

## ارزیابی و مقایسه رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بلندمرتبه فولادی با کاربرد دیوار برشی‌های بتنی و فولادی

سیدفتح اله ساجدی

دانشیار گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

فرید سلیمانی مقدم

دانشجوی دکتری عمران - سازه، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

f\_sajedi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۳/۱۳ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۹/۰۵/۲۴

### چکیده

یکی از عوامل مؤثر در فرآیند طراحی ساختمان‌ها، چگونگی کنترل و مدیریت نیروی زلزله برای دستیابی به مقاومت لرزه‌ای مطلوب، در عین رعایت شکل‌پذیری مناسب می‌باشد. در این راستا، به‌کارگیری سیستم‌های مهاربندی مختلف در سازه ساختمان‌های بلندمرتبه، نظیر دیوار برشی‌های فولادی و بتنی از راهکارهای متداول است. لذا در این پژوهش، یک بار با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه و بار دیگر بدون لحاظ این اندرکنش بر روی دو سازه ۱۰ و ۱۵ طبقه، در حالات وجود دیوار برشی‌های فولادی و بتنی، مدل‌های مختلفی در نرم‌افزار ABAQUS به روش تحلیل غیرخطی بررسی شدند. به همین منظور با مدل‌سازی سازه‌های مذکور در نرم‌افزار، تأثیر استفاده از دیوار برشی‌های فولادی و بتنی، با لحاظ اثر اندرکنش خاک - سازه و بدون آن تحلیل شدند. نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها برای سازه ۱۰ طبقه نشان داد که عملکرد سازه با دیوار برشی فولادی بهتر از دیوار برشی بتنی می‌باشد. همچنین نتایج به‌دست آمده برای سازه ۱۵ طبقه نیز نشان داد که عملکرد این سازه با دیوار برشی فولادی بهتر از دیوار برشی بتنی بوده است. به طور کلی، نتایج نشان داد که دیوار برشی فولادی رفتار بهتری را نسبت به دیوار برشی بتنی از خود نشان می‌دهد. در مجموع به دست آمد که با لحاظ نمودن اندرکنش خاک - سازه در مدل‌سازی‌های انجام شده برای هر دو نوع سازه، خروجی‌ها به واقعیت نزدیک‌تر می‌شوند.

**کلید واژگان:** شکل‌پذیری، مقاومت لرزه‌ای، ساختمان بلندمرتبه فولادی، دیوار برشی فولادی، دیوار برشی بتنی.

## ۱- مقدمه

در ساختارهای اولیه در سازه‌های ابتدای قرن بیستم، چنین فرض می‌شد که اعضای ساختاری اصولاً نیروهای گرانش را تحمل می‌کنند. امروزه، با پیشرفت طراحی سامانه‌های ساختاری و مواد با مقاومت بالا، وزن سازه کاهش و لاغری افزایش یافته است که ناگزیر باید به نیروهای جانبی مانند باد و زلزله توجه کرد. به شکل قابل فهمی، خصوصاً برای سازه‌های بلند، با افزایش لاغری و انعطاف پذیری، سازه‌ها از نیروهای جانبی ناشی از باد و زمین لرزه هرچه بیشتر آسیب می‌بینند [۱]. به عنوان یک قانون کلی، وقتی همه چیز یکسان باشد، سازه بلندتر لزوماً باید سامانه ساختاری مناسبی برای مقاومت در برابر نیروهای جانبی داشته باشد [۲].

