

## بهینه‌سازی متغیرهای تولید فراورده‌های مرکب الیاف طبیعی - سیمان به روش سطح پاسخ

### چکیده

این تحقیق باهدف بررسی تولید فراورده مرکب الیاف طبیعی - سیمان با استفاده از صنوبر، کاه گندم و سه نوع ماده افزودنی انجام شده است. در این تحقیق برای تولید کامپوزیت از کاه گندم (۰، ۱۵، ۳۰)، الیاف صنوبر (۷۰، ۸۵ و ۱۰۰)، درصد استفاده از مواد افزودنی (۳ سطح) و سه نوع ماده افزودنی (کلرید کلسیم، کلرید منیزیم و هیدروکسید کلسیم) استفاده گردید. پس از تهیه نمونه‌های آزمون، مقاومت فشاری طی مدت‌زمانی (۱، ۳، ۷ و ۲۸ روز)، واکنش‌پذیری ضخامت (TS)، مدول گسیختگی (MOR) و چسبندگی داخلی (IB) مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور بهینه‌سازی خواص کامپوزیت‌ها، معادله مدل ریاضی (مدل رگرسیون چند متغیره درجه دو) توسط روش سطح پاسخ ارزیابی گردید. بیشترین میزان مقاومت فشاری (۳۲/۵ مگا پاسکال) و کمترین آن (۷/۱ مگا پاسکال) ۲۸ روزه به ترتیب مربوط به نمونه‌های دارای ۷ درصد هیدروکسید کلسیم و ۳ درصد کلرید منیزیم می‌باشد. همچنین کامپوزیت‌های دارای ۳۰٪ کاه گندم و ۷۰٪ الیاف صنوبر با میزان ۳ درصد کلرید کلسیم نسبت به سایر نمونه‌ها دارای مدول گسیختگی بیشتری می‌باشند. به‌طور کلی، نتایج حاکی از آن است که ماده افزودنی کلرید کلسیم با میزان ۵٪ و مقدار متوسط نسبت ۱۵٪ کاه به ۸۵٪ الیاف صنوبر به‌عنوان مقادیر بهینه جهت حصول مقادیر قابل قبول چسبندگی داخلی و مدول گسیختگی می‌باشد. مدل ارائه شده توسط روش سطح پاسخ با توجه به معنی‌داری آن در طی آنالیز آماری، برآورد مناسب و معنی‌داری برای تعیین نقطه مناسب کاربرد متغیرهای مورد استفاده را فراهم کرده است.

**واژگان کلیدی:** الیاف طبیعی، روش سطح پاسخ، صنوبر، کاه گندم، مواد افزودنی.

وحیبه صادقی پناه<sup>۱\*</sup>  
مرتضی ناظریان<sup>۲</sup>  
بابک نصرتی ششکل<sup>۳</sup>  
رحیم محبی گرگری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری فراورده‌های چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار، گروه سامانه‌های زیستی، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
<sup>۳</sup> استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه زابل، ایران  
<sup>۴</sup> مربی، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه زابل، ایران

مسئول مکاتبات:

[Sadeghi.vsp@gmail.com](mailto:Sadeghi.vsp@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۲۰

### مقدمه

فراورده‌های مرکب الیاف طبیعی - سیمان از جمله فراورده‌های مرکب چوبی هستند که در فرآیند تولید آن الیاف طبیعی سلولزی به کمک سیمان به یکدیگر متصل می‌شوند [۱]. این فراورده‌ها به دلیل دارا بودن خواص کاربردی مانند مقاومت در برابر آتش، پایداری ابعادی و مقاومت در برابر عوامل مخرب زیستی و عدم انتشار گاز فرمالدهید برخلاف چندسازه‌های باتصال مصنوعی در دهه‌های اخیر مورد توجه صنعت ساختمان و محققین و

صنعت‌گران قرار گرفته‌اند [۲]. با توجه به محدود بودن منابع مواد اولیه به‌ویژه در بخش منابع طبیعی، تأمین ماده اولیه چوبی مورد نیاز صنایع رو به گسترش از یک‌سو و حفظ منابع محدود جنگلی تأمین‌کننده چوب از سوی دیگر هر روز اهمیت بیش‌تری یافته است؛ اما کاربرد این ضایعات معایبی دارد که می‌تواند خواص کامپوزیت الیاف طبیعی - سیمان را شدیداً تحت تأثیر قرار دهد [۳]. ابعاد الیاف طبیعی می‌تواند بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی تأثیر بسزایی داشته باشد. با افزایش ضریب کشیدگی،

باعث افزایش سرعت این فرایند شده و زمان گیرایی سیمان را بهبود بخشند [۱۲]. Ashori و همکاران (۲۰۱۲)، در تحقیق روی فراورده‌های مرکب سیمانی ساخته‌شده با رشته‌های صنوبر به این نتیجه دست یافتند که تمام خواص فراورده‌های مرکب بهبودیافته با افزایش مقدار کلرید کلسیم ( $\text{CaCl}_2$ ) از ۳ به ۷ درصد افزایش یافت [۱۳]. Mejia-Ballesteros و همکاران (۲۰۱۹)، تأثیر افزودنی‌های معدنی بر ساختار و خصوصیات فراورده‌های مرکب الیاف-سیمان به این نتیجه رسیدند که افزودن آلومینو سیلیکات موجب بهبود مقاومت فشاری و خمشی فراورده‌های مرکب الیاف-سیمان می‌گردد [۱۴].

فراورده‌های مرکب الیاف طبیعی - سیمان از محصولات مهندسی ساز جدید می‌باشد و در مقایسه با محصولات در حال رقابت، این محصول در مرحله اولیه منحنی نفوذ به بازار قرار گرفته است [۱۵]. امروزه فراورده‌های مرکب الیاف طبیعی - سیمان را می‌توان در محصولاتی مانند لوله‌های قالبی بدون فشار و مصالح ساختمانی اساساً به‌صورت تولیدات تخته‌ای باریک مشاهده نمود [۱۶]. روش سطح پاسخ، مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل مسائلی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن‌ها پاسخ مورد نظر تحت تأثیر چندین متغیر گوناگون قرار دارد. هدف از اعمال این روش، یافتن بهترین مجموعه از سطوح عامل برای رسیدن به بعضی ویژگی‌های خاص و مورد نظر می‌باشد [۱۷]. در این بررسی اثرات همزمان کاربرد ذرات کاه گندم، مقدار و نوع مواد افزودنی و درصد چوب صنوبر با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی فراورده مرکب الیاف طبیعی - سیمان مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### مواد اولیه

کلرید کلسیم ( $\text{CaCl}_2$ )، کلرید منیزیم ( $\text{MgCl}_2$ ) و هیدروکسید کلسیم ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) از شرکت مرک آلمان

