

## ساخت پانل‌های سقفی کاذب با استفاده از پسماند جامد جوهرزدایی از کاغذ بازیافتی

رحیم یدالهی<sup>۱</sup>، یحیی همزه<sup>۲\*</sup>، شادمان پورموسی<sup>۳</sup>، علیرضا عشوری<sup>۴</sup>، محمد جعفری<sup>۵</sup> و کامبیز راشدی<sup>۶</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد واحد کرج

<sup>۴</sup> دانشیار پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

<sup>۵</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

<sup>۶</sup> کارشناس ارشد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

### چکیده

به منظور کاهش مشکلات زیست محیطی و ایجاد ارزش افزوده در پسماندهای جامد حاصل از جوهرزدایی کاغذ، پانل‌های سیمان - پسماند با سه نسبت پسماند به سیمان شامل ۲ به ۳، ۱ به ۱ و ۳ به ۲، چسب بتن به عنوان افزودنی در سه سطح ۰، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی پسماند و کلراید کلسیم به عنوان افزودنی در دو سطح ۰ و ۵ درصد وزنی سیمان ساخته شد. برای هر تیمار حداقل سه تکرار انجام شد و خواص پانل‌ها شامل چگالی، مدول الاستیسیته، مدول گسیختگی، چسبندگی داخلی، جذب آب، واکشیدگی ضخامت، مقاومت کشش پیچ و مقاومت در برابر آتش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که مقاومت خمشی و چسبندگی داخلی با افزایش مقدار پسماند کاهش می‌یابد و حداکثر این مقاومت‌ها در مقدار پسماند ۴۰ درصد حاصل شد. اثرات نامطلوب پسماند بر خواص مذکور احتمالاً ناشی از کم بودن قدرت اتصال پسماند در مقایسه با سیمان است. مقاومت کششی پیچ پانل‌ها ۲۲/۷ kPa اندازه‌گیری شد و جذب آب و واکشیدگی ضخامت پانل‌ها با افزایش مقدار پسماند به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. با افزایش چگالی پانل‌ها، کاربرد چسب بتن و کلراید کلسیم همه خواص مورد بررسی مطلوب‌تر شدند. به طور کلی، در شرایط ۴۰ درصد پسماند، ۱۰ درصد چسب بتن و مقدار ۵ درصد کلراید کلسیم، پانل‌هایی با چگالی حدود ۰/۸ گرم بر سانتیمتر مکعب قابل تهیه است که مناسب‌ترین خواص را به لحاظ مدول‌های خمشی، چسبندگی داخلی، سختی و واکشیدگی ضخامت نسبت به پانل کناف گچی موجود در بازار داشته باشند. جذب آب پانل‌های ساخته شده در این شرایط با جذب آب کناف گچی برابر بوده ولی واکشیدگی ضخامت آن به طور قابل توجهی از کناف گچی کمتر است. همچنین مقاومت در برابر آتش این پانل‌ها به طور قابل توجهی از پانل کناف گچی بیشتر بود.

**واژگان کلیدی:** کاغذ بازیافتی، جوهرزدایی، پسماند، پانل سقفی، چسب بتن، خواص مقاومتی، مقاومت در برابر آتش.

### ۱- مقدمه

بهبود از این مواد موضوع تحقیقات زیادی بوده است [۳-۵]. یکی از کاربردهای بالقوه این پسماندها، استفاده از آن‌ها در صنایع مرتبط با ساختمان است. صفحات سیمانی ساخته شده با سیمان خالص دارای مقاومت خمشی کمی هستند و در کرنش‌های بسیار کم دچار شکست می‌شوند [۶]. برای رفع این مشکل و ارتقای سایر ویژگی‌های مورد نیاز این صفحات، از الیاف مختلفی استفاده می‌شود که رایج‌ترین آن‌ها الیاف آریست بوده است که خواص بسیار خوبی در چند سازه ایجاد می‌کند. در دهه اخیر در اغلب کشورها کاربرد الیاف آریست در صنعت ساختمان به دلیل تأثیر نامطلوب آن بر سلامتی انسان ممنوع شده است و تحقیقات زیادی برای جایگزینی این ماده انجام گردیده است. در این راستا، الیاف طبیعی در صورت اختلاط مناسب با ملات سیمان، مقاومت خمشی صفحات سیمانی را افزایش می‌دهند و

بهبودسازی و استفاده کارآمد از انواع ضایعات و پسماندها یکی از چالش‌های قرن حاضر به شمار می‌رود [۱]. لجن جوهرزدایی از کاغذ بازیافتی از مهمترین پسماندهای صنایع خمیر و کاغذ است که در کارخانجات بازیافت کاغذهای باطله سفید ایجاد می‌شود. کارخانه‌های بازیافت کاغذ مجهز به جوهرزدایی با فرآوری کاغذهای چاپ و تحریر بازیافتی مانند کاغذهای اداری، لبه‌بری چاپخانه‌ها، روزنامه و مجلات حاوی پرکننده‌های مختلف مانند کربنات کلسیم سبب تولید پسماندهای جامدی می‌شوند که بخش زیادی از آن را مواد معدنی تشکیل می‌دهند [۲]. به دلیل اهمیت موضوع و کاهش مشکلات ناشی از این مواد، در سال‌های اخیر کاربرد و استفاده

در این رابطه،  $C$  وزن سیمان و  $F$  وزن پسماند می‌باشد [۱۰]. سپس مخلوط حاصل را به مدت ۵ دقیقه بهم زده و کیک پسماند-سیمان در قالبی به ابعاد  $270 \times 350$  mm<sup>2</sup> تشکیل شد و به مدت ۱۰ دقیقه در پرس هیدرولیکی تحت فشار ۳۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع قرار گرفت تا کیک فشرده شده از یک استحکام نسبی برخوردار شود. جهت جلوگیری از ترک، کیک فشرده شده ابتدا قیدگذاری شد و جهت افزایش استحکام به مدت ۲۴ ساعت تحت قید قرار گرفت. سپس پانل‌ها از قالب خارج شدند و به مدت ۲۸ روز در محیطی با رطوبت نسبی بیش از ۹۸ درصد و دمای  $20 \pm 2$  °C نگهداری شدند تا رطوبت آن‌ها به آرامی کاهش یابد و علاوه بر جلوگیری از تشکیل ترک‌های موئین، گیرایی آن‌ها کامل شود. پانل‌ها پس از ۲۸ روز از محیط اولیه خارج شدند و به مدت ۱۵ روز در یک محیط با دمای  $21$  °C و رطوبت نسبی ۶۵ درصد قرار گرفتند. متغیرهای این تحقیق عبارتند از:

