

## رفتار دیوار برشی بتن مسلح پیش‌ساخته ترکیبی در مناطق زلزله‌خیز

فهیمة شاه‌پوری

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، ایران  
fahime.shahpouri@modares.ac.ir

عباسعلی تسنیمی

استاد مهندسی سازه، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، ایران  
tasnimi@modares.ac.ir

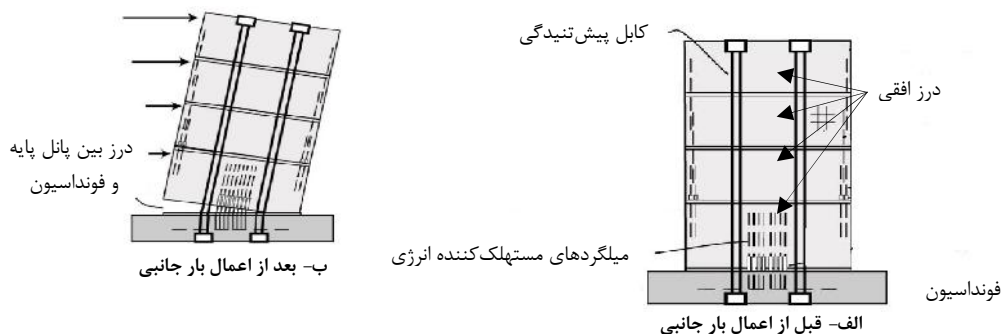
کلید واژه‌ها: بتن پیش‌تنیده، دیوار برشی ترکیبی، رفتار غیرخطی، درز، مرکزگرایی

### چکیده

جلوگیری از فروریزش سازه‌ها یکی از میانی طراحی‌های لرزه‌ای متداول است. اغلب سازه‌ها پس از رخداد زلزله دچار تغییرمکان نسبی ماندگار شده و بهره‌برداری از ساختمان، ناممکن و در مواردی بازسازی، هزینه‌های سنگینی را طلب می‌کند. در طول دو دهه گذشته، محققین سازه و زلزله، سیستم‌های لرزه‌ای جدیدی را معرفی کرده‌اند که به سیستم‌های مرکزگرا معروفند و علاوه بر قابلیت استهلاک انرژی و کاهش خسارت به سازه، تغییرشکل‌های ماندگار کمتری به سازه تحمیل می‌کنند. افزودن سیستم مرکزگرا به دیوار برشی پیش‌ساخته، حرکت گهواره‌ای آن را افزایش داده و تغییرمکان نسبی ماندگار را در بالاترین تراز دیوار کاهش می‌دهد. در این مقاله یک نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی بتن مسلح پیش‌ساخته ترکیبی با تمام جزئیات در نرم‌افزار اجزای محدود مدل‌سازی شده و پس از انجام تحلیل غیرخطی عددی، و حساسیت‌سنجی مدل عددی به متغیرهای خسارت-خمیری بتن، پاسخ آن در برابر بارهای ثقلی و جانبی ناشی از زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نحوه مدل‌سازی در تطبیق با فیزیک نمونه‌ی آزمایشگاهی به خوبی انجام شده است. در ضمن تأثیر عواملی نظیر تغییر محل اعمال بار ثقلی، مقدار تنش پیش‌تنیدگی اولیه و خروج از مرکزیت کابل‌ها بر منحنی ظرفیت دیوار برشی ترکیبی، مورد بررسی قرار گرفته است.

### مقدمه

دیوار برشی پیش‌ساخته ترکیبی از پانل‌های مستطیلی پیش‌ساخته تشکیل شده که به تعداد پانل‌های مورد استفاده دارای درز افقی می‌باشد. در اجرا بین این درزها با ملات خاصی پر می‌شود. واژه ترکیبی (Hybrid) به این دلیل به کار می‌رود که در این سیستم‌ها، از ترکیب میلگردهای فولادی و کابل‌های پیش‌تنیده نچسبیده با مقاومت بالا استفاده می‌شود. کابل‌های پیش‌تنیدگی در داخل غلاف‌هایی که از قبل در دیوار تعبیه شده، قرار می‌گیرند به نحوی که کابل هیچ‌گونه چسبندگی و تماسی با بتن ندارد مگر در ناحیه مهاری که با تمهیدات ویژه‌ای مهار می‌شود. بعد از اعمال بار جانبی تا یک حد مشخص، اولین مود جابجایی در این دیوارها، بازشدگی درز افقی موجود بین پانل پایه و فونداسیون است. به محض باربرداری نیروی پیش‌تنیدگی موجود در کابل‌ها به علاوه نیروی ثقلی، نقش نیروی بازگرداننده را داشته و دیوار را به موقعیت اولیه‌اش باز می‌گردانند. شکل (۱) وضعیت دیوار را قبل و بعد از اعمال بار جانبی نشان می‌دهد.



