

تحلیل قابلیت اعتماد قطعات چوبی مقاوم سازی شده با FRP

سهیل پالیزی (دانشجوی دکتری)

وهب توفیق* (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران شریف، پاییز (۱۴۰۱)
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۳/۱، ص. ۱۰۰-۸۹ (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، تحلیل قابلیت اعتماد سیستم چوب (FRP) با جمع آوری مدل های ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است. همچنین، با استفاده از داده های آزمایشی موجود، یک مدل المان محدود علاوه بر مدل های قبلی نیز راستی آزمایی و ارائه شده است. با در نظر گرفتن سه تراز بارگذاری و تعریف عدم قطعیت در برخی متغیرهای مؤثر در مسئله، تعداد ۱۹۲ تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ضریب مدل انجام شده است. خروجی نشان داد در حالتی که عدم قطعیت در طراحی قطعه در نظر گرفته شود، شاخص قابلیت اعتماد به طور قابل توجهی کاهش می یابد، به طوری که میانگین شاخص مذکور برای مدل های موجود در پژوهش حاضر از ۴/۸۸ به ۲/۷۱ رسیده است. همچنین، مطابق انتظار در حالتی که عدم قطعیت در مسئله در نظر گرفته شده است، تأثیر نسبت بار زنده به بار مرده در تعیین شاخص قابلیت اعتماد تا حدودی از میان رفته است.

soheil.palizi@gmail.com
tough@sharif.edu

واژگان کلیدی: قابلیت اعتماد، مقاوم سازی، چوب، FRP، مدل المان محدود.

۱. مقدمه

چوب، چسب و FRP مختلف، مقادیر مقاومت اتصال و نیروی شکست سیستم به همراه مود شکست سیستم را در هر آزمایش مشخص کردند. رفتاری^۱ و همکاران (۲۰۰۹)^[۷] به بررسی کیفیت چسب سیستم چوب FRP پرداختند و نشان دادند که نوع چسب و FRP هر دو از پارامترهای تأثیرگذار در یکپارچگی اتصال هستند. ریچرواشتاپگر^۲ (۲۰۰۵)^[۸] پایداری حرارتی سیستم چوب - FRP را با استفاده از چسبندهای اپوکسی مطالعه کردند.

در مطالعه‌ی مشابه، کلیگر^۳ و همکاران (۲۰۱۶)^[۹] تیرهای چوبی را با ورق های FRP تقویت کردند و رفتار فشاری و کششی چوب را با اجرای سیستم پیش تنیدگی ارتقاء دادند. از جمله مصالح دیگری که برای ارتقاء ویژگی های چوب استفاده شده است، می توان به نانورس، شیشه و فیبرهای کربن اشاره کرد.^[۱۰] چوب و FRP هر دو ساختاری فیبرگونه دارند که در یک ماتریس چسبیده قرار می گیرند. در صفحات FRP، کاهش مقاومتی که به طور طبیعی و به مرور زمان در چوب رخ می دهد، وجود ندارد. اساساً دو نوع آزمون برای بررسی چسب چوب - FRP استفاده می شود. پژوهشگران مختلف، آزمون های اصلاح شده یی از ISO^[۱۱] ۶۲۳۸، ASTM D۹۰۵-۰۳^[۱۲] ارائه کرده اند.^[۱۳-۱۵] مقاومت برشی اتصال در طول صفحه ی متصل شده از آزمون های مذکور به دست آمده و به عنوان تنش میانگین معرفی شده اند. به دلیل اینکه سطح FRP بین دو قطعه ی چوب به حالت ساندویچی به دست آمده است، کرنش صفحات FRP بررسی نشده اند. با توجه به این موضوع، سایر پژوهشگران از روش برش تکی و برش دابل اتصال چوب به FRP استفاده کرده اند.^[۱۶-۱۸] پیکربندی^۴ مذکور، به خصوص برای آزمایش، نظارت

قطعات FRP^۱ از فیبرهای با مقاومت های بالا تشکیل شده اند که در یک ماتریس پلیمری جای گرفته اند.^[۱] استفاده از FRP در سال های اخیر، رشد چشم گیری داشته است. این اقبال عمومی نیز به دلیل سبکی، سهولت استفاده و ویژگی های منحصر به فرد آن، مانند مقاومت کششی بالا و مقاومت در برابر خوردگی و خستگی است. ویژگی های اخیر و سازگاری استفاده از ماده ی FRP با مصالح مختلف، مهندس ها را وادار به استفاده از آن در انواع مختلف سازه ها، مانند سازه های بتنی، بنایی و چوبی کرده است. سه نوع FRP، شامل: کربن، شیشه و آرامید بیشترین کاربرد را در این حوزه داشته اند. یکی از اهداف اصلی استفاده از FRP برای ارتقاء مقاومت و شکل پذیری سازه های مختلفی، چون: پل ها، سدها، خطوط لوله و اعضاء سازه یی است. انواع مختلفی از سیستم های مقاوم سازی با FRP در ادبیات فنی موجود است که عمدتاً برای سازه های بنایی و بتنی هستند.^[۲-۵]

با وجود اینکه چوب به عنوان یک مصالح قابل بازیافت شناخته می شود و به طور گسترده از زمان های قدیم استفاده شده است، معایبی در استفاده از مصالح قابل بازیافت وجود دارد که از جمله آن ها می توان به زوال بیولوژیکی در طول زمان و رفتار ترد در خمش اشاره کرد. کامپوزیت های چوب - FRP این نقص ها را می توانند جبران کنند. ون^۴ و همکاران (۲۰۱۴)^[۶] یک مطالعه ی آزمایشی ترتیب دادند و در آن سطح تماس چسب چوب FRP را مطالعه و با استفاده از انواع

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۳/۲۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۴/۵، پذیرش ۱۴۰۱/۴/۱۴

DOI:10.24200/J30.2022.60571.3109

بر سطح FRP را تسهیل می‌کند که می‌تواند منجر به توسعه‌ی مدل‌های سطحی شود.

پیکربندی آزمون‌های برشی تکی و دوبل در صنف پژوهشگران این حوزه به عنوان معرف مود دو شکست از سطح اتصال شناخته می‌شود. آزمون‌های اشاره شده منجر به استخراج نتایج آزمایشی بسیار مفیدی، مانند: مقاومت اتصال، توزیع کرنش، توزیع تنش برشی و پاسخ تنش لغزشی اتصال می‌شود. مورد آخر برای شبیه‌سازی‌های عددی سطح اتصال و شکست اتصال بسیار مهم است.^[۱۹] آزمایش بر روی مقاومت و رفتار اتصال FRP به بتن بسیار زیاد است و پیکربندی آزمون برش تکی بسیار محبوب است.^[۲۰] پژوهشگران مطالعاتی هم بر روی مقاومت و رفتار اتصال FRP و فولاد با استفاده از آزمون‌های برشی تکی و دوبل انجام داده‌اند.^[۲۱، ۲۲] در هر دو اتصال FRP به مصالح مختلف، رفتار اساسی اتصال (حتی با وجود مطالعات کمتر فولاد نسبت به بتن) استخراج شده است. در این راستا، شکست ناشی از جدا شدن چسب در بتن، غالباً در لایه‌ی بتنی رخ می‌دهد، زیرا چسب معمولاً قوی‌تر از بتن است. در اتصال فولاد، گسیختگی غالباً در چسب، سطح فولاد و چسب و سطح FRP و چسب رخ می‌دهد.^[۲۳] آزمایش بر روی اتصال FRP به چوب با استفاده از آزمون‌های برشی تکی و دوبل بسیار محدود است و در نتیجه مدل‌های تنش - لغزش در حال حاضر نیز در حال توسعه هستند.

