

بررسی عملکرد تیر رابط فولادی تعویض‌پذیر در دیوار برشی بتن مسلح

حمیدرضا حاجی رضایی

دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

h.hajirezayeeshami@iiees.ac.ir

عباسعلی تسنیمی

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

tasnimi@modares.ac.ir

کلیدواژه‌ها: دیوار برشی با تیر همبند، تیر رابط فولادی تعویض‌پذیر، تسلیم برشی، رفتار چرخه‌ای، طراحی فیوز

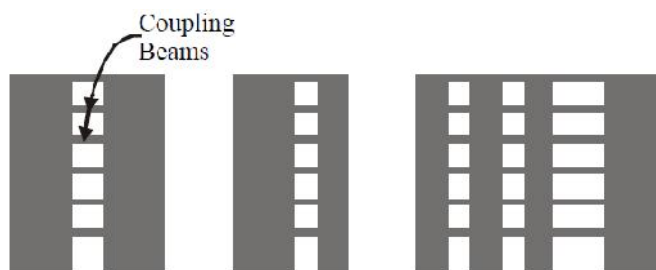
چکیده

در دیوارهای برشی کوپله، تیرهای همبند اولین‌المان‌هایی هستند که تحت بارهای لرزه‌ای وارد رفتار غیرخطی می‌شوند. لذا تیرهای همبند نقش فیوز را داشته و انرژی زلزله را تلف می‌کنند. برای عملکرد بهینه در سیستم دیوارهای کوپله، مکانیزم اتلاف انرژی باید به صورت تشکیل مفاصل پلاستیک در تیرهای همبند صورت پذیرد. در نتیجه وجود تیرها باعث کاهش تنش در دیوارها می‌شود. با این تفسیر، می‌توان تیرهای همبند را به گونه‌ای طراحی کرد تا در نقش یک فیوز که قابلیت تعویض دارند در سیستم عمل کنند. در این پژوهش ابتدا رفتار چرخه‌ای دیوار برشی همبند با تیر رابط فولادی با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود Diana 9.3 با نمونه آزمایشگاهی صحت سنجی شده است. در مش بندی قسمت دیوار بتنی و تیر فولادی از المان‌های بیست گرهی سالیید (solid) ایزو پارامتریک استفاده شده است. برای بتن رفتار ترک توزیع شده (smeared cracking) در نظر گرفته شده است که تحت کشش از منحنی رفتاری هوردجیک و تحت فشار از منحنی رفتاری پارابولیک پیروی می‌کند. هم‌چنین برای تیر فولادی از مدل رفتاری پلاستیسیته ون مایزس با در نظر گرفتن ناحیه کار سختی به کار گرفته شده است.

سپس برای دیوار صحت سنجی شده، تیر فولادی که قابلیت تعویض دارد طراحی شده است. فلسفه طراحی تیر همبند بر این اساس است که زمانی که قسمت فیوز تیر همبند تحت برش جاری می‌شود، نواحی کناری تیر همبند در ناحیه خطی باقی بماند در نهایت رفتار چرخه‌ای تیر همبند فولادی تعویض‌پذیر طراحی شده مورد ارزیابی قرار گرفته است که در نتیجه اثر جمع شدگی (pinching) در منحنی چرخه‌ای در رفتار دیوارهای برشی دارای تیر همبند تعویض‌پذیر مشاهده نشد و حلقه‌ها قابلیت اتلاف انرژی بیشتری از خود نشان می‌دهند.

مقدمه

دیوارهای برشی همبند دستگاهی متشکل از دو یا چندین دیوار برشی است که با تیرهای همبند به یکدیگر متصل شده‌اند و با رفتار یکپارچه، دیوار برشی بزرگ‌تری را به وجود می‌آورند که به طور مؤثرتری در برابر بارهای جانبی مقاومت می‌کنند. در چنین دستگاه‌هایی تحت بارهای جانبی، تیرهای همبند اولین‌المان‌هایی هستند که وارد رفتار غیرخطی می‌شوند. لذا در این سازه‌ها، تیرهای همبند نقش فیوز را برعهده داشته و انرژی زلزله با دوران‌های غیرخطی بزرگ تیر تلف می‌گردد. در نتیجه سختی تیرهای همبند کنترل‌کننده توزیع و بزرگی نیروها در دیوارهای همبند هست. از این رو در زلزله‌های گذشته در سیستم دیوارهای برشی همبند، خسارت اصلی در سازه در تیرهای همبند مشاهده شده است.



