

بررسی پارامترهای مؤثر برقابلیت اعتماد پایه پلهای بتن آرمه تقویت شده با

صفحات FRP

محسنعلی شایانفر، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
حسین نادرپور، دانشجوی دکتری سازه، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
Shayanfar@iust.ac.ir

چکیده

FRP

FRP

FRP

FRP

FRP

FRP

FRP

ρ

FRP

واژه‌های کلیدی: قابلیت اعتماد، FRP، پل بتن آرمه، محصور شدگی، خروج از محوریت، شکل‌پذیری

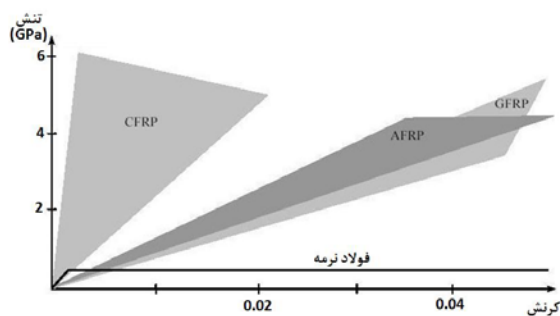
۱. مقدمه

در طول پایه بدون تغییر محسوس در وزن ایجاد می‌کند. با دورپیچ کردن یک پایه بتنی با روکش FRP برش، ممان و ظرفیت محوری بهبود می‌یابد. به علاوه، شکل‌پذیری عضو نیز تا میزان مطلوبی افزایش پیدا می‌کند. روکش FRP با دورپیچ کردن پایه توسط الیاف FRP در راستای عرضی شکل می‌گیرد. تأثیر

استفاده از کامپوزیتهای FRP^۱ به‌طور گسترده‌ای در صنعت ساختمان رو به افزایش است. یکی از کاربردهای این کامپوزیت‌ها در مقاوم‌سازی و ترمیم پایه پلهای بتن آرمه است. استفاده از روکش FRP برای افزایش عملکرد فشاری محوری اعضای بتنی تأثیر زیادی دارد؛ به علت این واقعیت که یک محصور شدگی پیوسته



شکل ۱. نمونه‌ای از تقویت پایه پل بتن آرمه با صفحات FRP



شکل ۲. منحنی‌های تنش-کرنش کامپوزیت‌های FRP در مقایسه با فولاد نرمه [۱۲]

نشان داده شده است. شکل ۲ نشان می‌دهد که CFRP دارای بیشترین پایایی است، زیرا سطح زیر منحنی بیشتری را به دست می‌دهد. در نتیجه CFRP ها در زمینه مقاوم‌سازی پایه پلهای بتن آرمه در مقوله پایایی، بهترین گزینه هستند [۵ و ۶].

۳. مدل بتن محصور شده با FRP

۳-۱ مقاومت فشاری و شکل پذیری

بتن تحت فشار محوری تمایل به منبسط شدن دارد. یک روکش کامپوزیت FRP، انبساط عرضی را محدود کرده و در بتن یک حالت فشار سه محوره ایجاد می‌کند که مقاومت و شکل پذیری بتن را افزایش می‌دهد. تأثیر حالت فشار سه بعدی بر خصوصیات بتن برای اولین بار توسط Richart و همکاران در سال ۱۹۲۸ مطالعه شد [۷]. آنها استوانه‌های بتنی که تحت بار محوری قرار گرفته بودند را تحت فشار مایع جانبی قرار دادند. بر مبنای آزمایش، فرمولهای زیر برای تخمین حداکثر مقاومت (f'_{cc}) و کرنش محوری بتن محصور شده (ϵ_{cc}) پیشنهاد شد:

محصورشدگی ناشی از FRP توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج قابل توجهی به دست آمده است. در این میان مطالعات آزمایشگاهی مهمی صورت پذیرفته و مدل‌های تجربی متعددی نیز برای تشریح رفتار اعضای بتن آرمه محصور شده با FRP ارائه شده است [۲ و ۱]. هدف از این مقاله، ارزش‌گذاری قابلیت اعتماد پایه پلهای بتن آرمه محصور شده با FRP است. مدل‌های تجربی موجود به منظور پیش‌بینی مقاومت و شکل‌پذیری بتن محصور شده با FRP استفاده شده و نامطمئن همراه با این مدل‌ها بر مبنای اطلاعات آزمایشگاهی موجود تخمین زده می‌شود. این نامطمئن مانند سایر نامطمئن‌های همراه با خصوصیات مصالح، بارها و یک مدل سازه‌ای در آنالیز قابلیت اعتماد پایه‌های بتن آرمه محصور شده با FRP و محصور نشده توسط اندیس قابلیت اعتماد، ارزش‌گذاری می‌شود. بر مبنای نتایج آنالیز قابلیت اعتماد، توصیه‌هایی برای چگونگی اصلاح ضریب کاهش مقاومت در طراحی پایه پلهای محصور شده با FRP به منظور اطمینان از حصول تراز قابلیت اعتماد مشابه با آنچه برای پایه‌های محصور نشده معمول وجود دارد، ارائه شده است.

۲. مشخصات مصالح FRP

کامپوزیت‌های FRP می‌توانند به منظور مقاوم‌سازی پایه پلهای بتن آرمه در مقابل مدهای اصلی شکست در طول یک زلزله مورد استفاده قرارگیرند. در شکل ۱ نمونه‌ای از پایه پل تقویت شده با FRP آورده شده است. یک کامپوزیت FRP از دو عضو اصلی شامل الیاف که یک عامل مسلح‌کننده است و نیز یک زمینه پلیمری به عنوان چسبی که الیاف را در کنار هم نگه می‌دارد، تشکیل شده است. الیاف معمولاً از موادی با مقاومت زیاد نظیر کربن، شیشه و یا آرامید هستند. این الیاف دارای مقاومت خمشی زیادی هستند زیرا در آنها از جابجایی نامناسب الیاف جلوگیری شده و این باعث محدود شدن جریان پلاستیک می‌شود. در نتیجه الیاف دارای مقاومت بیشتری بوده اما در عین حال ترد نیز هستند [۳ و ۴].

دوام به عنوان یک خصوصیت مهم در انتخاب نوع کامپوزیت به منظور پایداری در برابر بارهای لرزه‌ای به شمار می‌آید. دوام به صورت کار مورد نیاز برای شکست در واحد حجم تعریف می‌شود. این خصوصیت ممکن است با محاسبه سطح زیر منحنی تنش-کرنش تعیین شود. منحنی‌های تنش-کرنش معمول در شکل ۲ برای CFRP، GFRP و AFRP در مقایسه با فولاد نرمه

یک رابطه غیرخطی مشابه با آنچه در معادله ۳ آمده توسط Cusson در سال ۱۹۹۵ برای پیش‌بینی حداکثر کرنش محوری بتن محصور شده توسط طوقه‌های فولادی پیشنهاد شد (با مقادیر $q = 1.7$ و $b = 0.21$).

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_c} = \left[1 + b \left(\frac{f_l}{f'_c} \right)^q \right] \quad (۴)$$

همچنین Miyauchi و همکارانش در سال ۱۹۹۹ از این رابطه برای آنالیز نتایج آزمایشهای فشار محوری بر روی پایه‌های بتنی محصور شده با صفحات CFRP استفاده کرده و مقادیر $q = 0.373$ و $b = 10.6$ را برای بتن با مقاومت 30MPa و مقادیر $q = 0.525$ و $b = 10.5$ را برای بتن با مقاومت 50MPa با انجام آنالیز رگرسیون بر روی نتایج آزمایش به دست آوردند [۱].

