

(OPEN ACCESS)

Effect of joint type and board thickness on the ultimate load of fir wood corner joints

Alireza Mirhasanniasarabi¹, Morteza Nazerian², Sima Sepahvand^{3*} and Sepideh Hamed⁴

1-M.Sc., student, Department of Biosystems, Faculty of New Technologies and Aerospace Engineering, Zirab campus, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2-Associate Prof., Department of Biosystems, Faculty of New Technologies and Aerospace Engineering, Zirab campus, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3*-Corresponding Author, Assistant Prof., Department of Biosystems, Faculty of New Technologies and Aerospace Engineering, Zirab campus, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Email: s_sepahvand@sbu.ac.ir

4-Associate Prof., Department of Biosystems, Faculty of New Technologies and Aerospace Engineering, Zirab campus, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 30 June 2026

Revised: 15 July 2026

Accepted: 18 July 2026

Published online: 21

September 2026

Keywords:

Polyvinyl acetate (PVAc),
ultimate load,

Mechanical behavior,

Stress transfer,

Joint design.

ABSTRACT

Background and Objectives: Corner joints are among the most critical components of wooden structures and products, playing a decisive role in load transfer, structural stability, and durability. The mechanical performance of these joints is influenced by several factors, including joint type, board thickness, wood species, and bonding quality. An inappropriate selection of joint type or board thickness may result in stress concentration, reduced strength, excessive deformation, and premature structural failure. Despite the widespread use of traditional and engineered wood joints in the wood and furniture industries, comprehensive experimental information regarding the combined effects of joint type and board thickness on the ultimate load of corner joints, particularly in fir wood, is limited. Therefore, the present study aimed to investigate the effects of joint type and board thickness on the ultimate load on fir wood corner joints in order to identify the most suitable combination in terms of mechanical performance and provide guidance for improving the design and safety of wooden structures.

Materials and Methods: Fir wood was used as the raw material in this study. Five joint types, namely butt joint, mortise-and-tenon joint, dowel joint, half-lap joint, and dovetail joint, were evaluated. Wooden boards were prepared at six thickness levels (1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, and 4.0 cm), and the joints were fabricated from these boards using polyvinyl acetate (PVAc) adhesive. Three replicates were considered for each combination of joint type and thickness. A total of 90 specimens were prepared. After the adhesive curing period, the specimens were subjected to shear testing, and the failure load of each specimen was recorded as the ultimate load indicator. The experimental data were analyzed using SPSS software through two-way analysis of variance (ANOVA) to evaluate the individual effects of joint type and board thickness, as well as their interaction

on the ultimate load of the corner joints. Statistical significance was ascertained at $P < 0.05$.

Results: The statistical analysis indicated that the developed model exhibited a satisfactory fit and that the investigated variables accounted for a substantial proportion of the variation in ultimate load. The effects of board thickness, joint type, and their interaction on the ultimate load of the corner joints were all statistically significant ($P < 0.05$). The results demonstrated that the butt, mortise-and-tenon, dowel, half-lap, and dovetail joints exhibited significantly different mechanical behaviors and ultimate load values. Furthermore, increasing board thickness generally enhanced the ultimate load of the joints; however, the magnitude of this improvement varied depending on the joint type. These findings indicate that joint type and board thickness jointly determine the load-bearing capacity and ultimate load of wooden corner joints and should not be considered independently in joint design.

Conclusion: The results demonstrated that the ultimate load of fir wood corner joints was significantly affected by joint type, board thickness, and the interaction between these two factors. Significant differences in mechanical performance were observed among the butt, mortise-and-tenon, dowel, half-lap, and dovetail joints. Increasing board thickness generally improved the ultimate load of the joints, although the extent of improvement depended on the joint configuration. Therefore, the selection of an appropriate joint type should always be made in accordance with the board thickness to maximize load-bearing capacity, structural strength, and durability. The findings of this study provide useful guidance for the selection and design of wood joints in the wood products, furniture, and timber construction industries and may contribute to the optimization of their mechanical performance.

Cite this article: Alireza Mirhasanniasarabi, Morteza Nazerian, Sima Sepahvand and Sepideh Hamed. 2026. Effect of joint type and board thickness on the ultimate load of fir wood corner joints. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 41(3), 261-274. <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2026.373382.1843>



Copyright: © 2025 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (<http://ijwpr.areeo.ac.ir/>) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

بررسی اثر نوع اتصال و ضخامت تخته بر نیروی گسیختگی اتصالات گوشه‌ای چوب نراد

علیرضا میرحسن نیا سرابی^۱، مرتضی ناظریان^۲، سیما سپهوند^{۳*} و سپیده حامدی^۴

۱- دانشجوی ارشد، گروه سامانه‌های زیستی، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، پردیس زیراب، دانشگاه شهید بهشتی، زیراب، ایران

۲- دانشیار، گروه سامانه‌های زیستی، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، پردیس زیراب، دانشگاه شهید بهشتی، زیراب، ایران

۳- نویسنده مسئول، استادیار، گروه سامانه‌های زیستی، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، پردیس زیراب، دانشگاه شهید بهشتی، زیراب، ایران