شکل ۱: سیستم دیوار برشی ترکیبی



## جزئیات نمونه‌ی آزمایشگاهی مورد بررسی

نمونه آزمایشگاهی شامل دو پانل پیش‌ساخته است. پانل پایه (زیرین) نماینده‌ی طبقه‌ی اول و پانل بالایی نماینده طبقات ۲ تا ۴ می‌باشد. پانل‌های پیش‌ساخته در درون خود یک شبکه فولادی شامل میلگردهای افقی و قائم به قطر ۹/۵ میلی‌متر می‌باشند. فونداسیون نمونه آزمایشگاهی به عنوان یک مجموعه صلب شامل یک قسمت میانی و دو بلوک انتهایی است. با توجه به ضریب مقیاس مورد استفاده که ۰/۴ بوده است مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی که برای مدل‌سازی عددی نیز مورد نیاز است به شرح زیر می‌باشد. طول دیوار: ۲۴۳ سانتیمتر، ارتفاع پانل پایه: ۱۴۵ سانتیمتر، ارتفاع پانل بالایی: ۲۶۹ سانتیمتر، ضخامت دیوار: ۱۵/۹ سانتیمتر، محل اعمال بار جانبی: ۳۶۶ سانتیمتر از روی فونداسیون، طول، ارتفاع و ضخامت تیر میانی فونداسیون به ترتیب: ۳۵۰، ۱۱۰ و ۶۰ سانتیمتر، طول، ارتفاع و ضخامت بلوک انتهایی فونداسیون به ترتیب: ۱۵۰، ۱۴۰ و ۷۰ سانتیمتر می‌باشد.

بار ثقلی وارد بر دیوار که شامل وزن خود دیوار و بار سرویس وارد بر آن می‌باشد ۳۶۱/۲ کیلونیوتن است که از طریق یک کابل پیش‌تنیده که در مرکز دیوار قرار می‌گیرد به نمونه اعمال شده است. با توجه به اینکه در دو انتهای پانل پایه، نیروی فشاری زیادی وجود دارد برای جلوگیری از خردشدگی، بتن این نواحی باید محصور گردد. طول ناحیه‌ای که بتن آن محصور می‌شود ۴۰۶/۴، فاصله خاموت‌ها در راستای ارتفاع دیوار ۷۶/۲ و فاصله اولین خاموت از کف پانل پایه ۱۹/۰۵ میلی‌متر است. برای جلوگیری از بازشدگی درزی که بین پانل پایه و پانل بالایی وجود دارد، از میلگردهای فولادی به قطر ۱۹/۱ میلی‌متر استفاده شده است که خروج از مرکزیت این میلگردها نسبت به مرکز دیوار ۱۱۱۷/۶ میلی‌متر می‌باشد. این میلگردها طوری طراحی می‌شوند که الاستیک باقی بمانند و برای جلوگیری از گسیختگی ناشی از خستگی دارای یک طول کوچک نچسبیده به اندازه‌ی ۷۶/۲ میلی‌متر می‌باشند.

کابل‌های پیش‌تنیدگی که وظیفه کاهش تغییرشکل‌های پسماند وارد بر نمونه را بر عهده دارند دو دسته بوده که هر کدام شامل سه کابل به قطر ۱۲/۷ میلی‌متر بوده که به صورت متقارن نسبت به مرکز دیوار با خروج از مرکزیت ۲۷۹/۴ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که تنش پیش‌تنیدگی اولیه‌ی این کابل‌ها  $0.5f_{pu}$  است. میلگردهای مستهلک‌کننده انرژی شامل ۴ میلگرد فولادی به قطر ۱۹/۱ میلی‌متر می‌باشد که با خروج از مرکزیت ۸۸/۹ و ۱۹۰/۵ میلی‌متر نسبت به مرکز دیوار قرار گرفته‌اند و در این میلگردها نیز در طولی به اندازه ۳۸۱ میلی‌متر با استفاده از یک ورق نازک پلاستیکی از تماس میلگرد با بتن جلوگیری شده است. مشخصات مکانیکی کلیه مصالح بکار رفته در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات مصالح بکار رفته

مرحله نهایی		مرحله نظیر حداکثر مقاومت		مدول ارتجاعی $E_s (Mpa)$	مرحله جاری شدگی		نوع مصالح بکار رفته
کرنش	تنش	کرنش	تنش		کرنش	تنش	
$V_{s,fr} \%$	$f_{s,fr} (Mpa)$	$V_{su} \%$	$f_{su} (Mpa)$		$V_{sy} \%$	$f_{sy} (Mpa)$	
۱۸/۸	۵۵۰/۳	۱۲/۴	۶۴۷/۴	۱۸۶۶۸۲/۵	۰/۲۳	۴۶۲	میلگردهای مستهلک‌کننده انرژی
۱۰/۸	۶۰۵/۴	۷/۸۵	۷۱۲/۲	۱۸۲۷۷۳/۲	۰/۳۵	۴۹۴/۴	میلگردهای ناحیه‌ی بتن محصور
۷/۳۸	۱۹۸۵/۶۹	-	-	۱۹۳۲۴۶/۳	۰/۸۳	۱۶۲۰/۳	کابل‌های پیش‌تنیدگی
پانل بالایی				پانل پایه			
$E_c (Mpa)$		$f_c (Mpa)$		$E_c (Mpa)$		$f_c (Mpa)$	
۲۹۰۴۰/۷		۵۵/۳		۲۹۰۴۰/۷		۵۵/۳	