مطالعات ذکر شده نشان داد که مدل‌های تجربی در معادلات ۳ و ۴ می‌توانند برای پیش‌بینی مقاومت فشاری و شکل‌پذیری بتن محصور شده با FRP استفاده شوند. با این حال در همان زمان، مقادیر مختلفی از a و b و نیز n و q نشان داد که یک نامطمئن قابل توجه با مدل‌ها همراه است. بنابراین استفاده از این مدل‌ها در فرآیند طراحی، مستلزم آن است که نامطمئن مذکور به درستی تخمین زده شده و سپس به حساب آورده شود. در این مقاله به منظور به حساب آوردن این عدم اعتماد در مدل‌ها، ضرایب a و b به صورت متغیرهای تصادفی لحاظ شده‌اند. مقادیر میانگین (μ_a) و (μ_b) و واریانس (σ_a^2) و (σ_b^2) آنها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود به دست می‌آیند. برای استوانه‌های بتنی محصور شده با FRP، فشار محصورشدگی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f_l = \frac{2f_f t_f}{D} \quad (۵)$$

که در آن f_f و t_f به ترتیب مقاومت کششی و ضخامت روکش FRP بوده و D ، قطر یک استوانه بتنی است. آنالیز اطلاعات آزمایشگاهی به حصول نتایج زیر انجامیده است: در معادله ۳، مقادیر $n=0.79$ ، $\mu_a = 2.17$ و $\sigma_a = 0.85$ و در معادله ۴، مقادیر $q=0.42$ ، $\mu_b = 16.1$ و $\sigma_b = 9.3$ به دست آمد. شکل ۳، مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده را با استفاده از معادلات ۳ و ۴ و نیز اطلاعات تجربی نشان می‌دهد.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = \left[1 + a \left(\frac{f_l}{f'_c} \right) \right] \quad (۱)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_c} = \left[1 + b \left(\frac{f_l}{f'_c} \right) \right] \quad (۲)$$

که در آن f'_c و ε_c ، به ترتیب مقاومت فشاری و کرنش محوری مربوط به تنش حداکثر بتن محصور نشده‌اند. همچنین f_l ، فشار محصور شدگی بوده و مقادیر $a = 4.1$ و $b = 5a$ ، ضرایبی هستند که به صورت تجربی تعیین شده‌اند.

مطالعات تجربی بعدی نشان داد که محصورشدگی جانبی در ترازهای بالاتر فشار محصور شدگی، تأثیر کمی داشته و یک رابطه غیرخطی بین افزایش مقاومت بتن و نسبت محصور شدگی (f_l/f'_c) پیشنهاد شد:

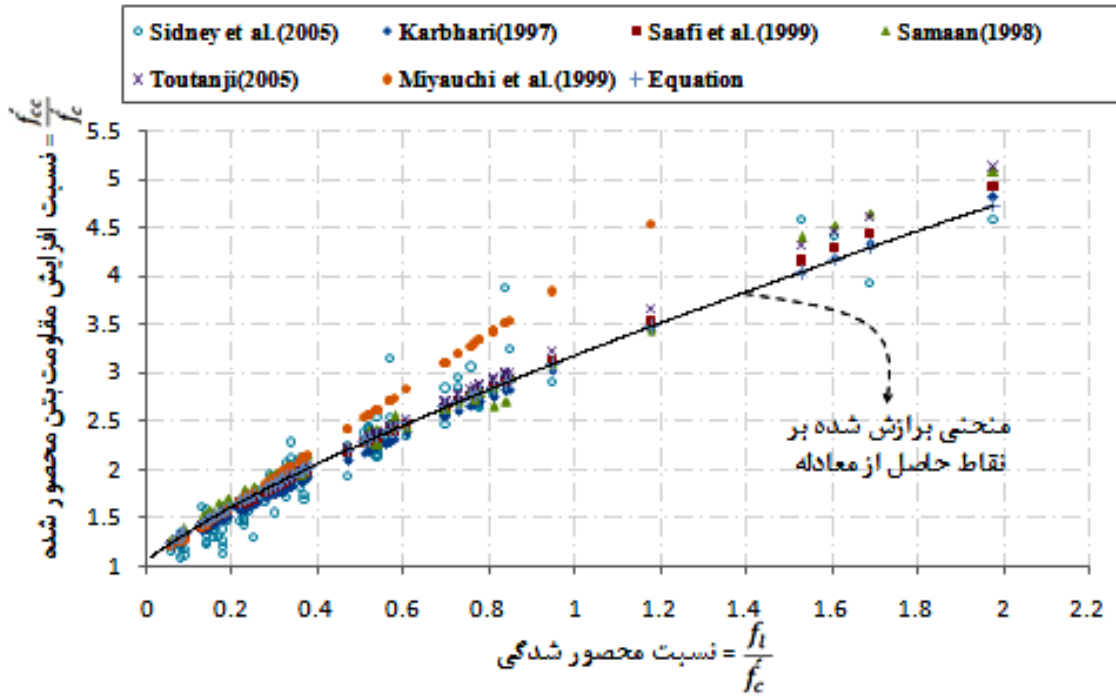
$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = \left[1 + a \left(\frac{f_l}{f'_c} \right)^n \right] \quad (۳)$$

در رابطه اخیر، مقادیر $a = 3.7$ و $n = 0.86$ پیشنهاد شده‌اند. این فرمول بعدها توسط محققین دیگری استفاده شد و آنها مقادیر مختلفی را برای a و n بر مبنای آنالیز رگرسیون بر روی اطلاعات آزمایشگاهی پیشنهاد دادند. برای مثال Cusson، مقادیر $a = 2.1$ و $n = 0.7$ را با استفاده از نتایج آزمایشهای فشار محوری پایه‌ی بتنی با مقاومت بالا و محصور شده توسط طوقه‌های فولادی به دست آورد [۸]. برای بتن محصور شده با FRP، Karbhari، مقادیر $a = 2.1$ و $n = 0.87$ را با استفاده از نتایج آزمایشهای فشاری استوانه‌های بتنی محصور شده با FRP به دست آورد [۹]. در همین راستا Toutanji مقادیر $a = 2.3$ و $n = 0.85$ را بر مبنای نتایج آزمایشهای مشابه پیشنهاد کرد [۲]. تعدادی از فرمول‌های ارایه شده برای بتن محصور شده به کمک FRP با استفاده از آنالیز رگرسیون و یا به کمک تئوری پلاستیسیته به صورت تجربی بسط داده شده و در جدول ۱ آورده شده است.

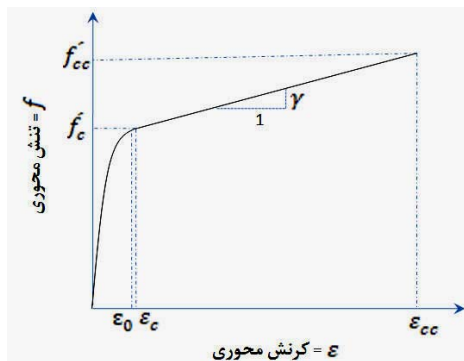
جدول ۱. مدل‌های مقاومتی مختلف برای بتن محصور شده با

FRP [۲]

محقق	سال ارایه مدل	a	n
Toutanji	2005	2.3	0.85
Sidney et al.	2005	2.2	0.828
Saafi et al.	1999	2.2	0.84
Miyauchi et al.	1999	2.98	1.00
Karbhari	1997	2.1	0.87



شکل ۳. نسبت افزایش مقاومت بتن محصور شده به ازای نسبت‌های مختلف محصور شدگی



شکل ۴. منحنی بیانگر رابطه تنش- کرنش برای بتن محصور شده با

FRP [۲]

۴. آنالیز قابلیت اعتماد پایه‌های پل بتن آرمه

در حال حاضر آیین نامه‌ای که به صورت مدون ضوابطی در ارتباط با طراحی پایه‌های محصور شده با FRP داشته باشد، موجود نیست. با این حال ضوابط مربوط به طراحی پایه‌های بتن آرمه محصور نشده در آیین نامه‌های مختلف، متفاوت هستند. حالت ایده آل آن است که آیین نامه‌ها ضوابط مشابهی برای طراحی پایه‌های محصور نشده و محصور شده با FRP داشته باشند. در این مطالعه این مساله بررسی می‌شود که چگونه ضوابط

۲-۳ رابطه تنش - کرنش

رابطه تنش-کرنش برای بتن محصور شده با FRP توسط دیاگرامی شامل یک سهمی و یک خط مماس بر سهمی توضیح داده می‌شود (شکل ۴). معادله برای بخش سهمی به صورت زیر است:

$$f = f'_c [2x - x^2] \quad ; \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (6)$$

که در آن $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}$ است و برای بخش خطی:

$$f = f'_{cc} - \gamma [\varepsilon_{cc} - \varepsilon] \quad ; \quad \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cc} \quad (7)$$

که در آن f و ε ، تنش و کرنش محوری در بتن بوده و γ ، شیب بخش خطی و ε_0 ، کرنش محوری در نقطه تقاطع بین بخشهای سهمی و خطی دیاگرام تنش-کرنش هستند. شیب γ و کرنش ε_0 به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\gamma = \frac{1}{\varepsilon_c} \left[\sqrt{4f'_c (f'_{cc} \varepsilon_c^2 - 2f'_c \varepsilon_c \varepsilon_{cc} + f'_{cc} \varepsilon_{cc}^2)} - 2f'_c (\varepsilon_{cc} - \varepsilon_c) \right] \quad (8)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_c - \frac{\gamma \varepsilon_c^2}{2f'_c} \quad (9)$$

احتمالاتی انتخابی برای بارهای زنده و مرده، مقادیر میانگین مربوطه (P_{D_m} و M_{D_m} برای بار مرده و نیز P_{L_m} و M_{L_m} برای بار زنده) تعیین می‌شوند.

