



University of Tehran

Optimization of radio frequency heating in plywood production by using modified resin with magnetic nanomaterials

Shayan Rouhi¹ | Hamidreza Edalat^{2*} | Taghi Tabarsa³

1. Department of Wood Technology and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan. Iran. Email: roohishayan76@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Wood Technology and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan. Iran. Email: h.edalat@gau.ac.ir
3. Department of Wood Technology and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan. Iran. Email: tabarsa@gau.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 15 August 2025

Revised: 06 September 2025

Accepted: 18 September 2025

Published online: 22 November 2025

Keywords:

Dielectric material,
Electrode current,
Encapsulated Nano materials,
Intermolecular friction,
Response surface.

ABSTRACT

One area of interest for improvements in the quality and properties of manufactured products is the use of nanotechnology to optimize production processes. In this study, the modeling and optimization of the resin curing process in plywood produced by radiofrequency heating using magnetic nanomaterials were investigated using response surface methodology (RSM). For this purpose, encapsulated superparamagnetic iron oxide nanomaterials were added in different amounts (2%, 11%, and 20%) to the urea-formaldehyde adhesive matrix. The plywood panels were manufactured in seven layers using a press equipped with radiofrequency heating, with dimensions of 500 × 500 mm and a thickness of 12 mm. The radiofrequency pressing variables included electrode current (0.3, 0.45, and 0.6 amperes) and pressing time (40, 80, and 120 seconds). The results showed that the use of superparamagnetic nanomaterials improved the physical and mechanical properties of the plywood. Increasing the electrode current decreased impact strength and bending strength but reduced water absorption. Examination of the samples showed that high current and long pressing time caused discoloration and burning. Optimization indicated that adjusting the electrode current, pressing time, and nanomaterial content to 0.4 A, 64 s, and 12.7%, respectively, produced higher-quality boards without burning, reduced energy consumption, and maximized efficiency. These levels were applied to produce new boards, and the actual results closely matched the predicted values, with model errors of 24.88% for MOR and 17.99% for MOE.

Cite this article: Rouhi, S., Edalat, H.R., Tabarsa, T. (2025). Optimization of radio frequency heating in plywood production by using modified resin with magnetic nanomaterials. *Journal of Forest and Wood Products*, 78 (3), 287-304. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.400560.1364>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.400560.1364>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

بهینه‌سازی فرآیند گرمادهی رادیو فرکانس در ساخت تخته‌لایه با استفاده از رزین اصلاح شده با نانو مواد مغناطیسی

شایان روحی^۱ | حمیدرضا عدالت^{۲*} | تقی طبرسا^۳

۱. گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران. رایانامه: tabarsa@gau.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران. رایانامه: h.edalat@gau.ac.ir
۳. گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران. رایانامه: roohishayan76@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱

کلیدواژه:

اصطکاک مولکولی،

جریان الکترون،

دی‌الکتریک،

سطح پاسخ،

نانو مواد پوشش‌دار.

یکی از زمینه‌های مورد توجه در حوزه ارتقاء کیفیت محصولات، استفاده از نانوفناوری در بهینه‌سازی فرآیندهای تولید می‌باشد. در این تحقیق، به مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند انعقاد رزین در تخته‌لایه‌های تولید شده به وسیله گرمادهی رادیوفرکانس با استفاده از نانومواد مغناطیسی به روش سطح پاسخ (RSM) پرداخته شده است. برای این منظور، نانومواد سوپرپارامغناطیس اکسید آهن پوشش‌دار شده در مقادیر مختلف (۲، ۱۱ و ۲۰ درصد) به ماتریس چسب اوره فرمالدهید اضافه گردید. تخته‌لایه‌های این تحقیق توسط پرس صنعتی مجهز به گرمادهی رادیوفرکانس در ابعاد ۵۰۰ × ۵۰۰ میلی‌متر، ضخامت ۱۲ میلی‌متر به صورت هفت‌لایه ساخته شدند. متغیرهای مربوط به پرس رادیوفرکانس شامل جریان الکترون‌دها (۰/۳، ۰/۴۵ و ۰/۶ آمپر) و زمان پرس (۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ ثانیه) بود. نتایج نشان داد که استفاده از نانومواد سوپرپارامغناطیس، منجر به بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی تخته‌لایه می‌شود. افزایش جریان الکترون‌دها موجب افت مقاومت به ضربه و مقاومت خمشی شد، اما در خصوص ویژگی‌های فیزیکی موجب بهبود (کاهش) جذب آب گردید. بررسی نمونه‌های تهیه‌شده از تخته‌ها نشان داد که در تیمارهای با جریان بالا و زمان پرس طولانی، تغییر رنگ و سوختگی نیز رخ می‌دهد. به کمک بهینه‌سازی فرآیند و تنظیم جریان الکترون‌دها، زمان پرس و مقدار نانو مواد به ترتیب در سطوح ۰/۴ آمپر، ۶۴ ثانیه و ۱۲/۷ درصد می‌توان به کیفیت بالاتر بدون ایجاد سوختگی در لایه‌ها و همچنین مصرف کمتر انرژی با کاهش زمان پرس دست یافت. این سطوح در ساخت تخته‌های جدید بکار گرفته شد و نتایج واقعی با مقادیر حاصل از پیش‌بینی مقایسه گردید. خطای مدل در پیش‌بینی مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته ظاهری به ترتیب ۲۴/۸۸ و ۱۷/۹۹ درصد به دست آمد.

استناد: روحی؛ شایان، عدالت؛ حمیدرضا، طبرسا؛ تقی (۱۴۰۴). بهینه‌سازی فرآیند گرمادهی رادیو فرکانس در ساخت تخته‌لایه با استفاده از رزین اصلاح شده با نانو مواد مغناطیسی.

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۸ (۳)، ۲۸۷-۳۰۴. DOI: <https://10.22059/jfwf.2025.400560.1364>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.400560.1364>



۱. مقدمه

علی‌رغم توسعه بسیاری از فرآورده‌های چوبی، ارزش تخته‌لایه در صنایع مختلف مانند ساختمان، مبلمان و خودرو به دلیل ویژگی‌های متنوع و نسبت مقاومت به وزن مطلوب آن، همچنان حفظ شده است. این کامپوزیت دارای ویژگی‌های مقاومتی بالا، وزن مخصوص مناسب، هزینه‌های تولید نسبتاً پایین و دوام بلندمدت می‌باشد [۱]. استفاده از تخته‌لایه به عنوان جایگزین چوب ماسیو در مصارف مختلف از جمله مبلمان، کابینت‌ها، پنجره‌ها و درب‌ها، اهمیت زیادی در حفظ منابع طبیعی و توسعه پایدار دارد. از آنجا که استفاده از چوب ماسیو به منابع جنگلی و درختان وابسته است و ممکن است به تخریب محیط‌زیست منجر شود، تخته‌لایه حاصل از جنگل‌های دست‌کاشت و گونه‌های تندرشد به عنوان یک ماده اولیه پرمصرف در توسعه پایدار صنعت ساختمان شناخته شده است. استفاده از این محصول در تولید مبلمان و کابینت‌ها، علاوه بر کاهش اثرات منفی بر محیط‌زیست، به طراحان و تولیدکنندگان امکان ایجاد طرح‌ها و سبک‌های متنوع را می‌دهد و در نتیجه انتخابی هوشمندانه و اقتصادی برای فضاهای داخلی و محیط‌های زندگی مدرن محسوب می‌شود. استفاده از تخته‌لایه‌های فرم‌دار در صنعت مبلمان، مسیر تازه‌ای در ایجاد تنوع در طراحی و خلق محصولات منحصر به فرد مانند صندلی‌های چشم‌نواز ایجاد نموده است. این محصولات علاوه بر داشتن زیبایی متفاوت، از استحکام بالایی نیز برخوردار هستند [۲]. در حوزه مهندسی چندسازه‌های چوبی، نانوتکنولوژی باعث ایجاد تغییرات مثبت و بهبودهای قابل توجهی در ویژگی‌ها و عملکرد این محصولات شده است و کاربردهای آن روز به روز در حال توسعه است [۳]. از جمله مهم‌ترین این کاربردها می‌توان به استفاده از آن در بهبود یا تقویت ویژگی‌های رزین مانند ویسکوزیته، سرعت سخت شدن، زمان‌زله ای شدن و... [۴-۵]، ایجاد مقاومت در چندسازه‌های چوبی در برابر عوامل جوی و زیستی مانند قارچ‌ها، باکتری‌ها و موجودات چوب‌خوار [۶]، نانوپرکننده‌ها در رزین [۷]، کاهش سیکل زمانی پرس اوراق فشرده چوبی [۸]، تهیه کامپوزیت‌هایی با ویژگی آنتی‌باکتریال [۹]، مغناطیسی [۱۰] و یا سوپرآبگریز [۱۱] اشاره کرد. این تلاش‌ها به عنوان یک گام مهم در ساخت محصولات چوبی با عملکرد بالا، ایمنی بهتر و سازگاری با محیط‌زیست مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است.

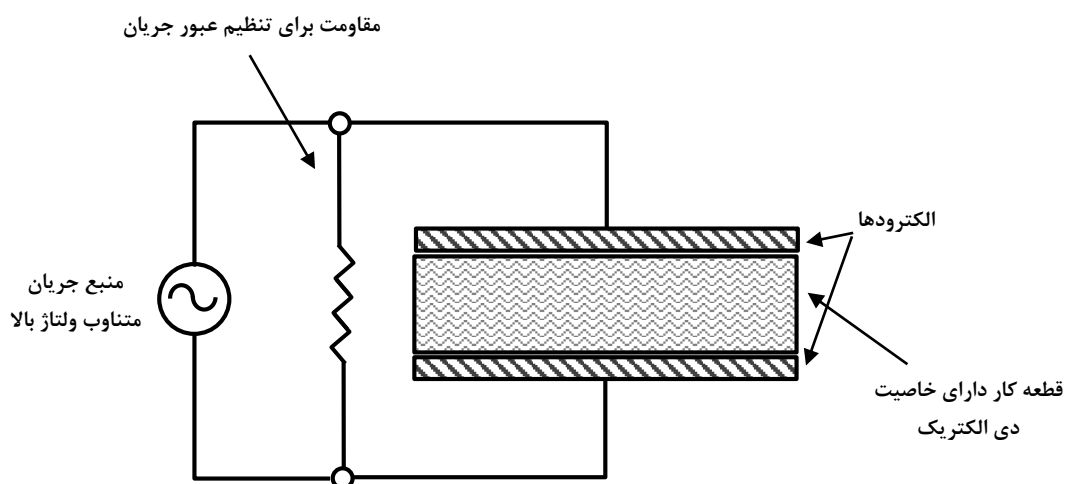
نانو ذرات مغناطیسی معمولاً از فلزاتی مانند آهن، نیکل، کبالت و یا ترکیبات آنها تشکیل شده و در ابعاد کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نانوذرات، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان، کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف از جمله الکترونیک، پزشکی، انرژی و مهندسی مواد دارند [۱۲-۱۳].

