

Manufacturing and Characterization of Binder-less Particleboard from Date Palm Residues

Mahyar Moradmand^{1*}, Hamid Zarea Hosseinabadi^{2*}, Hossein Mahdavi³

1- Corresponding authors, MSc graduated, Department of Wood and Paper Science and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: hzareah@ut.ac.ir

2- Corresponding authors, Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: Mahyar.moradmand@ut.ac.ir

3- Professor, School of Chemistry, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: April 2025

Accepted: May 2025

Abstract

Problem definition and objectives: In recent decades, deforestation and diminishing natural wood supplies have significantly impacted the wood panel industry. At the same time, increasing demand for wood-based panels and rising health and environmental concerns regarding formaldehyde emissions from synthetic adhesives have created an urgent need for sustainable alternatives. Among various agricultural residues, date palm trunks rich in lignocellulosic compounds and abundantly available in arid regions like southern Iran offer a promising raw material for developing environmentally friendly, binderless particleboards. This study aims to fabricate such panels without using synthetic resins, relying on self-bonding mechanisms activated under controlled hot-pressing conditions. It employs Response Surface Methodology (RSM) using a Box-Behnken design to systematically examine the effects of pressing parameters on final product performance.

Methodology: Date palm trunks were sourced, debarked, and flaked using a ring flaker machine. Flakes were conditioned to three initial moisture levels: 25%, 50%, and 75%. The mats provided from flakes, were then hot-pressed at three target densities (650, 750, and 850 kg/m³), at pressing temperatures of 180°C, 190°C, and 200°C, and for durations of 5, 10, and 15 minutes. Mechanical tests included Modulus of Rupture (MOR), Modulus of Elasticity (MOE), and Internal Bond Strength (IB); physical properties such as density, water absorption, and thickness swelling were also assessed. All tests followed DIN EN standards, and data analysis and model optimization were performed using Minitab and Design Expert software.

Results: Panel density ranged from 648 to 1206 kg/m³. Increasing press temperature and target density significantly reduced water absorption and thickness swelling, with the lowest values observed at 200°C and 900 kg/m³. Water absorption dropped to 62%, and swelling to 269%, demonstrating the crucial role of pressing conditions in panel dimensional stability. The internal bonding strength reached up to 0.32 MPa, MOR up to 11.8 MPa, and MOE peaked at 2989 MPa. These results indicate that some panel configurations met the P2 type requirements of industrial standards for dry interior applications.

Conclusion: The study confirms the feasibility of manufacturing binderless particleboards from date palm trunk residues using optimized hot-pressing conditions. These panels exhibited acceptable mechanical and physical properties for interior use, without relying on synthetic adhesives. This method supports sustainable agricultural residue utilization, reduces environmental pollution from synthetic resin (especially formaldehyde-based resins), and provides economic value to arid rural regions. Future research should investigate the incorporation of surface treatments, chemical pretreatments, or hydrophobic agents to further enhance panel performance and moisture resistance.

Keywords: Binder-less panel, date palm, hot pressing, self-bonding mechanism, mechanical properties.

ساخت و ارزیابی خواص تخته خرده چوب بدون چسب از بقایای درخت نخل خرما

مهیار مرادمند^{۱*}، حمید زارع حسین آبادی^{۲*}، حسین مهدوی^۳

۱- نویسنده مسئول، دانش‌آموخته ارشد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکدگان منابع طبیعی و کشاورزی منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: hzarecah@ut.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکدگان منابع طبیعی و کشاورزی منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mahyar.moradmand@ut.ac.ir

۳- استاد، دانشکده شیمی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: خرداد ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: فروردین ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: در دهه‌های اخیر، فشارهای ناشی از جنگل‌زدایی و کمبود منابع چوب طبیعی، چالش‌های جدی برای صنایع چوبی به وجود آورده است. از سوی دیگر، نگرانی‌های زیست‌محیطی مربوط به رزین‌های مصنوعی، خصوصاً انتشار فرمالدهید، لزوم توسعه راهکارهای جایگزین را دوچندان نموده است. بقایای نخل خرما، به‌عنوان یک زیست‌توده غنی از ترکیبات لیگنوسلولزی، به‌ویژه در مناطق گرمسیری ایران، می‌تواند منبعی بالقوه برای تولید پانل‌های بدون چسب باشد. این پژوهش با هدف تولید و تحلیل مکانیکی تخته‌خرده‌چوب‌های بدون چسب از تنه نخل خرما طراحی شده و تلاش دارد تا با استفاده از روش متدولوژی سطح پاسخ (RSM) و مدل Box-Behnken، تأثیر پارامترهای دمای پرس، زمان پرس، رطوبت اولیه خرده‌ها و دانسیته پانل را بر خواص نهایی کامپوزیت، بررسی نماید.

مواد و روشها: بینه‌های نخل خرما از استان‌های جنوبی کشور جمع‌آوری شد. نمونه‌ها در سه سطح رطوبتی (۲۵، ۵۰ و ۷۵٪)، چگالی‌های هدف (۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ kg/m³) و دماهای پرس (۱۸۰، ۱۹۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) آماده‌سازی و در زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه، با فشارهای متناسب تحت پرس گرم قرار گرفتند. سپس آزمون‌های مکانیکی شامل مدول گسیختگی (MOR)، مدول ینگ (MOE) و چسبندگی داخلی (IB) و آزمون‌های فیزیکی از جمله دانسیته، جذب آب و واکنشیدگی ضخامت انجام شد تا کیفیت پانل‌های ساخته شده، مورد ارزیابی قرار گیرد.

نتایج: افزایش دمای پرس و دانسیته باعث کاهش معنادار جذب آب (تا ۶۲٪) و واکنشیدگی ضخامت (تا ۲۶۹٪) گردید. چسبندگی داخلی تا ۰٫۳۲ مگاپاسکال و مدول گسیختگی تا ۱۱٫۸ مگاپاسکال اندازه‌گیری گردید. نتایج حاصل از آنالیز واریانس نشان داد که پارامترهای اعمال شده در پرس گرم تأثیر معناداری بر اغلب خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه‌ها داشتند. در واقع، افزایش دمای پرس، موجب تخریب بخشی از هولوسلولزها گردید که با کاهش خاصیت هیدروفیلی، جذب آب نمونه‌ها کاهش یافت. از سوی دیگر، با افزایش رطوبت اولیه خرده‌ها، پیوند بین الیاف تقویت شد و در نهایت منجر به بهبود چسبندگی داخلی گردید. مقایسه نتایج با استانداردهای بین‌المللی نشان داد که اگرچه اغلب نمونه‌ها الزامات تخته‌خرده‌چوب برای کاربردهای داخلی خشک (کلاس P2) را برآورده کردند، اما در زمینه جذب آب و واکنشیدگی ضخامت، هنوز چالش‌هایی وجود دارد که نیازمند اصلاح ساختاری یا افزودن افزودنی‌های ضد آب است. با توجه به اینکه در این پژوهش هیچ‌گونه رزین مصنوعی یا ماده شیمیایی به پانل‌ها افزوده نشد، دستیابی به این سطح از خواص مکانیکی، خود نشان‌دهنده پتانسیل بالای نخل خرما در فرآیندهای بدون چسب است.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نه تنها نشان‌دهنده امکان تولید پانل‌های مهندسی‌شده‌ی بدون چسب از بقایای نخل خرما است، بلکه مزایای محیط‌زیستی و اقتصادی قابل توجهی را نیز به همراه دارد. استفاده از منابع بومی، کاهش وابستگی به رزین‌های مصنوعی، کاهش انتشار ترکیبات آلی فرار و همچنین ایجاد اشتغال در مناطق محروم، از جمله مزایای جانبی این فناوری محسوب می‌شوند. پیشنهاد می‌شود در آینده، بررسی‌های بیشتری بر روی روش‌های پیش تیمار مانند بخاردهی و اعمال قلیایی ملایم انجام شود تا پیوندهای بین مولکولی، تقویت شده و خواص نهایی پانل‌ها بهبود یابد.

همچنین ترکیب مکانیزم خودچسبی با افزودنی‌های زیستی مانند نشاسته اصلاح شده یا موم‌های گیاهی، می‌تواند راهکاری ترکیبی برای دستیابی به عملکرد بهتر باشد.

واژه های کلیدی: تخته خرده چوب بدون چسب، نخل خرما، پرس گرم، مکانیزم خودچسبی، خواص مکانیکی.

