

## تأثیر نانوفیبر سلولز (CNF) و نانورس در خواص آکوستیک اتصال انگشتی چوب کاج جنگلی (*Pinus sylvestris*) متصل شده با پلی وینیل استات (PVA)

بابک رنجبر<sup>۱</sup>، امیر لشگری<sup>۲\*</sup>، احمد جهان لتیاری<sup>۳</sup> و آژنگ تاج‌دینی<sup>۴</sup>

۱) دانشجوی دکتری تخصصی رشته علوم و صنایع چوب و کاغذ، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

۲) دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

\*رایانامه نویسنده مسئول مکاتبات: [amir.lashgari@kiau.ac.ir](mailto:amir.lashgari@kiau.ac.ir)

۳) استاد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

۴) دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

<https://doi.org/10.71916/jrn.2024.26801>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۱

### چکیده

در این پژوهش به بررسی اتصالات انگشتی چوب کاج جنگلی (*Pinus sylvestris*) با چسب پلی وینیل استات تقویت شده با ذرات نانوفیبر سلولز (CNF) و نانورس با روش ارتعاش آزاد در تیر دوسر آزاد پرداخته شد. اتصالات انگشتی در سه سطح ۰، ۰/۴ و ۱/۵ درصد حاوی ذرات نانوفیبر سلولز و نانورس در وسط نمونه‌ها ایجاد شدند. نتایج حاکی از افزایش معنی دار مقادیر مدول الاستیسیته و مدول سفتی دینامیک در اثر اضافه نمودن هر دو سطح ۰/۴ و ۱/۵ درصد نانوفیبر سلولز و نانورس بود. مقادیر میرایی ارتعاش با اضافه نمودن هر دو سطح ۰/۴ و ۱/۵ نانوفیبر سلولز و نانورس نسبت به نمونه‌های فاقد نانو ذرات از خود کاهش معنی داری نشان دادند. مقادیر کارایی تبدیل آکوستیک نیز با اضافه نمودن هر دو سطح ۰/۴ و ۱/۵ نانوفیبر سلولز و نانورس نسبت به نمونه‌های فاقد نانو ذرات از خود نسبت به نمونه‌های فاقد نانو از خود افزایش نشان دادند. به‌طور کل با افزایش درصد کاربرد هر دو نانوذره خواص آکوستیکی بهتری در اتصالات انگشتی ملاحظه شد که اثر نانوفیبر سلولز بیشتر از نانورس بود.

واژه‌های کلیدی: اتصال انگشتی، ارتعاش، کاج، نانورس، نانوفیبر سلولز.

### مقدمه

عضوهای چوبی تشکیل شده باشند، اما ممکن است شامل اتصالات چوب به فولاد یا دیگر عضوهای فلزی و غیرفلزی نیز باشند (Ayarkwa et al., 2000). علاوه بر این با توجه به منابع محدود چوبی در جهان اتصالات باعث کاهش هدررفت چوب می‌شود.

از اتصالات چسبی از سال‌های بسیار دور در ساخت انواع محصولات چوبی به اشکال گوناگون سر به سر<sup>۱</sup>، پهلوه‌پهلوه<sup>۲</sup> و

یکی از امتیازات اصلی چوب و فرآورده‌های مرکب آن به‌عنوان ماده سازه‌ای این است که به سادگی می‌توان اجزای سازه‌ای را با دامنه وسیعی از اتصال‌دهنده‌ها (انواع چسب‌ها و اتصال‌دهنده‌های مکانیکی) به یکدیگر متصل کرد. اتصال در سازه‌های چوبی اعم از ساختمان‌های چوبی یا مبلمان به معنی متصل شدن دو یا چند عضو به وسیله یک اتصال‌دهنده می‌باشد (Custodio et al., 2009). اتصالات ممکن است تماما از

تحقیق ایشان نشان داد افزایش درصد استفاده از نانورس در ترکیب چسب UF تاثیر معنی داری بر مقادیر مدول الاستیسیته ندارد درحالی که مقاومت خمشی با افزایش میزان مصرف نانورس از خود افزایش نشان داده است. Yavari و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی خواص آکوستیک چوب بلوط واجد اتصال‌های انگشتی و فارسی در زوایای مختلف با روش ارتعاش آزاد در تیر دو سر آزاد پرداختند. نتایج پژوهش ایشان حاکی از تاثیر بهتر چسب پلی‌وینیل استات نسبت به چسب ایزوسیانات بر ویژگی‌های آکوستیک این گونه بود. با توجه به اهمیت اتصالات چسبی در سازه‌های چوبی و تاثیر ذرات نانو در افزایش کارایی چسب‌ها هدف از انجام این پژوهش بررسی تاثیر استفاده از ذرات نانوفیبرسلولز و نانورس<sup>۴</sup> در ۳ سطح ۰، ۰/۴ و ۱/۵ (کشته‌گر و همکاران، ۱۳۹۸) درصد در اتصالات انگشتی با طول انگشتی ۱۰ میلی‌متر در گونه بلوط با چسب پلی‌وینیل استات با روش آزمون غیرمخرب ارتعاش آزاد خمشی در تیر دو سر آزاد می‌باشد.

#### مواد و روش‌ها

ابتدا تعداد ۱۰۰ نمونه کاملاً سالم و راست تار از چوب یک گرده بینه کاج جنگلی (*Pinus sylvestris*) بدون هر گونه عیب و ایراد ظاهری از جمله گره، ترک، پوسیدگی و کج تار بر طبق استاندارد بین‌المللی ISO شماره ۳۱۲۹ با ابعاد ۴×۴×۲ سانتی‌متر<sup>۵</sup> جهت انجام آزمون انتخاب شدند. نمونه‌ها به منظور رسیدن به رطوبت تعادل ۱۲ درصد به مدت ۳ هفته در اطاق کليما تيزه (با دمای ۲۱±۱ سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۵±۵ درصد) بر طبق استاندارد بین‌المللی ISO شماره ۳۱۲۹ در دستگاه کليما تيزه دانشگاه آزاد کرج قرار گرفتند. پس از طی مدت مذکور به منظور اطمینان بیشتر از عاری بودن نمونه‌ها از عیوب پنهان داخلی، نمونه‌های آزمون در دانشگاه مکانیک چوب دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج تحت آزمون ارتعاش خمشی آزاد در تیر دو سر آزاد بر اساس استاندارد ASTM C-02 (ASTM, 2002) قرار گرفته و بر اساس تئوری تیر تیموشنکو نمونه‌هایی که دارای بیشترین همبستگی (همبستگی بالای ۰/۹۸) بین مدهای اول تا سوم ارتعاشی

سطح به سطح<sup>۱</sup> استفاده می‌شود و گستردگی زیادی دارد (Custodio et al., 2009). اتصال انگشتی از مهم‌ترین اتصالات چسبی سربه‌سر در ساخت مصنوعات چوبی می‌باشد که با استفاده از این اتصال، امکان تولید قطعات چوبی با طول بلندتر و در مواردی صفحات با پهناي بیشتر با انواع چسب فراهم می‌گردد (Ayarkwa et al., 2000). تحقیقات زیادی در زمینه تولید اتصالات با استحکام بیشتر با استفاده از انواع ذرات نانو انجام شده است (Guo et al., 2018; Ismita & Lokesh, 2017; Hosseyni et al., 2014; Kaboorani & Ridell., 2011).

