

ارزیابی قابلیت اعتماد طراحی خمشی تیرهای FRP-RC با در نظر گرفتن ترکیبات بار شامل بار زلزله

کوروش نصراله‌زاده

استادیار گروه سازه، دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
nasrollahzadeh@kntu.ac.ir

رضا آقامحمدی

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
raghamohammadi@yahoo.com

کلید واژه‌ها: FRP، قابلیت اعتماد، تیر، ظرفیت خمشی

چکیده

خوردگی و زوال فولاد مسلح‌کننده بتن، ناکارآمدی این اعضا را در برخی از کاربری‌ها مانند سازه‌های دریایی، عرشه‌ی پل‌ها و ... رقم زده است. بر همین اساس، پلیمر مسلح شده با الیاف (FRP)، به علت دارا بودن ویژگی مقاومت بالا در برابر خوردگی، جایگزینی مناسب برای فولاد مسلح‌کننده بتن به شمار می‌آید. در این تحقیق، روابط آیین‌نامه‌ی ACI 440.1R-06 در طراحی خمشی اعضای بتنی مسلح‌شده با میلگرد (FRP-RC)، مورد ارزیابی قابلیت اعتماد قرار گرفته است. برای انجام ارزیابی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است تا بتوان از مزایای آن مانند زمان کمتر آنالیز، عدم نیاز به مشتقات تابع حالت حدی و دقت بالا در مقابل دیگر روش‌های معمول حوزه‌ی قابلیت اعتماد بهره جست. در پایان پارامترهای تاثیرگذار به همراه چگونگی تاثیرشان بر روی حاشیه‌ی ایمنی این اعضا شناسایی و با توجه به این نتایج، پیشنهاداتی در مورد اصلاح ضریب کاهش مقاومت ارائه شده است.

مقدمه

خوردگی فولاد، باعث بالا رفتن هزینه‌های نگهداری و ناکارآمدی بتن مسلح در بعضی از کاربری‌ها مانند عرشه‌ی پل‌ها، سازه‌های دریایی و بسیاری دیگر شده است. به همین علت، پلیمر مسلح‌شده با الیاف (FRP)، به دلیل داشتن مقاومت بالا در برابر خوردگی به سرعت در حال گرفتن نقش فولاد مسلح‌کننده بتن در محیط‌های شدیداً خورنده می‌باشد (ACI 440.1R-06). اما میلگرد FRP دارای خواص مکانیکی متفاوتی از فولاد مانند تنش کششی نهایی بالا، مدول الاستیسیته‌ی پایین و رفتار کاملاً خطی تنش-کرنش که منجر به شکستی کاملاً ترد می‌شود، می‌باشد و همین تفاوت در خواص مکانیکی، رفتاری متفاوت را برای اعضای بتنی مسلح‌شده با میلگرد (FRP-RC) فرم می‌زند که این مساله لزوم بازنگری در بعضی از فرضیات و روابط طراحی حالت حدی، بهره‌برداری و ... را برای این اعضا می‌طلبد. از زمان پیدایش FRP-RC در صنعت عمران تاکنون، تحقیقات بسیاری برای درک و پیش‌بینی رفتار اعضای طراحی شده با این مواد صورت گرفته است که نتایج حاصله از آن منجر به اصلاحاتی در فرضیات و روابط مربوط به بتن مسلح مرسوم شده است و این روابط را تا حدی مناسب طراحی این اعضا کرده است. اما با این حال تحقیقاتی که رفتار این اعضا را در یک فضای احتمالاتی بررسی و کارآمدی اصلاحات صورت گرفته را ارزیابی کند، بسیار کم بوده و تلاش محدودی برای بررسی میزان حاشیه‌ی ایمنی و در عین حال بهینه‌بودن این روابط صورت گرفته است. به همین دلیل نیاز به یک بررسی و ارزیابی در فضای احتمالاتی که بتواند نیازهای فوق یعنی حاشیه‌ی ایمنی‌مناسب و طراحی بهینه این اعضا را به نحوی که مورد قبول آیین‌نامه‌های امروزی است رقم بزند، کاملاً حس می‌شود. با توجه به این نیاز از میان حوزه‌های مرتبط با تحلیل‌های احتمالاتی، تحلیل قابلیت اعتماد به علت توانایی بالا برای حصول به اهداف مذکور انتخاب شده است.

