

### حامد نصیری<sup>۱\*</sup>، علی ورشویی<sup>۲</sup> و ابوالفضل کارگرفرد<sup>۳</sup>

\*۱- مسئول مکاتبات، کارشناس ارشد مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس.

پست الکترونیک: hamed\_nasiri59@yahoo.com

۲- استاد یار گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس

۳- استادیار پژوهش بخش تحقیقات علوم چوب و فرآورده های آن، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور.

تاریخ پذیرش: بهمن ۱۳۸۹

تاریخ دریافت: آذر ۱۳۸۸

## چکیده

در این بررسی امکان استفاده از الیاف باگاس در ساخت چندسازه فیبر-سیمان مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور، مقدار الیاف باگاس در دو سطح ۴ و ۱۰ درصد، میزان مصرف کلریدکلسیم، به عنوان تسریع کننده، در سه سطح ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد (براساس وزن خشک سیمان) و دو تیپ سیمان پرتلند (تیپ ۲ و ۵) به عنوان عوامل متغیر در نظر گرفته شد. به این ترتیب با احتساب ۱۲ تیمار، در مجموع ۳۶ تخته آزمایشگاهی ساخته شد. سپس خواص فیزیکی و مکانیکی تخته‌ها اندازه‌گیری و نتایج با استفاده از طرح آماری فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ یا ۵ تاثیر معنی‌داری بر خواص فیزیکی و مکانیکی تخته‌های ساخته شده ندارد. بنابراین افزایش میزان الیاف و همچنین کلریدکلسیم باعث تضعیف مقاومت‌های مکانیکی و افزایش میزان جذب آب و واکنشیدگی ضخامت تخته‌های ساخته شده می‌شود. در این تحقیق تخته‌هایی که با سیمان پرتلند تیپ ۲، میزان الیاف ۴ درصد و کلریدکلسیم ۷/۵ درصد ساخته شدند بیشترین مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته، چسبندگی داخلی و کمترین واکنشیدگی ضخامت بعد از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب را داشتند.

واژه‌های کلیدی: چندسازه، الیاف باگاس، سیمان پرتلند، کلریدکلسیم، مقاومت‌های مکانیکی، خواص فیزیکی.

## مقدمه

قدمت چندان‌ی نداشته و در ردیف فرآورده‌های نسبتاً جدید چوبی قرار می‌گیرند. صنایع تولیدکننده پانل‌های چوبی تأکید ویژه‌ای بر مصرف پسماندها و چوب‌های کم ارزش دارند. از جمله این مواد می‌توان گونه‌های چوبی کم مصرف گرده‌بینه‌های غیر قابل استفاده جهت تولید چوب‌های بریده و تخته لایه، بقایای بهره‌برداری از جنگل، پسماندها و ضایعات کارخانه‌های صنایع چوب و نیز مواد

صفحات فشرده چوبی یا فرآورده‌های چندسازه<sup>۱</sup> شامل انواع تخته فیبر، تخته خرده‌چوب، پانل‌های چوبی با اتصال معدنی و فرآورده‌های قالبی خرده‌چوب می‌باشند که در مقایسه با محصول‌هایی مانند کاغذ و تخته لایه

1 - Wood Composite materials, Composition Boards

امروزه با عنایت به رشد جمعیت نیاز به مصالح در دسترس، ارزان و سازگار با محیط زیست بیش از پیش احساس می‌گردد. حال این سؤال مطرح است که آیا می‌توان به کمک ترکیب الیاف باگاس نیشکر و سیمان پرتلند به عنوان اتصال دهنده معدنی به چندسازه مناسبی دست یافت؟ و این که نسبت الیاف به سیمان، میزان کلریدکلسیم به عنوان تسریع کننده گیرایی و نوع سیمان چه اثری می‌توانند بر فرآورده تولیدی داشته باشند؟

Sedan (۲۰۰۸) در بررسی مقاومت مکانیکی الیاف شاهدانه تقویت شده با سیمان بیان داشت با افزودن الیاف تا حد معینی مقاومت خمشی افزایش یافت. از طرف دیگر تیمار قلیایی الیاف باعث بهبود مقاومت خمشی و بهبود چسبندگی شبکه-الیاف شد.

