

بررسی تأثیر فولادهای عرضی و ورقهای تقویتی فولادی بر رفتار ستونهای بتنی

مرتضی شیخی* و حسن حاجی کاظمی**

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۸۴/۵/۱ - دریافت نسخه نهایی: ۸۵/۴/۷)

چکیده - پوشش ستونهای بتنی با ورقهای فولادی یکی از روشهای مناسب مقاوم سازی این سازه هاست. با استفاده از این روش، ضمن افزایش مقاومت محوری و خمشی و برشی ستون، شکل پذیری آن نیز بهبود می یابد. در این پژوهش، با بررسی اثرات محصورشدگی بتن توسط خاموتها و یا ورقهای فولادی تقویتی پیرامون آن، تغییرات منحنی اندرکنش بارمحوری - لنگر خمشی ستونها مورد مطالعه قرار می گیرد. نتایج نشان می دهد که اثرات محصورشدگی در محدوده مکانیزم رفتاری شکست مواد ستونها به ویژه بر رفتار ستونهای لاغر با بارمحوری نسبتاً زیاد بسیار محسوستر است.

واژگان کلیدی: ستون، تقویت، محصورشدگی، اندرکنش بار - لنگر، شکل پذیری

A Theoretical Study of the Behavior of Reinforced Concrete Columns Strengthened by Steel Plates and Transverse Reinforcements

M. Sheikhi and H. Haji-Kazemi

Faculty of Engineerin, Ferdws University of Mashad

Abstract: Jacketing of reinforced concrete columns is a common and useful strengthening method. This method substantially improves mechanical properties of the column, such as flexural strength as well as shear and ductility. In this paper, the behavior of confined reinforced concrete columns are investigated. The results indicate that the method is more effective for slender columns in the region of their failure zone.

Keywords: Columns, Strengthening, Confinement, Load- moment interaction, Ductility.

** - استاد

* - کارشناس ارشد

در چند دهه اخیر بحث مقاوم سازی سازه ها یکی از مهمترین موضوعات مورد بررسی توسط پژوهشگران و جامعه علمی- صنعتی بوده است. وقوع زلزله ها و تغییر آیین نامه ها از سویی و تغییرات شرایط محیطی و بارگذاری و عمر سازه های بتنی از دلایل عمده نیاز آنها به مقاوم سازی است. از این رو در این مقاله، مقاوم سازی ستونهای بتن مسلح و از میان شیوه های مختلف مقاوم سازی، روش پوشش دادن ستون با ورقهای فولادی مد نظر قرار گرفته و تأثیر محصورشدگی بتن بر رفتار ستون، به ویژه اندرکنش بارمحوری-لنگر خمشی مورد بررسی قرار گرفته است.

مقاوم سازی ستونهای بتنی به شیوه پوشش دادن با ورقهای فولادی علاوه بر افزایش مقاومت دارای محاسن دیگری نیز هست. اولین مزیت این روش فضای کمی است که ورقهای فولادی تقویتی اشغال می کنند. از سوی دیگر با محصورکردن بتن، مقاومت و شکل پذیری آن افزایش چشمگیری خواهد یافت. به این ترتیب این مجموعه دارای مقاومت خمشی بیشتری نسبت به ستون بتنی اولیه بوده و حداقل مقاومت فشاری آن، مجموع مقاومتهای فشاری جعبه فولادی و هسته بتنی خواهد بود. مکانیزم این بهبود مقاومت چنین است که به علت وجود هسته بتنی، از کمانش موضعی ورقهای فولادی به داخل مقطع جلوگیری می شود. از طرف دیگر گوشه های مقطع به علت اثرات متقابل المانهای متعامد، دارای سختی زیادی بوده که خود کاهش طول مؤثر کمانشی و گیرداری دو انتهای قطعه (ورق فولادی تقویتی) را به دنبال خواهد داشت. آزمایشات نشان می دهد که مقاومت کمانشی این نمونه ستونهای تقویت شده با ورق فولادی تقریباً ۲/۵ برابر جعبه فولادی بدون هسته بتنی است [۱].

