



Encapsulation of magnetic nanoparticles to achieve effective distribution in adhesive matrix and investigation its impact on adhesive bondline shear strength

Hamidreza Edalat^{1*} | Shayan Rouhi² | Taghi Tabarsa³

1. 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
2. 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
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: 09 July 2026

Revised: 21 August 2026

Accepted: 08 August 2026

Published online: 14 September 2026

Keywords:

Adhesive rheology,
Agglomeration,
Bonding evaluation,
High frequency heating,
Shear strength development,
Urea formaldehyde.

ABSTRACT

Introduction: Development new adhesives and modification of common adhesives are two main fields for wood-based composite studies. Usually, in order to evaluate adhesive performance, some products are made according to certain treatments that increase the research costs and time. The alternative method is the evaluation of strength and rheology properties on a smaller scale but at higher speed and precision in which the adhesive is applied in tiny amounts on smaller samples and hot pressing is done with high accuracy. This technique is performed by an Automated Bonding Evaluation System (ABES) according to a standard method.

Method: In this study it was required to modify UF resin by adding nano-magnetic particles to use in plywood production in high frequency heating process. To prevent nano particle aggregation, encapsulation technique for the particles was applied. For this purpose, three types of material, including starch, PEG and Acacia gum were used under various mixing conditions. Then, the performance of the mixing method and material type was controlled qualitatively via visual inspection. After that, 20% of different suspensions were added to UF and the gel time of the modified adhesives were obtained with the Adhesive Bonding and Rheology Evaluating System and compared to each other. After determination of appropriate composition, another investigation was done to obtain shear strength development isothermal graphs as a function of press time. For this purpose lap-joint samples of Beech strands with 0.6 mm thickness and 20×5 mm² area, were made under compositions of press temperature and time as variables in three levels of 80, 100 and 120 °C and five levels of 40, 60, 80, 100 and 120 s respectively. Then, the shear strength of them was tested with tension loading system. By investigating the obtained graphs, the trend of shear strength development due to press time and press temperature were determined in different adhesive compositions and the optimum one was selected. In the final stage, to investigate the effect of the encapsulated nano particles load in the adhesive matrix, different levels (0%, 4%, 8%, 12%, 16%, 20% and 24%) of selected compound were added to UF resin. Lap-joints were made similar to those in previous stage but with the optimum temperature and time conditions (100 °C press temperature and 90 s press time), and the shear strength was measured on the specimens.

Results: The results showed that the type of encapsulating material has certain effect on the uniform distribution of particles as well as gelation time, and among the three applied encapsulation materials, starch had the best performance. With the presence of encapsulated nano-magnetic particles in UF, the bondline shear strength improved. The amount of this increase compare to pure UF was obtained 2.2%, 5.96%, 8.2%, 7.3%, 9.4% and 8.92% respectively for treatments with 4%, 8%, 12%, 16%, 20% and 24% encapsulated nano-magnetic particles. The isothermal graphs of shear strength development of the modified adhesive showed that the relation between press time and strength was linear until 80 s and then became nonlinear.

Conclusion: This study found that the encapsulation of nano-magnetic particles with starch could lead to uniform suspension without accumulation and their presence in UF matrix up to 24% based on adhesive solid mass, didn't have a negative influence on the shear strength of the bondline. Application of this suspension not only caused no disruption to UF curing but also reduced the time of this process compared to pure resin.

Cite this article: Edalat, H.R., Rouhi, S.H., Tabarsa, T. (2026). Encapsulation of magnetic nanoparticles to achieve effective distribution in adhesive matrix and investigation its impact on adhesive bondline shear strength. *Journal of Forest and Wood Products*, 79 (2), 203-218. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2026.418185.1403>



پوشش‌دار کردن نانوذرات مغناطیسی به منظور پراکنش مؤثر در ماتریس چسب و بررسی اثر آن بر مقاومت برشی خط چسب

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

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

اطلاعات مقاله

چکیده

مقدمه: توسعه چسب‌های جدید و اصلاح چسب‌های رایج دو زمینه اصلی مطالعات چندسازه‌های چوبی است. معمولاً برای ارزیابی عملکرد چسب چندین نمونه از محصول در قالب تیمارهای مشخص ساخته می‌شود که علاوه بر افزایش هزینه تحقیق، به زمان طولانی‌تری هم نیاز دارد. روش جایگزین ارزیابی خواص مقاومتی و رئولوژیکی چسب در مقیاسی کوچکتر با سرعت و دقت به مراتب بالاتر بوده که در آن چسب در مقادیر جزئی برای اتصال مواد چوبی با مقیاس کوچکتر اعمال و فرآیند پرس با دقت بالا انجام و کنترل می‌گردد. این تکنیک با استفاده از سیستم ارزیابی چسبندگی چسب و طبق استاندارد صورت می‌گیرد.

نوع مقاله:

پژوهشی

روش پژوهش: در این مطالعه لازم بود که چسب اوره فرم‌آلدهید از طریق اضافه نمودن نانومواد مغناطیسی برای ساخت تخته‌لایه در فرآیند گرمادهی رادیوفرکانس اصلاح شود. به‌منظور ممانعت از تشکیل توده‌ها و کلوخگی نانوذرات، از تکنیک پوشش‌دار کردن ذرات با سه نوع ماده نشاسته، پلی‌اتیلن گلیکول و صمغ عربی تحت شرایط اختلاط متنوع استفاده شد. سپس عملکرد شیوه اختلاط و نوع مواد با روش بصری و به‌طور کیفی کنترل شد. پس از این مرحله سوسپانسیون‌های مختلف فوق به‌میزان ۲۰ درصد به چسب اوره فرم‌آلدهید اضافه شده و زمان ژله‌ای شدن چسب‌ها با استفاده از سیستم ارزیابی چسبندگی و رئولوژی چسب به‌دست آمد و با یکدیگر مقایسه شدند. پس از مشخص شدن ترکیب منتخب، آزمایش دیگری برای به‌دست آوردن نمودارهای توسعه مقاومت برشی اتصالات همپوشان به‌صورت هم‌دما و به‌صورت تابعی از زمان پرس انجام شد. برای این منظور نمونه‌های همپوشان شامل دو تراشه راش به ضخامت ۰/۶ میلی‌متر و سطح تماس ۲۰ در ۵ میلی‌متر تحت ترکیبی از متغیرهای دما و زمان پرس به‌ترتیب در سه سطح ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و پنج سطح ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ ثانیه ساخته شدند. سپس از طریق سیستم بارگذاری کششی مقدار مقاومت برشی آنها محاسبه شد. با بررسی نمودارهای حاصل، روند افزایش مقاومت برشی اتصالات تحت تأثیر دما و زمان در ترکیب‌های مختلف چسب مشخص و ترکیب بهینه انتخاب شد. در مرحله پایانی به‌منظور ارزیابی تأثیر مقدار سوسپانسیون نانوذرات پوشش‌دار شده در ماتریس چسب، مقادیر مختلفی از سوسپانسیون نانومواد منتخب (۰، ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۴ درصد) به چسب اوره فرم‌آلدهید اضافه و نمونه‌های همپوشان مانند مرحله قبل با شرایط دمایی و زمان پرس بهینه (دمای پرس ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۹۰ ثانیه) ساخته و آزمون مقاومت برشی همانند روش قبلی بر روی نمونه‌ها انجام شد.

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۳

کلیدواژه:

ارزیابی چسبندگی،
اوره فرم‌آلدهید،
توسعه مقاومت برشی،
رئولوژی چسب،
کلوخه شدن،
گرمادهی رادیوفرکانس.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که نوع ماده پوشش‌دهنده تأثیر به‌سزایی در پراکنش نانوذرات مغناطیسی و زمان ژله‌ای شدن دارد و از بین سه نوع ماده استفاده شده، نشاسته بهترین عملکرد را داشت. با حضور سوسپانسیون نانومواد مغناطیسی پوشش‌دار شده توسط نشاسته در چسب اوره، مقاومت برشی خط چسب افزایش یافت؛ مقدار این افزایش برای سطوح ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۴ درصد سوسپانسیون نانومواد، به‌ترتیب معادل ۲/۲، ۵/۹۶، ۸/۲، ۷/۳، ۹/۴ و ۸/۹۲ درصد نسبت به مقدار مقاومت برشی چسب اوره فرم‌آلدهید خالص به‌دست آمد. نمودارهای هم‌دمای توسعه مقاومت برشی خط چسب اصلاح شده نشان داد که ارتباط زمان پرس با مقاومت تا زمان ۸۰ ثانیه به‌صورت خطی بوده و پس از آن به حالت غیر خطی تغییر می‌یابد.

