیر سوق می‌یابد.

شکل ۶ مقاومت خمشی بیشینه‌ی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. افزودن الیاف باگاس به مقادیر ۲ درصد و ۴ درصد به کامپوزیت‌های سیمانی به‌ترتیب سبب افزایش مقاومت خمشی به مقدار ۳۷ و ۴۴ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است. بیشترین نرخ افزایش با افزودن الیاف تا ۲ درصد ایجاد می‌شود و مقدار افزایش مقاومت هنگامی که مقدار الیاف از ۲ به ۴ درصد افزایش می‌یابد بسیار اندک است. با افزایش الیاف بیش از ۲ درصد، به‌دلیل وزن سبک الیاف باگاس، این الیاف در مخلوط به‌صورت غیر همگن توزیع و روی سطح دوغاب ظاهر می‌شوند، و ورق سیمانی تولیدشده در یک وجه دارای تراکم سیمان و در وجه دیگر دارای تراکم الیاف است. به‌همین دلیل، الیاف در درصدهای بالاتر مورد آزمون قرار نگرفت، اگرچه ممکن است با توجه به فرایند هچک (شکل ۱) و با توجه به تشکیل لایه‌ها بر روی نمد تسمه‌نقاله، امکان افزایش درصد الیاف باگاس در فرایند واقعی هچک بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی فراهم شود. درمورد مقادیر بیشتر از ۲ درصد نیز به نظر می‌رسد که الیاف باگاس درکامپوزیت سازگاری خوبی دارد و با پذیرش نقش تقویت‌کنندگی در ورقه‌ی سیمانی سبب بهبود مقاومت خمشی آن می‌شود. اما چنان‌که اشاره شد، شکل ظاهری نمونه‌ها نمی‌تواند مورد تأیید باشد. تراکم سیمان در یک وجه و تراکم الیاف در وجه دیگر سبب تضعیف مقاومت خمشی خواهد شد؛ بنابراین اضافه‌کردن این الیاف در مقادیر بالاتر از ۴ درصد متوقف شد.

عملکرد الیاف اوکالیپتوس در کامپوزیت سیمانی نشان می‌دهد که به‌رغم تأثیرگذاری این الیاف در شکل‌پذیری نمونه، نقش چندانی در افزایش مقاومت خمشی نداشته‌اند. این الیاف علاوه بر این که در مقایسه با الیاف باگاس مقاومت کششی پایین‌تری دارند سازگاری مناسبی با خمیر سیمان ندارند. به‌عبارت دیگر چسبندگی و پیوستگی آن‌ها با خمیر سیمان کم‌تر از باگاس است، زیرا مشاهده‌ی نمونه‌های شکسته شده نشان می‌دهد که بین این الیاف و خمیر سیمان حفره‌های ریزی ایجاد شده که می‌تواند ناشی از عدم چسبندگی محصولات هیدراتاسیون با این الیاف باشد. افزایش این الیاف نیز نمی‌تواند در بهبود مقاومت خمشی مؤثر باشد زیرا مشاهده‌ی نمونه‌های شکسته‌شده نشان داد که این الیاف به‌صورت کاملاً غیرهمگن در خمیر سیمان توزیع شده‌اند و در هنگام مخلوط کردن آن‌ها با خمیر سیمان به‌جای توزیع مناسب در خمیر سیمان برخی از آن‌ها به یکدیگر چسبیده و به توده‌یی از الیاف بدل شده‌اند. همچنین بررسی قطر الیاف نشان می‌دهد که در میان الیاف استفاده

شده، الیاف اکالیپتوس قطر بیشتری دارند. در درصدهای یکسان استفاده شده، این موضوع سبب کاهش سطح تماس الیاف و خمیر سیمان شده و بدین‌ترتیب چسبندگی الیاف به خمیر و درنتیجه، مقاومت خمشی نمونه‌ها کاهش خواهد یافت. بدیهی است چسبیدن این الیاف به یکدیگر و تبدیل‌شدن آن‌ها به یک توده در خمیر سیمان موجب کاهش بیشتر سطح جانبی مؤثر آن‌ها در تماس با خمیر سیمان شده و عملاً همگنی مخلوط سیمان را کاهش می‌دهند.