- میزان پسماند به صورت نسبت وزنی پسماند به سیمان در سه

سطح ۳:۲، ۲:۱ و ۱:۱ و ۳:۲

- میزان چسب بتن در سه سطح ۰، ۱۰ و ۱۵ درصد (نسبت به

وزن پسماند)

- میزان کلرید کلسیم در دو سطح ۰ و ۵ درصد (نسبت به وزن

سیمان).

عوامل ثابت عبارتند از چگالی اسمی ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب، فشار پرس ۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به مدت زمان ۱۰ دقیقه، نوع سیمان (پرتلند دو)، سرعت بسته شدن دهانه پرس ۶ میلی‌متر در ثانیه و مدت زمان قیدگذاری ۲۴ ساعت. با توجه به عوامل متغیر مذکور، ۱۸ تیمار حاصل شد و برای هر تیمار سه تکرار و در مجموع ۵۴ تخته ساخته شد (جدول (۱)). خواص پانل‌های ساخته شده با خواص پانل سقفی کاذب موجود در بازار ایران با نام تجاری کناف گچی مقایسه شده است.

جدول ۱- تعداد و نوع تیمارهای مورد بررسی

کلرید کلسیم (درصد وزنی نسبت به سیمان)						نسبت وزنی پسماند به سیمان (درصد)
۵			۰			
نسبت وزنی چسب به پسماند (درصد)			نسبت وزنی چسب به پسماند (درصد)			نسبت وزنی پسماند به سیمان (درصد)
۱۵	۱۰	۰	۱۵	۱۰	۰	
A53	A52	A51	A03	A02	A01	۴۰ به ۶۰
B53	B52	B51	B03	B02	B01	۵۰ به ۵۰
C53	C52	C51	C03	C02	C01	۴۰ به ۶۰

به عنوان گزینه‌ای مناسب برای جایگزینی الیاف آریست مطرح هستند [۷]. در میان انواع مختلف الیاف استفاده شده در چند سازه‌های الیاف-سیمان، الیاف طبیعی دارای مزیت‌هایی هستند که از آن جمله می‌توان به دسترسی پذیری، تجدیدپذیری، قیمت پایین و حفظ سلامت محیط کار اشاره کرد [۸]. با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی پسماندهای جامد ناشی از جوهرزدایی کاغذ و وجود الیاف لیگنوسولوزی با ضریب شکل‌پذیری مناسب در آن، می‌توان انتظار داشت که کاربرد این نوع پسماند در ساخت پانل‌های چوب-سیمان و چوب-گچ سبب کاهش هزینه‌های ساخت این نوع از محصولات شده و خواص این محصولات را ارتقاء دهد [۹]. لذا در این بررسی کاربرد پسماند جامد فرآیند جوهرزدایی کارخانه‌های بازیافت کاغذ که دارای ویژگی‌های تقریباً مناسب و قابل قبولی برای ساخت پانل‌های الیاف-سیمان است، با هدف ایجاد ارزش افزوده در این نوع پسماندها و افزایش مقاومت‌های صفحات چوب-سیمان بررسی شده است. همچنین با هدف کاهش مقدار سیمان مصرفی و امکان کاربرد درصد بیشتری از پسماند در این صفحات، اثر استفاده از چسب بتن نیز بررسی شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

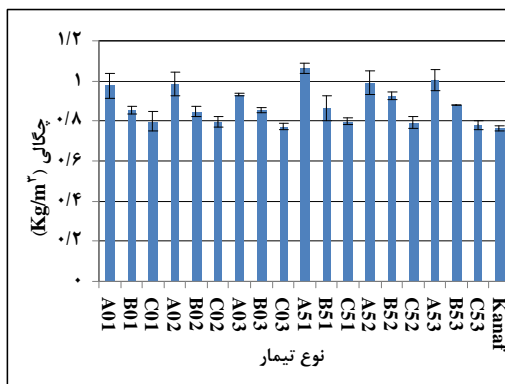
پسماند مورد استفاده در این تحقیق، پسماند حاصل از فرآیند جوهرزدایی کاغذسازی است که خواص فیزیکی شیمیایی آن در مطالعه پیشین [۲] ارائه شده است. در این پژوهش از سیمان پرتلند نوع دو استفاده شد. چسب بتن مورد استفاده بر پایه لاتکس بوده و با طراحی مخصوص برای کمک به چسبندگی و گیرایی بتن، ضد آب و با قابلیت استفاده روی سطح خارجی است که در این بررسی به عنوان افزودنی در داخل پانل استفاده شده است. همچنین، از کلرید کلسیم پودری با خلوص ۹۹ درصد به عنوان تسریع‌کننده گیرایی سیمان استفاده شد.

برای ساخت پانل‌ها ابتدا میزان سیمان مصرفی و پسماند برای هر تیمار بر اساس چگالی پانل محاسبه شد و میزان چسب مصرفی و کلرید کلسیم مورد نیاز به ترتیب به صورت درصدی از وزن پسماند و سیمان در داخل آب حل شد. سپس پسماند و سیمان به مخلوط اضافه شد. وزن آب در این مخلوط طبق رابطه (۱) محاسبه شد.

