

Investigation of the effect of strand thickness and fiber-reinforced polymers (FRP) on the physical and mechanical properties of parallel strand lumber made of eucalyptus wood

Narjes khaton Madahi¹, Mohammad Shamsian², Mohammad Arabi^{3*}

1- PhD Student, Department of Science and Wood and Paper Industries, University of Zabol, Zabol, Iran.

2- Associate Professor, Department of Science and Wood and Paper Industries, University of Zabol, Zabol, Iran.

3- Corresponding author, Assistant Professor, Department of Science and Wood and Paper Industries, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: marabi@uoz.ac.ir, n.madahi@yahoo.com

Received: May 2024

Accepted: October 2024

Abstract

Problem definition and objectives: Parallel strand lumber (PSL) beams possess high strength and stiffness in the longitudinal direction due to the proper orientation of strands and high density, making them slightly heavier than solid and laminated wood, while also providing a high load-bearing capacity. Nowadays, to protect forest resources in Iran, the use of fast-growing, planted species such as *Eucalyptus camaldulensis*, along with wooden waste, has gained special importance for the production of PSL beams. This approach results in a product that is more affordable and cost-effective compared to other engineered wood products. Given the application of PSL beams in wooden structures as beams and columns, there is potential for strengthening and repairing them using fiber-reinforced polymer (FRP) materials. FRPs have gained widespread use in the construction industry due to their advantageous properties, including economic feasibility, high durability, lightweight nature, and resistance to corrosion and impact. This study aims to explore the feasibility of manufacturing PSL beams from *Eucalyptus camaldulensis* and to enhance their physical and mechanical properties using fiber-reinforced polymer materials.

Methodology: In this research, strands with dimensions of 50 mm in length, 20 mm in width, and two thicknesses of 4 mm and 6 mm were used, mixed with a urea-formaldehyde and melamine-formaldehyde adhesive in a ratio of 70 to 30. To reinforce the boards, four surface treatments were employed with three repetitions each: GFRP with epoxy adhesive, GFRP with polyurethane adhesive, fiberglass orthopedic tape with epoxy adhesive, and gypsum orthopedic band with urea-formaldehyde adhesive. The physical properties measured included water absorption and thickness swelling after 2 and 24 hours of immersion in water, as well as mechanical properties such as static bending (modulus of rupture and modulus of elasticity).

Results: In this study, increasing the strand thickness from 4 mm to 6 mm resulted in an improvement in the mechanical properties (modulus of rupture and modulus of elasticity) of the samples. The independent effect of chip thickness on water absorption after 2 hours and thickness swelling at both 2 and 24 hours was not significant; however, a reduction was observed in the 24-hour water absorption. After reinforcing the boards, the samples treated with fiberglass and epoxy adhesive showed the greatest enhancement in physical and mechanical properties. The water

absorption and thickness swelling in the samples reinforced with the gypsum orthopedic band were higher than those in the other samples. The highest mechanical properties were found in the GFRP samples with epoxy adhesive, while the lowest values were recorded in the control samples.

Conclusion: The results indicated that it is feasible to produce parallel strand lumber (PSL) beams from Eucalyptus wood. The reinforcement of PSL beams with GFRP enhanced their mechanical properties, making them suitable for applications subjected to higher loads. Additionally, the reinforcement of the boards with GFRP and epoxy adhesive resulted in reduced water absorption and thickness swelling of the beams, which enhances their applicability in outdoor environments.

Keywords: Parallel strand lumber, Fiber reinforced polymer (FRP), Eucalyptus camaldolensis, Glass fibers.

بررسی تأثیر ضخامت تراشه و پلیمرهای تقویت شده با الیاف بروی خواص فیزیکی و مکانیکی تخته تراشه‌های موازی ساخته شده با چوب اکالیپتوس

نرجس خاتون مداحی^۱، محمد شمسیان^۲، محمد عربی^۳

- ۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری کامپوزیت‌های لیگنوسلولزی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل، زابل، ایران، ایمیل: و استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل، زابل. پست الکترونیک: n.madahi@yahoo.com
- ۲- دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل، زابل، ایران
- ۳- نویسنده مسئول، استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل، زابل، ایران. پست الکترونیک: marabi@uoz.ac.ir

تاریخ دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: مهر ۱۴۰۳

چکیده

بیان مساله و اهداف: تیر تراشه موازی به دلیل جهت‌گیری مناسب تراشه‌ها در جهت طولی و دانسیته بالا از مقاومت و سفتی بالایی در جهت طولی برخوردار بوده و از چوب ماسیو و لایه‌های کمی سنگین‌تر و قابلیت تحمل بار بالایی دارد. امروزه به دلیل حفاظت از منابع جنگلی در ایران استفاده از گونه‌های دست کاشت و تند رشد که به وفور در دسترس هستند مانند گونه اکالیپتوس کاملدولنسیس و همچنین پسماندهای چوبی برای تولید تیر تراشه موازی از اهمیت ویژه‌ای پیدا کردند که در مجموع می‌توان محصولی با قیمت ارزان‌تر و مقرون به صرفه‌تر نسبت به سایر فرآورده‌های لایه‌ای چوبی تولید کرد. با توجه به کاربرد تیر تراشه‌های موازی در سازه‌های چوبی به عنوان تیر و ستون، امکان تقویت و ترمیم آنها با استفاده از مواد پلیمری تقویت شده با الیاف (FRP) وجود دارد. زیرا FRP ها با توجه به خواص خوب خود مانند توجیه اقتصادی، دوام بالا، سبک بودن، مقاومت در برابر خوردگی و ضربه کاربرد گسترده‌ای در صنعت ساخت و ساز پیدا کرده‌اند. این پژوهش با هدف امکان ساخت تیر تراشه‌های موازی از گونه چوبی اکالیپتوس کاملدولنسیس و بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی آن با استفاده از پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه استفاده شد.

مواد و روشها: در این تحقیق، با استفاده از تراشه‌هایی با ابعاد طول ۵۰، پهنا ۲۰ و با دو ضخامت ۴ و ۶ میلی‌متر، با مخلوط دو چسب اوره و ملامین فرمالدهید با نسبت ۷۰ به ۳۰ ساخته شد و برای تقویت تخته‌ها با سه تکرار، از چهار تیمار سطحی شامل GFRP و چسب اپوکسی، GFRP و چسب پلی اورتان، باند ارتوپدی فایبرگلاس با چسب اپوکسی و باند ارتوپدی گچی با چسب اوره فرمالدهید استفاده شد. خواص فیزیکی شامل جذب آب و واکنشیدگی ضخامت بعد از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب و مقاومت‌های مکانیکی مانند خمش استاتیک (مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته) اندازه‌گیری شد.