ضریب فشردگی و سطح ویژه ذرات واکشیدگی ضخامتی و خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها بهبود می‌یابد. همچنین با کاهش ابعاد ذرات، امکان حل شدن مواد استخراجی و قندها در محلول سیمانی افزایش می‌یابد. افزایش انحلال این مواد باعث می‌شود تا مقاومت کامپوزیت‌های ساخته‌شده از ذرات کوچک‌تر کاهش یابد [۴، ۵]. از جمله مزایای کاربرد الیاف طبیعی در فراورده‌های مرکب چوب-سیمان می‌توان به ارزان بودن، قابلیت تجدیدپذیری و بازیابی و سازگاری با محیط‌زیست اشاره کرد [۶]. در کنار این مزایا می‌توان جذب رطوبت زیاد الیاف و پیوند محدود بین الیاف و ماتریس سیمان را از معایب استفاده از الیاف طبیعی در کامپوزیت‌های سیمانی دانست [۷]. از جمله معایب کامپوزیت‌های سیمانی تقویت‌شده با الیاف طبیعی، تخریب شدید الیاف در محیط‌قلیایی می‌باشد که برای رفع این مشکل ملات استفاده از خاکستر فرار توسط محققین پیشنهاد شده است و کامپوزیت‌های حاصله نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهند [۸]. در این خصوص Agopyan و همکاران (۲۰۰۵)، بیان داشتند که با وجود ماندگاری ضعیف الیاف گیاهی در محیط سیمانی می‌توان از آن‌ها به‌عنوان تقویت‌کننده‌ای مناسب در ملات‌های شکننده استفاده و مصالحی با خصوصیات بهینه جهت اهداف ساختمان‌سازی محلی تولید نمود [۹]. Savastano و همکاران (۲۰۰۴)، با مطالعه الیاف طبیعی به‌عنوان جایگزین الیاف آریست در محصولات سیمانی نتیجه گرفتند که سطوح نامنظم الیاف خمیر کرافت اکالیپتوس گراندیس سبب اتصال مکانیکی قابل قبولی با ملات می‌شود و این الیاف با اتصالات مناسب سبب بهبود خصوصیات مکانیکی سیمان می‌شود [۱۰].

علاوه بر اعمال تیمارهای رطوبتی در شرایط مختلف، کاربرد مواد شیمیایی عمدتاً معدنی تحت عنوان مواد تسریع‌کننده می‌تواند نه‌تنها باعث بهبود معنی‌دار خواص فیزیکی و مکانیکی تخته شود، بلکه همزمان باعث کاهش هزینه تولید و رفع مشکلات ناشی از دفع یا تصفیه پساب می‌گردد [۱۱]. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده توسط محققین مواد افزودنی مانند کلرید منیزیم ( $\text{MgCl}_2$ ) و کلرید کلسیم می‌توانند به‌عنوان تسریع‌کننده هیدراتاسیون

تهیه شدند. همچنین کاه گندم از مزارع کشاورزی و الیاف صنوبر از کارگاه‌های پوشال‌گیری شهرستان زابل تهیه شدند (جدول ۱). در این بررسی از سیمان پرتلند معمولی

(تیپ ۱) تولید کارخانه سیمان شرق مشهد (مشهد، ایران) استفاده گردید که درصد ترکیبات شیمیایی تشکیل‌دهنده این نوع سیمان در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی الیاف طبیعی مورد استفاده

گونه	مواد استخراجی (%)	سلولز (%)	لیگنین (%)	خاکستر (%)
صنوبر	۴/۸	۴۱/۷	۲۸/۴	۰/۸
کاه گندم	۶/۳	۴۳	۱۸/۵	۵/۵

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند معمولی (تیپ ۱)

گوگرد تری‌اکسید	اکسید منیزیم	اکسید کلسیم	تری آلومینات کلسیم	تترا کلسیم آلومینو فریت	کلسیم سیلیکات	تری کلسیم سیلیکات
۲/۱۹	۲/۸	۱٪	کمتر از ۰/۱۵٪	۷٪	۱۹٪	۵۵٪

## تیمارها

در این تحقیق عوامل متغیر شامل درصد اختلاط رشته‌های چوب صنوبر به ذرات ساقه کاه گندم در ۳ سطح (۰/۱۰۰، ۱۵/۸۵ و ۳۰/۷۰)، سه نوع ماده‌ی شیمیایی کلرید کلسیم، کلرید منیزیم و هیدروکسید کلسیم به‌عنوان ماده افزودنی در ۳ سطح (۳، ۵ و ۷ درصد) نسبت به وزن خشک سیمان مورد استفاده قرار گرفت. سایر عوامل تحقیق شامل ضخامت ۱۴ میلی‌متر فرآورده‌های مرکب، نوع سیمان (تیپ ۱)، دانسیته فرآورده‌های مرکب که حدود ۱/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب، فشار پرس (۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) و فرآورده‌های مرکب دارای ابعاد  $۳۰ \times ۳۰ \times ۱/۴$  سانتی‌متر برای تمام تیمارها ثابت در نظر گرفته شد.

## تولید فرآورده‌های مرکب الیاف طبیعی - سیمان

در این تحقیق برای ساخت فرآورده مرکب الیاف طبیعی - سیمان از صفحه‌های آلومینیومی به ابعاد  $۳۱ \times ۳۱$  سانتی‌متر و یک قالب چوبی به ابعاد  $۳۵ \times ۳۵$  سانتی‌متر استفاده گردید. برای تهیه کیک الیاف طبیعی - سیمان ابتدا هر یک از مواد افزودنی و آب مقطر باهم مخلوط گردید و در مرحله بعد سیمان و الیاف طبیعی به این ترکیب افزوده شده و کاملاً مخلوط گردیدند. مخلوط حاصل به داخل قالب چوبی انتقال و پس از قرار دادن صفحه

آلومینیومی بر روی آن تحت پرس سرد قرار گرفت. از شابلون‌های فلزی نیز برای کنترل ضخامت فرآورده‌های مرکب استفاده گردید. فرآورده‌های مرکب حاصل از پرس سرد خارج و به مدت ۲۸ روز آبدهی گردید تا مقاومت نهایی آن‌ها حاصل شود. بعد از این مدت فرآورده‌های مرکب در شرایطی با دمای ثابت قرار داده شد تا کاملاً خشک شوند. کلیه اندازه‌گیری‌های خواص فرآورده‌های مرکب بعد از گذشت ۲۸ روز از زمان ساخت آن‌ها، مطابق با استاندارد انجام شد [۲۰-۱۸].