۵- قابلیت اعتماد پایه بتن آرمه در قالب اندیس قابلیت اعتماد β با استفاده از یک پروسه بر مبنای روش قابلیت اعتماد مرتبه اول تعیین می‌شود. مدل لایه‌ای برای پیش‌بینی شکست پایه بکار گرفته می‌شود. رفتار تنش- کرنش تک محوری یک لایه بتن محصور شده با FRP در فشار توسط معادلات ۶ و ۷ بیان می‌شود. به منظور اطمینان از سازگاری آنالیز، همان معادلات برای بتن محصور نشده با لحاظ کردن $f'_{cc} = f'_c$ و $\epsilon_{cc} = 0.003$ استفاده می‌شوند [۱۱].

پارامترهای آماری متغیرهای تصادفی بیانگر رفتار پایه‌های محصور شده با FRP در جدول ۲ آورده شده‌اند. توجه شود که مقاومت فشاری بتن محصور نشده به صورت $f'_c = k_w f'_{cyl}$ تخمین زده می‌شود که در آن f'_{cyl} مقاومت اندازه‌گیری شده با استفاده از آزمایشهای استوانه استاندارد و ضریب k_w که بیانگر کنترل کیفیت کار نیروی انسانی است، به دست می‌آید. اطلاعات موجود در ارتباط با تغییرات مقاومت کششی f_f مربوط به روکش FRP، اندک هستند. بدیهی است که این قابلیت تغییر بستگی به نوع الیاف و زمینه پلیمری و نیز شرایط ساخت و آزمایش دارد. بر طبق اطلاعات آزمایشگاهی موجود در ارتباط با صفحات FRP با الیاف شیشه‌ای، کربنی و آرامیدی، ضریب تغییرات (COV) مربوط به f_f بین 0.03 و 0.20 تغییر می‌کند. در اینجا فرض می‌شود که f_f دارای توزیع نرمال لگاریتمی^۲ با ضریب تغییرات (COV) برابر با 0.125 باشد. میانگین و انحراف استاندارد ضرایب a و b که نامطمئن همراه با معادلات ۳ و ۴ را بیان می‌دارند، در بالا ارزش گذاری شده‌اند. از آنجا که a و b نمی‌توانند منفی باشند، به عنوان متغیرهای تصادفی نرمال لگاریتمی لحاظ می‌شوند. خطای توأم با مدل لایه‌ای استفاده شده برای پیش‌بینی شکست پایه توسط یک متغیر تصادفی نرمال λ با میانگینی برابر با واحد و $COV=0.065$ در نظر گرفته می‌شود. بار مرده توسط یک متغیر تصادفی نرمال با میانگین 1.1 نسبت به مقدار اسمی و $COV=0.1$ مدل می‌شود. برای عمر مفید ۵۰ ساله یک سازه، بار زنده می‌تواند توسط توزیع نرمال با میانگینی برابر مقدار اسمی و $COV=0.2$ مدل شود [۱۲ و ۱۳].

طراحی پایه بتنی در آیین نامه ACI 318-02 [۱۰] می‌تواند برای طراحی پایه‌های محصور شده با FRP با همان تراز قابلیت اعتماد اصلاح شود.

برای پایه‌های محصور شده با FRP، پیشنهاد می‌شود مقاومت فشاری بتن با مقادیر $a=2.17$ و $n=0.79$ تخمین زده شود و کرنش در آخرین تار فشاری بتن با مقادیر $b=16.1$ و $q=0.42$ محاسبه شود. با استفاده از مقادیر اصلاح شده برای مقاومت و کرنش بتن، مقاومت اسمی یک پایه محصور شده با FRP طبق ضوابط ACI 318-02 برای طراحی اعضاء در فشار و خمش محاسبه می‌شود. به منظور محاسبه مقاومت طراحی پایه‌های محصور شده با FRP، ضریب کاهش مقاومت ϕ باید در مقایسه با مقدار آن در ACI 318-02 اصلاح شود تا به منظور در نظر گرفتن نامطمئنی همراه با ارزیابی خصوصیات بتن محصور شده با FRP به حساب آورده شود. مقادیر اصلاح شده ϕ باید تضمین کنند که قابلیت اطمینان پایه‌های محصور شده با FRP از قابلیت اعتماد پایه‌های محصور نشده و طراحی شده طبق ACI 318-02 کمتر نباشد.

اطلاعات مورد نیاز به منظور تعیین مقادیر ϕ برای پایه‌های محصور شده با FRP می‌تواند با استفاده از یک پروسه بر مبنای قابلیت اعتماد به دست آید که شامل مراحل زیر است:

۱- انتخاب پارامترهای پایه شامل ابعاد، نوع بتن، نوع فولاد و نیز درصد آنها، پارامترهای روکش FRP و پارامترهای بارگذاری شامل نسبت بار زنده به بار مرده در حالت اسمی (L_n/D_n) و خروج از محوریت به صورت $e = M_n/P_n$ که در آن P_n و M_n به ترتیب نیروهای محوری اسمی و ممان خمشی اسمی هستند.

۲- برای پارامترهای انتخاب شده در گام اول، مقاومت‌های اسمی P_n و M_n مربوط به پایه طبق آیین نامه ACI 318-02 محاسبه شود. در حالتی که پایه توسط روکش FRP محصور شده است، خصوصیات بتن به کمک معادلات ۳ و ۴ تخمین زده می‌شود.

۳- مقداری برای ϕ انتخاب کرده و مقادیر نیروهای طراحی $P_n = \phi P_n$ و ممان خمشی $M_n = \phi M_n$ محاسبه می‌شوند.

۴- بر مبنای ترکیب بارگذاری $U = 1.4D_n + 1.7L_n$ ، نسبت بار اسمی L_n/D_n و با استفاده از P_n و M_n محاسبه شده در گام سوم، مقادیر اسمی نیروهای محوری و ممان خمشی برای بار مرده به صورت P_{D_n} و M_{D_n} و نیز برای بار زنده به صورت P_{L_n} و M_{L_n} تعیین می‌شوند. سپس بر طبق توزیع‌های

۴-۱ نتایج آنالیز قابلیت اعتماد

قابلیت اعتماد پایه بتن آرمه محصور شده توسط یک روکش FRP به طور عمده‌ای به متغیرهای تصادفی موجود در جدول ۲ و سایر پارامترها شامل ابعاد پایه، نسبت آرماتور و خروج از محوریت بار که در اینجا به عنوان متغیرهای قطعی لحاظ شده‌اند، بستگی دارد. یک فرآیند کالیبراسیون سختگیرانه آیین‌نامه‌ای، ارزش‌گذاری قابلیت اعتماد پایه بتن آرمه را برای تمام محدوده مقادیر این متغیرهای ممکن در طراحی لازم می‌دارد. با این حال هدف این مقاله، انتخاب تعدادی ضرایب ایمنی جدید برای طراحی پایه‌های محصور شده با FRP نیست، بلکه هدف، اصلاح جزئی ضریب کاهش مقاومت مورد استفاده در طراحی پایه بوده و این موضوع می‌تواند بدون چنین مطالعات کالیبراسیونی نیز حاصل شود.

