بررسی تأثیر آرماتور فشاری بر مقاومت خمشی مقاطع بر اساس ACI 318-05

رضا مرشد[1] و ابوالفضل اسلامی[2]

چکیده

بر اساس ویرایش‌های قبل از سال ۲۰۰۲ آیین‌نامه ACI 318 در مقاطع خمشی معمولی تا قبل از رسیدن به آرماتور کششی حداکثر، استفاده از آرماتور فشاری ضرورتی نداشته و به کار بردن آن برای کمک به مقاومت خمشی مقطع غیراقتصادی است. با تغییر نحوه‌ی تعیین ضریب کاهش مقاومت خمشی از ویرایش‌های سال ۲۰۰۲ به بعد، برای مقاطعی که از ناحیه‌ی کنترل شده با کشش خارج و به ناحیه‌ی انتقالی وارد می‌شوند، این ضریب کاهش می‌یابد. در این گونه موارد استفاده از آرماتور فشاری می‌تواند مقطع را به ناحیه‌ی کنترل شده با کشش بازگرداند و به طور غیر مستقیم با افزایش مقدار ضریب کاهش مقاومت، تأثیر قابل توجهی روی مقاومت خمشی مقطع داشته باشد که استفاده از آن را از نظر اقتصادی نیز توجیه می‌کند. در این تحقیق مسأله فوق مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد و پیشنهاداتی جهت چگونگی استفاده بهینه از آرماتور ارائه می‌گردد.

کلید واژه ها: آرماتور فشاری، مقاومت خمشی، ضریب کاهش مقاومت، مقاطع کنترل شده با کشش، مقاطع کنترل شده با فشار

۱– مقدمه

استفاده از آرماتور فشاری علاوه بر کمک به ظرفیت خمشی مقطع، می‌تواند باعث افزایش شکل‌پذیری و کاهش تغییر مکان خزشی گردد. آن‌چه از نظر اقتصادی می‌تواند توجیه‌کننده‌ی کاربرد آرماتور فشاری گردد، تأثیر آن روی افزایش مقاومت خمشی مقطع است. در محاسبه‌ی مقاومت خمشی مقاطع بر اساس ویرایش‌های قبل از سال ۲۰۰۲ آیین‌نامه[۱]، تا قبل از رسیدن آرماتورهای کششی به نسبت آرماتور حداکثر، درصد افزایش مقاومت در مقایسه با درصد افزایش آرماتور فشاری اندک بوده و در نتیجه استفاده از آرماتور فشاری با وجود تأثیرات مثبت روی رفتار اعضای خمشی، توجیه اقتصادی ندارد. استفاده از آرماتور فشاری در این شرایط تنها برای مقاطع با آرماتور کششی بالاتر از نسبت حداکثر، الزامی و رایج است. آیین‌نامه ACI 318 از ویرایش سال ۲۰۰۲ به بعد تغییرات اساسی در نحوه‌ی تعیین ضرایب کاهش مقاومت در نظر می‌گیرد که با توجه به آن مقدار ضریب کاهش مقاومت در فاصله‌ی بین ناحیه‌ی کنترل شده با کشش و ناحیه‌ی کنترل شده با فشار (ناحیه‌ی انتقالی) به تدریج کاهش می‌یابد[۲]. این تغییر در ضریب کاهش مقاومت به گونه‌ای است که پس از خروج از ناحیه‌ی کنترل شده با کشش با افزایش مقدار آرماتور کششی، مقاومت خمشی مقطع تقریباً بدون تغییر می‌ماند.

مقاله در تاریخ ۸۶/۱۱/۱۲ دریافت و در تاریخ ۸۶/۱۲/۲۰ به تصویب نهایی رسید.