## تهیه نمونه‌های آزمونی

تهیه نمونه‌های آزمونی با استفاده از یک دستگاه اره گرد نجاری انجام گردید و تخته‌ها ابتدا کناره‌بری شده و بعد برش نمونه‌های مقاومت خمشی، واکشیدگی ضخامت و چسبندگی داخلی انجام گردید. نمونه‌های چسبندگی داخلی و واکشیدگی ضخامت پس از انجام آزمایش‌های خمشی از آن‌ها تهیه گردید. بنابراین اندازه  $۳۰ \times ۱۰ \times ۱/۴$  سانتی‌متر برای مقاومت خمشی، اندازه  $۱۰ \times ۱۰ \times ۱/۴$  سانتی‌متر برای واکشیدگی ضخامت و اندازه  $۵ \times ۵ \times ۱/۴$  سانتی‌متر برای چسبندگی داخلی در نظر گرفته شده است [۲۱].

## آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی

آزمون‌های فیزیکی (واکشیدگی ضخامت و جذب آب) بر اساس استاندارد EN 317 پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب انجام شد [۱۷]. آزمون مقاومت فشاری نمونه‌ها توسط دستگاه (Hounsfield-H25KS) در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل، گروه صنایع چوب تعیین گردید. نمونه‌های مورد آزمون بر اساس استاندارد ASTM D3501 به صورت مکعب مستطیل شکل با عرض ۱ سانتی‌متر و طول ۲ سانتی‌متر بود. تیمارهای مورد آزمون طی ۴ مدت‌زمانی (۱، ۳، ۷ و ۲۸ روز) با سه تکرار مورد آزمون

قرار گرفتند [۲۲]. مدول گسیختگی (MOR) بر اساس استاندارد EN 310 انجام شد [۱۸].

## طرح آماری

در این پژوهش از روش سطح پاسخ (RSM) و استفاده از طرح مرکب مرکزی (CCD) جهت بررسی اثر متغیرهای آزمایش استفاده شد. آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Design Expert 7 انجام شد. متغیرهای مستقل شامل نسبت صنوبر به کاه گندم، درصد مواد افزودنی و نوع مواد افزودنی بود که در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- سطوح متغیرهای مستقل فرایند و کدهای مربوطه

کد و سطح مربوطه		متغیرهای مستقل		
+	۰	-	نماد	
۳۰/۷۰	۱۵/۸۵	۰/۱۰۰	A	نسبت صنوبر به کاه گندم (rpm)
۷	۵	۳	B	مواد افزودنی (%)
CaCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>	C	نوع مواد افزودنی

## نتایج و بحث

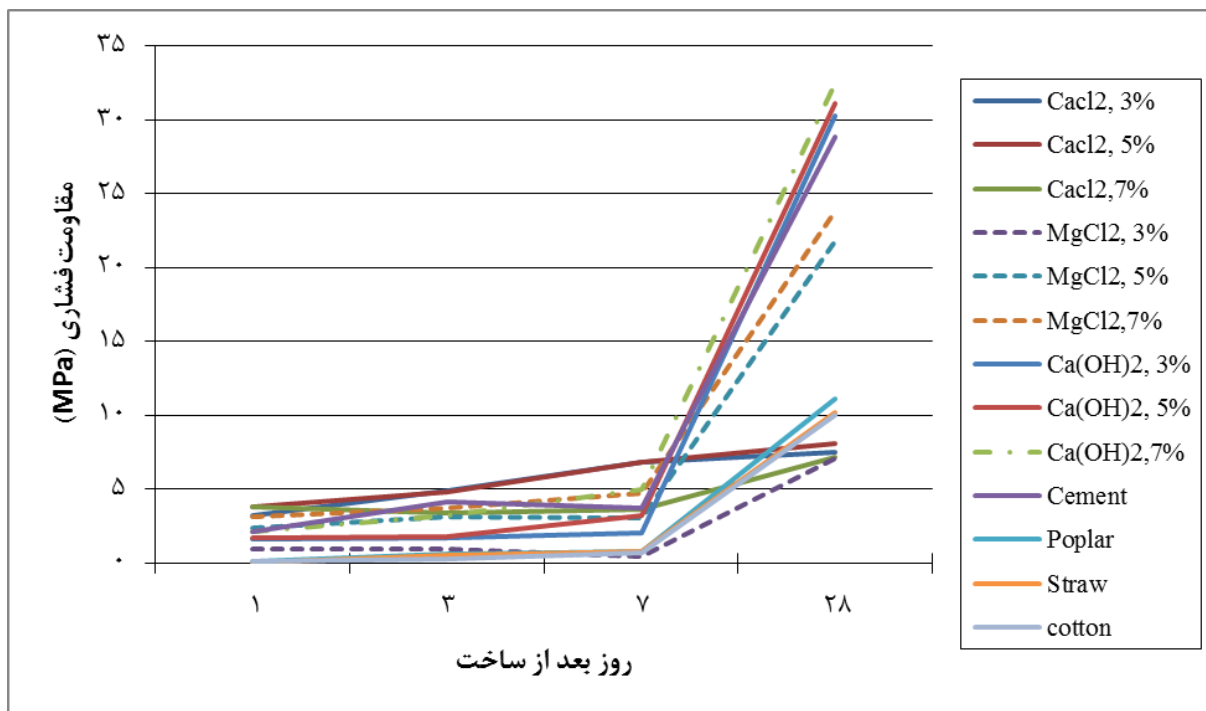
### مقاومت فشاری سیمان و فراورده‌های مرکب ساخته‌شده

شکل ۱، تأثیر افزودن تسریع‌کننده‌ها را بر روی مقاومت فشاری سیمان بعد گذشت ۱، ۳، ۷ و ۲۸ روز را نشان می‌دهد. مشاهده شد که مواد استخراجی موجود در صنوبر و کاه باعث کاهش مقاومت فشاری سیمان سخت شده می‌شوند. کاهش در مقاومت فشاری سیمان سخت شده نه تنها در مراحل اولیه آزمون مقاومت فشاری مشاهده شد بلکه مقاومت فشاری نمونه‌های که بعد از ۲۸ روز آزمون شدن نیز کاهش قابل توجه پیدا کرده بود که میزان مقاومت فشاری سیمان خالص سخت شده بعد از ۲۸ روز برابر ۲۸/۹ مگا پاسکال بود، در حالی که بعد از ۲۸ روز در مورد نمونه‌های ساخته‌شده از کاه گندم به ۱۰/۱ مگا پاسکال و برای صنوبر به ۱۱/۱ مگا پاسکال کاهش را نشان داد. همچنین مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری برای بلوک‌های سیمانی که در ترکیب آن‌ها از آهک ۳ و ۷ درصد استفاده شده با بلوک‌های سیمانی خالص شسته شده که کلرید کلسیم ۳ درصد به آن‌ها اضافه شده است

