

شبیه‌سازی رفتار گهواره‌ای مقید برای ستون‌های بتنی مسلح به میلگرد ساده تحت بار افزاینده‌ی جانبی

محمد عرب پناهان^۱، محمدصادق معرفت^۲، محمد خان محمدی^۳
دانشکده‌ی مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

arabpanahan@yahoo.com
mmarefat@ut.ac.ir
mkhan@ut.ac.ir

خلاصه

ساختمان‌های بتنی مسلح به میلگرد ساده، یکی از انواع ساختمان‌های قدیمی می‌باشند که عموماً برای تقاضاهای ثقلی طراحی شده‌اند. در ستون‌های بتنی با میلگرد ساده که تحت اثر بار جانبی قرار دارند، لغزش قابل توجه میلگرد در بتن، باعث بروز رفتار گهواره‌ای مقید می‌شود. به دلیل شکل‌گیری این مود رفتاری، تا قبل از دریافت فروریزش، خروج از مرکزیت بار محوری در ستون‌ها باعث افزایش پایداری و مقاومت جانبی ستون می‌گردد. در این مقاله مود رفتاری گهواره‌ای مقید برای این نوع ستون‌ها در محیط MATLAB مدلسازی و اثر آن روی تغییر مکان جانبی با مدنظر قرار دادن سه جزء اصلی آن یعنی لغزش، خمش و برش در نظر گرفته شده‌است. رفتار خمشی با توسعه‌ی یک مدل مبتنی بر مفصل پلاستیک و رفتار لغزشی با استفاده از یک مدل تحلیلی کالیبره شده بر اساس آزمایش‌های بیرون کشیدگی شبیه‌سازی گردیده‌اند. در نهایت مدل تئوریک با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و معتبرسازی شده‌اند.

کلمات کلیدی: ستون، میلگرد ساده، رفتار گهواره‌ای مقید، لغزش

۱. مقدمه

یکی از انواع ساختمان‌های بتن‌آرمه‌ی موجود، ساختمان‌های بتنی مسلح به میلگرد ساده می‌باشند که عمدتاً پیش از سال ۱۹۷۰ مرسوم بوده‌اند. با توجه به اثبات آسیب‌پذیری آنها، تقاضا برای ارزیابی لرزه‌ای و بهسازی اینگونه سازه‌ها رشد قابل توجهی داشته و رفتار مکانیکی آنها مرکز توجه بسیاری از محققین واقع شده‌است.

از آنجاییکه ستون‌ها مهمترین اعضا در سازه‌های قابی شکل می‌باشند شناخت رفتار آنها در پیش‌بینی شکل‌پذیری، مقاومت، سختی و انرژی‌پذیری سازه تأثیر بسزایی خواهد داشت. با توجه به کمبود آزمایش‌های صورت گرفته بر روی ستون‌های بتنی مسلح به میلگرد ساده، پیش از ارزیابی رفتاری، لازم است که مدلی عددی با توجه به خصوصیات فیزیکی و مشاهدات آزمایشگاهی به جهت شناخت رفتار لرزه‌ای حاکم بر این نوع ستون‌ها تدوین گردد.

مطالعات اولیه‌ی انجام شده بر این نوع از سازه‌ها، بیشتر پیرامون پیوستگی میلگرد ساده و بتن بوده‌اند. شروع جدی تحقیقات آزمایشگاهی بر روی پیوستگی بین بتن و میلگرد ساده را می‌توان به آبرامز^۴ [۱] نسبت داد. وی با انجام آزمایش‌های بیرون کشیدگی^۵ روی نمونه‌های مختلف، دریافت که نیروی پیوستگی تا قبل از رخداد لغزش از طریق مکانیزم چسبندگی و بعد از آن به وسیله‌ی عملکرد اصطکاکی بین بتن و میلگرد صورت می‌پذیرد.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله در دانشگاه تهران

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

^۳ استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

^۴ Abrams

^۵ Pullout

دسته‌ی دیگر از مطالعات، مربوط به شناخت رفتار اعضای بتنی با میلگرد ساده می‌باشد. معرفت و همکاران [۲] با آزمایش‌هایی روی تیرهای بتنی مسلح به میلگرد ساده مشاهداتی همچون لغزش زیاد میلگردهای طولی، بلندشدگی مشهود نمونه از روی فنداسیون، ظرفیت تغییرمکانی پایین و بازشدگی ترک پای نمونه را گزارش دادند.

