

تأثیر تغییرات ابعادی جان و بال در تیر I شکل بر روی مقاومت خمشی آن

چکیده

این بررسی اثرات نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان در سه سطح (۱:۲، ۳/۵، ۱/۵ و ۲:۵)، همینطور نسبت ضخامت به ارتفاع جان در سه سطح (۲:۵، ۳/۵، ۰/۵ و ۵:۰/۵) و عرض بال در سه سطح (۳/۸، ۴/۶ سانتیمتر) به عنوان متغیرهای مستقل بر روی بعضی از خواص مکانیکی نظیر مدول گسیختگی (MOR) و مدول الاستیسیته (MOE) تیرهای I شکل ساخته شده از چوب زبان گنجشک (*Fraxinus spp.*) را ارزیابی کرده است. برای این منظور، روش سطح پاسخ (RSM) برای ارزیابی اثرات متغیرهای مستقل بر روی MOR و MOE تیرهای I شکل بر اساس طرح محور چرخشی مرکب مرکزی (CCRD) با سه متغیر و سه سطح مورد استفاده قرار گرفت. در این ارزیابی، آزمون خمش مطابق استاندارد ASTM D-5055 انجام پذیرفت. معادله‌های مدل ریاضی توسط بهره‌گیری از برنامه شبیه‌ساز کامپیوتری به منظور یافتن اختلاف‌های معنی‌دار و تاثیرگذارترین متغیرها بدست آمد. بر اساس نتایج، مقادیر پیش‌بینی شده در تطابق با مقادیر بدست آمده بوده‌اند (مقدار R^2 برای MOR و MOE به ترتیب برابر ۰/۹۹ و ۰/۹۸). بررسی نشان داد که RSM می‌تواند به‌طور موثری در مدل‌سازی خواص خمشی تیر I شکل مورد استفاده قرار گیرد. معلوم گردید که همه متغیرهای مستقل اثر مستقیم و معنی‌دار بر روی پاسخ‌ها داشته‌اند، بنحوی که نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان، نسبت ضخامت به ارتفاع تیر و عرض بال در سطوح به ترتیب برابر با ۵:۲، ۵:۰/۵ و ۴/۶ مقادیر MOR و MOE را در حداکثر میزان قرار دادند. همزمان، بعضی از اثرات متقابل و مربع اثرات متغیرها نیز تاثیرات معنی‌داری داشته‌اند. بطور کلی، افزایش در نسبت ضخامت بال به ارتفاع، نسبت ضخامت به ارتفاع جان و عرض بال MOR و MOE تیرهای I شکل را افزایش داد. علاوه بر آن، نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان بیشترین تاثیر را بر روی مقاومت خمشی تیر داشت.

واژگان کلیدی: تیرهای I شکل، زبان گنجشک، مقاومت خمشی، روش سطح پاسخ.

مرتضی ناظریان^{۱*}

علیرضا رضائیان^۲

محمد شمسیان^۳

^۱ دانشیار گروه سامانه‌های زیستی، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه صنایع چوب و فرآورده های سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۳ دانشیار گروه صنایع چوب و فرآورده های سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

مسئول مکاتبات:

morteza17172000@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۴

در بالا و پایین که از ترکیب فرآورده هایی همچون فرآورده های لایه ایی نظیر تخته لایه، LVL، و نیز تخته تراشه جهت دار و گاه در ترکیب با چوب ماسیو ساخته می‌شوند

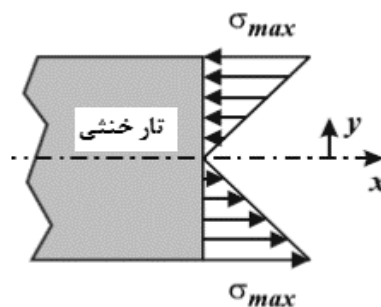
مقدمه

تیرهای مهندسی شده I شکل از جمله فرآورده‌های مهندسی شده چوبی هستند، با یک جان در مرکز و دو بال

به طول تیر که مسبب ایجاد پیچش های جانب می باشند توجه گردد [۴].

محاسبه تنش های خمشی و برشی و تعیین اندازه تیر با این پیش فرض انجام می شود که تیر در پهلوها حایل دارد و بنابراین ثبات جانبی آنها تامین خواهد شد زیرا تنش های خمشی که موازی محور طولی تیر و تنش های برشی که در جهت عمود بر محور طولی تیر ایجاد می شوند مسبب ایجاد کمانش جانبی خواهند شد [۵]. چوب در کشش عمود بر الیاف ضعیف است و روی همین اصل از تنش خمشی غیر موازی با محور طولی تیر باید اجتناب کرد [۶]. در تیرهای ماسیو خم شدن ممکن است حول محور ضعیف یا قوی اتفاق بیفتد. اما در حالت عام نصب تیر طوری است که خمش حول محور قوی تیر اتفاق خواهد افتاد که این حالت در تیرهای I شکل همیشه باید در محور قوی تیر باشد. خمش حول محور طولی تیر سبب توسعه تنش خمشی در جهت عمود بر الیاف آن خواهد شد. این ترتیب ایجاد تنش در اتصالات اعضای چوبی اتفاق می افتد [۷]. تنش خمشی در تیرها به دو صورت نمود دارد: حداکثر تنش فشاری در بالاترین نقطه تیر و حداکثر تنش کشش در پایین ترین نقطه تیر اتفاق می افتد (شکل ۱). این دو نوع تنش هر چه به مرکز تیر نزدیک تر می شود کاهش می یابد تا به نقطه مرکزی (تار خنثی) تیر می رسد [۷ و ۸].

[۱]. از دو منظر مزیت تیرهای I شکل را می توان مورد لحاظ قرار داد. اول بالا بودن مقاومت با توجه به سبکی وزن ساختمان و دوم سرعت در اجرا و ساخت ساختمان که منجر به کاهش هزینه و زمان می شود. علاوه بر آن، بدلیل وجود عیوب متمرکز نظیر شکافها، ترک ها و گره ها، ناهمگنی و محدودیت در برآورده کردن نیازهای طولی تیرها در چوب آلات ماسیو، باز طراحی و تبدیل چوب ماسیو به تیرهای I شکل می تواند به افزایش قابلیت کاربردی چوب منجر شود [۲]. اما در طی این تبدیل، فاکتورهایی نظیر کیفیت رزین اتصال دهنده جان به بال، ابعاد اجزای تشکیل دهنده تیر و غیره بر روی قابلیت های کاربردی تاثیر گذار هستند. هر چه قطر جان بیشتر شود، سختی و سفتی کل تیر افزایش می یابد. ولی این ازدیاد سختی به هیچ وجه با افزایش وزن تیر قابل مقایسه نیست. تیرهای I شکل با یک جان در مرکز و دو بال در بالا و پایین، تیری با مقطعی به شکل I به وجود می آورند به نحوی که با توجه به ابعاد بال و جان می توان نقطه بهینه ایی از ابعاد را برای تولید تیر با مقاومت خمشی حداکثری تولید نمود. [۳]. تیرهای I شکل با ساختار پیچیده ای که دارند تمامی مقاومت های مورد نیاز تیر را دارا می باشد بطوری که از یک طرف تنش برشی ایجاد شده بر روی تیر را جان تیر تحمل می کند و از طرف دیگر بارهای خمشی اعمال شده بر روی تیر را بال های تیر تحمل می کند، اما باید به تنشهایی که در نتیجه افزایش بیش از اندازه ارتفاع



شکل ۱- شمای توزیع تنش در طی آزمون خمش یک تیر I شکل

مستقیمی با نوع ماده به کار رفته در جان دارد. ظرفیت تحمل بار در تیر تحت تاثیر پارامترهای زیادی از جمله: ارتفاع مقطع بال، ارتفاع مقطع جان، ضخامت مقطع جان،

با اتصال بال و جان با هم، تیری با مقطع I شکل تشکیل می شود که می تواند جایگزین مناسبی برای چوب ماسیو باشد. تنش و بار در اطراف تیر از طریق چسب به اجزاء تیر منتقل می شود. ظرفیت تحمل بار تیر رابطه