شکل ۱: نمونه‌های از هندسه دیوارهای همبند (مالی و پوپوف ۱۹۸۳)

بعد از زلزله ۱۹۶۴ آلاسکا، توجه به بهبود پاسخ تیرهای رابط در دیوار برشی کوپله مورد توجه محققین قرار گرفت. کارهای آزمایشگاهی و آنالیزهای لرزه‌ای که پائولی پیرامون این موضوع انجام داد، منجر به انتشار دستورالعمل طراحی تیر رابط بتن مسلح با آرماتور گذاری مورب (Diagonally reinforced concrete coupling beam) شد (سانتا کومار ۱۹۷۴، پارک و پائولی ۱۹۷۵، پائولی ۱۹۸۶). این تیرها، شکل پذیری و اتلاف انرژی بیشتری نسبت به تیرهای پیشین نشان می‌دادند. تحقیقاتی که روی تحلیل و طراحی تیر رابط فولادی در قاب‌های بادبندی برون‌محور انجام گرفت، یک دستورالعمل ارزشمند، با بالاترین سطح شکل‌پذیری و جذب انرژی را فراهم آورد. (مالی و پوپوف ۱۹۸۳، انگل‌هاردت و پوپوف ۱۹۸۹) (Engelhardt and Popov, 1989). دستورالعمل طراحی فولاد کانادا (CSA ۱۹۸۹)، دستورالعمل طراحی برای قاب مهاربندی برون‌محور که شامل طراحی تیرهای رابط شکل‌پذیری می‌شد، تهیه نمود. در ادامه تحقیقات بسیاری بر روی تیرهای همبند فولادی که قابلیت جذب بالای انرژی را دارا هستند توسط محققان از جمله گانگ و شهروز در سال ۲۰۰۱ (Gong and shahrooz, 2001)، فورتنی و همکاران (Fortney et al., 2007) در سال ۲۰۰۷ و چن و لو در سال ۲۰۱۲ (Chen and Lu, 2012) انجام گرفته شد.

در این پژوهش ابتدا به صحت سنجی یک نمونه دیوار برشی بتن مسلح کوپله با تیر همبند فولادی پرداخته است. سپس برای دیوار برشی کوپله مذکور، تیر همبند تعویض پذیر فولادی طراحی شده و برای ارزیابی این المان، رفتار چرخه‌ای آن تحت بارگذاری رفت و برگشتی با مدل‌سازی اجزا محدودی به دست آمده است.

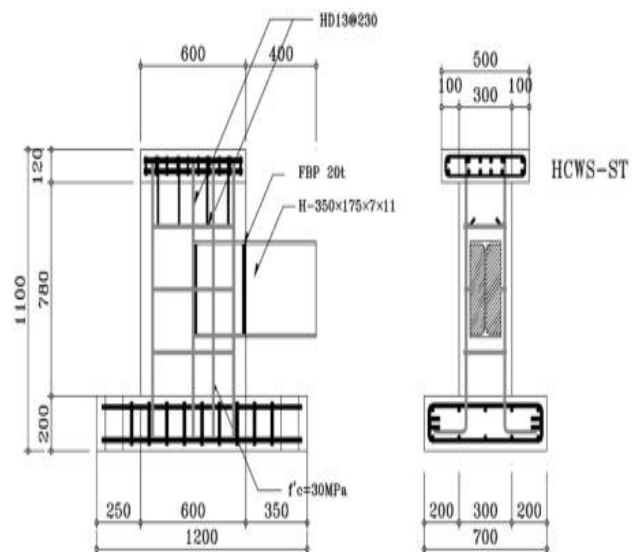
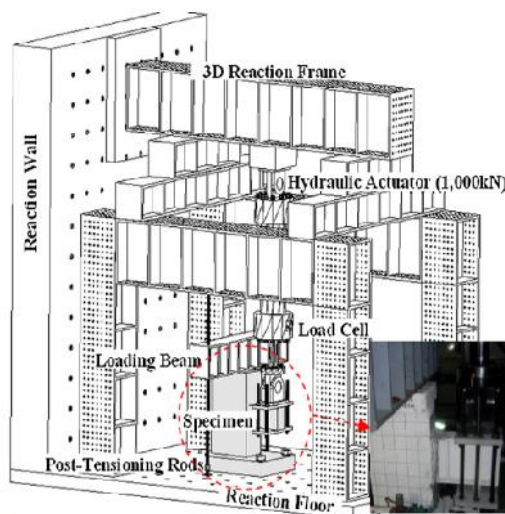
مدل‌سازی و صحت سنجی