سیستم‌های باربر جانبی زیادی جهت مقاوم سازی سازه‌های بلندمرتبه در برابر بارهای دینامیکی ناشی از زلزله طراحی شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند که هر کدام به نوبه خود دارای مزایا و معایبی هستند. در این راستا، به کارگیری دیوار برشی‌های فولادی و بتنی از جمله راهکارهای جدید و متداولی است که ارزیابی هر کدام در رسیدن به اهداف مذکور، موجب انجام این تحقیق شده است. کاربرد دیوارهای برشی در سازه‌های فولادی، ضمن برخورداری از خصوصیات خوب سیستم‌های مهاربندی همگرا<sup>۱</sup> و واگرا<sup>۲</sup> در بسیاری از موارد حتی بهتر از آنها عمل می‌کنند و از نظر سختی برشی نیز از سخت ترین سیستم‌های مهاربندی یعنی بادبند X شکل، سخت تر بوده و با توجه به امکان ایجاد بازشو در آنها، کارایی همه سیستم‌های مهاربندی را از این نظر دارا می‌باشند [۳]. همچنین رفتار این سیستم در محدوده خمیری و میزان جذب انرژی آن نسبت به سیستم‌های مهاربندی بسیار بهتر است. مسأله حائز اهمیت در سازه‌های فولادی بلندمرتبه، مسأله اثر اندرکنش خاک - سازه بر رفتار سازه است که عمدتاً در تحلیل های سازه ای مرسوم و قدیمی در نظر گرفته نشده و ممکن است تاثیر نامطلوبی بر نتایج داشته باشد [۴].

در روش‌های طراحی سازه‌های متعارف معمولاً تأثیر اندرکنش خاک-سازه، نادیده گرفته می‌شود. نادیده گرفتن این پدیده در طراحی سازه‌های سبک بر خاک‌های سخت، معقول و منطقی است [۵]، لیکن در سازه‌های سنگین و با سختی بالا، نظیر نیروگاه‌های هسته‌ای، آسمان خراش‌ها و بزرگراه‌های چندطبقه، اثر اندرکنش خاک - سازه، برجسته و حساس است. خسارات ایجاد شده از زلزله‌های اخیر، مانند زلزله کوبه در سال ۱۹۹۵ در ژاپن، نشان داده است که پاسخ سیستم سازه‌ای، نه تنها به پاسخ خود سازه اصلی، بلکه به پاسخ فنداسیون و زمین‌زیر آن نیز وابسته است. خسارات عمده‌ای در سازه‌ها به علت اندرکنش خاک-سازه در زلزله‌های رخ داده گزارش شده است [۶]. به

عنوان نمونه، یاشینسکی<sup>۳</sup> گزارشی از خسارت زلزله سانفرانسیسکو<sup>۴</sup> را در سال ۱۹۸۹ ارائه کرد. همچنین تحلیل‌های عددی وسیعی که توسط میلوناکیس<sup>۵</sup> و گرتس<sup>۶</sup> انجام شدند، نشان دادند که اندرکنش خاک - سازه در خرابی شدید بزرگراه سریع‌السیر هان شین<sup>۷</sup> در زلزله کوبه در سال ۱۹۹۵ ژاپن، علت عمده بوده است [۷].

تاکنون تحقیقات زیادی در این زمینه صورت پذیرفته است که از جمله آنها می‌توان به مطالعه بهنام فر<sup>۸</sup> و سوجی موروا<sup>۹</sup> (۱۹۹۹)، اشاره کرد که پاسخ دینامیکی طیف وسیعی از ساختمان های ۱، ۲، ۳ و ۲۰ طبقه و ساختمان مربوط به یک نیروگاه هسته‌ای را در دو وضعیت منفرد و مجاور مورد مقایسه قرار دادند. مطالعه آنها نشان داد که با نزدیکی دو سازه، فرکانس تشدید افزایش می‌یابد، و در برخی نتایج مربوط به فاصله سازه‌ها، افزایش در پاسخ سازه‌ها مشاهده گردید. آنها همچنین نشان دادند که اثرات مجاورت بر پاسخ سازه‌های خاص مثل نیروگاه‌های هسته‌ای بحرانی تر است [۸].

