بهینه‌سازی خواص تخته خرده چوب-سیمان ساخته‌شده از ساقه پنبه و خاکاره با ماده افزودنی کلرید کلسیم ($CaCl_2$)

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی رفتار هیدراتاسیون و خواص مکانیکی تخته خرده چوب –سیمان ساخته‌شده از ساقه پنبه، صنوبر و خاکاره، حاوی ماده افزودنی کلرید کلسیم ($CaCl_2$) در نسبت‌های مختلف وزنی است. در ابتدا، زمان انعقاد خمیر سیمانی حاوی مقادیر مختلف ماده افزودنی $CaCl_2$ و آرد چوب و ساقه پنبه تعیین شد. همچنین اثر میزان ماده افزودنی $CaCl_2$، نسبت وزنی ذرات ساقه پنبه به خرده چوب صنوبر و درصد خاکاره بر روی مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و چسبندگی داخلی تخته خرده چوب–سیمان توسط روش سطح پاسخ مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور بهینه‌سازی خواص تخته‌ها، معادله مدل ریاضی (مدل رگرسیون چند متغیره درجه‌دو) توسط برنامه شبیه‌سازی کامپیوتری تهیه گردید. نتایج نشان داد که مقادیر پیش‌بینی‌شده، انطباق مناسبی با مقادیر واقعی دارد (ضریب تبیین R^2 برای مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و چسبندگی داخلی به‌ترتیب برابر ۰/۹۳، ۰/۹۰، ۰/۹۵ بوده‌اند). همچنین معلوم شد که روش سطح پاسخ می‌تواند به‌طور مؤثر برای مدل‌سازی خواص تخته‌ها بکار رود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، حداکثر مقدار مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و چسبندگی داخلی با درصد اختلاط ساقه پنبه به صنوبر با نسبت وزنی ۴۳:۵۷، کاربرد ۴/۵ درصد ماده افزودنی و ۹ درصد خاکاره به دست آمد.

واژگان کلیدی: تخته خرده چوب–سیمان، ساقه پنبه، خاکاره، خواص مکانیکی، ماده افزودنی.

مرتضی ناظریان[*۱]
وجیهه صادقی پناه[۲]
رحیم محبّی گرگری[۳]
بابک نصرتی ششکل[۴]

[۱] دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

[۲] کارشناس ارشد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

[۳] مربی گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

[۴] استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

مسئول مکاتبات:
morteza17172000@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۱۸

مقدمه

تخته خرده چوب-سیمان یکی از فرآورده‌های چندسازه چوبی است که می‌تواند به‌عنوان مصالح ساختمانی مورداستفاده قرار گیرد. به‌دلیل کمبود منابع چوبی بررسی کاربرد پسماندها و ضایعات چوبی در ساخت فرآورده‌های مرکب چوبی ضروری به‌نظر می‌رسد. علاوه بر این، کاربرد این مواد در صنایع می‌تواند به پاک‌سازی طبیعت از وجود این مواد و بهبود شرایط زیست‌محیطی منجر گردد [۱]؛ اما استفاده از ضایعات کشاورزی به‌عنوان ماده اولیه در ساخت اوراق فشرده باعث ایجاد معایب و مشکلاتی می‌شود که بررسی این عیوب ضروری به‌نظر می‌رسد [۲].

وجود مغز در ساقه موادی همچون پنبه و کاه گندم باعث ایجاد عیوب مختلفی می‌شود. جذب زیاد رطوبت

توسط مغز اثر نامطلوب بر روی خواص تخته دارد. همچنین ویژگی‌های اسفنجی و الیاف کوتاه ضایعات کشاورزی، از عوامل تأثیرگذاری است که باعث کاهش خواص مقاومتی تخته می‌شود. با توجه به وجود مواد استخراجی متنوع و متفاوت در ساقه گیاهان لیگنوسلولزی و اثرات متفاوت و عمدتاً منفی آن‌ها، ضروری است تا اثر هرکدام از این مواد بر فرایند هیدراتاسیون سیمان بررسی شود. با مقایسه سرعت هیدراتاسیون سیمان حاوی انواع مواد استخراجی و مواد افزودنی به‌عنوان تسریع‌کننده، می‌توان خواص مقاومتی و فیزیکی تخته‌های ساخته‌شده از مواد لیگنوسلولزی را ارزیابی نموده و در مورد آن‌ها قضاوت کرد. Nazerian و Sadeghiipanah (۲۰۱۳) نشان دادند که کاربرد مواد افزودنی خواص فیزیکی و مکانیکی تخته خرده چوب – سیمان را با تسریع در سرعت فرایند هیدراتاسیون سیمان به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد [۳]. بسیاری از مواد اولیه کشاورزی نظیر ساقه پنبه حاوی مواد بازدارنده نظیر نشاسته، قند، همی‌سلولزها و مواد استخراجی هستند که باعث تأخیر در سرعت هیدراتاسیون سیمان پرتلند می‌شوند. به‌واسطه کاربرد گونه‌های چوبی تعدیل‌کننده نظیر صنوبر می‌توان از اثرات منفی کاربرد ضایعات لیگنوسلولزی کاست. اوراق چوب سیمان با وجود دانسیته بالا به‌دلیل عدم استفاده از حرارت در طی پرس تخلخل نسبتاً بالایی دارند که با کاربرد ذرات ریز چوب همانند خاکاره می‌توان فضای خالی را پر کرده و باعث بهبود خواص تخته‌ها شد. از طرف دیگر، به‌موازات کاربرد ذراتی با ابعاد کم، امکان انحلال مواد قندی و کندکننده فرآیند هیدراتاسیون سیمان افزایش می‌یابد. با افزودن مواد تسریع‌کننده هیدراتاسیون سیمان می‌توان این مشکل را تا حد زیادی برطرف نمود.

Nazerian و Eghbal Hosiny (۲۰۱۳) و Nazerian و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که ابعاد ذرات خرده چوب تأثیر فراوانی بر خواص فیزیکی و مکانیکی دارد. نتایج این تحقیق نشان داد که تغییر در ابعاد ذرات باعث افزایش ضریب نازکی، ضریب فشردگی و سطح ویژه ذرات و درنهایت بهبود واکشیدگی ضخامت و خواص مکانیکی تخته‌ها شده است. همچنین تخته‌هایی که از ذراتی با ابعاد، ضریب نازکی، فشردگی و سطح ویژه کم‌تر ساخته‌شده بودند، خواص مقاومتی کم‌تری داشته‌اند. همچنین کاهش ابعاد ذرات، باعث افزایش انحلال مواد استخراجی و قندها در محلول سیمانی شده و درنتیجه مقاومت تخته‌های ساخته‌شده از ذرات کوچک‌تر کاهش می‌یابد [۴ و ۵]. Fan و همکاران نشان دادند درحالی‌که علاوه بر خلل و فرج، خرده چوب‌ها در ضخامت و سطح تخته به‌ترتیب حدود ۴۲ درصد و ۳۸ درصد و سیمان به‌ترتیب ۵۸ و ۶۲ درصد از حجم تخته چوب سیمان را اشغال نموده‌اند، با استفاده از ذرات ریز همچون خاکاره، می‌توان خواص مقاومتی تخته‌ها را بهبود بخشید [۶].

Wei و همکاران (۲۰۰۵) ثابت کردند که می‌توان از $MgCl_2$ به‌عنوان ماده افزودنی شیمیایی مؤثر برای بهبود سازگاری بین چوب و سیمان استفاده کرد. ایشان نتیجه گرفتند که پلی‌ساکاریدهای تجزیه‌شده عامل اصلی کاهش سرعت هیدراتاسیون سیمان و ناسازگاری بین چوب و سیمان هستند [۷]. Nazerian و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی خود با اضافه کردن مواد افزودنی و تحلیل خواص فیزیکی و مکانیکی تخته خرده چوب – سیمان، به این نتیجه رسیدند که وجود مواد استخراجی چوب باعث افزایش زمان هیدراتاسیون سیمان می‌شود. همچنین، جایگزین کردن درصدی از سیمان توسط خاک نسوز یا $CaCl_2$، افزایش سرعت هیدراتاسیون و بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی را می‌تواند درپی داشته باشد [۸].