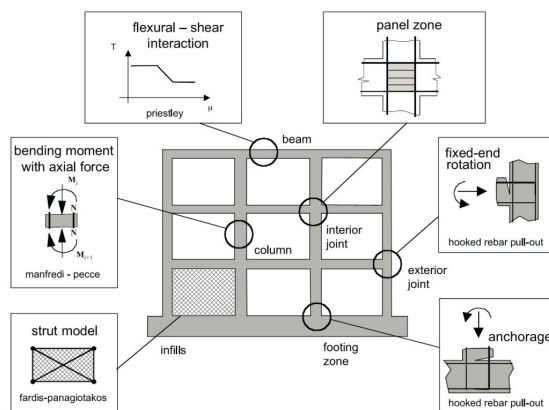
وردرامه^۱ و همکاران [۳] با تمرکز روی چرخش انتهای گیردار ستون‌های مستطیلی بتنی مسلح به میلگرد ساده ادعا نمودند که مهمترین منبع تغییر مکان در این نوع ستون‌ها لغزش می‌باشد، به‌طوری‌که چرخش در انتهای متصل به فنداسیون غالب بوده و حدود ۹۰٪ از چرخش وتری کل ستون در لحظه‌ی فروپاشی^۲ را تشکیل می‌دهد.

آرانی و همکاران [۴] با انجام مطالعه‌ی جامع آزمایشگاهی بر روی رفتار ستون‌های بتنی مسلح به میلگرد ساده دریافتند که مود رفتارجانبی ستون‌های بتنی مسلح به میلگرد ساده، مود گهواره‌ای مقید می‌باشد که مستقل از نوع وصله میلگرد طولی است.

متأسفانه، مدلسازی تحلیلی و عددی روی این دسته از ستون‌ها در ادبیات فنی بسیار کم می‌باشند، در حالیکه، نیاز به این مدلسازی‌ها به علت محدود بودن شرایط و نمونه‌های آزمایشگاهی رو به افزایش است. بنابراین یک مدل عددی در محیط برنامه‌نویسی متلب تدوین گردیده‌است که در آن سعی شده که لغزش میلگرد در بتن ناشی از ازدیاد طول و جابجایی انتهایی مدنظر قرار گرفته و با توجه به بلندشدگی مشهود ستون از پی، اثر خروج از مرکزیت بار محوری بر مقاومت در مدل گنجانده شود. درنهایت پس از صحت‌سنجی، مدل عددی برای پیش‌بینی رفتار غیرخطی (رفتار گهواره‌ای مقید) این دسته از اعضا قابل استفاده است.

۲. تدوین مدل عددی

برای سازه‌های بتن آرمه که تحت زلزله‌های متوسط تا شدید واقع می‌شوند، حصول پاسخ حقیقی سازه‌ای و همچنین برآورد خسارت وابسته به آن، نیازمند مدل‌نمودن دقیق تغییرمکان‌های غیرالاستیک موضعی است که در نواحی انتهایی اعضا رخ می‌دهند. مهمترین منابع این تغییرمکان‌ها شامل خمش و چرخش انتهای گیردار عضو می‌باشند. شکل ۱ اعضا و نواحی بحرانی آنها در اثر ورود بار جانبی را در یک قاب بتنی مسلح موجود نشان می‌دهد.



شکل ۱: اعضا و نواحی بحرانی در یک قاب بتن آرمه و نحوه‌ی مدل نمودن آنها

در ادامه به منظور بررسی یکی از مهمترین منابع تغییرمکانی افقی در سازه‌های بتنی مسلح به میلگرد ساده، رفتار ستون‌های طبقه‌ی همکف مورد مدلسازی واقع می‌شود. با توجه به اجزای تغییرمکانی این اعضا تحت بار جانبی که، خمش، لغزش و برش می‌باشند اجزای رفتاری نیز بر همین اساس در مدل‌سازی مدنظر قرار می‌گیرند.