Ganesan و همکاران (۲۰۰۷) با بهره‌گیری از مواد زائد کشاورزی مثل خاکستر باگاس به عنوان مواد پوزولانی در ترکیب با سیمان، مقاومت اولیه افزایش، نفوذ آب کاهش و باعث کنترل کلرید در ترکیب شده است. بر طبق نتایج حاصل از تحقیقات Govin و همکاران (۲۰۰۶) تیمار حرارتی چوب موجب بهبود هیدراتاسیون سیمان، ثبات ابعادی و همچنین کاهش خاصیت هیگروسکوپی الیاف چوبی می‌شود.

Cao و همکاران (۲۰۰۶) پیشنهاد کردند با افزایش طول الیاف، مقاومت خمشی محصول افزایش می‌یابد. به طوری که مقایسه تأثیر تیمار قلیایی الیاف باگاس با محلول NaOH در غلظت‌های ۱، ۳ و ۵ درصد، تیمار با محلول ۱٪ بعثت حذف همی سلولز باعث چسبندگی بهتر الیاف-شبکه و در نتیجه افزایش مقاومت خمشی شده است. Rapoport و همکاران (۲۰۰۵) در نتایج حاصل از بررسی‌های خود آورده‌اند که افزودن الیاف سلولزی تا حد

لیگنوسلولزی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی را نام برد. توسعه و گسترش این صنایع که پسماندها و مواد کم ارزش را به عنوان ماده اولیه مصرف نموده و فرآورده‌های با ارزشی تولید می‌کنند، نقش مهمی در حفظ منابع طبیعی و بهسازی محیط زیست ایفا می‌کنند.

صفحه‌های فشرده چوبی از نظر کاربرد دارای امتیازهای ویژه و منحصر بفردی می‌باشند، از جمله این که در ابعاد بزرگ تولید می‌گردند، دارای سطوح صاف و متراکم هستند، فاقد معایت متمرکز می‌باشند، ویژگی‌ها و خواص کاربردی آنها در قسمت‌های مختلف یک صفحه یکنواخت است. یکی از این فرآورده‌های چندسازه که به عنوان مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد تخته‌های چوب-سیمان است که از خرده‌چوب و سیمان ساخته می‌شود. سابقه تولید صفحه‌های چوب سیمان به سال ۱۹۱۴ می‌رسد، که در اطریش نوعی پانل فشرده چوبی که در ساخت آن کربنات منیزیم ( $Mg\ CO_3$ ) به عنوان عامل اتصال دهنده به کار رفته بود، تولید گردید. هدف اصلی تولید پانل‌های چوب-سیمان یا فرآورده‌های چندسازه با اتصال معدنی، ترکیب ذرات آلی مانند چوب و مواد لیگنوسلولزی با اتصال دهنده‌های معدنی از قبیل سیمان، گچ، منیزیت و غیره است. در این فرآیند می‌توان از الیاف دیگری مانند فایبرگلاس‌های مقاوم به مواد قلیایی نیز استفاده نمود. به علاوه سایر مواد و مصالح غیرآلی مانند، شن و پرلیت را نیز می‌توان مورد استفاده قرار داد. این فرآورده‌ها که امروزه در بیشتر کشورهای جهان تولید می‌شوند، دارای خواص کاربردی مطلوبی مانند مقاومت به عوامل جوی، آتش و عوامل بیولوژیک بوده و از پایداری ابعاد بالایی برخوردارند.

چوبی ریخته شده و پس از پخش شدن آن به صورت یکسان توسط یک صفحه چوبی پیش پرس شده، و پس از قرار دادن صفحه آلومینیومی بر روی آن تحت پرس سرد قرار گرفت. از شابلون‌های فلزی نیز برای کنترل ضخامت تخته‌ها استفاده شد. پس از طی مدت ۱۲ ساعت از زمان پرس، تخته‌های ساخته شده از زیر پرس سرد خارج و به مدت ۲۸ روز آبدهی گردید تا مقاومت نهایی آنها حاصل شود. بعد از این مدت تخته‌ها در شرایطی با دمای ثابت قرار داده شد تا کاملاً خشک شوند.