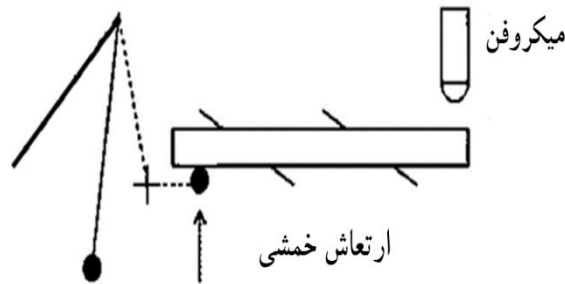
از انواع این ذرات می‌توان به ذرات نانوفیبرسلولز<sup>۲</sup> و نانورس اشاره کرد. سلولز که از اعضای خانواده پلی‌ساکاریدها است، فراوان‌ترین ماده زیستی و ماده تجدیدشونده طبیعی است که از دسته‌های رشته رشته مانند به اسم میکروفیبریل با قطر ۳ تا ۳۰ نانومتر تشکیل شده است. این ذرات به دلایلی همچون تجدیدپذیری، قیمت کم، سطح ویژه زیاد و مقاومت ویژه زیاد بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند (Beigloo et al., 2017). Kamboj و همکاران (۲۰۲۲) اثر استفاده از نانوفیبرسلولز در غلظت‌های مختلف را در اتصالات انگشتی متصل شده با چسب پلی‌وینیل استات<sup>۳</sup> در دو گونه چوب صنوبر (*Picea abies L*) و راش (*Fagus sylvatica*) مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد افزایش ۰/۰۱ نانوفیبرسلولز باعث بهبود خواص مکانیکی هر دو گونه می‌گردد. از نانورس نیز به‌عنوان پرکننده در ساخت نانوکامپوزیت‌ها در حجم قابل توجه استفاده می‌شود، به طوری که مصرف مقادیر اندکی از آن سبب افزایش مدول الاستیسیته، استحکام، مقاومت گرمایی، کاهش نفوذپذیری گاز، مقاومت در برابر اشتعال و بهبود خواص فیزیکی می‌گردد که بهبود خواص ذکر شده در اکثر مواقع باعث افت سایر ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی در محصول تولیدی نمی‌شود (Nafchi et al., 2015). از تحقیقات صورت گرفته در تاثیر استفاده از نانورس در خواص خمشی اتصال انگشتی در چوب‌آلات می‌توان به تحقیق Ismita و همکاران (۲۰۱۹) در چسب اوره فرمالدهید اشاره کرد. نتایج

4. Nano clay sodium montmorillonite  
5. Tangential × Radial × Longitudinal

1. Face to face  
2. CNF  
3. PVAc

مجدد ابعاد و وزن، مورد آزمون ارتعاش خمشی قرار گرفتند (شکل ۱).

بودند جهت ادامه آزمون انتخاب گردیدند (Roohnia et al., 2012). بر این اساس تعداد ۷۲ نمونه از نمونه‌های اولیه که حایز شرایط جهت ادامه تحقیق بودند، پس از اندازه‌گیری



شکل ۱. نمای شماتیک از آزمون ارتعاش خمشی آزاد در تیر دو سر آزاد

استفاده در این پژوهش از شرکت صنایع چسب شمال و نانوفیبرسلولز و نانورس از شرکت نگین شرق تهیه گردید (مشخصات مندرج در جدول ۱).

ضبط اصوات و ذخیره آن توسط نرم‌افزار Audacity® انجام پذیرفت. فایل صدا توسط سیستم NDT-lab® با همان فرکانس نمونه‌برداری قرائت گردید و محاسبات دینامیک صورت پذیرفت (Roohnia, 2007). چسب پلی‌وینیل استات مورد

جدول ۱. مشخصات چسب و ذرات نانو

چسب پلی‌وینیل استات	درصد مواد جامد	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	زمان گیرایی (در ۲۰ دقیقه)	پایه رقیق‌کننده
	۶۶-۶۲	۱/۱-۱/۵	۲۰-۱۰ دقیقه	اتیل استات
انواع نانو	نانو سلولز (CNF)	چگالی (گرم بر مترمکعب)	ابعاد (میکرومتر)	
			عرض	طول
		۱/۲	۲۰-۲۵	۲۰-۱۸۰
	نانورس		عرض	طول
	(Nanoclay sodium montmorillonite)	۰/۷	۴-۵	۱-۲
			قطر	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /gr)
			۳۲±۱۰	۳۱-۳۳
			۱۰-۱۵	۲۲۰-۲۷۰

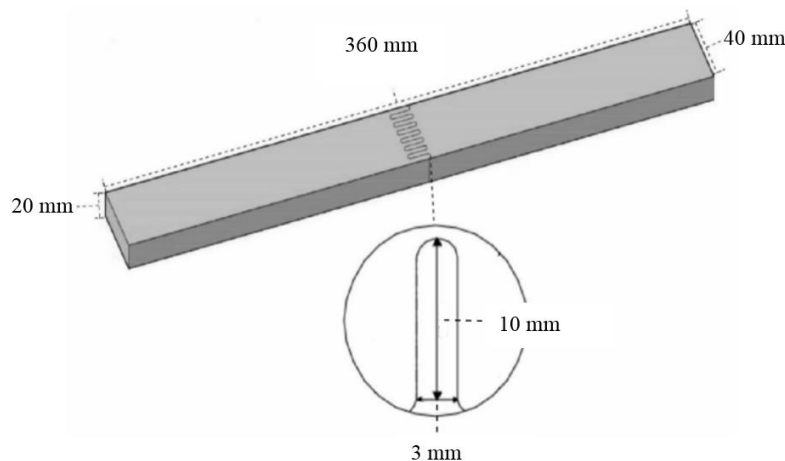
اتصال، مقدار مورد نیاز آن محاسبه شد (Roohnia et al., 2012). پس از چسب‌زنی نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت تا برقراری کامل اتصال در درون گیره دستی قرار گرفته و پس از آن مجدداً به منظور رسیدن به رطوبت تعادل ۱۲ درصد به مدت ۳ هفته در اطاق کلیماتیزه (با دمای ۲۱±۱ سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۵±۵٪) واقع شدند. آزمون ارتعاش خمشی آزاد در تیر دو سر آزاد بر روی نمونه‌های اتصال یافته مجدداً صورت گرفت و محاسبات دینامیک نیز بر روی اتصالات مطابق با تئوری تیر تیموشنکو انجام پذیرفت (Timoshenko, 1921).

نانوفیبرهای سلولز و نانورس در ۲ سطح ۰/۴ و ۱/۵ درصد بر اساس وزن کل چسب پلی‌وینیل استات با همزن دیجیتال به مدت ۱۵ دقیقه در دور ۲۰۰۰ برای پراکنش ذرات در دانشگاه مکانیک چوب دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج هم زده شدند (نجفیان اشرفی و همکاران، ۱۴۰۱). اتصال انگشتی با دستگاه تجاری MAKITA® در کارگاه صنعتی رزکان وسط آزمون‌ها شکل گرفت (شکل ۲). آزمون‌های اولیه به ۶ گروه ۳ تایی تقسیم شده و در ۳ سطح ۰، ۰/۴ و ۱/۵ با ذرات نانوفیبر سلولز و نانورس اتصال یافتند. مصرف چسب ۲۰۰ گرم بر مترمربع در نظر گرفته شد که پس از اندازه‌گیری مساحت

$$\lambda = \frac{1}{n} \ln \left| \frac{X_1}{X_{n+1}} \right| \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$a_n = \left( \frac{E}{\rho} \right) - \left( \frac{E}{K \times G_{ij}} \right) b_n, \quad R^2 \geq 0.98 \quad \text{رابطه (۱)}$$

میرایی حاصل از ارتعاش که شاخصی برای میزان افت ارتعاش در طول زمان است از رابطه (۲) محاسبه گردید (Bodig & Jayne, 1993).



