

طراحی بهینه ستون‌های بتنی تقویت شده با FRP به کمک الگوریتم آموزش – یادگیری

سیدروح الله حسینی واعظ

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم

نویسنده مسئول: hoseinivaez@qom.ac.ir

محمد رضا رضایی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم

دریافت مقاله: ۱۳۹۶-۵-۶

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷-۱-۲۸

چکیده:

طراحی بهینه اقتصادی یکی از اهداف اصلی مهندسی عمران می‌باشد. امروزه جهت تقویت مقاطع بتنی ستون‌ها از الیافی تحت عنوان الیاف FRP استفاده می‌شود. این الیاف در سه نوع کربنی، شیشه و آرامید در بازار موجود است. در این مطالعه از الگوریتم فراابتکاری آموزش و یادگیری برای تعیین ابعاد مقطع ستون و میلگردهای ستون و همچنین تعداد لایه‌های FRP مورد نیاز جهت تقویت استفاده شده است. الگوریتم فراابتکاری مورد نظر با توجه به محدودیت‌ها و قیدهایی که برای طراحی در نظر گرفته شده است، ابعاد مقطع بتنی و میلگردها را تعیین می‌کند و سپس ظرفیت مقطع را بررسی کرده چنانچه به مقاوم‌سازی نیاز داشته باشد، از تعدادی لایه FRP برای تقویت مقطع استفاده می‌کند. تابع هزینه شامل هزینه بتن، میلگرد و FRP مصرفی جهت تقویت است، که به‌عنوان تابع هدف معرفی گردیده است. ضوابط طراحی و محدودیت‌های طراحی بر مبنای آیین‌نامه ACI 440-08 و ACI 318-14، به صورت قید پیاده‌سازی و فرمول‌نویسی شده است. بنابراین مجموعه تابع هدف و قیدها به نحوی با هم در ارتباط هستند تا کمترین هزینه بر مبنای تابع هدف با برقراری تمام قیود (طرحی قابل قبول)، در نقطه‌ای به نام طرح بهینه حاصل شود. با توجه به نتایج حالت‌های مختلف، در صورت استفاده از ابعاد و تعداد میلگردهای معرفی شده توسط الگوریتم استفاده از الیاف کربنی با صرفه اقتصادی بیشتری روبه‌رو می‌شود.

واژه‌های کلیدی: الیاف FRP، الیاف کربنی، سازه‌های بتنی، تقویت ستون‌ها، بهینه‌سازی، الگوریتم TLBO

رفتار ستون‌های بتنی در برابر انتقال نیروهای محوری (بدون لنگر خمشی) یا انتقال نیروهای خارج از محور (با لنگر خمشی) از اهمیت ویژه‌ای در عملکرد سازه برخوردار است. تغییر کاربری سازه، تغییر ظرفیت باربری سازه، تغییر آیین‌نامه‌های طراحی، ضعف‌های اجرایی و عدم امکان جایگزین کردن سازه جدید دلایلی بر بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد. در ابتدا برای تقویت ستون‌ها از ژاکت‌های فولادی استفاده می‌شد که اخیراً به خاطر وزن بالا و عدم مقاومت کافی در برابر خوردگی، جای خود را به الیاف پلیمری مسلح شده (FRP¹) داده است. الیاف FRP در انواع کربنی CFRP² و آرامیدی AFRP³ و شیشه‌ای GFRP⁴ در بازار موجودند. این الیاف با ایجاد حالت تنش‌های سه محوری باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری بتن محصور می‌گردند؛ که این افزایش مقاومت و شکل‌پذیری به دلیل جلوگیری از گسترش ترک‌های عرضی در بتن می‌باشد [۱].

گرایش روز افزون به استفاده از سیستم‌های FRP برای مقاوم‌سازی یا مرمت سازه‌ها دلایل گوناگون دارد. اگر چه الیاف و رزین‌های مورد استفاده در سیستم‌های FRP نسبت به دیگر مصالح متعارف مانند بتن و فولاد گران‌تر هستند، لیکن اغلب هزینه‌های مربوط به دستمزد و تجهیزات نصب سیستم‌های FRP ارزان‌تر می‌باشند. این سیستم‌ها همچنین می‌توانند در سطوحی با دسترسی محدود یا جاهایی که اجرای شیوه‌های متعارف با مشکلاتی مواجه هستند، مورد استفاده قرار گیرند.

پژوهشگران طی آزمایشات خود بر روی نمونه‌های دایره‌ای و مربعی متغیرهایی از قبیل شکل مقطع و نسبت طول به قطر و چسبندگی بین بتن و FRP را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که تاثیر محصور شدگی روی نمونه‌های دایره‌ای بیشتر از نمونه‌های مربعی است [۲]. در سال ۲۰۰۳ محققان برای تنش-کرنش مدلی را ارائه کردند که از آن برای پیش بینی مقاومت بتن محصور شده استفاده می‌گردد. در مدل آن‌ها برای انواع کامپوزیت، کرنش پارگی متفاوتی در نظر گرفته شده بود [۳]. محققان در آزمایشات خود به بررسی رفتار نمونه‌های مربعی سایز بزرگ پرداختند و نتیجه گرفتند که با افزایش نسبت نظری $\frac{b}{d}$ مقاومت محصور شدگی نمونه پایین آمده و با افزایش شعاع گوشه r مقاومت فشار محصور شدگی افزایش می‌یابد [۴]. محققان اجرای ستون‌های با بارگذاری خارج از مرکز را که با FRP‌های متفاوتی تقویت شدند، مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در این مقاله، افزایش قابل توجهی در ظرفیت مقاومت، ظرفیت تغییر شکل و شکل‌پذیری ستون‌ها را نشان می‌دهد [۵]. در سال ۲۰۱۳ مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی با کامپوزیت‌های FRP مورد مطالعه قرار گرفت. پژوهشگران دریافتند که تقویت ستون بتنی با کامپوزیت‌های FRP، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد [۶].

در زمینه طراحی مهندسی سازه، تلاش برای دست یافتن به روش‌های طراحی با وزن، هزینه ساخت و ساز در کنار برآورده شدن محدودیت‌های طراحی از اهداف اصلی می‌باشد. به عنوان مثال طراحی بهینه قاب‌های فولادی نیازمند انتخاب مقاطع مناسب فولادی برای اعضای قاب از مجموعه‌ای از مقاطع فولادی استاندارد است. این انتخاب باید به گونه‌ای انجام شود که نه تنها قاب فولادی حداقل وزن را داشته باشد، بلکه محدودیت‌های مقاومتی و خدمت‌پذیری سازه نیز در محدوده مجاز مشخص شده توسط آیین‌نامه‌های طراحی باشد. یکی از اقداماتی که برای رسیدن به این هدف می‌توان انجام داد استفاده از روش‌های سعی و خطا می‌باشد. بنابراین با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری که دقت و سرعت مناسبی دارند می‌توان این کار را انجام داد [۷]. در این مطالعه از الگوریتم فراابتکاری آموزش و یادگیری برای تعیین ابعاد مقطع ستون و میلگردهای ستون و همچنین تعداد لایه‌های FRP مورد نیاز جهت تقویت استفاده شده است. الگوریتم فراابتکاری مورد نظر با توجه به محدودیت‌ها و

¹ Fiber Reinforced Polymer

² Carbon Fiber Reinforced Polymer

³ Aramid Fiber Reinforced Polymer

⁴ Glass Fiber Reinforced Polymer

قیدهایی که برای طراحی در نظر گرفته شده است، ابعاد مقطع بتنی و میلگردها را تعیین می‌کند و سپس ظرفیت مقطع را بررسی کرده چنانچه به مقاوم‌سازی نیاز داشته باشد، از تعدادی لایه FRP برای تقویت مقطع استفاده می‌کند. تابع هزینه شامل هزینه بتن، میلگرد و FRP مصرفی جهت تقویت است، که به‌عنوان تابع هدف معرفی گردیده است. ضوابط طراحی و محدودیت‌های طراحی بر مبنای آیین‌نامه ACI 440-08 و ACI 318-14 [۸ و ۹]، به‌صورت قید پیاده‌سازی و فرمول‌نویسی شده است.

۲- تقویت ستون‌ها تحت بار محوری و لنگر خمشی بر مبنای ACI ۴۴۰-۰۸ و همچنین ACI ۳۱۸-۱۴

پوشاندن ستون با FRP علاوه بر تقویت ستون تحت فشار خالص، باعث تقویت ستون تحت فشار و لنگر خمشی (و یا بار محوری فشاری با خروج از مرکزیت) نیز می‌شود. بنابراین ضروری است این افزایش مقاومت مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور لازم است با استفاده از روش‌های موجود، نمودار اثر توام بار محوری و لنگر خمشی (P-M) را برای ستون تقویت شده با FRP رسم کرد.