به طور مشخص دلیل آنکه ضریب کاهش مقاومت نیاز به اصلاح دارد، عدم اعتماد اضافی همراه با ارزش‌گذاری خصوصیات بتن محصور شده با FRP است. تأثیر این عدم اطمینان بر قابلیت اعتماد پایه، بسته به پارامترهای محصور شدگی FRP، می‌تواند توسط پارامتر نسبت محصور شدگی به صورت f_l/f'_c بیان شود. بنابراین در ادامه به بررسی تأثیر f_l/f'_c بر قابلیت اعتماد پایه پرداخته خواهد شد. با این حال، تأثیر سایر پارامترها نظیر نسبت بار زنده به مرده L_n/D_n ، نسبت آرماتور ρ و نسبت خروج از محوریت e/D نیز می‌تواند در نظر گرفته شوند. آنالیز قابلیت اعتماد برای پایه‌ها با قطر $D=500\text{mm}$ ، مقاومت اسمی بتن 30MPa و فولاد طولی شامل ۸ آرماتور که در دایره‌ای به قطر

350mm به طور یکنواخت توزیع شده‌اند، انجام می‌گیرد. همچنین مقاومت کششی اسمی روکش FRP برابر با 1500MPa در نظر گرفته شده است.

۵. تأثیر نسبت محصور شدگی

در ابتدا اندیس قابلیت اعتماد β برای پایه‌ها با شکست فشاری شامل خروج از محوریت کوچک بار ($e/D = 0.1$) محاسبه می‌شود. همچنین مقدار درصد آرماتور برابر $\rho = 1\%$ که همان حداقل درصد مجاز طبق آیین‌نامه ACI 318-02 است، در نظر گرفته شده و f_l/f'_c در محدوده‌ای بین 0 و 2 (شامل تمام مقادیر ممکن و عملی) تغییر می‌کند. ضریب کاهش مقاومت $\phi = 0.75$ مورد استفاده در آنالیز، همان مقدار توصیه شده توسط ACI 318-02 برای پایه‌های دایروی است. نتایج در شکل ۵ برای سه مقدار متفاوت از L_n/D_n برابر با 0.5، 1.0 و 2.0 نمایش داده شده که نسبت‌های بار معمول را در نظر می‌گیرند. با افزایش نسبت محصور شدگی، مقاومت طرح پایه‌های محصور شده با FRP هم افزایش می‌یابد، اما بار طراحی نیز دچار افزایش می‌شود. بنابراین اندیس قابلیت اعتماد کاهش می‌یابد، زیرا همان ضریب کاهش مقاومت $\phi = 0.75$ برای طراحی پایه‌های محصور نشده و محصور شده با FRP استفاده شده است، یعنی ϕ برای نامطمئنی همراه با ارزش‌گذاری مقاومت و شکل‌پذیری بتن محصور شده با FRP به حساب آورده نشده است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که تفاوت بین اندیس‌های قابلیت اعتماد به دست آمده از مقادیر مختلف L_n/D_n قابل ملاحظه نیست.

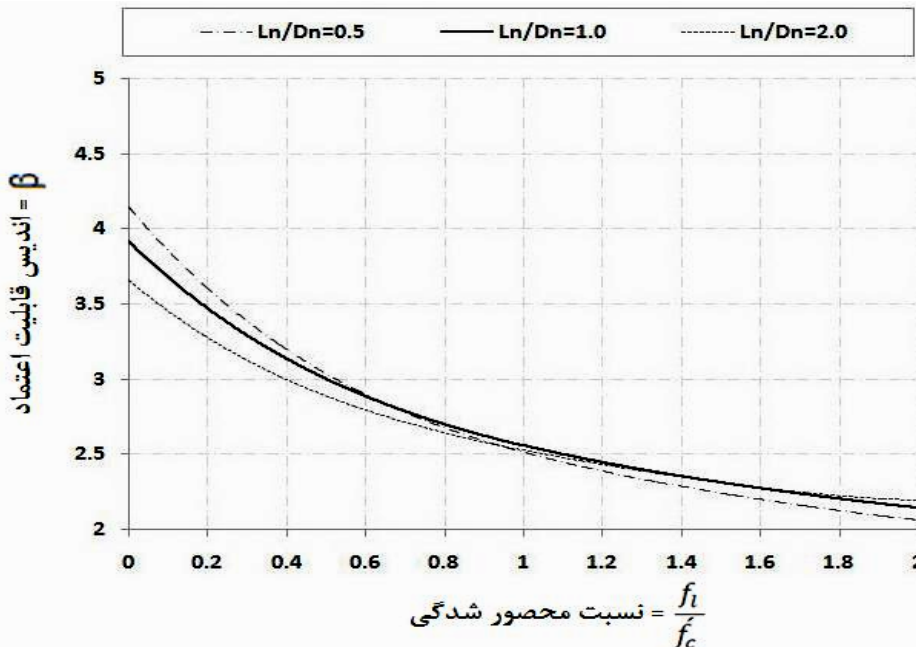
جدول ۲. اطلاعات آماری متغیرهای تصادفی مورد استفاده در مطالعه

متغیر	علامت مشخصه	میانگین	ضریب تغییرات	نوع توزیع
مقاومت تسلیم فولاد	f_y	420 MPa	0.1	نرمال لگاریتمی
مقاومت فشاری استوانه بتن	f_{cyl}	Grade+7.5 MPa	$\sigma = 6$ MPa	نرمال لگاریتمی
ضریب کنترل کار	k_w	0.85	0.05	نرمال
مقاومت کششی FRP	f_f	1800 MPa	0.125	نرمال لگاریتمی
ضریب معادله ۳	a	2.17	$\sigma = 0.85$	نرمال لگاریتمی
ضریب معادله ۴	b	16.1	$\sigma = 9.3$	نرمال لگاریتمی
خطای مدل	λ	1	0.065	نرمال
بار مرده	D	$1.1 D_n$	0.10	نرمال
بار زنده	L	L_n	0.20	نرمال

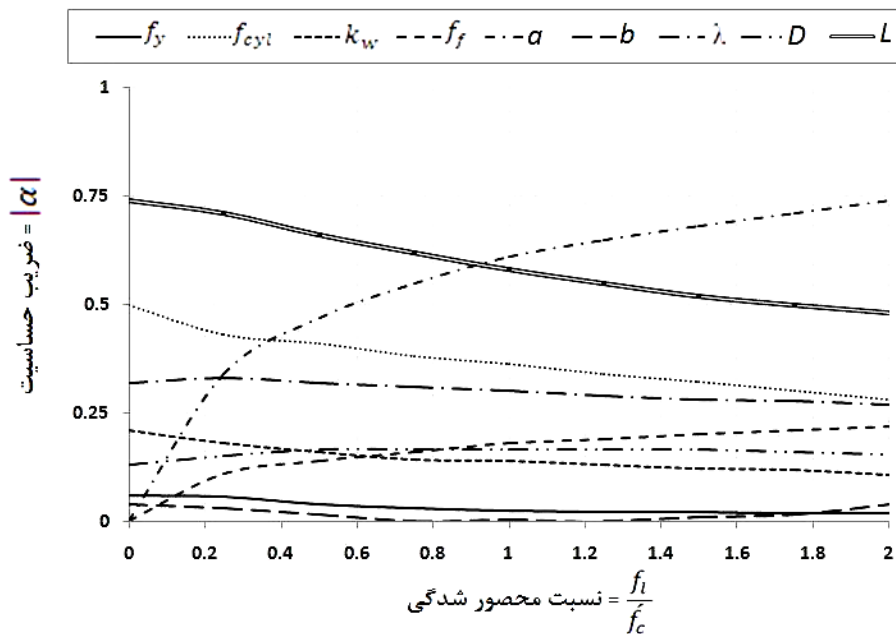
بررسی پارامترهای مؤثر بر قابلیت اعتماد پایه پلهای بتن آرمه تقویت شده با صفحات FRP

که در مورد متغیرهای تصادفی مستقل، جایگزینی i امین متغیر تصادفی با مقدار میانگین آن، باعث افزایش β با یک ضریب می شود که در آن α_i ، ضریب حساسیت است.