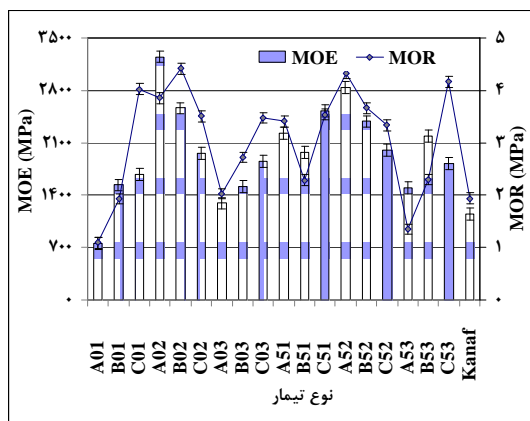
$$W(ml) = 0.25 C (g) + 2.7 F (g) \quad (1)$$

## ۳- نتایج

در شکل (۱) اثر عوامل مختلف مورد بررسی بر چگالی پانل‌ها نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد پسماند به علت حجیم شدن پانل، چگالی پانل کاهش یافته است و در پانل‌های حاوی ۶۰ درصد پسماند، چگالی پانل‌ها تقریباً برابر با چگالی کناف گچی شده است. به علاوه، مقدار سیمان و پسماند مهم‌ترین عامل مؤثر بر چگالی هستند و مقدار چسب و کلرید کلسیم تأثیر قابل توجهی در تغییر چگالی ندارند. با توجه به شکل (۲) می‌توان گفت که مدول الاستیسیته (MOE) پانل‌های ساخته شده حاوی پسماند، به جز نمونه حاوی ۴۰ درصد پسماند و بدون مواد شیمیایی، بیشتر از مدول نمونه کناف گچی است. همچنین، مدول گسیختگی (MOR) پانل‌ها جز در دو تیمار، از پانل کناف گچی بیشتر است. اگر چه چگالی پانل‌های حاوی ۶۰ درصد پسماند با چگالی پانل گچی برابر است، اما مدول گسیختگی بیشتری از پانل گچی دارند.



شکل ۱- تغییرات چگالی ظاهری صفحات تهیه شده



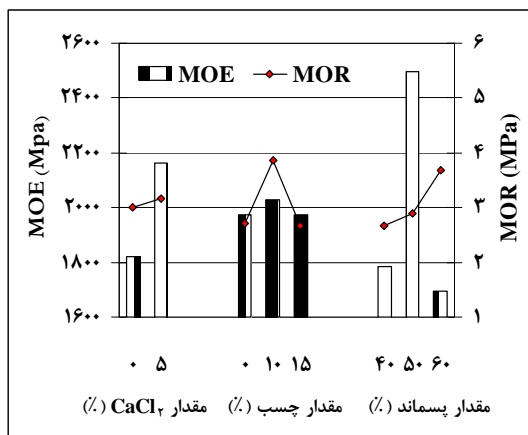
شکل ۲- مدول الاستیسیته و گسیختگی صفحات حاصل از

تیمارهای مختلف

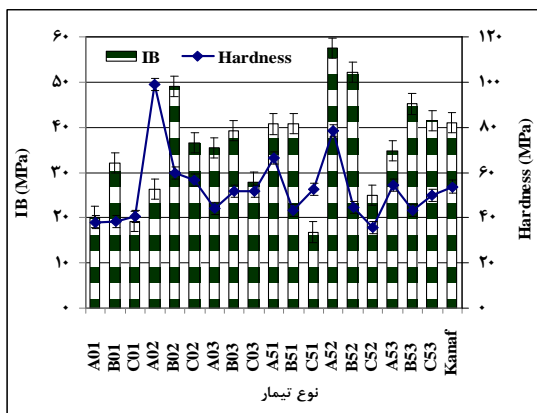
پس از متعادل‌سازی پانل‌ها، نمونه‌های آزمونی بر اساس استاندارد DIN/EN 634 تهیه شد و خواص فیزیکی و مکانیکی شامل مقاومت خمشی (مطابق DIN/EN 610)، چسبندگی داخلی (مطابق DIN/EN 319)، جذب آب و واکنشیدگی ضخامت (مطابق DIN/EN 317) و مقاومت به آتش (مطابق BS-476:Part 12) و سختی نمونه‌ها (ASTM D897) اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از ارزیابی خواص فوق به وسیله آزمون تجزیه واریانس در طرح فاکتوریل در قالب طرح بلوک کاملاً تصادفی تجزیه و تحلیل شد و تعیین تیمارهای مطلوب با مقایسه میانگین‌ها با آزمون آماری دانکن انجام گردید.

آزمون‌های مربوط به مقاومت خمشی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه INSTRON ۴۴۸۶ انجام شد. بارگذاری یک نقطه‌ای و سرعت بارگذاری ۱۰ mm/min بود. برای تعیین مقاومت چسبندگی داخلی نمونه‌ها آزمون برش موازی سطح (اعمال نیروی فشاری هم راستا و غیر هم جهت) با استفاده از دستگاه AMSLER و با سرعت ۱۰ mm/min انجام شد. جذب آب و واکنشیدگی ضخامت نمونه‌ها پس از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب اندازه‌گیری شد. سختی نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D 897 و به روش برینل اندازه‌گیری شد. جهت انجام آزمون سختی، نمونه روی تکیه‌گاه دستگاه هیدرولیکی قرار گرفته و نیرویی توسط یک ساچمه فلزی به قطر ۱۱/۴ میلی‌متر به سطح نمونه منتقل شد و سختی بر حسب مگاپاسکال محاسبه گردید. مقاومت به کشش محوری پیچ مطابق استاندارد DIN EN 320 با استفاده از دستگاه INSTRON ۴۴۸۶ اندازه‌گیری شد. سرعت کشش پیچ در راستای محور آن نیز ۱۰ mm/min بود. در این بررسی از پیچ ۱/۴×۱۰ اینچ نوک تیز استفاده شد. چگالی پانل‌ها با اندازه‌گیری وزن و ابعاد نمونه‌های تهیه شده به ترتیب وسیله ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم و کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر تعیین شد. برای اندازه‌گیری مقاومت در برابر آتش پانل‌ها، از استاندارد BS-476:Part 12 استفاده شد. نمونه‌ها قبل از انجام آزمون وزن شدند و برای انجام آزمون، دهانه نازل آتش با زاویه ۴۵° به فاصله ۵ میلی‌متر از سطح نمونه‌ها قرار داده شد و آزمون مقاومت به آتش با فشار ثابت گاز خروجی به مدت ۱۲۰ ثانیه انجام شد. پس از اتمام آزمون، سطح نمونه‌ها با یک برس سیمی تمیز شد و دوباره وزن شد. درصد کاهش وزن نسبت به وزن اولیه به عنوان میزان مقاومت به آتش نمونه‌ها در نظر گرفته شد.