## مدل‌سازی عددی دیوار برشی مرکزگرا

شبیه‌سازی نمونه‌ها با استفاده از روش اجزای محدود غیرخطی به وسیله‌ی نرم‌افزار ABAQUS صورت پذیرفته است. مدل‌سازی کابل‌ها و کلیه میلگردها، با استفاده از المان خریایی دو گرهی با مرتبه‌ی درون‌یابی خطی انجام شده و در مدل‌سازی بتن از المان‌های آجری هشت گرهی با مرتبه‌ی درون‌یابی خطی استفاده شد. برای مدل‌سازی ناحیه غیرخطی رفتار بتن از مدل خسارت-خمیری استفاده شد. در تعیین پارامترهای مدل خسارت-خمیری از مقادیر منطقی استفاده شده و تأثیر تغییر این پارامترها حساسیت سنجی شد. معیار پلاستیسیته مورد استفاده برای فولاد، معیار فون مایسز است که برای تعریف آن منحنی تنش-کرنش یک بعدی فولاد به صورت یک تابع جدولی به نرم‌افزار معرفی می‌گردد. برای انتگرال‌گیری، از انتگرال‌گیری کاهش‌یافته استفاده شده است.

برای شبیه‌سازی نیروی پیش‌تنیدگی موجود در کابل‌ها یک تنش اولیه متناسب با نیروی پیش‌تنیدگی مورد نیاز ( $0.5f_{pu}$ ) در راستای محوری کابل‌ها در آنها ایجاد گردید. تأثیر افتهای کوتاه مدت و بلند مدت باید لحاظ گردد. در مدل‌سازی، کابل‌های پیش‌تنیده فقط در دو نقطه انتهایی مهار شدند. با استفاده از قید Tie درجه آزادی نقاط انتهایی کابل به درجات آزادی ورق فولادی و از طرف دیگر خود این ورق‌های فولادی نیز در بالا به پانل پیش‌ساخته‌ی بالایی و در پایین به تیر میانی فونداسیون بسته شد. برای مدل‌سازی اندرکنش بتن و همه آرماتورهای موجود در

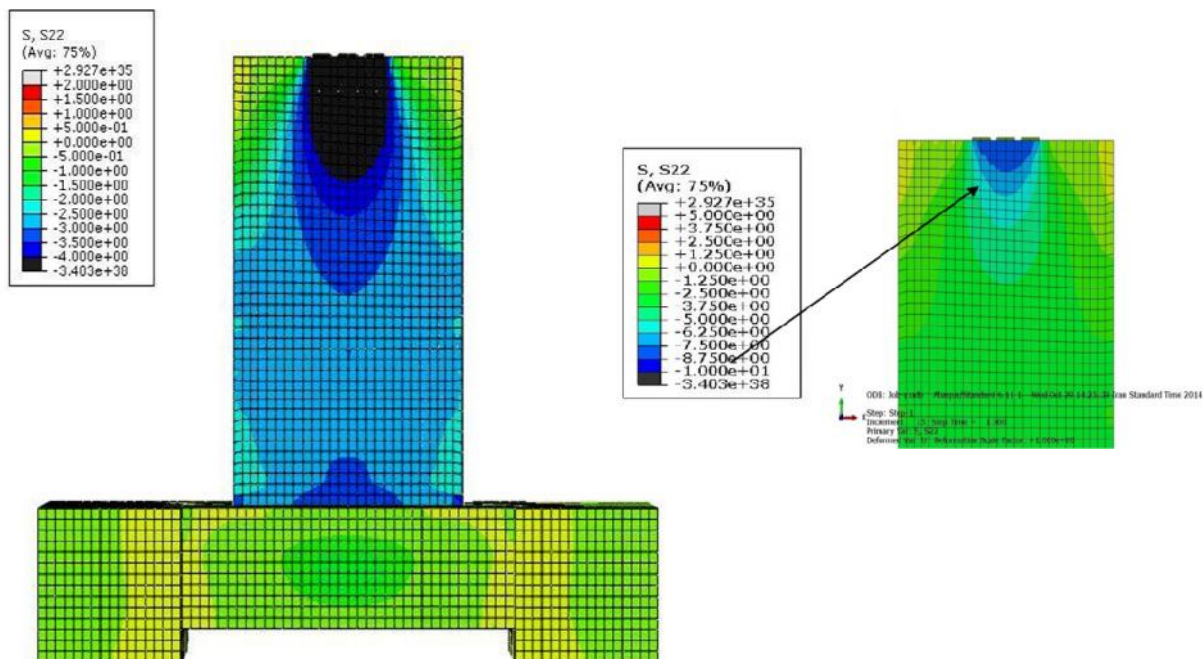
نمونه از قید Embedded region استفاده شده است. با استفاده از این قید درجات آزادی انتقالی میلگردها حذف شده و مقید به مقدار حاصل از درون یابی درجات آزادی المان میزبان (بتن) می گردد.

برای مدل سازی طول نچسبیده در میلگردهای مستهلک کننده انرژی این طور عمل شد که طول کل میلگرد را به سه قسمت تقسیم کرده و برای دو قسمتی که با بتن تماس داشت قید Embedded region لحاظ گردید و برای قسمت میانی که تماس آن با بتن با یک پوشش پلاستیکی گرفته شده، قید خاصی در نظر گرفته نشد.