از سوی دیگر با اعمال بار برستون و اضافه کردن تدریجی آن به حدی خواهیم رسید که در اثر بروز ترکهایی بسیار ریز در بتن، هسته بتنی افزایش حجم می یابد. این پدیده هنگامی رخ می دهد که تنش در بتن به بالاتر از $0.5f_c$ برسد [۲]. در روش

تقویت با ورق فولادی این افزایش حجم توسط پوسته فولادی مهار شده و در نتیجه بتن تحت تنشهای سه محوری قرار می گیرد که پیامد آن افزایش مقاومت فشاری هسته بتنی خواهد بود. در حقیقت در این فرایند پوسته بتنی مشابه فولادهای عرضی ولی به صورت پیوسته عمل می کند. این پدیده تا هنگامی ادامه دارد که پوسته فولادی رو به بیرون صفحه کمانش موضعی کرده و بتن و پوسته فولادی در آن نقطه از مقطع دچار تخریب شوند. نکته قابل ذکر در این فرایند افزایش چشمگیر شکل پذیری ستون است که استفاده از این نوع مقطع را برای شرایط مقابله با زلزله مفیدتر می سازد.

با توجه به موارد ذکر شده، نموداراندرکنش بارمحوری-لنگر خمشی چند نمونه ستون بتن مسلح و ستون بتن مسلح تقویت شده با ورقهای فولادی براساس معادله های تعادل متعارف و روش پیشنهادی ارائه و مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

لازم به توضیح است که در گذشته، پژوهشگران دیگری از جمله ساتسیوگلو و همکاران [۳] در زمینه اثرات فولادهای عرضی بر رفتار ستونها و همچنین آسامی و همکاران [۴] در زمینه اثر ورقهای تقویتی فولادی بر ستونهای شامل جعبه فولادی آکنده از بتن تحقیقات گسترده ای انجام داده اند. اما تحقیقات زیادی در معادله با اثرات توأم ورقهای فولادی و فولادهای عرضی یا خاموتها بر ستونهای بتن مسلح تقویت شده با ورقهای فولادی صورت نگرفته است.

۲- رفتار مقطع ستونهای بتن مسلح

وجود فولادهای عرضی در ستون بتن مسلح علاوه بر افزایش مقاومت بتن، شکل پذیری بیشتر مقطع را نیز به دنبال خواهد داشت. اساس کار چنین است که در اثر فشار جانبی وارد بر بتن از طرف خاموتها، تنشهای یک محوری هسته، به سه محوری تبدیل خواهند شد که نتیجه آن افزایش مقاومت و شکل پذیری بتن خواهد بود. معادله زیر معرف اثر فشار جانبی بر مقاومت فشاری بتن است.

فشار در گوشه‌ها با وسط اضلاع متفاوت است، معادله بالا به صورت مستقیم قابل استفاده نخواهد بود و لازم است که فشار جانبی معادل در نظر گرفته شود. برای این منظور، ساتسیوگلو و همکاران [۳] معادله‌های زیر را برای محاسبه فشار معادل جانبی برای مقطع مربعی بتن مسلح پیشنهاد کردند.

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_{le} \quad (4)$$

$$f_{le} = k_2 f_l \quad (5)$$

$$f_l = \frac{\sum A_s f_y \sin \alpha}{sb} \quad (6)$$

$$k_1 = 6.7(f_{le})^{-0.17} \quad (7)$$

$$k_2 = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b}{s}\right)\left(\frac{b}{s_1}\right)\left(\frac{1}{f_l}\right)} \leq 1.0 \quad (8)$$

که در این معادله‌ها f_{cc} مقاومت فشاری بتن محصور شده، f_{co} مقاومت فشاری بتن محصور نشده، f_{le} فشار جانبی معادل، A_s سطح مقطع فولادهای عرضی در مقطع، α زاویه بین خاموتها با محور عرضی مقطع، s فاصله خاموتها، b عرض مقطع و s_1 فاصله‌ی دو فولاد طولی مجاور هم هستند. با به دست آوردن مقدار f_{cc} و کرنشهای متناظر بر اساس معادله‌های زیر، می‌توان نمودار تنش-کرنش بتن را رسم کرد، شکل (۱).

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{01}(1 + 5k) \quad (9)$$

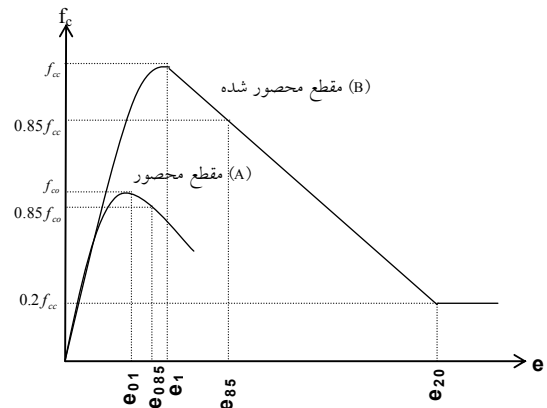
$$k = k_1 \frac{f_{le}}{F_{co}} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{85} = 260\rho\varepsilon_1 + \varepsilon_{085} \quad (11)$$

