

Improving the performance of polyvinyl acetate adhesive in order to increase the strength and stability of tongue and groove joints in traditional beech wood structures

Vahid Sokhdan^{1*}, Hamid Reza Mansouri², Mohammad Dahmardeh Ghale^{no}²
and Mohammad Shamsian²

1*-Corresponding Author, Ph.D. Student in Wood and Paper Industry, Department of Wood and Paper Industry, University of Zabol, Zabol, Iran, Email: vahidsokhdan@yahoo.com

2- Associate Professor, Department of Wood and Paper Industry, University of Zabol, Zabol, Iran

Received: August 2024

Revised: November 2024

Accepted: January 2025

Abstract

Background and Objectives: Historical wooden constructions clearly depict the identity, architecture, culture and lifestyle of the people of a period of history and are available to future generations as precious treasures. Therefore, the disconnection of the joints of historical wooden constructions is a big problem to preserve these valuable works in the long term. This research was carried out with the aim of improving and strengthening polyvinyl acetate (PVAc) adhesive using nanocellulose fibers (NFC) and glass nanofibers (GNF) to improve the tongue and groove joint strength in the traditional beech wood constructions.

Materials and methods: In this research, in order to study the effects of reinforcements on the properties of PVAc adhesive, NFC and GNF were investigated at three different levels including 0, 3, and 6% based on the dry weight of the adhesive (9 treatments; each treatment with 3 replications). The connection of the tongue and groove using polyvinyl acetate glue without NFC and GNF were considered as control samples. After preparing the samples, quantitative and qualitative tests including tensile strength, bending strength (modulus of rupture and modulus of elasticity), accelerated aging test, FTIR spectroscopy and evaluation of the samples using electron microscope scanning (SEM) were performed.

Results: According to the results, there was a significant difference between the studied treatments in terms of tensile strength and modulus of rupture and modulus of elasticity ($P < 0.05$). Among the examined treatments, the highest amount of tensile strength (13.9 MPa), modulus of rupture (130.5 MPa) and modulus of elasticity (11785.36 MPa) were measured using PVAc adhesive modified with 3% CNF and 3% GNF. In addition, the results showed a significant difference between the treatments in terms of accelerated aging rate ($P < 0.05$). The lowest rate of accelerated aging (4.0) was observed in PVAc modified with 3% NFC and 3% GNF. FTIR spectroscopy showed that when CNFs are added into the PVAc polymer matrix, hydrogen bonds are formed between the hydroxyl groups (OH) of polymer chains and the hydroxyl groups of nanocellulose, which causes the formation of coherent three-dimensional networks. Also, according to the observations from scanning electron microscope (SEM), it was found that CNFs and GNFs were relatively well dispersed in the PVAc polymer matrix.

Conclusion: This study showed that by adding 3% NFC and 3% GNF to PVAc adhesive, the mechanical properties of joints in beech wood structures increase. Considering this issue, it is recommended to use a combination of cellulose nanofibers (NFC) and glass nanofibers (GNF) in

order to improve the resistance properties of joints in traditional wooden structures.

Keywords: Cellulose nanofibers (CNF), polyvinyl acetate (PVAc), glass nanofibers (GNF), mechanical properties, accelerated aging.

بهبود عملکرد چسب پلی وینیل استات به منظور افزایش استحکام و پایداری اتصالات کام و زبانه در سازه‌های سنتی گره چینی چوب راش

وحید سخندان^{۱*}، حمیدرضا منصور^۲، محمد دهمرده قلعه نو^۲ و محمد شمسیان^۲

*۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه زابل، زابل، ایران، پست الکترونیک: vahidsokhandan@yahoo.com

۲- دانشیار، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه زابل، زابل، ایران

تاریخ دریافت: شهریور ۱۴۰۳

تاریخ اصلاح نهایی: آذر ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: بهمن ۱۴۰۳

چکیده

سابقه و هدف: سازه‌های چوبی تاریخی به وضوح، هویت، معماری، فرهنگ و سبک زندگی مردم یک دوره از تاریخ را به تصویر می‌کشد و به عنوان گنجینه‌ای گران بها در اختیار نسل‌های بعد قرار می‌گیرد. از این رو، از هم‌گسیختگی اتصالات سازه‌های چوبی تاریخی، مشکل بزرگی برای حفظ این آثار ارزشمند در مدت زمان طولانی است. این پژوهش با هدف اصلاح و تقویت چسب پلی وینیل استات (PVAc) با استفاده از الیاف نانوسلولزی (NFC) و نانوالیاف شیشه (GNF) برای بهبود اتصالات کام و زبانه در سازه‌های سنتی گره چینی چوب راش انجام شده است.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق، به منظور مطالعه تأثیرات میزان تقویت‌کننده‌ها بر خواص چسب PVAc، نانوالیاف سلولزی و نانوالیاف شیشه در سه سطح مختلف شامل ۰، ۳ و ۶ درصد بر مبنای وزن خشک چسب در قالب ۹ تیمار (هر تیمار با ۳ تکرار) بررسی شدند. اتصال کام و زبانه با استفاده از چسب پلی وینیل استات بدون نانوالیاف سلولزی و نانوالیاف شیشه به عنوان نمونه‌های شاهد در نظر گرفته شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمون‌های کمی و کیفی شامل مقاومت کششی، مقاومت به خمش (مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته)، آزمون کهنگی تسریع شده و طیف‌سنجی FTIR انجام گردید.

نتایج: طبق نتایج، اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای مورد مطالعه از نظر میزان مقاومت کششی و مقاومت به خمش (مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته) وجود داشت ($P < 0/05$). در بین تیمارهای مورد مطالعه، بیشترین میزان مقاومت کششی (۱۳/۹ MPa)، مدول گسیختگی (۱۳۰/۵ MPa) و مدول الاستیسیته (۱۱۷۸۵/۳۶ MPa) در تیمار PVAc اصلاح شده حاوی ۳ درصد نانوالیاف سلولزی و ۳ درصد نانوالیاف شیشه مشاهده شد. علاوه بر این، نتایج به دست آمده تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای مورد مطالعه از نظر میزان کهنگی تسریع شده نشان داد ($P < 0/05$). کمترین میزان کهنگی تسریع شده در تیمار PVAc اصلاح شده با ۳ درصد نانوالیاف سلولزی و ۳ درصد نانوالیاف شیشه (۴/۰) مشاهده گردید که نشان داد افزودن نانوالیاف سلولزی و نانوالیاف شیشه به چسب PVAc باعث کاهش میزان کهنگی تسریع شده در محل اتصالات می‌شود. طیف‌سنجی FTIR نشان داد که با وارد شدن نانوالیاف سلولزی به داخل ماتریس پلی وینیل استات (PVAc)، بین گروه‌های هیدروکسیلی (OH) زنجیره‌های پلیمری و گروه‌های هیدروکسیلی نانوسلولزی پیوند هیدروژنی به وجود می‌آید که موجب تشکیل شبکه‌های سه‌بعدی منسجم و یکپارچه می‌شود.

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان داد که با افزودن نانوالیاف سلولزی در سطح ۳ درصد و نانوالیاف شیشه در سطح ۳ درصد به چسب PVAc، خواص مکانیکی اتصالات در سازه‌های چوبی راش افزایش می‌یابد. با توجه به این موضوع، استفاده ترکیبی از نانوالیاف سلولزی (NFC) و نانوالیاف شیشه (GNF) به منظور بهبود خواص مقاومتی اتصالات در سازه‌های چوبی سنتی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نانوالیاف سلولزی، پلی وینیل استات (PVAc)، نانوالیاف شیشه، خواص مکانیکی، کهنگی تسریع شده.

مقدمه

هویت هر سرزمینی آثار تاریخی و میراث فرهنگی آن است که قدمت، تاریخچه و تمدن هر سرزمینی را مشخص می‌کند؛ بنابراین، حفاظت و حراست از این آثار تاریخی امری ضروری محسوب می‌شود و به‌عنوان یکی از اهداف و سیاست‌های راهبردی هر جامعه به‌شمار می‌رود. ایران در رسته‌های اول دارنده آثار تاریخی و ابنیه‌های تاریخی و فرهنگی در جهان است (Moghaddasi Jahromi, 2017). یکی از هنرهای با ارزش در معماری اسلامی ایران، گره‌چینی بوده است که با اتکا بر هندسه‌ای بی‌همتا، زیبایی هنر ایرانی اسلامی را به نمایش گذاشته است. در ساخت سازه‌های سنتی مانند گره‌چینی، اتصالات نقش عمده‌ای در پایداری سازه در طول زمان و رفتار ساختاری آن ایفا می‌کند. نقطه حساس هر سازه چوبی، به‌عنوان یک محصول چند جزئی، اتصالات آن است (Aniñon & Garciano, 2024). هنگامی که سخن از اتصالات چوبی به میان می‌آید، اتصالات چسبی به‌عنوان مهمترین نوع اتصالات مطرح می‌شوند. چسباندن می‌تواند جایگزینی برای روش‌های متداول اتصال مانند پیچ کردن، میخ کردن و اتصالات فلزی باشد. به‌کارگیری چسب در یک اتصال باعث افزایش سطح مقطع اتصال شده و تنش وارده به آن ناحیه را در کل سطح توزیع می‌کند و خودبه‌خود، اثر تمرکز تنش به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد (Ehsani et al., 2012).