تعمیرات با استفاده از FRP با استفاده از سیستم‌های مختلفی از اتصال صورت می‌گیرد. در روش چیدمان مرطوب^۷ که در آن صفحات فیبری، خشک یا اصطلاحاً پارچه‌هایی آغشته به رزین می‌شوند، به صورت اجرا در محل هستند. روش اخیر توسط ACI^۸ بیان شده است.^[۲۴] رزین و پرایمر آن، صفحات FRP را به سطح مصالح مورد نظر می‌چسباند و سیستم در محل عمل‌آوری می‌شود. عمده‌ی مطالعات انجام شده مربوط به اتصال صفحات FRP به قطعات بتنی است. در همین راستا، کایزر و کارباری^۹ (۲۰۰۳).^[۲۵] برای نخستین بار تأثیر عدم قطعیت‌ها را در کامپوزیت‌های ساخته شده به روش چیدمان مرطوب مطالعه کردند. بدین ترتیب، نقص‌های بالقوه در سیستم، شامل: پارگی در رشته‌های فیبری، استفاده از مخلوط رزین نامناسب و دارای ناخالصی، خطاهای حین ساخت در محل و نفوذ رطوبت یا مواد شیمیایی را شناسایی کردند. با وجود عدم قطعیت‌های زیاد موجود در روش اخیر که باعث می‌شود بازه‌ی تغییرات نتایج گسترده باشد، روش چیدمان مرطوب غالباً در تعمیرات استفاده می‌شود، زیرا انعطاف‌پذیری بیشتری برای استفاده در محل را فراهم می‌کند و به لحاظ هزینه‌های اجرایی، کمترین مقدار را در مقایسه با سایر روش‌ها دارد.^[۲۶] در مهندسی عمران، تحلیل قابلیت اعتماد در موارد متعددی استفاده شده است، که یکی از آن‌ها در کامپوزیت‌های FRP است. وایگاس و آنادرو^{۱۰} (۲۰۱۱).^[۲۷] به مطالعه‌ی تأثیر سازه‌های موجود و عدم قطعیت‌های FRP بر تعمیرات سازه پرداختند و دریافتند که مهم‌ترین عدم قطعیت در مرمت سازه مربوط به مساحت آرماتورهای فولادی و همچنین مقاومت سازه‌ی موجود است. ژانگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۸).^[۲۸] با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در مدل، به بررسی تحلیل احتمالاتی اتصال‌های بتنی و FRP پرداختند و با استفاده از ۸ مدل موجود در ادبیات فنی، در نهایت پیشنهادهایی مفید در رابطه با مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی ارائه کردند. عمده‌ی مطالعات این حوزه هم در رابطه با قطعات بتنی است. لکن در جست‌وجوی انجام شده توسط نویسندگان، مطالعه‌ی احتمالاتی در استفاده از سیستم چوب FRP مشاهده نشده است. بنابراین نیاز به شروع مطالعات در این راستا احساس شده است.

در پژوهش حاضر، با توجه به خلأ موجود در زمینه‌ی طراحی آیین‌نامه‌ی قطعات چوبی مقاوم‌سازی شده با FRP، تمامی مدل‌های تجربی و تحلیلی موجود در

ادبیات فنی در حوزه‌ی اخیر جمع‌آوری شده است. همچنین داده‌های موجود مربوط به آزمایش کششی سیستم چوب - FRP برای ساخت و راستی‌آزمایی یک مدل المان محدود استفاده شده است. پنج مدل از مدل‌های موجود در ادبیات فنی به همراه یک مدل المان محدود با تحلیل قابلیت اعتماد با توجه به سه نسبت مختلف از بارهای زنده به مرده، آنالیز و خروجی حاصل از تحلیل در قالب جدول‌ها و نمودارهایی ارائه شده است.

۲. مدل‌های موجود در سیستم چوب - FRP

مطابق آنچه که در بخش ۱ بیان شد، مزایایی که روش اتصال چوب - FRP فراهم می‌کند، شامل: ارتقاء ویژگی‌های مکانیکی^[۲۹]، تعیین مود شکست^[۳۰]، انتخاب ماده‌ی چسبیده^[۳۱] و انتخاب نوع FRP توسط مطالعاتی بررسی شده است. ویژگی‌های اخیر تا حدی مقبول بوده است، حتی در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۶^[۳۲]، نشان داده شد که سطح اتصال چوب FRP مقاومت بیشتری نسبت به اتصال سایر مصالحی مثل بتن و فولاد به FRP دارد. بنابراین کارایی استفاده از سیستم چوب FRP برای مقاوم‌سازی برکسی پوشیده نیست. با وجود این، یکی از رایج‌ترین شکست‌های موجود در سیستم چوب FRP، شکست ناشی از جداشدگی چسب کامپوزیت FRP است که در آن از تمام ظرفیت FRP استفاده نشده و شکل‌پذیری مدنظر سیستم سازه‌ی صورت نگرفته است. بنابراین نتیجه می‌شود که عملکرد چسب، مستقیماً در عملکرد کامپوزیت تأثیرگذار است. در همین راستا، مدل‌های زیادی براساس روابط تجربی و یا تئوری‌های شکست ارائه شده است. با وجود این، همچنان کمبود مدل‌های کارا در سیستم چوب - FRP نسبت به سیستم بتن FRP احساس می‌شود. در جدول ۱، مدل‌های ارائه شده برای سیستم چوب FRP ارائه شده است. در روابط ارائه شده در جدول ۱، P_u بیشینه‌ی بار اعمال شده است. t_f ، b_f و E_f به ترتیب: عرض، ضخامت و مدول کشسانی صفحه‌ی FRP هستند. b_w ، t_w و E_w به ترتیب عرض، ضخامت و مدول کشسانی چوب هستند. f_{ts} مقاومت کششی بلوک چوبی، G_a و t_a مدول برشی و ضخامت چسب و L_e و L_b هم به ترتیب طول اتصال و طول مؤثر اتصال هستند. τ و $\tau(max)$ بیانگر تنش اتصال و بیشینه‌ی تنش برشی اتصال هستند. A ، B ، a و C_1 تا C_8 ، ثوابت هستند. c_1 و c_2 به صورت تجربی برابر با ۷/۰ و ۱۰/۰ در نظر گرفته می‌شوند. ضریب k_c مشخص‌کننده‌ی اثر آماده‌سازی سطحی است و در بازه‌ی بین ۷۶/۰ تا ۱ قرار دارد. ضریب k_u درجه مقاوم‌سازی را مشخص می‌کند که می‌تواند برابر با ۱ فرض شود. γ_w و γ_a جهت چوب و نوع چسب را مشخص می‌کنند. C_N و C_w و C_f به ترتیب: سختی کشسان، ضریب سختی محوری چوب و ضریب سختی محوری FRP را مشخص می‌کنند. E_{ad} و S_{ad} بیانگر مدول کشسانی و تنش تسلیم چسب هستند. همچنین E_f و S_f پارامترهای مدول کشسانی و تنش تسلیم برای FRP را نشان می‌دهند. ضرایب C_1 تا C_5 در رابطه‌ی ۵ ضرایب ثابتی هستند که در نوشتار مرجع، مقدار آن‌ها موجود است.

۳. مدل المان محدود سیستم چوب - FRP

به منظور مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. در این راستا، از بخشی از داده‌های آزمایشی موجود در ادبیات فنی برای راستی‌آزمایی مدل استفاده شده است.^[۵] به طور کلی، یک تحلیل المان محدود، شامل سه مرحله‌ی:

جدول ۱. مدل‌های موجود در تعیین مقاومت اتصال سیستم چوب - FRP.

مدل	مدل	
	نام	شماره
$P_u = \frac{1}{3} b_f f_{ts} \sqrt{\frac{E_f t_f}{f_{ts}}}$	بندتی و کولا (۲۰۱۰) [۳۳]	۱
$P_u = P_{max} \frac{L_b}{L_e} \left(2 - \frac{L_b}{L_e} \right)$ $P_{max} = c_1 k_b k_c K_\mu b_f \sqrt{E_f t_f \tau_{max}}$ $L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 \tau_{max}}}$ $k_b = 1/6 \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b_w}}{1 + \frac{f}{f_c}}} \leq k_b \leq 1/29$	یواندس و باربوسا (۲۰۱۲) [۳۴]	۲
$P_u = 0.12 \gamma_w \gamma_a b_f L_e^{0.18} \sqrt{E_f t_f}$ $\tau(x) = \frac{\partial J}{\partial \delta} = A^* B C_N e^{-Bs} (1 - e^{-Bs})$ $J = \frac{1}{3} C_N P^2$ $C_N = \left(\frac{1}{b_f} \right) \left(\frac{1}{C_w} + \frac{1}{C_f} + \frac{(t_w + t_f + t_a)^2}{4 D_w} \right)$ $P = A (1 - e^{-Bs})$ $P_u = \gamma_w \sqrt{L_e f_{ts} E_f t_f} \left(\frac{b_f}{b_w} \right)^2$	ون و همکاران (۲۰۱۴) [۵]	۳
$\tau(x) = \frac{P}{b_f L_e} \left(1 - \frac{x}{L_e} \right) x$ $\tau(max) = \frac{P_u}{2 b_f L_e}$ $L_e = \alpha \beta (f_{ts})^{0.75} \ln(E_f t_f)$ $\beta = \frac{1.25 + \frac{b_f}{b_w}}{2 \left(1.25 - \frac{b_f}{b_w} \right)}$	واحدیان (۲۰۱۷) [۳۵]	۴
$\frac{P_u}{E_t A_t} = \left\{ \left(\left(\frac{E_{ad}}{E_f} \right)^6 (C^4 \cdot C^0 \cdot C^1) \frac{S_{ad}}{S_f} \left(\left(\frac{S_{ad}}{S_f} - C^2 \right)^2 - \sqrt{C^3 \frac{E_{ad}}{E_f}} \right) \right)^2 \right. \\ \left. + \left(\left(C^7 + \frac{A_{ad}}{A_f} + \frac{E_{ad}}{E_f} \frac{A_{ad}}{A_f} \right) \sqrt{\frac{E_{ad}}{E_f}} \right) \left(C^6 + \left(\frac{S_{ad}}{S_f} \right)^2 \right)^2 \right\}$	پالیزی و توفیق (۲۰۲۲) [۳۶]	۵