رفتار خمشی کامپوزیت‌های حاوی کرافت در شکل ۶ نشان می‌دهد که بیشترین مقاومت ورقه‌های سیمانی با استفاده از این نوع الیاف سلولزی به دست آمده است. الیاف کرافت دارای بیشترین نسبت طول به قطر در مقایسه با دو نوع الیاف دیگر هستند که درنتیجه سطح زیادی برای ایجاد سطح تماس و پیوند با خمیر سیمان ایجاد خواهند کرد. همچنین توزیع این الیاف در خمیر سیمان بسیار همگن‌تر از سایر نمونه‌ها بوده است، به‌طوری که تقریباً به‌صورت یکسان در تمام مخلوط توزیع شده و نمونه‌یی با سطح بسیار صاف و هموار ایجاد می‌کنند. از مقایسه‌ی نتایج این تحقیق با سایر تحقیقات انجام شده[۷و۸] مشخص شد که مقاومت خمشی کامپوزیت‌های سیمانی حاوی الیاف کرافت در این تحقیق حدود بیست تا چهل درصد نسبت به مقاومت خمشی به دست آمده در تحقیقات مشابه کم‌تر است. مهم‌ترین علت این موضوع طول کوتاه (حدود ۰٫۸ میلی‌متر) الیاف به کاربرده شده در این تحقیق در مقایسه با تحقیقات مشابه (که الیاف کرافت به کار رفته در آنها به‌طول ۱٫۵ تا ۲٫۵ میلی‌متر بوده‌اند) است. طول بلند الیاف کرافت (حدود ۱٫۵ تا ۲٫۵ میلی‌متر) سبب افزایش طول مهاری الیاف که نقش انتقال تنش وارده به خمیر سیمان را دارد، می‌شود. از آنجا که تنش کششی الیاف کرافت، که نوعی الیاف سلولزی هستند، بسیار زیاد است احتمال پارگی الیاف در حین تحمل بار کم‌تر وجود دارد. به‌دلیل محدودیت تجهیزات ازمایشگاهی در کشور امکان اندازه‌گیری مقاومت کششی الیاف کرافت وجود ندارد، اما براساس تحقیقات انجام‌شده[۲] مقاومت کششی این نوع از الیاف حدود ۸۰۰ مگاپاسکال است. همین موضوع سبب می‌شود که سُرخوردگی (بیرون‌کشیدگی) الیاف از خمیر سیمان، بیشترین نوع شکست مشاهده شده در حین آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های کامپوزیتی باشد. بنابراین به نظر می‌رسد که با افزایش طول الیاف که تأمین‌کننده‌ی چسبندگی و پیوستگی لازم بین الیاف و خمیر سیمان است، تنش خمشی قابل حمل نمونه‌ها افزایش یابد.

در کشور ایران بیشترین تنوع درختان جنگلی برای تولید کاغذ، چوب درختان پهن‌برگ (چوب سخت) مانند راش، ممریز، انجیلی، توسکا و صنوبر است. الیاف به دست آمده از این نوع درختان بسته به روش‌های مختلف تولید الیاف (کرافت یا NFFC، نیمه‌مکانیکی، نیمه‌شیمیایی و مکانیکی ـ حرارتی) دارای طول کوتاه (حدود ۰٫۸ تا ۱ میلی‌متر) و قطر حدود ۵ تا ۵۰۰ میکرون هستند. در حالی که در بسیاری از نقاط جهان درختان جنگلی که برای تولید کاغذ به کار می‌روند از نوع درختان سوزنی‌برگ (چوب نرم) مانند نراد، کاج، سرو و کاج نوئل هستند که الیاف تولیدشده‌ی آن‌ها متناسب با شیوه‌ی تولید، دارای طول بلند (۱ تا ۲٫۵ میلی‌متر) و قطر حدود ۵ تا ۵۰۰ میکرون هستند. به‌عبارت دیگر طول زیاد این الیاف سبب می‌شود تا علاوه بر افزایش طول مهاری‌شان و به‌تبع آن افزایش مساحت جانبی، نسبت طول به قطر آن‌ها نیز افزایش یابد که این موضوع عامل مهمی در افزایش مقاومت خمشی کامپوزیت‌های سیمانی محسوب خواهد شد.