دیوار برشی بتن مسلح کوپله با تیر همبند فولادی

نمونه آزمایشگاهی که برای صحت سنجی مدل المان محدود به کار گرفته شده است، مربوط به دیوار برشی بتن مسلح کوپله با تیر همبند فولادی است که تحت بار رفت و برگشتی قرار گرفته است. نمونه ذکر شده توسط پارک وان شین و یون هیون دو در سال ۲۰۰۴ مورد آزمایش قرار گرفته است (Park and Yun, 2006). تمام ویژگی‌های مدل ساخته شده از روی نمونه آزمایشگاهی در مرجع ذکر شده برداشت شده است. مدل آزمایشگاهی ساخته شده و جزئیات تیر همبند و مشخصات مصالح به کار گرفته شده در نمونه به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۱ نشان داده شده است. این مدل توسط دو جک هیدرولیکی ۱۰۰۰ کیلو نیوتنی جهت بارگذاری دیوار و جک هیدرولیکی ۲۰۰۰ کیلو نیوتنی جهت بارگذاری بر روی تیر همبند فولادی بارگذاری شده است.

جدول ۱: مشخصات بتن و فولاد استفاده شده در آزمایش (Park and Yun, 2006)

مشخصات فولاد		مشخصات بتن	
۳۵۲	مقاومت تسلیم (MPa)	۳۰	مقاومت فشاری (MPa)
۰/۰۰۱۸۲۷	کرنش تسلیم	۰/۰۰۲۴۸۴	کرنش نهایی فشاری
۱۹۲۰۰۰	مدول الاستیسیته (MPa)	۲۵۹۰۰	مدول الاستیسیته (MPa)
۴۸۹	مقاومت نهایی (MPa)	۰/۱۶	ضریب پواسون

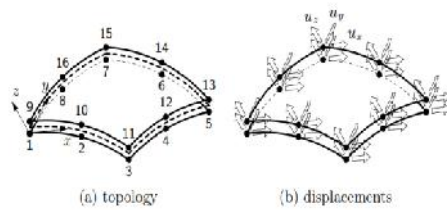


شکل ۲: مدل آزمایشگاهی ساخته شده و جزئیات دیوار و تیر همبند (Park and Yun, 2006)

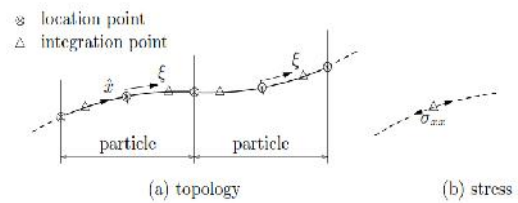
مدل سازی المان محدود دیوار برشی بتن مسلح کوبله با تیر همبند فولادی

در این پژوهش از نرم افزار المان محدود Diana 9.3 به منظور مدل سازی استفاده شده است. در ساخت مدل المان محدود دیوار نمونه، در مش بندی قسمت دیوار بتنی و تیر فولادی از المان های بیست گرهی سالیید (solid) ایزوپارامتریک استفاده شده است. برای بتن رفتار ترک توزیع شده (smeared cracking) در نظر گرفته شده است که تحت کشش از منحنی رفتاری هوردجیک و تحت فشار از منحنی رفتاری پارابولیک پیروی می کند. هم چنین برای تیر فولادی از مدل رفتاری پلاستیسیته ون مایزس با در نظر گرفتن ناحیه کار سختی به کار گرفته شده است.