جدول ۲. مشخصات مصالح چوب در مدل راستی آزمایی.

مصالح	مدول کشسانی - GPa (انحراف معیار)	مقاومت فشاری - MPa (انحراف معیار)
چوب نرم *	۶/۳۴ (۱/۵۵)	۳۲/۸ (۲/۱)
چوب سخت **	۱۰/۰۱ (۱/۶۷)	۴۹/۳ (۶/۶)
	*Softwood	**Hardwood

هندسه‌ی مدل، شامل: سه بخش: قطعه‌ی چوبی، چسب و FRP است، که در نرم‌افزار آباکوس مطابق ابعاد ذکرشده تعریف شده است. مقطع همگن به مصالح هر سه جزء اختصاص یافته و از ویژگی کشسان - خمیری به صورت ساده شده برای آن استفاده شده است. تعریف اخیر، مزیتی را فراهم می‌کند که در آن با رسیدن هر کدام از مصالح به حد خمیری، جاری شدنشان اتفاق بیفتند و نیروی شرایط مرزی مربوط به FRP دیگر افزایش نیابد و نیروی بیشتری را تحمل نکند.

در پیکربندی مدل، FRP بر روی قطعه چوبی قرار گرفته و مرز بین چوب و FRP نیز با چسب پوشانده شده است. برای مش‌بندی قطعات هم از المان‌های مکعبی با انتگرال‌گیری کاهش یافته برای سبک‌تر شدن حجم محاسبات استفاده شده

پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش است، که در ادامه، با جزئیات بیشتری ارائه شده‌اند.

در مطالعه‌ی مذکور، از آزمایش pull-out استفاده شده است که در آن یک قطعه‌ی FRP از طریق چسب به چوب متصل شده است. سپس تحت آزمایش کشش قرار می‌گیرد و نیروی حد گسیختگی آن اندازه گرفته می‌شود. با استفاده از دو نوع چوب، سه نوع FRP و شش نوع چسب، تعداد ۸۴ آزمایش انجام و خروجی هر کدام از آزمایش‌ها ارائه شده‌اند. در جدول‌های ۲ الی ۴، مشخصات مصالح چوب، FRP و چسب ارائه شده است.

پیکربندی آزمایش به همراه ابعاد قطعات چوب و FRP در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۳. مشخصات مصالح FRP در مدل راستی آزمایی.

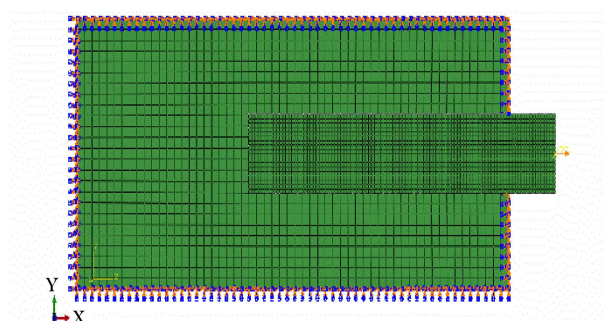
مصالح	مدول کشسانی - GPa (انحراف معیار)	مقاومت کششی - MPa (انحراف معیار)	کرنش نهایی (انحراف معیار)
صفحه‌ی نوع ۱	۲۳۱ (۱۴)	۲۷۶۸ (۱۷۸)	۰/۰۱۲۰ (۰/۰۰۰۹)
صفحه‌ی نوع ۲	۲۴۴ (۲۳)	۲۶۰۱ (۳۱۰)	۰/۰۱۰۴ (۰/۰۰۰۶)
پروفایل‌های پالتروده شده *	۱۹۲ (۳)	۳۱۳۳ (۸۷)	۰/۰۱۶۳ (۰/۰۰۰۵)

* Pultruded

جدول ۴. مشخصات مصالح چسب در مدل راستی آزمایی.

مصالح	مدول کشسانی - GPa (انحراف معیار)	مقاومت کششی - MPa (انحراف معیار)	کرنش نهایی (انحراف معیار)
۳۰	۸/۸۹ (۰/۱۴)	۲۶/۹ (۱/۲)	۰/۰۰۳۶ (۰/۰۰۰۵)
۳۰۰	۳/۴۳ (۰/۰۳)	۴۸/۳ (۶/۲)	۰/۰۱۷۳ (۰/۰۰۰۳)
۳۳۰	۴/۲۷ (۰/۱۱)	۲۸/۳ (۱/۵)	۰/۰۰۶۷ (۰/۰۰۰۴)
۴۲۰	۱/۷۲ (۰/۰۳)	۲۱/۵ (۰/۵)	۰/۰۱۸۴ (۰/۰۰۰۱۵)
۲۰۱۵	۱/۷۵ (۰/۱۵)	۱۶/۴ (۲/۱)	۰/۰۱۸۵ (۰/۰۰۰۲۸)
تایفو*	۱/۱۸ (۰/۰۷)	۱۵/۲ (۱/۳)	۰/۰۳۷۲ (۰/۰۰۰۸۸)

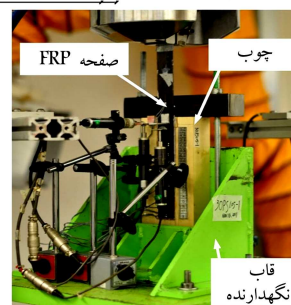
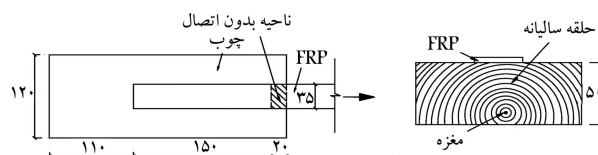
Tyfo*



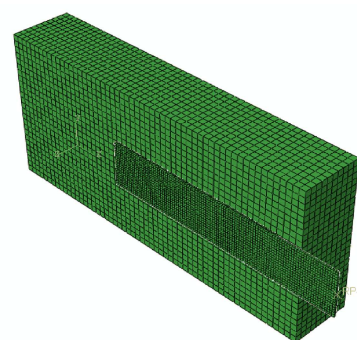
شکل ۳. شرایط مرزی مدل المان محدود.

توجه به پیکربندی آزمایش، صفحاتی که با هم تماس دارند، به صورت صفحه به صفحه متصل و قید TIE برای آن‌ها استفاده شده است. همچنین دور تا دور قطعه‌ی چوبی به صورت گیردار در نظر گرفته شده و در ابتدای قطعه‌ی FRP، یک نقطه به عنوان نقطه‌ی مرجع انتخاب و شرایط مرزی به آن اعمال شده است. این شرایط مرزی به صورت بسته شدن نقطه‌ی مرجع در همه‌ی درجه‌های آزادی به جز جهت کشش دستگاه اعمال نیرو به FRP بوده است. شرایط مرزی مدل نیز در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

پس از مدل‌سازی انجام شده، خروجی‌ها به دست آمدند. توجه شود تمامی داده‌های مربوط به آزمایش بررسی شده و میزان خطا و یا انحراف خروجی‌های مدل المان محدود از مقدار آزمایشی به دست آمده است. خروجی مدل المان محدود برای تمامی آزمایش‌های انجام شده مطابق شکل ۴ به دست آمده است که مطابق آن، ضریب تصمیم‌گیری برابر ۰/۹۳ به دست آمده است، که نشان می‌دهد داده‌های حاصل از تحلیل المان محدود قادرند با دقت بسیار خوبی مقادیر آزمایشی را پیش‌بینی کنند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، داده‌های این نمودار حول خط نیمساز ۴۵ درجه قرار دارد و مدل المان محدود غالباً به صورت over-predict است. بنابراین، مدل المان محدود مذکور می‌تواند مرجع مناسبی برای تحلیل در روش قابلیت اعتماد در نظر گرفته شود.