چسب‌ها جزء لاینفک در تولید مصنوعات چوبی به‌شمار می‌روند و نقش مؤثری در کیفیت اتصالات ایفا می‌کنند؛ بنابراین، ویژگی اتصالات سازه‌های چوبی عمدتاً براساس نوع و کیفیت چسب تعیین می‌شود (Ülker, 2016). به‌طورکلی، چسب‌های چوب به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. چسب‌های طبیعی مانند صمغ، پروتئین، رزین و سایر مواد طبیعی در سازه‌های قدیمی استفاده می‌شدند (Vineeth et al., 2019). ویژگی اصلی این نوع چسب‌ها، سهولت کاربرد و دوست‌دار محیط‌زیست بودن آنهاست (Roffael, 2006). بااین‌حال، این نوع از چسب‌ها اغلب مقاومت مکانیکی و پایداری مطلوبی در برابر آب ندارند؛ بنابراین، برای اصلاح و

تقویت اتصالات در سازه‌های چوبی، از چسب‌های مصنوعی مانند پلی وینیل استات (Polyvinyl acetate) (PVAc) که یکی از پرکاربردترین چسب‌های ترموپلاستیک در سازه‌های چوبی به‌شمار می‌رود، استفاده می‌شود (Qiao & Easteal, 2001).

چسب‌های پلی وینیل استات دارای ساختمان مولکولی گسترده‌ای هستند. اختلاف خواص فیزیکی در میان گونه‌های مختلف چسب پلی وینیل استات ناشی از تفاوت در وزن مولکولی و توزیع اوزان مولکولی آنهاست (Sedlarik et al., 2007). چسب‌های پلی وینیل استات (PVAc) به علت کاربرد آسان، مقاومت به خشکی بالا و هزینه‌های رقابتی، به‌طور گسترده برای مونتاژ مبلمان استفاده می‌شوند (Jiang et al., 2018). پلی وینیل استات هنگام مصرف در مواد متخلخل مانند چوب، برهم‌کنش‌های بین مولکولی مانند نیروهای واندروالسی و نیروهای هیدروژنی ایجاد می‌کند که موجب بهبود خواص مکانیکی سازه‌های چوبی در محل اتصالات می‌شود (Kaboorani et al., 2012).

سلولز یکی از انواع طبیعی نانوالیاف است که در طی چند دهه اخیر به دلیل مزایای بالای آن از جمله خاصیت زیست‌تخریب‌پذیری و دوست‌دار محیط‌زیست بودن، در بسیاری از زمینه‌های صنعتی استفاده شده است. نانوالیاف سلولز (Cellulose nanofibers) (NFC) در واقع مولکول‌های انعطاف‌پذیر و طولی هستند که دارای قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر و طول چند میکرون می‌باشند (Salari, 2018). این نانوالیاف که دارای بخش‌های کریستالی و آمورف می‌باشند، آب‌دوست هستند و با ایجاد سوسپانسیون در آب شبکه‌ای ژله مانند و سه‌بعدی تشکیل می‌دهند (Salari et al., 2018). نانوالیاف شیشه (Glass nanofibers) (GNF) نیز از جمله متنوع‌ترین محصولات نساجی به‌شمار می‌روند که از ترکیبات سیلیس مشتق می‌شوند. این نانوالیاف دارای ویژگی‌های خاصی از قبیل شفافیت، سختی، پایداری و مقاومت در برابر مواد شیمیایی هستند که در تولید سازه‌های مختلف کاربرد دارند (Bardak et al., 2017). امروزه از نانوالیاف سلولز و نانوالیاف شیشه در صنایع چوبی به‌منظور افزایش مقاومت

(Suevos *et al.*, 2010).

با توجه به آنچه اشاره شد، این پژوهش باهدف بررسی نقش نانوالیاف سلولز (NFC) و نانوالیاف شیشه (GNF) در اصلاح و تقویت چسب پلی وینیل استات (PVAc) برای بهبود اتصالات کام و زیانه در سازه‌های سنتی گره‌چینی چوب راش انجام شده است. نوآوری این پژوهش در این است که برای اولین بار، تقویت اتصالات کام و زیانه در سازه‌های چوبی سنتی با استفاده از چسب پلی وینیل استات حاوی نانو الیاف سلولزی و نانوالیاف شیشه مطالعه می‌شود.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه

چوب راش سوپر از شرکت پل مایر آلمان تهیه شده است که چوبی بسیار با کیفیت، بدون گره و با چگالی بالا به‌شمار می‌رود. شایان ذکر است مشخصات فنی این چوب شامل وزن مخصوص $0.7/1 \text{ cm}^3$ با ضخامت ۴ cm و عرض ۱۵ cm برای یک الوار ۲ متری است. نمونه چوب به مدت چند ماه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد قرار داده شد تا به رطوبت ثابت برسد.

مشخصات چسب پلی وینیل استات (PVAc) و نانو مواد تقویت‌کننده

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی چسب پلی وینیل استات (PVAc) استفاده شده در این تحقیق، در جدول ۱ ارائه شده است. یادآوری می‌شود که در این تحقیق، چسب چوب سامد مشهد دارای کد ۸۰۱ به مقدار ۱۵۰ گرم و برای هر اتصال ۵/۲ گرم تهیه و با قلم‌مو استفاده شد. همچنین، به‌منظور بررسی اثر میزان تقویت‌کننده بر خواص چسب پلی وینیل استات، نانو سلولز و نانو شیشه دارای قطری در حدود ۵ نانومتر و طول ۱۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر بودند و از شرکت نانو صدرا خریداری شدند.

اتصال چسب‌های مختلف مانند PVAc استفاده می‌شود. با وجود مزایای پلی وینیل استات (PVAc)، استحکام پایین این چسب در برابر تغییرات اقلیمی (رطوبت و دماهای بالا) به‌عنوان یکی از معایب آن مطرح شده است (Mittal, 2012). به‌منظور غلبه بر این معایب و افزایش استحکام اتصالات، تحقیقات مختلفی انجام شده است. در این مطالعات، امکان استفاده از نانو ذرات، به‌عنوان عامل تقویت‌کننده چسب‌های پلی وینیل استات (PVAc) بررسی شده است. در پژوهش دیگری، Kaboorani و همکاران (۲۰۱۲) از نانوسلولز کریستالی برای بهبود عملکرد چسب پلی وینیل استات استفاده کردند که نتایج مثبتی به همراه داشت. Keshtegar و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر چسب پلی وینیل استات تقویت‌شده با نانو فیبر کربن اصلاح‌شده بر روی خواص استحکامی اتصالات رایج صنایع چوب را بررسی نمودند و بیان کردند که این ماده بیشترین تأثیر را بر روی استحکام اتصالات داشته است. همچنین، Kaboorani و Riedl (۲۰۱۱) به بررسی تأثیر افزودن نانو رُس بر عملکرد پلی وینیل استات و پایداری حرارتی و ساختار نانو کامپوزیت خاک رُس-PVAc پرداختند و دریافتند که مقاومت بُرشی اتصالات چوبی در تمام حالات با افزودن نانو خاک رُس به PVAc افزایش می‌یابد.

اتصالات یکی از مقوله‌های اساسی و راهبردی در هریک از سازه‌های چوبی هستند که نقش پایداری سازه در برابر اعمال نیروهای داخلی و خارجی را بر عهده دارند. به‌طورکلی، تمام سازه‌ها به اتصالات خود وابسته‌اند و دستیابی به قوی‌ترین حالت اتصال، یکی از مهمترین اهداف در سازه‌های چوبی است (Jiang *et al.*, 2018). از این‌رو، افزودن نانو ذرات به چسب پلی وینیل استات می‌تواند به تقویت و بهبود خواص مکانیکی اتصالاتی مانند کام و زیانه در سازه‌های چوبی سنتی کمک کند. یادآوری می‌شود که بهبود اتصالات و افزایش استحکام آنها با چسب تقویت‌شده با نانو ذرات، باعث افزایش طول عمر سازه چوبی سنتی می‌شود (López-

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی چسب پلی وینیل استات استفاده شده

Table 1- Physical and chemical properties of used PVAc

Property	Content
Density (gr/cm ³)	1/19
Viscosity (cp)	12000
Solid Content (%)	50.5
pH	3.01

را شامل می‌شود، به درون محلول پلیمر اضافه گردید و به وسیله دستگاه اولتراسونیک در دمای ۳۵-۲۰ درجه سانتی‌گراد، توان ۹۰ وات و فرکانس ۸۰ هرتز به مدت ۴ ساعت برای پراکنش ذرات هم‌زده شد. فرایند هم زدن تا زمانی ادامه یافت که نانوالیاف سلولز در ماتریس چسب PVAc به خوبی پراکنده شود (Najafianashrafi et al., 2023). در این مطالعه، دی‌بوتیل فتالات (DBP) نیز به عنوان یک پروموتور (پیش‌برنده) برای اطمینان از ادغام مناسب ذرات پلیمری اضافه شد (Chaabouni and Boufi, 2017).

مشابه روش بالا که برای نانوالیاف سلولزی انجام شد، فیلم نانو کامپوزیت PVAc با نانوالیاف شیشه نیز در سه سطح مختلف (۰، ۳ و ۶ درصد) تهیه شد. برای تیمارهایی که از هر دو نوع نانو مواد در سطوح مختلف استفاده می‌کردند، در ابتدا درصد نانوسلولز اضافه شد و پس از هم زدن محلول در دستگاه اولتراسونیک و مشاهده پراکنش خوب نانوسلولز در محلول پلیمر، درصد نانوالیاف شیشه نیز افزوده شد و پس از فرایند به هم زدن محلول حاصل و مشاهده پراکنش خوب نانومواد، مراحل بعدی دنبال شد.

