

## مطالعه تأثیر چسب اپوکسی تقویت شده با نانوفیبر کربن بر ظرفیت لنگر خمشی اتصال گوشه‌ای در سازه مبلمان

محراب مدهوشی<sup>۱\*</sup> و براتعلی کشته‌گر<sup>۲</sup>

\*۱- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران، پست الکترونیک: madhoushi@gau.ac.ir

۲- دکترای فراورده‌های چوب، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

تاریخ دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: تیر ۱۴۰۰

### چکیده

در این تحقیق تأثیر چسب اپوکسی تقویت شده با نانوفیبر کربن در سه سطح صفر، ۰/۴ و ۱/۵ درصد بر روی مقاومت اتصالات گوشه‌ای متعارف در صنایع مبلمان بررسی شد. نانوفیبرهای کربن توسط دستگاه التراسونیک در ماتریس چسب پلیمری پراکنش یافتند و نمونه‌های آزمون اتصال، با استفاده از قطعات ام دی اف (MDF) برش خورده با ابعاد مورد نظر و دویل چوبی با قطرهای ۸ و ۱۰ میلی‌متر و عمق نفوذ در دو سطح (۲D و ۳D) به کمک رزین تقویت شده ساخته شدند. در مجموع ۱۲ تیمار با سه تکرار به‌طور جداگانه برای هر یک از دو آزمون فشاری و کششی مورد ارزیابی قرار گرفت و ارزیابی ظرفیت لنگر خمشی اتصالات با سرعت ۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش درصد وزنی نانوفیبر کربن، قطر و عمق نفوذ دویل چوبی در آزمون فشاری، ظرفیت لنگر خمشی به ترتیب ۱/۲، ۱/۲ و ۱/۲ برابر و در آزمون کششی به ترتیب ۱/۳، ۱/۱ و ۱/۲ برابر نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش یافتند. به‌طور کلی با توجه به متغیرهای تحقیق می‌توان این‌گونه بیان کرد که نانو فیبر کربن قابلیت تقویت خواص مقاومتی رزین اپوکسی و در نتیجه اتصالات مورد مطالعه را داشت. در نهایت می‌توان بیان کرد که سطح ۰/۴ درصد نانوفیبر کربن، قطر ۱۰ میلی‌متر و عمق نفوذ ۲D دویل چوبی بهترین استحکام اتصالات را در دو نوع بارگذاری نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: نانوفیبر کربن، چسب اپوکسی، دویل چوبی، اتصال گوشه‌ای، تخته‌فیبر با دانسیته متوسط.

### مقدمه

مواد چوبی و چندسازه‌های آن شامل پانل‌های تخته‌خرده چوب، تخته‌لایه، تخته‌فیبر با دانسیته متوسط، تخته‌تراشه جهت‌دار و غیره، به‌طور گسترده در سازه‌های متنوع مبلمان مانند صندلی و کابینت استفاده می‌شود (Eckelman *et al.*, 2002). در صنعت مبلمان، قطعات این چندسازه‌ها به طرق مختلف (گوشه‌ای، سر به سر، متقاطع، عرضی و ...) به یکدیگر متصل شده و به‌طور کلی اتصال‌ها از بخش‌های اصلی یک سازه محسوب می‌شوند. اتصال‌ها بار وارده را بر کل سازه

تحمل کرده و آن را در بین اعضای مختلف توزیع کرده و در نهایت پایداری کل سازه را به وجود می‌آورند. در این ارتباط، نوع اتصال‌دهنده نیز تأثیر مهمی در استحکام هر سازه ای ایفا می‌کند (Madhoushi & Ansell, 2017; Madhoushi, 2021).

به‌طور کلی در سازه‌های چوبی از انواع اتصال‌دهنده‌های مکانیکی (میخ، پیچ، پرچ) و شیمیایی (انواع چسب‌ها) استفاده می‌شود. اتصالات گوسه‌ای که از متداول‌ترین نوع اتصال محسوب می‌شود از اتصال‌دهنده‌های مکانیکی و

مبتنی بر اپوکسی خصوصیات مکانیکی، حرارتی و الکتریکی ویژه‌ای را ایجاد کرده‌اند (Naeimirad *et al.*, 2016).  
 باین‌حال، دامنه استفاده از اپوکسی به دلیل شکنندگی و مقاومت ضعیف محدود است (Norhakim *et al.*, 2014).

معرفی فناوری نانو فرصت جدیدی را برای توسعه نسل جدید چسب‌ها با خواصی خاص فراهم کرده است که با روش‌های معمول به دست نمی‌آیند (Kaboorani *et al.*, 2013). تحقیقات زیادی بر روی بهبود چسب اپوکسی با استفاده از نانو مواد پرکننده انجام شده است و طی سال‌های اخیر، استفاده از نانو مواد کربنی که عمدتاً نانو الیاف کربن (CNF) و نانولوله کربن (CNT) هستند در پلیمرها (Parveen *et al.*, 2013) و چسب‌های پلیمری از قبیل اپوکسی (Norhakim *et al.*, 2014) مورد بررسی قرار گرفته است.

از دو دهه اخیر (Feng *et al.*, 2014) استفاده از نانوفیبر کربن به دلیل سطح ویژه زیاد، دارا بودن خواص مقاومت کششی بالا و خواص چسبندگی بین سطحی مطلوب به‌عنوان مواد پرکننده کامپوزیت‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته است (Ozkan *et al.*, 2012)؛ به‌طوری‌که قطر آنها اغلب بین ۵ تا ۱۰۰ نانومتر متغیر است و طول آنها به ۵ تا ۱۰۰ میکرون می‌رسد (Izadi *et al.*, 2012)؛ خواص مکانیکی آنها چشمگیر است و استحکام آنها در محدوده ۷۲۵-۲۳۰ GPa گزارش شده است (Zhou *et al.*, 2008).

با توجه به ویژگی‌های قابل توجه بیان‌شده برای استفاده از نانوفیبرهای کربن در تقویت خواص مقاومتی چسب‌های پلیمری، هدف از این مطالعه بررسی تأثیر استفاده از رزین اپوکسی تقویت‌شده با نانوفیبرکربن بر روی خواص استحکامی اتصالات گوشه‌ای متعارف در سازه‌های چوبی مبلمان است تا به‌منظور حفظ کیفیت و افزایش عمر مفید محصول بتوان اقدام کرد.