برای ۷ روزه دارای یک مقاومت فشاری می‌باشند. هرچند که مقاومت فشاری ۳۰۱ و ۷ روز برای بلوک‌های سیمانی که به آن‌ها کلرید کلسیم ۳ درصد اضافه شده است نسبت به مقدار مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن کمتر می‌باشد. اثر نوع ماده افزودنی (کلرید منیزیم و کلرید کلسیم) بر روی مقاومت فشاری معنی‌دار نیست. ولی مقدار ماده افزودنی (۳ و ۵ درصد) فقط برای کلرید منیزیم اثر معنی‌داری بر روی مقاومت فشاری داشته است. این نتایج مطابق با نتایج Stark و Xu (۲۰۰۵) در خصوص فراورده‌های مرکب ساخته‌شده با کلرید منیزیم است که با افزایش مقدار این ماده، مقاومت فشاری معنی‌دار نبوده است [۲۳]. بیشترین میزان مقاومت فشاری (۳۲/۵ مگا پاسکال) ۲۸ روز را بلوک‌های سیمانی که به آن‌ها آهک ۷ درصد افزوده شده است؛ و کم‌ترین میزان مقاومت فشاری (۷/۱ مگا پاسکال) ۲۸ روز مربوط به بلوک‌های سیمانی که به آن‌ها کلرید منیزیم ۳ درصد می‌باشد. همچنین Dante و همکاران (۲۰۱۴)، نیز از جمله عوامل تضعیف پیوند بین الیاف و ماتریس را اثر جداره و شکل‌گیری لایه‌ای ضعیف از کریستال‌های هیدروکسید کلسیم در سطح تماس الیاف و

این یافته‌ها با نتایج به دست آمده توسط Mejia-Ballesteros و همکاران (۲۰۱۹)، Stark و Xu (۲۰۰۵)، Dante و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد [۲۳، ۱۴].

ماتریس سیمان معرفی می‌کنند [۲۴]. Mejia-Ballesteros و همکاران (۲۰۱۹)، نیز در مطالعه خود بهبود ویژگی مقاومت فشاری فرآورده مرکب الیاف-سیمان را توسط آلومینوسیلیکات گزارش کرده‌اند [۱۴].



شکل ۱- تأثیر افزودن تسریع‌کننده‌ها بر روی مقاومت فشاری

### واکشیدگی ضخامت (TS)

طبق جدول ۴، نتایج به دست آمده از واکشیدگی ضخامت به طور معنی‌داری ( $p < 0.05$ )، تحت تأثیر متغیر-های تولید مورد استفاده در ساخت فرآورده مرکب الیاف طبیعی- سیمان قرار گرفت. شکل ۲، اثر متغیرهای مورد استفاده بر واکشیدگی ضخامت فرآورده مرکب ساخته شده از مدل معادله را نشان می‌دهد. محققان در بررسی ویژگی‌های فرآورده‌های مرکب الیاف طبیعی- سیمان ساخته شده با خرده‌های دم برگ نخل بیان می‌کنند که افزایش مقدار کلرید منیزیم در ترکیب فرآورده‌های مرکب باعث افزایش واکشیدگی ضخامت فرآورده‌های مرکب می‌شود [۲۵]. کلرید منیزیم به دلیل ماهیت قلیائی جذب آب را افزایش می‌دهد و در نتیجه باعث افزایش واکشیدگی ضخامت می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود، کمترین میزان واکشیدگی ضخامت با استفاده هیدروکسید

### ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی فرآورده‌های

#### مرکب الیاف طبیعی- سیمان

نتایج هر یک از متغیرها به صورت مجزا در جداول دیگر برای واکشیدگی ضخامت (۴)، چسبندگی داخلی (۵) و مدول گسیختگی (۶) به عنوان سه پارامتر تابع MGS که نوع ماده افزودنی (A)، درصد ماده افزودنی (B) و نسبت گاه به چوب صنوبر (C) تعریف شده است. از ارتباط بین این سه پارامتر (واکشیدگی ضخامت، چسبندگی داخلی و مدول گسیختگی) معادلات زیر به دست آمده است.

$$Y_1 = 37.08 - 0.44A - 1/31C - 0.96B^2 \quad \text{معادله مدل TS}$$

$$Y_2 = 11/13 + 2/76A - 0.27C + 1/17A^2 - 2/51C^2 + 2/12AB - 1/11CB \quad \text{معادله مدل MOR}$$

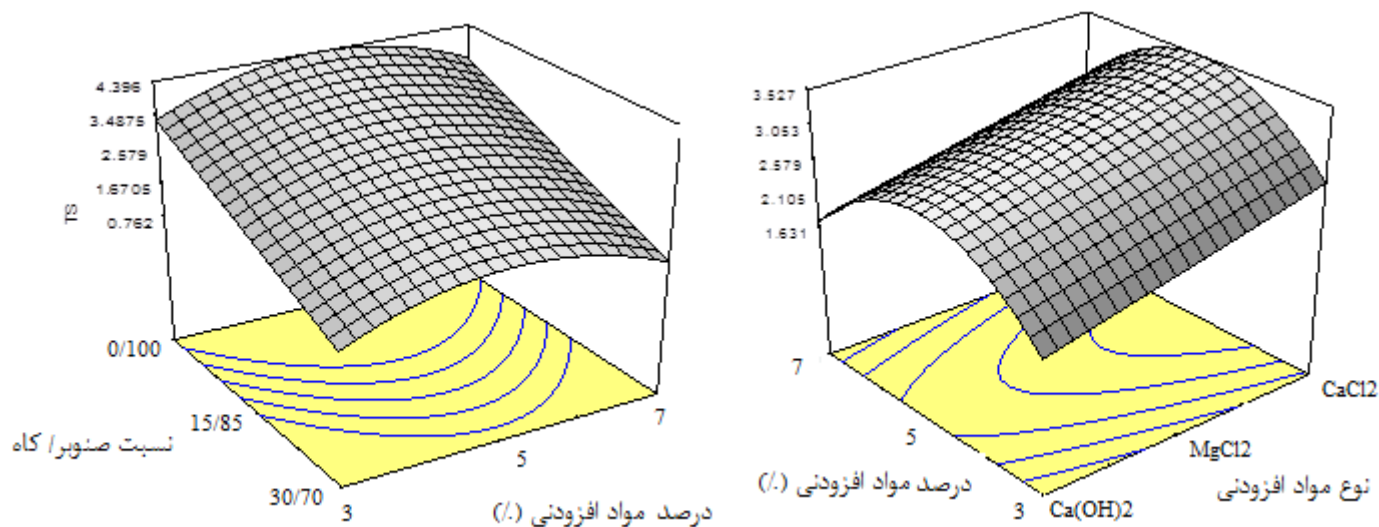
$$Y_3 = 2 + 0.12A + 0.16B + 0.19C + 0.073C^2 + 0.11AB - 0.04CB \quad \text{معادله مدل IB}$$

واکسیدگی ضخامتی وجود دارد. به طوری که با افزایش میزان واکسیدگی و در نتیجه برگشت ضخامتی بیشتر، این امکان فراهم می‌شود تا مقدار بیشتری آب در داخل فرآورده مرکب نفوذ کند. حضور مواد تسریع‌کننده هیدراتاسیون سیمان به واسطه نفوذ بیشتر کریستال‌های طولی‌تر (در نتیجه هیدراتاسیون کامل‌تر سیمان) به داخل منافذ میکرونی و اسفنجی ذرات الیاف، امکان نفوذ کمتر آب به داخل تخته را فراهم کرده و نتیجتاً کاهش جذب آب فراهم می‌شود [۱۱]. نتایج به دست آمده در خصوص واکسیدگی ضخامت با نتایج به دست آمده توسط Nazerian و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد [۱۱].

