

مدل عددی پیشنهادی جهت تحلیل چرخه‌یی غیرخطی تیر همبند فولادی و بتنی در دیوار برشی کوپله‌ی بتن مسلح

حبيب اکبرزاده بنگر* (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه مازندران

ابوذر جعفری (دکتری)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

میثم بهشتی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه مازندران

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۷
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۲/۴، ص. ۵۳-۶۴

مدل سازی عددی دیوارهای برشی مزدوج بتنی جهت شناخت دقیق رفتار سازه‌های بلند در مقابل زلزله الزامی است. اغلب روش‌های مدل سازی عددی تیرهای همبند با استفاده از روش اجزاء محدود با المان‌های کوچک منحصر شده است که به افزایش زمان و هزینه‌ی تحلیل‌ها می‌انجامد. در نوشتار حاضر، با ارائه‌ی روشی جدید، مدل سازی عددی غیرخطی دیوارهای برشی مزدوج بتنی با تیر همبند بتنی و فولادی با المان‌های میله‌یی با دقتی مناسب جهت استفاده‌ی مهندسان انجام شده است. در روش مذکور، تیرهای همبند با استفاده از تیر کشسان و با مفاصل برشی یا خمشی و مفصل لغزشی در دو انتهای آن مدل سازی شده است. همچنین برای مدل سازی دیوارهای برشی از المان‌های چند لایه با مقاطع فایبر^۱ استفاده شده است که اثر محصورشدگی در المان مرزی لحاظ شده است. برای صحت‌سنجی مدل پیشنهادی برای دیوارهای برشی مزدوج بتنی با تیر همبند بتنی و فلزی از نتایج آزمایشگاهی موجود استفاده شده است. مقایسه‌ی رفتار پیش‌بینی شده توسط مدل‌های پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل سازی عددی پیشنهادی، دقت مناسبی دارد.

واژگان کلیدی: دیوار برشی مزدوج بتنی، تیر همبند بتنی، تیر همبند فولادی، مدل سازی عددی، تحلیل غیرخطی چرخه‌یی.

h.akbarzadeh@umz.ac.ir
abouzar.jafari@yahoo.com
maysambeshti@gmail.com

۱. مقدمه

آنجایی که دیوارها علاوه بر بارهای جانبی، بارهای ثقلی را نیز تحمل می‌کنند، لذا هرگونه آسیب به دیوار در حالت نهایی می‌تواند ایمنی ساختمان را به خطر اندازد و حتی تعمیر را پس از زلزله بسیار دشوار کند. در حالت دیگر، اگر تیرهای همبند در مقابل دیوار برشی خیلی قوی نباشند، در حالت نهایی، تیرهای همبند قبل از دیوار تسلیم می‌شوند و انرژی وارده از طرف زلزله را مستهلک می‌کنند؛ لذا خرابی دیوارها در حالت نهایی بحرانی نمی‌شود. بنابراین در صورتی که سیستم سازه‌یی دیوار مزدوج به درستی طراحی شود، اتلاف انرژی لرزه‌یی در ارتفاع، به دلیل تحمل تغییرشکل‌های غیرکشسان تیرهاست.^[۲]

به دلیل اینکه عرض بازشوها در بیشتر دیوارهای برشی مزدوج بین ۱ تا ۲ متر است، لذا تیرهای همبند با نسبت دهانه به ارتفاع ۲ یا حتی کمتر هستند، پس به عنوان تیر عمیق شناخته می‌شوند و در نتیجه تیرهای مذکور در هنگام زلزله تمایل به گسیختگی برشی دارند. تیر همبند بتنی، رایج‌ترین تیر همبند در المان دیوار برشی مزدوج بتنی است. همان‌طور که گفته شد، تیرهای همبند با نسبت دهانه به عمق

سیستم دیوار برشی بتنی از سیستم‌های رایج جهت مقابله با نیروی جانبی ناشی از زلزله در ساختمان‌های بتن مسلح به‌خصوص ساختمان‌های بلند است. به دلیل استفاده از بازشوهای در یا پنجره به طور منظم در ارتفاع، دیوار برشی اغلب به دو دیوار کوچک‌تر تقسیم می‌شود که به وسیله‌ی تیرهای همبند به هم متصل می‌شوند. نیروهای جانبی اعمال شده به دیوار مزدوج، باعث تولید زوج نیروی محوری در دیوارها می‌شوند و سپس نیروی محوری مذکور، نیروی برشی بزرگی در تیرهای همبند ایجاد می‌کند. بنابراین تیرهای همبند باعث عملکرد زوج‌شدگی دو دیوار و در نتیجه، تحمل بخشی از لنگر واگونی ناشی از نیروی زلزله می‌شوند.^[۱]

در زلزله‌های بزرگ، تیرهای همبند بسیار قوی، نیروهای بزرگی در دیوارها ایجاد می‌کنند که باعث گسیختگی پایه‌های دیوار قبل از گسیختگی تیرها می‌شوند. از

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۸/۱، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۲/۷، پذیرش ۱۳۹۵/۱۲/۱۶.

DOI:10.24200/J30.2019.1440

مقطع کمتر از ۲، با جذب انرژی بالا و رفتار غالب برشی هستند. مطالعاتی در سال ۱۹۷۵، بر روی رفتار تیرهای همبند بتنی با نسبت دهانه به عمق مقطع کمتر از ۲) با بارگذاری چرخه‌ای) انجام شد و این نتیجه به دست آمد که جهت جلوگیری از شکست برشی و افزایش جذب انرژی و شکل‌پذیری تیرهای همبند بتنی با نسبت دهانه به عمق مقطع کمتر از ۲، میلگرگذاری قطری ویژه‌ی نیاز است.^[۳] به دلیل مشکلات ساخت و زمان‌بر بودن اجرای تیرهای همبند بتنی، پژوهشگران روش‌های مختلفی جهت جایگزین کردن آن‌ها پیشنهاد کرده‌اند.^[۴-۹] یکی از راه‌حل‌های پیشنهادی، استفاده از تیرهای همبند فولادی با تکیه‌گاه‌های محاط‌شده در دیوار برشی بتنی است.^[۹،۵،۴]

مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که تیرهای همبند فولادی، مقاومت، شکل‌پذیری، سختی و پاسخ چرخه‌ای خوبی را برای عملکرد سازه‌ی جهت جایگزینی تیر همبند بتنی در زلزله از خود نشان می‌دهند. جهت تحلیل غیرخطی دیوار برشی مزدوج با تیر همبند بتنی یا تیر همبند فولادی، پژوهش‌های محدودی انجام شده است که بیشتر آن‌ها روش عددی با المان‌های کوچک و برای عضو تک تیر همبند بوده است. همچنین مدل‌هایی با المان‌های بزرگ در برخی نوشتارها ارائه شده‌اند، ولی در هیچ‌یک، نمونه‌ی دیوار برشی مزدوج بتنی چندطبقه با تیر همبند فولادی و یا تیر بتنی با میلگرد قطری با نمونه‌ی آزمایشگاهی اعتبارسنجی نشده‌اند.

در سال ۱۹۹۸،^[۱۰] با طراحی و تحلیل دینامیکی غیرخطی ۴ سازه با دیوار برشی مزدوج بتنی با تیرهای همبند بتن مسلح و فولادی به بررسی و مقایسه‌ی مزیت‌های تیرهای مذکور در سیستم‌های دیوار مزدوج پرداخته شده است. مدل‌سازی غیرخطی دیوارهای برشی بتنی مزدوج در نرم‌افزار RUAUMOKO با یک ستون معادل با مشخصه‌ی اندرکنش نیروی محوری - لنگر خمشی در مرکز مقطع دیوار و تیرهای همبند با یک المان خطی با مقطعی با سختی چرخه‌ای انجام شده است. همچنین در سال ۲۰۰۲،^[۱۱] با مدل‌سازی چند نمونه دیوار برشی بتنی مزدوج با تیر فولادی مدفون در دیوار در نرم‌افزار اجزاء محدود DIANA، روشی جهت طراحی و مدل‌سازی اجزاء محدود دیوار برشی بتنی مزدوج با تیر فولادی جهت تحلیل استاتیکی غیرخطی ارائه شده است. دیوارهای برشی بتنی در نرم‌افزار DIANA با استفاده از المان‌های ریز خمشی هسمان‌گرد ۳ گره‌یی و ۴ گره‌یی، همچنین جان تیرهای همبند فولادی با استفاده از المان‌های خمشی هسمان‌گرد ۴ گره‌یی و بال‌های تیرهای همبند با استفاده از المان خرابایی مدل‌سازی شدند. مدل‌های مذکور آثار غیرخطی مواد، ترک‌خوردگی بتن، باز و بسته شدن بتن در ناحیه‌ی مدفون تیر همبند و سطح دیوار را در برمی‌گیرند.

در سال ۲۰۰۷،^[۱۲] نیز با مدل‌سازی دیوار مزدوج بتن مسلح ۳ طبقه با تیر همبند بتن مسلح با میلگرد قطری در نرم‌افزار اجزاء محدود VecTor۲ به بررسی اثر میلگردهای محصورکننده در تیرهای همبند در مقاومت آن‌ها و رفتار دیوار مزدوج بتن مسلح پرداخته و از مش‌های ریز مثلی و مستطیلی جهت مدل‌سازی المان‌های دیوار مزدوج بتن مسلح استفاده شد. همچنین میلگردهای قطری با استفاده از المان خرابایی مدل‌سازی شدند.

همچنین در پژوهش دیگری در همان سال،^[۱۳] جهت تحلیل غیرخطی دینامیکی، ساختمان بتن مسلح با دیوار برشی بتنی در نرم‌افزار PERFORM-۳D مدل‌سازی شد و دیوارهای برشی بتنی مزدوج با استفاده از مقاطع فایبر موجود در نرم‌افزار و همچنین تیرهای همبند بتنی با استفاده از دو قطعه المان از نوع تیر^۲ موجود در نرم‌افزار با مقطع کشسان و مفصل برشی غیرخطی در مرکز تیر مدل‌سازی شدند. در سال ۲۰۱۰،^[۱۴] نیز با آزمایش بر روی تیرهای همبند بتن مسلح با میلگرد قطری، روشی جهت مدل‌سازی تیرهای همبند در نرم‌افزار PERFORM-۳D

جهت تحلیل دینامیکی پیشنهاد شد که به سختی کشسان تیر همبند بتنی و مشخصات بار تغییرمکان مفاصل تیر همبند وابسته بود. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که روش مذکور، دقت بسیار بالایی داشته است.