انواع چسب‌ها تشکیل شده که در ساخت انواع مبلمان به‌کار می‌روند (Zhou, 1991). باوجوداین، پیش‌بینی رفتار این نوع اتصالات پیچیده است و متغیرهای متنوعی از جمله نوع اتصال دابل، طول، قطر و عمق نفوذ دابل و نوع چسب‌ها رفتار اتصالات را تحت تأثیر قرار می‌دهد، مثلاً افزایش قطر دابل و همچنین افزایش عمق نفوذ تأثیر معنی‌داری بر روی مقاومت به لنگر خمشی اتصالات ساخته‌شده دارد (Eckelman, Zhang & 1993). تحقیقات زیادی در زمینه اتصالات مختلف و مقایسه آنها با یکدیگر از جمله دابل چوبی با صفحات چوبی (تخته‌خرده چوب و تخته‌فیبر با دانسیته متوسط) توسط محققان انجام شده و به‌طورکلی قوی تر بودن اتصال دابل نسبت به اتصالات فاق چسب‌خورده و قلیف گزارش شده است (Huuml, 2010). همچنین در بررسی ظرفیت لنگر خمشی و مقاومت کششی اتصال با دابل چوبی در تخته‌فیبر با دانسیته متوسط توسط Bahmani و همکاران (۲۰۰۹)، بالاترین مقادیر مقاومتی اتصال با دابل چوبی با قطر ۸ میلی‌متر و عمق نفوذ ۱۲ میلی‌متر گزارش شده است. در مطالعه دیگری در ارتباط با تأثیر نوع قطر و درجه آزادی دابل چوبی بر مقاومت برشی اتصالات ساخته شده از تخته‌خرده چوب توسط Jahan Latibari و همکاران (۲۰۰۵)، مشخص شد که بیشترین مقاومت مربوط به دابل چوبی آجدار با قطر ۱۰ میلی‌متر با عمق نفوذ چهار برابر قطر و درجه آزادی ۰/۵ تا ۰/۲۵ میلی‌متر است.

عامل مؤثر دیگر بر رفتار اتصالات نوع چسب مصرفی است. اتصالات بر پایه رزین، نقش مهمی در استحکام محصولات و اقتصاد تولید آنها ایفا می‌کنند و با افزایش تولید و مصرف فراورده‌های چوبی مهندسی‌شده در ساختمان‌ها، مصرف چسب‌ها به شدت افزایش یافته است (Zhou, 1991; Kaboorani & Riedl, 2011). مدت طولانی است که رزین اپوکسی از نظر مهندسی از اهمیت قابل توجهی برخوردار شده است و به‌طور گسترده برای اتصال مواد مختلف استفاده می‌شود (Jojibabu *et al.*, 2017). اجزای ساخته شده از مواد

## مواد و روش‌ها

نانوفیبرکربن: ابتدا نانو فیبر کربن در پژوهشگاه صنعت نفت ایران به روش لایه نشانی بخار شیمیایی (CVD) با مشخصات قطر برابر ۲۵nm و طول ۵-۱۰nm مطابق با روش Zhou و همکاران (۲۰۰۸) ساخته شد. برای این منظور، روی سطح زیر پایه تحت تأثیر گاز شهری متان قرار گرفت و با انجام واکنش شیمیایی بخارات پیش‌ماده با بخارات و گازهای دیگر لایه نشانی با استفاده از گازی که گرم شده و به شکل رشته باریکی درآمده بود انجام شد.

چسب: یک نوع چسب اپوکسی با علامت تجاری ۹۵۰ Ren Lam M- با مشخصات فنی از نظر رنگ ظاهری، بی‌رنگ، ویسکوزیته در دمای ۵°C (CP) ۱۶۰۰-۱۲۵۰،

دانسیته ۱/۱g/cm<sup>2</sup>، زمان استفاده با هاردنر ۳۰min، زمان گیرایی ۴h، هاردنر مورد استفاده برای این رزین اپوکسی از نوع آمینی با نام تجاری Ren Hy 956 و بی‌رنگ و با مشخصات فنی، ویسکوزیته در دمای ۲۵°C (CP) ۴۷۰-۳۷۰ و دانسیته ۱ g/cm<sup>2</sup> بود و با نسبت ۵۰ درصد رزین با آن مخلوط شد.

تخته فیبر با دانسیته متوسط: این تخته به طور گسترده برای استفاده در دکوراسیون داخلی خانه، آشپزخانه و مبلمان استفاده می‌شود و در ابعاد مختلف تولید می‌گردد. در این تحقیق نمونه‌ها از یک صفحه MDF با ابعاد mm (۱۶ × ۱۲۲۰ × ۲۸۰۰) تهیه شد که خواص آن در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- برخی از خواص تخته فیبر با دانسته متوسط (MDF)

IB (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	درصد رطوبت	دانسیته (g/cm <sup>2</sup> )
۰/۱۹	۲۷۱۳	۲۰/۶۶	٪۶/۴۲	۰/۷۱

میلی‌متر با خواص فیزیکی و مکانیکی ذکر شده در جدول ۲ برای ساخت اتصال گوشه‌ای سرب‌سر قطعات استفاده شد.