۲-۱- مدلسازی رفتار خمشی

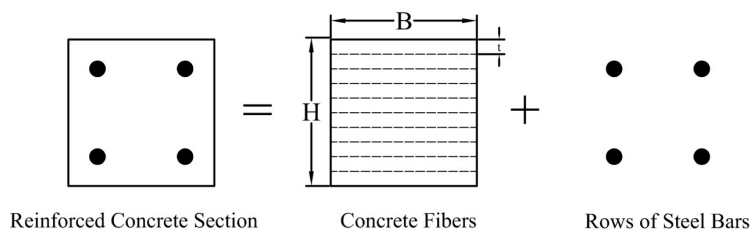
^۱ Verderame et al., 2008a

^۲ Collapse

مدلسازی خمشی عضو (ستون) در الگوریتم، با تدوین لایه‌های^۱ یکطرفه برای مصالح بتن و همچنین ردیف‌هایی برای آرماتورهای مقطع صورت پذیرفته است. در حل خمشی، فرض سازگاری کرنشی بین بتن و آرماتور طولی برقرار می‌باشد. در مجموع، ورودی مدلسازی عددی، رفتار مصالح بر حسب تنش-کرنش بوده و خروجی مدل، منحنی‌های رفتار جانبی المان ستون بر حسب برش پایه-تغییر مکان جانبی می‌باشند. در ادامه، مراحل مدلسازی خمشی المان ستون که منتهی به تغییر مکان جانبی ناشی از خمش و همچنین لنگر مقاوم خمشی مقطع پای ستون می‌شوند، به ترتیب ارائه می‌گردند.

۲-۱-۱- مدل سازی مصالح: در این مرحله، مدل رفتار یکطرفه بتن و فولاد به برنامه معرفی می‌شود.

۲-۱-۲- تقسیم مقطع بتنی به لایه‌ها: در ورودی برنامه، تعداد لایه‌های مطلوب از کاربر خواسته می‌شود که بسته به دقت دلخواه، می‌تواند وارد گردد.

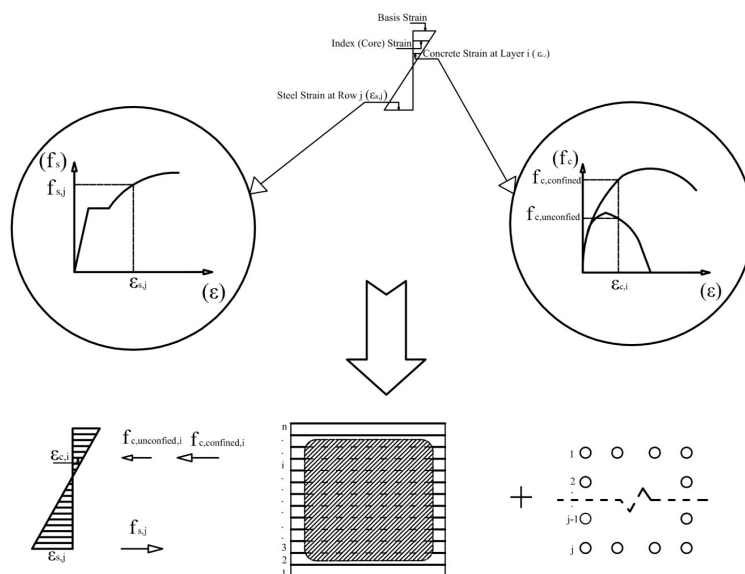


شکل ۲: مفهوم مدل سازی مصالح به عنوان ورودی مدل کلی

۲-۱-۳- انتخاب کرنش تار مبنا (ϵ_{Basis}): این کرنش، همان کرنش در دورترین تار فشاری بتن می‌باشد.

۲-۱-۴- بدست آوردن توزیع کرنش: با داشتن کرنش مبنا و فرض یک مقدار دلخواه برای ارتفاع تار خشی، توزیع کرنش در مقطع پای ستون حاصل می‌گردد.

۲-۱-۵- بدست آوردن نیروهای داخلی متناظر به توزیع کرنش مفروض در مقطع: مطابق با شکل ۳ و از روی مدل مصالح به دست می‌آیند.



شکل ۳: روند حصول نیروهای داخلی برای یک رشته‌ی نمونه (fi) و همچنین یک ردیف میلگرد نمونه (پایینترین ردیف)

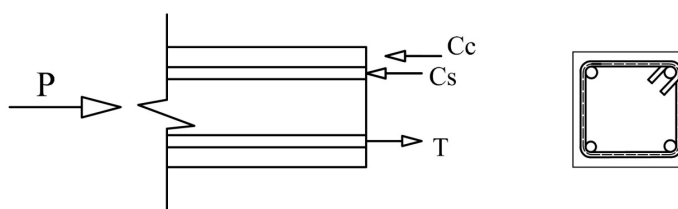
¹ Layers

در شکل ۳، C_c نیروی بتن فشاری، $f_{c,unconfined,i}$ و $f_{c,confined,i}$ به ترتیب تنش فشاری بتن غیر محصور (پوشش) و تنش فشاری بتن محصور در رشته نام، C_s نیروی وارد بر آرماتورهای فشاری مقطع، T نیروی وارد بر میلگردهای کششی مقطع و $f_{s,j}$ تنش کششی وارد بر آرمین ردیف از میلگردهای کششی می باشد.