$$\rho = \frac{\sum A_s}{sb} \quad (12)$$

در معادله‌های بالا، A_s سطح مقطع فولادهای عرضی است. چنانچه اطلاعات تجربی در مورد مقادیر ε_1 و $\varepsilon_{0.85}$ در اختیار نباشد، می‌توان این دو مقدار را برای بتن‌های معمولی به ترتیب برابر 0.002 و 0.0038 در نظر گرفت. باید اضافه کرد که قسمت غیر خطی اولیه نمودار (B) در شکل (۱)، از معادله زیر به دست می‌آید [۳]:

$$f_c = f_{cc} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \right)^2 \right]^{1/(1+2k)} \leq f_{cc} \quad (13)$$



شکل ۱- (A) روش کلاسیک بدون اثرات محصورشدگی
(B) روش پیشنهادی با اثرات محصورشدگی

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_l \quad (1)$$

که در آن f_{cc} مقاومت فشاری بتن محصور شده، f_{co} مقاومت فشاری بتن محصور نشده، f_l فشار جانبی و k_1 ضریب افزایش مقاومت است. مقدار ضریب k_1 به ضریب پواسون بتن بستگی دارد و مقدار آن از معادله زیر به دست می‌آید [۳].

$$k_1 = \frac{1-\nu}{\nu} \quad (2)$$

از آنجا که مقدار k_1 برای بتن‌های مختلف و همچنین در فشارهای متفاوت عددی ثابت نیست، پژوهشگران معادله‌های دیگری نیز برای مقدار k_1 پیشنهاد کرده‌اند. از جمله معتبرترین آن، معادله تجربی ریچارت و همکاران [۵] است که به صورت زیر ارائه شده است.

$$k_1 = 6.7(f_l)^{-0.17} \quad (3)$$

توضیح اینکه، معادله فوق با نتایج آزمایشهایی که دیگر پژوهشگران از جمله بالمر [۶] و ساتو و آیبوشی [۷] انجام داده‌اند تطابق نسبی خوبی دارد و مورد تأیید قرار گرفته است.

همچنین باید اضافه کرد که معادله (۳) تنها برای مقاطع با فشار جانبی یکنواخت کاربرد دارد. به عنوان مثال در مقطع دایره‌ای شکل که فشار جانبی ناشی از پوشش فولادی و یا فولادهای عرضی، یکنواخت است این معادله پاسخهای قابل قبولی می‌دهد، ولی در مقاطعی نظیر مقطع مربعی شکل که فشار جانبی یکنواخت نبوده و

جدیدی که اثرات توأم جعبه فولادی و فولادهای عرضی را در نظر بگیرد، ارائه شود.

اکنون اگر از معادله‌های (۱۴) و (۱۵) مقادیر فشار جانبی ناشی از جعبه فولادی وارد بر هسته بتنی به دست آید و از معادله‌های (۵) تا (۸) فشار جانبی ناشی از فولادهای طولی و عرضی وارد بر هسته بتنی محاسبه شود، با رویهم‌گذاری این فشارهای جانبی معادله‌های زیر به دست خواهد آمد:

$$k_1 = 6.7(f_{le} + f_{rp})^{-0.17} \quad (17)$$

$$f_{cc} = f_{co} + k_1(f_{le} + f_{rp}) \quad (18)$$

$$k = \frac{k_1(f_{le} + f_{rp})}{f_{co}} \quad (19)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{01}(1 + 5k) \quad (20)$$

$$\varepsilon_{85} = 260\rho\varepsilon_1 + \varepsilon_{085} \quad (21)$$

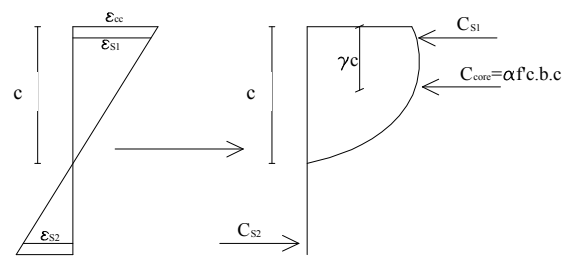
$$\rho = \frac{\sum A_s}{bs} + \frac{2t}{b} \quad (22)$$

نمودار تنش-کرنش مقاطع محصورشده ستونهای بتنی مسلح تقویت شده با صفحه‌های فولادی را می‌توان با استفاده از معادله‌های زیر در بازه‌های کرنش داده شده و با فرض کنترل لغزش بین ورق فولادی و بتن به دست آورد.