شکل ۲. نمای شماتیک از اتصالات انگشتی

آزمون آماری T test در سطح ۹۵ درصد صورت پذیرفت. درصد تغییرات در مقادیر حاصل از هر یک از فاکتورهای اندازه‌گیری شده نسبت به نمونه‌های شاهد نیز محاسبه گردید. برای انجام آزمون‌های آماری از نرم‌افزار SPSS Ver. 17 و برای رسم نمودار ستونی و نقطه‌ای از نرم‌افزار MS ECXEL استفاده گردید.

### نتایج

در جدول (۲) میزان درصد تفاوت هر یک از فاکتورهای محاسباتی دینامیکی در اثر ایجاد اتصال با شرایط متفاوت نسبت به چوب بدون اتصال هر گروه آمده است. در جدول (۳) تاثیر چسب‌های پلی‌وینیل استات در ترکیب با نانوسلوز و نانورس در درصد‌های مختلف (۰، ۰/۴ و ۱/۵) نسبت به چوب بدون اتصال و نیز میزان درصد تفاوت هر یک از فاکتورهای محاسباتی دینامیکی در اثر ایجاد اتصال با شرایط متفاوت آمده است.

مدول سفتی (مدول الاستیسیته ویژه) از رابطه (۳) محاسبه شد:

$$S_L = \frac{E_L}{d} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن  $S_L$ : مدول سفتی (مدول الاستیسیته ویژه) ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{Kg}$ );  $E_L$ : مدول الاستیسیته ( $\text{Pa}$ ); و  $d$ : دانسیته ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) است (Bodig & Jayne, 1993).

کارایی تبدیل آکوستیک (ACE) که از فاکتورهای مهم آکوستیکی چوب‌آلات می‌باشد توسط رابطه (۴) محاسبه شد (Roohnia, 2019).

$$ACE = \frac{\sqrt{E}}{\lambda \rho^3} \quad \text{رابطه (۴)}$$

ACE: کارایی تبدیل آکوستیک ( $\text{M}^4/\text{s} \cdot \text{kg}$ );  $E$ : مدول الاستیسیته دینامیک ( $\text{Pa}$ ) حاصل از ارتعاش طولی;  $\rho$ : جرم ویژه ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); و  $\lambda$ : میرایی ارتعاش می‌باشند (Roohnia, 2019; Ono & Norimoto, 1983).

مقایسه میانگین‌های هر یک از ویژگی‌های آکوستیکی حاصل از هر مرحله آزمونی (نسبت به نمونه‌های شاهد) نیز توسط

جدول ۲. مقادیر کمی محاسبه شده

## استفاده از عوامل زیباشناسی در انتخاب درختان و درختچه های زینتی مناسب برای فضای شهری با .../۱۶۱

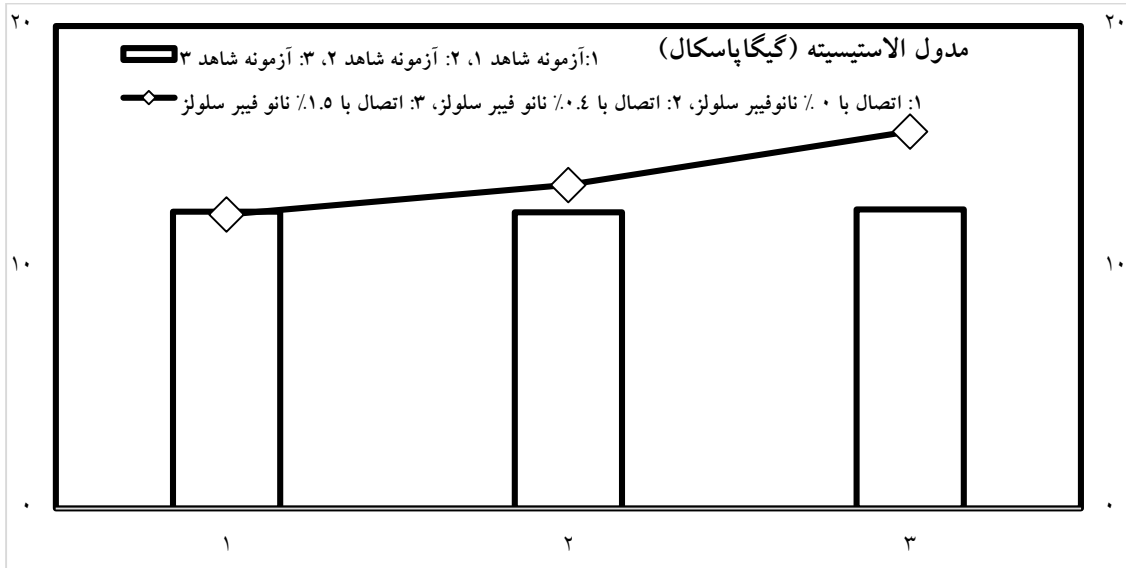
مدول الاستیسیته دینامیک (Gpa)	مدول سفتی (MPa.m <sup>3</sup> /Kg)	میرایی ارتعاش	کارآیی تبدیل آکوستیک (m <sup>4</sup> .s <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	
۱۲/۳۰	۲۵/۱۰	۰/۰۱۷۳	۱۲۲۶	نمونه شاهد گروه ۱
۱۲/۱۹	۲۴/۸۶	۰/۰۱۵۲۵	۸۲۴	۰٪
۱۲/۲۸	۲۹/۹۶	۰/۰۰۹۴۵	۱۲۸۰	نمونه شاهد گروه ۲
۱۳/۴۱	۲۹/۴۵	۰/۰۱۲۹۸	۹۵۷	۰٪/۴
۱۲/۴۰	۲۶/۶۰	۰/۰۱۵۸۶	۷۵۷	نمونه شاهد گروه ۳
۱۵/۶۲	۳۳/۵۴	۰/۰۲۰۹۸	۶۵۹	۱٪/۵
۱۴/۳۱	۱۸/۵۵	۰/۰۱۳۷۱	۴۶۰	نمونه شاهد گروه ۱
۱۴/۱۷	۱۸/۳۷	۰/۰۱۹۸۹	۳۰۳	۰٪
۱۲/۱۲	۱۷/۴۷	۰/۰۱۳۸۱	۴۰۴	نمونه شاهد گروه ۲
۱۲/۶۲	۱۸/۰۲	۰/۰۱۹۰۷	۲۹۵	۰٪/۴
۱۲/۱۸	۲۱/۰۷	۰/۰۱۰۵۲	۶۲۰	نمونه شاهد گروه ۳
۱۴/۳۸	۲۲/۷۷	۰/۰۱۴۳۷	۴۹۹	۱٪/۵