برای رفتار تماسی موجود بین فونداسیون و پانل پایه و به طور مشابه پانل پایه و پانل بالا باید رفتار مماسی و عمود بر سطح به صورت جداگانه تعریف شوند. برای رفتار عمود بر سطح از قید Hard Contact استفاده شد. با استفاده از این قید دو سطح نمی توانند در یکدیگر نفوذ کنند و در صورت اعمال نیروی کششی دو سطح می توانند از یکدیگر جدا شوند. برای رفتار مماسی از گزینه Penalty و تعریف ضریب اصطکاک موجود استفاده گردید. ضریب اصطکاک برای تماس بین فونداسیون و پانل پایه ۰/۵ و برای تماس بین پانل پایه و پانل بالایی ۰/۶ در نظر گرفته شد.

## پیش تنیدگی

پیش تنیدگی نمونه با ایجاد یک تنش اولیه در کابل ها و انتقال این تنش از طریق ورق های فولادی به بتن انجام شد. در شکل (۲) توزیع تنش فشاری ناشی از پیش تنیدگی در راستای ارتفاع دیوار نمایش داده شده است. مطابق انتظار این توزیع نسبت به محور گذرنده از مرکز دیوار تقارن داشته و در نواحی نزدیک به محل انتقال نیروی پیش تنیدگی، تنش فشاری بیشتری (در حدود  $9\text{Mpa}$ ) در المان های بتنی ایجاد شده است که با فاصله گرفتن از این نواحی توزیع تنش ها یکنواخت شده است.

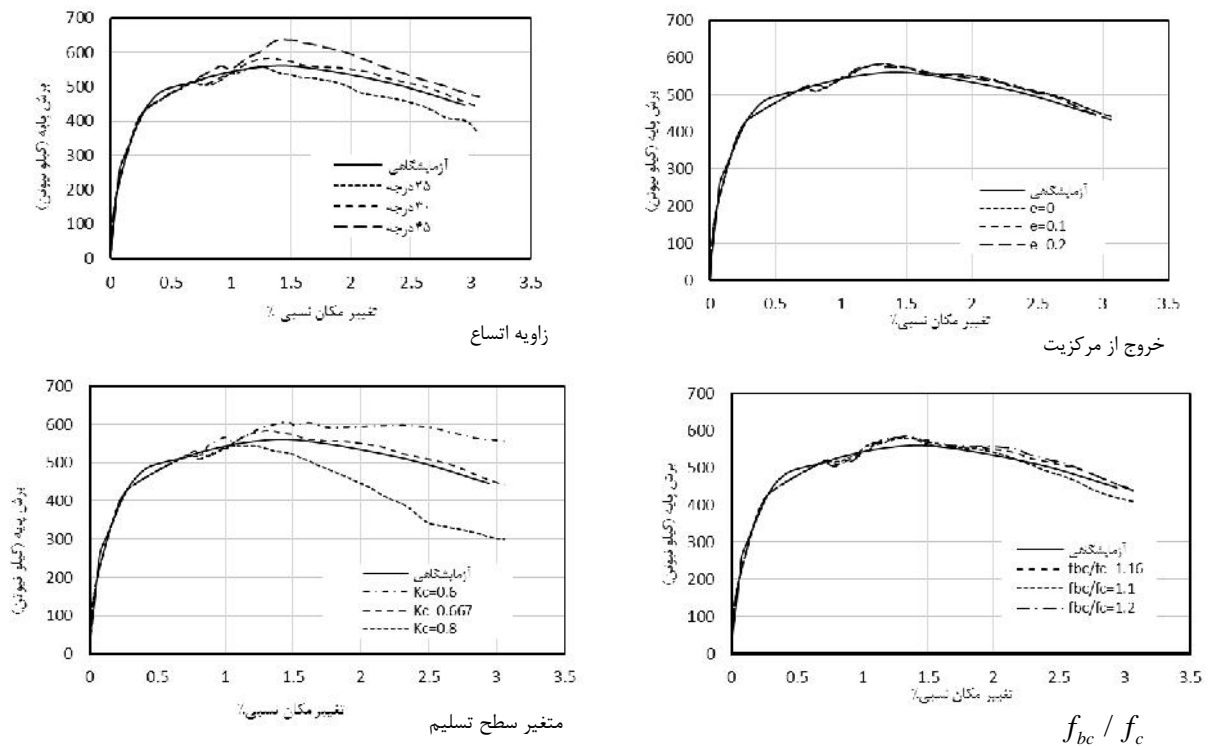


شکل ۲: توزیع تنش پیش تنیدگی در راستای ارتفاع دیوار و نواحی دارای تمرکز تنش

## تحلیل حساسیت

برای صحت سنجی نتایج حاصل از مدل سازی عددی نمونه های آزمایشگاهی لازم است متغیرهای خسارت-خمیری مربوط به بتن به درستی تعیین و بکار برده شوند. برای اینکار صحت متغیرهای مهم مانند زاویه اتساع، خروج از مرکزیت، متغیر سطح تسلیم و نسبت مقاومت فشاری دو محوری به مقاومت فشاری تک محوری کنترل شد. تأثیر این متغیرها به ترتیب با مقادیر ۳۰ درجه، ۰/۱، ۰/۶۶۷ و ۱/۱۶ انطباق بسیار خوبی با منحنی پوش نمونه آزمایشگاهی داشته است که در شکل (۳) نشان داده شده است.

