

شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد خمشی پروفیل‌های چوب پلاستیک با روش اجزای محدود با نرم-افزار

ANSYS Workbench

چکیده

در این تحقیق، خواص خمشی پروفیل‌های تولیدی شرکت چوب پلاست عصر هنر اندازه‌گیری و سپس با هدف کاهش هزینه و زمان اندازه‌گیری دقت روش اجزای محدود با نرم‌افزار ANSYS برای پیش‌بینی آن‌ها ارزیابی شد. از این‌رو، ابتدا خواص خمشی نمونه‌های کوچک شاهد با طول دهانه ۱۸۰ میلی‌متر انجام شد. مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌های کوچک و ضریب پواسون ۰/۳ به‌عنوان داده ورودی برای پیش‌بینی استفاده شد. سپس چهار نوع پروفیل توخالی و توپر با طول دهانه ۱۸۰ و ۴۵۰ میلی‌متر تحت بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای با دستگاه 0308 Hounsfield با سرعت بارگذاری ۵ mm/min آزمایش شدند. بنابراین، مقادیر تنش و خیز آن‌ها اندازه‌گیری و با نتایج روش اجزای محدود (FEM) مقایسه شدند. نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر مستقل نوع پروفیل بر MOR معنی‌دار است. همچنین نتایج نشان داد که تأثیر مستقل و متقابل طول دهانه و نوع پروفیل بر MOE از نظر آماری معنی‌دار است. نتایج تأثیر مستقل نشان داد که با افزایش طول دهانه از ۱۸۰ به ۴۵۰ میلی‌متر، مقدار MOR و MOE به ترتیب ۸/۸٪ کاهش و ۱۷/۷٪ افزایش، و با تغییر نوع پروفیل مقدار MOR و MOE به ترتیب ۳۳/۱٪ و ۲۴/۲٪ تغییر کردند. نتایج تأثیر متقابل نشان داد که با تغییر هم‌زمان طول دهانه و نوع پروفیل مقادیر MOR حدود ۴۳/۹ درصد و مقدار MOE ۶۶/۶ درصد تغییر کرد. نتایج نشان داد که روش اجزای محدود مقدار MOR را با میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) کمتر از ۳/۰۳٪ و خیز متناظر آن‌ها را با MAPE کمتر از ۱۵/۲۵٪ پیش‌بینی کرد. با توجه به خطای رضایت‌بخش این روش می‌توان روش اجزای محدود را به‌عنوان روشی کارآمد برای پیش‌بینی خواص مکانیکی این محصولات پیشنهاد کرد.

واژگان کلیدی: پروفیل چوب پلاستیک، پیش‌بینی، خیز، روش اجزای محدود، مقاومت خمشی.

اکبر رستم پور هفتخوانی^{۱*}
آرش چاوشی^۲
محمد عربی^۳

^۱ استادیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد فراورده‌های چندسازه چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۳ استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

مسئول مکاتبات:

arostampour@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۳

مقدمه

کامپوزیت چوب پلاستیک یکی از محصولات چوب پایه است که از پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP) یا پلی‌وینیل‌کلراید (PVC) به همراه آرد چوب تولید می‌شوند. برای رقابت و استقبال بهتر از تخته‌های WPC در بازار نسبت به چوب، لازم است قیمتشان به هم نزدیک باشد. به‌عبارت‌دیگر قیمت آن‌ها نباید بیش از ۲-۳ برابر قیمت تخته‌های چوبی باشد و این قیمت اضافی باید دارای توجیه زیبایی (ظاهر خوب، فاقد گره و تراشه و ترک)، خواص مکانیکی قابل‌قبول، دوام خوب، هزینه نگهداری کم‌تر، فاقد تخریب بیولوژیکی، مقاوم به موریانه و حتی‌المقدور مقاوم به آتش‌سوزی باشد [۱]. محصول چوب پلاستیک به‌عنوان کفپوش مخصوصاً کف‌سازی محوطه در کنار استخرها، مسیرهای پیاده‌رو، روف‌گاردن‌ها، دکوراسیون مانند دیوار پوش، گلدان، نمای ساختمان، پرگولا، آلاچیق، و به‌عنوان نرده در تراس‌ها، بالکن‌ها، محوطه فضای سبز و هرجایی که به حصار کشی نیاز باشد، کاربرد دارد. این محصولات به‌صورت پروفیل‌های توپر یا توخالی تولید می‌شوند. نوع و مقدار پلیمر، پرکننده سلولزی و معدنی، جفت‌کننده و مواد افزودنی و همچنین پارامترهای تولید بر خواص فیزیکی و مکانیکی چوب پلاستیک مؤثرند [۲-۴]. از آنجایی‌که محصولات چوب پلاستیک تولیدشده در کاربردهای مختلف تحت تأثیر بارهای استاتیکی مختلفی مانند فشار، کشش، خمش و ضربه قرار می‌گیرند، برای ارزیابی خواص آن لازم است پروفیل‌های مختلف با شرایط تولید و همچنین فرمولاسیون‌های مختلف تحت بارهای مذکور مورد آزمایش قرار بگیرند. از این‌رو، مدل‌سازی و پیش‌بینی خواص کامپوزیت چوب پلاستیک نیز مانند دیگر مصالح مهندسی به دلیل کاهش زمان و هزینه اندازه‌گیری آن‌ها مورد توجه محققین قرار گرفته است، طوری که روش اجزای محدود^۱ [۵]، شبکه عصبی مصنوعی^۲ [۶]، روش رگرسیون [۷]، قانون اختلاط^۳ [۸]، مدل هالپین-سای^۴ [۹]، مدل هیرش^۵

[۹]، مدل اصلاح شده بایر و بادر^۶ [۹] برای پیش‌بینی خواص کامپوزیت‌های چوب پلاستیک مورد مطالعه قرار گرفته است. با روش شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون می‌توان بر اساس متغیرهای فرآیندی، دانسته و ... به‌عنوان داده ورودی برای پیش‌بینی خواص چوب پلاستیک استفاده کرد. با قانون اختلاط، مدل هالپین-سای، مدل هیرش، مدل اصلاح شده بایر و بادر، تئوری پیوستگی، مدل میکرو مکانیکی هالپی-یاگانو^۷، مدل هوی-شیا^۸ بر اساس درصد حجمی اجزای ترکیب کامپوزیت و مدول آن‌ها می‌توان خواص کامپوزیت را پیش‌بینی کرد. در بیشتر کارخانه‌های تولید چوب پلاستیک، وقتی درصد بهینه ترکیب و متغیرهای تولید برای هر محصول تعیین شد، آن محصول در هر بار تولید بر اساس آن شرایط بهینه تولید می‌شود. از آنجایی‌که، محصولات چوب پلاستیک با قالب‌های مختلف تولید می‌شوند لازم است تحلیل و طراحی برای هر پروفیل با شرایط تولید و فرمولاسیون مختلف انجام شود. برای حل این مشکل، می‌توان از روش اجزای محدود برای پیش‌بینی خواص محصول با اشکال مختلف مقاطع استفاده کرد. طوری که، با تهیه نمونه‌های کوچک آزمایشگاهی از هر ترکیب و انجام آزمون‌های مکانیکی روی آن‌ها و سپس محاسبه مدول الاستیسیته از نمودار تنش و کرنش می‌توان با روش اجزای محدود در نرم‌افزار ANSYS هر پروفیل با هر ترکیبی را تحت تأثیر بارهای استاتیکی مختلف تحلیل و طراحی کرد. روش اجزای محدود یکی از روش‌های تحلیل مسائل مهندسی مکانیک و سازه است که در آن جسم به‌صورت سه‌بعدی مدل‌سازی و سپس با مش بندی به اجزای ریز تقسیم می‌شود و سپس گره‌های موجود در مش تحلیل می‌شوند. محققین نشان داده‌اند که نتایج حاصل از تحلیل مکانیکی و سازه‌ای روش اجزای محدود تطابق و نزدیکی مطلوبی با نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌های آزمایشگاهی دارد. از این‌رو، روش اجزای محدود را می‌توان برای تحلیل مکانیکی و سازه‌ای محصولات چندسازه چوب پلاستیک به کار گرفت [۱۰]. José da Silva و همکاران (۲۰۱۲) نمونه-

Finite element analysis (FEA)

²Artificial neural network (ANN)³Rule of hybrid mixture (RoHM)⁴Halpin-Tsai⁵Hirsch⁶Bowyer and Bader⁷Halpi-Pagano⁸Hui-Shia

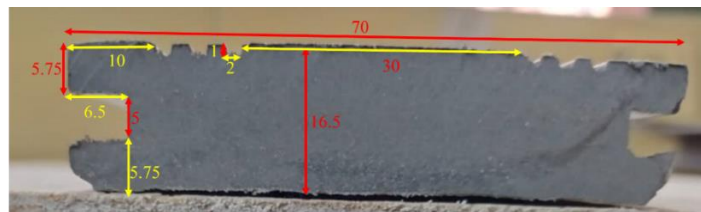
های تئوری داشت [۱۷]. Pagar و Suryawanshi (۲۰۲۱) مقاومت خمشی و کششی چندسازه ساخته شده از پوسته بادامزمینی و الیاف نارگیل-اپوکسی را بررسی کردند و سپس آن‌ها را با روش اجزای محدود در نرم‌افزار ANSYS تحلیل و پیش‌بینی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش اجزای محدود با دقت قابل‌قبولی آن‌ها را پیش‌بینی کرد و روشی قابل‌اعتماد برای برآورد مقاومت‌های محصولات ساخته شده از این چندسازه‌ها می‌باشد [۱۸]. Sathishkumar و همکاران (۲۰۲۱) با تحلیل و پیش‌بینی مقاومت‌های چندسازه ساخته شده از الیاف سیسال-خاکستر ذغال سنگ-رزین اپوکسی با روش اجزای محدود با نرم‌افزار ANSYS نشان دادند که این روش زمانی با دقت بالا و قابل‌قبولی می‌تواند مقاومت‌ها را پیش‌بینی کند که اختلاط ترکیبات چندسازه به نحو مطلوبی انجام شده باشد [۱۹]. با توجه به موفقیت روش اجزای محدود در پیش‌بینی خواص پروفیل‌های با اشکال مختلف از یک ترکیب مشابه از روی آزمایش نمونه-های کوچک، در این تحقیق پروفیل‌های مختلف تولید شده توسط شرکت چوب پلاست عصر هنر با عنوان تجاری @Plastowood در ANSYS مدل‌سازی و سپس با اعمال بار تحلیل شدند. با مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های پیش‌بینی شده با روش اجزای محدود (با نرم‌افزار ANSYS)، دقت مدل‌سازی محاسبه و قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج بررسی شد.

مواد و روش‌ها

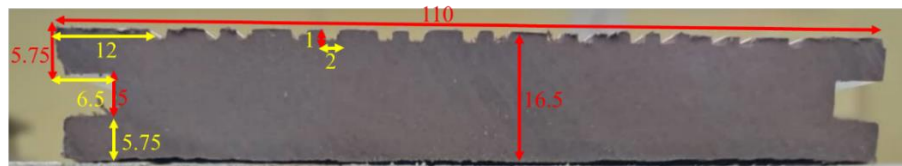
مواد

در این تحقیق نمونه‌های چوب پلاستیک از شرکت چوب پلاست عصر هنر با عنوان تجاری @Plastowood تهیه شدند. شکل ۱ نمایی از پروفیل‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد.

