طراحی، ساخت و بررسی مقاومت‌های مکانیکی اتصال در تیر باربر لایه‌ای پله پیچ ساخته‌شده از چوب صنوبر

چکیده

این پژوهش با هدف ساخت تیر باربر پله پیچ چوبی با استفاده از فرآورده لایه‌ای چوب صنوبر، گونه سپیدار (Populus Alba *L.*) و دستیابی به یک اتصال بهینه برای تبدیل تیر باربر به ابعاد کوچک‌تر جهت رسیدن به طراحی مناسب برای ساخت پله پیچ چوبی انجام شد. بدین منظور تخته سه‌لایه از گونه سپیدار با استفاده از چسب پلی‌اورتان دوجزئی و با ضخامت لایه‌های سطحی ۰/۵ میلی‌متر و لایه وسط ۲ میلی‌متر در ابعاد ۱۲۰×۱۲۰ سانتیمتر ساخته‌شده و برای ساخت فرآورده لایه‌ای موردنظر استفاده شدند. در ادامه، خواص مکانیکی و مدهای شکست فرآورده موردبررسی قرار گرفتند. درنهایت، ۵ نوع اتصال سربه‌سر شامل اتصال انگشتی، دم چلچله، نیم و نیم، مورب و مورب اصلاح‌شده برای تیر باربر پله پیچ چوبی طراحی و با طول ۶۵، عرض ۲۰ و ضخامت ۲/۱ سانتی‌متر ساخته‌شده و مورد آزمون خمش در صفحه قرار گرفتند. مدول الاستیسیته خمشی در صفحه تیر باربر به ترتیب برای نمونه شاهد ۱۵۹۸ MPa، برای اتصال مورب اصلاح‌شده ۲۴۴۱ MPa، برای اتصال مورب ۱۶۶۹MPa، برای اتصال نیم و نیم ۱۰۴۷MPa، برای اتصال انگشتی MPa ۹۵۷ و برای اتصال دم چلچله ۶۵۲MPa به دست آمدند. مدول گسیختگی در صفحه تیر باربر به ترتیب برای نمونه شاهد ۳۲ MPa، برای اتصال مورب اصلاح‌شده MPa ۲۷، برای اتصال مورب ۲۳ MPa، برای اتصال نیم و نیم ۱۹ MPa، برای اتصال انگشتی ۱۲ MPa و برای اتصال دم چلچله ۱۳ MPa به دست آمدند. نتایج تجزیه واریانس یک‌طرفه بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین مدول الاستیسیته خمشی و مدول گسیختگی تیرهای باربر در آزمون خمش در صفحه در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($\alpha\leq0.01$) بود. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان تیر باربر بااتصال مورب اصلاح‌شده را گزینه مناسبی برای ساخت تیر باربر پله پیچ چوبی دانست.

واژگان کلیدی: چوب صنوبر، پله پیچ، تیر باربر، اتصال‌های سربه‌سر، فرآورده لایه‌ای، خواص مکانیکی.

فرخ رادفر[1*]
حمید زارع حسین آبادی[2]
پیام مرادپور[3]
کامبیز پورطهماسبی[4]

[1] دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

[2] دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

[3] استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

[4] استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

مسئول مکاتبات:
radfarfarokh69@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲

مقدمه

تا اواسط سال ۱۹۴۰ میلادی تقریباً همه راه‌پله‌ها، حتی راه‌پله‌های بزرگ داخلی و خارجی در ساختمان از چوب ساخته می‌شد، اما تخریب آن‌ها در جنگ جهانی، ساخت این سازه از چوب را کمرنگ نمود. کاهش ساخت پله‌های چوبی منجر به کاهش کیفیت این صنعت شده و صنعتگران کمتری برای این بخش باارزش آموزش دیدند. امروزه ساخت سازه‌ها توسط مصالح طبیعی ازنظر اثرات

زیست‌محیطی و زیبایی دوباره موردتوجه قرارگرفته و باعث باارزش شدن این صنعت شده است. مصالح طبیعی که توسط صنعتگران ماهر مورداستفاده قرار می‌گرفتند، بار دیگر رایج شده و صنعت چوب دوباره ازنظر اقتصادی جایگاه خاصی پیداکرده است. امروزه ساخت راه‌پله با استفاده از چوب به دلیل شکل‌پذیری بالا و برطرف نمودن نیاز انسان ازنظر زیبایی شناختی بسیار مورد استقبال قرارگرفته است [۱]. علاوه بر این، چوب در سبک‌سازی سازه نسبت به دیگر مصالح ساختمانی نقش به‌سزایی دارد. زمان و نیاز به تجربه بالا و استفاده از چوب با ابعاد بزرگ برای ساخت راه‌پله‌های چوبی منجر به هزینه بالا و محدود شدن ساخت آن‌ها شده است. بنابراین جهت ساخت این نوع سازه باید به دنبال راهی بود که موجب آسان شدن فرآیند ساخت و استفاده از قطعات چوبی کوچک‌تر شود. استفاده از فرآورده‌های مرکب و به‌کارگیری اتصال برای ساخت تیر باربر که یکی از اصلی‌ترین و بزرگ‌ترین قطعه پله پیچ چوبی است تأثیر بسزایی در مصرف چوب و افزایش دقت ساخت این سازه خواهد داشت. پله‌های چوبی ازنظر شکل ظاهری به دو دسته پله‌های مستقیم و پله‌های مدور تقسیم بندی می‌شوند. پله‌های مدور شامل پله‌های پیچ و پله‌های بیضی می‌باشند که در آن‌ها پله‌های پیچ قسمتی از دایره و پله‌های بیضی قسمتی از بیضی می‌باشند. پله‌های پیچ چوبی به دلیل اشغال فضای کم و زیبایی زیاد بسیار مورد استقبال قرارگرفته‌اند [۲]. پله پیچ معمولاً به دو روش، چرخش حول یک ستون مرکزی و چرخیده شدن حول یک نقطه فرضی ساخته می‌شود. علاوه بر زیبایی بسیار بالای پله‌های پیچ چرخیده شده حول یک نقطه فرضی نسبت به پله پیچ‌های متصل به یک ستون مرکزی، اختلاف کم شیب راه‌پله در عرض پله، موجب استفاده بیشتر این نوع پله پیچ نسبت به پله پیچ-های متصل به یک ستون مرکزی گشته است. وجود تیر باربر پله پیچ با ابعاد بزرگ، محدودیت گونه‌های چوبی جنگلی با مقاومت‌های مکانیکی بالا موجب محدود شدن ساخت آن از چوب، و ساخت تیر باربر به کمک فلزات، بتن و ... شده است. شکل‌پذیری چوب، امکان طراحی و ساخت اتصالات مناسب، استفاده از فرآورده‌های چوبی، مونتاژ سریع و با هزینه بسیار پایین سازه‌های چوبی در مقابل سازه‌های با اسکلت بتنی و فلزی اهمیت و ضرورت پرداختن به موضوع سازه‌های چوبی را بیش از گذشته مشخص می‌سازد. ازآنجایی‌که میزان تخریب زلزله تابعی از وزن سازه است، لذا با توجه به موارد ذکرشده، وزن سازه-های چوبی بسیار سبک‌تر از سازه‌های بتنی و فولادی بوده و در نتیجه نیروی برشی و محوری ناشی از وقوع زلزله به مقدار کمتری ایجادشده و اثرات تخریبی زلزله کاهش می-یابد [۳].