$$\begin{cases} f_c = f_{cc} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \right)^2 \right]^{1/(1+2k)} & 0 < \varepsilon_c < \varepsilon_1 \\ f_c = f_{cc} + \frac{0.15f_{cc}}{\varepsilon_{85} - \varepsilon_1} (\varepsilon_1 - \varepsilon_c) & \varepsilon_1 < \varepsilon_c < \varepsilon_{20} \\ f_c = 0.2f_{cc} & \varepsilon_{20} < \varepsilon_c \end{cases} \quad (23)$$

۵- اندرکنش بارمحوری-لنگر خمشی ستون

با توجه به مطالب ذکر شده در بخشهای قبلی، در ادامه نموداراندرکنش بارمحوری-لنگر خمشی چند نمونه مقطع ستون بتنی مسلح و بتن مسلح تقویت شده با ورق فولادی با استفاده از روش سعی و خطا ارائه می‌شود. مراحل این فرایند به این ترتیب است که با فرض صفحه باقی ماندن مقطع در قبل و بعد از بارگذاری و انتخاب یک کرنش فرضی برای آخرین تار ناحیه فشاری، محل تار خشی تعیین می‌شود. سپس با استفاده از این یافته و برقراری تعادل، درستی انتخاب فرض محل تار خشی بررسی می‌شود.



شکل ۲- نمودار تنشها و کرنشها در مقطع

۳- رفتار بتن در ستون جعبه‌ای فولادی آکنده از بتن

اکنون ستون جعبه‌ای فولادی آکنده از بتن بدون فولادهای طولی و عرضی مورد بررسی قرار می‌گیرد. براساس آخرین تحقیقات انجام شده توسط آسامی و همکاران [۴]، برای بتن‌های با مقاومت فشاری ۲۰ تا ۵۰ Mpa معادله‌های زیر که با نتایج آزمایشگاهی تقارب بیشتری دارد ارائه شده است:

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-v^2)F_y}{4\pi^2 E_s}} \quad (14)$$

$$f_{rp} = -6.5R \frac{(f'_c)^{1.46}}{F_y} + 0.12(f'_c)^{1.03} \quad (15)$$

$$f_{cc} = f_{co} + mf_{rp} \quad (16)$$

در این معادله‌ها f_{rp} فشار جانبی وارد از طرف پوسته به هسته بتنی و m ضریبی بین ۴ تا ۶ و تابعی از نسبت ابعاد و خواص فیزیکی مواد خواهد بود. در مقاطع جعبه فولادی آکنده از بتن، m برابر ۴ پیشنهاد شده است.

۴- معادله‌های پیشنهادی برای رفتار ستون بتنی مسلح

تقویت شده با ورق فولادی

هنگامی که بحث مقاوم‌سازی ستون مطرح می‌شود، ستون بتنی همراه با فولادهای طولی و عرضی مقطع همراه با جعبه فولادی محصورکننده مورد نظر خواهد بود. تا کنون هیچ یک از پژوهشها پاسخگوی اثرات محصورشدگی توأم جعبه فولادی و فولادهای عرضی نیستند. در این مقاله سعی بر آن است که با ترکیب معادله‌های کلاسیک و پژوهشهای گذشته، معادله‌های

جدول ۱ - مشخصات مصالح نمونه‌های مورد بررسی

| مصالح | E (MPa) | f _y (MPa) | f _c (MPa) |
|-------------------|---------|----------------------|----------------------|
| بتن | ۲۵۰۰۰ | - | ۲۵ |
| فولادهای طولی | ۲۰۰۰۰۰ | ۳۰۰ | - |
| فولادهای عرضی | ۲۰۰۰۰۰ | ۳۰۰ | - |
| ورق فولادی تقویتی | ۲۰۰۰۰۰ | ۲۴۰ | - |

ترتیب بیشترین مقدار لنگر در این بازه، لنگر متناظر با نیروی محوری فرض شده خواهد بود. با توجه به طولانی بودن فرایند فوق، برنامه رایانه‌ای برای تحلیلهای ذکر شده تهیه شده است.

در نامگذاری مقطعهای مورد مطالعه از شیوه زیر استفاده شده است. شکل عمومی نام یک مقطع به صورت bx-py است. در عبارت ذکر شده، x بعد مقطع بتنی مربع و y ضخامت ورق تقویتی بر حسب سانتیمتر می‌باشند. به عنوان مثال b30-p0 بیانگر یک ستون مربعی بتن مسلح به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متر بدون ورق تقویتی بوده و یا b30-p1.5 معرف ستون مربعی بتن مسلح، به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متر که با ورقهای تقویتی فولادی به ضخامت ۱۵ میلی‌متر است. مشخصات مصالح به کار گرفته شده در این نمونه‌ها که براساس مصالح موجود در ایران انتخاب شده‌اند، در جدول (۱) ارائه شده است.