نتایج: در این تحقیق با افزایش ضخامت تراشه از ۴ به ۶ میلی‌متر مقاومت‌های مکانیکی (مدول خمشی و الاستیسیته) نمونه‌ها افزایش پیدا کرد. اثر مستقل ضخامت تراشه بروی جذب آب ۲ ساعت و واکنشیدگی ضخامت در هر دو مورد ۲ و ۲۴ ساعت معنی‌دار نشد و تنها در مورد جذب آب ۲۴ ساعت، کاهش پیدا کرد. بعد از تقویت تخته‌ها، نمونه‌های تیمار شده با الیاف شیشه و چسب اپوکسی بیش‌ترین بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی را داشتند و میزان جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در نمونه‌های تقویت شده با باند ارتوپد گچی از سایر نمونه‌ها بیشتر بود. بیشترین مقاومت‌های مکانیکی مربوط به نمونه GFRP با چسب اپوکسی و کمترین مقدار مقاومت‌ها در نمونه‌های شاهد مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که امکان تولید تیر تراشه‌های موازی از چوب اکالیپتوس وجود دارد و تقویت تیر تراشه‌های موازی با استفاده GFRP، مقاومت‌های مکانیکی تیر تراشه‌ها را افزایش داده و امکان استفاده آنها را برای

کاربردهایی که تحت بار بیشتری هستند فراهم می‌کند. همچنین تقویت تخته‌ها با GFRP و چسب اپوکسی باعث کاهش جذب آب و واکنش‌پذیری تیرها می‌شود که این موضوع امکان کاربرد آنها در محیط‌های خارجی را نیز می‌تواند فراهم کند.

واژه‌های کلیدی: تخته تراشه موازی، پلیمر تقویت شده با الیاف (FRP)، اکالیپتوس کاملدولنسیس، الیاف شیشه.

مقدمه

امروزه در ایران به دلیل حفاظت از منابع جنگلی استفاده از گونه‌های دست کاشت و تند رشد مانند اکالیپتوس دارای ارزش و اهمیت است. این منابع به همراه پسماندهای چوبی می‌توانند در تولید تخته تراشه‌های موازی (PSL) به کار گرفته شوند، که در مجموع می‌توان محصولی با قیمت ارزان‌تر و مقرون به صرفه نسبت به سایر فرآورده‌های چوبی از قبیل تخته لایه به دست آورد [۱]. PSL یکی از محصولات چوبی مهندسی است که اکنون اغلب در کاربردهای ساختمانی مانند تیرها، ستون‌ها و پل‌ها حتی به عنوان شاه‌تیر استفاده می‌شود و از ضایعات تراشه‌های روکش و لایه بلند با طولی بین ۴۵ سانتیمتر تا ۲/۴ متر به صورت یک تخته بزرگ تولید شده و سپس مطابق با سفارش و هر کاربرد برش می‌خورد [۲]. هر چند، در فرایند ساخت تخته تراشه‌های موازی می‌توان بسیاری از عیوب رویشی چوب مثل ترک و گره‌ها را توزیع کرد و به مقاومت نسبتاً بالاتری نسبت به چوب ماسیو دست یافت، ولی با استفاده از تقویت آن توسط الیاف مصنوعی مثل شیشه و کربن که استحکام و سختی بسیار بالایی دارند حتی می‌توان به مقاومت خیلی بیش‌تری دست یافت و امکان استفاده از این تخته‌ها در مصارفی با تحمل بار خیلی بیش‌تر را امکان پذیر نمود. کامپوزیت‌های FRP در شکلی که هم اکنون استفاده می‌شوند متشکل است از یک سری فیبر یا الیاف که درون رزینی به عنوان ماتریس یا زمینه قرار گرفته‌اند. الیاف شیشه متداول‌ترین نوع الیاف می‌باشد و الیاف کربن بهترین نوع الیاف از نظر مقاومت و تاب‌آوری در برابر خستگی هستند. عیب این الیاف گرانی آن و همچنین کرنش بسیار کم گسیختگی می‌باشد، که

آن را ترد می‌کند. ماتریس یا زمینه رزینی نیز به عنوان یک اجزای اصلی تشکیل دهنده کامپوزیت مشتمل بر رزین-های ترموست (گرماسخت) و ترموپلاستیک (گرمانرم) است. انواعی از رزین‌های ترموست که در ساخت FRP استفاده می‌شوند عبارت‌اند از: پلی‌استر غیراشباع، اپوکسی، وینیل استر، پلی‌اورتان. انتخاب نوع رزین و مقدار آن بستگی به نوع کار، مقاومت‌های مورد نظر و شرایط استفاده کامپوزیت و همچنین نوع الیاف مورد استفاده دارد [۳]. بسیاری از دانشمندان و کارشناسان برای تقویت انواع مختلف مواد شروع به استفاده از FRP کردند. Wang (۲۰۱۸) رفتار ساختاری تیرهای چوبی خارجی تقویت شده با کامپوزیت‌های مختلف FRP (کتان، بازالت، شیشه و ترکیبی از آنها) را مورد مطالعه قرار داد و اثر مواد مختلف فیبری، ضخامت لایه FRP و ترتیب لایه‌ها از طریق آزمایش خمش سه نقطه روی رفتار خمشی تیرهای چوبی تقویت شده را بررسی کرد. تیرهای تقویت شده با FRP کتان در مقایسه با تیرهای تقویت شده با FRP بازالت، ظرفیت بار خمشی بالایی را نشان دادند و نسبت به تیرهای تقویت شده با الیاف شیشه در همان تعداد لایه، حداکثر بار را افزایش دادند [۴]. Shoorvazi و همکاران (۲۰۲۴) ویژگی‌های مکانیکی شامل مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته را در تیرهای I شکل ساخته شده با PSL و LVL۴ تقویت شده با الیاف شیشه و چسب اپوکسی را بررسی کردند نتایج نشان داد که استفاده از LVL تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه نسبت به LVL معمولی باعث بهبود در مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته شد، همچنین استفاده از LVL تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه در بال تیرچه‌ها نسبت به LVL

³ - glass fiber

⁴ - laminated veneer lumber

¹ - Parallel Strand Lumber (PSL)