نمود که سطحی که در معرض تنش بیشتری (کششی یا فشاری) قرار دارد را بواسطه تغییر در ابعاد اجزای تشکیل- دهنده تیر تقویت نمود. علاوه بر آن، تیرهای I شکل دارای مقاومت‌های برشی بالاتری نسبت به چوب ماسیو است و در صورت وجود عیب در چوب این عیب‌ها را در کل تیر پراکنده می‌کند و از ایجاد نقاط ضعیف جلوگیری می‌کند. از این رو، به منظور کاربرد چوب‌ها با کیفیت پایین و تبدیل آنها به ابعاد بزرگتر، همزمان کاهش وزن، اثرات فاکتورهای موثر بر مقاومت‌های تیرها همچون ضخامت بال، عرض بال، ضخامت و ارتفاع جان در این بررسی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

از یک طرف با توجه به شهره بودن مقاومت خمشی بسیار بالای چوب زبان گنجشک و از طرف دیگر صیانت از طبیعت و درخت، در این تحقیق از چوب درخت زبان گنجشک (*Fraxinus excelsior L.*) اما خشکیده از توابع مه‌ریز، استان یزد برای ساخت تیرهای I شکل استفاده شد. پس از استحصال، گرده بینه‌ها به کارگاه چوب بری انتقال یافت و به صورت الوار برش خورده و پس از چیدن در هوای آزاد به مدت سه ماه، در کارگاه برش با توجه به متغیرها مورد بررسی به ابعاد مورد نظر بریده شدند و مجدداً به مدت دو هفته در شرایط آزمایشگاه قرار گرفتند تا به رطوبت تعادل برسند. برش گرده بینه به گونه‌ای صورت گرفت که الوارهای به دست آمده در جهت شعاعی کامل برش خوردند (شکل ۲). طول و عرض تخته‌های مورد مصرف در جان و بال (با رطوبت تعادل ۸٪) نیز بر اساس متغیرهای مورد نظر در این بررسی انتخاب و بریده شدند (جدول ۲) به نحوی که نسبت‌های مورد نظر را برآورده نمایند. ضخامت جان نیز در این تحقیق ۵mm در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه هدف بررسی تنها اثر ابعادی تیر بر روی مقاومت خمشی تیر بوده است و بدلیل حذف تاثیر هر گونه خطا و ناپارامتری نظیر عدم فشار یکسان، تغییرات رطوبتی، گسیختگی در خط چسب و غیره از رزین گرما سخت اوره فرمالدهید (UF) برای اتصال اجزای تیر استفاده شد تا بتوان در طی ساخت کنترل کامل بر میزان فشار و حرارت داشت به طوری که در طی

عرض مقطع بال و محل بارگذاری بر روی تیر می‌باشد [۹].

مشاهده شده است که برای تیرهای با اتصال کنشکاف در بال، چنانچه ضخامت در جان تیر ۱۲ میلی‌متر و تغییر در ارتفاع مقطع تیر از ۲۲۵mm به ۴۹۵mm باشد، باعث سختی موثر و ظرفیت خمشی بالای تیر خواهد شد. همچنین با افزایش ارتفاع سطح مقطع، ظرفیت نهایی شکست در جان تیر و خط چسب افزایش می‌یابد. تحلیل اثر پارامترهایی از قبیل سختی نسبی اجزا و فاصله بین پانل‌های جان تیر نیز نشان داد که تمرکز تنش در منطقه اتصال جان به بال است [۱۰].

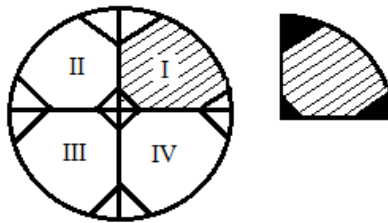
ابعاد و نسبت‌های طول دهانه به ارتفاع در تیر از فاکتورهایی است که می‌تواند خواص تیرها را تحت تاثیر قرار دهد. بر اساس بررسی‌های انجام شده مشخص گردیده است نسبت مناسب طول دهانه به ارتفاع مقطع در اکثر تیرها ۱:۱۵ باید باشد. برای این نسبت طول به ارتفاع بالا باید از بال‌های با کیفیت مناسب استفاده نمود [۱۱]. استفاده از کامپوزیت‌ها در تیر نسبت به چوب ماسیو، کم شدن مقاومت خمشی تیر را در پی دارد ولی مقاومت برشی این نوع فرآورده‌ها از چوب ماسیو بالاتر است [۱۱]. بررسی‌های بسیار گسترده‌ای در مورد امکان کاربرد انواع فرآورده‌های بر پایه چوب نظیر OSB، تخته لایه و غیره در تولید تیرهای I شکل صورت گرفته است، اما در تمامی این بررسی‌ها به نظر می‌رسد که اثرات نسبت‌های ابعادی اجزاء مختلف تشکیل دهنده تیر I شکل بر روی خواص آنها مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در طی خمش، تیرها تحت تنش همزمان کشش و فشار قرار می‌گیرند. با توجه به طبیعت چوب مقاومت کششی بر خلاف تیرهای فلزی بیشتر از فشاری می‌باشد. همچنین، اگر در نظر داشت که تیرهای I نوعی پانل ساندویچی هستند که در طی خمش عمده بار را رویه‌ها تحمل می‌کنند، افزایش یا کاهش ضخامت این پانل به شدت بر روی سفتی در خمش و نیز خصوصاً مقاومت خمشی به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد [۱۲]. از اینرو هر گونه تغییر در نسبت‌های ابعادی تیر می‌تواند مقاومت‌ها را بشدت تحت تاثیر قرار دهد و می‌توان تیر را طور طراحی نمود که اختلاف میزان مقاومت فشاری چوب را نسبت به مقاومت کششی تا حد معینی کاست و یا حداقل به نحوی تیر را طراحی

مشهد تهیه شد. مشخصات فنی این رزین در جدول ۱
ارایه شده است.

آزمون خمش بتوان مطمئن شد که گسیختگی در جان یا
بال رخ داده است و در خط چسب بدلیل اشکال در فرایند
چسبندگی رخ نداده است. این رزین از کارخانه چسب

جدول ۱- مشخصات فنی رزین UF و مصرفی

وزن مخصوص، gr/cm ³	ویسکوزیته، Cp	pH	مواد جامد، %	زمان ژله‌ای شدن، s
۱/۲۶	۳۵۰	۷	۶۳	۶۰



شکل ۲- نحوه برش و تهیه تخته از گرده بینه برای جان و بال تیر

اساس رعایت نسبت های مورد نظر که به عنوان متغیرهای
مورد بررسی در نظر گرفته شد، بریده شدند.

پس از برش، جان و بال به کارگاه پرس منتقل و طی
یک هفته به شرایط محیط (کلیما) رسیدند. مصرف رزین
اوره فرمالدئید برابر 100 g/m^2 و توسط قلم مو بر روی
سطوح اتصال کشیده شد. بال‌های تیر به صورت دو تیکه و
جدا از هم به دو طرف جان تیر پرس گردیدند. بدین
منظور، در پرس تخت مجموعه جان و بال‌ها قرار گرفتند،
به طوری که تیر مونتاژ شده به صورت افقی درون دستگاه
پرس قرار گرفت تا فشار و حرارت پرس بر دو ضخامت
بال‌های تیر به طور یکنواخت اعمال گردد.

برای ساخت تیر از یک پرس گرم هیدرولیکی (پرس
هیدرولیکی RANJBAR با قطر پیستون $20/06 \text{ cm}$ و
ابعاد مفید صفحات $72 \times 63 \text{ cm}$ با سیستم حرارتی
الکتریکی استفاده شد. تیرها پس از ساخت به مدت یک
هفته در محیط آزمایشگاه قرار گرفت تا رطوبت نمونه‌ها به
حد تعادل با محیط تحت آزمون قرار گیرد. پس از آن،
نمونه‌ها در دستگاه آزمون مکانیکی تحت آزمون خمش
قرار داده شده (شکل ۳) و مقادیر مدول الاستیسیته
(MOE) و مدول گسیختگی (MOR) محاسبه شد. برای
این منظور، پس از ثبت میزان بار حد تناسب، خیز و بار
گسیختگی و محاسبه ممان اینرسی تیر بر اساس فرمول-
های (۴-۱) [۱۲]، MOE و MOR محاسبه گردید.

