

تحلیل غیرخطی لرزه‌های دیوار برشی بتن مسلح با در نظر گرفتن اثر اندرکنش بتن و میلگرد

سیدشاکر هاشمی، استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر،

E-mail: sh.hashemi@pgu.ac.ir

حمزه زارعی چهارگود، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشگاه خلیج فارس بوشهر

محمد واقفی، استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر

چکیده: در این تحقیق به بررسی رفتار غیرخطی دیوار برشی بتن مسلح با در نظر گرفتن اثر اندرکنش بین بتن و میلگرد که به صورت یک نیروی پیوسته در طول میلگرد است، پرداخته می‌شود. از رفتار چرخه‌ای بتن و میلگرد و همچنین رفتار چرخه‌ای تنش پیوستگی - لغزش بین بتن و میلگرد در تحلیل غیرخطی استفاده شده است. یکی از روش‌های پرکاربرد در تحلیل عددی المان‌های بتن مسلح، روش مدل رشته‌ای (Fiber Section Model) می‌باشد. مدل رشته‌ای پیوستگی بین بتن و میلگرد را کامل فرض نموده و از لغزش صرف‌نظر می‌کند. در تحقیق حاضر از یک روش تحلیل عددی مبتنی بر مدل رشته‌ای استفاده شده، با این تفاوت که فرض پیوستگی کامل بتن و میلگرد حذف و اثر پیوستگی - لغزش در محاسبات و فرمولاسیون المان بتن مسلح لحاظ شده است. همچنین اثرات تغییر شکل برشی در داخل دیوار و همچنین بیرون‌کشیدگی میلگرد در پای دیوار در مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شده است. به کمک برنامه‌نویسی در محیط MATLAB روش مدل‌سازی عددی پیشنهاد شده برای نمونه آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته و دقت خوبی در انطباق پاسخ‌های عددی و تجربی حاصل شده است.

کلیدواژه‌ها: تحلیل غیرخطی، مدل رشته‌ای، اثر پیوستگی - لغزش، طول مهارتی میلگرد درون اتصال

۱- مقدمه

به منظور بررسی واقع‌گرایانه‌ی رفتار دیوارهای بتن مسلح امری بسیار مهم است. مدل‌سازی دیوارهای برشی بتن مسلح می‌بایست به نحوی صورت گیرد که بتواند اثرات تغییر محل تار خنثی در اثر تغییرات بارگذاری، سخت‌شدگی کششی بتن، باز و بسته شدن پیش‌رونده‌ی ترک‌ها، رفتار غیرخطی برشی و اندرکنش برش و خمش را به نحو مناسبی لحاظ نماید.

روش‌های پیشنهادی برای مدل‌سازی تحلیلی دیوار برشی بتن مسلح را می‌توان به دو گروه عمده شامل مدل‌های

با توجه به توسعه‌ی روزافزون بلندمرتبه‌سازی، کاربرد دیوارهای برشی به منظور تأمین مقاومت و سختی جانبی به صورت چشم‌گیری افزایش یافته که این امر کاربرد مدل‌های مناسب تحلیلی عددی را برای آنها ایجاب می‌نماید. در واقع قرارگیری دیوارهای برشی در محل‌های مناسب در پلان سازه می‌تواند منجر به حصول سازه‌ای با مقاومت و سختی و در عین حال شکل‌پذیری مناسب گردیده و گزینه‌ای مناسب به عنوان سیستم باربر جانبی در مناطق لرزه‌خیز باشد. لذا، انجام تحلیل‌های غیرخطی

میکروسکوپی و ماکروسکوپی طبقه‌بندی کرد. مدل‌های میکروسکوپی می‌توانند رفتار موضعی را دقیق‌تر پیش‌بینی کنند، ولی با توجه به پیچیدگی‌های مدل‌سازی و تحلیل و تفسیر نتایج، اجرای آنها برای تجزیه و تحلیل غیرخطی ساختمان‌های چند طبقه و یا دیوار برشی بتن مسلح نیاز به زمان و هزینه زیادی دارد.

از ابتدایی‌ترین روش میکروسکوپی مورد استفاده جهت تحلیل دیوارهای برشی، المان تیر-ستون معادل (Beam Column Element) می‌باشد که همچنان دارای کاربرد گسترده در بررسی رفتار دیوارها می‌باشد. از محدودیت‌های این روش این است که فرض می‌کند چرخش‌ها حول محور مرکزی دیوار اتفاق می‌افتد؛ بنابراین تغییر محور خنثی مقطع دیوار و اندرکنش با اعضای قاب که به دیوار متصلند را نادیده می‌گیرد. همچنین با توجه به عدم اعمال بازشدگی پیش‌رونده‌ی ترک‌ها در اثر تغییر تار خنثی، دوران‌ها و تغییر مکان‌های کمتری از این روش نسبت به واقعیت حاصل می‌گردد [۱]. این محدودیت‌ها به کاربرد روش المان‌های متشکل از اجزای متعدد قائم منجر شد. این روش‌ها علاوه بر رفع محدودیت‌های جابه‌جایی تار خنثی، سخت‌شدگی کششی بتن، باز و بسته شدن پیش‌رونده‌ی ترک‌ها و رفتار غیرخطی برشی اثرات محصورشدگی بتن را دقیق‌تر بیان می‌کند. توسعه‌ی این روش به مدل رشته‌ای منجر شد که در این نوع مدل‌سازی سطح مقطع دیوارها به تعداد مشخصی المان رشته‌ای تقسیم‌بندی می‌شود. در این مدل، عضو طولی به چندین بخش تقسیم شده و هر بخش متشکل از لایه‌های موازی است. برخی از لایه‌های نشان‌دهنده‌ی مصالح بتنی و لایه‌های دیگر نشان‌دهنده‌ی مصالح فولادی می‌باشد. رفتار بتن و فولاد به‌صورت مجزا تعریف شده، ولی اندرکنش میان آنها در نظر گرفته نمی‌شود. مونتگی و اسپاکن [۲] اثر پیوستگی- لغزش میلگردها در مدل مقطع فیبری را محاسبه کردند. این مدل توسط کوترونیس و همکاران [۳] برای شبیه‌سازی رفتار دیوار برشی بتن مسلح تحت تحریک دینامیکی استفاده شد. مولاپودی و همکاران با