بهنام فر و همکاران (۲۰۰۱)، دو ساختمان که در مجاورت یکدیگر روی خاک نرم قرار گرفته بودند را به صورت یکپارچه و با در نظر گرفتن همبستگی ارتعاشی بین آنها، جهت محاسبه فرکانس‌های طبیعی سیستم، مورد مدل سازی و بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که هرگاه فاصله دو ساختمان از ۲/۵ برابر بعد پایه‌ها کمتر شود، لازم است همبستگی ارتعاشی بین آنها در نظر گرفته شود [۹].

تبریزی و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیق دیگری به بررسی اثر اندرکنش خاک - سازه بر پاسخ غیرخطی سازه‌های بلندمرتبه، با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی به روش المان محدود پرداختند. نتایج تحلیل آنها نشان داد که در مواردی که زمان تناوب دینامیکی لایه خاک، فاصله زیادی با پرپود سازه دارد، اندرکنش سازه‌های مجاور معمولاً اثر کاهنده بر پاسخ غیرخطی و خسارت سازه از خود نشان می‌دهد [۱۰].

تحقیقات<sup>۱۱</sup> انجام شده<sup>۱۲</sup> دوبعدی مذکور با قبول فرض رفتار کرنش مسطح، هم برای سازه و هم خاک، نشان دادند که اثرات اندرکنش خاک - سازه و همچنین مجاورت سازه‌ها، بر پاسخ دینامیکی آنها در خیلی از موارد قابل صرف نظر نیست و با توجه به لزوم حصول پاسخ دقیق، تحلیل‌های اندرکنش و مجاورت برای استفاده در طراحی و مقاوم سازی لرزه‌ای سازه‌ها، کاملاً مقبول و مورد نیاز است که انجام این گونه تحقیقات با مدل های سه بعدی برای سازه، فنداسیون و خاک زیر آن انجام شود. این تحقیق با این رویکرد در مسائل اندرکنش خاک - سازه، به انجام رسید و سپس به مسائل مجاورت سازه‌ها تعمیم داده شد.

<sup>6</sup> Gazetas

<sup>7</sup> Hanshin

<sup>8</sup> Behnamfar

<sup>9</sup> Sugimura

<sup>1</sup> Concentric Brace Frames (CBF)

<sup>2</sup> Eccentric Brace Frames (EBF)

<sup>3</sup> Yashinsky

<sup>4</sup> San Francisco

<sup>5</sup> Mylonakis

به طور کلی جهت مقابله با نیروهای جانبی زلزله در سازه‌های بلندمرتبه فولادی، بتنی و کامپوزیتی، از سامانه‌های ساختاری مختلفی استفاده می‌شود که از جمله پرکاربردترین آنها می‌توان به سامانه‌های قاب سخت شونده، مهاربندی، دیوار برشی‌های فولادی و بتنی اشاره نمود. با توجه به کاربرد روزافزون دیوار برشی‌های فولادی و بتنی، در این تحقیق، به بررسی استفاده از این نوع سامانه ساختاری در سازه‌های بلندمرتبه پرداخته شده است [۱۳].

سامانه‌های قاب دیوار برشی در هر دو نوع از ساختمان‌های بتنی و کامپوزیت استفاده می‌شوند. دیوار برشی‌ها ممکن است به‌عنوان تیرهای پایه عمودی تعریف شوند، که نیروهای جانبی باد و لرزه‌ها را که به سازه وارد شده و توسط دیافراگم‌های کف به آنها منتقل می‌شوند، تحمل می‌کنند. دیوار برشی‌ها عموماً بخش‌هایی از هسته‌های آسانسور و سرویس هستند و قاب‌ها یک ساختار سخت‌تر و محکم‌تر را ایجاد می‌کنند. این اعضا می‌توانند اشکال مختلفی مانند مدور، منحنی، تخم‌مرغی، جعبه‌ای، سه‌گوش یا خط راست، داشته باشند. این سامانه از نظر ساختاری مانند یک سازه بتنی با دیوار برشی عمل می‌کند که تمام نیروهای جانبی را تحمل می‌کند. برج متروپولی تن (۱۹۸۷) با ارتفاع ۶۸ طبقه در نیویورک مثال خوبی از این سامانه می‌باشد. برج‌های ۸۸ طبقه‌ای پتروناس<sup>۱</sup> (۱۹۹۸) که تا زمان ساخت تایپه<sup>۱</sup> با ۱۰۱ طبقه در سال ۲۰۰۴ بلندترین سازه‌های جهان بودند، نیز این سامانه را در ساختمان کامپوزیت خود استفاده کردند.