۲-۱- چند نکته از آیین‌نامه

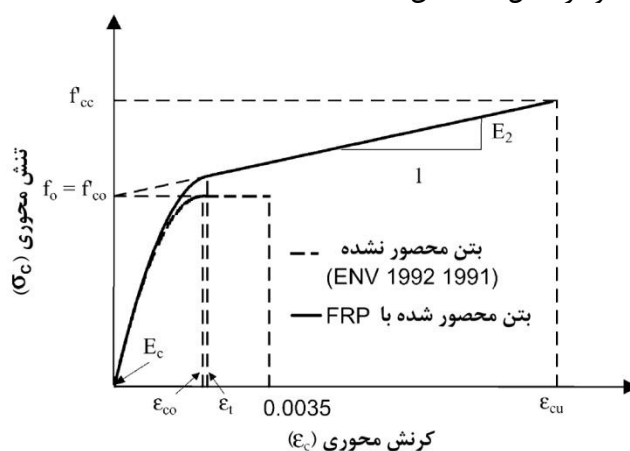
بر اساس آیین‌نامه^۵ برای اعضای تحت نیروی محوری و لنگر خمشی باید نکات زیر را در نظر گرفت:
مقدار کرنش موثر پوشش FRP نباید از 0.004 بیشتر شود.

$$\varepsilon_{fe} = \min(\kappa_e \varepsilon_{fu}, 0.004) \quad (۱)$$

منظور کردن افزایش مقاومت ستون، تنها زمانی صورت می‌گیرد که نقطه مربوط به بار و لنگر نهایی وارد به ستون (M_u و P_u) بالاتر از خطی قرار گیرد که از مبدا مختصات و نقطه مربوط به بار و لنگر حالت متوازن مقطع تقویت نشده می‌گذرد (در نمودار P-M). این بدین معناست که افزایش مقاومت تنها در مقاطعی صورت می‌گیرد، که مود شکست آن‌ها فشاری است. بر اساس آیین‌نامه در صورتی که خروج از مرکزیت فشار وارد بر مقطع کوچکتر و یا مساوی 10 درصد ضلع بزرگتر مقطع مستطیلی باشد ($e \leq 0.1h$). مقاومت فشاری اسمی مقطع با استفاده از روابط ارائه شده برای ستون تقویت شده با FRP تحت فشار خالص بدست می‌آید. لازم به ذکر است به دلیل ابهامی که آیین‌نامه در این قسمت داشت، این مورد فقط برای مقاطع مستطیلی اعمال شد و در جهت اطمینان از اعمال آن برای مقاطع دایره‌ای صرف‌نظر شد.

۲-۲- مدل تنش-کرنش بتن محصور شده با FRP

نمودار P-M، با استفاده از تعادل نیروها و هم‌سازی کرنش‌ها ایجاد می‌شود. برای این منظور نیاز به مدلی می‌باشد تا نمودار تنش-کرنش بتن محصور شده با FRP را ارائه کند. این مدل در سال ۲۰۰۳ توسط لام و تنگ [۱۰] ارائه شد، که آیین‌نامه نیز آن را پذیرفته و در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) مدل تنش-کرنش بتن محصور شده با FRP ارائه شده توسط لام و تنگ [۱۰]

^۵ در این نوشتار منظور از آیین‌نامه، آیین‌نامه ACI ۴۴۰-۰۸ می‌باشد.

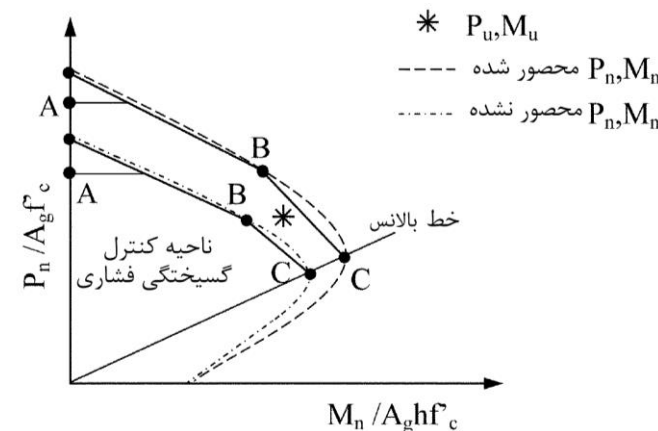
$$f_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_c} \varepsilon_c^2 & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon'_t \\ f'_c + E_2 \varepsilon_c & \varepsilon'_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccu} \end{cases} \quad (2)$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}} \quad (3)$$

$$\varepsilon'_t = \frac{2f'_c}{E_c - E_2} \quad (4)$$

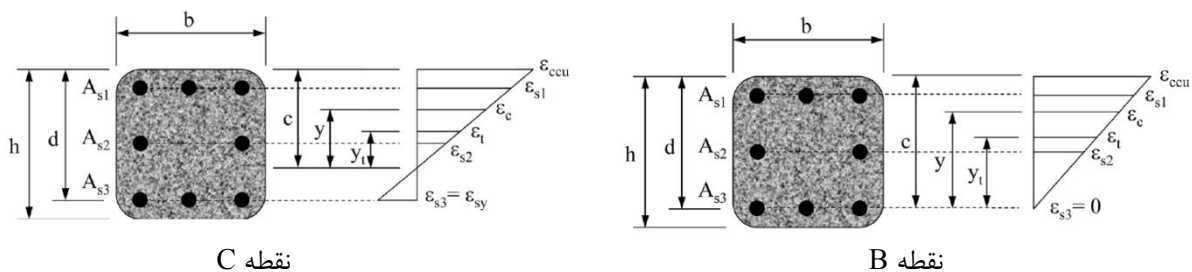
۳-۲- نحوه تهیه نمودار P-M

آیین نامه به منظور ساده سازی پیشنهاد می کند، نمودار P-M در ناحیه شکست فشاری با دو خط جایگزین شود. این دو خط از نقاط A، B و C عبور می کند، که در شکل (۲) مشاهده می شود.



شکل (۲) ساده سازی نمودار P-M

نقطه A: این نقطه معادل حالتی است که ستون تحت فشار خالص به مقاومت نهایی خود می رسد (تنش در کلیه نقاط مقطع برابر با ε_{ccu} می باشد). نقطه B: این نقطه معادل حالتی است که در لحظه شکست ستون، تنش در دورترین فولادها از محل وقوع کرنش فشاری حداکثر، برابر با صفر باشد. نقطه C: این نقطه معادل حالتی است که در لحظه شکست ستون، تنش در دورترین فولادها از محل وقوع کرنش فشاری حداکثر، برابر با تنش جاری شدن باشد.



شکل (۳) نقاط B و C در نمودار P-M

نقطه A با استفاده از روابط (۵) الی (۸) تعیین می گردد.

$$P_n = 0.85[0.85f'_{cc}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (5)$$

$$P_n = 0.8[0.85f'_{cc}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (6)$$

که در روابط فوق:

$$f'_{cc} = f'_c + \Psi_f 3.3 \kappa_a f_l \quad (7)$$

$$f_l = \frac{2nE_f t_f \epsilon_{fe}}{D} \quad (8)$$

در حالت کلی برای مقاطع دایره‌ای و مستطیلی تعیین نقاط B و C با استفاده از تعادل نیروها و همسازی کرنش‌ها صورت می‌گیرد. اما با توجه به این که در پیوست D آیین‌نامه روشی ساده‌تر برای مقاطع مستطیلی ارائه شده است، برای این مقاطع از روش موجود در پیوست استفاده می‌شود.

تعیین نقاط B و C برای مقاطع دایره‌ای

تعیین مقاومت اسمی بتن مقطع

همانطور که گفته شد، تعیین نقاط B و C برای مقاطع دایره‌ای با استفاده از تعادل نیروها و همسازی کرنش‌ها صورت می‌گیرد؛ اما به دلیل پیچیدگی انتگرال‌گیری روی مقاطع دایره‌ای، به جای محاسبه دقیق انتگرال، مقطع دایره را به نوارهایی موازی محور خمش تقسیم کرده و انتگرال‌گیری عددی انجام می‌شود. در این تحقیق تعداد نوارها برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده است.