² - Fiber reinforced polymer materials

لایه از پارچه بافته شده ساده GFRP با تراکم و گراماژ ۱۰۰ گرم بر مترمربع (نوع ۱) و گراماژ ۲۰۰ گرم بر مترمربع (نوع ۲) قرار داده و چسبانده شد. برای چسباندن لایه‌ها از چسب‌های پلی ونیل استات^۶ پلی اورتان^۷ و اپوکسی دوجزئی^۸ استفاده شد. از نتایج مشخص شد که چسب اپوکسی از استحکام بالاتری نسبت به چسب‌های پلی اورتان و پلی ونیل استات برخوردار است و پارچه بافته شده نوع ۲ نسبت به پارچه نوع ۱ استحکام بالاتری داشته و بار موازی به خط چسب باعث عملکرد بالاتر نسبت به بار عمود به خط چسب می‌شود [۹]. همان‌طور که ذکر شد امروز به جهت حفظ جنگل‌ها و گونه‌های ارزشمند جنگلی و همچنین تقاضای روز افزون انواع صفحات فشرده چوبی، تولید کنندگان به سمت استفاده از گونه‌های کم قطر و دست کاشت سوق پیدا کرده‌اند. مشخص است که استفاده از چوب‌های جوان معایبی را به همراه دارد که امروزه با توسعه علوم مختلف و استفاده از آنها می‌توان اثر این معایب را کاهش داد و زمینه را برای استفاده از این نوع چوب‌ها فراهم کرد. یکی از این راه‌ها تقویت فیزیکی و مکانیکی محصولات ساخته شده با FRP ها است. از این رو، هدف از این مطالعه استفاده از گونه جوان اکالیپتوس (*Eucalyptus camaldulensis*) تقریباً نامرغوب صنعتی جهت تولید ماده مرکب مهندسی تخته تراشه موازی و همچنین امکان تقویت آن با انواع FRP ها موجود در بازار می‌باشد. با انجام چنین تحقیقاتی برای استفاده از این کامپوزیت‌ها در تقویت تخته تراشه موازی و مشاهده نتایج به دست آمده با وجود کاهش در هزینه‌ها می‌توان به توسعه استفاده از این مواد و چنین روش‌هایی کمک کرد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای ساخت تخته‌های تراشه موازی، گرده‌بینه‌های اکالیپتوس با قطرهای متفاوت (تقریباً ۱۰ سانتی‌متر) از محیط دانشگاه زابل تهیه شدند. رزین‌های اوره و ملامین فرمالدهید به صورت مایع از شرکت چسب سامد مشهد، ایران و همچنین آمونیوم کلراید به مقدار ۲ درصد به‌عنوان سخت‌کننده مورد استفاده قرار گرفتند.

معمولی، الوار تراشه موازی و الوار تراشه موازی تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه دارای عملکرد مکانیکی بسیار بهتری بود [۵]. همچنین Shoorvazi و همکاران (۲۰۲۴) یک مطالعه دیگر بر روی PSL ساخته شده از ضایعات نی و LVL حاصل از چوب صنوبر و تقویت شده با الیاف شیشه و رزین اپوکسی انجام دادند نتایج نشان داد در همه ویژگی‌های مکانیکی مورد مطالعه، استفاده از GFRP موجب تقویت ویژگی‌های مکانیکی در پانل‌های PSL و LVL گردید [۶]. Moradpour و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر پلیمر تقویت با الیاف شیشه را بر خواص تخته تراشه لایه-ای ساخته شده از صنوبر را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این مطالعه از چسب ایزوسیانات و اوره فرمالدهید به‌عنوان عامل اتصال دهنده استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که نوع رزین و GFRP تأثیر قابل توجهی روی خواص تیر تراشه لایه‌ای دارند. همچنین مشخص شد که مفیدترین اثر آن به ترتیب روی مدول الاستیسیته، مقاومت به ضربه، مدول گسیختگی، مقاومت برشی و مقاومت فشاری موازی تراشه بود و بالاترین خواص با استفاده از ایزوسیانات به‌عنوان رزین و GFRP به‌عنوان تقویت کننده به دست آمد [۷]. همچنین Morad pour و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر نوع رزین و ضخامت تراشه بر خواص کاربردی تخته تراشه موازی ساخته شده از صنوبر را مورد بررسی قرار داد. تخته‌های آزمایشگاهی با استفاده از تراشه چوب با ضخامت ۱ و ۲ میلی‌متر، چسب اوره فرمالدهید، اوره فرمالدهید اصلاح شده با نانو کریستال سلولز، ملامین فرمالدهید، ملامین فرمالدهید-اوره فرمالدهید، فنل فرمالدهید و پلیمر ایزوسیانات به‌عنوان چسباننده ساخته شدند. به‌طور کلی نتایج نشان داد که خواص مکانیکی صفحات ساخته شده با تراشه‌های ضخامت کمتر از ۲ میلی‌متر با استفاده از رزین فنل فرمالدهید و ایزوسیانات بهتر بود. نوع چسب و ضخامت تراشه تأثیر مهمی را بر عملکرد و کاربرد تخته‌ها ساخته شده نشان دادند [۸].

Yildirim (۲۰۲۱) روی کامپوزیت‌های چوب چند لایه ساخته شده از چوب صنوبر و GFRP مطالعه‌ای انجام داد. در این مطالعه از ۴ لایه با ضخامت ۵ میلی‌متر که به روش اوره بری از چوب صنوبر تهیه شده بود استفاده شد. بین هر

⁶ - PVAc-D4

⁷ - PU

⁸ - L285-resin and H285-hardener

⁵ - glass fiber reinforced polymer

ساخت این محصول با رزین‌های ملامین با نسبت ۷۰ به ۳۰ مخلوط و چسب حاصل به میزان ۶ درصد در ساخت تخته استفاده شد.

ساخت و تقویت تخته‌ها

عمل چسب زنی بر روی تراشه‌های منگنه شده به صورت دستی و با استفاده از برس رنگ صورت پذیرفت. لایه‌های تراشه‌ی آماده شده توسط پرس هیدرولیکی در ۲۲ دقیقه با ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع، واقع در کارگاه پرس گروه صنایع چوب و کاغذ دانشگاه زابل، پرس شدند. تخته‌های ساخته شده پس از خروج از پرس هیدرولیکی به تدریج در محیط سرد گردیده و کناره‌بری شدند. شکل ۱ فرآیند ساخت نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱- فرآیند ساخت و تست نمونه‌ها

منظور تکمیل فرآیند گیرایی چسب‌ها، نمونه‌های تقویت شده به کمک چسب پلی اورتان به مدت یک ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و نمونه‌های تقویت شده به کمک چسب اپوکسی و اوره فرمالدئید به مدت بیست دقیقه با دمای ۱۵۰ درجه زیر پرس گرم قرار گرفتند.

برای تیمار تخته‌ها از پارچه الیاف شیشه از شرکت مقاوم سازان افزیر، باندهای ارتوپدی گچی و فایبرگلاس از شرکت ای مد تجهیز تهیه شد. برای چسباندن الیاف شیشه و باند فایبر گلاس از رزین‌های اپوکسی و پلی یورتان که از شرکت مهندسی مکرر تهران تهیه شده بودند، استفاده شد و باند ارتوپدی معمولی با استفاده از رزین اوره فرمالدئید به سطح تخته چسبانده شد.