Ashori و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقی روی اوراق مرکب چوب-سیمان ساخته‌شده با رشته‌های صنوبر به این نتیجه دست یافتند که با افزایش مقدار مصرف $CaCl_2$ از ۳ درصد به ۷ درصد، خواص فیزیکی و مکانیکی تخته‌ها بهبود یافته است. همچنین با افزایش مقدار چوب، مقاومت خمشی چوب – سیمان افزایش یافت [۹]. Azrieda و همکاران (۲۰۰۹) در بررسی‌های خود بر روی سرعت هیدراتاسیون شش گونه چوب مختلف نشان دادند که $MgCl_2$ و $CaCl_2$ به‌عنوان تسریع‌کننده هیدراتاسیون باعث افزایش سرعت فرآیند شده و زمان گیرایی سیمان را بهبود می‌بخشد [۱۰].

در این بررسی اثرات توأم کاربرد ذرات ساقه پنبه، مقدار ماده افزودنی $CaCl_2$ و میزان خاکاره با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) [1] با کمک فن تحلیل واریانس

[1] Response Surface Methodology

بر خواص مکانیکی تخته خرده چوب – سیمان مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

عوامل متغیر شامل درصد اختلاط رشته‌های چوب صنوبر با ذرات پنبه در ۵ سطح (X_1: ۷۰:۳۰، ۶۰:۴۰، ۵۰:۵۰، ۴۰:۶۰، ۳۰:۷۰)، مقدار وزنی ماده افزودنی کلرید کلسیم در ۵ سطح (X_2: ۰/۴۸، ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۵/۲۵ درصد، نسبت به وزن خشک سیمان) و مقدار ماده پرکننده خاکاره در ۵ سطح (X_3: ۰/۸، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۹/۲ درصد، نسبت به وزن مجموع ذرات صنوبر و ساقه پنبه) بوده است (جدول ۱). سایر عوامل ساخت شامل ضخامت تخته (۱۴ میلی‌متر)، نوع سیمان پرتلند (تیپ ۱)، دانسیته تخته‌ها (۱/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، فشار پرس (۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) و ابعاد تخته‌ها (۱/۴×۳۰×۳۰ سانتی‌متر)، درصد آب (۴۰ درصد وزن سیمان)، نسبت وزنی سیمان به چوب (۷۰:۳۰) و ابعاد ذرات (عبور یافته از الک ۲ میلی‌متری) برای تمام تیمارها ثابت در نظر گرفته شدند.

روش ساخت نمونه‌ها

برای ساخت کیک خرده چوب-سیمان ابتدا محلول کلرید کلسیم و آب تهیه و به ذرات پنبه و صنوبر اضافه شد. پس از حدود ۵ دقیقه هم‌زدن برای توزیع یکنواخت رطوبت در داخل چسب‌زن، سیمان به این ترکیب اضافه گردید و به‌مدت ۱۵ دقیقه مجدداً به‌نحوی مخلوط شدند که هیچ نقطه سیمان نخورده‌ای بر روی ذرات مشاهده نشود. پس از اختلاط کامل، تشکیل کیک بین دو صفحه فولادی، اعمال فشار مناسب و رساندن ضخامت کیک به حد موردنیاز، فشار اعمال‌شده توسط پرس بر روی کیک توسط دو گیره فولادی تثبیت شد. پس از استقرار کامل گیره‌ها، پرس بازشده و کیک تحت‌فشار به داخل کیسه پلاستیکی منتقل شد. پس از ۲۴ ساعت از استقرار در محیط آزمایشگاهی، گیره‌های فولادی و صفحات باز شدند و تخته تر شکل‌گرفته در داخل کیسه پلاستیکی به‌مدت ۱۸ روز قرار داده شد. پس‌ازآن، تخته‌ها از کیسه‌های پلاستیکی بیرون آورده و به‌مدت ۹ روز دیگر به‌منظور تکمیل فرایند هیدراتاسیون و هم‌زمان خشک شدن و رسیدن به رطوبت تعادل به‌طور مجزا و ایستاده در محیط آزمایشگاهی قرار داده شدند.

از آزمون فاکتوریل به‌عنوان طرح آزمونی استفاده شد. ۱۵ تیمار تعریف‌شده در قالب متغیرهای مستقل و سطوح آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. به‌منظور برآورد ضریب رگرسیون، از روش مکعب ماتریس طراحی‌شده (CCF[1]) با نقاطی که در مرکز هر محور از فضای فاکتوریل قرار دارد، استفاده گردید. از این روش برای توسعه مدل ریاضی به‌صورت معادلات رگرسیون چند متغیره برای مدول گسیختگی (MOR)، مدول الاستیسیته (MOE) و چسبندگی داخلی (IB) تخته‌ها استفاده شد. با توجه به کمی بودن متغیرهای موردبررسی، این روش این قابلیت را دارد تا مقادیر بهینه از متغیرهای موردبررسی را بدون توجه به آن‌که الزاماً مقادیر بهینه تعیین‌شده به‌عنوان نقاط انتخابی در هر یک از متغیرهای هر تیمار وجود داشته باشد، برآورد نماید. فاصله مختصاتی بین نقاط از مرکز مختصات (α) برابر ۱/۶۸± در نظر گرفته شد. از پنج سطح برای هر متغیر استفاده گردید (جدول ۱). حد بالای سطوح هر متغیر به‌عنوان ۱/۶۸ و حد پایین به‌عنوان ۱/۶۸- کدگذاری گردید. معادله (رابطه ۱) چندجمله‌ای درجه دوم (رگرسیون) استفاده‌شده برای نشان دادن سطح پاسخ (y) [۱۱] نیز نشان داده شده است.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{3} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{3} \beta_{ii} X_i^2 \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=i+1}^{3} \beta_{ij} X_i X_j \quad (۱)$$

β_0 متوسط پاسخ‌ها و β_{ii}، β_i و β_{ij} ضرایب رگرسیونی هستند که به‌ترتیب وابسته به اثرات خطی، مربعات و اثرات متقابل متغیرهای موردبررسی است.

بر اساس طرح فاکتوریل استفاده‌شده، تعداد شش تکرار در نقطه مرکزی مختصات در نظر گرفته شد [۱۲]. مجموع تعداد نمونه‌ها برای سه متغیر مستقل (نسبت پنبه به صنوبر، میزان ماده افزودنی $CaCl_2$ و میزان خاکاره) از طریق رابطه $2^n+(2\times n)+C$ به‌دست آمد. آنالیز رگرسیونی، آنالیز واریانس (ANOVA) و سطح پاسخ‌گویی داده‌ها با

[1] Central Composite Face

استفاده از نرم‌افزارهای Minitab و Design Expert به‌دست آمد.

تهیه نمونه‌های آزمونی

اندازه‌گیری‌های خواص تخته‌ها بعد از گذشت ۲۸ روز از زمان ساخت آن‌ها، مطابق با استاندارد EN ۳۱۰ [۱۳] و EN ۳۱۹ [۱۴] انجام شد. آزمون‌های خمشی در ابعاد ۱۲mm×۱۰۰×۳۰۰ و آزمون چسبندگی داخلی در ابعاد ۵۰×۵۰mm با سرعت بارگذاری ۱/۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام پذیرفت.