یکی از عوامل کلیدی در تولید تخته‌لایه، فرآیند گیرایی رزین است که به منظور تثبیت و اتصال اجزای چوبی به یکدیگر بکار می‌رود [۱۴]. در این فرآیند، استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی با هدف بهبود کیفیت و کارایی عملیات گیرایی مورد توجه قرار گرفته است [۱۵ و ۱۶] و از این رو، بهره‌برداری از فناوری‌های نوین به منظور بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌ها در این فرآیند، مورد توجه محققان و صنعتگران قرار گرفته است. در پرس‌های متداول، انتقال حرارت از سطح به لایه میانی که توسط هدایت مستقیم حرارت به سطوح و انتقال بخار انجام می‌شود، منجر به ایجاد گرادیان حرارتی در ضخامت کیک می‌گردد، به نحوی که همیشه دمای لایه میانی کمتر از لایه سطحی است. بدین ترتیب، چسب لایه سطحی در ابتدای سیکل پرس سخت می‌گردد و در لایه میانی به دلیل دمای کمتر، گیرایی رزین با تأخیر صورت می‌گیرد و در صورت کوتاه بودن سیکل پرس، ساخت فرآورده با مشکل مواجه می‌گردد [۱۷ و ۱۸]. یک روش جایگزین که می‌تواند همه یا برخی از این معایب را رفع کند استفاده از گرمادهی دی‌الکتریک^۱ است [۱۹]. این اصطلاح کلی هر دو بخش گرمادهی رادیو فرکانس^۲ و میکروویو^۳ را تحت پوشش قرار می‌دهد [۲۰].

روش گرمادهی رادیو فرکانس (RF) به عنوان یک تکنیک پیشرفته، سابقه طولانی در صنعت اوراق فشرده چوبی دارد و تحقیقات زیادی روی این موضوع تمرکز داشته است [۲۱]. از این تکنیک برای خشک نمودن، پیش گرمادهی کیک و گرمادهی در حین پرس استفاده می‌شود. یکی از محدودیت‌های این روش مصرف بالای انرژی الکتریکی می‌باشد، بنابراین به منظور کاهش هزینه تولید، استفاده از این تکنیک در کوتاه‌ترین زمان ممکن مد نظر بوده است. یکی از چالش‌های تولید تخته‌لایه‌های فرم‌دار، عملیات حرارت‌دهی حین پرس است. معمولاً در تولید این محصولات، از چسب‌های گرماسخت استفاده می‌گردد و استفاده از گرما در حین تولید نه تنها

^۱Dielectric heating^۲Radio frequency heating^۳Microwave heating

عاملی برای گیرایی چسب محسوب می‌گردد، بلکه به فرم‌دهی بهتر لایه‌ها کمک می‌نماید. فرم‌دار بودن محصول استفاده از پرس‌های گرم صفحه‌ای را ناممکن می‌سازد و فناوری گرمادهی با فرکانس بالا به‌همراه بکارگیری صفحات پرس قالبی، این محدودیت را رفع نموده است. در گرمادهی لایه‌ها به روش فرکانس بالا، مجموعه لایه‌ها و چسب مابین آنها، به‌عنوان ماده‌ی دی‌الکتریک عمل نموده و در بین دو صفحه‌ی فلزی متصل به جریان برق متناوب با ولتاژ و فرکانس بالا (کیلو هرتز تا مگاهرتز)، تشکیل یک خازن را می‌دهند. به‌واسطه‌ی تغییر سریع قطب‌های مثبت و منفی جریان متناوب، جنبش مولکولی شدیدی در ماده‌ی دی‌الکتریک ایجاد شده که از طریق اصطکاک بین مولکولی، موجب تولید گرما در زمان بسیار کوتاهی به‌خصوص در لایه‌های میانی می‌گردد (شکل ۱). ساخت محصول در کمترین زمان ممکن و غلبه بر محدودیت هدایت حرارتی پایین چوب، مهم‌ترین مزیت گرمادهی رادیوفرکانس محسوب می‌گردد. در این شرایط ایجاد گرما از درون ماده انجام می‌شود و این مسئله نرخ خشک شدن یکنواخت‌تر، کیفیت بالاتر محصول و افزایش سرعت تولید را به‌همراه دارد. برخی از مواد مانند آب به‌واسطه‌ی جذب انرژی بیشتر نسبت به بستری که در آن وجود دارند، برای این نوع از گرمادهی مستعدتر هستند. بنابراین، گرمادهی می‌تواند به‌صورت ترجیحی هم انجام شود [۲۰].



شکل ۱. طرح شماتیک مکانیسم گرمادهی فرکانس بالا

حرکت چسب به درون چوب می‌تواند تحت تأثیر روش حرارت‌دهی در پرس گرم نیز باشد. Sernek و همکاران (۱۹۹۹) مشاهده نمودند که استفاده از پرس با گرمادهی رادیوفرکانس در مقایسه با روش حرارت‌دهی معمولی باعث کاهش نفوذ چسب اوره فرمالدهید در چوب می‌شود. آنها بیان داشتند که دلیل این کاهش، سرعت بالاتر پلیمریزاسیون رزین است که به‌دلیل افزایش سریع ویسکوزیته، زمان کمتری را برای نفوذ فراهم می‌آورد [۲۲]. انتظار می‌رود که نفوذ چسب به موقعیت جزء چوبی در حین پرس گرم چند سازه بستگی داشته باشد زیرا دما و فشار بخار در یک با توجه به موقعیت فیزیکی تغییر می‌کنند [۲۳].

اتصال قوی بین اجزای چوبی نیازمند نفوذ کافی چسب در چوب می‌باشد. مقدار نفوذ چسب لازم است به اندازه‌ای باشد که بتواند آسیب‌های فرآیندی موجود بر سطح چوب را ترمیم کند و همچنین انتقال تنش بهتری را بین بسترها فراهم آورد [۲۳-۲۴]. تحقیقات نشان داده است که در اغلب موارد، میزان نفوذ چسب اثر مثبت بر عملکرد اتصالات دارد [۲۲، ۲۵]. استفاده از چسب اوره فرمالدهید در این فرآیند گزینه‌ای مقرون به صرفه بوده ولی با مشکلاتی مانند سوختن لایه‌ها در مجاورت خطوط چسب همراه است و در حین گرمادهی رادیوفرکانس ایجاد جرقه می‌کند. بنابراین یافتن راهکاری برای کاهش این معضل و توزیع یکنواخت میزان جذب انرژی در خطوط چسب، می‌تواند منجر به تولید محصولی با کیفیت و اقتصادی گردد. یک روش نوآورانه در بهینه‌سازی فرآیند گیرایی رزین، استفاده از گرمادهی رادیوفرکانس به‌همراه نانومواد مغناطیسی است. استفاده از این تکنیک می‌تواند به بهبود کارایی و کیفیت فرآیند گیرایی منجر شود. نانومواد مغناطیسی به‌عنوان یک عامل کمکی، جذب امواج الکترومغناطیسی را تغییر می‌دهد و فرآیند را در جهت بهبود هدایت حرارتی و توزیع یکنواخت گرما بهبود می‌بخشد.

هدف از انجام این مطالعه، بکارگیری نانومواد مغناطیسی به‌عنوان یک راهکار در جذب یکنواخت انرژی توسط خطوط چسب و همچنین بهینه‌سازی فرآیند گرمادهی در پرس رادیوفرکانس با مقیاس صنعتی می‌باشد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

در این مطالعه، لایه‌های چوبی از گونه سپیدار (*Populus alba*) توسط دستگاه لوله‌بر صنعتی در کارخانه شرکت چوب سنگ سناباد (واقع در شهرک صنعتی کاویان شماره دو مشهد) تهیه گردید. ضخامت اسمی لایه‌ها ۲ میلی‌متر بود و پس از خشک شدن برای جلوگیری از تبادل رطوبتی تا زمان ساخت تخته‌های آزمونی در کیسه‌های پلاستیکی نگهداری شدند. چسب مورد استفاده در این تحقیق از نوع چسب اوره فرمالدهید مایع بود که از شرکت سامد مشهد تهیه شد (جدول ۱). در این مطالعه، از نانو ذرات اکسید آهن محصول شرکت Finenano آمریکا پس از پوشش‌دار شدن استفاده گردید.

جدول ۱. ویژگی‌های رزین اوره فرمالدهید

دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	مواد جامد (درصد)	ویسکوزیته (سانتی‌پواز)	زمان ژل‌ای شدن (ثانیه)	pH
۱/۲۸	۵۸/۵	۳۰۰	۵۵	۷/۵

برای تولید تخته‌ها، ابتدا چسب به‌میزان لازم براساس تعداد تخته در زمان ساخت (حداکثر سه تخته در هر نوبت) توزین و داخل بشر ریخته شد. سپس به میزان ۱۵ درصد براساس جرم مرطوب به آن آرد گندم اضافه گردید. مخلوط حاصل با استفاده از همزن مکانیکی با سرعت ۳۰۰ و ۴۰۰ دور بر دقیقه به‌ترتیب به‌مدت ۸ و ۱۰ دقیقه همگن گردید. سپس، نانو ذرات مغناطیسی (اکسید آهن) پوشش‌دار شده با نشاسته و هاردنر به آن اضافه گردید. غلظت محلول نانوذرات مغناطیسی پوشش‌دار شده، برابر با ۰/۴۷ درصد بود که جزئیات تولید و ارزیابی آن در مطالعه دیگری ارائه شده است. به‌منظور اختلاط کامل محلول با چسب مایع، از همزن مکانیکی با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه و به‌مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تا پخش کامل استفاده گردید. مقدار استفاده از محلول نانومواد ۲، ۱۱ و ۲۰ درصد بر مبنای جرم جامد چسب تعیین گردید. به‌عنوان هاردنر نیز از محلول ۱۸ درصد کلرور آمونیوم و به‌میزان یک درصد جرم جامد چسب استفاده شد. به‌دلیل تغییرات دینامیک خواص دی‌الکتریک چسب حین فرآیند پلیمریزاسیون، از اندازه‌گیری پارامترهای مربوطه صرف‌نظر گردید.