در سال‌های اخیر صنعت تخته لایه و روکش به علت کمبود گرده‌بینه‌های با قطر مناسب و همچنین نبود فناوری‌های نوین برای بهره‌گیری از گرده‌بینه‌های کم قطر در کشور، دارای رشد منفی بوده است. این در حالی است که با افزایش چشمگیر جمعیت و در نتیجه گسترش ساختمان سازی به‌ویژه در کلان شهرها، تقاضا برای مصرف فرآورده‌های لیگنوسلولزی روز به روز در حال افزایش است. بنابراین به نظر می‌رسد که بهره‌گیری از چوب‌های تولیدی در دوره‌های بهره‌برداری کوتاه مدت (زراعت چوب) برای تأمین ماده اولیه موردنیاز صنایع فوق امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. در این راستا گونه‌های چوبی تندرشد مانند صنوبرها، اکالیپتوس و پالونیا به لحاظ نشان دادن توان تولید حجم زیاد چوب در واحد سطح در کمترین زمان ممکن مورد توجه محققان در بیشتر کشورهای جهان قرارگرفته است. با توجه به این‌که قسمت اعظم کشور ما در نواحی بیابانی قرارگرفته و با توجه به کمبود چوبی که امروزه در صنایع چوب داریم، بهره‌گیری از درختان تند رشد که در کوتاه مدت بازدهی خوبی داشته باشند، ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به محدود شدن بهره‌برداری از گونه‌های راش، توسکا، افرا، ممرز، نمدار، ملچ و بلوط و غیره در جنگل‌های شمال ایران در سال‌های اخیر، استفاده از گونه‌های مختلف صنوبر در ساخت تخته لایه متداول شده است که با توجه به دوره-های بهره‌برداری کوتاه مدت این گونه، برای تأمین ماده اولیه مورداستفاده در صنایع یاد شده امری ضروری می-باشد [۴]. Somechai(۱۹۸۹) مقاومت اتصال کام و زبانه و پین را در چوب گونه تیک (*Tectona grandis*) بررسی کرد .اتصال‌های موردبررسی با استفاده از چسب پلی وینیل استات (PVAc) و به دو شکل Lو Tساخته‌شده بودند.

نتایج این بررسی نشان داده است که اگر عامل‌هایی مانند چسب و نوع اتصال و گونه چوبی ثابت باشند، مقاومت اتصال ایجاد شده متناسب با طول نفوذ تغییر خواهد کرد [۵]. Kasal (۲۰۰۶) مقاومت قاب مبلمان راحتی ساخته‌شده از اعضای مختلف را با روش اجزا محدود بررسی کرد. نتایج نشان داده‌اند که تحلیل سه بعدی سازها با استفاده از روش اجزای محدود تخمین قابل قبولی در عملکرد سازهای قاب مبلمان راحتی داشته است. این پژوهشگر استفاده از فرآورده‌های مرکب چوبی (MDF،OSB و تخته چندلا) را جایگزینی مناسب برای ساخت قاب مبلمان به‌جای چوب ماسیو دانسته است [۶]. Bahmani و همکاران (۲۰۱۰) در یک مطالعه موردی با پیش‌بینی لنگر خمشی اتصال T شکل با پین چوبی در MDFمشخص شد که بیشترین میزان ظرفیت لنگر خمشی در اتصال‌های با قطر ۸ میلی‌متر و طول نفوذ ۱۲ میلی‌متر در اعضای اتصال ایجاد می‌شود [۷]. Rostampour-Haftkhani و همکاران (۲۰۲۲) برای تقویت اتصال فارسی قاب‌های مبلمان با استفاده از پین فشرده صنوبر به جای پین راش استفاده کردند، نتایج این بررسی نشان دادند که با افزایش تعداد پین، قطر پین و درصد فشردگی، میانگین ظرفیت لنگر خمشی اتصال به ترتیب ۵/۱۰۵، ۳/۵۴ و ۷۵/۲۸ درصد افزایش‌یافته است [۸]. امروزه بشر نسبت به دهه‌های گذشته زمان بیشتری را در داخل خانه سپری می‌کند. طراحی ساختمان و فضای داخل آن، بافت و دکوراسیون داخل منزل و شاید مهمتر از آن راحتی و آسایش بیش ازپیش اهمیت پیداکرده است. اتصالات موجب تبدیل اجزاء سازه به المان‌های کوچک‌تر و بالا بردن دقت و ظرافت در ساخت و سهولت حمل و نقل می‌شود. برای شناخت کامل ویژگی‌های سازه مبلمان باید اطلاعاتی درباره تعیین بار وارده بر سازه و تغییر شکل اتصال در زیر بار داشت. یکی از بخش‌های اصلی و مهم هر سازه چوبی اعم از مبلمان و سایر سازه‌های چوبی اتصالات آن است که نقاط بحرانی بین عناصر آن می‌باشند. اتصالات بار وارده را به‌طور متوسط تحمل کرده و بین اعضای آن توزیع می‌کنند [۹]. حفظ ظرافت اتصال و در عین حال فراهم آوردن بیشترین استحکام در سازه، از نکات بسیار مهم در سازه‌های چوبی است [۱۰]. اجزاء سازه به روش‌های متفاوت (گوشه‌ای، سربه‌سر، متقاطع، عرضی و ...) و اتصال‌دهنده‌های گوناگون (کام و زبانه، دم چلچله، انگشتی، قلیف و ...) به همدیگر متصل می‌شوند. علی‌رغم پیچیدگی اتصال سربه‌سر، امروزه به دلیل محدودیت استفاده از قطعات بزرگ در سازه، از اتصال سربه‌سر به‌طور گسترده‌ای در ساخت اجزاء تشکیل‌دهنده سازه‌ها و همچنین فرآورده‌های مهندسی‌شده استفاده می‌شود، ولی با توجه به وجود لنگر خمشی در تیرها، کمتر در تیرهای چوبی مورداستفاده قرار می‌گیرند و بیشتر در ستون‌های چوبی به علت وجود فشار موازی با طول کاربرد دارند. درنتیجه این مسئله منجر به استفاده از قطعات بزرگ چوبی جهت ساخت تیرها در سازه‌های چوبی شده است. بنابراین لازم است از انواع و خواص مکانیکی این نوع اتصال اطلاعات لازم فراهم باشد تا در طراحی سازه‌های مربوطه مورداستفاده قرار گیرد. همچنین استفاده از فرآورده‌های چوبی در ساخت تیرها علی‌رغم استفاده از چوب‌های سبک و کمک به زراعت چوب، نقش به‌سزایی در کاهش وزن سازه دارد. یکی از اهداف این تحقیق علاوه بر طراحی اتصال در تیر باربر پله پیچ چوبی، یافتن راه‌کاری برای تأمین منابع اولیه از چوب‌های تندرشد با تمرکز بر کاهش فشار بر جنگل‌های طبیعی می‌باشد. ازاین‌رو در این تحقیق برای ساخت تیر باربر از فرآورده لایه‌ای صنوبر استفاده شد. وجود اتصال در تیر باربر موجب تبدیل آن به ابعاد کوچک‌تر می‌شود که این امر بالا بردن دقت و سرعت ساخت، استفاده از مواد اولیه با ابعاد کوچک‌تر، مونتاژ سریع و آسان، جابجایی راحت و امکان پیش‌ساخته نمودن را در پی خواهد داشت. این تحقیق با هدف دستیابی به یک اتصال سربه‌سر در تیر باربر پله پیچ چوبی با مقاومت بالا و تبدیل آن به المان‌های کوچک‌تر و استفاده از فرآورده لایه‌ای چوب صنوبر برای به حداقل رساندن وزن سازه و درعین‌حال حفظ مقاومت‌های مکانیکی و کمک به زراعت چوب اجرا شد.