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان داد پوشش‌دار کردن نانوذرات مغناطیسی توسط نشاسته منجر به ساخت سوسپانسیون یکنواخت و بدون تشکیل توده می‌شود و حضور این سوسپانسیون در ماتریس چسب اوره فرم‌آلدهید تا سطح ۲۴ درصد نسبت به جرم جامد چسب هیچ گونه تأثیر منفی بر مقاومت برشی خط چسب نخواهد داشت. استفاده از این سوسپانسیون نه تنها تداخلی در پلیمریزاسیون چسب اوره فرم‌آلدهید نداشت بلکه زمان این فرآیند را نسبت به چسب خالص کاهش داد.

استناد: عدالت؛ حمیدرضا، روحی؛ شایان، طبرسا؛ تقی (۱۴۰۵). پوشش‌دار کردن نانوذرات مغناطیسی به‌منظور پراکنش مؤثر در ماتریس چسب و بررسی اثر آن بر مقاومت برشی خط چسب.

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۹ (۲)، ۲۱۸-۲۰۳. DOI: <https://10.22059/jfwf.2026.418185.1403>

۱. مقدمه

یکی از زمینه‌های پر کاربرد در تحقیقات چندسازه‌های چوبی، مطالعات مربوط به چسب‌ها و اتصالات آن با چوب بوده است. توسعه چسب‌های جدید یا اصلاح چسب‌های رایج دو زمینه اصلی این مطالعات هستند. در فرآیند اصلاح چسب، ویژگی‌های چسب قبل و بعد از تیمار اصلاحی با آزمون‌های متنوعی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برخی از این ویژگی‌ها عبارتند از درصد جامدات^۱، گرانیوی^۲، زمان ژله‌ای شدن^۳، pH^۴ و چسبناکی^۵. در تحقیقات داخل کشور ارزیابی عملکرد چسب اغلب به ساخت تخته با استفاده از رزین شاهد و رزین اصلاح شده مورد مطالعه محدود می‌شود. به عبارت دیگر برای ارزیابی عملکرد چسب در اتصال یا چندسازه، لازم است که با استفاده از چسب اصلاح شده چند نمونه از آن محصول در قالب تیمارهای مشخص و تکرار کافی ساخته شود. این روش متأسفانه ایرادات اساسی مانند صرف هزینه قابل توجه برای ساخت کامپوزیت‌ها (اعم از هزینه مواد اولیه و هزینه‌های ساخت)، هزینه انجام آزمون‌ها در تعداد قابل توجه و در نهایت صرف زمان بیشتر برای انجام تحقیق است. رویکرد جایگزین در کشورهای توسعه‌یافته، ایجاد یک حلقه واسط بین مرحله آزمایشگاهی ساخت یا اصلاح چسب با مرحله ساخت چندسازه است. به عبارت دیگر پس از توسعه فرمولاسیون چسب، پیش از ورود به فاز ساخت چندسازه (تخته‌فیبر، تخته‌لایه، تخته‌خرده‌چوب، چندسازه‌های مهندسی و ...) خواص مقاومتی و رئولوژیکی چسب در مقیاسی کوچکتر با سرعت و دقت به مراتب بالاتر مورد آزمون قرار می‌گیرد. برای این هدف، لازم است چسب در مقادیر جزئی برای اتصال مواد چوبی با مقیاس کوچکتر اعمال و فرآیند پرس با دقت بالا انجام و کنترل گردد. به همین منظور در دهه ۹۰ میلادی یک روش آزمون دقیق و سریع توسط Humphrey ابداع و پس از آن انتشار نتایج تحقیقات با آن آغاز شد [۱، ۲] و در نهایت در قالب استاندارد ASTM D7998 به جامعه صنعت و تحقیقات معرفی شد [۳]. این روش یک سیستم خودکار برای ارزیابی چسبندگی^۶ (ABES) است که از دو بخش اصلی تشکیل شده است؛ پرس گرم مینیاتوری بسیار دقیق با مساحت صفحات ۵ تا ۶ سانتی‌متر مربع با قابلیت اعمال فشار و دما با محدوده قابل تنظیم و بخش دوم یک دستگاه کوچک آزمون مکانیک است که توانایی بارگذاری کششی با سرعت قابل تنظیم و با دقت بالا برای ثبت نیرو را دارد. در این روش برای هر ترکیب چندین تیمار متشکل از دما و زمان‌های مختلف تعریف می‌گردد. مقادیر بسیار ناچیز از ترکیب چسب بر روی سطوح یک جفت تراشه نازک چوب با گونه مشخص پرینت یا اسپری شده و به صورت همپوشان^۷ در پرس مذکور قرار داده می‌شود و نمونه مورد نظر ساخته می‌شود (شکل ۱). در مرحله بعد پس از خنک‌سازی توسط بخش دوم دستگاه و با اعمال نیروی کششی به دو سر نمونه، اتصال چسب تحت تنش برشی قرار گرفته و می‌شکند. با ثبت داده حاصل از بارگذاری، نمودار نیرو و جابجایی هر آزمون رسم شده و مقاومت برشی اتصال با استفاده از حداکثر نیروی اعمال شده و مساحت بخش همپوشان محاسبه و ثبت می‌گردد. پس از اخذ داده، نمودار توسعه مقاومت چسب در دما و زمان‌های مختلف رسم شده و مدل آن برازش داده می‌شود. با استفاده از این نمودار می‌توان دما و زمان بهینه برای انعقاد رزین در مجاورت چوب را به دست آورد. علاوه بر آن می‌توان نمودار مربوط به ترکیب چسب‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه نمود و ترکیب بهینه را با توجه به مقاومت برشی، دما و زمان پرس انتخاب نمود.



شکل ۱. نمونه همپوشان (Lap-Joint) ساخته شده براساس استاندارد ASTM D7998

¹ Solid Content

² Viscosity

³ Gel Time

⁴ Potential of Hydrogen

⁵ Tack

⁶ Automated Bonding Evaluation System (ABES)

⁷ Lap-Joint

با داشتن این نتایج دیگر نیازی به ساخت تخته یا کامپوزیت با ترکیب‌های مختلف چسب، نیست و می‌توان تنها به تیمارهای برتر بسنده نمود و از این طریق در صرف وقت، هزینه و انرژی به شکل بسیار مؤثر صرفه‌جویی نمود. گاهی اوقات چسب حاصل پتانسیل کافی برای ساخت کامپوزیت را نداشته و می‌توان بدون ساخت تخته به این مسئله در زمان بسیار کوتاه و با هزینه کمتر پی برد [۴]. از مزایای دیگر این روش، امکان انجام تیمارها در تکرارهای متعدد و با استفاده از مقادیر ناچیز چسب بوده که باعث بالارفتن دقت نتایج بدون ازدیاد هزینه‌ها می‌گردد. سیستم ABES به‌عنوان روشی مطمئن، تکرارپذیر و کم‌هزینه برای پژوهش‌های بنیادی و کاربردی در زمینه چسب‌های چوب شناخته می‌شود و به‌طور گسترده به‌عنوان ابزاری ضروری برای غربال‌گری اولیه و بهینه‌سازی فرمولاسیون چسب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴-۶]. جدول ۱ به‌طور خلاصه تحقیقات انجام گرفته با ABES در سه دهه اخیر را نشان می‌دهد:

جدول ۱. خلاصه تحقیقات انجام شده با استفاده از ABES به‌همراه موضوع مطالعه [۱،۲،۷،۸،۹،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳،۱۵،۱۶،۱۷،۱۸،۱۹]

سال	نویسندگان	موضوع مطالعه/نوع چسب	تمرکز تحقیق
۱۹۸۹	Zavala و Humphrey	معرفی سیستم	اولین انتشار رسمی برای معرفی ABES
۱۹۹۰	Humphrey	US. Patent	اعلان ثبت اختراع سیستم ABES
۲۰۰۳	Lecourt و همکاران	چسب تانن میموزا	مقایسه نتایج ABES با DMA
۲۰۰۴	Smith	pMDI	مطالعه مقاومت برشی در تراشه‌های OSB
۲۰۰۵	Humphrey	UF, MUF	بررسی همبستگی ABES با عملکرد واقعی پانل
۲۰۰۷	Lee و Kamke	UF, PF	تحلیل قابلیت‌های ABES، راهنمایی روش‌شناسی
۲۰۰۷	Mansouri و همکاران	لیگنین	استفاده از ABES برای چسب‌های زیست‌پایه
۲۰۰۸	Lei و همکاران	تانن و لیگنین	ارزیابی رفتار پخت سریع چسب‌های پایدار
۲۰۱۳	Martins و همکاران	UF	ارزیابی چسبندگی در مواد لیگنوسولوزی متفاوت
۲۰۱۶	Ruonen و همکاران	خودچسبندگی	ارزیابی مقاومت برشی لایه‌های گونه توس
۲۰۱۶	Frihart و همکاران	چسب سویا	ارزیابی تأثیر دمای پرس بر مقاومت چسب در حالت مرطوب
۲۰۲۰	Lorenz و Frihart	چسب چوب	ارزیابی توسعه مقاومت خودچسبندگی چسب
۲۰۲۵	Silveira و همکاران	چسب نشاسته	ارزیابی تأثیر سخت کننده بر چسب نشاسته دی‌آلدئید
۲۰۲۵	Fašalek و همکاران	pMDI	مطالعه توسعه مقاومت اتصال