برای چسب‌زنی لایه‌های زوج از چسب‌زن غلطکی صنعتی موجود در کارخانه مذکور استفاده گردید. گراماژ مصرفی چسب با تنظیم فواصل غلطک‌ها به گونه‌ای انجام گرفت که به‌طور تقریبی جرم هر خط چسب، ۱۸۰ گرم در هر متر مربع بود. در مجموع، تعداد هفت لایه متشکل از چهار لایه فرد و سه لایه زوج با ابعاد ۵۰۰ × ۵۰۰ میلی‌متر برای هر تخته در نظر گرفته شد. پرس تخته‌ها با استفاده از پرس رادیوفرکانس صنعتی مستقر در کارخانه شرکت چوب سنگ سناباد با توان ۳۰ کیلو وات و فرکانس ثابت ۶/۷۸ مگاهرتز انجام شد. عملیات پرس لایه‌ها تحت شرایط دمایی هدفمند برای خطوط چسب (حداقل ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد طبق آزمایش‌های اولیه) و فشار ویژه پرس ۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تنظیم گردید. بر این اساس، تخته‌ها با فرم مسطح و با ضخامت ۱۲ میلی‌متر ساخته شدند. از صفحات آلومینیومی با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر به‌عنوان الکترود استفاده شد که از طرق کابل مسی مسطح به ژنراتور جریان متصل شدند. با توجه به ضخامت محصول، سطح ولتاژ اعمال شده روی الکترودها در دامنه پایین معادل با ۶ کیلو ولت تنظیم گردید. سیکل پرس (شکل ۲) متشکل از هفت مرحله به‌شرح زیر بود:

مرحله اول (A): شروع بارگیری لایه‌های مونتاژ شده بین صفحات پرس

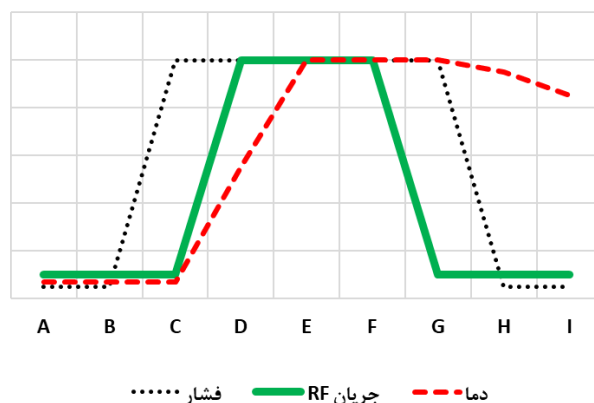
مرحله دوم (B): شروع بسته شدن دهانه پرس و فشرده شدن لایه‌ها بین قالب‌های پرس تحت فشار ویژه مورد نیاز

مرحله سوم (C): وصل شدن جریان فرکانس بالا و شروع گرمادهی

مرحله چهارم (D): ادامه گرمادهی رادیوفرکانس همراه با حفظ فشار (معادل با زمان پرس اصلی طبق سطوح انتخاب شده)

مرحله پنجم (E): رسیدن دما به حداکثر مقدار مورد نیاز
 مرحله ششم (F): قطع جریان فرکانس بالا همراه با حفظ فشار (زمان پرس بدون جریان؛ مدت ۳۰ ثانیه)
 مرحله هفتم (G): حذف فشار و خروج بخار همراه با حفظ فاصله صفحات قالب و شروع افت تدریجی دما (حداقل به مدت ۱ دقیقه)
 مرحله هشتم (H): باز شدن صفحات پرس
 مرحله نهم (I): خروج تخته از پرس

سیکل پرس با گرمادهی رادیو فرکانس



شکل ۲. مراحل نه گانه سیکل پرس مجهز به گرمادهی رادیو فرکانس

تخته‌های ساخته شده به صورت عمودی و به شیوه‌ای که هر دو سمت در معرض هوای محیط باشند تا سرد شدن کامل نگهداری شدند. پس از ۷۲ ساعت، کناره‌بری تخته‌ها و برش نمونه‌های آزمونی طبق الگوی از پیش تعیین شده انجام گردید (جدول ۲).

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های آزمونی و کد استاندارد [۲۶-۳۰]

تعداد	ابعاد نمونه (میلیمتر)			کد استاندارد	نام آزمون
	ضخامت	پهنا	طول		
۳	۱۲	۵۰	۳۳۰	EN 310	خمش
۵	۱۲	۲۰	۲۰۰	ASTM D 3499	ضربه
۲	۱۲	۵۰	۵۰	BS EN 320	نگهداری پیچ
۲	۱۲	۵۰	۵۰	BS EN 320	نگهداری میخ
۷	۱۲	۵۰	۵۰	EN 317	واکشی‌دگی ضخامت

آزمون خمشی نمونه‌ها به صورت خمش استاتیک سه نقطه‌ای و مدول الاستیسیته ظاهری با استفاده از دستگاه کامتک (Comtech) و با سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. برای آزمون مقاومت به ضربه، از دستگاه پاندولی Schenck TREBEL مدل RPS W150/300 با پاندول ۱۰ کیلوگرمی استفاده شد و سپس مقدار کار انجام شده برحسب ژول برای آنها ثبت گردید. برای انجام آزمون ظرفیت نگهداری اتصالات، ابتدا با استفاده از دریل ستونی مدل MS32B، سوراخی به طول ۱۵ میلی‌متر و به قطر ۳ میلی‌متر بر روی سطح نمونه‌ها ایجاد شد. سپس پیچ خودکار با طول ۴۰ میلی‌متر و قطر ۴ میلی‌متر در دو نوع با گام ۳ میلی‌متری (دنده درشت) و گام ۱/۵ میلی‌متری (دنده ریز) در محل اتصال با استفاده از پیچ‌گوشی شارژی با گشتاور درجه ۵ بسته شد. میزان نفوذ پیچ به درون سطح نمونه‌ها به اندازه‌ای بود که نوک مخروطی پیچ از سمت دیگر نمونه خارج شود. در مورد نمونه‌های آزمون نگهداری میخ، پیش سوراخ‌کاری انجام نگردید و میخ‌ها توسط یک چکش با جرم یک کیلوگرم به‌طور دستی و

به‌واسطه یک قطعه کمکی برای حفظ راستای عمودی ۹۰ درجه، میخ بر روی سطوح نمونه‌ها کوبیده شدند. مقاومت نگهداری پیچ و میخ با استفاده از دستگاه تست مکانیکی یونیورسال شرکت Schenck Trebel با سرعت بارگذاری ۲ میلی‌متر بر دقیقه در جهت عمود بر سطح ارزیابی گردید. پس از انجام تست، ظرفیت نگهداری از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$W = \frac{P_{max}}{L}$$

رابطه ۱)

W = ظرفیت نگهداری پیچ یا میخ (نیوتن بر میلی‌متر مربع)، P_{max} = نیروی حداکثر (نیوتن) و L = طول نفوذ مؤثر (میلی‌متر) برای تعیین میزان جذب آب و واکنشیدگی ضخامت، ضخامت اولیه و جرم اولیه آنها با استفاده از ریزسنج با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر و ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم، نمونه‌ها در ظرفی محتوای آب قرار داده شدند و برای غوطه‌وری کامل نمونه‌ها از یک توری سیمی استفاده شد. ابتدا، پس از ۲ ساعت غوطه‌وری در آب و سپس بعد از ۲۲ ساعت دیگر، جرم و ضخامت نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و به‌واسطه روابط موجود، میزان جذب آب و واکنشیدگی ضخامت آنها محاسبه گردید.

به‌منظور بررسی دقیق وضعیت نانومواد استفاده شده در ساختار تخته‌لایه پس از پرس، نمونه‌های آزمونی با ابعاد ۳×۵×۱۰ میلی‌متر از محل اتصال لایه چهارم با لایه‌های مجاور آن تهیه شد و پس از شکست مناسب و پوشش‌دهی، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۴ با برند Zeiss و مدل Sigma 300- HV مورد بررسی و تصویربرداری قرار گرفت. برای نمونه‌برداری فقط در مراحل اولیه برای جداسازی لایه‌های مورد نظر از تخته، از اره گرد استفاده شد ولی در ادامه به‌دلیل ضرورت حفظ ماهیت سطوح و پیشگیری از آغشته شدن به مواد فلزی، از بکارگیری فرآیندهای تکمیلی مانند سنباده‌زنی و برش با مواد فلزی اجتناب گردید و قبل از پوشش‌دهی، سطوح مورد بررسی در مقاطع عرضی با شکست طبیعی نمونه‌ها ایجاد و در معرض پوشش‌دهی واقع شد.

در این پژوهش، از طرح فاکتوریل با دو سطح و روش سطح پاسخ^۵ جهت بررسی اثر متغیرهای آزمایش و تهیه مدل استفاده شد. آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Design Expert 11 انجام شد. متغیرهای مستقل شامل نانومواد مغناطیسی، جریان الکترودها و زمان پرس بود که در جدول ۳ ارائه شده است. تعداد تکرار برای هر تیمار ۳ عدد در نظر گرفته شد و سه تخته نیز به‌عنوان نقاط میانه با سطوح متوسط متغیرها ساخته شدند. در آنالیز به کمک روش سطح پاسخ، مبنای کار یافتن اثرات معنی‌دار و برازش مدل جهت پیش‌بینی مقادیر ویژگی‌ها بود. ضمن اینکه بهینه‌سازی فرآیند ساخت با در نظر گرفتن اولویت‌ها و محدودیت‌ها توسط نرم‌افزار مذکور انجام گردید. سپس اعتبار مدل‌های برازش یافته و سطح بهینه تعیین شده با ساخت سه عدد تخته جدید تحت شرایط بهینه، مورد بررسی مجدد قرار گرفت.

جدول ۳. سطوح متغیرهای مستقل فرآیند تولید

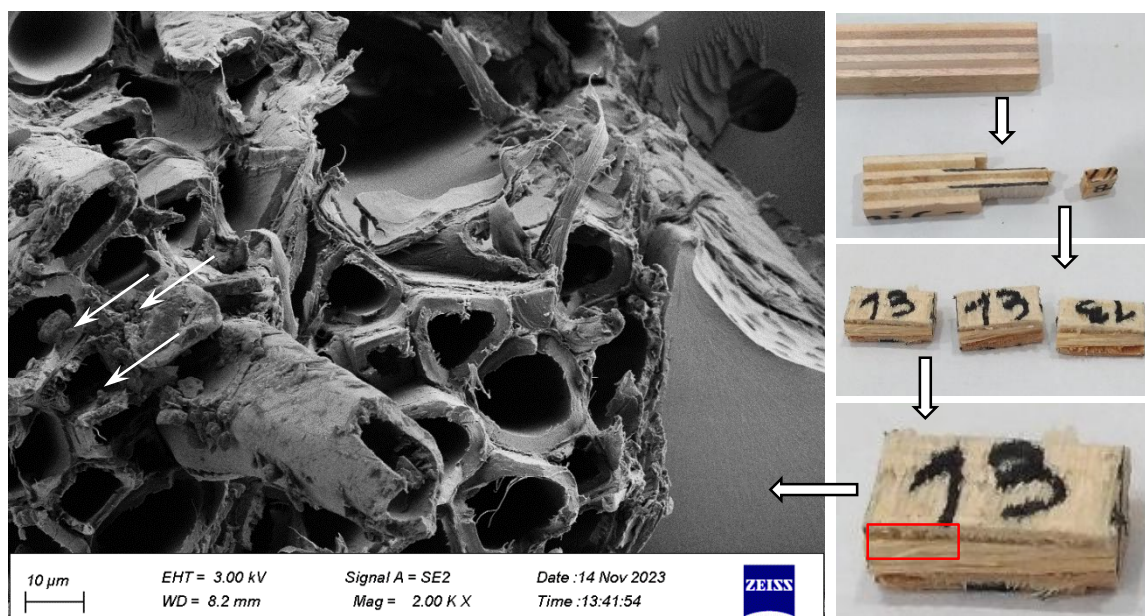
واحد	سطوح متغیرها			متغیرهای مستقل
	+۱	۰	-۱	
درصد	۲۰	۱۱	۲	مقدار نانومواد مغناطیسی (A)
آمپر	۰/۶	۰/۴۵	۰/۳	جریان الکترودها (B)
ثانیه	۱۲۰	۸۰	۴۰	زمان پرس (C)

۳. یافته‌های پژوهشی و بحث

شکل ۳، تصویر میکرو سکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) حاصل از مطالعه ناحیه اینترفاز چوب-چسب مقطع تخته‌لایه مورد نظر را با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر نشان می‌دهد. حضور نانو مواد مغناطیسی در بخش‌هایی از چسب نفوذ یافته و سخت شده در بافت چوب نشان‌دهنده توزیع مؤثر ولی همراه با کلوخگی نانومواد مغناطیسی در این ناحیه می‌باشد. با توجه به مقیاس تصویر، ابعاد توده‌ها متغیر بوده ولی از کمتر از ۱ میکرومتر تا قطر ۵ میکرومتر قابل مشاهده است.