مواد و روش‌ها

مواد

در این تحقیق از چوب صنوبر، گونه سپیدار (*Populus Alba L.*) با سن تقریبی ۱۰ سال، قطر۲۰ سانتی‌متر، دانسیته ۴۵۰ کیلوگرم در مترمکعب و رطوبت ۵۰ درصد

که از چادگان (حومه اصفهان) تهیه شده بود، برای ساخت فرآورده لایه‌ای استفاده گردید. چسب پلی‌اورتان ML518 و هاردنر HA418 موردنیاز از شرکت مکرر تهیه شدند که مشخصات چسب پلی‌اورتان در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات چسب پلی‌اورتان ML-518

مشخصه	مقدار
رنگ	کرم
دانسیته (gr/cm^3)	۱/۳
مواد جامد چسب (٪)	۱۰۰
زمان مصرف در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (دقیقه)	۲۵
دمای سرویس (درجه سانتی‌گراد)	۳۰- تا ۱۲۰
دمای کاربرد (درجه سانتی‌گراد)	۱۵ تا ۴۰
گیرایی کامل چسب (روز)	۱۰
سختی (Shore A)	۹۵-۹۰
مقاومت حرارتی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (ساعت)	۱۵۰

روش ها

آماده‌سازی چوب و تهیه لایه

گرده‌بینه‌های صنوبر به‌وسیله اره زنجیری به طول ۱۳۰ سانتی‌متر برش داده و توسط دستگاه لوله‌بر به لایه‌های با ضخامت ۲/۲ و ۰/۵۵ میلی‌متر تبدیل شدند. پس از کاهش رطوبت لایه‌های لوله بری شده با قرار گرفتن در فضای باز به ۲±۶ درصد، ضخامت لایه‌ها از ۲/۲ به ۲ و از ضخامت ۰/۵۵ به ۰/۵ رسیدند.

ساخت فرآورده لایه‌ای

لایه‌های خشک شده توسط قیچی پنوماتیکی کناره بری شدند و سپس اتصال طولی آن‌ها در ابعاد ۱۲۰×۱۲۰ سانتی‌متر انجام شد. سپس تخته‌های ۳ لایه با آرایش متقاطع و با ضخامت لایه مرکزی ۲ و لایه‌های سطحی ۰/۵ میلی‌متر با استفاده از چسب پلی‌اورتان در دستگاه پرس ۳ طبقه با ابعاد ۱۳۰×۳۰۰ سانتی‌متر با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد ساخته شدند. برای ساخت فرآورده لایه‌ای، تخته لایه‌های ساخته‌شده با استفاده از چسب پلی‌اورتان به‌صورت موازی و به تعداد هفت عدد به‌وسیله دستگاه پرس ساخته شدند. (شکل ۱).

آزمون‌های مکانیکی فرآورده لایه‌ای

جهت دستیابی به خواص مکانیکی، پس از گذشت ۱۰ روز از ساخت فرآورده لایه‌ای صنوبر برای پلیمر شدن کامل چسب، نمونه‌ها با توجه به استانداردهای مربوط به آزمون‌های مکانیکی، اندازه بری و آماده‌سازی شدند. تمامی آزمون‌های مکانیکی به تعداد سه تکرار انجام گرفت. آزمون‌های مکانیکی به دو صورت، موازی با جهت الیاف لایه سطحی و عمود بر جهت الیاف لایه سطحی انجام شدند. مشخصات آزمون‌های مکانیکی و تصاویر مربوط به آن‌ها به ترتیب در جدول ۲ و شکل ۲ آمده است.

روابط ۱ و ۲ مربوط به آزمون خمش

$$I = \frac{L^3 \times P}{48 \times \Delta} \qquad (۱)$$

که در آن E= مدول الاستیسیته MPa، I= ممان اینرسی mm^4، P= نیرو در محدوده تناسب، Δ= جابجایی در محدوده تناسب، L= طول محدوده مورد آزمون

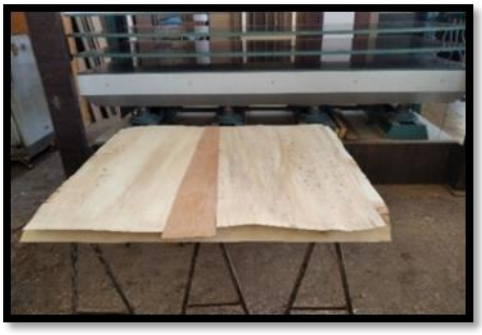
$$\frac{S_b \times I}{C} = \frac{PL}{4} \qquad (۲)$$

$S_b = I/C$ حداکثر لنگر MPa، P= نیرو در محدوده تناسب N، L= طول محدوده مورد آزمون mm، S_b= مدول گسیختگی MPa

الف) تهیه لایه توسط دستگاه لوله‌بر

ب) ساخت تخته لایه

ج) کناره بری تخته لایه برای ساخت فرآورده لایه‌ای



د) ساخت فرآورده لایه‌ای صنوبر

ه) فرآورده لایه‌ای ساخته‌شده

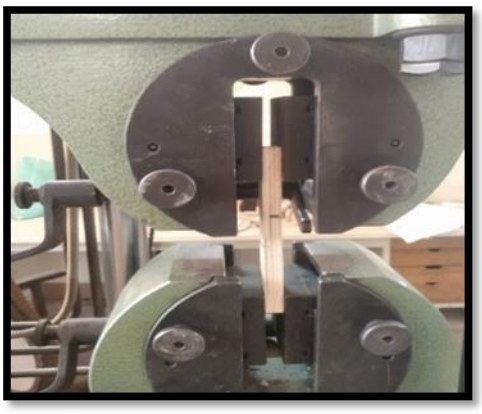
شکل ۱- مراحل ساخت تخته لایه و کامپوزیت موردنیاز در این تحقیق

جدول۲- مشخصات آزمون‌های مکانیکی انجام‌شده

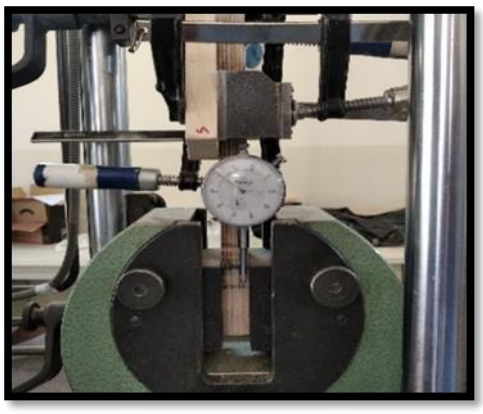
نوع آزمون	استاندارد	ابعاد نمونه‌های آزمونی (mm)
آزمون کشش برش خط چسب[1][۱۴]	ISO 12466-1*	۱۵۰×۲۵×۱۲
آزمون کشش[2]موازی با طول[۱۵]	ASTM D3500-14 Method A	۴۰۶×۶/۵×۲۱
آزمون فشار[3]موازی با طول[۱۶]	ASTM D3501-05a	۱۵۰×۲۵×۲۱
آزمون خمش[4]خارج از صفحه[۱۷]	ASTM D3043-00 Method A	۵۵۵×۵۰×۲۱
آزمون خمش در صفحه	ASTM D3043-00 Method A	۷۰۰×۵۰×۲۱

*= خط چسب‌های دو، چهار، شش و هشت آزمون شدند.