پست الکترونیک: s_sepahvand@sbu.ac.ir

۴- دانشیار، گروه پالایش زیستی، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، پردیس زیراب، دانشگاه شهید بهشتی، زیراب، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: اتصالات گوشه از مهم‌ترین اجزای سازه‌ها و محصولات چوبی به شمار می‌روند و نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال نیرو، پایداری و دوام سازه دارند. عملکرد مکانیکی این اتصالات تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله نوع اتصال، ضخامت قطعات، گونه چوب و کیفیت چسبندگی قرار دارد. انتخاب نامناسب نوع اتصال یا ضخامت قطعات می‌تواند موجب تمرکز تنش، کاهش مقاومت، افزایش تغییرشکل و در نهایت گسیختگی زود هنگام سازه شود. با وجود استفاده گسترده از انواع اتصالات سنتی و مهندسی‌شده در صنایع چوب و مبلمان، پژوهش و اطلاعات آزمایشگاهی جامعی درباره اثر هم‌زمان نوع اتصال و ضخامت قطعات بر نیروی گسیختگی اتصالات گوشه، به‌ویژه در چوب نراد، در دسترس نیست. از این رو، پژوهش حاضر باهدف بررسی اثر نوع اتصال و ضخامت تخته بر نیروی گسیختگی اتصالات گوشه ساخته‌شده از چوب نراد انجام شد تا مناسب‌ترین ترکیب از نظر عملکرد مکانیکی شناسایی شود و زمینه‌ای برای بهبود طراحی و افزایش ایمنی سازه‌های چوبی فراهم آید.
تاریخ‌های مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰	مواد و روش‌ها: در این پژوهش، از چوب طبیعی نراد به‌عنوان ماده اولیه استفاده شد. پنج نوع اتصال شامل قلیف، کام و زبانه، دویل، نیم‌ونیم و دم‌چلچله مورد بررسی قرار گرفتند. تخته‌های چوبی اولیه در شش سطح ضخامت شامل ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ و ۴ سانتی‌متر تهیه شدند و اتصالات موردنظر از این تخته‌ها ساخته شدند. در مجموع، ۹۰ نمونه با استفاده از چسب پلی‌وینیل استات تهیه شدند و پس از طی دوره گیرایش، تحت آزمون نیروی گسیختگی قرار گرفتند. نیروی شکست هر نمونه به‌عنوان شاخص نیروی گسیختگی ثبت شد. داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار SPSS و تحلیل واریانس دوطرفه مورد بررسی قرار گرفت تا اثر مستقل نوع اتصال، ضخامت تخته و همچنین اثر متقابل این دو عامل بر نیروی گسیختگی اتصالات تعیین شود. سطح معنی‌داری آزمون‌ها برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.
واژه‌های کلیدی: پلی‌وینیل استات، نیروی گسیختگی، رفتار مکانیکی، انتقال تنش، طراحی اتصال	یافته‌ها: نتایج تحلیل آماری نشان داد که مدل آماری از برازش مناسبی برخوردار بوده و متغیرهای مورد بررسی توانستند بخش عمده تغییرات نیروی گسیختگی را تبیین کنند. همچنین، اثر ضخامت تخته، نوع اتصال و اثر متقابل این دو عامل بر نیروی گسیختگی اتصالات از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0/05$). مقایسه نتایج نشان داد که اتصالات قلیف، کام و زبانه، دویل، نیم‌ونیم و دم‌چلچله رفتار مکانیکی یکسانی نداشتند و نیروی گسیختگی آنها به‌طور معنی‌داری با یکدیگر متفاوت بود. علاوه بر این، افزایش ضخامت تخته به‌طور کلی موجب افزایش نیروی گسیختگی اتصالات شد، اما میزان این افزایش در همه اتصالات یکسان نبود و به نوع اتصال وابسته بود. این موضوع نشان داد که نوع اتصال و ضخامت تخته به‌صورت هم‌زمان در تعیین ظرفیت تحمل بار و مقاومت نهایی اتصال نقش دارند و نمی‌توان هر یک از این عوامل را به‌صورت مستقل در طراحی اتصالات چوبی در نظر گرفت.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که نیروی گسیختگی اتصالات گوشه چوب نراد به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع اتصال، ضخامت تخته و اثر متقابل این دو عامل قرار دارد. اتصالات قلیف، کام و زبانه، دویل، نیم‌ونیم و دم‌چلچله از نظر عملکرد مکانیکی تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند و افزایش ضخامت تخته در اغلب موارد موجب بهبود نیروی گسیختگی شد، هرچند که میزان این بهبود به نوع اتصال نیز وابسته بود؛ بنابراین، انتخاب مناسب نوع اتصال باید همواره متناسب با ضخامت قطعات چوبی انجام شود تا بیشترین ظرفیت باربری، استحکام و دوام در سازه‌ها و محصولات چوبی حاصل گردد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنایی برای انتخاب و طراحی اتصالات مناسب در صنایع چوب، مبلمان و سایر سازه‌های چوبی باشد و در بهینه‌سازی عملکرد مکانیکی این محصولات مورد استفاده قرار گیرد.

استناد به این مقاله: علیرضا میرحسن نیا سرابی، مرتضی ناظریان، سیما سپهوند و سپیده حامدی. ۱۴۰۵. بررسی اثر نوع اتصال و ضخامت تخته بر نیروی گسیختگی اتصالات گوشه‌ای چوب نراد. نشریه تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، (۳)، ۲۷۴-۲۶۱.

DOI: <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2026.373382.1843>

مقدمه

چوب یکی از قدیمی‌ترین و درعین حال ارزشمندترین مواد مهندسی مورد استفاده بشر است که به دلیل تجدیدپذیری بودن، قابلیت بازیافت، نسبت بالای مقاومت به وزن، سهولت ماشین‌کاری و زیبایی طبیعی، همواره جایگاه ویژه‌ای در صنایع ساختمان، مبلمان و دکوراسیون داخلی داشته است (He et al., 2023). در دهه‌های اخیر، هم‌زمان با افزایش نگرانی‌های جهانی درباره تغییرات اقلیمی، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و ضرورت توسعه پایدار، استفاده از مصالح زیست‌پایه به‌عنوان جایگزینی برای مواد پرمصرف و انرژی‌بر مانند فولاد، بتن و پلیمرهای سنتزی موردتوجه گسترده قرار گرفته است (Liu et al., 2024). در این میان، چوب به دلیل قابلیت ذخیره‌سازی کربن، مصرف انرژی کمتر در فرایند تولید و امکان بازگشت به چرخه طبیعی، به یکی از مهم‌ترین مواد مهندسی پایدار تبدیل شده است (Vlaović et al., 2024). بر همین اساس، استفاده از چوب و فراورده‌های مهندسی‌شده آن در ساخت سازه‌های سبک، ساختمان‌های چندطبقه، مبلمان، تجهیزات داخلی و سایر محصولات صنعتی طی سال‌های اخیر رشد قابل توجهی داشته است (Hu et al., 2023). اگرچه خواص فیزیکی و مکانیکی چوب نقش مهمی در عملکرد نهایی محصولات چوبی ایفا می‌کنند، اما استحکام و دوام این محصولات تنها به ویژگی‌های ذاتی چوب وابسته

نیست و کیفیت اتصالات نیز یکی از عوامل تعیین‌کننده در عملکرد سازه‌ای آنها محسوب می‌شود (Hu et al., 2023). درواقع، اتصال نقطه‌ای است که نیرو از یک عضو به عضو دیگر منتقل می‌شود و هرگونه ضعف در طراحی یا اجرای آن می‌تواند موجب تمرکز تنش، افزایش تغییرشکل و شکست زود هنگام محصول شود (Li et al., 2024). از این رو، Smardzewski (۲۰۱۵) و Vlaović و همکاران (۲۰۲۴) اتصالات را یکی از بحرانی‌ترین اجزای سازه‌ها و محصولات چوبی معرفی کرده‌اند و نشان داده‌اند که مقاومت، پایداری و دوام نهایی یک سازه چوبی بیش از آنکه به مقاومت اعضای منفرد وابسته باشد، به عملکرد مکانیکی و قابلیت انتقال بار در اتصالات بستگی دارد. Liu و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که رفتار مکانیکی اتصالات نقش تعیین‌کننده‌ای در ظرفیت باربری و ایمنی سازه‌های چوبی دارد و بهینه‌سازی طراحی اتصال می‌تواند عملکرد کلی سازه را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشد. علاوه بر این، کیفیت طراحی و اجرای اتصال، علاوه بر افزایش استحکام، موجب بهبود دوام، پایداری و قابلیت اطمینان محصولات چوبی شده و نقش مهمی در افزایش عمر مفید آنها ایفا می‌کند (Vlaović et al., 2024). در میان انواع مختلف اتصالات، اتصالات گوشه از پرکاربردترین و مهم‌ترین اتصالات مورد استفاده در صنایع چوب و مبلمان به شمار می‌روند (Eckelman, 2003);