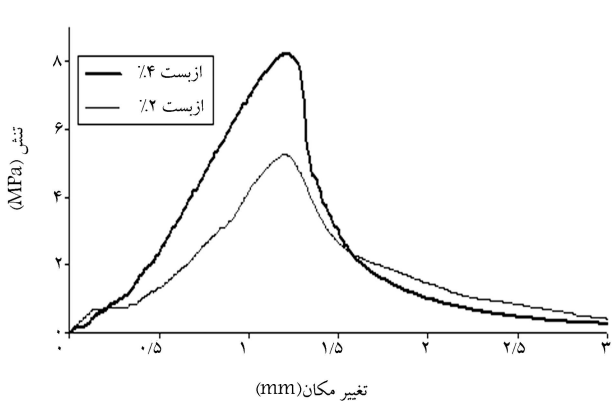
از آنجا که مقدار درختان سوزنی‌برگ در ایران بسیار محدود است و بیشتر کاربردهای تزیینی دارند، لذا به‌منظور تأمین پیوستگی و مقاومت کششی مورد نیاز در تولید انواع کاغذهای مصرفی، مانند کاغذ سفید، کارتن‌های قهوه‌یی و غیره در کشور ایران لازم است، حدود ۲۵ درصد الیاف بلند سلولزی وارداتی که دارای طول ۱٫۵ تا ۲٫۵ میلی‌متر هستند برای تولید خمیر کاغذ در مخلوط اضافه شود. این الیاف عمدتاً از روسیه، اسکاندیناوی و کشورهای اروپایی به ایران وارد می‌شود.

از جمله مزایای کاربرد الیاف کرافت در خمیر سیمان آن است که فرایند تولید این الیاف به‌روش شیمیایی در محیط قلیایی (محلول هیدروکسید کلسیم و یا سود با نسبت وزنی مایع به چوب برابر با ۱ تا ۰٫۱) با $PH = ۱۰ - ۱۲$ است و به همین دلیل این الیاف در محیط قلیایی خمیر سیمان که ناشی از واکنش‌های هیدراتاسیون است، پایدار باقی می‌مانند.

با به‌کار بردن میکروسیلیس به‌مقدار ۵ درصد وزنی جایگزین سیمان در کامپوزیت‌های سیمانی، مقاومت خمشی همه‌ی نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نسبت به سایر نمونه‌ها کاهش یافته است. در منابع مختلف، تأثیر مثبت میکروسیلیس در ورقه‌های سیمانی عمدتاً به‌دلیل دو سازوکار شناخته‌شده است. یکی به‌علت فعالیت پوزولانی بسیار زیاد آن است که سبب کاهش هیدروکسید کلسیم غیرمفید حاصل از هیدراتاسیون سیمان پرتلند با آب است که آن را به سیلیکات کلسیم هیدراته مفید و مؤثر در فرایند کسب مقاومت خمیر سیمان تبدیل می‌کند. تأثیر دیگر میکروسیلیس به‌دلیل ریزبودن ذرات آن است که در کنار نرمی زیاد آن‌ها، باعث پرکردن خلل و فرج بین ذرات ژل و سیمان می‌شود و به این ترتیب مقاومت خمشی را افزایش می‌دهد.[۲] اما نتایج این تحقیق، برخلاف تحقیقات دیگر محققین کاهش مقاومت خمشی را نشان داده است. براساس بررسی به عمل آمده به نظر می‌رسد عامل مهمی که می‌تواند در کاهش مقاومت نقش داشته باشد «خارج‌شدن بخش زیادی از ذرات بسیار ریز میکروسیلیس در هنگام آبکشی با دستگاه ایجاد خلاء» است که این ذرات بسیار ریز به‌همراه آب خروجی از منافذ ریز صفحه‌ی فلزی که در کف قالب قرار داشته، خارج شده‌اند. در این صورت کاهش مقاومت خمشی قابل انتظار خواهد بود، زیرا میکروسیلیس که جایگزین سیمان شده بود از مخلوط خارج شده است. به‌عبارت دیگر مقدار مواد چسباننده در مخلوط کاهش یافته و این موضوع سبب کاهش مقاومت کامپوزیت سیمانی می‌شود.

