بررسی توزیع تنش در اتصالات گوشه با اعضای چوب پلیمر با استفاده از روش اجزای محدود

حمیده عبدل‌زاده[۱*]
محمد لایقی[۲]
قنبر ابراهیمی[۳]
مهدی قاسمیه[٤]

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

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

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

[۴] استاد عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مسئول مکاتبات:
h_abdolzadeh@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۰

چکیده

در تحقیق حاضر بررسی آزمایشگاهی و عددی جامعی در رابطه با عملکرد سازه‌ای اتصالات سربه‌سر با اعضای چوب–پلیمر (پلی(فورفوریل‌الکل)) تحت تنش مرکب در مقایسه با آزمونه‌های شاهد انجام شد. هدف از این تحقیق افزایش هم‌زمان عملکرد این اتصالات در فضای بیرونی و تحت بارگذاری مرکب بوده است. برای بررسی عملکرد این اتصالات آزمونه‌هایی با دو مقدار متفاوت فورفوریلاسیون در سطوح ۲۰٪ و ۶۵٪ در مقایسه با آزمونه‌های شاهد مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. خواص مکانیکی فراورده حاصل بر اساس استاندارد ASTM-D143 تعیین و براساس آن‌ها ویژگی-های ماده برای مدل تعیین شد. مقادیر نیرو در حد تناسب تجربی با نتایج مدل FEM مقایسه شد. نتایج به دست آمده از مدل نیز کاملا نتایج تجربی را تایید کرد. اعتبارسنجی نتایج مدل همخوانی بسیار خوبی با نتایج تجربی نشان داد. برای به دست آوردن درک درستی از رفتار اتصال در مدل FEM و پیش‌بینی علت‌های شکست آن تحت بار، برخی از خواص مکانیک شکست چوب پلیمر مورد استفاده قرار گرفت.

واژگان کلیدی: روش اجزای محدود، اتصال سربه‌سر، تنش مرکب، فورفوریلاسیون و مکانیک شکست.

مقدمه

در سال‌های اخیر با توجه به ارزیابی تحقیقات صورت گرفته در رابطه با طراحی سازه‌های چوبی یعنی تلاش برای ساخت مدل‌هایی بر مبنای خصوصیات ماده در قالب روش اجزای محدود[۱] (FEM) و یا بررسی و تجربه و تحلیل بر اساس مدل‌های سازه‌ای می‌توان دریافت که مهندسان ساختمان مجددا به مزایای چوب به‌عنوان ماده ساختمانی علاقه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند [۱].

خصوصیات چوب به دلیل رشد طبیعی و شرایط محیطی به شدت متغیر هستند. حتی در یک درخت خصوصیات چوب یکسان نیستند. علاوه بر این مواد و سازه‌های تحت بار همواره دارای اشکال هندسی منظم نیستند و مقادیر بارها و تغییرشکل‌های متناظر خارجی را همواره نمی‌توان کاملا مشخص نموده و با مقادیر قطعی تعیین کرد. تحقیقات انجام شده در حوزه علوم و صنایع چوب برای به‌حداقل رساندن تاثیر عوامل محیطی و هرسونایکسانی ذاتی چوب راهکارهای مختلفی را ارائه نموده است. معایب مختلف چوب در کاربرد آن به عنوان مصالح سازه‌ای، بشر را به استفاده از روش‌های مختلف برای برطرف کردن این معایب سوق داده است. اشباع چوب با برخی از مونومرها و پلیمریزاسیون این مونومرها در چوب با توجه به انواع مختلف آن‌ها و تفاوت چوب

[1] Finite Element Method

پلیمر تولیدی یکی از این روش‌های رایج است که همراه با افزایش کارایی اتصال در فضاهای بیرونی خواص مکانیکی فراورده حاصل را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در سال‌های اخیر در صنعت اصلاح چوب، موادی با پایه طبیعی که از منابع تجدید شونده طبیعی تهیه می‌شوند بیش از مواد شیمیایی قدیمی مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از این فراورده‌هایی که بعد از سالها مجددا مورد توجه محققان مختلف دنیا قرار گرفته است تولید چوب پلیمر پلی(فورفوریل‌الکل) است [۲]. بسته به نوع چوب پلیمرها خواص مکانیکی اعضای سازه‌ای حاصل از آنها تغییر می-کند. بررسی برهمکنش این خواص در سازه‌های چوبی مانند مبلمان و اثربخشی طراحی مناسب اتصال تحت بار می‌تواند به بهره‌گیری مناسب خواص القایی فیزیکی و مکانیکی اعضای چوب پلیمر منتهی شود.

استفاده از چوب و فراورده‌های آن در سازه به خاطر فقدان معیار شکست مناسب با محدودیت‌هایی همراه است. اعضای چوبی در سازه‌ها دارای نواحی موضعی هستند که در اثر بارهای وارده، برش و کشش عمود بر الیاف زیادی را متحمل می‌شوند. سازه‌هایی که در معرض تنش کششی عمود بر الیاف قرار می‌گیرند نگران کننده‌تر هستند. دلیل اصلی ضعف چوب در این جهت مستعدتر بودن آن به ترک خوردگی طی خشک شدن و یا فرایندهای اصلاح در این جهت است. راه چاره برای تحلیل این ترک‌ها استفاده از مکانیک شکست است.

استفاده از ابزار آزمایشگاهی برای بررسی رفتار سازه تحت بار نمی‌تواند جزئیات عکس‌العمل سازه را تحت بار نشان دهد از سویی دیگر روش‌های تجربی بسیار وقت‌گیر و هزینه برند. استفاده از مدلسازی می‌تواند تا حد زیادی به برطرف کردن این مشکلات کمک کند. روش اجزای محدود روشی عددی است که از طریق آن می‌توان مسائل مهندسی و ریاضی و فیزیک را حل کرد. در مسائلی که شکل هندسی، بارگذاری و خواص ماده در آن‌ها پیچیده یا مختلط است نمی‌توان با تحلیل‌های متعارف دقت مطلوبی را بدست آورد. حل‌های تحلیلی عبارت‌های ریاضی خاصی هستند که می‌توان با آن‌ها مقدار کمیت مجهول مورد نظر را در هر نقطه‌ای از جسم را پیدا کرد و در نتیجه، در کلیه نقاط جسم معتبر خواهند بود. این حل‌ها عموما بر پایه معادلات دیفرانسیل عمومی یا جزئی استوار است که اغلب به دلیل پیچیده بودن شکل هندسی، بارگذاری و خواص مواد، دسترسی به آن‌ها امکان‌پذیر نیست. بنابراین نیاز به روش‌های عددی، از جمله روش اجزای محدود احساس می‌شود.