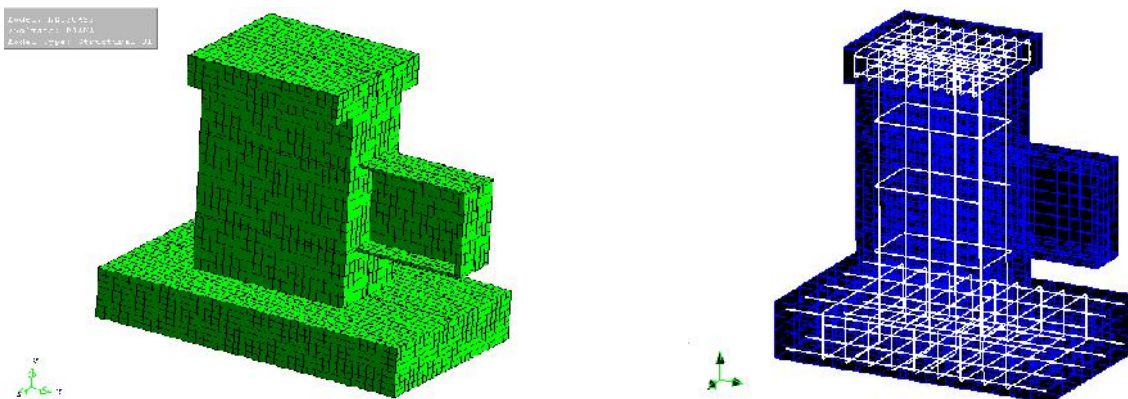
برای میلگردها، از المان میلگرد مسلح استفاده شده است. همان طور که در شکل ۳ دیده می شود کل طول میلگرد به چندین قسمت تقسیم می شود. هر قسمت باید به طور کامل در المان سازه ای قرار بگیرد. متغیرهای این المان کرنش و تنش های می باشند که با درجات آزادی المان محصور کننده صورت همبند عمل می کند. همچنین بین تیر فولادی مدفون در بتن و بتن اندرکنش وجود دارد که سبب می شود لغزشی بین تیر و بتن به وجود آید. برای مدل کردن این رفتار، از المان اندرکنش CQ48I استفاده شده است که به صورت تکاملی مسطح و ضخامت نزدیک به صفر روی سطوح تیر مدفون را پوشانده است (شکل ۴). این المان ها رفتار Bond-Slip را برای تیر شبیه سازی می کنند. با توجه به نتایج آزمایشگاهی و مطالعات عددی که هیروشی ماتسودا و همکاران در مورد رفتار لغزش فولاد مدفون در بتن انجام داده اند برای المان اندرکنش در ناحیه غیر خطی از منحنی شکننده Bond-Slip با مقاومت نهایی ۲ مگاپاسکال در لغزشی برابر با ۰/۰۰۳ میلی متر استفاده شده است (Liu et al., 2009). در نتیجه با این مجموعه می توان رفتار غیر خطی المان ها و مصالح سازه را به نحو مناسب تری مدل سازی نمود (Diana 9.3, 2009). شرایط مرزی در این پژوهش مشابه شرایط موجود در مرجع گفته شده می باشد. نحوه مدل سازی و مش بندی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴: المان اندرکنش