مقدمه

اوج‌گیری بحران‌های محیط‌زیستی در چند دهه‌ی اخیر، بنیان منابع زیستی جهان را در معرض تهدیدات جدی قرار داده است. با توجه به پدیده‌ی جنگل‌زدایی، تخریب پوشش جنگلی و افزایش قابل توجه تقاضا برای پانل‌های چوبی، میزان عرضه‌ی چوب خام کاهش یافته و فشار مضاعفی بر منابع طبیعی وارد شده است [۱]. با توجه به کاهش واردات نئوپان، در سال‌های اوج مصرف گذشته بخش قابل‌توجهی از نیاز از راه واردات تأمین می‌شد؛ اما از سال ۲۰۱۳ میلادی به بعد، با اعمال تحریم‌ها و افزایش تعرفه‌های گمرکی، سهم واردات به سرعت کاهش یافته و تولید داخلی نتوانسته پاسخگوی کامل مصرف باشد [۲]. مطالعه‌ای که در سال ۲۰۱۳ انجام شد، نشان می‌دهد که تقاضای کل MDF ایران تا سال ۲۰۱۸ به بیش از ۱,۶۴۲,۰۰۰ مترمکعب خواهد رسید که نسبت به سال ۲۰۱۳ حدود ۴۲٪ رشد را نشان می‌دهد. در همین گزارش آمده است که هم‌اکنون حدود ۶۱٪ از تولید MDF کشور به واردات وابسته است و در صورت گسترش تولیدکنندگان جدید، «کمبود مواد اولیه چوبی» یک چالش اساسی برای زنجیره تأمین به وجود خواهد آورد [۳]. از این‌رو، یافتن منابع جایگزین و بهینه‌سازی استفاده از بقایای کشاورزی ایران، از جمله بقایای نخل خرما، به یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است [۴]. تخته خرده چوب، یکی از مهم‌ترین محصولات مهندسی‌شده‌ی چوبی است که با استفاده از خرده‌های چوب به کمک رزین‌های مصنوعی تولید می‌شود. در فرآیند متداول، خرده‌های چوب تحت پرس گرم، در حضور رزین به هم فشرده می‌گردند تا ساختاری یکنواخت

و مستحکم به دست آید [۵]. با این حال، انتشار فرمالدهید - یک ترکیب سمی و سرطان‌زا - از پانل‌های اوره فرمالدهید طی دو دهه گذشته به دغدغه‌ای زیست‌محیطی و بهداشتی بدل شده و مقررات سخت‌گیرانه‌ای را در بسیاری از کشورها در پی داشته است [۶-۸]. تخته‌های بدون چسب اساساً برای چسباندن ذرات چوب یا فیبر لیگنوسلولزی از لیگنین و پیوندهای هیدروژنی طبیعی سلولز بهره می‌برند و در نتیجه نیازی به افزودن اوره فرمالدهید یا دیگر رزین‌های سمی ندارند. این ویژگی منجر به حذف کامل انتشار ذرات فرمالدهید در حین تولید و مصرف نهایی می‌شود که هم از منظر سلامت کارگران کارخانه‌ها و هم از دیدگاه مصرف‌کننده نهایی، یک مزیت زیست‌محیطی چشمگیر است. در کشور ما، گونه‌هایی مانند نخل خرما (*Phoenix dactylifera*) برای بهینه‌سازی رشد و عملکرد در جنگل‌کاری‌های گرمسیری باید سالانه هرس شوند. بقایای هرس نخل شامل تنه، شاخه‌ها و خوشه‌های بدون میوه، منبع غنی‌ای از زیست‌توده‌ی لیگنوسلولزی را فراهم می‌آورد [۹]. ایران با بیش از ۲۶۰ هزار هکتار نخلستان - معادل ۲۰-۲۵٪ سطح نخلستان‌های جهان - سالانه بین ۱/۱ تا ۲/۹ میلیون تن بقایای هرس ایجاد می‌کند که اغلب سوزانده یا دفن می‌شوند و به آلودگی هوا و خاک می‌انجامد [۱۰]. نخل خرما، ماده‌ای لیگنوسلولزی است که حاوی سلولز، همی‌سلولزها و لیگنین و سرشار از قند و نشاسته است که در جدول (۱) قابل‌مشاهده است؛ که این منبع غنی از همی سلولز و لیگنین، عامل مهمی در ایجاد مکانیزم خودچسبی است [۱۱].

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی نخل خرما [۱۲]

نوع الیاف	لیگنین (%)	سلولز (%)	همی سلولز (%)	خاکستر (%)
نخل خرما	۳۱/۹	۵۰/۶	۸/۱	۶/۸

فورفورال است. در بررسی شیمیایی پانل‌های بدون چسب تولیدشده از ترمو مکانیکال پالپ (Thermomechanical pulp) گزارش کردند که در حین پرس، همی سلولزها تجزیه شده و فورفورال تولید می‌کنند؛ به موازات آن، مقدار لیگنین کل (به‌خصوص بخش pseudo-lignin حاصل از بسپارش شدن فورفورال و محصولات تجزیه همی سلولز) افزایش یافته و منجر به افزایش مقاومت داخلی (IB) می‌شود [۱۷].

با توجه به مطالعات فراوان تر در بررسی نخل روغنی، با توجه به هم‌خانواده بودن با نخل خرما، در این مطالعه، به امکان‌سنجی تولید تخته خرده چوب خودچسب از بقایای تنه‌ی نخل خرما و تحلیل تأثیر پارامترهای پرس گرم - دما (۱۸۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد)، زمان پرس (۵-۱۵ دقیقه)، رطوبت اولیه (۲۵-۵۰٪) و دانسیته هدف پانل (۸۰۰-۱۰۰۰ kg/m³) بر خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه‌ها پرداخته خواهد شد. استفاده از روش طرح آزمایش متدولوژی سطح پاسخ در مدل Box-Behnken امکان می‌دهد تا تعامل میان این عوامل به‌صورت کمی تعیین شده و شرایط عملیاتی بهینه استخراج شود. هدف نهایی این پژوهش، ارائه‌ی راهبرد بومی، کم‌هزینه و دوستدار محیط‌زیست برای حذف رزین‌های بر پایه نفت در فرایند تولید، کاهش انتشار ترکیبات فرآر مانند فرمالدهید و بهره‌برداری پایدار از بقایای نخل خرما است؛ راهکاری که علاوه بر کاهش فشار بر جنگل‌های طبیعی، می‌تواند به توسعه‌ی صنعتی مناطق محروم جنوب کشور یاری رساند.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی مواد اولیه

برای تهیه خرده‌ها از بینه‌های نخل خرما استفاده شد. بدین منظور به تعداد موردنیاز، بینه نخل خرما با قطر متوسط با تنوع برداشت از مناطق مختلف از شهرستان‌های منوجان از استان کرمان گرفته تا شهرستان رودان واقع در استان هرمزگان تهیه گردید. بینه‌های نخل خرما در شرایط محیطی کارگاه مبلمان و فرآورده‌های مرکب چوبی گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشکده‌گان منابع طبیعی و کشاورزی دانشگاه تهران به رطوبت تعادل محیط رسید. به‌منظور تهیه خرده چوب، از فلیکر تیغه‌ای