آماده‌سازی مواد

گرده‌بینه‌ها به تراشه‌هایی با ابعاد ۵۰۰ میلی‌متر طول، ۲۰ میلی‌متر عرض و دو ضخامت ۴ و ۶ میلی‌متر تراشه-گیری و برش خوردند. جهت ساخت تخته تراشه موازی و انجام بهتر چسب زنی و پرس، تراشه‌ها به صورت موازی کنار هم دیگر منگنه شد. چسب‌های اوره فرمالدئید به دلیل عملکرد فیزیکی و مکانیکی محدود و استفاده در

سپس تیمارهای تقویت مورد نظر به شرح جدول ۱ انجام شد. باندهای ارتوپدی گچی، فایبرگلاس و پارچه الیاف شیشه اندازه‌ی ابعاد تخته بریده شدند. باندهای ارتوپد گچی، فایبرگلاس و یک لایه پارچه GFRP بر روی تخته‌ها به شرح جدول ۱ چسبانده شد (مقدار چسب مصرفی ۱۵۰ گرم بر مترمربع در نظر گرفته شد). به

جدول ۱- تیمار سطحی و ضخامت تراشه نمونه‌ها

| ضخامت تراشه | ۴ و ۶ میلی‌متر |
|-------------|---------------------------------------|
| تیمار سطحی | پارچه GFRP + چسب اپوکسی |
| | پارچه GFRP + چسب پلی اورتان |
| | باند ارتوپدی فایبرگلاس + چسب اپوکسی |
| | باند ارتوپدی گچی + چسب اوره فرمالدهید |

فاکتوریل تحلیل آماری صورت گرفت. متغیرهای آزمون شامل دو ضخامت تراشه و چهار تیمار سطحی ذکر شده در جدول ۱ با سه تکرار بود.

نتایج و بحث

در جدول ۲ سطح معنی‌داری اثرات مستقل و متقابل ضخامت تراشه و تیمار سطحی بر مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته، جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت نمونه‌های PSL نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول نیز مشخص است اثر مستقل و متقابل ضخامت تراشه و تیمار سطحی بر مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته در سطح ۰/۰۱ درصد معنی‌دار شده است. اثر مستقل ضخامت تراشه بر واکنش‌دهی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت و همچنین جذب آب ۲ ساعت معنی‌دار نشده است. اثر متقابل تیمار سطحی و ضخامت تراشه بر همه خواص مکانیکی مورد مطالعه در این تحقیق معنی‌دار است.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

تخته‌ها پس از تیمار جهت تثبیت برای یک هفته در شرایط کلیما قرار گرفتند. سپس تخته‌ها مطابق استاندارد ASTM D 5456-99 و EN 317 به ترتیب برای آزمون خمش استاتیک و جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت بعد از غوطه‌وری در آب، برش خوردند [۱۰] و برای انجام آزمون‌ها از دستگاه تست مکانیکی HOUNSFIELD مدل KS H25 واقع در آزمایشگاه مکانیک دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل استفاده گردید. آزمون‌های مکانیکی (مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته) توسط دستگاه اندازه‌گیری شد و رایانه متصل به دستگاه، پس از انجام آزمون مربوط به هر نمونه، اطلاعاتی مانند مقاومت حداکثر و مقاومت در حد تناسب را ارائه نمود. نتایج حاصل با نرم‌افزار آماری SPSS در سطح اعتماد ۹۵ درصد (سطح معنی‌داری ۵ درصد) از نظر آماری تحلیل شد. از آزمون دانکن برای مقایسه بین میانگین‌ها و بر اساس طرح کاملاً تصادفی در قالب آزمون

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیرات مستقل و متقابل ضخامت تراشه و تیمار سطحی بر ویژگی‌های تخته تراشه

| خواص فیزیکی و مکانیکی | | | | (مقدار F و سطح معنی‌داری) | | |
|-----------------------|----------|------------|------------|---------------------------|------------|--------------------------|
| واکنش‌دهی ضخامت | | جذب آب | | MOE | MOR | منابع تغییرات |
| ۲۴ ساعت | ۲ ساعت | ۲۴ ساعت | ۲ ساعت | | | |
| ns/۲۷۰ | ns/۰۳۹ | ۱۹/۹۳۲** | ns/۰۰۲ | ۸/۴۸۸ ** | ۱۱/۵۳۲** | ضخامت تراشه |
| ** ۳۴/۲۹۳ | ** ۲۳/۳۴ | ۲۳/۳۴۰ ** | ** ۱۳۰/۰۲۰ | ** ۱۶/۸۵۰ | ** ۱۲/۷۶۲ | تیمار سطحی |
| ** ۱۹/۳۸۱ | ** ۹/۷۱۹ | ۱۱۹/۸۴۲ ** | ۵۲/۲۰۸** | ۲۳۸/۷۲۱ ** | ۱۳۵/۶۵۶ ** | ضخامت تراشه × تیمار سطحی |

* معنی‌داری در سطح ۵ درصد، ** معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد، ns معنی‌دار نمی‌باشد

مدول خمشی و مدول الاستیسته

اثر مستقل ضخامت تراشه و تقویت سطحی بر

مقاومت خمشی PSL

همان‌طور که در جدول ۳ مشخص است تیمار سطحی و همچنین تغییر نوع تیمار سطحی از حالت بدون تیمار سطحی به تیمار با باند ارتوپدی گچی (چسب اوره فرمالدهید)، باند فایبرگلاس (چسب اپوکسی) و لایه الیاف شیشه با چسب پلی اورتان و چسب اپوکسی، مقادیر MOR به ترتیب ۶، ۹، ۱۱ و ۱۹ درصد و مقادیر MOE به ترتیب ۱۰، ۱۳، ۷ و ۱۵ درصد افزایش یافت. این تحقیق مشابه یافته‌های MoradPour و همکاران (۲۰۱۸) و

Bakalarz و Kossakowski (۲۰۱۹) بود که به ترتیب با تقویت LSL و LVL با الیاف شیشه، مقاومت‌های مکانیکی آن را به مقدار قابل توجهی افزایش دادند [۷] و [۱۲]؛ و با افزایش ضخامت تراشه از ۴ به ۶ میلی‌متر مقادیر MOR و MOE به ترتیب ۲۵ و ۱۹ درصد کاهش می‌یابد. Lee و Tahir (۲۰۰۳) و Morad pour (۲۰۱۹) نشان دادند که با افزایش ضخامت تراشه به ترتیب خواص مکانیکی OSB و PSL بهبود یافتند [۱۳] و [۷]. عدد داخل پرانتز انحراف معیار و حروف الفبا گروه‌بندی دانکن را نشان می‌دهند.