شکل ۳: المان میلگرد مسلح



شکل ۵: نمونه دیوار برشی مدل شده در نرم افزار

صحت سنجی دیوار برشی بتن مسلح کوبله با تیر همبند فولادی

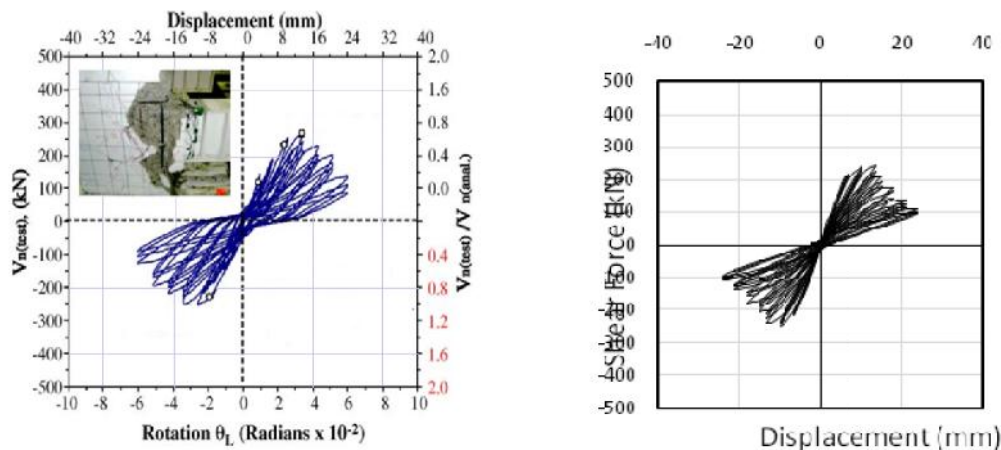
نتایج مدل المان محدود ساخته شده با منحنی هیستریزس آزمایشگاهی اشاره شده در شکل ۶ نشان داده شده است. با مقایسه دو نمودار در شکل ۶، منحنی هیستریزس بدست آمده از آنالیز عددی، انطباق خوب نتایج المان محدود و آزمایشگاهی در مقاومت نهایی، سختی سازه و هم چنین مود خرابی سازه که حاصل از تخریب ناحیه اتصال تیر به دیوار برشی می باشد را نشان می دهد. به منظور صحت سنجی از نسخه خریداری شده نرم افزار المان محدود Diana 9.3 در پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله استفاده شده است.



طراحی تیر همبند فولادی تعویض پذیر

طراحی نمونه شاهد بر اساس میزان دوران مورد انتظار تیر همبند مطابق با ضوابط آئین نامه طرح لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی AISC341-10 صورت پذیرفته است. دوران مورد انتظار تیر همبند به‌طورپیش فرض برای سطوح شکل پذیری بالا در آئین نامه ۰/۰۸ در نظر گرفته شده است؛ مگر آنکه بر اساس دریافت مورد انتظار در طبقه میزان کمتری نیاز باشد. در نمونه‌های آزمایشگاهی مورد نظر جزئیات براساس دورانخطی مورد انتظار ۰/۰۸ رادیان صورت گرفته است.

فلسفه طراحی تیر همبند بر این اساس است که زمانی که قسمت فیوز تیر همبند تحت برش جاری می‌شود، نواحی کناری تیر همبند در ناحیه خطی باقی بماند. از آنجاکه این قسمت از تیر نباید وارد ناحیه غیر خطی شود، ظرفیت مورد انتظار برشی و خمش نظیر ظرفیت مورد انتظار برشی که برای طراحی قسمت فیوز در نظر گرفته شده است را در ضریب η که عددی بزرگ‌تر از یک و وابسته به سطح لرزه‌ایمی باشد ضرب می‌کنیم. با توجه به آئین نامه فرض می‌کنیم η برابر با ۱/۲ باشد.



