



Investigating Effective Parameters on the Withdrawal Resistance of Wooden Dowel Joints Made by Wood Welding Technology

Pantea Omrani ^{1*}¹ Associate Professor, Wood Science and Technology Department, The Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Tehran, Iran.*Corresponding Author's Email: pantea.omrani@gmail.com (Pantea Omrani)**Paper History:**

Received: 2026-06-05

Revised: 2026-07-04

Accepted: 2026-08-16

Keywords:Dowel Joint,
Polyvinyl Acetate,
Dowel Withdrawal Resistance,
Wood Welding,
Wooden Structures

Abstract One of the main parts of any wooden structure is its joints, which must meet the requirements for bearing applied loads. Wood welding is a new technology that has made it possible to produce wood joints with considerable strength without the use of glue. Therefore, this research aims to investigate and compare the withdrawal resistance of dowel wood joints made by the welding method and the method using glue. In this research, the species of joint member (Hornbeam and Fir), type of dowel joint (welded joint and joint with polyvinyl acetate glue), dowel diameter (10 and 12 mm), and dowel surface shape (smooth and grooved) were considered as variables. After preparing the specimens, the dowel withdrawal resistance test was performed. The results of the analysis of variance showed that the independent effects of joint member, joint type, surface shape, and dowel diameter on dowel withdrawal resistance were significant at the 1% level. The results showed that, for all studied variables, the withdrawal resistance of welded dowel joints was greater than that of joints made with polyvinyl acetate glue, indicating the superiority of wood welding technology over the use of this glue.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2026.585118.1367>URL: https://www.jamt.ir/article_251344.html

1. INTRODUCTION

Conventional joints used in furniture and building structures, including mortise-and-tenon connections, round dowels, metal fasteners, and adhesive-based joints, remain widely applied; however, they suffer from several drawbacks. These include complicated manufacturing procedures, considerable waste of wood materials, susceptibility of metals to corrosion, and relatively low production efficiency (Wang & Lee, 2018; Barčík et al., 2014; Chen et al., 2023; Li et al., 2023a; Zhang et al., 2023; Golovin et al., 2023). Using dowel wood joints and polyvinyl acetate (PVA) glue is one of the common joining methods in the construction of wooden furniture and structures; however, most common adhesives used in making joints contain solvents that may emit toxic fumes during curing or throughout the service life of wooden furniture and structures. In addition, their long curing time increases production time and cost, they have low moisture resistance, and their supply cost is high.

In woodworking applications, adhesives are predominantly synthetic and derived from petrochemical resources. Besides their typically extended curing periods, these adhesives pose risks to human health and contribute to environmental pollution (Belleville et al., 2013a; Belleville et al., 2013b; Sotayo et al., 2020). To address these limitations, researchers and industry have increasingly focused on wood welding technology, which has emerged as a sustainable

and highly efficient joining method (Pizzi et al., 2011; Yin et al., 2022; Zhang et al., 2018; Zhu et al., 2017; Vaziri & Sandberg, 2021).

Wood welding technology involves the softening process caused by the heat generated due to friction between two pieces of wood, the melting of some wood components (mainly lignin and, to some extent, hemicellulose), and the formation of an internal phase between the surfaces of the two joined wood pieces (Gfeller, et al., 2003). These molten materials form a strong and solid bond line after cooling.

The rotational welding technique for wooden dowels offers several notable benefits, including strong joint performance, rapid production cycles, and environmentally friendly characteristics, making it particularly suitable for connecting components in furniture and other wood-based products (Li et al., 2023b).

At present, wood welding as a joining method has reached a mature level of development, with successful implementation not only in furniture manufacturing but also in load-bearing and structural applications (Vaziri et al., 2021a; Vaziri et al., 2021b). Since this technology is still under development, this research investigated and compared the effectiveness of selected parameters on the withdrawal resistance of dowel wood joints made using wood welding technology.

2. MATERIALS AND METHODS

Please cite this article as: Omrani, P. (2026). Investigating Effective Parameters on the Withdrawal Resistance of Wooden Dowel Joints Made by Wood Welding Technology, *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 15, No. 2, 66-80. <https://doi.org/10.30501/jamt.2026.585118.1367>.



In this study, the joint member pieces were selected from Hornbeam (*Carpinus betulus*) with a density of 0.7 g/cm³ and Fir (*Abies alba*) with a density of 0.4 g/cm³. The wooden dowels used were also prepared from Hornbeam with diameters of 1 and 1.2 cm, smooth and grooved surfaces, and a moisture content of 2%. The adhesive used was polyvinyl acetate with the following specifications: white color, density of 1.08 g/cm³, viscosity of 30,000–40,000 cP, solid content of approximately 60–65%, pH of 5, and gelation time of approximately 20–30 min (at 20 °C).

To prepare the test specimens, in both welded and glued joints, the wood pieces were first cut to dimensions of 2.5 × 5 × 5 cm, and the wooden dowels were cut to a length of 10 cm. Then, pre-drilling was carried out at the center of the wood pieces to a depth of 2.5 cm, proportional to the diameter of the wooden dowels. In the rotary dowel welding method, a drill operating at 3000 rpm was used, whereas in the glue method, wooden dowels impregnated with polyvinyl acetate glue were used. The dowel withdrawal resistance test was performed according to ASTM D1037 using a tensile testing machine (STT-5T) at a loading speed of 2 mm/min.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The results showed that the withdrawal resistance of welded dowel joints with Hornbeam joint members was higher than that of joints with Fir joint members. Wood species is one of the parameters that has a significant effect on the strength of rotationally welded wood dowels (Pizzi et al., 2004). Since wood density affects its mechanical properties, it can be stated that Hornbeam performed better than Fir due to its higher density. Furthermore, higher density means more wood material and, consequently, a larger bonding surface, which can increase the withdrawal resistance of the joints. The findings of (Belleville et al., 2016) also demonstrated the importance of density in the welding process.

The results of the dowel withdrawal resistance tests for both Hornbeam and Fir showed that welded joints had greater strength than joints made with PVA glue. Other studies have also shown that welded dowel joints have better strength than joints made with PVA glue (Pizzi et al., 2006; Omrani et al., 2018; Omrani, 2020). In fact, the melting of wood cell wall materials during welding leads to an increase in material volume density at the joint surface and the formation of new bonds between the dowel fibers and the joint member. Furthermore, Zhong et al. (Zhong et al., 2024), through microscopic examination of rotationally welded dowel joints, reported that changes in chemical composition at the interface led to a more structured crystalline bond and enhanced connection strength due to fiber entanglement and interlocking.

The results showed that larger-diameter dowels resulted in greater joint strength. Increasing the dowel diameter effectively increases the dowel surface area, and it has been reported that the tensile strength of dowel joints increases with increasing adhesion contact area (Eckelman, 2002). With the increase in welding surface area, the amount of lignin acting as a binder between the joint member and the wooden dowel, as well as the

number of bonds formed between the joint components, increases, resulting in greater joint strength.

The results showed that joints welded with grooved dowels produced stronger joints than those welded with smooth dowels. One reason is that the grooves on the dowel surface increase the welding surface area and, consequently, mechanical strength. In addition, dowels with grooved surfaces, due to the helical arrangement of surface fibers, are more prone to greater and more effective entanglement of the dowel fibers with the surface fibers of the joint member during the welding process. Although the presence of generated water vapor can influence bond formation between fibers, excessive water vapor and its entrapment in the welding zone during the welding process can negatively affect the continuation of welding (Omrani et al., 2018).

4. CONCLUSION

In this study, the holding power of dowel wood joints made by welding and the conventional method using PVA glue was investigated and compared. The results showed that, in both types of joints, the withdrawal resistance of dowel wood joints made with Hornbeam joint members was higher than that of joints made with Fir joint members. The withdrawal resistance of welded dowel joints was greater than that of joints made with polyvinyl acetate glue, indicating the superiority of wood welding technology over the use of this adhesive. Increasing the dowel diameter increased the withdrawal resistance of the joints. The grooved dowel surface produced greater withdrawal resistance than the smooth surface. Furthermore, the highest withdrawal resistance was obtained using a grooved dowel with a diameter of 12 mm welded into a Hornbeam joint member, whereas the lowest was obtained using a smooth dowel with a diameter of 10 mm bonded with glue in a Fir joint member. Therefore, it can be concluded that the investigated parameters have a significant effect on the withdrawal resistance of welded dowel joints. Along with other advantages of wood welding, these findings support its application in the wood and furniture industry, wooden structures, and the construction industry. These advantages include eliminating the curing time required for PVA glue, faster bonding, significantly greater joint strength compared with PVA-bonded joints, cost-effectiveness, and environmental friendliness.