در این مطالعه به اصلاح چسب از طریق نانومواد مغناطیسی پرداخته شد. هدف این تکنیک فراهم نمودن امکان جذب انرژی امواج الکترومغناطیسی در فرآیند گرمادهی رادیوفرکانس می‌باشد. این روش گرمادهی یکی از روش‌های اصلی در تولید تخته‌لایه-های فرم‌دار است که به‌واسطه وزن کم و استحکام بالا، به‌طور وسیعی در صنعت مبلمان و دکوراسیون استفاده می‌شوند. از آنجا که مکانیسم گرمادهی در روش رادیوفرکانس براساس جنبش‌ها و اصطکاک بین مولکولی است و این مسئله توسط امواج الکترومغناطیسی ایجاد می‌گردد، بهبود عملکرد چسب در جذب این امواج تأثیر بسیار مهمی در سرعت گرم شدن و پلیمریزاسیون چسب خواهد داشت. استفاده از نانومواد مغناطیسی می‌تواند پتانسیل چسب برای این منظور را افزایش دهد ولی به‌دلیل انرژی سطحی بالای این مواد و برهمکنش‌های دوقطبی-دوقطبی، با چالش تشکیل توده‌ها و کلوخگی^۱ همراه است [۲۰،۲۱]. در این مطالعه تلاش شد که نانومواد مغناطیسی به حالت پوشش‌دار شده^۲ تبدیل شوند که پایداری لازم در ماتریس چسب اوره فرم‌آلدئید را داشته باشند [۲۲].

برای پوشش‌دار کردن از مواد متعددی استفاده شد و بهترین ترکیب برای ایجاد این پوشش با توجه به وضعیت پراکنش نانوذرات

^۱ Agglomeration

^۲ Encapsulated

در ماتریس چسب و مطالعه رئولوژی چسب در زمان انعقاد انتخاب شد. سپس به منظور مشخص نمودن دما و زمان بهینه پلیمریزاسیون چسب اصلاح شده با ترکیب منتخب، و همچنین مشخص نمودن تأثیر مقدار این مواد در ماتریس، تغییرات مقاومت برشی خط چسب مورد مطالعه قرار گرفت.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. پوشش‌دار کردن نانوذرات

برای ساخت نانو مواد مغناطیسی مورد نظر از نانو ذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) عرضه شده توسط شرکت Finenano آمریکا استفاده شد (جدول ۲). از آنجا که نانومواد مذکور تمایل به جذب یکدیگر و تشکیل توده‌های بزرگتر دارند، ایجاد پوشش بازدارنده متشکل از مواد غیر فلزی امری ضروری است. این مواد قادر خواهند بود با تشکیل لایه‌ای نازک و مولکولی پیرامون نانوذرات، از کلوخه شدن آنها جلوگیری نمایند. به منظور پوشش‌دار نمودن از سه نوع ماده شامل نشاسته، پلی اتیلن گلیکول^۱ و صمغ عربی^۲ (حاصل از اقاقایب سینگال) استفاده شد که ویژگی‌های آنها به شرح جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۲. ویژگی‌های نانو ذرات اکسید آهن (Fe_3O_4)

اندازه ذرات (نانومتر)	سطح ویژه (گرم بر سانتی متر مربع)	رنگ	مورفولوژی	خلوص (درصد)	دانسیته حقیقی (گرم بر سانتی متر مکعب)	دانسیته ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)
۲۰-۳۰	۴۰-۶۰	سیاه	کروی	۹۸	۴/۸-۵/۱	۰/۸۴

جدول ۳. ویژگی‌های مواد پوشش‌دهنده مورد استفاده

ماده پوشش‌دهنده	منشأ	برند	خلوص (درصد)	رطوبت (درصد)	شکل ظاهری	pH محلول ۲ درصد
نشاسته	گیاهی-ذرت	Chem lab بلژیک	۹۹	۱۰	پودری-سفید	۶-۷/۵
پلی اتیلن گلاکول	نفتی، گرید دارویی	سپیداج-ایران	۹۹	۲	گرانول سفید	۵/۵-۷
صمغ عربی	گیاهی-شیره آکاسیا	Alland & Robert فرانسه	۹۸	۵	پودر-صورتی کمرنگ	۵/۲-۶

مواد پوشش‌دهنده به شکل پودر و گرانول تهیه شد و لازم بود به حالت سوسپانسیون درآیند. سوسپانسیون انتخابی از نوع آبی بود و سازگاری لازم را با چسب‌های صنعتی رایج در صنعت (رزین‌های آمینوپلاست) داشت. مسئله غلظت سوسپانسیون مواد پوشش‌دهنده اهمیت زیادی در پوشش‌دار شدن نانو مواد داشته و معمولاً در غلظت‌های بالا این مسئله با مشکل مواجه می‌گردد. پروسه تشکیل سوسپانسیون شامل چندین مرحله بود که برای تیمارهای مختلف و هرکدام از مواد به تفکیک در جدول‌های ۴ تا ۶ ارائه شده است. تکنیک‌های اختلاط شامل همزن مغناطیسی، همزن مکانیکی سریع و همزن اولتراسونیک بود. به این صورت که ابتدا پودر مواد به مقدار لازم برای رسیدن به غلظت مشخص به آب مقطر در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد اضافه شد و توسط همزن مغناطیسی (طبق جدول ۴ با سرعت چرخش معین و تحت زمان و دمای مورد نظر) مخلوط شد. پس از دستیابی به محلولی یکنواخت، مقدار مورد نیاز از نانوذرات مغناطیسی برای رسیدن به غلظت مورد نظر این مواد در ترکیب به محلول اضافه شده و با همزن مغناطیسی با سرعت و زمان معین (طبق جدول ۴) همگن شد. سوسپانسیون حاصل به منظور همگن‌سازی پوشش‌دهی و یکنواخت‌سازی توزیع ذرات حداقل دو مرحله دیگر توسط همزن اولتراسونیک با توان، زمان کل، مدت تحت بار و مدت استراحت متفاوت (طبق جدول ۴) همگن‌سازی شدند.

پس از تشکیل سوسپانسیون حاوی نانوذرات و مواد پوشش‌دهنده، عملکرد شیوه اختلاط و نوع مواد با روش بصری و به‌طور

^۱ Polyethylene Glycol (PEG)

^۲ Acacia Gum (AG)

کیفی کنترل شد. علاوه بر وضعیت سوسپانسیون که در حالت مطلوب به صورت پخش یکنواخت (عدم تشکیل رسوب و دو فاز شدن) در نظر گرفته شد، برای کنترل دقیق تر، ۲ سی سی از سوسپانسیون بر روی لام شیشه‌ای پخش و بررسی شد. به عبارت دیگر میزان تأثیر شیوه اختلاط از ظاهر سوسپانسیون بررسی شد و سوسپانسیون‌های پایدار بدون دو فاز شدگی و با رنگ خاکستری یکنواخت بر روی لام از سایرین قابل تشخیص بودند.

جدول ۴. تیمارهای اجرا شده با نشاسته به عنوان ماده پوشش دهنده

کد تیمار	مرحله	غلظت مواد در هر مرحله	شرایط اختلاط با همزن مغناطیسی/هموژنایزر			شرایط اختلاط با همزن اولتراسونیک		
			دما (درجه سانتی گراد)	سرعت (دور بر دقیقه)	زمان (دقیقه)	توان (وات)	زمان (دقیقه)	بار (ثانیه)
Sta1	۱	۵ درصد نشاسته	۸۵	۵۰۰	۶۰	-	-	-
	۲	۵/۵ درصد نشاسته و نانو مواد	۶۰	۵۰۰	۲۸۸۰	-	-	-
	۳	۵/۵ درصد نشاسته و نانو مواد	-	-	-	۱۰۰	۵	۱۰
	۴	۵/۵ درصد نشاسته و نانو مواد	-	-	-	۲۵۰	۵	۱۰
Sta2	۱	۵ درصد نشاسته	۸۵	۵۰۰	۶۰	-	-	-
	۲	۰/۵ درصد نانو مواد	۶۰	۵۰۰	۱۴۴۰	-	-	-
	۳	۵/۵ درصد نشاسته و نانو مواد	-	-	-	۱۰۰	۵	۱۰
	۴	۵/۵ درصد نشاسته و نانو مواد	-	-	-	۲۵۰	۵	۱۰
Sta3	۱	۵ درصد نشاسته	۸۵	۵۰۰	۶۰	-	-	-
	۲	۰/۵ درصد نانو مواد	۶۰	۵۰۰	۶۰	-	-	-
	۳	۵/۵ درصد نشاسته و نانو مواد	۵۰	۴۰۰*	۲	-	-	-
	۴	۵/۵ درصد نشاسته و نانو مواد	-	-	-	۱۰۰	۵	۱۰
	۵	۵/۵ درصد نشاسته و نانو مواد	-	-	-	۲۵۰	۵	۱۰