[1]Bonding Quality
[2]Tension
[3]Compression
[4]Flexure



الف) آزمون کشش برش خط چسب



ب) آزمون کشش

ج) آزمون فشار

د) آزمون خمش

شکل ۲- آزمون‌های مکانیکی فرآورده لایه‌ای ساخته‌شده

طراحی و ساخت اتصالات تیر باربر پله پیچ

. با توجه به این‌که اتصال در تیر باربر از نوع سربه‌سر می‌باشد، در مجموع پنج نوع اتصال سربه‌سر شامل اتصال انگشتی، دم چلچله، نیم و نیم، مورب و مورب اصلاح‌شده برای تیر باربر طراحی شدند. برای ساخت اتصال از دستگاه CNC[1] استفاده شد. تیر باربر ساخته‌شده بااتصال دارای طول ۷۰۰ میلی‌متر، عرض ۲۱ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر بود.

اتصال انگشتی

یکی از پرکاربردترین اتصالات سربه‌سر، اتصال انگشتی است. طرح شماتیک و نحوه مونتاژ اتصال انگشتی در تیر باربر در شکل شماره ۳ نمایش داده‌شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، برای جلوگیری از تمرکز تنش و سهولت در اعمال اتصال، در انتهای زبانه‌ها و کام‌ها برش به‌صورت دایره با شعاع ۳ میلی‌متر و به تعداد چهار عدد صورت گرفت.

اتصال دم چلچله

اتصال دم چلچه طراحی‌شده با چهار زبانه برای تیر باربر در شکل شماره ۳ نشان داده‌شده است. استفاده از اتصال دم چلچله برای موقعیت‌های سربه‌سر بسیار رایج است و بیشتر برای مواقعی که تیر تحت بار کشش موازی با طول قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود. با توجه به این‌که تعداد کام و زبانه در اتصال انگشتی و دم چلچله زیاد است، برای استفاده از این اتصالات برای تیر باربر نیاز به دقت بسیار بالایی می‌باشد.

[1]Computer Numerical Control

اتصال نیم و نیم

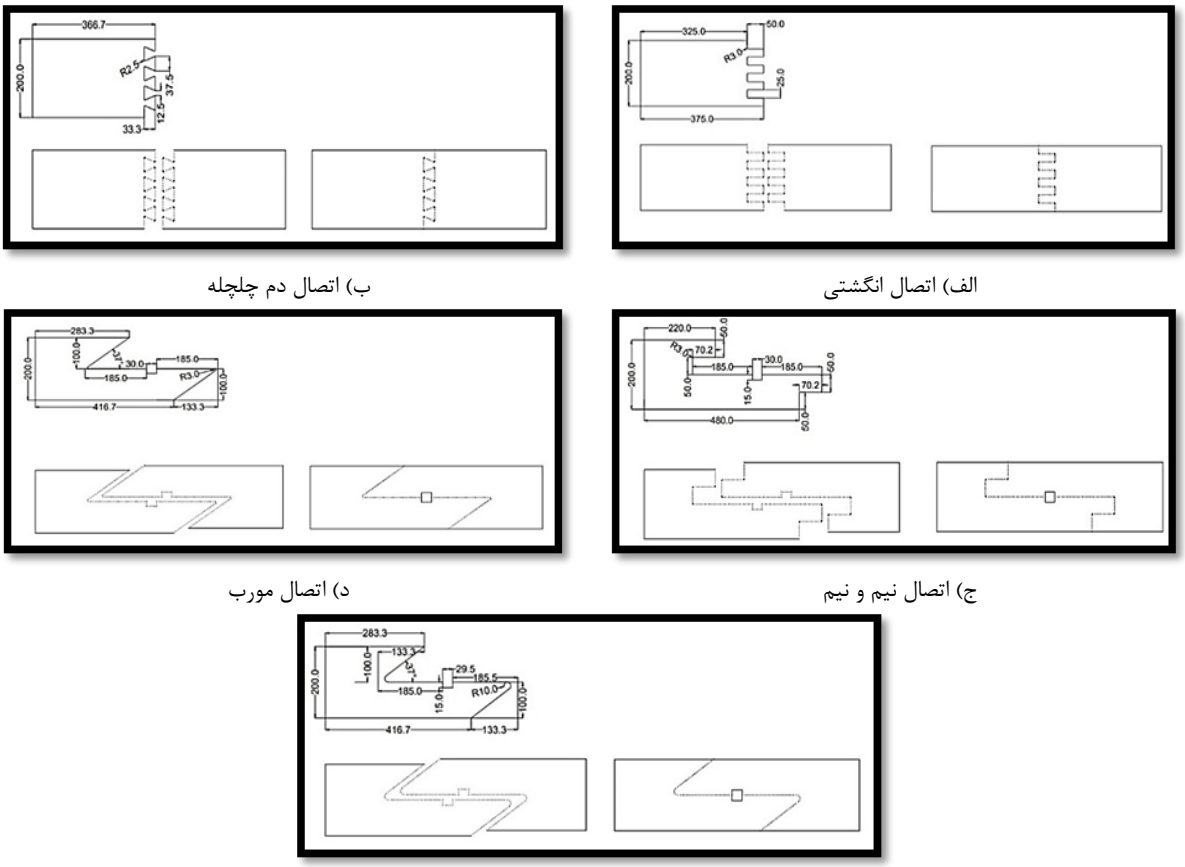
یکی دیگر از اتصالات طراحی‌شده برای تیر باربر، اتصال نیم و نیم نام‌گذاری شد. در این اتصال همانند شکل شماره ۳، دو عدد زبانه و یک عدد جای بلوک چوبی به ابعاد ۳۰ × ۳۰ میلی‌متر تعبیه شده است که موجب سهولت در مونتاژ اتصال می‌شود. بلوک چوبی به کار رفته از جنس گونه راش می‌باشد.

اتصال مورب

در اتصال مورب همانند اتصال نیم و نیم، یک زبانه و یک جای بلوک چوبی وجود دارد. در اتصال مورب زاویه زبانه با طول تیر، ۳۷ درجه می‌باشد که آن را از اتصال نیم و نیم با زاویه زبانه ۹۰ درجه متمایز می‌سازد. زاویه‌دار کردن زبانه در اتصال مورب باعث حذف دو گوشه در اتصال شده، و این موجب توزیع بهتر تنش در اتصال می‌گردد. همان‌گونه که در اتصال مورب طراحی‌شده در شکل ۳ مشخص است، نوک زبان مورب به‌صورت دایره با شعاع ۳ میلی‌متر برش داده‌شده است که باعث کمتر شدن تمرکز تنش در این قسمت می‌شود.

اتصال مورب اصلاح‌شده

همانطور که در شکل شماره ۳ نشان داده می‌شود، اتصال مورب اصلاح‌شده همان اتصال مورب است. چیزی که این اتصال را از اتصال مورب متمایز می‌سازد، شعاع دایره نوک زبانه است که از ۳ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر افزایش‌یافته و همچنین جای بلوک چوبی ۰/۱ میلی‌متر با یکدیگر اختلاف پیداکرده است که باعث افزایش فشار در خط چسب موقع مونتاژ می‌گردد.



الف) اتصال انگشتی

ب) اتصال دم چلچله

ج) اتصال نیم و نیم

د) اتصال مورب

ه) اتصال مورب اصلاح‌شده

شکل ۳- طرح شماتیک اتصال‌های طراحی‌شده تیر باربر

ساخت اتصال تیر باربر

برای چسباندن اتصالات در تیر باربر از چسب پلی‌اورتان ML518 و هاردنر HA418 استفاده شد (شکل ۴).

نمونه شاهد

به طور معمول ساخت تیر باربر پله پیچ به‌صورت لایه‌ای و بدون اتصال انجام می‌شود و برای رسیدن به طول موردنظر، اتصال سربه‌سر در لایه‌های مختلف با آرایش نامتقارن صورت می‌گیرد. بنابراین برای مقایسه نتایج، تیر باربر بدون اتصال و چیدمان سربه‌سر نامتقارن در لایه‌های مختلف، تحت عنوان نمونه شاهد ساخته شد.