^۴ FESEM

^۵ Response Surface Methodology (RSM)



شکل ۳. تصویر FESEM مقطع تخته لایه ساخته شده با چسب حاوی نانومواد مغناطیسی پوشش دار شده و پرس رادیوفرکانس (محل تصویربرداری ناحیه اینترفاز چوب-چسب می باشد)

در جدول ۴، نتایج آنالیز واریانس داده‌ها برای کلیه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ارائه شده است.

جدول ۴. تجزیه واریانس داده‌های ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و مدل‌های برازش یافته

منبع	مقاومت خمشی	مدول الاستیسیته ظاهری	مقاومت به ضربه	ظرفیت نگهداری پیچ دنددرشت	ظرفیت نگهداری پیچ دندریز	منبع
م. مربعات	شاخص P	م. مربعات	شاخص P	م. مربعات	شاخص P	منبع
۱۷۸/۵۸	*** / ۰۰۰۱	۱/۲۰۰E+۰۶	*** / ۰۰۰۱	۲/۲۷۸E+۰۵	*** / ۰۰۰۱	مدل
۴۴/۶۳	*** / ۰۰۱۸	۵۴۴۱۹/۸۲	*** / ۰۰۲۶	-	-	A
۴۷/۵۵	*** / ۰۰۱۴	۸۵۰۱۲/۴۲	*** / ۰۰۱۶	-	-	B
۵۹۹/۴۷	*** / ۰۰۰۱	۵/۲۸۳E+۰۶	*** / ۰۰۰۸	۲/۲۷۸E+۰۵	*** / ۰۰۰۱	C
-	-	۱/۳۹۴E+۰۵	*** / ۰۰۰۶	-	-	A×B
۵۵/۵۷	*** / ۰۰۰۷	۱/۵۹۰E+۰۵	*** / ۰۰۰۳	-	-	A×C
۴۵۱/۵۹	*** / ۰۰۰۱	۲/۶۲۶E+۰۶	*** / ۰۰۰۱	-	-	B×C
۴۶/۱۵	*** / ۰۰۱۵	۵۴۲۱۰/۵۰	*** / ۰۱۸۷	-	-	A×B×C
منبع	ظرفیت نگهداری میخ	جذب آب ۲ ساعت	جذب آب ۲۴ ساعت	واکسیدگی ضخامت ۲ ساعت	واکسیدگی ضخامت ۲۴ ساعت	منبع
م. مربعات	شاخص P	م. مربعات	شاخص P	م. مربعات	شاخص P	منبع
۴۱۴۳/۱۳	*** / ۰۰۵۴	۷۶/۸۲	*** / ۰۰۳۳	۲۱/۵۱	*** / ۰۰۰۱	مدل
-	-	-	-	-	-	A
-	-	-	-	-	-	B
۴۱۴۳/۱۳	*** / ۰۰۵۴	۱۰۵/۷۹	*** / ۰۰۸۰	۲۱/۵۱	*** / ۰۰۰۱	C
-	-	-	-	-	-	A×B
-	-	-	-	-	-	A×C
-	-	۷۵/۱۵	*** / ۰۲۲۳	-	-	B×C
-	-	-	-	-	-	A×B×C

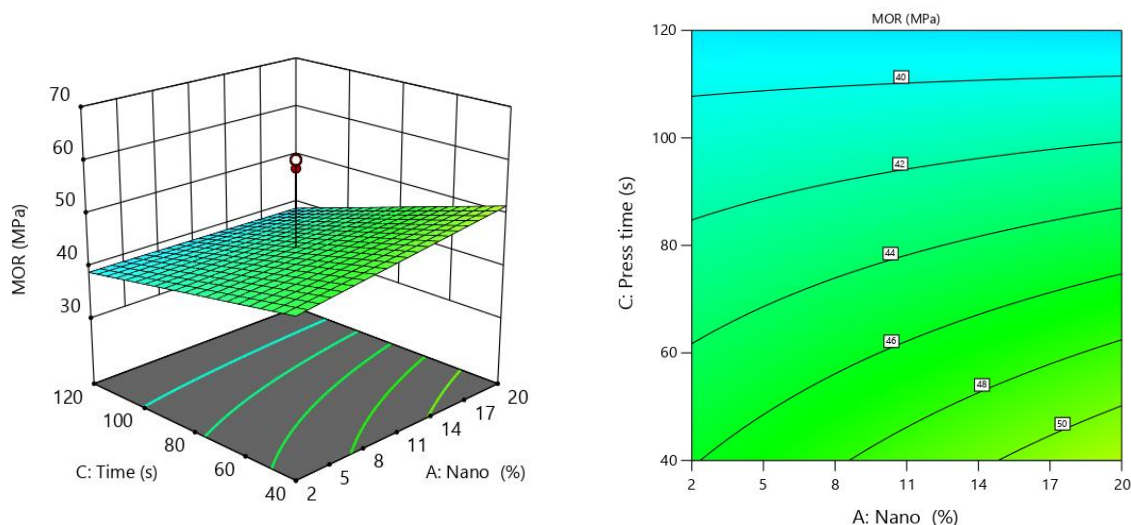
C: زمان پرس

B: جریان الکترودها

A: مقدار نانومواد مغناطیسی

۳-۱. مقاومت خمشی (MOR)

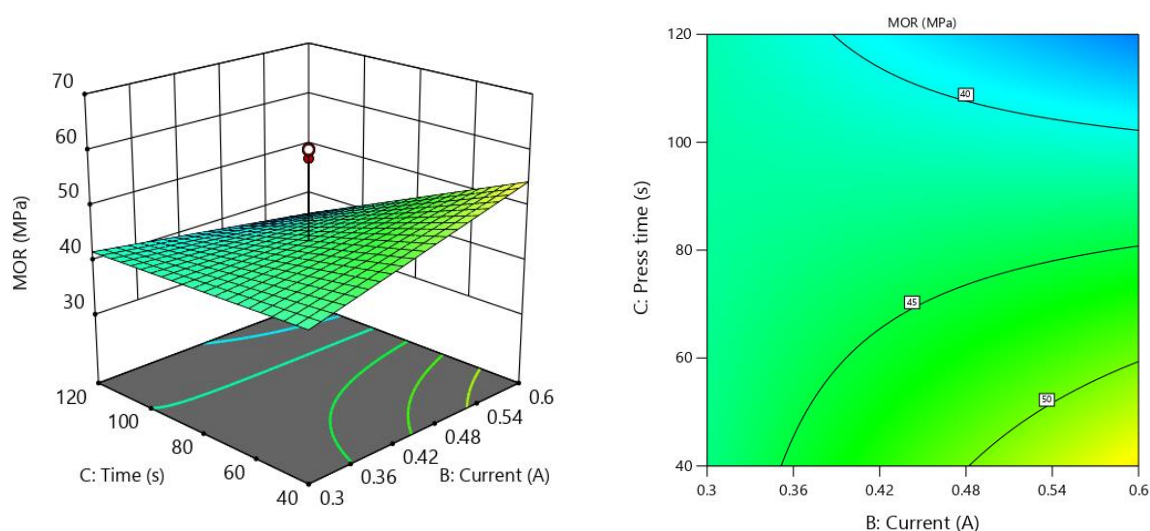
آنالیز واریانس داده‌های مقاومت خمشی نمونه‌های تخته لایه نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است. همچنین، اثر مستقل در صد نانو مواد مغناطیسی (A)، جریان الکترودها (B) و زمان پرس (C)، تأثیر معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد بر روی متغیر مقاومت خمشی نمونه‌ها داشت. در بین اثرات متقابل، تنها اثر متقابل درصد نانو مواد مغناطیسی (A) و جریان الکترودها (B) معنی‌دار نبود. در مدل برازش یافته، تمام متغیرها به صورت مستقل و متقابل به استثنای اثر متقابل مقدار نانو مواد و جریان الکترودها (AB) بر مقاومت خمشی در سطح اطمینان ۹۹ درصد اطمینان معنی‌دار بوده‌اند. با بررسی روند تغییرات در منحنی همتراز مقاومت خمشی نمونه‌ها مشاهده می‌شود که در مقادیر پایین تا متوسط زمان پرس، با افزایش در صد نانو مواد مغناطیسی (A)، مقاومت خمشی افزایش می‌یابد ولی در مقادیر بالای زمان پرس، مقدار مقاومت خمشی مستقل از درصد نانو مواد مغناطیسی است. این مسئله با مشاهده نمودار سطح پاسخ نیز قابل درک است. شیب سطح پاسخ در اثر افزایش مقدار نانو مواد، در مقادیر حداقل و حداکثر زمان پرس متفاوت بود و بی‌اثر شدن افزایش نانو مواد در زمان پرس طولانی‌تر کاملاً مشهود است (شکل ۴). بررسی مقدار این ویژگی تحت تأثیر جریان صفحات و زمان پرس نشان داد که افزایش جریان صفحات در زمان پرس کوتاه و طولانی دو تأثیر کاملاً متفاوت را بر مقدار مقاومت خمشی داشته است. تخته‌های ساخته شده با حداقل زمان پرس بیشترین حساسیت را به افزایش جریان صفحات الکترودها نشان دادند به طوری که با افزایش جریان، مقاومت خمشی بهبود پیدا کرده است. این در حالی است که در زمان پرس طولانی، افزایش جریان الکترودها تأثیر منفی بر مقدار مقاومت خمشی داشته است (شکل ۵).