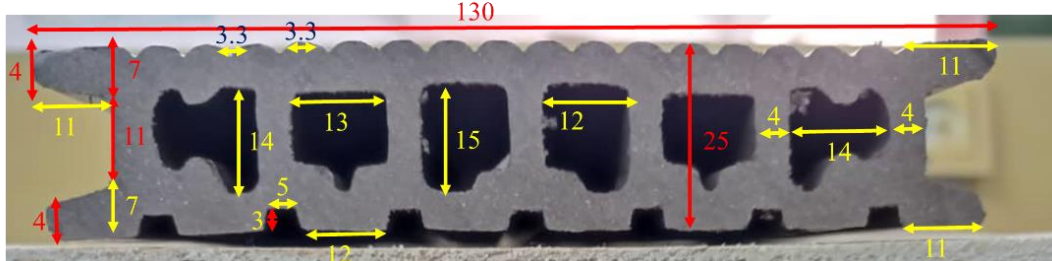
های چوب پلاستیک ساخته شده از الیاف موز و سیسال را با روش اجزای محدود به صورت دو و سه بعدی تحلیل کردند. آن‌ها نشان دادند که نتایج حاصل از روش اجزای محدود تطابق خوبی با نتایج آزمایش تجربی نمونه‌های چوب پلاستیک داشتند [۱۱]. Shankar و همکاران (۲۰۱۳) مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مقاومت به ضربه چندسازه اپوکسی-الیاف موز را با روش اجزای محدود تحلیل کردند. نتایج نشان داد که تنش، کرنش و جابجایی نمونه‌های آزمون مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشتند [۱۲]. Prasad و همکاران (۲۰۱۴) با تحلیل مقاومت کششی نمونه‌های چوب-پلاستیک ساخته شده از الیاف جوت و موز با روش اجزای محدود نشان دادند که این روش با دقت مطلوبی مقاومت‌های نمونه‌های ساخته شده را پیش‌بینی می‌کند [۱۳]. Suryawanshi و همکاران (۲۰۱۶) با تحلیل شکست نمونه‌های چوب پلاستیک ساخته شده از الیاف موز با روش اجزای محدود نشان دادند که این روش با دقت خوبی رفتار شکست نمونه‌های چوب پلاستیک را در برابر ضربه پیش‌بینی می‌کند [۱۴]. Bi (۲۰۱۸) نشان داد که روش اجزای محدود به عنوان روشی عددی نسبت به روش-های تئوری ارجحیت بیشتری دارد، زیرا خواص مکانیکی چندسازه چوب پلاستیک را با دقت بیشتری پیش‌بینی می‌کند [۱۵]. Roy و همکاران (۲۰۱۸) نتایج تجربی حاصل از اندازه‌گیری مقاومت‌های چندسازه پلی‌اتیلن-آرد چوب، پوسته موجودات دریایی و جلبک دریایی را با نتایج حاصل از روش اجزای محدود مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که داده‌های حاصل از آزمایش‌های مطابقت خوبی با نتایج شبیه‌سازی شده و محاسبه شده با روش اجزای محدود داشت [۱۶]. Gupta و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی تأثیر درصد الیاف بر مقاومت‌های مکانیکی چندسازه-الیاف موز-اپوکسی و تحلیل آن‌ها با روش‌های تئوری و روش عددی اجزای محدود نشان دادند که روش اجزای محدود تطابق خوبی با داده‌های حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی و همچنین روش



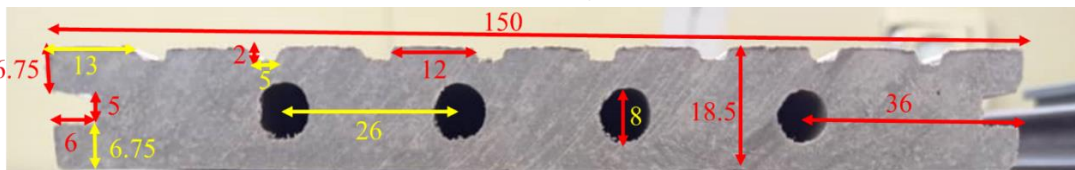
الف: پروفیل D7



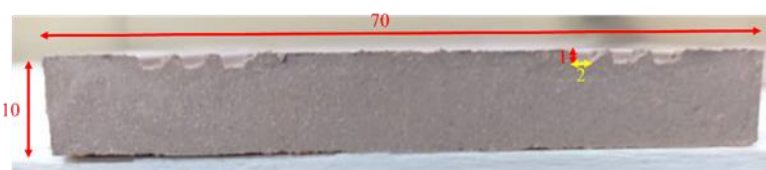
ب: پروفیل D11



ج: پروفیل D13



د: پروفیل D15



ه: پروفیل T7

شکل ۱- پروفیل‌های آزمایش شده در این مطالعه

محیط انسیس در حالت بارگذاری و ایجاد تکیه‌گاه نشان می‌دهد. بار با ایجاد خطی در وسط نمونه‌ها به صورت متمرکز به آن‌ها اعمال شد. برای شبیه‌سازی تیر ساده، در خط لبه زیرین نمونه در یک طرف تکیه‌گاه مفصلی و در طرف دیگر تکیه‌گاه غلطکی ایجاد شد. برای مش بندی نیز از حالت متوسط نرم‌افزار استفاده شد. سپس مقدار حداکثر تنش و میزان جابجایی در سطح زیرین نمونه از خروجی نرم‌افزار به دست آمد و با روش تجربی مقایسه شد. برای بررسی میزان حداکثر تنش خمشی، خطی در وسط طول دهانه در سطح زیرین نمونه (شکل ۳ قسمت الف) ایجاد شد و میانگین مقادیر تنش روی آن خط به عنوان حداکثر تنش در نظر گرفته شد و این محاسبه برای تمامی نمونه انجام شد. علاوه بر این، برای نشان دادن اختلاف بین توزیع تنش‌ها به صورت تحلیلی و روش اجزای محدود، توزیع تنش در طول تیر در سطح زیرین نمونه تا وسط طول دهانه و همچنین توزیع تنش از سطح زیرین تا مرکز سطح برای یکی از نمونه‌های هر تیمار به عنوان مثال بررسی شد و با روش تحلیلی مقایسه شد. شکل ۳ نحوه بررسی توزیع تنش‌ها در محیط انسیس را در شرایط مختلف نشان می‌دهد.

ارزیابی دقت پیش‌بینی

برای بررسی دقت پیش‌بینی روش اجزای محدود از میانگین مطلق درصد خطا^۴ استفاده شد، که فرمول محاسبه آن‌ها به صورت رابطه ۴ است:

$$APE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y_i - Y_p|}{Y_i} \right) 100 \quad (4)$$

که در آن‌ها Y_i مقادیر اندازه‌گیری شده، Y_p مقادیر پیش‌بینی شده و n تعداد کل داده‌هاست.

محصولات این شرکت بر پایه پلی‌اتیلن سنگین^۱ است که بر اساس درصد وزنی ۵۰:۵۰ نسبت به خاکاره تولید می‌شوند. همچنین از پلی‌اتیلن وکس به عنوان روان کننده به نسبت ۱ درصد وزنی و پلی‌اتیلن گرافت شده با مالئیک انیدرید (PE-g-MA) تولید شده شرکت آریا پلیمر پیشگام به عنوان عامل جفت کننده با ۲ درصد وزنی استفاده برای ساخت محصول استفاده می‌شود. در این تحقیق ابتدا آزمایش خمش بر روی نمونه‌های کوچک با ابعاد $25 \times 7 \times 1$ سانتیمتر (به ترتیب ضخامت، پهنا و طول) با طول دهانه ۱۸ سانتیمتر با ۶ تکرار انجام شد (پروفیل T7). سپس از میانگین مدول الاستیسیته آن‌ها به عنوان داده ورودی در ANSYS برای مدل‌سازی با روش اجزای محدود استفاده شد. ضریب پواسون نیز برای چوب پلاستیک ۰/۳ در نظر گرفته شد. سپس، آزمایش خمش بر روی دو پروفیل توپر (D11 و D7) و دو پروفیل توخالی (D15 و D13) با طول دهانه‌های ۱۸ و ۴۵ سانتیمتر با سه تکرار انجام شد. آزمایش بر اساس استاندارد EN 310 [۲۰] انجام شد. سرانجام با فرمول‌های زیر MOR و MOE نمونه‌ها محاسبه شد.

$$MOR = \frac{MC}{I} \quad (1)$$

$$MOE = \frac{L^3}{48I} * \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (2)$$

$$M = \frac{PL}{4} \quad (3)$$

که در آن، MOR^۲ مدول گسیختگی نمونه‌ها (MPa)، MOE^۳ مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌ها (MPa)، M لنگر خمشی نمونه‌ها (N.mm)، C فاصله از خط خنثی تا سطوح (mm)، I ممان اینرسی مقطع نمونه‌ها (mm)، L طول دهانه (mm)، $\frac{\Delta P}{\Delta x}$ نسبت اختلاف ۴۰ و ۱۰ درصد نیروی نهایی به جابجایی متناظر آن است.

مدل‌سازی با روش اجزای محدود با نرم‌افزار

ANSYS

برای مدل‌سازی با روش اجزای محدود مدل‌ها در نرم‌افزار ANSYS آماده شدند. شکل ۲ مدل‌های تهیه شده در

^۱High-density polyethylene (HDPE)

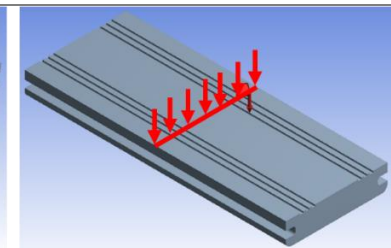
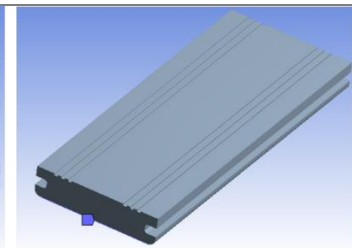
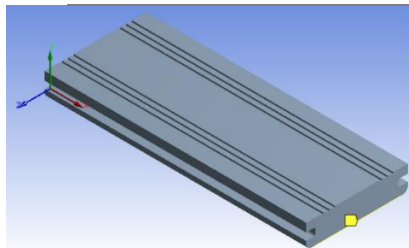
^۲Modulus of Rupture (MOR)

^۳Modulus of Elasticity (MOE)

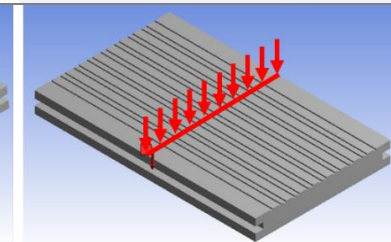
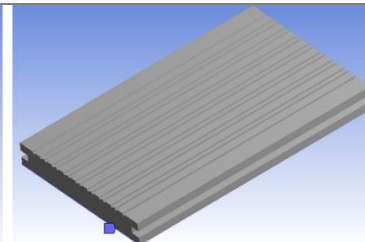
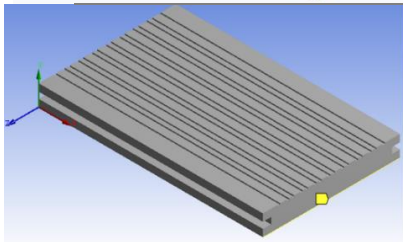
^۴Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

ایجاد تکیه‌گاه

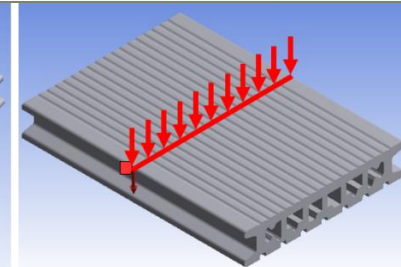
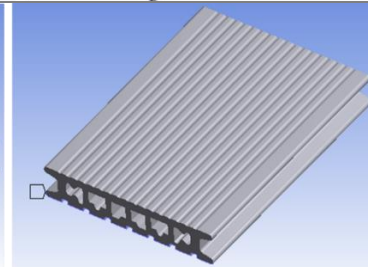
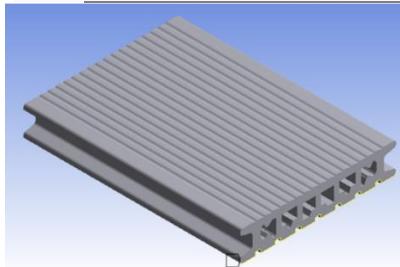
اعمال بار