* استفاده از همزن سریع

جدول ۵. تیمارهای اجرا شده با PEG به عنوان ماده پوشش دهنده

تیمار	مرحله	غلظت مواد در هر مرحله	شرایط اختلاط با همزن			شرایط اختلاط با همزن اولتراسونیک		
			دما (درجه سانتی گراد)	سرعت (دور بر دقیقه)	زمان (دقیقه)	توان (وات)	زمان (دقیقه)	بار (ثانیه)
PEG1	۱	۵ درصد PEG	۸۵	-	-	-	-	-
	۲	۵ درصد PEG	۶۰	۵۰۰	۶۰	-	-	-
	۳	۰/۵ درصد نانو مواد	۶۰	۵۰۰	۱۲۰	-	-	-
	۴	۵/۵ درصد PEG و نانو مواد	-	-	-	۱۰۰	۵	۱۰
	۵	۵/۵ درصد PEG و نانو مواد	-	-	-	۲۵۰	۵	۱۰
PEG2	۱	۵ درصد PEG	۸۵	-	-	-	-	-
	۲	۵ درصد PEG	۶۰	۵۰۰	۶۰	-	-	-
	۳	۰/۵ درصد نانو مواد	۶۰	۵۰۰	۱۴۴۰	-	-	-
	۴	۵/۵ درصد PEG و نانو مواد	-	-	-	۲۵۰	۵	۶
	۵	۵/۵ درصد PEG و نانو مواد	-	-	-	۱۰۰	۵	۱۰
	۶	۵/۵ درصد PEG و نانو مواد	-	-	-	۲۵۰	۵	۱۰

جدول ۶. تیمارهای اجرا شده با صمغ عربی (AG) به عنوان ماده پوشش‌دهنده

تیمار	مرحله	غلظت مواد در هر مرحله	شرایط اختلاط با همزن / هموژنایزر				شرایط اختلاط با همزن اولتراسونیک			
			دما	سرعت	زمان	توان	زمان	بار	استراحت	
			(درجه سانتی‌گراد)	(دور بر دقیقه)	(دقیقه)	(وات)	(دقیقه)	(ثانیه)	(ثانیه)	
AG1	۱	۵ درصد AG	۸۵	-	-	-	-	-	-	-
	۲	۵ درصد AG	۸۵	۵۰۰	۱۲۰	-	-	-	-	-
	۳	۰/۵ درصد نانو مواد	۶۰	۵۰۰	۱۴۴۰	-	-	-	-	-
	۴	۵/۵ درصد AG و نانو مواد	-	-	-	۱۰۰	۵	۱۰	۵	-
	۵	۵/۵ درصد AG و نانو مواد	-	-	-	۲۵۰	۵	۱۰	۵	-
AG2	۱	۲ درصد AG	۸۵	-	-	-	-	-	-	-
	۲	۲ درصد AG	۸۵	۵۰۰	۶۰	-	-	-	-	-
	۳	۰/۵ درصد نانو مواد	۶۰	۵۰۰	۱۴۴۰	-	-	-	-	-
	۴	۲/۵ درصد AG و نانو مواد	-	-	-	۱۰۰	۵	۱۰	۵	-
	۵	۲/۵ درصد AG و نانو مواد	-	-	-	۲۵۰	۵	۱۰	۵	-

۲-۲. آماده‌سازی و ارزیابی چسب

در این بخش سوسپانسیون‌های نانوذرات مغناطیسی پوشش‌دار شده (حاوی ۰/۵ درصد نانو مواد مغناطیسی) به میزان ۲۰ درصد بر مبنای جرم جامد چسب با آن مخلوط شد. چسب مورد استفاده در این تحقیق از نوع چسب مایع اوره فرم‌آلدهید بود که از شرکت چسب سامد مشهد تهیه شد (جدول ۷).

جدول ۷. ویژگی‌های چسب اوره فرم‌آلدهید

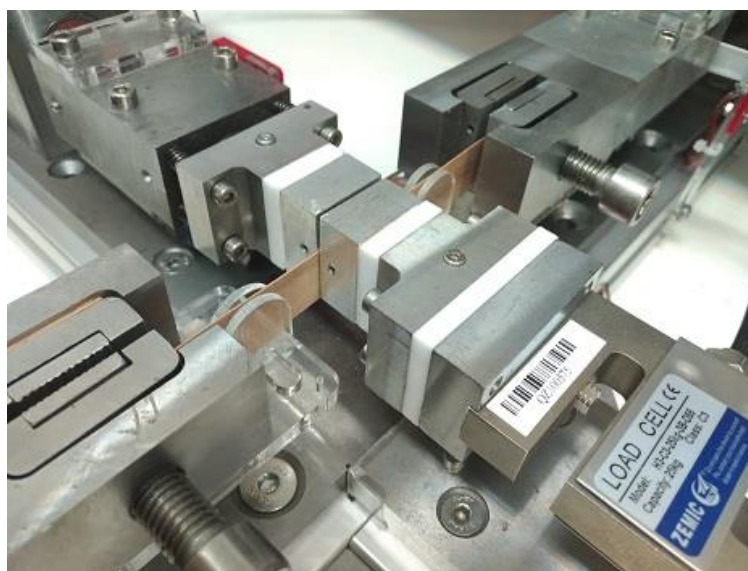
دانیسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	مواد جامد (درصد)	ویسکوزیته (سانتی‌پوز)	زمان ژله‌ای شدن (ثانیه)	pH
۱/۲۸	۵۸/۵	۳۰۰	۵۵	۷/۵

به منظور اختلاط سوسپانسیون نانومواد در ماتریس چسب، از همزن مکانیکی با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه استفاده شد. از کلرور آمونیوم به عنوان ماده سخت‌کننده به صورت محلول ۱۸ درصد و به میزان ۲ درصد جرم چسب جامد در سوسپانسیون نهایی استفاده شد و به مدت ۱ دقیقه مخلوط شد. هدف از انجام این بخش ارزیابی رئولوژی انعقاد به عبارتی تغییر ویسکوزیته تحت دمای پرس و زمان ژله‌ای شدن بود. برای ارزیابی‌های فوق از استاندارد ASTM D7998 [۳] و سیستم ارزیابی چسبندگی و رئولوژی چسب ABRES^۱ استفاده شد (شکل ۲).

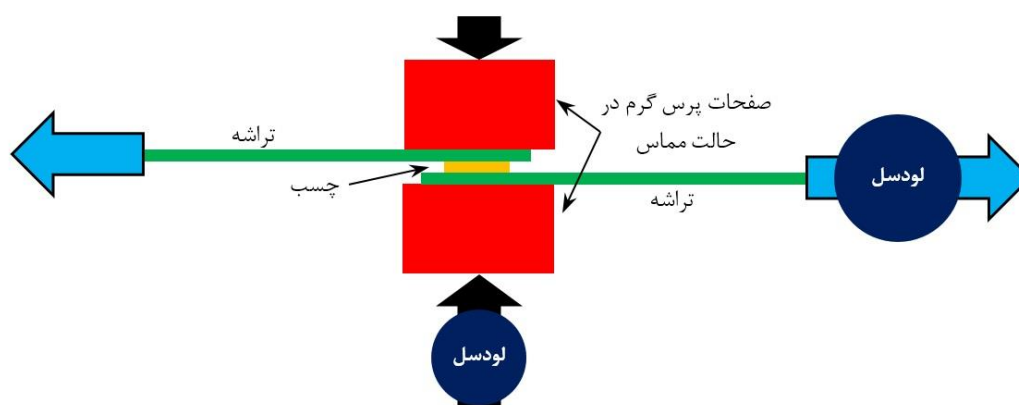
به منظور ثبت تغییرات ویسکوزیته چسب‌ها و زمان ژله‌ای شدن مقدار ۰/۵ گرم چسب با استفاده از ابزار مخصوص بر روی یک انتهای روکش چوب راش با طول ۱۱۰، عرض ۲۰ و ضخامت ۰/۶ میلی‌متر قرار داده شد. محل اعمال چسب در انتهای نمونه‌ها بود. سپس قطعه دیگری به صورت همپوشان بر روی محل چسب خورده با سطح اتصال به طول ۱۰ میلی‌متر و عرض ۲۰ میلی‌متر قرار گرفت و مجموعه دو قطعه روکش (تراشه) و چسب مابین آنها درون گیره‌های دستگاه گذاشته شد. در این مرحله صفحات پرس مینیاتوری دستگاه در حالت مماس با سطوح تراشه قرار گرفت و نیروی حداکثر برابر با ۲ نیوتن بر سطح تراشه‌ها وارد شد. در این زمان محور کشنده تراشه‌ها با سرعت معادل ۳ میلی‌متر بر دقیقه شروع به حرکت نمود. دمای پرس برابر با ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و با دقت ۰/۱ درجه کنترل و ثبت شد. در دستگاه ABRES امکان مشاهده و ثبت متغیرهای فرآیندی شامل دمای پرس، فشار پرس، مقدار جابجایی در محورهای پرس و کشش، نیروی موجود در محور کشش و زمان وجود داشت (شکل ۳). بر این اساس