### تهیه نمونه‌های آزمونی

کلیه اندازه‌گیری‌های خواص تخته‌ها بعد از گذشت ۲۸ روز از زمان ساخت آنها، مطابق با استاندارد DIN آلمان به شماره ۶۸۷۶۳ انجام شد. تهیه نمونه‌های آزمونی با استفاده از یک دستگاه اره گرد نجاری انجام گردید و تخته‌ها ابتدا کناره‌بری شده و بعد برش نمونه‌های مقاومت خمشی، چسبندگی داخلی و واکشیدگی ضخامت انجام گردید. نمونه‌های واکشیدگی ضخامت و جذب آب پس از انجام آزمایش‌های خمشی از آنها تهیه گردید. بنابراین اندازه نمونه‌های مقاومت خمشی  $1/5 \times 5 \times 28$  سانتیمتر، چسبندگی داخلی  $1/5 \times 5 \times 5$  سانتیمتر، جذب آب و واکشیدگی ضخامت  $1/5 \times 5 \times 5$  سانتیمتر در نظر گرفته شده است.

### تجزیه و تحلیل آماری

بعد از انجام آزمایش‌های مکانیکی و فیزیکی بر روی نمونه‌های تهیه شده، نتایج بدست آمده در قالب طرح کاملاً تصادفی تحت آزمایش‌های فاکتوریل با سه متغیر و با استفاده از آزمون دانکن (DMRT) و به کمک تکنیک

معینی اثر تقویتی و بیش از آن تأثیر منفی خواهد داشت. بنابراین نحوه پراکنش الیاف در ترکیب تغییری در نتایج ایجاد نکرد. مقایسه نمونه‌های کنترل با نمونه‌های حاوی الیاف، اندازه ترک‌هایی که در اثر همکشیدگی ناشی از خشک شدن مشاهده شد باریک‌تر بود. از طرف دیگر، الیاف باگاس بدون تیمار باعث کاهش دمای هیدراتاسیون و افزایش زمان گیرایی سیمان می‌شود، اما استفاده از تیمار حرارتی، بعلافت حذف اثرهای منفی قندهای محلول در آب، همی سلولز و لیگنین، زمان گیرایی سیمان را کاهش می‌دهد (Bilba و همکاران ۲۰۰۳).

### مواد و روشها

در این تحقیق عوامل متغیر شامل نوع سیمان در دو سطح (پرتلند تیپ ۲ و ۵)، الیاف باگاس نیشکر در دو سطح ۴ و ۱۰ درصد و کلرید کلسیم به عنوان ماده افزودنی در سه سطح ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد (براساس وزن سیمان) بوده است. سایر عوامل تحقیق شامل ضخامت چندسازه الیاف - سیمان (۱۵ میلی‌متر)، فشار پرس ۵۵۰ psi، زمان پرس ۱۲ ساعت و پرس سرد برای تمام تیمارها ثابت در نظر گرفته شد.

### روش ساخت نمونه‌ها

در این تحقیق برای ساخت تخته‌های الیاف-سیمان از صفحه‌های آلومینیومی به ابعاد  $40 \times 40$  سانتیمتر، یک قالب چوبی به ابعاد  $7 \times 35 \times 35$  سانتیمتر استفاده گردید. برای تهیه کیک الیاف-سیمان ابتدا کلرید کلسیم و آب باهم مخلوط گردید و بعد الیاف به آنها اضافه شد. در مرحله بعد سیمان به این ترکیب افزوده شده و کاملاً با هم مخلوط و یکنواخت شدند پس از مخلوط شدن کامل مواد و اطمینان از مجتمع نشدن الیاف، مخلوط در داخل قالب

نتایج نشان داد که تأثیر مستقل مقدار الیاف باگاس بر مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و چسبندگی داخلی تخته‌های ساخته شده معنی‌دار بوده و تخته‌های دارای ۴ درصد الیاف باگاس از سطح بالاتری در ویژگی‌های فوق برخوردار می‌باشند. در جدول ۱ میانگین‌های مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و چسبندگی داخلی حاصل برای تخته‌های ساخته شده با دو سطح الیاف باگاس ۴ و ۱۰ درصد مشاهده می‌شود.