در نهایت، مخلوط به دست آمده از چسب PVAc و نانو در داخل قالب‌های تفلونی به قطر حدود ۱۵۰ mm ریخته شد. مخلوط حاصل که قالب‌گیری نیز شده بود، در درون آون در شرایط ویژه (در شرایط خلأ، در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت) قرار داده شد تا حباب‌های هوای درون مخلوط قالب‌گیری شده به طور کامل خارج شود. پس از این مرحله، مخلوط قالب‌گیری شده در داخل آون معمولی در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد به مدت دو شبانه‌روز (۴۸ ساعت) قرار داده شد تا آب آن به طور کامل تبخیر و خشک شود. پس

تولید چسب PVAc با نانوالیاف تقویت کننده (PVAc-) (NFC/GNF)

در این تحقیق، به منظور فراوری نانو کامپوزیت (فیلم آزمونی) از پلی وینیل استات (PVAc)، نانوالیاف سلولز (NFC) و نانوالیاف شیشه (GNF)، مقادیر وزنی پلیمر و وزن خشک نانوسلولز و نانوالیاف شیشه براساس فرمولاسیون مورد نظر تعیین گردید.

در این آزمایش، مقدار مشخصی پلیمر طبق درصد اختلاط نانو کامپوزیت‌ها (حدود ۱۰ گرم) در ۸۰ گرم آب مقطر ریخته شد. مخلوط حاصل از چسب PVAc و آب مقطر در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از دستگاه اولتراسونیک به مدت ۴ ساعت برای پراکنش ذرات هم‌زده شد (Najafianashrafi et al., 2023). پس از حل شدن کامل پلیمر، دادن حرارت متوقف گردید اما اختلاط محلول تا رسیدن دمای آن به حدود دمای اتاق ادامه یافت. پس از انجام این مراحل، مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که محلول PVA به حالت شفاف درآمده است. ایجاد حباب در محلول می‌تواند یکنواختی نانو کامپوزیت را تحت تأثیر قرار دهد. از این رو، به منظور از بین بردن حباب هوا، محلول پلیمر در شرایط ویژه که شامل خلأ است، هواگیری شد تا هوای موجود در محلول به طور کامل از درون آن تخلیه شود. البته، شایان ذکر است که شیوه دیگری نیز برای از بین بردن حباب‌های هوای تشکیل شده در محلول پلیمر وجود دارد. این شیوه شامل اختلاط محلول با سرعت آهسته و در مدت زمان نسبتاً طولانی است (Salari, 2018).

پس از تهیه محلول پلیمر، در ابتدا سوسپانسیون نانوسلولز که مقدار معینی از ماده خشک نانوسلولز (۰، ۳ و ۶ درصد)

ویسکوزیته چسب نیز از دستگاه فوردکاپ (Ford viscosity cup) با نازل ۸ میلی‌متر و مطابق با استاندارد ASTM D1084 استفاده شد.

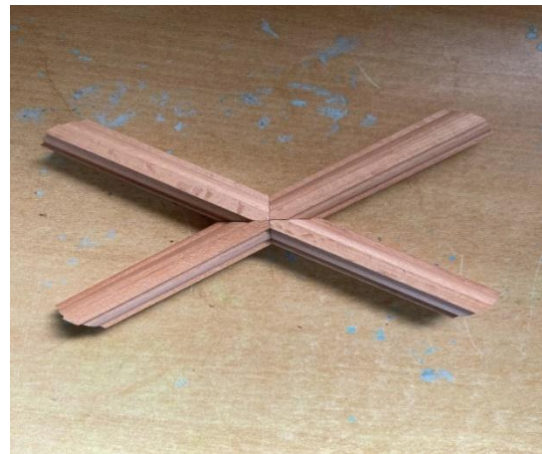
ساخت و آماده‌سازی نمونه اتصالات گره‌چینی در فرایند ساخت گره‌چینی، ابتدا طراحی و ترسیم گره مورد نظر براساس اندازه کار انجام شد. سپس از روی قسمت‌های مورد نیاز گره رسم شده، الگو یا قالب برداشته و چهارچوب در اندازه مورد نظر ساخته شد. گره‌ها که اتصالات کوچکی از چوب هستند، به صورت زاویه‌دار یا ساده با استفاده از اتصالات کام و زبانه و با استفاده از چسب اصلاح شده به یکدیگر متصل شدند. در شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب تصاویری از نمونه سازه گره‌چینی و وضعیت فیزیکی نمونه‌های آزمونی اتصالات کام و زبانه به صورت شماتیک و واقعی ارائه شده است.



از خشک شدن قالب‌ها و تشکیل فیلم نانو کامپوزیت، فیلم به دست آمده از درون قالب‌ها خارج شد (Salari, 2018). فیلم حداقل یک هفته قبل از آنالیز در دمای اتاق و رطوبت نسبی ۵۰ درصد قرار گرفت.

تعیین مشخصات فیزیکی چسب PVAc تقویت‌شده با نانوالیاف (PVAc-NFC/GNF)

در این مطالعه، دانسیته چسب پلی‌وینیل استات (PVAc) مطابق استاندارد ASTM D1875 انجام گردید. به منظور تعیین دانسیته، از یک پیکنومتر استفاده شد؛ به طوری که در ابتدا، وزن پیکنومتر خشک و تمیز (کالیبره شده) تعیین شد. علاوه بر این، درصد ماده جامد چسب PVAc مطابق استاندارد ASTM D2369 اندازه‌گیری گردید. ماده جامد چسب با تقسیم وزن چسب خشک بر وزن چسب محلول بر حسب درصد تعیین گردید (Salari, 2018). در این تحقیق، به منظور تعیین



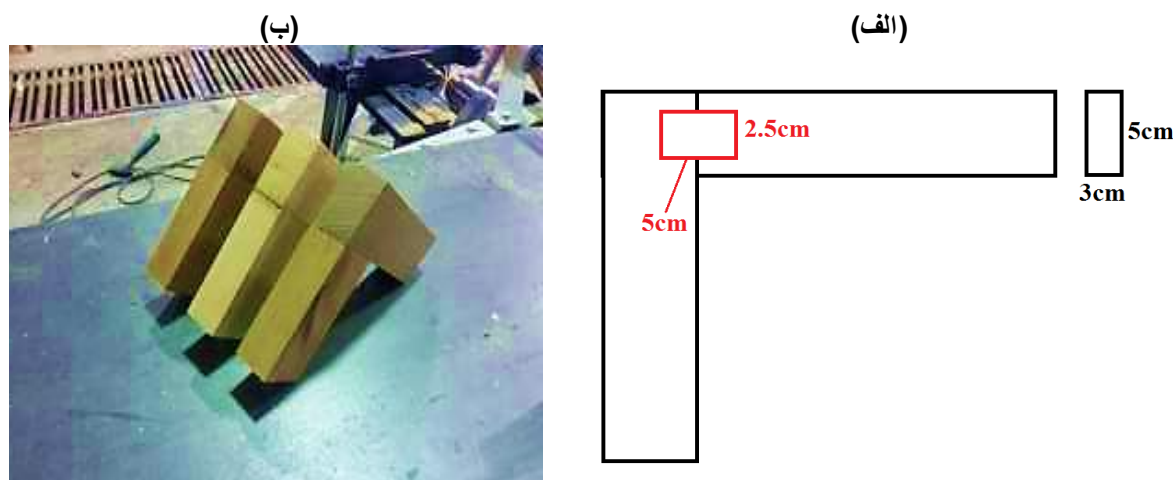
شکل ۱- نمونه سازه گره‌چینی طراحی شده

Figure 1. Designed wood structure

گردید. در هنگام اعمال چسب در بین اتصالات، سعی گردید که پراکنش چسب‌های PVAc تقویت‌شده با نانوالیاف سلولز و نانوالیاف شیشه به خوبی انجام شود، به طوری که فضای خالی و عاری از چسب در بین اتصالات کام و زبانه وجود نداشته باشد. در مجموع، ۹ تیمار و هر تیمار با ۳ تکرار تهیه گردید.

اعمال چسب روی اتصالات چوبی

برای زمان مونتاژ باز، یعنی فاصله زمانی بین اعمال چسب روی سطوح چوب تا روی هم‌گذاری قطعات، ۲ دقیقه لحاظ گردید. چسب PVAc تقویت‌شده با نانوالیاف سلولزی و نانوالیاف شیشه در سه سطح مختلف شامل ۰، ۳ و ۶ درصد بر مبنای وزن خشک چسب روی اتصالات چوبی اعمال



شکل ۲- نمایی از طرح شماتیک اتصالات (الف) و نمونه‌های آزمونی ساخته شده (ب)
 Figure 2. Schematic view of the connections (A) and fabricated test samples (B)

درصد بود. پس از افزودن چسب، نمونه‌های مورد نظر به مدت یک شبانه‌روز تحت شرایط فشار قرار گرفتند. سپس، نمونه‌ها به مدت ۱۵ روز قبل از آزمون کششی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۰ درصد قرار گرفتند.

آزمون مقاومت خمشی و محاسبه مدول گسیختگی / مدول الاستیسیته

آزمایش خمشی استاتیک براساس استاندارد شماره ISO 3133 انجام شد. نمونه‌های خمشی با ابعاد ۶۰×۵۰×۱۰۰ میلی‌متر و با استفاده از دستگاه اینسترون آزمایش شدند (شکل ۳-ب). نمونه‌ها تحت بار متمرکز در وسط دهانه قرار گرفتند. سرعت بارگذاری برای نمونه‌ها ۵ میلی‌متر در دقیقه تعیین گردید. براساس داده‌های به دست آمده از آزمون و روابط زیر، مقاومت خمشی (گسیختگی) و مدول الاستیسیته محاسبه شد.

$$MOR = (3 \times P_{max} \times l) / (2 \times b \times h^2)$$

$$MOE = (P \times l^3) / (4 \times \delta \times b \times h^3)$$

در این رابطه‌ها، P_{max} نیروی حد گسیختگی، P نیروی حد تناسب، l طول دهانه فک، δ خیز حد تناسب، b عرض قطعه نمونه و h ضخامت قطعه نمونه است (Zamani et al., 2019).