[1] **استادیار**، دانشکده عمران، دانشگاه یزد (نویسنده مسئول)
پست الکترونیکی: morshed@yazduni.ac.ir
[2] **فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد سازه**، دانشگاه یزد

۲- مقاومت خمشی مقاطع مستطیلی بدون آرماتور فشاری

بر اساس آیین‌نامه ACI 318-05 برای اعضای غیر پیش‌تنیده و اعضای پیش‌تنیده‌ای که تحت اثر بار محوری ضریب‌دار کم‌تر از $0.1f'_cA_g$ قرار دارند، کرنش کششی خالص در دورترین آرماتور کششی مقطع، ε_t، در لحظه‌ی محاسبه‌ی مقاومت اسمی آن نباید از ۰/۰۰۴ کم‌تر باشد($\varepsilon_t \geq 0.004$)[۳]. با توجه به شرط فوق با نوشتن معادله‌ی هم‌سازی کرنش‌ها و برقراری شرط تعادل نیروها نسبت حداکثر آرماتورهای کششی در یک مقطع بدون آرماتور فشاری، $\rho_{\max}$، به صورت رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۴، ۵].

$$\rho_{\max} = 0.364\beta_1 \frac{d_t}{d}\frac{f'_c}{f_y} \qquad (۱)$$

که در رابطه‌ی فوق d_t، فاصله‌ی دورترین تار فشاری بتن تا مرکز سطح دورترین لایه از آرماتورهای کششی و d، فاصله دورترین تار فشاری بتن تا مرکز سطح آرماتورهای کششی است. هم‌چنین f'_c مقاومت فشاری مشخصه‌ی بتن و f_y مقاومت تسلیم آرماتورهای کششی می‌باشد. ضریب β_1 ضریبی است که برای ارتباط عمق بلوک تنش مستطیلی معادل و عمق محور خنثی تعریف می‌شود.

با توجه به مطالب فوق و سایر شرایط تعیین شده در آیین‌نامه، با نوشتن معادله‌ی هم‌سازی کرنش‌ها و معادلات تعادل نیروها خواهیم داشت:

$$\frac{M_n}{bd^2} = \rho f_y\left(1 - 0.59\frac{\rho f_y}{f'_c}\right) \qquad (۲)$$

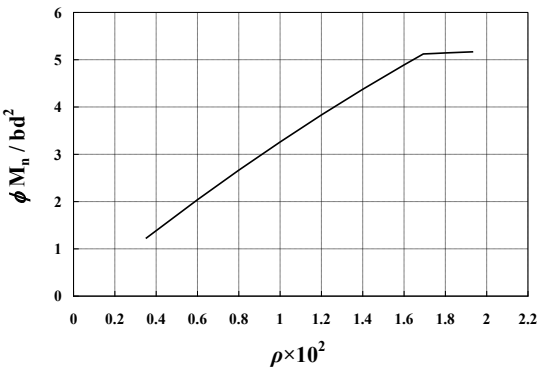
که در رابطه‌ی فوق b عرض مقطع مستطیلی و M_n، مقاومت خمشی اسمی مقطع بر حسب مگاپاسگال است [۴، ۵]. بر اساس آیین‌نامه ACI 318 مقطع خمشی باید طوری طراحی شود که مقاومت طراحی آن بیش‌تر از مقاومت مورد نیاز باشد[۳]، یعنی:

$$M_u \leq \phi M_n \qquad (۳)$$

در رابطه‌ی (۳)، M_u لنگر خمشی ضریب‌دار در مقطع و ϕ ضریب کاهش مقاومت است که مقدار آن بر اساس ویرایش‌های سال ۲۰۰۲ به بعد آیین‌نامه، به کرنش خالص کششی در دورترین آرماتورهای کششی وابسته است. برای تعیین ϕ، مقاطع به سه دسته‌ی مقاطع کنترل شده با کشش، مقاطع در ناحیه‌ی انتقالی و مقاطع کنترل شده با فشار تقسیم می‌شوند. اگر هنگامی که بتن فشاری به کرنش حدی ۰/۰۰۳ خود برسد، کرنش کششی خالص در دورترین آرماتور کششی مقطع، ε_t، کوچک‌تر یا مساوی حد کرنش کنترل شده با فشار باشد، مقطع به صورت کنترل شده با فشار در نظر گرفته می‌شود که در این حالت برای اعضای با آرماتور دورپیچ مقدار $\phi = 0.7$ و برای سایر اعضا $\phi = 0.65$ تعریف شده است. چنان‌چه کرنش کششی خالص در دورترین فولاد کششی حداقل برابر ۰/۰۰۵ بوده و بتن فشاری به مقدار کرنش حدی مفروض ۰/۰۰۳ برسد، مقطع به صورت کنترل شده با کشش در نظر گرفته می‌شود. ضریب کاهش مقاومت برای این مقاطع به صورت $\phi = 0.9$ تعیین شده است. مقاطعی که ε_t آن‌ها بین حد کرنش کنترل شده با فشار و ۰/۰۰۵ باشد، در یک ناحیه‌ی انتقالی قرار دارند و مقدار ضریب کاهش مقاومت آن‌ها با درون‌یابی بین حالات قبلی محاسبه می‌شود[۳]. چنان‌چه حداکثر نسبت آرماتورهای کششی یک مقطع را برای آن که در ناحیه‌ی کنترل شده با کشش قرار گیرد با ρ_{tcl} نمایش دهیم، با نوشتن معادله‌ی هم‌سازی کرنش‌ها به ازای $\varepsilon_t = 0.005$ و برقراری شرط تعادل نیروها در مقطع خواهیم داشت[۴]:

$$\rho_{tcl} = 0.85\times\frac{3}{8}\beta_1\frac{d_t}{d}\frac{f'_c}{f_y} \qquad (۴)$$

با توجه به این که بر اساس آیین‌نامه ACI 318 کرنش خالص کششی در دورترین آرماتور کششی در لحظه‌ی محاسبه‌ی مقاومت اسمی مقطع نباید از ۰/۰۰۴ کم‌تر باشد، مقاطع خمشی فقط می‌توانند در ناحیه‌ی کنترل شده با کشش و ناحیه‌ی انتقالی واقع شوند. شکل ۱ نمودار تغییرات مقاومت خمشی نهایی مقاطع مستطیلی در محدوده‌ی مجاز نسبت آرماتورهای کششی بدون آرماتور فشاری با فرض آن که آرماتورهای کششی تنها در یک ردیف قرار گیرند($d = d_t$)، را نشان می‌دهد. در این حالت نسبت آرماتوری که مقطع را در مرز ناحیه‌ی کنترل شده با کشش و ناحیه‌ی انتقالی قرار می‌دهد از رابطه‌ی (۴) برابر ۰/۰۱۶۹۳ به دست می‌آید.



شکل ۱ تغییرات مقاومت خمشی یک مقطع مستطیلی بدون آرماتور فشاری برای $f_y = 400MPa$ و $f'_c = 25MPa$

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بعد از ورود مقطع به ناحیه‌ی انتقالی با افزایش مقدار آرماتور، مقاومت خمشی نهایی مقطع تقریباً ثابت باقی می‌ماند. مسأله فوق برای تمامی آرماتورهای با مقاومت تسلیم متفاوت و بتن‌های با مقاومت فشاری مختلف مشاهده می‌گردد. این امر به دلیل کاهش تدریجی ضریب کاهش مقاومت با افزایش نسبت آرماتور در ناحیه‌ی انتقالی اتفاق می‌افتد. با چنین تعریفی از ضریب کاهش مقاومت در ویرایش سال ۲۰۰۲ به بعد آیین‌نامه ACI 318، بعد از ورود مقطع به ناحیه‌ی انتقالی، استفاده از آرماتور کششی بیش‌تر باعث افزایش مقاومت خمشی مقطع نشده و ورود به این ناحیه برای طراحی مقاطع از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست.

۳- اثر آرماتور فشاری روی مقاومت خمشی مقاطع

تأثیر استفاده از آرماتور فشاری در مقاطع خمشی با نسبت آرماتور کم‌تر از $\rho_{\max}$ بر اساس رابطه‌ی (۱)، در ناحیه‌ی کنترل شده با کشش و ناحیه‌ی انتقالی متفاوت خواهد بود.