^۱ Adhesive bonding and rheology evaluating system

مقادیر نیروی موجود در محور کشش دستگاه نیز با دقت ۱ نیوتن (۱۰۰ گرم) و میزان جابجایی نیز با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر ثبت شد. در این آزمایش چسب در مجاورت و در تماس واقعی با سطح چوب، تحت دمای بالا قرار گرفته و تغییرات ویسکوزیته آن از طریق تغییرات ثبت شده در مقادیر نیروی محور کشش در واحد زمان مشخص می‌شود. به بیان دیگر، افزایش ویسکوزیته چسب و رسیدن به زمان ژله‌ای شدن، با افزایش مقادیر نیروی برشی مابین دو تراشه خواهد بود که از طریق لودسل موجود در محور کشش دستگاه قابل اندازه‌گیری و ثبت است. برای هر آزمایش از ۳ تکرار استفاده شد و محدوده زمان ژله‌ای شدن چسب از طریق پیک موجود در نمودار میانگین نیرو-زمان (در محور کشش) به دست آمد [۳].



شکل ۲. پرس گرم نمونه‌های همپوشان و بارگذاری کششی توسط دستگاه ABRES



شکل ۳. شمایی از انجام آزمون ژل تایم توسط دستگاه ABES

۲-۳. ارزیابی توسعه مقاومت برشی خط چسب

برای این منظور آزمون مقاومت برشی خط چسب بر روی نمونه‌های همپوشان به صورت همدم^۱ برای چندین دما و زمان انجام شد و روند تغییرات آن به صورت تابعی از زمان برای دماهای مختلف به دست آمد. در این آزمون با استفاده از ابزار مخصوص مقادیری

^۱ Isothermal

از چسب بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۳ گرم از ترکیب منتخب براساس نتایج مشاهده کیفی و نتایج آزمون زمان ژله‌ای شدن بر روی ۵ میلی‌متری انتهای یک قطعه روکش راش با ابعاد مشابه مرحله قبل اعمال شد. مقدار سوسپانسیون نانومواد استفاده شده ۱۰ درصد بر مبنای جرم خشک چسب اوره تنظیم شد. سپس قطعه دیگر با رعایت همپوشانی به میزان ۵ میلی‌متر بر روی تراشه قبلی (آغشته به چسب) مونتاژ و درون دستگاه گذاشته شد. صفحات پرس مینیاتوری دستگاه با فشار ویژه ۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع دو تراشه را تا پایان زمان پرس تحت فشار قرار دادند. مکانیزم ویژه موجود در صفحات پرس هر گونه کاهش فشار پرس ناشی از افت تنش^۱ تراشه‌ها را جبران نموده و از این طریق میزان فشار پرس در طی پرس گرم به‌طور یکنواخت و ثابت کنترل شد. نمونه‌ها تحت ترکیبی از متغیرهای دما و زمان پرس در ۵ تکرار ساخته شده و مورد آزمون قرار گرفتند. دمای پرس در سه سطح ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد که با دقت ۰/۱ درجه تنظیم و کنترل شد. زمان پرس نمونه‌ها براساس نتایج بخش رئولوژی گیرایی چسب و در پنج سطح شامل ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ ثانیه انتخاب شد و با استفاده از نتایج مقاومت برشی حاصل، نمودار توسعه مقاومت^۲ برای هر دما (نمودارهای هم‌دما) ترسیم شد [۳]. پس از پایان زمان پرس، صفحات پرس از یکدیگر باز شده و نمونه ساخته شده توسط دمش هوا خنک‌سازی شد. در مرحله بعدی دو انتهای نمونه که توسط فک فولادی مخصوص مهار شده بودند، از طریق سیستم بارگذاری کششی، با سرعت ۷ میلی‌متر بر دقیقه حرکت نموده و متعاقباً خط چسب مابین دو تراشه تحت تنش برشی قرار گرفت. آزمون تا پایان شکست در نمونه پیش رفت و مقادیر مربوط به جابجایی و مقدار نیرو در محور کشش توسط سنسورهای مخصوص به‌ترتیب با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و ۱ نیوتن ثبت شد. مقدار مقاومت برشی نمونه‌ها به‌شرح زیر محاسبه شد:

$$\sigma_s = \frac{F_{max}}{A}$$

معادله ۱

 σ_s : مقاومت برشی خط چسب (مگاپاسکال) F_{max} : حداکثر نیرو در لحظه شکست (نیوتن) A : مساحت بخش همپوشان در اتصال (میلی‌متر مربع)

۲-۴. بررسی تأثیر مقدار نانومواد بر مقاومت برشی خط چسب

در این مرحله ترکیب‌های متنوعی از چسب اوره شامل اوره خالص و اوره حاوی سوسپانسیون نانومواد در شش سطح ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۴ درصد بر مبنای جرم چسب جامد آماده شد. کلرور آمونیوم نیز به‌صورت محلول ۱۸ درصد و به میزان ۲ درصد جرم چسب جامد استفاده شد. شرایط اختلاط همانند مرحله قبلی بود و پس از آماده‌سازی ترکیب‌های چسب، نمونه‌های همپوشان طبق استاندارد مذکور و مشابه مرحله قبل ولی با شرایط دمایی و زمانی ثابت ساخته شدند. به‌عبارت دیگر پرس نمونه‌ها با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۹۰ ثانیه برای همه ترکیب‌های چسب صورت گرفت. پس از خنک‌سازی آزمون مقاومت برشی نیز همانند روش قبلی بر روی نمونه‌ها انجام و نتایج ثبت شد. داده‌های به‌دست آمده توسط تجزیه واریانس یک‌طرفه در سطح ۹۵ درصد اطمینان تحلیل شد و برای مقایسه میانگین از آزمون توکی ($\alpha \leq 0.05$) استفاده شد. همچنین همبستگی بین داده‌های مقاومت برشی با زمان پرس برای هر کدام از سطوح دمایی مورد بررسی قرار گرفت.

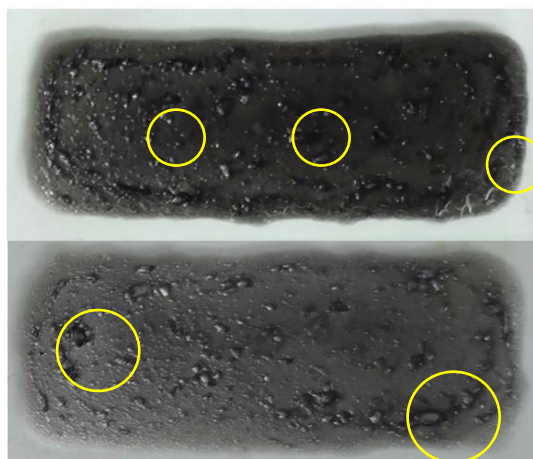
۳. یافته‌های پژوهشی و بحث

۳-۱. پراکنش نانوذرات پوشش‌دار شده

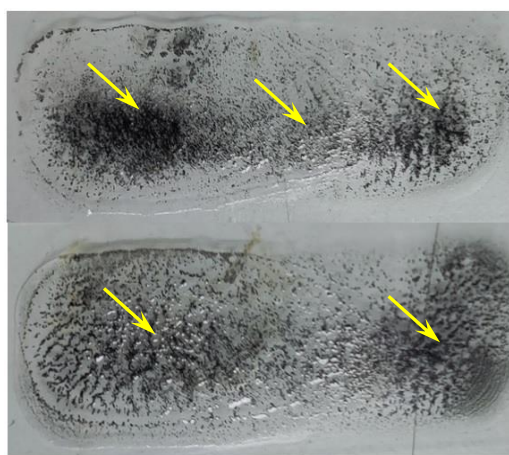
تصاویر سوسپانسیون‌های حاوی نانوذرات مغناطیسی پوشش‌دار شده در شکل‌های ۴ تا ۶ قابل مشاهده است. بررسی کیفی نمونه‌ها مشخص کرد که پوشش‌دار کردن نانوذرات توسط نشاسته نسبت به دو ماده دیگر نتیجه بخش بوده و توزیع بسیار بهتری در سوسپانسیون آبی ایجاد می‌نماید.