شکل ۱. پیکربندی آزمایش و ابعاد قطعات.



شکل ۲. مش‌بندی مدل المان محدود.

است که با توجه به اینکه توزیع تنش مدنظر نیست، راهکار مناسبی خواهد بود. ابعاد مش با آزمون و خطا برای چوب، ۵/۰ متر و برای FRP و چسب ۲/۰ متر انتخاب شده‌اند که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. یک مرحله‌ی تحلیل استاتیکی غیرخطی برای مجموعه انجام شده است که با

نتایج آزمایشی P_m^u است (رابطه ۳):

$$R = P_u^m \quad (3)$$

همچنین، از منظر طراحی، بار اسمی و مقاومت با هم مرتبطند و بنابراین بارهای اسمی مرده و زنده برحسب مقاومت به صورت رابطه ۴ محاسبه می‌شوند:

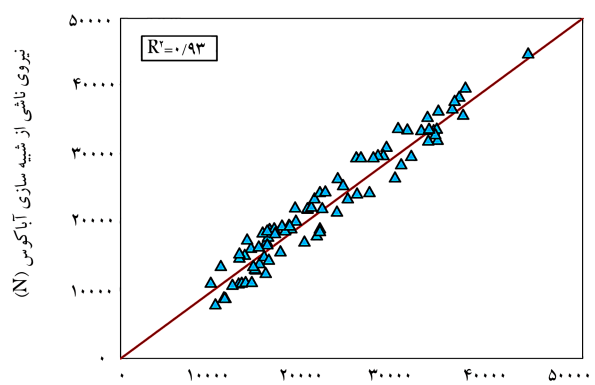
$$S_d = \psi \times P_u^c \quad (4)$$

که در آن، S_d بار طراحی و ψ ضریب کاهش برای یافتن یک تراز مناسب از شاخص قابلیت اعتماد است. در صورت نبودن ضریب مدل، ضریب کاهش می‌تواند در بازه‌ی بین ۰/۲ تا ۰/۸ باشد.^[۳۹] در پژوهش حاضر، به منظور دستیابی به ضریب قابلیت اعتماد، $\beta = 3$ و براساس ضریب محاسبه شده در هر شش مدل، ضریب کاهش با آزمون و خطا حدوداً برابر با ۰/۶ در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مقاوم‌سازی چوب - FRP با توجه به سناریوهای مختلف بارگذاری می‌تواند انجام شود، سه سطح بارگذاری براساس نسبت بار زنده به بار مرده (η) برابر با ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ انتخاب شده است.

با مراجعه به نوشتارهای موجود در ادبیات فنی مشاهده شد که توزیع‌های نرمال ۱۲، لاگنرمال ۱۳، و وایبول ۱۴ برای مدل کشسانی چسب و FRP و همچنین برای تنش تسلیم آن‌ها بیشترین کاربرد را داشته‌اند. برای مسئله‌ی پیش رو از توزیع لاگنرمال برای آن‌ها که بیشتر از بقیه بوده و نیز با توجه به کوچک بودن انحراف معیار متغیرها استفاده شده‌اند. در مجموع ۶ پارامتر شامل: مدل کشسانی، ضخامت، طول و عرض FRP به همراه عرض چوب و مقاومت فشاری چوب به عنوان فضای طراحی در نظر گرفته شده است، که فضای نمونه‌ی به اندازه‌ی ۶۴ (۲^۶) ایجاد می‌شود. با توجه به وجود سه تراز بارگذاری، تعداد حالت‌های انجام تحلیل قابلیت اعتماد ۱۹۲ (۳ × ۶۴) به دست می‌آید. برای هر حالت، از روش تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه‌ی اول (FORM) استفاده شده است، تا شاخص قابلیت اعتماد بتا با استفاده از روش هاسوفر - لیند^[۴۰]، به جهت کاهش هزینه‌ی محاسباتی به دست آید. شاخص قابلیت اعتماد را می‌توان به صورت هندسی و با یافتن فاصله بین نقاط تعریف شده توسط مقادیر مورد انتظار متغیرها و نزدیک‌ترین نقطه بر ضابطه‌ی شکست تعریف کرد، که به صورت رابطه ۵ بیان می‌شود:

$$\beta = \min \sqrt{(x - \mu)^T C^{-1} (x - \mu)} \quad (5)$$

که در آن، x بردار متغیرهای دارای عدم قطعیت در تابع حالت حدی است. μ بردار میانگین و C ماتریس کواریانس برای متغیرهای دارای عدم قطعیت هستند. در مجموع، دو گروه از شاخص قابلیت اعتماد محاسبه شده است: اولی، مربوط به ۶ مدل (۵ مدل جدول ۱ و یک مدل المان محدود) بدون اعمال ضریب مدل است. دومی، نیز حالت با وجود ضریب مدل است. در حالتی که ضریب بار زنده به بار مرده ۱ در نظر گرفته شود، شاخص‌های قابلیت اعتماد محاسبه شده برای داده‌های پژوهش بر مبنای هر ۶ مدل معرفی شده، به صورت جدول‌های ۵ و ۶ به دست می‌آیند. زمانی که عدم قطعیت مدل در تحلیل در نظر گرفته نشود، قابلیت اعتماد محاسبه شده، بیشترین مقدار را در بین دو حالت مذکور دارد که میانگین بتا در این حالت برابر با ۴/۸۸ شده است. با وجود این، نتایج به دست آمده برای بتا برای هر ۶ مدل تفاوت فاحشی با یکدیگر دارند. بیشترین میانگین بتا مربوط به مدل شماره‌ی ۵ با میانگین بتا برابر با ۶/۵۲ است، که در ادبیات فنی با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک به دست آمده بود. همچنین مدل شماره‌ی ۶ که مدل المان محدود ساخته شده در پژوهش حاضر است، با میانگین شاخص قابلیت اعتماد برابر



شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج آزمایش با خروجی مدل المان محدود.

۴. عدم قطعیت مدل مقاومت اتصال

به دلیل اینکه تمامی روش‌های محاسباتی، شامل ساده‌سازی‌های مختلفی هستند، همواره عدم قطعیت در مدل وجود دارد. برای تعریف ضریب مدل، رابطه‌ی ۱ را همواره می‌توان تعریف کرد:^[۳۷]

$$P_u^m = \varepsilon \times P_u^c \quad (1)$$

که در آن، P_u^m مقاومت اتصالی است که به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده است. P_u^c مقاومت اتصال محاسبه شده توسط مدل‌های پیش‌بینی و ε ضریب مدل است که متناظر با هر مدل مشخص است. زمانی که ضریب مدل از ۱ بیشتر باشد، نشان می‌دهد که مقاومت محاسبه شده کوچک‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده است؛ و برعکس، هر چه میانگین ضریب مدل به ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل دقیق‌تر خواهد بود. با وجود این، ضرایب بزرگ‌تر از ۱ نشان می‌دهند که مدل ارائه شده، محافظه‌کارانه و عدد کمتر از ۱، نشان‌دهنده‌ی غیرایمن بودن مدل است.

ضریب مدل برای تمامی داده‌های ارائه شده در بخش‌های قبل و برای هر ۵ مدل معرفی شده، محاسبه شده است. میانگین ε در بازه‌ی بین ۰/۵۸ (مدل پالیزی و توفیق)^[۳۶] و ۲/۹۴ (مدل بندتی و کولا)^[۳۳] به دست آمده است. براساس نتایج میانگین حاصل شده، مدل پالیزی و توفیق از مقاومت اندازه‌گیری شده بزرگ‌تر است، در حالی که پیش‌بینی مدل بندتی و کولا، بسیار کوچک‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده است. همچنین در مورد مدل المان محدود نیز پارامتر مذکور محاسبه شده و عدد ۰/۷۴ به دست آمده است، که نشانگر دقت قابل قبول مدل است.