جدول ۳. مقادیر کمی محاسبه شده

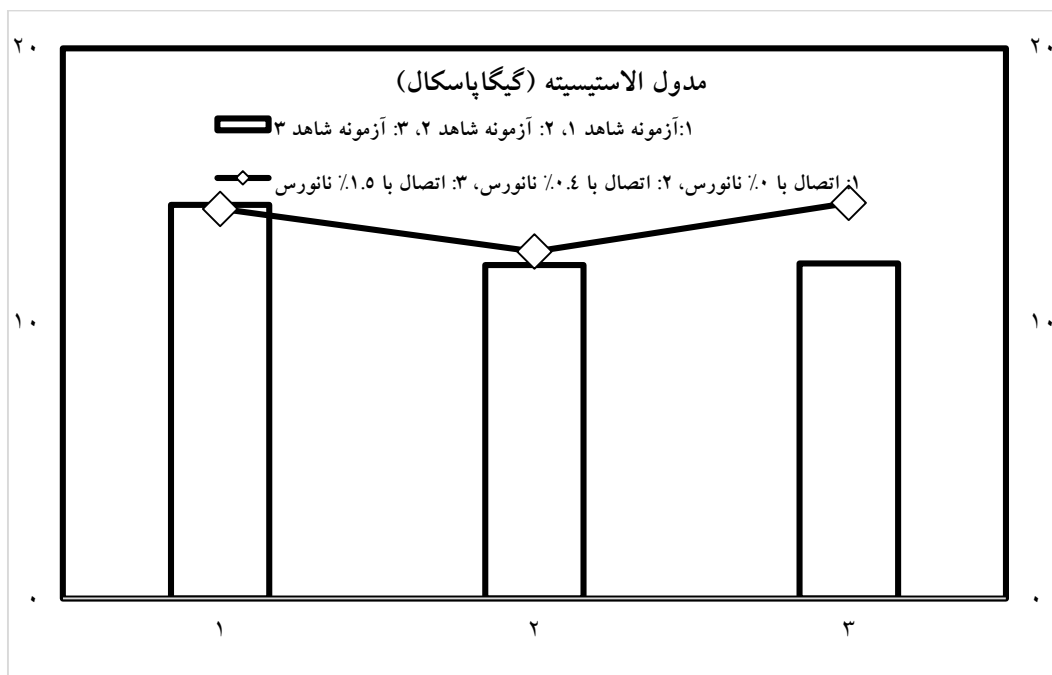
مدول الاستیسیته دینامیک (Gpa)	مدول سفتی (MPa.m <sup>3</sup> /Kg)	میرایی ارتعاش	کارآیی تبدیل آکوستیک (m <sup>4</sup> .s <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	
-۰/۹۵	-۰/۹۶	+۴۲/۱۱	-۳۲/۷۳	اتصال با ۰ درصد نانوسلولز
+۹/۲۴	+۹/۲۲	+۳۷/۳۴	-۲۵/۲۵	اتصال با ۰/۴ درصد نانوسلولز
+۲۶/۰۴	+۲۶/۱۰	+۳۲/۲۲	-۱۳/۱۱	اتصال با ۱/۵ درصد نانوسلولز
-۰/۹۹	-۰/۹۵	+۴۵/۰۵	-۳۴/۰۶	اتصال با ۰ درصد نانورس
+۴/۰۷	+۳/۱۷	+۳۸/۱۰	-۲۷/۰۴	اتصال با ۰/۴ درصد نانورس
+۱۸/۰۸	+۸/۰۴	+۳۶/۶۰	-۱۹/۵۷	اتصال با ۱/۵ درصد نانورس

در شکل (۴) تاثیر نانورس در مقادیر مدول الاستیسیته دینامیک اتصالات انگشتی حاصل از پلی وینیل استات شده است. همانطور که ملاحظه می گردد اضافه کردن هر دو مقادیر ۰/۴ و ۱/۵ درصد نانورس در چسب پلی وینیل استات باعث افزایش معنی دار مقادیر مدول الاستیسیته دینامیک شده است (به ترتیب ۴/۰۷ و ۱۸/۰۸ درصد نسبت به چوب یکپارچه).

ایجاد اتصال انگشتی بدون ترکیب چسب با ذرات نانوفیبرسلولز تاثیر معنی داری بر مقادیر مدول الاستیسیته دینامیک نسبت به چوب یکپارچه نداشت (افت به لحاظ عددی: ۰/۹۵ و ۰/۹۹ درصد در آزمونهای هر گروه نسبت به چوب یکپارچه). همانطور که در شکل (۳) ملاحظه می شود افزودن ۰/۴ و ۱/۵ درصد نانوفیبرسلولز سبب افزایش معنی دار مدول الاستیسیته دینامیک در چوبهای اتصال دار نسبت به چوب یکپارچه شده است (افزایش ۹/۲۴ و ۲۶/۰۴ درصد نسبت به چوب یکپارچه).



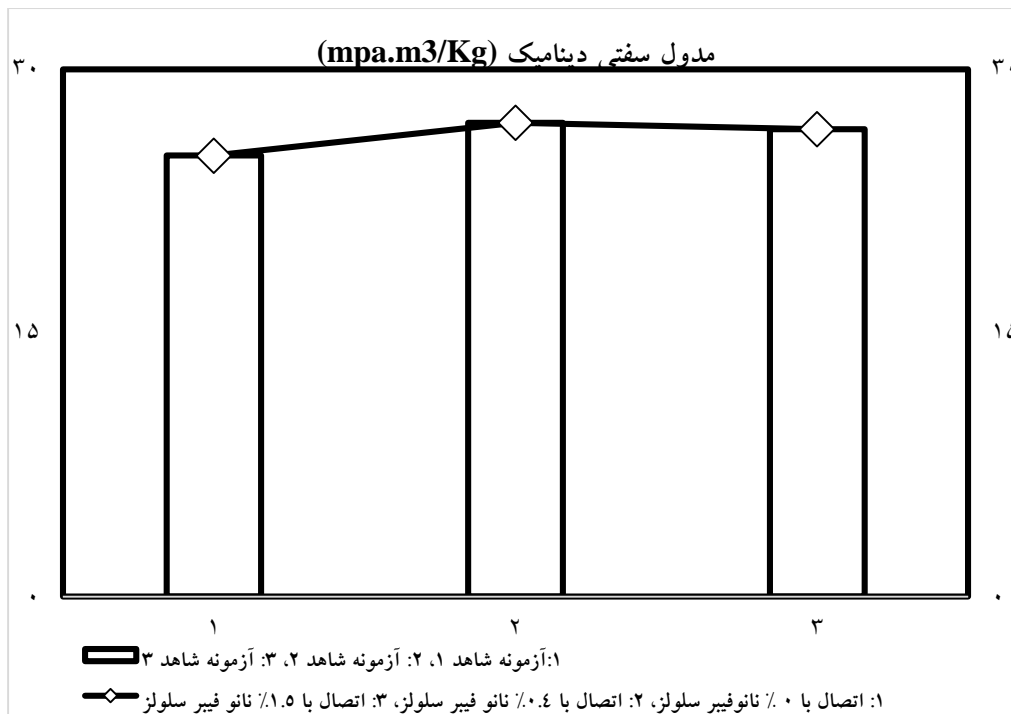
شکل ۳. تاثیر نانوفیبر سلولز بر مدول الاستیسیته دینامیک اتصالات



شکل ۴. تاثیر نانورس بر مدول الاستیسیته دینامیک اتصالات

به چوب یکپارچه). با افزایش نانوفیبر سلولز در هر دو مقادیر ۱/۵ و ۰/۴ درصد مقادیر مدول سفتی دینامیک به طور معنی داری افزایش یافته است (به ترتیب: ۹/۲۲ و ۲۶/۱۰ درصد نسبت به چوب یکپارچه).