برای تعیین مقاومت اسمی بتن مقطع، مراحل زیر را طی می‌شود:

محاسبه ضخامت هر نوار (t_{lr})

$$t_{lr} = \frac{D}{100} \quad (9)$$

محاسبه فاصله مرکز هر نوار تا محل وقوع تنش فشاری حداکثر (d_{lri})

$$d_{lri} = \frac{2i - 1}{2} \times t_{lr} \quad (10)$$

محاسبه عرض هر نوار (b_{lri})

$$b_{lri} = D \times \sin \theta_{lri} \quad (11)$$

$$\sin \theta_{lri} = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_{lri}} \quad (12)$$

$$\cos \theta_{lri} = \frac{D/2 - d_{lri}}{D/2} \quad (13)$$

محاسبه فاصله تار خنثی تا محل وقوع تنش فشاری حداکثر (c)

$$c = d \quad (14)$$

$$c = d \frac{\varepsilon_{ccu}}{\varepsilon_{ccu} + \varepsilon_{sy}} \quad (15)$$

محاسبه فاصله محل وقوع ε'_t تا محل وقوع تنش فشاری حداکثر (d_t)

$$d_t = c \left(1 - \frac{\varepsilon'_t}{\varepsilon_{ccu}} \right) \quad (16)$$

$$\varepsilon'_t = \frac{2f'_c}{E_c - E_2} \quad (17)$$

محاسبه کرنش هر نوار (ε_{ci})

$$\varepsilon_{ci} = \frac{c - d_{lri}}{c} \varepsilon_{ccu} \quad (18)$$

محاسبه تنش هر نوار (f_{ci})

$$f_{ci} = \begin{cases} E_c \varepsilon_{ci} - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_c} \varepsilon_{ci}^2 & 0 \leq \varepsilon_{ci} \leq \varepsilon'_t \\ f'_c + E_2 \varepsilon_{ci} & \varepsilon'_t \leq \varepsilon_{ci} \leq \varepsilon_{ccu} \\ 0 & \varepsilon_{ci} \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}} \quad (20)$$

محاسبه مقاومت اسمی بتن از روابط زیر (M_{nc} و P_{nc})

$$P_{nc} = \sum_{i=1}^{100} f_{ci} b_{lri} t_{lr} \quad (21)$$

$$M_{nc} = \sum_{i=1}^{100} f_{ci} b_{lri} t_{lr} \times \left(\frac{D}{2} - d_{lri} \right) \quad (22)$$

تعیین مقاومت اسمی فولادهای مقطع

برای تعیین مقاومت اسمی فولادهای مقطع، مراحل زیر طی می‌شود:
محاسبه کرنش میلگردها (ϵ_{si})

$$\epsilon_{si} = \frac{c - d_i}{c} \epsilon_{ccu} \quad (23)$$

d_i فاصله میلگرد نسبت به محل وقوع تنش فشاری حداکثر می‌باشد.
محاسبه تنش میلگردها (f_{si})

$$f_{si} = E_s \epsilon_{si} \quad (24)$$

$$-f_y \leq f_{si} \leq f_y \quad (25)$$

از آنجایی که در قسمت قبل هنگام محاسبه مقاومت اسمی بتن، مقطع بصورت کامل بتنی فرض شده است و فولادها نیز به عنوان بتن در نظر گرفته شده‌اند، لازم است مقدار نیرو و لنگر اضافی که به این دلیل در نظر گرفته شده است، از مقاومت کل کسر شود. بنابراین با استفاده از روابط قسمت قبل تنش (f_{ci}) معادل کرنش فولادها (ϵ_{si}) محاسبه می‌شود.

با استفاده از روابط زیر مقاومت اسمی فولادها (M_{ns} و P_{ns}) محاسبه می‌شود:

$$P_{ns} = \sum_i (f_{si} - f_{ci}) \times A_{si} \quad (26)$$

$$M_{ns} = \sum_i (f_{si} - f_{ci}) \times A_{si} \times \left(\frac{D}{2} - d_i \right) \quad (27)$$

تعیین مقاومت اسمی کل مقطع

مقاومت اسمی کل مقطع از مجموع مقاومت اسمی بتن و فولادهای مقطع به دست می‌آید.

$$P_n = P_{nc} + P_{ns} \quad (27)$$

$$M_n = M_{nc} + M_{ns} \quad (28)$$

تعیین نقاط B و C برای مقاطع مستطیلی

باتوجه به پیوست D آیین‌نامه نیرو و لنگر نهایی در نقاط B و C مقاطع مستطیلی با استفاده از روابط زیر بدست می‌آید:

$$\phi P_{n(B,C)} = \phi \left[(A(y_t)^3 + B(y_t)^2 + C(y_t) + D) + \sum A_{si} f_{si} \right] \quad (29)$$

$$\phi M_{n(B,C)} = \phi \left[(E(y_t)^4 + F(y_t)^3 + G(y_t)^2 + H(y_t) + I) + \sum A_{si} f_{si} d_i \right] \quad (30)$$

که در روابط فوق پارامترهای A تا I به شرح زیر می‌باشند:

$$A = \frac{-b(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)^2 \quad (31)$$

$$B = \frac{b(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right) \quad (32)$$

$$C = -bf'_c \quad (33)$$

$$D = bcf'_c + \frac{bcE_2}{2} (\varepsilon_{ccu}) \quad (34)$$

$$E = \frac{-b(E_c - E_2)^2}{16f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)^2 \quad (35)$$

$$F = b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)^2 + \frac{b(E_c - E_2)}{3} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right) \quad (36)$$

$$G = - \left(\frac{b}{2} f'_c + b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right) \right) \quad (37)$$

$$H = bf'_c \left(c - \frac{h}{2} \right) \quad (38)$$

$$I = \frac{bc^2}{2} f'_c - bcf'_c \left(c - \frac{h}{2} \right) + \frac{bc^2 E_2}{3} (\varepsilon_{ccu}) - \frac{bcE_2}{2} \left(c - \frac{h}{2} \right) (\varepsilon_{ccu}) \quad (39)$$

در روابط فوق پارامتر c برابر با فاصله تار خنثی تا دورترین تار فشاری و y_t برابر با فاصله تار خنثی تا محل وقوع کرنش فشاری مساوی ε'_t می‌باشند که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$c = \begin{cases} d & \text{for point B} \\ d \frac{\varepsilon_{ccu}}{\varepsilon_{sy} + \varepsilon_{ccu}} & \text{for point C} \end{cases} \quad (40)$$

$$y_t = c \frac{\varepsilon'_t}{\varepsilon_{ccu}} \quad (41)$$

همچنین در روابط فوق A_{si} ، d_i و f_{si} به ترتیب برابر با مساحت، فاصله قائم تا مرکز سطح و تنش در i -امین ردیف فولادهای فشاری می‌باشد. هنگام تعیین d_i باید توجه داشت که ناحیه فشاری مقطع در بالای ناحیه کششی قرار گرفته باشد. آنگاه علامت d_i برای فولادهای بالاتر از مرکز سطح، مثبت و برای فولادهای پایین‌تر از مرکز سطح، منفی است. همچنین برای تعیین f_{si} ، از تشابه مثلث‌ها در توزیع کرنش‌های معادل نقاط B و C ، استفاده می‌شود و علامت آن برای تنش‌های فشاری مثبت و کششی منفی است. یادآوری می‌گردد که ضریب کاهش مقاومت (ϕ) با توجه به نوع فولاد گذاری عرضی (دورپیچ و یا خاموت) تعیین شده و براساس ۱۴-۳۱۸ ACI، به شرح زیر است:

$$\phi = 0.75 \quad \text{ستون با دورپیچ}$$

$$\phi = 0.65 \quad \text{ستون با خاموت}$$

۲-۴- مراحل تقویت ستون تحت بار محوری و لنگر خمشی

کنترل ضابطه آیین‌نامه مبنی بر اینکه مجاز به تقویت هستیم یا نه.

$$(\phi P_n)_{\text{existing}} \geq [1.1P_D + 0.75P_L]_{\text{new}} \quad (42)$$

$$(\phi M_n)_{\text{existing}} \geq [1.1M_D + 0.75M_L]_{\text{new}} \quad (43)$$

محاسبه ظرفیت نهایی مورد نیاز با استفاده از ترکیبات بار ارائه شده در ۱۴-۳۱۸ ACI:

$$P_u = 1.2P_D + 1.6P_L \quad (44)$$

$$M_u = 1.2M_D + 1.6M_L \quad (45)$$

تعیین مختصات نقاط A ، B و C برای ستون تقویت نشده

۱- تعیین مختصات نقطه A از یکی از روابط زیر صورت می‌پذیرد.