اتصال را تحت تأثیر قرار دهند. با این حال، نتایج بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که نوع اتصال و ابعاد هندسی آن، به‌ویژه ضخامت قطعات، از عوامل کلیدی کنترل‌کننده ظرفیت باربری و مقاومت اتصالات چوبی محسوب می‌شوند (Eckelman, 2003; Hu & Chen, 2021; Acar et al., 2023). تغییر در ضخامت قطعات نه تنها سطح تماس بین اعضای متصل را تغییر می‌دهد، بلکه نحوه توزیع تنش، میزان تمرکز تنش در گوشه‌ها و الگوی گسیختگی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. از سوی دیگر، هر نوع اتصال دارای مسیر انتقال بار، سطح تماس، اصطکاک و سازوکار شکست ویژه خود است؛ بنابراین انتظار می‌رود واکنش آنها نسبت به تغییر ضخامت یکسان نباشد (Chen & Zhu, 2019; Yu et al., 2024). با وجود کاربرد گسترده این اتصالات، تاکنون پژوهش جامعی که به‌صورت هم‌زمان اثر نوع اتصال و ضخامت قطعات چوبی را در چند سطح مختلف بر مقاومت اتصالات گوشه بررسی کند، محدود بوده است. بسیاری از مطالعات پیشین عمدتاً بر یک نوع اتصال خاص یا یک محدوده محدود از ضخامت تمرکز داشته‌اند و کمتر به بررسی آثار تعاملی این دو عامل پرداخته‌اند. مطالعات پیشین عمدتاً به بررسی عملکرد یک نوع اتصال خاص تحت شرایط هندسی یا بارگذاری مشخص متمرکز بوده‌اند. برای مانند، Derikvand و همکاران (۲۰۱۲) اثر ضخامت شانه در اتصال کام و زبانه را بررسی کردند و نشان دادند که تغییرات هندسی این جزء می‌تواند ظرفیت خمشی اتصال را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین Derikvand و Ebrahimi (۲۰۱۴) با تمرکز بر پارامترهای هندسی اتصال کام و زبانه، نقش ابعاد زبانه و توزیع تنش را در عملکرد مکانیکی اتصال ارزیابی کردند. با این حال، این مطالعات عمدتاً محدود به یک گروه خاص از اتصالات بوده و امکان مقایسه هم‌زمان چندین نوع اتصال متداول گوشه‌ای را فراهم نکرده‌اند. از سوی دیگر، مطالعات انجام‌شده در زمینه اثر ضخامت اعضای چوبی بر عملکرد اتصالات، عمدتاً بر یک نوع اتصال خاص متمرکز بوده‌اند و اثر متقابل بین ضخامت قطعه چوبی و نوع اتصال را به‌صورت جامع مورد ارزیابی قرار نداده‌اند.

(Smardzewski, 2015). این اتصالات در تولید انواع میز، صندلی، کمد، کابینت، کشتی، قفسه، جعبه‌های چوبی و بسیاری از سازه‌های سبک و نیمه‌سنگین کاربرد دارند و وظیفه اصلی آنها انتقال نیرو میان اعضای عمود بر یکدیگر است (Derikvand & Eckelman, 2015). در چنین اتصالاتی معمولاً تنش‌های کششی، خمشی و به‌ویژه برشی در ناحیه اتصال متمرکز می‌شود؛ از این رو، کوچک‌ترین ضعف در طراحی هندسه اتصال، انتخاب نوع اتصال یا کیفیت اجرای آن می‌تواند موجب کاهش ظرفیت باربری و شکست سازه شود (Atar et al., 2022). مطالعات انجام‌شده بر روی اتصالات گوشه نشان داده‌اند که رفتار این اتصالات به‌مراتب پیچیده‌تر از اعضای ساده چوبی است، زیرا عوامل متعددی به‌طور هم‌زمان بر نحوه توزیع تنش و الگوی شکست آنها اثر می‌گذارند (Hu & Chen, 2021; Hu & Guan, 2019; Chen & Zhu, 2019). رفتار مکانیکی اتصالات چوبی تابع مجموعه‌ای از عوامل هندسی، مکانیکی و فناوری ساخت است (Derikvand & Eckelman, 2015; Hu & Guan, 2019). مطالعات انجام‌شده بر روی اتصالات کام و زبانه نشان داده‌اند که پارامترهای هندسی اتصال، از جمله ضخامت شانه، طول، عرض و عمق زبانه، تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت خمشی و مقاومت اتصال دارند (Derikvand et al., 2012; Derikvand & Ebrahimi, 2014a). همچنین، تحلیل‌های مبتنی بر روش اجزای محدود نشان داده‌اند که تغییر در ابعاد هندسی اتصال می‌تواند الگوی توزیع تنش و کرنش را در نواحی بحرانی اتصال به‌طور محسوسی تغییر دهد و درک بهتری از سازوکار شکست فراهم کند (Derikvand & Ebrahimi, 2014b). علاوه بر این، ظرفیت بیرون‌کشیدگی اتصالات کام و زبانه به عواملی مانند گونه چوب و ابعاد زبانه وابسته بوده و این عوامل نقش مهمی در عملکرد مکانیکی و ظرفیت باربری اتصال ایفا می‌کنند (Derikvand et al., 2013). گونه چوب، چگالی، مقدار رطوبت، جهت الیاف، نوع چسب، کیفیت فرآیند اتصال، شرایط بارگذاری و ابعاد قطعات از مهم‌ترین عواملی هستند که می‌توانند استحکام و سختی

بررسی کند، ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا، نوآوری این پژوهش در مقایسه پنج نوع اتصال گوشه‌ای متداول تحت شش سطح مختلف ضخامت تخته چوبی و ارزیابی اثرهای مستقل و متقابل این دو عامل بر نیروی گسیختگی اتصالات است. این رویکرد امکان شناخت بهتر رفتار مکانیکی اتصالات مختلف و تعیین ترکیب مناسب اتصال-ضخامت برای کاربردهای چوبی را فراهم می‌کند. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش بررسی و مقایسه مقاومت مکانیکی اتصالات چوبی بر اساس نوع اتصال و ضخامت قطعات در چوب طبیعی نراد است. در این راستا، پنج نوع اتصال رایج شامل قلیف، کام و زبانه، دوپل، نیم‌ونیم و دم‌چلچله مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اتصال قلیف ساده‌ترین نوع اتصال بوده و عمدتاً بر چسبندگی سطحی بین قطعات متکی است. در مقابل، سایر اتصالات دارای درگیری هندسی و مکانیکی بین قطعات هستند که موجب بهبود انتقال بار می‌شود. این اتصالات به دلیل کاربرد گسترده در صنایع چوب و تفاوت در رفتار مکانیکی انتخاب شده‌اند. نتایج این پژوهش می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی اتصالات در صنایع مبلمان و سازه‌های چوبی سبک، کاهش مصرف مواد اولیه و بهبود ایمنی و دوام محصولات چوبی کمک نماید.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از چوب نراد (*Fir sp.*) به عنوان ماده اصلی استفاده شد که دارای میانگین رطوبت 12 ± 2 درصد و وزن مخصوص در رطوبت تعادل برابر با 0.42 g/cm^3 بود. همچنین برای اتصال قطعات از چسب پلی‌وینیل استات (PVAc) به صورت آماده که دارای درصد جامد حدود ۴۵-۵۰٪، ویسکوزیته متوسط (حدود ۳۰۰۰-۶۰۰۰ mPa.s در دمای 25°C) و بر پایه امولسیون آبی بوده و بدون رقیق‌سازی برای اتصال قطعات مورد استفاده قرار گرفت.

ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی از چوب نراد سالم و عاری از

بنابراین، هنوز مشخص نیست که افزایش ضخامت قطعات چوبی در تمامی پیکربندی‌های اتصال، منجر به بهبود مشابه در مقاومت برشی می‌شود یا اینکه پاسخ مکانیکی اتصال به ضخامت قطعه، به طور قابل توجهی تحت تأثیر هندسه و سازکار انتقال بار در هر نوع اتصال قرار می‌گیرد. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که برهم‌کنش بین هندسه اتصال و ضخامت قطعه چوبی می‌تواند به طور مستقیم بر نحوه توزیع تنش، مسیر گسیختگی و ظرفیت باربری نهایی اتصال اثرگذار باشد. این در حالی است که برهم‌کنش بین هندسه اتصال و ضخامت قطعه می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع تنش، رفتار گسیختگی و ظرفیت باربری نهایی اتصال داشته باشد (Hu & Guan, 2019; Chen & Zhu, 2019). از سوی دیگر، رفتار مکانیکی اتصالات چوبی به دلیل ماهیت ناهمسان و آنیزوتروپ ماده چوب، پیچیده‌تر از بسیاری از مصالح مهندسی دیگر است. تغییرات رطوبتی، جهت الیاف و ناهمگنی ساختاری چوب می‌تواند موجب تغییر در مسیر انتقال تنش و تمرکز تنش در نواحی بحرانی اتصال شود. در چنین شرایطی، طراحی بهینه اتصال و انتخاب ضخامت مناسب نه تنها موجب افزایش مقاومت مکانیکی می‌شود، بلکه نقش مهمی در کاهش گسیختگی‌های زودرس و افزایش دوام سازه‌های چوبی ایفا می‌کند (Vlaović et al., 2024; Yu et al., 2024). بر اساس مرور مطالعات پیشین، افزایش ضخامت قطعات معمولاً موجب افزایش ظرفیت باربری و کاهش تمرکز تنش می‌شود، اما این اثر در انواع مختلف اتصالات یکسان نیست و به هندسه و سازکار انتقال بار در هر اتصال وابسته است (Boadu & Antwi-Boasiako, 2017; Chen & Zhu, 2019). همچنین نوع اتصال می‌تواند مسیر انتقال نیرو و نوع گسیختگی را به طور اساسی تغییر دهد؛ به طوری که برخی اتصالات مانند دم‌چلچله عملکرد بهتری نسبت به اتصالات ساده در برابر بارهای کششی و برشی نشان می‌دهند (Atar et al., 2022; Imirzi et al., 2016). با توجه به این موارد، انجام یک پژوهش نظام‌مند که اثر نوع اتصال و ضخامت قطعات چوبی را به صورت هم‌زمان در یک طرح آزمایشگاهی کنترل‌شده

اتصال 6×6 سطح ضخامت 3×3 تکرار) ساخته و پس از کدگذاری، برای انجام آزمون مقاومت برشی مورد استفاده قرار گرفتند.

آزمون نیروی گسیختگی

نیروی گسیختگی اتصالات با استفاده از دستگاه آزمون یونیورسال (Instron 5969) مجهز به لودسل (50 kN) و مطابق با روش آزمون [ASTM D905](#) ارزیابی شد. نمونه‌ها به صورت یکنواخت و عمود بر ناحیه اتصال تحت بارگذاری قرار گرفتند. آزمون‌ها با سرعت ثابت (2 mm/min) تا لحظه شکست انجام شد و بیشینه نیروی ثبت شده به عنوان مقاومت شکست در نظر گرفته شد. با توجه به تفاوت در هندسه و نحوه انتقال بار در انواع اتصالات مورد بررسی، ظرفیت تحمل نیروی شکست (N) به عنوان شاخص ارزیابی عملکرد مکانیکی اتصالات در نظر گرفته شد. کلیه آزمایش‌ها در شرایط کنترل شده دمایی (20 ± 2 سانتی‌گراد) و رطوبتی (5 ± 65 درصد) انجام گردید.

روش تحلیل داده‌ها

داده‌های حاصل از آزمون نیروی گسیختگی با استفاده از نرم‌افزار SPSS (ورژن ۲۰۲۰) تحلیل شدند. پس از بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها و همگنی واریانس‌ها، اثر نوع اتصال، ضخامت تخته و اثر متقابل آن‌ها بر نیروی گسیختگی با استفاده از تحلیل واریانس دوطرفه (Two-Way ANOVA) ارزیابی شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد ($\alpha = 0.05$) انجام شد.

نتایج

تجزیه و تحلیل واریانس نیروی گسیختگی اتصالات

به منظور بررسی اثر نوع اتصال، ضخامت تخته و اثر متقابل آن‌ها بر نیروی گسیختگی اتصالات گوشه چوب نراد، داده‌های حاصل از آزمون‌ها با استفاده از تحلیل واریانس دوطرفه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحلیل در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اثر ضخامت

هرگونه عیب ظاهری مانند گره، ترک، پیچیدگی الیاف و پوسیدگی تهیه شدند. ابعاد اولیه نمونه‌ها شامل طول ۱۵ سانتی‌متر و عرض ۶ سانتی‌متر بود. تخته‌های چوبی در شش سطح ضخامت شامل ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ و ۴ سانتی‌متر تهیه و اتصالات مورد نظر از این تخته‌ها ساخته شدند. پس از برش و ماشین‌کاری، پنج نوع اتصال شامل قلیف، کام و زبانه، دوبل، نیم‌و نیم و دم‌چلچله مطابق ابعاد طراحی شده ساخته شد. در تمامی مراحل، دقت ابعادی و کیفیت اجرای اتصالات کنترل شد تا تمامی نمونه‌ها از شرایط ساخت یکسان برخوردار باشند. پس از تکمیل عملیات ماشین‌کاری، سطوح اتصال با استفاده از سنباده نرم پرداخت شدند تا هرگونه ناصافی، پرز و آثار ماشین‌کاری حذف شده و تماس کامل بین سطوح اتصال برقرار شود. پس از آماده‌سازی قطعات، چسب پلی‌وینیل استات (PVAc) با استفاده از قلم‌مو به‌طور یکنواخت بر روی سطوح اتصال اعمال و پخش شد تا پوشش کامل سطوح و ضخامت یکنواخت خط چسب در تمامی نمونه‌ها فراهم شود. مقدار چسب مصرفی بر مبنای وزن خشک چسب نسبت به واحد سطح مؤثر اتصال تعیین گردید و برای تمامی نمونه‌ها مقدار ثابت ۱۰۰ گرم بر مترمربع در نظر گرفته شد تا اثر ناشی از تغییرات مقدار چسب بر مقاومت اتصالات حذف شود. سپس قطعات در موقعیت صحیح مونتاژ شده و با استفاده از گیره‌های مکانیکی (Clamping pressure) به مدت ۲۴ ساعت تحت فشار یکنواخت قرار گرفتند. پس از باز کردن گیره‌ها، نمونه‌ها به مدت ۷ روز در شرایط استاندارد آزمایشگاهی (دمای 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 5 ± 65 درصد) نگهداری شدند تا فرآیند عمل‌آوری چسب به‌طور کامل انجام شود. به منظور بررسی اثر ضخامت تخته بر مقاومت برشی اتصالات، تخته‌های چوبی اولیه در شش سطح ضخامت شامل ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ و ۴ سانتی‌متر آماده‌سازی شدند. سپس، اتصالات مورد بررسی از این تخته‌ها ساخته شدند. برای هر ترکیب از نوع اتصال و ضخامت، سه تکرار در نظر گرفته شد؛ در نتیجه، در مجموع ۹۰ نمونه آزمایشی (۵ نوع

تخته، نوع اتصال و اثر متقابل این دو عامل بر نیروی گسیختگی اتصالات گوشه چوب نراد در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود ($P < 0/01$). نتایج نشان داد که ضخامت تخته با مقدار F برابر $79/150$ و نوع اتصال با مقدار F برابر $62/596$ تأثیر قابل توجهی بر نیروی گسیختگی اتصالات داشتند. همچنین اثر متقابل ضخامت و نوع اتصال نیز با مقدار F برابر $5/009$ معنی دار بود که بیانگر متفاوت بودن پاسخ انواع اتصالات به تغییرات ضخامت تخته است.