بررسی خواص مکانیکی اتصالات

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمون‌های کمی و کیفی شامل مقاومت کششی، خمشی و آزمون کهنگی تسریع شده برای ارزیابی استحکام اتصالات انجام شد.

آزمون مقاومت کششی

در آزمایش کشش موازی الیاف، با تقسیم مقدار حداکثر نیروی وارد شده به نمونه بر سطح مقطع شکست، مقاومت (تنش) حداکثر محاسبه گردید. در این مطالعه، از رابطه زیر برای محاسبه مقاومت کششی استفاده شد.

$$P(Q) = P/A$$

در این رابطه، P حداکثر نیروی وارد شده به نمونه بر حسب نیوتن (N)، A سطح مقطع شکست بر حسب میلی‌متر مربع (mm^2) و $P(Q)$ مقاومت کششی بر حسب مگاپاسکال (MPa) است.

به منظور اندازه‌گیری مقاومت کششی نمونه‌های اتصال از دستگاه SANTOM-150 ساخت شرکت سنتام با استفاده از لودسل BONJESHI با وزن ۵۰ کیلوگرم نیرو مطابق با استاندارد ASTM D882 استفاده شد (Najafianashrafi et al., 2023). نحوه بارگذاری نمونه‌های اتصال که تحت آزمون کششی قرار گرفتند، در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. رطوبت نمونه‌ها در زمان آزمون مقاومت کششی حدود ۱۲



(ب)



(الف)

شکل ۳- الف) آزمون مقاومت کششی و ب) آزمون مقاومت خمشی نمونه اتصال

Figure 3. A) Tensile strength test and B) bending strength test of the bonded sample

Hasani Khorshidi & (D1037 (جدول ۲) ارزیابی شدند (Emadi, 2017).

آزمون کهنگی تسریع شده
به منظور انجام آزمون کهنگی تسریع شده، نمونه‌های
گروه چینی در شرایط کهنگی مندرج در استاندارد ASTM

جدول ۲- مراحل و شرایط آزمون کهنگی تسریع شده

Table 2- Steps and condition of Accelerated aging test

Step	Time (h)	Temperature (°C)	Media
1	1	45	Water
2	3	93	Water Vapor
3	20	-20	Freezer
4	3	99	Iron
5	3	93	Water Vapor
6	18	99	Iron

آزمون آماری

نتایج حاصل از اندازه‌گیری خواص مکانیکی و کهنگی تسریع شده اتصالات کام و زبانه در سازه‌های چوبی سنتی ساخته شده، براساس طرح آماری به صورت آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی توسط نرم‌افزار SPSS 18 تجزیه و تحلیل گردید. همچنین برای مقایسه و گروه‌بندی کلی میانگین مقاومت‌ها در هر یک از اتصالات، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد استفاده شد.

طیف‌سنجی FTIR

به منظور طیف‌سنجی FTIR، حدود ۲ mm از سطح نمونه‌های خشک شده تراشیده و از یک الک با اندازه ۴۰ میس (mesh) عبور داده شد. سپس قطعات کوچکی از چوب و KBr (هیچ جذب و انتشاری ندارد) تهیه شده و با استفاده از طیف‌سنج Bruker Vector 22 FTIR با وضوح 4 cm^{-1} و 24 scan/min بررسی شدند (Akhtari & Arefkhani, 2010).

نتایج

نانوالیاف سلولز بود. این یافته‌ها نشان داد که با افزایش میزان نانوالیاف سلولز تا یک حد معین، درصد مواد جامد و دانسیته چسب PVAc کاهش می‌یابد، در حالی که ویسکوزیته چسب مقدار کمی افزایش می‌یابد. افزایش ویسکوزیته چسب PVAc با افزودن نانوالیاف سلولز را می‌توان به قابلیت سلولز (Jatoi *et al.* 2019, 2020) و تشکیل شبکه‌های سه بعدی در چسب (Salari, 2018) و پدیده پرکولاسیون (Percolation) (Elmaghraby *et al.*, 2023) نسبت داد.

بررسی ویژگی‌های چسب پلی وینیل استات خالص و تقویت‌شده تأثیر نانوالیاف سلولز بر ویژگی‌های فیزیکی چسب پلی وینیل استات (PVAc) در جدول ۳ ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که رزین پلی وینیل استات خالص (نمونه شاهد) دارای بیشترین میزان درصد ماده جامد و دانسیته است، این در حالی است که کمترین میزان درصد ماده جامد و دانسیته مربوط به چسب پلی وینیل استات حاوی ۳ درصد

جدول ۳- تأثیر میزان نانوالیاف سلولز و نانوالیاف شیشه بر ویژگی‌های فیزیکی چسب پلی وینیل استات (PVAc)

Table 3- The effect of the amount of cellulose nanofibers and glass nanofibers on the physical properties of polyvinyl acetate (PVAc)

Adhesive	Solid content (%)	Viscosity (s)	pH
PVAc	51	82	5
PVAc+ 3%NFC	47	75	6
PVAc+ 6%NFC	45	79	5
PVAc+ 3%GNF	45	78	6
PVAc+ 6%GNF	41	77	5
PVAc+ 3%NFC+3%GNF	47	74	5
PVAc+ 3%NFC+6%GNF	44	72	5
PVAc+ 6%NFC+3%GNF	43	71	6
PVAc+ 6%NFC+6%GNF	40	68	6

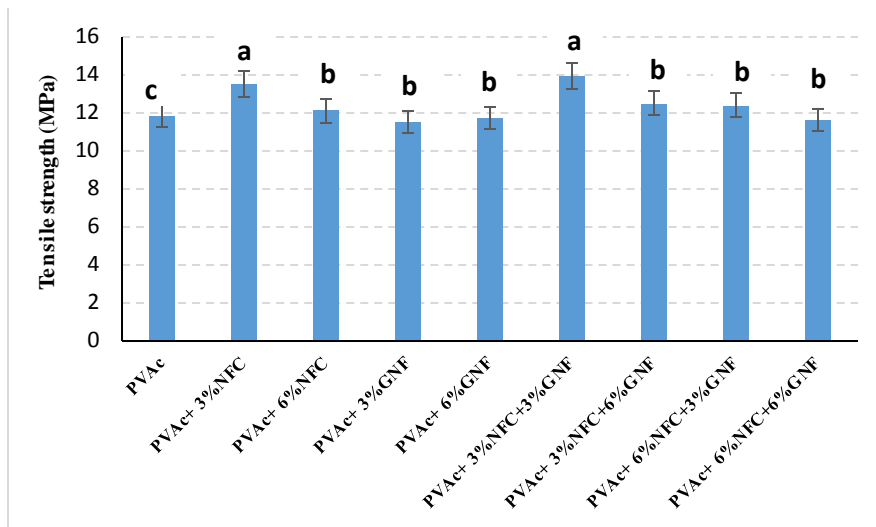
نانوالیاف شیشه (۱۳/۵۵ MPa) به ثبت رسید.

نتایج نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین مقاومت کششی تیمار PVAc حاوی ۳ درصد نانوالیاف سلولز و ۳ درصد نانوالیاف شیشه با تیمار PVAc حاوی ۳ درصد نانوالیاف سلولز (۱۳/۵ MPa) وجود ندارد ($P < 0.05$). این یافته‌ها نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی، افزودن نانوالیاف سلولزی در سطح ۳ درصد به چسب پلی وینیل استات (PVAc) می‌تواند به تنهایی مقاومت کششی اتصالات چوب راش را تا حد قابل توجهی بهبود ببخشد.

خواص مکانیکی اتصالات

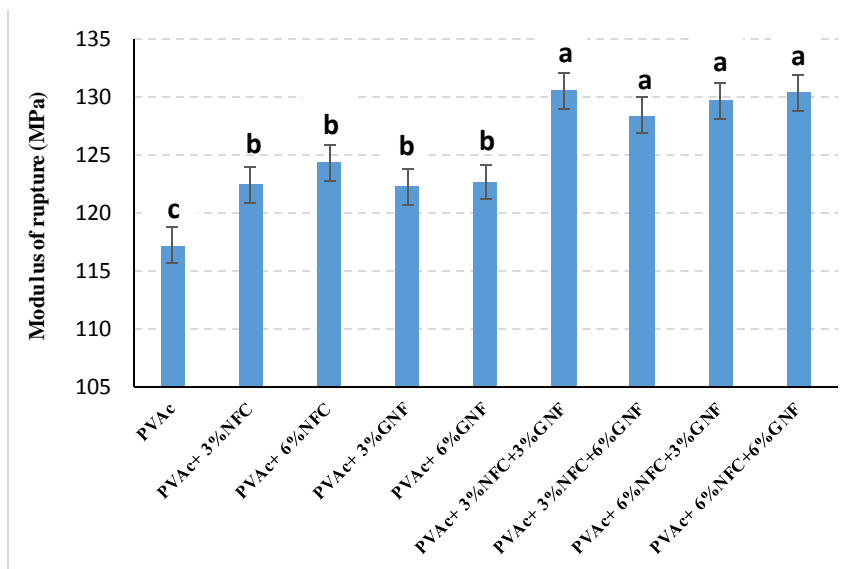
مقاومت کششی

نتایج مربوط به مقاومت کششی در بین تیمارهای مورد مطالعه در شکل ۴ ارائه شده است. براساس نتایج، اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای مورد بررسی از نظر میزان مقاومت کششی وجود داشت ($P < 0.05$). در بین تیمارهای مورد مطالعه، بیشترین میزان مقاومت کششی در تیمار PVAc حاوی ۳ درصد نانوالیاف سلولز و ۳ درصد نانوالیاف شیشه (۱۳/۹ MPa) مشاهده گردید، این در حالی است که کمترین میزان مقاومت کششی نیز در تیمار PVAc حاوی ۳ درصد