آزمون تعیین سرعت هیدراتاسیون سیمان

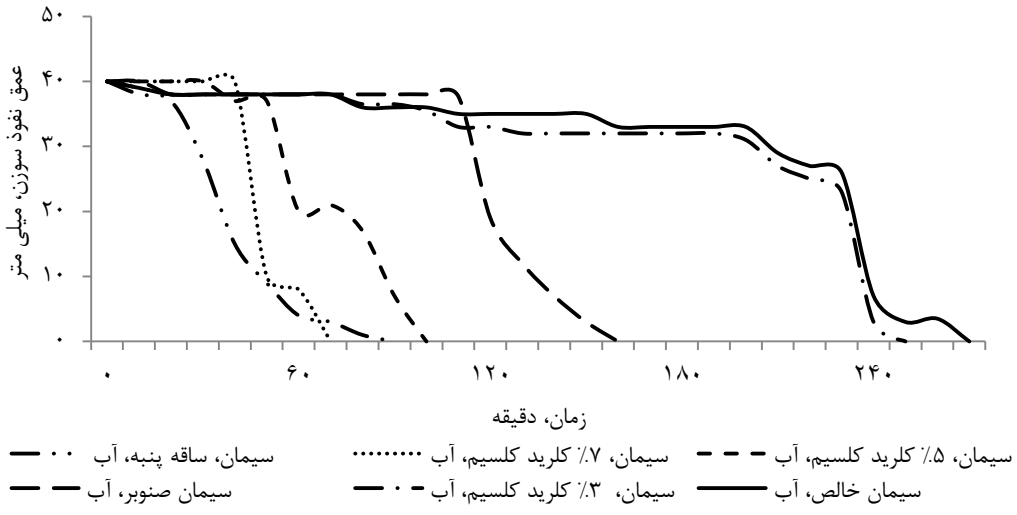
۶ تیمار شامل سیمان + آب مقطر، سیمان + آب مقطر + آرد چوب، سیمان + آب مقطر + آرد ساقه پنبه، سیمان + آب مقطر + ۳ درصد ماده افزودنی، سیمان + آب مقطر + ۵ درصد ماده افزودنی و سیمان + آب مقطر + ۷ درصد ماده افزودنی (بر اساس ماده خشک سیمان) بر اساس استاندارد ASTM C 191-04a مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۱) [۱۵]. ترکیب حاصله به‌مدت ۲ دقیقه باهم مخلوط شدند. بلافاصله پس از اختلاط، خمیر سیمانی وارد قالب پلاستیکی دستگاه ویکات شد. برای تعیین زمان هیدراتاسیون سیمان، سوزن ویکات هر ۱۰ دقیقه یک‌بار به‌داخل ملاط سیمان رها می‌شد. زمان کاهش میزان نفوذ سوزن به‌داخل خمیر سیمانی (زمان شروع هیدراتاسیون) تا وقتی‌که دیگر امکان نفوذ سوزن به‌داخل خمیر سیمانی وجود نداشته باشد (زمان خاتمه هیدراتاسیون سیمان) ثبت گردید.

بعد از انجام آزمایش‌های مکانیکی بر روی نمونه‌های تهیه‌شده، نتایج به‌دست‌آمده در قالب طرح فاکتوریل با بهره‌گیری از فن تجزیه واریانس ANOVA توسط روش سطح پاسخ (RSM) با کمک نرم‌افزار Minitab مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت.

نتایج و بحث

هیدراتاسیون خمیر سیمان

زمان گیرایی خمیر سیمان با توجه به نوع ماده افزودنی و همچنین ماده لیگنوسلولزی متفاوت است (شکل ۱). با افزایش میزان مواد افزودنی، زمان گیرایی خمیر سیمان کاهش یافته است. زمانی که به ترکیب خمیر سیمان، ۷ درصد کلرید کلسیم افزوده شد، سرعت گیرایی (هیدراتاسیون) خمیر سیمانی نسبت به زمانی که به مخلوط خمیر سیمان، ۵ و ۳ درصد کلرید کلسیم افزوده شد افزایش بیش‌تری یافت. از شکل یک ملاحظه می‌شود که حضور قندها و مواد استخراجی در ساقه پنبه و چوب قابل‌حل در آب، گیرایی را کاهش و زمان سخت شدن سیمان را در خمیر سیمان افزایش می‌دهد.



شکل ۱- سرعت هیدراتاسیون (شروع و خاتمه) خمیر سیمانی بر اساس عمق نفوذ سوزن ویکات

نتایج به‌دست‌آمده [۵] از آزمون هیدراتاسیون نشان داد که مواد استخراجی محلول در آب مواد لیگنوسلولزی و چوب دمای هیدراتاسیون را کاهش می‌دهند. این کاهش منجر به کاهش سرعت فرآیند هیدراتاسیون و افزایش زمان گیرایی سیمان می‌شود. علاوه بر آن، به‌علت دانسیته پایین چوب صنوبر، جذب آب توسط دیواره سلولی افزایش پیدا می‌کند و باعث می‌شود تا غلظت خمیر سیمان افزایش پیدا کند. این امر باعث می‌شود تا میزان عمق نفوذ سوزن دستگاه ویکات به‌داخل خمیر سیمان کاهش پیدا کند، درحالی که هیدراتاسیون خمیر سیمان به‌طور کامل صورت نگرفته است. این موضوع در مورد پنبه شدت بیش‌تری دارد. در این شرایط با وجود تکمیل نشدن فرایند هیدراتاسیون، ذرات پنبه موجود در خمیر سیمانی آب بیش‌تری را جذب کرده و در همان ابتدای فرایند هیدراتاسیون امکان نفوذ سوزن را غیرممکن می‌سازد.

خصوصیات مکانیکی تخته خرده چوب – سیمان

طرح آزمونی استفاده‌شده همراه با مقادیر کدگذاری شده و واقعی متغیرهای مستقل (نسبت پنبه به چوب صنوبر (X_1)، مقدار ماده افزودنی (X_2) و درصد خاکاره (X_3)) و مقادیر میانگین توابع آن‌ها (مدول گسیختگی (MOR)[1]، مدول الاستیسیته (MOE)[2] و چسبندگی داخلی (IB)[3] در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- طرح آزمونی بکار رفته برای ساخت تخته خرده چوب – سیمان[۱۲۳]