به‌منظور مقایسه‌ی نتایج با نمونه‌ی حاوی الیاف آزبست، در شکل ۷ نتایج آزمون خمشی مربوط به نمونه‌های حاوی ۲ و ۴ درصد الیاف آزبست که در آزمایشگاه ساخته شده، ارائه شده است.

چنان که مشاهده می‌شود، الیاف آزبست به‌دلیل مقاومت کششی و ضریب کشسانی بالا، نسبت طول به قطر بسیار زیاد و همچنین چسبندگی مناسب با خمیر سیمان رفتار بسیار مطلوبی از خود بروز می‌دهد. همچنین افزایش این الیاف

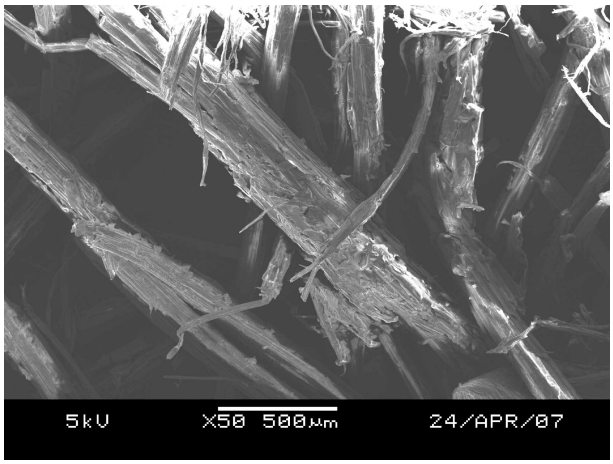



**شکل ۷. نمودار تنش ـ تغییر مکان ورقه‌های سیمانی مسلح شده با الیاف آزبست سفید حاوی ۲ و ۴ درصد الیاف.**

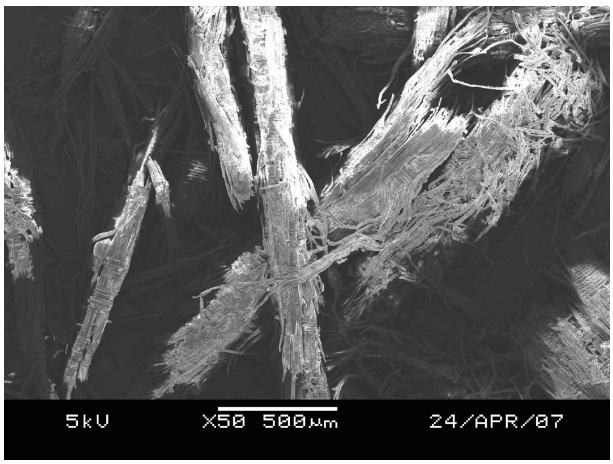
باعث افزایش شکل‌پذیری نمونه می‌شود. نمونه‌ی حاوی ۲ درصد الیاف آزبست مقاومت خمشی ۵/۳ و نمونه‌ی حاوی ۴ درصد مقاومت خمشی ۸/۲ مگاپاسکال را نشان می‌دهد. این در حالی است که در ورقه‌های سیمانی موج‌دار ساخته‌شده در کارخانه‌های ایران معمولاً حدود ۱۲ تا ۱۵ درصد الیاف آزبست به کار می‌رود و مقاومت خمشی آن‌ها نیز حدود ۱۲ تا ۱۷ مگاپاسکال است.

برای شناخت ریزساختار و جزئیات قرارگیری الیاف در ماتریس سیمان، تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی (SEM)[۶] از آن‌ها در شکل‌های ۸ تا ۱۰ ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود الیاف باگاس استفاده شده سطح نسبتاً زبری دارند یا به‌عبارت دیگر دارای رشته‌ها یا تارچه‌های متعددی هستند که می‌توانند درگیری مکانیکی مناسبی با ماتریس سیمان ایجاد کنند (شکل ۸). همچنین ذرات خاکه (ذرات بسیار ریزی که در اطراف الیاف قرارگرفته و باعث عدم‌گیرش مناسب با خمیر سیمان می‌شود)، که می‌تواند با لغزش در سطح مشترک الیاف ـ خمیر سیمان از عملکرد مناسب الیاف بکاهد، در این الیاف وجود ندارد. بنابراین، باگاس مورد استفاده که فاقد خاکه بوده و دارای طول حدود ۱/۳ میلی‌متر و سطح مناسب برای ایجاد پیوند مکانیکی با سیمان است، در افزایش مقاومت خمشی تأثیر مهمی داشته است.