تجزیه واریانس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت بدین ترتیب با استفاده از این روش آماری تأثیر مستقل و متقابل هر یک از عوامل متغیر بر خواص مورد مطالعه در سطح اعتماد ۹۹ و ۹۵ درصد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

## نتایج

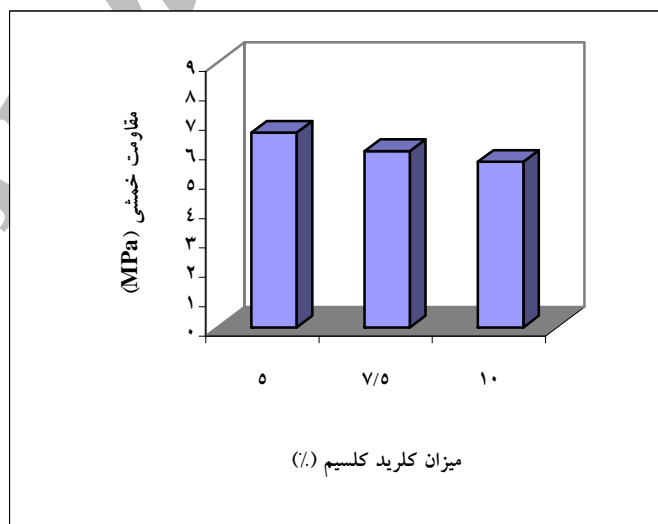
تأثیر مستقل و متقابل متغیرهای ساخت بر ویژگیهای فیزیکی و مکانیکی تخته‌های ساخته شده از الیاف باگاس و سیمان اندازه‌گیری و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

جدول ۱- تأثیر مقدار مصرف الیاف باگاس بر مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و چسبندگی داخلی تخته‌های ساخته شده

سطوح الیاف (%)	MOE (Mpa)	MOR (Mpa)	IB (Mpa)
۴	۵۱۳۷/۴۴۴	۶/۶۲۳	۰/۴۸۲
۱۰	۳۳۵۹/۵۸۳	۵/۶۳۲	۰/۳۰۲

مشاهده می‌گردد بالاترین مقدار مقاومت خمشی تخته‌ها با ۶/۷۴ مگاپاسکال در سطح ۵ درصد مصرف کلریدکلسیم، و حداقل مقدار مقاومت خمشی تخته‌ها با ۵/۷۰ مگاپاسکال در سطح ۱۰ درصد مصرف کلریدکلسیم بدست آمده است.

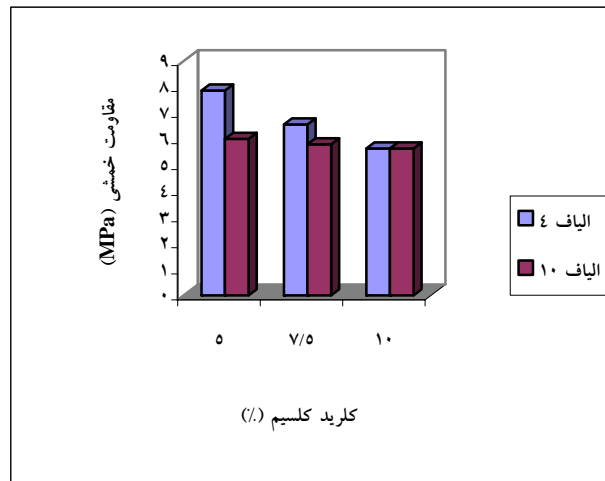
نتایج همچنین نشان داد که تأثیر مستقل مصرف کلریدکلسیم بر مقاومت خمشی تخته‌ها معنی‌دار بوده و با افزایش مصرف این ماده، مقدار مقاومت خمشی تخته‌های ساخته شده کاهش می‌یابد. به طوری که در شکل ۱



شکل ۱- تأثیر مستقل مقدار مصرف کلریدکلسیم بر مقاومت خمشی

مصرف ۵ درصد کلرید کلسیم و ۴ درصد الیاف باگاس حاصل شده است (شکل ۲).