شکل ۴- نتایج مربوط به مقاومت کششی در بین تیمارهای مورد مطالعه (NFC: نانوالیاف سلولز، GNF: نانوالیاف شیشه)

Figure 4. The results of tensile strength among the studied treatments (NFC: cellulose nanofibers, GNF: glass nanofibers)



شکل ۵- نتایج مربوط به مدول گسیختگی (MOR) در بین تیمارهای مورد مطالعه (NFC: نانوالیاف سلولز، GNF: نانوالیاف شیشه)

Figure 5. The results of the modulus of rupture (MOR) results among the studied treatments (NFC: cellulose nanofibers, GNF: glass nanofibers)

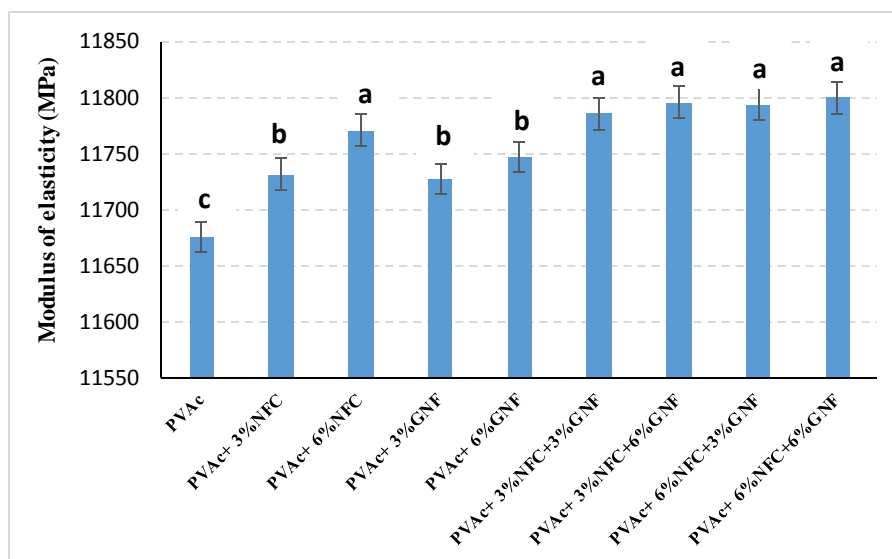
مقاومت خمشی
 مدول گسیختگی (MOR): نتایج مربوط به مدول گسیختگی (MOR) در بین تیمارهای مورد مطالعه در شکل ۵ ارائه شده است. براساس نتایج، اختلاف معنی داری بین تیمارهای مورد بررسی از نظر میزان مدول گسیختگی وجود داشت ($P < 0.05$). در بین تیمارهای مورد مطالعه، بیشترین میزان مدول گسیختگی در تیمار PVAc حاوی ۳ درصد نانوالیاف سلولز و ۳ درصد نانوالیاف شیشه (۱۳۰/۵ MPa) مشاهده گردید، این در حالی است که کمترین میزان مدول گسیختگی نیز در تیمار PVAc خالص (۱۱۷/۲ MPa) به ثبت رسید. نتایج نشان داد که تفاوت معنی داری بین مدول گسیختگی

بیشترین میزان مدول گسیختگی در تیمار PVAc حاوی ۳ درصد نانوالیاف سلولز و ۳ درصد نانوالیاف شیشه (۱۳۰/۵ MPa) مشاهده گردید، این در حالی است که کمترین میزان مدول گسیختگی نیز در تیمار PVAc خالص (۱۱۷/۲ MPa) به ثبت رسید.

تیمار PVAc حاوی ۳ درصد نانوالیاف سلولز و ۳ درصد نانوالیاف شیشه، PVAc حاوی ۳ درصد نانوالیاف سلولز و ۶ درصد نانوالیاف شیشه، PVAc حاوی ۶ درصد نانوالیاف سلولز و ۳ درصد نانوالیاف شیشه و PVAc حاوی ۶ درصد نانوالیاف سلولز و ۶ درصد نانوالیاف شیشه وجود ندارد ($P > 0.05$). این یافته‌ها نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی، افزودن نانوالیاف سلولز و نانوالیاف شیشه در سطح ۳ درصد به چسب پلی وینیل استات (PVAc) می‌تواند مدول گسیختگی اتصالات چوب راش را تا حد قابل ملاحظه‌ای بهبود ببخشد.

مدول الاستیسیته (MOE): نتایج مربوط به مدول الاستیسیته (MOE) در بین تیمارهای مورد مطالعه در شکل ۶ ارائه شده است. براساس نتایج، اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای مورد مطالعه از نظر میزان مدول الاستیسیته وجود داشت ($P < 0.05$). در بین تیمارهای مورد مطالعه، بیشترین میزان مدول الاستیسیته در تیمار PVAc تقویت شده با ۶ درصد نانوالیاف سلولزی و ۶ درصد نانوالیاف شیشه به چسب پلی وینیل استات (PVAc) می‌تواند با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی، افزودن نانوالیاف سلولز در سطح ۳ درصد به چسب پلی وینیل استات (PVAc) می‌تواند مدول الاستیسیته اتصالات در سازه‌های چوبی راش را تا حد قابل توجهی افزایش دهد.

مدول الاستیسیته (MOE): نتایج مربوط به مدول الاستیسیته (MOE) در بین تیمارهای مورد مطالعه در شکل ۶ ارائه شده است. براساس نتایج، اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای مورد مطالعه از نظر میزان مدول الاستیسیته وجود داشت ($P < 0.05$). در بین تیمارهای مورد مطالعه، بیشترین میزان مدول الاستیسیته در تیمار PVAc تقویت شده با ۶ درصد نانوالیاف سلولزی و ۶ درصد نانوالیاف شیشه به چسب پلی وینیل استات (PVAc) می‌تواند با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی، افزودن نانوالیاف سلولز در سطح ۳ درصد به چسب پلی وینیل استات (PVAc) می‌تواند مدول گسیختگی اتصالات چوب راش را تا حد قابل ملاحظه‌ای بهبود ببخشد.



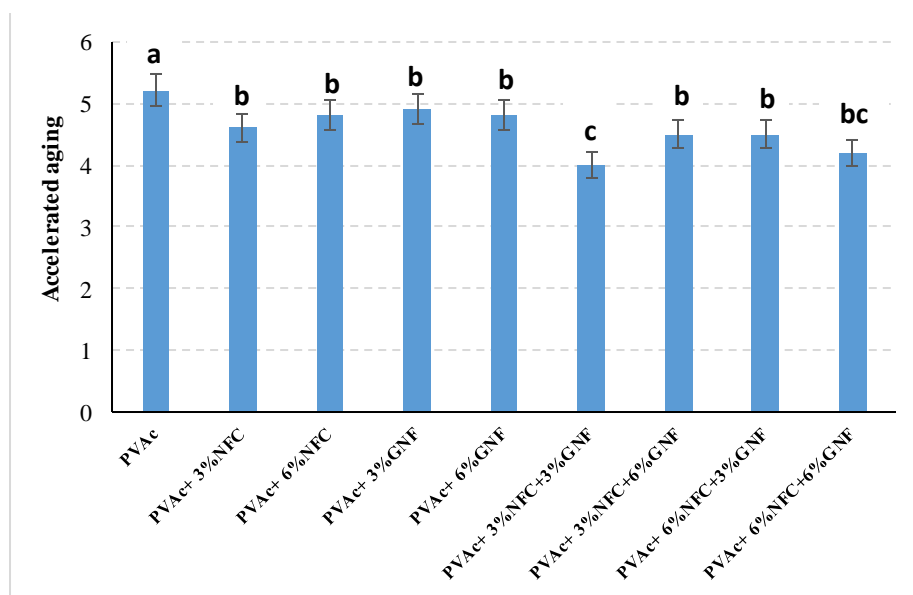
شکل ۶- نتایج مربوط به مدول الاستیسیته (MOE) در بین تیمارهای مورد مطالعه (NFC: نانوالیاف سلولز، GNF: نانوالیاف شیشه)

Figure 6. The results of the modulus of elasticity (MOE) among the studied treatments (NFC: cellulose nanofibers, GNF: glass nanofibers)

کهنگی تسریع شده

۳ درصد نانوالیاف سلولز و ۳ درصد نانوالیاف شیشه (۴ MPa) به ثبت رسید. نتایج نشان داد که تفاوت معنی داری بین کهنگی تسریع شده در تیمار PVAc حاوی ۳ درصد نانوالیاف سلولز و ۳ درصد نانوالیاف شیشه با سایر تیمارها وجود دارد ($P < 0.05$). این یافته‌ها نشان می‌دهد که افزودن نانوالیاف سلولز و نانوالیاف شیشه در سطح ۳ درصد به چسب پلی وینیل استات (PVAc) می‌تواند میزان کهنگی تسریع شده اتصالات چوبی را تا حد قابل توجهی کاهش دهد.