برخی پژوهشگران نیز در سال ۲۰۱۰،^[۱۵] با تحلیل ساختمان ۴۲ طبقه‌ی بتن مسلح با دیوار برشی بتن مسلح مزدوج، تفاوت بین طراحی سازه‌ی براساس آیین‌نامه‌ی ساختمانی ۲۰۰۶ ICC و انجمن طراحی ساختمان بلند لس‌آنجلس ۲۰۰۸ LATBSDC را بررسی کردند. دیوارهای برشی بتنی مزدوج با استفاده از مقاطع فایبر موجود در نرم‌افزار و همچنین تیرهای همبند بتنی با استفاده از دو المان تیر با مقطع کشسان و مفصل برشی در مرکز تیر مدل‌سازی شدند. در سال ۲۰۱۱،^[۱۶] نیز با مدل‌سازی اجزاء محدود تیر همبند بتن‌آرمه و تیر همبند فولادی که قبلاً آزمایش شده بودند به بررسی تفاوت پاسخ چرخه‌ای دو المان مذکور در دیوارهای برشی مزدوج بتنی پرداخته شد و نتایج بررسی‌های اخیر، نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر تیر همبند فولادی در جذب انرژی لرزه‌یی بود. همچنین در سال ۲۰۱۱،^[۱۷] جهت بررسی آثار روش‌های مقاوم‌سازی تیرهای همبند با محصورشدگی توسط صفحات فولادی و صفحات FRP، مطالعات عددی روی تیرهای مذکور با مدل‌سازی اجزاء محدودی در نرم‌افزار اجزاء محدود ANSYS انجام شد.

با اعتبارسنجی از چند نمونه دیوار برشی بتنی و دیوار مزدوج بتن مسلح در نرم‌افزار Opensees (۲۰۱۳)،^[۱۸] بر روی آسمان‌خراش شانگهای، تحلیل تاریخی زمانی غیرخطی انجام شد و دیوار برشی مزدوج با استفاده از چند لایه با خواص مشابه، که به چند مش کوچک‌تر تقسیم می‌شدند، مدل‌سازی شد. سپس به هر یک از لایه‌های مذکور، رفتار بتن و فولاد اختصاص داده شد.

همچنین در سال ۲۰۱۴،^[۱۹] جهت بررسی مکانیزم‌های شکست دیوارهای برشی بتن مسلح با بازشوهای نامنظم، دیوارهای برشی بتنی با بازشوی منظم (دیوار مزدوج) و دیوار بدون بازشو تحت بارگذاری یک‌نواخت جانبی قرار گرفتند و دیوارهای مذکور در نرم‌افزار اجزاء محدود BIOGRAF ۰۲ جهت مطالعه‌ی عددی با مش‌های مثلی مدل‌سازی شدند. در همان سال، مؤسسه‌ی ملی استاندارد و تکنولوژی (NIST)،^[۲۰] تعداد زیادی از ساختمان‌های بتن مسلح آسیب‌دیده در زلزله‌ی ۲۰۱۰ شیلی را در نرم‌افزارهایی مثل PERFORM-۳D، Opensees و ... جهت انجام تحلیل‌های غیرخطی دینامیکی و پوش‌آور مدل‌سازی کردند. در گزارش مذکور، مقاطع پایه‌های دیوارهای برشی مزدوج بتن مسلح و تیرهای همبند بتنی موجود در ساختمان‌های بتنی در نرم‌افزار PERFORM-۳D، به ترتیب با مقاطع فایبر چندلایه‌ی دیوار برشی و دو المان تیر موجود در نرم‌افزار با مقطع کشسان و یک فنر غیرخطی برشی در مرکز تیر همبند مدل‌سازی شدند.

همچنین برخی پژوهشگران در سال ۲۰۱۶،^[۲۱] جهت بررسی عملکرد دیوارهای مزدوج بتن مسلح با تیرهای همبند بتن مسلح و فولادی طراحی‌شده براساس مقاومت، تعدادی ساختمان بتن مسلح با دیوار برشی بتنی مزدوج را در نرم‌افزار PERFORM-۳D تحلیل غیرخطی کردند. دیوارهای برشی بتنی مزدوج، با استفاده از مقاطع فایبر دیوار برشی موجود در نرم‌افزار و نیز تیرهای همبند بتنی و فولادی، با المان تیر با مقطع کشسان و مفصل برشی در مرکز تیر، مدل‌سازی شدند.

همان‌طور که مطالعات پیشین در زمینه‌ی تحلیل غیرخطی تیرهای همبند نشان می‌دهند، مدل‌های عددی پیشنهادی بیشتر بر روی تک تیر همبند بتنی و فلزی ارزیابی شده‌اند. همچنین مدل‌های تئوری با نرم‌افزارهای اجزاء محدود با المان‌های کوچک انجام شده است که برای مهندسان کاربردی نیست. مدل‌هایی نیز در نرم‌افزار PERFORM-۳D ارائه شده است ولی در هیچ‌یک از آن‌ها، نمونه‌ی دیوار برشی

درجه‌ی زوج‌شدگی مؤثر بین ۲۰ تا ۵۵ درصد توصیه می‌شود.^[۲۳] لذا در مدل‌های آزمایشگاهی انتخاب‌شده در نوشتار حاضر، نسبت زوج‌شدگی ۳۵٪ توصیه شده است.

برای بررسی بیشتر دیوارهای برشی مزدوج بتنی با تیر همبند بتنی یا فلزی در برابر بارهای لرزه‌یی با درجه‌ی زوج‌شدگی مختلف، نیاز به مدل‌سازی مناسب با سرعت آنالیز بالاست. لذا در ادامه، نحوه‌ی مدل‌سازی چنین دیوارهایی جهت تحلیل غیرخطی با شیوه‌ی جدید در نرم‌افزار PERFORM-۳D توضیح داده شده است.

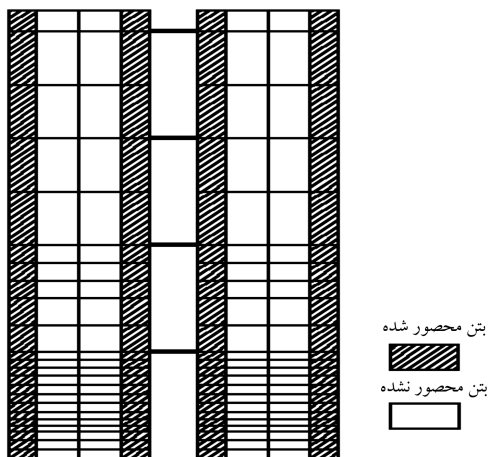
۳. مدل‌سازی سیستم دیوار در نرم‌افزار

PERFORM-۳D

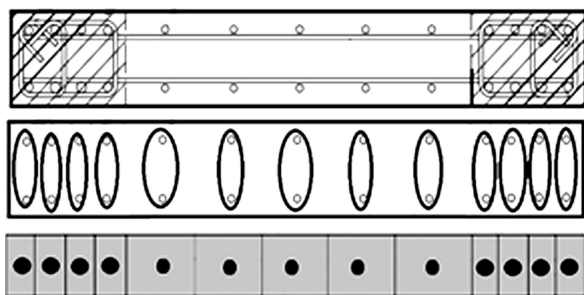
۱.۳. مدل‌سازی دیوار برشی بتنی مسلح

برای مدل‌سازی رفتار دیوارها از مدل اجزاء محدود با المان‌های پوسته‌یی چندلایه استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نوع بتن استفاده‌شده در المان مرزی به‌صورت محصورشده و در جان دیوار به‌صورت محصورنشده در نظر گرفته شده است. همچنین میلگردهای فولادی طولی در پایه‌های دیوار به‌صورت الیاف فولادی متمرکز در الیاف بتنی مدل‌سازی شده‌اند (شکل ۳).

در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از مقاطع فایبر که می‌توانند برای تعریف سطح مقطع عرضی هر المان استفاده شوند، رفتار غیرخطی دیوارها مدل شده است. برای این کار، با به‌کارگیری یک چیدمان صحیح از الیاف بتنی و فولادی، که رفتار هر یک از آن‌ها به‌صورت نمودارهای تنش - کرنش با دقت بالایی تعریف شده‌اند، می‌توان سطح مقطع هر المان را مدل‌سازی کرد. سپس با استفاده از المان‌های مذکور در



شکل ۲. چیدمان المان الیاف بتنی.



شکل ۳. چیدمان الیاف فولادی در مقاطع دیوار.

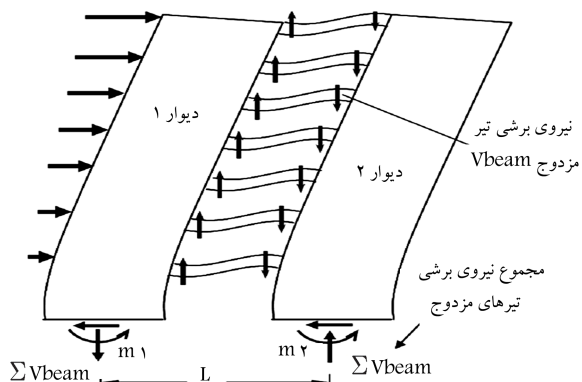
مزدوج بتنی چند طبقه، با آزمایش‌های انجام گرفته اعتبارسنجی نشده است. لذا در پژوهش حاضر، مدل تئوری کاربردی در نرم‌افزار PERFORM-۳D جهت تحلیل غیرخطی چرخه‌یی سیستم دیوارهای برشی مزدوج بتنی با تیر همبند بتنی و فلزی پیشنهاد شده است که قابل کاربرد برای تحلیل غیرخطی دینامیکی است. مدل‌سازی پیشنهادی مذکور علاوه بر دقت مناسب، برای مهندسان نیز سادگی به همراه دارد.

۲. رفتار دیوارهای برشی مزدوج بتن مسلح

نیروی جانبی مقاوم در دیوارهای مزدوج، ترکیبی از نیروی خمشی پایه‌ی دیوارها و عملکرد قابی ناشی از تیرهای همبند است که خود متشکل از زوج نیروی محوری ایجادشده در پایه‌های دیوار حاصل از برش در تیرهای همبند است (شکل ۱). رفتار سازه‌یی سیستم دیوار مزدوج در برابر بار جانبی با تغییر نسبت زوج‌شدگی تغییر می‌کند. به‌طور کلی، دیوارهای برشی مزدوج بتنی با درجه‌ی زوج‌شدگی به ۳ دسته تقسیم می‌شوند، که شامل: دیوارهای جدا از هم که فقط توسط یک تیر ضعیف اتصال یافته‌اند (زوج‌شدگی پایین)؛ دیوارهای برشی مزدوج بتنی با زوج‌شدگی مؤثر (زوج‌شدگی متوسط) و دیوارهای با تیرهای همبند بسیار قوی (زوج‌شدگی بالا).^[۲۴] همچنین مطابق رابطه‌ی ۱، معیاری جهت سنجش رفتار سازه‌یی سیستم‌های دیوار مزدوج، که به آن درجه‌ی زوج‌شدگی (CR) می‌گویند، تعریف می‌شود:

$$CR = \frac{L \sum V_{beam}}{L \sum V_{beam} + \sum m_i} \quad (1)$$

که در آن، $\sum V_{beam}$ مجموع مقاومت برشی تمام تیرهای همبند روی پایه‌ی دیوارها، L بازوی مقاوم از مرکز تا مرکز پایه‌ی دیوارها و $\sum m_i$ مجموع مقاومت خمشی پایه‌ی دیوار هستند. اگر زوج‌شدگی برابر با ۰٪ باشد، به این مفهوم است که دو تا دیوار به‌صورت جدا رفتار می‌کنند، اگر درجه‌ی زوج‌شدگی برابر با ۱۰۰٪ باشد به این مفهوم است که پایه‌های دو دیوار به‌عنوان یک پایه‌ی تکی رفتار می‌کنند. لذا در درجه‌ی زوج‌شدگی ۱۰۰٪ تحت زلزله‌های شدید، مفصل خمیری در دیوار زودتر از تیرهای همبند اتفاق می‌افتد که ایمنی سازه را به خطر می‌اندازد. بنابراین درجه‌ی زوج‌شدگی باید به گونه‌یی باشد که ابتدا در تیر همبند، مفصل خمیری ایجاد شود. براساس نتایج انجام شده از تحلیل اجزاء محدود ساختمان‌های ۱۲ طبقه با دیوار برشی مزدوج با تیر فولادی، درجه‌ی زوج‌شدگی دیوار مزدوج بین ۳۰٪ تا ۴۵٪ توصیه می‌شود.^[۱] همچنین برای دیوار مزدوج با تیر بتنی