چوب رفتارهای منحصر به فردی دارد که در سایر مواد نمی‌توان آن را مشاهده نمود. Eberhardsteiner (۲۰۰۲) پارامترهای زیر را برای چوب برمی‌شمرد:

پارامترهای بیولوژیکی نظیر گونه‌های چوبی

پارامترهای فیزیکی مانند دانسیته، دما، رطوبت هوا و مقدار رطوبت

پارامترهای مکانیکی که هرسونایکسانی سطح شکست را تعیین می‌کند

پارامترهای کلی سازه‌ای در محل [۳].

Eberhardsteiner (۲۰۰۲) رفتار تنش وکرنش چوب سالم نوئل را تحت بارگذاری چند محوری اندازه‌گیری کرده و محل شکست و رفتار آن قبل از شکست را تشخیص داد. با استفاده از چوب سالم و در صورتی که از یک سیستم اندازه‌گیری چشمی استفاده شود، امکان آن وجود دارد که محل تنش را در ماده ارتوتروپیک تحت تنش صفحه‌ای بتوان تشخیص داد. سه مشاهده اصلی عبارتند از: ۱) وابسته بودن بسیار زیاد شکست به زاویه بین جهت الیاف ماده و جهت اعمال بار؛ ۲) تکرارپذیری رفتار نمونه‌ها از طریق پارامترهای آزمونی مشابه؛ ۳) یکنواختی تغییر شکل نمونه‌ها در دامنه مورد نظر [۳].

Schmidt و Kaliske (۲۰۰۹) شبیه‌سازی عددی سازه‌های چوبی را با استفاده از روش اجزای محدود، که بسیار نزدیک به واقعیت ماده است با تکنیک‌های اجزای محدود و تعیین الگوریتم ارائه کردند. در این تحقیق آن‌ها برای تعیین الاستسیته و رفتار گسیختگی چوب، مدل مواد پیوسته هرسونایکسان را مورد بحث و بررسی قرار دادند. مدل گسیختگی نرم ماده می‌تواند به‌عنوان ویژگی پلاستیک مورد توجه قرار گیرد. رفتار گسیختگی ماده تحت تاثیر هرسونایکسانی، رطوبت، دما و رفتار گسیختگی قرار می‌گیرد [۴].

در دهه‌های اخیر استفاده از پلی‌فورفوریل الکل به عنوان یک چوب پلیمر دیواره‌ای دوستدار طبیعت رواج

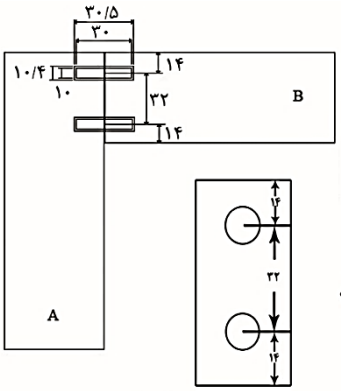
یافته است. بررسی منابع موجود نشان داد در اکثر موارد تحقیقات انجام گرفته به بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی این فراورده پرداخته است، ولی تاکنون تحقیقات جامعی که به بررسی توزیع تنش در اعضای چوبی و چوب پلیمر بپردازد و یا رفتار اعضای فورفوریل‌دار شده در سازه تحت بار را بررسی کند، یافت نشد. از این رو با توجه به ارتقاء توان تحمل تنش برشی موازی الیاف و تغییر کشش عمود بر الیاف اعضا، در این تحقیق به کمک روش اجزای محدود، توزیع تنش در اتصالات گوشه با اعضای چوب پلیمر تحت تنش مرکب بررسی شده است.

با وجود فقدان اطلاعات طراحی به منظور پذیرش آسان‌تر اتصالات گوشه در ساخت سازه‌های چوبی بخصوص مبلمان و استفاده از اعضای فورفوریل‌دار شده در ساخت آن، استفاده از مدل روش اجزای محدود می‌تواند نقش موثری در بهینه‌سازی دقت توزیع تنش در اتصال آزمونی ایفا کند.

مواد و روش‌ها

ساخت آزمونه‌های اتصال گوشه

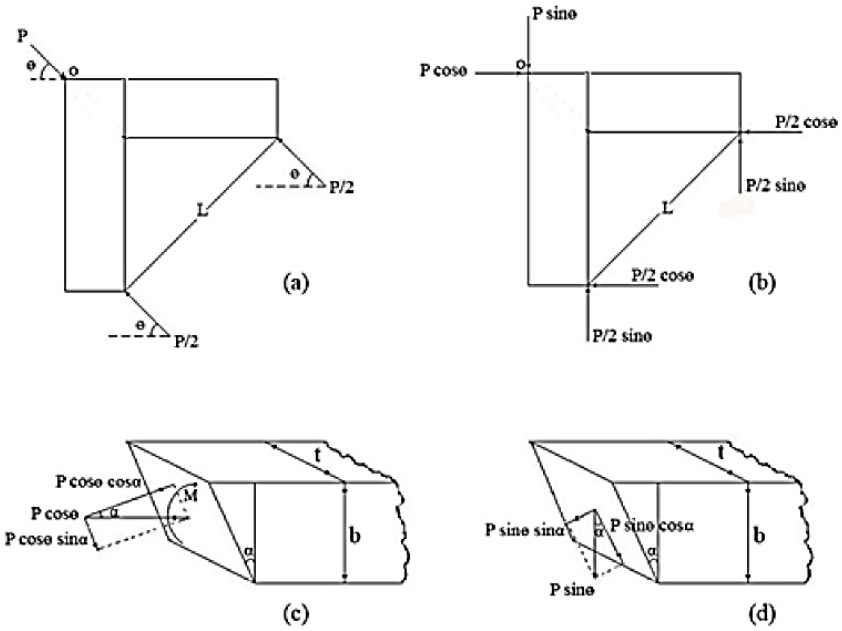
جزئیات ساختار اتصال



شکل ۱- محل و ابعاد پین‌های چوبی در اتصال گوشه (mm)

در این تحقیق از پین‌های چوب راش با قطر ۱۰ میلیمتر و طول ۳۰ میلیمتر به عنوان اتصال‌دهنده مکانیکی استفاده شد. شکل ۱ جزییات قرارگیری این پین‌ها را نشان می‌دهد.