$$\phi P_n = \phi 0.85 [0.85 f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (46)$$

$$\phi P_n = \phi 0.8 [0.85 f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (47)$$

۲- تعیین مختصات نقطه B و C با توجه به شکل مقطع و با استفاده از روابط قسمت قبل

۳- برای ستون تقویت نشده مقادیر زیر در روابط قسمت قبل قرار می‌گیرند:

$$f'_{cc} = f'_c \quad E_2 = 0 \quad \varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{cu} = 0.003$$

از آنجایی که تقویت تنها زمانی مجاز است که مود شکست فشاری باشد، لازم است قبل از هرکاری مود شکست تعیین شود. در صورتی که شرط زیر برقرار باشد مود شکست فشاری است (M_{C0} و P_{C0} مختصات نقطه C ستون تقویت نشده است).

$$P_u \geq \frac{P_{C0}}{M_{C0}} M_u \quad (48)$$

بررسی لزوم یا عدم لزوم تقویت

در صورتی که مود شکست فشاری بود و شروط زیر نیز همزمان برقرار بودند، ستون نیازی به تقویت ندارد، در غیر این صورت گام بعدی در نظر گرفته می‌شود.

$$P_u \leq \phi P_{n(\text{existing})} \quad (49)$$

$$M_u \leq \phi M_{n(\text{existing})} \quad (50)$$

حدس مقدار اولیه برای تعداد لایه‌های FRP بر اساس کنترل نسبت $\frac{f_l}{f'_c}$

$$n \geq \frac{0.04 f'_c D}{E_f t_f \varepsilon_{fe}} \quad (51)$$

تعیین مختصات نقاط A، B و C برای ستون تقویت شده

مقادیر ε_{ccu} ، f'_{cc} و E_2 را در این حالت باید با توجه به تعداد لایه‌ها، از روابط زیر به دست آورده و با استفاده از آنها مختصات نقاط A، B و C را تعیین نمود.

$$f_l = \frac{2n E_f t_f \varepsilon_{fe}}{D} \quad (52)$$

$$f'_{cc} = f'_c + \Psi_f 3.3 \kappa_a f_l \quad (53)$$

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left(1.5 + 12 \kappa_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0.45} \right) \quad (54)$$

همانطور که اشاره شد براساس آیین نامه مقدار ε_{ccu} باید از ۰/۰۱ کمتر باشد در غیر این صورت برای محاسبه f'_{cc} باید از روشی که در ادامه ارائه می شود استفاده نمود. ابتدا با استفاده از f'_{cc} و ε_{ccu} که از روابط فوق محاسبه شده اند، مقدار E_2 از رابطه زیر به دست می آید:

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}} \quad (55)$$

حال مقدار ε_{ccu} را برابر با ۰/۰۱ قرار داده و بر این اساس مقدار f'_{cc} از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$f'_{cc} = f'_c + E_2 \varepsilon_{ccu} \quad (56)$$

$$\varepsilon_{ccu} = 0.01 \quad \text{که در آن:}$$

براساس آیین نامه هنگام تعیین مختصات هر یک از نقاط A، B و C باید مقدار f_l و پس از آن f'_{cc} با در نظر گرفتن مقادیر زیر برای ε_{fe} حساب شود.

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_e \varepsilon_{fu} \quad \text{برای نقطه A}$$

$$\varepsilon_{fe} = \min(\kappa_e \varepsilon_{fu}, 0.004) \quad \text{برای نقطه B و C}$$

بررسی مقاومت ستون تقویت شده

$$P_u \leq \phi P_{n(new)}$$

$$M_u \leq \phi M_{n(new)}$$

در صورتی که روابط فوق برقرار نبود، باید یک لایه به لایه های قبلی افزود تا زمانی که روابط فوق برقرار باشند. لازم به ذکر است که در کد نوشته شده، مقدار اولیه برابر یک برای n فرض می شود و پس از کنترل مقاومت ستون تقویت شده، رابطه زیر نیز بررسی شده و در صورتی که برقرار نبود آنقدر لایه اضافه می شود تا رابطه زیر برقرار شود (البته به شرطی که تعداد لایه ها از حداکثر تعیین شده توسط کاربر تجاوز نکند).

$$\frac{f_l}{f'_c} \geq 0.08 \quad (57)$$

رسم نمودار P-M براساس اطلاعات به دست آمده از روابط

از آنجایی که در نمودار P-M، محور افقی ϕM_n و محور قائم ϕP_n می باشند، در ادامه به منظور ساده سازی به جای ϕM_n و ϕP_n به ترتیب x و y قرار می دهیم.

مقاطع دایره ای:

نمودار P-M برای مقطع دایره ای شامل دو خط مستقیم می باشد که در ادامه معادلات این دو خط ارائه می شود.

خط بین نقاط A و B

$$0 \leq x \leq \phi M_{n(B)} \rightarrow y = m_1 x + \phi P_{n(A)} \quad (58)$$

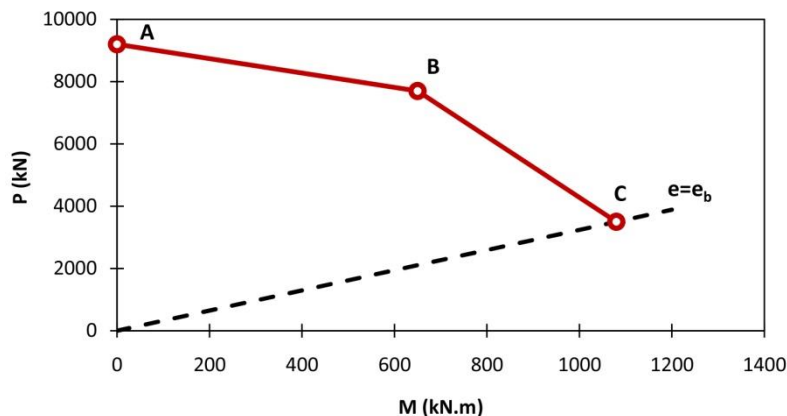
$$m_1 = \frac{\phi P_{n(B)} - \phi P_{n(A)}}{\phi M_{n(B)}} \quad (59)$$

خط بین نقاط B و C

$$\phi M_{n(B)} \leq x \leq \phi M_{n(C)} \rightarrow y = m_2(x - \phi M_{n(B)}) + \phi P_{n(B)} \quad (60)$$

$$m_2 = \frac{\phi P_{n(C)} - \phi P_{n(B)}}{\phi M_{n(C)} - \phi M_{n(B)}} \quad (61)$$

نمودار P-M رسم شده با استفاده از روش فوق در شکل (۴)، برای مقطع دایره‌ای نشان داده شده است.



شکل (۴) نمونه‌ای از نمودار P-M رسم شده برای مقاطع دایره‌ای

مقاطع مستطیلی:

نمودار P-M برای مقطع مستطیلی شامل سه خط مستقیم می‌باشد، که در ادامه معادلات این سه خط ارائه می‌شود. همانطور که گفته شد، بر اساس آیین‌نامه در صورتی که خروج از مرکزیت فشار وارد بر مقطع کوچکتر و یا مساوی ۱۰ درصد ارتفاع مقطع باشد ($e \leq 0.1h$)، مقاومت فشاری اسمی مقطع با استفاده از روابط ارائه شده برای ستون تقویت شده با FRP تحت فشار خالص بدست می‌آید. بنابراین می‌توان نوشت:

$$0 \leq x \leq 0.1h \phi P_{n(A)} \rightarrow y = \phi P_{n(A)} \quad (62)$$

در ادامه برای حالاتی که خروج از مرکزیت فشار وارد بر مقطع بزرگتر از ۱۰ درصد ارتفاع مقطع باشد ($e > 0.1h$)، می‌توان نوشت:

$$0.1h\phi P_{n(A)} \leq x \leq \phi M_{n(B)} \rightarrow y = m_1(x - 0.1h\phi P_{n(A)}) + \phi P_{n(A)} \quad (63)$$