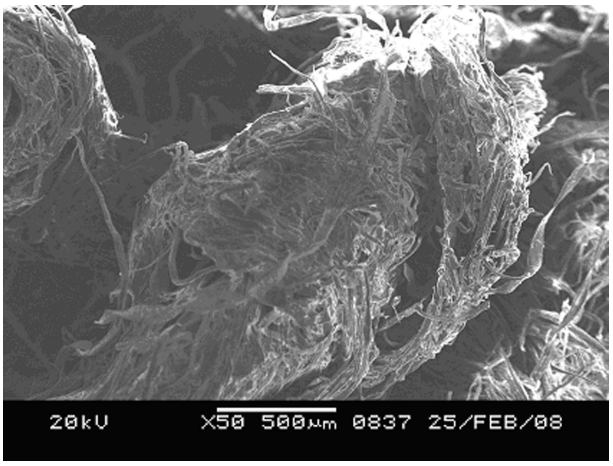
الیاف اکالیپتوس اگرچه در برخی قسمت‌ها به‌خوبی رشته‌رشته شده‌اند و توده الیاف به الیاف تک تبدیل شده است، سطح الیاف نسبت به الیاف باگاس صاف‌تر




شکل ۸. تصویر SEM از الیاف باگاس.




شکل ۹. تصویر SEM از الیاف اکالیپتوس.




شکل ۱۰. تصویر SEM از الیاف کرافت.

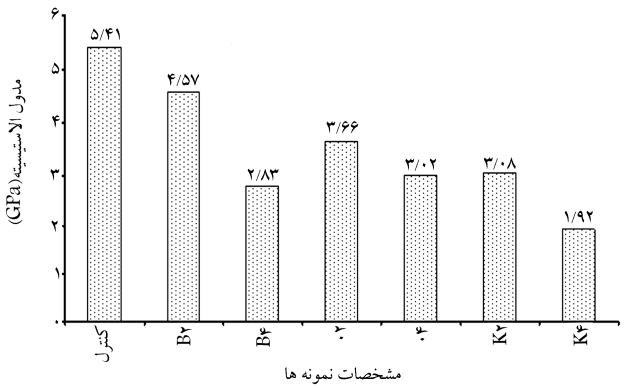
است (شکل ۹). همچنین میانگین قطر این الیاف بزرگ‌تر بوده و سطح تماس کم‌تری برای چسبندگی با خمیر سیمان دارند. لذا در مقایسه با باگاس در بهبود مقاومت خمشی تأثیر چندانی نداشته است.

ریزساختار الیاف کرافت نشان می‌دهد که این الیاف به‌خوبی رشته‌رشته شده است (شکل ۱۰). رشته‌رشته‌شدن مناسب این الیاف سبب ایجاد تارچه‌های متعدد در سطح آن‌ها شده که می‌تواند سطح تماس‌شان را با ماتریس سیمان بسیار زیاد کند. موضوع دیگری که درمورد الیاف کرافت وجود دارد، نسبت طول به قطر زیاد و همچنین قطر کم آن‌ها در مقایسه با سایر الیاف است. این موضوع در افزایش سطح تماس الیاف با ماتریس سیمان بسیار اهمیت دارد و می‌تواند نقش مهمی در افزایش ظرفیت باربری خمشی کامپوزیت‌های سیمانی داشته باشد.