REFERENCES

1. ASTM International. (1999). *ASTM D 1037: Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials*, United States: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1037-99>
2. Barčík, Š., Gašparík, M., Horejš, P. (2014). Influence of thermal modification on nail withdrawal strength of spruce wood. *Bioresources*, 9(4), 5963–5975. <https://doi.org/10.15376/biores.9.4.5963-5975>
3. Belleville, B., Stevanovic, T., Cloutier, A., Pizzi, A., Salenikovich, A. (2013a). Production and properties of wood-welded panels made from two canadian hardwoods. *Wood Science and Technology*, 47(5), 1005–1018. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0554-7>
4. Belleville, B., Stevanovic, T., Pizzi, A., Cloutier, A., Blanchet, P. (2013b). Determination of optimal wood-dowel welding parameters for two North American hardwood species. *Journal*

- of Adhesion Science and Technology*, 27(5-6), 566–576. <https://doi.org/10.1080/01694243.2012.687596>
5. Belleville, B., Ozarska, B., Pizzi, A. (2016). Assessing the potential of wood welding for Australian eucalypts and tropical species. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74, 5753–5757. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1067-5>
6. Chen, G., Wang, C., Wu, J.; Zhang, E., Wu, D. (2023). Mechanical performance of nailed connections between laminated bamboo lumber and oriented strand board. *Journal of Forestry Engineering*, 8(2), 75–81. <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.202207015>
7. Eckelman, C.A., Erdil, Y.Z., Zhang, j. (2002). Withdrawal and Bending Strength of Dowel Joints Constructed of Plywood and Oriented Strand board, *Forest Products Journal*, 52 (9), 66-74. <https://www.researchgate.net/publication/283355331>
8. Gfeller, B., Zanetti, M., Properzi, M., Pizzi, A., Pichelin, F., Lehmann, M., Delmotte, L. (2003). Wood bonding by vibrational welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 17(11), 1573-1589. <https://doi.org/10.1163/156856103769207419>
9. Golovin, Y.I., Gusev, A.A., Golovin, D.Y., Matveev, S.M., Tyurin, A.I., Samodurov, A.A., Korenkov, V.V., Vasyukova, I.A. and Yunack, M.A. (2023). Multiscale wood micromechanics and size effects study via nanoindentation. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 8(3), 246–264. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.04.002>
10. Li, P., Yang, C., Jiang, Z., Jin, Y., Wu, W. (2023a). Lignocellulose pretreatment by deep eutectic solvents and related technologies: A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 8(1), 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.11.004>
11. Li S, He J, Wu J, Yang Y, Sun Q, Lu X, Zhang, Z. (2023b). Study on water resistance improvement of wood dowel rotation welding joints. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 43(4), 1–18. <https://doi.org/10.1080/02773813.2023.2204858>
12. Omrani, P. (2020). Investigation of performance and fracture monitoring of dowel-welded joint by micrographs of scanning electron microscopy. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 10(4), 589-603. (In Persian). http://www.ijwp.ir/article_35976.html?lang=en
13. Omrani, P., Maryami, H., Eisapour, R. (2018). Investigating the effect of dowel diameter and surface in softwood joints made by welding and glue. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 32(4), 598-605. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/IJWPR.2017.115561.1439>
14. Pizzi, A., Despres, A., Mansouri, H.R., Leban, J.M., Rigolet, S. (2006). Wood joints by through-dowel rotation welding: microstructure, ¹³C-NMR and water resistance. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20(5), 427–436. <https://doi.org/10.1163/156856106777144327>
15. Pizzi, A., Leban, J.M., Kanazawa, F., Properzi, M., Pichelin, F. (2004). Wood dowel bonding by high-speed rotation welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18(11), 1263–1278. <https://doi.org/10.1163/016942410X501025>
16. Pizzi, A., Mansouri, H.R., Leban, J.M., Delmotte, L., Pichelin, F. (2011). Enhancing the exterior performance of wood joined by linear and rotational welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(19), 2717–2730. <https://doi.org/10.1163/016942411X556088>
17. Sotayo, A., Bradley, D., Bather, M., Sareh, P., Oudjene, M., El-Houjeiry, I., Harte, A.M., Mehra, S., O'Ceallaigh, C., Haller, P. and Namari, S. (2020). Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications, *Developments in the Built Environment*, 1, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2019.100004>
18. Vaziri, M., Sandberg, D. (2021). Welding of thermally modified wood and thermal modification of the welded wood: Effects on the shear strength under climatic conditions. *Bioresources*, 16(2), 3224–3234. <https://doi.org/10.15376/biores.16.2.3224-3234>
19. Vaziri, M., Karlsson, O., Abrahamsson, L., Lin, C. F., Sandberg, D. (2021a). Wettability of welded wood-joints investigated by the wilhelmy method: Part 1. Determination of apparent contact angles, swelling, and water sorption. *Holzforschung*, 75(1), 65–74. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0308>
20. Vaziri, M., Karlsson, O., Abrahamsson, L., Moghaddam, M. S., Sandberg, D. (2021b). Wettability of welded wood joints investigated by the wilhelmy method: Part 2. Effect of wollastonite additive. *Holzforschung*, 75(1), 79–86. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0310>
21. Wang, Y., Lee, S.H. (2018). A theoretical model developed for predicting nail withdrawal load from wood by mechanics. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76, 973–978. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1227-2>
22. Yin, W., Lu, H., Zheng, Y., Tian, Y. (2022). Tribological properties of the rotary friction welding of wood. *Tribology International*, 167, 107396. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107396>
23. Zhang, J., Gao, Y., Zhang, J., Zhu, X. (2018). Influence of pretreated wood dowel with CuCl₂ on temperature distribution of wood dowel rotation welding. *Journal of Wood Science*, 64, 209–219. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1693-5>
24. Zhang, Z., Tang, S., Cui, Z. (2023). Experimental study on the pull-through performance of self-tapping screws in laminated bamboo. *Journal of Forestry Engineering*, 8(2), 40–45. <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.202205027>
25. Zhong, X., Li, D., Xu, X., Li, Q., Yu, D., Wu, Z., Liang, J., Peng, J., Gu, W., Zhao, X., Yin, S. (2024). Effects of Dowel Rotation Welding Conditions on Connection Performance for Chinese Fir Dimension Lumber. *Forests*, 15(6), 1038. <https://doi.org/10.3390/f15061038>
26. Zhu, X., Gao, Y., Yi, S., Ni, C., Zhang, J., Luo, X. (2017). Mechanics and pyrolysis analyses of rotation welding with pretreated wood dowels. *Journal of Wood Science*, 63, 216–224. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1617-4>



مقاله‌ی کامل پژوهشی

بررسی پارامترهای مؤثر در توان نگهداری اتصال‌های دوبل چوبی ساخته‌شده با فناوری

جوشکاری چوب

پانته‌آ عمرانی*

^۱ دانشیار، گروه صنایع چوب، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

تاریخچه‌ی مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۳

پذیرش قطعی: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵

کلیدواژه‌ها:

اتصال دوبل،

پلی‌وینیل استات،

توان نگهداری دوبل،

جوشکاری چوب،

سازه‌های چوبی

چکیده یکی از بخش‌های اصلی هر سازه‌ی چوبی اتصال‌های آن است که باید شرایط تحمل بارهای وارده را داشته باشد. جوشکاری چوب فناوری نوینی است که امکان ساخت اتصال‌های چوب با مقاومت قابل توجه و بدون استفاده از چسب را فراهم کرده است. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر بررسی و مقایسه‌ی توان نگهداری اتصال‌های دوبل چوبی ساخته‌شده به روش جوشکاری و روش استفاده از چسب است. در این پژوهش، نوع گونه‌ی عضو اتصال (ممرز و نراد)، نوع اتصال دوبل (اتصال جوشکاری‌شده و اتصال با چسب پلی‌وینیل استات)، قطر دوبل (۱۰ و ۱۲ میلی‌متر) و شکل سطح دوبل (صاف و شیاردار) به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شدند. پس از ساخت نمونه‌ها، آزمون توان نگهداری دوبل انجام شد. نتایج تجزیه‌ی واریانس نشان داد که اثر مستقل عضو اتصال، نوع اتصال، سطح و قطر دوبل بر توان نگهداری دوبل در سطح یک درصد معنی‌دار است. نتایج نشان دادند، در همه‌ی متغیرهای مورد بررسی، توان نگهداری اتصال‌های دوبل جوشکاری‌شده بیشتر از اتصال‌های ساخته‌شده با چسب پلی‌وینیل استات بود که این امر نشان‌دهنده‌ی برتری فناوری جوشکاری چوب بر استفاده از این چسب است.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2026.585118.1367>

URL: https://www.jamt.ir/article_251344.html

۱- مقدمه

نیازهای گیاه با هم کار می‌کنند (Rowell, 2019). خواص چوب از اجزای جدار سلول یا اعضای ساختمانی سلول چوب (سلولز، همی‌سلولز و لیگنین) نشأت می‌گیرد که درصد این ترکیبات آلی تشکیل‌دهنده‌ی ساختمان چوب، در سوزنی‌برگان و پهن‌برگان متفاوت است. انواع گونه‌های چوبی دارای ساختار و ترکیبات شیمیایی متفاوت (حتی در یک گونه‌ی چوبی) هستند. همچنین، با توجه به خاصیت ناهمسانگردی آن، هر گونه‌ی چوبی در جهات مختلف (عرضی، شعاعی و مماسی) دارای خواص

چوب ماده‌ی مهندسی بسیار مهم و یک ماده‌ی مرکب پلیمری طبیعی است (Van Valk, 2015). چوب، از نظر چوب‌شناسی، ماده‌ای است آلی، جامد، متخلخل، ناهمگن، ناهمسانگرد^۱ و با خاصیت جذب و دفع رطوبت که حاصل فعالیت گیاهان چوب‌ده است و با سایر مواد اولیه، که همگن و همسانگرد هستند، بسیار متفاوت است. (Omrani, 2017). در سطح بنیادی، چوب یک ساختار بیولوژیک پیچیده و خود ترکیبی از مواد شیمیایی و انواع سلول‌ها است که برای رفع

۱. واژگان ناهمسانگرد (Anisotropic) و همسانگرد (Isotropic) از

اصطلاحات تخصصی رشته‌ی مهندسی صنایع چوب است که به‌ترتیب از معادل‌های «هرسونایکسان» و «هرسونایکسان» نیز برای آن استفاده می‌شود.

*عهده‌دار مکاتبات: پانته‌آ عمرانی

نشانی: ایران، تهران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده‌ی مهندسی عمران

پیام‌نگار: pantea.omrani@gmail.com

اتصالات دابل گرد، اتصالات فلزی و اتصالات چسبی، درحالی‌که رایج هستند، با چالش‌هایی مانند فرایندهای تولید پیچیده، اتلاف قابل توجه چوب، خوردگی فلز و راندمان پایین مواجه هستند (Wang & Lee, 2018; Barcik et al., 2014; Chen et al., 2023; Li et al., 2023a; Zhang et al., 2023; Golovin et al., 2023). استفاده از اتصال دابل چوبی (میخ یا پین چوبی) و چسب پلی‌وینیل استات (PVA)^۱ یکی از روش‌های اتصال مرسوم در ساخت انواع مبلمان و سازه‌های چوبی است، اما اکثر چسب‌های مرسوم مصرفی دارای معایبی مانند انتشار بخارهای سمی حاصل از حلال‌ها، زمان سخت شدن زیاد (که باعث افزایش زمان و هزینه تولید می‌شود)، پایداری کم در برابر رطوبت و هزینهی تأمین بالا هستند.