جدول ۳- اثر مستقل ضخامت تراشه و تقویت سطحی بر مقاومت خمشی

| MOE | MOR | تغییرات اثر مستقل | نوع تغییرات مستقل |
|-----------------------|------------------|------------------------|-----------------------|
| a۷۸۳۶/۵ (۶۹۱/۱۵۸۹۴) | a۶۲/۴(۶/۵۴۹۹۰) | بدون تقویت | |
| a۸۶۳۲/۸(۱۲۱۳/۶۷۸۶۷) | b۶۶/۴(۶/۹۸۲۸۲) | باند ارتوپدی گچی | |
| bc۹۷۷۶/۴(۱۱۲۴/۸۳۵۳۲) | c۷۲/۴(۹/۴۴۰۱۵) | باند فایبرگلاس | |
| c۱۰۵۵۷/۷(۱۳۱۰/۱۹۳۱۷) | d۸۶/۸(۱۱/۸۳۷۳۷) | پلی اورتان + GFRP | |
| c ۱۲۲۰۰/۸(۱۳۱۰/۱۹۳۱۷) | e۱۳/۲۹۶۳۰) ۹۷/۱(| اپوکسی + GFRP | اثر مستقل تیمار سطحی |
| ۸۹۴۴(۱۷۰/۱/۱۵۷۹۹) | ۶۸(۱۱/۳۸۳۷۳) | ضخامت تراشه ۴ میلی‌متر | اثر مستقل ضخامت تراشه |
| ۱۰۶۵۸(۱۵۲۳/۸۵۰۷۹) | ۸۶(۱۵/۹۱۸۰۳) | ضخامت تراشه ۶ میلی‌متر | |

گچی افزایش داد. به‌طوری که مقادیر MOR و MOE به ترتیب ۶ و ۱۶ برای نمونه‌های ساخته شده با ضخامت ۴ میلی‌متر و ۱۱ و ۷ درصد برای نمونه‌های ساخته شده با ضخامت ۶ میلی‌متر نسبت به نمونه‌های ساخته شده با باند ارتوپدی گچی افزایش یافتند. نمونه‌های تیمار شده با الیاف شیشه یک جهته و چسب پلی اورتان نسبت به باند فایبر گلاس پزشکی مقادیر MOE و MOR را به مقدار قابل توجهی افزایش دادند به‌طوری که از لحاظ آماری اختلاف بین این دو گروه نمونه معنی‌دار شد. بیشترین مقاومت خمشی و مدول الاستیسته مربوط به نمونه‌های ساخته شده با تراشه ۶ میلی‌متر و همچنین تیمار سطحی با الیاف شیشه یک جهته با چسب اپوکسی مشاهده شد. الیاف شیشه مدول یانگ بالایی دارند در نتیجه سفتی زیادی در کامپوزیت ایجاد می‌کنند و نیز مقاومت کششی و فشاری مناسبی را در کامپوزیت به وجود می‌آورند [۱۳]. در تحقیقی که Alhayek و Svecova (۲۰۱۲) روی

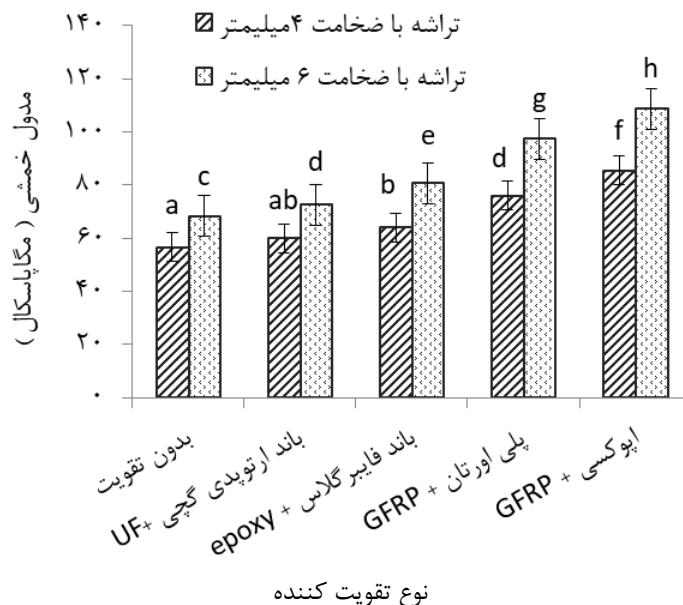
اثرات متقابل ضخامت تراشه و تقویت سطحی بر

مقاومت خمشی و مدول الاستیسته PSL

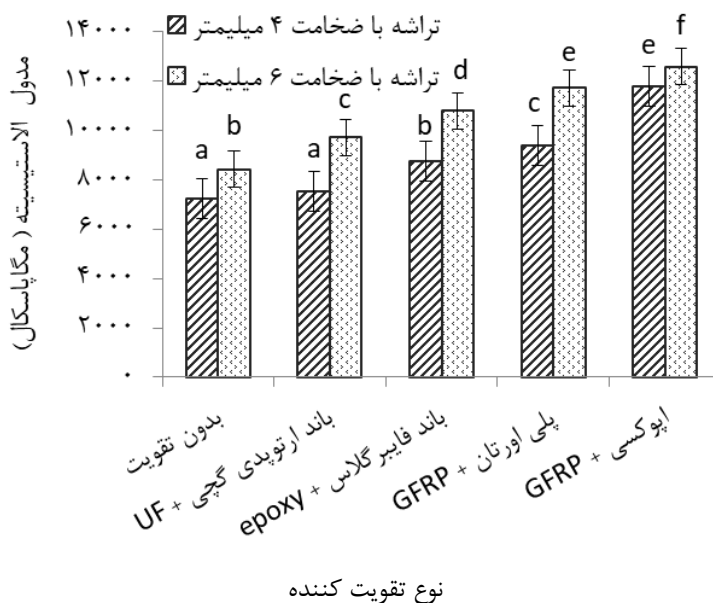
مطابق شکل ۲ و ۳ تأثیر متقابل ضخامت تراشه و تیمار سطحی نمونه‌های PSL بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسته نشان داده شده است. همان‌طور که در این دو شکل مشخص است نمونه‌های ساخته شده با ۴ میلی‌متر ضخامت کمترین مقاومت خمشی و مدول الاستیسته را داشتند. با تقویت این نمونه‌ها با باند ارتوپدی گچی به ویژه برای نمونه ساخته شده با ۴ میلی‌متر ضخامت، از لحاظ آماری تغییر چندانی در افزایش مقدار MOE و MOR مشاهده نشد. طوری که از لحاظ آماری نمونه‌های تقویت نشده و تقویت شده با باند ارتوپدی گچی در یک گروه قرار گرفتند؛ اما در مورد تراشه‌های ۶ میلی‌متر نتیجه متفاوت بود و از لحاظ آماری اختلاف معنی‌دار شد. تیمار سطحی نمونه‌های PSL با باند فایبر گلاس مقاومت خمشی و مدول الاستیسته نمونه‌های PSL را نسبت به باند ارتوپدی

را می‌توان این‌طور توضیح داد که چسب اپوکسی نسبت به چسب پلی اورتان، مقاومت اتصال FRP ها با چوب را افزایش می‌دهد [۱۴].