متغیر های مستقل مورد بررسی شامل: ۱- نسبت
ضخامت بال به ارتفاع جان در سه سطح (۱، ۱/۵، ۲)؛ ۲-
نسبت ضخامت به ارتفاع در جان تیر در سه سطح (۲،
۳/۵، ۵)؛ ۳- عرض بال در سه سطح (۳، ۳/۸، ۴/۶ سانتی-
متر) بوده است. دیگر شرایط ساخت نظیر درجه حرارت
پرس (160°C) و به مدت 1200 s (تا تکمیل انعقاد
رزین)، مقدار فشار پرس اعمال شده بر روی محصول به
ازاء واحد سطح (10 kg/cm^2) و غیره ثابت در نظر گرفته
شده اند. مدت زمان پرس با انجام آزمون و خطا برای
اطمینان از رسیدن حرارت به خط چسب و انعقاد کامل آن
تعیین گردید. بطور کلی دو متد اصلی برای اتصال جان به
بال در نظر گرفته می شود: اتصال شیار دار که جان در
کنشکاف ایجاد شده در بال قرار می گیرد و اتصال ساده
که بال تیر به صورت جدا و در دو طرف جان قرار می
گیرند. در این بررسی به دلیل حذف خطاها نظیر احتمال
ایجاد فاصله و عدم تماس مناسب بین دیواره شکاف با دو
طرف جان و نیز کم بودن ضخامت جان که خطر خرد
شدن در زیر پرس می رفت، از روش ساده استفاده گردید.
ضخامت جان تیر برابر 5 mm و با سه سطح ارتفاع (عرض)
۳۵، ۵۰ و 90 mm بر مبنای رعایت نسبت های ثابت
ارتفاع به طول دهانه تیر برابر ۱:۱۶ (بر مبنای سطوح
متغیر مربوطه) بریده شدند. ضخامت و عرض بال‌ها نیز بر



شکل ۳- آزمون تعیین مقاومت خمشی تیر I شکل

کشش از تار خنثی که برابر نصف ارتفاع در سطح مقطع تیر می باشد ($d/2$) رخ خواهد داد، از اینرو:

$$I = \frac{w(d-2f)^3}{12} + 2 \left(\frac{bf^3}{12} + bf \left(\frac{d}{2} - \frac{f}{2} \right) \right) \quad (1)$$

تحلیل آماری نتایج

پس از انجام آزمون خمش، نتایج به دست آمده در قالب طرح کامل تصادفی تحت آزمایش کسر فاکتوریل و با کمک روش سطح پاسخ (RSM) مورد ارزیابی و تحلیل آماری قرار گرفتند. از این روش برای توسعه مدل ریاضی به صورت معادلات رگرسیون چند متغیره برای مدول گسیختگی (MOR) و مدول الاستیسیته (MOE) تیرهای ساخته شده مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از روش سطح پاسخ، متغیرهای مستقل به عنوان تابعی از یک مدل ریاضی مد نظر قرار می گیرند. این مدل ریاضی به صورت معادله کلی چند جمله ای درجه دوم (رگرسیون) برای سطح پاسخ y نشان داده شده است [۱۳].

(۵)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \epsilon.$$

تمام ضرایب محور مرکزی مکعب با استفاده از بسته نرم افزار آماری مینی تب^۱ طراحی شده به دست آمد. پس از تعیین معنی داری ضرایب (در سطح اعتماد ۹۵ درصد)، مدل نهایی تنها با استفاده از این ضرایب [۱۴] توصیف شد. برای سه متغیر، توصیه می شود از آزمون شش مرکزی استفاده شود [۱۵]. از این رو تعداد کل آزمون مورد نیاز برای سه متغیر مستقل (نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان، نسبت ضخامت به ارتفاع در جان تیر و عرض بال) بر اساس معادله $k + (n \times 2) + 2^n$ (۶) که n مساوی تعداد

$$M_{max} = \frac{PL}{4} \quad (2)$$

I ممان اینرسی تیر، w عرض بال بالایی تیر، d ارتفاع تیر، f ضخامت بال تیر و b عرض بال پایینی تیر می باشد. M_{max} - لنگر خمش حداکثر، P - نیروی بارگذاری متمرکز اعمال شده در وسط تیر و L - فاصله دو تکیه گاه از هم می باشد.

با توجه به اینکه حداکثر لنگر خمشی در وسط تیر ساده با بارگذاری متمرکز سه نقطه در فاصله یکسان بارگذاری از دو انتهای تیر استقرار یافته بر روی تکیه گاه ها می باشد، از رابطه (۲) حداکثر لنگر خمشی تیر تعیین شد. در بارگذاری متمرکز سه نقطه بر روی تیرهای I شکل، حداکثر تنش در فاصله ای برابر با نصف طول دهانه تیر ($L/2$) و در بالاترین و پایین ترین سطح تحت فشار و

$$MOR = \frac{M_{max} \cdot y_{max}}{I} = \frac{PL}{4I} \times \frac{d}{2} = \frac{PLd}{8I} \quad (3)$$

مقدار مدول الاستیسیته نیز بر اساس فرمول (۴) [۱۲] تعیین می شود، که در آن P مقدار بار اعمال شده بر روی تیر، L فاصله دو تکیه گاه (طول دهانه)، δ خیز تیر و I نیز ممان اینرسی می باشد:

$$MOE = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I} \quad (4)$$

^۱Minitab

آمد. متغیرهای مستقل به همراه کد و سطوح آن‌ها و تعداد ترکیب شرایط استفاده شده به ترتیب در جداول ۲ و ۳ و ۳ ارائه شده است.

متغیرها و k تعداد تکرار در مرکز مکعب می‌باشد، برابر $20 = 6 + (3 \times 2) + 3^3$ می‌باشد [۱۵ و ۱۶]. پس از تجزیه و تحلیل رگرسیون، سطوح خطاهای پاسخ داده شده به دست

جدول ۲- کد و سطوح واقعی متغیرهای در نظر گرفته برای طرح مورد استفاده با روش سطح پاسخ (RSM)

کدگذاری سطوح متغیرها			واحد	متغیرها
۱	۰	-۱		
۲:۵	۱/۵:۳/۵	۱:۲	mm/mm	ضخامت بال به ارتفاع جان، (X ₁)
۰/۵:۵	۰/۵:۳/۵	۰/۵:۲	mm/mm	ضخامت به ارتفاع در جان تیر، (X ₂)
۴/۶	۳/۸	۳	mm	عرض بال، (X ₃)

و MOE را داراست. لازم به ذکر است که با توجه به میزان F جدول ۵ و ۶ برای متغیر x₃ که اگر چه معنی دار است، اما مقدار آن بسیار اندک می باشد (حدود ۵۰ برای MOR و ۱۱ برای MOE). شاید کاهش در مقدار MOR و MOE به موازات افزایش عرض بال در نتیجه خطاهای ناپیدا باشد که می توانند باعث کماتش جانبی آدر طی آزمون شوند و پاسخ را تحت تأثیر قرار دهند. همانگونه که در شکل ۴- الف، ج، ۴- الف و ۵- ج نیز مشاهده می شود میزان تأثیر گذاری عرض بال خیلی اندک است و مقدار اندک F را ارائه می دهد.

به منظور برآورد ضرایب رگرسیون، از محور چرخشی مرکب مرکزی (CCRD) ماتریس طراحی شده با نقاط دایره شکل در مرکز هر محور از فضای فاکتوریل مورد استفاده قرار گرفت. این گوناگونی نیاز به ۳ سطح از هر متغیر دارد. حد بالا از سطوح یک فاکتور به عنوان ۱ و حد پایین به عنوان ۱- کدگذاری گردید. طی این مرحله طبق طرح مشخص شده تعداد ۲۰ تیر با ترکیب شرایطی که در جدول ۲ آمده است، ساخته شد.