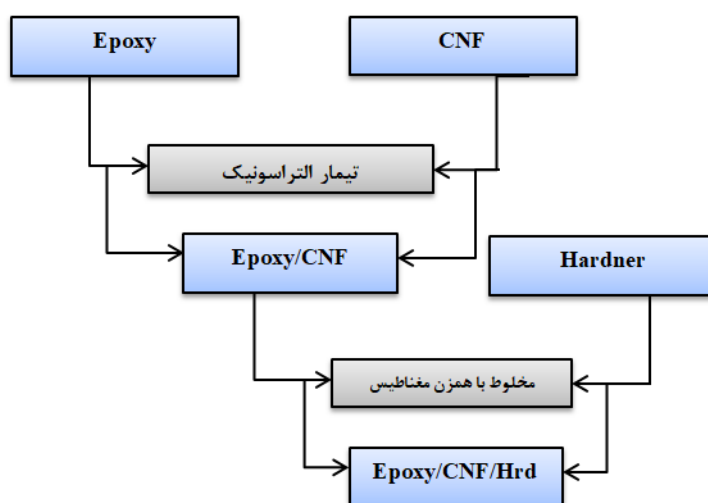
دوبل چوبی: دوبل چوبی از گونه چوبی ممرز (*Carpinus betulus*) و از نوع شیاردار با قطرهای ۸ و ۱۰

جدول ۲- خواص فیزیکی و مکانیکی گونه ممرز چوب دوبل

مقاومت برش موازی با الیاف (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	دانسیته (g/cm <sup>2</sup> )
۱۰/۹	۱۱۲۱۷/۵۷	۱۲۲/۷۶۵	۰/۷۱

آماده‌سازی چسب با نانوفیبر کربن: نانوفیبرهای کربن آماده‌شده در مرحله قبلی، در سه سطح صفر، ۴/۰ و ۵/۱ درصد بر اساس وزن تر رزین اپوکسی محاسبه و مطابق روش Zhou و همکاران (۲۰۰۶) به مقدار ۱۰ گرم رزین اپوکسی اضافه شد (شکل ۱). مخلوط حاصل به وسیله دستگاه اولتراسونیک در دمای ۳۵-۲۰°C، توان ۹۰ وات و فرکانس ۸۰ هرتز به مدت ۳۰ دقیقه برای پراکنش ذرات هم زده شدند (مرحله A). سپس مقدار ۵ گرم هاردنر به نسبت پنجاه درصد رزین به مخلوط رزین اپوکسی و نانوفیبر کربن (مرحله A) اضافه و توسط دستگاه همزن مغناطیسی با سرعت بالا به مدت ده دقیقه هم‌زده شد (مرحله B).

توان ۹۰ وات و فرکانس ۸۰ هرتز به مدت ۳۰ دقیقه برای پراکنش ذرات هم زده شدند (مرحله A). سپس مقدار ۵ گرم هاردنر به نسبت پنجاه درصد رزین به مخلوط رزین اپوکسی و نانوفیبر کربن (مرحله A) اضافه و توسط دستگاه همزن مغناطیسی با سرعت بالا به مدت ده دقیقه هم‌زده شد (مرحله B).



شکل ۱- روند مراحل آماده‌سازی مخلوط چسب اپوکسی با نانوفیبرکربن

آماده‌سازی نمونه‌های اتصالات  
نمونه‌ها از یک صفحه MDF با ابعاد  $1220 \times 16$  mm

با استفاده از یک ابره پانل بر آماده و قطعات در گروه A و B طبقه‌بندی شدند (شکل ۲، جدول ۳). علامت گذاری مناسب بر روی قسمت ضخامت در جهت طول و عرض گروه A و B قطعات تخته‌فیبر انجام شد. سوراخ‌هایی با قطر (D) ۸ و ۱۰ میلی‌متر و عمق نفوذ  $L_1$  و  $L_2 = 3D$

با استفاده از دستگاره سه‌کاره نجاری روی اجزاء گروه A و B ایجاد شد. دابل با ابعاد  $36 \times 8$  mm و  $48 \times 8$  mm برای سوراخ با قطر ۸mm و  $40 \times 10$  mm و  $60 \times 10$  mm برای سوراخ با قطر ۱۰mm با توجه به عمق نفوذ سوراخ‌های اجزاء گروه A و B آماده شدند.

جدول ۳- قطعات MDF مورد استفاده در ساخت نمونه اتصالات

تعداد	ابعاد (mm)	قطعات
۳۶	$200 \times 60 \times 16$	قطعه A
۳۶	$140 \times 60 \times 16$	قطعه B

#### آزمون فشاری و کششی

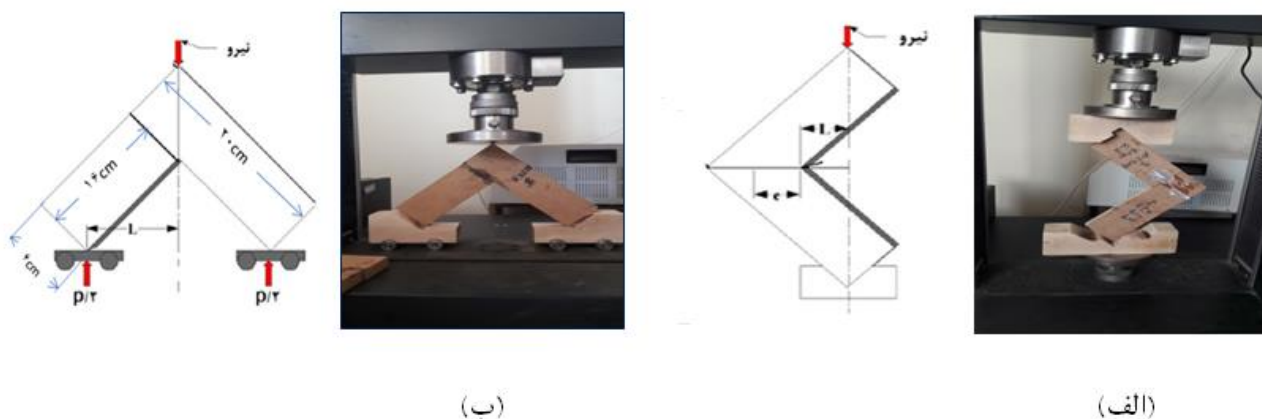
آزمون بارگذاری فشاری و کششی به‌وسیله دستگاره Cometech مدل ۵۰۵۶۱ - Qc ساخت کشور تایوان در آزمایشگاه مکانیک چوب دانشگاه گرگان انجام شد. در این آزمون بارگذاری با سرعت ۳ mm/min مطابق روش Atar و Ozçi (۲۰۰۸) اعمال گردید. شکل (۲) نحوه بارگذاری در حالت فشاری و کششی را نشان می‌دهد.