شکل ۶: نتایج مدل سازی المان محدود و آزمایشگاهی به ترتیب از راست به چپ

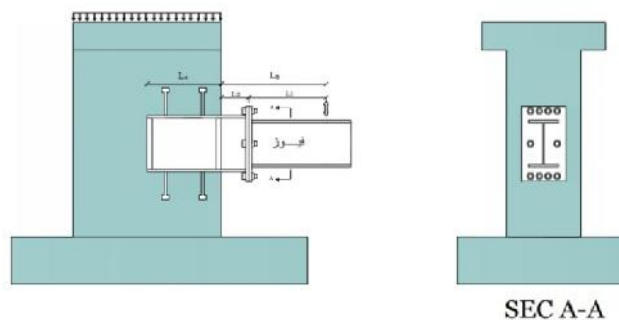
همچنین لاغری اجزا بال و جان باید به صورتی باشد که در اثر تغییر شکل‌های غیرخطی کمانش‌های موضعی در اجزا تیر همبند رخ ندهد. لذا تیر همبند طراحی شده ضوابط D1.1 آئین نامه AISC341-10 برآورده می‌سازد. طراحی تیر همبند فولادی تعویض پذیر با توجه به آئین نامه ذکر شده در سه بخش کلی دسته‌بندی می‌گردد.

۱- طراحی فیوز

۲- طراحی نواحی کناری

۳- طراحی ناحیه اتصال بین فیوز و نواحی کناری تیر همبند

بر اساس مراحل طراحی ذکر شده، ابعاد تقریبی نمونه‌های اجزا محدودی به صورت زیر تخمین زده شده است. نوع و هندسه میلگردهای مدفون در دیوار نیز همانند دیوار برشی بتن مسلح کوبله با تیر همبند فولادی صحت سنجی شده است. همچنین در قسمت اتصال از ۱۰ پیچ با قطر ۱۸ میلی‌متر استفاده شده است. ضخامت ورق اتصال نیز ۱۲/۵ در نظر گرفته شده است. پیچ‌ها از نوع معمولی که مقاومت تسلیم و نهایی آن به ترتیب ۲۴۰ و ۴۰۰ مگا پاسکال است. هم چنین مشخصات بتن، میلگرد و فولاد مصرفی تیر همبند مشابه مشخصاتی که یون و پارک برای مدل آزمایشگاهی خود در نظر گرفته‌اند می‌باشد (Park and Yng, 2006) نمونه شماتیک دیوار برشی طراحی شده با تیر پیوند تعویض پذیر و مشخصات هندسه به ترتیب در شکل ۷ و جدول ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۷: طرح شماتیک کلی بارگذاری نمونه‌های دیوار برشی با تیر همبند

جدول ۲: ابعاد و مشخصات نمونه (کلیه ابعاد به سانتیمتر)

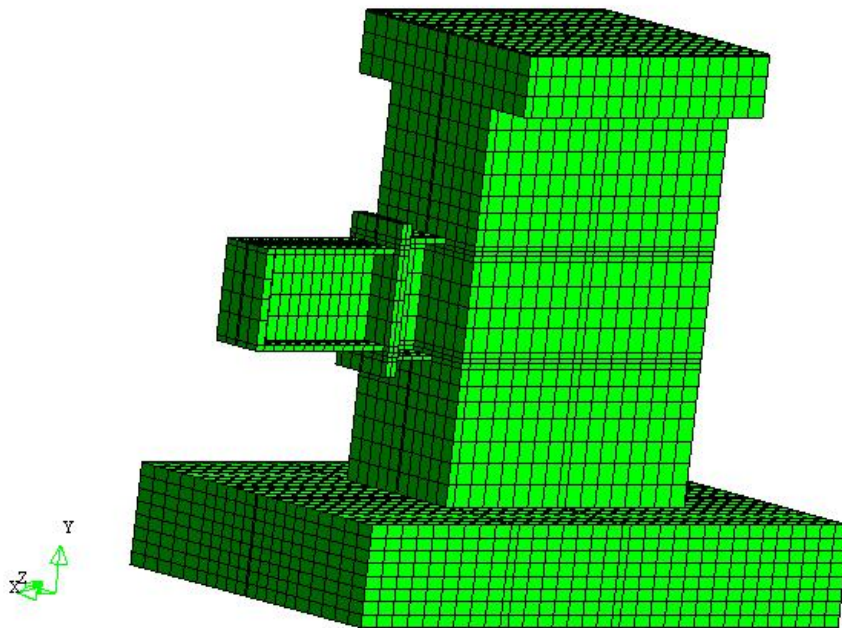
مشخصات	فیوز	ناحیه کناری
عرض بال تیر (b_f)	۱۲	۱۲
ضخامت بال تیر (t_f)	۱/۱	۱/۱
ارتفاع تیر (d)	۲۰	۲۴
ضخامت جان تیر (t_w)	۰/۵	۰/۵
طول (L_n)	۳۰	۱۰