نتایج و بحث

در جدول ۴ میانگین مقادیر MOR و MOE و در جداول ۵ و ۶ نیز اثر مستقل، متقابل و مربع اثرات مستقل متغیرهای مورد بررسی شامل نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان، نسبت ضخامت به ارتفاع در جان تیر و عرض بال بر روی MOR و MOE ارائه شده است. اشکال ۳ و ۴ نیز اثرات متقابل X₁×X₂، X₁×X₃ و X₂×X₃ را بر روی MOR و MOE نشان می دهد. روابط معنی داری نتایج به دست آمده تحت تأثیر متغیرهای ذکر شده به ترتیب در معادله- های ۷ و ۸ ارائه شده است. این روابط اثر متغیرها بر MOR و MOE را بیان می کند. می توان دریافت که ضریب خطی α₁ و α₂ هم برای MOR و هم برای MOE مثبت و α₃ منفی است. این مطلب نشان دهنده آن است که تیر شماره یک با بیشترین نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان (۲:۵)، بیشترین نسبت ضخامت به ارتفاع در جان تیر (۵:۰/۵)، و کمترین عرض بال (۳mm) بیشترین میزان MOR

مدل معادله برای MOR (رابطه ۷):

$$MOR = 11081 + 3287.6x_1 + 1745.4x_2 - 394.7x_3 + 1040.9x_1^2 + 612.1x_2^2 + 308.7x_3^2$$

مدل معادله برای MOE (رابطه ۸):

$$MOE = 101.8 + 36.9x_1 + 20.32x_2 - 3.16x_3 + 3.5x_1^2 + 3.79x_2^2 + 12.1x_1x_2$$

جدول ۴ مشاهده می شود که با استفاده صحیح از فاکتورهای ابعادی و یافتن حد مناسب در انتخاب ابعاد می توان مقاومت خمشی چوب های ماسیو را در طی استفاده در تیرهای I تا حد زیادی افزود. ملاحظه می گردد که بیشترین مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته برای گونه زبان گنجشک (F. excelsior) مشروحه در مآخذ [۱۷] و [۱۸] به ترتیب بین ۸۷MPa تا ۱۲۴MPa و ۹۷۳۴MPa تا ۱۲۶۲۳MPa بوده است، در حالیکه بعضی از تیرهای I شکل دارای MOR و MOE به ترتیب بیش از ۱۴۰MPa و ۱۵۰۰۰ MPa داشته اند.

² lateral torsion

¹Central Composite Rotatable Design

جدول ۴- ترکیب شرایط ساخت تیرها

شماره تخته	کد گذاری متغیرها			مقدار متغیرها		متغیرهای وابسته	
	X ₃	X ₂	X ₁	ضخامت بال به ارتفاع جان	عرض بال	MOR (MPa)	MOE (MPa)
۱	۱	۱	۱	۲:۵	۴/۶	۱۸۱/۴۶	۱۶۱۶۱/۳
۲	۱	۰	۰	۱/۵:۳/۵	۴/۶	۹۹/۳۲	۱۰۹۰۱/۲
۳	۰	۰	۱	۲:۵	۳/۸	۱۴۰/۷۸	۱۳۱۱۶/۶
۴	-۱	۱	-۱	۱:۲	۳	۸۵/۴۶	۱۰۱۴۱/۶
۵	۰	۰	۰	۱/۵:۳/۵	۳/۸	۱۱۰/۹۷	۱۱۸۰۲/۲
۶	-۱	۱	۱	۲:۵	۳	۱۷۵/۴۴	۱۵۷۶۳/۶
۷	+۱	۰	۰	۱/۵:۳/۵	۴/۶	۱۰۵/۹۹۰	۱۱۸۰۲/۳
۸	۰	۰	۰	۱/۵:۳/۵	۳/۸	۱۰۲/۹۱۰	۱۱۳۲۶/۵
۹	۱	-۱	-۱	۱:۲	۴/۶	۶۲/۴۴	۵۲۳۶/۸
۱۰	-۱	-۱	-۱	۱:۲	۳	۶۶/۷۰	۶۱۳۷/۹
۱۱	۱	-۱	۱	۲:۵	۴/۶	۱۱۲/۷۳	۱۲۳۱۶/۶
۱۲	۰	۰	۰	۱/۵:۳/۵	۳/۸	۱۰۱/۴۰۱	۱۱۰۰۵/۰
۱۳	۰	-۱	۰	۱/۵:۳/۵	۳/۸	۸۲/۵۸	۱۰۱۵۴/۶
۱۴	۰	۰	+۱	۲:۵	۳/۸	۶۸/۵۷	۶۸۸۷/۵
۱۵	۱	۱	-۱	۱:۲	۴/۶	۷۴/۵۵	۹۰۴۱/۶
۱۶	۰	۱	۰	۱/۵:۳/۵	۳/۸	۱۲۷/۲۲	۱۳۱۵۵/۷
۱۷	۰	۰	۰	۱/۵:۳/۵	۳/۸	۱۰۱/۰۶۰	۱۰۹۸۱/۲
۱۸	-۱	-۱	۱	۲:۵	۳	۱۱۶/۵۰	۱۲۹۶۳/۶
۱۹	۰	۰	۰	۱/۵:۳/۵	۳/۸	۱۰۲/۰۱۰	۱۱۱۲۶/۵
۲۰	۰	۰	۰	۱/۵:۳/۵	۳/۸	۱۰۱/۸۵۰	۱۱۰۹۸/۴

مقاومت خمشی چوب ماسیو زبان گنجشک طبق:

MOE (MPa)	MOR (MPa)
۹۷۳۴±۱۳۰۵	۱۰۰±۱۳
۱۲۶۲۳±۱۲	۱۱۶±۸

Kielmann و همکاران [۱۷]

Niemz و همکاران [۱۸]

نتایج تجزیه واریانس در جداول ۵ و ۶ برای MOR و MOE ارایه شده است. بطور کلی، بر اساس ضرایب R² که بیان کننده میزان همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و داده‌های مشاهده شده می‌باشند، می‌توان در مورد اعتبار داده‌های واقعی قضاوت نمود بطوریکه هر چه این مقدار به ۱ نزدیک تر باشد تطابق بسیار مطلوبتری وجود دارد. همانطور که در جداول ۵ و ۶ دیده می‌شود، مقدار R² برای MOR برابر ۰/۹۹ و برای MOE برابر ۰/۹۸ می‌باشد که بسیار مطلوب است. میزان درصد احتمال F در جداول ۵ و ۶ برای پاسخ‌های مدل در نظر گرفته شده (CCDR) شامل MOR و MOE کمتر از ۰/۰۵ است، که نشان می‌دهد این مدل از نظر آماری معنی‌دار است. دلیل دیگر از مناسب بودن طرح بکار رفته برای ارزیابی تاثیر