¹ Stress Relaxation

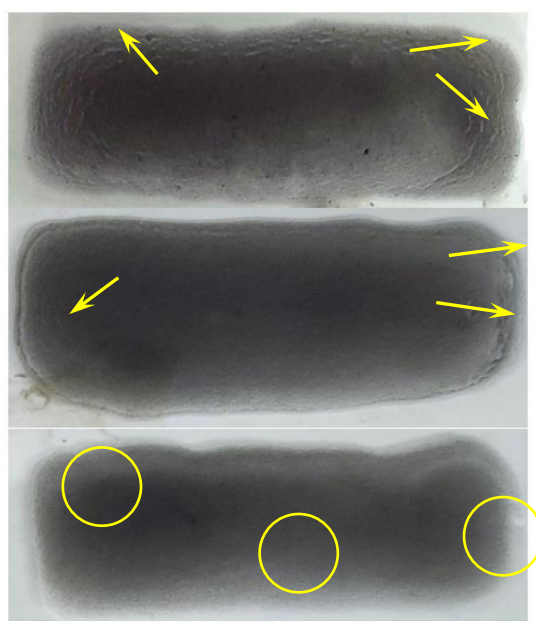
² Strength Development



شکل ۴. نمونه‌های تهیه شده از سوسپانسیون نانوذرات مغناطیسی پوشش‌دار شده با صمغ عربی (بالا: AG1، پایین: AG2)



شکل ۵. نمونه‌های تهیه شده از سوسپانسیون نانوذرات مغناطیسی پوشش‌دار شده با پلی‌اتیلن گلیکول (بالا: PEG1، پایین: PEG2)

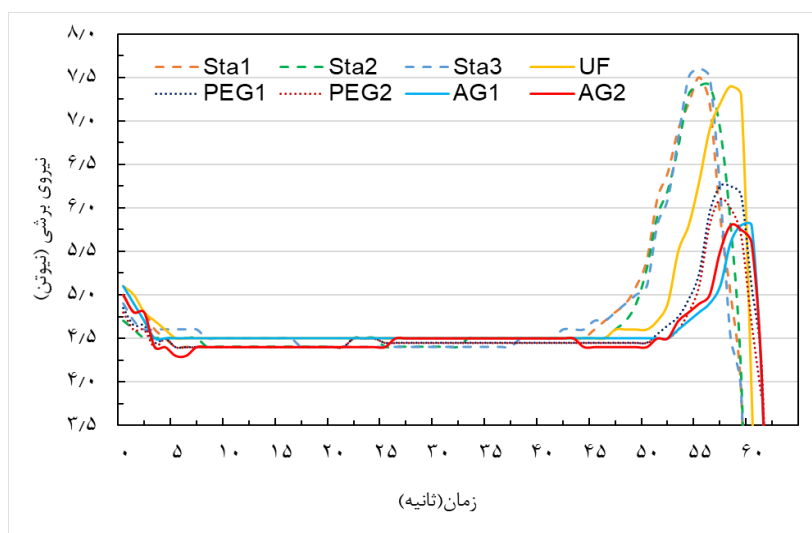


شکل ۶. نمونه‌های تهیه شده از سوسپانسیون نانوذرات مغناطیسی پوشش‌دار شده با نشاسته (بالا: Sta1، وسط: Sta2، پایین: Sta3)

مقایسه تیمارهای مختلف مربوط به نشاسته نشان داد که تیمار Sta3 که در زمان کوتاه‌تر و با بهره‌گیری از اختلاط مکانیکی با دور بالا انجام شد، نتیجه بهتری نسبت به دو تیمار دیگر داشته است.

۳-۲. زمان ژله‌ای شدن

شکل ۷ نمودار رئولوژی گیرایی (انعقاد) چسب اوره فرم‌آلدهید اصلاح شده توسط سوسپانسیون‌های مختلف نانومواد مغناطیسی پوشش‌دار شده را نشان می‌دهد. در این نمودار تغییرات نیروی برشی در محور عمودی وابسته به تغییرات گرانیوی رزین در اثر حرارت و زمان می‌باشد. به بیان دیگر پیک قابل مشاهده در نمودار بیانگر فرآیند ژله‌ای شدن رزین در مجاورت تراشه چوبی می‌باشد [۳].



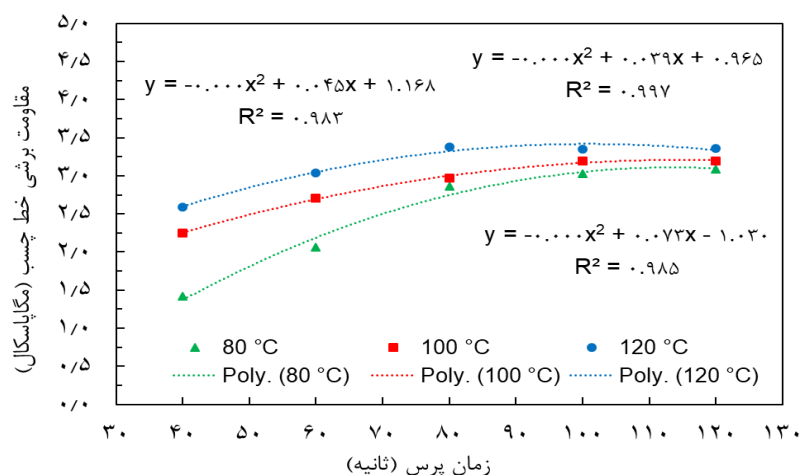
شکل ۷. نمودار زمان ژله‌ای شدن چسب اوره فرم‌آلدهید خالص و چسب حاوی نانومواد مغناطیسی پوشش‌دار شده

در خصوص رزین اوره خالص، پیک از ۵۰ ثانیه آغاز شده و تا ۵۸ ثانیه به حداکثر مقدار می‌رسد. در تیمارهای Sta1، Sta2 و Sta3 این پیک حدود ۴ ثانیه به سمت چپ جابجا شده است و ژله‌ای شدن رزین در زمان کوتاه‌تری رخ داده است. در مورد تیمارهای حاوی PEG و AG پیک به سمت راست جابجا شده و نشان‌دهنده طولانی‌تر شدن زمان ژله‌ای شدن است. تغییر ارتفاع پیک در این آزمون حاکی از تغییر مقاومت ذاتی چسب بوده که برای تیمارهای منتخب (پوشش‌دار شده با نشاسته) به‌طور گسترده در بخش مقاومت برشی مورد مطالعه قرار گرفت.

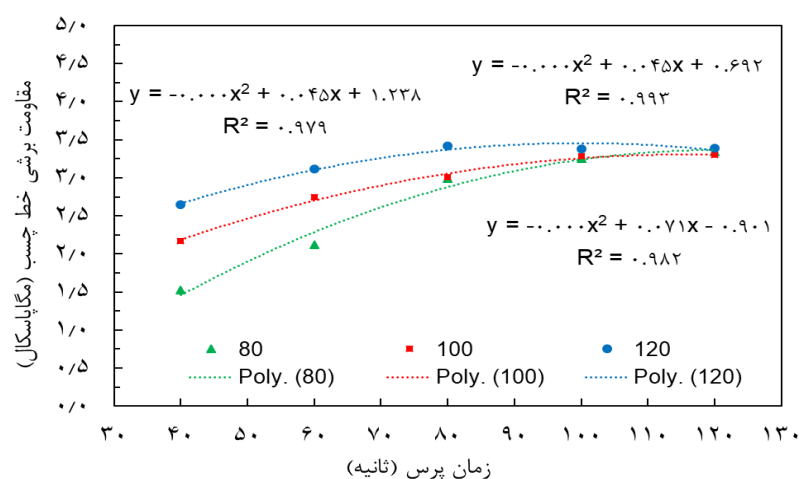
۳-۳. توسعه مقاومت برشی خط چسب

نمودارهای همدمای بیانگر تغییرات مقدار مقاومت برشی خط چسب در اثر زمان پرس هستند. مقدار مقاومت برشی خط چسب در نمونه‌های ساخته شده با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به سایر دماها پایین‌تر به‌دست آمد که دلیل آن عدم توسعه کامل شبکه سه بعدی بین مولکول‌های چسب می‌باشد. البته با افزایش زمان تا ۱۲۰ ثانیه مقدار این مقاومت در نمونه‌های ذکر شده بهبود می‌یابد (شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰). در نمونه‌های ساخته شده با دمای ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد مقدار مقاومت برشی افزایش و در اثر زمان پرس نیز توسعه یافت. البته تا زمان ۱۰۰ ثانیه، تغییرات مقاومت به‌طور صعودی بوده و پس از آن تغییر محسوسی قابل مشاهده نیست. در نهایت مشخص شد که با افزایش زمان پرس از اختلاف مقادیر مقاومت برشی نمونه‌های ساخته شده با دمای پرس متفاوت، کاسته می‌شود.