تأثیر هر یک از متغیرهای تصادفی بر قابلیت اعتماد پایه می تواند توسط ضرایب حساسیت که همزمان با اندیس قابلیت اعتماد در آنالیز مرتبه اول حاصل می شوند، منعکس شود. می توان نشان داد



شکل ۵. تأثیر نسبت محصور شدگی بر اندیس قابلیت اعتماد



شکل ۶. تأثیر نسبت محصور شدگی بر ضرایب حساسیت

شدگی دارد. بنابراین به منظور اطمینان از اینکه پایه‌های محصور شده با FRP، دارای قابلیت اعتماد مناسب در فشار محوری تنها و نیز فشار محوری به همراه خمش هستند (یعنی قابلیت اعتماد آنها بزرگ تر یا مساوی قابلیت اعتماد پایه‌های محصور نشده طبق 02-318 ACI است)، ضریب کاهش مقاومت استفاده شده برای طراحی آنها باید در مقایسه با $\phi = 0.75$ داده شده در ACI 02-318، کاهش یابد. ضریب کاهش مقاومت برای پایه‌های محصور شده با FRP می‌تواند به صورت $\phi = 0.75\phi_1$ بیان شود که ϕ_1 ضریبی است که نامطمئن همراه با ارزش‌گذاری خصوصیات بتن محصور شده با FRP را به حساب می‌آورد. به طور مشخص، مقدار ϕ_1 بستگی به نسبت محصور شدگی داشته و $\phi_1 \leq 1$ است.

برای تعیین یک رابطه بین ϕ_1 و f_l/f'_c ، اندیسهای قابلیت اعتماد به عنوان تابعی از ϕ_1 برای یک محدوده از مقادیر f_l/f'_c برای پایه‌ها با $\rho = 1\%$ ، $L_n/D_n = 1$ و $e/D = 0.1$ محاسبه می‌شوند. نتایج آنالیز در شکل ۷ نمایش داده شده‌اند. اندیس قابلیت اعتماد هدف β_T می‌تواند برابر 3.5 در نظر گرفته شود که اندکی از $\beta = 3.7$ به دست آمده برای پایه محصور نشده با مشخصات مشابه کمتر است. مقادیر ϕ_1 تضمین کننده $\beta = 3.5$ برای f_l/f'_c های متفاوت، در محل تقاطع خط افقی در $\beta = 3.5$ با منحنی‌های $\phi_1 - \beta$ در شکل ۷ به دست می‌آیند. رابطه متوجه بین ϕ_1 و f_l/f'_c در شکل ۸ نشان داده شده است.

برای استفاده عملی، استفاده از رابطه بین ϕ_1 و f_l/f'_c نشان داده شده در شکل ۸ نیاز به اعمال تقریب با یک فرمول ساده دارد. علاوه بر ساده سازی، فرمول ذکر شده باید شرایط زیر را ارضا کند: (۱) برای تامین تقریب نزدیک رابطه به دست آمده برای یک محدوده از مقادیر f_l/f'_c مورد استفاده متغیر بین 0 و 0.5.

(۲) برای اطمینان از اینکه اندیس قابلیت اعتماد از 3.5 برای مقادیر بزرگ تر f_l/f'_c تجاوز کند و پس از آن نامطمئن درباره ارزش گذاری خصوصیات بتن محصور شده با FRP افزایش می‌یابد.

می‌توان از فرمول زیر با شرایط فوق استفاده کرد:

$$\phi_1 = \frac{1}{1 + 0.35 \left(\frac{f_l}{f'_c} \right)} \quad (10)$$

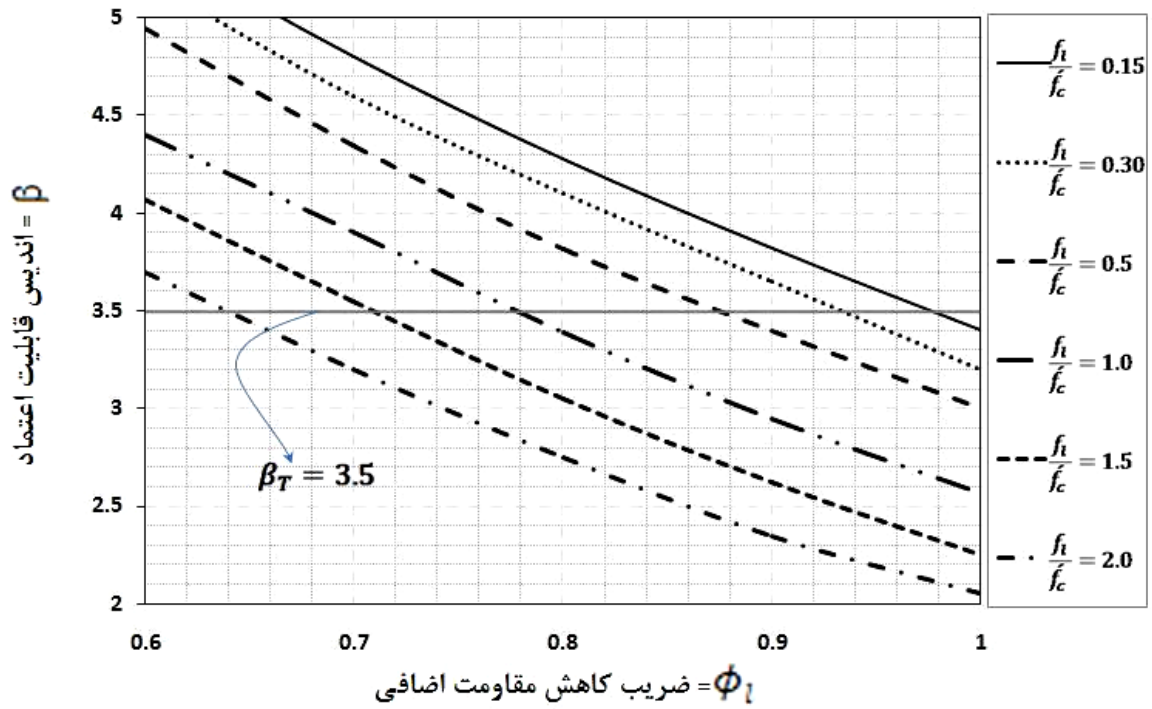
هرچه مقدار α_i بیشتر باشد، تأثیر متغیر تصادفی i ام بر قابلیت اعتماد بیشتر است. برای مثال با چشم پوشی از نامطمئنی یک متغیر با $\alpha_i = 0.3$ ، افزایشی در حدود 5% در β رخ می‌دهد؛ در حالی که $\alpha_i = 0.1$ تنها 0.5% افزایش را سبب می‌شود. ضرایب حساسیت به دست آمده از اندیسهای قابلیت اعتماد شکل ۵، در شکل ۶ برای $L_n/D_n = 1$ نشان داده شده‌اند. بر طبق این نتایج، ضرایب حساسیت برای چهار متغیر تصادفی شامل مقاومت فشاری بتن محصور نشده (f'_c)، ضریب (a)، خطای مدل (λ) و بار زنده (L) از 0.3 تجاوز می‌کند، یعنی تنها این چهار متغیر تأثیر بسزایی بر قابلیت اعتماد پایه دارند.

همان طور که پیش‌بینی می‌شد، ضرایب حساسیت برای متغیرهای تصادفی بیانگر خصوصیات بتن محصور شده با FRP، با افزایش نسبت محصور شدگی، افزایش می‌یابند (به استثنای b که مربوط به ارزش‌گذاری کرنش محوری حداکثر در بتن محصور شده با FRP بوده و تأثیر چشمگیری بر شکست پایه در فشار ندارد)؛ در حالی که ضرایب حساسیت برای f'_c و L (متغیرهای تصادفی دارای بیشترین تأثیر بر روی پایه‌های محصور نشده) کاهش می‌یابد. با تجاوز نسبت محصور شدگی از 0.9، a (متغیر تصادفی که f_f توسط آن افزایش در مقاومت فشاری بتن محصور شده با FRP را کنترل می‌کند) پارامتری می‌شود که تأثیر حاکمی بر قابلیت اعتماد پایه می‌گذارد. روابط مشابهی بین ضرایب حساسیت و نسبت محصور شدگی برای L_n/D_n برابر 0.5 و 2.0 مشاهده می‌شوند. با این حال، در مقایسه با $L_n/D_n = 1$ ، افزایش نسبی در ضریب حساسیت برای a با افزایش f_l/f'_c در مقابل مقادیر مشابه برای f'_c و L در حالت $L_n/D_n = 0.5$ بیشتر بوده و برای حالت $L_n/D_n = 2$ ، کمتر است. از آنجا که a دارای بیشترین تغییر (بیشترین COV) در میان این سه متغیر تصادفی است، این موضوع، نرخهای کاهش متفاوتی را برای اندیسهای قابلیت اعتماد در شکل ۵ برای L_n/D_n برابر با 0.5، 1 و 2 نشان می‌دهد.