جدول ۱- نتایج تحلیل واریانس عاملی دوطرفه برای نیروی گسیختگی اتصالات

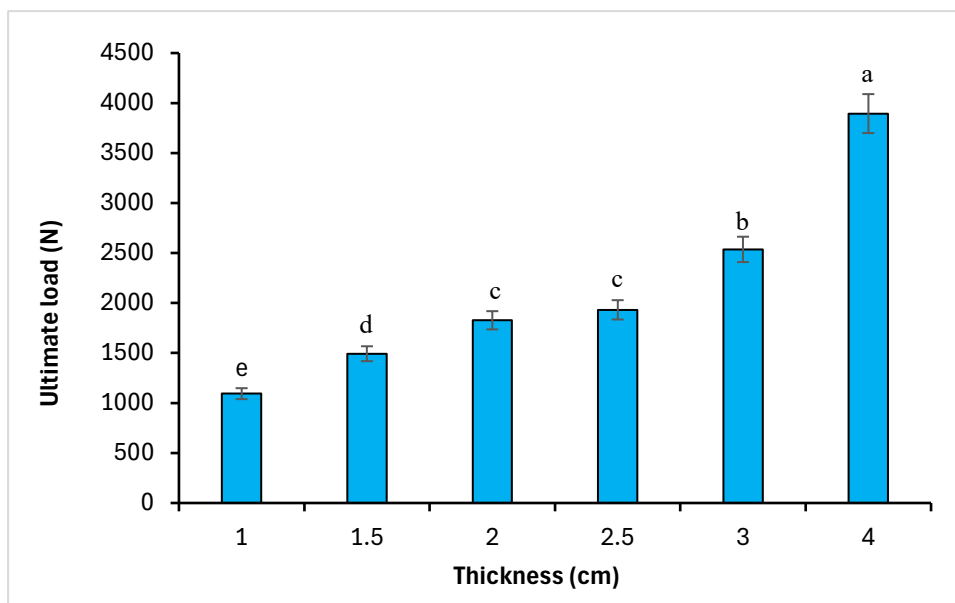
Table 1. Results of two-way factorial ANOVA for the ultimate load of wood corner joints

Source of Variation	Type III SS	df	Mean Square	F-value	P-value
Corrected Model	138,316,538	29	4,769,535.807	25.735	$P < 0.001$
Intercept	408,116,545.6	1	408,116,545.6	2202.101	$P < 0.001$
Thickness	73,344,825.07	5	14,668,965.01	79.150	$P < 0.001$
Joint Type	46,403,975.40	4	11,600,993.85	62.596	$P < 0.001$
Thickness $\times$ Joint Type	18,567,737.93	20	928,386.897	5.009	$P < 0.001$
Error	11,119,830.00	60	185,330.500	-	-
Total	557,552,914.0	90	-	-	-
Corrected Total	149,436,368.4	89	-	-	-

اثر ضخامت تخته بر نیروی گسیختگی اتصالات

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که ضخامت تخته اثر معنی داری بر نیروی گسیختگی اتصالات گوشه چوب نراد داشت ($P < 0/01$). با افزایش ضخامت تخته، میانگین نیروی گسیختگی اتصالات روندی افزایشی نشان داد، به طوری که کمترین مقدار مقاومت در ضخامت ۱ سانتی متر و بیشترین مقدار در ضخامت ۴ سانتی متر مشاهده شد (شکل ۱). همچنین، نتایج آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵

درصد نشان داد که ضخامت‌های مختلف در پنج گروه آماری قرار گرفته‌اند؛ تنها ضخامت‌های ۲ و ۲/۵ سانتی متر در یک گروه آماری مشترک قرار گرفتند که نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار بین این دو سطح است، در حالی که سایر ضخامت‌ها تفاوت معنی داری با یکدیگر نشان دادند. کمترین میانگین نیروی گسیختگی مربوط به ضخامت ۱ سانتی متر با مقدار $67/1093$ نیوتن و بیشترین مقدار مربوط به ضخامت ۴ سانتی متر با مقدار $60/3894$ نیوتن بود (جدول ۲).



Different letters indicate significant differences among the means according to Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

شکل ۱- میانگین نیروی گسیختگی اتصالات گوشه چوب نراد در سطوح مختلف ضخامت تخته

Figure 1. Mean ultimate load of Fir wood corner joints at different board thickness levels

جدول ۲- نتایج آزمون چند دامنه‌ای دانکن برای مقایسه میانگین نیروی گسیختگی در ضخامت‌های مختلف

Table 2. Results of Duncan's Multiple Range Test for Comparison of Mean ultimate load at Different Thickness Levels

Thickness (cm)	Number of Samples (N)	Subset 1	Subset 2	Subset 3	Subset 4	Subset 5
1	15	1093.6667 ^e	—	—	—	—
1.5	15	—	1492.8667 ^d	—	—	—
2	15	—	—	1827.3333 ^c	—	—
2.5	15	—	—	1932.0000 ^c	—	—
3	15	—	—	—	2536.3333 ^b	—
4	15	—	—	—	—	3894.600 ^a
Sig. (p-value)	—	1	1	0.508	1	1