چسب اپوکسی که با نانو فیبرکربن مخلوط و آماده شده بر روی سطح دابل‌ها و سوراخ‌های اجزاء گروه A و B اعمال شد و بعد این دو جزء به کمک دابل متصل شدند. اجزاء اتصال‌شده نمونه‌ها به مدت دو هفته با گیره نگه‌داشته شدند تا فرایند سخت‌شدن چسب تکمیل گردد.

جدول ۴- تیمارهای آزمایش فشاری و کششی و کدهای اختصاری آنها

تیمار	کد	تیمار	کد	تیمار	کد
۱	D <sup>۱</sup> L <sup>۱</sup> N <sup>۰</sup>	۵	D <sup>۱</sup> L <sup>۲</sup> N <sup>۱</sup>	۹	D <sup>۲</sup> L <sup>۱</sup> N <sup>۲</sup>
۲	D <sup>۱</sup> L <sup>۱</sup> N <sup>۱</sup>	۶	D <sup>۱</sup> L <sup>۲</sup> N <sup>۲</sup>	۱۰	D <sup>۲</sup> L <sup>۲</sup> N <sup>۰</sup>
۳	D <sup>۱</sup> L <sup>۱</sup> N <sup>۲</sup>	۷	D <sup>۲</sup> L <sup>۱</sup> N <sup>۰</sup>	۱۱	D <sup>۲</sup> L <sup>۲</sup> N <sup>۱</sup>
۴	D <sup>۱</sup> L <sup>۲</sup> N <sup>۰</sup>	۸	D <sup>۲</sup> L <sup>۱</sup> N <sup>۱</sup>	۱۲	D <sup>۲</sup> L <sup>۲</sup> N <sup>۲</sup>

N: مقدار نانو (N<sup>۰</sup>=۰.۰، N<sup>۱</sup>=۰.۰/۴، N<sup>۲</sup>=۱/۵)؛ D: قطر (D<sup>۱</sup>=۸، D<sup>۲</sup>=۱۰.۰)؛ L: عمق نفوذ (L<sup>۱</sup>=۲D، L<sup>۲</sup>=۳D)



شکل ۲- روش بارگذاری نمونه‌های اتصال در (الف) آزمون فشاری و (ب) آزمون کششی

فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۹ مورد ارزیابی قرار گرفت تا فاکتورهای مؤثر از لحاظ آماری شناسایی شوند. همچنین مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن برای بررسی معنی‌دار بودن اثر متغیرها در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد.

### نتایج

مقادیر میانگین ظرفیت لنگر خمشی اتصالات در جدول ۵ و نتایج حاصل از تحلیل آماری لنگر فشاری و لنگر کششی به ترتیب در جدول ۶ آمده است.

در این تحقیق ۱۲ تیمار (جدول ۴) و برای هر تیمار ۳ تکرار در نظر گرفته شد. برای محاسبه لنگر در حالت بارگذاری فشاری و کششی از رابطه‌های زیر استفاده شد.

$$M = PL \quad \text{رابطه (۱) لنگر فشاری}$$

$$M = \frac{P}{2} L \quad \text{رابطه (۲) لنگر کششی}$$

که در آن  $M$  = لنگر فشاری و کششی (N.m)،  $P$  = نیرو (N)

و  $L$  = طول (m).

### طرح آماری

در این پژوهش، اثر تیمارهای مختلف با کاربرد آزمون

جدول ۵- میانگین مقادیر ظرفیت لنگر اتصال در بارگذاری فشاری و کششی

ظرفیت لنگر (Nm)		کد نمونه	ظرفیت لنگر (Nm)		کد نمونه
کششی	فشاری		کششی	فشاری	
۱۴۴/۷۸	۲۰۱/۸۲	۰N۱L۲D	۱۰۸/۴۳	۱۳۲/۰۸	۰N۱L۱D
۱۷۷/۱۹	۲۵۶/۵۳	۱N۱L۲D	۱۴۸/۲۳	۱۹۰/۶۶	۱N۱L۱D
۱۵۹/۵۴	۲۲۷/۵۵	۲N۱L۲D	۱۲۰/۳۷	۱۶۳/۸۱	۲N۱L۱D
۱۵۶/۳۵	۲۱۹/۴۷	۰N۲L۲D	۱۵۵/۸۵	۱۶۹/۲۳	۰N۲L۱D
۱۹۵/۲۰	۲۷۱/۴۵	۱N۲L۲D	۱۸۸/۸۶	۲۵۰/۳۸	۱N۲L۱D
۱۶۶/۶۳	۲۴۱/۸۷	۲N۲L۲D	۱۶۴/۲۶	۲۲۶/۷۸	۲N۲L۱D

جدول ۶- تجزیه واریانس ظرفیت لنگر در حالت بارگذاری فشاری و کششی

معنی داری		فاکتور F	میانگین مربعات		درجه آزادی		مجموع مربعات		منبع تغییرات	
کششی	فشاری		کششی	فشاری	کششی	فشاری	کششی	فشاری		
* / .۰	* / .۰۴	۱۰/۹۶	۳/۵۵	۴۰۶۹/۹۷	۶۸۸۴/۱۴	۲	۲	۸۱۳۹/۹۴	۱۳۶۹۶/۲۷	N
* / .۰۷	* / .۰۲	۸/۷۱	۶/۸۵	۳۲۳۱/۸۱	۱۳۱۹۹/۰۰	۱	۱	۳۲۴۱/۸۲	۱۳۱۹۹/۰۰	D
* / .۰۰	* / .۰۱	۱۹/۱۵	۸/۹۵	۷۱۰۸/۸۱	۱۷۲۵۴/۷۳	۱	۱	۷۱۰۸/۸۱	۱۷۲۵۴/۷۳	L
ns / .۹۸	ns / .۹۵	- / .۰۲	- / .۰۵	۷/۹۱	۱۰۱/۴۲	۲	۲	۱۵/۸۲	۲۰۲/۸۴	D × N
ns / .۹۶	ns / .۸۶	- / .۰۴	- / .۱۶	۱۵/۳۶	۳۰۴/۲۳	۲	۲	۱۵/۸۲	۶۰۸/۴۶	L × N
* / .۰۲	* / .۰۷	۶/۱۱	۳/۷۰	۲۲۶۹/۵۰	۷۱۳۲/۵۵	۱	۱	۲۲۶۹/۵۰	۷۱۳۲/۵۵	D × L
ns / .۸۸	ns / .۸۹۸	- / .۱۳	- / .۱۱	۴۷/۱۸	۲۰۹/۳۳	۲	۲	۹۴/۳۶	۴۱۸/۶۶	D × N × L