### ۳- روش اجزاء محدود

روش اجزاء محدود یک روش تحلیل عددی است که می‌توان آن را برای حل مسائل متعدد و متنوع مهندسی در حالات استاتیکی، دینامیکی، خطی و غیرخطی، مانند تحلیل تنش به کار گرفت. این روش که ریشه آن به دهه‌های ۱۹۰۰ میلادی برمی‌گردد، عملاً در دهه ۶۰ میلادی به صورت نظام مند و مدون، وارد مباحث مهندسی، به خصوص مهندسی مکانیک و عمران شد. اصطلاح اجزاء محدود برای اولین بار توسط کلاف<sup>۲</sup> در سال ۱۹۶۰ جهت حل مسائل ارتجاعی دو بعدی به کار گرفته شد، هر چند اولین شخصی که عملاً از این روش در حل مسائل پیچش استفاده نمود، کورانت<sup>۳</sup> در سال ۱۹۴۳ بود. در روش اجزاء محدود که یک روش حل عددی می‌باشد، غالباً مسائل فیزیکی به کمک معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم و یا با کمک کمینه نمودن انرژی پتانسیل حل می‌شوند. روش کار به این صورت است که کل مدل هندسی به اجزاء ریزتری به نام جزء تقسیم می‌شود. هر جزء، خود دارای گره‌هایی است که مقادیر ورودی (بارگذاری و شرایط مرزی) و خروجی (نتایج) به آنها اختصاص داده می‌شود. با استفاده از تئوری اجزاء محدود، پس از حل معادلات تعادل، تغییر مکان‌ها

در مقاله حاضر تلاش شده است که ضمن بررسی رفتار سازه، تحت اثر سیستم دیوار برشی‌های فولادی و بتنی در ساختمان‌های بلندمرتبه فولادی و لحاظ تأثیر هر یک بر مقاومت لرزه‌ای و شکل‌پذیری ساختمان، اثر اندرکنش خاک - سازه نیز بر نتایج آنها، مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

### ۲- ضرورت استفاده از دیوار برشی در سازه‌های بلندمرتبه

به‌طور متداول، سامانه‌های ساختاری بسیاری وجود دارند که می‌توانند برای مقاومت سازه بلند در برابر نیروهای جانبی استفاده شوند. در این مقاله، این سامانه‌ها بر اساس رفتار واکنش پایه ساختاری برای مقاومت در برابر نیروهای جانبی طبقه‌بندی می‌شوند [۱۱]:

مقاومت سازه‌های بلند در برابر باد، همانند زمین‌لرزه‌ها، عامل تعیین‌کننده اصلی در فرمولاسیون سامانه‌های ساختاری جدید است که با ادامه تلاش‌های مهندسیین طراح برای افزایش ارتفاع و مقاومت سازه در برابر انحراف درونی، محدودیت‌های قابل قبول و کاهش میزان مواد و مصالح، به دست می‌آید. به لطف فن‌آوری‌های رایانه‌ای پیشرفته، مواد مدرن و راهکارهای ساختاری ابتکاری، سامانه‌های ساختاری برتر، نظیر آسمان‌خراش‌ها می‌توانند رشد کنند، به گونه‌ای که پیش‌تر از آن، هرگز کسی تصویری از آسمان‌خراش تایپه<sup>۱</sup> با ۱۰۱ طبقه را نمی‌کرد.