۳-۱ مقاطع در ناحیه‌ی کنترل شده با کشش

برای مقاطعی که در ناحیه‌ی کنترل شده با کشش قرار می‌گیرند، استفاده از آرماتور فشاری باعث افزایش بازوی لنگر و در نتیجه افزایش مقاومت خمشی اسمی مقطع (و در نهایت مقاومت خمشی نهایی) می‌شود لکن، درصد این افزایش نسبت به درصد استفاده از آرماتور فشاری ناچیز بوده و با وجود سایر اثرات مثبتی که وجود آرماتور فشاری در عضو خواهد داشت[۵]، استفاده از آن را از نظر اقتصادی توجیه نمی‌کند. از دیگر اثرات اضافه شدن آرماتور فشاری برای مقاطع در این حالت، افزایش کرنش خالص کششی در آرماتورهای کششی است که به دلیل ثابت بودن مقدار ضریب کاهش مقاومت در ناحیه‌ی کشش حاکم، این افزایش تأثیری در مقدار این ضریب ندارد. به عنوان مثال یک مقطع مستطیلی با ابعاد $b = 300mm$، $d = 380mm$، $d' = 70mm$ (d': فاصله‌ی دورترین تار فشاری بتن از مرکزسطح آماتورهای فشاری) را در نظر می‌گیریم. برای مقطع فوق در صورتی که $f'_c = 25MPa$ و $f_y = 400MPa$ باشد و با فرض آن که آرماتورهای کششی در یک لایه قرار گیرند($d = d_t$)، مقدار آرماتور کششی حداکثر از رابطه‌ی (۱) برابر $A_{s,\max} = 2205mm^2$ و مقدار آرماتوری که مقطع را در مرز ناحیه‌ی کنترل شده با کشش قرار می‌دهد از رابطه‌ی (۴) برابر $A_{s,tcl} = 1930mm^2$ به دست می‌آید. ظرفیت خمشی نهایی این مقطع با آرماتور کششی $A_s = 1500mm^2$، برابر با $M_u = 179.7kN.m$ به دست می‌آید و درصورت استفاده از همین مقدار آرماتور فشاری (دو برابر شدن مقدار کل آرماتور در مقطع) مقاومت خمشی تنها $1.8kN.m$،یعنی نزدیک به یک درصد افزایش می‌یابد.

اگرپارامتر η را به صورت نسبت افزایش مقاومت به نسبت افزایش آرماتور در مقطع تعریف نموده و آن را ملاک ارزیابی اقتصادی مقاطع خمشی قرار دهیم، در مثال فوق این نسبت تنها برابر ۰/۰۱ به دست می‌آید که توجیه اقتصادی ندارد.

۳-۲ مقاطع در ناحیه‌ی انتقالی

با توجه به تعریف مقاطع در ناحیه‌ی انتقالی و کم‌ترین مقدار مجاز کرنش خالص کششی در دورترین آرماتور کششی، $\varepsilon_t = 0.004$، مقاطعی که کرنش خالص کششی آن‌ها در محدوده‌ی $0.004 \le \varepsilon_t < 0.005$ قرار می‌گیرند و یا به عبارت دیگر $\rho_{tcl} \le \rho \le \rho_{\max}$ باشد، درمحدوده‌ی ناحیه‌ی انتقالی قرار می‌گیرند. مقدار ضریب کاهش مقاومت در این حالت همان‌گونه که قبلاً نیز گفته شد با کاهش ε_t، کاهش می‌یابد و در نتیجه با افزایش آرماتور کششی در این ناحیه، مقاومت خمشی نهایی مقاطع تغییر چندانی