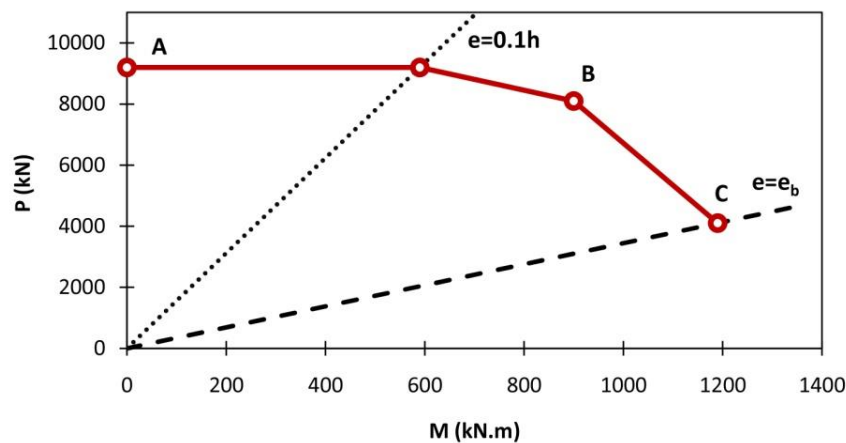
$$m_1 = \frac{\phi P_{n(B)} - \phi P_{n(A)}}{\phi M_{n(B)} - 0.1h\phi P_{n(A)}} \quad (64)$$

و همچنین:

$$\phi M_{n(B)} \leq x \leq \phi M_{n(C)} \rightarrow y = m_2(x - \phi M_{n(B)}) + \phi P_{n(B)} \quad (65)$$

$$m_2 = \frac{\phi P_{n(C)} - \phi P_{n(B)}}{\phi M_{n(C)} - \phi M_{n(B)}} \quad (65)$$

نمونه‌ای از نمودار P-M رسم شده در شکل (۵)، برای مقطع مستطیلی نشان داده شده است.

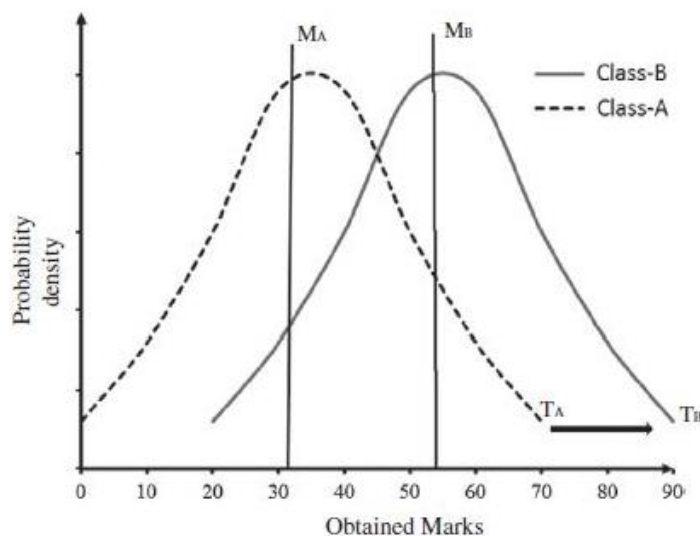


شکل (۵) نمونه‌ای از نمودار P-M رسم شده برای مقاطع مستطیلی

۳- الگوریتم فراابتکاری آموزش و یادگیری (TLBO)

الگوریتم آموزش و یادگیری (TLBO) در سال ۲۰۱۱ توسط راتو و همکاران [11] ابداع گردید. این الگوریتم بر مبنای جمعیت بوده و تلاش می‌کند، روند آموزش و یادگیری در یک کلاس درس را شبیه‌سازی کند. روند بهینه‌یابی شامل دو مرحله آموزش‌دهنده و مرحله آموزش‌گیرنده می‌باشد. در واقع روش TLBO یک مدل ریاضی برای مسائل بهینه‌یابی بر مبنای روند ساده آموزش ایجاد می‌کند. در این روش دانش‌آموزان به عنوان جمعیت اولیه در نظر گرفته می‌شوند. دو مربی مختلف T_A و T_B دروس یکسانی را در دو کلاس مختلف A و B تدریس می‌کنند. به منظور فراهم کردن مقایسه درست و دقیق، سطح دانش‌آموزان در دو کلاس به طور تقریبی یکسان در نظر گرفته می‌شود. توزیع نمرات بدست آمده توسط دانش‌آموزان در دو کلاس در شکل زیر نشان داده شده است. از شکل واضح است که میانگین نمرات در کلاس B بالاتر از کلاس A می‌باشد ($M_B > M_A$) و این بدان معنی است، که معلم B بهتر از معلم A می‌باشد. به عبارت دیگر معلم بهتر از نتایج حاصل شده در کلاس مشخص می‌گردد. همچنین می‌توان گفت که، تعامل بین دانش‌آموزان در کلاس B بهتر از کلاس A می‌باشد. باید توجه شود که مربی

در یک کلاس به عنوان بهترین فرد در نظر گرفته می‌شود. شکل (۶) توزیع نمرات بدست آمده توسط دانش‌آموزان در دو کلاس مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (۶) توزیع نمرات بدست آمده توسط دانش‌آموزان در دو کلاس مختلف

معلم اطلاعات خود را در اختیار دانش‌آموزان قرار می‌دهد. بنابراین میانگین کلاس مستقیماً با توانایی معلم در ارتباط می‌باشد. مربی T_A تلاش می‌کند که میانگین کلاس خود را از M_A به M_B افزایش دهد. موفقیت معلم T_A وابسته به کیفیت آموزش منتقل شده به دانش‌آموزان و کیفیت خود دانش‌آموزان در یک کلاس می‌باشد. کیفیت دانش‌آموزان در یک کلاس به وسیله میانگین نمرات حاصل شده از جمعیت کلاس اندازه‌گیری می‌شود. اگر میانگین کلاس افزایش یابد دانش‌آموزان بطور طبیعی نیازمند معلم بهتر خواهند بود. از این‌رو بین کیفیت آموزش و موفقیت دانش‌آموزان تعاملی وجود خواهد داشت. بعد از به خدمت گرفتن معلم بهتر میانگین کلاس افزایش خواهد یافت و این روند آنقدر تکرار می‌شود تا بهترین جواب حاصل شود.

۳-۱- پیاده سازی TLBO برای بهینه‌سازی

روش TLBO شامل مراحل زیر می‌باشد:

مرحله ۱. جمعیت اولیه در TLBO: در این مرحله کلاس با یک جمعیت تصادفی از دانش‌آموزان (مقاطع با ابعاد و آرما‌تورهای مختلف) پر می‌شود.

$$PS = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{nm}^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{nm}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{ps} & x_2^{ps} & \dots & x_{nm}^{ps} \end{bmatrix} \begin{cases} W(x^1) \\ W(x^2) \\ \vdots \\ W(x^{ps}) \end{cases} \quad (66)$$

در این کلاس هر ردیف یک مقطع طراحی شده با اعضای x^1, x^2, \dots, x^{ps} و وزن متناظر $W(x^1), W(x^2), \dots, W(x^{ps})$ می‌باشد. باید توجه کرد که طرح‌ها در کلاس بر حسب مقدار وزن آن‌ها چیده می‌شوند.

$$W(x^1) < W(x^2) < \dots < W(x^{ps}) \quad (67)$$

مرحله ۲. مرحله آموزش: مقاطع طراحی شده با کمترین مقدار تابع هدف $W(x^1)$ به عنوان معلم $X^{teacher}$ در نظر گرفته می شود. هدف معلم این است که نهایت تلاش خود را برای بهبود میانگین کلاس انجام دهد. (X^{mean}) بنابراین i امین طرح با استفاده از فرمول زیر حاصل می شود:

$$X^{new,i} = X^i + r(X^1 - T_F X^{mean}) \quad (68)$$

در رابطه فوق:

$X^{new,i}$ = طرح جدید، X^i = طرح حاضر، r = عدد تصادفی در محدوده $[0, 1]$ و T_F = فاکتور آموزش می باشد.

$$X^{mean} = \left[m \left(\text{class} \sum_{i=1}^{ps} x_1^i \right), m \left(\text{class} \sum_{i=1}^{ps} x_2^i \right), \dots, m \left(\text{class} \sum_{i=1}^{ps} x_{nm}^i \right) \right] \quad (69)$$

چنانچه طرح جدید $(X^{new,i})$ بهتر از طرح موجود (X^i) باشد، $(W(X^{new,i}) < W(X^i))$ ، طرح جدید جایگزین طرح موجود می شود. $(X^i = X^{new,i})$

مرحله ۳. علاوه بر تلاش معلم برای بهبود میانگین کلاس، دانش آموزان نیز با یکدیگر در تعامل هستند تا یکدیگر را بهبود بخشند. یک طرح در جمعیت به صورت تصادفی با دیگر طرح ها در تعامل و اثرگذاری بوده تا کیفیتش افزایش یابد. در این مرحله X^j به صورت تصادفی که متفاوت با X^i می باشد، انتخاب شده در صورتی که مقدار $W(X^{new,i})$ بهتر از $W(X^i)$ باشد، طرح جدید جایگزین می شود $(W(X^{new,i}) < W(X^i))$.

$$X^{new,i} = X^i + r(X^i - X^j) \quad \text{if} \quad W(X^i) < W(X^j)$$

$$\text{if} \quad W(X^j) < W(X^i) \quad X^{new,i} = X^i + r(X^j - X^i)$$

مرحله ۴. مراحل ۲ و ۳ آنقدر تکرار می شوند تا جایی که نتایج بدست آمده در مراحل مختلف، تغییر چشمگیری نداشته باشند.