بررسی تجربی توزیع تنش در اتصال گوشه تحت کشش قطری



شکل ۲- توزیع تنش در محل اتصالات L شکل (اتصال گوشه) سربه‌سر تحت آزمون کشش قطری

$$M = \frac{PL}{۴} \quad (۱)$$

در صورتیکه L=۱۴۱/۴۰ mm باشد.

$$I = \frac{۱}{۱۲} t \left(\frac{b}{cos\alpha}\right)^{۳} = \frac{tb^{۳}}{۱۲cos^{۳}\alpha} \quad (۲)$$

بنابراین حداکثر تنش‌های محوری موازی با الیاف، σ_a، به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma_a = -\frac{P\cos\theta\cos\alpha}{t\left(\frac{b}{cos\alpha}\right)} \pm \frac{MC}{I} \quad (۳)$$

$$\sigma_a = -\frac{P\ cos\theta cos^{۲}\alpha}{tb} \pm \frac{PL}{۴}\left(\frac{b}{۲cos\alpha}\right)\frac{۱۲\ cos^{۲}\alpha}{tb^{۳}} \quad (۴)$$

$$\sigma_a)_D = -\frac{P\ cos\theta cos^{۲}\alpha}{tb} - \frac{۳PL(cos^{۲}\alpha)}{۲\ tb^{۲}} \quad (۵)$$

$$\sigma_a)_E = -\frac{P\ cos\theta cos^{۲}\alpha}{tb} + \frac{۳PL(cos^{۲}\alpha)}{۲\ tb^{۲}} \quad (۶)$$

رفتار اعضای چوبی تحت بارگذاری کششی تا مرحله شکست بررسی شده و مقادیر بار در مرحله شکست ثبت گردید. مقدار σ_a، آزمونه‌ها در دو گوشه داخلی و خارجی اتصالات (به ترتیب در نقاط D و E) با مقادیر α و θ بر اساس معادلات به‌دست آمد.

بنابراین در اتصال سربه‌سر $\theta = ۴۵^{\circ}$ و $\alpha = ۰^{\circ}$ است و مقدار تنش σ_a به صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$\sigma_{a)_D} = -۷۰۷/۰\frac{P}{tb} - ۵/۱\frac{PL}{tb^{۲}} \quad (۷)$$

$$\sigma_{a)_E} = -۷۰۷/۰\frac{P}{tb} + ۵/۱\frac{PL}{tb^{۲}} \quad (۸)$$

ساخت مدل اجزای محدود

المان‌ها

در این تحقیق نسخه ۱۴/۵ نرم‌افزار ANSYS مورد استفاده قرار گرفت. از میان فهرست المان‌های ANSYS المان‌های SOLID186 با ۲۰ گره در هر المان، المان مناسبی تشخیص داده شد. این المان‌ها می‌توانند مدل سازی مناسب اشکال هندسی پیچیده و محدوده انحناء-داری که در اتصال گوشه مشاهده می‌شود را اصلاح کرده و دقت بالاتری را نسبت به تحقیقات دیگری که با وجود المان‌های کم‌تر زمان بیشتری برای محاسبه نیاز داشتند، فراهم کند. مدل FEM بر اساس ابعادی که در قسمت‌های قبلی برای اتصالات ذکر شد ساخته شد.

خصوصیات مواد و سیستم‌های مختصات

چوب ماده‌ای طبیعی، ارتوتروپیک و غیرهمگن است اما در مدل FEM، غالبا آن را همگن و عاری از معایب فرض می‌کنند. برای آزمونه‌های کوچکی که در فاصله نسبتا زیادی از مغز تهیه می‌شوند، اثر انحنای دوایر رشد قابل چشم‌پوشی است. آزمونه‌های تجربی از قطعات فاقد معایب رشد درست شده بودند. خصوصیات استفاده شده برای المان‌های SOLID186 برای مواد ارتوتروپیک دارای سه مدول الاستیک (E_X, E_Y, E_Z)، سه ضریب پواسون (ν_{XY}, ν_{XZ}, ν_{YZ}) و سه مدول برشی (G_{XY}, G_{YZ}, G_{XZ}) است.

Tannert و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که مدهای ترد گسیختگی در دامنه رفتار الاستیک آغاز شده و ظرفیت اتصال را تعیین می‌کند [۵]. در این تحقیق ماده ارتوتروپیک و الاستیک خطی فرض شده است و چوب همگن و عاری از معایب با مقدار رطوبت، دمای هوا و دمای چوب ثابت در نظر گرفته شده است. خصوصیات الاستیک از ابتدا مطابق با جدول ۱ تنظیم شدند.

در تحقیق حاضر از اعضای چوب پلیمر با دو مقدار متفاوت فورفوریلاسیون استفاده شد و نتایج حاصل از آنها با توزیع تنش در آزمونه شاهد مقایسه گردید. مقدار فورفوریل الکل در واحد حجم در سطح کم تقریبا ۲۰٪ و در سطح نسبتا زیاد ۶۵٪ بود. برای درک راحت‌تر و پرهیز از تکرار مقدار فورفوریلاسیون در متن مقاله از واژه‌های سطح کم و سطح زیاد برای مقایسه اثر تیمار بر توزیع تنش استفاده شده است.