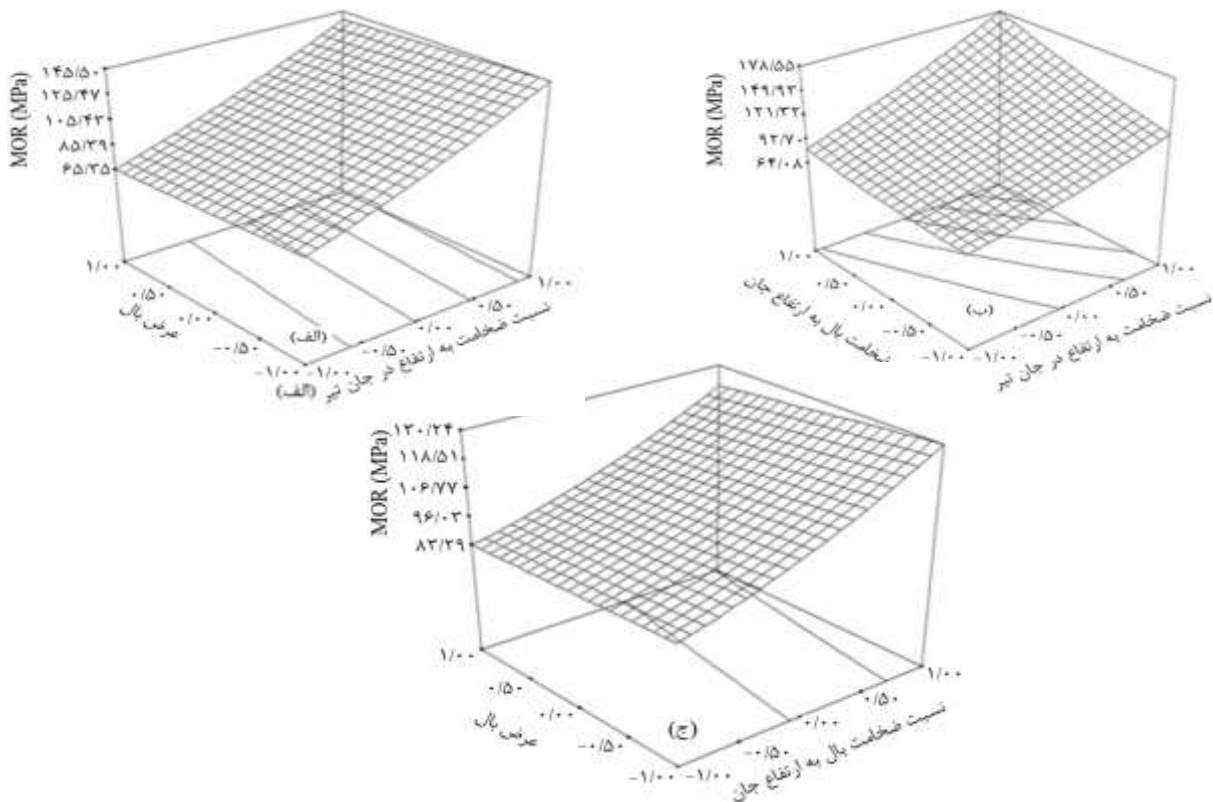
متغیرهای مورد بررسی بر روی MOR معنی‌دار نبودن عدم برازش مدل می‌باشد که مقدار آن بالاتر از ۰/۰۵ می‌باشد. از جدول ۵ مشهود است که اثر مستقیم متغیرهای نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان (X₁)، نسبت ضخامت به ارتفاع در جان تیر (X₂) و عرض بال (X₃)، مربع اثرات X₁² و X₂² و اثرات متقابل X₁×X₂ و X₂×X₃ در سطح ۹۵ درصد اطمینان آماری بر روی MOR معنی‌دار بوده است. علاوه بر مدل معادله، از جدول نیز مشهود است که مقدار F برای X₁ بیشترین مقدار را داشته است که بدان معنی است که MOR بیشترین تاثیر را از اثر مستقیم متغیر نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان می‌پذیرد. MOR از X₁² کمترین تاثیرپذیری را دارد که بدان معنی است که مربع اثر نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان کمترین اثر را بر

آوردن در جدول آنالیز واریانس صرفنظر شده است. به- منظور دست یافتن به نتایج و درک بهتری از خروجی، مدل پیش‌بینی شده در شکل‌های سه‌بعدی نشان داده شده‌اند.

روی تغییرات MOR دارد. مربع اثر عرض بال (x_3^2) و اثر متقابل نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان \times عرض بال $(x_1 \times x_3)$ تاثیر معنی‌داری بر روی MOR نداشته است و از

جدول ۵- نتایج حاصل از تجزیه واریانس ANOVA برای MOR

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار احتمال P>F
مدل	۱۹۲۵۵/۴۱	۷	۲۷۵۰/۷۷	۱۳۹۹/۶۴	<۰/۰۰۰۱
X ₁	۱۳۶۳۰/۱۳	۱	۱۳۶۳۰/۱۳	۶۹۳۵/۲۶	<۰/۰۰۰۱
X ₂	۴۱۲۸/۲۱	۱	۴۱۲۸/۲۱	۲۱۰۰/۵۱	<۰/۰۰۰۱
X ₃	۱۰۰/۰۵	۱	۱۰۰/۰۵	۵۰/۹۱	<۰/۰۰۰۱
X ₁ ²	۴۰/۵۶	۱	۴۰/۵۶	۲۰/۶۴	۰/۰۰۰۷
X ₂ ²	۴۵/۸۴	۱	۴۵/۸۴	۲۳/۳۳	۰/۰۰۰۴
X ₁ X ₂	۱۱۷۱/۲۸	۱	۱۱۷۱/۲۸	۵۹۵/۹۷	<۰/۰۰۰۱
X ₂ X ₃	۹/۹۰	۱	۹/۹۰	۵/۰۴	۰/۰۴۴۴
عدم پرازش	۲۱/۶۰	۷	۳/۰۹	۷/۸۰	۰/۱۹۰
انحراف معیار	۱/۴		R^2 (همبستگی) = ۰/۹۹۸۸		
میانگین	۱۰۵/۵۵		همبستگی برآورد شده = ۰/۹۹۸۱، همبستگی پیش‌بینی شده = ۰/۹۹۴۱		



شکل ۴- اثر متقابل متغیرها بر مقاومت خمشی (MOR): الف- نسبت ضخامت به ارتفاع در جان تیر \times عرض بال، ب- نسبت ضخامت به ارتفاع در جان تیر \times عرض بال، ج- نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان تیر \times عرض بال

تنش (شکل ۱) در مقاومت دادن به تیر یا پانل در خمش ندارد. در طی خمش، مقاومت این فرآورده‌ها شدیداً تحت تاثیر ضخامت یا ارتفاع می‌باشد. بر اساس رابطه (۹) که بیان‌کننده نسبت سختی تیر I شکل به سختی چوب ماسیو می‌باشد، می‌توان بیان داشت که به موازات افزایش ارتفاع جان تیر و در صورت ثابت ماندن ضخامت بال و یا به عبارت دیگر در صورت افزایش نسبت ارتفاع جان به ضخامت بال، نسبت سختی در خمش تیرهای I شکل افزایش می‌یابد، بطوریکه هر قدر نسبت ارتفاع جان به ضخامت بال افزوده شود با توجه به توان دوم این نسبت، میزان سختی خمشی تیر بطور تصاعدی افزایش می‌یابد، چنانچه اگر نسبت ارتفاع جان از ۲ به ۳ و از ۳ به ۴ افزایش یابد، میزان سختی تیر I شکل در مقایسه با تیر ماسیو به ترتیب ۳، ۶ و ۱۲ برابر افزایش می‌یابد. از اینرو می‌توان توصیف نمود که با توجه به نتایج بدست آمده (جدول ۲ و اشکال ۴ و ۵) کاهش نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان (x_1) از میزان ۱:۲ تا ۲:۵ که منجر به افزایش نسبت h/t_f می‌شود، سختی خمشی (D_I) که تاثیر مستقیم در افزایش MOR و MOE دارد را سبب می‌شود [۱۹].

$$\frac{D_I}{D_{mas}} = \frac{3}{4} \left(\frac{h_c}{t_f} \right)^2 \quad (9)$$

D_I - سختی خمشی تیر I شکل، D_{mas} - سختی خمشی تیر ماسیو، h_c - ارتفاع جان و t_f ضخامت بال می‌باشد.

همین ارزیابی را در مورد اثر ضخامت به ارتفاع جان (x_2) بر مقاومت‌های خمش (MOR و MOE) می‌توان بیان داشت بطوریکه با کاهش نسبت ضخامت به ارتفاع جان تیر (افزایش ارتفاع جان) از ۲ : ۰/۵ به ۵ : ۰/۵ مقاومت‌های خمشی بطور پیوسته افزایش می‌یابد. مطابق با رابطه (۹)، برای x_2 نیز با افزایش نسبت h_c به t_f شدیداً می‌تواند سختی تیر را که تاثیر زیادی بر مقاومت خمشی دارد تحت تاثیر قرار دهد.