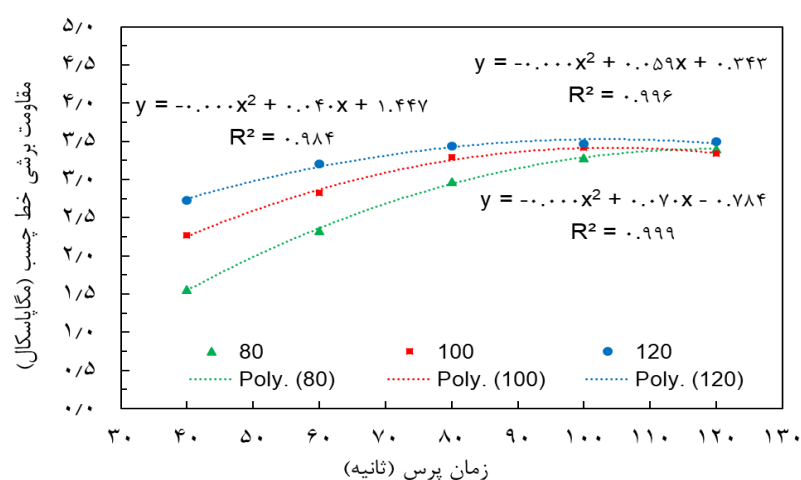
همچنین نتایج نشان دادند که ارتباط مقدار مقاومت برشی خط چسب با زمان پرس غیر خطی بوده و از تابع درجه دوم پیروی می‌کند. البته نمودارها نشان می‌دهند تا زمان ۸۰ ثانیه ارتباط فوق خطی بوده و با بیشتر شدن زمان روند تغییر می‌کند.



شکل ۸. نمودارهای هم‌دمای ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، مربوط به توسعه مقاومت برشی خط چسب اوره فرم‌آلدهید حاوی نانومواد مغناطیسی پوشش‌دار شده براساس تیمار Sta1



شکل ۹. نمودارهای هم‌دمای ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، مربوط به توسعه مقاومت برشی خط چسب اوره فرم‌آلدهید حاوی نانومواد مغناطیسی پوشش‌دار شده براساس تیمار Sta2

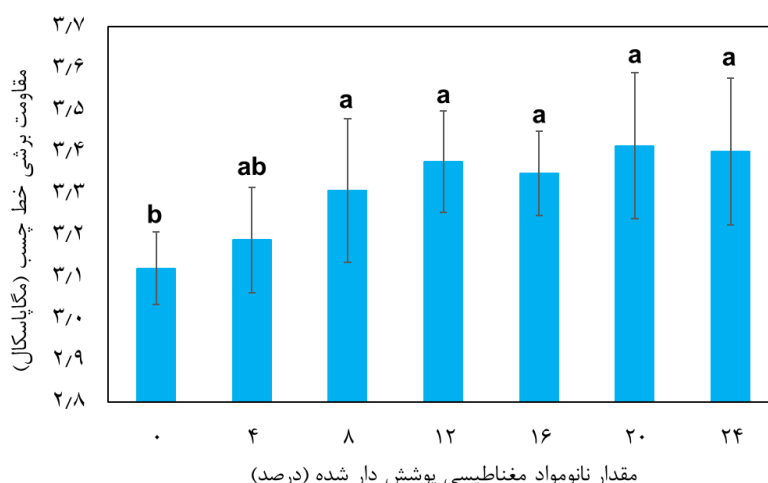


شکل ۱۰. نمودارهای هم‌دمای ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، مربوط به توسعه مقاومت برشی خط چسب اوره فرم‌آلدهید حاوی نانومواد مغناطیسی پوشش‌دار شده براساس تیمار Sta3

مقایسه نمودار توسعه مقاومت برشی خط چسب مربوط به چسب حاوی نانومواد مغناطیسی پوشش‌دار شده با روش‌های Sta1، Sta2 و Sta3 بیانگر این مسئله است که شیوه اختلاط در فرآیند پوشش‌دار کردن نانوذرات مغناطیسی توسط نشاسته، تأثیری بر مقاومت برشی خط چسب نداشته است و مقادیر و روند تغییرات تیمارهای مختلف مشابه یکدیگر به دست آمد. بنابراین برای انتخاب تیمار بهینه می‌توان صرفاً به زمان آماده‌سازی سوسپانسیون نانومواد و کیفیت پراکنش آنها بسنده نمود. به همین دلیل شیوه اختلاط Sta3 برای ارزیابی‌های بعدی انتخاب شد.

۳-۴. تأثیر مقدار سوسپانسیون نانومواد بر مقاومت برشی خط چسب

یکی از مسائل بسیار مهم در اصلاح چسب‌ها توسط نانومواد، مقدار استفاده از آنها در ماتریس چسب می‌باشد. نانومواد معمولاً به دلیل بالا بودن انرژی سطحی، تمایل زیادی برای تشکیل کلوخه دارند و از این طریق باعث افت مقاومت ذاتی چسب می‌شوند [۲۰، ۲۱]. این افت مقاومت در اثر تمرکز تنش در نقاط حاوی کلوخه‌هاست. اگرچه در این مطالعه از تکنیک پوشش‌دار کردن نانوذرات برای مقابله با تشکیل کلوخه‌ها استفاده شد ولی به علت ماهیت مغناطیسی ذرات مورد استفاده و تأثیر نیروهای دو قطبی-دوقطبی، احتمال جذب ذرات پوشش‌دار شده توسط یکدیگر و تشکیل توده‌های مجتمع وجود داشت [۲۱، ۲۲]. به همین دلیل سوسپانسیون منتخب نانومواد مغناطیسی پوشش‌دار شده در مقادیر مختلف به ماتریس چسب اوره فرمالدهید اضافه شد و پس از اختلاط و همگن‌سازی، مقاومت برشی خط چسب ارزیابی شد. شکل ۱۱ مقایسه مقادیر میانگین این ویژگی بین چسب خالص و تیمارهای حاوی مقادیر مختلف سوسپانسیون نانومواد را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. تأثیر مقدار سوسپانسیون نانومواد مغناطیسی پوشش‌دار شده با نشاسته (Sta3) بر مقاومت برشی خط چسب اوره فرمالدهید

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزودن سوسپانسیون نانومواد مغناطیسی پوشش‌دار شده به چسب اوره، مقاومت برشی خط چسب افزایش یافته است. مقدار این تغییرات برای سطوح ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۴ درصد سوسپانسیون نانومواد به ترتیب معادل ۵/۹۶، ۸/۲، ۷/۳، ۹/۴ و ۸/۹۲ درصد نسبت به مقدار مقاومت برشی چسب اوره فرمالدهید خالص به دست آمد. بین مقاومت برشی تیمار مختلف با یکدیگر اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد و فقط نسبت به اوره فرمالدهید خالص این افزایش معنی‌دار بوده است. این افزایش می‌تواند ناشی از دو دلیل باشد؛ یکی حضور ذرات نشاسته که مانند یک اکستندر عمل کرده و موجب بهبود چسبندگی و خودچسبندگی شده است [۱۸] و دیگری تأثیر ماهیت فلزی نانوذرات در انتقال و توزیع یکنواخت حرارت پرس در خط چسب که می‌تواند بر تکمیل شبکه سه بعدی اتصالات عرضی اثرگذار باشد. مسئله دیگر توزیع یکنواخت نانوذرات پوشش‌دار شده در ماتریس چسب است که این مسئله از تمرکز تنش جلوگیری نموده و مقاومت ذاتی رزین را در حالت سخت شده حفظ می‌نماید. نکته قابل توجه عدم کاهش مقدار مقاومت در اثر افزودن سوسپانسیون نانومواد به چسب می‌باشد که حاکی از عدم تأثیر منفی نانوذرات بر مقاومت برشی خط چسب است.