مکانیزم خودچسبی^۱ در غیاب رزین مصنوعی، بر پایه واکنش‌های داخلی لیگنین و قندهای تولیدشده از تجزیه ی همی سلولز و سلولز استوار است. در دماهای بالای پرس‌گرم، همی سلولز به واسطه‌ی هیدرولیز حرارتی، تجزیه شده و قندهای پنج‌کربنه ناشی از آن (عمدتاً فورفورال و هیدروکسی‌متیل فورفورال) تولید می‌شوند. مقاومت مکانیکی پانل‌های بدون چسب به اتصالات متقابل لیگنین - لیگنین و لیگنین - پلی‌ساکارید بستگی دارد که در واکنش در دمای بالا و تغییر شکل سیستم، تحت فشار پرس فعال می‌شود؛ بنابراین در فرایند تولید، شرایط پرس گرم یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر ایجاد مکانیزم خودچسبی است [۱۳]. Faiaid و همکاران (۲۰۲۲)، به بررسی یک ارزیابی علمی برای بقایای نخل خرما از نظر مشخصات و کاربردها پرداختند. نتایج نشان داد که استخراج الیاف در سطح صنعتی و بسیار کارآمد از بقایای نخل خرما با حداقل آسیب به الیاف هنوز به مطالعات بیشتری نیاز دارد تا از نظر اقتصادی و مکانیکی امکان‌پذیر باشد [۱۴]. Baskaran و همکاران (۲۰۱۷)، به بررسی تبدیل بقایای تنه نخل روغنی به پانل‌هایی با ارزش افزوده بالا یعنی تخته خرده چوب پرداختند. خواص مکانیکی همه انواع پانل‌ها حداقل نیاز استاندارد صنعتی ژاپن برای نوع ۸ را برآورده کرده است. نتایج کلی نشان داد که افزودن حداقل مقدار اوره فرمالدهید به‌عنوان چسب می‌تواند خواص اساسی تخته خرده چوب درخت نخل روغنی را بهبود بخشد [۱۵]. Laemsak و همکاران (۲۰۰۰)، پانل‌های خودچسب ساخته شده از الیاف تولیدشده از فرایند انفجار بخار نخل روغنی را در شش سطح انفجار تهیه کردند. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش چگالی پانل‌ها، خصوصیات مکانیکی پانل‌ها افزایش یافت. اعتقاد بر این است که مقاومت اصلی خود پیوندی پانل، به دلیل اتصالات لیگنین-فورفورال است. با توجه به اجزای شیمیایی ساقه برگ‌های نخل روغنی که غنی از همی-سلولز است، به نظر می‌رسد امکان خوبی برای تولید پانل‌های بدون چسب با استفاده از الیاف منفجر شده نخل روغنی وجود دارد [۱۶]. اعتقاد بر این است که مقاومت اصلی خود پیوندی پانل، به دلیل اتصالات لیگنین-

¹ Self-bonding

² Steam-exploded

سطوح ۱۸۰، ۱۹۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، زمان در سه سطح ۱۵، ۱۰ و ۲۰ دقیقه، دانسیته پانل در سطوح ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و درصد رطوبت کیک در سطوح ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد، تعیین گردید.

پس از جمع‌آوری و تهیه مواد اولیه و همچنین تعیین عوامل ثابت و متغیر، جهت به دست آوردن جدول طرح آزمایشات بر اساس طرح باکس بنکن^۴، در متدولوژی سطح پاسخ، از نسخه ۱۲ برنامه‌ی design expert استفاده شد. با توجه به وجود پنج متغیر و مشخص کردن حدود هر یک از متغیرها، ۲۴ تیمار برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی تعیین گردید.

برای آماده‌سازی نمونه‌ها، به جهت انجام آزمون‌های مکانیکی شامل مدول یانگ، مدول گسیختگی و کشش عمود بر صفحه و آزمون‌های فیزیکی همچون دانسیته، واکنشیدگی ضخامت و جذب آب، پانل‌های آزمون بر اساس استانداردهای موجود در جدول (۲)، برش داده شدند.

رینگی شرکت پالمن^۳ ساخت کشور آلمان استفاده شد. سپس خرده چوب‌ها (با ابعاد ۱۰ میلی‌متر طول، ۳-۶ میلی‌متر عرض و ۱-۲ میلی‌متر ضخامت)، با توجه به رطوبت اولیه خود و محاسبه میزان آب مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت هدف، با قرار گرفتن در بسته‌های پلاستیکی، توسط نازل‌های آب، به رطوبت هدف رسیدند. با توجه به رطوبت اولیه در مرحله‌ی پرس گرم، کیک‌های تشکیل شده از خرده چوب‌ها با پرس آزمایشگاهی BÜRKL-E ساخت آلمان، تحت پرس گرم قرار گرفتند. با توجه به دانسیته‌های هدف متفاوت پانل‌ها (۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰)، فشار ویژه‌های ۳۵، ۲۵ و ۴۵ مگاپاسکال به ترتیب برای پانل‌های این بررسی بر پانل‌های تحت پرس گرم اعمال شد. زمان و دمای پرس با توجه به جدول طرح آزمایشات، بر روی کیک‌ها، اعمال گردید.

روش‌های اجرایی تحقیق

عوامل ثابت، شامل ضخامت پانل (۵ میلی‌متر) و ابعاد

جدول ۲- استانداردهای مورد استفاده در آزمون‌های انجام شده

تعداد تکرار برای هر تیمار	ابعاد نمونه آزمون (mm)			استاندارد مورد استفاده	نوع آزمون
	ضخامت	عرض	طول		
۳	۵	۵	۱۵	DIN EN 310	مدول یانگ و مدول گسیختگی
۳	۵	۵	۵	DIN EN 317	واکنشیدگی ضخامت و جذب آب
۳	۵	۵	۵	DIN EN 323	دانسیته
۳	۵	۵	۵	DIN EN 1607	کشش عمود بر صفحه

پانل (۴۰ × ۴۰) و عوامل متغیر شامل دمای پرس در

⁴ Box-Behnken

³ Pallmann

تمامی آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی در آزمایشگاه فیزیک و مکانیک گروه صنایع چوب دانشگاه فنی درسدن واقع در کشور آلمان انجام شد.

جذب آب و واکنشیدگی ضخامت

طبق استاندارد (EN DIN 317) جذب آب و واکنشیدگی ضخامت نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعته غوطه‌وری در آب سرد و در دمای اتاق در آزمایشگاه فیزیک دانشگاه فنی درسدن، اندازه‌گیری شدند.

مدول یانگ و مدول گسیختگی

برای تعیین مدول یانگ و مدول گسیختگی در آزمون خمش، نمونه‌ها بدون تبادل رطوبتی با محیط در اتاق کلیما با استفاده از دستگاه اینسپکت ۱۰ ساخت کشور آلمان در آزمایشگاه مکانیک و فیزیک گروه صنایع چوب دانشگاه فنی درسدن مورد آزمون قرار گرفت. سرعت بارگذاری، طبق استاندارد DIN EN310، ۵ میلی‌متر بر ثانیه و آزمون در بازه 30 ± 60 ثانیه انجام شد تا شکست اتفاق بیفتد.

مقاومت چسبندگی داخلی

آزمون کشش عمود بر صفحه در فراورده‌های مرکب چوبی به معنای سنجش چسبندگی داخلی و اتصالات بین اجزا است. به منظور انجام این آزمون طبق استاندارد (EN 1607)، مورد ارزیابی قرار گرفتند.

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل نتایج

پس از انجام تمامی آزمون‌ها برای نمونه‌های ساخته‌شده مطابق جدول آزمایشات، جهت سازماندهی بهتر و محاسبه دقیق مقادیر میانگین‌ها،

نتایج به دست آمده توسط برنامه مینی تب‌سرخه ۱۲، نرمال‌سازی شد و به کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، نتایج هر آزمون تحلیل گردید.

نتایج نمونه‌های آزمون‌ی طراحی شده به وسیله طرح آزمایشات

در جدول (۳) میانگین مربعات و درجه آزادی نشان داده شده است. جهت تعیین چگونگی بررسی عوامل گوناگون بر آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی از آزمون تجزیه واریانس استفاده شد و همچنین سطح معنی‌دار بودن اثر عوامل متغیر بر آزمون‌ها مشخص گردید.

خواص فیزیکی

دانسیته

دانسیته ۲۴ نمونه‌ی ساخته‌شده از خرده چوب دارای دامنه‌ای بین ۶۴۸ تا ۱۲۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود. در آنالیز با مدل پیشنهادی نرم‌افزار، طبق تحلیل نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) مشخص شده که پارامترهای ماده اولیه و زمان پرس در سطح ۵ درصد و دانسیته هدف پانل در سطح ۱ درصد اثر معناداری بر دانسیته نهایی پانل دارد. با افزایش زمان پرس، از دانسیته نهایی پانل کاسته شد. این کاهش دانسیته با توجه به زمان و دمای بالای پرس و به دنبال آن، تخریب هولوسلولزهای نخل خرما است؛ زیرا هولوسلولزها نقش مهمی در خود پیوندی دارد؛ در نتیجه، میزان تخلخل بافت پانل افزایش می‌یابد که در نهایت، منجر به کاهش دانسیته نهایی می‌شود. همچنین، با افزایش درصد رطوبت خرده‌ها، دانسیته نهایی پانل افزایش یافت. این را می‌توان به لهیدگی بهتر مواد اولیه در پرس و در نهایت ساخت پانل متراکم مربوط دانست.