متغیرهای کدگذاری شده				مقادیر واقعی متغیرها			خواص مکانیکی		
تیمار*	X_1	X_2	X_3	نسبت پنبه به صنوبر	درصد ماده افزودنی	درصد خاکاره	MOR MPa	MOE MPa	IB MPa
۱	۰	-۱/۶۸	۰	۵۰:۵۰	۰/۴۸	۵	۷/۰۲	۱۳۵۸	۰/۴۳
۲	۱	۱	۱	۶۰:۴۰	۴/۵	۷/۵	۸/۵۲	۱۸۷۵	۰/۳۹
۳	۰	۰	۰	۵۰:۵۰	۳	۵	۸/۱۲	۱۸۶۵	۰/۳۶
۴	۱/۶۸	۰	۰	۳۰:۷۰	۳	۵	۱۰/۲	۲۳۴۶	۰/۳
۵	-۱	۱	۱	۶۰:۴۰	۴/۵	۷/۵	۷/۰۲	۱۶۵۲	۰/۰۸
۶	۰	۰	۰	۵۰:۵۰	۳	۵	۸/۲۱	۱۸۴۲	۰/۳۰
۷	۰	۰	۰	۵۰:۵۰	۳	۵	۸/۰۲	۱۸۰۲	۰/۳۲
۸	۰	۰	۰	۵۰:۵۰	۳	۵	۸/۱	۱۷۹۹	۰/۲۹
۹	۱	-۱	۱	۴۰:۶۰	۱/۵	۷/۵	۹/۷۵	۲۱۵۶	۰/۷۴
۱۰	۱	-۱	-۱	۴۰:۶۰	۱/۵	۵/۲	۶/۲۱	۱۷۵۲	۰/۱۲
۱۱	-۱	-۱	۱	۴۰:۶۰	۱/۵	۵/۷	۹/۰۱	۱۲۵۴	۰/۵۵
۱۲	۰	۰	۰	۵۰:۵۰	۳	۵	۶/۸۴	۱۸۶۵	۰/۳۹
۱۳	۰	۱/۶۸	۰	۵۰:۵۰	۵/۵۲	۵	۱۱/۶۵	۲۴۱۲	۰/۱۵
۱۴	۰	۰	۰	۵۰:۵۰	۳	۵	۸/۰۲	۱۵۲۳	۰/۳۳
۱۵	۱	۱	-۱	۴۰:۶۰	۴/۵	۲/۵	۱۲/۹۵	۲۵۹۶	۰/۳۰
۱۶	-۱	۱	-۱	۶۰:۴۰	۴/۵	۲/۵	۱۳/۰۲	۲۶۴۱	۰/۳۳
۱۷	۰	۰	-۱/۶۸	۵۰:۵۰	۳	۰/۸	۹/۰۲	۱۹۵۲	۰/۶۰
۱۸	۰	۰	۱/۶۸	۵۰:۵۰	۳	۹/۲	۷/۵۴	۱۸۹۶	۰/۶۰
۱۹	-۱/۶۸	۰	۰	۷۰:۳۰	۳	۵	۵/۰۲	۵۲۴	۰/۰۹
۲۰	-۱	-۱	-۱	۶۰:۴۰	۱/۵	۲/۵	۵/۵۴	۷۵۲	۰/۰۶

* مقادیر کمی هر متغیر مستقل برای هر تیمار به‌صورت کدگذاری شده و واقعی ارائه شده است.

[1] Modulus of rupture
[2] Modulus of elasticity
[3] Internal bonding

بر اساس متغیرهای مستقل موردبررسی، مدل معادلات رگرسیونی به‌دست‌آمده برای متغیرهای وابسته (مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و چسبندگی داخلی) ارائه شده است.

$$Y_1(MOR) = 8/07 + 0/85X_1 - 0/43X_2 + 1/38X_3 + 0/61X_3^2 + 2/18X_2X_3 \quad (۲)$$

$$Y_2(MOE) = 1871/86 + 376/77X_1 + 338/64X_3 - 115/45X_1^2 - 215/5X_1X_3 - 327X_2X_3 \quad (۳)$$

$$Y_3(IB) = 0/33 + 0/04X_1 - 0/011X_2 + 0/078X_3 - 0/038X_1^2 + 0/088X_3^2 - 0/18X_2X_3 \quad (۴)$$

عوامل و میزان تأثیرگذاری هرکدام از این عوامل در طرح آزمایشی موردنظر در معادلات بالا محاسبه شده است.

از مدل توسعه‌یافته (ANOVA) برای تجزیه‌وتحلیل نتایج استفاده شد. این نتایج در ۹ نمودار (اشکال ۲-۴) و همچنین جدول‌های تجزیه واریانس (ANOVA) مربوط به هر متغیر وابسته (جدول‌های ۲-۴) به‌صورت مجزا ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل واریانس ANOVA برای MOR

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	احتمال F>مقدار– p
Model	۸۴/۶۸	۶	۱۴/۱۱	۳۰/۴۸	<۰/۰۰۰۱
X_1	۳/۱۳	۱	۳/۱۳	۶/۷۶	۰/۰۲۲۰
X_2	۷/۹۷	۱	۷/۹۷	۱۷/۲۰	۰/۰۰۱۱
X_3	۲۵/۸۴	۱	۲۵/۸۴	۵۵/۸۱	<۰/۰۰۰۱
X_1^2	۶/۵۴	۱	۴/۵۶	۹/۸۶	۰/۰۰۷۸
X_3^2	۶/۰۲	۱	۶/۰۲	۱۳/۰۰	۰/۰۰۳
X_2X_3	۳۸/۰۲	۱	۳۸/۰۲	۸۲/۱۰	<۰/۰۰۰۱
عدم برازش	۴/۶۸	۸	۰/۵۹	۲/۱۹	۰/۲۰
ضریب تبیین (R^2)=۰/۹۳؛ ضریب تغییرات ۰/۸؛ انحراف معیار=۰/۶۸					

جدول ۳- نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل واریانس ANOVA برای MOE

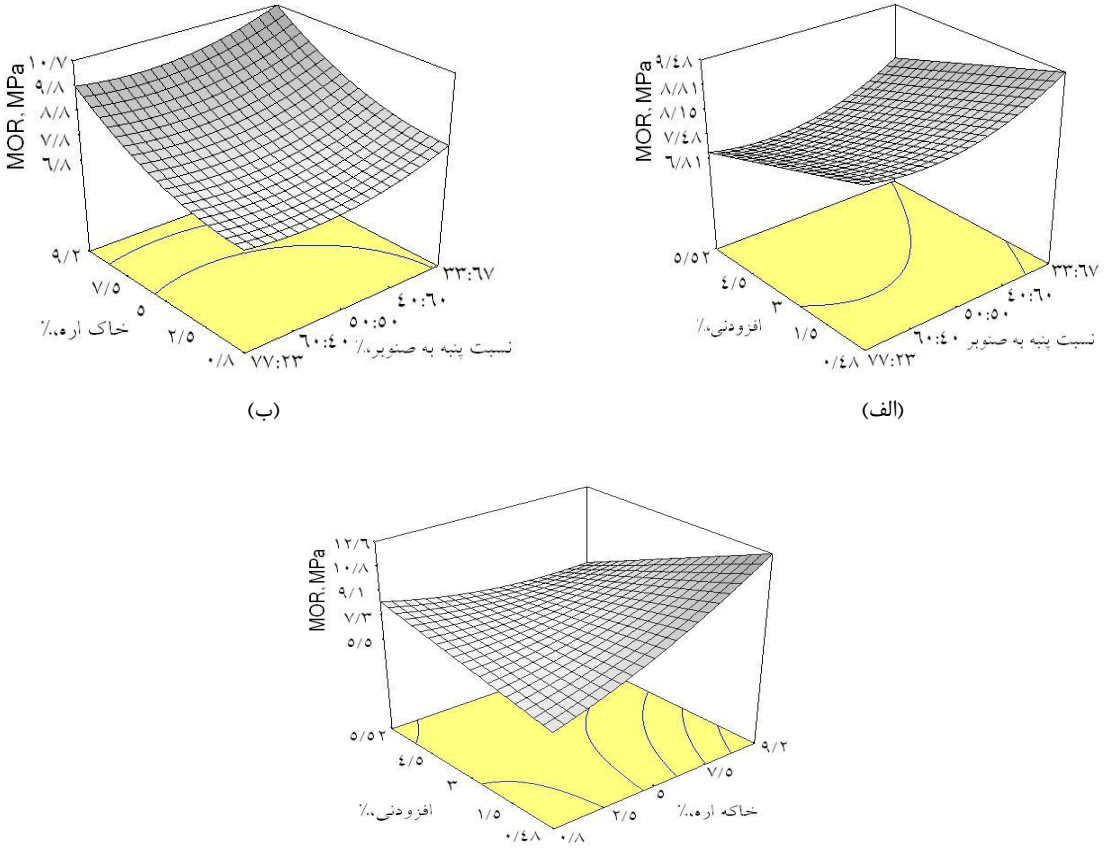
منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	احتمال F>مقدار– p
Model	۴/۹۸۳	۶	۸/۳۰۵	۲۰/۵۴	<۰/۰۰۰۱
X_1	۱/۹۳۷	۱	۱/۹۳۷	۴۷/۹۰	<۰/۰۰۰۱
X_2	۱/۵۶۵	۱	۱/۵۶۵	۳۸/۷۰	<۰/۰۰۰۱
X_1^2	۱/۹۴۹	۱	۱/۹۴۹	۴/۸۲	۰/۰۴۶۹
X_1X_3	۳/۷۱۵	۱	۳/۷۱۵	۹/۱۹	۰/۰۰۹۶
عدم برازش	۴/۴۰۶	۸	۵۵۰۶۸/۹۰	۳/۲۳	۰/۱۱
ضریب تبیین (R^2)=۰/۹۰؛ ضریب تغییرات=۱/۱؛ انحراف معیار= ۰/۵					