جدول ۱- خواص الاستیک چوب و چوب پلیمر

نمونه‌های آزمونی		E_x	E_Y	E_Z	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}	ν_{XY}	ν_{XZ}	ν_{YZ}
چوب راش (شاهد)		۳۶۶۶	۲۹۳/۲۸	۱۸۳/۳	۲۶۱/۸۶	۲۶/۱۸۶	۲۴۶/۱۵	۰/۳۷	۰/۵	۰/۶۷
چوب	سطح کم	۵۳۶۹	۴۲۹/۵۲	۲۶۸/۴۵	۳۸۳/۵	۳۸/۳۵	۳۶۰/۴۹	۰/۳۷	۰/۵	۰/۶۷
پلیمر	سطح زیاد	۶۳۷۵	۵۱۰	۳۱۸/۷۵	۴۵۵/۳۶	۴۵/۵۳۶	۴۲۸/۰۴	۰/۳۷	۰/۵	۰/۶۷

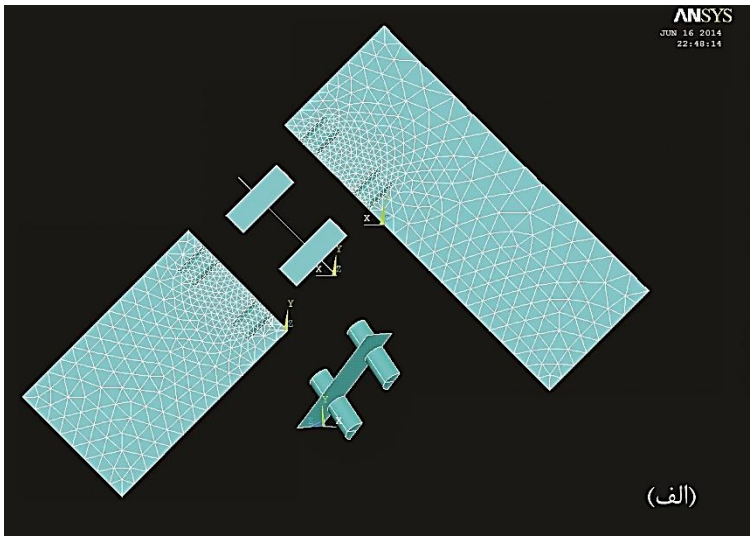
مقادیر مدول الاستسیته و مدول برشی بر حسب MPa

در این جدول مدول‌های الاستیسیته طولی از طریق آزمایش برای آزمونه‌های شاهد و چوب پلیمر تعیین شد و مقادیر مدول شعاعی و مماسی و مدول‌های برشی با کمک نسبت‌های گزارش شده توسط Ebrahimi (۱۹۹۷) بدست آمدند. مقادیر ضرایب پواسون نیز متوسط ضرایب تعیین شده برای پهن‌برگان در این منبع به‌دست آمد [۶]. سه سیستم مختصات موضعی برای هر عضو و پین، تعیین شدند. بنابراین برای هر دو عضو می‌توان خصوصیات ماده‌ای یکسانی را فرض کرد و یا اینکه خاصیت ماده‌ای دیگری را برای هرعضو به‌طور جداگانه تعریف کرد.

به دلیل تفاوت بالای چوب در کشش موازی و عمود بر الیاف، لازم است مقادیر سخت شوندگی جنبشی دوخطی[1] ماده تعیین شود. برای تعیین مقادیر این فاکتور، مقادیر مدول تانژانت و مقدار نیرو در حد تسلیم چوب و فراورده‌های چوبی تحت آزمون فشار موازی الیاف تعیین شدند.

شکل هندسی مدل و مش‌بندی

Solid مدل‌سازی است که استفاده کننده شکل هندسی شئ را برای تشریح شرایط مرزی و فراهم ساختن کنترل‌هایی در زمینه اندازه و شکل المان‌ها مورد استفاده قرار می‌دهد که برای مدل کردن اتصالات گوشه بسیار مناسب است. برای کاهش زمان محاسبات فقط نصف اتصال با استفاده از تقارن ماده مدل شد. مش‌بندی FEM با استفاده از المان‌های آجری[2] انجام شد. دقت نتایج رابطه معکوسی با زمان تحلیل دارد. مدل به قسمت‌های مختلفی تقسیم می‌شود که به گرادیان تنش و اهمیت نتایج در قسمت خاصی وابسته است. ریزترین مش در محل پین‌ها با احتمال اتفاق افتادن بالاترین تنش‌ها مورد استفاده قرار گرفت.



شکل۳- مش‌بندی FEM در اعضای اتصال و ناحیه تماس (بین دو عضو) در اتصال

[1] Bilinear Kinematic Hardening

[2] brick

تماس در FEM به عنوان فرایند تماس دو سطح جدا از هم، با همدیگر تعریف می‌شود. در حالت فیزیکی متداول احساس می‌شود که سطوح تماسی درون همدیگر نفوذی ندارند؛ آن‌ها نیروهای نرمال فشاری را انتقال داده و جداسازی دو قطعه در تماس با هم از همدیگر آزاد است. استفاده از المان تماس باعث ایجاد حالت غیرخطی که شامل تغییر در سفتی مماسی و اصطکاک است، می‌شود. هر دو این تغییرات، می‌توانند باعث مشکلاتی در همگرایی تحلیل عددی شده و نیازمند پیشینه بارگذاری دقیق با گام‌های زمانی کوچک است. در روش‌های تماسی متداول از فنرهای تماسی استفاده می‌شود که فقط در زمان نفوذ کردن قطعات درون هم، فعال می‌شود. برای تعادل جسم تحت بار و تکمیل حل، محدودیت‌های مقدار نفوذ دو قطعه در همدیگر نیازمند ایجاد نیروی تماسی سطح مشترک است. اما اکثر اجسام نفوذی ندارند و بنابراین هدف از درنظر گرفتن حداقل مقدار نفوذ، بالا بردن دقت است.