۴- بررسی مساله طرح بهینه تقویت ستون های مستطیلی و دایروی

در این مطالعه از الگوریتم فراابتکاری TLBO برای تعیین ابعاد مقطع ستون و میلگردهای ستون و همچنین تعداد لایه های FRP استفاده شده است. روش کار به این صورت است که الگوریتم فراابتکاری مورد نظر با توجه به محدودیت ها و قیدهایی که برای طراحی در نظر گرفته شده است، ابعاد مقطع بتنی و میلگردها را تعیین می کند و سپس ظرفیت مقطع را بررسی کرده چنانچه به مقاوم سازی نیاز داشته باشد، از تعدادی لایه FRP برای تقویت مقطع استفاده می کند. در این تحقیق، تابع هدف حداقل کردن تابع هزینه^۶ می باشد. البته باید این تحقیق را به صورت یک مسئله چند هدفه، که از اهداف آن کاهش قیمت بتن، میلگرد و FRP مصرفی آن است، مورد بررسی قرار داد. قیمت مصالح را می توان با قیمت دستمزد در نظر گرفت؛ که در این تحقیق از این هزینه مازاد صرف نظر گردیده است. قیمت هر یک متر مربع از الیاف های کربن، آرمید و شیشه با اگماض، به ترتیب مبالغ ۵۰/۰۰۰ و ۳۰/۰۰۰ ریال در نظر گرفته شده است.

محدودیت های آیین نامه ای و همچنین محدودیت های ابعاد مقطع بتنی، به عنوان قیدها معرفی شده اند. اگر محدودیت های آیین نامه رعایت نشوند، مبلغ کار انجام شده مقدار بزرگی تعریف شده تا در بررسی حداقل مقدار تابع هزینه، به صورت جواب مسئله انتخاب نگردد. برای محدودیت های ابعاد مقطع نیز نرم افزار به صورتی برنامه نویسی

⁶ Cost Function

شده که در صورت کمتر شدن از حد پایین و یا بیشتر شدن از حد بالا به ترتیب مقادیر حد پایین و حد بالا را در نظر خواهد گرفت.

حد بالا و پایین مقطع بتن از ۳۰۰ تا ۶۰۰ میلیمتر برای مقاطع مستطیلی با بارگذاری فشاری و حد بالا و پایین مقطع بتن از ۲۵۰ تا ۵۰۰ میلیمتر برای بارگذاری فشار توام با خمش در نظر گرفته شده است و تعداد میلگرد طولی نیز برابر با ۸ تا ۲۸ عدد در محیط مستطیل می‌باشد؛ که از قطرهای ۱۲ تا ۳۰ میلیمتر استفاده شده‌اند. در همه مقاطع مقادیر حداکثر و حداقل فاصله میلگردها بر اساس آیین‌نامه رعایت شده است. همچنین نسبت حداقل و حداکثر آرماتورهای طولی مجاز نیز برای مقطع در نظر گرفته شده است. دقت حل مساله در الگوریتم‌های فراابتکاری رابطه مستقیمی با جمعیت اولیه آن الگوریتم برای حل مساله دارد. در این پژوهش تعداد جمعیت اولیه برابر با ۳۰۰ در نظر گرفته شد. برای هر جنس از FRP ها ۱۰ آنالیز مستقل انجام شد و در نهایت بهترین نتایج آن‌ها، گزارش شده است. در جدول‌های (۱) تا (۳) مشخصات مصالح الیاف کربن، شیشه و آرامید آورده شده است. در جدول (۴) نیز مشخصات بارگذاری در دو حالت مختلف آورده شده است.

جدول (۱) مشخصات الیاف کربن (CFRP) مصرفی

مقدار اختصاص داده شده	مشخصات مصالح مصرفی
0.017	کرنش نهایی گسیختگی CFRP
230000	مدول الاستیسیته CFRP (MPa)
4900	مقاوت کششی نهایی CFRP (MPa)

جدول (۲) مشخصات الیاف شیشه (GFRP) مصرفی

مقدار اختصاص داده شده	مشخصات مصالح مصرفی
0.028	کرنش نهایی گسیختگی GFRP
70000	مدول الاستیسیته GFRP (MPa)
3900	مقاوت کششی نهایی GFRP (MPa)

جدول (۳) مشخصات الیاف آرامید (AFRP) مصرفی

مقدار اختصاص داده شده	مشخصات مصالح مصرفی
0.023	کرنش نهایی گسیختگی AFRP
120000	مدول الاستیسیته AFRP (MPa)
3800	مقاوت کششی نهایی AFRP (MPa)

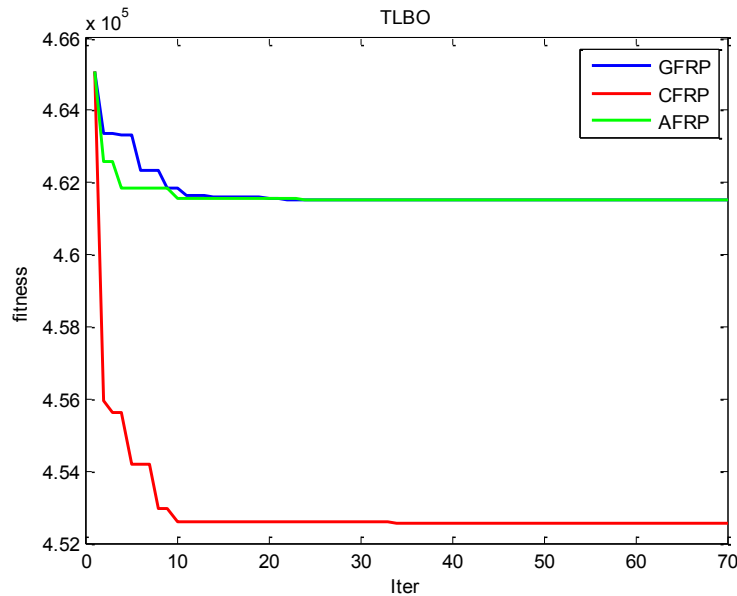
جدول (۴) مشخصات بارگذاری برای حالت‌های مختلف

بارگذاری	لنگر (kN.m)	فشار (kN)
حالت اول	0	3341.7216
حالت دوم	264.58	1440.2940

۴-۱- مساله مقطع مستطیلی

بررسی مقاطع مستطیلی تحت بارمحوری خالص

در شکل (۸) نمودار همگرایی الگوریتم TLBO برای الیاف کربن، شیشه و آرامید نشان داده شده است. همانطور که از شکل نیز مشخص است، هزینه تمام شده‌ی (بتن و میلگرد و الیاف FRP) مقطعی که با الیاف کربن مقاوم‌سازی شده در مقایسه با الیاف شیشه و آرامید کمتر می‌باشد. این در حالی است که قیمت کربن از شیشه و آرامید بیشتر می‌باشد؛ ولی با توجه به اینکه مقاومت الیاف کربن بیشتر است. در نهایت مقطعی که دارای الیاف کربن می‌باشد، دارای هزینه کمتری شده است.