تیرهای چوبی انجام دادند تقویت با GFRP در آنها سبب افزایش مقاومت و سفتی نمونه‌ها شد. مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته بیشتری در نمونه‌های PSL تیمار شده با الیاف شیشه و چسب اپوکسی مشاهده شد. دلیل این امر



شکل ۲- تأثیر متقابل ضخامت تراشه و نوع تقویت کننده سطحی نمونه‌های PSL اکالیپتوس بر مقاومت خمشی



شکل ۳- تأثیر متقابل ضخامت تراشه و نوع تقویت کننده سطحی نمونه‌های PSL اکالیپتوس بر مدول الاستیسیته

در حدود ۱ درصد است. با تغییر تیمار سطحی نمونه‌های PSL و استفاده از باند فایبرگلاس پزشکی، و لایه الیاف شیشه چسبانده شده با چسب پلی اورتان و اپوکسی مقادیر واکشیدگی ضخامت ۲ ساعت به ترتیب ۱، ۱۶، ۲۱ و ۴۹ درصد، واکشیدگی ضخامت ۲۴ ساعت به ترتیب ۱۶، ۴۰، ۴۴ و ۱۴ درصد، جذب آب ۲ ساعت به ترتیب ۰، ۱۶، ۲۲، ۲۶ و ۲۸ درصد و جذب آب ۲۴ ساعت به ترتیب ۰، ۴، ۱۲، ۱۶ و ۱۲ درصد کاهش می‌یابد.

اثر مستقل ضخامت تراشه و تیمار سطحی بر واکشیدگی ضخامت و جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت
جدول ۴ اثر مستقل ضخامت تراشه و تقویت سطحی را بر واکشیدگی ضخامت و جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۴، با تیمار سطحی نمونه‌های PSL مقدار جذب آب و واکشیدگی ضخامت آنها کاهش می‌یابد. تأثیر باند ارتوپدی گچی بر واکشیدگی ضخامت ۲ ساعت تأثیری ندارد و اختلاف واکشیدگی ضخامت آن به نمونه‌های تقویت نشده

جدول ۴- اثر مستقل ضخامت تراشه و تقویت سطحی را بر واکشیدگی ضخامت و جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت

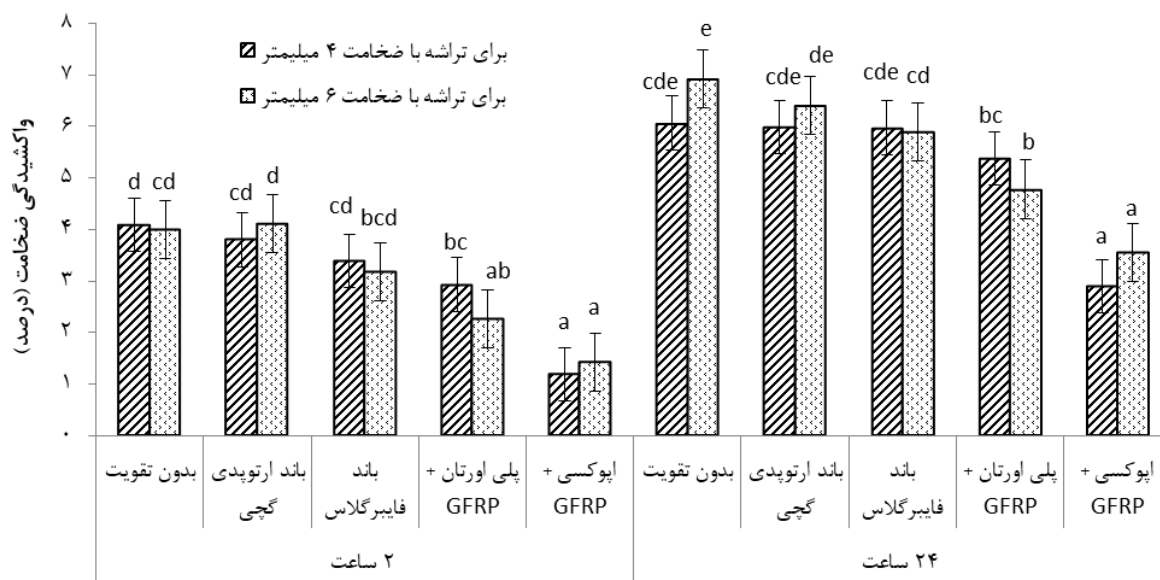
| نوع اثر مستقل | نوع تغییرات | جذب آب ۲ ساعت | جذب آب ۲۴ ساعت |
|---------------|------------------------|-------------------|--------------------|
| اثر مستقل | بدون تقویت | ۱۵/۶۳ (۱/۰۰۶۷۵) e | ۴۲/۸۳ (۶/۰۸۹۵۱) c |
| تیمار سطحی | باند ارتوپدی گچی | ۱۳/۰۴ (۰/۸۲۸۰۵) d | ۴۰/۷۰ (۵/۱۳۸۴۴) c |
| | باند فایبرگلاس | ۱۰/۱۵ (۰/۵۹۴۵۰) c | ۳۵/۴۷ (۴/۳۶۲۱۱) bc |
| | پلی اورتان + GFRP | ۷/۵۱ (۱/۰۶۳۰۱) b | ۲۹/۶۰ (۸/۷۸۴۳۲) ab |
| | اپوکسی + GFRP | ۵/۳۶ (۰/۸۶۰۴۱) a | ۲۵/۸۱ (۷/۳۵۴۲۴) a |
| اثر مستقل | ضخامت تراشه ۴ میلی‌متر | ۱۰/۳۷ (۳/۷۸۷۴۲) | ۴۰/۵۵ (۵/۹۵۶۱) |
| ضخامت تراشه | ضخامت تراشه ۶ میلی‌متر | ۱۰/۳۰ (۴/۰۲۴۹۶) | ۲۹/۲۲ (۷/۸۱۵۵۵) |