N: نانوفیبر کربن، D: قطر دوپل، L: عمق نفوذ دوپل، \*: معنی داری در سطح ۵ درصد، ns: عدم معنی داری

### اثر نانوفیبر کربن

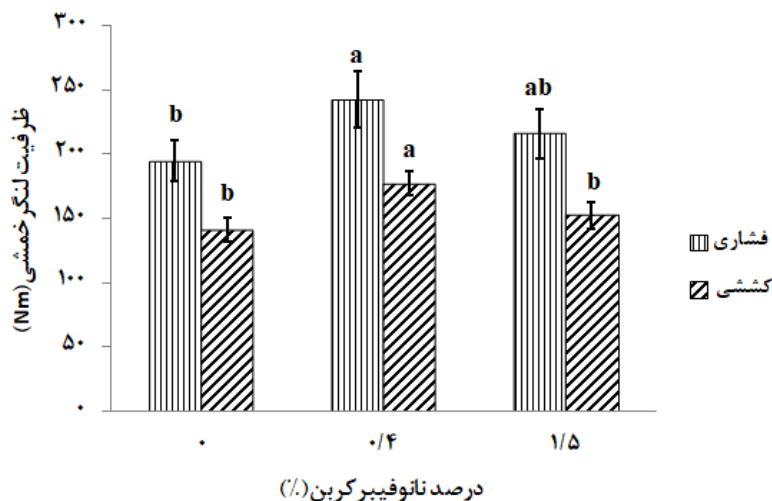
لنگر خمشی در تیمار ۰/۴ درصد نانوفیبر کربن در بارگذاری فشاری و کششی به ترتیب ۱/۲ و ۱/۳ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش نشان داد.

### تأثیر قطر دوپل چوبی

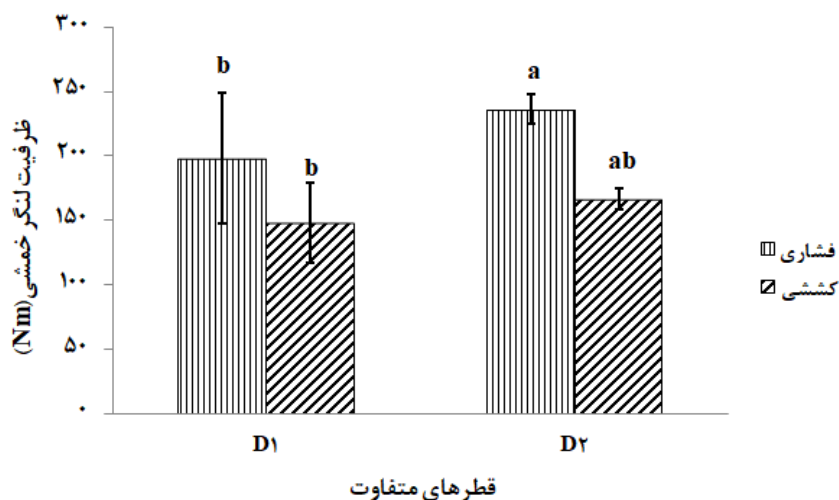
شکل ۴ ظرفیت لنگر خمشی اتصالات ساخته شده با دو قطر دوپل تحت بارگذاری فشاری و کششی را نشان می دهد. مطابق جدول های تجزیه واریانس، با افزایش قطر دوپل چوبی، ظرفیت لنگر خمشی اتصال در هر دو حالت به طور معنی داری ( $P < 0.05$ ) افزایش یافت. همان طوری که مشخص

شکل ۳ ظرفیت لنگر خمشی اتصالات ساخته شده با اپوکسی تقویت شده با نانوفیبر کربن را تحت بارگذاری فشاری و کششی نشان می دهد. با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۶) مشخص گردید که مقدار نانوفیبر کربن بر مقدار ظرفیت لنگر خمشی در هر دو نوع بارگذاری تأثیر مستقل معنی داری در سطح اطمینان ۹۵٪ داشت. همان طور که مشخص است افزودن ۰/۴ درصد نانوفیبر کربن منجر به افزایش ظرفیت لنگر خمشی اتصال شد و در بالاتر از آن (۱/۵ درصد) کاهش یافت. مطابق مقادیر آزمایش، ظرفیت

گردید بیشترین تأثیر در ظرفیت لنگر خمشی تحت بار کششی با قطر  $D_2=10\text{mm}$  مشاهده شد و در حالت بارگذاری فشاری ۱/۲ و در حالت بارگذاری کششی ۱/۱ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش نشان داد.



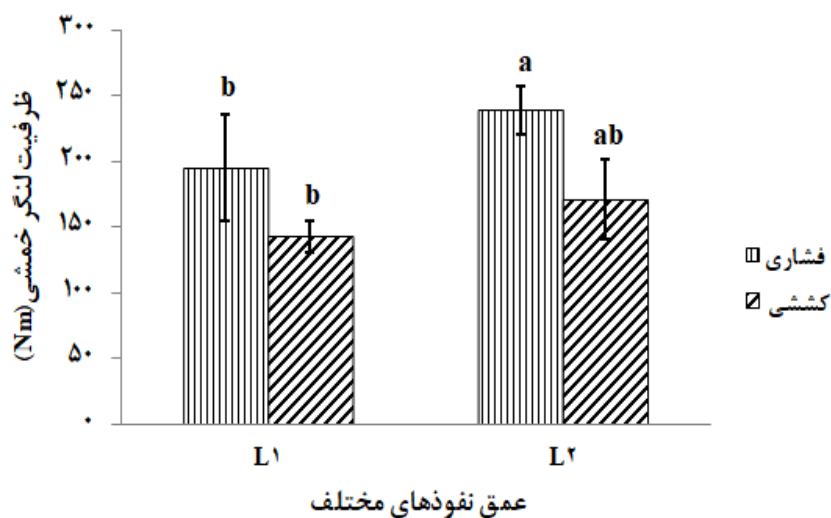
شکل ۳- تأثیر نانوفیبر کربن بر روی ظرفیت لنگر خمشی تحت بارگذاری فشاری و کششی



شکل ۴- تأثیر قطر دابل چوبی بر روی ظرفیت لنگر خمشی تحت بارگذاری فشاری و کششی

حالت به طور معنی داری ( $P<0/05$ ) تأثیر داشت. مطابق نتایج به دست آمده، ظرفیت لنگر خمشی از L1 به L2 افزایش یافت و برای هر دو حالت بارگذاری فشاری و کششی بیشترین مقدار مربوط به عمق نفوذ L2 و ۱/۲ برابر نسبت به عمق نفوذ L1 بود.