کلسیم به میزان ۳٪ ماده افزودنی و نسبت چوب صنوبر / کاه گندم (۰/۱۰۰) به دست آمد. در شکل ۱، اثر میزان افزودنی و نسبت کاه/چوب را بر واکسیدگی ضخامت در مقدار متوسط نوع افزودنی نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که نسبت بیشتر یا کمتر کاه/چوب، مقدار واکسیدگی ضخامت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این نتیجه احتمالاً در نتیجه این امر است که کاه گندم دارای مقدار بیشتری سلولز نسبت به چوب صنوبر می‌باشد [۲۶، ۲۷]. پس می‌توان نتیجه گرفت با کاهش کاه / چوب میزان واکسیدگی ضخامت نیز کاهش می‌یابد. همچنین در بسیاری از موارد، همبستگی معنی‌داری بین میزان جذب آب و میزان

جدول ۴- نتایج آنالیز واریانس مدل سطح پاسخ برای واکسیدگی ضخامت

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	احتمال p
مدل	۲۳/۸۲	۴	۵/۹۵	۳۳/۹۸	< ۰/۰۰۰۰۱
A	۱/۹۶	۱	۱/۹۶	۱۱/۲۰	۰/۰۰۴۴
C	۱۷/۲۱	۱	۱۷/۲۱	۹۸/۲۲	< ۰/۰۰۰۰۴
B <sup>2</sup>	۴/۶۲	۱	۴/۶۲	۲۶/۳۵	۰/۰۰۰۱
۰/۴۲	انحراف معیار		۰/۹۰۰۶		همبستگی (R <sup>2</sup> )
۰/۸۳۰۸	همبستگی پیش‌بینی شده		۰/۸۷۴۱		همبستگی برآورد شده



شکل ۲- اثر متغیرهای مختلف بر واکسیدگی ضخامتی (TS)

افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده از چسبندگی داخلی به‌طور معنی‌داری ( $p < 0/05$ ) تحت تأثیر متغیرهای تولید مورد استفاده در ساخت فرآورده مرکب الیاف طبیعی-سیمان قرار گرفت.

### چسبندگی داخلی (IB)

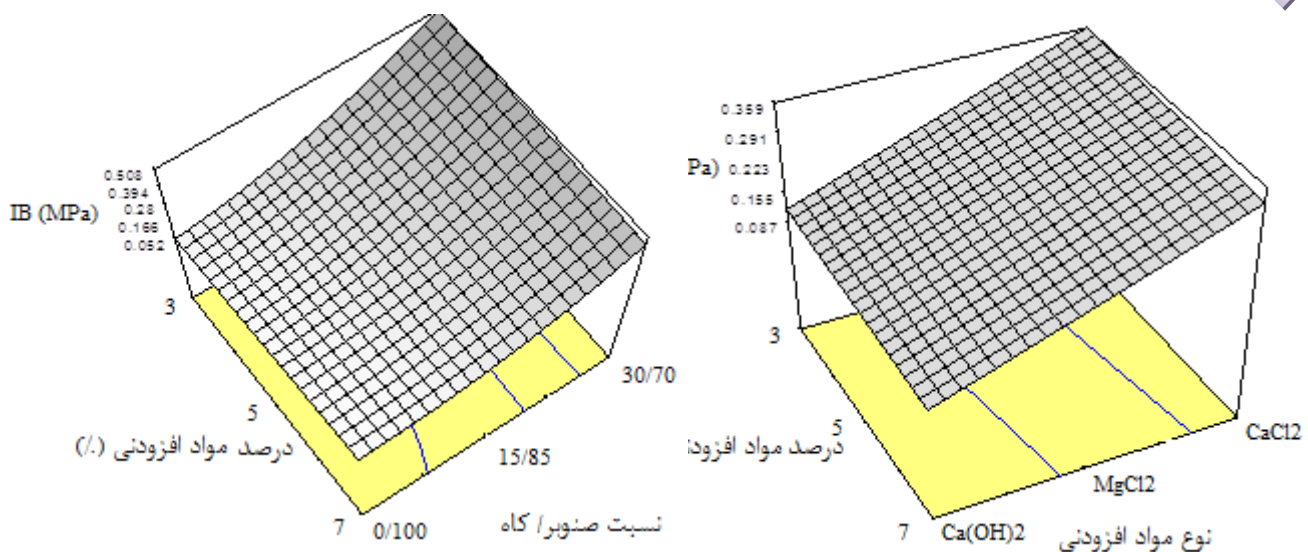
جدول ۵، نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل واریانس برای چسبندگی داخلی را نشان می‌دهد. مقاومت چسبندگی داخلی به مقدار ماده اتصال‌دهنده وابسته است. هر چه مقدار ماده معدنی اتصال‌دهنده بیشتر باشد، مقدار آن نیز

جدول ۵- نتایج آنالیز واریانس مدل سطح پاسخ برای چسبندگی داخلی

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	احتمال p
مدل	۰/۶۳	۶	۰/۱۰	۴۱/۹۱	< ۰/۰۰۰۱
A	۰/۱۴	۱	۰/۱۴	۵۷/۶۹	< ۰/۰۰۰۱
C	۰/۳۵	۱	۰/۳۵	۱۴۱/۵۹	< ۰/۰۰۰۱
C <sup>2</sup>	۰/۰۲۷	۱	۰/۰۲۷	۱۰/۶۷	۰/۰۰۱۶
AC	۰/۰۸۸	۱	۰/۰۸۸	۳۵/۳۳	< ۰/۰۰۰۱
BC	۰/۰۱۳	۱	۰/۰۱۳	۵/۱۳	۰/۰۴۱۳
۰/۰۵	انحراف معیار		۰/۹۵۹۶		همبستگی (R <sup>2</sup> )
۰/۸۸۳۲	همبستگی پیش‌بینی شده		۰/۹۲۸۲		همبستگی برآورد شده

پرتلند با خرده چوب صنوبر مورد بررسی قرار دادند، نتایج تحقیق وی نشان داد که مواد افزودنی بر گیرایی سیمان و کیفیت صفحات چوب سیمان اثر مطلوب داشته است، به اثر مثبت کلرید کلسیم در چسبندگی داخلی اشاره کردند [۲۸]. دلیل این امر به هیدراتاسیون بهتر سیمان در اثر کلرید کلسیم و خنثی شدن درصد بیشتری از مواد محدودکننده که مانع از گیرایی سیمان می‌شوند، نسبت داده شده است. بیشترین مقدار چسبندگی داخلی مربوط به فرآورده مرکبی با ۳ درصد کلرید کلسیم و نسبت چوب صنوبر به کاه گندم (۰/۱۰۰) می‌باشد. نتایج تحقیقات پژوهشگران نشان داده است که سطح خارجی ضایعات مواد لیگنوسولوزی عمدتاً پوشیده از مواد مومی می‌باشد. این مواد باعث ایجاد سطوح صیقلی سخت و چرب نامطلوب می‌شوند و باعث شکست سریع اتصالات بین سیمان و ذرات لیگنوسولوزی می‌شوند [۲۹].