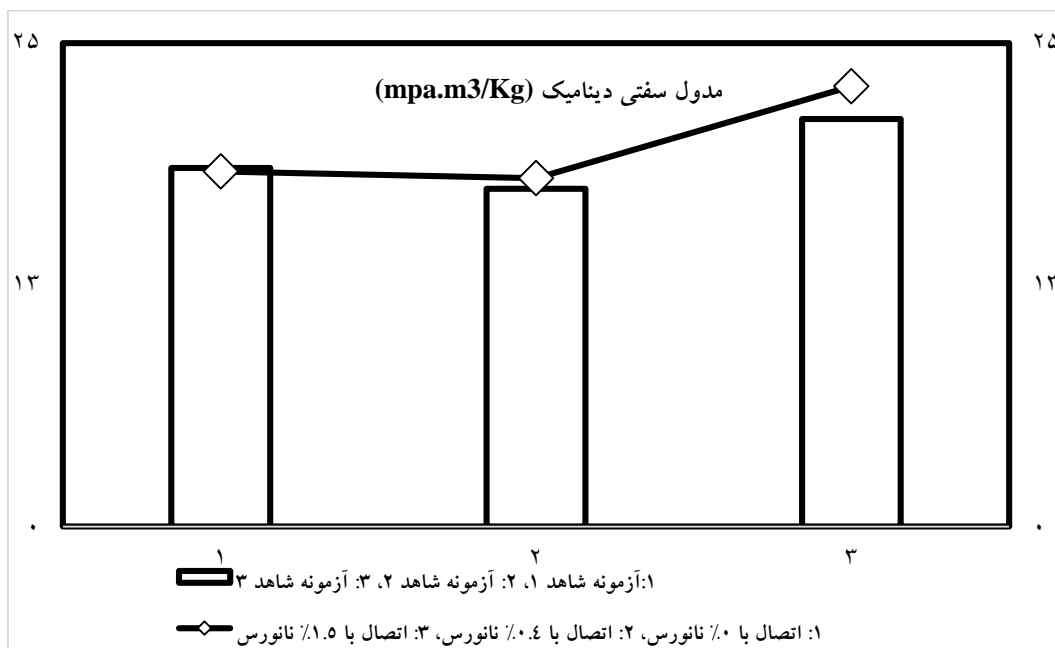
شکل (۵) تاثیر حضور نانوفیبر سلولز در چسب پلی وینیل استات را در مقادیر مدول سفتی دینامیک به نمایش درآورده است. همان طور که در این شکل ملاحظه می گردد ایجاد اتصال بدون نانوفیبر سلولز تاثیر معنی داری بر مقادیر مدول سفتی دینامیک نداشته است (افت به لحاظ عددی: ۰/۹۶ و ۰/۹۵ درصد نسبت



شکل ۵. تاثیر نانوفیبر سلولز بر مدول سفتی دینامیک اتصالات

می‌باشد. اضافه نمودن مقادیر ۰/۴ و ۱/۵ درصد نانورس سبب افزایش معنی‌دار مقادیر حاصل از این فاکتور شد (به ترتیب ۳/۱۷ و ۸/۰۴ درصد نسبت به چوب یکپارچه).

در شکل (۶) نیز تاثیر اضافه نمودن نانورس بر مقادیر مدول سفتی دینامیک اتصالات حاصل از چسب پلی‌وینیل استات آمده است. اضافه نمودن نانورس به پلی‌وینیل استات روند تغییراتی همچون مدول الاستیسیته

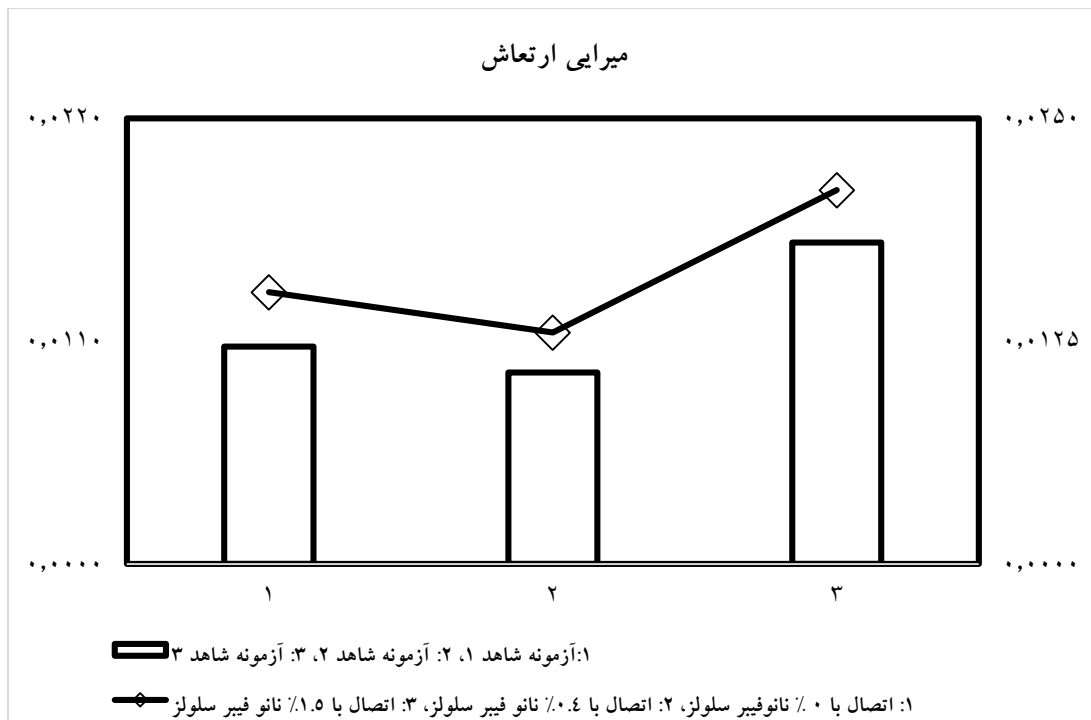


شکل ۶. تاثیر نانورس بر مدول سفتی دینامیک اتصالات

است. مقادیر میرایی ارتعاش در سطح اختلاط ۰ درصد با افزایش معنی‌داری روبه‌رو شد (افزایش: ۴۲/۱۱ و ۴۵/۰۵ درصد نسبت به چوب یکپارچه در آزمون‌های شاهد هر

در شکل (۷) تغییرات میرایی ارتعاش در اثر ایجاد اتصال پلی‌وینیل استات بدون اختلاط و با اختلاط با ذرات نانوفیبر سلولز در سه سطح ۰، ۰/۴ و ۱/۵ به نمایش در آمده