شکل ۱. تعریف زوج‌شدگی.^[۲۴]

حاضر، f_{cr} برابر با $0.55\sqrt{f_c}$ و کرنش کششی نهایی بتن با استفاده از نتایج بررسی‌های وچپو و کولینز حدود 0.002 در نظر گرفته شده است (روابط ۲ الی ۴):

$$f_{c1} = E_c \varepsilon_1 \quad (N/mm^2) \quad (2)$$

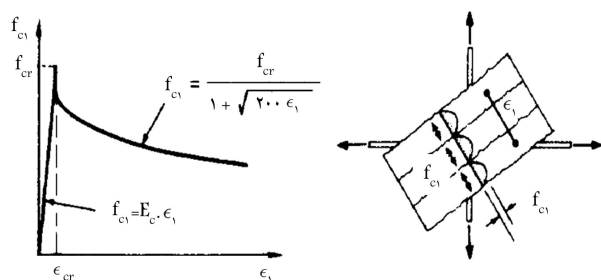
$$E_c = 4700 \sqrt{f_c} \quad (N/mm^2) \quad (3)$$

$$f_{c1} = \frac{f_{cr}}{1 + \sqrt{200 \varepsilon_1}} \quad (N/mm^2) \quad (4)$$

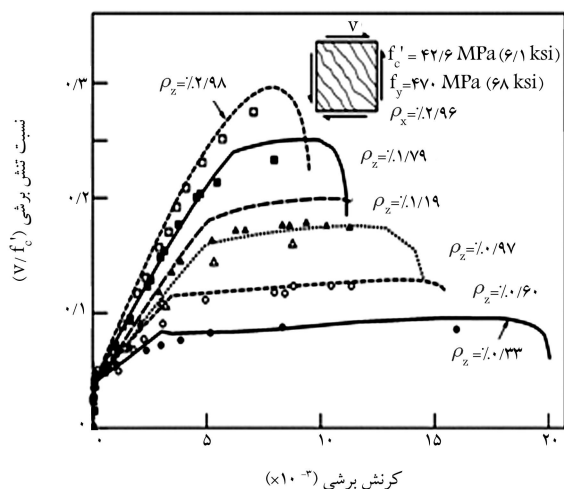
که در آن‌ها، پارامترهای E_c ، ε_1 و f_c (مگاپاسکال)، به ترتیب سختی کشسان (مگاپاسکال)، کرنش کششی و بیشینه‌ی مقاومت بتن (مگاپاسکال) هستند.

۲.۱.۳. لایه‌ی برشی بتنی

لایه‌ی سوم استفاده‌شده برای مدل‌سازی المان‌های دیوار، لایه‌ی برشی بتن است، که فاقد مقطع فایبر است که این رفتار به صورت غیرخطی فرض می‌شود. جهت مدل‌سازی برشی بتن در مقاطع فایبر المان‌های دیوار از مدل پیشنهادی بنتز و کولینز استفاده شده است (شکل ۷).^[۲۸] همانطور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، نمودار تنش - کرنش نرمال‌شده‌ی، براساس مقاومت بیشینه‌ی محوری، کرنش نهایی برشی و درصد‌های مختلف میلگرد عرضی ارائه شده است و با توجه به منحنی‌ها و با داشتن مقاومت فشاری بتن و درصد میلگرد عرضی دیوار، منحنی نسبت تنش برشی مقاوم به مقاومت فشاری بتن به طور تقریبی استخراج و در نرم‌افزار استفاده شده است. همچنین در شکل مذکور، منحنی‌های تنش برشی - کرنش دیوار با درصد‌های میلگرد عرضی $\rho_v = A_v/b_w s$ (مساحت میلگردهای عرضی موجود در مقطع، b_w عرض مقطع و s فاصله‌ی میلگردهای عرضی) برابر با $2/98$ ،



شکل ۶. منحنی تنش - کرنش کششی بتن جهت مدل‌سازی.



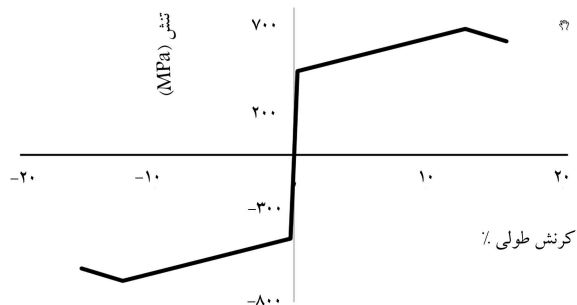
شکل ۷. منحنی تنش - کرنش برش جهت مدل‌سازی.^[۲۸]

لایه‌های مختلف که هر یک بیانگر یکی از خواص مکانیکی و رفتاری بتن مسلح است، المان‌ها به صورت موازی به یکدیگر متصل و رفتار کلی یک دیوار مدل‌سازی شده است. بنابراین جهت مدل‌سازی رفتار غیرخطی دیوارهای بتنی، از المان‌های Shear wall در نرم‌افزار PERFORM-۳D استفاده شده است. همچنین برای بررسی رفتارهای خمشی و برشی در دیوارهای مذکور از یک المان ترکیبی از دو لایه‌ی خمشی - محوری و برشی استفاده شده است.^[۲۵] لایه‌های مذکور در گره‌های المان‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند و به صورت لایه‌هایی موازی با هم عمل می‌کنند. در پژوهش حاضر، از ۳ نوع لایه برای مدل‌سازی رفتار دیوارها استفاده شده است که شامل لایه‌ی خمشی - محوری بتنی، لایه‌ی خمشی - محوری فولادی و لایه‌ی برشی بتن بوده است.

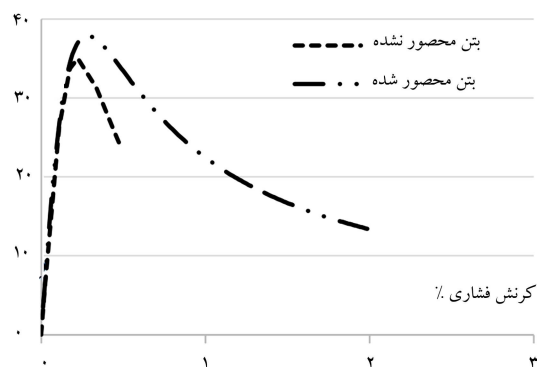
۱.۱.۳. خواص مکانیکی الیاف خمشی - محوری بتن و فولاد

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، آرماتورهای فولادی به صورت رفتار سه خطی تنش - کرنش مدل می‌شوند. در لایه‌ی خمشی - محوری فولادی، توزیع الیاف فولادی همانند توزیع آرماتورها در ساختار مقطع دیوار مدل می‌شوند. مدل تنش - کرنش مندر و همکاران،^[۲۶] جهت مدل‌سازی بتن در وضعیت‌های محصورشده و محصورنشده در تنش فشاری المان‌های دیوار استفاده شده است (شکل ۵).

جهت مدل‌سازی تنش - کرنش بتن محصورشده و محصورنشده در کرنش از مدل تنش - کرنش کششی وچپو و کولینز همانند شکل ۶ استفاده شده است. در مدل مذکور، تنش کششی بتن به صورت خطی با رابطه‌ی ۲ تا تنش ترک‌خوردگی افزایش می‌یابد و سپس با رابطه‌ی ۴ به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد.^[۲۷] تنش کششی بتن (مگاپاسکال) و f_{cr} تنش ترک‌خوردگی بتن (مگاپاسکال) است که وچپو و کولینز برابر با $0.33\sqrt{f_c}$ پیشنهاد کرده‌اند، ولی آیین‌نامه‌ی ۸ - ۲۰۰۸، ACI۳۱۸، تنش کششی بیشینه‌ی بتن را برابر با $0.55\sqrt{f_c}$ پیشنهاد می‌کند. لذا در پژوهش



شکل ۴. منحنی تنش - کرنش تک محوری فولاد.



شکل ۵. منحنی‌های تنش - کرنش تک محوری بتن.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج بار - تغییرمکان که نایش^[۳۰] به دست آورده است، به دلیل در نظر گرفتن تغییر شکل‌های لغزشی با نتایج ASCE ۴۱-۰۶ اختلاف دارد، در حالی که نتایج ارائه شده توسط ASCE ۴۱-۰۶ محافظه کارانه تر است. لذا در مطالعه‌ی حاضر، از نتایج به دست آمده توسط نایش جهت به دست آوردن روابط بار - تغییرمکان تیرهای همبند بتنی استفاده می‌شود.

روش‌های اول و دوم جهت تحلیل کشسان، نیاز به تخمین مقادیر سختی مؤثر کشسان خمشی و برشی به علت ترک خوردگی دارند. مقادیر سختی مؤثر کشسان خمشی و برشی به ترتیب برابر با $0.5E_cI_{eff}$ و $0.4AcwE_c$ در FEMA ۳۵۶، پیشنهاد شده‌اند.^[۳۱] همچنین اصلاحیه‌ی ASCE ۴۱-۰۶ در سال ۲۰۱۰، مقادیر کمتر از $0.3E_cI_{eff}$ را در نظر گرفته است. نایش^[۳۰] با آزمایش بر روی تیرهای همبند بتن مسلح با میلگرد قطری، سختی خمشی تیر همبند را بین ۰/۱ تا ۰/۱۵ سختی مقطع کل تیر همبند بتنی پیشنهاد داده است. لذا در مطالعه‌ی حاضر، از سختی مؤثر پیشنهادی نایش^[۳۰] برای تیرهای همبند بتنی با میلگرد قطری استفاده شده است. سختی کشسان مؤثر برشی تیر همبند بتنی نیز برابر با ۰/۴ سختی کشسان مؤثر خمشی فرض شده است.