به عبارتی، چسب‌های مصنوعی رایج منشأ پتروشیمی دارند و، علاوه بر زمان‌های عمل آمدن به نسبت طولانی، از منابع مشکلات بهداشتی و آلودگی محیط‌زیست به شمار می‌روند (Belleville et al., 2013a; Belleville et al., 2013b; Sotayo et al., 2020). به‌منظور حل این مشکلات، «فناوری جوشکاری چوب»^۲ به‌عنوان فناوری اتصال سازگار با محیط‌زیست و کارآمد نوظهور، توجه محققان و صنعت را به خود جلب کرده است (Pizzi et al., 2011; Yin et al., 2022; Zhang et al., 2018; Zhu et al., 2017; Vaziri & Sandberg, 2021). اولین بار سات‌آف و کوتسر (Suthoff & Kutzer, 1997) جوشکاری قطعات چوبی با یکدیگر بر اثر اصطکاک چرخشی دابل‌های چوبی را بررسی، ثبت و مطرح کردند. همچنین، اولین بار پیزی و همکاران (Pizzi et al., 2004) تحقیقات علمی جامعی با موضوع جوشکاری چرخشی دابل چوبی بدون استفاده از چسب انجام دادند که این موضوع از آن‌پس بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. فناوری نوین جوشکاری چوب شامل فرایند نرم شدن ناشی از دمای ایجادشده به دلیل اصطکاک بین دو قطعه‌ی چوبی و ذوب شدن برخی از اجزای چوب (عمدتاً لیگنین و تا حدی همی سلولز) و تشکیل فازی داخلی بین سطوح دو قطعه‌ی چوب به‌هم متصل‌شده می‌شود (Gfeller, et al., 2003). این مواد ذوب‌شده، پس از سرد شدن، یک خط اتصال سخت و محکم را تشکیل می‌دهند.

فیزیکی و مکانیکی متعدد و متفاوتی است (Omrani, 2017). دانسته یا جرم مخصوص از خواص مهم چوب است [که در خواص فیزیکی و مکانیکی آن مؤثر است]. مقاومت به خستگی چوب عالی است و مشخصه‌ی نسبت استحکام به جرم مخصوص آن بسیار رضایت‌بخش است. رطوبت در خواص چوب و کاربرد آن در تولیدات چوبی بسیار تأثیرگذار است. با تغییر رطوبت چوب [جذب و دفع]، ابعاد آن تغییر می‌کند (Akbari Jouchi et al., 2021; Astle et al., 2013). برای پایداری ابعاد و استفاده‌ی مناسب از چوب، بسته به کاربرد آن، گاهی به تمهیدات حفاظتی نیاز داریم. چوب به‌عنوان مصالح مهندسی پایدار و سبز، مفید، مؤثر و بادوام در گستره‌ی وسیعی مانند لوازم خانگی، کشتی‌سازی، ملخ هواپیما، پره‌ی توربین بادی و کامپوزیت‌های پیشرفته کاربرد دارد (Akbari Jouchi et al., 2021; Ross, 2010). به عبارتی، ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی چوب به ساخت محصولات متنوع و کاربردهای وسیعی در صنایع چوب و مبلمان، سازه‌های چوبی و نیز دیگر صنایع مانند ساختمان، هوافضا، حمل‌ونقل و بسته‌بندی به‌عنوان ماده‌ی مهندسی، تزئینی و غیره منجر شده است. از این رو، با توجه به ویژگی‌های بسیار منحصر به فرد و متفاوت این ماده‌ی مهندسی مهم در مقایسه با سایر مواد و گستره‌ی کاربرد آن، لازم است، علاوه بر محققان صنایع چوب، محققان دیگر صنایع نیز شناخت و مطالعه‌ی بیشتری درباره‌ی این ماده و محصولات مشتق‌شده از آن داشته باشند و به تحقیقات بین‌رشته‌ای بیشتری درباره‌ی آن بپردازند. بر اثر این تحقیقات می‌توان مواد مهندسی‌شده‌ی جدیدی را تولید کرد و از کاربردهای گسترده‌ی آن‌ها در بخش‌های گوناگون زندگی بشر استفاده کرد.

اما در مبلمان و سازه‌های چوبی، کلیه‌ی قطعات به طرق مختلف به یکدیگر وصل شده‌اند و اتصال‌ها از بخش‌های اصلی هر سازه‌ی چوبی به شمار می‌روند. اتصال‌ها بار وارده را دائماً تحمل می‌کنند و بنیان سازه را به وجود می‌آورند. شواهد نشان می‌دهند که اتصال‌ها ایمنی سازه و زیبایی آن را تضمین می‌کنند. از آنجایی‌که حرکت سازه‌های چوبی به سمت خرابی از نقاط ضعف آن‌ها نشئت می‌گیرد و این نقاط ضعف اتصال‌ها هستند، توجه به طراحی اتصال‌ها اهمیت می‌یابد (Eckelman, 2003). اتصالات مرسوم مبلمان و [سازه‌های چوبی] مانند کام و زبانه،

اگرچه در ادبیات بین‌المللی، اصطلاح جوشکاری چوب تقریباً پذیرفته شده است، از دیدگاه مهندسی مواد، این فرایند شباهت بیشتری به اتصال‌های اصطکاکی حالت جامد دارد تا جوشکاری ذوبی متداول فلزات؛ زیرا تشکیل اتصال عمدتاً ناشی از نرم شدن حرارتی لیگنین و درهم‌تنیدگی الیاف چوبی است. فرایندهای بازیافت یا سوزاندن محصولات جوشکاری‌شده هیچ ترکیبات سمی‌ای آزاد نمی‌کنند و خطری برای سلامت انسان ندارند (Stamm et al., 2005). عمرانی و همکاران (Omran et al., 2008b) نیز با تجزیه و تحلیل مواد فرار و گازهای ناشی از دود جوشکاری چوب در چوب‌های راش و نوئل نشان دادند که جوشکاری چوب، فرایندی سالم و بی‌خطر برای انسان و محیط‌زیست است. براساس تحقیقات پیزی و همکاران (Pizzi et al., 2006) نیز اتصال‌های دو قطعه‌ای چوب با روش جوشکاری دوپل، بدون چسب و با سرعت بالا، مقاومت بیشتری از اتصال‌های با چسب PVA دارند. این برتری به‌ویژه در مقاومت کششی در حالت خشک و پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب سرد هم مشاهده شده است. همچنین، اتصال‌هایی که با روش جوشکاری چوب ساخته می‌شوند، حتی پس از ۲ ساعت جوشیدن در آب (Omran et al., 2007) و به‌مدت یک سال قرار گرفتن در معرض شرایط جوئی باز، همچنان مقاومت‌های مکانیکی مطلوبی از خود نشان می‌دهند (Omran et al., 2008a). جوشکاری چرخشی دوپل‌های چوبی دارای مزایای مقاومت پیوند بالا و سرعت پردازش سریع هستند و برای نقاط اتصال در مبلمان و فرآورده‌های چوبی مناسب‌اند (Li et al., 2023b). همچنین، با کاهش زمان ساخت اتصال از چندین ساعت به کمتر از یک دقیقه به کاهش زمان و هزینه‌ی تولید منجر می‌شود. ژونگ و همکاران (Zhong et al., 2024) فرایند جوشکاری چرخشی نراد چینی (*Keteleeria fortunei*) را بررسی کردند. نتایج نشان داد فناوری جوشکاری چرخشی می‌تواند به‌سرعت از طریق گرمای اصطکاک، بدون چسب‌های شیمیایی، به اتصالی قوی بین چوب دست یابد؛ این فناوری دارای مزایای عملیات ساده و راندمان تولید بالا است. بلویل و همکاران (Belleville et al., 2016) نیز به ارزیابی پتانسیل جوشکاری چوب برای گونه‌ی اکالیپتوس استرالیایی و گونه‌های گرمسیری پرداختند. گونه‌های انتخاب‌شده در این مطالعه عبارت بودند از *Eucalyptus saligna*, *Corymbia maculata*

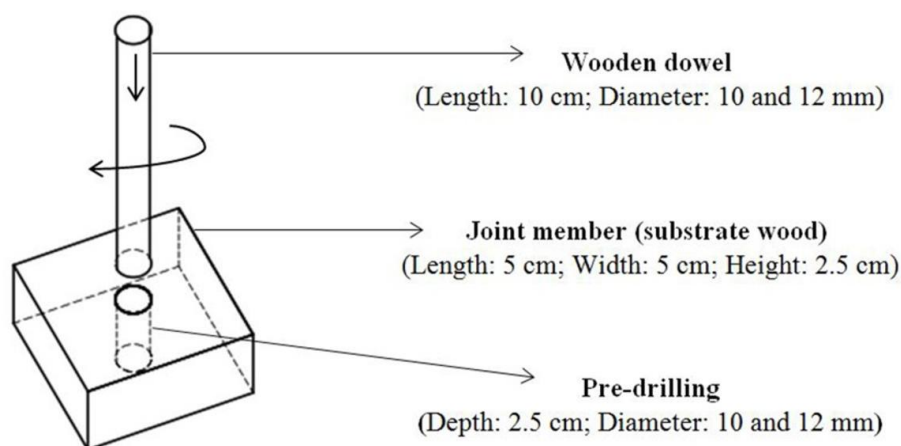
Ochroma و *Tectona grandis*, *Eucalyptus pilularis* *pyramidale* این گونه‌ها دارای جرم مخصوص هوا خشک به‌ترتیب ۹۶۵، ۷۸۴، ۹۲۵، ۵۹۸ و ۱۳۶ کیلوگرم در مترمکعب بودند. دوپل‌های چوبی صاف نیز از همان گونه‌های فوق با قطر ۹/۴۵ میلی‌متر تهیه شدند. نتایج نشان داد جوشکاری دوپل چوب در اکثر گونه‌ها به استثنای *Ochroma pyramidale* به‌خوبی انجام می‌شود و امکان‌پذیر است. به عبارتی، نتایج نشان دادند که جرم مخصوص در فرایند جوشکاری عامل بسیار مهمی است. عمرانی و همکاران (Omran et al., 2018) نیز در پژوهشی تأثیر قطر و سطح دوپل بر مقاومت کششی اتصال‌های ساخته‌شده با گونه‌ی نراد و دوپل چوبی ممرز به دو روش جوشکاری و اتصال با چسب پلی‌وینیل استات را بررسی کردند. بررسی داده‌های حاصل از آزمون مقاومت کششی نشان داد که پارامترهای قطر و نوع سطح دوپل بر مقاومت کششی اتصال‌ها اثر معنی‌داری در هر دو روش ساخت اتصال‌ها داشته و همچنین قطر بیشتر و سطح شیاردار دوپل مقاومت کششی بیشتری از دوپل با قطر کمتر و سطح صاف داشته است. همچنین، در مطالعه‌ای که عمرانی (Omran, 2020) انجام داد، عملکرد و نحوه‌ی شکست اتصال دوپل چوبی جوشکاری‌شده با استفاده از ریزنگارهای میکروسکوپ الکترونی روشی بررسی شد. نتایج نشان داد که شکست در محل اتصال رخ نداده، بلکه ناحیه‌ی جوشکاری‌شده مقاومت بیشتری از اعضای چوبی داشته و در برابر بارگذاری کششی رفتار مقاوم‌تری از خود نشان داده است. این یافته‌ها بیانگر آن است که روش جوشکاری چوب می‌تواند جایگزین مناسبی برای چسب‌های متداول در ساخت اتصالات چوبی باشد. در تحقیقی دیگر، مقاومت اتصال‌های کام و زبانه و دوپل در چوب گونه‌ی *Tectona grandis*، که با استفاده از چسب PVA و به دو شکل L و T ساخته شده بودند، نشان داد اگر عامل‌هایی مانند چسب، نوع اتصال و گونه‌ی چوبی ثابت باشند، مقاومت اتصال ساخته‌شده متناسب با طول نفوذ تغییر خواهد کرد (Vetchakam, 1989).