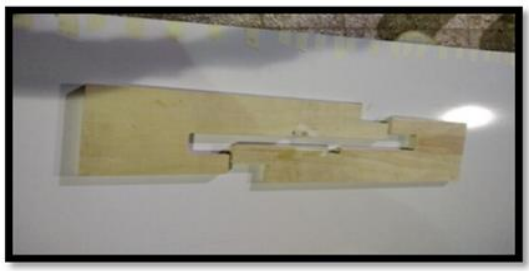
ارزیابی عملکرد مکانیکی تیر باربر پله پیچ

آزمون خمش در صفحه تیر باربر

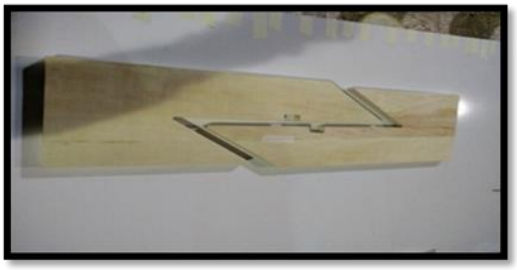
یک حالت مهم و متداول تغییر شکل ماده که دارای مثال‌های زیادی است، خمش تیرها است. انعکاس لنگر نشان می‌دهد که تیرهای لایه‌ای، اعضای ساختمانی چوب ماسیو و حتی فیبرها در کاغذ دستخوش نیروهای خمشی، پیچشی و بارهای محوری هستند. تئوری خمش برای طراحی سازه‌های ساده از چوب و تخته لایه و بسیاری از چندسازه دیگر، ضرورت دارد [۸].

الف) اتصال انگشتی

ب) اتصال دم چلچله



ج) اتصال نیم و نیم



د) اتصال مورب

شکل ۴- مونتاژ اتصالات تیر باربر

با توجه به اینکه بیشترین بار وارده بر تیرها در سازه‌های چوبی تحت عنوان بار خمشی می‌باشد، تیر باربر پله پیچ چوبی مورد آزمون خمش در صفحه قرار گرفت. لازم به ذکر است که آزمون خمش در صفحه تیر باربر با سه تکرار انجام شد. پس از گذشت ۱۰ روز و به حداکثر رسیدن مقاومت چسب، تیرهای باربر بر اساس استاندارد ASTM D3043-00 Method A مورد آزمون خمش در صفحه قرار گرفتند (شکل ۵). نتایج حاصل از آزمون خمش در صفحه تیر باربر بر اساس آنالیز واریانس یک‌طرفه و توسط نرم‌افزار مینی‌تب بررسی شدند.

شکل ۵- تیر باربر تحت آزمون خمش در صفحه

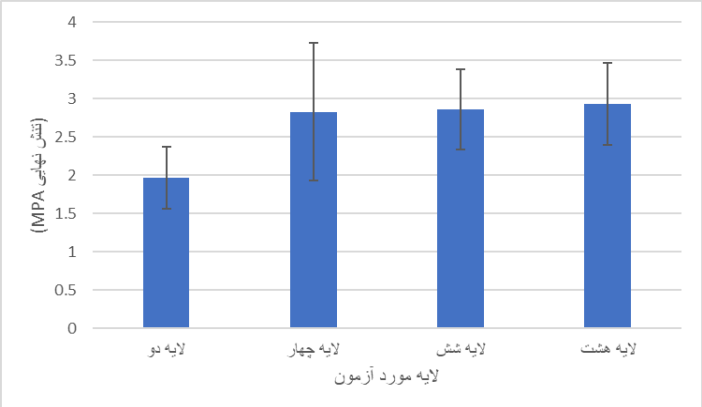
نتایج و بحث

در جدول شماره ۳ نتایج حاصل از آزمون کیفیت اتصال تحت استاندارد ISO 12466-1 آمده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده است (جدول ۳ و شکل ۶). با توجه به قابل قبول بودن کیفیت اتصال بر اساس استاندارد EN 314-2 برای مقادیر بالاتر از یک مگا پاسکال برای مقاومت برشی، کیفیت اتصال در تمامی لایه‌ها مطلوب می‌باشد.

جدول ۳ – میانگین و انحراف معیار مقاومت برشی خط چسب

لایه مورد آزمون	مقاومت برشی (MPa)	انحراف معیار
۲	۱/۹۶۳	۰/۴۰۶
۴	۲/۸۲۷	۰/۸۹۹
۶	۲/۸۵۹	۰/۵۲۳
۸	۲/۹۲۸	۰/۵۳۵

برابر شکل ۶، کیفیت اتصال بین لایه‌های صنوبر و چسب پلی‌اورتان مورد قبول بوده و با توجه به بررسی ظاهری نمونه‌ها بعد از انجام آزمون، به نظر می رسد سطح مشترک و فاز مشترک مناسبی بین چسب پلی‌اورتان و لایه‌های صنوبر وجود داشته است (شکل ۷).



شکل ۶- آزمون کشش برش خط چسب

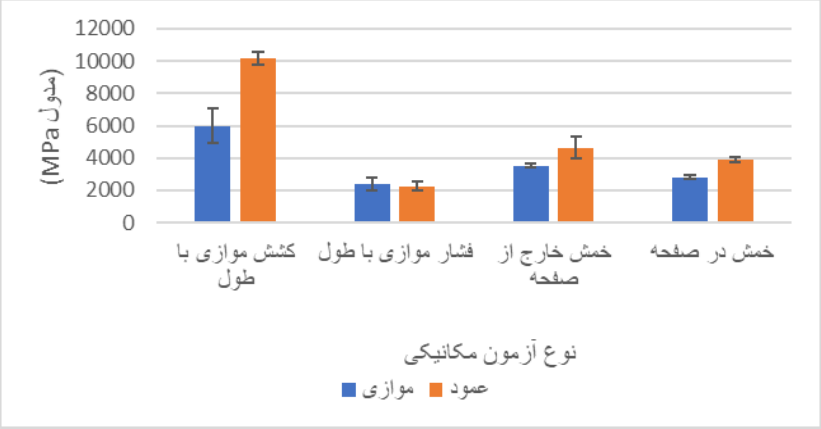
شکل ۷- جدا شدن خط چسب تحت بار کشش برش

در جدول ۴ مقادیر میانگین و انحراف معیار مدول‌ها و مقاومت‌های مربوط به آزمون‌های مکانیکی چندسازه ساخته‌شده آمده است. در نتایج به‌دست‌آمده برای خمش خارج از صفحه و در صفحه منظور از مقاومت، مدول گسیختگی است.