۵. تحلیل قابلیت اعتماد

مشابه فرمول‌بندی ACI و همچنین سایر مطالعات مشابه در این حوزه،^[۳۹،۳۸] تابع حالت حدی برای طراحی مقاومت اتصال چوب - FRP به صورت رابطه‌ی ۲ نوشته می‌شود:

$$G = R - D - L \quad (2)$$

که در آن، G تابع حالت حدی، R ظرفیت، D و L تقاضای ناشی از بارهای مرده و زنده هستند. تابع مقاومت R در حالت عادی، ظرفیت اعضای سازه‌ی مانند ظرفیت خمشی یک تیر را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، تابع مقاومت برابر با

جدول ۵. شاخص قابلیت اعتماد در ۶۴ حالت بدون در نظر گرفتن ضریب مدل.

شماره تحلیل	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴	مدل ۵	مدل ۶
۱	۲,۱۱	۴,۱۹	۵,۹۰	۴,۳۲	۵,۷۶	۵,۶۴
۲	۳,۵۶	۳,۵۹	۵,۸۵	۴,۵۸	۵,۵۵	۵,۴۹
۳	۲,۳۲	۵,۰۶	۵,۸۳	۴,۴۴	۵,۶۲	۵,۷۶
۴	۲,۴۶	۳,۲۶	۵,۷۵	۴,۹۶	۵,۷۹	۵,۹۲
۵	۲,۹۵	۳,۱۱	۵,۱۱	۴,۷۶	۶,۲۶	۶,۱۱
۶	۳,۳۳	۳,۸۸	۵,۱۸	۴,۸۹	۶,۳۵	۶,۱۸
۷	۳,۷۰	۴,۷۸	۵,۲۲	۴,۵۵	۶,۴۶	۶,۲۱
۸	۲,۱۹	۴,۱۱	۵,۳۹	۴,۶۱	۶,۴۲	۶,۱۷
۹	۲,۸۱	۴,۰۶	۴,۴۴	۴,۷۷	۶,۷۸	۶,۱۵
۱۰	۲,۴۳	۳,۵۵	۴,۹۶	۴,۳۶	۶,۵۹	۶,۳۵
۱۱	۲,۳۹	۳,۱۸	۵,۰۲	۴,۳۹	۵,۹۶	۶,۳۲
۱۲	۱,۹۵	۳,۲۶	۴,۴۰	۴,۴۴	۵,۹۰	۶,۳۸
۱۳	۱,۸۶	۴,۰۵	۴,۳۱	۴,۲۹	۶,۰۶	۶,۴۱
۱۴	۱,۹۲	۴,۰۹	۵,۳	۵,۰۵	۶,۰۱	۶,۵۰
۱۵	۲,۶۳	۴,۱۱	۵,۲۳	۵,۱۱	۶,۰۹	۶,۴۶
۱۶	۲,۸۱	۳,۹۶	۵,۱۳	۵,۲۱	۷,۱۱	۶,۴۹
۱۷	۳,۳۵	۳,۶۲	۵,۱۷	۵,۲۵	۷,۱۸	۶,۵۶
۱۸	۳,۴۴	۳,۳۵	۵,۳۳	۵,۱۵	۷,۲۵	۶,۴۹
۱۹	۳,۰۲	۳,۴۵	۴,۵۱	۵,۱۸	۷,۳۴	۶,۷۶
۲۰	۲,۵۰	۳,۴۰	۴,۶۰	۴,۹۶	۷,۲۷	۶,۹۱
۲۱	۲,۱۱	۳,۶۳	۴,۷۳	۴,۹۲	۷,۵۰	۶,۸۵
۲۲	۲,۶۲	۴,۲۲	۴,۷۷	۴,۹۸	۷,۶۲	۶,۸۱
۲۳	۳,۱۸	۳,۵۵	۵,۸۰	۴,۸۸	۷,۶۶	۶,۹۷
۲۴	۱,۷۳	۳,۶۴	۵,۸۵	۴,۳۹	۷,۶۰	۷,۰۱
۲۵	۳,۱۳	۳,۷۸	۵,۹۱	۴,۷۵	۷,۵۸	۷,۳۲
۲۶	۴,۴۲	۳,۱۱	۵,۹۹	۴,۹۹	۷,۷۱	۸,۰۹
۲۷	۴,۵۳	۳,۲۶	۴,۸۴	۵,۱۰	۷,۹۵	۷,۹۶
۲۸	۴,۶۰	۲,۹۸	۴,۸۸	۵,۱۴	۷,۹۳	۷,۹۲
۲۹	۴,۲۱	۴,۱۶	۴,۹۵	۵,۰۲	۸,۰۵	۷,۶۲
۳۰	۲,۰۹	۴,۰۴	۴,۹۶	۵,۰۶	۸,۰۸	۸,۵۶
۳۱	۱,۹۶	۴,۳۲	۵,۳۹	۴,۵۵	۸,۱۱	۸,۵۲
۳۲	۱,۸۸	۴,۳۸	۵,۴۶	۴,۶۷	۸,۰۱	۷,۹۰
۳۳	۱,۹۱	۴,۴۵	۵,۵۵	۴,۷۸	۷,۵۴	۶,۱۳
۳۴	۳,۴۰	۴,۵۰	۵,۶۴	۴,۸۲	۷,۵۲	۶,۰۱

ادامه‌ی جدول ۵.

۳۵	۱,۸۷	۴,۶۴	۵,۱۱	۴,۹۲	۷,۵۹	۵,۹۲
۳۶	۲,۸۰	۴,۶۸	۵,۱۶	۴,۳۶	۷,۵۶	۵,۶۹
۳۷	۲,۷۶	۴,۷۰	۵,۲۲	۴,۲۱	۷,۶۳	۵,۳۶
۳۸	۲,۷۷	۴,۲۲	۵,۰۰	۴,۲۵	۶,۳۲	۵,۳۴
۳۹	۲,۸۵	۴,۳۲	۵,۰۳	۴,۲۸	۶,۵۸	۵,۲۰
۴۰	۲,۸۸	۴,۷۸	۵,۱۱	۴,۳۳	۶,۴۶	۵,۲۹
۴۱	۲,۱۱	۴,۹۶	۵,۱۶	۴,۱۶	۶,۴۹	۵,۲۱
۴۲	۲,۱۹	۵,۱۵	۴,۴۴	۴,۴۶	۶,۵۹	۵,۱۸
۴۳	۲,۳۴	۵,۱۹	۴,۴۹	۴,۴۹	۶,۴۱	۵,۴۶
۴۴	۲,۳۹	۵,۱۷	۴,۵۵	۴,۲۸	۶,۱۱	۵,۳۹
۴۵	۲,۰۸	۵,۲۳	۴,۵۹	۴,۳۵	۵,۹۵	۵,۸۴
۴۶	۱,۲۸	۵,۱۴	۵,۴۱	۴,۷۴	۶,۰۶	۵,۵۲
۴۷	۲,۳۱	۴,۸۰	۵,۴۶	۴,۸۶	۵,۹۰	۵,۶۶
۴۸	۳,۴۵	۴,۷۶	۵,۵۲	۴,۸۹	۵,۷۸	۵,۱۱
۴۹	۳,۱۸	۴,۴۴	۵,۵۹	۴,۸۲	۵,۸۶	۵,۱۹
۵۰	۴,۰۴	۴,۳۹	۵,۷۹	۴,۹۴	۵,۳۲	۶,۲۳
۵۱	۲,۲۳	۴,۶۷	۵,۸۴	۴,۹۹	۵,۳۶	۶,۳۶
۵۲	۲,۴۴	۴,۷۵	۵,۸۹	۴,۵۹	۵,۳۹	۶,۶۰
۵۳	۲,۹۶	۴,۸۲	۵,۹۲	۴,۶۵	۵,۴۴	۶,۵۲
۵۴	۲,۳۳	۴,۶۴	۴,۵۰	۴,۷۱	۵,۲۶	۶,۴۶
۵۵	۲,۱۹	۴,۴۰	۴,۵۶	۴,۸۸	۵,۲۹	۵,۹۵
۵۶	۳,۱۸	۴,۱۶	۴,۶۱	۴,۳۱	۶,۱۱	۵,۹۱
۵۷	۳,۲۵	۳,۷۶	۴,۶۷	۴,۳۵	۶,۲۶	۵,۹۰
۵۸	۲,۶۱	۳,۵۷	۴,۷۳	۴,۳۶	۶,۳۱	۵,۸۵
۵۹	۲,۶۴	۳,۲۲	۴,۷۸	۴,۴۴	۶,۳۵	۵,۷۵
۶۰	۱,۳۶	۳,۵۶	۴,۸۲	۴,۴۱	۵,۲۵	۵,۷۳
۶۱	۱,۹۶	۳,۴۹	۴,۳۶	۴,۷۲	۵,۱۸	۵,۴۵
۶۲	۱,۸۵	۳,۳۲	۴,۴۲	۴,۶۲	۵,۱۵	۵,۴۹
۶۳	۲,۲۲	۳,۷۱	۴,۴۴	۴,۶۳	۵,۲۱	۵,۵۱
۶۴	۳,۱۶	۳,۱۹	۴,۵۵	۴,۶۹	۵,۲۵	۵,۱۹
میانگین	۲,۶۷	۴,۰۹	۵,۱۱	۴,۶۹	۶,۵۲	۶,۲۴
میانگین کل	۴,۸۸					