۲.۲.۳. مدل سازی تیرهای همبند فولادی

برخی پژوهشگران (۱۹۹۳)،^[۴] با بارگذاری چرخه‌یی نمونه‌های واقعی تیرهای فولادی که جان آن‌ها در برابر کماتش تقویت شده بود به بررسی رفتار تیرهای مذکور پرداخته‌اند. در مطالعه‌ی مذکور، بیشینه‌ی مقاومت برشی در حدود ۱/۵ برابر مقاومت برشی اسمی جان براساس ANSI/AISC ۳۶۰-۱۰^[۳۲] و چرخشی برابر با ۱۰٪ گزارش شده و مقاومت برشی مورد انتظار (V_p) برابر با ۱/۲۵ برابر برش اسمی توصیه شده است.^[۴] در پژوهش دیگری (۲۰۰۱)، نیز با بررسی مشکلات دیوار مزدوج بتن مسلح با تیرهای فولادی و کامپوزیتی فولادی - بتنی، مقدار ظرفیت دوران تیرهای فولادی در حدود ۰/۰۶ رادیان و تیرهای کامپوزیتی در حدود ۰/۱۲ رادیان ذکر شده است.^[۸] همچنین در سال ۲۰۱۴^[۳۳] با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی تیرهای همبند کامپوزیتی فولادی - بتنی، به بررسی طول محاطی تیرهای مذکور در دیوار مزدوج بتنی پرداخته و روشی جهت مدل سازی غیرخطی آن‌ها پیشنهاد شده است. در پژوهش مذکور، تیرهای همبند کامپوزیتی با روش‌هایی که برای مدل سازی تیرهای همبند بتن مسلح ذکر شده است، در نرم افزار PERFORM-۳D مدل سازی شده و نتایج مدل سازی به دست آمده، دقت بسیار بالایی برای مدل سازی این گونه

۱/۷۹، ۱/۱۹، ۰/۹۷، ۰/۶ و ۰/۳۳ رسم شده است. مدول برشی (G) نیز برابر با $0.4Ec$ در نظر گرفته شده است.

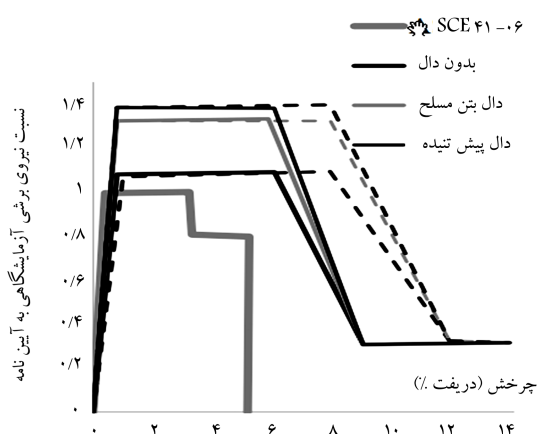
۲.۳. مدل سازی تیرهای همبند

استفاده‌ی بسیار زیادی از روش‌های مدل سازی مفصل خمیری و مدل‌های فایبر با روابط تک محوری مواد برای بتن و میلگرد در مدل سازی تیر - ستون جهت تحلیل و طراحی ساختمان انجام می‌گیرد. برای تیرهای همبند هم می‌توان از روش‌های مدل سازی تیر - ستون استفاده کرد. بنابراین جهت بررسی دقیق تر مدل سازی تیر همبند، روش‌های مختلف مدل سازی شامل مفصل خمیری و روش فایبر استفاده شده است.

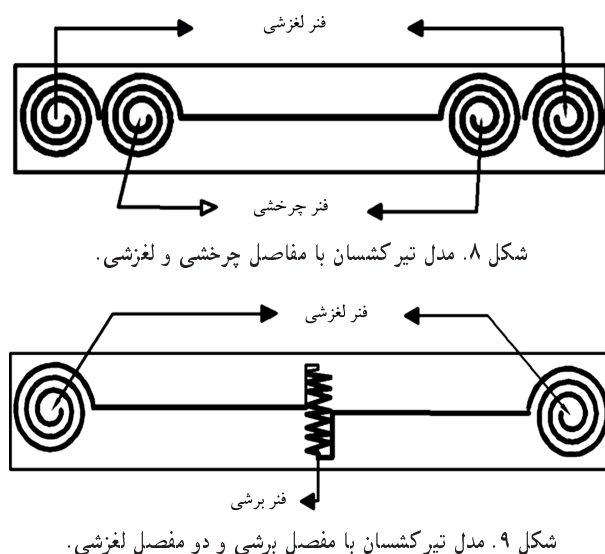
۱.۲.۳. تیرهای همبند بتنی

چهار روش مدل سازی برای تیرهای همبند بتنی با مفصل خمیری می‌توان استفاده کرد. روش اول، متشکل از یک تیر با مقطع کشسان با سختی خمشی و برشی مشخص جهت محاسبه‌ی تغییر شکل‌های خطی است و یک فنر غیرخطی چرخشی در هر انتهای تیر جهت در نظر گرفتن تغییر شکل‌های غیرخطی خمشی و برشی استفاده می‌شود (شکل ۸). همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، از یک فنر کشسان چرخشی جهت در نظر گرفتن تغییر شکل‌های لغزشی استفاده می‌شود. در روش دوم، از تیر کشسان با سختی خمشی و برشی مشخص و یک فنر غیرخطی برش - تغییرمکان در وسط دهانه‌ی تیر جهت در نظر گرفتن برش و تغییر شکل‌های برشی و همچنین از یک فنر چرخشی جهت تغییر شکل‌های لغزشی استفاده می‌شود (شکل ۹).

در روش‌های سوم و چهارم که تفاوت آن‌ها با روش‌های قبلی فقط در جایگزین کردن تیر با مقطع کشسان با یک تیر با المان‌های فایبر است، به دلیل اینکه بیشترین آثار غیرخطی مربوط به میلگردهای قطری می‌شود و آثار آن‌ها با استفاده از مفصل در نظر گرفته می‌شوند، لذا میلگرد قطری در المان بندی اجزاء دیوار مدل نمی‌شود. در روش مذکور به دلیل استفاده‌ی روش فایبر در حالت کشسان جهت مدل سازی تیر، نیازی به تعیین سختی کشسان نیست. پارامترهای مدل سازی بار - تغییر شکل مفصل هر یک از روش‌ها را می‌توان از نتایج موجود در ASCE ۴۱-۰۶^[۳۴] و یا از نتایج بررسی‌های نایش (۲۰۱۰)^[۳۰] استفاده کرد. خصوصیات بار - تغییرمکان آزمایش‌های نایش روی تیرهای همبند بتنی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. منحنی‌های پوش با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و نتایج ASCE ۴۱-۰۶.^[۳۰]



که $f_s = f_y$ است، مطابق روابط ۱۰ الی ۱۴ هستند:

$$\delta_s = \delta_{s1} \times \left(\frac{u_e}{u_u} \right)^{2.5} [mm] \quad (10)$$

$$\delta_{exty} = 1.25 \times \varepsilon_y \times \frac{L_e}{\gamma} [mm] \quad (11)$$

$$\delta_{toty} = \delta_s + \delta_{exty} [mm] \quad (12)$$

$$\theta_{@ \delta_{tot}} = \frac{\delta_{toty}}{d - x} [rad] \quad (13)$$

$$K = \frac{M_y}{\theta_{@ \delta_{tot}}} [mm - MPa] \quad (14)$$

که در آن‌ها، δ_s بیانگر لغزش میلگردها (میلی‌متر)، کشیدگی میلگردها به دلیل تجمع کرنش‌ها در تمامی طول میلگرد در حالت تسلیم (میلی‌متر)، δ_{toty} تغییر مکان کلی میلگرد در سطح مشترک تیر- دیوار در حالت تسلیم (میلی‌متر)، x فاصله ی تار فشاری تا تار خشی مقطع تیر بتنی در حالت تسلیم (میلی‌متر)، d ارتفاع مؤثر مقطع تیر بتنی (میلی‌متر)، $\theta_{@ \delta_{tot}}$ زاویه ی ترک باز شده در سطح مشترک تیر- دیوار به دلیل لغزش میلگردها (رادیان) در حالت تسلیم و K سختی مفصل لنگر - انحنای (مگاپاسکال) جهت مدل سازی می‌باشند.

۴. معرفی نمونه‌ها

در پژوهشی در سال ۲۰۱۵، [۶] دو دیوار مزدوج برشی بتن‌آرمه ی ۴ طبقه با مقیاسی برابر با نصف مقیاس واقعی با تیرهای همبند بتن‌آرمه با میلگردهای قطری و تیرهای فولادی با ورق فولادی با تنش تسلیم پایین در جان تیر به منظور بررسی رفتار چرخه‌یی دیوارهای مزدوج با تیرهای بتن‌آرمه و فولادی طراحی و آزمایش شدند. با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲، ارتفاع کلی دیوارها از فونداسیون، طول افقی پایه‌ها، ارتفاع هر یک از طبقات، طول تیرهای همبند و ضخامت دیوارهای مورد آزمایش به ترتیب ۶۳۰ سانتی‌متر، ۱۳۰ سانتی‌متر، ۱۵۰ سانتی‌متر، ۴۵۰ میلی‌متر و ۲۰۰ میلی‌متر بودند. مقاطع و خصوصیات بتن و میلگردهای پایه‌های دیوارها برای هر یک از دیوارهای مزدوج با توجه به نوع تیر مورد استفاده در دیوارهای مزدوج، در ارتفاع مشابه یکدیگر و ثابت بودند. با توجه به شکل ۱۳ و تنها تفاوت بین مقاطع دیوارهای برشی مزدوج بتن مسلح و تیر همبند فولادی، در سطح مشترک دیوار و تیرهای همبند فولادی (تکیه‌گاه) از نصف مقطع $8 \times 13 \times 200 \times 400$ mm استفاده شده است. بارهای وارده به دیوارهای مزدوج برشی بتن مسلح با تیرهای فولادی و بتنی مشابه هستند. قبل از اعمال بارهای افقی، بر سطح هر یک از پایه‌های دیوار، نیروی

تیرها داشته است. روشی که در پژوهش مذکور جهت مدل‌سازی تیرهای همبند فولادی استفاده شده است، همانند مدل پیشنهادی برای تیر همبند بتن مسلح بوده است (شکل‌های ۸ و ۹). همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، در روش ذکر شده، تیر همبند با استفاده از مفاصل خمشی در دو انتهای تیر یا مفاصل برشی در وسط تیر و مفصل لغزشی در دو انتهای تیر و یک تیر کشسان یا فایبر مدل می‌شود. همچنین سختی کشسان تیرهای همبند فولادی از رابطه ی ۵ که توسط هریس و همکاران پیشنهاد شده است، به دست می‌آید: [۱۰، ۵، ۴]

$$EI_{eff} = 0.6 k' E_s I_{gs} \rightarrow k' = \left(1 + \frac{1.2 E_s I_{gs} \lambda}{I_c G_s A_w} \right)^{-1} \quad (5)$$

که در آن، k' بیانگر کاهش سختی خمشی به دلیل تغییر شکل‌های برشی است، I_{gs} ممان اینرسی مقطع کامل، E_s مدول کشسانی فولاد، G_s مدول برشی فولاد، A_w مساحت مقطع فولادی مقاوم در برابر برش، λ ضریب شکل برای برش است (مقطع I شکل برابر با ۱/۲۵)، L_c دهانه ی مؤثر تیر همبند است. همچنین سختی کشسان برشی برای تیر همبند با فرض $K' = 1$ برابر با $0.6 G_s A_w$ استفاده می‌شود و سختی مؤثر کشسان برشی تیر همبند فولادی برابر با ۰/۴، سختی مؤثر خمشی تیر مذکور فرض شده است.