اساساً، سه نمونه اصلی برای سازه وجود دارد. سازه‌های فولادی، سازه‌های بتنی و سازه‌های کامپوزیت. تمام سازه‌های بلندمرتبه، می‌توانند به‌عنوان سازه‌های کامپوزیت در نظر گرفته شوند. چون، اصولاً غیرممکن است بتوان سازه‌ای را تنها با استفاده از فولاد یا بتن ساخت. این یعنی، در یک دریافت اساسی، استفاده از آرماتور فولادی متعادل می‌تواند یک سازه بتنی را تبدیل به یک ساختار کامپوزیت کند و به شکل مشابهی قالب‌های بتنی می‌توانند یک سازه فولادی را تبدیل به یک سازه کامپوزیت نمایند. بیشتر سازه‌های بلندمرتبه در جهان به دلیل نسبت بالای مقاومت به وزن، سهولت سرهم کردن و قابلیت نصب میدانی، اقتصادی بودن انتقال به محل موردنظر، دستیابی به سطوح مقاومتی متفاوت و امکان انتخاب گسترده بخش‌های آن سامانه، ساختاری فولادی دارند. سامانه‌های قاب‌بندی ابتکاری و روش‌های طراحی مدرن، فرآیند ساخت، حفاظت در مقابل آتش و مقاومت در برابر فرسایش را بهبود بخشیده و فنون برپا کردن ساختمان در ترکیب با سبک‌های تحلیلی پیشرفته فراهم شده توسط رایانه نیز، استفاده از فولاد را در هر سامانه ساختاری منطقی، برای سازه‌های بلند فراهم کرده است [۱۲].

<sup>1</sup> Clough 3

<sup>1</sup> Courant 4

<sup>1</sup> Taipei 0

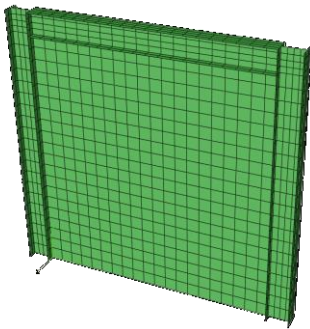
<sup>1</sup> Metropolitan 1

<sup>1</sup> Petronas 2

فایل ورودی، اطلاعاتی چون مختصات دو گره که به وسیله آن هندسه المان تشکیل می‌شود، مقطع هندسی در محل دو گره المان، خصوصیات ماده نظیر ضریب ارتجاعی، ضریب پواسون، مدول برشی، منحنی تنش - کرنش ماده و دیگر اطلاعات مورد نیاز وارد شده است. اطلاعات خروجی شامل طیف گسترده‌ای از نتایج، نظیر تنش‌ها، کرنش‌ها و نیروها از این المان نیز به صورت برداشت اطلاعات در گره‌ها و یا سطح المان‌ها قابل دسترسی است.

### ۳-۳- ساخت مدل هندسی المان

پس از ساخت مدل هندسی المان، ثابت حقیقی و نوع مصالح مصرفی مناسب به هر جزء مدل هندسی تخصیص داده شده و از شبکه بندی اختیاری و یا ترسیم برای شبکه‌سازی مدل هندسی استفاده می‌شود. به طور کلی شبکه - بندی اعضای مختلف مدل باید به گونه‌ای باشد که گره‌های ایجاد شده در اعضای مجاور، بر یکدیگر منطبق بوده تا بعد از اتصال آنها به هم، بتوانند نیرو را انتقال دهند (سازه یکپارچه ایجاد گردد). در شکل ۱، نمونه‌ای از مدل‌سازی‌های انجام شده نمایش داده شده است.