⁶ Mini-Tab

⁷ Design expert

⁵ Technische Universität Dresden

جدول ۳- تجزیه واریانس

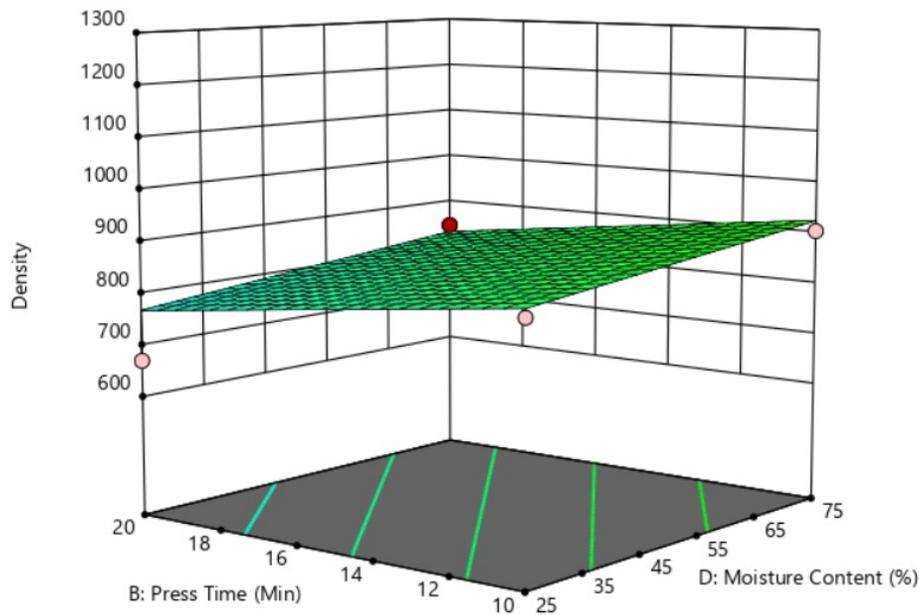
منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					واکشیدگی ضخامت
		مدول یانگ	مدول گسیختگی	چسبندگی داخلی	دانسیته	جذب آب	
دما پرس	۱	**۱۳۵۳۹۵۵/۰۸۹۰۱۷	ns۱/۶۰۴۶۱۳۳۷۹	*۰/۱۹۵۷۸۱۱۶۶	ns۵۶۳۴/۰۹۰۷۹۹	**۱۲/۰۶۱۱۲۱۶۳۵	**۶۰۷۸۴/۶۶۹۳۰
زمان پرس	۱	ns۱۸۰۵۸۷	۱/۲۸۷۷۹۵۰۲۱۹	۰/۰۶۶۸۷۰۹۳۷۵	*۴۹۹۴۷/۸۹۷۳۶۵۵	۲۰۳۷۲۸۱۳۸۱/۵	۱۷۲۸۴/۴۰۱۰۳۱
دانسیته پانل	۱	ns۲۴۹۷۰۶/۸۹	ns۱۲/۲۷۰۹۹	ns۰/۰۲۸۸۲۰۴۱	*۸۶۵۳۶/۳۲۲۲۴۹۸	*۷۲۴۱۲۱۰	۸۱۱۸/۱۹۰۷۴۱
درصد رطوبت	۱	ns۱۸۳۴۱۱/۱۸۲	*۲۱/۷۱۸۵۸۴۱۰۴۳	۰/۰۱۵۹۹۰۳۳۷۵	ns۲۶۱۰۲/۲۴۰۹۴۶۹	ns۶۳۷۳۱۳۶۸۵	*۴۷۳۶۴/۸۹۲۰۳۳

NS بدون تفاوت معنی دار * معنی داری در سطح ۵ درصد ** معنی داری در سطح ۱ درصد

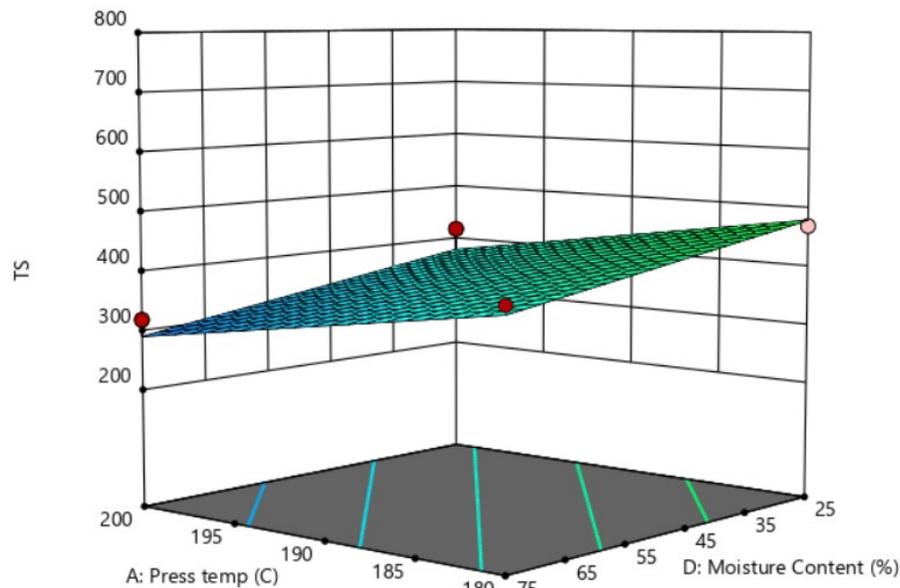
جذب آب و واکشیدگی ضخامت

درصد جذب آب پس از غوطه‌وری ۲۴ ساعته در آب سرد، در بین ۶۲ و ۱۰۵ درصد و درصد واکشیدگی ضخامت پس از غوطه‌وری ۲۴ ساعته در آب سرد، در بین ۴۸۷ و ۲۶۹ درصد برای پانل‌های ساخته شده از خرده چوب بود. این درصد جذب آب و واکشیدگی ضخامت با توجه به عدم حضور رزین‌های شیمیایی و ماهیت ماده قابل پیش بینی بود. در آنالیز با مدل پیشنهادی نرم‌افزار، طبق تحلیل نتایج جدول تجزیه واریانس در مدل پیشنهادی نرم‌افزار مشخص شده که برای جذب آب، دمای پرس در سطح ۱ درصد و دانسیته هدف پانل در سطح ۵ درصد و برای واکشیدگی ضخامت، دمای پرس در سطح ۱ درصد و درصد رطوبت در سطح ۵ درصد اثر معناداری بر جذب آب و واکشیدگی ضخامت دارد. شکل‌های (۱-۲) به طور جداگانه اثر متغیرها و روند تأثیر فاکتورهای دمای پرس، دانسیته هدف پانل و درصد رطوبت را بر واکشیدگی ضخامت و جذب آب، نشان می‌دهد. بر اساس این تصاویر در پانل‌های ساخته شده، با کاهش درصد رطوبت، واکشیدگی ضخامت بیشتر و با افزایش دمای پرس، کمترین واکشیدگی ضخامت حاصل می‌شود. در مورد جذب آب، کاهش درصد جذب آب در راستای افزایش دمای پرس بوده است زیرا افزایش دمای پرس، باعث تخریب هولوسولزهای داخل کیک می‌شود و چون هولوسولزها، ساختاری هیدروفیلک دارند؛ تخریب و

کاهش مقادیر آن‌ها، به کاهش جذب آب در پانل نهایی منجر می‌گردد. همچنین مشخص است که با افزایش دانسیته پانل، درصد جذب آب کاسته می‌شود که مورد ذکر شده را می‌توان به ساختار متراکم پانل در پانل‌های ساخته شده در دانسیته‌های بالاتر مربوط دانست. هرچه دانسیته پانل بیشتر باشد، تخلخل آن کمتر می‌شود؛ در نتیجه باعث کاهش جذب آب در پانل می‌گردد. Lamaming و همکاران [۷] نتایجی را در ساخت تخته خرده چوب از قسمت‌های جوان و پیر تنه نخل روغنی با افزودن ۲۰٪ ساکاروز منتشر کردند که نشان می‌دهد؛ با رطوبت ۷٪ مواد اولیه، در شرایط عملیاتی ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد دما، در مدت ۲۰ دقیقه زمان پرس، با دانسیته هدف ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، درصد جذب آب، ۱۹/۷ درصد و درصد واکشیدگی ضخامت، ۳۲ درصد است. Nadhari و همکاران [۱۸]، در گزارش‌های اعلام کرده‌اند که تخته خرده چوب بدون چسب با افزودن چسب‌های طبیعی همچون نشاسته سیب‌زمینی در شرایط عملیاتی دمای پرس ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان پرس ۲۰ دقیقه با دانسیته هدف ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، دارای مقادیر ۶۹ درصد برای جذب آب بود. در شرایط عملیاتی مشابه با Lamaming و Nadhari، نتایج به دست آمده برای درصد جذب آب ۳۶/۱۰۳ درصد و واکشیدگی ضخامت ۴۲۳ درصد به دست آمد.