المان‌های سطح به سطح TARGET170 و CONTACT174 مورد استفاده قرار گرفتند. آن‌ها سطوح تغییرشکل‌پذیری را فراهم ساخته و مش‌های FEM زیرین را مانند پوستی می‌پوشانند. سفتی تماسی(FKP)[1]، تلورانس نفوذ[2] (FTOL)، ضریب اصطکاک[3] (f) و فاصله تماسی آغازین[4](g) بین اعضای تماسی بر روی دقت نتایج و رفتار همگرایی اثرمی‌گذارند و باید مشخص شوند. FKP و FTOL متغیرهای بدون واحدی هستند که به ترتیب سفتی نسبی اجسام تماسی و اجازه نفوذ مرتبط با عمق المان‌های زیرین را نشان می‌دهند. به‌دست آوردن این مقادیر همواره به سعی و خطا نیازمند است. بر اساس بررسی تحقیقات انجام شده روی چوب و سعی وخطا طی انجام تحقیق حاضر عدد ۰/۰۱ برای FKP به دست آمد، این مقدار اجازه می‌دهد حل با استفاده از حل‌کننده پیش-فرض به همگرایی بیانجامد. FTOL بر روی عدد ۰/۵ تنظیم شده است که مقداری است که اجازه می‌دهد، نفوذ سطوح تماسی رفتار واقعی سطوح نفوذکننده غیرمتقارن چوبی را منعکس سازد.

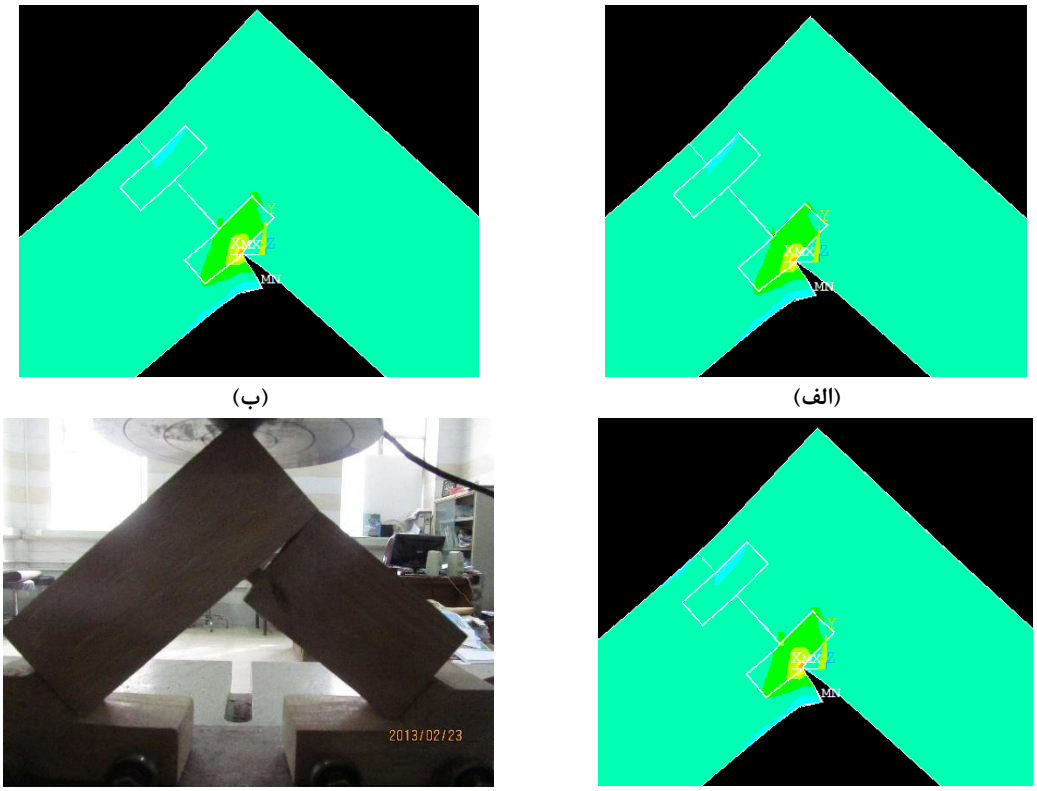
تلورانس ساخت (چفت شدن دوقطعه یا تفاوت ابعاد سوراخ پین با پین) به‌طور معنی‌داری بر روی کارایی اتصال اثر می‌گذارد. فاصله‌های ابتدایی که نشان دهنده عدم تماس دو عضوند ناشی از تفاوت در شکل هندسی سطوح هستند که برای مدل‌سازی رفتار اولیه باید بررسی شوند. تحقیقات پیشین پیشنهاد می‌کنند که با مدل‌سازی فاصله بین اعضای اتصال (تلورانس ساخت) تا حدود ۰/۵ میلیمتر، می‌تواند هم‌خوانی خوبی بین منحنی پاسخ بارگذاری تجربی و تحلیلی به دست آورد. در این تحقیق بر اساس مدل‌های ساخته شده و سعی و خطای اولیه فاصله بین اعضا ۰/۴ میلیمتر در نظر گرفته شد. کیفیت سطح اعضا نقش مهمی در رفتار اتصال تحت بار دارد به عنوان مثال می‌تواند اصطکاک بین آن دو را تعیین کند. در این بررسی ضریب اصطکاک μ را بر اساس تحقیقات قبلی در دامنه مقدار گزارش شده توسط McKenzie و Karpovich ۰/۳ در نظر گرفته شد [۷].