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف پوشش‌دار کردن نانوذرات مغناطیسی به منظور اصلاح چسب برای کاربرد در پرس‌های مجهز به گرمادهی رادیوفرکانس انجام شد. بهبود پتانسیل جذب امواج مغناطیسی توسط چسب به تسریع گرمادهی و ممانعت از معایبی مانند سوختن و جرقه در خطوط چسب کمک به‌سزایی می‌کند. برای این منظور سه نوع ماده با شرایط اختلاط متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت و نتیجه از طریق ارزیابی‌های کیفی و کمی مقایسه شدند. بر این اساس مشخص شد که از بین سه نوع ماده پوشش‌دهنده، نشاسته بهترین نتیجه را در پوشش‌دهی نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن دارد. مقایسه سوسپانسیون پخش شده بر روی سطوح شیشه‌ای مؤید این مسئله بود که به لحاظ پراکنش ذرات، سوسپانسیون نانوذرات پوشش‌دار شده با نشاسته بهترین عملکرد را دارد. به عبارتی، وجود کلوخگی و توزیع نایک‌نواخت مشهود در نانوذرات پوشش‌دار شده با پلی‌اتیلن گلاکول و صمغ عربی و همچنین برخورداری از زمان ژله‌ای شدن طولانی‌تر باعث شد که این دو ماده از ادامه تحقیق کنار گذاشته شوند. آزمون‌های توسعه مقاومت برشی چسب نیز این نکته را مشخص نمود که بین فرایندهای مختلف پوشش‌دار کردن توسط نشاسته، تفاوت چشمگیری وجود ندارد و در تمام آنها توسعه مقاومت برشی خط چسب به صورت یک تابع درجه دوم از زمان پرس قابل پیش‌بینی است. همچنین مشاهده شد با افزایش زمان پرس تأثیر دمای پرس کاهش می‌یابد و مقدار مقاومت برشی خط چسب در اغلب تیمارها پس از زمان ۹۰ ثانیه افزایش محسوسی ندارد. براساس این نتایج ترکیب Sta3 به دلیل کوتاه‌تر بودن زمان آماده‌سازی و همچنین پراکنش یکنواخت و همگن ذرات در سوسپانسیون، به عنوان ترکیب منتخب مشخص شد. در مرحله نهایی مقادیر مختلف از سوسپانسیون نانوذرات مغناطیسی پوشش‌دار شده طبق ترکیب Sta3 به چسب اوره فرم‌آلدهید اضافه شد و مقدار مقاومت برشی خط چسب نمونه‌های ساخته شده با آنها مورد ارزیابی واقع شد. نتایج نشان داد که اضافه نمودن سوسپانسیون فوق به ماتریس چسب موجب افزایش مقدار مقاومت برشی خط چسب می‌گردد. هرچند این مقدار افزایش ناچیز می‌باشد ولی نکته مهم این بود که اضافه نمودن سوسپانسیون مورد نظر به چسب تا میزان ۲۴ درصد نسبت به جرم چسب جامد، تأثیر منفی بر مقاومت برشی خط چسب نمی‌گذارد. بنابراین نانوذرات مغناطیسی پوشش‌دار شده با ذرات نشاسته طبق روش Sta3 گزینه بسیار مناسب برای اصلاح چسب اوره فرم‌آلدهید برای فرایندهای پرس مجهز به گرمادهی رادیوفرکانس می‌باشند و علی‌رغم نگرانی‌های موجود در کاربرد نانوذرات در ماتریس چسب و ایجاد کلوخگی و افت مقاومت‌ها، ترکیب مذکور هیچ‌گونه اثر منفی بر زمان ژله‌ای شدن و مقاومت برشی خط چسب نداشته است و این تأثیر حتی در مقادیر بالا مانند ۲۰ و ۲۴ درصد نیز مشاهده می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش: نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی آقای شایان روحی و پژوهانه استاد راهنما انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی فازهای پژوهش به تفکیک، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، تهیه نمونه‌های آزمونی دستگاه ABRES و انجام آزمون‌های مربوط به چسب، بررسی و کنترل نتایج، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، نگارش، اصلاح

و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده دوم: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش‌ها و گردآوری داده‌ها
نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، کمک در مطالعه و بازبینی مقاله

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

References

- [1] Humphrey, P.E. & Zavala, D. (1989). A technique to evaluate the bonding reactivity of thermosetting adhesives. *Journal of Testing and Evaluation*, 17(6), 323-328.
- [2] Humphrey, PE. (1990). Device for testing adhesive bonds. *US Patent US 5176028 A*, 5 Jan 1993.
- [3] ASTM-D7998-15 (2015). Standard test method for measuring the effect of temperature on the cohesive strength development of adhesives using lap shear bonds under tensile loading. *ASTM International*, West Conshohocken, United States.
- [4] Wescott, J., Birkeland, M., Traska, A., Frihart, C. & Dally, B. (2007, February 18-21). *New method for rapid testing of bond strength for wood adhesives*. 30th annual meeting of the Adhesion Society, Tampa Bay, Florida, USA.
- [5] Costa, N., Ferra, J., Martins, J., Coelho, C., Pereira, J., Cruz, P., Magalhaes, F. & Carvalho, L. (2014). Impact of thermal treatment on bonding performance of UF/PVAc formulations. *International Wood Products Journal*, 5(4), 212-216. <https://doi.org/10.1179/2042645314Y.0000000075>
- [6] Huang, Z. & Feng, M. (2018). Correlation of adhesive performance between automated bond evaluation system tests and plywood tests: A case study of lignin-phenol-formaldehyde adhesives. *Forest Products Journal*, 68(4), 353-360. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-17-00064>
- [7] Lecourt, M., Pizzi, A. & Humphrey, P. (2003). Comparison of TMA and ABES as forecasting systems of wood bonding effectiveness. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61, 75-76. <https://doi.org/10.1007/s00107-002-0346-5>
- [8] Smith, G. (2004). The effect of some process variables on the lap-shear strength of aspen strands uniformly coated with pMDI-resin. *Wood and Fiber Science*, 36(2), 228-238.
- [9] Humphrey, P.E. (2005, September 16-20). *Temperature and reactant injection effects on the bonding dynamics of thermosetting adhesives*. [Conference presentation paper]. Conference on wood adhesives, Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA.
- [10] Kamke, F. & Lee, J. (2007). Adhesive penetration in wood—a review. *Wood and Fiber Science*, Vol 2, 205-220.
- [11] El Mansouri, N., Pizzi, A. & Salvado, J. Lignin-based wood panel adhesives without formaldehyde. *European Journal of Wood and Wood Products*, 65(1), 65-70. <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0130-z>
- [12] Lei, H., Pizzi, A. & Du, G. (2008). Environmentally friendly mixed tannin/lignin wood resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 107(1), 203-209. <https://doi.org/10.1002/app.27011>
- [13] Martins, J., Pereira, J., Coelho, C., Ferra, J., Mena, P., Magalhães, F., & Carvalho, L. (2013). Adhesive bond strength development evaluation using ABES in different ligno-cellulosic materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 47, 105-109. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.08.003>
- [14] Hemmilä, V., Adamopoulos, S., Karlsson, O. & Kumar, A. (2017). Development of Sustainable Bio-Adhesives for Engineered Wood Panels – a Review. *RSC Advances*, 7(61). <https://doi.org/10.1039/c7ra06598a>
- [15] Ruponen, J., Rohumaa, A., Laine, K. & Segerholm, K. (2016). *Tensile-shear strength studies on self-bonded 2-ply birch Veneer joint manufactured and tested by applying automated Bonding evaluation system (ABES) hot press*. [Conference presentation paper]. World Conference on Timber Engineering (WCTE). Vienna, Austria.

- [16] Frihart, C., Coolidge, T., Mock, C. & Valle, E. (2016). High Bonding Temperatures Greatly Improve Soy Adhesive Wet Strength. *Polymers*, 8(11), 394. <https://doi.org/10.3390/polym8110394>
- [17] Frihart, C. & Lorenz, L. (2020). Standard test method ASTM D 7998-19 for the cohesive strength development of wood adhesives. *Journal of Visualized Experiments*. (159). e61184, 6 p. <https://doi.org/10.3791/61184>
- [18] Silveira, V., Papadakis, R. & Adamopoulos, S. (2025). Towards starch-based adhesives involving carbon dots as versatile crosslinkers. *The Journal of Adhesion*, 101(12), 1395-1421. <https://doi.org/10.1080/00218464.2025.2464051>
- [19] Fašalek, A., Konnerth, J. & van Herwijnen, H. (2025). Method for evaluating the bond strength development of pMDI adhesive using ABES. *Wood Sciences & Technology*, 59, 70. <https://doi.org/10.1007/s00226-025-01670-6>
- [20] Ourry, L., Toulemon, D., Ammar, S. & Mammeri, F. (2017). Methods for preparing polymer-decorated single exchange-biased magnetic nanoparticles for application in flexible polymer-based films. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 8, 408-417. <https://doi.org/10.3762/bjnano.8.43>
- [21] Kirchberg, S., Rudolph, M., Ziegmann, G. & Peuker, U. (2012). Nanocomposites based on technical polymers and sterically functionalized soft magnetic magnetite nanoparticles: Synthesis, processing, and characterization. *Journal of Nanomaterials*, 670531. <https://doi.org/10.1155/2012/670531>
- [22] Hajalilou, A., Ferreira, L. P., Jorge, M., Reis, C. & Cruz, M. (2024). Surface-Modified Iron Oxide Nanoparticles with Natural Biopolymers for Magnetic Hyperthermia: Effect of Reducing Agents and Type of Biopolymers. *Journal of Composites Science*, 8(10), 425. <https://doi.org/10.3390/jcs8100425>