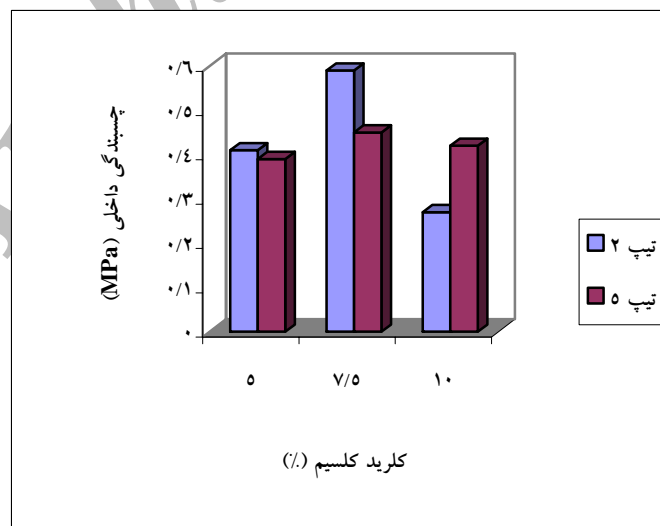
تأثیر متقابل مقدار مصرف کلرید کلسیم و الیاف باگاس بر مقاومت خمشی تخته‌های ساخته شده نیز معنی‌دار بوده و بالاترین مقاومت خمشی تخته‌های ساخته شده در شرایط



شکل ۲- تأثیر متقابل میزان مصرف الیاف و کلرید کلسیم بر مقاومت خمشی

تخته‌های ساخته شده با سیمان تیپ ۲ و مصرف ۷/۵ درصد کلرید کلسیم بوده است که در شکل ۳ قابل مشاهده است.

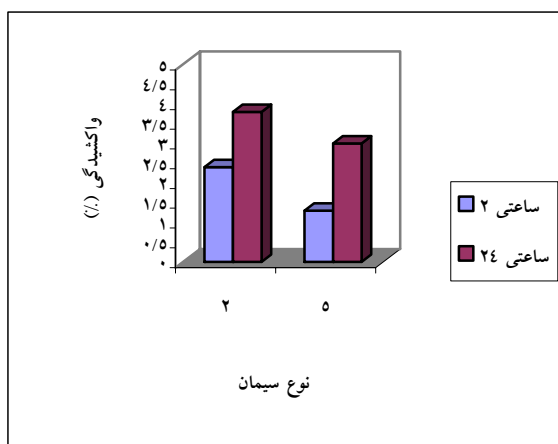
تأثیر متقابل نوع سیمان مورد مصرف و کلرید کلسیم بر مقادیر چسبندگی داخلی تخته‌ها نیز معنی‌دار بوده است به طوری که بالاترین مقدار چسبندگی داخلی مربوط به



شکل ۳- تأثیر متقابل نوع سیمان مقدار مصرف کلرید کلسیم بر چسبندگی داخلی

کمترین مقدار واكشیدگی تخته‌ها در شرایط استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۵ بدست آمده است (شکل ۴).

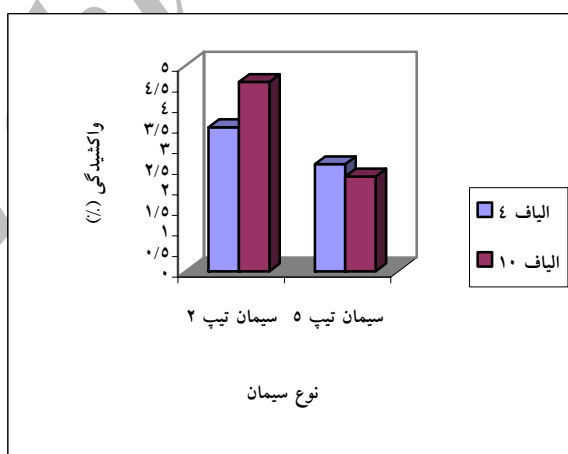
نتایج حاصل از اندازه‌گیری واكشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت تخته‌های ساخته شده نشان داد که تأثیر نوع سیمان مورد مصرف بر این ویژگی معنی‌دار بوده است و



شکل ۴- تأثیر مستقل نوع سیمان بر واكشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعته

واكشیدگی ضخامت در تخته‌های ساخته شده از سیمان تیپ ۵ و مصرف ۱۰ درصد الیاف مشاهده گردیده است (شکل ۵).