یا ناشی از عدم پخش یکنواخت ذرات و الیاف پسماند در پانل و در نتیجه وجود نقاط ضعیف در پانل باشد. به علاوه، مقاومت اتصال بین ذرات الیاف و سیمان کمتر از مقاومت بین ذرات سیمان است و به همین دلیل کاربرد کلراید کلسیم به دلیل بهبود سازگاری سیمان با الیاف سبب بهبود مقاومت‌ها شده است. چسبندگی داخلی (IB) یکی از عواملی است که می‌تواند در کارایی پانل تأثیر زیادی داشته باشد و همچنین در حین برش پانل سطوح برش صافی را ایجاد نماید. از طرف دیگر، هر چه پانل‌ها سختی کمتری داشته باشند برش آن‌ها با تیغ راحت‌تر خواهد بود. شکل (۴) مقاومت چسبندگی داخلی و سختی پانل‌های ساخته شده در تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پانل‌های نوع A با ۶۰ درصد سیمان بیشترین مقدار سختی را دارند و سختی پانل‌هایی با ۶۰ درصد پسماند تقریباً با پانل کناف گچی مورد استفاده در بازار به عنوان سقف کاذب و پارتیشن‌های داخل ساختمان یکسان است.



شکل ۳- تأثیر مستقل درصد پسماند، چسب و کلراید کلسیم بر مدول خمشی پانل‌ها



شکل ۴- چسبندگی داخلی و سختی پانل‌ها

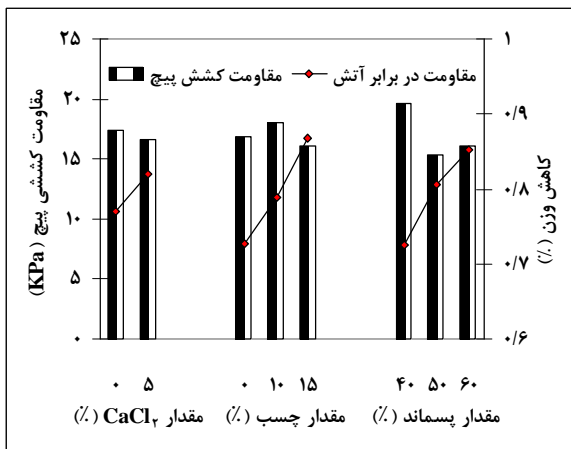
افزایش مدول گسیختگی بر اثر افزایش پسماند به دلیل زیاده‌تر بودن مقاومت کششی الیاف موجود در پسماند در مقایسه با سیمان خالص است. اثر مستقل مقدار پسماند، مقدار چسب و مقدار کلراید کلسیم مصرفی بر مدول‌های خمشی در شکل (۳) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مدول الاستیسیته پانل‌ها با افزایش درصد پسماند تا ۵۰ درصد افزایش یافته است ولی با افزایش درصد پسماند از ۵۰ درصد تا ۶۰ درصد مدول الاستیسیته کاهش شدیدی دارد. به علاوه مشاهده می‌شود که با افزودن چسب به مقدار ۱۰ درصد، مدول الاستیسیته پانل‌ها به طور قابل توجهی افزایش یافته است؛ ولی با افزایش مقدار چسب به ۱۵ درصد، مدول الاستیسیته کاهش یافته است. همچنین استفاده از کلراید کلسیم در سطح ۵ درصد باعث بهبود مدول الاستیسیته پانل‌ها شده است. مدول گسیختگی پانل‌ها با افزایش درصد پسماند و کاربرد کلراید کلسیم افزایش یافته است و مشابه مدول الاستیسیته، بیشترین مدول خمشی در مقدار ۱۰ درصد چسب بود و کاهش یا افزایش مقدار چسب سبب کاهش مدول گسیختگی شده است. بهبود مدول‌های پانل‌ها در اثر کاربرد کلراید کلسیم می‌تواند به دلیل اثر این ماده در بهبود سازگاری سیمان با ذرات و الیاف موجود در پسماند باشد که حاصل آن بهبود اتصالات در سطح مشترک الیاف-سیمان است.

مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج حاصل از تحقیق Tittlein و همکاران [۱۱] که پانل‌های چوب سیمان سبک تهیه کرده بودند نشان می‌دهد که خواص مقاومتی پانل‌های تهیه شده با ۵۰ درصد پسماند (با چگالی در حدود ۰/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، در حد مقاومت پانل‌های سبک ساخته شده از چوب سیمان در شرایط بهینه (با چگالی ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب، مدول الاستیسیته برابر با ۲۲۰۰ مگاپاسگال و مدول گسیختگی برابر با ۵/۸ مگا پاسگال) می‌باشد. در استاندارد EN 634-2 دو کلاسه پانل چوب-سیمان تعریف شده است که مدول الاستیسیته آن‌ها به ترتیب ۴۵۰۰ و ۴۰۰۰ مگاپاسگال است [۱۲]. بنابر این، در مقایسه با چوب-سیمان استاندارد با چگالی ۱/۴-۱/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب، مدول الاستیسیته همه پانل‌های ساخته شده کمتر از حداقل مجاز تعریف شده در این استاندارد است. از طرف دیگر، حداقل مقدار مدول گسیختگی چوب-سیمان نیز در این استاندارد ۹ مگاپاسگال است که بیشتر از مدول گسیختگی همه پانل‌های ساخته شده می‌باشد. با توجه به همبستگی مدول‌های خمشی با چگالی پانل [۱۳ و ۱۴]، کم بودن این مدول‌ها می‌تواند ناشی از کمتر بودن چگالی پانل‌های تهیه شده در مقایسه با چوب سیمان استاندارد و

استفاده از ۵ درصد کلراید کلسیم سبب افزایش چسبندگی داخلی شده است؛ ولی بر روی سختی اثر معنی‌داری نداشته است. در ادامه، درصد کاهش وزن پانل‌ها به عنوان معیاری از مقاومت به آتش آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل (۶) ارائه شده است.