شکل ۴. اثر نانو مواد مغناطیسی (A) و زمان پرس (C) بر ویژگی مقاومت خمشی (مقدار جریان الکترودها ۴۵/۰ آمپر)

بهبود مقاومت خمشی تخته لایه‌ها ناشی از افزودن نانو مواد سوپر پارامغناطیس به چسب اوره ممکن است به دلیل تقویت خصوصیات مکانیکی ناشی از برهمکنش نانو مواد با مولکول‌های چسب و اجزای چوب و کمک به کنترل تغییرات حرارتی ایجاد شده در خطوط چسب در حین فرآیند گرمادهی باشد. به عبارت دیگر، حضور نانو مواد مغناطیسی در ترکیب چسب موجب جذب بیشتر امواج الکترومغناطیسی شده و با جنبش مولکولی شدیدتر، حرارت بیشتر و سریع‌تری را در چسب ایجاد می‌کند. البته وجود این روند در زمان پرس کوتاه‌تر مشهود است و شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش زمان پرس، تأثیر نانو مواد از بین می‌رود. افزایش شدت جریان نیز موجب افزایش مقاومت شده که می‌تواند در اثر گیرایی کامل چسب باشد. هر چند اثر مثبت افزایش شدت جریان تنها در زمان پرس کوتاه مشاهده می‌شود و با افزایش زمان پرس به ۱۲۰ ثانیه، افزایش شدت جریان تأثیر منفی بر روی مقاومت داشته است. ذکر این نکته ضروری است که در تیمارهای ۱۲۰ ثانیه به خصوص در شرایطی که از حداکثر جریان استفاده شده است، تغییر رنگ شدید در لایه‌های تخته مشهود است و در برخی نمونه‌ها، آثار سوختگی کاملاً مشاهده شد. دلیل کاهش مقاومت نیز می‌تواند

تخریب حرارتی و سوختن لایه‌ها باشد. در نتیجه، افزودن نانومواد سوپر پارامغناطیس به چسب اوره در شرایط استفاده از شدت جریان و زمان پرس کمتر، می‌تواند موجب بهبود مقاومت خمشی گردد. Silva و همکاران (۲۰۱۹)، نشان دادند که افزودن نانوذرات اکسید روی، توزیع بهتر حرارت در پرس و افزایش مقاومت خمشی تخته خرده‌چوب را به دنبال دارد [۳۰]. به‌طوری که مقاومت خمشی، از ۱۱/۳۲ مگاپاسکال در نمونه فاقد نانوذره اکسید روی، به ۱۴/۵۲ مگاپاسکال در تخته خرده‌چوب‌های حاوی یک درصد نانوذرات اکسید روی رسید. در تحقیق دیگری، Taghiyari و Farajpour (۲۰۱۳) گزارش کردند که هنگام استفاده از مقادیر ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌لیتر از نانومس بر هر کیلوگرم خرده‌چوب، زمان فشار پرس گرم به‌ترتیب، ۵/۷ و ۳/۴ درصد در تولید تخته خرده‌چوب کاهش یافته است [۸]. مقاومت خمشی نیز از ۱۱/۳۳ مگاپاسکال در نمونه شاهد، به ۱۱/۵۵ و ۱۲/۱۸ مگاپاسکال به‌ترتیب در تخته‌های ساخته شده با ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌لیتر نانومس افزایش یافته است. نتایج این بخش از تحقیق با نتایج به‌دست آمده توسط محققان اشاره شده مطابقت دارد.



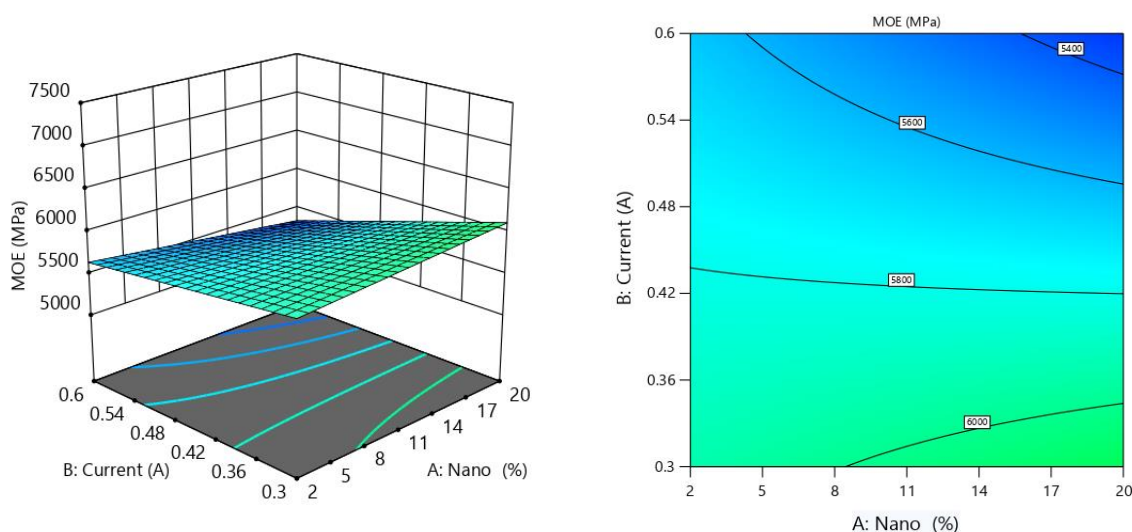
شکل ۵. اثر جریان صفحه (B) و زمان پرس (C) بر ویژگی مقاومت خمشی (مقدار نانو مواد ۱۱ درصد)

نمی‌توان ارتباط مستقیمی بین جریان رادیوفرکانس و مقاومت خمشی تخته‌لایه قائل شد. ولی مقاومت خمشی یک تخته‌لایه تحت تأثیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی اجزای سازنده آن، دانسیته نهایی و ضریب فشردگی، شرایط ساخت، میزان استفاده از چسب و کیفیت خطوط چسب دارد. در تحقیق صورت گرفته متغیرهای مربوط به مواد اولیه و دانسیته تخته ثابت در نظر گرفته شدند ولی آنچه تحت پارامترهای تولید (زمان پرس، شدت جریان و درصد نانومواد) تغییر داشته است، شرایط انعقاد رزین و کیفیت چسبندگی بین لایه‌های چوبی است. در این تحقیق، یکی از دلایل افت مقاومت نمونه‌ها، سوختگی لایه‌ها در اثر گرمادهی پرس بوده است. این سوختگی در اثر تحمل حرارت پرس در زمان طولانی‌تر حاصل شده و با کاهش مقاومت‌های مکانیکی همراه بوده است. یکی دیگر از دلایل کاهش مقاومت‌ها می‌تواند شرایط نفوذ نامناسب رزین در بافت چوب باشد [۲۴-۲۵].

۳-۲. مدول الاستیسیته ظاهری (MOE)

نتایج آنالیز مدول الاستیسیته ظاهری نمونه‌های تخته‌لایه نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد اثر مستقل در صد نانومواد مغناطیسی (A)، جریان الکترودها (B) و زمان پرس (C) بر مدول الاستیسیته ظاهری معنی‌دار بوده‌اند (جدول ۴). با توجه به معنی‌دار شدن اثرات متقابل و با بررسی منحنی سطح پاسخ مدول الاستیسیته ظاهری نمونه‌ها، مشخص شد که افزایش درصد نانومواد مغناطیسی (A) و مقدار جریان الکترودها (B)، مدول الاستیسیته ظاهری کاهش می‌یابد. شکل ۶ این اثر را در شرایطی نمایش می‌دهد که مقدار زمان پرس در حالت متوسط، یعنی

۸۰ ثانیه اعمال شده است. نمودار همتراز مقدار مدول الاستیسیته نشان می‌دهد که در مقدار ثابت استفاده از نانو مواد مغناطیسی، افزایش جریان الکترونها موجب کاهش این ویژگی شده است.



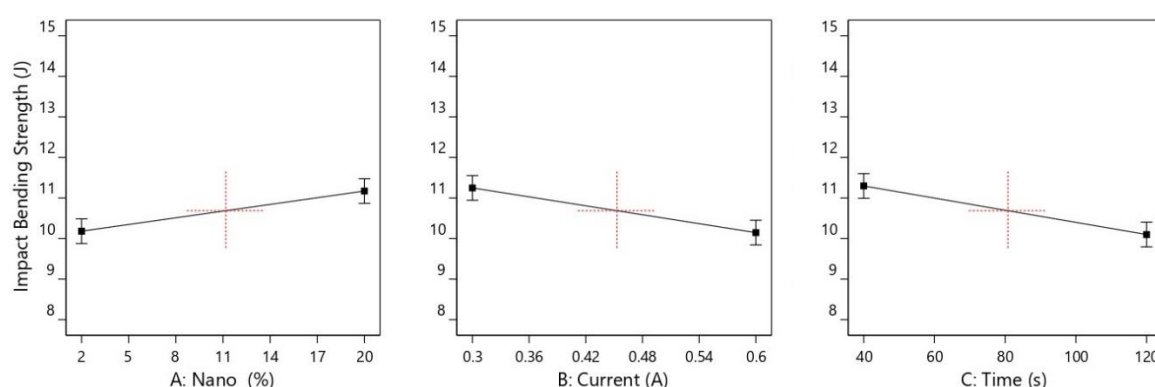
شکل ۶. اثر مقدار نانومواد مغناطیسی (A) و جریان الکترونها (B) بر مدول الاستیسیته ظاهری نمونه‌ها (زمان پرس ۸۰ ثانیه)

از آنجا که ویژگی مدول الاستیسیته ظاهری تخته‌ها علاوه بر عملکرد مستقل لایه‌ها به کیفیت چسبندگی آنها به یکدیگر نیز بستگی دارد، می‌توان نتیجه گرفت، تغییر شرایط انعقاد چسب در پرس رادیو فرکانس منجر به تغییر مدول الاستیسیته ظاهری تخته شده است. حضور نانومواد سوپراپارامغناطیس، علاوه بر تقویت ساختار چسب به واسطه افزایش سطح تماس، موجب تغییر میزان جذب انرژی گرمایی ناشی از فرکانس بالا نیز می‌گردد و به تولید فرآورده لایه‌ای با انسجام بهتر و چسبندگی بهتر لایه‌ها منجر می‌شود [۳۱]. البته تأثیر این مواد در زمان‌های پرس طولانی کم‌رنگ می‌گردد. همچنین، معنی دار شدن اثر متقابل درصد نانومواد و جریان الکترونها نشان می‌دهد که روندهای متفاوت برای تأثیر افزایش مقدار نانو مواد بر مدول الاستیسیته ظاهری وجود دارد. در شدت جریان حداقل، با افزایش مقدار نانومواد، مقدار مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد و در مقادیر حداکثر جریان، با افزایش درصد نانومواد، کاهش مدول الاستیسیته را خواهیم داشت (شکل ۶). در خصوص اثر متقابل نانو مواد مغناطیسی و زمان پرس (AC) و اثر متقابل جریان الکترونها و زمان پرس (BC) روندی مشابه با نتایج مقاومت خمشی مشاهده گردید. افزایش زمان پرس تخته لایه‌ها می‌تواند بهبود قابل توجهی در مدول الاستیسیته آنها ایجاد کند. دلیل اصلی این بهبود، انعقاد کامل‌تر رزین و همچنین ایجاد تعادل بهتر در تمام لایه‌ها می‌باشد. به عبارتی، زمان بیشتر فرصت می‌دهد تا تنش‌های داخلی تخته متعادل شده و منجر به افزایش یکنواختی و تراکم در ساختار تخته و در نهایت بهبود عملکردها و کیفیت آن شود. ولی ذکر این نکته ضروری است که اگر این افزایش زمان، همراه با افزایش شدت جریان یا توأم با افزایش میزان نانومواد مغناطیسی باشد، می‌تواند اثرات منفی بر ویژگی مذکور داشته باشد. دلیل این اثر منفی، دریافت حرارت بیشتر و تخریب بافت لایه‌های چوبی، اتصالات چسب و چوب و همچنین نیروهای خودچسبندگی خط چسب می‌باشد.