سطحی واکشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در نمونه‌های تیمار شده با باند ارتوپدی گچی، واکشیدگی ضخامت ۲ ساعت آن نسبت به نمونه‌های تقویت نشده مقدار اندکی افزایش را نشان می‌دهد. در سایر تیمارها با تغییر نوع تیمار سطحی از باند ارتوپدی به باند فایبر گلاس و سپس به الیاف شیشه + چسب پلی اورتان و الیاف شیشه چسب اپوکسی واکشیدگی ضخامت نمونه برای هر دو نوع ضخامت تراشه کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار کاهش واکشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت به ترتیب برای نمونه‌های تیمار شده با الیاف شیشه و چسب پلی اورتان و چسب اپوکسی است. به طوری که با تغییر تیمار سطحی نمونه‌ها از باند فایبر گلاس به الیاف شیشه + چسب پلی اورتان و الیاف شیشه + چسب اپوکسی، مقدار واکشیدگی ضخامت به ترتیب ۱۰ و ۱۵ درصد برای واکشیدگی ضخامت ۲ ساعت و ۲۰ و ۲۷ درصد برای واکشیدگی ضخامت ۲۴ ساعت کاهش نشان می‌دهد.

بیشترین میزان کاهش مقادیر جذب آب با تیمار سطحی الیاف شیشه و چسب اپوکسی حاصل شد و اختلاف چسب اپوکسی و پلی اورتان نیز در کاهش میزان جذب آب و واکشیدگی ضخامت نمونه‌های PSL در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد. اثر مستقل ضخامت تراشه در میزان واکشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت و همچنین جذب آب ۲ ساعت چندان چشمگیر نیست. در حالی که با افزایش ضخامت تراشه‌ها از ۴ به ۶ میلی‌متر جذب آب ۲۴ ساعت حدود ۲۷ درصد کاهش نشان داد. Lee و Tahir (۲۰۰۳) و همچنین Morad pour و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که با افزایش ضخامت تراشه به ترتیب خواص فیزیکی OSB و PSL بهبود یافتند [۱۳ و ۸].

اثرات متقابل ضخامت تراشه و تقویت سطحی بر واکشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت

شکل ۴ اثر متقابل ضخامت تراشه و تیمار سطحی را بر واکشیدگی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. در نمونه‌های ساخته شده با تراشه ۴ و ۶ میلی‌متر با تیمار



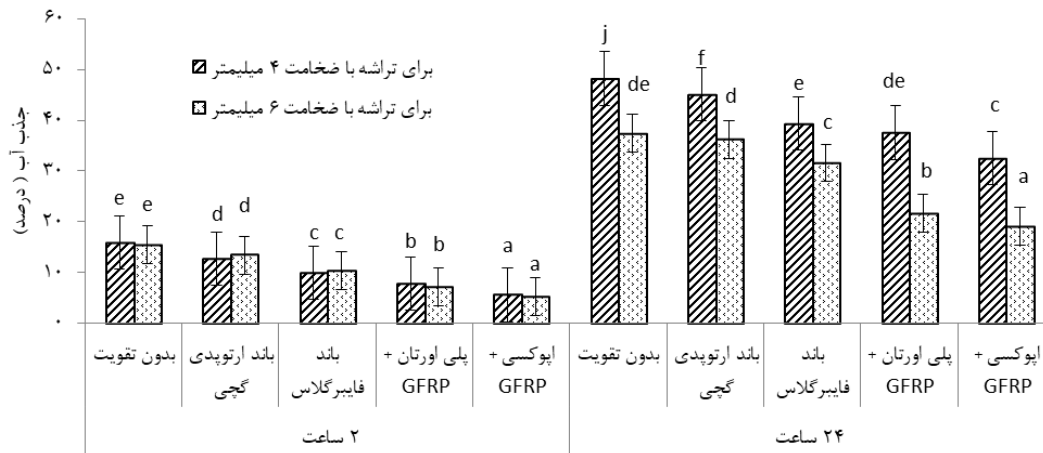
شکل ۴- اثر متقابل ضخامت تراشه و تیمار سطحی بر واکسیدگی ضخامت نمونه‌های PSL

ضخامت نمونه‌ها (۲ ساعت) با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد، ولی با گذشت زمان (۲۴ ساعت) از سرعت آن کاسته شد. مقدار زیاد افزایش در ابتدای غوطه‌وری می‌تواند به علت پدیده انتشار باشد [۱۵]. در مرحله اول غوطه‌وری، مولکول‌های آب با پدیده انتشار (حرکت توده‌ای) و با سرعت زیاد به درون کانال‌ها، منافذ، دیواره سلولی و فضاهای خالی تخته نفوذ کرده اما با گذشت زمان به دلیل پر شدن فضاهای خالی موجود، از سرعت این پدیده کم می‌شود [۱۶]. با تیمار نمونه‌ها منافذ سلولی با رزین پر شده و دیگر جایی برای مولکول‌های آب و جذب آب باقی نمی‌ماند. لازم به ذکر است که در نمونه‌های تیمار شده با باند ارتوپدی گچی، جذب آب بعد ۲ ساعت آن نسبت به نمونه‌های تقویت نشده مقدار اندکی افزایش را نشان می‌دهد. در سایر تیمارها با تغییر نوع تیمار سطحی از باند ارتوپدی به باند فایبر گلاس و سپس به الیاف شیشه + چسب پلی اورتان و الیاف شیشه + چسب اپوکسی واکسیدگی ضخامت نمونه برای هر دو نوع ضخامت تراشه کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار کاهش جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت به ترتیب برای نمونه‌های تیمار شده با الیاف شیشه و چسب پلی اورتان و چسب اپوکسی است.

اثرات متقابل ضخامت تراشه و تقویت سطحی بر

جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت

شکل ۵ اثر متقابل ضخامت تراشه و تیمار سطحی را بر جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. در نمونه‌های ساخته شده با تراشه ۴ و ۶ میلی‌متر با تیمار سطحی جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت کاهش می‌یابد. در بین تیمارها، نمونه‌های تیمار شده با رزین اپوکسی و پلی یورتان همراه با GFRP جذب آب در آنها نسبت به باند ارتوپد معمولی، باند فایبر گلاس و نمونه‌های تقویت نشده کمتر بود. در نمونه‌های ارتوپدی معمولی به دلیل وجود گچ و خاصیت آب‌دوستی و جذب آب آن و همچنین استفاده از رزین اوره فرمالدهید، تأثیر چشمگیری در کاهش جذب آب مشاهده نشد و میزان جذب آب تقریباً مشابه نمونه‌های تیمار نشده بود، به طوری که با تغییر تیمار سطحی نمونه‌ها از باند ارتوپدی کچی به باند فایبر گلاس و همچنین از باند فایبر گلاس به الیاف شیشه + چسب پلی اورتان و الیاف شیشه + چسب اپوکسی، مقدار جذب آب به ترتیب ۱۰ و ۱۵ درصد برای جذب آب ۲ ساعت و ۲۰ و ۲۷ درصد برای جذب آب ۲۴ ساعت کاهش را نشان می‌دهد. در ابتدای غوطه‌وری مقدار جذب آب و واکسیدگی