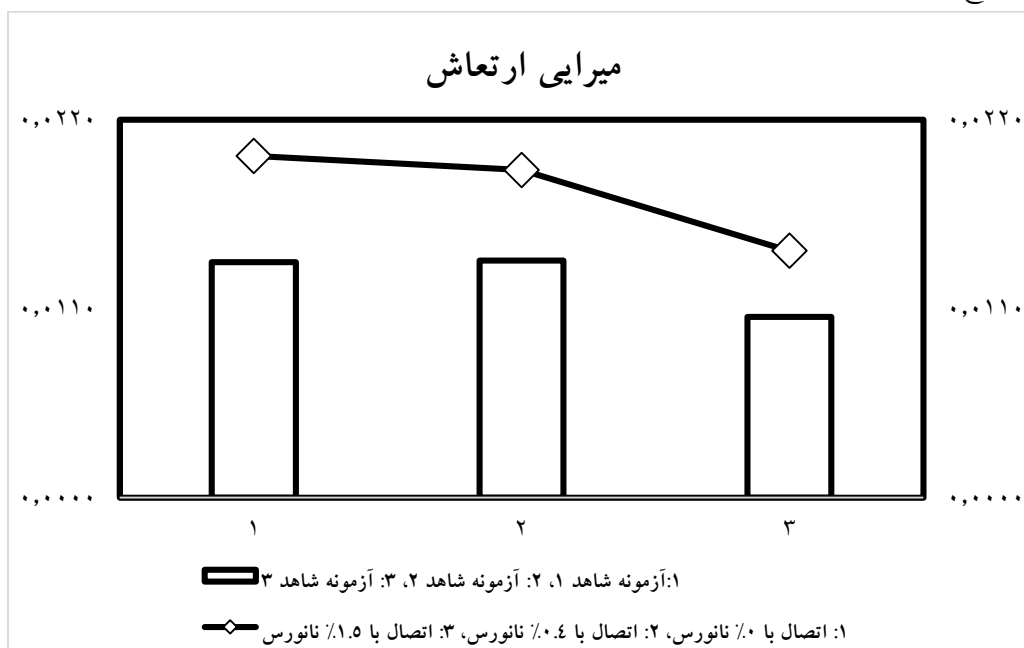
گروه). ایجاد اتصال با دو سطح اختلاط ۰/۴ و ۱/۵ مقادیر میرایی ارتعاش را به طور معنی داری نسبت به چوب‌های ۳۲/۲۲ درصدی نسبت به چوب یکپارچه). اتصال دار فاقد نانو کاهش داد (به ترتیب افزایش: ۳۷/۳۴ و



شکل ۷. تاثیر نانوفیبر سلولز بر میرایی ارتعاش دینامیک اتصالات

ارتعاش شده است (به ترتیب افزایش: ۳۸/۱۰ و ۳۶/۶۰ درصدی نسبت به چوب یکپارچه).

در شکل (۸) تغییرات میرایی ارتعاش در اثر ایجاد اتصال پلی-وینیل استات بدون اختلاط و با اختلاط با ذرات نانورس در سه سطح ۰، ۰/۴ و ۱/۵ به نمایش در آمده است. اتصال با ذرات نانورس در دو سطح ۰/۴ و ۱/۵ سبب کاهش مقادیر میرایی



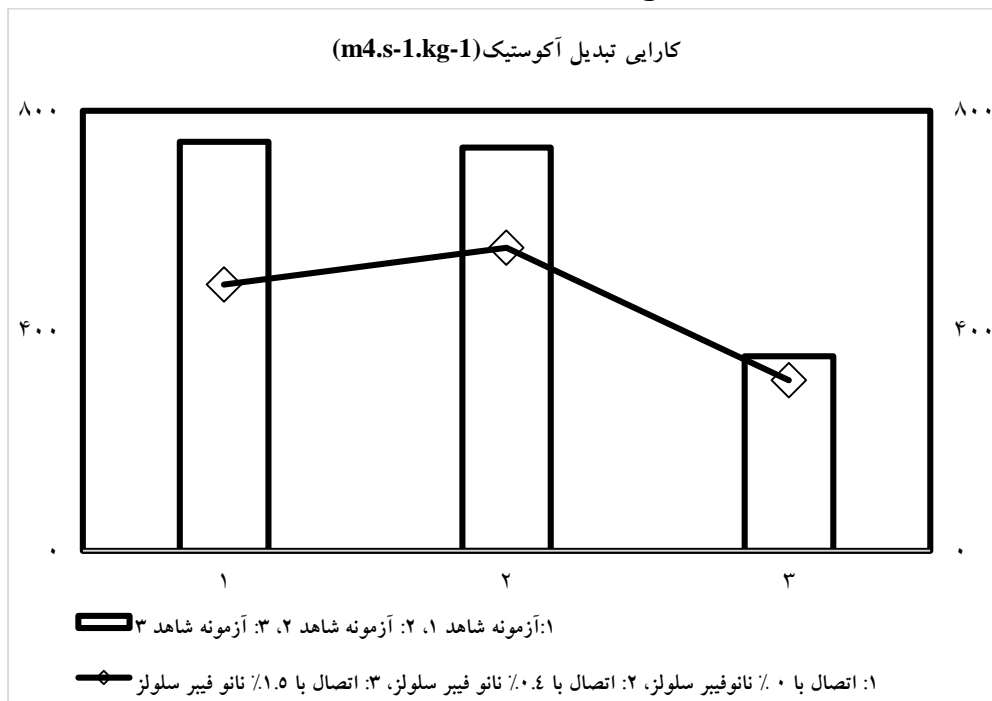
شکل ۸. تاثیر نانورس بر میرایی ارتعاش دینامیک اتصالات



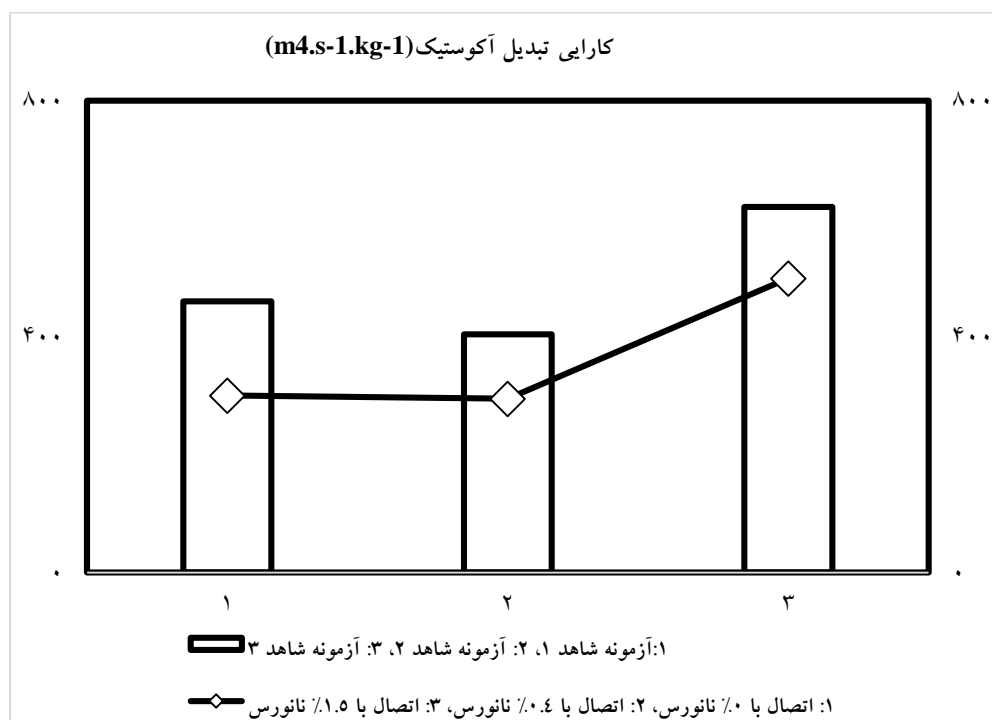
## استفاده از عوامل زیباشناسی در انتخاب درختان و درختچه های زینتی مناسب برای فضای شهری با .../۱۶۵