کارایی یک تیر تحت حالت‌های متفاوتی از شکست مانند شکست خمشی، شکست برشی، شکست ناشی از تغییرشکل نامتعارف در حالت بهره‌برداری و ... می‌تواند زیر سوال برود. لذا بررسی و ارزیابی قابلیت اعتماد این اعضا، نیازمند تفکیک و بررسی جداگانه‌ی هر کدام از این حالات شکست می‌باشد. بدین منظور در این تحقیق شکست خمشی به دلیل کاربرد بالای آن در طراحی تیرها، به عنوان شکست مورد بررسی انتخاب و

- 1- Fiber reinforced polymer
- 2- FRP Reinforced Concrete



روابط طراحی خمشی آیین‌نامه‌ی ACI 440.1R-06 که یکی از پرکاربردترین آیین‌نامه‌ها در حوزه‌ی طراحی اعضای FRP-RC می‌باشد، با تاکید بر ترکیبات بار حاوی بار زلزله مورد ارزیابی قابلیت اعتماد قرار گرفته است.

روابط طراحی خمشی تیرهای FRP-RC طبق آیین‌نامه ACI 440 و استخراج توابع حالت حدی

روابط طراحی خمشی تیرهای FRP-RC طبق آیین‌نامه ACI 440

در این قسمت محاسبه‌ی ظرفیت خمشی اسمی تیرهای FRP-RC مطابق با فصل هشتم آیین‌نامه‌ی ACI 440.1R-06 توضیح داده شده است. در اینجا نیز آیین‌نامه از طراحی حالت حدی بهره گرفته است، به این صورت که مقدار مقاومت خمشی اسمی عضو M_n ضریب ضریب کاهش مقاومت ϕ می‌بایست از لنگر حاصل از بارهای ضریب‌دار موجود بر روی تیر M_u بیشتر باشد. یعنی:

$$\phi M_n \geq M_u \quad (1)$$

لازم بذکر است که مقدار M_u می‌تواند از ترکیبات بار مختلفی بدست آید. در اینجا ترکیب بار $1.2D + 1.6L$ به این علت که سازه بیشتر عمر خود را در تحمل این ترکیب بار سپری می‌کند انتخاب شده است، اما تاثیرات بار زلزله نیز با استفاده از ترکیبات بارهای زیر مورد مطالعه قرار خواهند گرفت:

$$1.2D + 1.0L + 1.0E \quad (2)$$

$$0.9D + 1.0E \quad (3)$$

در ترکیبات بار بالا، منظور از D ، L و E به ترتیب بار مرده، زنده و زلزله می‌باشد.

روابط خمشی تیرهای FRP-RC همانند تیرهای بتنی مرسوم، به دو حالت فوق مسلح و تحت مسلح تقسیم می‌شود. به این نحو که اگر نسبت میلگرد طولی موجود در تیر ρ_f از نسبت حالت بالانس ρ_{fb} کمتر باشد، تیر تحت مسلح بوده و شکست آن به صورت گسیختگی FRP می‌باشد و در حالتی که $\rho_f \leq \rho_{fb}$ باشد، تیر فوق مسلح بوده و شکست آن با خرد شدن بتن ناحیه‌ی فشاری آغاز می‌شود که در ادامه روابط مربوطه آورده شده است:

$$M_n = \rho_f f_{fu} \left(1 - \frac{\beta_1}{2} \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) \right) b d^2 \quad (4)$$

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 \quad (5)$$

در روابط بالا β_1 ، ε_{cu} ، f_f ، f_{fu} ، f'_c ، d ، b و ρ_f به ترتیب برابر با عرض تیر، عمق موثر تیر، مقاومت فشاری بتن، تنش نهایی FRP، تنش موجود در میلگرد FRP، کرنش نهایی بتن، ضریب ارتفاع بلوک فشاری و کرنش نهایی FRP می‌باشند.

از آنجاییکه حالت گسیختگی FRP رفتاری شکننده‌تر در مقابل خردشدگی بتن دارد، آیین‌نامه برای آن ضریب کاهش مقاومت ϕ شدیدتری قرار داده است:

$$\phi = \begin{cases} 0.55 & \rho_{fb} < \rho_f \\ 0.3 + 2.5 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \rho_{fb} \leq \rho_f \leq 1.4 \rho_{fb} \\ 0.65 & 1.4 \rho_{fb} < \rho_f \end{cases} \quad (6)$$