شکل ۵- اثر متقابل ضخامت تراشه و تیمار سطحی نمونه‌های PSL بر جذب آب

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تخته تراشه موازی با استفاده از تراشه‌های گونه اکالیپتوس کاملدولنسیس ساخته شد و با FRP (پلیمر مسلح شده با الیاف) تیمار و تقویت شد. سپس خواص فیزیکی (جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت ۲ و ۲۴ ساعت) و مقاومت‌های مکانیکی (مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته) آن بررسی شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که:

۱- برای ساخت تخته‌ها تراشه‌هایی با دو ضخامت ۴ و ۶ میلی‌متر استفاده شد. با افزایش ضخامت از ۴ به ۶ میلی‌متر مقاومت‌های مکانیکی تخته (مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته) بهبود پیدا کرد و بعد از تیمار و تقویت تخته‌ها، بیشترین مقاومت‌ها مربوط به نمونه FRP شیشه با چسب اپوکسی و کمترین مربوط به نمونه شاهد بود.

۲- با افزایش ضخامت تراشه‌ها، خواص فیزیکی تخته (جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت) کاهش داشت. بعد از تیمار و تقویت تخته‌ها، میزان جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت در تخته‌هایی که با FRP شیشه و چسب اپوکسی تقویت شده بودند از همه کمتر و در باند ارتوپد گچی از همه بیشتر بود.

۳- تقویت تخته‌ها با FRP، مقاومت‌های تخته تراشه را افزایش داده و امکان استفاده آن را برای کاربردهایی که تحت بار بیشتری هستند فراهم می‌کند. تقویت تخته‌ها با FRP شیشه و چسب اپوکسی علاوه بر افزایش مقاومت

های مکانیکی و استحکام تخته‌ها، باعث کاهش جذب آب و واکنش‌دهی تخته‌ها می‌شود که این موضوع باعث کاربرد آنها در محیط‌های داخلی و خارجی می‌شود.

منابع

- [1] Vahidi Parsa, M., Shamsian, M., Farrokh Payam, S. and Cole, F. (2018). ' The effect of nanoclay on the physical and mechanical properties of Parallel Strand Lumber made with reed stalks '. Renewable natural resources research, 9(1), pp.1-10 (In Persian).
- [2] Donald, M.N. (1960). ' Implications of nonresponse for the interpretation of mail questionnaire data ', Public Opinion Quarterly, 24(1), pp.99-114., doi: 10.1086/266934.
- [3] Rezaian, A. and Motahari, S. (2015). ' Physical and mechanical properties of polymers ', Tehran: University of Tehran Printing and Publishing Institute, 196 (In Persian).
- [4] Wang, H.T., Wu, G. and Pang, Y.Y. (2018). ' Theoretical and numerical study on stress intensity factors for FRP-strengthened steel plates with double-edged cracks ', Sensors, 18(7), p.2356, doi: 10.3390/s18072356.
- [5] shoorvazi, H., Shamsian, M., bayatkashkoli, A., Dahmardeh Ghalehno, M. (2024). ' Reinforcement of I-Shaped Beams Constructed with Parallel Strand Lumber and Laminated Veneer Lumber Utilizing Glass Fiber Polyme ', Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 14(4), pp. 389-402. doi: 10.22034/ijwp.2023.2000248.1609, (In Persian).
- [6] Shurvazi, H., Shamsian, M., Bayatkashkoli, A. and Dahmardeh Ghalehno, M. (2024). ' Investigating the reinforcement of parallel chip lumber (PSL) obtained from reed waste and laminated veneer lumber (LVL)

- [12] Bakalarz, M. and Kossakowski, P. (2019). ' The flexural capacity of laminated veneer lumber beams strengthened with AFRP and GFRP sheets ', *Technical Transactions*, 116(2), pp.85-95., doi: 10.4467/2353737XCT.19.023.10159.
- [13] Lee, L. and Tahir, P.M. (2003). ' Effects of fine particle content on the properties of five-layered oriented strand board. In Proceedings of the XII World Forestry Congress, Quebec City, Canada (pp. 21-28).
- [14] Alhayek, H. and Svecova, D. (2012). 'Flexural stiffness and strength of GFRP-reinforced timber beams ', *Journal of composites for construction*, 16(3), pp.245-252., doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000261.
- [15] Younesi-Kordkheili, H., naghdi, R., Honarbakhsh Raouf, A. (2016). 'Investigation Some of Physical and Mechanical Properties of Polypropylene Fiber/ Wood /Cement Composites ', *Iranian Journal of Wood and Paper Industries* , 7(2), pp. 207-217., doi: 20.1001.1.20089066.1395.7.2.5.3 (In Persian).
- [16] Fotsing, J.A.M. and Tchagang, C.W. (2005). ' Experimental determination of the diffusion coefficients of wood in isothermal conditions ', *Heat and mass transfer*, 41, pp.977-980., doi: 10.1007/s00231-005-0621-1.
- made of spruce with fiber reinforced polymer (FRP) ', *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 39(2), pp.95-110., doi: 10.22092/ijwpr.2024.363404.1761, (In Persian).
- [7] Moradpour, P. Pirayesh, H., Gerami, M. and Rashidi Jouybaria, I. (2018). ' Laminated strand lumber (LSL) reinforced by GFRP; mechanical and physical properties, Elsevier ', *Construction and Building Materials*, Volume 158, 15 January 2018, Pages 236-242.
- [8] Moradpour, P., Behnia, M., Pirayesh, H. and Shirmohammadli, Y. (2019). ' The effect of resin type and strand thickness on applied properties of poplar parallel strand lumber made from underutilized species ', *European Journal of Wood and Wood Products*, 77, pp.811-819., doi: 10.1007/s00107-019-01438-3.
- [9] Yildirim, M.N., Karaman, A. and Zor, M. (2021). ' Bending characteristics of laminated wood composites made of poplar wood and GFRP ', *Drvna industrija*, 72(1), pp.3-11., doi: 10.5552/drvind.2021.1913.
- [10] ASTM D 5456 (1999) Standard Specification for Evaluation of Structural Composite Lumber Products.
- [11] European Norm, Particleboards and fibreboards; determination of swelling in thickness after immersion in water. European Standardization Committee, German version, EN 317, 1993456 (1999) Standard Specification for Evaluation of Structural Composite Lumber Products.