در شکل های (۹) و (۱۰) تغییرات کارایی تبدیل آکوستیک در اثر ایجاد اتصال پلی وینیل استات بدون اختلاط و با اختلاط با ذرات نانوفیبرسلولز در سه سطح ۰، ۰/۴ و ۱/۵ به نمایش در آمده است. مقادیر کارایی تبدیل آکوستیک در سطح اختلاط ۰ درصد با کاهش معنی داری روبه رو شد (به ترتیب کاهش: ۳۲/۷۳ و ۳۴/۰۶ درصد نسبت به چوب یکپارچه در نمونه های شاهد هر گروه). ایجاد اتصال با دو سطح اختلاط

در شکل های (۹) و (۱۰) تغییرات کارایی تبدیل آکوستیک در اثر ایجاد اتصال پلی وینیل استات بدون اختلاط و با اختلاط با ذرات نانوفیبرسلولز در سه سطح ۰، ۰/۴ و ۱/۵ به نمایش در آمده است. مقادیر کارایی تبدیل آکوستیک در سطح اختلاط ۰ درصد با کاهش معنی داری روبه رو شد (به ترتیب کاهش: ۳۲/۷۳ و ۳۴/۰۶ درصد نسبت به چوب یکپارچه در نمونه های شاهد هر گروه). ایجاد اتصال با دو سطح اختلاط



شکل ۹. تاثیر نانوفیبرسلولز بر کارایی تبدیل آکوستیک اتصالات



شکل ۱۰. تاثیر نانورس بر کارایی تبدیل آکوستیک اتصالات

همان‌طور که نتایج نشان داد حضور نانوسلولز در چسب پلی‌وینیل‌استات موثر واقع شد. نتایج دینامیک حاصل از این پژوهش را پیش از این Yavari و همکاران (۲۰۱۵) در اتصال انگشتی بدون ذرات نانو گزارش نموده بودند. آنان در تحقیق در مورد چوب بلوط بلند مازو به این نتیجه رسیده بودند که اتصال انگشتی با چسب پلی‌وینیل‌استات تأثیر معنی‌داری بر مقادیر مدول الاستیسیته دینامیک ندارد. اما در خصوص اثر دینامیک ذرات هر دو ذره نانوفیبرسلولز و نانورس بر ویژگی‌های آکوستیک گونه‌های چوبی تا کنون تحقیقی مشاهده نشده است. Kamboj و همکاران (۲۰۲۲) نیز اثر مثبت حضور نانوفیبرسلولز و نانوکریستال سلولز در چسب پلی‌وینیل‌استات را در درصدهای متفاوت با این تحقیق در دو گونه *spruce wood (Picea abies L)* and *beech wood (Fagus sylvatica)* گزارش نمودند. تجزیه و تحلیل FTIR تحقیق ایشان حاکی از برهم‌کنش مناسب بین نانوفیبرسلولز و چسب پلی‌وینیل‌استات بود. ضمن اینکه Aydemir و همکاران (۲۰۱۶) نیز اتصال خوب چسب پلی‌وینیل‌استات با ذرات نانوفیبرسلولز را گزارش داده بودند. در مورد ذرات حضور ذرات نانورس در چسب پلی‌وینیل‌استات نیز پیش از این پژوهش دینامیک مشابهی صورت پذیرفته است. اما در تحقیقاتی که به روش استاتیک گزارش شده بود Kaboorani و Riedl (۲۰۱۱) در تحقیق خود روی چسب پلی‌وینیل‌استات اعلام نمودند که این چسب قابلیت اتصال خوبی با ذرات نانورس دارد. همچنین می‌توان به تحقیق Aydemir و همکاران (۲۰۱۶) اشاره کرد. ایشان در تحقیق خویش با درصدهای متفاوت با این تحقیق به این نتیجه رسیده بودند که حضور نانورس اثر مثبتی در ماتریس چسب پلی‌وینیل‌استات دارد. نتایج حاصل از این پژوهش نیز مبین افزایش معنی‌دار مقادیر مدول الاستیسیته دینامیک اتصال انگشتی در گونه بلوط می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل، اثر نانوفیبرسلولز بیشتر از نانورس بر مدول الاستیسیته دینامیک می‌باشد. در مورد فاکتور مدول سفتی دینامیک در اتصالات حاوی نانوفیبرسلولز و نانورس و سایر محصولات چوبی تحقیق مشابهی ملاحظه نشد، ولی با توجه به افزایش مقادیر مدول الاستیسیته دینامیک در اثر اضافه نمودن هر دو نانوذره نانوفیبر سلولز و نانورس و

ثابت ماندن دانسیته، افزایش مقادیر مدول سفتی دور از انتظار نبود. پیش از این تحقیق مشابهی پیرامون تأثیر اضافه کردن ذرات نانوفیبرسلولز و نانورس بر مقادیر میرایی ارتعاش صورت پذیرفته است. اتصالات بدون نانوفیبرسلولز و نانورس با افزایش معنی‌دار مقادیر میرایی ارتعاش مواجه شدند. با اضافه نمودن هر دو ذرات نانوفیبرسلولز و نانورس کاهش این مقادیر اتفاق افتاد که نتیجه حاصل را می‌توان به اتصال خوب بین چسب پلی‌وینیل‌استات ذرات نانوفیبرسلولز و نانورس (Aydemir et al., 2016; Hosseyini et al., 2014; Candan & Akbulut, 2015) نسبت داد. از کارآیی تبدیل آکوستیک به‌عنوان اصلی‌ترین معیار در انتخاب چوب‌آلات مصارف چوب‌های به‌کار رفته در صفحات ارتعاشی مربوط به سازآلات یاد می‌شود (Roohnia, 2019). این فاکتور با میرایی ارتعاش نسبت عکس دارد و با اتصال چوب بدون هر دو نانوذره نانوفیبرسلولز و نانورس با افت معنی‌دار مقادیر این فاکتور مواجه شدند. اما با اضافه نمودن ذرات هر دو نانوذره مقادیر این فاکتور به‌طور معنی‌داری از خود افزایش نشان دادند. نتایج حاصل از تحقیقات Yavari و همکاران (۲۰۱۵) در مورد اتصال چوب بلوط با چسب پلی‌وینیل‌استات مطابق با نتایج به‌دست آمده از این تحقیق بود. ضمن اینکه Kohantorabi و همکاران در سال‌های (۲۰۱۵) و (۲۰۲۰) از این فاکتور جهت ردیابی ناهمگنی در چوب‌های صنوبر و چوب بلوط ناهمگن‌شده با اتصال با چوب صنوبر توسط چسب پلی‌وینیل‌استات استفاده نمودند. نتیجه حاصل را علاوه بر رابطه معکوس مقادیر میرایی ارتعاش و کارآیی تبدیل آکوستیک، به ایجاد همگنی بیشتر در ناحیه اتصال به واسطه حضور نانوفیبرسلولز و نانورس در اتصال حاصل می‌توان نسبت داد.