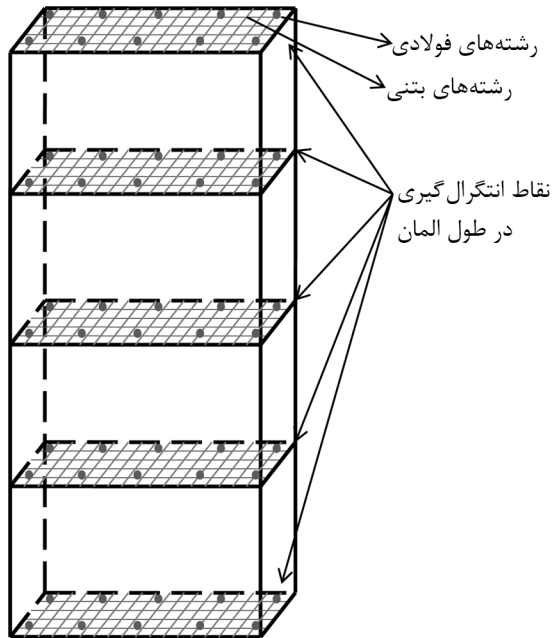
استفاده از روش مدل فیبری در سال ۲۰۱۳ تأثیر نسبت ارتفاع به عرض، درصد میلگردهای متفاوت و مقاومت فشاری بتن را بر پاسخ‌های دیوار بررسی کردند [۴]. فرض تغییرشکل‌های برشی خطی، پیچیدگی شبیه‌سازی شرایط مرزی، و نادیده گرفتن اثر پیوستگی- لغزش محدودیت‌های این مدل بودند. از جمله مدل‌های ماکروسکوپی می‌توان به مدل فتر چند محوری، مدل اندرکنش خمش و برش و مدل خرپا اشاره کرد که جزئیات آنها در مرجع [۵] ذکر شده است. عمومی‌ترین روش میکروسکوپی مدل‌سازی رفتار عناصر بتن مسلح که مورد استفاده قرار می‌گیرد روش المان محدود می‌باشد. در این روش، عضو بتن مسلح به یک تعداد متناهی از المان‌های کوچک (المان‌های بتن و فولاد) پیوسته در یک تعداد متناهی از نقاط گرهی گسسته تقسیم‌بندی می‌شود. تعداد المان‌ها با توجه به دقت مورد نیاز و ابزار تجزیه و تحلیل در دسترس انتخاب می‌شود. تحلیل المان محدود قادر به ارزیابی رفتار کلی عضو به‌علاوه‌ی رفتار محلی می‌باشد [۶]. مدل المان محدود به یک ابزار قدرتمند برای تجزیه و تحلیل سازه‌های بتن مسلح، از جمله تجزیه و تحلیل سه‌بعدی و غیرخطی تبدیل شده است. برای این منظور، بسیاری از نرم‌افزارهای تجزیه و تحلیل المان محدود توسعه داده شد و توسط محققین استفاده می‌شود [۷].

در تحقیق حاضر، با نگرشی تازه برای مدل‌سازی دیوار برشی از تئوری مدل رشته‌ای استفاده شده است. پارامترهایی همچون تأثیر اندرکنش بین بتن و میلگرد، نحوه‌ی تغییرات سختی و مقاومت در زمان تحلیل، سازوکار بیرون‌کشیدگی میلگرد و اثرات نیروی برشی لحاظ شده است. برای مدل‌سازی از فرضیات تئوری تیموشنکو که در محاسبات مربوط به هر المان اثر برش را در نظر می‌گیرد، استفاده شده است. تئوری تیر تیموشنکو نسبت به تئوری اویلر برنولی پاسخ‌های جامع‌تری در حضور اثر قابل توجه برش می‌دهد.

۲- مدل‌سازی

تئوری حاکم بر این تحقیق، توسعه‌یافته‌ی مدل رشته‌ای

که از تئوری المان میله‌ای پیروی می‌کند، تشکیل می‌شود و اثر پیوستگی - لغزش (Bond Slip Effect) به صورت اندرکنش بین آنها در روابط تعادل حاکم بر جزء طول لحاظ می‌شود.



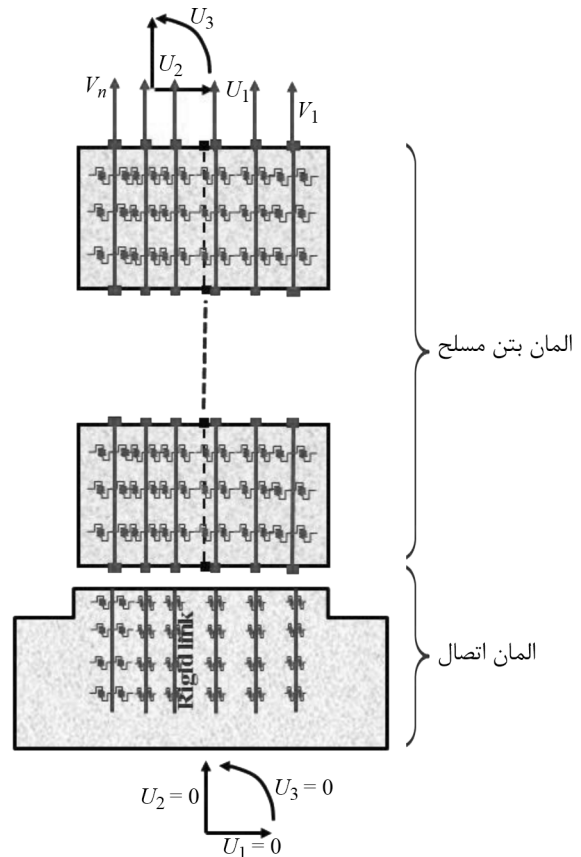
شکل (۲): تقسیم‌بندی مقطع المان به رشته‌های بتنی و فولادی در جهت طولی.

در تئوری تیر تیموشنکو فرض بر این است که سطح مقطع پس از تغییر شکل، صفحه‌ای باقی می‌ماند، ولی لزوماً مشابه با تئوری اویلر-برنولی، صفحه‌ی تغییر شکل یافته عمود بر محور تیر نخواهد بود. این اختلاف در مورد عمود بودن و یا نبودن ناشی از تغییر شکل برشی فرض می‌شود. در شکل (۳) مقایسه‌ی بین دو تئوری اویلر-برنولی (Euler Bernoulli Theory) و تیموشنکو (Timoshenko Beam Theory) ارائه شده است [۸]. در شرایط دو بعدی مقدار تنش در سطح مقطع، مقادیر نیروی برشی در جهت y و خمش حول محور z به صورت روابط (۱ تا ۳) محاسبه می‌شود:

$$M_z(x) = - \int_A y \sigma_{xx} dA = E \frac{d\Psi_z(x)}{dx} \int_A y^2 dA = EI_z \frac{d\Psi_z(x)}{dx} \quad (1)$$

$$V_z(x) = - \int_A y \sigma_{xy} dA = -\beta G_{shear} (-d\Psi_z(x) + \frac{du_2^B(x)}{dx}) \int_A dA \quad (2)$$

می‌باشد. در تئوری مدل رشته‌ای از لغزش بین بتن و میلگردهای بتن مسلح صرف نظر شده و یا به عبارت دیگر پیوستگی بین بتن و میلگرد کامل فرض می‌شود. در تحقیق حاضر، فرض پیوستگی کامل از میان برداشته شده و دیوار برشی بتن مسلح به صورت ترکیبی از دو نوع المان بتن مسلح و المان اتصال مدلسازی شده است. مدل دیوار برشی مورد بررسی در این تحقیق مانند شکل (۱) می‌باشد.



شکل (۱): مدل‌سازی دیوار برشی شامل المان بتن مسلح و المان اتصال.