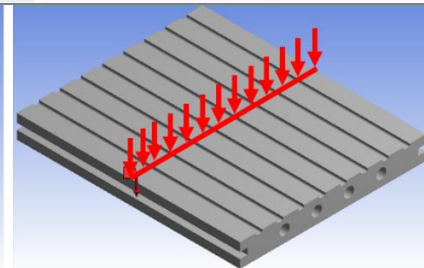
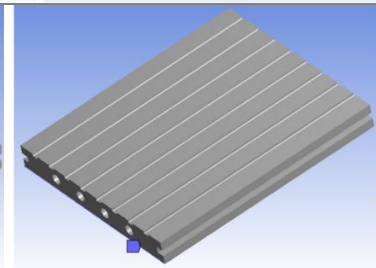
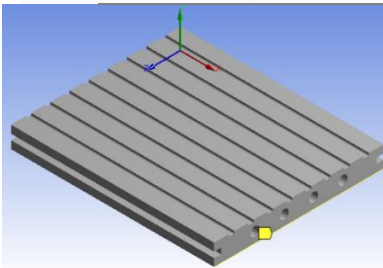
الف: پروفیل D7



ب: پروفیل D11

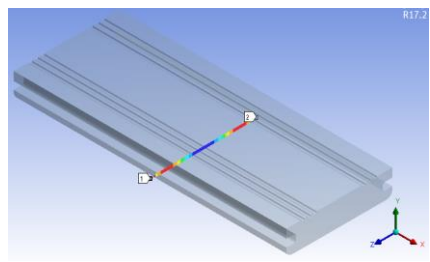
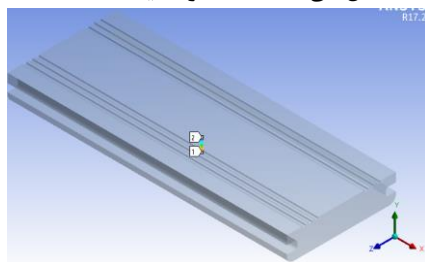
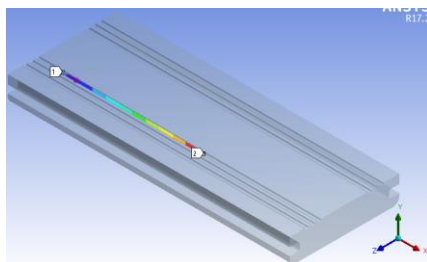


ج: پروفیل D13



د: پروفیل D15

شکل ۲- مدل‌های آماده‌شده در محیط ANSYS Workbench



ج: توزیع تنش در طول تیر تا وسط نمونه

ب: توزیع تنش از سطح زیرین تا مرکز سطح مقطع

الف: توزیع تنش در سطح زیرین در وسط نمونه

شکل ۳- بررسی توزیع تنش برای پروفیل D7 در محیط ANSYS Workbench

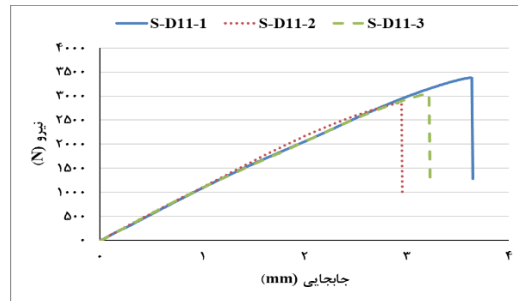
شده در هر دو طول دهانه به ترتیب مربوط به پروفیل‌های D7، D11، D13، D15 بوده است. از روی اطلاعات نمودارهای ۴ و ۵ مقادیر MOR و MOE برای نمونه‌های با طول دهانه‌های ۱۸۰ و ۴۵۰ میلی‌متر محاسبه و نتایج آن در

نتایج و بحث

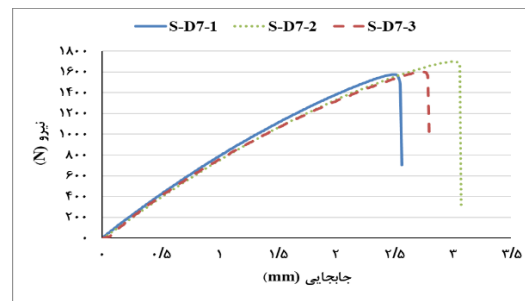
نمودار نیرو-جابجایی مربوط به نمونه‌های مورد مطالعه در طول دهانه‌های ۱۸۰ و ۴۵۰ میلی‌متر در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین نیروی تحمل

نشان داد که تأثیر مستقل نوع پروفیل بر MOR معنی‌دار است، اما تأثیر مستقل طول دهانه و تأثیر متقابل آن‌ها بر MOR معنی‌دار نیست. اما تأثیر مستقل و متقابل طول دهانه و نوع پروفیل بر MOE از نظر آماری معنی‌دار است.

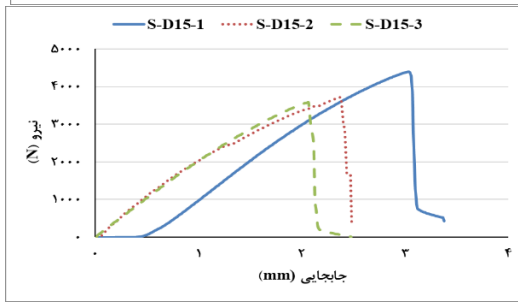
جدول ۱ ارائه‌شده است. نتایج آزمایش خمش نمونه شاهد (پروفیل T7) با طول دهانه ۱۸۰ میلی‌متر نیز در جدول ۲ ارائه‌شده است. جدول تجزیه واریانس آزمون فاکتوریل با متغیرهای طول دهانه و نوع پروفیل برای مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته خمشی در جدول ۳ ارائه‌شده است.



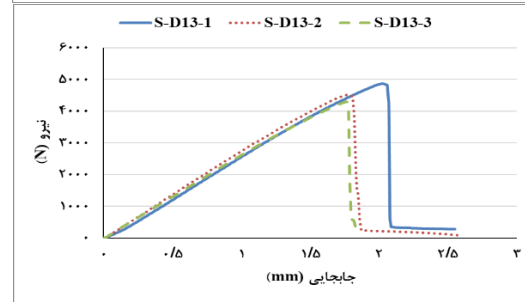
ب: پروفیل D11



الف: پروفیل D7

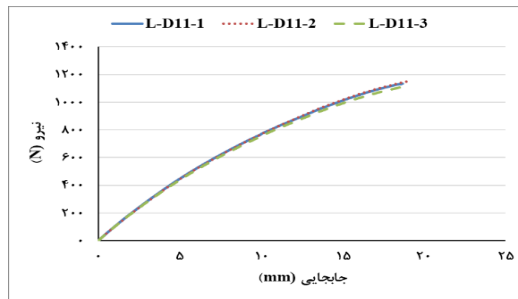


د: پروفیل D15

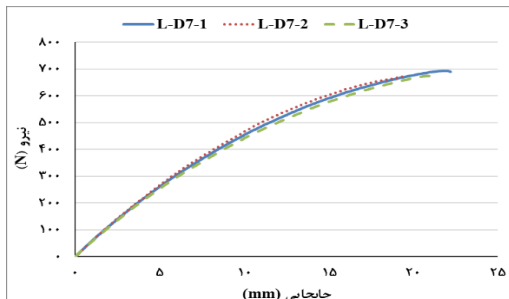


ج: پروفیل D13

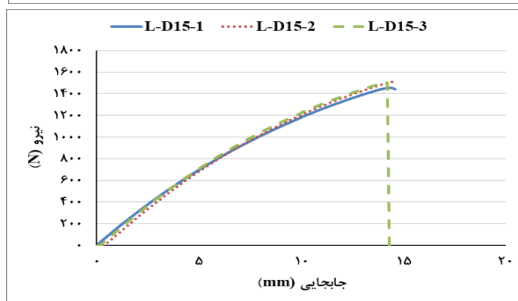
شکل ۴- نمودار نیرو و جابجایی برای پروفیل‌ها با طول دهانه ۱۸۰ میلی‌متر



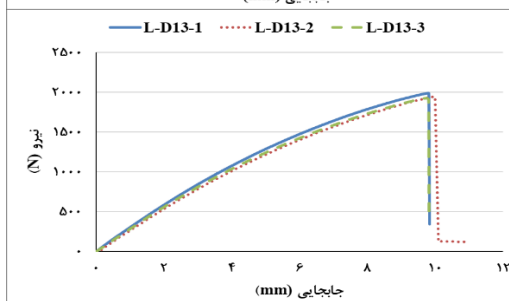
ب: پروفیل D11



الف: پروفیل D7



د: پروفیل D15



ج: پروفیل D13

شکل ۵- نمودار نیرو و جابجایی برای پروفیل‌ها با طول دهانه ۴۵۰ میلی‌متر

جدول ۱- مقادیر MOR و MOE برای نمونه‌های بزرگ مورد مطالعه با طول دهانه ۱۸۰ و ۴۵۰ میلی‌متر