تا به امروز، روش فنی اتصال جوشکاری چوب نه‌تنها در صنعت مبلمان، بلکه در کاربردهای سازه‌ای به سطح فناورانه خوبی رسیده است (Vaziri et al., 2021a; Vaziri et al., 2021b)؛ اما از آنجایی‌که فناوری جوشکاری چوب نوین و هنوز هم در مرحله‌ی توسعه است، در این پژوهش، توان نگه‌داری

چوب مصرفی از نوع پلی‌وینیل استات و از شرکت شیمیایی چسب پارس دارای مشخصات رنگ سفید، جرم مخصوص ۱/۰۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، گرانیوی ۳۰۰۰۰-۴۰۰۰۰ سانتی‌پوآز، مواد جامد حدود ۶۰-۶۵ درصد، pH برابر ۵ و زمان ژله‌ای شدن حدود ۲۰-۳۰ دقیقه (در ۲۰ درجه‌ی سلسیوس) تهیه و استفاده شد.

۲-۲- روش ساخت نمونه‌های آزمونی

برای این کار، در هر دو نوع اتصال جوشکاری و اتصال با چسب، ابتدا چوب‌ها به ابعاد ۵×۵×۲/۵ سانتی‌متر و دابل‌های چوبی به طول ۱۰ سانتی‌متر برش داده شدند. پس‌از آن، در مرکز چوب‌های بریده‌شده، متناسب با قطر دابل‌های چوبی و به عمق ۲/۵ سانتی‌متر پیش‌سوراخ‌کاری انجام شد. سپس، نمونه‌های آزمونی توان نگهداری دابل، در هر دو نوع اتصال، از یک دابل چوبی و یک قطعه عضو اتصال ساخته شدند (شکل ۱).



شکل ۱. نمونه‌ی آزمونی توان نگهداری دابل چوبی (راست: شماتیک و دابل صاف؛ چپ: اتصال جوشکاری‌شده با دابل شیاردار)

گرفته شد. در هیچ‌کدام از روش‌های اتصال، از گیره‌ی دستی برای اعمال فشار استفاده نشد. پس از ساخت نمونه‌های آزمونی، نمونه‌ها به مدت ۱۵ روز با شرایط دمای 20 ± 2 درجه‌ی سلسیوس و رطوبت نسبی 5 ± 65 درصد در محیط آزمایشگاهی قرار گرفتند. سپس، آزمون توان نگهداری دابل، با استفاده از استاندارد ASTM D 1037 (ASTM International, 1999) و با دستگاه آزمایش کشش (Tensile Tester STT-5T) و سرعت بارگذاری ۲ میلی‌متر در دقیقه انجام شد. حداکثر نیروی وارده بر حسب نیوتن ثبت و سپس توان نگهداری طبق رابطه‌ی (۱) (Belleville et al., 2013b) محاسبه شد:

اتصال‌های ساخته‌شده توسط اعضای اتصال مم‌رز و نراد با دابل چوبی (در قطر و شکل سطح متفاوت) به دو روش جوشکاری و استفاده از چسب PVA بررسی و مقایسه شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

در این پژوهش قطعات عضو اتصال از دو گونه‌ی چوبی کاربردی در ایران یعنی از گونه‌ی پهن‌برگ مم‌رز (*Carpinus betulus*) با جرم مخصوص ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و گونه‌ی سوزنی‌برگ نراد (*Abies alba*) با جرم مخصوص ۰/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب انتخاب شد. برای این کار، ابتدا چوب‌ها تهیه و به مدت ۳ ماه در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند. قبل از برش‌کاری چوب‌ها به ابعاد مورد نظر، رطوبت آن‌ها نیز اندازه‌گیری شد (۱۲ درصد). دابل‌های چوبی مصرفی نیز از گونه‌ی مم‌رز با قطرهای ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر و سطوح صاف و شیاردار، دارای رطوبت ۲ درصد تهیه و استفاده شد. چسب

اتصال جوشکاری چرخشی دابل چوبی با دستگاه دریل ستونی دارای سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه، اهرم دستی و قابلیت تنظیم عمق نفوذ دابل توسط اپراتوری ثابت در مدت ۲-۳ ثانیه انجام شد. در روش استفاده از چسب نیز، از دابل چوبی آغشته به چسب پلی‌وینیل استات استفاده شد و دابل‌ها با دست در قسمت پیش‌سوراخ‌کاری چسب‌خورده‌ی قطعه‌ی عضو اتصال قرار داده شدند. آغشته‌سازی سطوح دابل چوبی و پیش‌سوراخ‌کاری نیز با لایه‌ای یکنواخت از چسب به روش مرسوم در صنعت مبلمان و ساخت اتصال‌های چوبی انجام شد. زمان مونتاژ باز ۲ دقیقه و زمان مونتاژ بسته ۲۴ ساعت در نظر

مقایسه‌ی میانگین تیمارها و گروه‌بندی آن‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن^۲ در سطح احتمال ۱ درصد استفاده شد. همچنین، به منظور بررسی میزان شباهت و طبقه‌بندی تیمارهای مختلف براساس توان نگهداری دویل، تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد.

۳- نتایج و بحث

جدول ۱، نتایج تجزیه و تحلیل واریانس اثر عوامل متغیر بر توان نگهداری دویل را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱، اثر مستقل هریک از متغیرها یعنی عضو اتصال، نوع اتصال، سطح و قطر دویل بر توان نگهداری دویل در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. همچنین، طبق مقادیر F ، بیشترین تا کمترین اثر معنی‌داری به ترتیب مربوط به اثر مستقل نوع اتصال با مقدار $F = ۱۲۰۶/۵۳$ ، اثر مستقل عضو اتصال با مقدار $F = ۲۲۲/۸۹$ ، اثر مستقل سطح دویل با مقدار $F = ۱۰۶/۵۱$ و اثر مستقل قطر دویل با مقدار $F = ۷۵/۸۸$ است. جدول ۱ نشان می‌دهد، اثر متقابل عضو اتصال و نوع اتصال، اثر متقابل عضو اتصال و قطر دویل، اثر متقابل نوع اتصال و قطر دویل و نیز اثر متقابل نوع اتصال و سطح دویل بر توان نگهداری دویل در سطح ۱ درصد معنی‌دار است.

$$\sigma_k = \frac{F_{Max}}{S} = \frac{F_{Max}}{2\pi rh} \quad (۱)$$

در این رابطه، σ_k توان نگهداری (MPa)، F_{max} حداکثر بار اندازه‌گیری شده در شکست (N)، S سطح جوشکاری شده یا سطح تماس اتصال (mm^2)، r شعاع سوراخ پیش‌سوراخ‌کاری شده (mm) و h عمق درجه‌ی دویل (mm) است.

۳-۲- تحلیل آماری

در این پژوهش، با توجه به چهار عامل مورد بررسی شامل نوع گونه‌ی چوب عضو اتصال (مرمرز و نراد)، نوع اتصال دویل (اتصال جوشکاری شده و اتصال با چسب پلی‌وینیل استات)، قطر دویل (۱۰ و ۱۲ میلی‌متر) و شکل سطح دویل (صاف و شیاردار) و ۹ تکرار، تعداد ۱۴۴ نمونه‌ی آزمونی ساخته شدند و مورد آزمون قرار گرفتند. پس از محاسبه‌ی توان نگهداری دویل برای هر نمونه، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و در قالب یک طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی مورد تجزیه و تحلیل واریانس چندعاملی^۱ قرار گرفتند تا آثار مستقل و متقابل عوامل متغیر بر توان نگهداری دویل بررسی شود. معنی‌داری آثار براساس آزمون F و در سطح احتمال ۱ درصد ($p \leq ۰/۰۱$) ارزیابی شد. برای