نتایج و بحث

مدل‌سازی آزمونه‌ها تحت کشش قطری

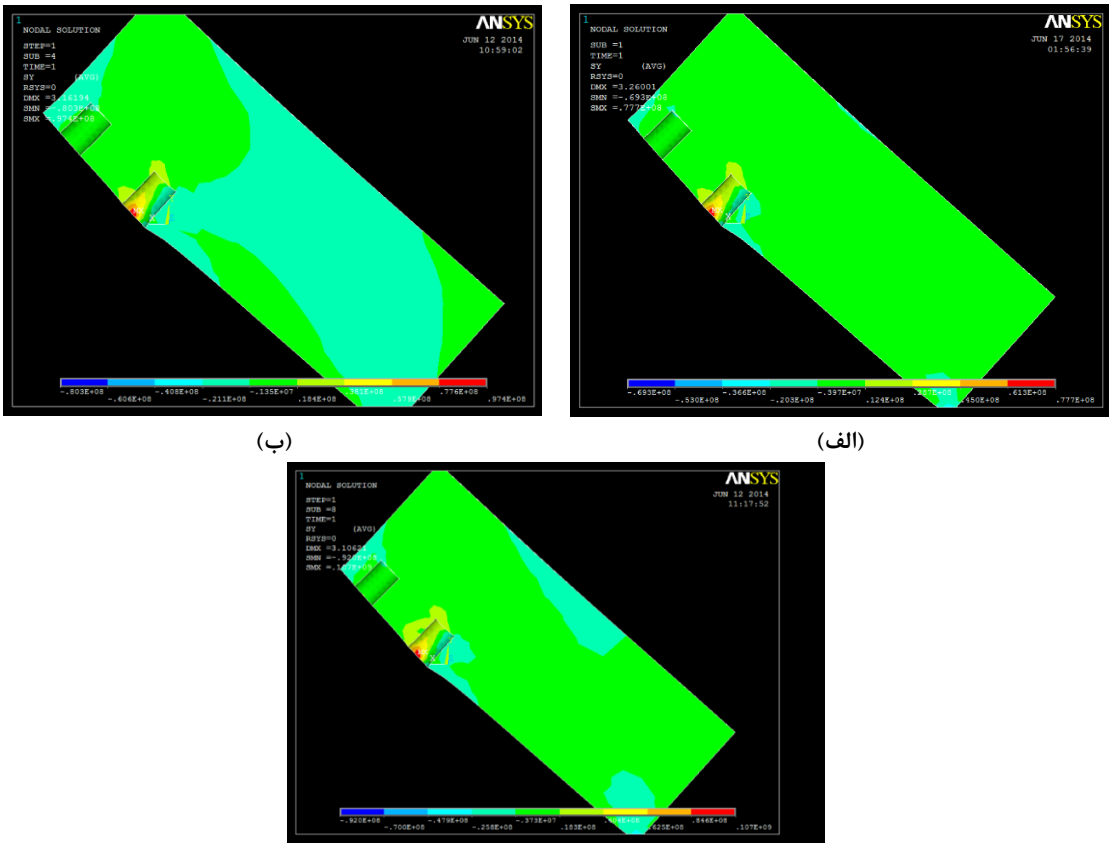
همان‌طور که در قسمت (د) شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد پین نزدیک به لبه داخلی در اتصال سربه‌سر تحت کشش قرار دارد و بازشدگی اتصال از این ناحیه آغاز می-گردد. بنابراین انتظار می‌رود تمرکز تنش در این ناحیه بالاتر بوده و تنش کششی عمود بر الیاف و برش موازی الیاف که علت اصلی شکست در اعضای چوبی است در این ناحیه به وجود آید. قسمت الف تا ج شکل ۴ نیز این موضوع را به‌طور کامل نشان داده و تایید می‌نماید.

[1] Contact stiffness
[2] Penetration Tolerance
[3] Friction Coefficient
[4] Initial Connection Gap



شکل ۴- توزیع تنش در اتصالات سربه‌سر تحت کشش قطری در آزمونه‌های شاهد (الف)، فورفوریل‌دار شده در سطح کم (ب)، در سطح نسبتا زیاد (ج) و نتیجه تجربی (د)

شکل‌های ۵ و ۶ توزیع تنش را در تک تک اعضا به طور مجزا نشان می‌دهند. در اتصال تحت بار کشش قطری، مد شکست موثر در عضو بزرگ‌تر مد I است. تحقیقات نشان داده است که فورفوریلاسیون و افزایش سطح آن باعث کاهش چقرمگی شکست در آزمونه‌های مکانیک شکست تحت مد I می‌شود. بررسی‌ها نشان داده است فرایند ساخت چوب پلیمر باعث ایجاد ریزترک‌هایی در ساختار چوب شده و این ریزترک‌ها باعث کاهش چقرمگی فراورده تحت مد I می‌شوند [۸]. علاوه بر این بررسی خواص مکانیکی چوب‌پلیمرها در سطوح مختلف فورفوریلاسیون نیز کاهش مقاومت کششی عمود بر الیاف (جدول ۲) را که تقریبا هم‌راستا با خواص مکانیک شکست تحت مد I است تایید کرده است [۹ و ۱۰]. همان‌طور که در شکل ۵ می‌توان به وضوح مشاهده نمود توزیع تنش کششی که نشان دهنده احتمال بیشتر شکست در عضو است با فورفوریلاسیون و افزایش سطح آن وسیع‌تر می‌شود (وسعت رنگ زرد و قرمز). ولی اتصال در ناحیه نزدیک به گوشه خارجی تحت فشار است (رنگ سبز و آبی تنش فشاری را نشان می‌دهد) و در محل پین (نزدیک به لبه داخلی) در این اعضا تنش کششی عمود بر الیاف یا شکست تحت مد I قرار دارد. به علت اینکه ناحیه تنش کششی در میانه‌های عضو قرار داشته و عضو در لبه‌ها تحت فشار (رنگ سبز و آبی) است شکست در این عضو اتفاق نخواهد افتاد.



(ب) (الف)

(ج)

شکل ۵- توزیع تنش در عضو بزرگتر اتصال سربه‌سر در آزمونه شاهد (الف) و فورفوریل‌دار شده در سطح کم (ب) و نسبتا زیاد (ج) تحت بارگذاری کشش قطری

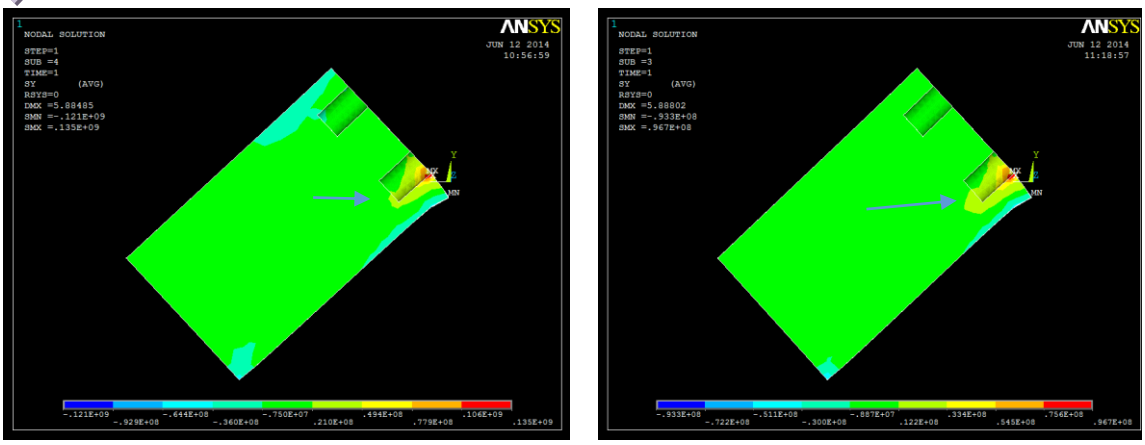
با توجه به شکل اتصال و نحوه بارگذاری، در اثر فورفوریلاسیون ناحیه‌ای که تحت تنش کششی است (قسمت زرد و قرمز رنگ در شکل ۶) باعث ایجاد مد برش (مد II شکست) در عضو کوچک‌تر می‌شود که وسعت این ناحیه در اثر فورفوریلاسیون کوچک‌تر می‌شود. تحقیقات نشان داده است مقاومت برشی موازی الیاف در آزمونه‌های فورفوریل‌دار شده با فورفوریلاسیون و افزایش سطح آن تا ۸۶ درصد افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق به طور خلاصه در جدول ۲ آورده شده است [۹ و ۱۰]. این ویژگی چقرمگی شکست را تحت مد II افزایش داده و شکست عضو را به تعویق می‌اندازد.