در این مدل، المان طولی به رشته‌های بتنی و فولادی تقسیم‌بندی می‌شود که بعضی از آنها نشان‌دهنده‌ی مصالح بتنی و رشته‌های دیگر نشان‌دهنده‌ی میلگردها می‌باشد. قانون تنش-کرنش تک‌محوری برای توصیف رفتار مصالح در جهت‌های طولی (موازی با محور المان) مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۲).

هر المان بتن مسلح به صورت ترکیبی از یک بخش بتنی که از تئوری تیر تیموشنکو پیروی می‌کند و n میلگرد طولی

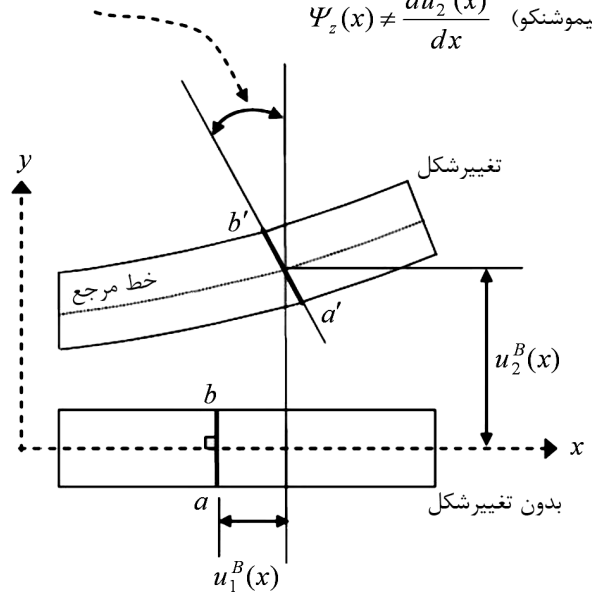
$$\frac{V_y(x)}{-\beta G_{shear} A} = \frac{du_2^B(x)}{dx} - \Psi_z(x) \Rightarrow \quad (3)$$

$$\gamma_y = \Psi_z(x) - \frac{du_2^B(x)}{dx}$$

$$\Psi_z(x) = \frac{du_2^B(x)}{dx} \quad (\text{اویلر برنولی})$$

$$\Psi_z(x) \neq \frac{du_2^B(x)}{dx} \quad (\text{تیموشنکو})$$

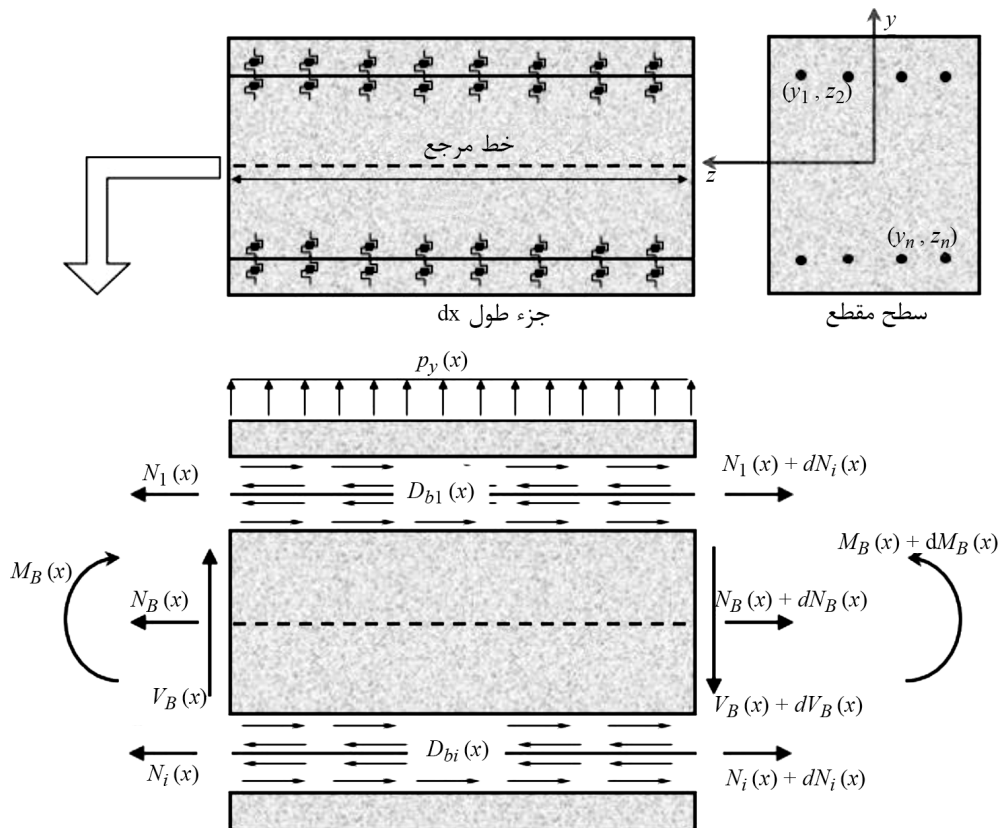
در روابط ذکر شده σ_{xy} و σ_{xx} مقدار خمش در سطح مقطع المان با موقعیت طولی x و $du_2^B(x)$ و $\Psi_z(x)$ تغییر مکانها و مقدار چرخش مربوط به بخش بتنی المان می باشد. به این ترتیب اختلاف دو مقدار $\frac{du_2^B(x)}{dx}$ و $\Psi_z(x)$ در مقطع، مقدار کرنش برشی در جهت y را نتیجه می دهد و این همان مقداری است که در تئوری اویلر- برنولی از آن صرف نظر می شود.



شکل (۳): مقایسه تغییر شکل های داخلی در دو تئوری اویلر- برنولی و تیموشنکو

برای یک المان بتن مسلح مطابق با شکل (۴) دیاگرام آزاد یک جزء طول dx نشان داده شده است. با توجه به تشکیل المان مذکور از دو جزء بتن و میلگرد، ضمن گسسته سازی آنها، روابط تعادل نیروهای داخلی نوشته شده است. در این محاسبات اثر پیوستگی- لغزش بین بتن و میلگرد به عنوان عامل مهم اندرکنشی بین دو جزء

از روابط (۱) و (۲) می توان رابطه ی (۳) را نتیجه گرفت:



شکل (۴): جزء طول المان بتن مسلح دو بعدی به همراه اثر پیوستگی بتن و میلگرد.

در نظر گرفته شده و در محاسبات و روابط تعادل اعمال شده است [۹]. رابطه‌ی تعادل نیروی محوری در المان بتنی و میلگرد λm به صورت زیر می‌باشد:

$$dN(x) + \sum_{i=1}^n D_{b_{s-fi}}(x) \times dx = 0 \Rightarrow \quad (4)$$

$$\frac{dN(x)}{dx} + \sum_{i=1}^n D_{b_{s-fi}}(x) = 0$$

$$dN_i(x) + \sum_{i=1}^n D_{b_{s-fi}}(x) \times dx = 0 \Rightarrow \quad (5)$$

$$\frac{dN_i(x)}{dx} - D_{b_{s-fi}}(x) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

در روابط اخیر n تعداد میلگردهای طولی مقطع می‌باشند. به صورت حاصل ضرب تنش پیوستگی در محیط مقطع میلگرد تعریف می‌شود.