کد پروفیل	C (mm)	I (mm ⁴)	L (mm)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	Pmax (N)	Xmax (mm)	P10% (N)	P40% (N)	Xp10% (mm)	Xp40% (mm)	(P40%-P10%)	(Xp40%-Xp10%)
D7	۸/۱۶	۲۵۳۳۸/۸۷	۱۸۰	۲۲/۸۲	۳۷۷۲/۰۷	۱۵۷۴/۰۰	۲/۵۰۵	۱۶۰	۶۳۲	۰/۱۸	۰/۷۸	۴۷۲	۰/۱۶
D7	۸/۱۶	۲۵۳۳۸/۸۷	۱۸۰	۲۴/۶۵	۳۵۹۶/۲۵	۱۷۰۰/۰۰	۳/۰۲۴	۱۷۲	۶۸۲	۰/۲۲۸	۰/۹۰۸	۵۱۰	۰/۱۶۸
D7	۸/۱۶	۲۵۳۳۸/۸۷	۱۸۰	۲۳/۲۱	۳۷۰۷/۶۴	۱۶۰۱/۰۰	۲/۷۴۱۰۴	۱۶۳	۶۳۹	۰/۲۱۳۸۴	۰/۸۲۹۴۴	۴۷۶	۰/۱۶۱۵۶
D11	۸/۱۱	۴۰۹۵۲/۲۳	۱۸۰	۳۰/۱۱	۳۲۰۶/۷۵	۳۳۸۰/۰۰	۳/۶۳	۳۳۶	۱۳۵۲	۰/۳۱۵	۱/۲۵۵	۱۰۱۶	۰/۹۴
D11	۸/۱۱	۴۰۹۵۲/۲۳	۱۸۰	۲۵/۴۷	۳۲۳۹/۳۴	۲۸۶۰/۰۰	۲/۹۵۲	۲۸۸	۱۱۴۴	۰/۲۵۲	۱/۰۳۶	۸۵۶	۰/۷۸۴
D11	۸/۱۱	۴۰۹۵۲/۲۳	۱۸۰	۲۷/۲۲	۳۲۰۳/۶۶	۳۰۵۶/۰۰	۳/۲۲	۳۰۴	۱۲۲۴	۰/۲۷۶	۱/۱۲۸	۹۲۰	۰/۸۵۲
D13	۱۳/۰۷	۱۳/۰۷	۱۸۰	۲۰/۴۹	۲۳۶۷/۳۳	۴۸۷۰/۰۰	۲/۰۳۲	۴۹۰	۱۹۵۰	۰/۲۳۶	۰/۷۷۲	۱۴۶۰	۰/۵۳۶
D13	۱۳/۰۷	۱۳/۰۷	۱۸۰	۱۸/۹۸	۲۴۴۲/۱۰	۴۵۱۰/۰۰	۱/۷۶۸	۴۴۵	۱۸۰۵	۰/۱۷۲	۰/۶۵۶	۱۳۶۰	۰/۴۸۴
D13	۱۳/۰۷	۱۳/۰۷	۱۸۰	۱۸/۰۵	۲۲۶۷/۶۰	۴۲۹۰/۰۰	۱/۷۶۵	۴۳۰	۱۷۱۵	۰/۱۶۷۵	۰/۶۶	۱۲۸۵	۰/۴۹۲۵
D15	۸/۹۸	۷۲۵۶۵/۸۴	۱۸۰	۲۴/۴۷	۳۵۱۰/۲۹	۴۳۹۵/۰۰	۳/۰۴	۴۳۵	۱۷۶۰	۰/۷۳۲	۱/۳۶۴	۱۳۲۵	۰/۶۳۲
D15	۸/۹۸	۷۲۵۶۵/۸۴	۱۸۰	۲۰/۷۳	۳۶۵۲/۵۱	۳۷۲۳/۰۰	۲/۳۷۵	۳۸۶	۱۵۰۴	۰/۱۸۷۵	۰/۷	۱۱۱۸	۰/۵۱۲۵
D15	۸/۹۸	۷۲۵۶۵/۸۴	۱۸۰	۱۹/۹۳	۳۴۶۹/۸۷	۳۵۸۰/۰۰	۲/۰۶۲۵	۳۴۰	۱۴۲۸	۰/۱۶۲۵	۰/۶۸۷۵	۱۰۸۸	۰/۵۲۵
D7	۸/۱۶	۲۵۳۳۸/۸۷	۴۵۰	۲۵/۱۲	۳۷۴۱/۶۱	۶۹۳/۰۰	۲۲/۰۵	۶۹	۲۷۷/۵	۱/۲	۵/۳۷۵	۲۰۸/۵	۴/۱۷۵
D7	۸/۱۶	۲۵۳۳۸/۸۷	۴۵۰	۲۴/۷۲	۳۸۶۰/۱۹	۶۸۲/۰۰	۲۰/۳۷۵	۶۹	۲۷۲	۱/۱۸	۵/۱۲	۲۰۳	۳/۹۴
D7	۸/۱۶	۲۵۳۳۸/۸۷	۴۵۰	۲۴/۴۷	۳۶۴۷/۴۰	۶۷۵/۰۰	۲۱	۶۷/۵	۲۷۰/۷۵	۱/۲۲۵	۵/۴	۲۰۳/۲۵	۴/۱۷۵
D11	۸/۱۱	۴۰۹۵۲/۲۳	۴۵۰	۲۵/۲۵	۳۹۶۰/۱۸	۱۱۳۳/۷۵	۱۸/۷	۱۱۳/۷۵	۴۵۳/۷۵	۱/۱۲	۵/۱	۳۴۰	۳/۹۸
D11	۸/۱۱	۴۰۹۵۲/۲۳	۴۵۰	۲۵/۶۳	۳۹۲۴/۹۶	۱۱۵۱/۲۵	۱۹/۱	۱۱۶/۲۵	۴۶۰	۱/۱۶	۵/۲۲	۳۴۳/۷۵	۴/۰۶
D11	۸/۱۱	۴۰۹۵۲/۲۳	۴۵۰	۲۴/۸۰	۳۹۰۱/۹۴	۱۱۱۳/۷۵	۱۸/۸۲	۱۱۱/۲۵	۴۴۶/۳۵	۱/۱۲	۵/۱	۳۳۵	۳/۹۸
D13	۱۳/۰۷	۱۳/۰۷	۴۵۰	۲۰/۸۹	۳۷۲۱/۱۵	۱۹۸۶/۰۰	۹/۸۲۵	۱۹۸	۷۹۴	۰/۶۳۷۵	۲/۸۱۲۵	۵۹۶	۲/۱۷۵
D13	۱۳/۰۷	۱۳/۰۷	۴۵۰	۲۰/۴۵	۳۵۵۶/۵۲	۱۹۴۴/۰۰	۹/۹۸۷۵	۱۹۴	۷۸۰	۰/۷۳۷۵	۲/۹۷۵	۵۸۶	۲/۲۳۷۵
D13	۱۳/۰۷	۱۳/۰۷	۴۵۰	۲۰/۲۲	۳۶۲۵/۴۷	۱۹۲۲/۰۰	۹/۷۶۲۵	۱۹۴	۷۶۸	۰/۶۸۷۵	۲/۸۳۷۵	۵۷۴	۲/۱۵
D15	۸/۹۸	۷۲۵۶۵/۸۴	۴۵۰	۲۰/۲۳	۳۶۲۶/۱۹	۱۴۵۳/۵۰	۱۴/۴۲	۱۴۴	۵۸۲	۰/۹	۴/۰۶	۴۳۸	۳/۱۶
D15	۸/۹۸	۷۲۵۶۵/۸۴	۴۵۰	۲۱/۱۰	۳۸۴۰/۳۹	۱۵۱۶/۰۰	۱۴/۷	۱۵۰	۶۰۸	۱/۳	۴/۴۲	۴۵۸	۳/۱۲
D15	۸/۹۸	۷۲۵۶۵/۸۴	۴۵۰	۲۰/۹۴	۳۸۳۹/۳۰	۱۵۰۴/۰۰	۱۴/۲	۱۵۰	۶۰۲	۱/۰۸	۴/۱۶	۴۵۲	۳/۰۸

C ارتفاع مقطع از سطح زیرین، I ممان اینرسی مقطع، L طول دهانه، MOR و MOE به ترتیب مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته خمشی، P_{max} و X_{max} به ترتیب نیرو و جابجایی حداکثر، P_{10%} و X_{10%} به ترتیب ده درصد نیروی حداکثر و جابجایی متناظر آن و P_{40%} و X_{40%} به ترتیب چهار درصد نیروی حداکثر و جابجایی متناظر آن می‌باشد.

جدول ۲- مقادیر MOR و MOE برای نمونه‌های کوچک (پروفیل‌های T7)

کد پروفیل	C (mm)	I (mm ⁴)	L (mm)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	Pmax (N)	Xmax (mm)	P10% (N)	P40% (N)	Xp10% (mm)	Xp40% % (mm)	(P40% -10%)	(Xp40%-Xp10%)
T7	۴/۹۲	۵۵۸۵/۰۹	۱۸۰	۲۹/۳۲	۳۵۴۵/۶۰	۷۳۹/۵۰	۶/۰۵۲۵	۷۴/۲۵	۲۹۵/۵	۰/۴۰۵	۱/۷۶۲۵	۲۲۱/۲۵	۱/۳۵۷۵
T7	۴/۹۲	۵۵۸۵/۰۹	۱۸۰	۲۸/۹۴	۳۴۹۷/۵۲	۷۲۹/۷۵	۶/۳۰۷۵	۷۳/۵	۲۹۱/۷۵	۰/۳۶۷۵	۱/۷۲۵	۲۱۸/۲۵	۱/۳۵۷۵
T7	۴/۹۲	۵۵۸۵/۰۹	۱۸۰	۳۱/۲۸	۳۵۲۲/۳۴	۷۸۸/۸۰	۶/۷۸	۷۸/۴	۳۱۵/۲	۰/۴۲۷۵	۱/۸۹	۲۳۶/۸	۱/۴۶۲۵
T7	۴/۹۲	۵۵۸۵/۰۹	۱۸۰	۲۳/۶۱	۳۴۰۶/۲۷	۵۹۵/۵۰	۴/۷۸۵	۶۰	۲۳۸/۵	۰/۳۶	۱/۵	۱۷۸/۵	۱/۱۴
T7	۴/۹۲	۵۵۸۵/۰۹	۱۸۰	۲۷/۳۳	۳۳۵۹/۰۶	۶۸۹/۲۵	۵/۰۱۷۵	۶۹	۲۷۵/۲۹	۰/۳۱۹	۱/۶۵۵	۲۰۶/۲۹	۱/۳۳۶
T7	۴/۹۲	۵۵۸۵/۰۹	۱۸۰	۳۰/۰۱	۳۵۲۴/۱۲	۷۵۶/۸۰	۶/۳۴۵	۷۵/۲	۳۰۲/۴	۰/۳۹	۱/۷۹۲۵	۲۲۷/۲	۱/۴۰۲۵

C ارتفاع مقطع از سطح زیرین، I ممان اینرسی مقطع، L طول دهانه، MOR و MOE به ترتیب مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته خمشی، P_{max} و X_{max} به ترتیب نیرو و جابجایی حداکثر، P_{10%} و X_{10%} به ترتیب ده درصد نیروی حداکثر و جابجایی متناظر آن و P_{40%} و X_{40%} به ترتیب چهل درصد نیروی حداکثر و جابجایی متناظر آن می‌باشد.

جدول ۳- جدول تجزیه واریانس تأثیر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر MOR و MOE پروفیل‌های مختلف در طول دهانه‌های ۱۸۰ و ۴۵۰ میلی‌متر

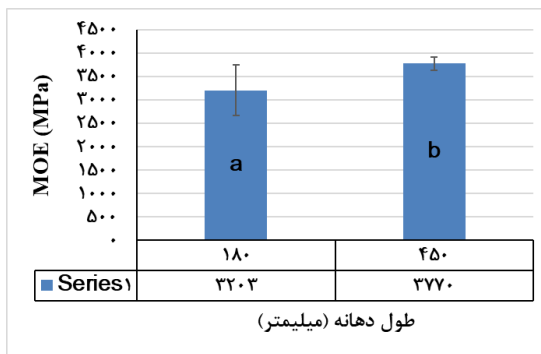
منابع تغییرات	MOE				MOR			
	Sig.	مقدار F	میانگین مربعات	درجه آزادی	Sig.	مقدار F	میانگین مربعات	درجه آزادی
طول دهانه	۰/۰۰۰*	۲۶۰/۰۱۳	۱۹۳۲۲۷۵/۰۷۶	۱	۰/۷۳۰ ^{ns}	۰/۱۲۳	۰/۲۲۲	۱
نوع پروفیل	۰/۰۰۰*	۸۹/۱۲۳	۶۶۲۳۱۲/۹۰۴	۳	۰/۰۰۰*	۲۸/۸۹۷	۵۲/۰۸۷	۳
طول دهانه × نوع پروفیل	۰/۰۰۰*	۶۰/۵۳۰	۴۴۹۸۲۶/۱۴۵	۳	۰/۰۸۳ ^{ns}	۲/۶۸۳	۴/۸۳۵	۳

ns - عدم معنی‌داری

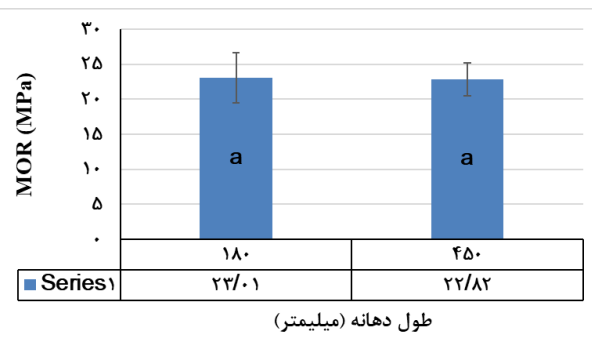
* - معنی‌داری در سطح اعتماد ۹۵ درصد

قسمت ب شکل ۷ نشان داد که با تغییر هم‌زمان طول دهانه و نوع پروفیل مقدار MOE $66/6$ درصد تغییر کرد، طوری که کمترین مقدار آن (۲۳۵۹ MPa) مربوط به نمونه با طول دهانه ۱۸۰ میلی‌متر و پروفیل D13 و بیشترین آن (MPa) ۳۹۲۹) مربوط به نمونه با طول دهانه ۴۵۰ میلی‌متر و پروفیل D11 بود. نتایج نشان داد که MOR نمونه شاهد (پروفیل T7، MOR=28.42 MPa) با پروفیل D13 با طول دهانه ۱۸۰ و پروفیل D11 با طول دهانه ۱۸۰ که به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار MOR را داشتند، به ترتیب $48/2$ و ۳ درصد بیشتر بود. MOE نمونه شاهد (پروفیل T7، MOE=3475.8 MPa) با نمونه پروفیل D13 با طول دهانه ۱۸۰ میلی‌متر و پروفیل D11 با طول دهانه ۴۵۰ که به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار MOR را داشتند، به ترتیب $47/3$ بیشتر و $11/5$ درصد کمتر بود.