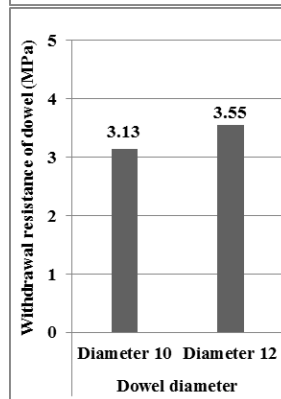
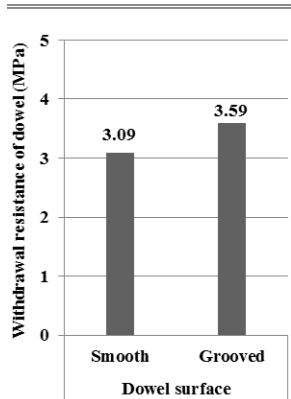
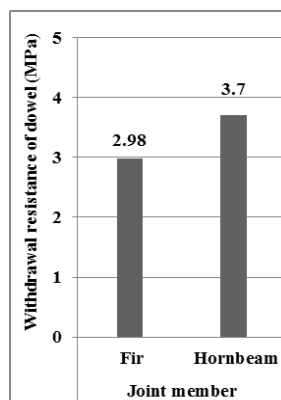
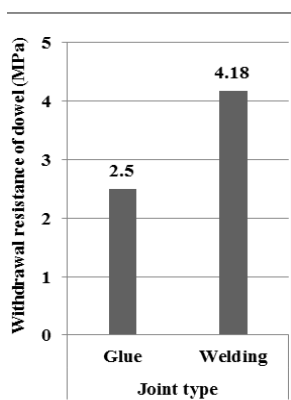
جدول ۱. نتایج تجزیه و تحلیل واریانس اثرات مستقل و متقابل عوامل متغیر بر توان نگهداری دویل

منبع تغییرات	درجه‌ی آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P (معناداری)
عضو اتصال	۱	۱۸/۷۷۰۵۵۶۲	۲۲۲/۸۹	*./۰۰۰۱
نوع اتصال	۱	۱۰۱/۶۰۹۷۶۰۰	۱۲۰۶/۵۳	*./۰۰۰۱
سطح دویل	۱	۸/۹۷۰۰۲۵۰	۱۰۶/۵۱	*./۰۰۰۱
قطر دویل	۱	۶/۳۸۹۹۴۱۴	۷۵/۸۸	*./۰۰۰۱
عضو اتصال × نوع اتصال	۱	۲/۵۹۵۳۲۱۰	۳۰/۸۲	*./۰۰۰۱
عضو اتصال × سطح دویل	۱	۰/۰۶۸۷۳۱۴	۰/۸۲	n.s./۳۶۸۱
عضو اتصال × قطر دویل	۱	۱/۷۲۴۸۴۴۴	۲۰/۴۸	*./۰۰۰۱
نوع اتصال × سطح دویل	۱	۰/۶۳۴۴۱۲۳	۷/۵۳	*./۰۰۷۰
نوع اتصال × قطر دویل	۱	۱/۷۸۶۶۷۷۸	۲۱/۲۲	*./۰۰۰۱
سطح دویل × قطر دویل	۱	۰/۲۹۲۱۴۰۲	۳/۴۷	n.s./۰۰۶۵۰
عضو اتصال × نوع اتصال × سطح دویل × قطر دویل	۵	۰/۶۰۴۲۴۳۷	۷/۱۷	*./۰۰۰۱

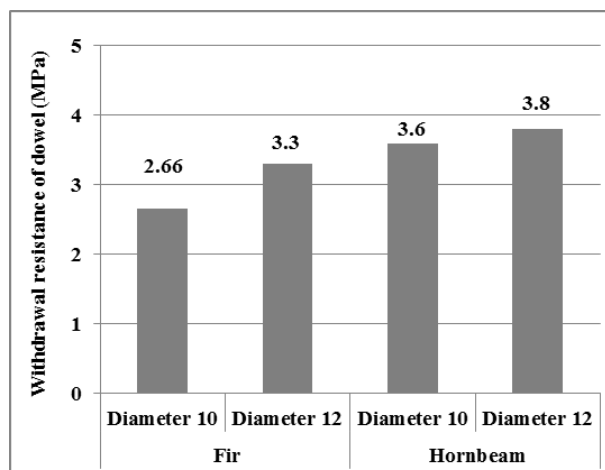
**معنی‌داری در سطح ۱ درصد n.s. عدم معنی‌داری در سطح ۱ درصد

شکل ۲ الف اثر مستقل عضو اتصال را نشان می دهد که توان نگهداری اتصال های ساخته شده با گونه ی ممرز در مقایسه با گونه ی نراد حدود ۲۴/۱۶ درصد بیشتر است. شکل ۲ ب اثر مستقل نوع اتصال را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که توان نگهداری اتصال های ساخته شده به روش جوشکاری حدود ۶۷/۲ درصد بیشتر از چسب است. شکل ۲ ج اثر مستقل قطر دوپل را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که توان نگهداری اتصال های ساخته شده با دوپل به قطر ۱۲ میلی متر حدود ۱۱/۶۴ درصد بیشتر از قطر ۱۰ میلی متر است. اگرچه افزایش قطر دوپل موجب افزایش سطح تماس اتصال می شود، افزایش مشاهده شده در توان نگهداری نشان می دهد که رشد بار شکست بیش از رشد سطح تماس بوده است. بنابراین، افزایش قطر نه تنها سطح اتصال را افزایش داده، بلکه کارایی مکانیکی ناحیه ی اتصال را نیز بهبود بخشیده است. شکل ۲ د اثر مستقل سطح دوپل را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که بیشترین توان نگهداری اتصال های ساخته شده توسط دوپل چوبی با سطح شیاردار حدود ۱۶/۱۸ درصد بیشتر از دوپل چوبی با سطح صاف است.

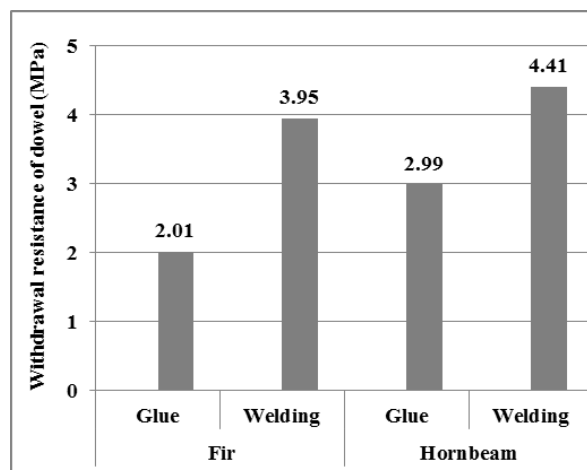
شکل ۳ الف اثر متقابل عضو اتصال و نوع اتصال را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که بیشترین توان نگهداری دوپل با مقدار ۴/۴۱ مگاپاسکال مربوط به اتصال های ساخته شده با دوپل و عضو اتصال ممرز به روش جوشکاری است. شکل ۳ ب اثر متقابل عضو اتصال و قطر دوپل را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که بیشترین توان نگهداری دوپل با مقدار ۳/۸ مگاپاسکال مربوط به اتصال های ساخته شده با دوپل قطر ۱۲ میلی متر و عضو اتصال ممرز است. شکل ۳ ج اثر متقابل نوع اتصال و قطر دوپل را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که بیشترین توان نگهداری دوپل با مقدار ۴/۲۸ مگاپاسکال مربوط به اتصال های ساخته شده با دوپل قطر ۱۲ میلی متر به روش جوشکاری است. شکل ۳ د اثر متقابل نوع اتصال و سطح دوپل را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که بیشترین توان نگهداری دوپل با مقدار ۴/۵ مگاپاسکال مربوط به اتصال های ساخته شده با دوپل چوبی شیاردار به روش جوشکاری است.



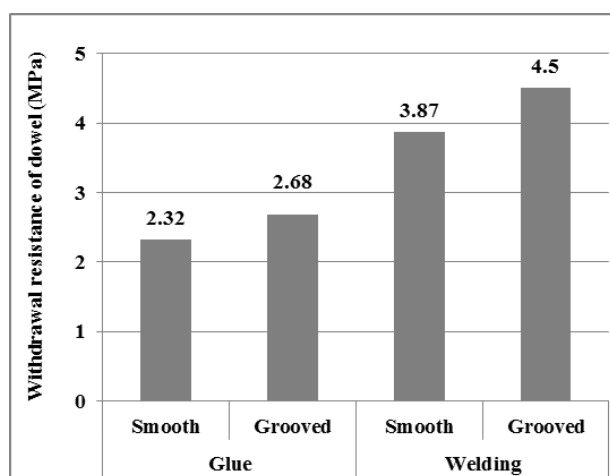
شکل ۲. اثر مستقل عوامل متغیر بر توان نگهداری دوپل