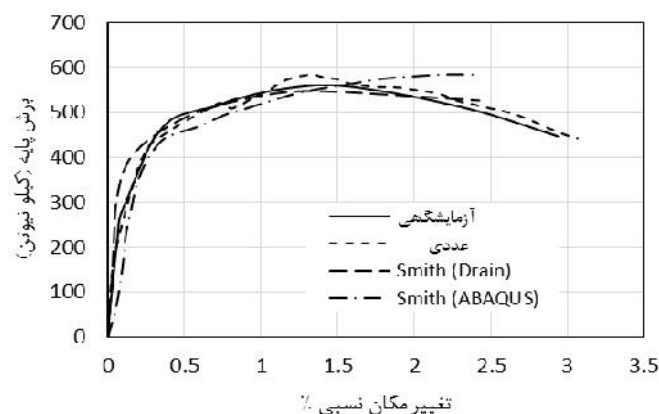




شکل ۳: حساسیت سنجی به متغیرهای خسارت- خمیری بتن

### منحنی ظرفیت

در مدل سازی عددی، بارگذاری به صورت یکنوا (مونوتونیک) بوده، نتایج مدل عددی با پوش منحنی چرخه‌ای حاصل از آزمایش مقایسه شده که انطباق قابل قبولی نیز دارد. افت مقاومت نسبت به مقاومت حداکثر در تغییر مکان‌های نسبی نهایی (±۲/۹۵٪)، ۱۳/۹٪ است. این افت مقاومت به دلیل آسیب بتن در پنجه دیوار که نیروی فشاری زیادی ناشی از بلند شدن دیوار است. در مدل عددی با تعریف رفتار غیرخطی برای بتن در کشش و فشار با استفاده از مدل خسارت-خمیری موجود در نرم‌افزار این افت به خوبی مدل‌سازی شده است شکل (۴). مطابق نتایج آزمایشگاهی و عددی، آسیب وارد بر دیوار بیشتر در پانل پایه متمرکز است. شروع ترک خوردگی در پانل پایه در تغییر مکان نسبی ۰/۵۵٪ اتفاق افتاده و کنده شدن بتن پوشش در تغییر مکان نسبی ۰/۸٪ آغاز شده است.