## ۲.۵. ضریب کشسانی

ضریب کشسانی براساس شیب منحنی تنش ـ تغییر مکان در محدوده‌ی صعودی نمودارها محاسبه شده و مقادیر آن‌ها در شکل ۱۱ ارائه شده است. ضریب رگرسیون برای همه‌ی نمونه‌ها بیش از ۰/۹۵ است که بیان‌گر خطی‌بودن نمودار در محدوده‌ی صعودی نمودارهاست. چنان‌که مشاهده می‌شود، ضریب کشسانی اغلب نمونه‌ها کم‌تر از نمونه‌ی شاهد است. همچنین در هر سه نوع الیاف استفاده شده با افزایش درصد الیاف، ضریب کشسانی کاهش می‌یابد. عوامل متعددی بر مقدار ضریب کشسانی کامپوزیت سیمانی مؤثر است. در صورتی که ورق سیمانی به‌عنوان یک جسم مرکب متشکل از دوفاز (الیاف و خمیر سیمان) در نظر گرفته شود، مقدار ضریب کشسانی الیاف می‌تواند در مقدار ضریب کشسانی جسم کامپوزیت تأثیر داشته باشد. به‌طوری که هر چه ضریب کشسانی الیاف بالاتر باشد، مدول کامپوزیت سیمانی هم بالاتر خواهد رفت. مقادیر ضریب کشسانی هریک از الیاف در جدول ۳ ارائه شده است. از آنجا که مقدار ضریب کشسانی الیاف بیش از خمیر سیمان است انتظار می‌رفت که کامپوزیت ساخته شده با این الیاف دارای ضریب کشسانی بالاتری نسبت به خمیر سیمان (بدون الیاف) باشد.

اما نتایج آزمایشگاهی خلاف این موضوع را نشان می‌دهند. مهم‌ترین دلیل این است که با افزایش درصد الیاف، حجم نمونه‌ها به‌مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش حجم به‌طور واضح در افزایش ضخامت نمونه‌ها برای ۲ درصد الیاف از حدود ۵ به حدود ۶ میلی‌متر و برای ۴ درصد الیاف از حدود ۶ به حدود ۷ میلی‌متر مشاهده می‌شود. درصد افزودن الیاف به مخلوط تاحدودی باعث افزایش




**شکل ۱۱. ضریب کشسانی ورقه‌های کامپوزیت سیمانی حاوی الیاف طبیعی.**

ضخامت و بالتبع افزایش حجم نمونه می‌شود، مثلاً با در نظرگرفتن چگالی الیاف، افزودن ۲ درصد وزنی الیاف (نسبت به سیمان) باید حدوداً شش درصد به حجم مخلوط اضافه کند در حالی که در عمل، این موضوع باعث افزایش ضخامت از شش میلی‌متر به حدود هفت میلی‌متر می‌شود و این مقدار معادل حدوداً ۱۷ درصد افزایش حجم نمونه‌ها را به دنبال خواهد داشت. افزایش ضخامت ناشی از افزایش تخلخل در نمونه‌هاست به‌طوری که در حین ساخت نمونه‌ها در دستگاه مخلوط‌کن نیز حباب‌های زیادی بر روی دوغاب سیمان ظاهر شد. به‌عبارت دیگر، هرچند وجود الیاف که خود دارای ضریب کشسانی بالاتر نسبت به سیمان است، درافزایش ضریب کشسانی کامپوزیت نقش مهمی دارد، تأثیرات جانبی آن مانند افزایش تخلخل به حدی زیاد است که بر خلاف تصور اولیه، افزایش درصد وزنی الیاف باعث کاهش ضریب کشسانی می‌شود.

بررسی تحقیقات انجام شده در این زمینه نیز نشان می‌دهد که روابط اولیه‌ی ارائه شده توسط سایر محققین درمورد ضریب کشسانی کامپوزیت‌های سیمانی ـ الیافی چنین بوده است:[۱۵]