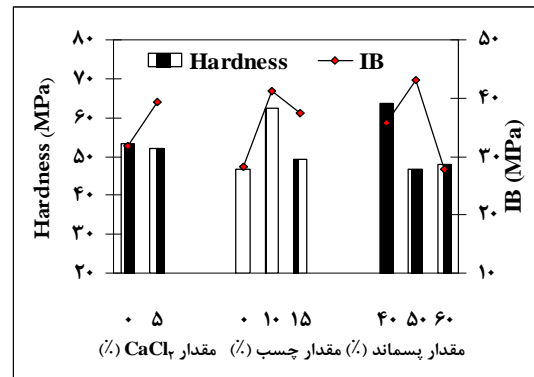
اثر مستقل پارامترهای مورد بررسی بر مقاومت به آتش و مقاومت کشش پیچ در شکل (۷) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد پسماند، مقدار چسب و کلراید کلسیم، مقدار کاهش وزن افزایش یافته است. کاربرد کلراید کلسیم تأثیری بر مقاومت کشش پیچ نداشته است. از طرف دیگر افزایش مقدار چسب تا ۱۰ درصد، سبب افزایش مقاومت کششی پیچ شده ولی افزایش آن از ۱۰ به ۱۵ درصد سبب کاهش این مقاومت شده است. افزایش مقدار پسماند از ۴۰ درصد به ۵۰ درصد، سبب کاهش مقاومت کششی پیچ شده ولی افزایش مقدار پسماند از ۵۰ به ۶۰ درصد سبب تغییر معنی‌داری در این مقاومت نشده است.

نتایج حاصل از واکنش‌پذیری ضخامت و جذب آب پانل‌ها در ۲ و ۲۴ ساعت در شکل (۸) ارائه شده است. اگرچه جذب آب پانل‌های ساخته شده به جز در یک تیمار (C52) کمتر از جذب آب پانل کناف گچی است، ولی جذب آب پانل‌های ساخته شده نسبتاً زیادی است که علت آن آبدوستی الیاف موجود در پسماند است. همچنین واکنش‌پذیری ضخامت پانل‌های ساخته شده به جز تیمارهایی که در آن‌ها از ۶۰ درصد پسماند (سری C) استفاده شده است، از پانل‌های گچی کمتر است. مقدار مجاز واکنش‌پذیری ضخامت چوب-سیمان استاندارد بر اساس استاندارد EN 634-2 ۱/۵ درصد است.

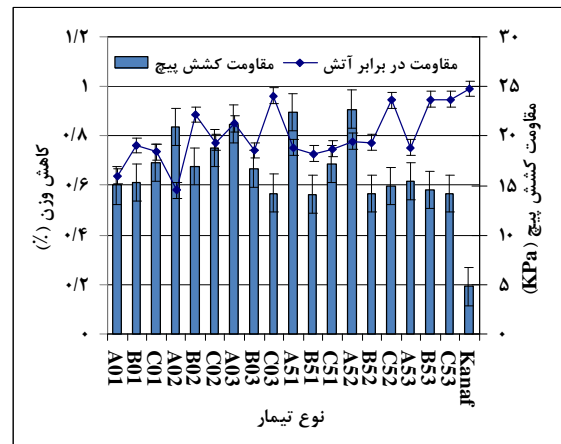


شکل ۷- تأثیر مستقل درصد پسماند، چسب و کلراید کلسیم بر مقاومت به آتش و مقاومت کششی پیچ پانل‌ها

با توجه به میزان سختی می‌توان گفت که یکی از مزیت‌های پانل‌های ساخته شده این است که همانند پانل گچی کناف به راحتی با تیغ قابل برشکاری هستند و برشکاری، نصب و استقرار این نوع پانل همانند پانل کناف خواهد بود. مقاومت چسبندگی داخلی پانل‌های ساخته شده در همه تیمارها بیشتر از حداقل مقدار مجاز مقاومت اتصال داخلی چوب-سیمان استاندارد (۵/۰ مگا پاسگال بر اساس استاندارد EN 634-2) است. اثر مستقل هر یک از پارامترهای مورد بررسی بر چسبندگی داخلی و سختی پانل‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پانل‌هایی با ۵۰ درصد پسماند، از چسبندگی داخلی بهتری برخوردار هستند و افزایش مقدار پسماند به ۶۰ درصد، سبب کاهش چسبندگی داخلی به دلیل کاهش مقدار سیمان شده است. همچنین، کاربرد ۱۰ درصد چسب بتن سبب افزایش سختی و چسبندگی داخلی صفحات گردیده و افزایش مقدار چسب به ۱۵ درصد، سبب کاهش هر دو ویژگی شده است.



شکل ۵- تأثیر مستقل درصد پسماند، چسب و کلراید کلسیم بر چسبندگی داخلی و سختی پانل‌ها



شکل ۶- درصد کاهش وزن ناشی از سوزاندن (معیاری از مقاومت به آتش) و مقاومت کششی پیچ پانل‌ها در تیمارهای مختلف

از طرف دیگر، اگر چه چسب مورد استفاده ضد آب است و برای تعمیر سطوح بتنی به کار می‌رود، ولی کاربرد آن در داخل پانل‌ها نه تنها سبب کاهش جذب و واکسیدگی ضخامت نشده است، بلکه جذب آب و واکسیدگی ضخامت را افزایش داده است. کاربرد کلراید کلسیم سبب کاهش جذب آب شده و اندکی واکسیدگی ضخامت را افزایش داده است. مقدار مجاز واکسیدگی ضخامت چوب-سیمان استاندارد بر اساس استاندارد EN 634-2 ۱/۵ درصد است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