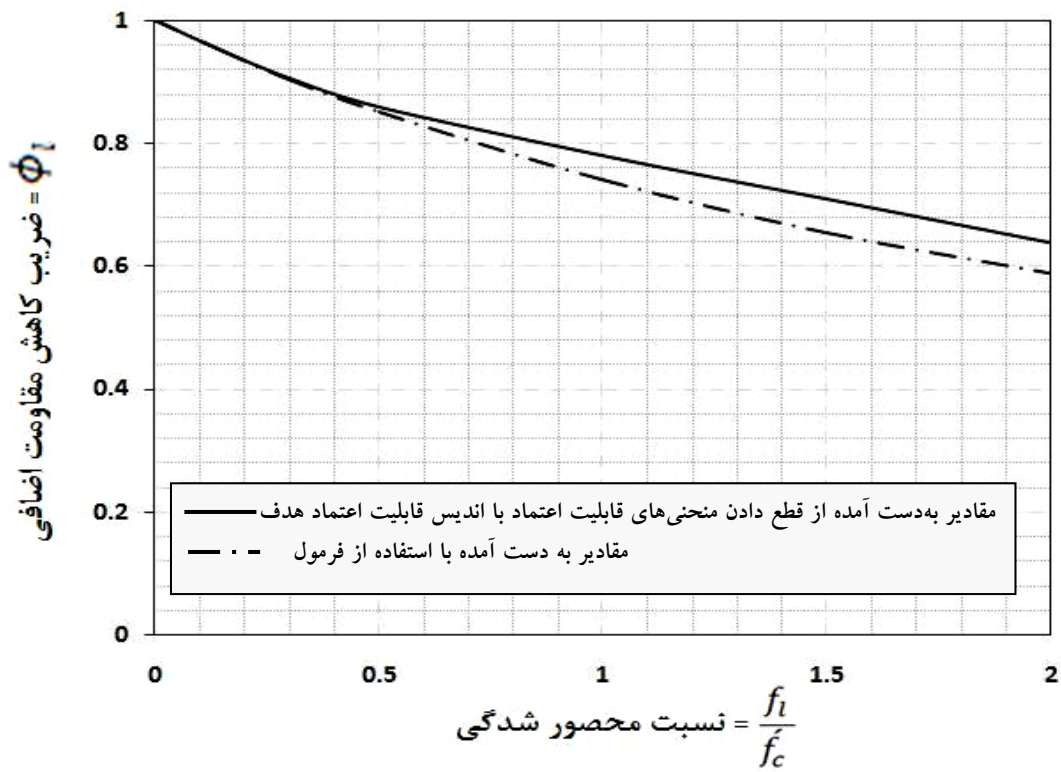
۱۰-۱ اصلاح ضریب کاهش مقاومت

نتایج ارایه شده در شکل ۵، به وضوح بیان می‌دارد که قابلیت اعتماد پایه‌های محصور شده با FRP بستگی به نسبت محصور

بررسی پارامترهای مؤثر بر قابلیت اعتماد پایه پلهای بتن آرمه تقویت شده با صفحات FRP



شکل ۷. اندیس قابلیت اعتماد به ازای ضریب کاهش مقاومت اضافی



شکل ۸. ضریب کاهش مقاومت اضافی به ازای نسبت محصور شدگی

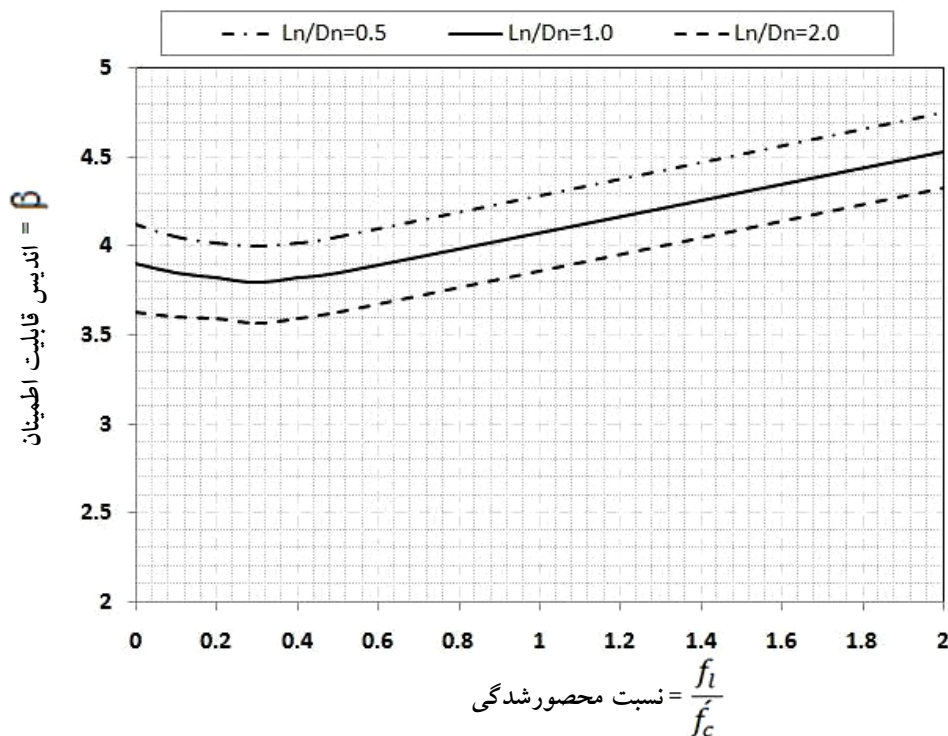
شکل ۸ نشان می‌دهد که یک سازگاری بسیار خوب بین مقادیر ϕ_l محاسبه شده توسط معادله ۱۰ و به دست آمده از نتایج موجود در شکل ۷ برای f_l/f'_c وجود دارد. برای مقادیر بزرگ‌تر f_l/f'_c معادله ۱۰ مقادیر کمتری از ϕ_l را به دست می‌دهد که باید مقادیر اندیس قابلیت اعتماد بزرگ‌تر از ۳.۵ را تضمین کند. بنابراین برای پایه‌های محصور شده با FRP در فشار محوری یا فشار محوری به همراه خمش، ضریب کاهش مقاومت ACI 318-02 می‌تواند به صورت زیر تعیین شود:

$$\phi_l = \frac{0.75}{1 + 0.35 \left(\frac{f_l}{f'_c} \right)} \quad (11)$$

سپس اندیس قابلیت اعتماد برای پایه‌های طراحی شده با ضریب کاهش مقاومت اصلاح شده در معادله ۱۱ محاسبه می‌شود؛ در حالیکه مقادیر دیگر پارامترها (یعنی ρ ، e/D ، و L_n/D_n) در آنالیز همان مقادیر مورد استفاده برای محاسبه اندیس‌های قابلیت اعتماد ارایه شده در شکل ۵ هستند. نتایج آنالیز در شکل ۹ ارایه شده‌اند. بر طبق نتایج برای همان مقادیر

اندیس قابلیت اعتماد برای پایه‌های طراحی شده با ضریب کاهش مقاومت اصلاح شده در معادله ۱۱ محاسبه می‌شود؛ در حالیکه مقادیر دیگر پارامترها (یعنی ρ ، e/D ، و L_n/D_n) در آنالیز همان مقادیر مورد استفاده برای محاسبه اندیس‌های قابلیت اعتماد ارایه شده در شکل ۵ هستند. نتایج آنالیز در شکل ۹ ارایه شده‌اند. بر طبق نتایج برای همان مقادیر

می‌ماند (یعنی دارای بیشترین ضریب حساسیت است). همچنین تغییرات نسبی در ضریب حساسیت برای f'_c ، L و a برای L_n/D_n برابر ۰.۵، ۱.۰ و ۲.۰ مشابه هستند که نشان می‌دهد که چرا منحنی‌های $f_l/f'_c - \beta$ برای مقادیر مختلف L_n/D_n در شکل ۹ تقریباً موازی باقی می‌مانند.