جدول ۲- خصوصیات مکانیکی چوب راش و چوب پلیمر آن [۱۳]

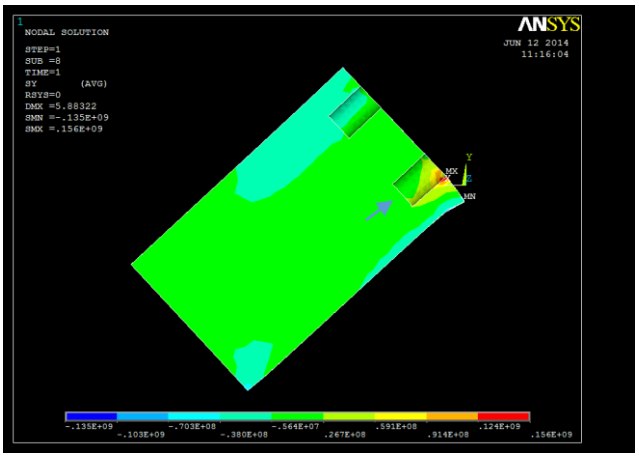
نمونه‌های آزمونی		کشش عمود بر الیاف	فشار عمود بر الیاف	برش موازی الیاف
چوب راش (شاهد)		۴/۶۲ (۱/۴۴)	۹/۵ (۵/۲۸)	۱۷/۴۳ (۳/۴۹)
چوب پلیمر	سطح کم	۳/۳۶ (۱/۰۳)	۱۱/۸۴ (۱/۸۸)	۲۷/۸۵ (۰/۸۱)
	سطح زیاد	۲/۲۳ (۰/۶۹)	۱۴/۵۴ (۲/۳۳)	۳۲/۴۳ (۱/۱۴)

اعداد داخل پرانتز مقادیر انحراف از استاندار را نشان می‌دهد، تنش‌ها بر حسب MPa محاسبه شده‌اند

بر اساس نتایج تجربی و معاینه اتصال پس از شکست مشخص شد که شکست اعضا تحت مد II و در عضو کوچک‌تر رخ می‌دهد. احتمالا با بکار بردن چسب قوی‌تری برای اتصال دو قطعه و پین، مقاومت خط اتصال تقویت می‌شود و همزمانی تقویت خط چسب و مقاومت اعضای اتصال با فورفوریلاسیون تحت برش موازی الیاف کارایی اتصال تحت تنش مرکب افزایش می‌یابد. این دستاوردها، نتایج تجربی به دست آمده از تحقیق را تایید می‌کند [۱۰].



(ب) (الف)



(ج)

شکل ۶- توزیع تنش در عضو کوچک‌تر اتصال سربه‌سر در آزمونه شاهد (الف) و فورفوریل‌دار شده در سطح کم (ب) و نسبتا زیاد (ج) تحت بارگذاری کشش قطری

اعتبار سنجی مدل

دقت و اعتبار مدل FEM حاضر با مقایسه مقدار نیرو در حد تناسب آزمونه‌های کشش قطری شبیه‌سازی شده با نمودار نیرو-تغییرمکان آزمونه‌های تجربی که توسط دستگاه آزمونگر ثبت شده است، بررسی شد. مدل با توجه به شکل هندسی اتصال گوشه و نحوه بارگذاری اتصال، با کمک روش اجزای محدود و با نرم افزار Ansys ساخته شد.

جدول ۳- اعتبار سنجی مدل با نتایج تجربی از طریق مقایسه مقادیر نیرو در حد تناسب

نتایج تجربی	**نیرو در حد تناسب (N)**	**۵۰۷۰/۹۷**
	نیرو در حد تسلیم (N)	**۶۱۰۲**
مدل	نیرو در ناحیه الاستیک (N)	**۵۰۷۰/۵۹**
خطا (٪)		**<۰/۵**

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که توافق بسیار خوبی بین مقادیر نیرو به‌دست آمده از مدل با نتایج تجربی وجود دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که توزیع تنش به‌دست آمده از مدل با دقت بالا می‌تواند توزیع تنش در آزمونه تحت تنش مرکب را نشان داده و نحوه شکست را در اعضای چوبی و فورفوریل‌دار شده به خوبی پیش‌بینی

نماید. نتایج تجربی به‌دست آمده از تحقیقات قبلی نشان داد که با تاثیر فورفوریلاسیون بر رفتار شکست و خواص مکانیکی فراورده، عملکرد اتصال تحت کشش قطری با افزایش سطح فورفوریلاسیون ۶/۶۹ ٪ افزایش می‌یابد [۱۰].

نتیجه‌گیری

۱) آزمون‌های مکانیکی روی چوب پلیمر نشان داده‌اند که تمام خواص مکانیکی چوب پلیمر راش پلی‌فورفوریل الکل غیر از کشش عمود بر الیاف با فورفوریلاسیون و افزایش سطح آن افزایش می‌یابد که در این میان افزایش برش موازی الیاف در این فراورده نقش مثبت و بسیار سازنده‌ای در عملکرد اتصالات گوشه تحت بارگذاری مرکب ایفا کرده‌است.