$$E_c = E_m(1 - V_f) + E_f V_f \qquad (۱۰)$$

که در آن $E_c$، $E_m$ و $E_f$ به‌ترتیب مدول کامپوزیت، ماتریس سیمان و الیاف و $V_f$ درصد حجمی الیاف درکامپوزیت است. از آنجا که این رابطه در بسیاری از موارد با نتایج آزمایشگاهی تفاوت‌هایی داشت، براساس نتایج تحقیقات جدیدتر[۱۱و۲] این روابط اصلاح شده و به‌صورت رابطه‌ی ۱۱ تکمیل شد. نتایج این تحقیقات نشان داد که با افزودن الیاف به خمیر سیمان مقدار حفره‌های ماتریس سیمان بیشتر شده و درنتیجه نقایص خمیر سیمان افزایش می‌یابد. بدین‌ترتیب خمیر سیمان در این حالت ضریب کشسانی کم‌تری نسبت به نمونه‌ی شاهد (کنترل) خواهد داشت. در این حالت مقدار ضریب کشسانی از رابطه‌ی ۱۱ به دست می‌آید:

$$E_m = E_{mo}(1 - p) \qquad (۱۱)$$

که در آن $E_{mo}$ ضریب کشسانی ماتریس سیمانی بدون الیاف، و $p$ درصد حفره‌ها درکامپوزیت است که خود تابعی از درصد الیاف بوده و از رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید:

$$p = ۰/۰۵۲۲ + ۳/۷۴۰۷ V_f \qquad (۱۲)$$

نکته‌ی مهمی که در حین انجام آزمایشات مشاهده شد وجود کف و حباب زیاد در حین ساخت نمونه‌های حاوی الیاف کرافت نسبت به دو نوع الیاف دیگر بود. به نظر می‌رسد این موضوع تأثیر مهمی در کاهش ضریب کشسانی نمونه‌های کرافت (و افزایش ضخامت‌های این نمونه‌ها) نسبت به دیگر نمونه داشته باشد. وجود حباب و کف در حین ساخت نمونه‌ها ممکن است ناشی از شیمیایی‌بودن فرایند تولید الیاف کرافت در محیطی کاملاً قلیایی باشد. وجود مواد قلیایی در این الیاف سبب می‌شود تا این مواد در مجاورت مواد روغنی که برای چرب‌کردن قالب‌ها استفاده شده است، با آب واکنش دهد و کف تولید کند.

## ۶. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تأثیر سه نوع از الیاف طبیعی (باگاس، اکالیپتوس و کرافت) که غالباً از ضایعات محصولات کشاورزی یا کاغذهای باطله به دست آمده، بر رفتار خمشی خمیر سیمان مورد بررسی قرارگرفته است. در این راستا نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد:

۱. دو نوع از الیاف طبیعی (باگاس و کرافت) به‌طور کلی با خمیر سیمان سازگار بوده و به‌دلیل امکان جذب آب می‌توانند درون مخلوط سیمان به‌خوبی توزیع شده و چسبندگی مناسبی با خمیر سیمان داشته باشند.

۲. بر اساس استاندارد EN ۱۲۴۶۷:۲۰۰۴ تمام نمونه‌های ساخته‌شده با توجه به مقاومت خمشی آن‌ها، درگروه ۲ قرار می‌گیرند.

۳. بیشینه درصد قابل اختلاط الیاف با خمیر سیمان بستگی به جنس، طول و قطر الیاف دارد.

۴. با افزایش طول الیاف، عملکرد خمشی کامپوزیت‌ها بهبود می‌یابد. البته برحسب نوع و مشخصات الیاف و شرایط آزمایش نباید این میزان از حدود معینی افزایش یابد زیرا موجب درهم رفتگی و پیچیدن الیاف و عدم توزیع یکنواخت آن‌ها در خمیر سیمان می‌شود.

۵. با افزایش نسبت طول به قطر الیاف، عملکرد آن‌ها در خمیر سیمان بهبود می‌یابد.

۶. وجود رشته‌ها (شاخک‌های کوچکی که در اثر سایش بر روی الیاف ایجاد می‌شود) می‌تواند باعث چسبندگی و پیوستگی بیشتر الیاف با خمیر سیمان شده و مقاومت خمشی را بهبود بخشد.

۷. به‌طور کلی عملکرد الیاف مورد بررسی در این تحقیق از نظر تأثیرشان بر بهبود مقاومت خمشی به‌ترتیب مربوط به الیاف کرافت، باگاس و اکالیپتوس بوده است.