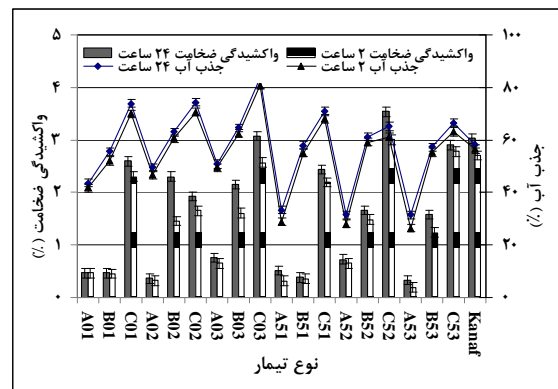
چگالی پانل‌های چوب-سیمان استاندارد در حدود ۱/۴-۱/۲ گرم بر سانتی‌متر است که با توجه به نتایج این تحقیق، اکثر پانل‌های حاصله، چگالی کمتر از چگالی چوب-سیمان استاندارد داشتند که به معنی سبک‌تر بودن پانل‌های حاصل است. همان طور که نتایج نشان دادند خواص پانل‌های تهیه شده بسیار بهتر از پانل کناف گچی موجود در بازار ایران بود و در نتیجه این پانل‌ها می‌توانند به عنوان جایگزین کناف گچی استفاده شوند. بر اساس نتایج گرفته شده و در مقایسه با حداقل خواص چوب-سیمان استاندارد، پانل‌هایی با درصد پسماند ۴۰ درصد، مقدار چسب ۱۰ درصد و مقدار کلراید کلسیم ۵ درصد، پانل‌هایی هستند که خواص آن‌ها به خواص استاندارد نزدیک‌تر است.

#### ۵- مراجع

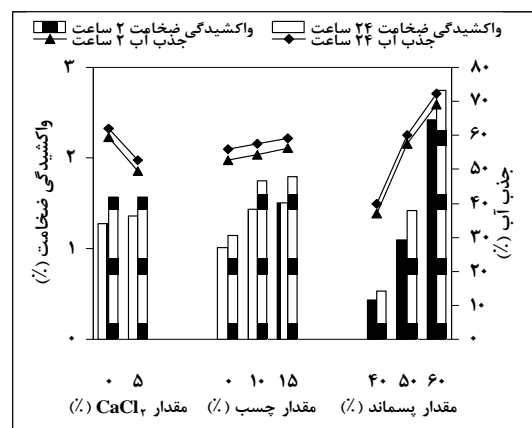
- [1] Modolo, R., Benta, A., Ferreira, V. M., Machado, L. M., "Pulp and Paper Plant Wastes Valorisation in Bituminous Mixes", Waste Management, 2010, 30 (4), 685-696.
- [2] همزه، ی، میرزائی، ب، عشوری، ع، دوست حسینی، ک، راشدی، ک، محمد الفت، ع، "ترکیب شیمیایی پسماندهای جامد صنایع کاغذسازی"، تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، ۱۳۹۰، ۲۶ (۲)، ۲۸۱-۲۹۰.
- [3] Hamzeh, Y., Ashori, A., Mirzaei, B., "Effects of Waste Paper Sludge on the Physico-Mechanical Properties of High Density Polyethylene/Wood Flour Composites", Journal of the Polymers and the Environment, 2011, 19 (1), 120-124.
- [4] Girones, J., Pardini, G., Vilaseca, F., Pelach, M. A., Mutje, P., "Recycling of Paper Mill Sludge as Filler/Reinforcement in Polypropylene Composites", Journal of the Polymers and the Environment, 2011, 18 (3), 407-412.

در پانل‌های ساخته شده، واکسیدگی ضخامت به مقدار زیادی تحت تأثیر مقدار پسماند استفاده شده است. طوری که در مقادیر ۶۰ درصد پسماند به دلیل کم بودن مقدار سیمان به عنوان اتصال دهنده، مقدار واکسیدگی ضخامت بیشتر از مقدار مجاز است؛ ولی در سایر تیمارها، مقدار واکسیدگی ضخامت تقریباً در حد مجاز یا کمتر از آن است.

در شکل (۹) اثر مستقل پارامترهای مورد بررسی بر جذب آب و واکسیدگی ضخامت پانل‌های ساخته شده بعد از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار پسماند و مقدار چسب، جذب آب و واکسیدگی در ۲ و ۲۴ ساعت به طور تقریباً خطی افزایش می‌یابد. این موضوع به دلیل افزایش فضاهای خالی در پانل در مقادیر بیشتر پسماند است که به طور خطی با افزایش مقدار پسماند افزایش می‌یابد [۵].



شکل ۸- درصد جذب آب و واکسیدگی ضخامت پانل‌های ساخته شده در تیمارهای مختلف



شکل ۹- اثر مستقل پارامترهای مورد بررسی بر جذب آب و واکسیدگی ضخامت پانل‌های ساخته شده بعد از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب

- [10] Pereira, C., Jorge, F. C., Irle, M., Ferreira, J. M., Maria, Ferreira J., "Characterizing the Setting of Cement when Mixed with Cork, Blue Gum, or Maritime Pine, Grown in Portugal I: Temperature Profiles and Compatibility Indices", *Journal of Wood Science*, 2006, 52 (4), 311-317.
- [11] Tittlein, P., Cloutier, A., Bissonnette, B., "Design of a Low-Density Wood-Cement Particleboard for Interior Wall Finish", *Cement & Concrete Composites*, 2012, 34 (2), 218-222.
- [12] Pereira, C., Caldeira, F., Ferreira, J. M. F., Irle, M. A., "Characterization of Cement-Bonded Particleboards Manufactured with Maritime Pine, Blue Gum and Cork Grown in Portugal", *European Journal of Wood and Wood Products*, 2012, 70 (1-3), 107-111.
- [13] Fuwape, J. A., Oyagade, A. O., "Bending Strength and Dimensional Stability of Tropical Wood-Cement Particleboard", *Bioresource Technology*, 1993, 44 (1), 77-79.
- [14] Wolfe, R., Gjinolli, A. E., "Durability and Strength of Cement Bonded Wood Particle Composites Made from Construction Waste", *Forest Products Journal*, 1999, 49 (2), 24-31.
- [5] Yan, S., Sagoe-Crentsil, K., Shapiro, G., "Reuse of De-Inking Sludge from Wastepaper Recycling in Cement Mortar Products", *Journal of Environmental Management*, 2011, 92 (8), 2085-2090.
- [6] Savastano Jr, H., Santos, S. F., Radonjic, M., Soboyejo, W. O., "Fracture and Fatigue of Natural Fiber-Reinforced Cementitious Composites", *Cement & Concrete Composites*, 2009, 31 (4), 232-243.
- [7] Naghizadeh, Z., Faezipour, M. M., Ebrahimi, Gh., Hamzeh, Y., "Fabrication of Lignocellulosic Fiber-Cement Composite Board and Determination of Optimum Quantities of Additives", *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 2011, 8 (1), 37-45.
- [8] Hosseinpourpia, R., Varshoe, A., Soltani, M., Hosseini, P., Ziaei Tabari, H., "Production of Waste Bio-Fiber Cement-Based Composites Reinforced with Nano-SiO<sub>2</sub> Particles as a Substitute for Asbestos Cement Composites", *Construction and Building Materials*, 2012, 31, 105-111.
- [9] Ashori, A., Tabarsa, T., Azizi, K., Mirzabeygi, R., "Wood-Wool Cement Board using Mixture of Eucalypt and Poplar", *Industrial Crops and Products*, 2011, 34 (1), 1146-1149.