شکل ۳، اثر متغیرهای مورد استفاده بر چسبندگی داخلی فرآورده مرکب ساخته شده از مدل معادله را نشان می‌دهد. وقتی میزان افزودنی به ۳ درصد کاهش پیدا می‌کند، چسبندگی داخلی به‌طور ثابت افزایش می‌یابد، توجه کنید که مقدار متوسط و بالا (به ترتیب ۰ و ۱) نوع افزودنی جهت به‌دست آوردن پیوستگی داخلی چندان مناسب نیست. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود پیوستگی داخلی بیشتر به نسبت کاه/چوب بستگی دارد تا نوع افزودنی است. توجه به این نکته مهم است که مقادیر بالای چسبندگی داخلی در پایین‌ترین مقدار نسبت کاه/چوب و میزان افزودنی به‌دست می‌آید. همچنین همزمان ملاحظه می‌شود که فرآورده‌هایی که دارای چسبندگی داخلی کمتری هستند، دارای برگشت ضخامت یا در واقع واکنشیدگی ضخامتی بیشتری هستند. Yazdi (۱۹۹۶) تأثیر مواد افزودنی را بر کیفیت اتصال سیمان



شکل ۳- اثر متغیرهای مختلف بر چسبندگی داخلی

داخلی تکه‌های چوب به ترتیب جهت استفاده‌های عمومی و ساخت مبلمان است. اثر متقابل نوع افزودنی، میزان مواد افزودنی و نسبت کاه/چوب بر مقدار مدول گسیختگی در شکل ۴ ارائه شده است. بیشترین مقدار مدول گسیختگی (حدود ۱۵ مگاپاسکال) مربوط به فرآورده مرکبی با استفاده ۳ درصد کلرید کلسیم با نسبت چوب صنوبر / کاه گندم (۳۰/۷۰) بود.

#### مدول گسیختگی (MOR)

روابط معنی‌داری نتایج به دست آمده تحت تأثیر نوع افزودنی، میزان افزودنی و نسبت چوب صنوبر/ کاه گندم در ساخت فرآورده مرکب الیاف طبیعی - سیمان برای مقدار مدول گسیختگی در جدول ۶ ارائه شده است. طبق نتایج مدول گسیختگی بین ۵/۹۹ تا ۱۵ مگا پاسکال متغیر می‌باشند. بر اساس استانداردها ۱۲/۵ و ۱۴ مگا پاسکال حداقل نیاز برای استاندارد گسیختگی و نیروی پیوستگی

جدول ۶- نتایج آنالیز واریانس مدل سطح پاسخ برای مدول گسیختگی

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	احتمال p
مدل	۲۴۵/۹۰	۷	۳۵/۱۳	۴۳/۹۱	< ۰/۰۰۰۱
A	۷۶/۱۲	۱	۷۶/۱۲	۹۵/۳۵	< ۰/۰۰۰۱
C	۱۰۲/۶۶	۱	۱۰۲/۶۶	۱۲۸/۳۵	< ۰/۰۰۰۱
A <sup>2</sup>	۴/۳۷	۱	۴/۳۷	۵/۴۶	۰/۰۳۶۳
B <sup>2</sup>	۲۰/۱۱	۱	۲۰/۱۱	۲۵/۱۴	۰/۰۰۰۳
AC	۳۵/۷۹	۱	۳۵/۷۹	۱۴/۷۳	< ۰/۰۰۰۱
BC	۹/۹۵	۱	۹/۹۵	۱۲/۴۳	۰/۰۰۴۲
۰/۸۹	انحراف معیار		۰/۹۶۲۴	R <sup>2</sup> (همبستگی)	
۰/۸۷۷۹	همبستگی پیش‌بینی شده		۰/۹۴۰۴	همبستگی برآورد شده	

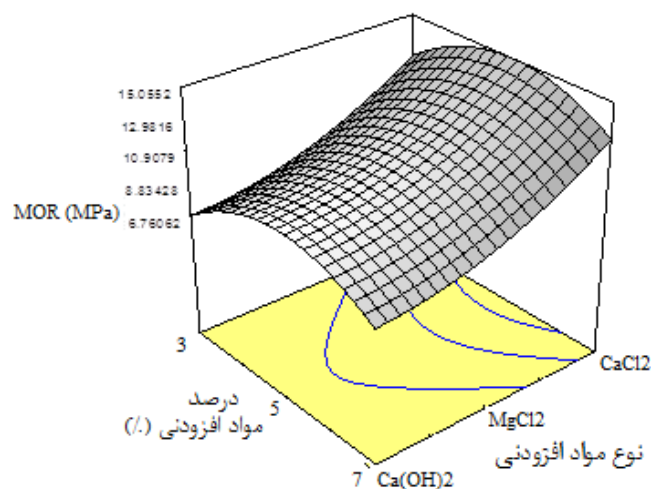
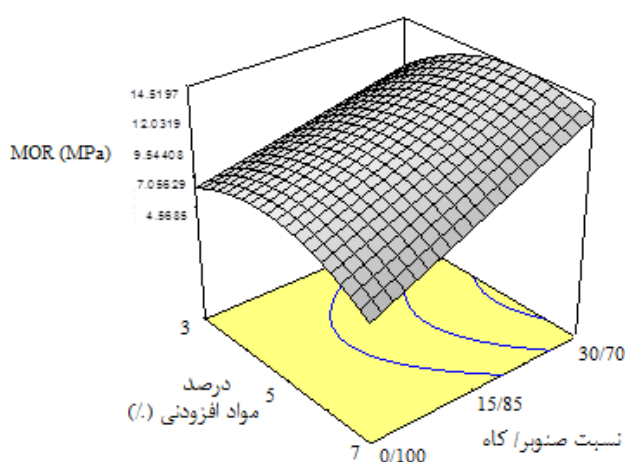
افزایش می‌یابد. باید بیان کرد که میزان متوسط میزان افزودنی برای حصول مقدار بالاتر مدول گسیختگی مناسب است، اما مقادیر خیلی زیاد میزان افزودنی برای مدول