شکل ۹. اثر نسبت محصور شدگی بر اندیس قابلیت اعتماد با اعمال ضریب اصلاح شده کاهش مقاومت اضافی

۶. تأثیر نسبت آرماتور

برای امتحان کردن تأثیر نسبت آرماتور ρ بر قابلیت اعتماد پایه، اندیس قابلیت اعتماد به عنوان تابعی از ρ برای $L_n/D_n = 1$ ، $f_t/f'_c = 0.25$ داده شده توسط معادله ۱۱ برابر ۰.۶۷ محاسبه شده‌اند. آنالیز برای دو مقدار نسبت خروج از محوریت e/D برابر ۰.۱۵ و ۰.۳ انجام شده است. نتایج در شکل ۱۰ ارایه شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود اندیس قابلیت اعتماد با افزایش ρ به علت افزایش در سهم آرماتور فولادی با تغییرپذیری مقاومت کم نسبت به ظرفیت باربری پایه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین اندیس قابلیت اعتماد برای $e/D = 0.3$ بزرگ‌تر است زیرا در این مورد، تأثیر فولاد در مقاومت پایه نسبت به حالت $e/D = 0.15$ مؤثرتر است.

۷. تأثیر نسبت خروج از محوریت

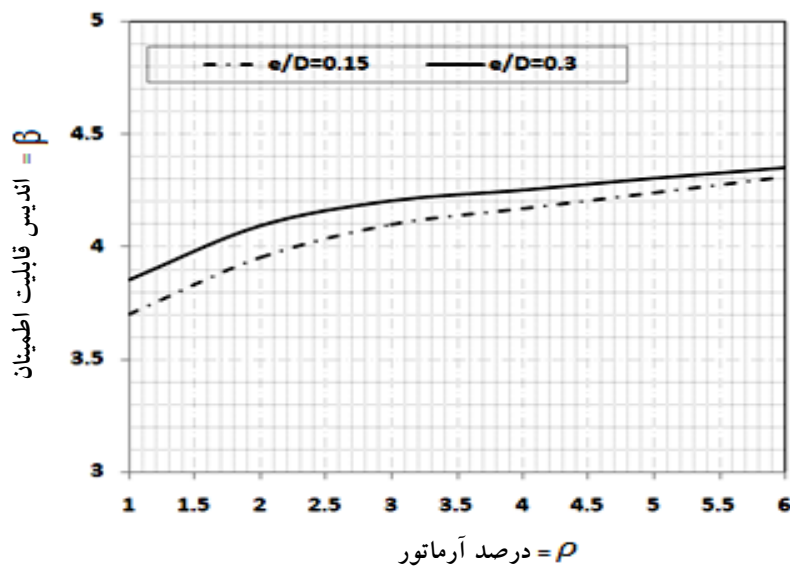
در نهایت، تأثیر خروج از محوریت بر قابلیت اعتماد پایه‌های محصور شده با FRP بررسی شده است. اندیس قابلیت اعتماد به عنوان تابعی از e/D برای پایه‌های با $\rho = 1\%$ ، $L_n/D_n = 1$ و نسبت‌های متفاوت محصور شدگی محاسبه شده است. پایه‌ها طبق ACI 318-02 طراحی شده و برای پایه‌های محصور شده با FRP، خصوصیات بتن با معادلات ۳ و ۴ تخمین زده شده‌اند. به منظور به حساب آوردن خروج از محوریت تصادفی، ACI 318-02 مقاومت محوری طراحی یک پایه را محدود می‌نماید.

این محدودیت برای پایه‌های محصور شده با FRP می‌تواند به صورت زیر باشد:

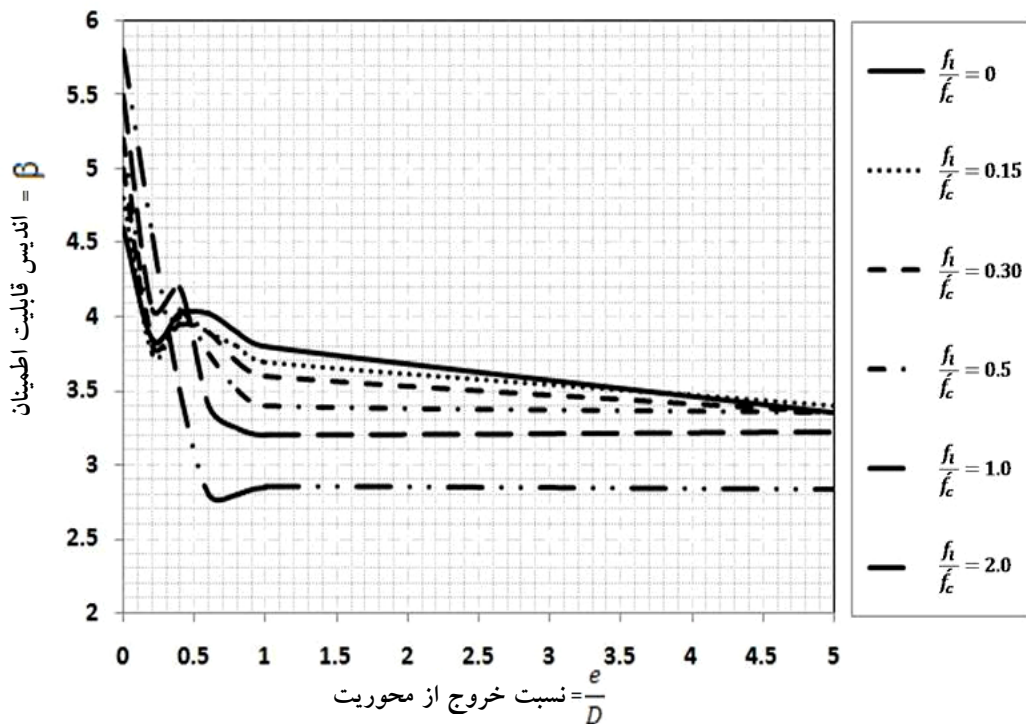
$$(12)$$

$$\phi P_{n(max)} = 0.85\phi [0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]$$

که در آن A_g ، سطح کلی مقطع عرضی پایه، A_{st} مساحت آرماتور طولی در مقطع عرضی و ϕ نیز توسط معادله ۱۱ به دست می‌آید. برای خروج از محوریت‌های بزرگ‌تر فرض می‌شود که ϕ به صورت خطی از مقدار تعیین شده توسط معادله ۱۱ تا ۰.۹ (خمش خالص) تغییر می‌کند؛ در حالی که مقاومت محوری اسمی حداقل دو مقدار کوچک‌تر یا مساوی P_b (مقاومت محوری اسمی در شکست بالانس) و نیز $0.1f'_c A_g / \phi$ خواهد بود. برای پایه‌های در نظر گرفته شده در اینجا همیشه مورد آخر حاکم می‌شود. نتایج آنالیز در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. در ابتدا، اندیس قابلیت اعتماد با افزایش e/D ، کاهش می‌یابد زیرا بار محوری وارده توسط معادله ۱۲ محدود می‌شود در حالی که ممان اعمالی افزایش می‌یابد. پس از آن، اندیس قابلیت اعتماد تا مقدار e/D مربوط به $0.1f'_c A_g / \phi$ شروع به افزایش می‌کند. در این نقطه، ϕ شروع به افزایش می‌کند که باعث کاهش در β می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که برای مقادیر بزرگ‌تر f_t/f'_c ، مقاومت محوری اسمی در مقادیر کمتر e/D برابر با $0.1f'_c A_g / \phi$ می‌شود و اندیس قابلیت اعتماد با نرخ سریع‌تری کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰. اثر نسبت آرماتور بر اندیس قابلیت اعتماد



شکل ۱۱. اثر نسبت خروج از محوریت بر اندیس قابلیت اعتماد

نشده باقی می‌ماند. این موضوع نشان می‌دهد که برای پایه‌های محصور شده با، ضریب کاهش مقاومت در خمش خالص باید کمتر از ۰.۹ باشد. از آنجا که محصور شدگی با FRP برای اعضاء با بارهای محوری کم، چندان ترمبیش نیست، تعیین ضریب کاهش مقاومت برای چنین مواردی از اهمیت کاربردی کمتری نسبت به اعضاء تحت فشار محوری زیاد (یا فشار محوری با خمش) برخوردار است.