تأثیر عمق نفوذ دابل چوبی شکل ۵ ظرفیت لنگر خمشی اتصالات ساخته شده با دو عمق نفوذ دابل چوبی تحت بارگذاری فشاری و کششی را نشان می دهد. مطابق جدول های تجزیه واریانس، عمق نفوذ دابل چوبی بر روی ظرفیت لنگر خمشی اتصال در هر دو

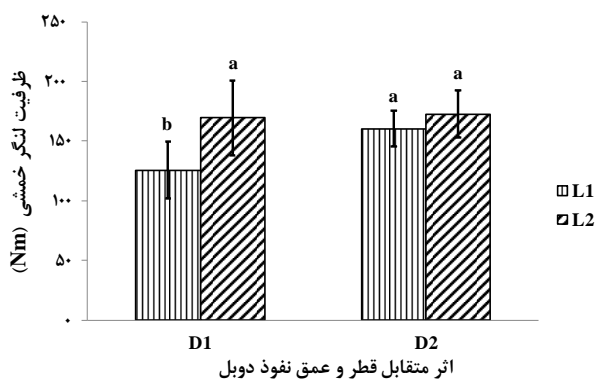


شکل ۵- تأثیر عمق نفوذ دوبل چوبی بر روی ظرفیت لنگر خمشی تحت بارگذاری فشاری و کششی

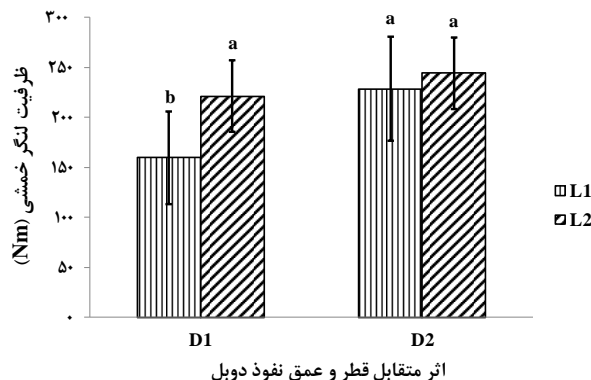
در هر دو نوع بارگذاری فشاری و کششی معنی‌دار بود. به‌طورکلی می‌توان بیان کرد که با افزایش هر یک از مقادیر قطر دوبل و عمق دوبل، ظرفیت لنگر خمشی افزایش می‌یابد، در نتیجه از نظر تأثیرگذاری متقابل همسو عمل می‌کنند و موجب افزایش مقادیر مقاومت نهایی می‌شوند.

تأثیر متقابل قطر و عمق نفوذ دوبل چوبی

شکل ۶ تغییرات ظرفیت لنگر خمشی تحت تأثیر اثر متقابل قطر و عمق دوبل چوبی نمونه‌های آزمون اتصال را نشان می‌دهد. با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۶)، مشخص گردید که این اثر متقابل بر روی ظرفیت لنگر خمشی



(ب)



(الف)

شکل ۶- تأثیر متقابل قطر و عمق نفوذ دوبل چوبی بر روی ظرفیت لنگر خمشی در (الف) بارگذاری فشاری و (ب) بارگذاری کششی



## بحث

مقایسه و بررسی میانگین ظرفیت لنگر خمشی تمام نمونه های آزمون ساخت شده با یکدیگر با توجه به جدول مقادیر میانگین (جدول ۵) حکایت از بالاتر بودن استحکام اتصال نمونه های ساخته شده با ۰/۴ درصد وزنی نانوفیبرکربن نسبت به نمونه های شاهد و حتی نمونه های ۱/۵ درصد نانوفیبرکربن دارد. مشخص گردید که ظرفیت لنگر خمشی اتصالات با مقدار ۰/۴ درصد وزنی نانوفیبرکربن و دابل چوبی با قطرهای ۸ و ۱۰ میلی متر و عمق نفوذ L۲ به ترتیب ۱/۳ و ۱/۲ برابر زیر بارگذاری فشاری و ۱/۲ و ۱/۲ برابر زیر بارگذاری کششی نسبت به نمونه های شاهد افزایش داشتند. با افزایش عمق نفوذ دابل چوبی قطر ۱۰ میلی متر به L۲، ظرفیت لنگر خمشی نسبت به عمق نفوذ L۱ افزایش قابل ملاحظه ای نداشت. به طور کلی تمام متغیرها (نانو ذرات، قطر دابل چوبی، عمق نفوذ) بر روی مقاومت اتصال نمونه های ساخته شده تحت بارگذاری فشاری و کششی تأثیر معنی دار داشت و سطح ۰/۴ درصد نانوفیبر، سطح D۲ قطر دابل چوبی و عمق نفوذ با سطح L۲ بهترین تیمارها از نظر تأثیر بر روی استحکام اتصالات به حساب می آیند.