استخراج توابع حالت حدی برای ظرفیت خمشی تیرهای FRP-RC

همانطور که از نام تابع حالت حدی پیداست، تابعی است که چگونگی رفتار عضو را در لحظه‌ی شکست شرح می‌دهد و مرز بین دو ناحیه‌ی ایمن و غیر ایمن را در مورد عضو مشخص می‌کند. لازم به ذکر است که روابط طراحی باید به نحوی رفتار کنند، که نه تنها عضو در حالت غیر ایمن طراحی نشود، بلکه با یک فاصله‌ی مناسبی از این مرز در حالت ایمن قرار بگیرد. در مورد مساله‌ی مورد بررسی یعنی ارزیابی قابلیت اعتماد شکست خمشی تیرهای FRP-RC، با توجه به روابط ارائه شده توسط آیین‌نامه و با رعایت فرم استاندارد و مرسوم تابع حالت حدی یعنی $LSF = R - Q$ که در آن R برابر مقاومت عضو و Q برابر بار وارد بر تیر می‌باشد (Nowak and Collins, 2000)، تابع حالت حدی به صورت زیر تعریف شده است:



$$LSF_{FRP} = \xi_{FRP} \rho_f f_{fu} \left(1 - 0.5\beta_1 \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \right) b d^2 - M_{Dead} - M_{Live} - M_{Earth} \quad (7)$$

$$LSF_{con} = \xi_{con} \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 - M_{Dead} - M_{Live} - M_{Earth} \quad (8)$$

در روابط بالا ξ_{FRP} و ξ_{con} ضرایب عدم قطعیت محاسباتی می باشند که برابر با نسبت مقاومت به دست آمده از آزمایش به مقاومت حاصل از روابط آیین نامه برای ظرفیت خمشی عضو می باشد که در بخش متغیرهای تصادفی بیشتر توضیح داده شده اند. متغیرهای M_{Earth} ، M_{Live} و M_{Dead} به ترتیب برابر لنگرهای حاصل از بار مرده، زنده و زلزله می باشند. لازم به ذکر است که اگر در ترکیب بار مورد بررسی یکی از بارها وجود نداشته باشد، آن بار از تابع حالت حدی حذف می شود.

متغیرهای تصادفی دخیل در توابع حالت حدی

در این مطالعه متغیرهای عرض تیر b ، ارتفاع موثر تیر d ، مقاومت فشاری بتن f'_c ، تنش نهایی FRP f_{fu} ، ضریب عدم قطعیت محاسباتی ξ و بار موجود بر روی تیر M به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده اند. در جدول ۱ متغیرهای تصادفی با مشخصات آماریشان آورده شده اند (Szerszen and Nowak, 2003).

جدول ۱: مشخصات آماری متغیرهای طراحی

متغیر	حالت	مقدار اسمی	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	توزیع احتمال
f'_c (MPa)	الف	۲۰	۲۶.۶۳	۶.۶۳	۰.۱۰	نرمال
	پ	۷۰	۷۹.۶۸	۹.۶۸	۰.۱۰	
f_{fu} (MPa)	الف	۳۶۷.۲	۴۳۲	۲۷	۰.۰۵	نرمال
	پ	۸۵۰	۱۰۰۰	۵۰	۰.۰۵	
b_w (mm)	الف	۲۰۰	۲۰۲.۲۹	۳.۸۱	۰.۰۴	نرمال
	پ	۷۰۰	۷۰۲.۲۹	۳.۸۱	۰.۰۴	
d (mm)	الف	۲۵۰	۲۴۵.۱۷	۱۲.۷۰	۰.۱۷	نرمال
	پ	۸۰۰	۷۹۵.۱۷	۱۲.۷۰	۰.۰۱	

در جدول بالا برای هر متغیر تاثیرگذار در طراحی دو حالت در نظر گرفته شده است که حالت الف و ب به ترتیب نماینده کمترین و بیشترین مقدار برای متغیر مربوطه در بین مقادیر مرسوم قابل انتخاب برای آن متغیر می باشند. همچنین برای متغیر قطعی ρ_f ، فرض شده است که نسبت ρ_f موجود به حالت بالانس ρ_{fb} ، دارای مقداری از ۰.۰۱ تا ۲.۵ با فواصل ۰.۱ دارد. با این نحوه انتخاب مقادیر برای متغیرهای طراحی می توان اطمینان داشت که بخش اعظمی از حالات ممکن برای طراحی این اعضا که توسط طراح می تواند انتخاب شود، پوشش داده شده است. پارامتر عدم قطعیت محاسباتی ξ برابر با نسبت مقدار ظرفیت واقعی عضو که از آزمایش بدست آمده M_{Exp} به مقدار ظرفیت اسمی عضو M_n که آیین نامه برای عضو پیش بینی می کند، می باشد. در ادامه مشخصات آماری متغیر عدم قطعیت مکانیکی ξ در جدول ۲ آورده شده است که این مقادیر از نمونه های آزمایشگاهی دارای شکست خمشی استخراج شده اند.