شکل ۴ اثر نوع افزودنی و میزان آن را بر مدول گسیختگی نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که با استفاده از کلرید کلسیم، مدول گسیختگی به‌طور خطی



منیزیم و سیلیکون عمیقاً به دیواره سلولی ذرات چوب نفوذ می‌کنند. این نفوذ می‌تواند میزان نیروی چسبندگی بین ذرات چوب و سیمان را به‌طور قابل توجه‌ای بهبود دهد. کلرید کلسیم از انتشار مواد محدودکننده گیرایی سیمان (مواد قندی) در مرحله اول گیرش سیمان جلوگیری می‌کند [۲۸]. با افزودن مواد افزودنی به‌واسطه تأثیرگذاری بر روی سرعت هیدراتاسیون قبل از آن که مواد قندی و مواد استخراجی باعث کُندسازی فرآیند هیدراتاسیون در نتیجه تشکیل لایه نفوذناپذیر شوند، دانه‌های سیمان آب را جذب کرده و سرعت هیدراتاسیون افزایش یافته و باعث بهبود مقاومت‌های فرآورده مرکب می‌شود. کلرید منیزیم بیش‌ترین تأثیر را بر هیدراتاسیون سیمان دارد. علت این موضوع بهبود سازگاری بین اتصال-دهنده معدنی و ذرات لیگنوسولوزی و تسریع در فرایند هیدراتاسیون سیمان در نتیجه افزودن مواد افزودنی می‌باشد [۱۱].

گسیختگی مناسب نیست. این موضوع نشان می‌دهد که مقدار افزودنی اهمیتی ندارد درحالی‌که نوع افزودنی و نسبت چوب صنوبر/ کاه گندم مهم است. تأثیر میزان افزودنی و نسبت چوب صنوبر/ کاه گندم را بر مدول گسیختگی در مقدار متوسط نوع افزودنی نشان می‌دهد. قسمت ج تأثیر نوع افزودنی و نسبت چوب صنوبر/ کاه گندم را بر مدول گسیختگی در مقادیر متوسط میزان افزودنی نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که مقادیر بالاتر مدول گسیختگی در کمترین مقدار کاه گندم و بیشترین مقدار نوع افزودنی (کلرید کلسیم) به‌دست می‌آید. از طرح‌های سه‌بعدی مشخص است که نسبت چوب صنوبر/ کاه گندم تأثیر بسیاری هم بر چسبندگی داخلی و هم بر مدول گسیختگی دارد. ماده کلرید کلسیم خصوصیات مطلوب فرآورده مرکب را بهبود بخشیده است. دلیل این امر مینرالیزه شدن بهتر ذرات چوب و سخت‌تر حل شدن ماده قندی توسط این افزودنی نسبت به سایر افزودنی‌ها است [۳۰]. ترکیبات معدنی دارای کلسیم،



شکل ۴- اثر متغیرهای مختلف بر مدول گسیختگی

۵٪ ماده کلرید کلسیم به‌عنوان میزانی مناسب جهت حصول مقادیر قابل قبول چسبندگی داخلی و مدول گسیختگی می‌باشد درحالی‌که مقادیر زیاد نوع افزودنی و میزان آن باعث به‌دست آمدن مقادیر غیرقابل قبول چسبندگی داخلی و مدول گسیختگی می‌شود. کمترین میزان واکنشیدگی ضخامت با استفاده هیدروکسید کلسیم

### نتیجه‌گیری

مدل ارائه‌شده توسط روش سطح پاسخ با توجه به معنی‌داری آن در طی آنالیز آماری، برآورد مناسب و معنی‌داری برای تعیین نقطه مناسب کاربرد متغیرهای مورد استفاده را فراهم کرده است. به‌طور کلی، تقریباً مقدار متوسط نسبت چوب صنوبر/ کاه گندم (۱۵/۸۵) و افزودن

آوردن مقدار بیشتر مدول گسیختگی مناسب است، اما مقادیر خیلی زیاد مواد افزودنی برای مدول گسیختگی مناسب نیست. البته نتایج کامل این تحقیق نشان‌دهنده این است که می‌توان از ضایعات کشاورزی مانند کاه گندم با رعایت نسبت‌های مناسب، به‌عنوان ماده اولیه برای ساخت فراورده‌های مرکب الیاف-سیمان به‌منظور کاربرد در بخش‌های مختلف مانند دیوار استفاده نمود.

به میزان ۳٪ ماده افزودنی و نسبت چوب صنوبر به کاه گندم (۰/۱۰۰) به دست آمد. بیشترین مقدار مدول گسیختگی (حدود ۱۵ مگاپاسکال) مربوط به فراورده مرکبی با استفاده ۳ درصد کلرید کلسیم با نسبت چوب صنوبر به کاه گندم (۳۰/۷۰) بود. با استفاده از کلرید کلسیم، مدول گسیختگی به‌طور خطی افزایش می‌یابد. باید بیان کرد که میزان متوسط مواد افزودنی برای به‌دست

## منابع

- [1] Ebrahimi, G., 1989. Mechanics of wood and wood composites. Tehran University press, 690 pages. (Translated In Persian)
- [2] Yasuda, S., Hirano, J., Nagadomi, W., Tange, J. and Tachi, M., 1989. Manufacture of wood-cement boards. III. Cement-hardening inhibitory components of western red cedar heartwood. Journal of Wood Chemistry and Technology, 9:123-133.
- [3] Imai, T., Suzuki, M., Aoyama, K., Kawasaki, Y. and Yasuda, S. 1995. Manufacture of wood-cement boards. VI. Cement-hardening inhibitory compound of beech (*Fagus crenata* Blume). Mokuzai Gakkaishi, 41:44-50.
- [4] Nazerian, M., Gozali, E. and Dahmardeh ghalehno, M., 2011. The influence of wood extractives on the hydration kinetics of cement paste and cement – bonded particleboard. Journal of applied science, 11(12): 2186-2192.
- [5] Fan, M., Bonfield, P. and pinwoodie, J., 2006. Nature and behavior of cement bonded particleboard: structure, physical property and movment. Journal Master Science, 41:5666-5678.
- [6] Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A., & Chotard, T., 2008. Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. Journal of the European Ceramic Society, 28(1):183-192.
- [7] Soroushian, P., Elzafraney, M., Nossoni, A., & Chowdhury, H., 2006. Evaluation of normal-weight and light-weight fillers in extruded cellulose fiber cement products. Cement and Concrete Composites, 28(1):69-76.
- [8] César, J., Alejandro, D., Pedro, V. & Gerardo, F., 2006. Performance of Agave lecheguilla natural fiber in portland cement composites exposed to severe environment conditions”, Building and Environment, 42(3):1151-1157.
- [9] Agopyan, V , Savastano Jr, V.M. & John, M.A., 2005. Cincotto, “Developments on vegetable fibre–cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview”, ”. Cement & Concrete Composites, 27:527–536.
- [10] Savastano, Jr, H. , Peter, G. Warden, Robert, S. & Coutts, P., 2004. Evaluation of pulps from natural fibrous material for use as reinforcement in cement product, Materials & Manufacturing Processes, 19(5): 963–978.
- [11] Nazerian, M., Hosseini Eghbal, S., Kermaniyan, H., and Mohebbi Gargari, R., 2016. The effect of water-leaching treatment of bagasse particles and additive content on the properties of cement-bonded particleboard. Journal of wood and forest science and technology, 23(4): 315-333. (In Persian)
- [12] Azrieda, A. R., Razali, A. K., Izran, K., Rahim, S. and Abdul Aziz. M., 2009. Hydration performance of cement bonded wood composites: compatibility assessment of six pioneer forest composition and fiber morphology. Journal of Polymers and the Environment, 19(1): 297–300.
- [13] Ashori, A., Tabarsa, T. and Sepahvand, S., 2012. Cement-bonded composite boards made from poplar strands. Construction and Building Materials, 26(1): 131–134.