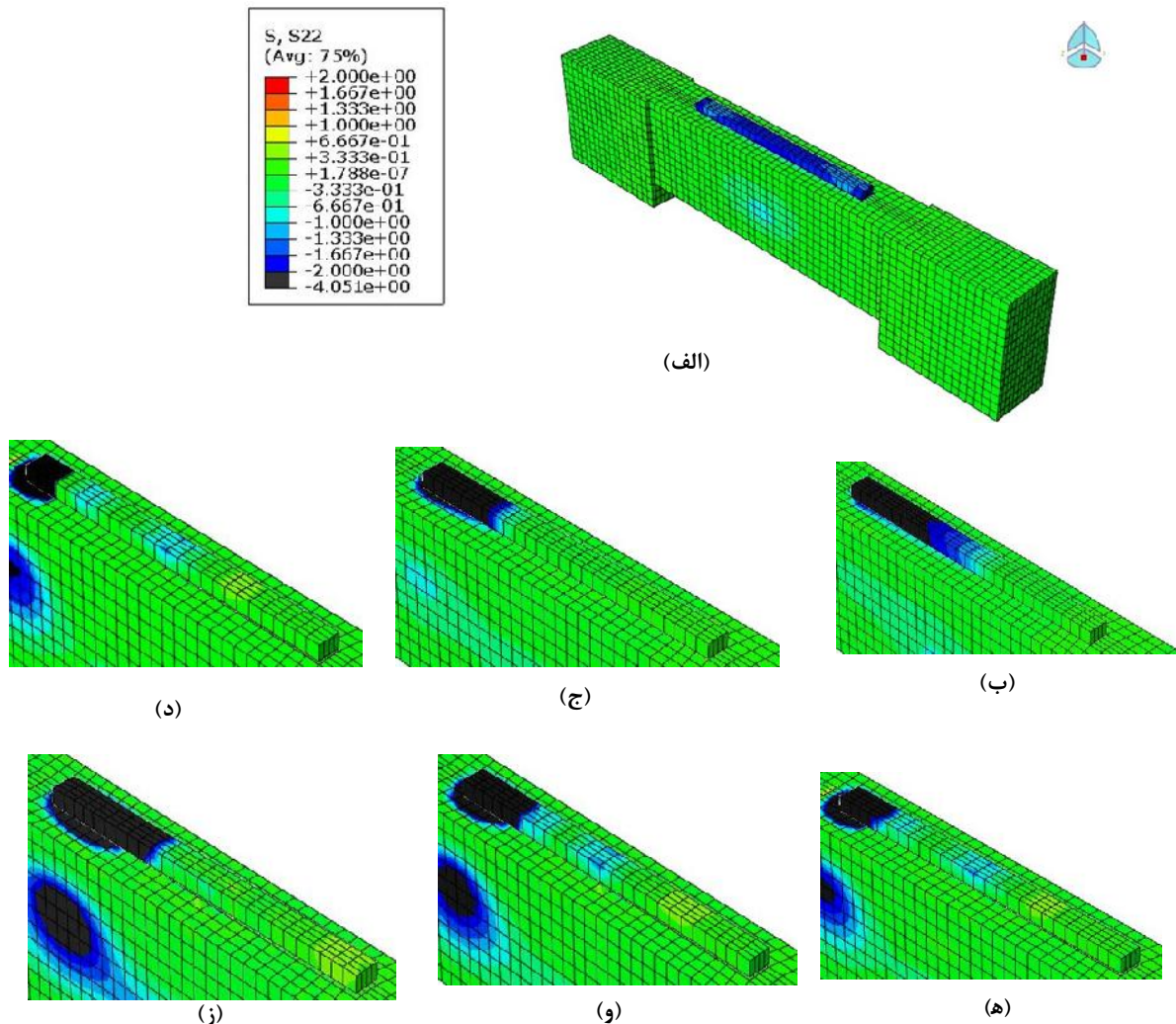


شکل ۴: مقایسه منحنی ظرفیت آزمایشگاهی و عددی دیوار برشی ترکیبی

### عمق ناحیه فشاری (عمق محور خنثی)

شکل (۵-الف) وضعیت دیوار در انتهای پیش‌تنیدگی و قبل از اعمال تغییر مکان جانبی است که به طور میانگین تنش فشاری ۱/۵ مگاپاسکال وجود دارد. در این مطالعه عددی مشاهده شد که با اعمال بار جانبی و بلند شدن ناحیه کششی دیوار از روی فونداسیون، ناحیه فشاری تحت تنش‌های بیشتری قرار گرفته و در نتیجه عمق محور خنثی کاهش یافت شکل (۵-ب، ج، د). ولی به تدریج با افزایش بار جانبی و به تبع آن

افزایش میزان بلندشدگی دیوار، دورترین تارهای فشاری مقطع دیوار از حد مقاومت نهایی خود گذشته و خرد می‌شوند و این در حالی است که دیوار هنوز پایدار بوده و قادر است تغییرشکل‌های بیشتری را تحمل کند. با افزایش بیشتر بار جانبی برای حفظ تعادل نیرویی مقطع، المان‌های دیگری از بتن در تحمل نیروهای فشاری مشارکت می‌نمایند که در نتیجه عمق محور خنثی افزایش می‌یابد شکل (۵-ه، و، ز).



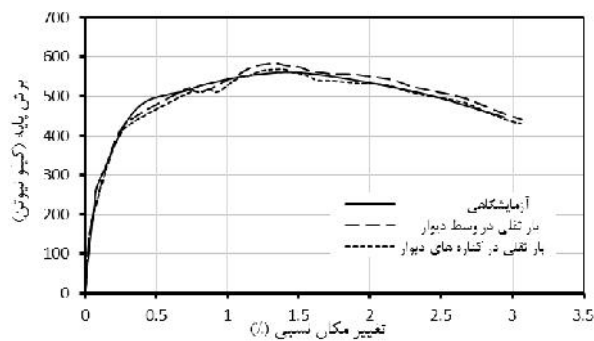
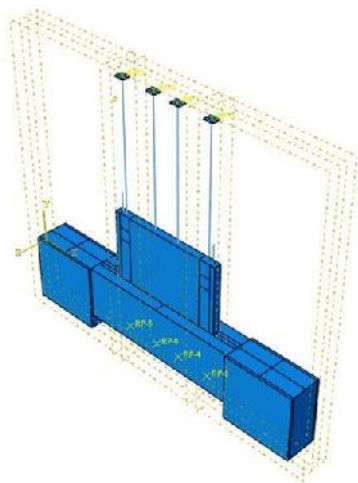
شکل ۵: عمق محور خنثی طی اعمال پیش‌تنیدگی و بار جانبی

### بررسی پارامتریک رفتار غیر خطی

در این قسمت رفتار دیوار برشی بتن مسلح پیش‌ساخته ترکیبی تحت مطالعات پارامتریک مورد بررسی قرار گرفته است و تأثیر عواملی نظیر تغییر محل اعمال بار ثقلی، مقدار تنش پیش‌تنیدگی اولیه و خروج از مرکزیت کابل‌ها بر منحنی ظرفیت دیوار ترکیبی، مورد بررسی قرار گرفته است.

### اثر تغییر محل اعمال بار ثقلی

در نمونه‌ی آزمایشگاهی مورد بررسی بار ثقلی وارد بر دیوار در وسط نمونه قرار داشت که با یک کابل پیش‌تنیده شبیه‌سازی شده بود. در این قسمت بار ثقلی وارد بر دیوار به کناره‌های دیوار انتقال داده شده است. در این حالت نیز از دو کابل پیش‌تنیده برای شبیه‌سازی بار ثقلی استفاده گردید. شکل (۶) مدل عددی دیوار برشی ترکیبی و منحنی ظرفیت دیواری است که در آن بار ثقلی توسط دو کابل پیش‌تنیده به فاصله ۲۰۰ میلی‌متر از لبه دیوار اعمال شده است.

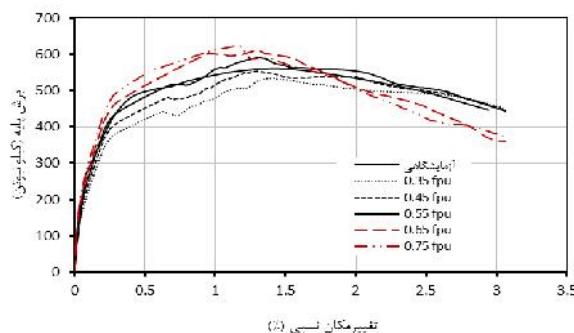


شکل ۶: مدل عددی و منحنی ظرفیت دیوار ترکیبی با بار ثقلی در کناره‌ها

با تغییر محل اعمال بار ثقلی، منحنی ظرفیت دیوار برشی ترکیبی تغییر چندانی نداشته است. منحنی ظرفیت نمونه‌ای که بارهای ثقلی در کناره‌ی دیوار اعمال شده است زیر منحنی نمونه‌ای که بار ثقلی آن در وسط دیوار اعمال شده است، قرار گرفته است. این مسئله نشان می‌دهد که برای برکنش دیواری که بار ثقلی آن در کناره‌ها اعمال شده، بار جانبی نسبتاً کمتری نیاز است اگرچه این تفاوت خیلی اندک است.