جدول ۲: مشخصات آماری ضریب عدم قطعیت مکانیکی ξ

توزیع احتمال	ضریب تغییرات	انحراف معیار	میانگین	تعداد نمونه ها	حالت شکست
نرمال	۰.۰۹۴	۰.۱۰۲	۱.۱۰۸	۵۸	گسیختگی FRP (ξ_{FRP})
	۰.۰۸۳	۰.۰۸۹	۱.۰۶۸	۶۴	خردشدگی بتن (ξ_{con})

بعد از صحبت در مورد متغیرهای مقاومتی، نوبت به متغیرهای مربوط به بار می رسد. یک عضو یا سازه در طول عمر بهره برداری خود در معرض انواع مختلفی از بارها می تواند قرار بگیرد که شامل بار مرده، زنده، برف، باد و یا زلزله می باشد. لازم به ذکر است که عضو یا سازه در آن واحد می تواند در معرض چندین نوع بار قرار گیرد و به همین دلیل است که آیین نامه ها ترکیبات مختلف بارگذاری را معرفی می کنند. بعد از محاسبه ی مقادیر اسمی بارهای وارده بر تیر، میانگین و انحراف معیار آن ها با استفاده از جدول ۳ بدست می آید. مقادیر داده شده در جدول ۳ بر اساس بیشترین مقدار بار وارده به سازه در پنجاه سال می باشد (Szerszen and Nowak, 2003).

جدول ۳: مشخصات آماری بارها بر اساس بیشترین مقدار در ۵۰ سال

نوع بار	بایاس	ضریب تغییرات	توزیع احتمال
مرده	۱.۰۵	۰.۱۰	نرمال
زنده	۱.۰۰	۰.۱۸	نوع I
برف	۰.۸۲	۰.۲۶	لاگ نرمال
باد	۰.۷۸	۰.۳۷	نوع I

در جدول بالا منظور از بایاس نسبت میانگین به مقدار اسمی می‌باشد.

الگوریتم ژنتیک و استخراج اندیس قابلیت اعتماد

مروری بر الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک^۳ در سال ۱۹۷۵ توسط آقای هالند^۴ به عنوان یک تکنیک بهینه‌سازی برای مسائل پیچیده و غیر خطی معرفی شد (Holland, 1976). این تکنیک ابزاری قدرتمند بوده که از مکانیسم انتخاب طبیعی موجود در نظریه‌ی تکامل زیستی برگرفته شده است. قدرت این روش در این است که فضای محتمل برای جواب را با تکنیک شناسایی نقاط مطلوب بیرون کشیده و گام بعدی را بر اساس این نقاط پایه‌ریزی می‌کند که این عمل باعث کمتر شدن زمان یافتن جواب بهینه می‌شود. به صورت کلی GA عمل جستجو برای رسیدن به جواب بهینه را با تعدادی نقاط اولیه با نام جمعیت آغاز می‌کند. هر نقطه یا به ادبیات GA هر کروموزوم برداری است حاوی خواص نقاط مورد بررسی که از آن با نام ژن یاد می‌شود. در مرحله‌ی بعد جمعیت جدید با انتخاب افراد لایق حاصل از انجام عمل تلفیق یا جهش و یا انتقال مستقیم از جمعیت قبل ساخته می‌شود و این عمل یعنی تولید جمعیت جدید با انتخاب افراد لایق از جمعیت قبلی، فرزندان و جهش‌یافتگان تا به آنجایی ادامه دارد که شرط توقف الگوریتم ارضا شود که این شرط می‌تواند رسیدن به تعداد چرخه‌ی معین و یا رسیدن به جواب با دقت کافی باشد. لازم به ذکر است که می‌توان تعداد جمعیت جهش‌یافتگان، فرزندان، میزان اعمال جهش و یا چگونگی تولید فرزندان از والدین انتخابی را تعیین کرد (Haupt and Haupt, 2004). در بخش بعدی چگونگی استفاده از این روش برای بدست آوردن اندیس قابلیت اعتماد شرح داده شده است.

استخراج اندیس قابلیت اعتماد با استفاده از الگوریتم ژنتیک

از آنجاییکه اندیس قابلیت اعتماد β معرف کمترین فاصله از مبدا مختصات تا تابع حالت حدی در فضای نرمال شده می‌باشد (Nowak and Collins, 2000)، می‌توان به آن از منظر بهینه‌سازی نگاه کرد. به این صورت که با تعریف تابع بیان‌کننده‌ی فاصله‌ی مبدا تا LSF به عنوان تابع هزینه، با استفاده از GA آن را بهینه کرده و کمترین مقدار آن که همان β می‌باشد را بدست آورد. مزیت استفاده از این روش در این است که سرعت آن نسبت به روش‌های شبیه‌سازی مانند مونت کارلو بسیار بالاتر بوده و به مشتقات تابع حالت حدی مانند روش‌های FORM و SORM نیاز نیست. با استفاده از تعریف β که در بالا آورده شد، تابع هزینه به این صورت تعریف شده است:

$$\beta = \sqrt{U \times U^T} \quad (9)$$

که در آن U بردار حاوی متغیرهای تصادفی در فضای نرمال شده می‌باشد. اما برای اینکه اطمینان حاصل شود که مقادیر حدس زده شده توسط الگوریتم برای متغیرهای تصادفی بر روی LSF قرار دارد، از تعداد متغیرهایی که توسط الگوریتم باید حدس زده شوند یکی کاسته شده و مقدار آن با استفاده از LSF بدست آورده می‌شود که با این عمل این اطمینان ایجاد می‌شود که الگوریتم بر روی LSF حرکت می‌کند. بدین منظور LSF به صورت زیر تغییر داده شده است:

$$M_{Dead} = \xi_{FRP} \rho_f f_{fu} \left(1 - 0.5\beta_1 \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \right) b d^2 - M_{Live} - M_{Snow} - M_{Wind} \quad (10)$$

$$M_{Dead} = \xi_{con} \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 - M_{Live} - M_{Snow} - M_{Wind} \quad (11)$$

بنابراین مقادیر متغیرهای ξ ، f_{fu} ، f'_c ، d ، b ، M_{Live} ، M_{Snow} و M_{Wind} توسط الگوریتم حدس زده شده و با استفاده از این مقادیر، مقدار M_{Dead} محاسبه می‌شود. سپس تمامی این مقادیر با توجه به نوع توزیع احتمالاتی که دارند به فضای نرمال شده برده شده و در رابطه‌ی (۹)

3Genetic Algorithm (GA)

4Holland



جاگذاری می‌شوند. سپس الگوریتم با توجه به مقادیر بدست آمده برای β سعی در کمینه کردن مقدار آن می‌کند.

مقادیر اولیه برای شروع الگوریتم بهینه‌یابی برابر میانگین متغیرها و تعداد ۱۰۰۰ چرخه به عنوان بیشترین تعداد چرخه در نظر گرفته شده است. اندازه‌ی جمعیت اولیه ده برابر متغیرهای تصادفی موجود در LSF ، جمعیت فرزندان و جهش‌یافتگان هرکدام برابر بیست درصد جمعیت اولیه فرض شد و نرخ جهش نیز برابر بیست درصد در نظر گرفته شد. انتخاب والدین برای تولید فرزندان و جهش‌یافتگان بر اساس چرخ گردان انجام شده و شرط توقف الگوریتم پایان یافتن ۱۰۰۰ چرخه و یا رسیدن به دقت پنج رقم اعشار در محاسبه‌ی β تعریف شد.

نتایج ارزیابی قابلیت اعتماد

نتایج کلی

در جدول ۴، مقدار β برای تمامی ترکیب بارها در هر مد خرابی نشان داده شده است. با مقایسه‌ی مقادیر بدست آمده از این ارزیابی با مقادیر β بدست آمده در مورد تیرهای بتنی مسلح‌شده با میلگرد فولادی که در حدود ۳ الی ۳.۵ در مورد ترکیب بار $1.2D + 1.6L$ می‌باشد، می‌توان دریافت که ضوابط طراحی آیین‌نامه ACI 440.1R-06 بسیار محافظه‌کارانه می‌باشد. همچنین با مقایسه‌ی مقادیر بدست آمده در مورد ترکیب بارهای $1.2D + 1.0L + 1.0E$ و $0.9D + 1.0E$ با مقادیر متناظر در بتن مسلح معمولی که در حدود ۲.۵ و ۲ می‌باشد، می‌توان به محافظه‌کارانه بودن آیین‌نامه در مورد این ترکیب بارها هم پی برد.

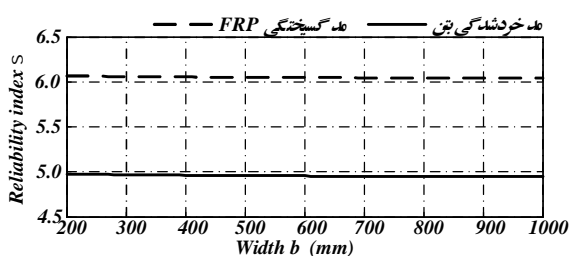
جدول ۴: اندیس قابلیت اعتماد در هر مد شکست در هر ترکیب بار

ترکیب بار	مد شکست	β	β_T	Φ
$1.2D + 1.6L$	گسیختگی FRP	6.05	4.0	0.87
	خردشدگی بتن	4.73	3.5	0.84
$1.2D + 1.0L + 1.0E$	گسیختگی FRP	5.29	3.0	0.88
	خردشدگی بتن	3.88	2.5	0.87
$0.9D + 1.0E$	گسیختگی FRP	4.04	3.0	0.71
	خردشدگی بتن	2.86	2.5	0.71