۲) با توجه به اینکه محل تمرکز تنش در اتصال گوشه از نوع سربه‌سر در محل اتصال دهنده (اتصال پین به اعضا) رخ می‌دهد، بررسی ناحیه اتصال و رفتار شکست در هر دو عضو می‌تواند راهنمای خوبی برای طراحی اتصال و استفاده از روش‌های اصلاحی مانند فورفوریلاسیون باشد. نتایج تحقیق حاضر و بررسی‌های قبلی نشان داده است که فورفوریلاسیون دو خصوصیت مکانیکی اصلی در عملکرد سازه‌ای اتصال را تغییر می‌دهد. از آنجا که ضعف چوب در تنش کشش عمود بر الیاف و برش موازی الیاف باعث شکست اتصال و سازه می‌شود با کاهش مقاومت عضو در کشش عمود بر الیاف و افزایش مقاومت برش موازی الیاف با فورفوریلاسیون و افزایش سطح آن عملکرد سازه‌ای اتصال تحت تاثیر قرار می‌گیرد. بررسی هم‌زمان رفتار شکست اتصال و بررسی محل تمرکز تنش از طریق روش اجزای محدود به کاربر اجازه می‌دهد با در نظر گرفتن مزایا و معایب فورفوریلاسیون یا هر چوب پلیمر دیگری بهترین طراحی سازه‌ای و نوع اتصال را انتخاب کند. با تغییر نوع طراحی اتصال و انتقال تنش به عضو به جای محل اتصال مقاومت اتصال افزایش یافته و عملکرد سازه‌ای بهبود می‌یابد.

۳) در این چوب پلیمر طراحی اتصال باید به گونه‌ای باشد که تا حد امکان شکست تحت مد ترکیبی یا نوع II را در اتصال ایجاد کرده و از شکست تحت مدI پرهیز شود.

۴) آزمون‌های مکانیک شکست بهترین معرف برای درک علل رفتار اتصالات گوشه تحت بارگذاری مرکب به‌حساب آمده و کمک بسیار زیادی برای بررسی شکست اعضای اتصال با چوب راش و چوب پلیمر حاصل از آن فراهم ساخته‌اند. نتایج این آزمون‌ها نشان داده‌اند که شکست تحت مد کشش در اعضای اتصال در محل اتصال دهنده با فورفوریلاسیون و افزایش سطح آن تسریع می‌شود.

۵) نتایج مدل روش اجزای محدود توانست به طور قابل قبول و با اعتبار بالا نتایج تجربی این تحقیق را تایید و کمک موثری در رابطه با رفتار شکست و پیش‌بینی مد شکست اعضای تحت بارگذاری مرکب ارائه نماید.

منابع

[1] Jenkel, Ch., Leichsenring, F., Graf, W. and Kaliske., M., 2015. Stochastic modelling of uncertainty in timber engineering. Engineering Structures, 99: 296-310.

[2] Omidvar, A., 2009. Wood Polymer Composite. Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources Press. Gorgan, Iran, 127 p. (In Persian).

[3] Eberhardsteiner, J., 2002. Mechanisches Verhalten von Fichtenholz - Experimentelle Bestimmung der biaxialen Festigkeitseigenschaften, , Springer-Verlag: Vienna, Austri, 174 p.

[4] Schmidt, R.J. and Kaliske, M., 2009. Modeling for numerical failure analysis of wooden strectures. Engineering Structures, 31: 571-579.

[5] Tannert, T., Lam, F. and Vallee, T., 2010. Structural performance of rounded dovetail connections: experimental and numerical investigation. European Journal of wood and wood product, 69: 471-482.

[6] Ebrahimi, Gh., 1997. Mechanics of wood and wood composites. University of Tehran Press, Tehran, Iran. 686 p.(In Persian).

[7] McKenzie, W.M. and Karpovich, H., 1968. The frictional behaviour of wood. Wood Science and Technology, 2(2): 139-152.

[8] Abdolzadeh, H., Ebrahimi, Gh., Layeghi, M., Ghassemieh, M. and Mirshokrai, S. A., 2015. Fracture behavior of beech-furan wood/polymer under mode I. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 29(4): 605-618. (In Persian).

[9] Abdolzadeh, H., Layeghi, M., Ebrahimi, G. and Ghassemieh, M., 2014. Study of stress capacity improvement of L-type joint by chemical modification of wood. BioResources, 9(3): 5302-5310.

[10] Abdolzadeh, H., Ebrahimi, Gh., Layeghi, M., Ghassemieh, M. and Mirshokrai, S. A., 2014. Mechanical properties of Beech-Furfuryl alcohol wood pollymer. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 4(2): 131-140. (In Persian).

Investigation on stress distribution at corner joints with wood polymer members using finite element method

Abstract

In this study, a comprehensive experimental and numerical investigation was carried out regarding structural performance of butted joints constructed with wood-polymer members (poly (furfuryl alcohol)) under combined stresses in comparison with control specimens. The aim of this research was to enhance performance of these joints in outdoor applications especially under combined stress. For investigation of this joints performance, specimens with two different values of furfurylation at 20% and 65% in comparison with control specimens were evaluated. Mechanical properties of specimens were determined according to ASTM D-143 and based on the results, materials properties were defined for the modeling. Proportional limit of loading value from experiments was compared with the result of FEM model. Result of FEM model completely confirmed experimental results and the validation of model was adequately performed. To understand the joint behavior at FEM model and to predict the fracture reasons, some properties of fracture mechanics related to wood polymer were used.

Keywords: finite element method, butted joint, combined stress, furfurylation and fracture mechanics.

H. Abdolzadeh[1*]
M. Layeghi[2]
Gh. Ebrahimi[3]
M. Ghassemieh[4]

[1] PhD, Department of Wood science & technology, Faculty of Natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

[2] Assistant Prof., Department of Wood science & technology, Faculty of Natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

[3] Professor, Department of Wood science & technology, Faculty of Natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

[4] Professor, Faculty of Civil engineering, College of engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Corresponding author:
h_abdolzadeh@ut.ac.ir

Received: 2016/07/09
Accepted: 2017/02/28