طول مدفون تیر (L_e)	۳۰
ارتفاع نمونه دیوار (H)	۸۰
عرض نمونه دیوار (L)	۶۰
ضخامت نمونه دیوار (t_{wall})	۳۰

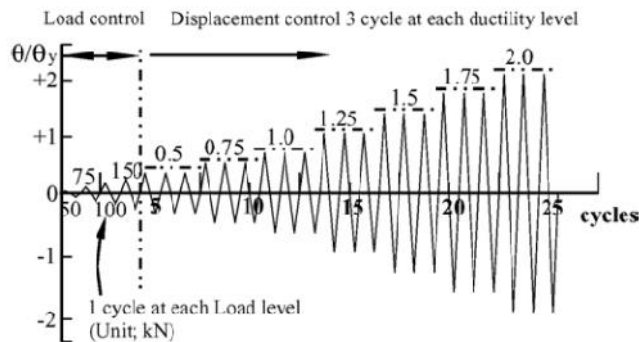
مدل سازی عددی تیر همبند فولادی تعویض پذیر طراحی شده

در این پژوهش از نرم افزار المان محدود Diana 9.3 جهت مدل سازی استفاده شده است. نمونه عددی ساخته شده و پروتکل بارگذاری رفت و برگشتی در شکل ۸ و ۹ قابل مشاهده است که در آن زاویه چرخش متناسب با تغییر مکان تسلیم تیر همبند است.