شکل ۱- اثر متقابل زمان پرس و درصد رطوبت در دانسیته کامپوزیت در شرایط دمای پرس: ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، دانسیته پانل: 900 Kg/m^3



شکل ۲- اثر متقابل دمای پرس و درصد رطوبت بر واکنشیدگی ضخامت در شرایط دمای پرس: ۱۵ دقیقه و دانسیته پانل: 900 Kg/m^3

الزامات استاندارد تخته خرده چوب با توجه به استاندارد EN 312:2010 part3 Type P2 را برآورده کند (شکل ۳). در آنالیز با مدل پیشنهادی نرم‌افزار، طبق تحلیل نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) پارامترهای ماده اولیه و

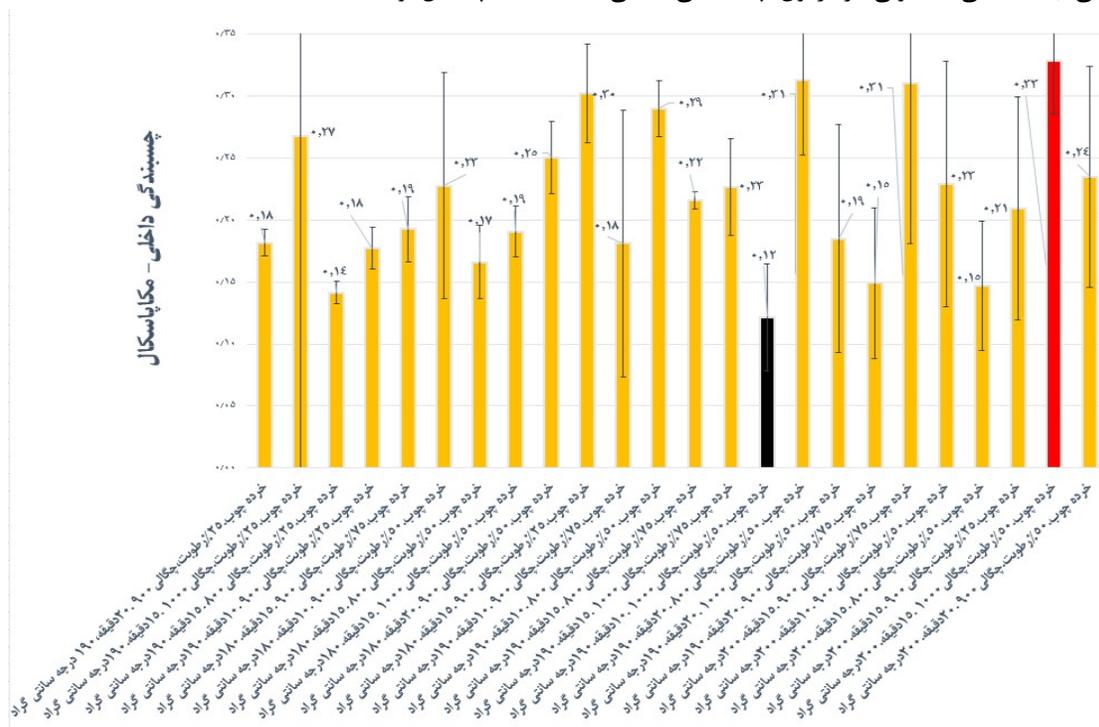
خواص مکانیکی

مقاومت چسبندگی داخلی

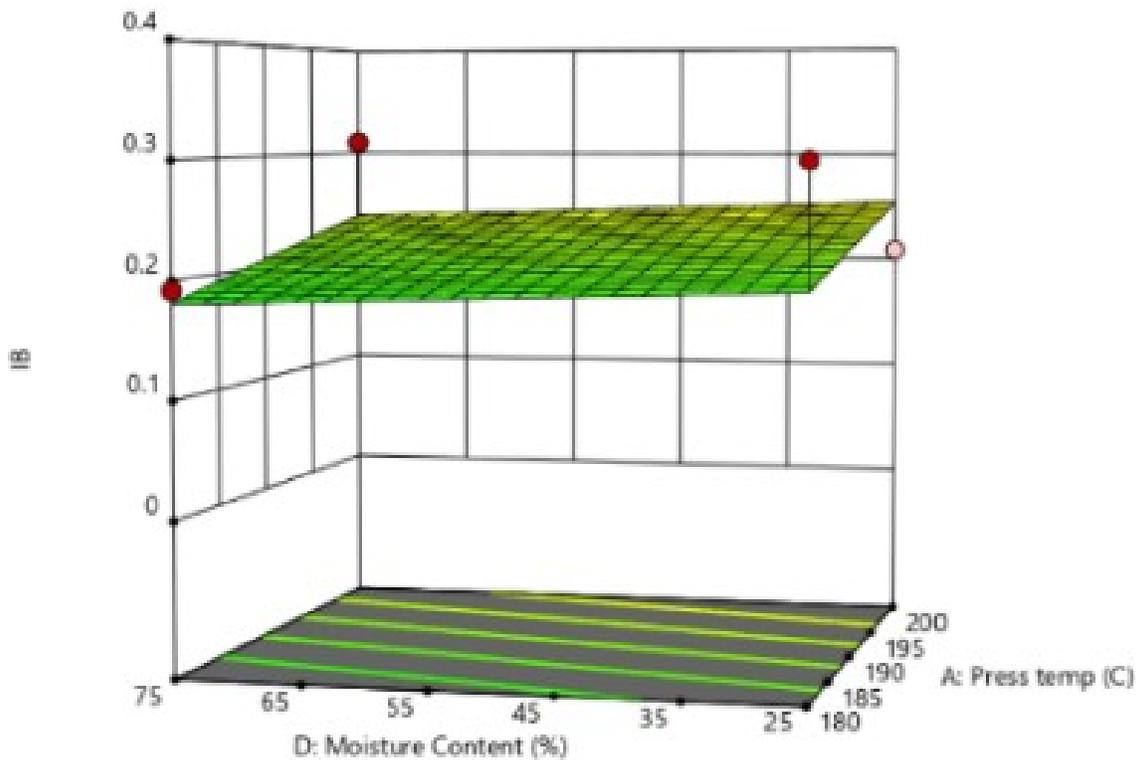
به طور متوسط می‌توان چسبندگی داخلی نمونه‌ها را برای خرده‌ها ۰/۲۲ مگاپاسکال بیان کرد که توانست

به خاطر ماهیت کششی بودن آن، این میکرو ترک‌ها باعث کاهش مقاومت چسبندگی داخلی می‌گردد. Hashim و همکاران (۲۰۱۰)، در گزارش‌های خود اعلام کرده است که پانل‌های خودچسب از نخل روغنی در دانسیته هدف ۰/۸ گرم بر سانتی مکعب، دارای چسبندگی داخلی ۰/۹۵ مگاپاسکال بود [۱۹]. در نتایج به دست آمده ما از پانل‌های خودچسب ساخته شده از تنه نخل خرما، در دانسیته ۰/۸، چسبندگی داخلی ۰/۲۱ مگاپاسکال بود. Hashim و همکاران (۲۰۱۱)، در گزارش‌های خود اعلام کرده‌اند که تخته خرده چوب بدون چسب از تنه نخل روغنی در دانسیته ۰/۸ گرم بر سانتی مترمکعب، دارای مقاومت چسبندگی داخلی ۰/۷۱ مگاپاسکال می‌باشد [۲۰]. نتایج به دست آمده از پانل‌های خودچسب ساخته شده از تنه نخل خرما در دانسیته هدف ۰/۸ گرم بر سانتی مترمکعب، دارای مقاومت چسبندگی داخلی ۰/۱۷ مگاپاسکال بود.