جدول ۴ – نتایج حاصل از آزمون‌های مکانیکی فرآورده ساخته‌شده

نوع آزمون	جهت لایه سطحی	(MPa) MOR	(MPa) MOE
کشش موازی با طول	موازی	۳۶/۳۶	۵۹۷۷
		(۴/۱۹)	(۱۰۸۱)
	عمود	۵۴/۲۲	۱۰۱۶۲
		(۵/۰۷)	(۴۱۶)
فشار موازی با طول	موازی	۱۶/۳۱	۲۳۶۷
		(۱/۹۵)	(۳۹۸)
	عمود	۲۴/۳۵۶	۲۲۵۹
		(۱/۰۰۱)	(۲۶۴)
خمش خارج از صفحه	موازی	۳۹/۵۱	۳۵۳۴/۶
		(۰/۰۰)	(۱۰۰/۴)
	عمود	۵۸/۵۲	۴۶۲۸
		(۲/۱)	(۶۸۵)
خمش در صفحه	موازی	۳۵/۴۲۸	۲۸۰۲
		(۰/۹۹)	(۱۲۲/۷)
	عمود	۵۰	۳۹۰۰
		(۱/۷۸)	(۱۹۱)

شکل ۸ تأثیر جهت لایه سطحی بر نتیجه آزمون‌های مکانیکی فرآورده لایه‌ای را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده‌شده است با تغییر جهت الیاف لایه-های سطحی از حالت موازی به حالت عمود با طول فرآورده، مدول‌های محاسبه شده افزایش‌یافته است. تغییر زاویه لایه‌های سطحی از حالت موازی به حالت عمود موجب موازی شدن زاویه لایه‌های مرکزی با طول آزمونه‌ها می‌شود. با توجه به بیشتر بودن ضخامت لایه‌های مرکزی و موازی شدن با جهت توزیع نیرو، مدول‌ها نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۸- تأثیر جهت لایه سطحی بر مدول‌های

فرآورده لایه‌ای

شکل ۹ مدهای شکست آزمون‌های مکانیکی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است، مد شکست در آزمون کشش موازی با طول (الف) از نوع کشش تراشه وار، در آزمون فشار موازی با طول (ب) از نوع نورد شدن، در آزمون خمش خارج از صفحه (ج) از نوع تراشه‌وار و در آزمون خمش در صفحه (ه) از نوع ترد می‌باشد.

الف) آزمون کشش موازی با طول

ب) آزمون فشار موازی با طول

ج) آزمون خمش خارج از صفحه

د) آزمون خمش در صفحه

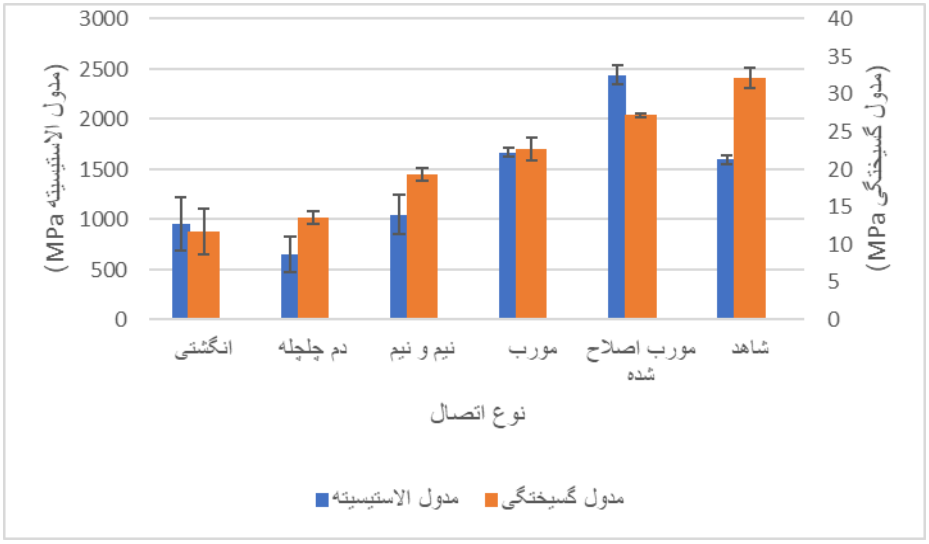
شکل ۹- مدهای شکست آزمون‌های مکانیکی

با توجه به جدول شماره ۵ نتایج آزمون خمش در صفحه مربوط به اتصال دم چلچله، نشان داد نیروی حد تناسب و مدول الاستیسیته در آن نسبت به نمونه شاهد کمتر می‌باشد، در حالی که مقدار جابجایی در محدوده الاستیک بسیار نزدیک به نمونه شاهد است. نیروی حد تناسب، مدول الاستیسیته و همچنین جابجایی در محدوده الاستیک در تیر باربر بااتصال انگشتی نسبت به نمونه شاهد کمتر بود، در حالی که نیروی حد تناسب و مدول الاستیسیته اتصال انگشتی نسبت به تیر باربر بااتصال دم چلچله بیشتر بود. نیروی حد تناسب و مدول الاستیسیته اتصال نیم و نیم از نمونه شاهد کمتر و از اتصال‌های انگشتی و دم چلچله بیشتر بود. همچنین جابجایی در محدوده الاستیک در اتصال نیم و نیم نسبت به نمونه شاهد کمتر بود. نیروی حد تناسب تحت آزمون خمش در صفحه در اتصال مورب نسبت به نمونه شاهد کمتر ولی مدول الاستیسیته بیشتر به دست آمد، که دلیل آن را می‌توان کمتر بودن جابجایی محدوده الاستیک بیان کرد. نیروی حد تناسب از N ۱۹۰۰۰ در اتصال مورب به N ۲۳۲۶۶ در اتصال مورب اصلاح‌شده رسید. همچنین مدول الاستیسیته در اتصال مورب اصلاح‌شده با MPa ۲۴۴۰/۸۴۷ نسبت به اتصال مورب با مدول MPa ۱۶۶۹/۲۶۷، تقریباً MPa ۷۷۰ افزایش داشت. در حالی که جابجایی در محدوده الاستیک در اتصال مورب اصلاح‌شده نسبت به اتصال مورب سیر نزولی در پی داشته است.

جدول ۵ – نتایج حاصل از آزمون خمش در صفحه برای اتصال تیر باربر

نوع اتصال	نیروی حد تناسب (N)	نیروی نهایی (N)	جابجایی حد تناسب (mm)	جابجایی نهایی(mm)	مدول الاستیسیته (MPa)	مدول گسیختگی (MPa)
انگشتی	۹۸۳۳	۱۱۰۰۰	۳/۴	۵/۴	۹۵۶/۶۳۲ (۲۶۵)	۱۱/۷۹ (۳/۰۴)
دم چلچله	۱۰۳۳۳	۱۲۶۳۳	۵/۳۶	۹/۶۶	۶۵۲/۴۷۸ (۱۷۵)	۱۳/۵۳۸ (۰/۸۶۵)
نیم و نیم	۱۴۸۳۳	۱۸۰۳۳	۴/۴	۷/۶	۱۰۴۷/۱۶۸ (۱۹۸)	۱۹/۳۲۱ (۰/۸۰۵)
مورب	۱۹۰۰۰	۲۱۱۳۳	۳/۶۶	۸/۸۶	۱۶۶۹/۲۶۷ (۴۶/۸۱۳)	۲۲/۶۴۳ (۱/۵۴۷)
مورب اصلاح‌شده	۲۳۲ ۶۶	۲۵۳۳۳	۳/۰۶	۴/۱۶	۲۴۴۰/۸۴۷ (۹۱)	۲۷/۱۶۶ (۰/۲۶۸)
شاهد	۲۵۶۶۶	۳۰۰۰۰	۵/۱۶	۶/۵	۱۵۹۸/۳۷۵ (۴۵/۹)	۳۲/۱۴۲ (۱/۴۱۸)

همان‌گونه که در شکل شماره ۱۰ قابل‌مشاهده است، مدول الاستیسیته مربوط به اتصال مورب اصلاح‌شده و اتصال مورب بیشتر از نمونه شاهد و کمترین مدول الاستیسیته مربوط به اتصال دم چلچله و انگشتی می‌باشد. همچنین بیشترین مدول گسیختگی به‌دست‌آمده مربوط به نمونه شاهد و کمترین مدول گسیختگی برای تیر باربر بااتصال انگشتی محاسبه شده است.