جدول ۶. شاخص قابلیت اعتماد در ۶۴ حالت با در نظر گرفتن ضریب مدل.

شماره تحلیل	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴	مدل ۵	مدل ۶
۱	۱,۲۹	۲,۵۱	۳,۱۵	۲,۱۸	۳,۲۰	۳,۰۸
۲	۲,۱۶	۲,۱۱	۳,۱۱	۲,۲۵	۳,۱۰	۳,۰۰
۳	۱,۳۹	۳,۰۳	۳,۰۵	۲,۱۱	۳,۱۴	۳,۱۵
۴	۱,۴۸	۱,۹۵	۳,۰۵	۲,۲۱	۳,۱۹	۳,۲۳
۵	۱,۷۹	۱,۸۲	۲,۷۵	۲,۴۳	۳,۵۰	۳,۳۴
۶	۲,۰۴	۲,۳۲	۲,۸۰	۲,۴۹	۳,۵۵	۳,۳۸
۷	۲,۲۷	۲,۸۶	۲,۸۲	۲,۳۲	۳,۶۱	۳,۳۹
۸	۱,۳۴	۲,۴۱	۲,۸۸	۲,۳۵	۳,۵۰	۳,۴۳
۹	۱,۷۰	۲,۴۳	۲,۳۳	۲,۴۳	۳,۷۹	۳,۴۲
۱۰	۱,۴۹	۲,۱۴	۲,۶۱	۲,۱۱	۳,۶۸	۳,۵۳
۱۱	۱,۴۶	۱,۸۶	۲,۷۱	۲,۲۴	۳,۳۳	۳,۵۱
۱۲	۱,۲۰	۱,۹۵	۲,۳۳	۲,۲۷	۳,۱۸	۳,۵۴
۱۳	۱,۱۴	۲,۴۳	۲,۳۰	۲,۱۹	۳,۳۹	۳,۵۶
۱۴	۱,۱۸	۲,۴۱	۲,۸۲	۲,۵۰	۳,۳۶	۳,۶۱
۱۵	۱,۶۰	۲,۴۶	۲,۸۳	۲,۶۱	۳,۴۵	۳,۵۹
۱۶	۱,۷۲	۲,۳۷	۲,۷۷	۲,۶۶	۳,۹۳	۳,۶۵
۱۷	۲,۰۶	۲,۱۴	۲,۷۹	۲,۶۸	۳,۹۷	۳,۶۹
۱۸	۲,۰۸	۲,۰۱	۲,۸۰	۲,۵۷	۴,۰۱	۳,۶۵
۱۹	۱,۸۵	۲,۰۷	۲,۴۴	۲,۶۴	۴,۰۶	۳,۸۰
۲۰	۱,۵۱	۱,۹۷	۲,۴۹	۲,۵۳	۴,۰۲	۳,۸۸
۲۱	۱,۲۷	۲,۱۷	۲,۵۰	۲,۴۳	۴,۱۴	۳,۸۵
۲۲	۱,۶۱	۲,۴۱	۲,۵۸	۲,۵۴	۴,۲۱	۳,۸۳
۲۳	۱,۹۵	۲,۱۳	۳,۱۴	۲,۴۹	۴,۲۳	۳,۹۲
۲۴	۱,۰۶	۲,۱۸	۳,۰۴	۲,۲۴	۴,۲۰	۳,۸۹
۲۵	۱,۹۰	۲,۱۶	۳,۱۹	۲,۳۰	۴,۱۹	۴,۰۷
۲۶	۲,۷۱	۱,۸۶	۳,۲۴	۲,۵۵	۴,۲۶	۴,۴۹
۲۷	۲,۷۸	۱,۹۱	۲,۵۶	۲,۶۰	۴,۳۹	۴,۴۲
۲۸	۲,۸۲	۱,۶۶	۲,۶۴	۲,۶۲	۴,۳۸	۴,۴۰
۲۹	۲,۵۸	۲,۴۹	۲,۶۸	۲,۵۶	۴,۴۵	۴,۲۳
۳۰	۱,۲۸	۲,۴۲	۲,۶۸	۲,۵۸	۴,۴۶	۴,۷۶
۳۱	۱,۲۰	۲,۵۹	۲,۹۱	۲,۳۲	۴,۴۸	۴,۸۴
۳۲	۱,۱۵	۲,۶۲	۲,۸۶	۲,۳۸	۴,۴۳	۴,۴۹
۳۳	۱,۱۷	۲,۶۱	۳,۰۰	۲,۳۵	۴,۱۷	۳,۴۸
۳۴	۲,۰۴	۲,۶۹	۳,۰۵	۲,۴۶	۴,۱۵	۳,۴۱

ادامہی جدول ۶.