با توجه به نتایج ذکر شده، افزودن نانو فیبرکربن به چسب اپوکسی بر روی اتصالات متعارف گوشه ای ساخته شده تأثیرگذار بوده است. به طوری که بیشترین ظرفیت لنگر خمشی مربوط به مقدار بارگذاری ۰/۴ درصد وزنی نانو فیبرکربن در بارگذاری فشاری برابر (Nm) ۲۴۲/۲۶ و از نظر تأثیرگذاری قطر، دابل با قطر (D۲=۱۰mm) برابر با (Nm) ۲۳۹/۱۹ و دابل چوبی با عمق نفوذ L۲، (Nm) ۱۹۵/۴۱ بود که به ترتیب نسبت به نمونه های شاهد خود با ظرفیت لنگر خمشی (Nm) ۱۹۴/۶۴، (Nm) ۱۹۸/۱۵ و (Nm) ۱۹۵/۴۱ افزایش داشتند. در حالت بارگذاری کششی نیز برای ۰/۴ درصد نانو (Nm) ۱۷۷/۳۷ و تأثیرگذاری قطر دابل نیز قطر D۲ برابر با (Nm) ۱۶۶/۶۲ و عمق نفوذ دابل L۲ برابر با (Nm) ۱۷۱/۱۹ بود که نسبت به نمونه های شاهد خود با لنگر خمشی (Nm) ۱۴۱/۳۵، (Nm) ۱۴۷/۶۷ و (Nm) ۱۴۳/۰۹ افزایش داشتند. از این رو داده های مذکور معنی دار بودن تأثیر

نانو فیبرکربن قطر و عمق نفوذ دابل را بر روی استحکام اتصالات نمونه ها تأیید می کنند.

با توجه به یافته های این تحقیق و نتایج محققان دیگر، در تحلیل تأثیرگذاری نانوفیبرکربن بر روی ظرفیت لنگر خمشی نمونه های آزمون زیر بارگذاری کششی به نظر می رسد نانو فیبرکربن باعث افزایش مقاومت خط چسب می گردد تا حدی که مقاومت آن نسبت به حالت شاهد افزایش می یابد. همچنین نانوفیبرکربن به دلیل داشتن استحکام کششی بالا (Keshtegar *et al.*, 2019) سبب تقویت ماده زمینه ای و همچنین سفت کنندگی و مقاومت در برابر تغییر ماده زمینه ای پلیمر به شکل مطلوبی می شود. به طور کلی از آنجاکه انتقال نیرو یا تنش از طریق فصل مشترک ماده نانو و رزین انجام می شود با توجه به توزیع مناسب فیبرهای کربن در اثر وجود گروه های عاملی (هیدروکسی، الکیل، متیلن، استری) و قرار گرفتن آنها در جهات ترجیحی سبب ایجاد فصل مشترک و تعامل بین صفحه ای مناسب بین زنجیره های ماتریس اپوکسی شده است که مانند پل عمل کرده و انتقال تنش را از چسب به الیاف نانوفیبر کربن به طور چشمگیری افزایش می دهد. این عوامل باعث تقویت عناصر اتصال بین چسب و سطح چوب شده، در نتیجه خواص مکانیکی اتصال از جمله ظرفیت لنگر خمشی بهبود می یابد، به طوری که در پژوهش های مشابه با رزین های دیگر که توسط Feng و همکاران (۲۰۱۴) و Zhou و همکاران (۲۰۱۰) انجام شده نتایج مشابه ای گزارش شده است.

مطابق نتایج تحقیق Barick و Tripathy (۲۰۱۰) در زمینه تأثیر نانوفیبرکربن بر روی مواد پلیمری ترموپلاستیک، افزایش بیشتر استحکام اتصالات با افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانوفیبرکربن اصلاح شده نسبت به ۱/۵ درصد وزنی می تواند شاخص مناسبی برای به نمایش گذاشتن اتصالات عرضی بهتر با ماتریس اپوکسی از طریق پراکنش یکنواخت نانوفیبرهای کربن در چسب مذکور باشد که در نتیجه بر روی انتقال تنش تأثیرگذار است و اتصال قوی تری را به نمایش می گذارد. در حالی که در مقدار بالاتر (۱/۵ درصد) با توجه به نقش تعیین کننده پراکنش نانو ذرات بر روی خواص نهایی چسب، پراکنش مناسب انجام نشده و نانو فیبرکربن در محل های بدون

- Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 24(1):117-124.
- Barick, A.K. and Tripathy, D.K., 2010. Effect of nanofiber on material properties of vapor-grown carbon nanofiber reinforced thermoplastic polyurethane (TPU/CNF) nanocomposites prepared by melt compounding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(10), pp.1471-1482.
- Eckelman A., Edril, Z. and Zhang J., 2002. Withdrawal and bending strength of dowel joints construction of plywood and oriented strandboard. *Forest Products Journal*, (52):9-66-74.
- Feng, L., Xie, N. and Zhong, J., 2014. Carbon nanofibers and their composites: a review of synthesizing, properties and applications. *Materials*, 7(5): 3919-3945.
- Huuml, H., 2010. Strength properties of L-profiled furniture joints constructed with laminated wooden panels. *Scientific Research and Essays*, 5(6): 545-550.
- Izadi, N., Rashidi, A., Borghei, M., Karimzadeh, R. and Tofigh, A., 2012. Synthesis of carbon nanofibres over nanoporous Ni-MgO catalyst: influence of the bimetallic Ni-(Cu, Co, Mo) MgO catalysts. *Journal of Experimental Nanoscience*, 7(2):160-173.
- Jahan Latibari, A., Ghofrani, M. and Noori, H., 2005. Investigation the holding strength of dowel joint constructed of particleboard. *Journal of Agricultural Sciences*. 11(1):135-148.
- Jojibabu, P., Ram, G.J., Deshpande, A.P. and Bakshi, S.R., 2017. Effect of carbon nano-filler addition on the degradation of epoxy adhesive joints subjected to hygrothermal aging. *Polymer Degradation and Stability*, 140: 84-94.
- Kaborani, A., Riedl, B. and Blanchet, P., 2013. Ultrasonication technique: a method for dispersing nanoclay in wood adhesives. *Journal of Nanomaterials*, 2013: 341897.
- Kaborani, 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.
- Keshtegar, B., 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.
- Madhoushi, M. and Ansell, M.P., 2017. Effect of glue-line thickness on pull-out behavior of glued-in GFRP rods in LVL: Finite element analysis. *Polymer Testing*, 62, 196-202.
- Madhoushi, M., 2021. Pull-out strength of glued-in

اتصال باقی می ماند که در نتیجه در ماتریس اپوکسی کلوخه شده و به صورت مراکز تجمع تنش عمل کرده و مانع از انتقال تنش می شود؛ بنابراین در اثر نیروی وارده، ترک افزایش یافته و از استحکام اتصال کاسته می شود و نمی توان تقویت خواص مورد نظر را در هر دو نوع بارگذاری انتظار داشت و این نتایج با نتایج پژوهش چسب اپوکسی با نانوفیبرکربن که توسط Rana و همکاران (۲۰۱۱) انجام شده همسو می باشد.