شکل (۸) مقایسه نمودارهای همگرایی برای هر سه نوع الیاف طرح تحت بارمحوری خالص برای مقطع مستطیلی

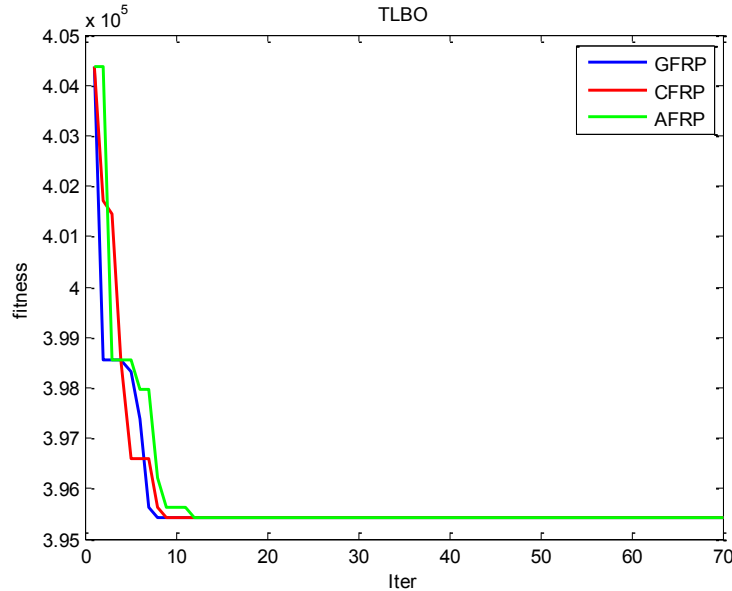
مقایسه نمودار همگرایی و هزینه تمام شده مقطع بتنی برای سه الیاف کربن، آرامید و شیشه برای فشاردر نهایت مقاطع بدست آمده از بهترین آنالیز الگوریتم برای بارگذاری فشاری در جدول زیر آورده شده است:

جدول (۵) معرفی بهترین مقطع برای سه نوع الیاف و همچنین مقایسه اقتصادی سه نوع الیاف تحت بارمحوری خالص برای مقطع مستطیلی

GFRP	CFRP	AFRP	مشخصات مقطع مستطیلی
۳۸۷	۳۸۷	۳۸۷	ارتفاع بهترین (mm)
۳۲۴	۳۲۴	۳۲۴	عرض بهترین (mm)
۲۰	۲۰	۲۰	تعداد میلگرد ها
۲۰	۲۰	۲۰	اندازه میلگرد
۱۰	۳	۶	تعداد FRP
۴۶۱۵۱۲/۳۳۳	۴۵۲۵۱۲/۳۳۳	۴۶۱۵۱۲/۳۳۳	هزینه کل (ریال)

بررسی مقطع مستطیلی تحت بار محوری و لنگر خمشی

برای حالت بارگذاری فشار همراه با خمش حد بالا و پایین مقطع بتن از ۲۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر برای مقاطع مستطیلی و تعداد میلگرد طولی نیز برابر با ۸ تا ۲۸ عدد در محیط مستطیل می‌باشد؛ که دارای قطرهای ۱۲ تا ۳۰ میلی‌متر می‌باشند. در همه مقاطع مقادیر حداکثر و حداقل فاصله میلگردها بر اساس آیین‌نامه رعایت شده است. همچنین نسبت حداقل و حداکثر آرماتورهای طولی مجاز نیز برای مقطع در نظر گرفته شده است. نمودارهای همگرایی در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۹) مقایسه نمودار همگرایی و هزینه تمام شده مقطع بتنی برای سه الیاف کربن، آرامید و شیشه تحت بار محوری و لنگر خمشی برای مقطع مستطیلی

در نهایت مقاطع بدست آمده از بهترین آنالیز الگوریتم برای بارگذاری حالت دوم در جدول (۶) آورده شده است:

جدول (۶) معرفی بهترین مقطع برای سه نوع الیاف و همچنین مقایسه اقتصادی سه نوع الیاف تحت بار محوری و لنگر خمشی برای مقطع مستطیلی

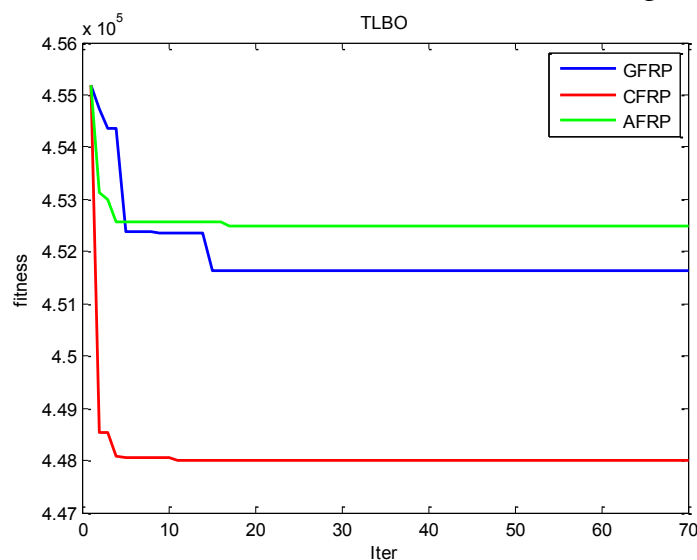
GFRP	CFRP	AFRP	مشخصات مقطع مستطیلی
257	257	257	ارتفاع بهترین (mm)
۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	عرض بهترین (mm)
۲۸	۲۸	۲۸	تعداد میلگرد ها
۱۴	۱۴	۱۴	اندازه میلگرد
۰	۰	۰	تعداد FRP
۳۹۵۴۲۹/۶۲۷	۳۹۵۴۲۹/۶۲۷	۳۹۵۴۲۹/۶۲۷	هزینه کل

همانطور که از نتایج مشاهده می شود برای حالت دوم بارگذاری الگوریتم به جواب بهینه همگرا شده و به این جواب رسیده که نیازی به استفاده از لایه های FRP در هیچ یک از انواع آن ها اقتصادی نبوده و با توجه به بارگذاری موجود بهترین جواب مقطعی بدون استفاده از لایه های FRP می باشد، که در هر سه حالت این مقطع ها برابر بوده است.

۲-۴- مساله مقطع دایره ای

بررسی مقطع دایره ای تحت بار محوری خالص

حد بالا و پایین قطر مقطع بتن از ۳۵۰ تا ۷۰۰ میلیمتر برای مقاطع دایره ای، با بارگذاری فشاری و حد بالا و پایین قطر مقطع بتن از ۳۰۰ تا ۶۰۰ میلیمتر برای بارگذاری فشار توام با خمش در نظر گرفته شده است و تعداد میلگرد طولی نیز برابر با ۶ تا ۱۳ عدد در محیط دایره ای می باشد، که دارای قطرهای ۱۲ تا ۳۰ میلیمتر می باشند. در همه مقاطع مقادیر حداکثر و حداقل فاصله میلگردها بر اساس آیین نامه رعایت شده است. همچنین نسبت حداقل و حداکثر آرماتورهای طولی مجاز نیز برای مقطع در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده از الگوریتم برای حالت اول بارگذاری را در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل (۱۰) مقایسه نمودار همگرایی و هزینه تمام شده مقطع بتنی برای سه الیاف کربن، آرامید و شیشه تحت بار محوری خالص برای مقاطع دایره ای

در نهایت مقاطع بدست آمده از بهترین آنالیز الگوریتم برای بارگذاری فشاری در جدول (۷) آورده شده است.

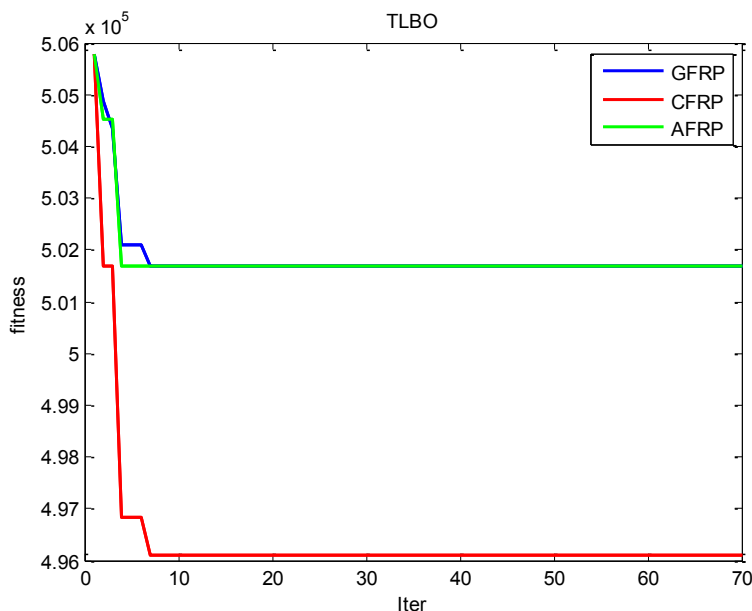
جدول (۷) معرفی بهترین مقطع برای سه نوع الیاف و همچنین مقایسه اقتصادی سه نوع تحت بار محور خالص برای مقاطع دایره ای

GFRP	CFRP	AFRP	مشخصات مقطع دایره ای
۴۰۹	۴۶۸	۴۳۷	قطر بهترین (mm)
۸	۱۲	۶	تعداد میلگرد ها
۳۰	۱۲	۲۸	اندازه میلگرد
۸	۳	۵	تعداد FRP
۴۵۱۶۳۲/۹۷۳	۴۴۷۹۹۷/۷۲۳	۴۵۲۴۹۹/۰۳۱	هزینه کل

همانطور که از جدول نتایج مشاهده می‌شود مقطع دایره‌ای با FRP کربن بهینه‌ترین و کم هزینه‌ترین سطح مقطع با سه لایه FRP را دارا می‌باشد.