۲-۱-۶- برقراری تعادل نیرویی: تعادل در مقطع پای ستون در هر حلقه توسط رابطه ی زیر کنترل می شود:

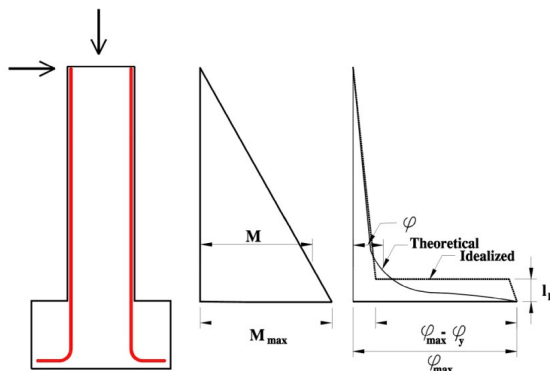
$$C_c + C_s - T - P < Error \quad (1)$$

در رابطه ی فوق، C_c ، C_s ، T و P به ترتیب، نیروی بتن فشاری مقطع، نیروی آرماتورهای فشاری مقطع، نیروی آرماتورهای کششی مقطع و نیروی محوری اعمالی به ستون می باشند (شکل ۴). همچنین $Error$ نیز همان خطای مجاز در رابطه ی برقراری تعادل بوده و برابر با $\varepsilon f'_c A_g$ است (ε میزان ضریب دلخواه برابر با ۰/۰۰۰۰۱)، f'_c مقاومت مشخصه ی فشاری بتن و A_g سطح مقطع ستون می باشند).



شکل ۴: نمایش مقطع و نیروهای داخلی و خارجی مؤثر بر آن

۲-۱-۷- محاسبه ی تغییر مکان خمشی جانبی: برای حصول تغییر مکان خمشی ستون تک انحنایی تحت بار جانبی خواص پلاستیسته در ناحیه ای احتمالی به طول مشخص (مفصل پلاستیک متمرکز)، از انتهای گیردار ستون به سمت بالا متمرکز می شود (شکل ۵).



شکل ۵: مدل مبتنی بر مفصل پلاستیک برای رفتار خمشی ستون طره (تک انحنایی) [۵]

این تغییر مکان به شرح زیر به دست می آیند [۶].

$$\Delta_f = \frac{\phi L^2}{3} \quad \text{for } \phi < \phi_y \quad (2)$$

$$\Delta_f = \frac{\phi_y L^2}{3} + (\phi - \phi_y) 0.5 L_p (L - 0.5 L_p) \quad \text{for } \phi > \phi_y \quad (3)$$

در روابط فوق Δf تغییر مکان جانبی ناشی از خمش، ϕ انحنا در مقطع پای ستون، ϕ_y انحنا نظیر به تسلیم خمشی در مقطع پای ستون، L دهانه‌ی برشی عضو (فاصله‌ی قائم بین سطح اعمال بار جانبی و سطح پی)، و L_p طول ناحیه‌ی پلاستیک خمشی ستون است که برابر با H در نظر گرفته شده‌است.

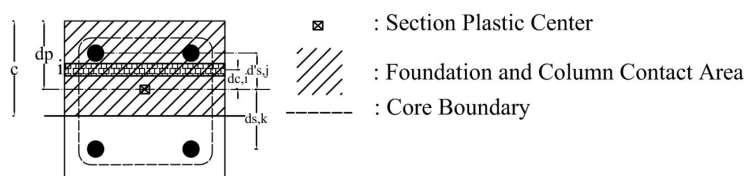
در مورد ستون‌ها با میلگرد ساده، چرخش انتها گیردار ستون (FER^1) به بلندشدگی مشهود ستون از پی در فصل مشترک آنها خواهد انجامید. بنابراین در این نوع از نمونه‌ها، مرکز پلاستیک باید برای سطح تماسی ستون و پی محاسبه شود که در تاریخچه‌ی رفتار جانبی ستون متغیر است. در حل مقطع تماسی ستون و پی فرض می‌شود که عمق تماسی ستون و پی بازای هر دریافت دلخواه برابر با ارتفاع تار خنثی باشد ($d_{contact} = c$) (سزن^۲ و ستزler^۳، ۲۰۰۸ [۷]). در این رابطه، عمق تماسی بلوک بتنی ستون و پی بوده و c ارتفاع تار خنثی می‌باشد.

$$d_p = \frac{c b f'_c x_c + A'_s f_y d' + A_s f_y d}{c b f'_c + A'_s f_y + A_s f_y} \quad (4)$$