جدول ۴- نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل واریانس ANOVA برای IB

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	احتمال F>مقدار $-p$
Model	۶۸/۸۴	۶	۰/۰۸۶	۲۰/۹۵	<۰/۰۰۱
X_1	۱۳/۳	۱	۰/۰۲۲	۵/۲۹	۰/۰۳۸۷
X_2	۹۷/۷	۱	۱/۵۷	۰/۳۸	۰/۰۵۴۶
X_3	۸۴/۲۵	۱	۰/۰۸۲	۲۰/۱۳	۰/۰۰۰۶
X_1^2	۵۴/۶	۱	۰/۰۲۱	۵/۱۸	۰/۰۴۰۳
X_3^2	۲/۶	۱	۰/۱۱	۲۷/۱۸	۰/۰۰۰۲
X_2X_3	۲/۳۸	۱	۰/۲۷	۶۵/۱۴	<۰/۰۰۰۱
عدم برازش	۶۸/۴	۸	۵/۶۸	۳/۶۷	۰/۸۴۱
ضریب تبیین (R^2)=۰/۹۰؛ ضریب تغییرات=۱/۱؛ انحراف معیار= ۰/۵					

ضریب تبیین (R^2) آزمون‌ها (MOR، MOE و IB) نشان می‌دهد که مدل طراحی‌شده معنی‌دار است (جدول-های ۲، ۳ و ۴). علاوه بر آن، مقدار F در جداول مربوط به آزمون‌های محاسبه‌شده برای مدل کم‌تر از ۰/۰۵ است و بیانگر این موضوع است که این مدل معنی‌دار است. با توجه به معادلات بالا، هر یک از متغیرهای مستقل موردبررسی به‌طور مشخص بر روی متغیرهای وابسته تأثیر معنی‌داری دارند، به‌طوری‌که اثر مستقل (مستقیم) نسبت پنبه به چوب، میزان $CaCl_2$، درصد خاکاره، توان دوم متغیر درصد خاکاره و اثر متقابل درصد $CaCl_2$ با درصد خاکاره بر روی مدول گسیختگی معنی‌دار هستند. اثر مستقل نسبت پنبه به چوب، درصد خاکاره، توان دوم نسبت ساقه پنبه به صنوبر، تأثیر متقابل نسبت ساقه پنبه به درصد خاکاره و نیز متقابل میزان ماده افزودنی با میزان خاکاره اثر معنی‌دار بر روی مدول الاستیسیته دارند. همچنین، اثر مستقل نسبت پنبه به چوب، میزان ماده افزودنی، درصد خاکاره، توان دوم نسبت پنبه به چوب، توان دوم درصد خاکاره و تأثیر متقابل میزان ماده افزودنی با خاکاره بر اساس معادله رگرسیونی بر روی چسبندگی داخلی معنی‌دار بوده است. بر اساس جداول ۲، ۳ و ۴ عدم برازش (Lack of fit) معنی‌دار نیست که مطلوب است. برای درک بهتر نتایج و تعیین میزان تأثیرگذاری هرکدام از متغیرهای مستقل بر روی خواص مکانیکی، مدل‌های پیش‌بینی‌شده به‌صورت پاسخ‌های سه‌بعدی ارائه شده است. تمام ملاحظات فوق نشان‌دهنده برازش خوب مدل رگرسیون است. اثر متقابل نسبت پنبه به چوب صنوبر (X_1)، ماده افزودنی (X_2) و درصد خاکاره (X_3) بر MOR، MOE و IB و در قالب اشکال سه‌بعدی ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است.

بر اساس جدول ۱ و شکل‌های ۲- الف و ب مشاهده می‌شود با کاهش میزان مصرف ساقه پنبه در سیستم، مقاومت خمشی تخته افزایش یافته است. این در حالی است که Kargarfard و همکاران (۲۰۰۶) با بررسی استفاده از ساقه پنبه به‌همراه چوب اکالیپتوس (که برخلاف صنوبر گونه‌ایی سنگین است) در ساخت تخته خرده چوب دریافتند که با افزایش ساقه پنبه ویژگی‌های مکانیکی ازجمله MOR تخته‌های ساخته‌شده بهبود می‌یابد. علت این امر در نتیجه پایین بودن جرم ویژه و بالا بودن ضریب فشردگی ساقه پنبه در تخته است [۱۶]. اتصالات موجود در تخته خرده چوب-سیمان در نتیجه درهم‌رفتگی مکانیکی است و اتصالات شیمیایی در طی اختلاط ذرات چوب با سیمان رخ نمی‌دهد. اگرچه در اثر فراخ بودن عناصر آوندی و سهولت در انتقال ذرات سیمان توسط آب عملاً امکان درهم‌رفتگی مکانیکی درنتیجه نفوذ بیشتر میکروکریستال‌های سیمان هیدراته در گونه‌های سبک‌تر جهت ایجاد اتصال مکانیکی بهتر فراهم می‌شود، اما به دلیل جذب بیشتر آب توسط گونه‌های سبک‌تر، میزان آب موردنیاز برای هیدراتاسیون کامل ذرات سیمان در تخته کاهش می‌یابد [۴]. ازاین‌رو، با کاربرد نسبت بیش‌تری از پنبه مقاومت‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۲- اثر متغیرهای مورداستفاده بر مدول خمشی (MOR) تخته‌های ساخته‌شده از مدل معادله