### اثر تغییر تنش پیش‌تنیدگی اولیه

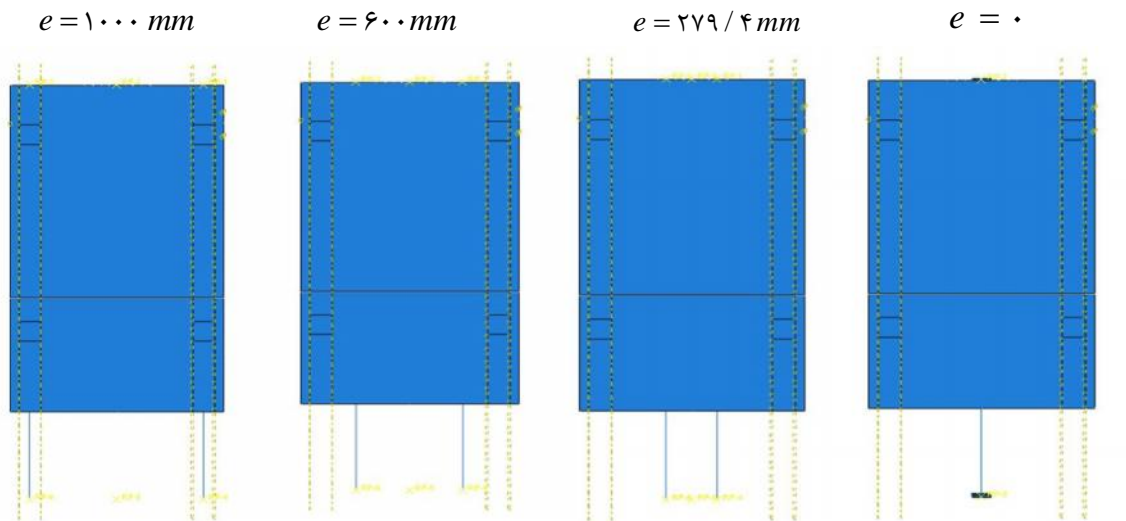
کابل‌های پیش‌تنیده موجود در دیوار برشی ترکیبی نقش اساسی در تأمین نیروی مرکزگرا دارند. در نمونه‌ی آزمایشگاهی مورد بررسی تنش پیش‌تنیدگی اولیه  $0/55f_{pu}$  بود. این نیرو باید به اندازه‌ای باشد که هدف پیش‌تنیده‌سازی را برآورده کند و از طرف دیگر باید یک حاشیه اطمینان نیز لحاظ گردد. در این قسمت تنش پیش‌تنیدگی اولیه را تغییر داده و اثر آن بر منحنی ظرفیت مورد بررسی قرار گرفته است. تنش پیش‌تنیدگی در دو حالت کمتر و در دو حالت دیگر بیشتر از  $0/55f_{pu}$  در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۷) برای مقادیر پیش‌تنیدگی  $0/35f_{pu}$ ،  $0/45f_{pu}$ ،  $0/55f_{pu}$ ، روند منحنی ظرفیت مشابهت زیادی دارند. برای مقادیر  $0/35f_{pu}$  و  $0/45f_{pu}$  که نیروی پیش‌تنیدگی کاهش یافته است، منحنی ظرفیت در همه قلمروهای ارتجاعی، الاستو-پلاستیک و نرم شدگی مقاومت کمتری نسبت به  $0/55f_{pu}$  نشان می‌دهند. برای حالتی که نیروی پیش‌تنیدگی افزایش یافته، سختی در قلمرو ارتجاعی اندکی افزایش یافته و منحنی ظرفیت در ناحیه الاستو-پلاستیک دارای سخت کرنشی بیشتری شده است. ولی در ناحیه پلاستیک (نرم شدگی) شدت کاهش مقاومت بیشتر از سایر حالات است.



شکل ۷: اثر تغییر تنش پیش‌تنیدگی اولیه بر منحنی ظرفیت دیوار

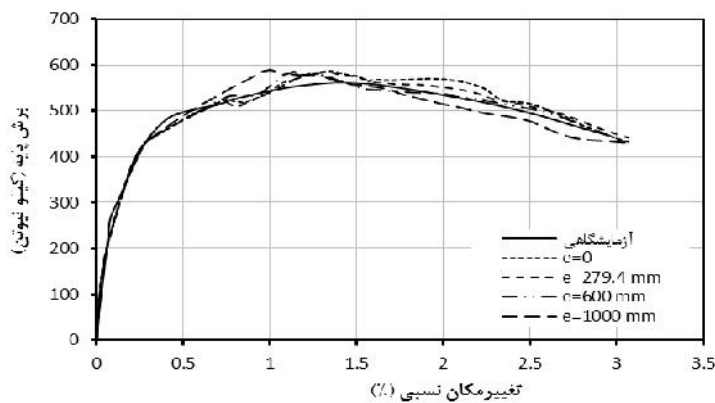
### اثر تغییر خروج از مرکزیت کابل‌های پیش‌تنیدگی