دمای پرس، به ترتیب در سطح ۱ و ۵ درصد اثر معناداری بر چسبندگی داخلی پانل دارد. نتایج نشان داد که با افزایش دما و زمان پرس، چسبندگی داخلی پانل افزایش می‌یابد. این را می‌توان به ایفای نقش بیشتر هولوسلولزها در فرایند خودچسبی مربوط دانست. با افزایش دما و زمان پرس، هولوسلولزهای بیشتری در چسبندگی ایفای نقش می‌کنند. همچنین با افزایش رطوبت خرده چوب، چسبندگی داخلی با شیب کمی، کاهش می‌یابد (شکل ۴). افزایش رطوبت مواد اولیه، باعث لهیدگی بیشتر و در نتیجه، ساخت پانلی با خصوصیات مکانیکی بهتر می‌شود. ولی می‌توان این احتمال را در نظر گرفت که با افزایش رطوبت، بخار آب موجود در کیک در مرحله‌ی پرس به‌طور کامل خارج نشده و باعث ایجاد میکرو ترک‌هایی در ضخامت کیک شده است. این میکرو ترک‌ها، در آزمون-های مکانیکی، مدول گسیختگی و مدول یانگ، نقش منفی‌ای، ایفا نمی‌کنند ولی در آزمون چسبندگی داخلی،



شکل ۳- نمودار مقادیر چسبندگی داخلی برای کامپوزیت‌ها



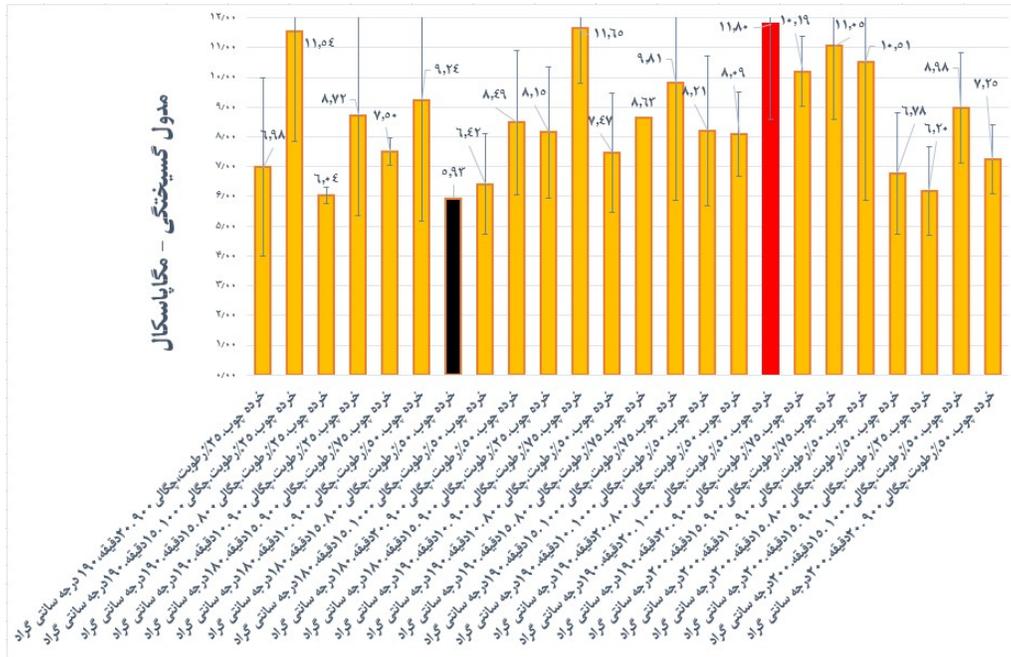
شکل ۴- نمودار اثر متقابل دمای پرس و درصد رطوبت بر چسبندگی داخلی در شرایط دانسیته پانل: 900 Kg/m^3 و زمان پرس: ۱۵ دقیقه

رطوبت ماده اولیه، به ترتیب در سطح ۱ و ۵ درصد، اثر معناداری بر مدول گسیختگی دارد. در شکل (۶)، مشاهده شد که با افزایش درصد رطوبت و دمای پرس، مدول گسیختگی نمونه‌ها افزایش پیدا کرد. این را می‌توان به لهیدگی بیشتر خرده‌ها در رطوبت بالای مواد اولیه تحت فشار پرس، مربوط دانست. Hashim و همکاران (۲۰۱۱)، در گزارش‌های خود اعلام کرده است که پانل‌های خودچسب از نرمه و تراشه‌های نخل روغنی در دانسیته هدف ۰٫۸ گرم بر سانتی مکعب، دارای مدول گسیختگی ۲۴٫۹۵ مگاپاسکال می‌باشد. نتایج به دست آمده از پانل‌های خودچسب ساخته شده از تنه نخل خرما، در دانسیته هدف ۰٫۸ گرم بر سانتی مترمکعب، برای مدول گسیختگی، ۷/۱۵ مگاپاسکال بود.

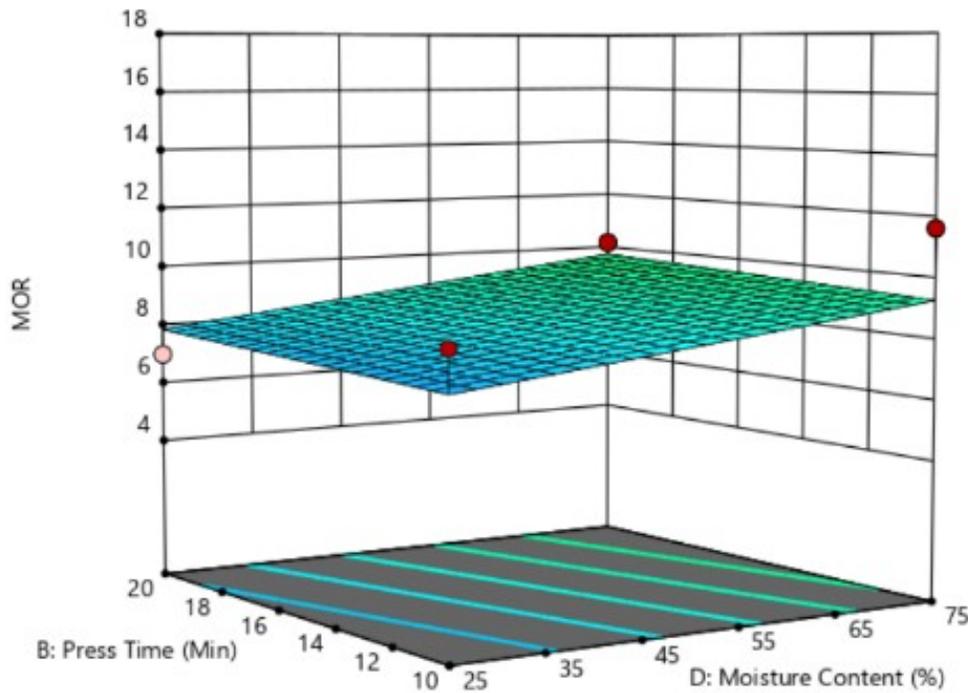
مدول گسیختگی

مدول گسیختگی نمونه‌ها پس از انجام آزمون خمشی، در بین ۵/۹۳ و ۱۱/۸۰ مگاپاسکال برای پانل‌های ساخته شده از خرده چوب به دست آمد. میانگین مدول گسیختگی برای پانل‌های ساخته شده از خرده چوب برابر ۸٫۵۶ مگاپاسکال به دست آمد. این درصد مدول گسیختگی با توجه به عدم حضور رزین‌های شیمیایی قابل پیش‌بینی بود. نتایج، مقادیر مدول گسیختگی را برای تمامی نمونه را نشان می‌دهد که کمترین و بیشترین مدول گسیختگی برای خرده‌ها به ترتیب برای نمونه‌های ۷ و ۱۶ می‌باشد (شکل ۵).