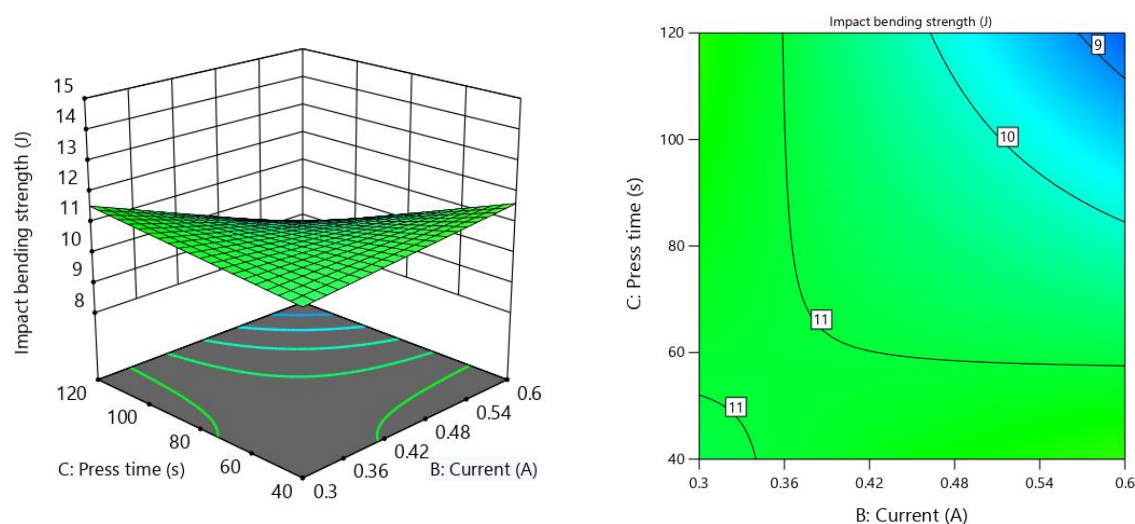
۳-۳. مقاومت به ضربه

نتایج آنالیز واریانس مقاومت به ضربه نمونه‌های تخته لایه نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی پیشنهادی در پیش‌بینی مقاومت به ضربه نمونه‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بوده است. همچنین، مشخص گردید که درصد نانومواد مغناطیسی (A)، جریان الکترونها (B) و زمان پرس (C)، تأثیر معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد بر روی مقاومت به ضربه نمونه‌ها داشته‌اند. در بین اثرات متقابل، تنها اثر متقابل جریان الکترونها (B) و زمان پرس (C) معنی‌دار بوده است (جدول ۴). بر خلاف اثر مقدار نانومواد، افزایش مقدار جریان الکترونها و زمان پرس موجب کاهش مقاومت به ضربه نمونه‌ها شده است (شکل ۷). با توجه معنی‌دار شدن

اثر متقابل جریان الکترودها (B) و زمان پرس (C)، در حالتی که از کمترین سطح جریان استفاده می‌شود، افزایش زمان پرس تأثیر مثبتی بر مقادیر مقاومت به ضربه داشت ولی زمانی که مقدار جریان به سطح متوسط و حداکثر افزایش می‌یابد. با بیشتر شدن زمان پرس، از مقدار مقاومت کاسته شده که این مسئله به تشدید گرمادهی مربوط است. با بررسی منحنی‌های سطح پاسخ و همتراز مشاهده می‌شود که مقاومت به ضربه نمونه‌ها تحت اثر متقابل جریان الکترودها و زمان پرس رفتارهای متفاوتی داشته است. استفاده از سطوح حداکثری این دو متغیر و در حالتی که مقدار نانومواد مغناطیسی در سطح متوسط بوده است، مقاومت به ضربه کاهش چشمگیری پیدا نموده است (شکل ۸). علت این مسئله می‌تواند تشدید فرآیند گرمادهی در اثر اعمال حداکثر جریان در الکترودهای پرس در طی زمان طولانی‌تر باشد که باعث سوختگی لایه‌ها و تخریب اتصالات شده و مقاومت فرآورده را کاهش داده است. از طرفی، اعمال حرارت در زمان طولانی‌تر می‌تواند تردی لایه‌ها را نیز به دنبال داشته باشد که روی مقاومت به ضربه فرآورده به‌طور مستقیم اثر می‌گذارد.



شکل ۷. اثر مستقل عوامل متغیر بر مقاومت به ضربه

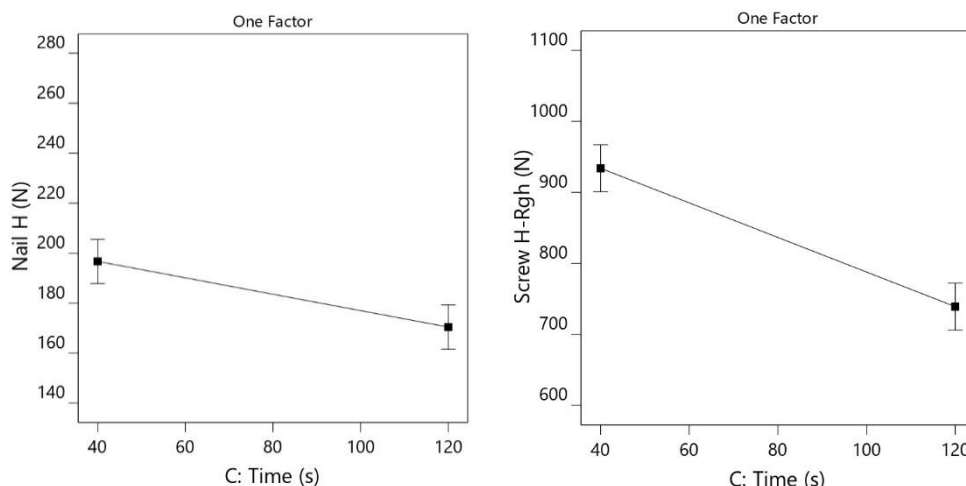


شکل ۸. اثر متقابل جریان الکترودها (B) و زمان پرس (C) بر مقاومت به ضربه نمونه‌ها (مقدار نانومواد ۱۱ درصد)

۳-۴. ظرفیت نگهداری اتصالات

نتایج آنالیز واریانس ظرفیت نگهداری اتصالات نشان داد که مدل برازش یافته برای ظرفیت نگهداری پیچ با دنده‌ریز و هیچ کدام از متغیرهای مستقل تأثیر معنی‌داری نداشتند. در خصوص ظرفیت نگهداری پیچ بادنده درشت و ظرفیت نگهداری میخ، مدل‌های

برآزش یافته در پیش‌بینی این دو ویژگی معنی‌دار بوده‌اند و در بین اثرات تنها اثر متغیر مستقل زمان پرس (C) در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار شده است (جدول ۴). همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، مقدار ظرفیت نگهداری پیچ با دندۀ درشت و همچنین میخ با افزایش زمان پرس کاهش یافته است.

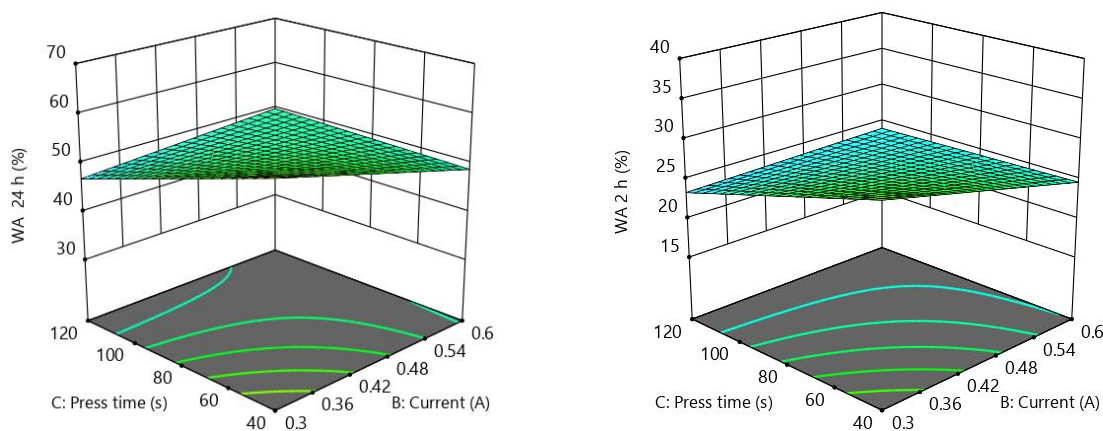


شکل ۹. اثر مستقل زمان پرس (C) بر ظرفیت نگهداری اتصالات؛ پیچ با دندۀ درشت سمت راست و میخ سمت چپ

دلیل کاهش ظرفیت نگهداری اتصال‌دهنده‌ها تحت تأثیر افزایش زمان پرس می‌تواند مربوط به کاهش مقاومت ذاتی لایه‌های چوبی تحت تأثیر تخریب حرارتی باشد و تغییرات کیفیت چسبندگی لایه‌ها تحت تأثیر جریان الکترودها و نانومواد مغناطیسی بر این ویژگی‌ها مؤثر نبودند.

۳-۵. جذب آب پس از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری

نتایج آنالیز واریانس نشان داد، مدل رگرسیونی جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار می‌باشد. همچنین مشخص گردید در خصوص جذب آب ۲ ساعت فقط اثر متغیر زمان پرس (C) و اثر متقابل جریان صفحه و زمان پرس ($B \times C$) معنی‌دار است در حالی‌که برای جذب آب ۲۴ ساعت، علاوه بر اثرات مذکور اثر جریان صفحه (B) نیز معنی‌دار بوده است (جدول ۴). با توجه به شکل ۱۰، افزایش مقدار جریان صفحه و زمان پرس، جذب آب نمونه‌ها پس از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری کاهش یافت. این مسئله به تأثیر حرارت بر کاهش آبدوستی لایه‌های چوبی مرتبط می‌باشد.