شکل ۱۰- مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی تحت آزمون خمش در صفحه تیر باربر

جدول شماره ۶ نتایج حاصل از آنالیز واریانس یک-طرفه مدول الاستیسیته خمشی و مدول گسیختگی تیر باربر را نشان می‌دهد. نتایج آنالیز واریانس یک‌طرفه در سطح ۱ درصد بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین مدول الاستیسیته خمشی و مدول گسیختگی تیرهای باربر در آزمون خمش در صفحه بوده است.

جدول ۶- نتایج حاصل از آنالیز واریانس یک‌طرفه مدول الاستیسیته خمشی و مدول گسیختگی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		مدول الاستیسیته	مدول گسیختگی
نوع اتصال	۵	۱۲۱۹۳۸۹**	۱۸۴/۹۳۳**
خطا	۱۲	۲۵۵۹۶	۲/۵۱۷
کل	۱۷		

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در شکل شماره ۱۱ می-توان اظهار داشت، در آزمون خمش در صفحه اختلاف میانگین مدول الاستیسیته خمشی بین تیر باربر بااتصال دم چلچله و انگشتی، نیم و نیم و انگشتی، مورب و شاهد معنی‌دار نمی‌باشد.

با توجه به نتایج حاصل از مقایسات زوجی توکی برای تیر باربر تحت آزمون خمش در (صفحه شکل ۱۲)، اختلاف میانگین مدول گسیختگی بین تیر باربر بااتصال مورب و نیم و نیم، دم چلچله و انگشتی معنی‌دار نمی-باشد.

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

نوع‌اتصال	N	Mean	Grouping
مورب اصلاح‌شده	3	2440.8	A
مورب	3	1669.3	B
شاهد	3	1598.4	B
نیم ونیم	3	1114	C
انگشتی	3	957	C D
دم‌چلچله	3	652	D

Means that do not share a letter are significantly different.

شکل ۱۱- مقایسات زوجی مدول الاستیسیته تیر باربر به روش توکی

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

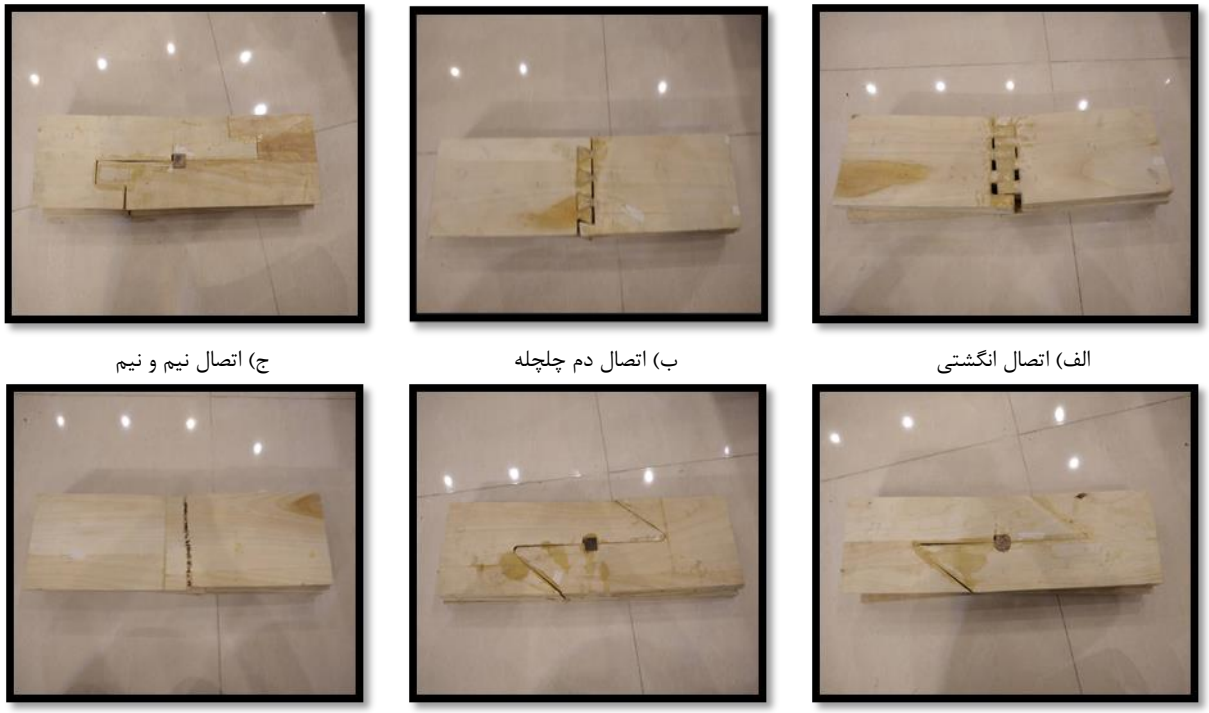
نوع‌اتصال	N	Mean	Grouping
شاهد	3	32.142	A
مورب اصلاح‌شده	3	27.166	B
مورب	3	22.643	C
نیم ونیم	3	19.321	C
دم‌چلچله	3	13.538	D
انگشتی	3	11.79	D

Means that do not share a letter are significantly different.

شکل ۱۲- مقایسات زوجی مدول گسیختگی تیر باربر به روش توکی

به‌طورمعمول ساختن تیر باربر پله پیچ همانند نمونه شاهد می‌باشد و برای افزایش طول از اتصال سربه‌سر ساده و آرایش نامتقارن در لایه‌ها استفاده می‌شود. همچنین لازم به ذکر است ساختن تیر باربر پله پیچ چوبی مانند نمونه شاهد بسیار بزرگ و به ابعاد کل پله می‌باشد که موجب افزایش زمان مونتاژ و کاهش مقاومت چسب می‌شود. استفاده از اتصال برای ساختن تیر باربر و تبدیل آن به قطعات کوچک‌تر سرعت و دقت فرآیند ساخت تیر باربر که یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر اتصالات چسبی است را افزایش می‌دهد. با توجه به این‌که ابعاد تیرهای باربر مورد آزمون خمش بزرگ نبوده‌اند و در واقعیت این‌گونه نیست، می‌توان استنباط کرد که در ابعاد واقعی مدول گسیختگی تیر باربر ساخته‌شده مثل نمونه شاهد نسبت به تیر باربر بااتصال مورب اصلاح‌شده که ابعاد کوچک‌تری دارد، پایین‌تر می‌باشد. بنابراین ساخت تیر باربر بااتصال مورب اصلاح‌شده نسبت به نمونه شاهد ترجیح داده می‌شود. تنها تفاوت اتصال مورب اصلاح‌شده نسبت به اتصال مورب، افزایش شعاع نوک زبانه و کنج داخل کام از ۳ به ۱۰ میلی‌متر بوده است. به نظر می‌رسد با افزایش شعاع در نوک زبانه و کنج داخل کام، توزیع تنش به حد چشمگیری افزایش و موجب بالا رفتن تحمل زیر بار و مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی گشته است. لازم به ذکر است که به دلیل زاویه‌دار بودن زبانه و کام در اتصال مورب و مورب اصلاح‌شده، برش و مونتاژ این اتصال‌ها نسبت به دیگر اتصالات طراحی‌شده بسیار آسان‌تر و سطوح درگیر کام و زبانه بیشتر تحت فشار قرار گرفته و فاصله بین سطوح درگیر در اتصال را کمتر کرده و موجب بهتر شدن توزیع تنش در این محدوده شده است. جابجایی جای بلوک چوبی در اتصال مورب اصلاح‌شده نسبت به اتصال مورب، تأثیر بسزایی در تحت فشار قرار دادن سطوح مشترک در مونتاژ اتصال را در پی داشت.