در رابطه‌ی فوق، d_p ارتفاع مرکز پلاستیک از دورترین تار فشاری مقطع، b پهنای مقطع، x_c مرکز هندسی ناحیه‌ی مستطیلی تماسی ستون و پی، f'_c و f_y به ترتیب مقاومت فشاری بتن و مقاومت تسلیم آرماتورهای طولی، A'_s و A_s به ترتیب سطح مقطع آرماتورهای فشاری و کششی مقطع و d و d' نیز به ترتیب، فاصله‌ی مرکز آرماتورهای فشاری و کششی از دورترین تار فشاری بتن می‌باشند. لنگر مقاوم سطح تماسی از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$M_{contact} = \sum_{i=1}^m f_{c,unconfined,i} A_{c,unconfined,i} dc_i + \sum_{i=1}^m f_{c,confined,i} A_{c,confined,i} dc_i + \sum_{j=1}^n f'_{s,j} A'_{s,j} ds'_j + \sum_{k=1}^n f_{s,k} A_{s,k} ds_k \quad (5)$$

در رابطه‌ی فوق $M_{contact}$ لنگر مقاوم مماسی m تعداد رشته‌های بتنی در مقطع، $A_{c,unconfined,i}$ و $A_{c,confined,i}$ به ترتیب سطح مقطع بتن غیر محصور (پوشش) و بتن محصور در رشته‌ی i ام، n و n' به ترتیب تعداد ردیف‌های آرماتورهای کششی می‌باشند. همچنین مطابق شکل ۶، dc_i فاصله‌ی مرکز رشته‌ی بتنی i تا مرکز پلاستیک مقطع، ds'_j فاصله‌ی مرکز آرماتورهای فشاری ردیف j تا مرکز پلاستیک و ds_k فاصله‌ی مرکز آرماتورهای کششی ردیف k تا مرکز پلاستیک مقطع می‌باشند. بقیه‌ی پارامترهای فرمول فوق قبلاً تعریف گردیده‌اند.



شکل ۶: معرفی بازوهای لنگری نیروهای داخلی نسبت به مرکز پلاستیک برای مقطع تماسی ستون با میلگرد ساده

۲-۲- مدل‌سازی رفتار لغزشی

مدل‌سازی لغزشی میلگرد ساده در بتن مطابق شکل شامل دو بخش عمده می‌باشد:

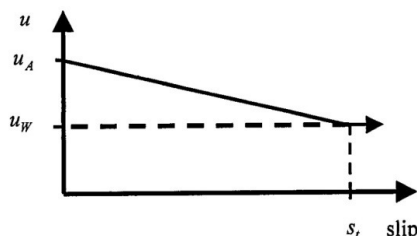
۱- مدل‌سازی رفتار پیوستگی بین بتن و میلگرد ساده

۲- مدل‌سازی رفتار مهار انتهایی میلگرد (قلاب در صورت وجود)

به منظور تخمین رفتار لغزشی ستون بتنی مسلح به میلگرد ساده، لازم است تا مدل‌هایی برای هر دو نوع رفتار پیوستگی و قلاب، معرفی شود.

۲-۲-۱- مدلسازی رفتار پیوستگی

به منظور مدل سازی رفتار پیوستگی، از مدل پیشنهادی فلدمن [۸] استفاده می شود.



شکل ۲: مدل خطی رفتار پیوستگی میلگرد ساده در بتن [۸]

$$s_{relative} = \int_0^{L_{bar}} \frac{T(x) dx}{E_{s1} A_{sl}} \quad (6)$$

در رابطه‌ی فوق، A_{sl} سطح مقطع بزرگترین میلگرد کششی در دورترین ردیف نسبت به بالاترین تار فشاری مقطع می باشد. به منظور حصول لغزش ناشی از ازدیاد طول در فاز پلاستیک میلگرد ساده، فرض می شود که رفتار مصالح فولاد دو خطی است. (تا نقطه‌ی تسلیم با مدول الاستیسیته‌ی E_{s1} و از نقطه‌ی تسلیم تا نقطه‌ی نهایی با مدول پلاستیسیته‌ی E_{s2}) $T(x)$ توزیع نیروی داخلی میلگرد است. با این فرض، لغزش ناشی از ازدیاد طول، در ناحیه‌ی پلاستیک فولاد، از رابطه‌ی زیر به دست می آید:

$$s_{relative} = \int_0^{L_{bar, plastic}} \frac{(T(x) - F_{ext, y}) dx}{E_{s2} A_{sl}} + \int_0^{L_{bar, plastic}} \frac{(F_{ext, y} - F_{bond}(x)) dx}{E_{s1} A_{sl}} + \int_{L_{bar, plastic}}^{L_{bar}} \frac{T(x) dx}{E_{s1} A_{sl}} \quad (7)$$

در رابطه‌ی بالا، $L_{bar, plastic}$ طولی از آرماتور کششی می باشد که وارد ناحیه‌ی پلاستیک شده است. F_{ext} نیروی مقاوم ناشی از پیوستگی است. همچنین $F_{ext, y}$ برابر است با $f_y A_{sl}$ (به f_y تنش تسلیم میلگرد کششی است).