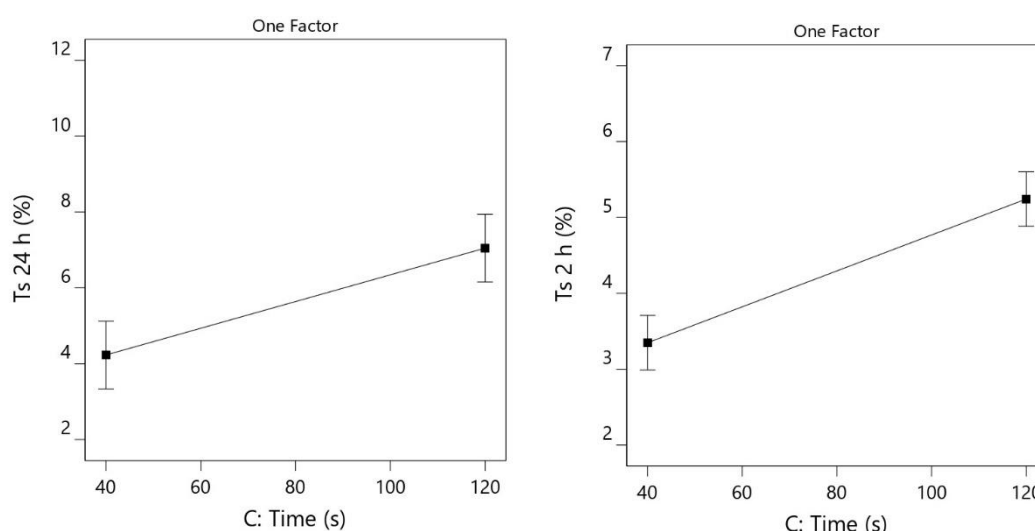


شکل ۱۰. اثر متقابل جریان صفحه (B) و زمان پرس (C) بر جذب آب (۲ ساعت (راست) و ۲۴ ساعت (چپ))

کاهش جذب آب تخته‌ها در نتیجه افزایش زمان پرس می‌تواند به اصلاح حرارتی لایه‌ها مربوط باشد. با توجه به تغییر رنگ مشاهده شده در تخته‌های ساخته شده با زمان طولانی‌تر پرس، سایت‌های جذب‌کننده آب طی این فرآیند اصلاح شده و لایه‌ها تمایل کمتری برای جذب آب خواهند داشت. به عبارت دیگر، تغییرات در ساختار شیمیایی لایه‌ها می‌تواند تعاملات سطحی تخته‌لایه و آب را تغییر دهد و باعث کاهش آبدوستی گردد.

۳-۶. واکنشیدگی ضخامت پس از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری

آنالیز واریانس نشان داد که مدل رگرسیونی واکنشیدگی ضخامت پس از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است. همچنین مشخص گردید که در بین متغیرها، فقط اثر متغیر زمان پرس (C) معنی‌دار می‌باشد (جدول ۴). با توجه به شکل ۱۱، افزایش مقدار جریان صفحه باعث شد که واکنشیدگی ضخامت نمونه‌ها پس از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری به ترتیب به میزان ۵۵ درصد و ۶۳ درصد افزایش یابد.



شکل ۱۱. اثر مستقل زمان پرس (C) بر واکنشیدگی ضخامت ۲ ساعت (راست) و ۲۴ ساعت (چپ)

افزایش زمان پرس اگرچه موجب اصلاح حرارتی و کاهش جذب آب گردید اما در خصوص واکنشیدگی ضخامت رفتار متفاوتی مشاهده شد که دلیل آن اثر منفی تشدید حرارت‌دهی با زمان پرس طولانی‌تر بر کیفیت اتصالات لایه‌ها و وقوع پدیده دلمینه شدن می‌باشد.

۳-۷. مدل‌های برازش‌یافته برای پیش‌بینی ویژگی‌ها

مدل‌های برازش‌یافته برای پیش‌بینی ویژگی‌های مورد بررسی در روابط ۲ تا ۱۰ ارائه شده است. همچنین ضرایب تبیین آنها در جدول ۵ قابل مشاهده می‌باشد.

رابطه ۲) مقاومت خمشی

$$\text{MOR (MPa)} = +43.77 + 1.36A + 1.41B - 5.00C + 0.4608AB - 1.52AC - 4.34BC - 1.39ABC$$

رابطه ۳) مدول الاستیسیته ظاهری

$$\text{MOE (MPa)} = +6223.36 + 47.62A + 59.52B - 469.20C - 76.22AB - 81.40AC - 330.81BC - 47.53ABC$$

رابطه ۴) مقاومت به ضربه

$$\text{Impact Resistance (J)} = +10.70 + 0.5004A - 0.5329B - 0.5754C - 0.2746AC - 0.9079BC$$

رابطه ۵) ظرفیت نگهداری پیچ با دنده درشت

$$\text{Rough pitch screw holding capacity (N)} = +836.54 - 97.42C$$

رابطه ۶) ظرفیت نگهداری میخ

$$\text{Nail holding strength (N)} = +183.56 - 13.14C$$

رابطه ۷) جذب آب ۲ ساعت

$$\text{WA 2 h (\%)} = +25.81 - 1.44B - 2.10C + 1.77BC$$

رابطه ۸) جذب آب ۲۴ ساعت

$$\text{WA 24 h (\%)} = +51.49 - 2.10B - 3.07C + 3.59BC$$

رابطه ۹) واكشیدگی ضخامت ۲ ساعت

$$\text{TS 2 h (\%)} = +4.30 + 0.9467C$$

رابطه ۱۰) واكشیدگی ضخامت ۲۴ ساعت

$$\text{TS 24 h (\%)} = +5.99 + 0.0195A - 0.3530B + 1.14C + 0.5182AB - 0.1102AC + 0.2682BC + 0.4874ABC$$

جدول ۵. ضریب تبیین مدل‌های برازش یافته برای پیش‌بینی ویژگی‌های تخته

ویژگی مورد بررسی	ضریب تبیین	ضریب تبیین تعدیل شده
مقاومت خمشی	۰/۸۳	۰/۷۱
مدول الاستیسیته ظاهری	۰/۸۹	۰/۷۸
مقاومت به ضربه	۰/۷۵	۰/۶۹
ظرفیت نگهداری پیچ (درشت)	۰/۶۰	۰/۵۸
ظرفیت نگهداری پیچ (ریز)	۰/۳۹	۰/۲۳
ظرفیت نگهداری میخ	۰/۲۸	۰/۲۵
جذب آب ۲ ساعت	۰/۴۵	۰/۳۸
جذب آب ۲۴ ساعت	۰/۵۵	۰/۴۹
واكشیدگی ضخامت ۲ ساعت	۰/۵۲	۰/۴۶
واكشیدگی ضخامت ۲۴ ساعت	۰/۴۷	۰/۳۳

همان‌طور که در جدول ۵ مشخص است، ضریب تبیین برای مدل‌های مربوط به خواص مکانیکی به‌خصوص ویژگی‌های خمشی، مقاومت به ضربه و ظرفیت نگهداری پیچ با دنده درشت، نسبت به سایر ویژگی‌ها، از مقدار بالاتری برخوردار بوده و قاعدتاً منجر به پیش‌بینی با خطای کمتر نیز خواهند شد.

۳-۸. بهینه‌سازی

هدف اصلی این مطالعه دستیابی به شرایط بهینه گرمادهی در رادیو فرکانس در تولید تخته لایه بود. بدین منظور روش سطح پاسخ به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های مدل‌سازی و بهینه‌سازی انتخاب گردید. با استفاده از این روش می‌توان مقادیر ویژگی‌های مورد انتظار را به‌صورت عدد دقیق یا بازه مشخص نمود و بعد محدودیت‌های فرآیند تولید را با توجه به اهداف بهینه‌سازی تعیین کرد. سپس براساس اولویت‌ها توسط نرم‌افزار و روش سطح پاسخ به سطوح بهینه متغیرها خواهیم رسید. از بین متغیرهای ساخت به‌ترتیب اولویت: زمان پرس کوتاه‌تر، مقدار جریان الکتروکتر کمتر و در نهایت بازه ۲ تا ۲۰ درصدی برای نانومواد پوشش‌دار شده انتخاب گردید. در بخش متغیرهای وابسته یا پاسخ‌ها نیز به‌ترتیب اولویت: مقاومت خمشی حداقل ۴۵ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته حداقل ۵۰۰۰ مگاپاسکال، سایر ویژگی‌های مکانیکی با مقدار حداکثر و ویژگی‌های فیزیکی با حداقل مقدار مد نظر قرار گرفتند. این تنظیمات درون نرم‌افزار Design Expert وارد گردید و پس از انجام بهینه‌سازی، راه‌حل‌های پیشنهادی بررسی و ترکیب زیر با بالاترین مطلوبیت^۶ (۰/۶۵) به‌عنوان ترکیب بهینه متغیرهای ساخت برای آزمون مدل‌ها انتخاب گردید:

^۶Desirability

مقدار جریان ۰/۴ آمپر

مقدار نانو مواد ۱۲/۷ درصد

زمان پرس ۶۴ ثانیه

تعداد سه تخته با تنظیمات فوق ساخته شد و ویژگی‌های خمشی آنها طبق روش‌های قبلی مورد آزمون قرار گرفت.

۳-۹. آزمون مدل‌ها

هر کدام از مدل‌های به‌دست آمده قادر به پیش‌بینی مقدار یکی از ویژگی تخته می‌باشند ولی قدرت پیش‌بینی آنها بستگی به مقدار ضریب تبیین آنها دارد. پس از بهینه‌سازی و انتخاب ترکیب بهینه برای ساخت، به‌منظور اعتبارسنجی مدل‌های حاصل در روش سطح پاسخ، ویژگی‌های خمشی تخته‌های جدید با مقادیر پیش‌بینی شده در بهینه‌سازی مقایسه گردید تا توانایی مدل‌ها در تخمین و بهینه‌سازی تعیین گردد (جدول ۶).