خروج از مرکزیت کابل‌های پیش‌تنیده نسبت به محور گذرنده از مرکز دیوار در راستای ارتفاع دیوار با پارامتر  $e$  نمایش داده شده است. در نمونه آزمایشگاهی  $e = 279/4 \text{ mm}$  بود. در این قسمت تأثیر تغییر پارامتر  $e$  بر منحنی ظرفیت دیوار برشی ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل (۸) در ابتدا کلیه کابل‌های پیش‌تنیده در مرکز دیوار قرار دادند ( $e=0$ ) سپس به تدریج  $e$  را افزایش داده و کابل‌های پیش‌تنیدگی به کناره‌های دیوار انتقال داده شدند.



شکل ۸: مقادیر مختلف خروج از مرکزیت کابل‌های پیش‌تنیده

مطابق شکل (۹) تفاوت چندانی در منحنی‌های ظرفیت مشاهده نمی‌شود. اما روند افزایش خروج از مرکزیت، نشان می‌دهد که مقاومت در تغییر مکان نسبی کمتر به حداکثر مقدار خود می‌رسد.



شکل ۹: اثر تغییر خروج از مرکزیت کابل‌های پیش‌تنیدگی بر منحنی ظرفیت دیوار

## نتیجه‌گیری

از مهم‌ترین نتایج این تحقیق که مبتنی بر بررسی رفتار و مدل‌سازی عددی دیوار برشی بتن مسلح پیش‌ساخته در فضای نرم‌افزار ABAQUS بوده است می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- منحنی ظرفیت حاصل از تحلیل عددی و منحنی به دست آمده از آزمایش تطبیق قابل قبولی داشته است.
- ۲- مدل عددی از بین متغیرهای خسارت-خمیری مربوط به بتن، به زاویه اتساع و متغیر سطح تسلیم حساسیت بیشتری نشان داده است.
- ۳- با اعمال بار جانبی و بلند شدن پاشنه دیوار، عمق محور خنثی کاهش یافت که با افزایش بار جانبی و حفظ تعادل نیرویی مقطع عمق محور خنثی افزایش می‌یابد.
- ۴- با تغییر محل اعمال بار ثقلی، منحنی ظرفیت تغییر چندانی نخواهد داشت.
- ۵- با کاهش نیروی پیش‌تنیدگی، منحنی ظرفیت در قلمرو ارتجاعی، الاستو-پلاستیک و نرم‌شدگی مقاومت کمتری نسبت به حالتی که نیروی پیش‌تنیدگی  $0.55 f_{pu}$  است، نشان می‌دهد.



- ۶- با افزایش نیروی پیش‌تنیدگی نسبت به  $0.55f_{pu}$ ، سختی در قلمرو ارتجاعی اندکی افزایش یافته و منحنی ظرفیت در ناحیه الاستو-پلاستیک دارای سخت‌ترشی بیشتری شده است. همچنین در ناحیه نرم‌شدگی نرخ کاهش مقاومت بیشتر از سایر مراحل رفتاری است.
- ۷- تغییر پارامتر خروج از مرکزیت کابل‌های پیش‌تنیدگی، تأثیر چندانی بر منحنی ظرفیت دیوار برشی ترکیبی ندارد ولی با افزایش خروج از مرکزیت، مقاومت در تغییر مکان نسبی کمتر به حد اکثر مقدار خود می‌رسد.

## مراجع

- ACI ITG-5.1-07 (2008) Acceptance Criteria for Special Unbonded Post-Tensioned Precast Structural Walls Based on Validation Testing and Commentary”, Reported by ACI Innovation Task Group 5, American Concrete Institute
- ACI ITG-5.2-09 (2009) Requirements for Design of a Special Unbonded Post-Tensioned Precast Shear Wall Satisfying ACI ITG-5.1 (ACI ITG-5.2-09) and Commentary”, Reported by ACI Innovation Task Group 5, American Concrete Institute
- Hibbitt Karlsson and Sorenson, ABAQUS User's Manual - Version 6.11.1, Hibbitt, Karlsson & Sorenson, Inc., 2011
- Maekawa K, Pimanmar A and Okamura H (2003) Non-Linear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, Taylor and Francis
- Restrepo JI & Rahman A (2007) Seismic performance of self-centering structural walls incorporating energy dissipators, *Journal of Structural Engineering*, 133(11), 1560-1570
- Smith BJ, Kurama YC & McGinnis MJ (2010) Design and measured behavior of a hybrid precast concrete wall specimen for seismic regions, *Journal of Structural Engineering*, 137(10), 1052-1062
- Smith BJ, Kurama YC & McGinnis MJ (2012) Behavior of Precast Concrete Shear Walls for Seismic Regions: Comparison of Hybrid and Emulative Specimens, *Journal of Structural Engineering*, 139(11), 1917-1927
- Smith B & Kurama Y (2009) Design of hybrid precast concrete walls for seismic regions, ASCE 2009 Structures Congress (pp. 1673-1682)