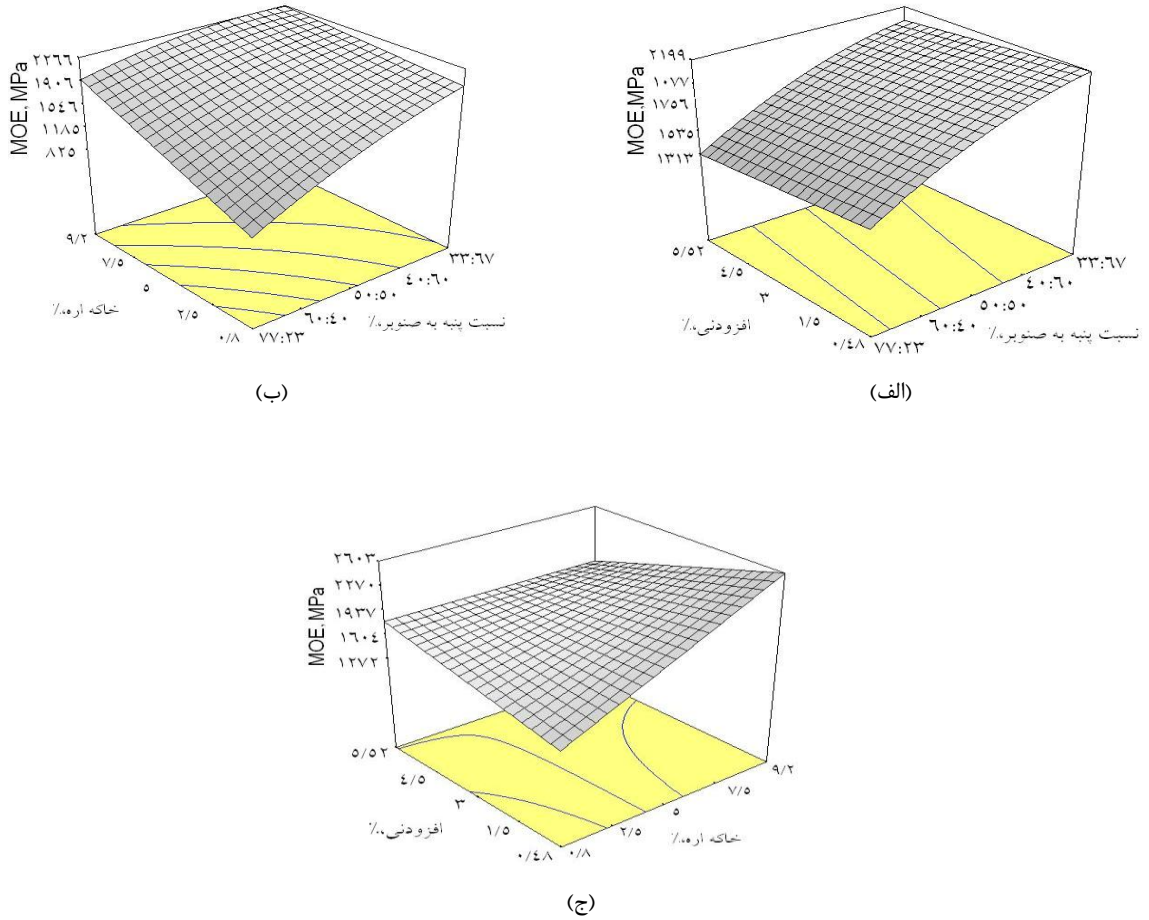
شکل (ب) اثر متقابل درصد خاک‌اره و نسبت پنبه به صنوبر را بر MOR در میزان ثابت ماده افزودنی (۳ درصد) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با کاهش میزان ذرات ساقه پنبه و افزایش خاک‌اره، MOR افزایش می‌یابد. با توجه به این‌که در تولید تخته خرده چوب-سیمان، از حرارت استفاده نمی‌شود و ذرات چوبی نمی‌توانند به تغییر شکل پایدار رسیده و افزایش سطح تماس را سبب شوند، ذرات خاک‌اره می‌توانند باعث ایجاد سطح تماس مناسب شوند. درواقع، خاک‌اره به‌عنوان عامل پرکننده خلل و فرج و افزایش‌دهنده سطح تماس بین ذرات عمل می‌کند. با افزایش سطح تماس این امکان فراهم می‌شود که مقاومت اتصال افزایش یابد. هم‌زمان به‌دلیل انعطاف‌پذیری کم‌تر ساقه پنبه و میزان جذب آب بیش‌تر توسط این ذرات، باعث خواهد شد تا ازیک‌طرف سطح اتصال بین ذرات و خرده چوب‌ها کم‌تر شده و از طرف دیگر میزان آب موردنیاز برای هیدراتاسیون کامل سیمان وجود نداشته باشد.

بر اساس شکل ۲-ج، کاربرد بیش‌تر خاک‌اره و کاهش مصرف $CaCl_2$ (وقتی‌که نسبت پنبه به صنوبر متوسط (۵۰:۵۰) و ثابت است) موجب افزایش MOR می‌شود. افزایش میزان ماده افزودنی باعث تسریع در فرآیند هیدراتاسیون می‌شود که تسریع فرآیند به‌نوبه خود به‌طور مستقیم به دمای هیدراتاسیون بستگی دارد. به‌دلیل افزایش سطح ویژه خاک‌اره امکان جذب آب از سیستم توسط ذرات چوب فراهم‌تر شده و باعث کاهش میزان آب موردنیاز برای تکمیل و برآورده کردن شدت فرآیند هیدراتاسیون به‌واسطه افزایش میزان کاربرد $CaCl_2$ می‌شود. این امر باعث می‌شود که فرآیند هیدراتاسیون

به‌شکل ناقص خاتمه یابد. همچنین به‌دلیل افزایش حرارت هیدراتاسیون و تشکیل بخار بیش‌ازاندازه، امکان ایجاد ترک‌های میکرونی در مناطق تماس سیمان با ذرات وجود دارد.

اثر متقابل نسبت ذرات ساقه پنبه به چوب صنوبر (X_1)، ماده افزودنی (X_2) و درصد خاکاره (X_3) بر MOE در شکل‌های ۳ الف-ج نشان داده شده است. محدوده داده‌ها برای MOE بین ۵۲۴ تا ۲۶۴۱ MPa است (جدول ۱). با توجه به معادله Y_2 مشاهده می‌شود که ضرایب خطی (β_1 و β_3) برای MOE مقادیر مثبتی را نشان می‌دهند. مقادیر مثبت نشان‌دهنده افزایش MOE با کاهش میزان پنبه به صنوبر (X_1) و افزایش خاکاره (X_3) در ساخت تخته است.

شکل ۳- الف اثر متقابل نسبت پنبه به چوب با ماده افزودنی در شرایطی که میزان مصرف خاکاره در حد متوسط (۵ درصد) ثابت شده است را روی MOE نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با کاهش میزان پنبه، MOE افزایش پیدا کرده است، اما تأثیر میزان ماده افزودنی ناچیز و یکسان است. به دلیل دانسیته پایین‌تر پنبه و وجود بافت اسفنجی بر سطح داخلی ساقه و درنتیجه نفوذ سریع‌تر آب به داخل ذرات پنبه، آب موردنیاز برای هیدراتاسیون کامل سیمان تأمین نخواهد شد. هم‌چنین، وجود مواد استخراجی بیشتر در مواد لیگنوسلولزی همانند ساقه پنبه نسبت به چوب که به‌عنوان مواد کندکننده سرعت هیدراتاسیون سیمان شناخته می‌شوند، باعث خواهد شد تا مقاومت تخته کاهش یابد.



شکل ۳- اثر متغیرهای مورداستفاده بر مدول الاستیسیته (MOE) تخته‌های ساخته‌شده از مدل معادله

شکل ۳- ب اثر متقابل خاکاره با نسبت پنبه به چوب را بر MOE در مقدار متوسط ماده افزودنی (۳ درصد) را نشان می‌دهد. کاهش نسبت پنبه به چوب و افزایش میزان خاکاره باعث افزایش مقدار MOE می‌شود. این تغییرات با توجه به مثبت بودن ضرایب خطی در معادله مدل (معادله ۳) نیز قابل‌اثبات است. اگرچه با کاهش ابعاد ذرات امکان انحلال مواد استخراجی فراهم می‌شود [۵]، اما به دلیل آنکه در فرایند ساخت از پرس گرم استفاده نمی‌شود و درنتیجه امکان نرم شدن ذرات چوبی جهت ایجاد سطح تماس بیشتر بین ذرات فراهم نمی‌شود و تخلخل و فضای خالی بین ذرات کاهش نمی‌یابد، کاربرد خاکاره می‌تواند تا حد زیادی باعث کاهش تخلخل و افزایش سطح تماس بین ذرات گردد.