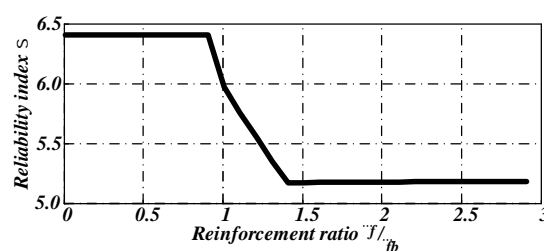
مطالعه‌ی پارامتریک

هدف از این بخش بررسی چگونگی تاثیر پذیرفتن β با تغییر کردن متغیرهای موجود در LSF می‌باشد. از آنجاییکه تاثیر پارامترهای مقاومتی در هر سه ترکیب بار یکسان است در اینجا فقط نمودارهای مربوط به ترکیب بار $1.2D + 1.6L$ آورده شده است. در شکل ۱ تاثیر نسبت آرماتور طولی بر روی β نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود برای مقاطع تحت مسلح مقدار β به مراتب بالاتر از مقاطع فوق مسلح می‌باشد که این امر ناشی از ضریب کاهش مقاومت شدیدتر آیین‌نامه برای این مد شکست می‌باشد. مقدار β با تغییر نسبت آرماتور موجود به آرماتور حالت بالانس از مقدار ۱ تا مقدار ۱.۴ به تدریج کاهش یافته تا که به مقدار پایین‌تر برای مد شکست خردشدگی بتن برسد. در شکل ۲ تغییرات β در مقابل تغییرات عرض تیر b به نمایش گذاشته شده است. همانطور که از قبل نیز نتیجه شده بود تغییر اندازه‌ی b تاثیر بسیار کمی بر روی β در هر دو مد شکست می‌گذارد.

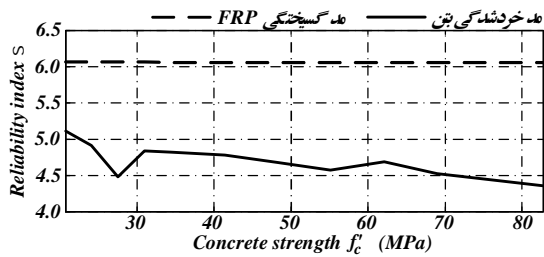
در شکل ۳ و شکل ۴ تاثیر عمق موثر تیر d و مقاومت فشاری بتن f_c' بر روی β نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش d مقدار β هم افزایش پیدا می‌کند. با توجه شکل ۴ تاثیر f_c' در مد گسیختگی FRP ناچیز بوده ولی کاهش β در مد خردشدگی بتن کاملاً آشکار می‌باشد. این کاهش β را می‌توان به روند تقریباً افزایشی ضریب تغییرات بتن با افزایش مقاومت آن همانطور که در مرجع Szerszen (and Nowak, 2003) گزارش شده است مرتبط دانست.