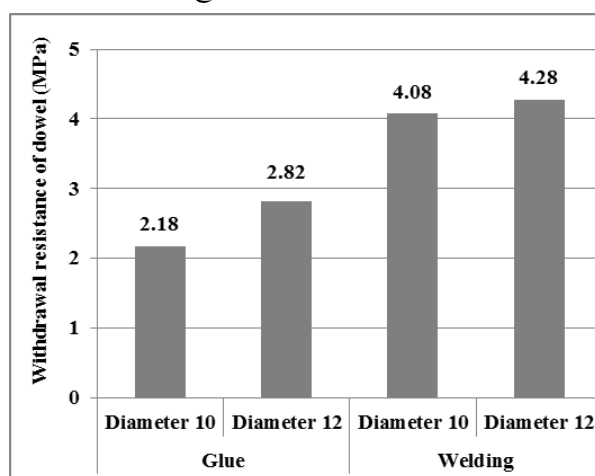
(ب) اثر متقابل عضو اتصال و قطر دویل



(الف) اثر متقابل عضو اتصال و نوع اتصال



(د) اثر متقابل نوع اتصال و سطح دویل



(ج) اثر متقابل نوع اتصال و قطر دویل

شکل ۳. آثار متقابل هریک از عوامل متغیر بر توان نگهداری دویل

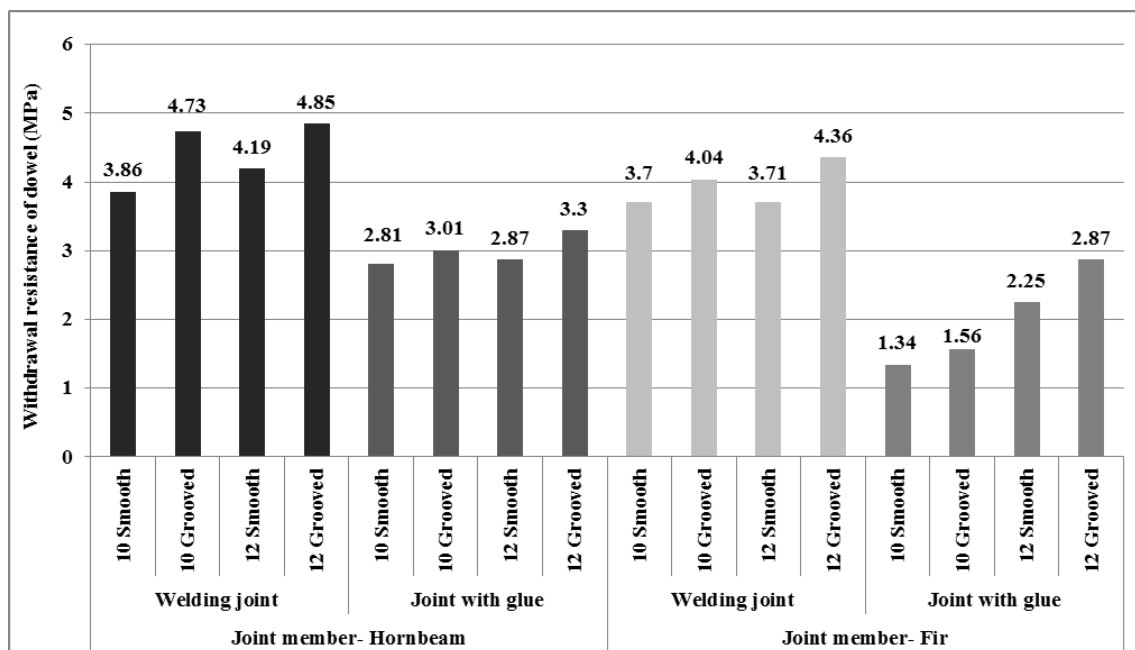
نمونه‌های جوشکاری‌شده، توان نگهداری دویل از حدود ۳/۸۶ به ۴/۱۹ مگاپاسکال (به میزان ۸/۵۵ درصد) افزایش یافته است. شکل ۴ نشان می‌دهد اتصال‌های ساخته‌شده با دویل سطح شیاردار در کل دارای توان نگهداری بیشتری از اتصال‌های ساخته‌شده با دویل سطح صاف هستند. همچنین، بیشترین توان نگهداری اتصال‌های ساخته‌شده مربوط به جوشکاری دویل سطح شیاردار با قطر ۱۲ میلی‌متر در عضو اتصال ممرز با مقدار ۴/۸۵ مگاپاسکال و کمترین توان نگهداری اتصال‌های ساخته‌شده نیز مربوط به اتصال دویل سطح صاف با قطر ۱۰ میلی‌متر توسط چسب PVA در عضو اتصال نراد با مقدار ۱/۳۴ مگاپاسکال است.

شکل ۵ آنالیز خوشه‌ای ۱۶ گروه بر مبنای توان نگهداری اتصال‌های جوشکاری‌شده و چسب‌شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، گروه‌های اول تا چهارم در

مقایسه‌ی میانگین‌ها در شکل ۴ نشان می‌دهد توان نگهداری دویل نمونه‌های جوشکاری‌شده، در هر دو عضو اتصال ممرز و نراد، بالاتر از نمونه‌های اتصال با چسب PVA است، به‌طوری که توان نگهداری دویل نمونه‌های جوشکاری‌شده در عضو اتصال ممرز برای انواع دویل‌ها شامل ۱۰ میلی‌متر صاف، ۱۰ میلی‌متر شیاردار، ۱۲ میلی‌متر صاف و ۱۲ میلی‌متر شیاردار به‌ترتیب ۳۷/۳۷، ۵۷/۱۴، ۴۶ و ۴۶/۹۷ درصد بیشتر از نمونه‌های اتصال با چسب PVA است. همچنین، در عضو اتصال نراد، توان نگهداری دویل نمونه‌های جوشکاری‌شده به‌ترتیب ۱۷۶/۱۲، ۱۵۸/۹۷، ۶۴/۸۹ و ۵۱/۹۲ درصد از نمونه‌های اتصال با چسب PVA بیشتر است. علاوه‌براین، نتایج نشان می‌دهند که توان نگهداری دویل، در هر دو عضو اتصال ممرز و نراد، با افزایش قطر دویل از ۱۰ به ۱۲ میلی‌متر افزایش پیدا می‌کند. برای مثال، در عضو اتصال ممرز، با افزایش قطر دویل سطح صاف در

چوب ممرز است؛ یعنی می‌توان در مواقع لزوم (با صرف نظر از عوامل دیگر) به جای دوپل ۱۲ میلی‌متری شیاردار از دوپل ۱۰ میلی‌متری شیاردار در این اتصال استفاده کرد که یعنی کاهش هزینه‌ی تهیه‌ی دوپل مصرفی. در موارد دیگر نیز این شرایط وجود دارد و در هنگام استفاده می‌توان اتصال با شرایط بهینه را انتخاب کرد.

فاصله‌ی کمتر یا تشابه بیشتری با هم گروه‌بندی شده‌اند. برای مثال، نتایج این گروه‌بندی کمک می‌کند تا یک طراح، با توجه به تشابه گروه‌ها یا فاصله‌ی نزدیک و دوری آن‌ها از هم اتصال مناسب و نیز بهینه را در طراحی سازه‌ای چوبی و غیره انتخاب کند. برای مثال، گروه مشابه سوم نشان می‌دهد که توان نگهداری اتصال جوشکاری دوپل ۱۰ میلی‌متری شیاردار در چوب ممرز نزدیک به اتصال جوشکاری دوپل ۱۲ میلی‌متری شیاردار در



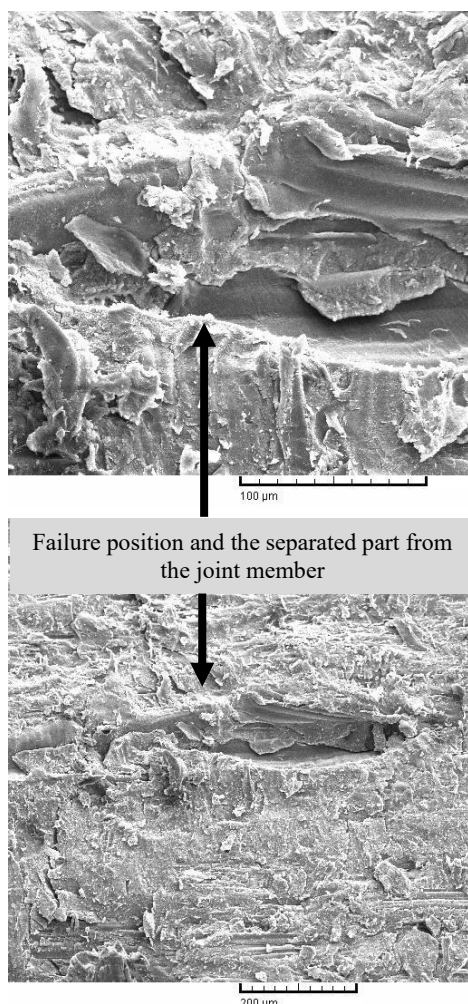
شکل ۴. میانگین‌ها یا آثار متقابل عضو اتصال- نوع اتصال- سطح دوپل و قطر دوپل بر توان نگهداری دوپل

گروه‌بندی توان نگهداری		C A S E							
اتصال‌ها		Label	Num	0	5	10	15	20	25
Grouping of Joints withdrawal resistance				+	+	+	+	+	+
گروه مشابه ۱ Similar group: 1	7	HGL12S	7	}					
	16	FGL12Gr	16						
	5	HGL10S	5						
	6	HGL10Gr	6						
	8	HGL12Gr	8						
گروه مشابه ۲ Similar group: 2	13	FGL10S	13	}					
	14	FGL10Gr	14						
	15	FGL12S	15						
گروه مشابه ۳ Similar group: 3	2	HW10Gr	2	}					
	4	HW12Gr	4						
	9	FW10S	9						
	11	FW12S	11						
گروه مشابه ۴ Similar group: 4	1	HW10S	1	}					
	3	HW12S	3						
	10	FW10Gr	10						
	12	FW12Gr	12						

شکل ۵. آنالیز خوشه‌ای ۱۶ گروه بر مبنای توان نگهداری اتصال‌های جوشکاری و چسب

(H): ممرز، (F): نراد، (W): جوشکاری، (GI): چسب، (S): سطح صاف، (Gr): سطح شیاردار، (12): قطر دوپل، (10): قطر دوپل

چسبندگی بین دو قطعه‌ی مورد اتصال، که به صورت سیمانی بین اتصال‌ها عمل می‌کند، همان مواد ذوب‌شده دیواره‌ی سلول‌ها در هنگام فرایند جوشکاری است (Omrani & Eisapour, 2017). پس از سرد شدن، سخت و محکم می‌شود. به طوری که عمرانی (Omrani, 2020) در تحقیق خود با تحلیل تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیه‌ی شکست عضو اتصال جوشکاری شده نشان داده است که شکست در محل اتصال خود جوشکاری ایجاد نشده، بلکه بخشی از عضو اتصال از آن جدا شده است. به عبارت دیگر، ناحیه‌ی جوشکاری شده بین دو بل و عضو اتصال، در مقایسه با خود اعضای چوبی، مقاومت بیشتری از خود نشان داده و در برابر بارگذاری کششی مؤثرتر عمل کرده است (شکل ۶).