رابطه‌ی تعادل در جهت قائم نیز به صورت زیر خواهد بود:

$$dV_y(x) - p_y \times dx = 0 \Rightarrow \frac{dV_y(x)}{dx} - p_y(x) = 0 \quad (6)$$

با فرض خیلی کوچک شدن لنگر حاصل از نیروی یکنواخت خارجی $p_y(x)$ به دلیل ضرب شدن در توان دوم dx و حذف کردن این اثر، تعادل لنگر حول محور Z روی جزء طول المان بتنی به صورت رابطه‌ی (۷) خواهد بود:

$$dM_z(x) - V_y(x) \times dx - \sum_{i=1}^n y_i D_{b_{s-fi}}(x) \times dx = 0 \Rightarrow \quad (7)$$

$$\frac{dM_z(x)}{dx} - V_y(x) \sum_{i=1}^n y_i D_{b_{s-fi}}(x) = 0$$

برای المان بتن مسلح روابط به صورت رابطه‌ی (۸) در

یک قالب ماتریسی بازنویسی می‌شود:

$$\partial_{RCE}^B T D_{RCE}^B T(x) - \partial_{RCE}^b(x) - P_{RCE}(x) = 0 \quad (8)$$

در رابطه‌ی اخیر $D_{RCE}^B(x)$ بردار نیروهای داخلی در سطح مقطع شامل بردار نیروهای داخل مقطعی مربوط به بتن و میلگرد، $D_{RCE}^b(x)$ بردار نیروی پیوستگی بین میلگردها و بتن اطرافشان و $P_{RCE}(x)$ بردار بارهای خارجی موجود در واحد المان می‌باشد.

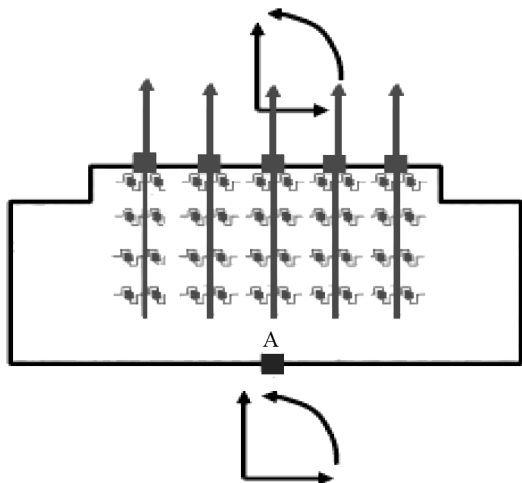
$$\partial_{RCE}^B = \begin{bmatrix} -B & 0 \\ \partial_{RCE} & = B \\ 0 & \partial_{RCE} \end{bmatrix},$$

$$\partial_{RCE}^{-B} = \begin{bmatrix} \frac{d}{dx} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{d}{dx} & -1 \\ 0 & 0 & \frac{d}{dx} \end{bmatrix},$$

$$\partial_{RCE}^{=B} = \begin{bmatrix} \frac{d}{dx} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{d}{dx} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{d}{dx} \end{bmatrix},$$

$$\partial_{RCE}^b = \begin{bmatrix} -1 & 0 & y_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 0 & y_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{n^*(n+3)} \quad (9)$$

در بسیاری از روش‌ها، المان اتصال به صورت مجزا مدل‌سازی نمی‌شوند، بلکه اثرات غیرخطی آن در المان‌های بتن مسلح مجاور چشمه‌ی اتصال در نظر گرفته می‌شود. المان اتصال در محل اتصال به پی و یا دیگر محل‌های صلب مورد استفاده قرار می‌گیرد، از نظر تعداد درجات آزادی مشابه شکل (۵) می‌باشد.



شکل (۵): المان اتصال.

المان‌های اتصال و ستون وجود خواهد داشت. لذا المان اتصال در روندی مشابه با المان ستون مدل‌سازی عددی شده است. جزئیات کامل این نوع المان مورد استفاده در مرجع [۱۱] ارائه شده است.

برای حل عددی غیرخطی از الگوریتم نیوتن-رافسون استفاده شده است. هر المان بتن مسلح در روند حل عددی به تعدادی المان بتن مسلح با طول کوتاه‌تر تقسیم شده است تا اثرات وابستگی به طول المان متأثر از نوع فرمولاسیون اجزای محدود المان که بر مبنای تغییر مکان است، لحاظ شود. بدین ترتیب بر اساس مطالعات عددی این‌طور نتیجه‌گیری شده است که اگر طول المان از حدی برابر با فواصل ترک‌های خمشی کمتر یا مساوی در نظر گرفته شود، اثر اندازه المان در پاسخ‌های عددی ناچیز خواهد شد.

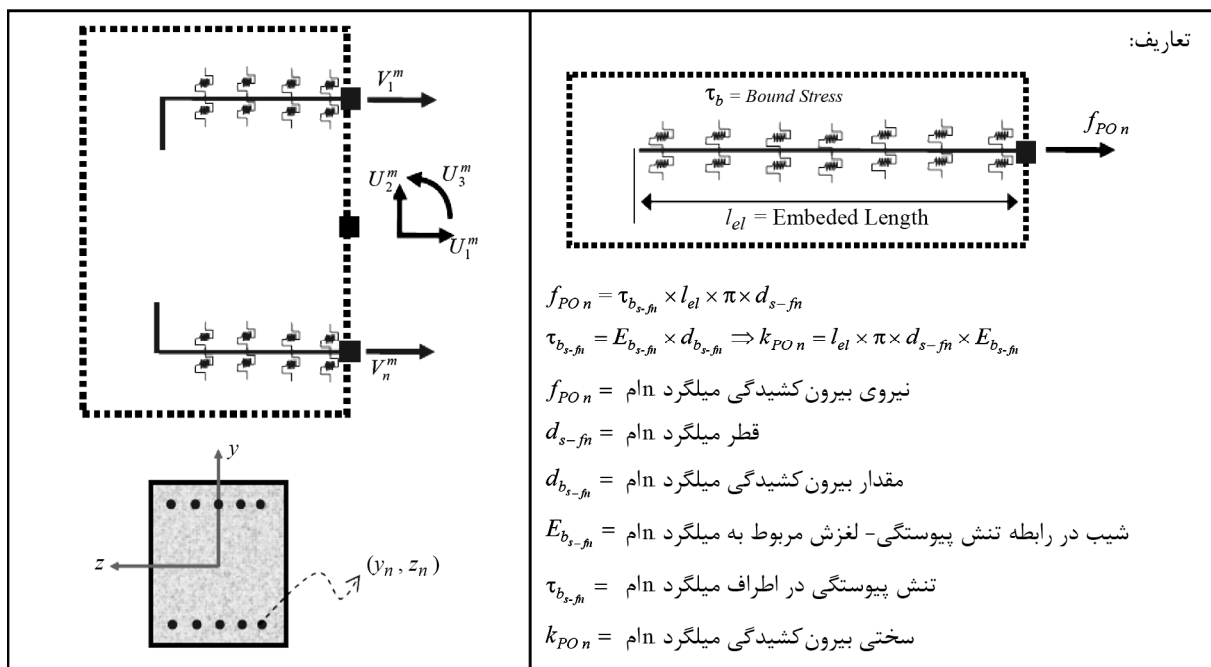
۳- رفتار مصالح

از مدل اصلاح‌شده‌ی کنت و پارک برای تبیین رابطه تنش- کرنش بتن استفاده شده است. این مدل در سال ۱۹۷۲ برای رفتار تنش-کرنش بتن مسلح (مقاطع مربعی محصورشده با خاموت) ارائه شد. در ادامه در سال ۱۹۸۲ توسط اسکات و