نمی‌یابد(به شکل ۱ مراجعه شود). برای مقاطع در این حالت استفاده از آرماتور فشاری از دو جهت باعث افزایش مقاومت خمشی نهایی آن‌ها می‌گردد: تأثیر اول همان اثر ذکر شده در بند ۳-۱ است که از طریق افزایش بازوی لنگرگیری منجر به افزایش ناچیز مقاومت خمشی اسمی (و در نهایت مقاومت خمشی نهایی) مقاطع می‌گردد و تأثیر دوم آرماتور فشاری در این حالت از طریق افزایش ε_t می‌باشد که باعث افزایش ضریب کاهش مقاومت در ناحیه‌ی انتقالی و در نتیجه افزایش مقاومت خمشی نهایی مقطع می‌گردد که تأثیر آن بسیار بیش‌تر از مورد اول است. در واقع استفاده از آرماتور فشاری برای مقاطع در ناحیه‌ی انتقالی، آن‌ها را به سمت ناحیه‌ی کشش حاکم به پیش می‌برد. با توجه به مطالب فوق، پیشنهاد می‌شود در حالتی که مقاطع در ناحیه‌ی انتقالی قرار می‌گیرند آن‌ها را به گونه‌ای طراحی نمود که همواره در مرز ناحیه‌ی کنترل شده با کشش قرار گیرند. بر مبنای این توصیه می‌توان مرز استفاده از آرماتورهای فشاری را برابر حداکثر نسبت آرماتورهای کششی برای آن که مقطع در ناحیه‌ی کشش حاکم قرار گیرد، ρ_{tcl}، تعریف نمود. حال چنان‌چه نسبت آرماتورهای کششی به دست آمده در طراحی یک مقطع، بزرگ‌تر از مقدار تعیین شده در رابطه‌ی (۴) باشد، بهتر است برای افزایش مقاومت خمشی مقطع از آرماتور فشاری استفاده نمود و مقطع را طوری طراحی نمود که به صورت کنترل شده با کشش عمل نماید. در این صورت استفاده از آرماتور بیش‌تر از نظر اقتصادی نیز توجیه‌پذیر است. برای بررسی مطالب فوق مقطع مستطیلی اشاره شده در بند قبلی در نظر گرفته شده است. مقاومت خمشی نهایی این مقطع برای سه مقدار متفاوت آرماتور کششی در ناحیه‌ی انتقالی به صورت زیر به دست می‌آید:

- $A_s = A_{s,tcl} = 1930mm^2 \rightarrow M_u = 221.8kN.m$
- $A_s = 2050mm^2 \rightarrow M_u = 222.5kN.m$
- $A_s = A_{s,\max} = 2205mm^2 \rightarrow M_u = 223.6kN.m$

همان‌گونه که از نمودار شکل ۱ نیز انتظار می‌رفت، مشاهده می‌شود که در مقطع فوق در طول ناحیه‌ی انتقالی با اضافه شدن ۱۴ درصد آماتور کششی، تنها ۰/۸ درصد به مقاومت خمشی نهایی مقطع اضافه شده است که مبین غیر اقتصادی بودن مقاطع خمشی طراحی شده در ناحیه‌ی انتقالی می‌باشد. در این حالت می‌توان به کمک آرماتورهای فشاری مقطع را به مرز ناحیه‌ی کنترل شده با کشش باز گرداند. در ادامه نحوه‌ی محاسبه‌ی مقدار آرماتور فشاری که می تواند مقطع را به مرز ناحیه‌ی کنترل شده با کشش بازگرداند، بیان می‌گردد. کرنش و تنش آرماتور فشاری به ترتیب با ε'_s و f'_s نشان داده می‌شود. با نوشتن معادلات هم‌سازی کرنش‌ها در مرز ناحیه‌ی کنترل شده با کشش خواهیم داشت:

$$\frac{\varepsilon_t}{0.003} = \frac{d_t - c}{c} \qquad (۵)$$

که با جایگزینی $\varepsilon_t = 0.005$ مقدار عمق محور خنثی، c، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$c = \frac{3}{8} d_t \qquad (۶)$$

$$\varepsilon'_s = 0.003 \times \frac{c - d'}{c} \qquad (۷)$$

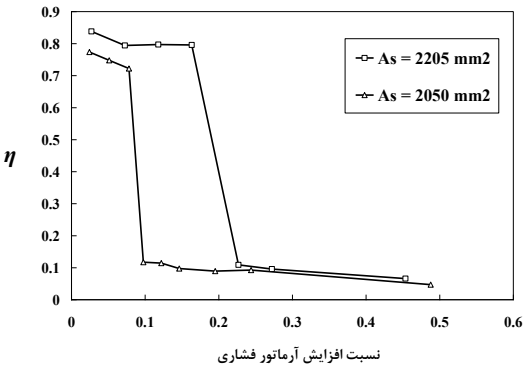
$$f'_s = E_s \varepsilon'_s \qquad (۸)$$

با نوشتن شرط تعادل نیروها در این حالت مقدار آرماتور فشاری که مقطع را در مرز ناحیه‌ی کنترل شده با کشش قرار می‌دهد، A'_s، از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\sum F = 0 \rightarrow A_s f_y = 0.85 f'_c ab + A'_s f'_s \qquad (۹)$$