در آنالیز با مدل پیشنهادی نرم‌افزار، طبق تحلیل نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۳)، دمای پرس و درصد



شکل ۵- نمودار مقادیر مدول گسیختگی



شکل ۶- اثر متقابل درصد رطوبت و زمان پرس بر مدول گسیختگی

آن، بسیار نزدیک به الزامات استاندارد گروه ۲ و ۳- DIN-EN310 استاندارد تخته‌خرده چوب، بود. در آنالیز با مدل پیشنهادی نرم‌افزار، طبق تحلیل نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) در مدل پیشنهادی نرم‌افزار، مشخص

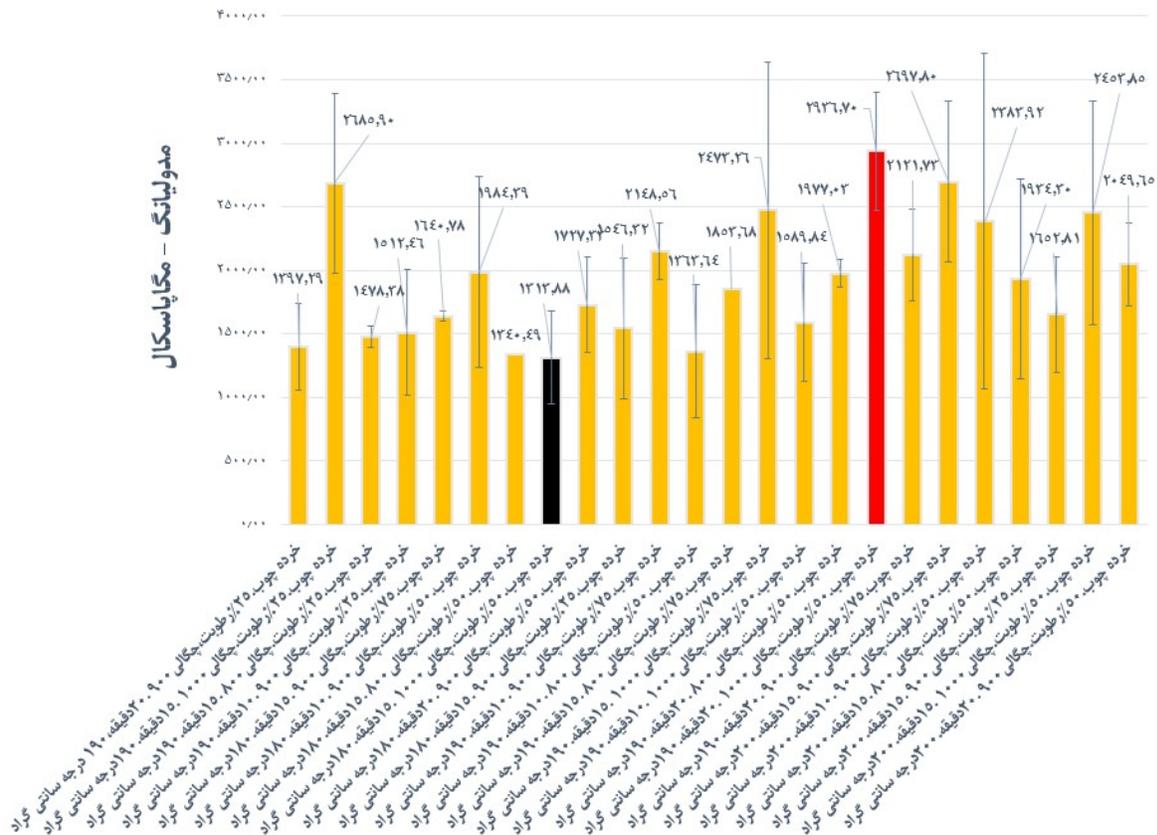
مدول یانگ

نمونه‌ها با توجه به استاندارد DIN-EN310 مورد آزمون قرار گرفتند. میانگین مدول یانگ برای پانل‌ها، به ترتیب برابر ۱۸۶۶/۳۵ مگاپاسکال به دست آمد که نتایج

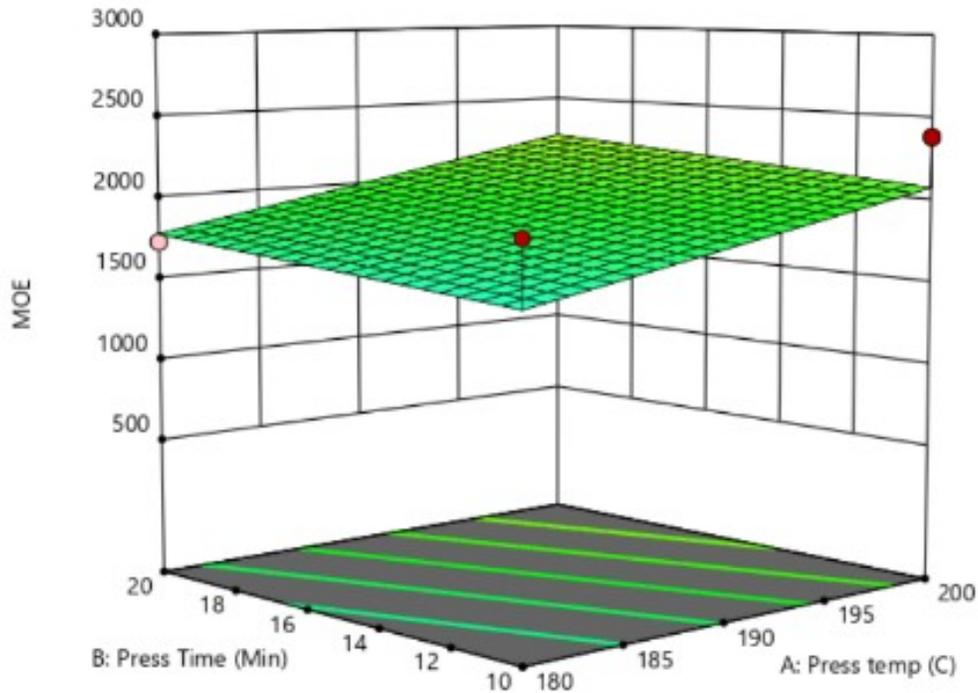
عملیاتی دمای پرس ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان پرس ۲۰ دقیقه با دانسیته هدف ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، دارای ۲۰۷۸ مگاپاسکال برای مدول یانگ و ۱۵/۳۵ برای مدول گسیختگی بود. نتایج به دست آمده در تخته خرده چوب خودچسب از تنه نخل خرما، در شرایط عملیاتی مشابه بدون اضافه کردن چسب طبیعی، دارای ۱۳۴۰ مگاپاسکال برای مدول یانگ و ۵/۹۳ برای مدول گسیختگی، به دست آمد.

شده که ماده اولیه و دمای پرس در سطح ۱ درصد اثر معناداری بر مدول گسیختگی دارد. با افزایش درصد رطوبت و دمای پرس، مدول یانگ نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. این را می‌توان به لهیدگی بیشتر خرده‌ها در رطوبت بالای مواد اولیه تحت فشار پرس، مربوط دانست (شکل ۷-۸).

Nadhari و همکاران (۲۰۲۰)، در گزارش‌های اعلام کرده‌اند که تخته خرده چوب بدون چسب با افزودن چسب‌های طبیعی همچون نشاسته سیب‌زمینی در شرایط



شکل ۷- نمودار مقادیر مدول یانگ



شکل ۸- اثر متقابل دمای پرس و زمان پرس بر مدول یانگ

بهینه‌سازی

پس از مشخص شدن مدل‌ها و تحلیل نمودارها جهت تعیین کفایت مدل‌ها، با در نظر گرفتن حدود مناسب متغیرها و پاسخ‌ها و با به دست آوردن ضرایب وزنی برای آن‌ها، عملیات بهینه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت

صورت گرفت. نرم‌افزار بهترین حالت عوامل متغیر را به ترتیب بالاترین مدول گسیختگی، بالاترین مدول یانگ، بیشترین چسبندگی داخلی، بالاترین دانسیته و کمترین جذب آب و واکنشیدگی ضخامت پیشنهاد داد (جدول ۵).

جدول ۵- شاخص مطلوبیت کامپوزیت‌های ساخته شده از خرده چوب نخل خرما

نمونه	دمای پرس	زمان پرس	دانسیته پانل	درصد رطوبت	مدول گسیختگی	مدول یانگ	چسبندگی داخلی	دانسیته نهایی	جذب آب	واکنشیدگی ضخامت	مطلوبیت
۱	۱۹۶/۶۹۵	۱۷/۰۶۳	۱۰۰۰	۶۸/۲۵۴	۱۰/۳۱۷	۲۹۸۹/۹۷۶	۰/۴۹۳	۹۲۸/۹۱۳	۵۳/۱۳۶	۲۷۶/۴۹۷	۰/۷۶۸

انتخاب شده

نتیجه گیری

بندی، حمل و نقل، دکوراسیون و ساختمان سازی " انجام شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا قدرانی صمیمانه خود را از معاونت پژوهش و فناوری دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، برای ایجاد بستری برای همکاری ارزشمند با دانشگاه فنی درسدن (Technische Universität Dresden) آلمان تحت برنامه ی اراسموس پلاس در انجام آزمایش‌های این پژوهش، به صورت رسمی ابراز نمایند.