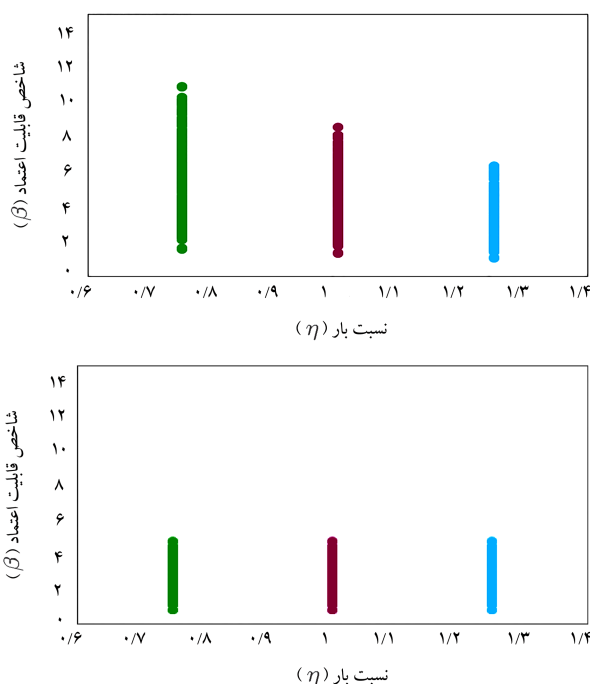
۳,۴۱	۴,۱۵	۲,۴۶	۳,۰۵	۲,۶۹	۲,۰۴	۳۴
۳,۳۶	۴,۱۹	۲,۵۱	۲,۷۰	۲,۵۶	۱,۱۱	۳۵
۳,۲۳	۴,۱۸	۲,۲۲	۲,۷۹	۲,۴۹	۱,۷۲	۳۶
۳,۰۵	۴,۲۲	۲,۰۵	۲,۸۲	۲,۸۱	۱,۶۹	۳۷
۳,۰۰	۳,۵۷	۲,۱۷	۲,۶۱	۲,۵۳	۱,۷۰	۳۸
۲,۹۲	۳,۷۲	۲,۱۸	۲,۶۶	۲,۵۹	۱,۷۵	۳۹
۳,۰۱	۳,۶۵	۲,۲۱	۲,۷۶	۲,۸۶	۱,۶۵	۴۰
۲,۹۶	۳,۶۷	۲,۰۴	۲,۷۹	۲,۹۰	۱,۲۹	۴۱
۲,۹۴	۳,۷۲	۲,۲۸	۲,۴۰	۳,۰۱	۱,۳۴	۴۲
۳,۱۰	۳,۶۲	۲,۲۹	۲,۴۳	۳,۱۱	۱,۴۰	۴۳
۳,۰۶	۳,۴۵	۲,۰۱	۲,۳۵	۳,۱۰	۱,۴۷	۴۴
۳,۳۲	۳,۲۷	۲,۲۲	۲,۴۸	۳,۰۸	۱,۲۸	۴۵
۳,۱۴	۳,۳۳	۲,۴۲	۲,۹۲	۳,۰۸	۰,۷۹	۴۶
۳,۲۲	۳,۲۴	۲,۴۸	۲,۹۵	۲,۸۷	۱,۴۲	۴۷
۲,۹۰	۳,۱۸	۲,۴۹	۲,۸۵	۲,۸۵	۲,۰۹	۴۸
۲,۹۵	۳,۲۲	۲,۵۵	۳,۰۲	۲,۶۱	۱,۹۵	۴۹
۳,۵۴	۲,۹۲	۲,۵۲	۳,۰۲	۲,۵۸	۲,۴۸	۵۰
۳,۶۱	۲,۹۵	۲,۵۱	۳,۱۶	۲,۸۰	۱,۳۷	۵۱
۳,۷۵	۲,۹۶	۲,۳۴	۳,۱۸	۲,۸۴	۱,۵۰	۵۲
۳,۷۰	۲,۹۹	۲,۳۷	۳,۲۰	۲,۸۹	۱,۸۲	۵۳
۳,۵۷	۲,۸۹	۲,۴۰	۲,۳۵	۲,۷۱	۱,۴۰	۵۴
۳,۲۹	۲,۹۱	۲,۴۹	۲,۴۶	۲,۶۳	۱,۳۴	۵۵
۳,۲۷	۳,۳۶	۲,۱۱	۲,۴۹	۲,۴۹	۱,۹۵	۵۶
۳,۲۶	۳,۴۴	۲,۲۲	۲,۵۲	۲,۲۵	۱,۹۲	۵۷
۳,۲۳	۳,۴۷	۲,۱۴	۲,۴۸	۲,۰۸	۱,۶۰	۵۸
۳,۱۸	۳,۴۹	۲,۲۷	۲,۵۸	۱,۹۳	۱,۶۲	۵۹
۳,۱۷	۲,۸۸	۲,۲۵	۲,۶۱	۲,۱۰	۰,۸۰	۶۰
۳,۰۱	۲,۸۵	۲,۴۱	۲,۳۶	۲,۰۹	۱,۲۰	۶۱
۳,۰۳	۲,۸۳	۲,۳۶	۲,۲۵	۱,۹۶	۱,۱۳	۶۲
۳,۰۴	۲,۸۶	۲,۳۶	۲,۴۰	۲,۱۸	۱,۳۶	۶۳
۲,۸۷	۲,۸۸	۲,۳۲	۲,۴۶	۱,۸۸	۱,۹۴	۶۴
۳,۴۹	۳,۶۱	۲,۳۷	۲,۷۳	۲,۴۲	۱,۶۳	میانگین
۲,۷۱	میانگین کل					

قابلیت اعتماد بتا با افزایش نسبت بار زنده به بار مرده برای حالت بدون در نظر گرفتن ضریب مدل نیز کاملاً مشخص است و یک روند کاهشی به خصوصی در نمودار مخصوص آن مشاهده می شود. این در حالی است که با در نظر گرفتن ضریب بار، روند خاصی مشاهده نمی شود و بازه ی تغییرات شاخص بدون توجه به مدل مقدار یکنواختی را نشان می دهد. این نتیجه با نتیجه ی حاصل از مطالعه ی ونگ و الینگود^{۱۶} (۲۰۱۵)، مطابقت دارد.^[۴۱]

۶. نتیجه گیری

چوب به عنوان یکی از قدیمی ترین مصالحی است که همواره در ساخت و سازها، استفاده شده است و با وجود کاربرد گسترده و ویژگی های منحصر به فرد آن، نقاط ضعفی مانند رفتار نسبتاً ترد به خصوص در خمش دارد. برای بهبود عملکرد چوب و همچنین یکی از راهکارها به منظور مقاوم سازی سازه های چوبی، استفاده از قطعات FRP است. سبکی و سهولت اجرای مصالح FRP بر روی قطعات مختلفی چون بتن، فولاد، و چوب سبب شده است تا بتوان با استفاده از آن ها، افزایش مقاومت و شکل پذیری در قطعات سازه ای را مشاهده کرد.

در پژوهش حاضر، محدود مدلهایی که در استفاده از سیستم چوب - FRP موجود بوده است، جمع آوری و عدم قطعیت شش پارامتر، به عنوان پارامترهای مؤثرتر در مقاومت سیستم چوب - FRP، برای انجام یک تحلیل قابلیت اعتماد در نظر گرفته شده است. همچنین در طی مراحل انجام شده، سه نسبت بارگذاری بار زنده به بار مرده برابر با ۱/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ در تابع بارگذاری طراحی قطعه در نظر گرفته شده است. آنچه در طی پژوهش حاضر به دست آمده است، این است که در فرایند طراحی قطعات مقاوم سازی شده با FRP، عدم قطعیت ها تأثیر شگرفی در قابلیت اعتماد مدل های موجود دارند. به طوری که میانگین شاخص قابلیت اعتماد تمامی ۶ مدل موجود، از ۴/۸۸ در حالت بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت به ۲/۷۱ با در نظر گرفتن عدم قطعیت کاهش یافته است. از میان ۵ مدل موجود ارائه شده در مطالعات پیشین، مدل پالیزی و توفیق^[۳۶] (۲۰۲۲)، با میانگین شاخص قابلیت اعتماد ۳/۶۱ بهترین مدل پیشنهادی است که شاخص آن با شاخص مدل های موجود طراحی سازه ای مطابقت خوبی دارد. شایان ذکر است که متغیرهای مختلفی در قابلیت اعتماد سیستم چوب - FRP تأثیر دارند. لکن در پژوهش حاضر فقط عدم قطعیت ۶ متغیر: مدول کشسانی، ضخامت، طول و عرض FRP به همراه عرض چوب و مقاومت فشاری چوب در نظر گرفته شده است. سایر عدم قطعیت های ذاتی یا شناختی می توانند در فرایند تحلیل سیستم چوب - FRP در مطالعات آتی مورد نظر باشد.



شکل ۵. شاخص قابلیت اعتماد در برابر تغییرات نسبت بارگذاری.

با ۶/۲۴ در رتبه ی دوم قرار گرفت. در حالی که اگر به داده های جدول دقت شود، پراکندگی داده های هر تحلیل بسیار زیاد نیست و در یک محدوده ی مشخصی برای مدل اخیر قرار دارند. این در حالی است که در مدل های ۱ الی ۴، اختلاف بین نتایج هر تحلیل با یکدیگر زیاد است. با اعمال عدم قطعیت در مدل، همان طور که انتظار می رفت، شاخص قابلیت اعتماد بتا کاهش یافته و میانگین آن برای هر ۶ مدل به ۲/۷۱ رسیده است. بنابراین می توان دریافت که در نظر نگرفتن عدم قطعیت در یک مدل طراحی می تواند نتایجی بسیار نامناسب را در پی داشته باشد. همان طور که مشاهده می شود، تأثیر عدم قطعیتی که فقط در ۶ متغیر اصلی در پژوهش حاضر بررسی شده است، بسیار قابل توجه است.