با توجه به شکل شماره ۱۳ مد شکست در تیر باربر بااتصال انگشتی (الف) در زبانه‌های بالای تار خنثی (فشار) به‌صورت تلفیقی ترد و تراشه وار و در زبانه‌های پایین تار خنثی (کشش) به‌صورت ساده از یکدیگر گسسته شده است. در تیر باربر بااتصال دم چلچله (ب) مد شکست در کل ارتفاع تیر از نوع ترد و تراشه وار در انتهای زبانه‌ها صورت گرفته که دلیل آن را می‌توان باریک شدن زبانه در انتهای اتصال دم چلچله بیان کرد. مد شکست تیر باربر بااتصال نیم و نیم (ج) در بالای تار خنثی از نوع فشاری و در پایین تار خنثی به‌صورت تراشه وار دیده می‌شود. در تیر بااتصال مورب و مورب اصلاح‌شده (د، ه) نوع شکست در بالای تار خنثی تراشه وار و در پایین تار خنثی جدا شدن اتصال اتفاق افتاده است. در نمونه شاهد مد شکست در کل ارتفاع تیر از نوع ترد می‌باشد.



الف) اتصال انگشتی ب) اتصال دم چلچله ج) اتصال نیم و نیم

د) اتصال مورب ه) اتصال مورب اصلاح‌شده ی) نمونه شاهد

شکل ۱۳- مدهای شکست در تیر باربر

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه ساخت تیر باربر پله پیچ چوبی با پرس گرم مقدور نمی‌باشد، استفاده از چسب پلی‌اورتان برای ساخت تیر باربر ساخته‌شده از فرآورده لایه‌ای صنوبر انتخاب مناسبی بود. نتایج این تحقیق نشان داد که می‌توان از فرآورده لایه‌ای صنوبر به‌طور موفقیت‌آمیزی برای ساخت تیر باربر لایه‌ای پله پیچ استفاده کرد. یکی از مهم‌ترین اهداف این تحقیق از طراحی اتصال در تیر باربر، تبدیل تیر باربر به قطعات کوچک‌تر برای دستیابی به فرآیند ساخت آسان، بالا رفتن دقت و سرعت، استفاده از قطعات کوچک‌تر و مونتاژ آسان‌تر بوده است، بنابراین با توجه به اینکه وجود اتصال موجب تبدیل تیر باربر به المان‌های کوچک متصل به یکدیگر شد، تیر باربر بااتصال مورب اصلاح‌شده جایگزین مناسبی به‌جای تیر باربر بدون اتصال می‌باشد.

سپاسگزاری

این تحقیق در قالب رساله دکتری با حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران به شماره گرنت ۲۹۹۷۱/۰۶/۱۴ و حمایت‌های مالی و عملیاتی شرکت صنایع چوب نقش‌جهان اصفهان انجام شد. آزمون های فیزیکی و مکانیکی بر روی نمونه ها نیز در آزمایشگاه فیزیک و مکانیک چوب و فرآورده های چوبی، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران انجام شده است.

منابع

[1] Kazemi Najafi, S., Maleki, S., Ebrahimi, Gh. and Ghofrani, M., 2017. Determination of withdrawal resistance of staple joints constructed with various members of upholstered furniture. Iranian Journal of wood and paper industries, 8(1):95-108. (In Persian).

[2] Hammer, O., 2016. The perfect shape: Spiral stories, Copernicus, Göttingen, Germany, 258p.

[3] Jalili, A. and Ghasemi, F., 2001. Iran's strategy of sustainable supply of lignocelluloses materials. Research Institute of Forests and Rangelands press. Tehran, Iran.168p. (In Persian).

[4] Mehdinia, M., Tabarsa, T. and Sadeghian, M., 2012. Investigation the Plywood Manufacturing of Paulownia (paulownia tomentosa) with Urea and Phenol-Formaldehyde Adhesives. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 2(1), 81-89. (in Persian)

[5] Somchai, V., 1989. Strength of tenon and dowel in teak (Tectona grandis Linn. f.) Bangkok, 106p.

[6] Kasal, A., 2006. Determination of the strength of various sofa frames with finite element analysis. Gazi University Journal Science, 19(4): 191-203.

[7] Bahmani, M., Ebrahimi, G. and Veysi, J., 2010. Design of experimental model for predicting ultimate bending strength dowel joint in medium density fiber (MDF). Journal of forest and wood products (JFWP) (iranian journal of natural resources) 62 (4): 8. (In Persian)

[8] Ebrahimi, G., 2007. Engineering design of furniture structure. Tehran university publication, 491 pp. (In Persian).

[9] Eckelman, C. A., 2004. Engineering Design of furniture. Purdue Uni.UsA. Chap 6.

[10] Rostampour-Haftkhani, A., sharari, M., arabi, M. and Hajializadeh, F., 2022. Improvement of the bending moment capacity of mitered MDF frame under diagonal tension by using of the densified poplar dowel. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 12(4), 561-573. (in persian)

[11] Standard test methods for Plywood-Bonding quality, Annual Book of ISO Standard, 12466-1, 2007.

[12] Standard test methods for structural panels in tension, Annual Book of ASTM Standard, D3500-14, 2014.

[13] Standard test methods for Wood-Based structural panels in compression, Annual Book of ASTM Standard, D3501-05a, 2011.

[14] Standard test methods for structural panels in flacture, Annual Book of ASTM Standard, D3046-00, 2011.

Designing, manufacturing and mechanical investigating of joint in laminated stringer of spiral stairs from poplar wood

Abstract

This research was carried out with the aim of making a stringer of wooden spiral stairs using laminated wood product from poplar wood and achieving an optimal connection to convert the stringer to smaller dimensions in order to achieve a suitable design for the construction of wooden spiral stairs. For this purpose, 3-layer plywood of poplar was made using two-part polyurethane glue with a surface layer thickness of 0.5 mm and a middle layer of 2 mm in dimensions of 120 x 120 cm, and then the produced plywood panels were used to make the desired laminated product. Mechanical properties and failure modes of the product were investigated. Then, five types of end to end joints including finger joint, tail joint, half and half, diagonal and modified diagonal joints were designed for the stringer of the wooden spiral stairs and made in the dimensions of 65, 20, 2.1 cm in length, width and thickness, respectively and subjected to out of plane bending test. Modulus of elasticity of the stringer in the in-plane bending test was obtained as 1598 MPa, 2441 MPa, 1669 MPa, 1047 MPa, 957 MPa and 652 MPa, respectively for control sample, modified diagonal joint, diagonal joint half-and-half joint, finger joint, and tail joint. In addition, modulus of rupture of the stringer in the in-plane bending test was obtained as 32 MPa, 27 MPa, 23 MPa, 19 MPa, 12 MPa and 13 MPa, respectively for control sample, modified diagonal joint, diagonal joint, half-and-half joint, finger joint, and tail joint. The result of one- way ANOVA showed that there is a significant difference among bending strength and modulus of elasticity of the stringers at 99% confidence interval ($\alpha \leq 0.01$). According to the results, the stringer with modified diagonal joint would be the most suitable alternative in wooden spiral stair.

Keywords: Poplar wood, spiral stair, stringer, end to end joints, laminated product, mechanical properties.

F. Radfar[1*]
H. R. Hosseinabadi[2]
P. Moradpour[3]
K. Pourtahmasi[4]

[1] PhD student, Department of Wood and Paper Science and technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

[2] Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

[3] Assistant Professor, Department of Wood and Paper Science and technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

[4] Professor, Department of Wood and Paper Science and technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

Corresponding author:
radfarfarokh69@gmail.com

Received: 2022/10/08
Accepted: 2022/11/23