۲-۲-۲- مدلسازی رفتار مهار انتهایی

نقش شبه تکیه گاهی قلاب برای طول مستقیم میلگرد سبب می شود که نیروی خارجی کششی وارد بر میلگرد (در محل تماس ستون با پی) تا پیش از رسیدن قلاب به حالت حدی نهایی (گسیختگی نهایی قلاب) کنترل نشود. مدل رفتاری زیر که توسط محققین قبلی برای رفتار قلاب میلگرد ساده ارائه شده است در این مقاله استفاده می شود [۹]:

$$f_{s, hook} = f_{su} \left(\frac{s_{hook}}{3.9} \right)^{0.3} \quad (8)$$

در رابطه‌ی فوق f_{su} و $f_{s, hook}$ به ترتیب تنش در نقطه‌ی شروع انحنای قلاب و مقاومت نهایی میلگرد (بر حسب MPa) بوده و s_{hook} میزان لغزش در قلاب (بر حسب mm) می باشند.

۲-۲-۳- مدلسازی رفتار لغزشی کلی

روشن است که لغزش کلی میلگرد ستون ($s_{element}$) و پی ($s_{footing}$) ناشی از دو عامل می باشد: ۱- لغزش حاصل از ازدیاد طول در نتیجه‌ی پوآسون منفی ($s_{element, relative}$ و $s_{footing, relative}$) ۲- لغزش حاصل از جابجایی انتهای مهار شده‌ی میلگرد کششی ($s_{element, end}$ و $s_{footing, end}$).

$$s_{element} = s_{element, relative} + s_{element, end} \quad (9)$$

$$S_{footing} = S_{footing, relative} + S_{footing, end} \quad (10)$$

و به عنوان نتیجه، لغزش کلی از رابطه ی ۱۱ به دست می آید:

$$S_{total} = S_{footing} + S_{element} \quad (11)$$

با داشتن میزان بازشدگی ترک پایه، تغییر مکان جانبی ناشی از لغزش مطابق رابطه ی زیر به دست می آید [۷]:

$$\Delta_s = \frac{S_{total}}{d - c} \quad (12)$$

در رابطه ی فوق Δ_s تغییر مکان جانبی ناشی از لغزش میلگرد، d عمق مؤثر مقطع پای ستون و c ارتفاع تار خنثی می باشد.

۳-۲-۳- اثر خروج از مرکزیت بار محوری در ستون های بتنی مسلح به میلگرد ساده

در مورد ستون های بتنی مسلح به میلگرد ساده، به دلیل بلندشدگی مشهود ستون از پی و خروج از مرکزیت بار محوری، مود گهواره ای مقید رخ می دهد. اثرات این مود روی تغییر مکان و مقاومت جانبی ستون به شرح زیر است.

۲-۳-۲- اثر روی تغییر مکان

تغییر مکان افقی ناشی از بازشدگی ترک پای نمونه، نتیجه ی تأثیر مود گهواره ای مقید روی تغییر مکان جانبی ستون تک انحنايي است که در بند قبل، مطرح گردید.

۲-۳-۳- اثر روی مقاومت

اثر مود گهواره ای روی مقاومت با در نظر گرفتن اثر خروج از مرکزیت بار محوری بررسی می شود. در مورد ستونها با میلگرد آجدار، از آنجایی که خمش یا برش، مد حاکم رفتاری می باشند، نقطه ی تأثیر واکنش نیروی محوری در پای ستون تقریباً ثابت بوده و منطبق بر نقطه ی تقاطع محور ستون و سطح پی می باشد. بنابراین با داشتن یک نقطه ی تأثیر ثابت برای واکنش نیروی محوری ثابت و همچنین افزوده شدن به تغییر مکان جانبی در نقطه ی شاخص، از مقاومت خمشی مقطع پای ستون کاسته خواهد شد. اما در نمونه هایی که مسلح به میلگرد ساده هستند به علت تغییر در عمق تماسی ستون و پی در رابطه ی $P-\Delta$ ، $\Delta = \Delta_0$ که Δ_0 فاصله ی افقی بین نقطه ی اعمال بار محوری و نقطه ی تأثیر واکنش بار محوری در پای ستون است. بنابراین Δ_0 دارای مبنای ثابتی نخواهد بود (شکل ۸).