در شکل ۵، مقدار شاخص قابلیت اعتماد محاسبه شده از تحلیل FORM بر حسب نسبت بار زنده به بار مرده که قبلاً تعریف شده بود، مشاهده می شود. همان طور که گفته شد، سه نسبت بار ۱/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ ارائه شده است. مطابق شکل اخیر، می توان دریافت که با در نظر گرفتن ضریب مدل، تراز شاخص قابلیت اعتماد بدون توجه به مدل های طراحی، بسیار یکنواخت تر شده است. کاهش ضریب

پانوشته ها

1. fiber reinforced polymer (FRP)
2. Wan
3. Raftery
4. Richter & Steiger
5. Klinger
6. setup

7. wet layup
8. American concrete institute (ACI)
9. Kaiser & Karbhari
10. Wiegghaus & Atadero
11. Zhang
12. normal Distribution
13. lognormal Distribution
14. weibull distribution
15. Hasofer & Lind

16. Wang & Ellingwood

منابع (References)

- Babatunde, S.A. "Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced polymers", *Composite Structures*, **161**, pp. 246-255 (2017).
- Carney, P. and Myers, J.J. "Shear and flexural strengthening of masonry infill walls with FRP for extreme out-of-plane loading", In *Architectural Engineering 2003: Building Integration Solutions*, pp. 1-5 (2003).
- Galati, N., Tumialan, G. and Nanni, A. "Strengthening with FRP bars of URM walls subject to out-of-plane loads", *Construction and Building Materials*, **20**(1-2), pp. 101-110 (2006).
- Toufigh, V., Toufigh, V., Saadatmanesh, H. and et al. "Strength evaluation and energy-dissipation behavior of fiber-reinforced polymer concrete", *Adv. Civ. Eng. Mater.*, **2**(1), pp. 622-636 (2013).
- Frketic, J., Dickens, T. and Ramakrishnan, S. "Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing", *Additive Manufacturing*, **14**, pp. 69-86 (2017).
- Wan, J., Smith, S.T., Qiao, P. and et al. "Experimental investigation on FRP-to-timber bonded interfaces", *Journal of Composites for Construction*, **18**(3), p. A4013006 (2014).
- Raftery, G.M., Harte, A.M. and et al. "Bond quality at the FRP-wood interface using wood-laminating adhesives", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **29**(2), pp. 101-110 (2009).
- Richter, K. and Steiger, R. "Thermal Stability of Wood-Wood and Wood-FRP Bonding with Polyurethane and Epoxy Adhesives", *Advanced Engineering Materials*, **7**(5), pp. 419-426 (2005).
- Kliger, I.R., Haghani, R., Brunner, M. and et al. "Wood-based beams strengthened with FRP laminates: Improved performance with pre-stressed systems", *European Journal of Wood and Wood Products*, **74**(3), pp. 319-330 (2016).
- Turku, I. and Karki, T. "The effect of carbon fibers, glass fibers and nanoclay on wood flour-polypropylene composite properties", *European Journal of Wood and Wood Products*, **72**(1), pp. 73-79 (2014).
- ISO, "Adhesives:Wood-to-wood adhesive bonds; Determination of shear strength by compressive loading", ISO 6238, Geneva (2001).
- ASTM D905-03, "Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading", West Conshohocken, PA (2003).
- Davalos, J.F., Qiao, P. and Trimble, B.S. "Fiber-reinforced composite and wood bonded interfaces: Part 1. Durability and shear strength", *Journal of Composites Technology and Research*, **22**(4), pp. 224-231 (2000).
- Lopez-Anido, R., Gardner, D.J. and Hensley, J.L. "Adhesive bonding of eastern hemlock glulam panels with eglass/vinyl waster reinforcement", *Forest Products Journal*, **50**, p.43 (2000).
- Crews, K. and Smith, S.T. "Tests on FRP-strengthened timber joints", *Proc., 3rd Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2006*, pp. 677-680 (2006).
- Claisse, P.A., Davis, T.J. and Masse, B. "Fatigue testing of glass/epoxy joints in timber up to the endurance limit", *Construction and Building Materials*, **21**(1), pp. 139-149 (2007).
- Ozcifci, A. and Yapici, F. "Effects of machining method and grain orientation on the bonding strength of some wood species", *Journal of Materials Processing Technology*, **202**(1-3), pp. 353-358 (2008).
- Wan, J., Smith, S.T. and Qiao, P.Z. "FRP-to-softwood joints: experimental investigation", In *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*, pp. 951-954 Springer, Berlin, Heidelberg (2011).
- Smith, S.T. and Gravina, R.J. "Modeling debonding failure in FRP flexurally strengthened RC members using a local deformation model", *Journal of Composites for Construction*, **11**(2), pp. 184-191 (2007).
- Yao, J., Teng, J.G. and Chen, J.F. "Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints", *Composites Part B: Engineering*, **36**(2), pp.99-113 (2005).
- Yu, T., Fernando, D., Teng, J. G. and et al. "Experimental study on CFRP-to-steel bonded interfaces", *Composites Part B: Engineering*, **43**(5), pp. 2279-2289 (2006).
- Fawzia, S., Al-Mahaidi, R. and Zhao, X.L. "Experimental and finite element analysis of a double strap joint between steel plates and normal modulus CFRP", *Composite Structures*, **75**(1-4), pp. 156-162 (2006).
- Zhao, X.L. and Zhang, L. "State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures", *Engineering Structures*, **29**(8), pp. 1808-1823 (2007).
- American Concrete Institute (ACI), "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures", ACI 440.2R-08, Farmington Hills, MI (2008).
- Kaiser, H. and Karbhari, V.M. "Identification of potential defects in the rehabilitation of concrete structures with FRP composites", *International Journal of Materials and Product Technology*, **19**(6), pp. 498-520 (2003).
- Atadero, R.A. and Karbhari, V.M. "Sources of uncertainty and design values for field-manufactured FRP", *Composite Structures*, **89**(1), pp. 83-93 (2009).
- Wieghaus, K.T. and Atadero, R.A. "Effect of existing structure and FRP uncertainties on the reliability of FRP-based repair", *Journal of Composites for Construction*, **15**(4), pp. 635-643 (2011).
- Zhang, D., Gu, X.L., Yu, Q.Q. and et al. "Fully probabilistic analysis of FRP-to-concrete bonded joints considering model uncertainty", *Composite Structures*, **185**, pp. 786-806 (2018).
- de Jesus, A.M., Pinto, J.M. and Morais, J.J. "Analysis of solid wood beams strengthened with CFRP laminates of distinct lengths", *Construction and Building Materials*, **35**, pp. 817-828 (2012).

30. Ozkul, Z.H. and Baykal, G. "Shear behavior of compacted rubber fiber-clay composite in drained and undrained loading", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(7), pp. 767-781 (2007).
31. Raftery, G.M. and Harte, A.M. "Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate", *Composites Part B: Engineering*, **42**(4), pp. 724-735 (2011).
32. Biscaia, H.C., Chastre, C., Borba, I.S. and et al. "Experimental evaluation of bonding between CFRP laminates and different structural materials", *Journal of Composites for Construction*, **20**(3), pp. 04015070 (2016).
33. Benedetti, A. and Colla, C. "Strengthening of old timber beams by means of externally bonded reinforcement", *In World Conf. on Timber Engineering, WCTE2010*, Trentino, Italy (2010, June).
34. Juvandes, L.F.P. and Barbosa, R.M.T. "Bond analysis of timber structures strengthened with FRP systems", *Strain*, **48**(2), pp. 124-135 (2012).
35. Vahedian, A., Shrestha, R. and Crews, K. "Effective bond length and bond behaviour of FRP externally bonded to timber", *Construction and Building Materials*, **151**, pp. 742-754 (2017).
36. Palizi, S. and Toufigh, V. "Bond strength prediction of FRP-timber under standard and acidic/alkali environmental conditions based on gene expression programming", *European Journal of Wood and Wood Product*, **80**(6), pp.1457-1471 (2022).
37. Phoon, K.K. and Kulhawy, F.H. "Characterisation of model uncertainties for laterally loaded rigid drilled shafts", *Geotechnique*, **55**(1), pp. 45-54 (2005).
38. Wang, N., Ellingwood, B.R. and Zureick, A.H. "Reliability-based evaluation of flexural members strengthened with externally bonded fiber-reinforced polymer composites", *Journal of Structural Engineering*, **136**(9), pp. 1151-1160 (2010).
39. Shi, J., Wu, Z. and et al. "Reliability analysis of intermediate crack-induced debonding failure in FRP-strengthened concrete members", *Structure and Infrastructure Engineering*, **11**(12), pp. 1651-1671 (2015).
40. Hasofer, A.M. and Lind, N.C. "Exact and invariant second-moment code format", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **100**(1), pp. 111-121 (1974).
41. Wang, N. and Ellingwood, B.R. "Limit state design criteria for FRP strengthening of RC bridge components", *Structural Safety*, **56**, pp. 1-8 (2015).