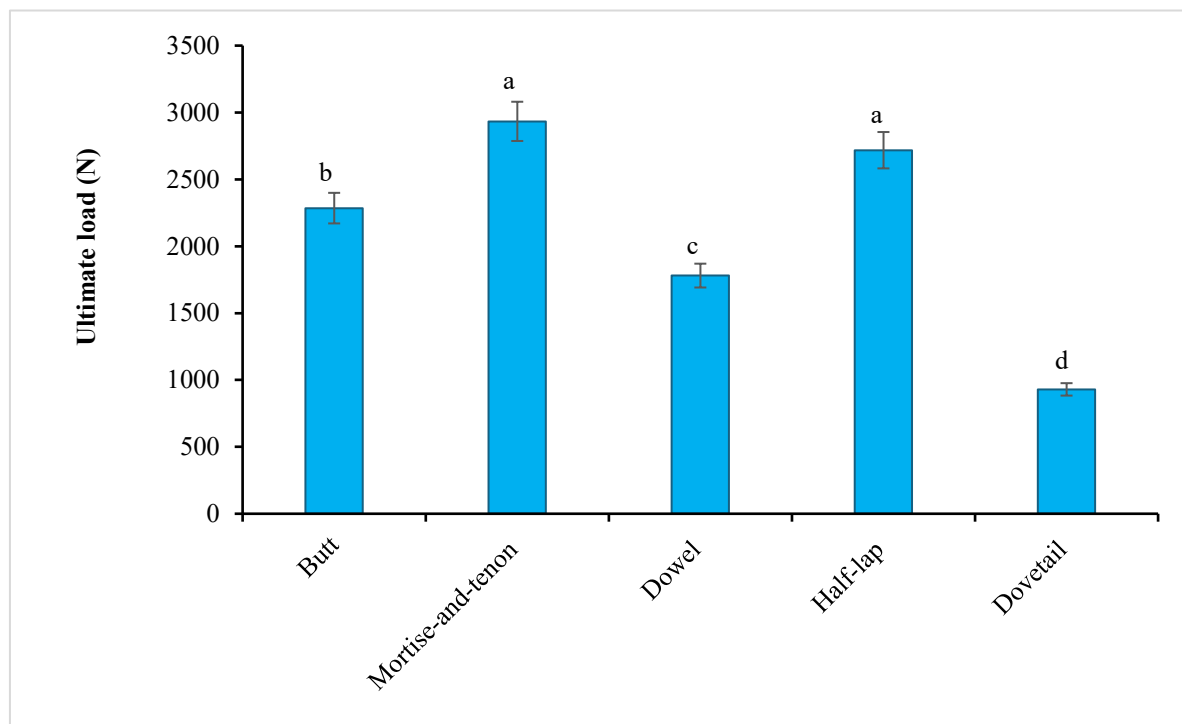
نیروی گسیختگی تفاوت قابل توجهی وجود دارد. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، اتصال کام و زبانه بیشترین میانگین نیروی گسیختگی را نشان داد. پس‌از آن، اتصال نیم‌ونیم و بعد اتصال قلیف قرار گرفتند. اتصال دوبل نیز نیروی

اثر نوع اتصال بر نیروی گسیختگی

بر اساس نتایج به‌دست آمده، نوع اتصال نیز اثر معنی‌داری بر نیروی گسیختگی نمونه‌ها دارد ($F=۶۲/۵۹۶$, $P<۰/۰۱$). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بین انواع اتصالات از نظر

اختلاف معنی دار وجود دارد، به طوری که میانگین های دارای حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

گسیختگی کمتری نسبت به سه اتصال مذکور نشان داد، در حالی که کمترین میانگین نیروی گسیختگی مربوط به اتصال دم چلچله بود. همچنین، نتایج آزمون چند دامنه ای دانکن نشان داد که بین میانگین نیروی گسیختگی برخی از انواع اتصالات



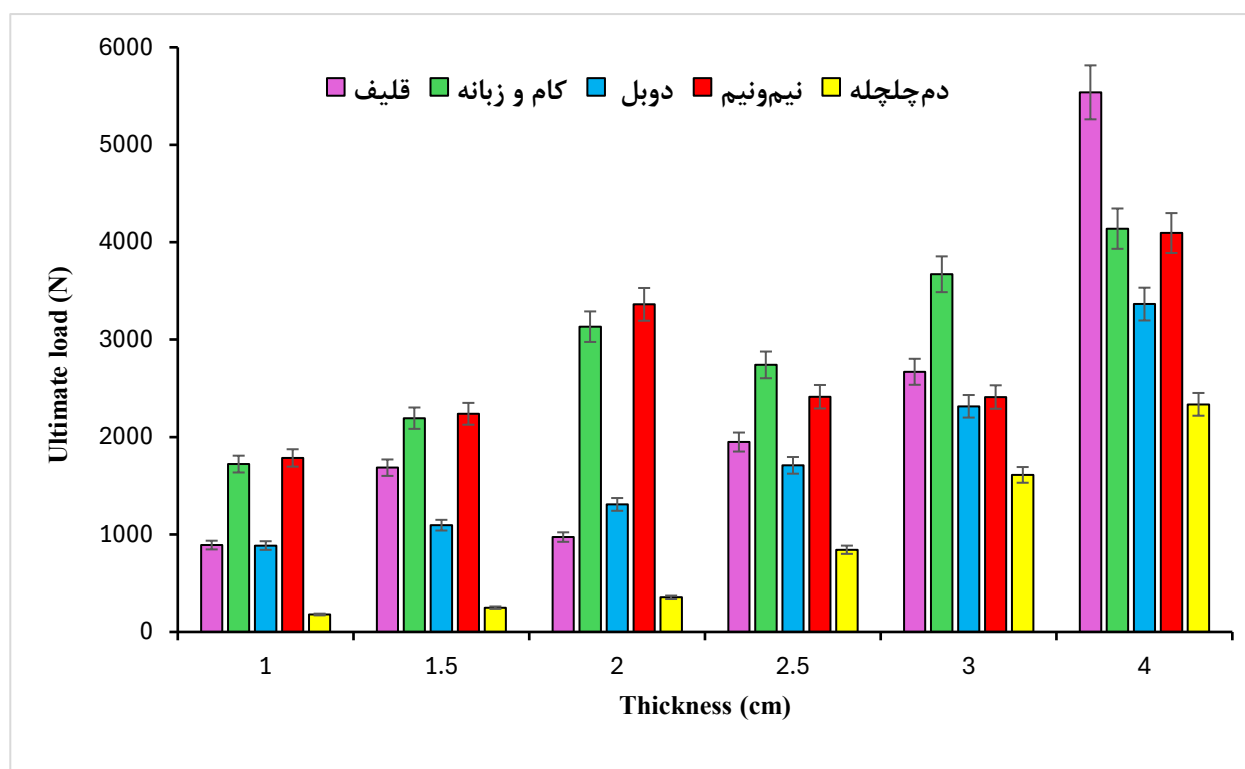
شکل ۲- مقایسه میانگین نیروی گسیختگی انواع اتصالات چوبی

Figure 2. Comparison of the mean ultimate load among different types of wood joints.

یکسان نبود. بیشترین میانگین نیروی گسیختگی در اتصال قلیف با ضخامت ۴ سانتی متر و کمترین میانگین نیروی گسیختگی در اتصال دم چلچله با ضخامت ۱ سانتی متر مشاهده شد. همچنین، اتصالات کام و زبانه و نیم ونیم در ضخامت های ۳ و ۴ سانتی متر نیز مقاومت برشی بالایی را نشان دادند که بیانگر تفاوت الگوی تغییرات نیروی گسیختگی در انواع مختلف اتصال با افزایش ضخامت است

اثر متقابل ضخامت و نوع اتصال

نتایج تحلیل واریانس نشان داد که اثر متقابل بین ضخامت تخته و نوع اتصال بر نیروی گسیختگی اتصالات گوشه چوب نراد از نظر آماری معنی دار بود ($F=5/009$, $P<0/01$). مقایسه میانگین های اثر متقابل در شکل ۳ ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش ضخامت تخته، میانگین نیروی گسیختگی در تمامی انواع اتصال روندی افزایشی داشت، اما میزان این افزایش در اتصالات مختلف



شکل ۳- اثر متقابل ضخامت و نوع اتصال بر نیروی گسیختگی اتصالات چوبی

Figure 3. Interaction effect of board thickness and joint type on the ultimate load of wood joints