#### منابع

کشته‌گر، ب.، مدهوشی، م.، رشیدی، ع. و مشکور، م. (۱۳۹۸) تأثیر تقویت چسب پلی‌وینیل‌استات (PVAc) با

- enhancement of finger jointed timber sections using high nanoclay concentrations in the adhesive. *International Journal of Chemical Studies*, 7(6):1064–1068
- Hosseyini, M.J., Rahimi S., Rahimi S. and Faezipour M.M. (2014) Effect of nanoclay particles on the properties of particleboards. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 4(3): 280-287.
- ISO 3129 (2019) Wood – Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 4p.
- Kaboorani, A. and Riedl, B. (2011) Effects of adding nano-clay on performance of polyvinyl acetate (PVA) as a wood adhesive. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(8): 1031-1039.
- Kamboj, G., Gaff, M., Smardzewski, J., Haviarov, E. Hui, D., Rezaei, R. and Kumar, A. (2022) Effect of cellulose nanofiber and cellulose nanocrystals reinforcement on the strength and stiffness of PVAc bonded joints. *Composite Structures*, 295(1): 1-9.
- Kohantorabi, M., Hemmasi, A., Talaeipour, M., Roohnia, M. and Bazayr, B. (2020) Effect of artificial inhomogeneity of density and drilling on dynamic properties developed by poplar block species (*Populus Nigra*) Jointed with oak Wood (*Quercus Castaneifolia*) Beams. *BioResources*, 15(3): 4711-4726. DOI: 10.15376/biores.15.3.4711-4726/
- Kohantorabi, M., Hossein, M.A., Shahverdi, M. and Roohnia, M. (2015) Vibration based NDT methods to verify wood drying efficiency. *Drvna Industrija*, 66(3): 221-228.
- Nafchi, H.R., Abdouss, M., Najafi, S.K., Gargari, R.M. and Mazhar, M. (2015) Effects of nano-clay particles and oxidized polypropylene polymers on improvement of the thermal properties of wood plastic composite, *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(1): 45-54.
- Ono, T. and Norimoto, M. (1983) Study on young's modulus and internal friction of wood in relation to the evaluation of wood for musical instruments. *Japanese Journal of Applied Physics*, 22(4): 611–614.
- Roohnia, M. (2007) NDT-LAB; System to evaluate the mechanical properties of wood, Iranian Patent No. 44032/22-08-1386.
- Roohnia, M. (2019) Wood: Vibration and acoustic properties, in: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering (19<sup>th</sup> Eds.), Elsevier Inc., Amsterdam, Netherlands, Available online, 19p.
- نانوفیبر کربن (CNF) بر ظرفیت لنگر خمشی اتصال گوشه-ای مبلمان. *تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران*, ۶۷(۲): ۲۴۲-۲۵۴.
- نجفیان اشرفی، م.، مرادپور، پ.، جهان‌لتیباری، ا. و عدالت، ح. (۱۴۰۱) اصلاح و بهبود ویژگی‌های چسب پلی‌وینیل استات با استفاده از نانو سیلیکا. *تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران*, ۳۸(۲): ۱۲۸-۱۴۰.
- ASTM. (2002) Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and poisson's ratio of refractory materials by impulse excitation of vibration, Designation C1548, 7p.
- Ayarkwa, J., Hirashima, Y. and Sasaki, Y. (2001) Predicting modulus of rupture of solid and finger jointed tropical African hardwoods using longitudinal vibration, *Forest Products Journal*, 51(1): 85-92.
- Aydemir, D., Gunduz, G., Aşık, N. and Wang, A. (2016) The effects of Poly (vinyl acetate) Filled with Nanoclay and Cellulose Nanofibrils on Adhesion Strength of Poplar and Scots Pine Wood. *Drvna Industrija*, 67(1): 17-24.
- Beigloo, J.G., Eslam, H.K., Hemmasi, A.H., Bazayr, B. and Ghasemi, I. (2017) Effect of nanographene on physical, mechanical, and thermal properties and morphology of nanocomposite made of recycled high-density polyethylene and wood flour. *BioResources*, 12(1): 1382-1394.
- Bodig, J. and Jayne, B.A. (1993) Mechanics of wood and wood composites (Persian translation by G. Ebrahimi), University of Tehran Press, Tehran, Iran, 669p.
- Candan, Z. and Akbulut, T. (2015) Physical and mechanical properties of Nanoreinforced particleboard composites, *maderas. Ciencia y Tecnología*, 17(2): 319–334.
- Custodio, J., Broughton, J. and Cruz, H. (2009) A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joint. *Adhesion and Adhesive*, 29(1): 173-185.
- Guo, F., Aryana, S., Han, Y. and Jiao, Y. (2018) A review of the synthesis and application of Polymer-Nanoclay composites. *Applied Sciences*, 8(9): 1-29.
- Ismita, N. and Lokesh, C. (2017) Effects of different nano clay loadings on the physical and mechanical properties of Melia composita particleboard. *Bois and Forets Des Tropiques*, 334(4): 7-12.
- Ismita, N., Pandey, S., Naveen Kumar, C.K., Khali, D.P., Kishan, K. and Gupta, S. (2019) Exploratory studies on bending strength

- Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 41(6): 744-746.
- Yavari, A., Hemmasi, A., Roohnia, M. and Marušák, R. (2015) Dynamic Young's modulus of scarf- and finger-jointed beams using longitudinal vibration method. *BioResources*, 10(4): 6886-6895.
- Roohnia, M., Kohantorabi, M., Jahan-Latibari, A., Tajdini, A. and Ghaznavi, M (2012) Nondestructive assessment of glued joints in timber applying vibration-based methods. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(6): 791-799.
- Timoshenko, S.P. (1921) On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars. The London,

## The effect of cellulose nanofiber (CNF) and nanoclay on the acoustic properties of finger joints of pine wood (*Pinus sylvestris*) bonded with polyvinyl acetate (PVA)

Babak Ranjbar<sup>1</sup>, Amir Lashgari<sup>2\*</sup>, Ahmad Jahan-Latibari<sup>3</sup>, and Ajang Tajdini<sup>4</sup>

- 1) Ph.D. Student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.
- 2) Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran. \*Corresponding Author Email Address: [amir.lashgari@kiaui.ac.ir](mailto:amir.lashgari@kiaui.ac.ir)
- 3) Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.
- 4) Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

Date of Submission: 2024/07/20

Date of Acceptance: 2024/09/01

### Abstract

This research investigates the finger joints of pine wood (*Pinus sylvestris*) using polyvinyl acetate glue reinforced with cellulose nanofiber (CNF) and nanoclay particles, employing the free vibration method in free-free beams. Finger joints were created at three levels (0%, 0.4%, and 1.5%) in the middle of the samples with polyvinyl acetate adhesive containing cellulose nanofiber and nanoclay. The results indicated a significant increase in the modulus of elasticity and elastic stiffness due to the addition of both 0.4% and 1.5% of cellulose nanofiber and nanoclay. The damping factor values showed a significant decrease by adding both levels of 0.4 and 1.5 cellulose nanofibers and nanoclay compared to the samples without nanoparticles. The values of acoustic conversion efficiency also increased by adding both levels of 0.4 and 1.5 cellulose nanofibers and nanoclay compared to samples without nanoparticles. In general, with the increase in the percentage of use of both nanoparticles, better acoustic properties were observed in finger joints, and the effect of Cellulose Nano Fiber was greater than that of Nano clay.

**Keywords:** CNF, Finger joint, Nano clay, Pine wood, Vibration.