نتایج مربوط به آزمون کهنگی تسریع شده در بین تیمارهای مورد مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است. براساس نتایج، اختلاف معنی داری بین تیمارهای مورد بررسی از نظر میزان کهنگی تسریع شده وجود داشت ($P < 0.05$). در بین تیمارهای مورد مطالعه، بیشترین میزان کهنگی تسریع شده در تیمار PVAc خالص (۵/۲) مشاهده گردید، این در حالی است که کمترین میزان کهنگی تسریع شده نیز در تیمار PVAc حاوی



شکل ۷- نتایج حاصل از آزمون کهنگی تسریع شده (NFC: نانوالیاف سلولز، GNF: نانوالیاف شیشه)

Figure 7. The results of accelerated aging test (NFC: cellulose nanofibers, GNF: glass nanofibers)

است. همچنین از مقایسه طیف مخلوط کلی این ترکیبات با مخلوط‌های سه تایی از این ترکیبات می‌توان نتایج زیر را استنباط کرد: از مقایسه طیف ترکیب ذکر شده با طیف مخلوط ترکیبات چسب PVA، چوب راش و الیاف شیشه، پیک مربوط به ارتعاشات کششی پیوند M-O در ناحیه $\nu = 607 \text{ cm}^{-1}$ ظاهر شده است که می‌تواند دلیل اضافه شدن ترکیب الیاف شیشه به ساختار باشد. همچنین با مقایسه طیف ترکیب ذکر شده با طیف مخلوط ترکیبات چسب PVA، چوب راش و نانو سلولز الیاف می‌توان نتایج زیر را استنباط کرد؛ باند جذبی مربوط به گروه‌های هیدروکسیل درگیر در پیوند

طیف‌سنجی FTIR

نتایج حاصل از طیف‌سنجی FTIR مربوط به تیمارهای مورد مطالعه در جدول ۴ و شکل ۸ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در طیف ترکیب کلی چسب PVA، چوب راش، نانوسلولز و الیاف شیشه نسبت به طیف نمونه‌های چوب راش، چسب PVA و الیاف شیشه و مخلوط‌های سه تایی از این ترکیبات، هیچ‌گونه تغییری در پیک‌های شاخص (حذف پیک و یا ظاهر شدن پیک جدید) مشاهده نشده است. در واقع، این پدیده نشان‌دهنده این واقعیت است که هیچ نوع واکنشی بین این اجزا که منجر به تولید ترکیبات جدید شود، رخ نداده

هیدروژنی از عدد موجی $U=3336 \text{ cm}^{-1}$ به هیدروژنی $U=3438 \text{ cm}^{-1}$ شیفت پیدا کرده است. جابه‌جایی به عدد موجی بالاتر می‌تواند دلیل دیگری بر بیشتر شدن پیوند

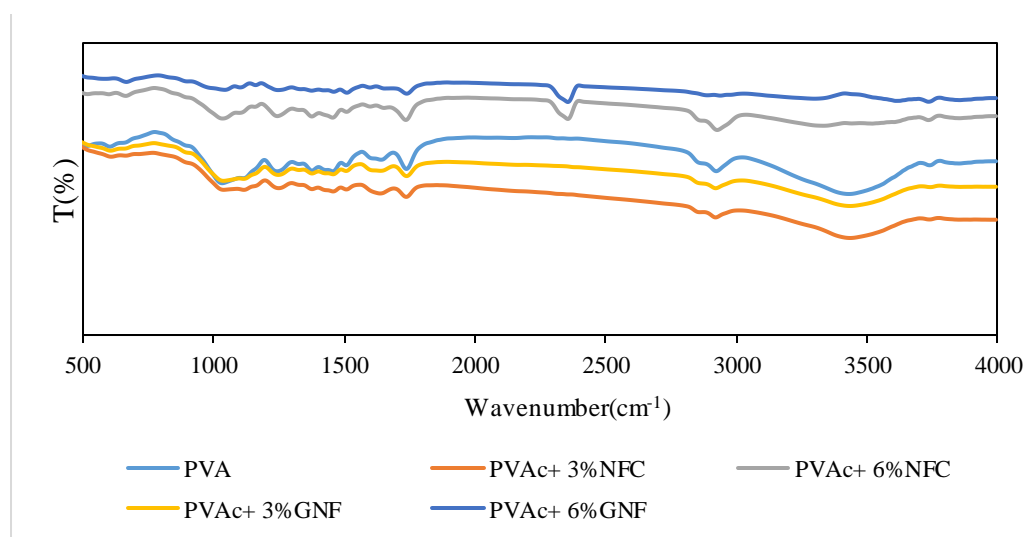
هیدروژنی درون مولکولی بدلیل حضور ترکیب نانوسلولز الیاف باشد.

جدول ۴- تفسیر طیف FTIR مربوط به نمونه ترکیب چسب PVAc، چوب راش، نانو سلولز الیاف و الیاف شیشه

Table 4- Interpretation of the FTIR spectrum related to the composite sample of PVAc adhesive, beech wood, nano cellulose fibers and glass fibers

The nature of vibrations	Approximate Wavenumber (cm^{-1})
OH-stretching vibrations	Broad peak at 3438 (due to hydrogen bonding)
Symmetric and asymmetric stretching vibrations of aliphatic C-H	2923
Stretching vibrations of ester groups (C=O)	1740
OH bending vibrations	
CH ₂ out-of-plane bending vibrations	1459
C-O stretching vibrations of esters	1249
C-O stretching vibrations of type 1 alcohol	1040
M-O stretching vibrations	607

Note: M refers to metals in the structure of glass fibers.



شکل ۸- طیف‌سنجی FTIR مربوط به تیمارهای مورد مطالعه

Figure 8. FTIR spectroscopy related to the studied treatments

به طوری که این محققان بیان کردند با افزودن نانوالیاف سلولزی (CNFs) به چسب PVAc، ویسکوزیته و مقاومت این چسب در برابر آب افزایش یافته و عملکرد مکانیکی چسب در شرایط مرطوب به شدت بهبود می‌یابد. Deng و همکاران (۲۰۱۴) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند و بیان کردند در فیلم‌های کامپوزیتی پلی وینیل استات-نانوالیاف سلولز

بحث

تأثیر نانومواد تقویت کننده بر ویژگی‌های فیزیکی چسب

PVAc

در این مطالعه، ویسکوزیته چسب به علت افزایش نانوالیاف سلولز به میزان اندکی افزایش یافت. این نتیجه با یافته‌های Boufi و Chaabouni (۲۰۱۷) هم‌خوانی دارد؛

این نتایج با یافته‌های ارائه شده در این تحقیق نیز هم‌خوانی داشت، به‌گونه‌ای که کمترین مدول الاستیسیته در این تحقیق (۱۱۶۷۵/۳۲) مگاپاسکال، در نمونه‌های شاهد (PVAc خالص) مشاهده شد. Madhooshi و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند با افزودن نانوالیاف اعم از نانوالیاف سلولزی و لیگنوسلولزی به رزین اپوکسی، سطح مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی افزایش می‌یابد که این افزایش برای نمونه‌های تقویت‌شده با نانوالیاف سلولزی بیشتر از نمونه‌های تقویت‌شده با نانوالیاف لیگنوسلولزی بود. این محققان مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی برای نمونه‌های تقویت‌شده با نانوالیاف سلولزی را به ترتیب ۲۹۲۱/۴۳ و ۶۲/۱۶۰ مگاپاسکال و برای نانوالیاف لیگنوسلولزی به ترتیب ۱۵۴۹ و ۱۱۱/۷۴ مگاپاسکال ثبت کردند. بررسی مقادیر مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی بین نمونه‌های تقویت‌شده با نانوالیاف سلولزی در مطالعه Madhooshi و همکاران (۲۰۱۷) و این تحقیق نشان می‌دهد که خواص مکانیکی بیشتر از این تحقیق است که علت آن را می‌توان به تفاوت در نوع چسب‌های به‌کار رفته (رزین اپوکسی و PVAc) و نوع گونه چوبی نسبت داد.

در این پژوهش، گونه چوبی مورد مطالعه راش بود که طبق تحقیقات پیشین (Salari, 2018; Salari *et al.*, 2018)، دارای دانسیته بالاتری در مقایسه با گونه‌های دیگر چوب مانند صنوبر و نراد بود. با توجه به این موضوع، تفاوت بین گونه‌های چوبی مورد استفاده و به تبع آن، تفاوت موجود بین دانسیته چوب‌ها می‌تواند میزان اثربخشی نانو ذرات را در استحکام پیوندهای چسب-چوب و بهبود خواص مکانیکی پلیمر PVAc و اتصالات چوبی تحت تأثیر قرار دهد.

براساس نتایج به‌دست آمده، بیشترین مقاومت کششی و خمشی در بین تیمارهای مورد مطالعه مربوط به تیمار PVAc تقویت‌شده با ۳ درصد نانوالیاف سلولزی و ۳ درصد نانوالیاف شیشه بود. این مسئله نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از هر دو نوع از نانوالیاف مورد مطالعه (NFC/GNF)، می‌تواند تأثیرات معنی‌داری در افزایش قدرت چسبندگی پلی وینیل استات (PVAc) داشته باشد. این نتیجه با یافته‌های ارائه شده

(CNFs-PVA)، برهم‌کنش قوی و سازگاری خوبی بین CNFs و مولکول‌های PVA وجود دارد که علت آن را می‌توان به ماهیت قطبی دو ماده نسبت داد.