**EXTENDED ABSTRACT**

## **Fabrication of Flooring Panels Using Recycled Paper De-inking Solid Waste**

Rahim Yadollahi <sup>a</sup>, Yahya Hamzeh <sup>a\*</sup>, Shademan Pourmousa <sup>b</sup>, Alireza Ashori <sup>c</sup>, Mohammad Jafari <sup>d</sup>, Kambiz Rashedi <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Department of Wood & Paper Science, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran*

<sup>b</sup> *Department of Wood & Paper Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran*

<sup>c</sup> *Department of Chemical Technologies, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran*

<sup>d</sup> *Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran*

**Received:** 02 December 2012; **Accepted:** 15 June 2013

---

### **Keywords:**

Recycled paper, Deinking, Solid waste, Flooring panels, Concrete adhesive, Mechanical properties, Fire resistance

---

## **1. Introduction**

Large volume of sludges generated in pulp and paper industry causes environmental concerns and due to limited space and new legislations, their disposal options become more limited and uneconomical. Pulp and paper mill sludges, especially deinked paper sludge contains fundamentally non-hazardous solid materials such as lingocellulosic fibers, ink and significant amount of papermaking fillers such as kaolin, clay, CaCO<sub>3</sub>, talc and silica [1]. As an eco-friendly and clean alternative to land fill, paper mill sludge can be used for the fabrication of lightweight fiber-cement panels in which mineral compounds of sludge behave like the ingredients of cement and sludge fibers work as effective reinforcing agents [2]. In order to reduce the disposal problem of papermaking sludge and enhance the properties of flooring panels, concrete, in this study an attempt has been made to examine the effect of deinked paper sludge on some physical and mechanical properties of the flooring panel.

## **2. Methodology**

### *2.1. Experimental study*

In this study, paper sludge (PS) originating from Latif Papermaking Co, Karaj, Iran was used. We had previously reported its chemical and morphological properties [1]. The binding agent employed was commercial grade of Portland cement, Type II and Calcium chloride (CaCl<sub>2</sub>) was used as cement setting accelerator. It was an analytical grade from Merk Co, Germany. To improve the adhesion of cement and PS, a concrete bonding adhesive from CEDEX, Iran, with trade name of CRB was used as binding agent. Flooring panels with the dimensions of 350 × 270 × 12 mm<sup>3</sup> were formed using PS contents of 40, 50, and 60 wt%, adhesive dosages of 0, 10, and 15 wt%, and 0 and 5 wt% of calcium chloride as an accelerator. At least three replications were fabricated for each treatment, and some mechanical and physical properties of the boards were evaluated. Control samples contained neat cement and water.

### *2.2. Physico - mechanical testing*

Prior testing, all the boards were conditioned in a controlled room for 15 days at 25 °C and 65% RH to reach the equilibrium moisture content of 12%. Conditioned boards were sawn into test samples to determine the modulus of

---

\* Corresponding Author

*E-mail addresses:* yadollahi\_rahim@alumni.ut.ac.ir (Rahim Yadollahi), hamzeh@ut.ac.ir (Yahya Hamzeh), shademan\_pourmousa@yahoo.com (Shademan Pourmousa), ashori\_a@yahoo.com (Alireza Ashori), jafari\_6384@yahoo.com (Mohammad Jafari), k.rashedi@ut.ac.ir (Kambiz Rashedi).



rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE, DIN EN 610), hardness (HS, DIN EN 897), and screw withdrawal perpendicular to the surface (SW, DIN EN 320), internal bond strength (IB, DIN EN 319) and fire resistance according to BS-476: Part 12 in the dry condition. Three-point flexural testing was carried out using an Instron Universal Testing Machine 4486, with a span of 180 mm and cross-head, the bearer diameter of 25 mm and the loading speed of 10 mm/min. The dimensions of test samples for MOR and MOE were  $310 \times 50 \text{ mm}^2$  and for other tests were  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  with nine replications for each treatment. Physical properties, namely water absorption (WA) and thickness swelling (TS) were evaluated based on DIN EN 317. At least three specimens of every board were tested to obtain a reliable average and standard deviation.

### 3. Results and discussion

The density of boards varied from 0.77 to 0.99  $\text{g/cm}^3$ . The average measured values of bending modulus of rupture and elasticity are plotted against the PS content in Fig. 1a. It can be observed that MOR and MOE properties were enhanced with increasing PS content from 40 to 60%. A further increase in PS content (60%) showed a reduction in the bending strength. After analyzing the broken pieces of the specimens, it was observed that some parts of the PS could not distribute uniformly in the matrix, and a portion of these PSs was clamped and placed in some points of the specimen containing 60% PS. The internal bond strength of the panels was found to be a maximum when PS content was 40% and further addition of PS increased the volume of fibers and reduced the volume of matrix causing lower bond strength (Fig. 1b). Moreover, the panels produced using 60% PS exhibited the highest water absorption (Fig. 1c), presumably due to the low density producing more permeable voids so that more water can be absorbed [3]. The samples exhibited satisfactory SW resistance of 22.7 kPa to make an acceptable connection loads for use as lightweight board materials. The boards also showed the addition of  $\text{CaCl}_2$  and cement adhesive could not considerably improve SW resistance (Fig. 1d). Increasing the PS content showed negative influence on fire resistance and increased weight loss due to wire. Like SW resistance, the addition of  $\text{CaCl}_2$  and cement adhesive reduced the fire resistance of panels.