۳.۲.۳. محاسبات فنر کشسان لغزشی

لغزش میلگردهای خمشی، بخش بزرگی از تغییر شکل تیر (۴۰-۵۰ درصد) در حالت تسلیم را به خود اختصاص می‌دهند. [۱۵] در اصلاحیه ی دستورالعمل ۴۱-۰۶-ASCE، سختی تیر کشسان به دلیل آثار لغزش در حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد کاهش داده شده است. [۳۴] برخی پژوهشگران (۱۹۹۲)، نیز جهت مدل‌سازی آثار لغزش در چرخش تسلیم عضو، روشی را برای مدل‌سازی لغزش میلگردها در تکیه‌گاه تیرهای همبند، سطح مشترک تیر و دیوار پیشنهاد داده‌اند. در روش مذکور، برای مدل‌سازی آثار لغزش در نرم‌افزار از یک مفصل چرخشی نیمه صلب استفاده شده است. [۳۵] در مطالعه ی حاضر، آثار لغزش میلگردها در هر دو نوع دیوار به دلیل اینکه میلگردها در سطح مشترک دیوار و تیر حضور دارند، در نظر گرفته شده است. معادلات ۶ الی ۹ مربوط به آثار لغزش هستند که در ادامه ارائه شده‌اند. پارامترهایی که برای محاسبات مذکور نیاز هستند، عبارت‌اند از d_b قطر میلگردهای خمشی (میلی‌متر)، L_d طول گیرایی میلگردها (میلی‌متر)، f'_c مقاومت بیشینه ی بتن مورد استفاده در تیر همبند (مگاپاسکال)، f_y تنش تسلیم میلگردهای خمشی تیر همبند (مگاپاسکال)، M_y لنگر تسلیم مقطع تیر (نیوتن. میلی‌متر) و f_s تنش موجود در میلگردهای فولادی (مگاپاسکال).

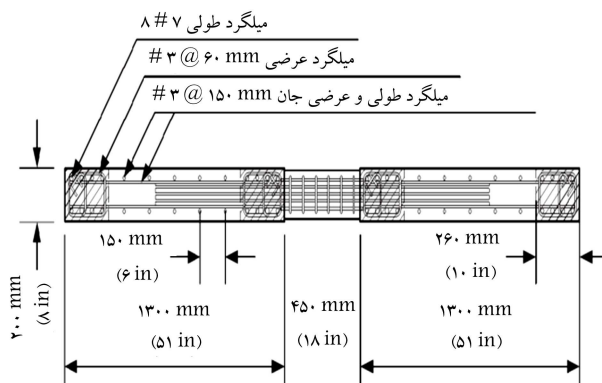
$$u_e = \frac{f_y \times d_b}{4 \times L_d} [MPa] \quad (6)$$

$$L_e = \frac{f_s \times d_b}{4 \times u_e} [mm] \quad (7)$$

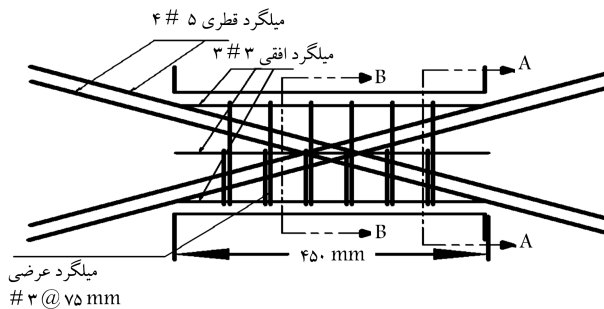
$$u_u = \left(20 - \frac{d_b}{4} \right) \times \sqrt{\frac{f'_c}{30}} [mm] \quad (8)$$

$$\delta_{s1} = \sqrt{\frac{30}{f'_c}} [mm] \quad (9)$$

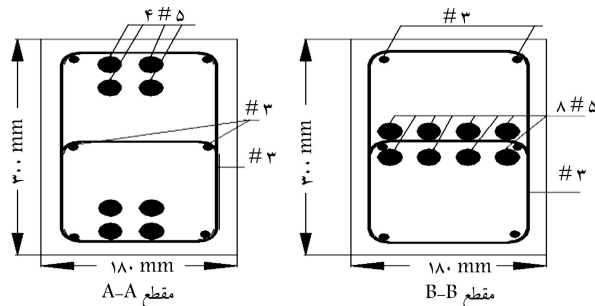
در فرمول‌های اخیر، u_e تنش کشسان پیوستگی (مگاپاسکال)، L_e طول ناحیه ی کشسان (میلی‌متر)، u_u تنش بیشینه ی پیوستگی (مگاپاسکال) و δ_{s1} ارائه دهنده ی لغزش موضعی در تنش بیشینه ی پیوستگی (میلی‌متر) هستند. محاسبات در زمانی



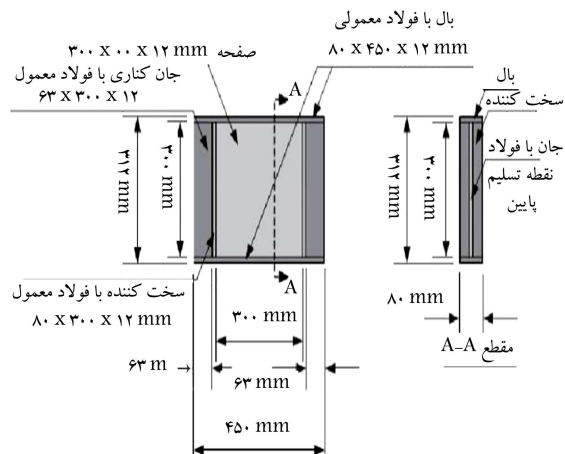
شکل ۱۱. مقطع دیوار برشی مزدوج. [۶]



شکل ۱۴. جزئیات میلگرد ضربدری در تیر همبند بتنی.



شکل ۱۵. جزئیات مقطع تیر همبند بتن آرمه.



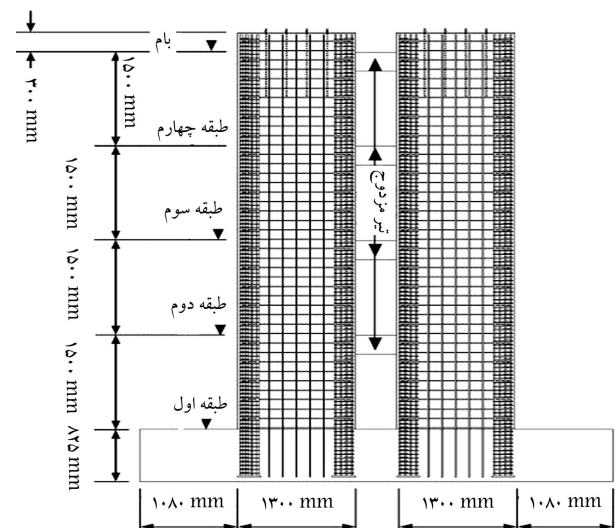
شکل ۱۶. جزئیات مقطع تیر همبند فولادی.

ضخامت بال، ضخامت جان، ضخامت سخت‌کننده‌های تیر فولادی به ترتیب برابر با ۳۱۲ میلی‌متر، ۸۰ میلی‌متر و بقیه‌ی موارد ۱۲ میلی‌متر هستند. ظرفیت برشی نهایی تیر فولادی با توجه به پائل میانی تیر براساس رابطه‌ی ۱۶ برابر با ۲۴۰ کیلو نیوتن است. در رابطه‌ی مذکور، $f_{y,LYP}$ تنش تسلیم فولاد جان برابر با ۱۰۰ مگاپاسکال و A_w مساحت مقطع جان تیر هستند.

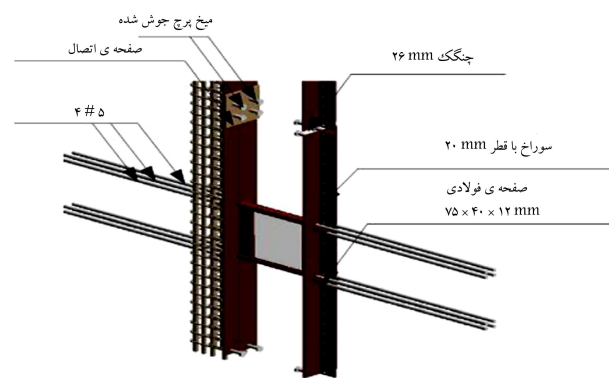
$$V_{n,LYP} = {}^o/\mathfrak{C}_{y,LYP} A_w \quad (16)$$

۵. بحث نتایج مدل سازی مختلف تیر همبند

برای صحت‌سنجی مدل‌های دیوار برشی مزدوج بتنی، با استفاده از نتایج پژوهشی در سال ۲۰۱۵،^[۶] منحنی لنگر واژگونی پایه‌ی دیوارها - دریافت کلی طبقه‌ی بام به‌دست آمده از آزمایش و مدل‌های غیرخطی دیوارهای مزدوج با یکدیگر مقایسه



شکل ۱۲. ارتفاع و طول‌های دیوارهای مزدوج بتن مسلح برای دیوارها. [۶]



شکل ۱۳. جزئیات اتصال تیر همبند فلزی به دیوار مزدوج. [۶]

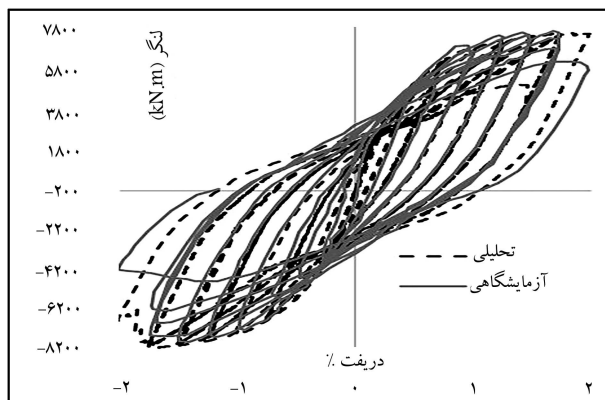
محوری معادل با ۲۴۵ کیلو نیوتن از طریق ۲ جک هیدرولیکی در طبقه‌ی بام اعمال و سپس بارهای افقی در ترازهای ۳ مترو و ۶ متر از سطح فونداسیون به وسیله‌ی جک‌ها به صورت خرجه‌ی به دیوار وارد شده‌اند.