در این تحقیق، بیشترین میزان کاهش ماده جامد در تیمار PVAc حاوی ۶ درصد نانوالیاف سلولزی و ۶ درصد نانوالیاف شیشه مشاهده گردید که این نتیجه بیانگر افزایش میزان چسبندگی چسب PVAc در نمونه‌های این تیمار است. نتایج ارائه شده در این تحقیق با یافته‌های Kaboorani و همکاران (۲۰۱۲) هم‌خوانی داشت؛ به‌طوری‌که این پژوهشگران استفاده از نانوالیاف سلولزی را در بهبود عملکرد چسب پلی وینیل استات (PVAc) مثبت ارزیابی کردند و بیان نمودند که افزودن نانوالیاف سلولزی به پلیمر PVAc، استحکام پیوند و چسبندگی را در شبکه‌های سه بُعدی چسب افزایش می‌دهد. Kamboj و همکاران (۲۰۲۲) نیز به نتایج مشابه با آنچه در این مطالعه بیان شد، دست یافتند. این محققان ظرفیت نانوالیاف سلولزی (CNF) و نانوبلورهای سلولزی را در تقویت ماتریس پلیمری PVAc مثبت ارزیابی کردند و بیان نمودند که افزودن نانوسلولز به PVAc می‌تواند استحکام پیوند و چسبندگی آن را بهبود ببخشد.

تأثیر نانومواد تقویت‌کننده بر خواص مکانیکی اتصالات چوبی

در این تحقیق، بررسی خواص مکانیکی در محل اتصالات چوب راش نشان داد که با افزودن نانوالیاف سلولزی به چسب PVAc، مقاومت کششی و خمشی (مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته) بهبود می‌یابد. این نتایج با یافته‌های ارائه شده در مطالعات پیشین از جمله Madhooshi و همکاران (۲۰۱۷) هم‌خوانی داشت، به‌طوری‌که آنان اظهار داشتند با افزایش نانو ذرات سلولزی و لیگنوسلولزی تا مقدار ۰/۲ درصد، مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی رزین اپوکسی در محل اتصالات افزایش یافت، اما با افزایش این مواد از ۰/۲ تا ۰/۳ درصد، ویژگی‌های مکانیکی مذکور روند نزولی داشتند. در مطالعه Madhooshi و همکاران (۲۰۱۷)، کمترین مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی مربوط به نمونه‌های شاهد بود که به ترتیب ۱۴۲۳/۲۴ و ۷۴/۷۵ مگاپاسکال ثبت شدند.

افزایش می‌یابد که منجر به کاهش وزن نمونه‌های چوب و کاهش استحکام و مقاومت چسبندگی PVAc می‌شود. شناورسازی نمونه‌ها در آب یکی از مراحل مهم در آزمون کهنگی تسریع شده است. در طی این مرحله، محصولات لیگنینی تخریب شده در مراحل بخاردهی، گرمادهی و فریز توسط جریان آب شسته می‌شوند. شسته شدن محصولات لیگنینی در نهایت منجر به کاهش استحکام الیاف سلولزی در سطح نمونه‌های چوب می‌شود و مقاومت چسبندگی چوب تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابد (Gürsoy and Ayrilmis, 2023). نظر به اینکه ویژگی‌های مکانیکی در نمونه‌های کهنه شده تحت تأثیر پارامترهای محیطی و همچنین اکسیداسیون سطحی قرار دارند، با افزایش مدت زمان آزمون کهنگی و تجمع گروه‌های کربونیل، امکان ایجاد ترک‌های سطحی در اتصالات چوبی و کاهش مقاومت چسبندگی PVAc افزایش می‌یابد (Lee et al., 1994).

در این مطالعه، همان‌طور که قبلاً در مورد خواص مکانیکی نیز اشاره شد، بررسی عملکرد نانوالیاف سلولزی (NFC) در آزمون کهنگی تسریع شده نشان داد که نانوالیاف سلولزی در مقایسه با نانوالیاف شیشه، از ظرفیت نسبتاً بهتری برای جلوگیری از زیست‌تخریب پذیری ماتریس پلیمری PVAc و اتصالات چوب راش برخوردار است. با این حال، عوامل مهمی در آزمون کهنگی وجود دارند که قابلیت چسبندگی نانوالیاف سلولزی (NFC) را تغییر می‌دهند. Turkoglu و همکاران (۲۰۱۵) بیان کردند که رطوبت بلندمدت و افزایش مدت زمان آزمون کهنگی منجر می‌شود که پوشش‌های سلولزی قابلیت چسبندگی خود را از دست بدهند. طبق مطالعات انجام شده، تخریب سطح چوب به دلیل تغییر رنگ آن مشخص می‌شود و پس‌از آن، با افزایش زبری سطح و ایجاد ترک‌های مختلف ادامه می‌یابد. براساس Andraday و همکاران (۲۰۲۳)، اشعه ماورای بنفش خورشید یکی از عوامل طبیعی مهم در کهنگی سازه‌های چوبی به‌شمار می‌رود که با ایجاد رادیکال‌های آزاد، بیشترین نقش را در تخریب لیگنین دیواره سلولی ایفا می‌نماید. گروه‌های کربونیل و کربوکسیل که مسئول تغییرات رنگ در سطح چوب میباشند،

در تحقیقات قبلی از جمله Bardak و همکاران (۲۰۱۷) و Örs و همکاران (۲۰۰۰) هم‌خوانی داشت. Bardak و همکاران (۲۰۱۷) در ارزیابی تأثیر نانو اکسید تیتانیوم (Nano-TiO₂) و نانو اکسید سیلیسیم (Nano-SiO₂) در بهبود عملکرد چسب پلی وینیل استات (PVAc) به منظور افزایش استحکام و پایداری اتصالات در سازه‌های چوب راش و بلوط نشان دادند که افزودن نانو اکسید تیتانیوم و نانو اکسید سیلیسیم از ۱ درصد به ۴ درصد، موجب افزایش هر دو مقاومت کششی و خمشی شده است. مشابه نتایج این پژوهش، یافته‌های حاصل از تحقیق Örs و همکاران (۲۰۰۰) نشان داد که افزایش مقدار نانوالیاف سلولزی (NFC) در ماتریس PVAc تقویتی داشت و منجر به بهبود استحکام کششی و مدول کششی فیلم‌های PVAc تقویت شده با NFC شد. در واقع، کاهش جذب آب در دمای بالا (۷۰ درجه سانتی‌گراد) با افزایش مقدار نانوالیاف سلولزی، موجب کارایی پیوند بین تقویت‌کننده و ماتریس چسب شد و چسبندگی مطلوبی به دلیل پیوند هیدروژنی نشان داد. در این مطالعه نیز نتایجی مشابه با Örs و همکاران (۲۰۰۰) حاصل شد، به طوری که پیوند بین نانوالیاف سلولزی و ماتریس PVAc از چسبندگی مطلوبی برخوردار بود.

تأثیر نانومواد تقویت‌کننده بر کهنگی تسریع شده این مطالعه نشان داد که با استفاده ترکیبی از نانوالیاف سلولزی (NFC) و نانوالیاف شیشه (GNF) در سطح ۳ درصد و افزودن این نانومواد به ماتریس پلیمری PVAc می‌توان میزان تخریب پذیری اتصالات چوبی را که بیشتر تحت تأثیر عوامل دما و رطوبت قرار دارند، بهبود بخشید. مرحله بخاردهی در آزمون کهنگی تسریع شده باعث جذب رطوبت نمونه‌های چوب شده و منجر به واکنشیدگی الیاف و کاهش مقاومت چسبندگی پوشش می‌شود. اگر زمان اثرگذاری رطوبت روی نمونه‌های چوب افزایش یابد، پوشش‌ها به سرعت قابلیت چسبندگی خود را از دست می‌دهند. Boufi و Chaabouni (۲۰۱۷) بیان کردند که با افزایش مدت زمان آزمون کهنگی تسریع شده، تجمع گروه‌های کربونیل

سنتی چوب راش اجرا شد. به‌طورکلی، این پژوهش نشان داد که با افزودن نانوالیاف سلولزی در سطح ۳ درصد و نانوالیاف شیشه در سطح ۳ درصد به چسب PVAc، میزان کهنگی تسریع‌شده در هنگام تغییرات اقلیمی (دما و رطوبت) کاهش و خواص مکانیکی اتصالات در سازه‌های چوبی راش بهبود می‌یابد. علاوه بر این، براساس نتایج به‌دست آمده، با افزایش میزان نانوالیاف سلولز تا یک حد معین، درصد مواد جامد و دانسیته چسب PVAc کاهش می‌یابد، درحالی‌که ویسکوزیته چسب مقدار کمی افزایش می‌یابد. تغییر این پارامترها در چسب PVAc می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی در مقاومت بالای اتصالات چوبی داشته باشد. با توجه به این موضوع، استفاده از نانوالیاف سلولزی (NFC) به‌منظور بهبود خواص مقاومتی اتصالات کام و زبانه در سازه‌های چوبی سنتی توصیه می‌شود.

به‌دلیل واکنش این رادیکال‌های آزاد با اکسیژن تولید میشوند (Dirckx *et al.*, 1992; Ayadi *et al.*, 2003). در مرحله مهمی از آزمون کهنگی، محصولات تخریب شده مانند لیگنین به‌دلیل شناورسازی نمونه‌ها در آب شسته می‌شوند. تخریب این محصولات و درنهایت، شسته‌شدن آنها منجر به کاهش استحکام الیاف سلولزی در سطح چوب، افزایش زبری و کاهش مقاومت چسبندگی پوشش چوب می‌شود. Teacă و همکاران (۲۰۱۳) بیان کردند که با تأثیر متقابل پارامترهای محیطی مانند ترکیب آب با اشعه ماورای بنفش، کهنگی و تخریب سطح چوب به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (Ghosh *et al.*, 2009).