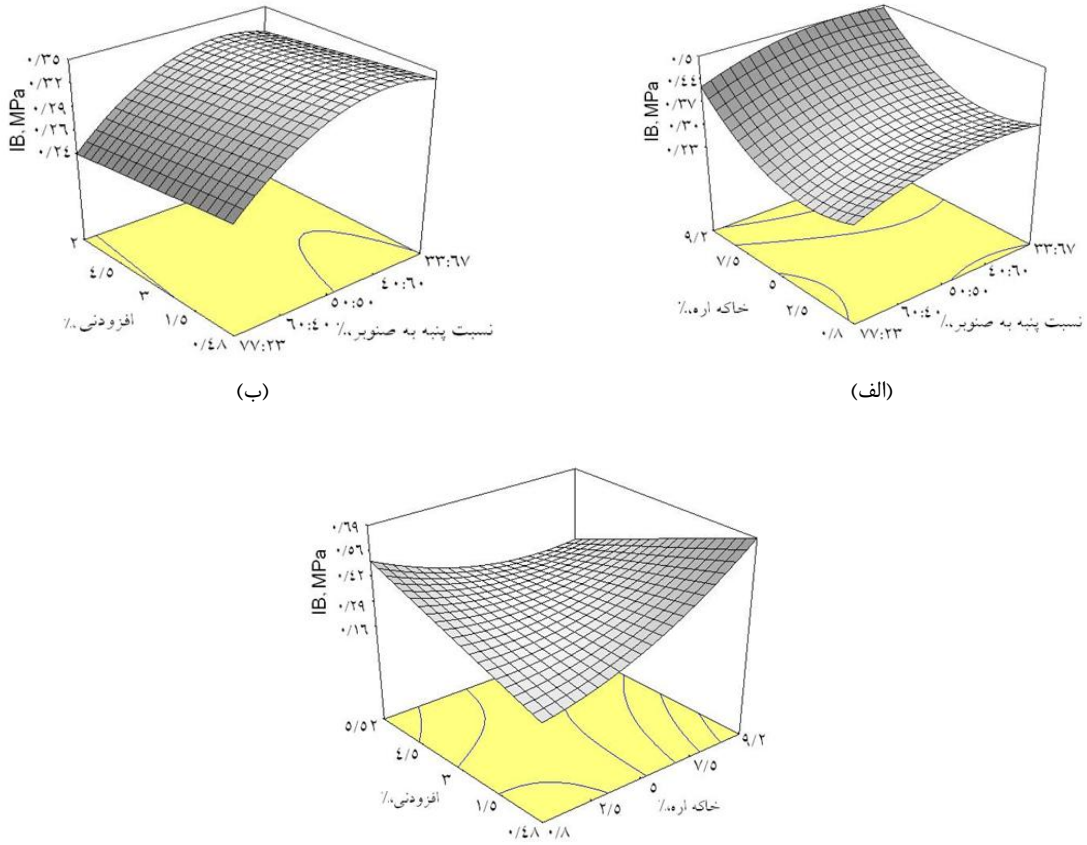
شکل ۳- ج اثر متقابل خاکاره با ماده افزودنی را بر MOE در مقدار متوسط نسبت پنبه به چوب (۵۰: ۵۰) نشان می‌دهد. افزایش میزان خاکاره و ماده افزودنی باعث افزایش مقدار MOE می‌شود. این تغییرات با توجه به مثبت بودن ضرایب خطی در معادله مدل (معادله ۳) نیز قابل‌اثبات است. کاربرد ذرات با ابعاد کوچک ازطرفی می‌تواند به‌دلیل سطح ویژه بیشتر و درنتیجه انحلال بیشتر مواد استخراجی در سیستم به‌واسطه محیط قلیایی بالا بر سرعت هیدراتاسیون و درنتیجه مقاومت تخته تأثیر منفی بگذارد و از طرف دیگر به‌واسطه خاصیت پرکنندگی تأثیر مثبت داشته باشد. با کاربرد مواد افزودنی تسریع‌کننده هیدراتاسیون خمیر سیمانی، عملاً اثر منفی انحلال بیشتر مواد استخراجی موجود در ذرات ریز که می‌توانست باعث کندی فرایند هیدراتاسیون شود از بین می‌رود. با بهبود سرعت هیدراتاسیون سیمان، مقاومت تخته افزایش می‌یابد.

نتایج به‌دست‌آمده از چسبندگی داخلی (IB) به‌طور معنی‌داری ($p<۰/۰۵$) تحت تأثیر متغیرهای مورداستفاده در ساخت تخته چوب سیمان قرار گرفت. اثر متقابل نسبت پنبه به چوب صنوبر ($X_۱$)، ماده افزودنی ($X_۲$) و درصد خاکاره ($X_۳$) بر IB در شکل ۴ الف-ج نشان داده شده است. بر اساس جدول ۴، مشاهده می‌شود که همه متغیرهای ساخت تأثیر معنی‌دار بر روی خواص مکانیکی تخته داشته‌اند. شکل ۴- الف اثر متقابل نسبت پنبه به چوب و ماده افزودنی را بر روی چسبندگی داخلی در مقدار متوسط و ثابت میزان خاکاره (۵ درصد) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش میزان ساقه پنبه چسبندگی داخلی تخته‌ها افزایش یافته است؛ اما از معادله مشهود است که تغییرات در IB متأثر از تأثیر متقابل میزان $CaCl_2$ با ذرات پنبه نیست. Ashori و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقی روی کامپوزیت‌های سیمانی ساخته‌شده با رشته‌های صنوبر به این نتیجه دست یافتند که تمام خواص تخته‌ها با افزایش مقدار $CaCl_2$ از ۳ درصد به ۷ درصد بهبود یافته است. آن‌ها ذکر کردند که با افزایش مقدار چوب، مقاومت خمشی چوب –سیمان افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که می‌توان تخته قابل‌قبول با رشته صنوبر با پیونددهنده سیمان پرتلند تولید کرد [۹]. شکل (ب) اثر متقابل نسبت پنبه به صنوبر با درصد خاکاره را بر IB در مقدار متوسط (۳ درصد) ماده افزودنی نشان می‌دهد. با مصرف پنبه تا حد ۴۰ درصد میزان IB به حداکثر خود می‌رسد. مقادیر بیش‌تر از این حد، چسبندگی داخلی را کاهش می‌دهد. با افزایش میزان مصرف خاکاره میزان IB افزایش می‌یابد. شدت افزایش IB در مقادیر بالاتر خاکاره بیش‌تر است. این امر می‌تواند در نتیجه افزایش سطح تماس بین ذرات باشد.

شکل ۴- ج اثر متقابل میزان خاکاره با درصد ماده افزودنی را بر IB در مقدار متوسط نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، با افزایش ماده افزودنی میزان IB افزایش می‌یابد، زیرا ترکیبات معدنی دارای کلسیم، منیزیم و سیلیکون عمیقاً به دیواره سلولی ذرات چوب نفوذ می‌کنند. این نفوذ می‌تواند میزان نیروی چسبندگی بین ذرات چوب و سیمان را بهبود بخشد. این افزایش در معادله (۴) نیز مشهود است. هم‌زمان با افزایش میزان خاکاره نیز، IB افزایش یافته است. افزایش میزان $CaCl_2$ در تأثیر متقابل با خاکاره IB تخته را بهبود بخشیده است. دلیل این امر مینرالیزه شدن بهتر ذرات چوب و سخت‌تر حل شدن ماده قندی توسط افزودنی‌های تسریع‌کننده فرایند هیدراتاسیون خمیر سیمانی است.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های آماری انجام‌شده بر روی داده‌های ورودی توسط بسته‌های نرم‌افزاری Minitab و Expert design میزان بهینه کاربرد

هرکدام از متغیرهای موردبررسی برای ساخت تخته‌هایی با خواص مکانیکی برتر مشخص گردید. بر اساس مدل معادلات و نمودارهای مربوط به آن‌ها، تغییرات متغیرهای وابسته با توجه به میزان تغییر در مقادیر متغیرهای مستقل تا حدودی مشابه بوده است؛ اما درنهایت، بر اساس اطلاعات خروجی مشخص گردید که کاربرد خاکاره تا حد ۴۳ درصد، ماده افزودنی $CaCl_2$ تا حد ۴/۵ درصد و ساقه پنبه تا حد ۴۳ درصد می‌تواند خواص مکانیکی تخته خرده چوب - سیمان همچون MOR، MOE و IB را در حد بهینه قرار دهد.