شکل ۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از محل شکست عضو اتصال و دو بل چوبی در اتصال جوشکاری (Omrani, 2020)

به عبارتی، براساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه شده در شکل ۶ (Omrani, 2020)، طبق یک تحلیل

با توجه به نتایج تشریح شده، ملاحظه شد که توان نگه‌داری اتصال دو بل جوشکاری شده با عضو اتصال ممرز از عضو اتصال نراد بیشتر است. گونه‌ی چوب یکی از عواملی است که، در جوشکاری چرخشی دو بل چوبی، تفاوت مقاومت معنی‌داری دارد (Pizzi et al., 2004). از آنجایی که جرم مخصوص چوب در خواص مکانیکی آن تأثیر دارد، می‌توان گفت گونه‌ی ممرز در مقایسه با گونه‌ی نراد، به دلیل جرم مخصوص بیشتر، عملکرد بهتری داشته است. ممرز به دلیل جرم مخصوص بیشتر از نراد حاوی پلیمرهای ساختاری (مانند لیگنین و سلولز) بیشتری در واحد حجم است که این مقدار بیشتر لیگنین، در فرایند جوشکاری، مانند چسبی طبیعی عمل کرده و پیوند مقاوم‌تری ایجاد می‌کند. از طرف دیگر، جرم مخصوص بیشتر یعنی ماده‌ی چوبی بیشتر و، به عبارتی، سطح اتصال بیشتر که می‌تواند توان نگه‌داری اتصال‌های ساخته شده را افزایش دهد. همچنین، جرم مخصوص بیشتر بر مقدار ترکیبات تشکیل‌دهنده‌ی چوب تأثیر دارد. بلویل و همکاران (Belleville et al., 2013b) نیز اشاره کرده‌اند که تفاوت در ترکیب پلیمر چوب می‌تواند در عملکرد چوب در فرایند جوشکاری تأثیرگذار باشد و در نتیجه خواص مکانیکی مواد جوشکاری شده را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، نتایج تحقیق بلویل و همکاران (Belleville et al., 2016) اهمیت جرم مخصوص در فرایند جوشکاری را نشان داده است.

نتایج حاصل از توان نگه‌داری دو بل در هر دو گونه‌ی ممرز و نراد نشان دادند که اتصال‌های حاصل از جوشکاری مقاومت بیشتری از اتصال‌های ساخته شده با چسب PVA دارند. نتایج تحقیقات دیگر نیز نشان داده و بیان داشته‌اند که اتصال‌های دو بل جوشکاری شده مقاومت بهتری از اتصالات ساخته شده با چسب PVA دارند (Pizzi et al., 2006; Omrani et al., 2018; Omrani, 2020). در واقع، ذوب مواد دیواره‌ی سلول‌های چوبی در هنگام جوشکاری به افزایش حجم ماده‌ی چوبی (جرم مخصوص بیشتر) در سطح اتصال و تشکیل پیوندهای جدید بین الیاف دو بل و عضو اتصال منجر می‌شود. از طرف دیگر، همگنی و یکنواختی نوع ماده‌ی اتصال‌دهنده در هر دو قطعه‌ی مورد اتصال (دو بل و عضو اتصال)، که در واقع همان لیگنین و البته تا حدی همی سلولزها هستند، عامل دیگری است که باعث افزایش مقاومت در اتصال‌های جوشکاری شده در مقایسه با اتصال‌های ساخته شده با چسب PVA شده است. به عبارت روشن‌تر، ماده‌ی

فراکتوگرافی^۱ دقیق‌تر، سطح شکست عمدتاً شامل کنده شدن و پارگی الیاف چوبی است و جدایش مشخصی در مرز اتصال مشاهده نمی‌شود. این الگوی شکست بیشتر به شکست درون‌ماده‌ای یا شبه‌ترد همراه با پارگی الیاف شباهت دارد تا شکست بین‌سطحی، که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی استحکام بالای ناحیه‌ی اتصال جوشکاری شده باشد.

همچنین، ژونگ و همکاران (Zhong et al., 2024) با بررسی میکروسکوپی اتصال جوشکاری چرخشی دوبل چوبی گزارش کردند که ترکیب شیمیایی در خط اتصال تغییر می‌کند و این امر به پیوند بلورین ساختاریافته‌تر و افزایش مقاومت اتصال به دلیل درهم‌تنیدگی و قفل شدن [به هم پیوستگی] الیاف منجر می‌شود. برخلاف چسب PVA که سطحی مشترک یا خط اتصال ایجاد می‌کند، در اتصال جوشکاری دوبل چوبی، ذوب شدن لیگنین و همی سلولز باعث ایجاد یک فاز درونی مشترک بین دوبل و عضو اتصال می‌شود. این فرایند باعث می‌شود الیاف چوب و دوبل در سطح مولکولی درهم‌تنیده شوند، درحالی‌که چسبندگی PVA تنها به نیروهای فیزیکی و نفوذ سطحی چسب محدود است.

نتایج نشان دادند که دوبل‌های با قطر بیشتر سبب مقاومت بیشتر اتصال‌های چوبی شده‌اند. نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین نیز بیانگر آن است که توان نگهداری دوبل با افزایش قطر دوبل افزایش می‌یابد (Eckelman, 2003). افزایش قطر دوبل در واقع یعنی افزایش سطح دوبل؛ همان‌طوری که بیان داشته‌اند که مقاومت اتصال دوبل در برابر بار کششی، با افزایش سطح تماس چسبندگی، افزایش می‌یابد (Eckelman, 2002). به عبارتی، در اتصال‌های ساخته شده با چسب، با افزایش سطح چسبندگی، مقاومت‌ها افزایش یافته‌اند؛ در فرایند جوشکاری نیز افزایش سطح دوبل به افزایش سطح جوشکاری منجر می‌شود. این افزایش سطح جوشکاری باعث بالا رفتن میزان مواد لیگنینی می‌شود که مشابه سیمان عمل می‌کند و نقش اتصال‌دهنده را بین عضو اتصال و دوبل چوبی ایفا می‌کند. همچنین، افزایش تعداد پیوندهای تشکیل شده میان قطعات اتصال باعث افزایش مقاومت اتصالات می‌شود. البته، به بیان دیگر، می‌توان گفت افزایش توان

نگهداری مشاهده شده در دوبل‌های ۱۲ میلی‌متری صرفاً ناشی از افزایش سطح تماس نیست؛ زیرا سطح تماس در مخرج رابط‌ه‌ی (۱) نیز وارد می‌شود. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که افزایش قطر دوبل سبب افزایش بیش از تناسب نیروی شکست (F_{max}) شده است که می‌تواند ناشی از افزایش حجم ناحیه‌ی جوشکاری، افزایش میزان درگیری الیاف و افزایش تعداد پیوندهای مکانیکی و شیمیایی ایجاد شده در فصل مشترک باشد. همچنین، نتایج نشان دادند اتصال‌های جوشکاری شده با دوبل شیاردار اتصال‌های مقاوم‌تری از اتصال‌های جوشکاری شده با دوبل صاف ایجاد می‌کنند. می‌توان گفت یکی از دلایل آن وجود شیارهای موجود در سطح دوبل است که باعث افزایش سطح جوشکاری و در نتیجه افزایش مقاومت‌های مکانیکی می‌شوند. از طرف دیگر، دوبل‌های با سطح شیاردار، به‌خاطر مارپیچی قرار گرفتن الیاف سطحی، در زمان فرایند جوشکاری مستعد درهم‌رفتگی بیشتر، بهتر و آسان‌تر الیاف سطح دوبل با الیاف سطح عضو اتصال هستند (Omran et al., 2018). به عبارت دیگر، شیارهای روی دوبل چوبی نه تنها سطح تماس را برای جوشکاری افزایش می‌دهند، بلکه باعث تکران حرارتی بیشتر و در نتیجه ذوب یکنواخت‌تر لیگنین می‌شوند. آرایش مارپیچی الیاف، در دوبل شیاردار، درگیری مکانیکی را با الیاف عضو اتصال تسهیل می‌کند.

علاوه‌براین، دود ناشی از فرایند جوشکاری حاوی مقادیر زیادی بخار آب است. شیارهای موجود در سطح دوبل چوبی شرایطی فراهم می‌آورد که بخار آب به راحتی، سریع‌تر و بیشتر از این سطح خارج شود. هرچند بخار آب تولید شده می‌تواند در فرایند تشکیل پیوندهای میان الیاف تأثیرگذار باشد، ولی حضور بیش از حد آن و انباشت بخار آب در محل جوشکاری می‌تواند در روند جوشکاری تأثیراتی منفی داشته باشد (Omran et al., 2008b).

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، بررسی و مقایسه‌ی توان نگهداری اتصال‌های ساخته شده با دوبل چوبی به روش جوشکاری و