ابعاد جان و ارتفاع تیر بر میزان تنش نیز تاثیر دارد. رابطه (۱۰) بیانگر تغییرات میزان تنشی است که منتج از میزان مقاومت خمشی تیر می‌باشد.

مطابق شکل ۴-الف، که بازگو کننده اثر متقابل $x_2 \times x_3$ می‌باشد، تاثیر نسبت ضخامت به ارتفاع در جان تیر در مقایسه با عرض بال به مقدار بیشتری تاثیرگذار است. با افزایش x_2 پاسخ بطور مداوم افزایش می‌یابد. اما با افزایش x_3 مقدار پاسخ کاهش می‌یابد اما شدت کاهش آن بسیار کمتر از تاثیر شدت افزایش x_2 می‌باشد. مقدار حداکثر MOR جایی است که x_2 به حداکثر خود می‌رسد و x_3 حداقل مقدار خود را داراست. این نتیجه در مدل معادله نیز قابل دریافت است. بر اساس شکل ۴-ب، که بازگو کننده اثر متقابل $x_1 \times x_2$ می‌باشد، با توجه به مقدار F در جدول ۵ و میزان شیب منحنی های x_1 و x_2 با محورهای موازی با خود، تاثیر ضخامت بال به ارتفاع جان تیر با توجه به شیب بیشتر منحنی هم راستا با محور مختصات بیشتر از تاثیر ضخامت به ارتفاع جان تیر می‌باشد. در این شکل مشهود است که با افزایش توام x_1 و x_2 مقدار MOR در بیشترین مقدار خود قرار می‌گیرد. در شکل ۴-ج، که بازگو کننده تاثیر متقابل $x_1 \times x_3$ می‌باشد، اگر چه با توجه به جدول آنالیز واریانس ۵ معنی دار نیست، اما متغیر x_1 تاثیر بیشتری با توجه به شیب بیشتر آن در راستای محور مختصات بر پاسخ دارد. بررسی‌های گذشته نیز تایید کننده این موضوع است که مقاومت خمشی با افزایش ارتفاع در جان افزایش یافته و شکست در طی بارگذاری خمشی در نتیجه شکست غیر الاستیک خط چسب و نقطه بین فازی می‌باشد [۳]. علاوه بر آن، در نتیجه ازدیاد تمرکز تنش در سطحی‌ترین لایه‌های بالایی و پایینی بر حسب نوع ماده، شکست می‌تواند در سطح تحت کشش یا فشار طی خمش رخ دهد. اما بر اساس میزان تغییر شدید در دیاگرام توزیع تنش در مقطع عرضی تیر، عملاً مقاومت سطحی‌ترین لایه‌های تحت فشار یا کشش بسیار بیشتر از تنش اعمال شده می‌گردد و با توجه به امکان انتقال تنش به جان از یک طرف و ضخامت خیلی کمتر آن در مقایسه با بال (عرض) حداکثر تنش در نزدیکترین فاصله بین بال و جان رخ می‌دهد.

تیرهای I شکل بطور کلی دارای ساختاری شبیه پانل‌های ساندویچی هستند که بال‌ها همانند رویه‌ها عمده بار خمشی و جان همانند مغزی عمده بار برشی را تحمل می‌کند و عملاً جان تاثیر زیادی با توجه به دیاگرام توزیع

۰/۵ به ۵ : ۰/۵ میزان تنش خمشی کاهش و به تبع آن به طور معکوس مقاومت خمشی افزایش می یابد. مطابق با رابطه (۱۰) و بر اساس تغییرات میزان x_2 ، افزایش h_c به t_c ، مقاومت خمشی می تواند تحت تاثیر زیادی قرار گیرد اما این میزان به اندازه ای نیست که سفتی تیر (رابطه ۹) با توجه به توان دوم رابطه h_c/t_f تحت تاثیر قرار می گیرد.

بر اساس رابطه (۳) میزان مدول گسیختگی y_{max} ارتباط مستقیمی با میزان MOR دارد از اینرو با افزایش ارتفاع جان (d) MOR افزایش می یابد. به عبارت دیگر افزایش نسبت ضخامت بالبه ارتفاع جان (x_1) از ۱:۲ به ۲:۵ و نیز نسبت ضخامت به ارتفاع (x_2) از ۲:۵ به ۰/۵:۵ میزان MOR افزایش می یابد.

$$\frac{\sigma_I}{\sigma_{mas}} = \frac{2t_f}{3h_c} \quad (10)$$

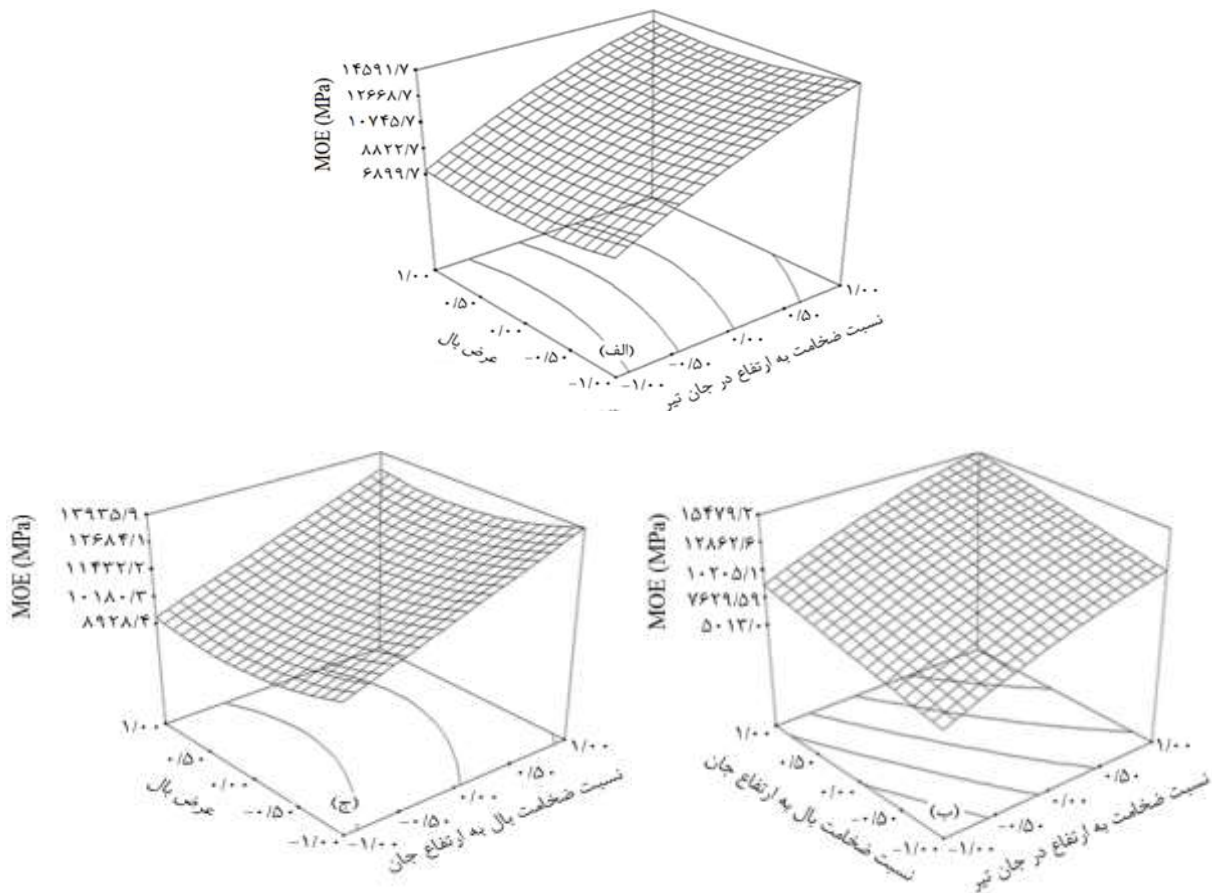
بر اساس این رابطه، میزان تنش خمشی با افزایش ارتفاع (h_c) جان تیر به ۲ و ۳ و ۴ برابر میزان MOR از ۲/۳ به یک و نیم، دو و ۲/۶۶ برابر به ترتیب کاهش می یابد و معکوس با آن و به همان اندازه مقاومت خمشی افزایش می یابد. از اینرو، با کاهش ضخامت بال به ارتفاع جان (x_1) از ۱:۲ به ۲:۵ مقاومت خمشی افزایش می یابد. همزمان، تغییرات نسبت ضخامت به ارتفاع جان (x_2) نیز بر روی تنش خمشی و به تبع آن بطور معکوس بر روی MOR و MOE تاثیر می گذارد، بطوریکه با کاهش نسبت ضخامت به ارتفاع در جان تیر (افزایش ارتفاع جان) از ۲:

جدول ۶- نتایج حاصل از تجزیه واریانس ANOVA برای MOE

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار احتمال P>F
مدل	$10^8 \times 1/493$	۵	$10^7 \times 2/986$	۲۲۷/۲۱	<۰/۰۰۰۱
x_1	$10^8 \times 1/081$	۱	$10^8 \times 1/081$	۸۲۲/۳۸	<۰/۰۰۰۱
x_2	$10^7 \times 3/785$	۱	$10^7 \times 3/785$	۲۸۷/۹۶	<۰/۰۰۰۱
x_3	$10^6 \times 1/558$	۱	$10^6 \times 1/558$	۱۱/۸۵	۰/۰۰۴
x_1^2	$10^6 \times 1/508$	۱	$10^6 \times 1/508$	۱۱/۴۷	۰/۰۰۴۴
x_3^2	$10^6 \times 1/408$	۱	$10^6 \times 1/408$	۱۰/۷۱	۰/۰۰۵۶
عدم برازش	$10^6 \times 1/765$	۹	$10^6 \times 1/961$	۱۳/۰۹	۰/۰۰۵۶
انحراف معیار	۳۶۲/۵۳		R^2 (همبستگی) = ۰/۹۸۷۸		
میانگین	۱۰۹/۹۷		همبستگی برآورد شده = ۰/۹۸۳۵، همبستگی پیش بینی شده = ۰/۹۷۴۳		

بیشتر منحنی هم راستا با محور مختصات بیشتر از تاثیر ضخامت به ارتفاع جان تیر می باشد. در این شکل مشهود است که با افزایش همزمان x_1 و x_2 مقدار MOE تا حداکثر افزایش می یابد. شکل ۵-ج، نشان دهنده تاثیر متقابل x_1x_3 می باشد که بیان می دارد که متغیر x_1 تاثیر بیشتری با توجه شیب بیشتر آن در راستای محور مختصات در مقایسه با عرض بال بر پاسخ دارد. اگر چه مطابق با جدول آنالیز واریانس ۵ اثرات متقابل x_1x_3 ، x_1x_2 و x_2x_3 اثر معنی داری بر روی ندارد اما با توجه به اینکه اثرات مستقیم و مربع اثرات هرکدام از متغیرهای مستقل بر روی MOE اثری معنی دار دارد، برای بیان بهتر تاثیر هرکدام از این متغیرهای مستقل بر روی MOE نمودارها (شکل ۵) ارائه شده اند.

مطابق شکل ۵-الف، ارایه دهنده اثر متقابل $x_2 \times x_3$ بر MOE می باشد. مشاهده می گردد که تاثیر نسبت ضخامت به ارتفاع در جان تیر در مقایسه با عرض بال به مقدار بیشتری بر روی MOE تاثیر گذار است. افزایش x_2 بطور مداوم MOE را افزایش داده است. اما با افزایش x_3 مقدار افزایش قابل ملاحظه ای در پاسخ دیده نمی شود و شدت تاثیرگذاری آن بسیار کمتر از شدت تاثیر x_2 می باشد. مقدار حداکثر MOE جایی است که x_2 به حداکثر خود می رسد و x_3 در سطح حداقل و یا حداکثر قرار دارد. این نتیجه در مدل معادله نیز قابل دریافت است. بر اساس شکل ۳-ب، و با توجه به مقدار F در جدول ۶ و میزان شیب منحنی های x_1 و x_2 با محورهای موازی با خود، تاثیر ضخامت بال به ارتفاع جان تیر با توجه به شیب



شکل ۵- اثر متقابل متغیرها بر مدول الاستیسیته (MOE): الف- نسبت ضخامت به ارتفاع در جان تیر × عرض بال، ب- نسبت ضخامت به ارتفاع در جان تیر × نسبت ضخامت بال، ج- نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان تیر × عرض بال

میزان سختی (K) تیر عبارت است از: EI (رابطه ۱۱) که در آن E- مدول الاستیسیته و I ممان اینرسی می باشد. بر اساس معادله $R = \frac{EI}{M_{max}} [17]$ ، با توجه به اینکه میزان I در نتیجه افزایش متغیرهای x_1 و x_2 افزایش یافته است (رابطه ۱)، افزایش می یابد، در حالیکه M_{max} تنها وابسته به مقدار نیرو، P، و طول دهانه، L، (رابطه ۴) می باشد باعث می شود تا R افزایش یابد. در حالیکه کاهش میزان R (شعاع انحناء) به آن معنی است که احتمال وقوع کمانش جانبی و به تبع آن افزایش تنش برشی محتمل تر بوده و تیر تحت نیروی خمشی کمتری خواهد شکست. از اینرو، افزودن متناسب نسبت x_1 و x_2 باعث افزایش MOE خواهد شد.

معادله (۴) را می توان به صورت معادله ساده شده (۱۳) ارایه نمود: $MOE = K \frac{L^3}{48I} [13]$ که در آن

در آزمون خمش، تیرها می توانند دچار کمانش جانبی شوند. ایجاد این نوع کمانش باعث ایجاد تنش برشی مضاعف می شود که می تواند در افت مقاومت تیر بسیار موثر باشد [۲۰ و ۲۱]. اما با افزودن ضخامت بال حتی به موازات افزودن ارتفاع جان می توان مقاومت بالاترین و پایین ترین سطح تحت تنش خمشی تیر را افزود و از ایجاد کمانش جانبی مسبب ایجاد تنش برشی اضافی کاست [۳]. با افزودن عرض بال های تیر می توان همان اثری را ایجاد نمود که در نتیجه افزودن ضخامت بال ایجاد شده است و باعث شد تا احتمال ایجاد کمانش جانبی و نتیجتاً تشکیل تنش برشی مضاعف را کاست. با توجه به اینکه عامل اصلی در ایجاد کمانش جانبی ابعاد جان نبوده بلکه مشخصه های ابعادی و استحکامی لایه های سطحی می باشند از اینرو حتی با افزایش نسبت ضخامت به ارتفاع در جان افزایش MOE رخ خواهد داد.

مناسب و معنی‌دار برای تعیین نقطه مناسب اعمال و کاربرد متغیرهای مورد استفاده فراهم کرده است. بر اساس تحلیل نتایج، مقادیر پیش‌بینی شده در انطباق مناسب با مقادیر آزمون‌ی قرار گرفت، بطوریکه R^2 برای مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر $0/99$ و $0/98$ بوده‌اند. از اینرو روش سطح پاسخ می‌تواند بطور موثری برای مدل‌سازی مقاومت‌های خمشی تیرهای I شکل مورد استفاده قرار بگیرد. نتایج نشان داد که اثر مستقیم نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان تیر، نسبت ضخامت به ارتفاع در جان تیر و عرض بال تأثیر معنی داری به ترتیب تا سطح 99% ، 99% و 95% اعتماد آماری بر روی پاسخ‌ها داشته است، بطوریکه با افزایش این متغیرها سطح پاسخ‌ها افزایش یافتند. این در حالی است که بعضی از مربع اثرات و اثرات متقابل متغیرهای مدل معادله بر پاسخ‌های مورد بررسی (شامل MOR و MOE) نیز اثرات معنی‌دار داشته است. همچنین بر اساس ضرایب مدل معادله و نیز مقدار F جدول آنالیز واریانس، میزان و شدت تأثیر گذاری هر کدام از اثرات مستقیم، مربع اثرات و اثرات متقابل متغیرهای مستقل مورد مقایسه قرار گرفت و معلوم گردید که اثر مستقیم نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان تیر بیشترین تأثیر را در مقایسه با سایر اثرات مستقیم، مربع اثرات و اثرات متقابل بر روی تغییرات پاسخ‌ها داشته است.