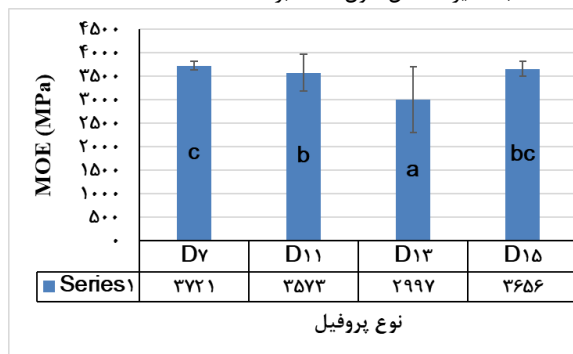
نتایج تأثیر مستقل طول دهانه و نوع پروفیل در شکل ۶ ارائه شده است. شکل ۶ قسمت‌های الف و ب نشان دادند که با افزایش طول دهانه از ۱۸۰ به ۴۵۰ میلی‌متر، مقدار MOR و MOE به ترتیب $8/8$ درصد کاهش و $17/7$ درصد افزایش یافت. شکل ۶ قسمت‌های ج و د نیز نشان دادند که با تغییر نوع پروفیل مقدار MOR و MOE به ترتیب $33/1$ و $24/2$ درصد تغییر کرد. تأثیر متقابل طول دهانه و نوع پروفیل بر MOR و MOE و مقایسه آن‌ها با پروفیل T7 به‌عنوان نمونه کوچک و شاهد در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج قسمت الف شکل ۷ نشان داد که با تغییر هم‌زمان طول دهانه و نوع پروفیل مقادیر MOR حدود $43/9$ درصد تغییر کرد، طوری که کمترین مقدار آن (۱۹/۱۷ MPa) مربوط به نمونه با طول دهانه ۱۸۰ میلی‌متر و پروفیل D13 و همچنین بیشترین مقدار آن (۲۷/۶ MPa) مربوط به نمونه با طول دهانه ۱۸۰ میلی‌متر و پروفیل D11 بود. علاوه بر این، نتایج



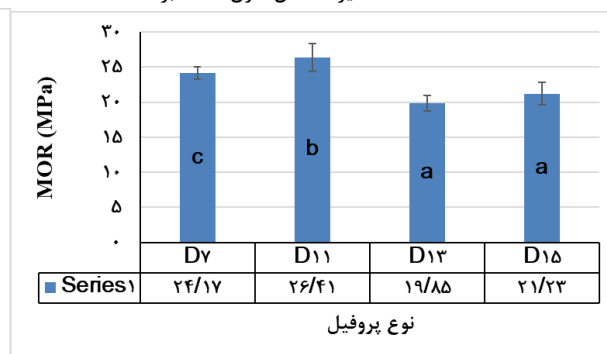
ب: تأثیر مستقل طول دهانه بر MOE



الف: تأثیر مستقل طول دهانه بر MOR



د: تأثیر مستقل نوع پروفیل بر MOE



ج: تأثیر مستقل نوع پروفیل بر MOR

شکل ۶- تأثیر مستقل طول دهانه و نوع پروفیل بر MOR و MOE

که مقاومت خمشی بیش از مقدار واقعی اندازه‌گیری گردد، اما مدول الاستیسیه خمشی کاهش می‌یابد، طوری که تأثیر آن بر مدول بیشتر از مقاومت خمشی گزارش شده است [۱].

با کاهش طول دهانه، نسبت طول دهانه به ارتفاع مقطع نمونه نیز کاهش یافته که به نوبه خود سبب افزایش مقاومت خمشی و کاهش مدول الاستیسیته می‌شود. نتایج همچنین نشان داد که پروفیل‌های توپر مقاومت و مدول الاستیسیه خمشی بیشتری از پروفیل‌های توخالی از خود نشان دادند، که دلیل آن به نحوه توزیع تنش در آن‌ها نسبت داده می‌شود. به طوری که وقتی نمونه‌ای زیر بار خمشی قرار می‌گیرد، تنش فشاری و کششی در سطوح آن و تنش برشی در مرکز سطح مقطع نمونه متمرکز می‌شود. طی فرآوری مذاب چوب پلاستیک برای تولید پروفیل به‌خصوص در قالب انتهایی آن، سطوح بیرونی قالب تحت نیروی گریز از مرکز جریان برشی حاکم ماده را با تراکم بیشتری به سطوح منتقل می‌کند و با افزایش دانسته سطوح پروفیل سبب افزایش مقاومت خمشی می‌شود. علاوه بر این، پلاستیک به دلیل جریان پذیری و روانی بیشتر نسبت به پرکننده‌های سلولزی و معدنی به سطوح منتقل می‌شود و به دلیل پیوستگی بهتر نسبت به ذرات پرکننده سبب افزایش مقاومت خمشی به‌خصوص در سطح زیر بار کششی می‌شوند. از سوی دیگر، وقتی پروفیل از قالب به بیرون هدایت می‌شود مواد فرار در سطوح مشرف به هوای آزاد از داخل توده مذاب خارج می‌شود و دانسته ماده در این قسمت بیشتر می‌شود. به همین دلیل در پروفیل‌های توخالی دانسته در سطوح بیشتر از تیغه‌های میانی است [۱].

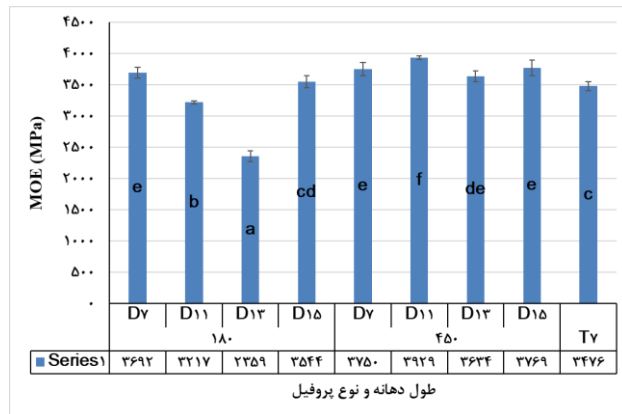
MOR و خیز محاسبه‌شده با روش اجزای محدود و خطای پیش‌بینی آن در جدول ۴ و میزان تطابق آن در شکل ۸ ارائه شده است.

تأثیر متقابل طول دهانه و نوع پروفیل بر MOR و MOE و مقایسه آن‌ها با پروفیل T7 به‌عنوان نمونه کوچک و شاهد در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج قسمت الف شکل ۷ نشان داد که با تغییر هم‌زمان طول دهانه و نوع پروفیل مقادیر MOR حدود ۴۳/۹ درصد تغییر کرد، طوری که کمترین مقدار آن (MPa) ۱۹/۱۷) مربوط به نمونه با طول دهانه ۱۸۰ میلی‌متر و پروفیل D13 و همچنین بیشترین مقدار آن (MPa) ۲۷/۶) مربوط به نمونه با طول دهانه ۱۸۰ میلی‌متر و پروفیل D11 بود. علاوه بر این، نتایج قسمت ب شکل ۷ نشان داد که با تغییر هم‌زمان طول دهانه و نوع پروفیل مقدار MOE ۶۶/۶ درصد تغییر کرد، طوری که کمترین مقدار آن (MPa) ۲۳۵۹) مربوط به نمونه با طول دهانه ۱۸۰ میلی‌متر و پروفیل D13 و بیشترین آن (MPa) ۳۹۲۹) مربوط به نمونه با طول دهانه ۴۵۰ میلی‌متر و پروفیل D11 بود. نتایج نشان داد که MOR (پروفیل T7، MOR=28.42 MPa) با پروفیل D13 با طول دهانه ۱۸۰ و پروفیل D11 با طول دهانه ۱۸۰ که به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار MOR را داشتند، به ترتیب ۴۸/۲ و ۳ درصد بیشتر بود. MOE نمونه شاهد (پروفیل T7، MOE=3475.8 MPa) با نمونه پروفیل D13 با طول دهانه ۱۸۰ میلی‌متر و پروفیل D11 با طول دهانه ۴۵۰ که به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار MOR را داشتند، به ترتیب ۴۷/۳ بیشتر و ۱۱/۵ درصد کمتر بود. به طور کلی نتایج نشان داد که با افزایش طول دهانه مقاومت خمشی به مقدار کمی کاهش یافت و تأثیر آن معنی‌دار نبود، اما با افزایش طول دهانه مدول الاستیسیته به طور معنی‌داری افزایش یافت. محققین نشان داده‌اند که با کاهش نسبت طول دهانه به ارتفاع مقطع آزمایش از مد خمشی به مد برشی می‌رود و این سبب می‌شود

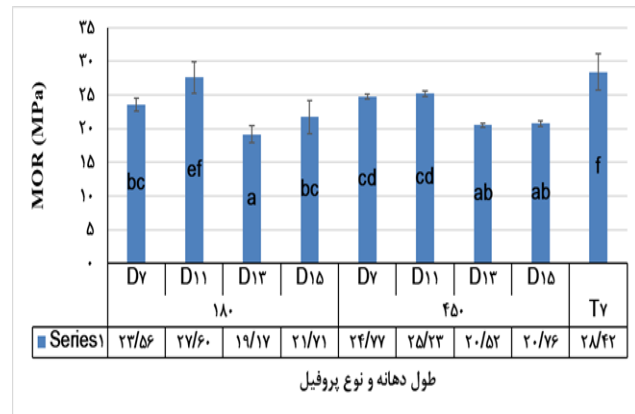
مقادیر MOR را با دقت بالا و مقادیر خیز را با دقت خوبی پیش‌بینی کرده است. نتایج ارائه‌شده برای پیش‌بینی MOR و خیز با روش اجزای محدود تطابق خوبی با تحقیقات گذشته از خود نشان داد [۱۴،۱۶،۱۷،۱۹،۲۲].

در این مطالعه توزیع تنش سطح زیرین نمونه تا وسط طول دهانه و همچنین در وسط طول دهانه از سطح زیرین تا مرکز سطح نمونه به روش تجربی و با روش اجزای محدود محاسبه شد و نتایج آن برای پروفیل‌های مختلف با طول دهانه‌های ۱۸۰ و ۴۵۰ میلی‌متر برای بار حداکثر و ۴۰٪ بار حداکثر در شکل ۹ ارائه‌شده است. نتایج نشان داد که نتایج حاصل از روش اجزای محدود تطابق خوبی برای پیش‌بینی توزیع تنش از خود نشان می‌دهد. در این مطالعه از آنالیز خطی در روش اجزای محدود استفاده شد، اما به دلیل رفتار ترد محصولات چوب پلاستیک، تطابق خوبی بین داده‌های پیش‌بینی‌شده با ANSYS و روش تحلیلی به دست آمد.

نتایج نشان داد که روش اجزای محدود مقدار MOR را به ترتیب در نیروی حداکثر و ۴۰ درصد نیروی حداکثر با میانگین خطای ۳/۰۳ و ۲/۷۴ پیش‌بینی کرد. اما خطای پیش‌بینی خیز متناظر آن‌ها به ترتیب ۱۵/۲۵ و ۱۵/۵ درصد بود. علاوه بر این، شکل ۸ نیز تطابق خوبی بین داده‌های پیش‌بینی‌شده با روش اجزای محدود و داده‌های تجربی نشان می‌دهند. نتایج نشان داد که خطای پیش‌بینی برای پروفیل‌های توخالی بیشتر از پروفیل‌های توپر بوده است. دقت پیش‌بینی مدل‌ها برای پیش‌بینی خواص مواد بر مبنای میانگین قدر مطلق درصد خطا (MAPE) عبارت‌اند از: کمتر از ۱۰٪ خطا (دقت پیش‌بینی بالا)، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خطا (دقت پیش‌بینی خوب) و بین ۲۰ تا ۵۰ درصد خطا (دقت پیش‌بینی بی‌منطقی) [۲۱]. بر مبنای این دسته‌بندی می‌توان نتیجه گرفت که روش اجزای محدود