در این تحقیق برای مدل‌سازی المان اتصال ضمن لحاظ نمودن موارد فوق، سازوکاری تعریف خواهد شد به‌نحوی که المان اتصال به کمک سرهم‌بندی این سازوکار قابل مدل‌سازی باشد. سازوکار اشاره‌شده سازوکار بیرون‌کشیدگی می‌گردد است. این سازوکار بر اساس مشخصات مکانیکی و هندسی می‌لگردهای مهار شده درون اتصال و تنش پیوستگی بین هر می‌لگرد و بتن پیرامون آن (τ_b) تعریف می‌شود. اگر طول مهاری یک می‌لگرد (l_{el}) کم باشد و یا تنش پیوستگی بین آن و بتن ضعیف باشد، مقدار بیرون‌کشیدگی و یا لغزش آن از درون بتن قابل ملاحظه خواهد بود. در شکل (۶) تعاریف مورد نیاز برای توصیف این سازوکار ارائه شده است.

در محیط اجزای محدود و به کمک برنامه‌نویسی در محیط MATLAB [۱۰] فرم تضعیف‌شده‌ی معادلات حاکم بر مبنای تغییر مکان و تابع انرژی پتانسیل استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

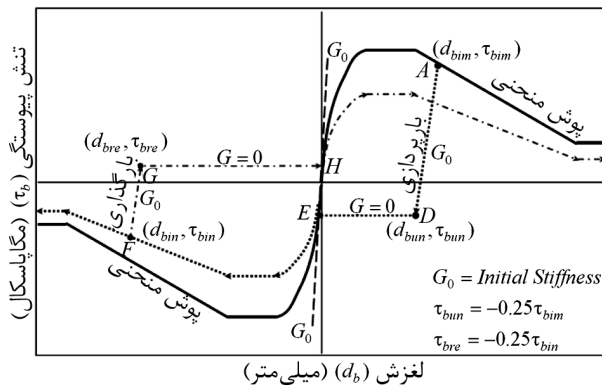
المان اتصال پای دیوار قابلیت مدل‌سازی عددی بیرون‌کشیدگی می‌لگرد متأثر از تضعیف پیوستگی بین بتن فونداسیون و هر می‌لگرد را دارد. همچنین به دلیل تفکیک درجات آزادی دو بخش بتنی و می‌لگردها قابلیت سرهم‌بندی



شکل (۶): سازوکار بیرون‌کشیدگی می‌لگرد و تعاریف مربوطه [۱۱].

همکاران [۱۲] اصلاحاتی روی آن صورت گرفت. مشخصه‌های این مدل در شکل (۷) نشان داده شده است.

مجانب برای منحنی مذکور را دارا می‌باشد. $(\varepsilon_{s0}, \sigma_{s0})$ مختصات مربوط به نقطه‌ی برخورد مجانب‌ها می‌باشد. در این تحقیق از مدل ارائه‌شده توسط الیگهوسن و همکاران [۱۴] برای رابطه‌ی تنش پیوستگی - لغزش استفاده شده است که به صورت یک منحنی غیرخطی می‌باشد (شکل ۹).

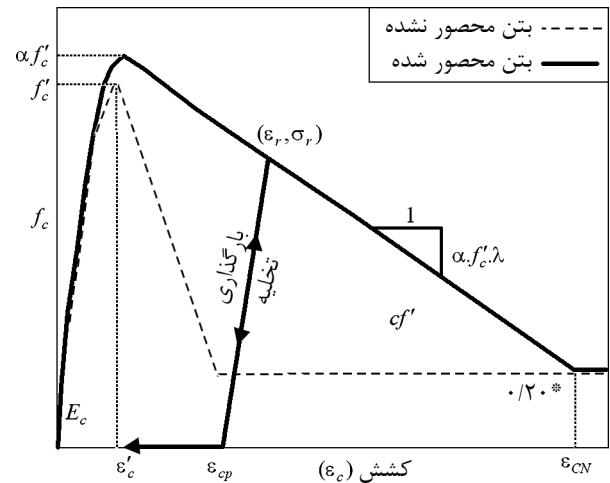


شکل (۹): ضوابط هیستریزس رابطه تنش پیوستگی - لغزش بر اساس مدل الیگهوسن و همکاران [۱۴].

مطابق با شکل (۹) منحنی باربرداری از نقطه a مسیر AD بوده و در ادامه مسیر افقی DE طی می‌شود. مقدار حداکثر تنش پیوستگی تعریف می‌شود که در انتهای بارگذاری قبلی حاصل شده (تجربه‌شده) و مقدار حداکثر لغزش متناظر با τ_{bim} می‌باشد. مسیر AD به صورت خطی و با شیبی برابر با سختی اولیه d_{bim} خواهد بود. مقدار تنش پیوستگی و لغزش در نقطه D که بر اساس مشخصات نقطه A محاسبه شده، به ترتیب τ_{bun} و d_{bun} نامیده می‌شوند. از نقطه D به بعد و در مسیر DE مسیری با شیب صفر طی می‌شود تا به منحنی پوش جهت مقابل برسد. در هنگام بارگذاری مجدد نیز ضوابط مسیری مشابه با مسیر باربرداری شبیه‌سازی می‌شود.

مدل هیستریزس ارائه‌شده توسط آندرسون و همکاران [۱۵] برای مدل‌سازی رفتار تنش - کرنش برشی مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل مطابق با شکل (۱۰) منحنی پوش را به صورت سه خطی در نظر گرفته و در جریان مسیرهای باربرداری و بارگذاری مجدد اثر تغییرات

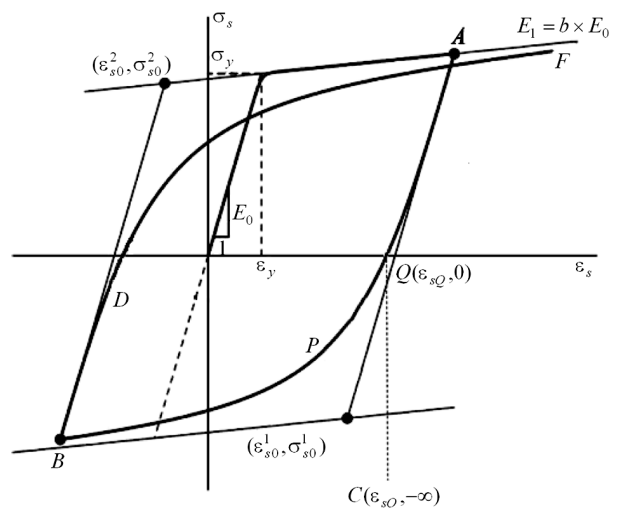
همکاران [۱۲] اصلاحاتی روی آن صورت گرفت. مشخصه‌های این مدل در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۷): منحنی پوش فشاری بتن محصور شده و نشده بر اساس مدل Park و Kent و نحوه باربرداری و بارگذاری مجدد آن [۱۲].