تیرهای همبند بتن مسلح در دیوارهای برشی مزدوج مذکور، ابعادی به طول ۴۵۰ میلی‌متر، ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و عرض ۱۸۰ میلی‌متر دارند و جزئیات آرماتورگذاری آن‌ها در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود. زاویه‌ی میلگردهای قطری نسبت به افق ۱۹ درجه است.

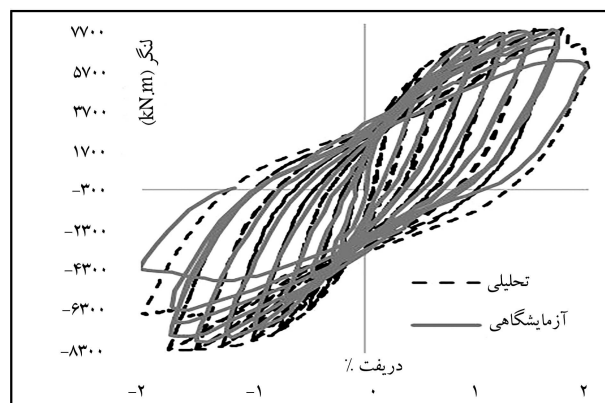
جهت محاسبه‌ی ظرفیت برشی تیر همبند از رابطه‌ی ۱۵ استفاده می‌شود که در آن، A_s مساحت یک دسته از میلگردهای قطری، f_y تنش تسلیم میلگردهای قطری، برابر با ۴۲۰ مگاپاسکال و α زاویه‌ی میلگردهای قطری با افق هستند. بنابراین ظرفیت برشی نهایی تیر همبند بتنی، تقریباً ۲۱۴ کیلونیوتن است.

$$V_{n,cb} = \mathfrak{r} A_s f_y \sin(\alpha) \quad (15)$$

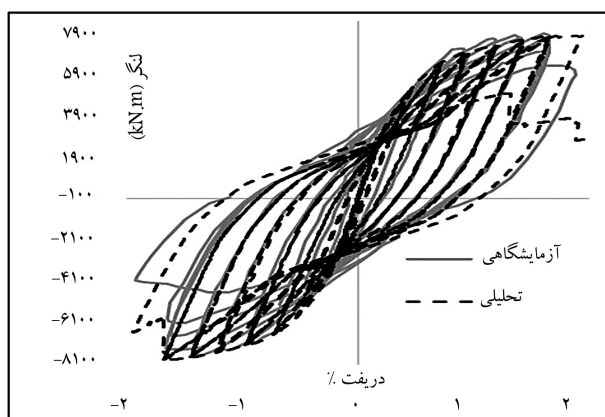
تیرهای همبند فولادی مورد استفاده از دو بخش کناری و یک بخش میانی تشکیل شده‌اند (شکل ۱۶). همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، طول بخش میانی ۳۰۰ میلی‌متر است که فولاد جان از فولاد با نقطه‌ی تسلیم پایین (LYP) و بخش کناری ۷۵ میلی‌متر است که فولاد جان از فولاد معمولی ($A572 Gr 50$) تشکیل شده است. بال تیر همبند از فولاد معمولی است. جهت جلوگیری از کمناش تیر همبند از دو سخت‌کننده با فولاد معمولی استفاده شده است. ارتفاع، عرض،



شکل ۱۷. منحنی لنگر واژگونی پایه - دررفت کلی طبقه‌ی بام دیوار برشی مزدوج با تیر فولادی با روش ۱.

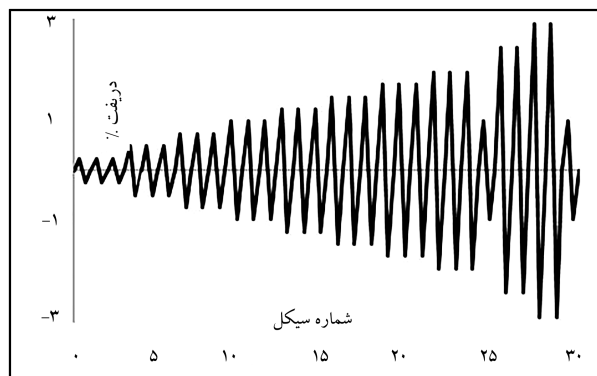


شکل ۱۸. منحنی لنگر واژگونی - دررفت کلی طبقه‌ی بام دیوار برشی مزدوج با تیر فولادی با روش ۲.



شکل ۱۹. منحنی لنگر واژگونی پایه - دررفت کلی طبقه‌ی بام دیوار برشی مزدوج با تیر فولادی با روش ۳.

بیشینه‌ی لنگر واژگونی هر سیکل در جهت مثبت محور افقی نمودار، در تمامی سیکل‌های روش‌های پیشنهادی تقریباً با نمونه‌ی آزمایشگاهی برابر هستند، ولی در جهت منفی محور افقی نمودار، روش اول بهترین پیش‌بینی را نسبت به روش‌های دیگر دارد. لذا روش ۱، در هر سیکل، بهترین تطابق از بیشینه‌ی لنگر واژگونی سیکل بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی را ایجاد می‌کند. همچنین دررفت افت کلی



شکل ۱۷. منحنی تاریخچه‌ی بارگذاری در دیوارهای برشی مزدوج بتن مسلح. [۶]

شده‌اند. دیوار مزدوج با تیر بتنی و تیر فولادی به ترتیب تا اولین سیکل دررفت ۳٪ و ۲٪ طبقه‌ی بام مطابق بارگذاری چرخه‌ی شکل ۱۷، تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. برای رسم منحنی لنگر واژگونی پایه - دررفت بام مدل، پس از اعمال بار ثقلی، بار جانبی افقی در نقاط ذکرشده‌ی روی دیوار به اندازه‌ی افزایش یافته است که دررفت مشابهی، همانند آنچه در سیکل‌های شکل ۱۷ وجود دارد، به دست آید. پس از آن با اندازه‌گیری لنگر واژگونی پایه‌های دیوار حاصل از بارگذاری جانبی افقی و دررفت طبقه‌ی بام مدل در هر گام، منحنی لنگر واژگونی - دررفت کلی طبقه‌ی بام برای سیکل‌های ذکرشده‌ی دیوار مزدوج ترسیم می‌شود.

۱.۵. دیوار مزدوج با تیر فلزی

از کلمات کوتاه‌شده‌ی روش ۱ الی ۴، به جای مخفف عبارت‌های درباره‌ی مدل استفاده شده است که هر یک بیانگر این توضیحات هستند:

- روش ۱، بیان‌کننده‌ی مدل‌سازی پایه‌های دیوار مزدوج بتنی با مقطع فایبر و تیر همبند بتنی با المان خطی با مقطع کشسان و مفاصل خمشی و لغزشی در دو انتها.
- روش ۲، بیان‌کننده‌ی مدل‌سازی پایه‌های دیوار مزدوج بتنی با مقطع فایبر و تیر همبند بتنی با المان خطی با مقطع کشسان و مفصل برشی در وسط تیر و مفصل لغزشی در دو انتها.
- روش ۳، بیان‌کننده‌ی مدل‌سازی پایه‌های دیوار مزدوج بتنی با مقطع فایبر و تیر همبند بتنی با المان خطی با مقطع فایبر و مفاصل خمشی و لغزشی در دو انتها.
- روش ۴، بیان‌کننده‌ی مدل‌سازی پایه‌های دیوار مزدوج بتنی با مقطع فایبر و تیر همبند بتنی با المان خطی با مقطع فایبر و مفصل برشی در وسط تیر و مفصل لغزشی در دو انتها.

شکل‌های ۱۸ الی ۲۱، منحنی‌های لنگر واژگونی - دررفت حاصل از تحلیل چرخه‌ی دیوار مزدوج با تیر فلزی با روش‌های پیشنهادی و مقایسه با نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به دلیل تطابق بالای منحنی‌های لنگر واژگونی مدل‌های ساخته‌شده در نرم‌افزار با نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی، تمامی روش‌های مدل‌سازی دیوار مزدوج با تیر فلزی، روش‌هایی مناسب هستند. لذا روشی که بهترین تطابق را بین منحنی‌های لنگر واژگونی تحلیلی و آزمایشگاهی ارائه می‌کند، معرفی می‌شود.

مثبت محور افقی با روش‌های ۳ و ۴، بزرگ‌تر از مقدار نمونه‌ی آزمایشگاهی است، ولی با روش‌های ۱ و ۲، کمتر از مقدار آزمایشگاهی به‌دست آمده است. همچنین در جهت مثبت محور افقی نمودار، تطابق نمودارهای روش‌های ۳ و ۴ بیشتر از روش‌های ۱ و ۲ هستند. در محدوده‌ی غیرخطی جهت منفی محور افقی نمودار شکل ۲۲، منحنی‌های روش‌های ۳ و ۴، در بالای منحنی نمونه‌ی آزمایشگاهی هستند. در حالی که منحنی‌های روش‌های ۱ و ۲، تطابق نسبتاً کاملی با منحنی نمونه‌ی آزمایشگاهی دارند. با توجه به مطالب ذکرشده، روش ۱ به دلیل ایجاد تطابق بهتر بین منحنی‌های تحلیلی و آزمایشگاهی نسبت به بقیه‌ی روش‌ها، مناسب‌ترین روش جهت مدل‌سازی دیوار مزدوج بتنی با تیر فلزی است.

۲.۵. دیوار مزدوج با تیر بتنی

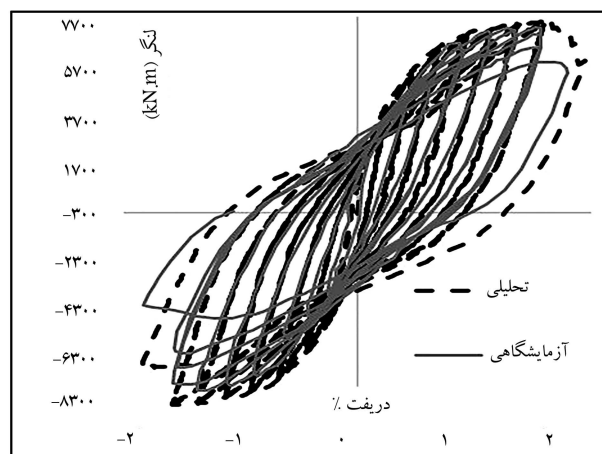
شکل‌های ۲۳ الی ۲۶، منحنی‌های لنگر واژگونی - دررفت حاصل از تحلیل چرخه‌ی دیوار مزدوج با تیر بتنی با روش‌های پیشنهادی و مقایسه با نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی را نشان می‌دهند که مطابق آن‌ها به‌دلیل تطابق بالای منحنی‌های لنگر واژگونی مدل‌های ساخته‌شده در نرم‌افزار با نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی، تمامی روش‌های مدل‌سازی دیوار مزدوج با تیر بتنی، روش‌های مناسبی برای مدل‌سازی دیوار مزدوج با تیر بتنی هستند. لذا همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، روشی که بهترین تطابق را بین منحنی‌های لنگر واژگونی تحلیلی و آزمایشگاهی دارد، ارائه شده است.