لازم به توضیح است که برای نمودار تنش-کرنش بتن از معادله معروف هوگنستاد که در بخشهای قبل به تفصیل بیان شد استفاده شده و برای فولاد، یک نمودار دوخطی الاستوپلاستیک با چشم پوشی از محدوده سخت شدگی کرنشی در نظر گرفته شده است.

۶- نتایج

شکلهای (۳) تا (۶) نمودارهای اندرکنش بار محوری- لنگر خمشی تعدادی مقطع از وسط دهانه ستون هستند. وسط ستون بدین منظور انتخاب شده است که اثرات بازتوزیع لنگرها در محدوده اتصال تیر- ستون و کاهش و افزایش سختیها در فرایند

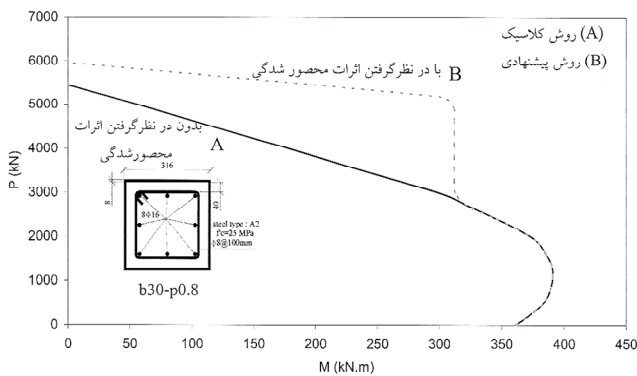
با یافتن نیروهای داخلی، شامل نیروی ناشی از مقاومت هسته بتنی (C_{core})، نیروهای ناشی از پوشش بتن (C_{end} و C_{side}) و نیروهای ناشی از آرماتورهای کششی و فشاری (C_s و T_s)، و برقراری معادله‌های تعادل مقطع (تعادل نیروهای داخلی با بار محوری خارجی)، با سعی و خطا و ادامه تکرارها مقدار c (محل تار خنثی) به دست می‌آید. سپس با لنگرگیری حول میان تار مقطع، مقدار لنگر مقاوم مقطع متناظر با این نیروی محوری تعیین می‌شود.

$$\alpha = \frac{\int_0^{\epsilon_c} f_c d\epsilon}{f'_c \epsilon_c} \quad (24)$$

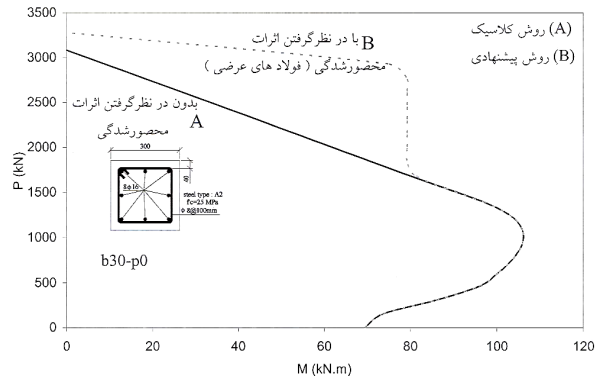
$$\gamma = 1 - \frac{\int_0^{\epsilon_c} \epsilon f_c d\epsilon}{\alpha f'_c (\epsilon_c)^2} \quad (25)$$

سؤالی که مطرح می‌شود این است که این فرایند تا چه مرحله ای ادامه خواهد داشت. به عبارت دیگر بتن تا چه کرنشی مقاومت خواهد کرد. در پاسخ باید گفت که بر طبق تحقیقات انجام شده، مقدار کاملاً مشخصی برای این حد وجود ندارد. معمولاً آیین‌نامه‌ها برای طراحی، این مقدار را در حدود ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۰۳۵ در نظر می‌گیرند. اگر چه مقدار کرنش نهایی بتن به ویژه بتن‌های با مقاومت فشاری پایین و بتن‌های محصور شده تا ۰/۰۰۸ خواهد رسید. به عنوان مثال آیین‌نامه‌ی بتن ایران (آبا) این مقدار را ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۰۸ در نظر گرفته و در طراحی‌ها مقدار ۰/۰۰۳ را برگزیده است.