بررسی مقطع دایره‌ای تحت بار محوری خالص و لنگر خمشی

حد بالا و پایین قطر مقطع بتن از ۳۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر برای مقاطع دایره‌ای با بارگذاری فشار توام با خمش در نظر گرفته شده است و تعداد میلگرد طولی نیز برابر با ۶ تا ۱۳ عدد در محیط دایره می‌باشد، که دارای قطرهای ۱۲ تا ۳۰ میلی‌متر می‌باشند. در همه مقاطع مقادیر حداکثر و حداقل فاصله میلگردها بر اساس آیین‌نامه رعایت شده است. همچنین نسبت حداقل و حداکثر آرماتورهای طولی مجاز نیز برای مقطع در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده از الگوریتم برای حالت دوم بارگذاری را در زیر مشاهده می‌کنید.



شکل (۱۱) مقایسه نمودار همگرایی و هزینه تمام شده مقطع بتنی برای سه الیاف کربن، آرامید و شیشه تحت بار محوری و لنگر خمشی برای مقاطع دایره‌ای

در نهایت مقاطع بدست آمده از بهترین آنالیز الگوریتم برای بارگذاری حالت دوم در جدول زیر آورده شده است.

جدول (۸) معرفی بهترین مقطع برای سه نوع الیاف و همچنین مقایسه اقتصادی سه نوع تحت بار محوری و لنگر خمشی برای مقاطع دایره‌ای

GFRP	CFRP	AFRP	مشخصات مقطع دایروی
۴۶۶	۴۵۰	۴۶۶	قطر بهترین (mm)
۱۰	۱۰	۱۰	تعداد میلگرد ها
۲۵	۲۵	۲۵	اندازه میلگرد
۰	۳	۰	تعداد FRP
۵۰۱۶۷۳/۹۰۵	۴۹۶۰۹۷/۴۴۷	۵۰۱۶۷۳/۹۰۵	هزینه کل

همانطور که از نتایج مشاهده می‌شود مقطع با لایه FRP کربن بهینه‌ترین جواب را دارا می‌باشد و نسبت به دو FRP دیگر هزینه تمام شده کمتری دارد. در این پژوهش ابتدا روش محاسبه تعداد لایه‌های FRP برای سه نوع الیاف شیشه، کربن و آرامید کد نویسی شد. سپس با الگوریتم فراابتکاری TLBO برای مقاطع دایره‌ای و مستطیلی هم در حالت فشاری خالص و هم در حالت نیروی فشاری با لنگرخمشی برای سه نوع الیاف با تغییر در نوع الیاف و ابعاد و تعداد میلگردها بهینه‌ترین حالت اقتصادی تحت نیروی خاصی مشخص گردید.

۵- نتیجه‌گیری

در حالت مستطیلی که تحت بار فشاری خالص قرار دارد برای یک ساختمان چهار طبقه معمولی مقطع بتنی با ابعاد ۳۷۸ در ۳۲۴ میلی‌متر همراه با ۲۰ میلگرد شماره ۲۰ و سه لایه الیاف کربنی بهینه‌ترین حالت می‌باشد. در صورت وجود برون محوری با استفاده از مقطع ۲۵۷ در ۵۰۰ میلی‌متر و ۲۸ میلگرد شماره ۱۴ بدون استفاده از هیچ لایه FRP اقتصادی‌ترین مقطع می‌باشد. در صورت استفاده از مقطع دایره‌ای در حالت بار محوری خالص مقطع به قطر ۴۶۸ میلی‌متر به همراه ۱۲ میلگرد شماره ۱۲ و سه لایه الیاف کربنی بهینه‌ترین حالت اقتصادی را خواهد داشت و در صورت وجود بار خارج از محور مقطع به قطر ۴۵۰ میلی‌متر به همراه ۱۰ عدد میلگرد شماره ۲۵ و سه لایه کربنی بهینه‌ترین حالت اقتصادی می‌باشد. در صورت مهم بودن فضا و مساحت و همچنین مصالح بتنی مورد استفاده در حالت وجود یا عدم وجود بار خارج از محور استفاده از مقطع مستطیلی با لایه‌های کربنی بهینه‌تر از حالت مقاطع دایره‌ای به نظر می‌رسد. با استفاده از ابعاد و میلگردهای مطرح شده در حالت وجود برون محوری نیازی به استفاده از الیاف FRP نمی‌باشد. ولی در صورت مهم بودن مصرف میلگرد و فولاد در سازه مقطع دایره‌ای پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

- [1] Karbhari, V.M. and L. Zhao, (2000) "Use of composites for 21st century civil infrastructure." *Computer methods in applied mechanics and engineering*,. 185(2): p. 433-454.
- [2] Mirmiran, A., (1998), "Effect of column parameters on FRP-confined concrete." *Journal of Composites for Construction*,. 2(4): p. 175-185.
- [3] Lam, L. and J. Teng, (2003), "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns." *Journal of Reinforced Plastics and Composites*,. 22(13): p. 1149-1186.
- [4] Toutanji, H., et al., (2009), "Behavior of large-scale rectangular columns confined with FRP composites". *Journal of Composites for Construction*,. 14(1): p. 62-71.
- [5] Quiertant, M. and J.-L. Clement, (2011), "Behavior of RC columns strengthened with different CFRP systems under eccentric loading." *Construction and Building Materials*,. 25(2): p. 452-460.
- [6] Widiarsa, I.B.R. and M.N. Hadi, (2013), "Performance of CFRP wrapped square reinforced concrete columns subjected to eccentric loading." *Procedia Engineering*,. 54: p. 365-376.
- [7] Kaveh, A., Hoseini Vaez, S.R., Hosseini, P. (2017), "Modified Dolphin Monitoring Operator for Weight Optimization of Frame Structures", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Online published: 25 April 2017, <https://doi.org/10.3311/PPci.9691>.
- [8] American Concrete Institute. (2008). "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening of concrete structure" (ACI 440.2R-08). Farmington Hill, Mich., USA.
- [9] American Concrete Institute. (2014). "Building code requirements for structural concrete" (ACI 318-14) and commentary (ACI 318-14), Farmington Hills, Mich., USA.
- [10] Lam, L. and J. Teng, (2003), "Design-Oriented Stress-Strain Model for FRP-Confined Concrete." *Construction and Building Materials*, 17(6-7): p. 471-489.
- [11] Rao, R.V., Savsani, V.J., and Vakharia, D. P. (2011). "Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems". *Computer-Aided Design*, 43(3), 303-315.

Optimum Design of RC Columns Reinforced by FRP Using TLBO Algorithm

**Seyed Rohollah Hoseini Vaez*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom

Mohammad Reza Rezaei

Master of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom

Abstract:

Optimum economic design is one of the main goals of civil engineering. Today, reinforced concrete the columns reinforced fibers called FRP fibers. The fiber is available in three types of carbon, glass, and aramid. In this study, The Teaching and Learning Metaheuristic Algorithm used to determine the dimensions of the column and steel bars, as well as the number of FRP layers needed for reinforcement. Considering the limitations and constraint that are intended for design, the algorithm determines the dimensions of the concrete cross-section and the bars, and then examines the cross-sectional strength and, if required for reinforcement, a number of FRP layers to reinforce the cross-sectional will use. The cost function includes the cost of concrete, reinforcing, and the FRP, which has been introduced as a target function. Design criteria and design constraints are implemented and formulated in accordance with the ACI 440-08 and ACI 318-14. Therefore, the set of target functions and constraints are related to each other so that the lowest cost based on the objective function is achieved by establishing all constraints (acceptable design) at a point called the optimal design. According to the results, using the dimensions of the column and number of bars represented by the algorithm, CFRP use is more cost effective.

Keywords: FRP Fiber, carbon fiber, RC buildings, strengthen of columns, optimization, TLBO(Teaching-Learnng-Based- Optimization) algorithm