ب: تأثیر متقابل طول دهانه و نوع پروفیل بر MOE



الف: تأثیر متقابل طول دهانه و نوع پروفیل بر MOR

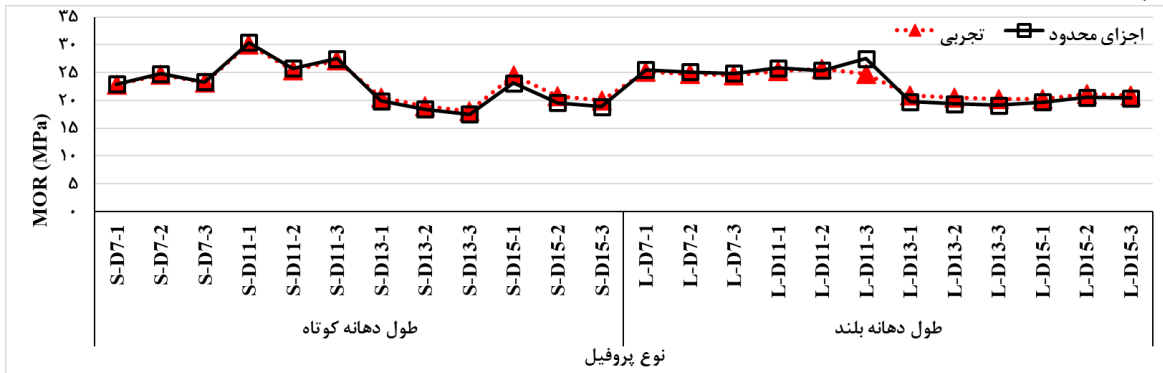
شکل ۷- تأثیر متقابل طول دهانه و نوع پروفیل بر MOR و MOE و مقایسه آن‌ها با پروفیل کوچک (شاهد)

جدول ۴- خطای روش اجزای محدود برای پیش‌بینی MOR و خیز در نیروی حداکثر و ۴۰ درصد آن

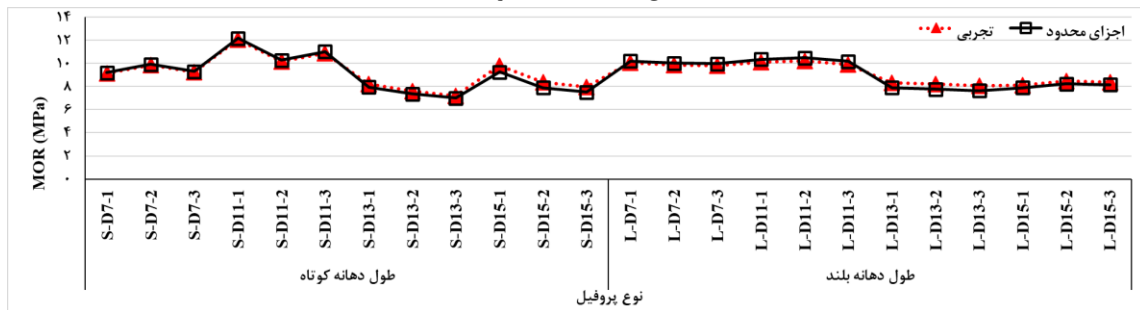
تجربی				روش اجزای محدود				مقدار خطا				
Pmax		0.4Pmax		Pmax		0.4Pmax		Pmax		0.4Pmax		
MOR (MPa)	Xmax	MOR 0.4(MPa)	X0.4	MOR (MPa)	Xmax	MOR 0.4(MPa)	X0.4	MOR (MPa)	Xmax	MOR 0.4(MPa)	X0.4	
۲۲/۸۲	۲/۵۰۵	۹/۱۶	۰/۷۸	۲۲/۹۳	۲/۴۳	۹/۲۱	۰/۹۸	۰/۴۹	۲/۸۷	۰/۴۹	۲۵/۲۵	S-D7-1
۲۴/۶۵	۳/۰۲۴	۹/۸۹	۰/۹۰۸	۲۴/۷۷	۲/۶۳	۹/۹۴	۱/۰۵	۰/۴۹	۱۳/۱۰	۰/۴۹	۱۶/۱۰	S-D7-2
۲۳/۲۱	۲/۷۴۱۰۴	۹/۲۶	۰/۸۲۹۴۴	۲۳/۳۳	۲/۴۷	۹/۳۱	۰/۹۹	۰/۴۹	۹/۷۱	۰/۴۹	۱۹/۰۹	S-D7-3
۳۰/۱۱	۳/۶۳	۱۲/۰۴	۱/۲۵۵	۳۰/۴۲	۳/۵۳	۱۲/۱۷	۱/۴۱	۱/۰۴	۲/۸۲	۱/۰۴	۱۲/۴۳	S-D11-1
۲۵/۴۷	۲/۹۵۲	۱۰/۱۹	۱/۰۳۶	۲۵/۷۴	۲/۹۸	۱۰/۳۰	۱/۱۹	۱/۰۴	۱/۱۱	۱/۰۴	۱۵/۲۴	S-D11-2
۲۷/۲۲	۳/۲۲	۱۰/۹۰	۱/۱۲۸	۲۷/۵۰	۳/۱۹	۱۱/۰۲	۱/۲۸	۱/۰۴	۰/۹۵	۱/۰۴	۱۳/۲۴	S-D11-3
۲۰/۴۹	۲/۰۳۲	۸/۲۰	۰/۷۷۲	۱۹/۸۹	۱/۶۶	۷/۹۶	۰/۶۷	۲/۹۴	۱۸/۲۵	۲/۹۴	۱۳/۸۴	S-D13-1
۱۸/۹۸	۱/۷۶۸	۷/۵۹	۰/۶۵۶	۱۸/۴۲	۱/۵۴	۷/۳۷	۰/۶۲	۲/۹۴	۱۲/۹۹	۲/۹۴	۶/۱۴	S-D13-2
۱۸/۰۵	۱/۷۶۵	۷/۲۲	۰/۶۶	۱۷/۵۲	۱/۴۶	۷/۰۰	۰/۵۹	۲/۹۴	۱۷/۰۹	۲/۹۴	۱۱/۳۶	S-D13-3
۲۴/۴۷	۳/۰۴	۹/۸۰	۱/۳۶۴	۲۳/۱۳	۲/۴۸	۹/۲۶	۱/۰۰	۵/۵۰	۱۸/۲۷	۵/۵۰	۲۷/۰۵	S-D15-1
۲۰/۷۳	۲/۳۷۵	۸/۳۷	۰/۷	۱۹/۵۹	۲/۱۰	۷/۹۱	۰/۸۵	۵/۵۰	۱۱/۳۸	۵/۵۰	۲۱/۴۷	S-D15-2
۱۹/۹۳	۲/۰۶۲۵	۷/۹۵	۰/۶۸۷۵	۱۸/۸۴	۲/۰۲	۷/۵۱	۰/۸۱	۵/۵۰	۱/۸۷	۵/۵۰	۱۷/۴۳	S-D15-3
۲۵/۱۲	۲۲/۰۵	۱۰/۰۶	۵/۳۷۵	۲۵/۵۲	۱۵/۳۷	۱۰/۲۲	۶/۱۵	۱/۶۱	۳۰/۳۲	۱/۶۱	۱۴/۴۷	L-D7-1
۲۴/۷۲	۲۰/۳۷۵	۹/۸۶	۵/۱۲	۲۵/۱۲	۱۵/۱۲	۱۰/۰۲	۶/۰۳	۱/۶۱	۲۵/۷۹	۱/۶۱	۱۷/۷۸	L-D7-2
۲۴/۴۷	۲۱	۹/۸۱	۵/۴	۲۴/۸۶	۱۴/۹۷	۹/۹۷	۶/۰۰	۱/۶۱	۲۸/۷۴	۱/۶۱	۱۱/۱۶	L-D7-3
۲۵/۲۵	۱۸/۷	۱۰/۱۰	۵/۱	۲۵/۸۶	۱۶/۲۰	۱۰/۳۵	۶/۴۸	۲/۴۵	۱۳/۳۷	۲/۴۵	۲۷/۱۳	L-D11-1
۲۵/۶۳	۱۹/۱	۱۰/۲۴	۵/۲۲	۲۵/۴۱	۱۵/۹۱	۱۰/۴۹	۶/۵۷	۰/۸۹	۱۶/۶۸	۲/۴۵	۲۵/۹۱	L-D11-2
۲۴/۸۰	۱۸/۸۲	۹/۹۴	۵/۱	۲۷/۵۰	۱۵/۹۱	۱۰/۱۸	۶/۳۸	۱۰/۹۰	۱۵/۴۴	۲/۴۵	۲۵/۰۲	L-D11-3
۲۰/۸۹	۹/۸۲۵	۸/۳۵	۲/۸۱۲۵	۱۹/۷۸	۷/۸۶	۷/۹۱	۳/۱۴	۵/۳۰	۱۹/۹۶	۵/۳۰	۱۱/۷۸	L-D13-1
۲۰/۴۵	۹/۹۸۷۵	۸/۲۰	۲/۹۷۵	۱۹/۳۶	۷/۷۰	۷/۷۷	۳/۰۹	۵/۳۰	۲۲/۹۳	۵/۳۰	۳/۸۱	L-D13-2
۲۰/۲۲	۹/۷۶۲۵	۸/۰۸	۲/۸۳۷۵	۱۹/۱۴	۷/۶۱	۷/۶۵	۳/۰۴	۵/۳۰	۲۲/۰۵	۵/۳۰	۷/۱۷	L-D13-3
۲۰/۲۳	۱۴/۴۲	۸/۱۰	۴/۰۶	۱۹/۷۱	۱۱/۲۴	۷/۸۹	۴/۵۰	۲/۶۰	۲۲/۰۶	۲/۶۰	۱۰/۸۴	L-D15-1
۲۱/۱۰	۱۴/۷	۸/۴۶	۴/۴۲	۲۰/۵۵	۱۱/۷۲	۸/۲۴	۴/۷۰	۲/۶۰	۲۰/۲۶	۲/۶۰	۶/۳۶	L-D15-2
۲۰/۹۴	۱۴/۲	۸/۳۸	۴/۱۶	۲۰/۳۹	۱۱/۶۳	۸/۱۶	۴/۶۵	۲/۶۰	۱۸/۱۱	۲/۶۰	۱۱/۸۹	L-D15-3
								۳/۰۳	۱۵/۲۵	۲/۷۴	۱۵/۵۰	میانگین خطای مطلق

طول دهانه کوتاه

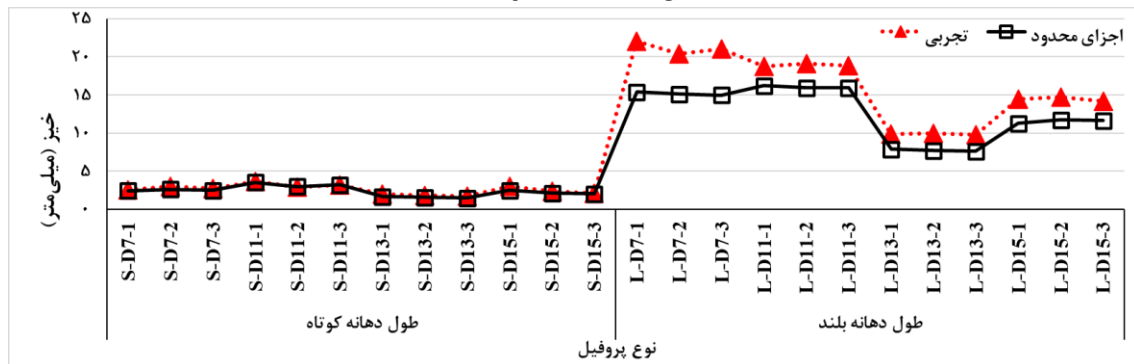
طول دهانه بلند



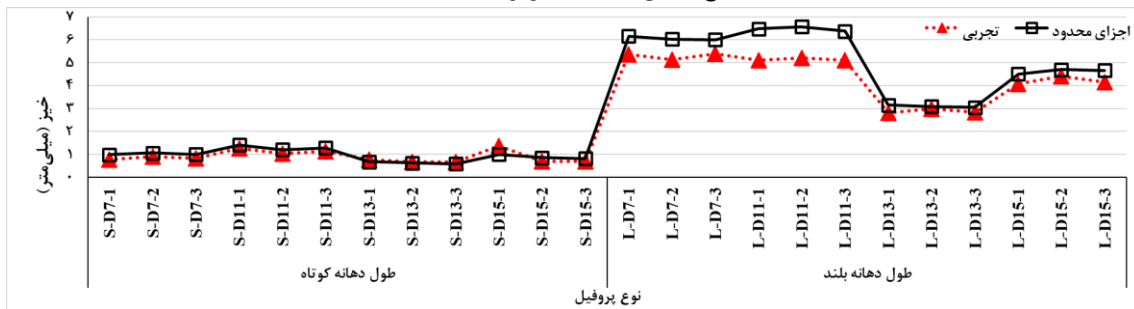
الف) تطابق داده‌های MOR برای Pmax



ب) تطابق داده‌های MOR برای 0.4Pmax

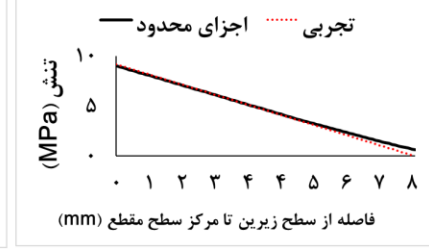
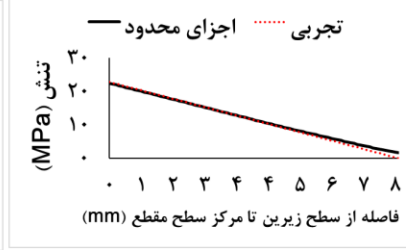
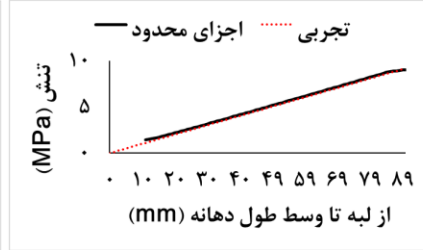
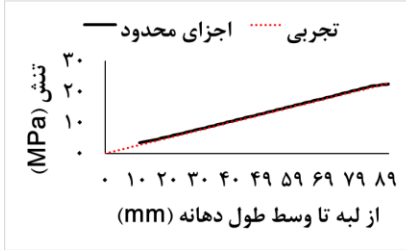