از مدل G-M-P برای تبیین رابطه‌ی تنش - کرنش میلگردها استفاده شده است. این مدل ابتدا توسط گیوفری و پینتو ارائه شد و سپس توسط منگوتو و پینتو تکمیل شده است (شکل ۸) [۱۳].

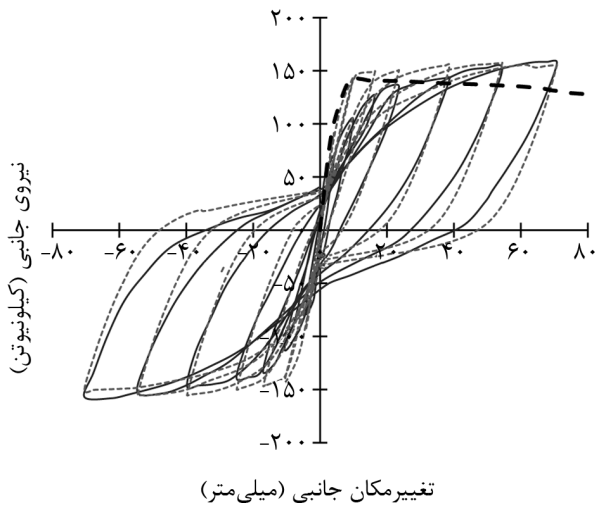
منحنی پوش مدل G-M-P یک منحنی تبدیل و انتقال از یک خط مستقیم با شیب E_0 به خط مستقیم دیگر با شیب E_1 را بیان می‌کند. این خطوط مستقیم در حقیقت نقش



شکل (۸): رفتار تنش - کرنش میلگرد بدون اثر کمانش بر اساس مدل G-M-P [۱۳].

در شکل (۱۲) نمودار چرخه‌ای پاسخ نیرو- تغییر مکان نمونه نشان داده شده است. ظرفیت نهایی دارای انطباق مناسبی بوده و مسیرهای باربرداری و بارگذاری نیز تطابق مناسبی با نتایج تجربی داشته است. همچنین نمودار پوش با فرض پیوستگی کامل بین بتن و میلگرد نیز نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند در مقایسه با نتایج تجربی، تحلیل با در نظر گرفتن اثر پیوستگی- لغزش دارای دقت و انطباق بیشتری می‌باشد.

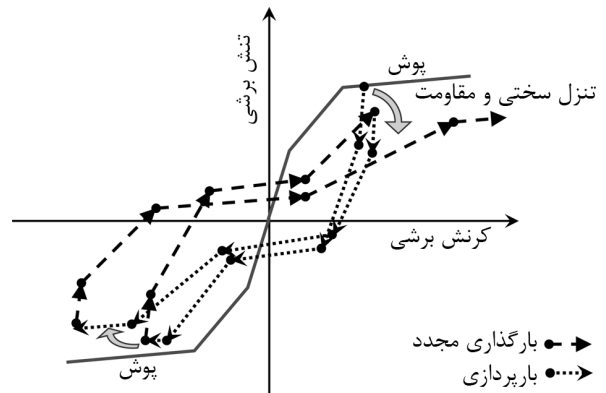
----- تحلیلی با تأثیر پیوستگی- لغزش
 - - - - تحلیلی با فرض پیوستگی کامل
 ————— تجربی



شکل (۱۲): منحنی پاسخ چرخه‌ای نیرو- تغییر مکان جانبی نمونه ۱.

در شکل (۱۳) رفتار چرخه‌ای تنش- کرنش برشی در موقعیت با فاصله‌ی صفر از پای دیوار ارائه شده است. در رفتار چرخه‌ای تنش- کرنش برشی، اثر تنزل مقاومت برشی قابل مشاهده است. مقدار تغییر شکل برشی ایجاد شده از مقدار کرنش حد تسلیم بیشتر است و نشان می‌دهد که رفتار برشی مقطع وارد مرحله خمیری شده است. به منظور بررسی دیگر قابلیت‌های روش عددی پاسخ حاصل برای یک نمونه با تحلیل بار افزون با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. دیوار نمونه شماره ۲ توسط آداناسوپولو در دانشگاه میسیگان مورد آزمایش قرار گرفته است. هندسه و ابعاد نمونه در شکل (۱۴) نشان داده شده

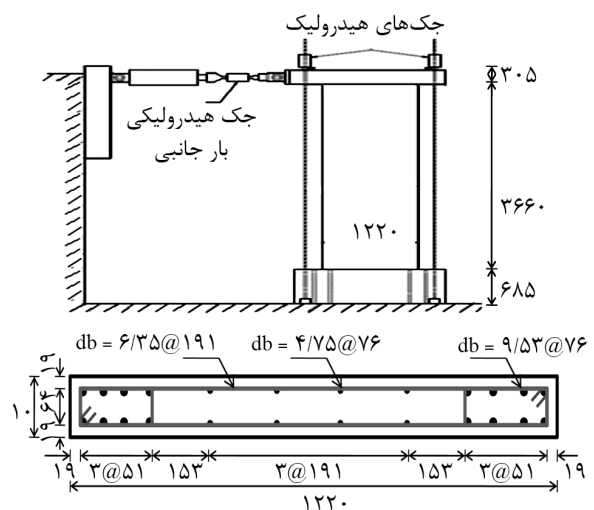
سختی و کاهش مقاومت برشی را در خود لحاظ نموده است. جزئیات بیشتر مدل در مرجع [۱۵] ذکر شده است.



شکل (۱۰): مدل هیستریزس تنش برشی- کرنش برشی مورد استفاده بر اساس تحقیقات آندرسون و همکاران [۱۵]

۴- اعتبارسنجی و بررسی عددی

جهت اعتبارسنجی، نتایج تحلیل عددی با پاسخ نمونه‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. در این تحقیق از دو نمونه دیوار برای اعتبارسنجی استفاده شده است. نمونه ۱ توسط تومسن و والس در سال ۱۹۹۵ مورد آزمایش قرار گرفته است. هندسه و ابعاد دیوار و مقطع آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است. تنش فشاری بتن برابر با ۳۸ مگاپاسکال و تنش تسلیم میلگردها برابر با ۴۳۴ مگاپاسکال است [۱۶]. نیروی محوری فشاری ثابت روی دیوار در اثنای بارگذاری جانبی برابر با ۳۷۸ کیلو نیوتن بوده است.