از طرف دیگر نتایج نشان داد که تأثیر متقابل نوع سیمان و مقدار مصرف الیاف باگاس بر واكشیدگی ضخامت ۲۴ ساعت تخته‌ها معنی‌دار بوده و کمترین



شکل ۵- تأثیر متقابل نوع سیمان و میزان مصرف الیاف بر واكشیدگی ضخامت ۲۴ ساعته

## بحث

خواص چندسازه الیاف باگاس-سیمان(ساخته شده تحت شرایط) در نظر گرفته شده در این تحقیق نشان داد که تخته‌های ساخته شده با الیاف باگاس تهیه شده در دمای بخارزنی ۱۷۰ درجه سانتیگراد، از خصوصیات چسبندگی و اتصال بهتری بین سیمان و باگاس برخوردار هستند و این بیانگر آن است که باگاس تیمارشده در مقایسه با باگاس خام دارای مواد قندی محلول در آب، همی سلولز و لیگنین کمتری است و چون این ترکیبات از عوامل محدود کننده در ایجاد یک اتصال محکم و کار آمد بین سیمان و الیاف به شمار می‌آید، باعث می‌گردد که با کاهش این ترکیبات در باگاس با اعمال تیمار حرارتی تخته‌های ساخته شده از خواص اتصال بهتری برخوردار باشند. در این رابطه تحقیقات انجام شده توسط Bilba و همکاران(۲۰۰۳)، نشان داد که باگاس تحت تیمار حرارتی قرار گرفته به دلیل دارا بودن مواد قندی و همی سلولز کمتر نسبت به باگاس خام، در ایجاد اتصال با سیمان، دمای هیدراتاسیون کمتری را نیاز دارد که نتایج این تحقیق را مورد تأیید قرار می‌دهد.

از سوی دیگر، نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از الیاف موجب افزایش خواص مکانیکی چندسازه‌های ساخته شده گردیده است که دلیل آن را می‌توان بوجود آمدن یک شبکه قوی و کار آمد در اثر ایجاد اتصال بین ذرات سیمان و سطح الیاف دانست که موجب بهبود ویژگی‌های خمشی چندسازه‌ها گردیده است. نتایج حاصل از تحقیقات Cao و همکاران(۲۰۰۶) و همچنین Ganesan و همکاران(۲۰۰۷) نیز نشان داده است که بکارگرفتن الیاف در تولید چندسازه‌های الیاف-سیمان باعث بهبود خواص مکانیکی به ویژه مقاومت خمشی

می‌گردد که دلیل آن را سطح تماس زیاد الیاف و ایجاد شبکه کارآمدتر و همچنین افزایش چسبندگی الیاف با ذرات سیمان ذکر کرده‌اند. نتایج تحقیقات Ganesan و همکارانش نشان داده است که استفاده از الیاف سلولزی به عنوان تقویت کننده شبکه، تا مقدار معینی باعث افزایش مقاومت‌ها می‌گردد ولی با افزایش مقدار بیشتر الیاف، مقاومت‌ها با افت روبرو شده است که نشان می‌دهد استفاده از الیاف سلولزی تا حد مشخصی باعث تقویت شبکه الیاف-سیمان و همچنین کاهش شکاف‌های همکشیدگی در هنگام خشک شدن می‌شود اما افزایش بیش از حد الیاف ترک‌ها را افزایش داده و باعث تمرکز تنش و کاهش فرآورده‌های هیدراتاسیون می‌شود(Rappoport و همکاران، ۲۰۰۵). این الیاف بدلیل وجود سطح ویژه بالای مکان‌های جذب آب را افزایش و با افزایش مصرف آنها تخلخل تخته‌ها بالارفته و راه برای ورود آب به فضای داخلی زیاد می‌گردد که منجر به واکنشیدگی ضخامت و افزایش جذب آب چندسازه می‌شود(Ganesan و همکاران ۲۰۰۷، Semple و همکاران ۲۰۰۲). از طرفی استفاده از کلریدکلسیم به عنوان تسریع‌کننده گیرایی و خنثی کردن عوامل محدودکننده(Bilba و همکاران ۲۰۰۳) باعث افزایش سرعت هیدراتاسیون گردیده و این افزایش سرعت، کامل نشدن فرآیند هیدراتاسیون سیمان را در بر دارد که خود باعث تنش، انقباض ملاط و تأثیر منفی بر مقاومت خواهد گذاشت.