ج) تطابق داده‌های خیز برای Pmax

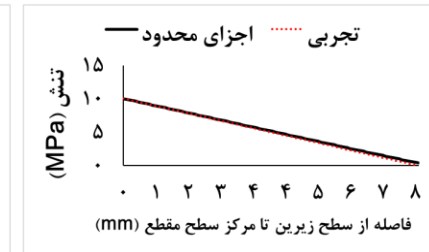
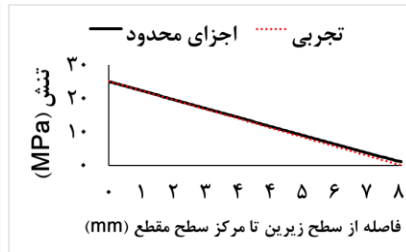
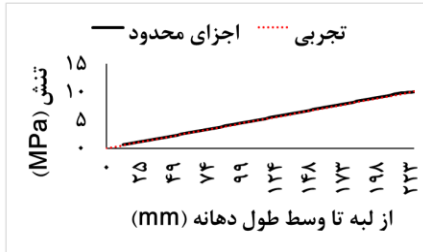
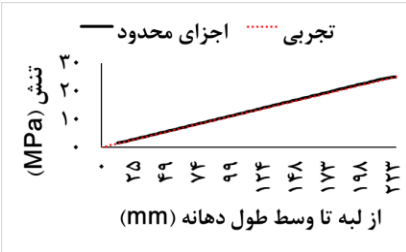


د) تطابق داده‌های خیز برای 0.4Pmax

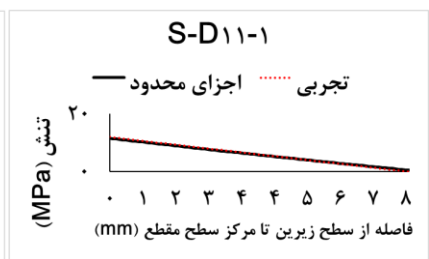
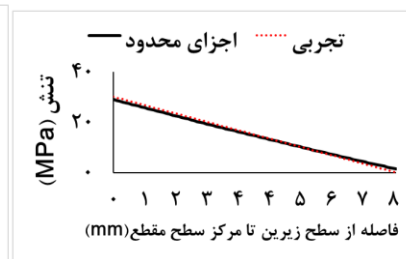
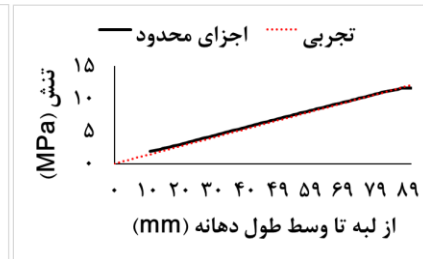
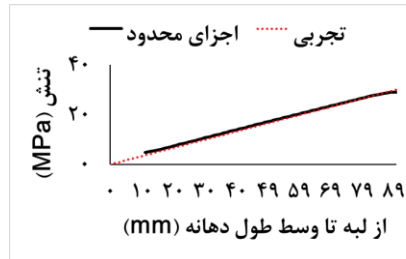
شکل ۸- تطابق داده‌های MOR و خیز حاصل از مطالعه تجربی و روش اجزای محدود برای نیروی حداکثر و $0.4 P_{max}$ برای پروفیل‌های مورد مطالعه



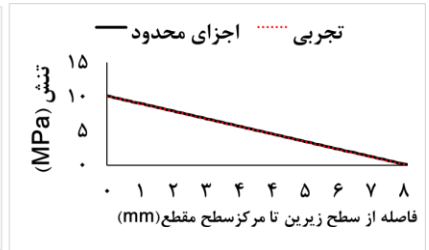
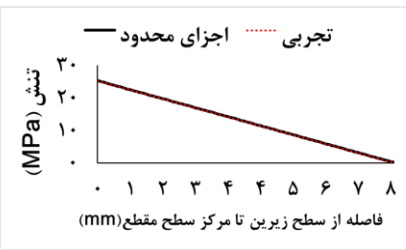
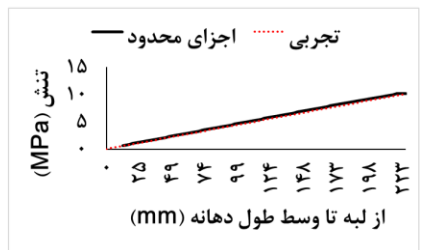
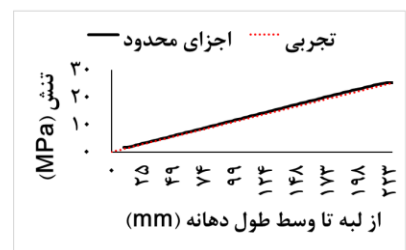
پروفیل D7 (طول دهانه 180 mm)



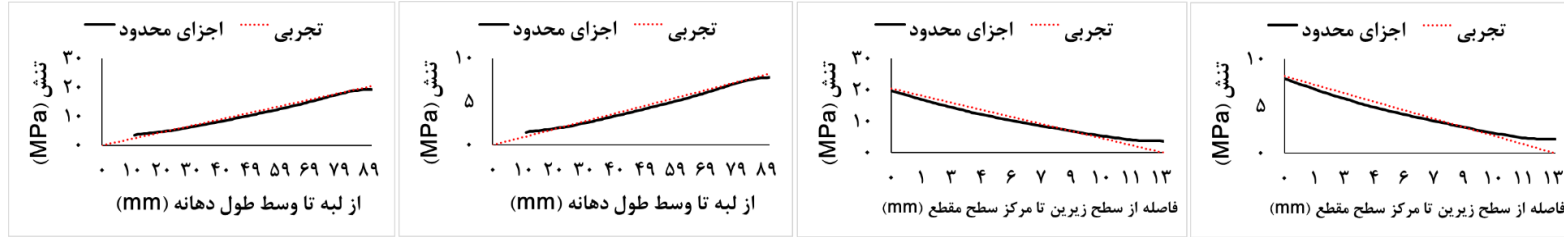
پروفیل D7 (طول دهانه 450 mm)



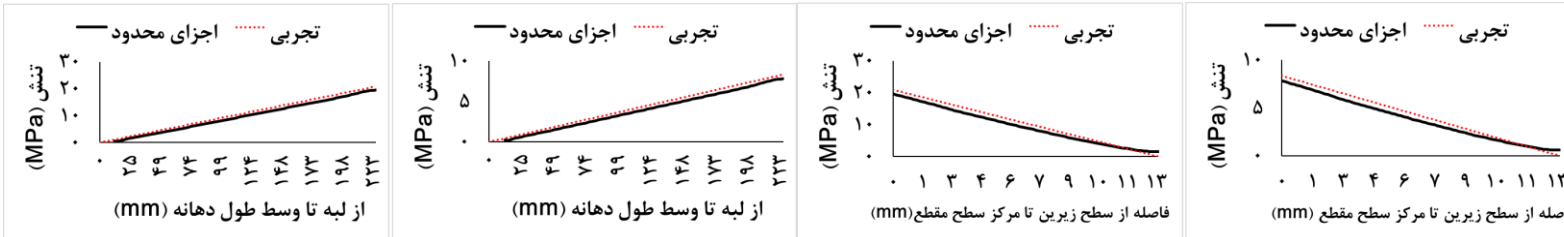
پروفیل D11 (طول دهانه 180 mm)



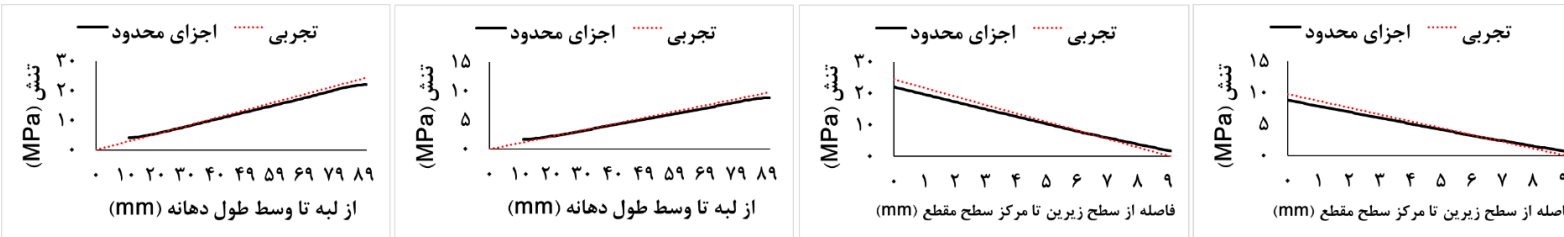
پروفیل D11 (طول دهانه 450 mm)



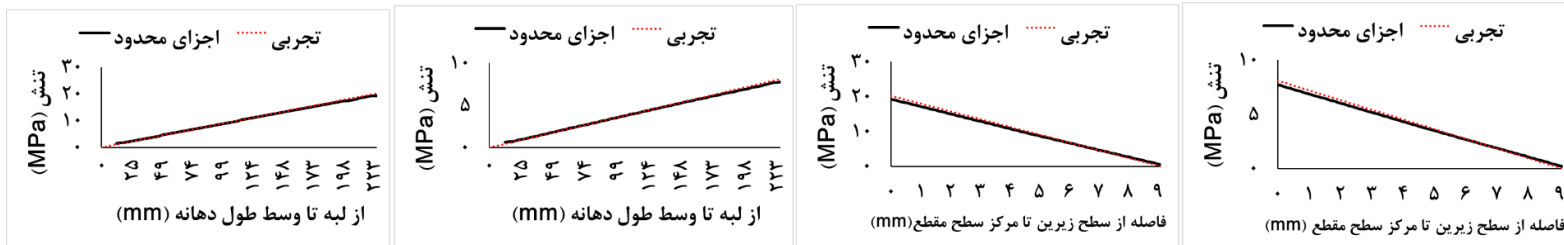
پروفیل D13 (طول دهانه 180 mm)



پروفیل D13 (طول دهانه 450 mm)



پروفیل D15 (طول دهانه 180 mm)



پروفیل D15 (طول دهانه 450 mm)

(الف)

(ب)

(ج)

(د)

شکل ۹- مقایسه توزیع تنش روش تجربی و FEM تا وسط دهانه و از سطح زیرین تا مرکز سطح برای پروفیل‌های مختلف در طول دهانه‌های مختلف، (الف) و (ب) به ترتیب توزیع تنش از سطح زیرین تا مرکز سطح برای P_{max} و $0.4P_{max}$ ، (ج) و (د) به ترتیب توزیع تنش تا وسط طول دهانه در سطح زیرین نمونه برای P_{max} و $0.4P_{max}$.