جدول ۶. مقایسه مقادیر پیش‌بینی و واقعی ویژگی‌ها و مقدار خطای پیش‌بینی

ویژگی‌ها	مقدار پیش‌بینی با روش سطح پاسخ	میانگین مقدار واقعی حاصل از تخته‌های ساخته شده	درصد خطای پیش‌بینی
مقاومت خمشی (MPa)	۴۵	۵۶/۲	۲۴/۸۸
مدول الاستیسیته ظاهری (MPa)	۵۵۰۰	۶۴۸۶	۱۷/۹۲

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه، با استفاده از چسب حاوی نانو مواد مغناطیسی پوشش‌دار شده، تخته‌های هفت‌لایه با ضخامت ۱۲ میلی‌متر و با استفاده از پرس مجهز به گرمادهی رادیو فرکانس در مقیاس صنعتی ساخته شد. هدف از انجام این مطالعه، بهینه‌سازی فرآیند ساخت با تمرکز بر گرمادهی مؤثر و بدون آسیب توسط سیستم رادیو فرکانس تعریف گردید. به‌منظور آنالیز دقیق و جامع، از طرح فاکتوریل با دوسطح و همچنین روش سطح پاسخ استفاده شد و برای هر یک از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، علاوه بر تعیین اثرات معنی‌داری، مدل پیش‌بینی برازش داده شد. به‌دلیل تنوع زیاد سطوح متغیرها، تلاش شد که اثرات متقابل دوگانه در شرایط استفاده از متغیر سوم با سطح متوسط ارائه و تفسیر گردند. به‌وضوح مشاهده گردید که زمان پرس، مقدار جریان الکترودها و مقدار استفاده از نانو مواد مغناطیسی پوشش‌دار شده تأثیر معنی‌داری بر اغلب ویژگی‌ها دارند. در سطوح حداقل جریان الکترودها و زمان پرس، تأثیر حضور نانو مواد کاملاً مشهود بود ولی در سطوح حداکثر این دو متغیر، با تشدید گرمادهی و ایجاد سوختگی در لایه‌ها، اثر نانو مواد نیز پنهان و غیرمعنی‌دار می‌گردد. ایجاد تغییر رنگ و سوختگی موجب تخریب اتصالات چوب-چسب شده و باعث جدایش لایه‌ها از یکدیگر شد و این مسئله عاملی مهم در کاهش چشمگیر مقاومت‌ها بود. البته در این شرایط به‌دلیل کاهش ماهیت آبدوستی لایه‌ها، مقدار ویژگی جذب آب کاهش محسوسی نشان داد. عامل مهم دیگر در کاهش مقاومت‌ها را می‌توان به محدود شدن نفوذ چسب در لایه‌های چوب تحت تأثیر گرمادهی رادیو فرکانس و افزایش سریع گرانش چسب مرتبط دانست [۲۴-۲۲]. با استفاده از مدل‌های به‌دست آمده و با توجه به اولویت‌های مدنظر برای مقادیر ویژگی‌ها و محدودیت‌های فرآیند ساخت، بهینه‌سازی سطوح متغیرها با استفاده از نرم‌افزار Design Expert انجام شد و ترکیب با بیشترین درجه مطلوبیت انتخاب و تعداد سه تخته طبق جزئیات شرایط بهینه ساخته شد. با مقایسه مقادیر واقعی ویژگی‌های خمشی با مقادیر حاصل از پیش‌بینی مشخص گردید که مدل‌های برازش یافته در تخمین مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته ظاهری به‌ترتیب با ۲۵ و ۱۸ درصد خطا همراه خواهند بود. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از نانومواد پوشش‌دار می‌تواند موجب گرمادهی مؤثر و بهینه در پرس‌های رادیو فرکانس گردد، مشروط بر اینکه سطوح جریان الکترودها و زمان پرس نیز در شرایط بهینه تنظیم گردند. به‌عبارت دیگر، در حضور نانومواد مغناطیسی، عدم بکارگیری از جریان بالا (۰/۶ آمپر) در الکترودها، مصرف انرژی کمتر را به‌دنبال خواهد داشت و با کاهش زمان پرس علاوه بر ممانعت از تغییر رنگ و سوختگی لایه‌ها، می‌توان به بازدهی بالاتر در تولید محصول دست یافت. نکته قابل توجه در این مطالعه، تغییر وضعیت نانو ذرات مغناطیسی در شرایط پرس رادیو فرکانس بود که موجب تشکیل کلوخه‌هایی با

قطر میکرومتری گردید. ماهیت این شیوه از گرمادهی و جنبش مولکولی اجتناب‌ناپذیر، می‌تواند دلیلی بر تغییر حالت این ذرات و از بین رفتن پوشش پیرامون آن باشد. علی‌رغم ایجاد کلوخگی، وجود ذرات مغناطیسی در بستر چسب، بر جذب امواج و بهبود توزیع گرما در خطوط چسب تأثیر مشخص و معنی‌داری داشته است.

سپاسگزاری

از شرکت محترم چوب سنگ سناباد و مدیر محترم مجموعه به دلیل حمایت در انجام این پژوهش و فراهم نمودن تجهیزات و لازمه‌های این تحقیق صمیمانه قدردانی می‌گردد.

۵. منابع

- [1] Bartoszek, K. & Kowaluk, G. (2024). Utilization of Fibrous Mat Residues from Upholstered Furniture as Sustainable Fillers in Plywood Production. *Materials*, 17(16), 4080.
- [2] Tusar, M.A., Zubair, A.A. & Akanda, M.A.S. (2024). Study of Mechanical Properties of Plywood and Its Application in Furniture. In Proceedings of the 14th International Conference on Mechanical Engineering (ICME 2023).
- [3] Bhushan, B. (2017). Introduction to nanotechnology. Springer Handbook of Nanotechnology, pp. 1-19.
- [4] Cheng, H.N., Kilgore, K., Ford, C., Fortier, C., Dowd, M.K. & He, Z. (2019). Cottonseed protein-based wood adhesive reinforced with nanocellulose. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 33(12), 1357-1368.
- [5] Fritz, C. & Olivera, J.F. (2022). Nanocellulose in heterogeneous water-based polymerization for wood adhesives. *Polysaccharides*, 3(1), 219-235.
- [6] Terzi, E., Kartal, S. N., Yılğör, N., Rautkari, L. & Yoshimura, T. (2016). Role of various nano-particles in prevention of fungal decay, mold growth and termite attack in wood, and their effect on weathering properties and water repellency. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 107, 77-87.
- [7] Sutrisno, Alamsyah, E.M., Syamsudin, T.S., Purwasmita, B.S., Suzuki, S. & Kobori, H. (2020). The potential using of organic nanoparticles synthesized from Gmelina (*Gmelina arborea* Roxb.) wood bark as nanofiller of wood adhesive: Physical, chemical and thermal properties. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 17(2), 165-175.
- [8] Taghiyari, H.R. & Farajpour, B.O. (2013). Effect of copper nanoparticles on permeability, physical, and mechanical properties of particleboard. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(1), 69-77.
- [9] Cheng, L., Ren, S. & Lu, X. (2020). Application of eco-friendly waterborne polyurethane composite coating incorporated with nano cellulose crystalline and silver nano particles on wood antibacterial board. *Polymers*, 12(2), 407.
- [10] Mashkour, M., Tajvidi, M., Kimura, T., Kimura, F. & Ebrahimi, G. (2011). Fabricating unidirectional magnetic papers using permanent magnets to align magnetic nanoparticle covered natural cellulose fibers. *BioResources*, 6(4), 4731-4738.
- [11] Hou, Y., Chen, J., Pan, D. & Zhao, L. (2023). Directional-Freezing-Assisted In Situ Sol–Gel Strategy to Synthesize High-Strength, Fire-Resistant, and Hydrophobic Wood-Based Composite Aerogels for Thermal Insulation. *Gels*, 9(2), 170.
- [12] Wu, C., Shen, Y., Chen, M., Wang, K., Li, Y. & Cheng, Y. (2018). Recent Advances in Magnetic-Nanomaterial- Based Mechanotransduction for Cell Fate Regulation. *Advanced Materials*, 30(17), 1705673.
- [13] Rios, A., & Zougagh, M. (2016). Recent advances in magnetic nanomaterials for improving analytical processes. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 84(Part A), 72-83.
- [14] Zhang, Y.H., Gu, J.Y., Tan, H.Y., Zhud, L.B. & Di, M.W. (2010). Preparation of the plywood using UF resin modified with blocked isocyanates. *Advanced Materials Research*, 129, 445-447.
- [15] Alabduljabbar, H., Alyousef, R., Gul, W., Shah, S.R.A., Khan, A., Khan, R. & Alaskar, A. (2020). Effect of alumina nano-particles on physical and mechanical properties of medium density fiberboard. *Materials*, 13(18), 4207.

- [16] Moslemi, A., Behzad, T. & Pizzi, A. (2020). Addition of cellulose nanofibers extracted from rice straw to urea formaldehyde resin; effect on the adhesive characteristics and medium density fiberboard properties. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 99, 102582.
- [17] Xu, J., Han, G., Wong, E. D., & Kawai, S. (2003). Development of binderless particleboard from kenaf core using steam-injection pressing. *Journal of Wood Science*, 49, 327-332.
- [18] Xu, J., Sugawara, R., Widyorini, R., Han, G. & Kawai, S. (2004). Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. *Journal of Wood Science*, 50, 62-67.
- [19] Bedeleian, B. (2018). Application of artificial neural networks and Monte Carlo method for predicting the reliability of RF phytosanitary treatment of wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(4), 1113-1120.
- [20] Schiffmann, R.F. (2020). Microwave and dielectric drying. In Handbook of industrial drying (pp. 345-372). CRC press.
- [21] Pungs, L. & Lamberts, K. (1962). On the economy of hardening thick and light particle board by radio frequency heating. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 20, 49-51.
- [22] Sernek, M., Resnik, J. & Kamke, F. A. (1999). Penetration of liquid urea-formaldehyde adhesive into beech wood. *Wood and Fiber Science*, 41-48.
- [23] Kamke, F.A. & Lee, J.N. (2007). Adhesive penetration in wood—a review. *Wood and Fiber Science*, 205-220.
- [24] Johnson, S.E. & Kamke, F.A. (1992). Quantitative analysis of gross adhesive penetration in wood using fluorescence microscopy. *The Journal of Adhesion*, 40(1), 47-61.
- [25] Edalat, H., Thole, V. & Faezipour, M. (2021). Experimental study on correlation between adhesive penetration pattern and mechanical performances in oriented strand board. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(1), 59-74.
- [26] EN 310:1993. Wood-based panels - Determination of modulus of elasticity in bending.
- [27] BS EN 317: 1993. Particleboards and Fiberboards. Determination of Swelling in Thickness after Immersion in Water.
- [28] BS EN 320:2011. Particleboards and fiberboards. Determination of resistance to axial withdrawal of screws.
- [29] ASTM-D3499 - Standard Test Method for Toughness of Wood-Based Structural Panels
- [30] Silva, L.C.L., Lima, F.O., Chahud, E., Christoforo, A.L., Lahr, F.A.R., Favaram, H.R. & de Campos, C.I. (2019). Heat transfer and physical-mechanical properties analysis of particleboard produced with ZnO nanoparticles addition. *BioResources*, 14(4), 9904-9915.
- [31] Mohammad Farajollah Pour, Hamidreza Edalat, Ali Dorieh, Mohammad Valizadeh Kiamahalleh, Mohammad Hassan Shahavi. (2022). Durability-related performance of reinforced bondline by phenol formaldehyde/nano SiO₂ composite in Laminated Veneer Lumber (LVL). *Journal of Building Engineering*, 60, 2022.