بحث

نتایج تحلیل واریانس نشان داد که هر دو عامل ضخامت تخته و نوع اتصال، به همراه برهم‌کنش آن‌ها، تأثیر معنی‌داری بر نیروی گسیختگی اتصالات گوشه چوب نراد داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که رفتار مکانیکی اتصالات چوبی تحت تأثیر هم‌زمان عوامل هندسی و نوع اتصال قرار دارد و بررسی هر یک از این عوامل به صورت مستقل نمی‌تواند عملکرد واقعی اتصال را به طور کامل تبیین کند. از این رو، در ادامه اثر هر یک از این عوامل بر نیروی گسیختگی مورد بحث قرار می‌گیرد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش ضخامت تخته موجب افزایش معنی‌دار نیروی گسیختگی اتصالات گوشه چوب نراد شد. این افزایش را می‌توان به بزرگ‌تر شدن سطح مقطع مؤثر، افزایش سطح تماس بین اجزای اتصال و بهبود توزیع تنش در ناحیه اتصال نسبت داد. با افزایش ضخامت، ظرفیت تحمل بار اتصال افزایش یافته و احتمال تمرکز تنش

در نواحی بحرانی کاهش می‌یابد؛ در نتیجه، اتصال پیش از وقوع گسیختگی قادر به تحمل نیروهای برشی بیشتری خواهد بود. این یافته با نتایج [Eckelman و Derikvand \(۲۰۱۵\)](#) همخوانی دارد. این پژوهشگران گزارش کردند که افزایش ابعاد و ضخامت اعضای مورد استفاده در اتصالات گوشه‌ای موجب افزایش ظرفیت باربری و بهبود عملکرد مکانیکی اتصال می‌شود. همچنین [Zhu و Chen \(۲۰۱۹\)](#) بیان کردند که افزایش ضخامت قطعات چوبی موجب بهبود رفتار مکانیکی، کاهش تغییر شکل و افزایش ظرفیت تحمل بار در سازه‌های چوبی می‌شود. بنابراین، ضخامت قطعه چوبی را می‌توان یکی از مهم‌ترین پارامترهای هندسی مؤثر بر عملکرد مکانیکی اتصالات چوبی دانست. این نتیجه با یافته‌های [Li و همکاران \(۲۰۲۴\)](#) نیز همخوانی دارد که نشان دادند ابعاد هندسی اعضا و ویژگی‌های اتصال، توزیع تنش و سختی دورانی اتصالات کام و زبانه را به طور مستقیم تحت تأثیر قرار داده و ظرفیت

بهینه‌سازی ابعاد هندسی اتصالات کام و زبانه می‌تواند ظرفیت باربری اتصال را به‌طور معنی‌داری افزایش دهد. علاوه بر این، [Kartal و Zor](#) (۲۰۲۰) گزارش کردند که هندسه اتصال و نحوه درگیری اجزای متصل‌شونده از عوامل اصلی مؤثر بر سختی، مقاومت و انتقال نیرو در اتصالات چوبی هستند. بر این اساس، در طراحی سازه‌ها و محصولات چوبی، انتخاب نوع اتصال باید متناسب با ضخامت قطعات انجام شود تا بیشترین ظرفیت باربری و بهترین عملکرد مکانیکی حاصل گردد. افزون بر این، [Vlaović](#) و همکاران (۲۰۲۴) در مرور جامعی بر اتصالات میلمان تأکید کردند که عملکرد مکانیکی، دوام و قابلیت اطمینان اتصالات تنها زمانی بهینه خواهد بود که نوع اتصال، ویژگی‌های هندسی قطعات و شرایط بارگذاری به‌صورت هم‌زمان در طراحی مدنظر قرار گیرند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر نوع اتصال و ضخامت تخته بر نیروی گسیختگی اتصالات گوشه‌ای ساخته‌شده از چوب نراد با استفاده از چسب پلی‌وینیل استات مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، پنج نوع اتصال شامل قلیف، کام و زبانه، دوبل، نیم‌ونیم و دم‌چلچله در شش سطح ضخامت مختلف طراحی و آزمایش شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که نوع اتصال و ضخامت تخته، به همراه برهم‌کنش آن‌ها، تأثیر معنی‌داری بر نیروی گسیختگی اتصالات گوشه چوب نراد دارند. در میان اتصالات بررسی‌شده، اتصال کام‌وزبانه بیشترین نیروی گسیختگی را نشان داد و پس از آن به ترتیب اتصالات نیم‌ونیم، قلیف، دوبل و دم‌چلچله قرار گرفتند. این تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از اختلاف در هندسه اتصال، میزان سطح تماس مؤثر و نحوه انتقال تنش در ناحیه اتصال است. افزایش ضخامت تخته از ۱ تا ۴ سانتی‌متر موجب افزایش معنی‌دار نیروی گسیختگی در تمامی اتصالات شد که این موضوع به افزایش سطح مقطع مؤثر و کاهش تمرکز تنش نسبت داده می‌شود. با این حال، میزان اثر ضخامت در همه اتصالات یکسان نبود و نشان‌دهنده نقش هم‌زمان هندسه اتصال در رفتار مکانیکی است. همچنین

باربری آن‌ها را افزایش می‌دهد. نوع اتصال نیز تأثیر معنی‌داری بر نیروی گسیختگی اتصالات داشت. عملکرد بهتر اتصالات کام و زبانه و نیم‌ونیم نسبت به سایر اتصالات را می‌توان به هندسه مناسب اتصال، افزایش سطح تماس مؤثر و درگیری مکانیکی بیشتر بین قطعات نسبت داد. در این اتصالات، علاوه بر لایه چسب، بخشی از نیرو از طریق قفل‌شوندگی هندسی اجزای اتصال منتقل می‌شود که موجب کاهش تمرکز تنش و افزایش ظرفیت باربری اتصال می‌گردد. در مقابل، مقاومت کمتر اتصال دم‌چلچله نشان می‌دهد که در شرایط این پژوهش، هندسه این اتصال و نحوه توزیع تنش نتوانسته است عملکرد مطلوبی در برابر بارهای برشی ایجاد کند. نتایج این پژوهش با یافته‌های [Smardzewski](#) (۲۰۱۵) مطابقت دارد که طراحی هندسی اتصال را یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده عملکرد مکانیکی اتصالات چوبی معرفی کرد. [Atar](#) و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که اتصالات دارای سطح تماس بیشتر و درگیری مکانیکی مؤثرتر، مقاومت بالاتری در برابر بارهای وارده از خود نشان می‌دهند. در همین راستا، [Bas](#) و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان دادند که افزایش سطح تماس مؤثر و بهبود درگیری مکانیکی در اتصالات چوبی موجب افزایش ظرفیت تحمل بار و بهبود عملکرد مکانیکی اتصالات گوشه‌ای می‌شود. معنی‌دار بودن برهم‌کنش بین ضخامت تخته و نوع اتصال نشان داد که تأثیر افزایش ضخامت بر نیروی گسیختگی در تمامی اتصالات یکسان نیست و پاسخ هر نوع اتصال به تغییرات ضخامت به ویژگی‌های هندسی آن بستگی دارد. این موضوع بیانگر آن است که عملکرد مکانیکی اتصالات چوبی حاصل اثر هم‌زمان ضخامت قطعه و هندسه اتصال است. در اتصالاتی که سطح تماس بیشتری دارند و انتقال نیرو از طریق درگیری مکانیکی مؤثرتر انجام می‌شود، افزایش ضخامت تأثیر بیشتری بر بهبود نیروی گسیختگی داشته است. این یافته با نتایج [Hu و Guan](#) (۲۰۱۹) همخوانی دارد که نقش پارامترهای هندسی اتصال را در توزیع تنش و رفتار مکانیکی اتصالات چوبی مورد تأکید قرار دادند. همچنین [Hu و Chen](#) (۲۰۲۱) نشان دادند که

حاصل از این مطالعه می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای انتخاب و بهینه‌سازی طراحی اتصالات چوبی در کاربردهای مشابه، به‌ویژه در محصولات چوبی و صنایع مبلمان، مورد استفاده قرار گیرد.