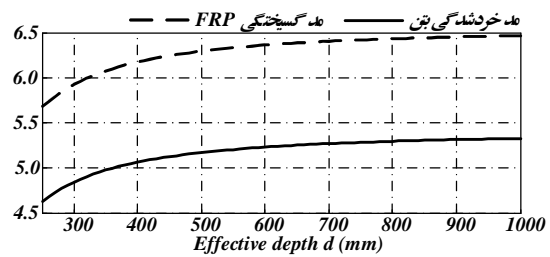
شکل ۲: تاثیرات عرض تیر b بر روی β



شکل ۱: تاثیرات نسبت آرماتور موجود به نسبت آرماتور حالت بالانس بر روی β

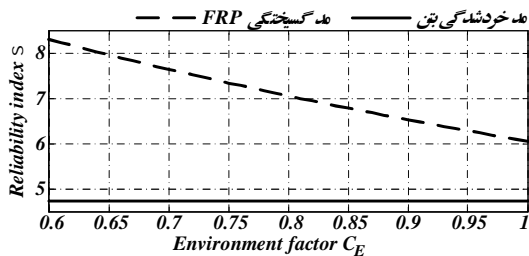


شکل ۴: تاثیرات مقاوت فشاری بتن f_c بر روی β

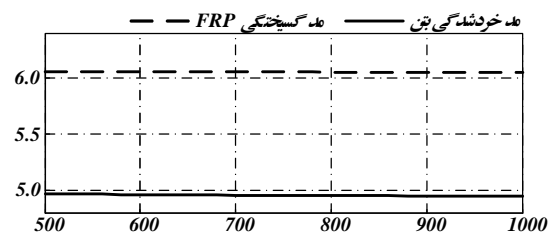


شکل ۳: تاثیرات عمق مؤثر تیر d بر روی β

در شکل ۵ تاثیر تنش کششی نهایی تیر f_{fu} بر روی اندیس قابلیت اعتماد تیر نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود با افزایش مقدار f_{fu} اندیس قابلیت اعتماد تغییر چندانی نمی‌کند. لازم به ذکر است که با افزایش مقدار تنش نهایی f_{fu} مقدار مدول الاستیسیتهی FRP نیز افزایش داده شده است. در شکل ۶ اندیس قابلیت اعتماد در مقابل ضریب کاهش اثرات محیطی C_E رسم شده است. با توجه به شکل مقدار β در مد گسیختگی FRP به شدت حساس به C_E بوده و با کاهش C_E به شدت کاهش می‌یابد. اما مد خردشدگی بتن نسبت به این پارامتر تقریباً بی‌تاثیر بوده و تغییری را از خود نشان نمی‌دهد.

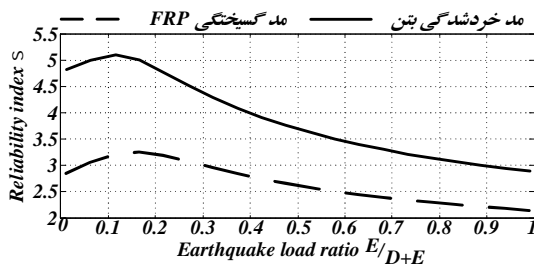


شکل ۶: تاثیرات ضریب محیطی C_E بر روی β

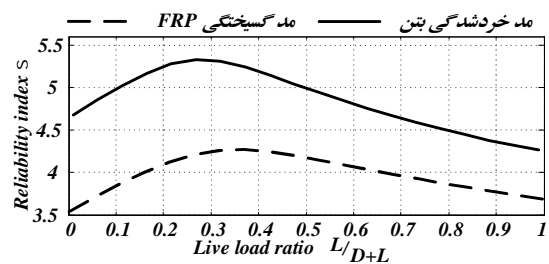


شکل ۵: تاثیرات تنش نهایی FRP f_{fu} بر روی β

در شکل ۷ تاثیر نسبت بار زنده‌ی موجود بر روی تیر بر روی β نشان داده شده است که در آن با افزایش این نسبت یعنی نسبت بار زنده به بار مرده مقدار β در ابتدا افزایش یافته و با گذشت از نسبت حدوداً ۰.۳ دوباره شروع به کاهش می‌کند. همانطور که دیده می‌شود برای نسبت‌های بین ۰.۱ تا ۰.۷ که دارای بیشترین احتمال وقوع در بین دیگر مقادیر نسبت بار زنده به مرده می‌باشند، مقدار β بالای ۵.۰ می‌باشد که نشان از سطح قابلیت اعتماد بالای اعضای FRP-RC در مقابل اعضای مسلح شده با فولاد دارد که برای همین حالت مقادیری بین ۳ الی ۴.۵ دارد (Szerszen and Nowak, 2003). شکل ۸ نشان‌دهنده‌ی کاهش β بر اثر افزایش بار زلزله می‌باشد که با استفاده از ترکیب بار $0.9D + 1.0E$ رسم شده است.