- CAO, F., SHIBATA, S., AND FUKUMOTO, I., 2006, Fabrication and flexural properties of Bagasse fiber Reinforced Biodegradable composites. *Journal of Macromole Cular Science, part B: Physics*, 45: 463-474.
- Govin, A ., Peschard, A ., Guyonnet, R., 2006, Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood. *Cement and Concrete Composites* 28 : 12-20.
- Bezerra, E.M., Joaquim, A.P. , Savastano Jr, H. , John, V.M., Agopyan, V., 2006, The effect of different mineral additions and synthetic fiber contents on properties of cement based composites. *Cement and Concrete Composites* 28: 555-563.
- Ganesan , K., Rajagopal, K. , Thangavel , K., 2007, Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites* 29: 515-524.
- 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: 183-192.

### منابع مورد استفاده

- Singh, N.B., Singh, V.D., Rai, S., 2000, Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. *Cement and Concrete Research* 30: 1485-1488.
- Hernandez JM, Rodriguez BS ,Middendorf B., 2000, Pozzolanic properties of residues of suger industries (first part).*Mater de Construction* 2000;50(260):71-8.
- Semple, K. E., Cunningham, R.B., Evans, P.D., 2002, The suitability of five western Australian mallee eucalypt species for wood-cement composites. *Industrial Crops and Products* 16: 89-100.
- Bilba, K., Arsene , M.A., Ouensanga, A., 2003, sugar cane bagasse fiber reinforced cement composites. Part I . Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. *Cement and Concrete composites* 25: 91-96.
- Rapoport, J.R., and shah, S.P., 2005, Cast-in-Place Cellulose Fiber- reinforced Cement Paste, Mortar, and Concrete. *ACI Materials Journal*. 102: 299-305.
- Negro , C., Sanchez, L.M., Fuente, H., and Blanco, A., 2005, Effects of flocculants and sizing agents on bending strength of fiber cement composites. *Cement and Concrete Composites* 11: 2104-2105.

Archive of SID



## Investigation on the properties of cement-bagasse fiber composite as a structural material

Nasiri, H.<sup>1\*</sup>, Varshoe, A.<sup>2</sup> and Kargarfard, A.<sup>3</sup>

1\*- Corresponding author, M.Sc. of Wood and paper science. Islamic Azad University, Chalous Branch.  
Email: hamed\_nasiri59@yahoo.com

2-Assit. Prof. of Islamic Azad University Chalous Branch.

3-Research Assit. Prof. of Research Institute of Forests & Rangeland

Received: Nov., 2010

Accepted: Jan., 2011

### Abstract

In this study the possibility of bagasse fiber usage in Fiber-Cement Composite (FCC) manufacturing, was investigated. Two load of bagasse fiber (%4, 10), three level of calcium chloride as facilitator (5, 7.5 and 10 percent per dry weight of cement) and two type of Portland cement (type II and V) were considered as variables (12 treatments). There were three replicates for each treatment, thus 36 experimental board were manufactured totally. The physical and mechanical properties of experimental specimens were investigated and results analyzed by SPSS software as fully randomized factorial model. As results indicated, there was no significant different between cement type II and V in physical and mechanical properties. The increased loads of calcium chloride caused a striking reduction in mechanical properties and increased water absorption amounts. The best bending strength, modulus of elasticity, IB and minimum thickness swelling were reported in treatment with 4% fibers, 7.5% calcium chloride and type II cement.

**Keyword:** Composite, bagasse, fiber, Portland cement, calcium choloride, physical & mechanical properties.