Model: M3
Analysis: DIANA
Model Type: Structural 3D

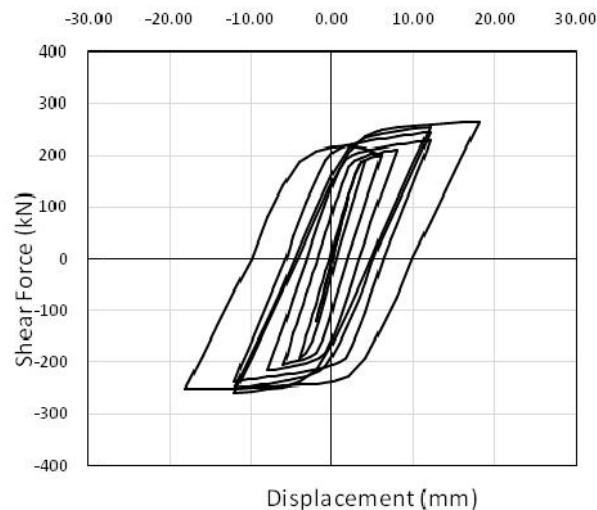


شکل ۸: نمونه دیوار برشی کوبله مدل سازی شده در نرم افزار

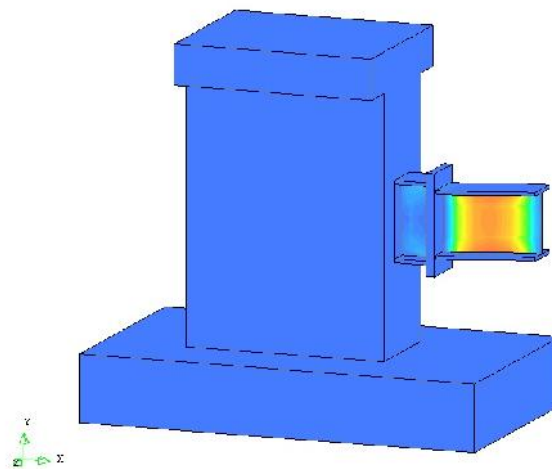


شکل ۹: پروتکل بارگذاری رفت و برگشتی

ویژگی‌هایی از اعضا که به اتلاف انرژی سیستم مرتبط می‌شوند تأثیر بسزایی در عملکرد سیستم دارند. منحنی هیستریزیس تیر همبند فولادی به تسلیم شدن تیر فولادی و ناحیه اتصال تیر همبند فولادی به دیوار بسیار وابسته است. همان‌طور که از طراحی انتظار می‌رفت نتایج آنالیز با تشکیل حلقه‌های کامل هیستریزیس که در آن پینچینگ مشاهده نمی‌شود که حاصل از تسلیم برشی قسمت فیوز تیر همبند است اتلاف انرژی بسیاری را نشان می‌دهد، درحالی‌که قسمت‌های دیگر در ناحیه الاستیک باقی‌مانده‌اند. منحنی هیستریزیس و همچنین کن تور تنش برشی به وجود آمده در نمونه به ترتیب در شکل ۱۰ و ۱۱ دیده می‌شوند.



شکل ۱۰: منحنی رفتاری تیر همبند تعویض‌پذیر



شکل ۱۱: کن تور کرنش‌های پلاستیک تیر همبند تعویض‌پذیر

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا رفتار چرخه‌ای دیوار برشی همبند با تیر رابط فولادی با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود Diana 9.3 با نمونه آزمایشگاهی صحت سنجی شده است. سپس برای دیوار صحت سنجی شده، تیر فولادی که قابلیت تعویض دارد طراحی شده است. در نهایت رفتار چرخه‌ای تیر پیوند فولادی تعویض‌پذیر طراحی شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده در این پژوهش عبارت‌اند از:

- ۱- در دیوار برشی‌های کوپله با تیر همبند تعویض‌پذیر، ناحیه فیوز وارد ناحیه پلاستیک شده درحالی‌که دیوار برشی و ناحیه کناری تیر همچنان در ناحیه الاستیک باقی‌مانده است. تعویض‌پذیر بودن فیوز، قابلیت بهبود رفتار سازه بعد از زلزله را فراهم می‌آورد.
- ۲- اثر جمع شدگی (pinching) در منحنی چرخه‌ای در رفتار دیوارهای برشی دارای تیر همبند تعویض‌پذیر مشاهده نشد و حلقه‌ها قابلیت اتلاف انرژی بیشتری از خود نشان می‌دهند.

- Canadian Standards Association (1989) CAN/CSA S16.1-M89, Limit states design for steel structures, CSA, Rexdale, Ontario
- Chen Y and Lu X(2012) "New replaceable coupling for shear wall," presented at the 15th World Conference of Earthquake Engineering, Lisbon
- Engelhardt, MD and Popov, EP 1989. Behavior of long links in eccentrically braced frames, earthquake engineering research center, Berkeley, report No, UCB/EERC-89/01
- Fortney P, Shahrooz B and Rassati G(2007) "Large-scale testing of a replaceable fuse steel coupling beam," Journal of Structural Engineering ASCE, vol. 133, pp. 1801-1807
- Gong B and ShahroozBM(2001) "Steel-concrete composite beams-behavior and design," Engineering Structures vol. 23, pp. 1480-1490
- Liu S, Matsuda H and Liu Y "Numerical and experimental study on pull-out behavior of stud shear connector embedded in concrete ",vol. 71, pp. 12-19
- Malley and Popov, Design consideration for shear links in eccentrically braced frames, earthquake engineering research center, Berkley, report No.UCB/EERC-83/24
- Park and Pauly (1975) Reinforced concrete structures, john Wiley and sons, New York, 1975
- Park W and Yun H, The bearing strength of steel coupling beam-reinforced concrete shear wall connections, Nuclear Engineering and Design (Elsevier), vol. 236, pp. 77-93
- Tno Diana manual. 9.3, (2009) Published by TNO DIANA bv, tnodiana.com, 2009