$K=P/\delta$ است. (P- بار اعمال شده طی خمش و δ - تغییر طول نسبی تیر). با افزایش ابعاد و ارتفاع تیر عملاً امکان افزایش سختی (با توجه به رابطه ۱۱) فراهم می‌شود. افزایش سختی ارتباط مستقیمی با MOE (رابطه ۱۳) دارد. بنابراین افزایش نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان که در آن افزایش ارتفاع جان از ۲ به ۵ بوده و همزمان با افزایش نسبت ضخامت به ارتفاع در جان که در آن نیز افزایش جان از ۲ به ۵ بوده است، باعث افزایش MOE شده است.

نتیجه گیری

بر اساس طرح آماری درجه دوم، اثر نسبت ضخامت بال به ارتفاع جان تیر، نسبت ضخامت به ارتفاع در جان تیر و عرض بال بر روی مقاومت خمشی (MOR و MOE) مورد بررسی قرار گرفت و میزان معنی‌داری اثر مستقیم، مربع اثر و اثر متقابل آنها بر پاسخ‌های مورد بررسی تحلیل شد. پس از استخراج مدل معادله به عنوان یک مدل توسعه یافته ریاضی، اثرات متقابل تأثیرگذار بر روی پاسخ‌ها در قالب نمودارهای سه‌بعدی ارائه گردید. مدل مستخرج از معادله رگرسیون چند متغیره ارائه شده توسط روش سطح پاسخ برای MOR و MOE با توجه به معنی‌داری آن در طی آنالیز آماری و نیز معنی‌دار نبودن عدم برازش داده‌ها (تجزیه واریانس ANOVA)، برآوردی

منابع

- [1] Dietsch, P. and Tannert, T., 2015. Assessing the integrity of glued laminated timber elements. *Construction and Building Materials*, 101:1259–1270.
- [2] Vallée, T., Tannert, T. and Fecht, S., 2017. Adhesively bonded connections in the context of timber engineering: A review. *Journal of Adhesion*, 93(4): 257–287.
- [3] Pelletier, B. and Doudak, G., 2019. Investigation of the lateral-torsional buckling behaviour of engineered wood I-joists with varying end conditions. *Engineering Structures*, 187: 329–340
- [4] Rémi, S.A. and Ghasan, D., 2017. Experimental and numerical investigation of lateral torsional buckling of wood I-joists. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 45:41–50.
- [5] Qiuwu X., 2014. Lateral torsional buckling of wood beams. Monograph: University of Ottawa.
- [6] Zhang, X., Que, Y., Wang, X., Li, Z., Zhang, L., Han, C., Que, Z. and Komatsu K., 2018. Experimental behavior of laminated veneer lumber with round holes, with and without reinforcement. *BioResources*, 13(4): 8899-8910.

- [7] Polocoser, T., Miller, T.H. and Gupta, R., 2013. Evaluation of remediation techniques for circular holes in the webs of wood I-joists *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(12): 1898-1909.
- [8] Baszen M., 2017. Semi-rigid Behavior of Joints in Wood Light-Frame Structures. *Procedia Engineering*, 172: 88 – 95.
- [9] Islam, A., Nwokoli, S. U. and Debebe, T., 2011. Bearing Capacity of I-Joists, 44p.
- [10] Racher, P., Bocquet, J. F. and Bouchair, A., 2007. Effect of web stiffness on the bending behaviour of timber composite I-beams. *Materials and design*, 28(3): 844-849.
- [11] Leichti, R. J., Falk, R. H. and Laufenberg, T. L., 1990. Prefabricated wood I-joists: an industry overview. *Forest Products Journal*, 40(3): 15-20
- [12] Leckie, F. A. and Dal Bello, D.J., 2009. Strength and Stiffness of Engineering Systems, *Mechanical Engineering Series*, 696 p.
- [13] Balasubramanian, M., Jayabalan, V. and Balasubramanian, V., 2008. A mathematical model to predict impact toughness of pulsed current gas tungsten arc welded titanium alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35(9/10): 852-858.
- [14] Lakshminarayanan, A. K. and Balasubramanian, V., 2009. Comparison of RSM with ANN in predicting tensile strength of friction stir welded AA7039 aluminium alloy joints. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19(1): 9-18.
- [15] Cochran W. G. and Cox, G. M., 1962. *Experimental design [M]*. New Delhi: Asia Publishing House, 42(5): 304-309.
- [16] Manonmani, K., Murugan, N. and Buvanasekaran, G., 2007. Effect of process parameters on the bead geometry of laser beam welded stainless steel sheets *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32: 1125-1133.
- [17] Kielmann, B.C., Militz, H., Mai, C. and Adamopoulos S., 2013. Strength changes in ash, beech and maple wood modified with a n-methylol melamine compound and a metal-complex dye. *Wood Reserch*, 53(3):343-350.
- [18] Niemz, p., Clauss, S., Michel F., Hansch, D. and Hansel A., 2014. Physical and mechanical properties of common ash (*Fraxinus excelsior L.*). *Wood Reserch*, 59(4): 671-682.
- [19] Vinson, J.R., 1999. *The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials*. Lancaster: Technomic.
- [20] Rémi, A.A., 2016. Lateral torsional buckling of wood I-joist. University of Ottawa.
- [21] Rémi, S.A. and Ghasan. D., 2017. Experimental and numerical investigation of lateral torsional buckling of wood I-joists. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 45:41–50.

The effect of dimensional changes of flange and web in I-joist on its bending strength

Abstract

This study evaluated the effects of flange thickness to depth of web ratio at three levels (1:2, 1.5:3.5 and 2:5) as well as thickness to depth of web ratio at three levels (0.5:2, 0.5:3.5 and 0.5:5) and width of flange at three levels (3, 3.8 and 4.6 cm) as independent variables on some mechanical properties e.g. modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of I-joist manufactured from ash wood (*Fraxinus* sp.). For this purpose, response surface methodology (RSM) was applied to evaluate the effects of independent variables on MOR and MOE of I-joist based on a three-level, three-variable central composite rotatable design (CCRD). In this survey, bending test was done according to the ASTM D-5055. Mathematical model equations were derived from computer simulation programming to find significant differences and the most effective variables. According to the results, predicted values were found to be in agreement with actual values (R^2 values of 0.99 and 0.98 for MOR and MOE, respectively). The study showed that RSM can efficiently be applied in modeling bending properties of I-joist. It was found that all independent variables had direct effect and significant effect on responses; in a way that flange thickness to depth of web ratio, thickness to depth of beam web ratio and width of flange maintained the MOR and MOE at maximum levels up to 2:5, 0.5:5 and 4.6cm, respectively. Simultaneously, some quadratic and interaction terms of variables had significant effects, too. Generally, increment in flange thickness to depth of web ratio, thickness to depth of web ratio and width of flange increased MOR and MOE of I-joist. Besides, flange thickness to depth of web ratio had the strongest effect on bending strength of beams

Keywords: I-joist, elm, bending strength, response surface methodology.

M. Nazerian^{1*}
A.R. Rezaian²
M. Shamsian³

¹ Associate prof., Department of bio-systems, Faculty of new technologies engineering, Shahid Beheshti university, Tehran, Iran

² MS.C., Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Zabol, Zabol, Iran

³ Associate prof., Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Zabol, Zabol, Iran

Corresponding author:
morteza17172000@yahoo.com

Received: 2019/04/06
Accepted: 2019/06/25