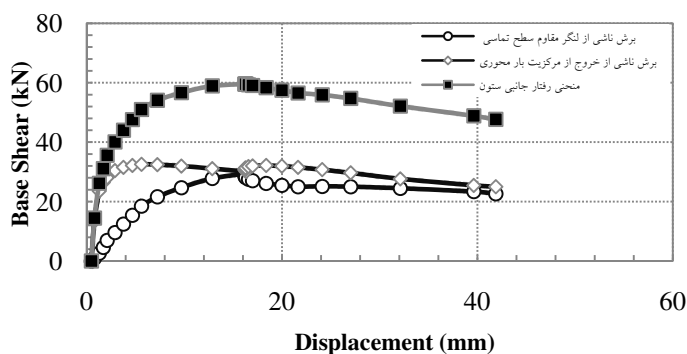


شکل ۸: عملکرد متفاوت خروج از مرکزیت نیروی محوری و تأثیر آن بر لنگر مقاوم مقطع

شکل ۹ نشان دهنده ی اجزای مقاومتی یک المان با رفتار گهواره ای مقید تحت بار جانبی می باشد.

۲-۵- مدل سازی رفتار برشی

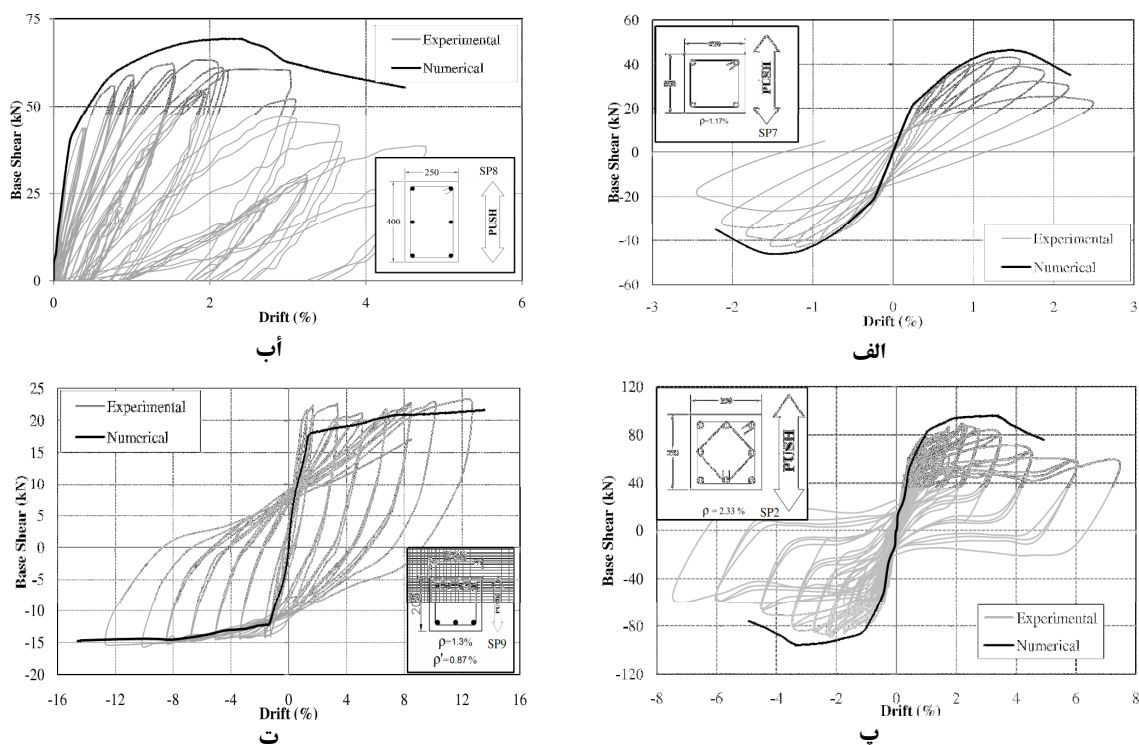
مطابق آزمایش های انجام شده سهم برش در تغییر مکان کلی بسیار اندک می باشد. سهم تغییر مکان برشی به طور متوسط ۵٪ مجموع تغییر مکان های ناشی از لغزش و خمش در نظر گرفته می شود.