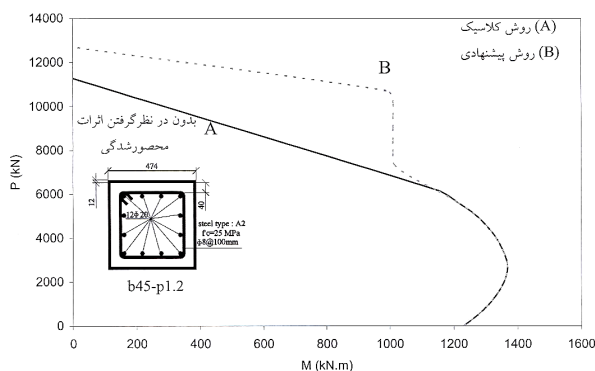
در این پژوهش، با توجه به مبحث محصورشدگی و همچنین بررسی رفتار مقطع از شروع بارگذاری تا حد نهایی، کرنش نهایی بتن ۰/۰۰۷ در نظر گرفته شده است. به این



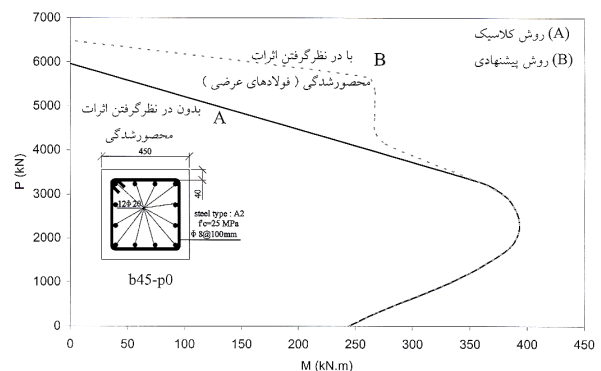
شکل ۴ - نمودار اندرکنش بار محوری- لنگر خمشی نمونه b30-p0.8
محصور شده توسط فولادهای عرضی و ورق فولادی



شکل ۳ - نمودار اندرکنش بار محوری- لنگر خمشی نمونه b30-p0
محصور شده توسط فولادهای عرضی



شکل ۶ - نمودار اندرکنش بار محوری- لنگر خمشی نمونه b45-p1.2
محصور شده توسط فولادهای عرضی و ورق فولادی



شکل ۵ - نمودار اندرکنش بار محوری- لنگر خمشی نمونه b45-p0
محصور شده توسط فولادهای عرضی

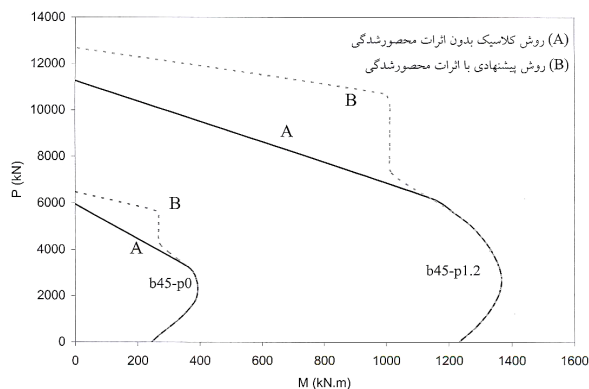
محدوده شکست مواد، (بار محوری بیش از بار بالانس) در روشهای کلاسیک محافظه کارانه تخمین زده می‌شوند. این امر در شرایطی که لنگر اعمالی به ستون و یا خروج از مرکزی بارهای محوری زیاد باشد احتمالاً برای ستونهای کناری که معمولاً در چنین حالتی قرار می‌گیرند، قابل چشم پوشی است ولی برای ستونهای میانی که بار محوری نسبتاً زیاد و لنگر خمشی نسبی کمتری دارند قابل چشم پوشی نخواهد بود. بازه این تفاوتها در شکلهای (۴) و (۶) که اثرات محصورشدگی بیشتر است، تا حدود ۷۵٪ لنگر نهایی دیده می‌شود.

موارد ذکر شده می‌تواند ریشه در معادله پیشنهادی هوگنستاد داشته باشد. در این نظریه با توجه به شکل (۱)، بعد از یک کرنش مشخص (ϵ_{20})، مقدار تنش ثابت می‌شود. این در حالی است که در بعضی از آیین نامه‌ها از اثرات محصورشدگی