مطابق شکل‌های ۲۳ الی ۲۶، بیشینه‌ی لنگر واژگونی هر سیکل در جهت مثبت محور افقی نمودار لنگر واژگونی - دررفت، با روش‌های ۱ الی ۴ به ترتیب بعد از سیکل‌های دررفت ۱/۵٪، ۱/۲۵٪، ۱/۵٪ و ۱/۲۵٪، کمترین اختلاف را با نمونه‌ی آزمایشگاهی نشان می‌دهند. در جهت منفی محور افقی نمودار لنگر واژگونی - دررفت، بیشینه‌ی لنگر واژگونی هر سیکل حاصل از روش ۴ در بین نتایج ارائه‌شده از روش‌های دیگر، کمترین اختلاف را با نمونه‌ی آزمایشگاهی دارد. افت لنگر واژگونی در روش ۴، در جهت مثبت محور افقی در نزدیکی دررفت واقعی به‌دست می‌آید. لذا پیش‌بینی افت لنگر واژگونی در لحظه‌ی شکست (افت کلی لنگر واژگونی در نمودار چرخه‌ی) با روش ۴، نسبت به روش‌های دیگر بهتر است.

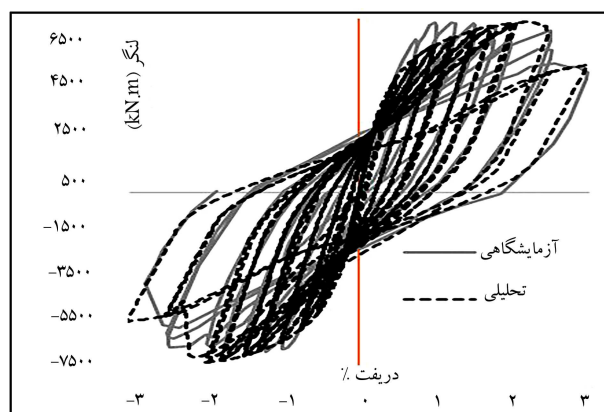
جهت بررسی دقیق‌تر و مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل غیرخطی چرخه‌ی

لنگر واژگونی در تمامی روش‌ها، در چرخه‌ی مشابه با سیکل نمونه‌ی آزمایشگاهی به‌دست می‌آید. با توجه به شکل‌های ۱۹ و ۲۱، پیش‌بینی افت لنگر واژگونی در لحظه‌ی شکست (افت کلی لنگر واژگونی در نمودارهای چرخه‌ی) در روش‌های ۲ و ۴ در جهت مثبت محور افقی و در نزدیکی دررفت افت آزمایشگاهی است، ولی با روش‌های ۱ و ۳ در جهت منفی محور افقی نمودار است. لذا روش ۱، بهترین تطابق بین منحنی‌های لنگر واژگونی حاصل از نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی را ایجاد می‌کند. همچنین خطای روش ۱، فقط پیش‌بینی دررفت افت لنگر واژگونی است که در چرخه‌ی مشابه با نمونه‌ی آزمایشگاهی به‌دست آمده است و می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد.

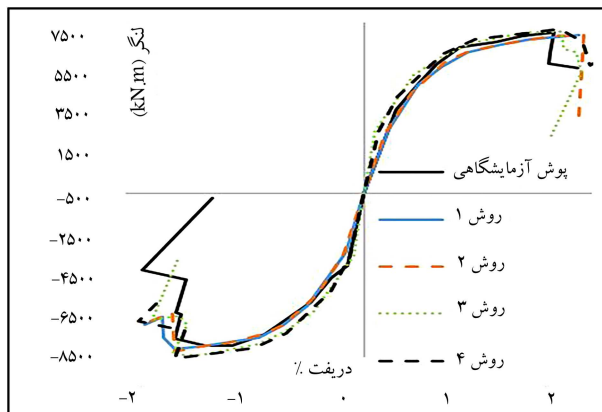
جهت بررسی دقیق‌تر و مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل غیرخطی چرخه‌ی روش پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی، پوش نمودار چرخه‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی روش مذکور از شکل‌های ۱۸ الی ۲۱ به‌دست آمده و در شکل ۲۲ ترسیم شده است. نتایج منحنی‌های مذکور نشان می‌دهد که سختی‌های اولیه‌ی روش‌های ۳ و ۴ در جهت مثبت محور افقی نمودار شکل ۲۲ با هم برابر است و از سخت اولیه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی مقداری جزئی بیشتر هستند. در جهت منفی محور افقی نمودار شکل ۲۲، سختی‌های اولیه‌ی تمامی روش‌ها، تقریباً با نمونه‌ی آزمایشگاهی برابر هستند. پیش‌بینی لنگر واژگونی در محدوده‌ی غیرخطی در جهت



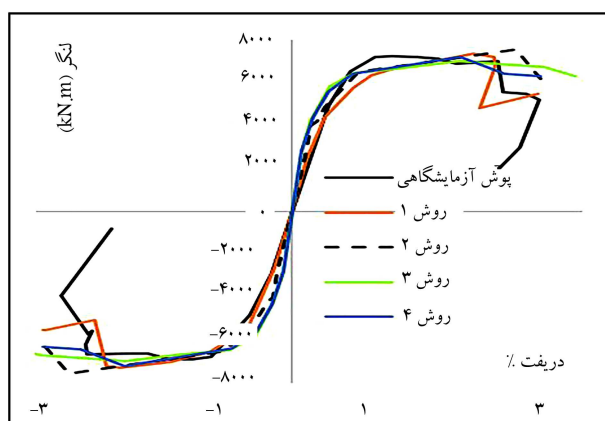
شکل ۲۱. منحنی لنگر واژگونی پایه - دررفت کلی طبقه‌ی بام دیوار برشی مزدوج با تیر فولادی با روش ۴.



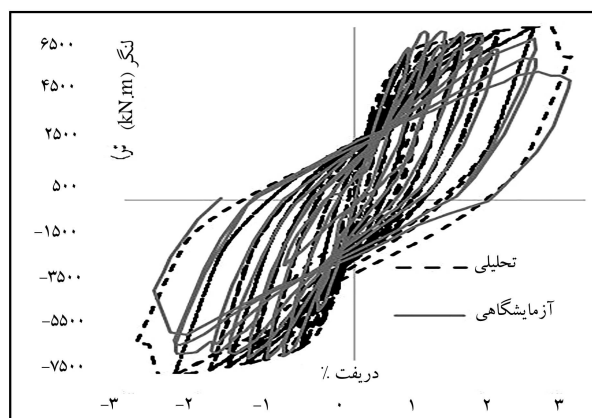
شکل ۲۳. منحنی لنگر واژگونی پایه - دررفت، دیوار مزدوج با تیر همبند بتنی با روش ۱.



شکل ۲۲. مقایسه‌ی پوش نمودار چرخه‌ی نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی برای دیوار مزدوج بتن مسلح با تیر همبند فلزی.



شکل ۲۷. مقایسه‌ی پوش نمودار چرخشی نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی برای دیوار مزدوج بتن مسلح با تیر همبند بتنی.

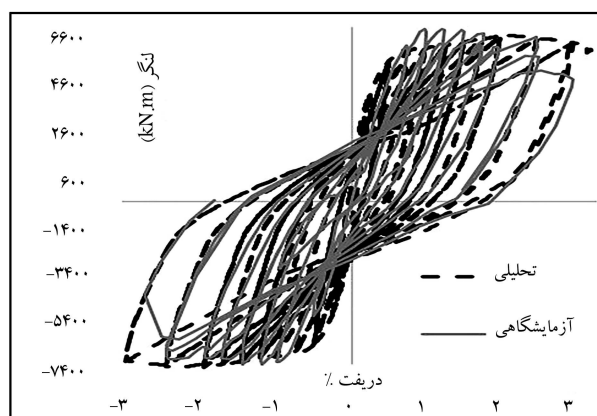


شکل ۲۴. منحنی لنگر واژگونی پایه - دررفت، دیوار مزدوج با تیر همبند بتنی با روش ۲.

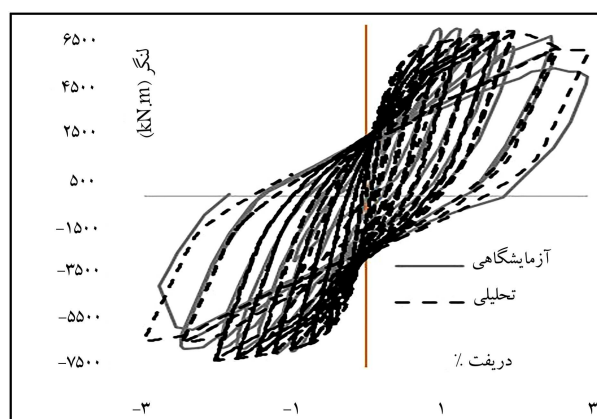
افقی در ناحیه‌ی غیرخطی، منحنی روش ۴ نسبت به دیگر روش‌ها تطابق بهتری با منحنی نمونه‌ی آزمایشگاهی ایجاد می‌کند. همچنین در جهت منفی محور افقی نمودار، منحنی‌های حاصل از روش‌های ۱ و ۴، بیشترین تطابق را با منحنی نمونه‌ی آزمایشگاهی ایجاد می‌کنند. همان‌طوری که شکل مذکور نشان می‌دهد، مدل‌سازی به روش‌های ۱ و ۴، با دقت مناسبی ظرفیت نهایی دیوار برشی مزدوج بتنی با تیر بتنی را هم از نظر میزان لنگر و هم دررفت پیش‌بینی می‌کنند. در حالی که دررفت نهایی متناظر با بیشینه‌ی لنگر به‌دست آمده با روش ۲، فاصله‌ی زیادی با مقدار آزمایشگاهی دارد. با توجه به مطالب ذکرشده، روش ۴ بهترین تطابق را بین منحنی‌های آزمایشگاهی و تحلیلی در تمامی نقاط نسبت به دیگر روش‌ها ایجاد می‌کند.

با مقایسه‌ی شکل‌های ۱۸ الی ۲۲ با شکل‌های ۲۳ الی ۲۷، منحنی‌های حاصل از تحلیل عددی دیوار مزدوج با تیر فلزی نسبت به دیوار مزدوج با تیر بتنی، به‌دلیل پیچیدگی کمتر در مدل‌سازی تیر همبند فلزی نسبت به تیر همبند بتنی با میلگرد قطری، تطابق بیشتری را نشان می‌دهند.