نتیجه‌گیری

امروزه شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار مکانیکی مواد به‌جای اندازه‌گیری مستقیم آن‌ها به دلیل کاهش زمان و هزینه اندازه‌گیری به طور چشمگیری مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران قرار گرفته است، تا بتوانند با دقت بالایی رفتار مواد را زیر بار خارجی پیش‌بینی کرده و برای کاربردهای مختلف آن را تحلیل و طراحی کنند. روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی خواص چندسازه‌های چوب پلاستیک وجود دارند، که برحسب درصد اجزای ترکیب چندسازه خواص آن پیش‌بینی می‌شود، که در مقدمه به آن اشاره شد. از آنجایی، که در شرکت‌های تولیدکننده محصول چوب پلاستیک، فرمولاسیون به طور مستمر تغییر نمی‌کند و آنچه بیشتر از همه متغیر است شکل پروفیل‌های تولیدی است، در این تحقیق سعی بر آن شد تا از روش اجزای محدود برای پیش‌بینی پروفیل‌های مختلف آن استفاده شود. از این‌رو، در این تحقیق ابتدا خواص پروفیل‌های توخالی و توپر چندسازه چوب-پلاستیک با روش آزمایشگاهی اندازه‌گیری و سپس با روش اجزای محدود و توسط نرم‌افزار ANSYS پیش‌بینی و دقت آن ارزیابی شد. نتایج کلی نشان داد که با افزایش طول دهانه مقدار MOR کاهش یافته است، اما از نظر آماری معنی‌دار نبود. اما مقدار MOE با افزایش طول دهانه افزایش یافت، که از نظر آماری معنی‌دار بود. از سوی دیگر، تأثیر تغییر شکل سطح مقطع پروفیل بر MOR و MOE بسیار بیشتر از تغییر طول دهانه بود و از نظر آماری نیز هر دو معنی‌دار بودند. با اینکه با تغییر مستقل طول دهانه و نوع پروفیل مقدار MOR به ترتیب ۸/۸٪ و ۳۳/۱٪ و مقدار MOE به ترتیب ۱۷/۷٪ و ۲۴/۲٪ تغییر کرد، و با توجه به اینکه با تغییر متقابل طول دهانه و نوع پروفیل مقادیر MOR و MOE به ترتیب ۴۳/۹٪ و ۶۶/۶٪ تغییر کرد، اما نتایج نشان داد که روش اجزای محدود با دقت بسیار بالایی مقدار تنش حداکثر در سطوح و توزیع تنش -ها را در طول و مقطع عرضی تیر (با خطای کمتر از ۳ درصد) و مقدار خیز پروفیل‌های مختلف را نیز با دقت

خوبی پیش‌بینی می‌کند (خطای کمتر از ۱۵ درصد). این در حالی است که تحلیل مورد استفاده در این تحقیق از نوع خطی بوده است. به همین دلیل خطای پیش‌بینی در نمونه‌های با طول دهانه‌های بالاتر که با توجه به مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ از خود رفتار شکل‌پذیرتری نشان داده است، بیشتر بوده و با خطای بیشتری تنش و خیز را پیش‌بینی کرده است. از طرف دیگر در این تحقیق از داده‌های مدول الاستیسیته و ضریب پواسون نمونه‌های کوچک به‌عنوان داده ورودی به نرم‌افزار برای پیش‌بینی استفاده شده است. طوری که هرچه نمونه کوچک‌تر باشد، با توجه به معایب کمتری که در آن وجود دارد، مقاومت و سفتی بیشتری از خود نشان می‌دهد. به همین دلیل در هنگام تعمیم به نمونه‌های بزرگ‌تر خطای بیشتری ایجاد می‌کند. به همین دلیل بهتر است مدول و ضریب پواسون هر پروفیل به‌عنوان داده ورودی برای پیش‌بینی استفاده شود که خطای بسیار کمتری برای پیش‌بینی از خود نشان می‌دهد.

برای اعتبارسنجی نتایج این تحقیق می‌توان از فرمولاسیون‌های مختلف چوب پلاستیک، یا محصولات چندین شرکت داخل کشور با سطح مقطع متفاوت نمونه تهیه کرد و با روش‌های پیش‌بینی مختلف خواص آن‌ها را پیش‌بینی و با یکدیگر مقایسه کرد. تحلیل خطی به دلیل سادگی و زمان کمتر برای تحلیل معمولاً بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند. برای مطالعه جامع درباره پیش‌بینی خواص مواد و همچنین مطالعه رفتار ماده در ناحیه پلاستیک، پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی دقت تحلیل خطی و غیرخطی با یکدیگر مقایسه شود.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت و همکاری شرکت پلاستوود (چوب پلاست عصر هنر) اجرا شده است. بدین‌وسیله از همکاری بی‌شائبه مدیرعامل، هیئت‌مدیره و همچنین کارکنان زحمت-کش آن شرکت تشکر و قدردانی می‌شود.

- [1] Ebrahimi, G. and Rostampour-haftkhani, A., 2010. Wood-Plastic Composites (translation). University Of Tehran Press,, 900 p. (In Persian).
- [2] Madhoushi, M. and Chavoshi, A., 2012. Investigation on the withdrawal strength of screw, nail and water absorption of Nanoclay-MDF dust-PP composite. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 3 (1), 52-66.
- [3] Motie, N., Ebrahimi, G., Tajvidi, M. and Layeghi, M., 2013. Minimizing hot-press time in the manufacturing process of wood plastic composites. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 4 (2), 79-90.
- [4] Ansari Movahed, D., Jonoobi, M. and Djafari Petroudy, S.R., 2021. Effects of maleic anhydride and oxidizer on mechanical and contact angle of polypropylene and cellulose nanocrystals composites. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 12 (2), 299-307.
- [5] Balasubramanian, K., Rajeswari, N. and Vaidheeswaran, K., 2020. Analysis of mechanical properties of natural fibre composites by experimental with FEA. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1149-1153.
- [6] Pujari, S., Ramakrishna, A. and Padal, K.B., 2017. Prediction of swelling behaviour of jute and banana fiber composites by using ANN and regression analysis. *Materials Today: Proceedings*, 4 (8), 8548-8557.
- [7] Srivabut, C., Ratanawilai, T. and Hiziroglu, S., 2021. Statistical modeling and response surface optimization on natural weathering of wood-plastic composites with calcium carbonate filler. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23 (4), 1503-1517.
- [8] Summerscales, J., Virk, A.S. and Hall, W., 2019 Enhanced rules-of-mixture for natural fibre reinforced polymer matrix (nfrp) composites (comment on lau et al. in volume 136). *Composites Part B: Engineering*, 160, 167-169.
- [9] Venkateshwaran, N. and ElayaPerumal, A., 2011 Modeling and evaluation of tensile properties of randomly oriented banana/epoxy composite. *Journal of reinforced plastics and composites*, 30 (23), 1957-1967.
- [10] Mohamadzadeh, M., Haftkhani, A.R., Ebrahimi, G. and Yoshihara, H., 2012. Numerical and experimental failure analysis of screwed single shear joints in wood plastic composite. *Materials & Design*, 35, 404-413.
- [11] Silva, L.J., Panzera, T.H., Christoforo, A.L., Durão, L.M. and Lahr, F.A.R., 2012 Numerical and experimental analyses of biocomposites reinforced with natural fibres. *International Journal of Materials Engineering*, 43-49.
- [12] Shankar, P.S., Reddy, K.T., Sekhar, V.C. and Sekhar, V., 2013 Mechanical performance and analysis of banana fiber reinforced epoxy composites. *International journal of recent Trends in Mechanical Engineering*, 1 (4), 1-10.
- [13] Prasad, V., Joy, A., Venkatachalam, G., Narayanan, S. and Rajakumar, S., 2014 Finite element analysis of jute and banana fibre reinforced hybrid polymer matrix composite and optimization of design parameters using ANOVA technique. *Procedia Engineering*, 97, 1116-1125.
- [14] Suryawanshi, R.T., Venkatachalam, G. and Vimalanand, S.V., 2016. Determination of stress intensity factor of banana fibre reinforced hybrid polymer matrix composite using finite element method. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 60 (3), 180-184.
- [15] Bi, Z., 2017. Finite element analysis applications: a systematic and practical approach. Academic Press.
- [16] Roy, H., Pahlevani, F., Cholake, S., Echeverria, C., Banerjee, A. and Sahajwalla, V., 2018. Simulation of Marine Bio-Composite Using Empirical Data Combined with Finite Element Technique. *Journal of Composites Science*, 2 (3), 48.

- [17] Gupta, U.S., Dhamarikar, M., Dharkar, A., Tiwari, S. and Namdeo, R., 2020. Study on the effects of fibre volume percentage on banana-reinforced epoxy composite by finite element method. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 3 (4), 530-540.
- [18] Pagar, A.H. and Suryawanshi, S., 2021. Finite Element Analysis of Groundnut Shell and Coir Fiber Mix Epoxy Composite Moulding and Testing.
- [19] Sathishkumar, G., Mohamed Akheel, M., Ibrahim, M., Rajkumar, G., Karpagam, R. and Gopinath, B., 2021. Experimental and Finite Element Analysis of Lignite Fly Ash on the Mechanical Properties of Sisal-added Polymer Matrix Composite Using ANSYS Workbench. *Journal of Natural Fibers*, 1-25.
- [20] Standardization-CEN, E.C.f. and Standardization-CEN, E.C.f., 2020. EN 310: determination of modulus of elasticity in bending and bending strength. CEN Brussel.
- [21] Lewis, C.D., 1982. *Industrial and business forecasting methods: A practical guide to exponential smoothing and curve fitting*. Butterworth-Heinemann.
- [22] Rajesh, M., Srinag, T., Prasanthi, P. and Venkataraoenkatarao, K., 2016 Finite element analysis of coir / Banana fiber reinforced composite material. *International Journal of Advanced Research in Mechanical Engineering & Technology* 2(4), 29-33.

Simulation and prediction of bending performance of wood plastic composite profiles using finite element method by ANSYS Workbench software

Abstract

In this study, bending performance of the WPC profiles of Asre Honar company were measured, then were predicted by finite element method (FEM) with ANSYS software to decrease the cost and time of measurement. The bending strength of small control specimens with a span length of 180 mm were firstly measured. Accordingly, their bending modulus of elasticity (MOE) and Poisson's ratio of 0.3 were used as input data for prediction. Therefore, four types of hollow and solid WPC profiles with span lengths of 180 and 450 mm were tested under three-point bending loading with a Hounsfield 0308 testing machine with a loading rate of 5 mm/min. Subsequently, their MOR and creep values were measured and compared with those predicted by the FEM. The results of the analysis of variance (ANOVA) showed that the main effect of profile types on MOR was statistically significant. Furthermore, the main and the interaction effects of the span lengths and profile types on MOE were statistically significant. The investigation of the main effects revealed that MOR and MOE decreased by 8.8% and increased by 17.7%, respectively by raising the span length from 180 to 450 mm, and also they were altered by 33.1% and 24.2% with the change in profile types. In addition, the interaction effects showed that MOR and MOE values changed by 43.9% and 66.6%, respectively with the simultaneous change of the span lengths and profile types. The results indicated that the FEM predicted the MOR values with a mean absolute percentage error (MAPE) of less than 3.03% and their corresponding creep with a MAPE of less than 15.25%. According to the satisfied MAPE of FEM, it could be suggested as an efficient method for predicting the bending properties of these products.

Keywords: wood-plastic profile, finite element method, prediction, bending strength, creep.

A. Rostampour Haftkhwani^{1*}

A. Chavooshi^{2,3}

M. Arabi⁴

¹ Assistant prof. of Wood Science and Technology, Department of natural resources, Faculty of agriculture and natural resources, University of Mohaghegh Ardabili. Ardabil, Iran

² M.Sc. Graduate, Department of Wood Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran

³ Chief Executive Officer (CEO) at Choob Plaste Asre Honar Company (Plastowood), Tehran, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Wood Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

Corresponding author:
arostampour@uma.ac.ir

Received: 2022/08/10

Accepted: 2022/10/25