شکل ۹: اجزای مقاومتی در منحنی رفتار گهواره‌ای مقید برای یک ستون بتنی با میلگرد ساده

۳. صحت‌سنجی مدل عددی

به منظور اینکه مدل عددی برای پیش‌بینی رفتار لرزه‌ای ستون‌های بتنی مسلح به میلگرد ساده استفاده شود، لازم است تا خروجی آن با رفتار واقعی این دسته از ستون‌ها (حاصل از تست‌های آزمایشگاهی) مقایسه و تأیید گردد. به همین منظور سه نمونه ستون و یک نمونه تیر برای اعتبارسنجی مدل عددی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (نتایج آزمایشی به ترتیب از منابع [۱۰]، [۱۱]، [۴] و [۱۲] برگرفته شده‌اند).



شکل ۱۰: صحت‌سنجی مدل عددی با منحنی‌های رفتاری آزمایشی ستون (الف، ب و پ) و تیر (ت)

۴. نتیجه‌گیری

توسعه‌ی مدل رفتاری ستون‌های بتنی مسلح به میلگرد ساده، بر اساس اجزای تغییرمکانی ستون و با هدف کمی‌سازی فیزیک رفتاری صورت گرفت. رفتار خمشی با توسعه‌ی یک مدل مبتنی بر مفصل پلاستیک و با در نظر گرفتن تغییرات مرکز پلاستیک مقطع مدل شد. مدل رفتار لغزشی نیز هم در ستون

و هم در پی با در نظر گرفتن لغزش ناشی از زوال مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد کششی و همچنین لغزش انتهای بارگذاری نشده آن صورت پذیرفت. در هر مرحله از حل خمشی مقطع پا، عمق تماسی متناسب با انحنای مقطع تغییر می کند که این منجر به عملکرد متفاوت $P-\Delta$ شده که به حاکم شدن مود گهواره ای مقید منتهی می شود. با مقایسه ی نتایج حاصل از مدل عددی و مدل آزمایشگاهی روشن شد که مدل عددی قادر به پیش بینی رفتار گهواره ای مقید برای ستون های بتنی با میلگرد ساده و همچنین رفتار جانبی برای تیرهای بتنی با این میلگردهای تسلیح می باشد.

۵. مراجع

1. Abrams, D. A., (1913). "Tests of bond between concrete and steel". *University of Illinois Bulletin*, No. 71.
 2. Marefat, M. S., Shirazi, S. M. H., Rostamshirazi, R. and Khanmohammadi, M. 2009. "Cyclic response of concrete beams reinforced by plain bars". *Journal of Earthquake Engineering*, **13**, 463-481.
 3. Verderame, G. M., Fabbrocino, G. and Manfredi, G., (2008a). "Seismic response of RC columns with smooth reinforcement part I: Monotonic tests". *Engineering Structures*, **30**, 2277-2288.
 4. Arani, K. K., Marefat, M. S., Amrollahi-Biucky, A. and Khanmohammadi, M., (2010). "Experimental seismic evaluation of old concrete columns reinforced by plain bars". *The Structural Design of Tall and Special Buildings*.
 5. Lehman, D. E. and Moehle, J. P., (2000). "Seismic performance of well confined concrete bridge columns". Pacific Earthquake Engineering Research Center. Berkeley: *University of California*.
 6. Paulay, T. and Priestly, M. N. J., (1992). "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonary Buildings", New Yorks, John Wiley and Sons.
 7. Sezen, H. and Setzler, E. J., (2008). "Reinforcement slip in reinforced concrete columns". *ACI Structural Journal*, **105**, 280-289.
 8. Feldman, L. R., (2006). "Bond of plain steel reinforcement in concrete". Ph. D dissertation, University of Western Ontario, London, Ontario.
 9. Fabbrocino, G., Verderame, G. M., Manfredi, G. and Cosenza, E. 2004. "Structural models of critical regions in old-type R.C. frames with smooth rebars". *Engineering Structures*, **26**, 2137-2148.
 10. Bousias, S., Spathis, A.-L. and Fardis, M. N., (2007). "Seismic retrofitting of columns with lap spliced smooth bars through FRP or concrete jackets". *Journal of Earthquake Engineering*, **11**, 653-674.
 11. Yalcin, C., Kaya, O. and Sinangil, M., (2006). "Seismic retrofitting of R/C columns having plain rebars using CFRP sheets for improved strength and ductility". *Construction and Building Materials*, **22**, 295-307.
۱۲. حسن زاده شیرازی، سید مسعود، ۱۳۸۴، "بررسی آزمایشگاهی رفتار لرزه ای و آسیب پذیری ستونهای ساختمانهای قدیمی بتنی مسلح به میلگرد ساده"، پایان نامه ی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده ی فنی.