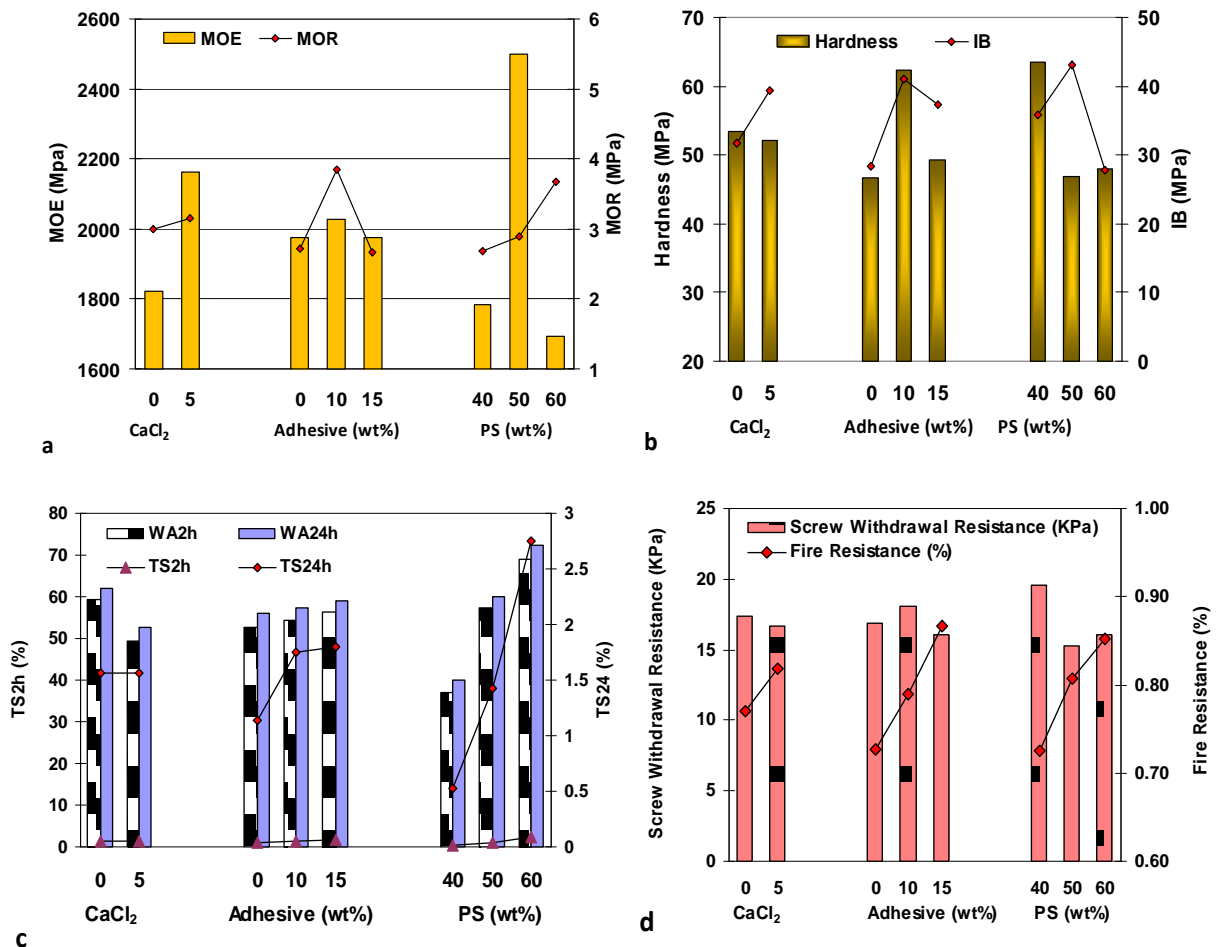


Fig. 1. Effect of formulations of the PS/cement in flooring boards on physico- mechanical properties: (a) MOR and MOE, (b) hardness and internal band, (c) water absorption and thickness swelling and, (d) screw withdrawal and fire resistance

#### 4. Conclusions

Results showed that the bending and internal strengths of the specimens were decreased with an increase in the PS content, and the maximum values were obtained at PS loading of 40 wt%. The negative influence of PS content on the mechanical properties can be explained by the reduced bonding ability of PS compared to cement. Screw withdrawal values were up to 22.7 kPa. Water absorption and the thickness swelling of fabricated panels were considerably increased with increased content of PS. In general, all properties of the boards were improved when the adhesive and calcium chloride contents were increased. The results showed that an increase in board density improved the mechanical and physical properties. In general, the fabricated panels with 40% PDS, 10% concrete adhesive and 5% CaCl<sub>2</sub> with a density of around 0.8 g/cm<sup>3</sup> had the best properties taking into account the bending modulus, internal bonding, hardness and thickness swelling which were considerably better than those of commercially available gypsum boards. Compared to the commercial gypsum boards, the fabricated panels had lower thickness swelling, comparable water adsorption and higher fire resistance.

#### 5. References

- [1] Hamzeh, Y., Ashori, A., Mirzaei, B., "Effects of Waste Paper Sludge on the Physico-Mechanical Properties of High Density Polyethylene/wood Flour Composites", *Journal of the Polymers and the Environment*, 2011, 19 (1), 120-24.
- [2] Yan, S., Sagoe-Crentsil, K., Shapiro, G., "Reuse of De-inking Sludge from Wastepaper Recycling in Cement Mortar products", *Journal of Environmental Management*, 2011, 92 (8), 2085-2090.
- [3] Asasutjarit, C., Hirunlabh, J., Khedari, J., Charoenvai, S., Zeghmati, U. C., "Development of Coconut Coir-based Lightweight Cement Board", *Construction and Building Materials*, 2007, 21 (2), 277-288.