در این پژوهش، کامپوزیت‌های بدون چسب ساخته شده از بقایای نخل خرما مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که پارامترهای ماده اولیه، رطوبت، دما و زمان پرس تأثیر معناداری بر خواص فیزیکی و مکانیکی پانل‌ها دارند. دانسیته، جذب آب و واکنشیدگی ضخامت به طور محسوسی تحت تأثیر این عوامل قرار گرفتند و نمونه‌هایی با چگالی بالاتر و جذب آب کمتر توانستند عملکرد بهتری داشته باشند. همچنین مشخص شد که اغلب پانل‌های ساخته شده از خرده چوب عملکرد فیزیکی مناسبی داشتند، هر چند واکنشیدگی ضخامت در هیچ کدام از گروه‌ها با استانداردهای تخته خرده چوب مطابقت نداشت.

از نظر خواص مکانیکی، پانل‌ها، توانستند الزامات استاندارد تخته خرده چوب نوع دوم (P2) برای استفاده در شرایط خشک داخلی را برآورده کنند. فرضیه‌های اصلی تحقیق مبنی بر تأثیر نوع ماده و شرایط پرس بر عملکرد کامپوزیت‌ها تأیید شد. همچنین، استفاده از بقایای نخل خرما به عنوان ماده اولیه بدون افزودن چسب مصنوعی، در صورت رعایت شرایط بهینه، قابلیت ساخت پانل‌هایی با کاربری داخلی را دارا هست. هر چند در شرایط صنعتی که پانل‌ها تحت رطوبت قرار معمول می‌گیرند، پانل‌های خودچسب ساخته شده از نخل خرما، نیازمند تمهیدات ویژه برای استفاده در شرایط معمول هستند؛ بنابراین، برای بهبود عملکرد، استفاده از پیش تیمار و مواد آب‌گریز در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد مصوب و دفاع شده در دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران می‌باشد. این تحقیق در راستای قرارداد تحقیقاتی و کاربردی بین معاونت پژوهش و فناوری دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران و شرکت ارمغان طبیعت مکران به شماره قرارداد ۹۹-۷۴۲۴۴۷۵ با عنوان "توسعه و ساخت بایوکامپوزیت های دوستدار محیط زیست از بقایای درخت نخل خرما و اتصال دهنده های طبیعی و مصنوعی برای صنایع بسته

منابع

- [1] Ashori, A. and Nourbakhsh, A., 2008. Effect of press cycle time and resin content on physical and mechanical properties of particleboard panels made from the underutilized low-quality raw materials. *Industrial Crops and Products*, pp. 225–230. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.02.015>.
- [2] Arian, A. and Vlosky, R.P., 2023. An overview of the wood products sector in Iran: 2007-2022. *Journal of Forest Business Research*, 2(2), pp. 146–169. <https://doi.org/10.62320/jfbr.v2i2.40>.
- [3] Dehghani Firouzabadi, M. R. and Ghorbannezhad, P., 2014. Investigation on MDF market demand in Iran. *International Journal of Lignocellulosic Products*, 1(1), 72-81. (In Persian).
- [4] Lee, S. H., Lum, W. C., Boon, J. G., Kristak, L., Antov, P., Pędzik, M. and Pizzi, A., 2022. Particleboard from agricultural biomass and recycled wood waste: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, pp. 4630–4658. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.166>.
- [5] Okuda, N. and Sato, M., 2004. Manufacture and mechanical properties of binderless boards from kenaf core. *Journal of Wood Science*, pp. 53–61. <https://doi.org/10.1007/s10086-003-0528-8>.
- [6] Solt, P., Konnerth, J., Gindl-Altmutter, W., Kantner, W., Moser, J., Mitter, R. and van Herwijnen, H. W., 2019. Technological performance of formaldehyde-free adhesive alternatives for particleboard industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 94, pp. 99–131. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.04.007>.
- [7] Lamaming, J., Hashim, R., Sulaiman, O., Sugimoto, T., Sato, M. and Hiziroglu, S., 2014. Measurement of some properties of binderless particleboards made from young and old oil palm trunks. *Measurement*, 47, 813-819. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.10.007>.
- [8] Barbu, M. C., Montecuccoli, Z., Förg, J., Barbeck, U., Klímek, P., Petutschnigg, A. and Tudor, E. M., 2021. Potential of brewer's spent grain as a potential

- particleboard and particleboard with addition of urea formaldehyde made from oil palm trunk waste. *Journal of Physical Science*, 28(3), 151-159. <https://doi.org/10.21315/jps2017.28.3.10>.
- [16] Laemsak, N. and Okuma, M., 2000. Development of boards made from oil palm frond II: Properties of binderless boards from steam-exploded fibers of oil palm frond. *Journal of Wood Science*, pp. 322-326. <https://doi.org/10.1007/BF00766224>.
- [17] Sun, Y. C., Lin, Z., Peng, W. X., Yuan, T. Q., Xu, F., Wu, Y. Q. and Sun, R. C. (2014). Chemical changes of raw materials and manufactured binderless boards during hot pressing: lignin isolation and characterization. *Bioresources*, 9(1), 1055-1071. <https://doi.org/10.15376/biores.9.1.1055-1071>.
- [18] Nadhari, W. N. A. W., Ishak, N. S., Danish, M., Atan, S., Mustapha, A., Abd Karim, N. and Yahaya, A. N. A., 2020. Mechanical and physical properties of binderless particleboard made from oil palm empty fruit bunch (OPEFB) with addition of natural binder. *Materials Today: Proceedings*, 31, 287-291. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.009>.
- [19] Hashim, R., Saari, N., Sulaiman, O., Sugimoto, T., Hiziroglu, S., Sato, M. and Tanaka, R., 2010. Effect of particle geometry on the properties of binderless particleboard manufactured from oil palm trunk. *Materials & Design*, 31(9), 4251-4257. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.012>.
- [20] Hashim, R., Nadhari, W. N. A. W., Sulaiman, O., Hiziroglu, S., Sato, M., Kawamura, F. and Tanaka, R., 2011. Evaluations of some properties of exterior particleboard made from oil palm biomass. *Journal of Composite Materials*, 45(16), 1659-1665. <https://doi.org/10.1177/0021998310385028>.
- replacement of wood in pMDI, UF or MUF bonded particleboard. *Polymers*, 13(3), 319. <https://doi.org/10.3390/polym13030319>.
- [9] Jahan Latibari, A., Hosseinzadeh, A., Nourbakhsh, A., Karegarfard, A. and Golbabaie, F., 1996. Investigation of the properties of particleboard made from palm residues. *Journal of Wood and Paper Research*, 1(148), pp. 53-108. (In Persian)
- [10] Chao, C.C.T. and Krueger, R.R., 2007. The date palm (*Phoenix dactylifera* L.): Overview of biology, uses, and cultivation. *HortScience*, pp. 1077-1082. <https://doi.org/10.21273/hortsci.42.5.1077>.
- [11] Hashim, R., Nadhari, W. N. A. W., Sulaiman, O., Hiziroglu, S., Sato, M., Kawamura, F. and Tanaka, R., 2011. Evaluations of some properties of exterior particleboard made from oil palm biomass. *Journal of Composite Materials*, 45(16), 1659-1665. <https://doi.org/10.1177/0021998310385028>.
- [12] Saadaoui, N., Rouilly, A., Fares, K. and Rigal, L., 2013. Characterization of date palm lignocellulosic by-products and self-bonded composite materials obtained thereof. *Materials & Design*, 50, 302-308. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.011>.
- [13] Nasir, M., Khali, D. P., Jawaid, M., Tahir, P. M., Siakeng, R., Asim, M. and Khan, T. A., 2019. Recent development in binderless fiber-board fabrication from agricultural residues: A review. *Construction and Building Materials*, 211, 502-516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.279>.
- [14] Faiad, A., Alsmari, M., Ahmed, M. M., Bouazizi, M. L., Alzahrani, B. and Alrobei, H., 2022. Date palm tree waste recycling: treatment and processing for potential engineering applications. *Sustainability*, 14(3), 1134. <https://doi.org/10.3390/su14031134>.
- [15] Baskaran, M., Azmi, N. A. C. H., Hashim, R. and Sulaiman, O., 2017. Properties of binderless