^۱ Fractography: شکست‌نگاری، مطالعه‌ی سطوح شکستگی برای تعیین

علت و نحوه‌ی شکست

4. Barcik, Š., Gašparik, M., & Horejš, P. (2014). Influence of thermal modification on nail withdrawal strength of spruce wood. *Bioresources*, 9(4), 5963–5975. <https://doi.org/10.15376/biores.9.4.5963-5975>
 5. Belleville, B., Stevanovic, T., Cloutier, A., Pizzi, A., & Salenikovich, A. (2013a). Production and properties of wood-welded panels made from two canadian hardwoods. *Wood Science and Technology*, 47(5), 1005–1018. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0554-7>
 6. Belleville, B., Stevanovic, T., Pizzi, A., Cloutier, A., & Blanchet, P. (2013b). Determination of optimal wood-dowel welding parameters for two North American hardwood species. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27(5-6), 566–576. <https://doi.org/10.1080/01694243.2012.687596>
 7. Belleville, B., Ozarska, B., & Pizzi, A. (2016). Assessing the potential of wood welding for Australian eucalypts and tropical species. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74, 5753–5757. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1067-5>
 8. Chen, G., Wang, C., Wu, J., Zhang, E., & Wu, D. (2023). Mechanical performance of nailed connections between laminated bamboo lumber and oriented strand board. *Journal of Forestry Engineering*, 8(2), 75–81. <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.202207015>
 9. Eckelman, C. A., Erdil, Y. Z., & Zhang, j. (2002). Withdrawal and Bending Strength of Dowel Joints Constructed of Plywood and Oriented Strand board. *Forest Products Journal*, 52(9), 66–74. <https://www.researchgate.net/publication/283355331>
 10. Eckelman, C. A. (2003). *Textbook of product engineering and strength design of furniture*, Purdue University. West Lafayette: Indiana, <https://www.purdue.edu/woodresearch/publications-carl-eckelman/>
 11. Gfeller, B., Zanetti, M., Properzi, M., Pizzi, A., Pichelin, F., Lehmann, M., Delmotte, L. (2003). Wood bonding by vibrational welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 17(11), 1573–1589. <https://doi.org/10.1163/156856103769207419>
 12. Golovin, Y. I., Gusev, A. A., Golovin, D. Y., Matveev, S. M., Tyrin, A. I., Samodurov, A. A., Korenkov, V. V., Vasyukova, I. A., & Yunack, M. A. (2023). Multiscale wood micromechanics and size effects study via nanoindentation. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 8(3), 246–264. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.04.002>
 13. Li, P., Yang, C., Jiang, Z., Jin, Y., & Wu, W. (2023a). Lignocellulose pretreatment by deep eutectic solvents and related technologies: A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 8(1), 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.11.004>
 14. Li, S., He, J., Wu, J., Yang, Y., Sun, Q., Lu, X., & Zhang, Z. (2023b). Study on water resistance improvement of wood dowel rotation welding joints. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 43(4), 1–18. <https://doi.org/10.1080/02773813.2023.2204858>
 15. Omrani, P., Bocquet, J., pizzi, A., Leban, J., & Mansouri, H. R. (2007). Zig-zag rotational dowel welding for exterior wood joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21(10), 923–933. <https://doi.org/10.1163/156856107781393910>
 16. Omrani, P., Mansouri, H. R., & Pizzi, A. (2008a). Weather exposure durability of welded dowel joints. *Holz Roh Werkstoff*, 66, 161–162. <https://doi.org/10.1007/s00107-007-0220-6>
 17. Omrani, P., Masson, E., pizzi, A., & Mansouri, H. R. (2008b). Emission of gases and degradation volatiles from polymeric wood constituents in friction welding of wood dowels. *Polymer Degradation and Stability*, 93(4), 794–799. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.01.017>
 18. Omrani, P. (2017). *wood Understanding: Structure, Chemistry, Physics and Mechanics of Wood*. Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran. https://publish.sru.ac.ir/book_897.html [In Persian]
- روش مرسوم استفاده از چسب PVA انجام شد. براساس یافته‌ها، نتایج زیر حاصل شد:
- در هر دو نوع اتصال، توان نگهداری اتصال‌های ساخته‌شده با عضو اتصال ممرز بیشتر از اتصال‌های ساخته‌شده با عضو اتصال نراد است.
 - توان نگهداری اتصال‌های دویل جوشکاری‌شده از توان نگهداری اتصال‌های ساخته‌شده با چسب PVA بیشتر بود که این امر نشان‌دهنده‌ی برتری فنی و محیط‌زیستی فناوری جوشکاری چوب در مقایسه با استفاده از این چسب است.
 - با افزایش قطر دویل، توان نگهداری اتصال‌های ساخته‌شده افزایش یافت.
 - سطح شیاردار دویل نیز توان نگهداری دویل بیشتری از سطح صاف ایجاد کرد.
 - بیشترین توان نگهداری اتصال‌های ساخته‌شده با دویل از طریق روش جوشکاری دویل با سطح شیاردار و قطر ۱۲ میلی‌متر در عضو اتصال ممرز و کمترین نیز با اتصال دویل سطح صاف و قطر ۱۰ میلی‌متر توسط چسب PVA در عضو اتصال نراد به دست آمد.
- بنابراین، می‌توان گفت عوامل مورد بررسی تأثیر معنی‌داری در توان نگهداری اتصال دویل جوشکاری‌شده دارند که این امر می‌تواند، در کنار دیگر مزایای روش جوشکاری چوب، کاربرد گسترده‌ای در صنایعی مانند صنعت چوب و مبلمان، سازه‌های چوبی و ساختمان داشته باشد. برخی از این مزایا عبارت هستند از حذف زمان‌های لازم برای پلیمریزاسیون چسب PVA، اتصال سریع‌تر، اتصال‌های چوبی با مقاومت قابل‌توجه و بیشتر از اتصال‌های ساخته‌شده با چسب PVA، مقرون‌به‌صرفه و دوستدار محیط‌زیست بودن.

منابع

1. Akbari Jouchi, A., Pourrajabian, A., Rahgozar, S., & Dehghan, M. (2021). Materials and manufacturing techniques of small horizontal axis wind turbine blade. *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, 10(3), 1–13. <https://doi.org/10.30501/jamt.2020.228466.1087> [In Persian]
2. Astle, C., Burge, I., Chen, M., Herrler, T., Kwan, L., Zibin, N., & Wood, D. (2013). Timber for small wind turbine blades. *Energy for Sustainable Development*, 17(6), 671–676. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.03.001>
3. ASTM International (1999). *ASTM D 1037: Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials*, United States: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1037-99>

- wollastonite additive. *Holzforschung*, 75(1), 79–86. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0310>
34. Vetchakam, S. (1989). *Strength of tenon and dowel in teak (Tectona grandis L. f.)*, Bangkok. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122623/records/6471fb0077fd37171a72713b>
 35. Wang, Y., & Lee, S. H. (2018). A theoretical model developed for predicting nail withdrawal load from wood by mechanics. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76, 973–978. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1227-2>
 36. Yin, W., Lu, H., Zheng, Y., & Tian, Y. (2022). Tribological properties of the rotary friction welding of wood. *Tribology International*, 167, 107396. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107396>
 37. Zhang, J., Gao, Y., Zhang, J., & Zhu, X. (2018). Influence of pretreated wood dowel with CuCl₂ on temperature distribution of wood dowel rotation welding. *Journal of Wood Science*, 64, 209–219. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1693-5>
 38. Zhang, Z., Tang, S., & Cui, Z. (2023). Experimental study on the pull-through performance of self-tapping screws in laminated bamboo. *Journal of Forestry Engineering*, 8(2), 40–45. <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.202205027>
 39. Zhong, X., Li, D., Xu, X., Li, Q., Yu, D., Wu, Z., Liang, J., Peng, J., Gu, W., Zhao, X., & Yin, S. (2024). Effects of Dowel Rotation Welding Conditions on Connection Performance for Chinese Fir Dimension Lumber. *Forests*, 15(6), 1038. <https://doi.org/10.3390/f15061038>
 40. Zhu, X., Gao, Y., Yi, S., Ni, C., Zhang, J., & Luo, X. (2017). Mechanics and pyrolysis analyses of rotation welding with pretreated wood dowels. *Journal of Wood Science*, 63, 216–224. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1617-4>
 19. Omrani, P., & Eisapour, R. (2017). Investigating and comparing the tensile strength of hardwood dowel joints made by glue and welding. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 32(3), 382–391. <https://doi.org/10.22092/IJWPR.2017.109986.1398> [In Persian]
 20. Omrani, P., Maryami, H., & Eisapour, R. (2018). Investigating the effect of dowel diameter and surface in softwood joints made by welding and glue. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 32(4), 598–605. <https://doi.org/10.22092/IJWPR.2017.115561.1439> [In Persian]
 21. Omrani, P. (2020). Investigation of performance and fracture monitoring of dowel-welded joint by micrographs of scanning electron microscopy. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 10(4), 589–603. http://www.ijwp.ir/article_35976.html?lang=fa [In Persian]
 22. Pizzi, A., Leban, J. M., Kanazawa, F., Properzi, M., & Pichelin, F. (2004). Wood dowel bonding by high-speed rotation welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18(11), 1263–1278. <https://doi.org/10.1163/016942410X501025>
 23. Pizzi, A., Despres, A., Mansouri, H. R., Leban, J. M., & Rigolet, S. (2006). Wood joints by through-dowel rotation welding: microstructure, ¹³C-NMR and water resistance. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20(5), 427–436. <https://doi.org/10.1163/15685610677144327>
 24. Pizzi, A., Mansouri, H. R., Leban, J. M., Delmotte, L., & Pichelin, F. (2011). Enhancing the exterior performance of wood joined by linear and rotational welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(19), 2717–2730. <https://doi.org/10.1163/016942411X556088>
 25. Ross, R. J. (2010). *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, Madison. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR113>
 26. Rowell, R. M. (2019). *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, Translated by Mohamad Aryaie Monfared and Hossein Mohamadi, Gorgan, PA: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. <https://publication.gau.ac.ir/publication>
 27. Sotayo, A., Bradley, D., Bather, M., Sareh, P., Oudjene, M., El-Houjeiri, I., Harte, A. M., Mehra, S., O'Ceallaigh, C., Haller, P., & Namari, S. (2020). Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications, *Developments in the Built Environment*, 1, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2019.100004>
 28. Stamm, B., Natterer, J., & Navi, P. (2005). Joining of wood layers by friction welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 19(13–14), 1129–1139. <https://doi.org/10.1163/156856105774429046>
 29. Suthoff, B., Kutzer, H. J. (1997). *Verfahren zum reibschweißartigen verbinden von Holz. (Method for joining wood)*, Deutsches Patent und Markenamt, Offenlegungsschrift DE 19746 782 A1. Deutsches Patent und Markenamt.
 30. Van Valk, L. H. (2015). *Elements of Material Sciences and Engineering*, 4th Ed., edited by Addison Wesley, Translated by Fakhreddin Ashrafizadeh, Fariba Saadat, Ardeshir Tahmasebi and Ahmad Monshi, Tehran, University Publishing Center – Tehran. <https://iup.ac.ir/product> [In Persian]
 31. Vaziri, M., & Sandberg, D. (2021). Welding of thermally modified wood and thermal modification of the welded wood: Effects on the shear strength under climatic conditions. *Bioresources*, 16(2), 3224–3234. <https://doi.org/10.15376/biores.16.2.3224-3234>
 32. Vaziri, M., Karlsson, O., Abrahamsson, L., Lin, C. F., Sandberg, D. (2021a). Wettability of welded wood-joints investigated by the wilhelmy method: Part 1. Determination of apparent contact angles, swelling, and water sorption. *Holzforschung*, 75(1), 65–74. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0308>
 33. Vaziri, M., Karlsson, O., Abrahamsson, L., Moghaddam, M. S., & Sandberg, D. (2021b). Wettability of welded wood joints investigated by the wilhelmy method: Part 2. Effect of