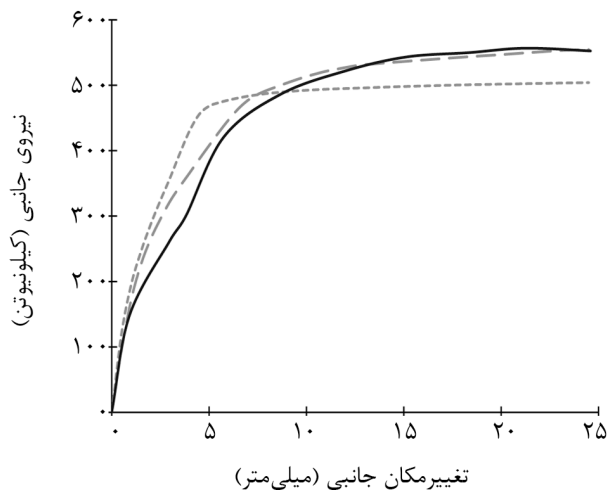


شکل (۱۱): هندسه و ابعاد دیوار نمونه ۱ [۱۶].

جدول (۱): مشخصات مقطع و میلگرد نمونه ۲

ابعاد مقطع	۱۰۲ × ۱۰۱۶ میلی‌متر مربع
قطر میلگرد عرضی	۶/۳۵ میلی‌متر
قطر میلگرد طولی جان	۱۵ میلی‌متر
قطر میلگرد طولی مرزها	۴ میلگرد با قطر ۱۲ میلی‌متر و ۴ میلگرد با قطر ۱۵ میلی‌متر
تنش تسلیم میلگرد عرضی	۶۷۰ مگاپاسکال
تنش تسلیم میلگرد طولی جان	۴۸۰ مگاپاسکال
تنش تسلیم میلگرد طولی مرزها	۴۹۰ مگاپاسکال

—	تحلیلی با استفاده از تئوری تیر تیموشنکو
----	تحلیلی با استفاده از تئوری اویلر برنولی
—	تجربی

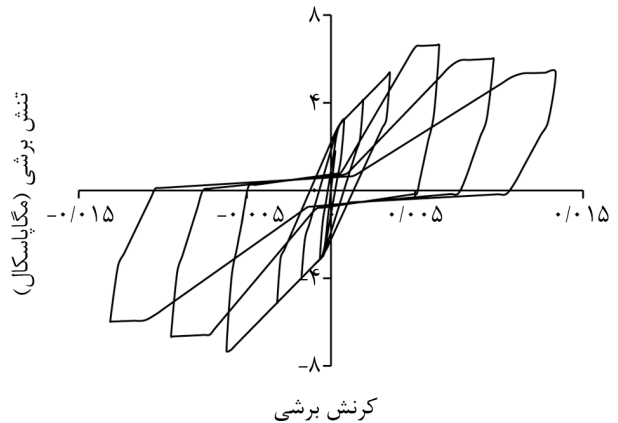


شکل (۱۵): منحنی پاسخ نیرو-تغییر مکان نمونه ۲.

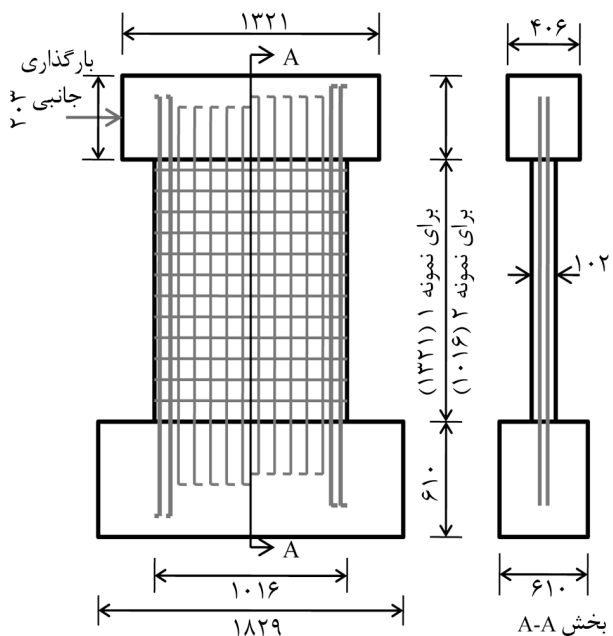
برنولی نیز نشان داده شده است. پاسخ تحلیلی با استفاده از تئوری تیموشنکو به دلیل در نظر گرفتن اثر برش در محاسبات دارای انطباق بهتری با نتایج تجربی بوده و لذا به کار بردن تئوری اویلر برنولی در تحلیل به دلیل صرف نظر کردن از تغییر شکل برشی دارای شیب اولیه بیشتر و به بیان دیگر تخمین سختی بیشتری می‌باشد.

در شکل (۱۶) میلگرد شماره ۱ در مقطع دیوار جهت بررسی رفتار آن نشان داده شده است. در شکل (۱۷) مقدار بیرون کشیدگی میلگرد شماره ۱ در مقطع دیوار نمونه ۲ از درون اتصال برای شرایط طول مهارهای مختلف نشان داده شده است. در شکل (۱۸) پاسخ جابه‌جایی-نیرو برای

است [۱۷]. تنش فشاری بتن برابر ۴۳ مگاپاسکال و پوشش بتن روی میلگردها برابر ۲۵ میلی‌متر می‌باشد دیگر مشخصات نمونه در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۳): رابطه‌ی چرخه‌ای تنش-کرنش برشی در موقعیت پای دیوار برای نمونه ۱.



شکل (۱۴): هندسه دیوار نمونه ۲.

در شکل (۱۵)، منحنی پاسخ نیرو-تغییر مکان مربوط به نمونه ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پاسخ نمونه تحلیلی انطباق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی داشته است. در شکل (۱۵) علاوه بر نتیجه‌ی تحلیلی حاصل از روش پیشنهادی متکی به تئوری تیموشنکو، پاسخ تحلیلی نمونه ۲ با استفاده از تئوری اویلر

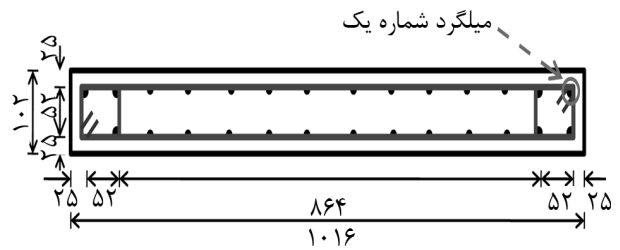
طول مهاری‌های مختلف ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش مدل‌سازی عددی مورد بررسی قابلیت لحاظ کردن اثر بیرون‌کشیدگی میلگرد از درون اتصال را دارا می‌باشد و از حساسیت کافی نسبت به این پارامتر برخوردار است. بر اساس نتایج حاصل شده، کاهش طول مهاری بیشتر از اینکه سختی را تحت تأثیر قرار بدهد، باعث کاهش ظرفیت نهایی و همچنین افزایش لغزش میلگرد در پای دیوار می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