افزایش قطر دوپل چوبی از ۸ به ۱۰ میلی متر و افزایش عمق نفوذ از L۱ به L۲ بر روی ظرفیت لنگر خمشی زیر بارگذاری فشاری و کششی تأثیر مثبت داشت، به طوری که با افزایش قطر دوپل چوبی و عمق نفوذ ظرفیت لنگر خمشی نیز افزایش یافت. افزایش ظرفیت لنگر خمشی با افزایش قطر و عمق نفوذ به این دلیل می تواند باشد که با افزایش قطر، سطح تماس دوپل چوبی با MDF و چسب افزایش یافته که این سبب افزایش ظرفیت لنگر خمشی می گردد. همچنین افزایش قطر دوپل باعث کاهش گسیختگی در خط چسب می گردد (Jahan Latibari *et al.*, 2005; Ramer, 1999). افزایش عمق نفوذ دوپل چوبی نیز باعث وارد شدن سطح آزاد بیشتری از آن در منطقه اتصال شده، در نتیجه مقاومت اتصال افزایش می یابد که نتایج تحقیقات Jahan Latibari و همکاران (۲۰۰۵) و Eckelman و همکاران (۲۰۰۲) چنین موضوعی را تأیید می کند. به طور کلی ظرفیت لنگر خمشی در بارگذاری فشاری نسبت به بارگذاری کششی بیشتر بود.

#### سپاسگزاری

این مطالعه با حمایت مالی و در قالب طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد، بدین وسیله از معاون محترم پژوهشی دانشگاه قدردانی می گردد.

#### منابع مورد استفاده

- Atar, M. and Özçi, A., 2008. The effects of screw and back panels on the strength of corner joints in case furniture. *Materials & Design*, 29(2), pp.519-525.
- Bahmani, M., Ebrahimi, G. and Fathi, L., 2009. Predicting of withdrawal strength of dowel joint in medium density fiber (MDF) by mathematic model.

- composites. *Journal of Nanomaterials*, 2013.
- Rana, S., Alagirusamy, R. and Joshi, M., 2011. Development of carbon nanofibre incorporated three phase carbon/epoxy composites with enhanced mechanical, electrical and thermal properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(5), 439-445.
- Zhang, J. and Eckelman, C.A., 1993. The bending moment resistance of single dowel corner joints in case construction. *Forest Products Journal*, 43:19-24.
- Zhou, H., 1991. Research on the improvement of water resistance of polyvinyl acetate emulsion. *Nianjie*, 12(4):11-20.
- Zhou, Y., Pervin, F., Rangari, V.K. and Jeelani, S., 2006. Fabrication and evaluation of carbon nano fiber filled carbon/epoxy composite. *Materials Science and Engineering: A*, 426(1-2), 221-228.
- Zhou, Y., Pervin, F., Jeelani, S. and Mallick, P.K., 2008. Improvement in mechanical properties of carbon fabric epoxy composite using carbon nanofibers. *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1-3): 445-453.
- GFRP rods in timber connections by using of epoxy resin reinforced by nanoparticles. *Cerne*, 27 (1): e-102508.
- Naeimirad, M., Zadhoush, A. and Neisiany, R.E., 2016. Fabrication and characterization of silicocarbide/epoxy nanocomposite using silicon carbide nanowhisker and nanoparticle reinforcements. *Journal of Composite Materials*, 50(4): 435-446.
- Norhakim, N., Ahmad, S.H., Chia, C.H. and Huang, N.M., 2014. Mechanical and thermal properties of graphene oxide filled epoxy nanocomposites. *Sains Malaysiana*, 43(4): 603-609.
- Ozkan, T., Chen, Q. and Chasiotis, I., 2012. Interfacial strength and fracture energy of individual carbon nanofibers in epoxy matrix as a function of surface conditions. *Composites Science and Technology*, 72(9):965-975.
- Parveen, S., Rana, S. and Figueiro, R., 2013. A review on nanomaterial dispersion, microstructure, and mechanical properties of carbon nanotube and nanofiber reinforced cementitious

## Study of the effect of carbon nanofiber reinforced epoxy adhesive on the flexural moment capacity of corner joints in furniture

M. Madhoushi<sup>1\*</sup> and B. A. Keshtegar<sup>2</sup>

1\*-Corresponding author, Associate Professor, Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: madhoushi@gau.ac.ir

2- PhD, Wood Composites, Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

Received: May, 2021 Accepted: July, 2021

### Abstract

In this study, the effect of epoxy resin modified by carbon nanofibers (CNFs) was investigated at three levels of zero, 0.4 and 1.5% on the strength properties of common corner joints in the furniture production. Carbon nanofibers were dispersed in the adhesive polymer matrix by ultrasonic device and test specimens of joints were prepared using MDF pieces with the desired dimensions, wooden dowel with diameters of 8 and 10 mm, penetration depth in two levels (D2 and D3) and using reinforced epoxy by CNFs. A total of 12 treatments with three replications were evaluated separately for each of the compressive and tensile tests and the flexural moment capacity of the joints specimens was evaluated at a speed of 3 mm/min. The results showed that by increasing the percentage of CNFs, diameter and penetration depth of dowel wood in the compression test, the flexural moment capacity increased by 1.2, 1.2 and 1.2 times, and in the tensile test by 1.3, 1.1 and 1.2 times, respectively, compared to the control samples. In general, according to the research variables, carbon nanofiber was able to improve the strength properties of epoxy resin and thus the strength of the joints. The level of 0.4% CNFS, dowel diameter 10 mm and penetration depth of D2 had the best effect on the strength of joints in two types of loading.

**Keywords:** Carbon nanofibre, epoxy adhesive, wooden dowel, corner joints, MDF.