در رابطه‌ی (۹)، a عمق بلوک مستطیلی تنش معادل است که به صورت $a = \beta_1 c$ تعریف می‌شود. به منظور بررسی اثر آرماتور فشاری در افزایش مقاومت خمشی مقطع در دو حالت $A_s = A_{s,\max} = 2205mm^2$ و $A_s = 2050mm^2$، مقادیر متفاوت آرماتور فشاری به مقطع مورد بررسی اضافه گردید. شکل ۲ رابطه‌ی نسبت افزایش مقاومت خمشی نهایی به نسبت افزایش آرماتور، η، را به ازای مقادیر مختلف نسبت افزایش آرماتور فشاری نشان می‌دهد. در مثال مورد نظر در حالاتی که $A_s = A_{s,\max} = 2205mm^2$ و $A_s = 2050mm^2$، مقدار آرماتور فشاری که می‌تواند مقطع را در مرز ناحیه‌ی کنترل شده با کشش قرار دهد، از رابطه‌ی (۹) به ترتیب برابر $A'_s = 360mm^2$ و $A'_s = 160mm^2$ به دست می‌آید که این مقادیر آرماتور فشاری همان نقاط پرش منحنی‌های شکل ۲ هستند که به ازای مقادیر آرماتور فشاری بزرگ‌تر از آن‌ها مقطع وارد ناحیه‌ی کنترل شده با کشش می‌گردد. همان‌گونه که در بخش ۲-۱ نیز گفته شد و از نمودارهای شکل ۲ مشاهده

می‌شود، مقدار η پس از ورود به ناحیه‌ی کنترل شده با کشش سریعاً کاهش می‌یابد که نشان دهنده‌ی غیر اقتصادی بودن افزایش آرماتور فشاری پس از ورود به ناحیه‌ی کنترل شده با کشش است و مرز این ناحیه را می‌توان مبنای طرح اقتصادی آرماتور فشاری قرار داد.



شکل ۲ تغییرات η به ازای مقادیر مختلف نسبت افزایش آرماتور فشاری

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس ویرایش‌های سال ۲۰۰۲ به بعد آیین‌نامه ACI 318 با ورود به ناحیه‌ی انتقالی ضریب کاهش مقاومت خمشی مقاطع به تدریج کاهش می‌یابد و در نتیجه مقاومت خمشی نهایی مقاطع در این ناحیه با اضافه شدن آرماتورهای کششی تقریباً ثابت می‌ماند. با افزودن آرماتور فشاری در مقاطعی که در ناحیه‌ی انتقالی قرار می‌گیرند، مقاطع به ناحیه‌ی کنترل شده با کشش باز می‌گردند و در نتیجه به علت افزایش ضریب کاهش مقاومت، مقاومت خمشی افزایش می‌یابد. میزان این افزایش مقاومت به گونه‌ای است که استفاده از آرماتور فشاری برای مقاطع قرار گرفته در ناحیه‌ی انتقالی را از نظر اقتصادی توجیه می‌کند. بر اساس بررسی انجام شده در این تحقیق، مقدار بهینه آرماتور فشاری به میزانی است که مقطع را در مرز ناحیه‌ی کنترل شده با کشش نگه دارد. در این صورت مقاطع به صورت اقتصادی و با حداکثر مقدار ضریب کاهش مقاومت طراحی می‌شوند.

مراجع

[1] ACI 318-99, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and commentary (ACI 318RM-99)*, American Concrete Institute, MI, USA, **2002**.

[2] ACI 318-02, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-02) and commentary (ACI 318R-02),* American Concrete Institute, MI, USA, **2002**.

[3] ACI 318-05, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-05) and commentary (ACI 318R-05)*, American Concrete Institute, MI, USA, **2005**.

[۴] مستوفی نژاد داود، *سازه های بتن آرمه*، جلد اول، انتشارات ارکان، چاپ دوم ۱۳۸۴.

[5] Mac Gregor, James G., *Reinforced Concrete, Mechanics and Design,* Fifth Edition, Prentice-Hall International, Inc., New Jersey, **2002**.