مدل‌سازی تیر همبند با روش تیر با مقطع کشسان و سختی کاهش‌یافته و مفصل خمیری برشی در مرکز تیر همبند و مفاصل لغزشی در دو انتهای تیر همبند در عین سادگی مدل‌سازی پارامترها، مطابقت خوبی بین نتایج آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی را نشان می‌دهد. از مزایای روش مذکور، سادگی تعیین ابعاد مقطع کشسان تیر و زمان‌بر نبودن آن است. همچنین در روش مذکور، تهیه‌ی پارامترهای مدل‌سازی مفصل برشی بسیار ساده و از طریق روابط ارائه‌شده در نوشتار حاضر امکان‌پذیر است. ولی در روشی که مفصل خمشی جایگزین مفصل برشی می‌شود، محاسبات پارامترهای مفصل خمشی به‌دلیل تعیین نمودار لنگر - انحنای لنگر - دوران پیچیده است. عیب روش تعیین سختی کاهش‌یافته‌ی مذکور، جهت سختی کشسان مقطع المان تیر است که در نوشتار حاضر براساس توصیه‌های نیش بین ۱/۵ تا ۱/۱۵ سختی مقطع ترک‌خورده استفاده شده است. لذا روش مذکور قابل استفاده برای مهندسان در شرکت‌های مشاور است. در روش‌هایی که مدل‌سازی مقطع تیر همبند در المان تیر با سختی کاهش‌یافته انجام می‌شود و تخمین میزان ترک‌خوردگی در روش‌های ذکرشده بسیار مشکل است، می‌توان از مدل تیر با مقطع فایبر استفاده کرد، که نیاز به کاهش سختی ندارد و مشکل آن، فقط وقت‌گیر بودن چیدمان رشته‌های فایبر در مقطع المان تیر است.



شکل ۲۵. منحنی لنگر واژگونی پایه - دررفت، دیوار مزدوج با تیر همبند بتنی با روش ۳.



شکل ۲۶. منحنی لنگر واژگونی پایه - دررفت، دیوار مزدوج با تیر همبند بتنی با روش ۴.

روش پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی، پوش نمودار چرخشی آزمایشگاهی و تحلیلی روش ذکرشده در شکل‌های ۲۳ الی ۲۶ به‌دست آمده و در شکل ۲۷ ترسیم شده است. نتایج این نمودار نشان می‌دهد که سختی کشسان در روش‌های ۳ و ۴ با هم برابر و بزرگ‌تر از بقیه‌ی روش‌هاست و همچنین دو روش ۱ و ۲، سختی تقریباً برابری با سختی نمونه‌ی آزمایشگاهی دارند. در حالی که در جهت مثبت محور

۶. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، جهت تحلیل غیرخطی دیوار مزدوج بتن مسلح با تیر همبند بتنی و تیر همبند فلزی، روش مدل سازی کاربردی برای مهندسان در نرم افزار پرکاربرد PERFORM-۳D پیشنهاد شده است. جهت صحت سنجی مدل پیشنهادی، نتایج تحلیل غیرخطی با نتایج نمونه های آزمایشگاهی موجود مقایسه شده و برخی نتایج مهم آن به این شرح بوده است:

۱. تحلیل های انجام شده با نرم افزار، لنگر واژگونی و شکل کلی نمودار لنگر واژگونی - دررفت نمونه ها را با بیشتر روش های مدل سازی با دقت بسیار بالایی تخمین زده است.

۲. با توجه به مقایسه ی منحنی های چرخه یی آزمایشگاهی و چرخه یی تحلیلی و منحنی های پوش چرخه یی آزمایشگاهی و تحلیلی دیوار مزدوج با تیر فولادی، دقیق ترین روش جهت مدل سازی دیوار مذکور، استفاده از روش ۱ است.

۳. همچنین با مقایسه ی منحنی های چرخه یی آزمایشگاهی، چرخه یی تحلیلی، پوش

چرخه یی آزمایشگاهی و تحلیلی دیوار مزدوج با تیر بتنی با میلگرد قطری، استفاده از روش ۴ دقیق ترین روش جهت مدل سازی دیوار مزدوج ذکر شده است.

۴. پاسخ تحلیلی مدل سازی دیوار مزدوج با تیر فولادی، نسبت به دیوار مزدوج با تیر بتنی با میلگرد قطری، دقیق تر است که دلیل آن سادگی مدل سازی تیر همبند فولادی نسبت به تیر همبند بتنی با میلگرد قطری در نرم افزار است.

۵. مدل سازی تیر همبند با روش تیر با مقطع کشسان و سختی کاهش یافته و مفصل خمیری برشی در مرکز تیر همبند و مفاصل لغزشی در دو انتهای تیر همبند در عین سادگی مدل سازی پارامترها، مطابقت خوبی بین نتایج آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی را نشان می دهد و لذا روش مذکور قابل استفاده برای مهندسان در شرکت های مشاور است.

۶. به جای استفاده از روش هایی که مدل سازی مقطع تیر همبند در المان تیر با سختی کاهش یافته انجام می شود و تخمین میزان ترک خوردگی بسیار مشکل است، می توان از مدل تیر با مقطع فایبر استفاده کرد که نیاز به کاهش سختی ندارد.

پانویس ها

1. fiber section
2. beam element

منابع (References)

1. El-Tawil, S. and Kuenzli, C.M. "Pushover of hybrid coupled walls.ii: analysis and behavior", *Journal of Structural Engineering*, **128**(10), pp. 1282-1289 (2002).
2. Eljadei, A. "Performance based design of coupled wall structures", Doctor of Philosophy, University of Pittsburgh (2012).
3. Park, R. and Paulay, T.C., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Son (1975).
4. Harries, K.A., Mitchell, D., Cook, W.D. and et al. "Seismic response of steel beams coupling concrete walls", *Journal of Structural Engineering*, **119**(12), pp. 3611-3629 (1993).
5. Harries, K.A., Gong, B. and Shahrooz, B.M. "Behavior and design of reinforced concrete, steel, and steel-concrete coupling beams", *Earthquake Spectra*, **16**(4), pp. 775-779 (2000).
6. Cheng, M.-Y., Fikri, R. and Chen, C.-C. "Experimental study of reinforced concrete and hybrid coupled shear wall systems", *Engineering Structures*, **82**, pp. 214-225 (2015).
7. Khalifa, E. "Analytical model for steel fiber concrete composite short-coupling beam", *Composites part B: Engineering*, **56**, pp. 318-329 (2014).
8. Shahrooz, B.M., Gong, B., Tunc, G. and et al. "An overview of reinforced concrete core wall steel frame hybrid structures", *Progress in Structural Engineering and Materials*, **3**(2), pp. 149-158 (2001).
9. Park, W.-S., and Yun, H.-D. "Seismic behaviour of coupling beams in a hybrid coupled shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **61**(11), pp. 1492-1524 (2005).
10. Harries, K.A., Mitchell, D., Redwood, R.G. and et al. "Nonlinear seismic response predictions of walls coupled with steel and concrete beams", *Can. J. Civ. Eng.*, **25**(5), pp. 803-818 (1998).
11. El-Tawil, S. and Kuenzli, C.M. "Pushover of hybrid coupled walls.ii: analysis and behavior", *Journal of Structural Engineering*, **128**(10), pp. 1282-1289 (2002).
12. Mohr, D.S. "Nonlinear analysis and performance based design methods for reinforced concrete coupled shear walls", Master Thesis, Seattle, University of Washington (2007).
13. Powell, G.H. "Detailed example of a tall shear wall building using CSI's perform 3D nonlinear dynamic analysis", Computers & Structures Educational Services (2007).
14. Naish, D., Wallace, J.W., Fry, J.A. and et al. "Modeling of diagonally reinforced concrete coupling beams", *7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUEE) & 5th International Conference on Earthquake Engineering (5ICEE)*, Tokyo (2010).
15. Ghodsi, T. and Flores Ruiz, J.A. "Pacific earthquake engineering research/seismic safety commission tall building design case study 2", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **19**(1) 197-256 (2010). pp.
16. Hosseini, M., Sadeghi, H. and Habiby, S. "Comparing the nonlinear behaviors of steel and concrete link beams

- in coupled shear walls system by finite element analysis", *The 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, 14, pp. 2864-2871, Elsevier (2011).
17. Kheyroddin, A., Naderpour, H., Amiri, G.G. and et al. "Influence of carbon fiber reinforced polymers on upgrading shear behavior of RC coupling beams", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **35**(C2), pp. 155-169 (2011).
18. Lu, X., Xie, L., Guan, H. and et al. "A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using OpenSees", *Finite Elements in Analysis and Design*, **98**, pp. 14-25 (2013).
19. Mosoarca, M. "Failure analysis of RC shear walls with staggered openings under seismic loads", *Engineering Failure Analysis*, **41**, pp. 48-64 (2014).
20. NIST GCR 14-917, "Recommendations for seismic design of reinforced concrete wall buildings based on studies of the 2010 maule, chile earthquake", National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (2014).
21. Bengar, H.A. and Aski, R.M. "Performance based evaluation of RC coupled shear wall system with steel coupling beam", *Steel and Composite Structures*, **20**(2), pp. 337-355 (2016).
22. Chaallal, O., Gauthier, D. and Malenfant, P. "Classification methodology for coupled shear walls", *Journal of Structural Engineering*, **122**(12), pp. 1453-1458 (1996).
23. Lequesne, R.D. "Behavior and design of high-performance fiber-reinforced concrete coupling beams and coupled-wall systems", Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan (2011).
24. El-Tawil, S., Fortney, P., Harries, K. and et al. "Recommendations for seismic design of hybrid coupled wall systems", American Society of Civil Engineers, Virginia (2010).
25. Computers and Structures Inc. "User guide PERFORM 3D nonlinear analysis and performance assessment for 3D structures", University Ave. Berkeley, USA (2011).
26. Mander, J.B., Priestley, M.J. and Park, R. "Theoretical stress-strain model for confined concrete", *Journal of Structural Engineering*, **114**(8), pp. 1804-1826 (1988).
27. Vecchio, F.J. and Collins, M.P. "The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear", *ACI Journal*, **83**(22), pp. 219-231 (1986).
28. Bentz, E.C. and Collins, M.P. "Development of the 2004 canadian standards association (CSA) A23.3 shear provisions for reinforced concrete", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **33**(5), pp. 521-534 (2006).
29. American Society of Civil Engineers. "ASCE/SEI standard 41-06, seismic rehabilitation of existing buildings", Reston, Virginia (2007).
30. Naish, D.A. "Testing and Modeling of Reinforced Concrete Coupling Beams", Los Angeles, University of California, Doctor Of Philosophy (2010).
31. FEMA 356, "Prestandard and commentary for the seismic design of buildings", Prepared by American Society of Civil Engineering, published by the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC (2000).
32. AISC. "Specification for structural steel buildings, ANSI /AISC 360-10", Chicago Illinois: American Institute Of Steel Construction (2010).
33. Motter, C.J. "Large-Scale testing of steel-reinforced concrete (SRC) coupling beams embedded into reinforced concrete structural walls", Doctor of Philosophy, University of California (2014).
34. Elwood, K.J., Matamoros, A.B., Wallace, J.W. and et al. "Update to ASCE/SEI 41 concrete provisions", *Earthquake Spectra*, **23**(3), pp. 493-523 (2007).
35. Alsiwat, J. and Saatcioglu, M. "Reinforcement anchorage slip under monotonic loading", *Journal of Structural Engineering*, **188**(9), pp. 2421-2438 (1992).