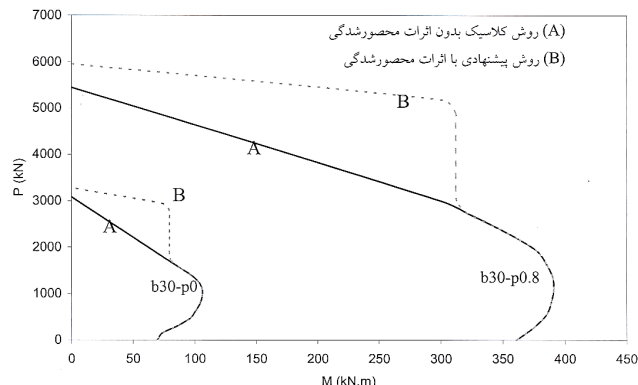
بارگذاری و سایر پارامترهای مؤثر براندرکنش بار محوری- لنگر خمشی که مورد مطالعه این پژوهش نیستند، حذف شوند. در این نمودارها ضرایب کاهش مقاومت نیز به کار گرفته نشده‌اند.

شکلهای (۳) و (۵) نمودارهای اندرکنش بار محوری- لنگر خمشی مقطع بتن آرمه بدون ورق فولادی است. نمودار A معرف رفتار ستون مسلح به روش کلاسیک و بدون در نظر گرفتن اثرات محصورشدگی و نمودار B رفتار ستون با اعمال اثرات فولادهای عرضی است.

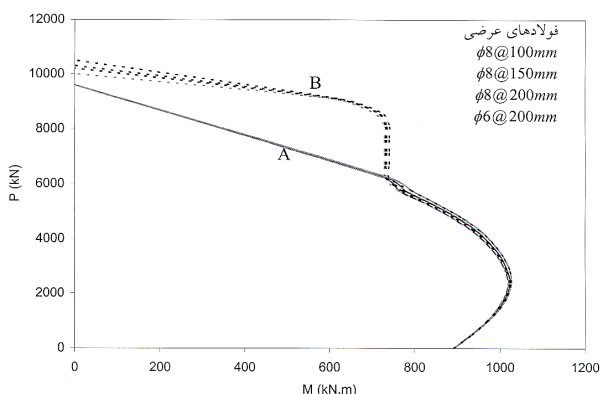
در نمودار B، زمانی که در محدوده صفر تا حدود ۷۰٪ لنگر نهایی، ستون تحت اثر بارهای اعمالی قرار می‌گیرد، روند کاهش بار محوری متناظر با لنگر مقاوم مشابه روش کلاسیک نیست. این بدان معناست که مقاومت ستونهای بتن آرمه در



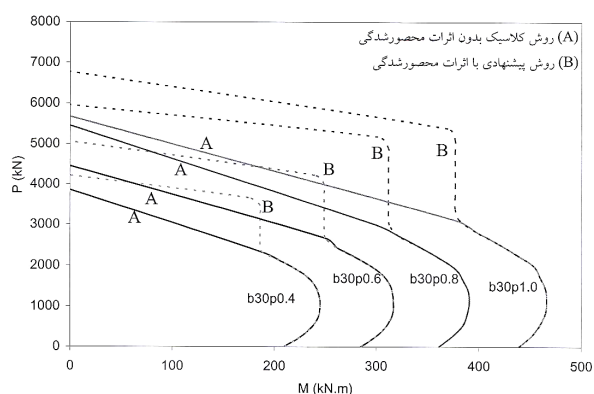
شکل ۸ - نمودار اندرکنش بار محوری - لنگر خمشی نمونه های b45-p0 و b45-p1.2



شکل ۷ - نمودار اندرکنش بار محوری - لنگر خمشی نمونه های b30-p0 و b30-p0.8



شکل ۱۰ - نمودار اندرکنش بار محوری - لنگر خمشی نمونه های b45-p0.8 با فولادهای عرضی متفاوت



شکل ۹ - نمودار اندرکنش بار محوری - لنگر خمشی نمونه های b30-p0.4, p0.6, p0.8, p1.0

فولادی تقویتی بر مقاومت مقطع ارائه شده است. در این نمودار با ثابت ماندن مشخصات مقطع، تنها ضخامت صفحه تقویتی تغییر می‌کند.

نمودار ارائه شده در شکل (۱۰) بیانگر رفتار اندرکنشی نمونه‌هایی است که تفاوتشان تنها در میزان فولادهای عرضی تقویتی است. در این نمودارها اثر محصورشدگی به خوبی در بارهای محوری نمایان است.

۷- نتیجه گیری

۱- روش به کار گرفته شده در آیین نامه‌ها، در محدوده شکست مواد ستونها، چه در شرایط استفاده از ورقهای تقویتی و چه در شرایط استفاده تنها از فولادهای عرضی بسیار محافظه کارانه است و از آنجا که بیشترین تعداد

صرف نظر می‌شود. از سوی دیگر همان گونه که در این نمودارها آشکار است، مقطع دارای بیشترین مقاومت خمشی در بار محوری حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد بار محوری نهایی مقطع است.