۸. خلاصه و نتیجه‌گیری

قابلیت اعتماد پایه پلهای بتن آرمه محصور شده با FRP مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا مدل‌های تجربی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری و کرنش محوری حداکثر بتن محصور شده با FRP انتخاب شد و نامطمئنی همراه با این مدل‌ها با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی موجود تخمین زده شد. مدل‌ها برای تعریف یک رابطه تنش-کرنش تک محوری برای بتن محصور شده با FRP استفاده شدند. این رابطه تنش-کرنش برای این مدل لایه‌ای که برای توضیح رفتار غیرخطی پایه تا حد شکست بکار رفت، لازم بود. قابلیت اعتماد پایه‌های بتن آرمه به وسیله اندیس قابلیت اعتماد با استفاده از یک تکنیک بر مبنای روش قابلیت

در ناحیه‌ای که ϕ شروع به افزایش خطی از مقدار تعیین شده توسط معادله ۱۱ تا مقدار ۰.۹ می‌کند، اندیسهای قابلیت اعتماد برای پایه‌های محصور شده با FRP پایین تر از مقادیر مرتبط برای پایه‌های محصور نشده قرار می‌گیرند. این موضوع به وضوح نشان می‌دهد که تعیین ϕ در ناحیه انتقالی (یعنی در ناحیه‌ای که بار محوری اسمی از $0.1f'_{cc}A_g/\phi$ تا صفر کاهش می‌یابد) نیاز به اصلاح شدن به منظور به حساب آوردن نامطمئنی همراه با ارزش گذاری خصوصیات بتن محصور شده با FRP دارد. نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که بار محوری اسمی $0.1f'_{cc}A_g/\phi$ می‌تواند به عنوان نقطه شروع ناحیه انتقالی باقی بماند. با این حال، ϕ به صورت خطی بین این نقطه و نقطه خمش خالص تغییر نمی‌کند زیرا اندیسهای قابلیت اعتماد برای پایه‌های محصور شده با FRP سریع تر از مقادیر مشابه برای پایه‌های محصور نشده در شروع ناحیه انتقالی کاهش می‌یابند و سپس تقریباً ثابت باقی می‌مانند. بنابراین در خمش خالص برای پایه‌های با نسبت محصور شدگی کم ($f_1/f_c \leq 0.5$)، دوباره برابر با مقادیر مربوط به پایه‌های محصور نشده می‌شوند. برای پایه‌های با نسبت‌های محصور شدگی بالا، اندیسهای قابلیت اعتماد در خمش خالص، کمتر از مقادیر مشابه برای پایه‌های محصور

2-Toutanji, H. A., and Li, Z. (1999) "Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes", ACI Mater. Journal, Vol. 96, No. 4, pp. 500-509.

3-Kheyroddin, A., and Naderpour, H. (2006). "Nonlinear finite element analysis of RC shear walls retrofitted using externally bonded steel plates and FRP sheets", CSCE, 1st International Structural Specialty Conference Calgary, Alberta, Canada, May, pp.23-26.

4-Kheyroddin, A., and Naderpour, H., (2008). "Nonlinear finite element analysis of composite RC shear walls", Iranian Journal of Science & Technology, Volume 32, No. B2, pp. 79-89.

5-F.Seible, F., Priestley, M.J.N. Hegemier, G. A. and Innamorato, D. (1997) "Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets", Journal of Composites for Construction, Vol. 1, pp. 52-62.

6-Chang, K.C., Liu, K.Y. and Chang, S.B. (2001) "Seismic retrofit study of RC rectangular bridge columns lap-spliced at the plastic hinge zone. In: Proc. of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong, pp. 869-875.

7-Richart, F.E., Brandtzaeg, A., and Brown, R.L. (1928) "A study of the failure of concrete under combined compressive stresses." Engineering Experimental Station Bull. No. 185, Univ. of Illinois, Urbana, Ill.

8-Cusson, D. and Paultre, P. (1995) "Stress-strain model for confined high-strength concrete" Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No. 3, pp. 468-477.

9-Karbhari, V.M., and Gao, Y. (1997) "Composite jacketed Concrete under uniaxial compression-verification of simple design equations", Journal of Materials for Civil Engineering, Vol. 9, No. 4, pp. 185-193.

10- American Concrete Institute. Committee 318, (2002), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02), Farmington Hills, Mich.

11- Ranganathan, R. (1990) "Reliability analysis and design of structures", McGraw Hill, New Delhi.

12- Melchers, R.E. (1999) "Structural reliability analysis and prediction", Second Edition, John Wiley and Sons, Chicester, England.

13- Nowak, A.S. and Collins, K.R. (2000) "Reliability of structures", McGraw Hill, International Edition.

اعتماد مرتبه اول تخمین زده شد. نامطمئن‌های همراه با مصالح (نظیر فولاد، بتن و FRP)، مقاومتها، مدل‌های پیش‌بینی کننده مقاومت فشاری و شکل پذیری بتن محصور شده با FRP، مدل لایه‌ای و بارهای مرده و زنده به حساب آورده شدند. پارامترهای قطعی متغیر در آنالیز قابلیت اعتماد شامل نسبت محصور شدگی، نسبت خروج از محوریت، نسبت آرماتور و نسبت بار زنده به بار مرده بودند. نتایج به دست آمده از آنالیز قابلیت اعتماد نشان داد که ضرایب کاهش مقاومت مورد استفاده برای طراحی پایه‌های بتن آرمه محصور شده با FRP در مقایسه با مقادیر داده شده در ACI 318-02 به منظور اطمینان از حصول تراز قابلیت اعتماد یکسان برای پایه‌های محصور شده با FRP و محصور نشده نیاز به کاهش دارند. همچنین قابلیت اعتماد پایه‌های محصور شده با FRP بستگی به نسبت محصور شدگی دارد. یک فرمول برای تعیین ضریب کاهش مقاومت به صورت تابعی از نسبت محصور شدگی برای پایه‌های محصور شده با FRP در فشار محوری و نیز فشار محوری با خمش زمانی که خروج از محوریت کوچک است، پیشنهاد شد. نتایج نشان داد که چهار متغیر تصادفی شامل مقاومت فشاری بتن محصور نشده، ضریب بیانگر نامطمئن همراه با ارزش گذاری مقاومت بتن محصور شده با FRP، پارامتر بیانگر خطای مدل سازه‌ای و نیز بار زنده تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر قابلیت اعتماد پایه بتن آرمه دارند. اندیس قابلیت اعتماد با افزایش در به علت افزایش در سهم آرماتور فولادی با تغییر پذیری مقاومت کم نسبت به ظرفیت باربری پایه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین با استفاده از نتایج آنالیزها، از آنجا که محصور شدگی با FRP برای اعضاء با بارهای محوری کم، چندان ثمربخش نیست، تعیین ضریب کاهش مقاومت برای چنین مواردی از اهمیت کاربردی کمتری نسبت به اعضاء تحت فشار محوری زیاد (یا فشار محوری با خمش) برخوردارست.

۸. پانویس‌ها

- 1- Fiber Reinforced Polymer
- 2- Log-Normal Distribution

۹. مراجع

- 1-Miyauchi, K., Inoue, S., Kuroda, T. and Kobayashi, A. (1999) "Strengthening effects of concrete columns with carbon fiber sheet." Trans. Jpn. Concr. Inst., No. 21, pp. 143-150.