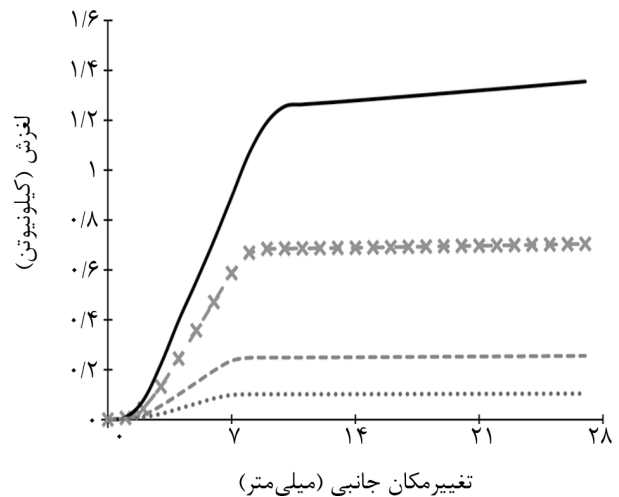
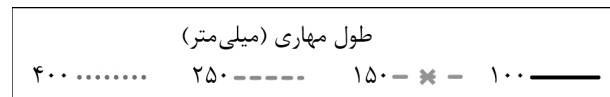
روش تحلیلی پیشنهاد شده در این تحقیق به دلیل اعمال اثر پیوستگی- لغزش و اثر تغییر شکل برشی در محاسبات مربوط به فرآیند مدل‌سازی و تحلیل، از دقت و قابلیت‌های بسیار خوبی برخوردار است. نتایج نشان می‌دهد که حضور و یا عدم حضور اثر لغزش و همچنین برش در مدل‌سازی و تحلیل عددی، نتایج متفاوتی در انواع پاسخ‌ها از جمله ظرفیت نهایی و سختی را نتیجه خواهد داد و بهترین پاسخ عددی زمانی حاصل می‌شود که همه‌ی عوامل مذکور در مدل‌سازی لحاظ گردند. از آنجا که روش پیشنهادی در این تحقیق همه‌ی این عوامل را در نظر می‌گیرد پاسخ عددی را با دقت بسیار خوبی برآورد می‌کند. در این روش اثر بیرون‌کشیدگی میلگرد از درون اتصال وابسته به تنش پیوستگی بین بتن و میلگرد و طول مهاری میلگردها در محاسبات تأثیر داده می‌شود و در مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و تجربی تطابق مناسبی در سختی و همچنین ظرفیت نهایی مشاهده شده است.

مراجع

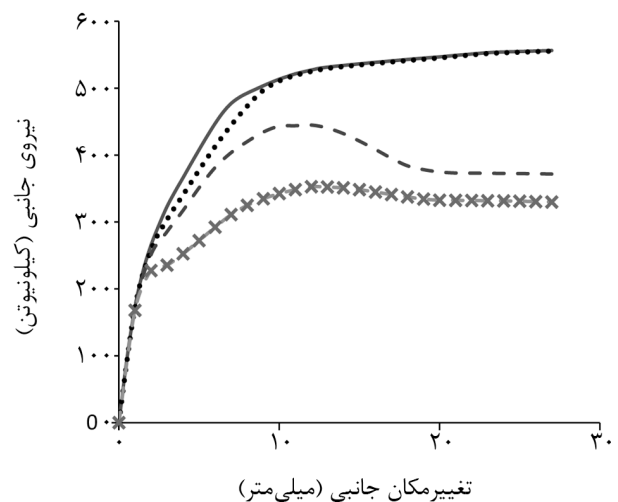
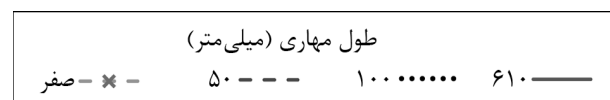
1. Kabeyasawa, T., Shiohara, H., Otani, S., and Aoyama, H. (1983) Analysis of the full-scale seven-story reinforced concrete test structure. *Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo (B)*, 37(2), 431-478.
2. Monti, G. and Spacone, E. (2000) Reinforced Concrete fiber beam element with bond-slip. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 126(6),



شکل (۱۶): میلگرد شماره ۱ برای بررسی رفتار آن.



شکل (۱۷): تغییرات مقدار بیرون‌کشیدگی میلگرد شماره یک در مقطع عرضی پای دیوار نمونه ۲.



شکل (۱۸): نمودار پاسخ نیرو- تغییر مکان جانبی نمونه ۲ برای طول مهاری‌های متفاوت.

- Sciences*, **36**, 109-119.
12. Scott, B.B., Park, R., and Priestley, M.J.N. (1982) Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates. *ACI Journal*, **79** (1), 3-27.
 13. Menegoto, M. and Pinto, P. (1973) Method of analysis for cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending. *Symp. Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads*, IABSE Reports, 13, Lisbon.
 14. Eligehausen, R., Popov, E., and Bertero, V. (1983) *Local Bond Stress-Slip Relationship of Deformed Bars under Generalized*. Report No. UCB/EERC-83/23, Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley.
 15. Anderson, M., Lehman, D., and Stanton, J. (2008) A cyclic shear stress-strain model for joints without transverse reinforcement. *Engineering Structures*, **30**, 941-954.
 16. Thomsen, J.H. and Wallace, J.W. (1995) *Displacement-Based Design of Reinforced Concrete Structural Walls: An Experimental Investigation of Walls with Rectangular and T-Shaped Cross Sections*. Report No. CU/CEE-95/06. Department of civil Engineering. Clarkson University, Potsdam, New York.
 17. Athanasopoulou, A. (2010) Shear Strength and drift capacity of reinforced concrete and high-performance fiber reinforced concrete low-rise walls subjected to displacement reversals. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in the University of Michigan.
 3. Kotronis, P., Ragueneau, F., and Mazars, J. (2005). A simplified model strategy for R/C walls satisfying PS92 and EC8 design, *Journal of Engineering Structures*, **27**(8), 1197-1208
 4. Mullapudi, T.R.S., Charkhchi, P., and Ayoub, A. (2013) Behavior of shear- dominant thin- walled RC structures. *Thin-Walled Structures*, **63**,134-146.
 5. Galal, K. and Sokyary, H.El. (2008) Advance-ment in Modeling of shear walls. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, china.
 6. Ngo, D. and Scordelis A.C. (1967) Finite element analysis of reinforced concrete beams. *ACI Journal*, **64**(3), 153- 163.
 7. Kwan, A.K.H. and He, X.G. (2001) Finite element analysis of effect of concrete confinement on behavior of shear walls. *Computers and Structures*, **79**(19), 1799-1810.
 8. Gruttmann, F. and Wagner, W. (2001) Shear correction factors in Timoshenkos beam theory for arbitrary shaped cross sections. *Computational Mechanics*, **27**, 199-207.
 9. Limkatanyu, S. (2002) Reinforced concrete models with bond- interfaces for the nonlinear static and dynamic analysis of reinforced concrete frame structures. A thesis submitted to the faculty of the graduate school of the University of Colorado in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, Department of Civil Engineering.
 10. MathWorks, MATLAB (2013) The language of Technical Computing, Version 8.01.0. (R2013a).
 11. Hashemi, S.Sh. and Vaghefi, M. (2012) Investigation of the effect of a bar's inadequate embedded length on the P-M interaction curve of reinforced concrete columns with rectangular sections. *Turkish Journal of Engineering and Environmental*