- [14] Mejia-Ballesteros, J. E., Savastano Jr, H., Fiorelli, J., & Rojas, M. F., 2019. Effect of mineral additions on the microstructure and properties of blended cement matrices for fibre-cement applications. *Cement and Concrete Composites*, 98, 49-60.
- [15] Teixeira, R. S., Tonoli, G. H. D., Santos, S. F. D., Rayon, E., Amigo, V., Savastano Jr, H., & Lahr, F. R., 2018. Nanoindentation study of the interfacial zone between cellulose fiber and cement matrix in extruded composites. *Cement and Concrete Composites*, 85:1-8.
- [16] Fonseca, C. S., Silva, M. F., Mendes, R. F., Hein, P. R. G., Zangiaco, A. L., Savastano Jr, H., & Tonoli, G. H. D., 2019. Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites. *Construction and Building Materials*, 211:517-527.
- [17] Myers, R.H., Montgomery, D.C., & Anderson-Cook, C.M., 2016. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons.
- [18] Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle. Panel Materials, Annual Book of ASTM Standard, EN 310. 1999. Wood based panels: determination of modulus of elasticity in bending and bending strength. European Standardization Committee. Brussels.
- [19] European Standardization Committee, 1999. Particleboards and fiber boards, Determination of swelling in thickness after immersion. EN 317, European Standardization Committee. Brussels.
- [20] European Standardization Committee, 1999. Particleboards and fiber boards, Determination of tensile strength. EN 319, European Standardization Committee. Brussels.
- [21] European Standardization Committee, 1993. Wood based panels, sampling, cutting and inspection. Sampling and cutting of test pieces and expression of test results. EN 326-1, European Standardization Committee. Brussels.
- [22] Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle. Panel Materials, Annual Book of ASTM Standard, 04.10, D 1037-99, 2002.
- [23] Xu, Q., Stark, J., 2005. Early hydration of ordinary Portland cement with an alkaline shotcrete accelerator. *Advances in cement research*, 17(1):1-8.
- [24] Dante, R. C., Sánchez-Arévalo, F. M., Huerta, L., Martín-Ramos, P., Navas-Gracia, L. M., & Martín-Gil, J., 2014. Composite fiber based on sisal fiber and calcium carbonate. *Journal of Natural fibers*, 11(2): 121-135.
- [25] Hermawan, D., Hata, T., Kawai, S., Nagadomi, W., & Kuroki, Y., 2002. Effect of carbon dioxide-air concentration in the rapid curing process on the properties of cement-bonded particleboard. *Journal of wood science*, 48(3):179-184.
- [26] Garay, R. M.M., Rallo, M.D. L.B., Carmona, R.C., & Araya, J.C., 2009. Characterization of anatomical, chemical, and biodegradable properties of fibers from corn, wheat, and rice residues. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69(3):406-415.
- [27] Radoykova, T.H., Radeva, G.V., & Nenkova, S.K., 2016. Comparative kinetic analysis of poplar biomass alkaline hydrolysis. *Cellulose Chemistry and Technology*, 50(2):269-274.
- [28] Yazdi, M. 1996. Effect of additives on bond quality of Portland cement with poplar particles. *Iranian Journal of Natural Resource*, 48(1):47-58. (In Persian)
- [29] Wei, Y.M. and Tomita, B., 2001. Effects of five additive materials on mechanical and dimensional properties of wood cement-bonded boards. *Journal of Wood Science*, 47:437-444.
- [30] Sulastiningsih, I.M. Nurwati, S. Murdjoko, Kawai, S., 2000. The Effects of Bamboo:Cement Ratio and Magnesium Chloride (MgCl<sub>2</sub>) Content on the Properties of Bamboo-Cement Boards. *Proceedings of Wood-Cement Composites in the Asia-Pacific Region*, 10 December, Canberra, Australia, 66-71.

## Optimization of production variables of natural fibers- cement composites by response surface methodology (RSM)

### Abstract

The objective of this study was to investigate the production of natural-cement composite fiber using poplar, wheat straw and three types of additives. In this study, variables in making the boards were: usage percent of wheat straw (0, 15 and 30%) and fibers of poplar (70, 85 and 100%), and levels and types of additives (three levels and three types of additives, i.e. calcium chloride, magnesium chloride and calcium hydroxide, respectively). After producing test specimens, compressive strength (1, 3, 7 and 28 days), thickness swelling (TS), the modulus of rupture (MOR), and internal bond (IB), were evaluated. The highest and the lowest compressive strength (32.5 and 7.1 MPa) after 28 days were respectively for samples containing 7% calcium hydroxide and 3% magnesium chloride. Also, the boards with 30 percent wheat straw and 70 percent poplar wood fiber with the amount of 3% calcium chloride had a higher MOR compared to other boards. In general, the results suggest that calcium chloride additives with amount of 5% and the average value of 15% straw to 85% poplar is the appropriate amount for achieving acceptable values of IB and MOR. Due to its significance in the statistical analysis, the model presented by Response Surface Methodology provided a suitable and significant estimate to determine the application of the variables.

**Keywords:** natural fibers, response surface methodology (RSM), poplar, wheat straw, additives.

**V. Sadeghi Panah**<sup>1\*</sup>  
**M. Nazerian**<sup>2</sup>  
**B. Nosrati sheshkal**<sup>3</sup>  
**R. Mohebbi Gargari**<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. student Department of Wood and Paper Sciences and Industries, Agricultural science and Natural Resource University of Gorgan, Iran

<sup>2</sup> Associate professor, Department of Bio-systems, Faculty of New Technologies Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Associate professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, University Shahid Beheshti, Iran

<sup>4</sup> Trainer, Department of Wood and Paper Science and Technology, University of Zabol, Iran

Corresponding author:  
[Sadeghi.vsp@gmail.com](mailto:Sadeghi.vsp@gmail.com)

Received: 2019/06/11  
Accepted: 2017/08/11