سیاسگزاری

در پایان بر خود لازم می‌دانیم از دانشگاه شهید بهشتی به دلیل حمایت مالی برای انجام هرچه بهتر این پژوهش، صمیمانه تشکر و قدردانی نماییم.

اثر متقابل نوع اتصال و ضخامت بیانگر آن است که عملکرد نهایی اتصالات به‌صورت مستقل از یکدیگر قابل تفسیر نیست و ترکیب این دو عامل تعیین‌کننده نیروی گسیختگی است. به‌طور کلی، اتصالاتی که دارای درگیری مکانیکی مؤثرتر و سطح هندسی تماس بیشتری هستند، در ضخامت‌های بالاتر عملکرد بهتری از خود نشان دادند. نتایج آزمون‌های آماری نیز وجود اختلاف معنی‌دار بین تیمارهای مختلف را تأیید کرد. در مجموع، این پژوهش نشان داد که انتخاب مناسب نوع اتصال و ضخامت تخته چوبی می‌تواند نقش مهمی در تغییر نیروی گسیختگی اتصالات گوشه‌ای داشته باشد. یافته‌های

References

- Acar, M., Balikci, E., Kuskun, T., Kasal, A. and Ziya Erdil, Y., 2023. Shear force capacities of H-type furniture joints constructed of various heat-treated wood species. *Drvna Industrija*, 74: 33–42. <https://doi.org/10.5552/drvind.2023.0010>
- Atar, M., Gode, F., Kucuktuvek, M., Akan, A. E., Ormecioglu, H. T. and Keskin, H., 2022. Tensile performance of traditional and modern corner joints in wooden structures. *Drvna Industrija*, 73: 69–80. <https://doi.org/10.5552/drvind.2022.2106>
- ASTM D905-08(2021). Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading. ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/d0905-08e01>
- Bas, S., Denes, L. and Csiha, C., 2024. Mechanical properties of furniture joints using loose tenons and connectors. *Forests*, 15(2): 343–357.
- Boadu, K. B. and Antwi-Boasiako, C., 2017. Assessment of the bending. *Wood Science and Technology*, 56: 1175–1190.
- Chen, Y. and Zhu, J., 2019. Study on bending characteristics of fast growing eucalyptus bookcase shelves by using Burgers model. *Wood Research*, 64: 137–144.
- Derikvand, M. and Eckelman, C. A., 2015. Bending moment capacity of L-shaped mitred frame joints constructed of MDF and particleboard. *BioResources*, 10: 5677–5690. <https://doi.org/10.15376/biores.10.3.5677-5690>
- Darikvand, M., Ebrahimi, G., and A Eckelman, C., 2012. Effect of shoulder thickness on bending moment capacity of mortise and loose tenon joint. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 4(1): 65–75.
- Derikvand, M., and Ebrahimi, G., 2014a. Finite element analysis of stress and strain distributions in mortise and loose tenon furniture joints. *Journal of Forestry Research*, 25(3): 677–681. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0507-5>
- Derikvand, M., and Ebrahimi, G., 2014b. Strength performance of mortise and loose-tenon furniture joints under uniaxial bending moment. *Journal of forestry research*, 25(2): 483–486. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0479-5>
- Derikvand, M., Ebrahimi, G., and Eckelman, C.A., 2014. Bending moment capacity of mortise and loose-tenon joints. *Wood and Fiber Science*, 46(2): 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0479-5>
- Derikvand, M., Smardzewski, J., Ebrahimi, G., Dalvand, M., & Maleki, S., 2013. Withdrawal force capacity of mortise and loose tenon T-type furniture joints. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 37(3), 377–384. <https://doi.org/10.3906/tar-1204-8>
- Eckelman, C.A., 2003. Textbook of Product Engineering and Strength Design of Furniture. West Lafayette, Indiana: Purdue University Press.
- He, S., Zhao, X., Wang, E. Q., Chen, G. S., Chen, P. Y. and Hu, L., 2023. Engineered wood: sustainable technologies and applications. *Annual Review of Materials Research*, 53: 195–223. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-010622-105440>
- Hu, W. G. and Chen, B. R., 2021. A methodology for optimizing tenon geometry dimensions of mortise-and-tenon joint wood products. *Forests*, 12: 478. <https://doi.org/10.3390/f12040478>
- Hu, W. G. and Guan, H. Y., 2019. A finite element model of semi-rigid mortise-and-tenon joint considering glue line and friction coefficient. *Journal of Wood Science*, 65: 14. <https://doi.org/>

[10.1186/s10086-019-1794-4](https://doi.org/10.1186/s10086-019-1794-4)

- Hu, W. G., Luo, M., Hao, M., Tang, B. and Wan, C., 2023. Study on the effects of selected factors on the diagonal tensile strength of oblique corner furniture joints constructed by wood dowel. *Forests*, 14: 1149. <https://doi.org/10.3390/f14061149>
- Imirzi, H. O., Ozkaya, K. and Efe, H., 2016. Determination of the strength of L-type corner joints obtained from wood-based board materials using different joining techniques. *Forest Products Journal*, 66: 214–224. <https://doi.org/10.13073/fpj-d-14-00081>
- Li, Z., Kitamori, A., Zhang, X., Wu, Y., Zhang, L. and Xue, J., 2024. Analytical investigation on the rotational behavior of dovetail mortise–tenon joints between beams and columns in traditional Chinese timber frames. *Journal of Wood Science*, 70: 50. <https://doi.org/10.1186/s10086-024-02162-0>
- Liu, K., Zhang, H., Du, Y., Hu, X., Wang, L., Li, L., Liu, H. and Luo, B., 2024. Fatigue and damage evolution in wood T-shaped mortise and tenon joints. *Scientific Reports*, 14: 21515. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72874-2>
- Smardzewski, J., 2015. *Furniture Design*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.
- Vlaović, Z., Gržan, T., Župčić, I., Domljan, D. and Mihulja, G., 2024. Strength, durability, and aesthetics of corner joints and edge banding in furniture design: a review. *Applied Sciences*, 14: 10285. <https://doi.org/10.20944/preprints202410.0577.v1>
- Yu, S., Pan, W., Su, H. and Ye, L., 2024. Experiment and theoretical study on mortise-tenon joints reinforced by support-type viscoelastic damper. *Journal of Building Engineering*, 87: 109049. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109049>
- Zor, M. and Kartal, M. E., 2020. Finite element modeling of fiber reinforced polymer-based wood composites used in furniture construction considering semi-rigid connections. *Drvna Industrija*, 71: 339–345. <https://doi.org/10.5552/drind.2020.1916>