۸. برای دست‌یابی به مخلوط همگن الیاف در خمیر سیمان لازم است نسبت آب به سیمان حدود ۳ تا ۴ باشد و با شیوه‌ی خاصی (مانند فرایند هچک) بعد از ساخت و شکل‌گیری نمونه، آب اضافی به‌نحو مناسبی از مخلوط خارج شده و نسبت آب به سیمان به حدود ۰/۳ برسد.

۹. انجام سایر آزمایش‌ها از جمله آزمایش‌های دوام مانند نفوذپذیری، جذب آب، دوره‌های یخ‌بندان و ذوب در تحقیقات آتی توصیه می‌شود تا امکان کاربرد این الیاف برای ساخت کامپوزیت‌های سیمانی از نقطه‌نظرهای مختلف بررسی شود.

با انجام تحقیقات تکمیلی در این زمینه می‌توان به فنّاوری ساخت ورق‌های سیمانی با الیاف طبیعی برای انواع کاربری‌های دست یافت. این نوع از ورق‌های سیمانی، فاقد مخاطرات زیست‌محیطی بوده و برای سلامتی انسان تهدیدی به شمار نمی‌آیند. افزون بر این، می‌توان از این فرایند به‌عنوان شیوه‌یی مناسب برای کاربرد انواع ضایعات محصولات کشاورزی، مانند ساقه‌ی گیاه نیشکر یا برخی از انواع کاغذهای باطله، در صنایع بازیافتی بهره جست.

## پانوشت

1. serpentines
2. amphobiles
3. chrysotile
4. Hatschek
5. Canadian standard freeness (CSF)
6. scanning electron macroscopy

## منابع


1. Coutts R.S.P. "A review of Australian research into natural fiber cement composites", *Cement and Concrete Composites,* **27**, pp. 518-526 (2005).
2. Bentur A. and Midness S. "Fiber reinforced cementitious composites", *Elsevier* pp.2 (1990).
3. WHO meeting, Oxford, United Kingdom, pp. 10-11 (April 1989).
4. Kane, A.B., *Mechanisms of Mineral Fibres Carcinogenesis,* International Agency for Research on Cancer, Lyon, France, pp. 11-34 (1996).
5. Nicholson, W.J. "The carcinogenicity of chrysotile asbestos. A review", *Ind. Health,* **39** , pp. 57-64 (2001).
6. Morrissey, F.E. and Coutts, R.S.P. "Bond between cellulose fibres and cement", *Cement Composite Lightweight Concrete* **7**(2), pp. 73-80 (1985).
7. Mohr, B.J.; Nanko, H. and Kurtis, K.E. "Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling", *Cement Concrete Composite*, **25**, pp. 435-448 (2005).
8. Thielemans, W. and Wool, R.P. "Butyrated kraft lignin as compatibilizing agent for natural fiber reinforced thermoset composites", *Compos Part A: Appl Sci Manuf*, **35**, pp. 327-338 (2004).
9. Agopyan, V.; Savastano Jr. H. and Cincotto, M.A. "Developments on vegetable fibre-cement based materials in Sao Paulo, Brazil: An overview", *Cement and Concrete Composite*, **27**, pp. 527-536 (2005).
10. Bilba, K.; Arsene, M.A. and Ouensanga, A. "Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite", *Cement Concrete Composite*, **25**, pp. 91-96 (2003).
11. Pehanich, L.; Blankenhorn, P.R. and Silsbee, M.R. "Wood fiber surface treatment level effects on selected mechanical properties of wood fiber-cement composites", *Cement and Concrete Research*, **34**, pp. 59-65 (2004).
12. Mohr, B.J.; Nanko, H. and Kurtis, K.E. "Aligned kraft pulp sheets for reinforcing mortar", *Cement and concrete composite,* **27**, pp. 554-564 (2005).
13. Cook, D.J. "Natural fiber reinforced concrete and cement-recent developments", *Materials Research Society Annual Meeting,* Boston, pp. 251-8 (1980).
14. Luiz, C.; Roma, Jr.a.; Luciane, S. Martelloa and Holmer Savastano Jr. "Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers" *Construction and Building Materials,* **22**(4), pp. 668-674 (April 2008).
15. Allen H.G. "Tensile properties of seven asbestos cements", *Composites,* **2**, pp. 98-103 (1971).