به منظور مطالعه جامعتر و مقایسه بهتر، نمودارهای مربوط به اثر صفحه‌های تقویتی بر رفتار عضو در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده که از تلفیق شکل‌های (۳) تا (۶) حاصل شده‌اند.

همان طور که در شکل‌های (۷) و (۸) دیده می‌شود مقاومت خمشی ستونهای بتن مسلح تقویت شده با صفحه فولادی نسبت به ستون بتن مسلح بسیار بیشتر است، در حالی که افزایش مقاومت محوری آنچنان چشمگیر نیست. به عنوان مثال، مقاومت خمشی در این نمونه‌ها در اثر مقاوم سازی ۳/۸ برابر شده است، در حالی که مقاومت فشاری آن حدود ۱/۸ برابر شده است.

نمودار شکل (۹) که در ادامه آمده است، تأثیر ورقهای

به حداکثر مقدار می‌رسد. تعداد این نوع ستونها در سازه‌های بلند و با مقاطع ظریف قابل توجه است.

۴- مقاوم سازی ستونهای بتن مسلح به شیوه پوشش دادن با ورقهای فولادی، یکی از روشهای کارآمد و آسان مقاوم سازی است. از مزایای بارز این شیوه، در دسترس بودن مصالح تقویتی و سهولت اجرای آن است. ضمن اینکه محصورکردن هسته بتنی باعث افزایش مقاومت ستون و کنترل شکل پذیری آن نیز می‌شود.

۵- نمودارهای ارائه شده می‌توانند نمونه‌هایی برای اصلاح روشهای موجود به‌ویژه در مقاوم سازی سازه‌ها باشند، ولی یادآوری می‌شود که در حال حاضر امکان استفاده کاربردی به استناد آنها وجود ندارد.

ستونهای سازه‌ها را ستونهای میانی که در آنها نسبت بار محوری به لنگر خمشی زیاد است، تشکیل می‌دهند، بنابراین نیاز به بازنگری در معادله‌های و منحنیهای تداخلی P-M ستونها، ضروری به نظر می‌رسد.

۲- در صورت اعمال بار محوری بسیار زیاد، اختلاف میان روش کلاسیک و روش پیشنهادی به تدریج و به مقدار کمی کاهش می‌یابد.

۳- در ستونهای با بار محوری متوسط و لنگر خمشی نسبتاً زیاد و در ستونهای لاغر و بلند که به دلیل اثرات $P - \Delta$ باید در یک بار محوری مشخص لنگر بیشتری را تحمل کنند و همچنین افزایش توأم ϕ و M نسبت به ستونهای کوتاه مشابه، اختلاف بین روش کلاسیک و روش دقیق پیشنهادی

مراجع

1. Shanmugam, N. E., Lakshmi, B., and Uy, B., "An Analytical Model for Thin-Walled Steel Box Columns with Concrete in-fill," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 24, pp.825-838, 2002.
2. Viest, I.M., Colaco, J.P., Furlong, R.W., Griffiths, L.G., Loring, R.T., and Wyllie, L.A., "Composite Construction Design for Buildings," 1997.
3. Saatcioglu, M., and Razvi, S.R., "Strength and Ductility of Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, Vol.6, pp.1590-1607, 1992.
4. Susantha, K. A. S., Ge, H., and Usami, T., "Uniaxial Stress-Strain Relationship of Concrete Confined by Various Shaped Steel Tubes," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 23, pp.1331-1347, 2001.
5. Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L., "A Study of the Failure of Concrete Under Combined Compressive Stresses," *Bulletin No. 190, Univ. of Illinois Engrg. Experimental Station, Urbana, Ill*, 1928.
6. Balmer, G. G., "Shearing Strength of Concrete Under High Triaxial Stress-Computation of Mohr's Envelope as a Curve," *Structural Research Lab. Report No. SP-23, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Co*, 1949.
7. Sato, T., and Ibushi, K., "Effect of Confinement on Ductile Behavior of Reinforced Concrete Short Columns," *Trans. of the Japan Concrete Inst.*, 10(5), 337-344, 1988.
8. Yasuyoshi, Miyauchi, "Studies on Repair and Strengthening Methods of Damaged Reinforced Concrete Columns," *Cement and Concrete Composites* 22, pp.81-88, 2000.
9. Yiao, Y., Wu, H., "Retrofit of Reinforced Concrete Columns Using Partially Stiffened Steel Jackets," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No.6, pp.725-732, 2003.