شکل ۴- اثر متغیرهای مورداستفاده بر چسبندگی داخلی (IB) تخته‌های ساخته‌شده از مدل معادله

نتیجه‌گیری

زمان گیرایی خمیر سیمان با افزایش میزان ماده افزودنی کلرید کلسیم کاهش یافته است. به‌علت تخلخل بالا و دانسیته پایین صنوبر و ساقه پنبه سرعت جذب آب توسط دیواره سلولی افزایش پیدا می‌کند. درحالی‌که هیدراتاسیون خمیر سیمان به‌طور کامل صورت نگرفته است، این موضوع باعث می‌شود تا غلظت خمیر سیمان افزایش یابد. این موضوع در مورد پنبه شدت بیش‌تری داشته است.

همه متغیرهای ساخت تأثیر معنی‌دار بر روی خواص مکانیکی تخته داشته‌اند. با افزایش مقدار خاکاره و ایجاد سطح تماس بیش‌تر و کاهش نسبت پنبه به چوب، مقدار MOR افزایش یافته است. افزایش مصرف خاکاره و کاهش $CaCl_2$ باعث افزایش MOR شده است. کاهش نسبت پنبه به چوب و افزایش میزان خاکاره باعث افزایش مقدار MOE شده است. با کاهش میزان پنبه و خاکاره،

MOE افزایش پیداکرده است اما تأثیر میزان ماده افزودنی ناچیز و یکسان است.

با مصرف پنبه تا حد ۴۰ درصد، میزان IB بـه حـداکثر خود می‌رسد. مقادیر بیش‌تر از این حد، چسبندگی داخلی را کاهش می‌دهد. با افزایش میزان مصرف خاک‌اره میـزان IB افزایش می‌یابد. شدت افزایش در مقادیر بالاتر خاک‌اره بیش‌تر است. با افزایش ماده افزودنـی، میـزان IB افـزایش می‌یابد.

نقطه بهینه کاربرد متغیرهای موردبررسی برای ساخت تخته‌هایی با مقاومت‌های حداکثر عبارت‌اند از: نسبت وزنی ساقه پنبه به صنوبر برابر ۴۳:۵۷، ماده افزودنی تا حـد ۴/۵ درصـد و خـاک‌اره تـا حـد ۹ درصـد. در طـی آن، MOR، MOE و IB به حداکثر میزان خود مـی‌رسـند (بـه ترتیـب ۱۲/۵ MPa، ۲۵۴۵ MPa، ۰/۳۵ MPa).

مراجع

[1] Yasin, M., Bhutto, A.W., Bazmi, A. A. and Karim, S., 2010. Efficient utilization of rice-wheat straw to producevalue–added composite products. International Journal of Chemical and Environmental Engineering, 1(2): 136-143.

[2] Han, G. P., Zhang, C.G., Zhang, D.M., Umemura, K. and Kawai, S., 1998. Upgrading of urea formaldehyde-bonded reed and wheat straw particleboard using silane coupling agents.Journalof Wood Science, 44(4): 282-286.

[3] Nazerian, M. and Sadeghiipanah, V., 2013. Cement-bonded particleboard with a mixture of wheat straw and poplar wood. Journal of Forestry Research, 24(2): 381-390.

[4] Nazerian, M., Dahmardeh Ghalehno, M. and Gozali, E., 2011. Effects of wood species, particle sizes and dimensions of residue obtained from trimming of wood–cement composites on physical and mechanical properties of cement-bonded particleboard. Journalof Wood Material Science & Engineering, 6(4):196-206.

[5] Nazerian, M. and Hosiny Eghbal S., 2013. The influence of additive content and particle size of bagasse on some properties of cement-bonded particleboard. Journal of the Indian Academy of Wood Science, 10(2): 86-94.

[6] Fan, M., Bonfield,P. and pinwoodie, J., 2006. Nature and behavior of cement bonded particleboard: structure, physical property and movement. Journal of Master Science, 41(17):5666-5678.

[7] Wei, Y., Tomita, B., Hiramantsu, Y., Miyatake, A. and Yoshinaga, S., 2003. Hydration behavior and compressive strength of cement mixed with exploded wood fiber strand obtained by the water-vapor explosion process. Journal of Wood Science, 49(4):317-326.

[8] Nazerian, M.,Gozali, E. and Dahmardeh Ghalehno, M., 2011. The Influence of Wood Extractives and Additives on the Hydration Kinetics of Cement Paste and Cement-bonded Particleboard. Journal of Applied sciences, 11(12): 2186-2192.

[9] Ashori, A., Tabarsa, T. and Sepahvand, S., 2012. Cement-bonded composite boards made from poplar strands.Journal of Construction and Building Materials, 26(1): 131–134.

[10] 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 Polymer and Environment, 19(1): 297–300.

[11] Balasubramanian, M., Jayabalan, V. and Balasubramanian, V., 2008. A mathematical model to predict impact toughness of pulsed current gas tungsten arc welded titanium alloy [J]. Journal of Advanced Manufacturing Technology, 35(9/10): 852-858.

[12] Cochran Cox, G.M., 1962. Experimental design [M]. New Delhi: Asia Publishing House.

[13] EN 310. 1999. Wood based panels: determination of modulus of elasticity in bending and bending strength. European Standardization Committee. Brussels.

[14] EN 319. 1999. Particleboards and Fiberboards :Determination of tensile strength. European Standardization Committee. Brussels.

[15] ASTM C 191-04a .Standard Method of Test forTime of Setting of HydraulicCement by Vicat Needle.

[16] Kargarfard, A., Nourbakhsh, A. and Golbabaei, F., 2006. Investigation on utilization of cotton stalk in particleboard production. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 21(2):95-104. (In Persian).

Optimization of cement-bonded particleboard properties made from cotton stalk and sawdust with chloride calcium ($CaCl_2$) additive

Abstract

The aim of this study was to evaluate the hydration behavior and mechanical properties of cement-bonded particleboard manufactured from cotton stalk and sawdust containing chloride calcium as an additive in different ratios. At first, curing time of cement paste containing different levels of $CaCl_2$, wood and cotton stalk flour was determined. Moreover, the effect of $CaCl_2$ content, weight ratio of cotton stalk particle to wood particle and percent of sawdust on bending strength, modulus of elasticity and internal bonding of cement-bonded particleboard were estimated by response surface methodology. In order to optimize board properties, equation of mathematical model (second order polynomial regression model) was provided by a computer simulation program. Results showed that there was a favorable conformity between predicted and observed values (regression coefficients (R^2) for modulus of rupture, modulus of elasticity and internal bonding were 0.93, 0.90 and 0.95, respectively). Also, it was determined that the response surface methodology can effectively be applied for modelization of board properties. According to obtained results, maximum values of modulus of rapture, modulus of elasticity and internal bonding were obtained by mixing percent of cotton stalk to poplar wood at weight ratio of 43:57, 4.5% of $CaCl_2$ as an additive and 9% of sawdust.

Keywords: cement-bonded particleboard, cotton stalk, sawdust, mechanical properties, additive.

M. Nazerian [1*]
V. Sadeghi Panah[2]
R. Mohebbi Gargari[3]
B. Nosrati sheshkal[4]

[1] Associate professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, University of Zabol, Zabol, Iran.

[2] MSc., Department of Wood and Paper Science and Technology, University of Zabol, Iran.

[3] Trainer, Department of Wood and Paper Science and Technology, University of Zabol, Iran.

[4] Assistant professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, University of Zabol, Zabol, Iran.

Corresponding author:
morteza17172000@yahoo.com

Received: 2015.02.08
Accepted: 2015.08.09