نتیجه‌گیری

این مطالعه به‌منظور ارزیابی تأثیر نانوالیاف سلولزی در بهبود عملکرد چسب پلی وینیل استات (PVAc) به‌منظور افزایش استحکام و پایداری اتصالات کام و زبانه در سازه‌های

References

- Akhtari, M. and Arefkhani, M., 2010. Investigation effect of Weathering on Acetylated Beech Wood by FTIR Spectroscopy and Electron Microscopic. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 25(1): 48-61. DOI: 10.22092/ijwpr.2010.117265
- Andrady, A.L., Heikkilä, A.M., Pandey, K.K., Bruckman, L.S., White, C.C., Zhu, M. and Zhu, L., 2023. Effects of UV radiation on natural and synthetic materials. Photochem Photobiol Sci., 22(5): 1177-1202. DOI: 10.1007/s43630-023-00377-6
- Aniñon, M.J.C. and Garciano, L.E.O., 2024. Advances in Connection Techniques for Raw Bamboo Structures—A Review. Buildings, 14(4):1126. DOI: 10.3390/buildings14041126
- Ayadi, N., Lejeune, F., Charrier, F., Charrier, B. and Merlin, A., 2003. Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. Holz als Roh-und Werkstoff, 61(3): 221-226.
- Bardak, T., Tankut, A.N., Tankut, N., Aydemir, D. and Sozen, E., 2017. The bending and tension strength of furniture joints bonded with polyvinyl acetate nanocomposites. Maderas. Ciencia y tecnología, 19(1): 51-62. DOI: 10.4067/S0718-221X2017005000005
- Chaabouni, O. and Boufi, S., 2017. Cellulose Nanofibrils/Polyvinyl Acetate Nanocomposite Adhesives with Improved Mechanical Properties. Carbohydrate Polymers, 156: 64-70. DOI: 10.1016/j.carbpol.2016.09.016
- Deng Q., Li J., Yang J., Li D., 2014. Optical and flexible α -chitin nanofibers reinforced poly(vinyl alcohol) (PVA) composite film: Fabrication and property. Compos. A Appl. Sci. Manuf., 67: 55-60. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.08.013
- Dirckx, O., Triboulot-Trouy, M. C., Merlin, A. and Deglise, X., 1992. Modifications de la couleur du bois d'Abies grandis exposé à la lumière solaire. In Annales des sciences forestières. EDP Sciences, 49(5): 425-447.
- Ehsani, A, H., Shirzadian Gilan, M., Ghafouri Sayad, A. and Shokrgozar Navi, A., 2012. Presentation and analysis of the appropriate method to increase the strength of adhesive joints in the case of the same volume of adhesive. Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering, 6(2): 19-24.
- Elmaghraby N.A., Omer A.M., Kenawy E.R., Gaber M., Ragab S. and Nemr A.E., 2023. Composite nanofiber formation using a mixture of cellulose acetate and activated carbon for oil spill treatment. Environmental Science and Pollution Research, 30(13): 38683-38699. DOI: 10.1007/s11356-022-24982-7
- Ghosh, S. C., Militz, H. and Mai, C. (2009). Natural weathering of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) boards

- modified with functionalised commercial silicone emulsions. *BioResources*, 4(2): 659-673.
- Gürsoy, S. and Ayrilmis, N. (2023). Effect of Lignin Modification of Recycled and Fresh Wood Fibers on Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Fiberboard. *Forests*, 14(10):2007. DOI: 10.3390/f14102007
- Hasani Khorshidi, F. and Emadi, M., 2017. Studying effect of accelerated aging on adhesion resistance of half polyester and polyurethane transparent coatings applied on maple and pine species. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 32(2): 205-214. DOI: 10.22092/ijwpr.2017.109580
- Jatoi A.W., Kumar P., Kim I.S., Ni Q.Q. (2019). Sonication induced effective approach for coloration of compact polyacrylonitrile (PAN) nanofibers. *Ultrason Sonochem*, 51:399-405. DOI: 10.1016/j.msec.2020.110679 .
- Jatoi A.W., Ogasawara H., Kim I.S., Ni Q-Q. (2020). Cellulose acetate/multi-wall carbon nanotube/Ag nanofiber composite for antibacterial applications. *Mater Sci Eng C*, 110:110679. DOI: 10.1016/j.msc.2020.110679.
- Jiang, W., Haapala, A., Tomppo, L., Pakarinen, T., Sirviö, J.A. and Liimatainen, H. (2018). Effect of Cellulose Nanofibrils on the Bond Strength of Polyvinyl Acetate and Starch Adhesives for Wood. *BioResources*, 13: 2283-2292. DOI: 10.15376/biores.13.2.2283-2292
- Kaborani, A. and Riedl, B., 2011. Effects of adding nano-clay on performance of polyvinyl acetate (PVA) as a wood adhesive. *Composites: Part A*, 42: 1031-1039.
- Kaborani, A., Riedl, B., Blanchet, P., Fellin, M., Hosseinaei, O. and Wang, S., 2012. Nanocrystalline cellulose (NCC): A renewable nano-material for polyvinyl acetate (PVA) adhesive. *European Polymer Journal*, 48: 1829-1837.
- Keshtegar, B. A., Madhoushi, M., Rashidi, A. and Mashkour, M., 2019. The influence of reinforcement of polyvinyl acetate adhesive (PVAc) with carbon nanofiber (CNF) on the bending moment capacity of the corner joint of the furniture. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 34(2): 242-254. DOI: 10.22092/ijwpr.2019.125633.1532
- Kamboj, G., Gaff, M., Smardzewski, J., and Haviarová, E., 2022. Effect of Cellulose Nanofiber and Cellulose Nanocrystals Reinforcement on the Strength and Stiffness of PVAc Bonded Joints. *Composite Structures*, 295(126): 2022295. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115821
- Mittal, K.L., 2012. *Adhesion Aspects of Polymeric Coatings*, Springer Science and Business Media, USA, pp. 569-582.
- Lee, J.O., Kim, B.K., Ha, C.S. and Song, K.W., 1994. Rheological and mechanical properties of PP/PE binary and PP/PE/EPDM ternary blends. *Polymer Korea*, 18: 68-68.
- López-Suevos, F., Eyholzer, C., Bordeanu, N. and Richter, K., 2010. DMA Analysis and Wood Bonding of PVAc Latex Reinforced with Cellulose Nanofibrils. *Cellulose*, 17: 387-398. DOI: 10.1007/s10570-010-9396-8
- Madhooshi, M., Mehdinia, M. and Yousefi, H., 2017. Study of physical and mechanical properties of cellulosic and lignocellulosic nanofibers reinforced epoxy resin. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 23(2): 295-273. DOI: 10.22069/jwfst.2017.11103.1580
- Moghaddasi Jahromi, Z., 2017. Importance and how to protect and maintain ancient monuments and historical buildings. Conference of Islamic and historical architecture and urban planning researches in Iran. Shiraz, Iran.
- Najafianashrafi, M., Moradpour, P., Jahan latibari, A. and Edalat, H., 2023. Adhesive Modification and Improvement of Properties of Polyvinyl Acetate Using Nano silica. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 38(2): 128-140. DOI: 10.22092/ijwpr.2023.361007.1743
- Örs, Y., Atar, M. and Özçifçi, A., 2000. Bonding Strength of Poly(vinyl acetate)-Based Adhesives in Some Wood Materials Treated with Impregnation. *Journal of Applied Polymer Science*, 76: 1472-1479.
- Qiao, L. and Eastal, A.J., 2001. Aspects of the Performance of PVAc Adhesives in Wood Joints. *Pigment and Resin Technology*, 30: 79-87.
- Roffael, E., 2006. Volatile Organic Compounds and Formaldehyde in Nature, Wood and Wood Based Panels. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 64: 144-149. DOI: 10.1007/s00107-005-0061-0
- Salari, A., 2018. Modifying the characteristics of polyvinyl acetate resin (PVAc) using nanocellulose and polyvinyl alcohol. Thesis (Ph.D.). Department of Science and Wood and Paper Industries, Tehran University of Agriculture and Natural Resources, Karaj, 134 p.
- Salari, A., Faezipour, M., Karimi, A., Jonoobi, M. and Moradpour, P., 2018. Investigation of the effect of modified poly vinyl acetate on the stress carrying capacity of corner joints in the wood members joined with dowel. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 9(3): 323-336.
- Sedlarik, V. N., Saha, I., Kuritka, P. and Saha, P., 2007. Environmentally friendly biocomposites based on waste of the dairy industry and poly(vinyl alcohol).

- Journal of Applied Polymer Science, 106(3): 1869-1879.
- Teacă, C.A., Rosu, D., Bodîrlău, R. and Rosu, L., 2013. Structural Changes in Wood under Artificial UV Light Irradiation Determined by FTIR Spectroscopy and Color Measurements – A Brief Review. *BioResources*, 8(1): 1-17. DOI: 10.15376/biores.8.1.1478-1507
- Turkoglu, T., Baysal, E., Kureli, I., Toker, H. and Ergun, M.E., 2015. The Effect of natural weathering on hardness and gloss of impregnated and vanished scots pine and oriental beech wood. *Wood Research*, 60(5): 533-544.
- Ülker, O., 2016. Wood Adhesives and Bonding Theory. *InTech*, pp. 20-53. DOI: 10.5772/65759
- Vineeth, S. K., Gadhawe, R.V. and Gadekar, P. T., 2019. Nanocellulose Applications in Wood Adhesives—Review. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 9: 63-75. DOI: 10.4236/ojpcchem.2019.94006
- Zamani, K., Kanousi, M., Khazaian, A. and Mohammadi, J. 2019. Study on the physical and mechanical changes of beech wood due to storage in the forest and activity of the fungus. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 25(4): 35-50. DOI: 10.22069/jwfst.2018.15079.1751