شکل ۸: تاثیرات نسبت بار زلزله به مجموع بار مرده و زلزله بر روی β

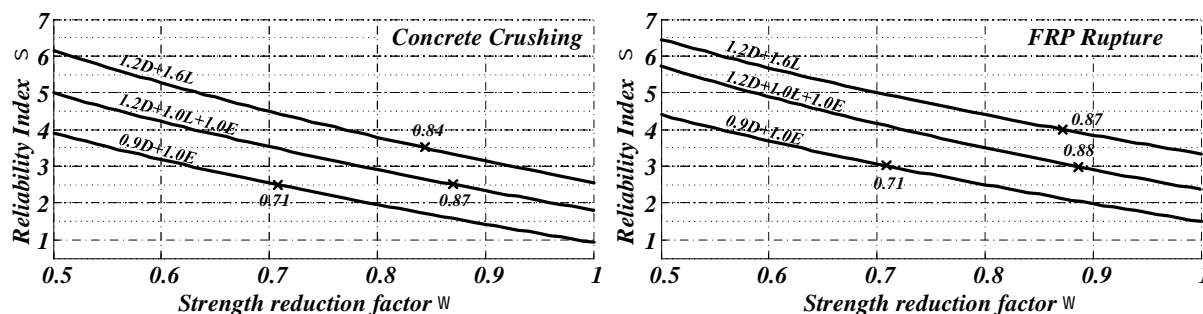


شکل ۷: تاثیرات نسبت بار زنده به مجموع بار مرده و زنده بر روی β

ضریب کاهش مقاومت

با توجه به بخش‌های قبلی نتیجه گرفته شد که ضریب کاهش مقاومت ϕ در طراحی خمشی ACI 440 بسیار محافظه‌کارانه است. به همین منظور در شکل ۶ مقدار β برای مقادیر مختلف ϕ محاسبه شده است تا بتوان مقدار مناسب ϕ که هم بهینه بودن طراحی و هم حاشیه‌ی ایمنی مناسبی را بدست دهد، انتخاب شود. از آنجاییکه مد گسیختگی FRP تردتر از مد خردشدگی بتن می‌باشد، β بالاتری برای آن در نظر گرفته شده است. در اینجا با استفاده از مقادیر پیشنهاد شده در (He and Qiu, 2011) مقدار اندیس قابلیت اعتماد ۴ برای مد گسیختگی FRP و مقدار اندیس قابلیت اعتماد ۳.۵ برای مد خردشدگی بتن در ترکیب بار $1.2D + 1.6L$ در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب مقدار ϕ برای مد

گسیختگی FRP و خردشدگی بتن به ترتیب برابر ۰.۸۷ و ۰.۸۴ در این ترکیب بار بدست آمد. اما در مورد ترکیب بارهای $1.2D + 1.0L + 1.0E$ و $0.9D + 1.0E$ مقادیر ۰.۷۱ و ۰.۸۸ برای مد شکست گسیختگی FRP و مقادیر ۰.۸۷ و ۰.۷۱ برای خردشدگی بتن بدست آمدند.



شکل ۶: ضریب کاهش مقاومت در مقابل اندیس قابلیت اعتماد β در هر مد شکست

نتیجه گیری

در این تحقیق ارزیابی قابلیت اعتماد بر روی طراحی خمشی تیرهای FRP-RC با تاکید بر دو مد گسیختگی FRP و خردشدگی بتن در سه ترکیب بار $1.2D + 1.0L + 1.0E$ ، $1.2D + 1.6L$ و $0.9D + 1.0E$ مطابق با آیین‌نامه‌ی ACI 440.1R-06 انجام گرفت. روش مورد استفاده برای بدست آوردن اندیس قابلیت اعتماد الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک می‌باشد. با انجام این ارزیابی مقدار β برای مدهای گسیختگی FRP و خردشدگی بتن، مقادیری بسیار بالا بدست آمد که این مساله نشان از محافظه‌کارانه بودن ضریب کاهش مقاومت در آیین‌نامه ACI چه در ترکیب بارهای گرانشی مانند بار مرده و زنده و چه در ترکیب بارهای حاوی بار زلزله دارد. متغیر عمق موثر d دارای بیشترین تاثیر بر روی β بوده و متغیرهای عرض تیر b و تنش کششی نهایی FRP تقریبی تاثیر بر روی β می‌باشند. افزایش ضریب محیطی C_E و مقاومت فشاری بتن f'_c باعث کاهش β به ترتیب در حالت گسیختگی FRP و خردشدگی بتن می‌شوند. در انتها با در نظر گرفتن مقادیر β در حدود ۴ و ۳.۵ برای ترکیب بار $1.2D + 1.6L$ به ترتیب برای دو مد گسیختگی FRP و خردشدگی بتن، مقدار ۰.۸۴ برای ضریب کاهش مقاومت β پیشنهاد شده است. اما در مورد دو ترکیب بار دیگر که حاوی بار زلزله‌اند، با مینا قرار دادن مقدار ۳ و ۲.۵ برای اندیس قابلیت اعتماد در مد گسیختگی FRP و خرد شدگی بتن، مقدار ۰.۷۱ برای این دو ترکیب بار در هر دو مد شکست پیشنهاد شده است.

مراجع

ACI 440 Committee (2006) Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1 R-06), American Concrete Institute, Detroit, Michigan

Haupt RL and Haupt SE (2004) Practical genetic algorithms. John Wiley & Sons

He Z and Qiu F (2011) Probabilistic assessment on flexural capacity of GFRP-reinforced concrete beams designed by guideline ACI 440.1 R-06, *Journal of Construction and Building Materials*, 25(4): 1663-1670

Holland JH (1975) Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. U Michigan Press

Nowak A and Collins K (2000) Reliability of Structures, McGraw-Hill Book Company, New York

S zerszen M and Nowak A (2003) Calibration of Design Code for Buildings (ACI 318): Part 2- Reliability Analysis and Resistance Factors, *Journal of ACI Structural*, 100(3): 383-391