شکل ۱- نمونه مدل‌سازی اعضای سازه و شبکه بندی آن

### ۳-۴- اعمال بار و شرایط مرزی بر مدل

به طور کلی بارهای وارده به سازه را می‌توان به صورت نیروهای و لنگرهای متمرکز یا گسترده و یا به صورت کشش‌ها و فشارهای سطحی (غشایی) یا بارهای حرارتی یا بارهای حجمی ناشی از تأثیر میدان گرانشی یا حتی الکترومغناطیسی بر سازه در نظر گرفت. برنامه تغییر مکان‌ها و نشست‌های اعمالی را نیز جزو بارگذاری منظور نموده است. قیود تکیه‌گاهی را نیز با بستن درجات آزادی مورد نظر گره‌ها در محل تکیه گاه می‌توان اعمال کرد. در اعمال قیود تکیه‌گاهی می‌توان از شرایط خاص تقارن و پاد تقارن و یا حتی تقارن محوری در صورت لزوم، با توجه به نوع مسأله استفاده کرد.

### ۳-۵- تنظیمات بارگذاری و تحلیل مدل‌ها

#### ۳-۵-۱- انتخاب نوع تحلیل

نرم افزار ABAQUS، قابلیت انجام انواع تحلیل‌ها نظیر استاتیکی، مودال، هارمونیک، گذرا، طیفی، کماتشی و تحلیل‌های زیر سازه‌ای را دارا است. به طور کلی الگوریتم حل در برنامه به ۴ روش حل شامل جایگزینی مستقیم، حل تکراری نیوتن-رافسون، الگوریتم حل تکراری

در محل گره‌های هر جزء محاسبه می‌شوند. برای محاسبه تغییر مکان‌ها در فضای بین گره‌ها، از توابعی استفاده می‌شود که متغیرهای این توابع، مقدار تغییر مکان‌ها در گره‌ها (که معلوم است) می‌باشند. به این توابع که بر حسب نوع جزء متفاوت است، توابع شکل گویند. این توابع مقدار درجه آزادی (مثلاً جابجایی) در هر ناحیه از جزء را مشخص می‌کنند. شرط اصلی انتخاب تابع شکل مناسب، قابلیت تأمین شرایط مرزی، توسط آن تابع است. روش اجزا محدود، جهت حل تقریبی معادلات دیفرانسیل حاکم بر محیط‌های پیوسته است. این روش در ابتدا به عنوان یک روش تحلیل تنش مطرح گردید و اکنون نیز به طور گسترده‌ای برای این منظور به کار می‌رود. علاوه بر این در بسیاری از کاربردهای مهندسی از قبیل هدایت حرارت، تراوش مایعات، دینامیک سیالات و میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، جایگاه خود را یافته است [۱۴].

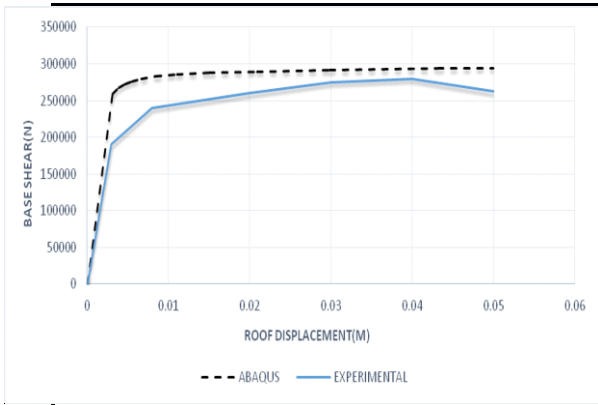
روش تحلیل اجزای محدود عموماً در تحلیل مسائل سازه‌ها و قاب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، ولی می‌توان از آن در حل مسائل مکانیک محیط‌های پیوسته و میدان‌های مختلف استفاده کرد. این روش امروزه به علت توانایی و انعطاف‌پذیری زیاد به عنوان یک ابزار مهم در اکثر دانشکده‌های مهندسی و بخش‌های پژوهشی و تحقیقات صنایع مورد توجه قرار گرفته است [۱۵].

### ۳-۱- معرفی نرم‌افزار آباکوس

با توجه به اهداف تحقیق، باید نرم افزار انتخابی قابلیت‌های زیادی داشته باشد تا نتایج مدنظر را ارائه نماید. از جمله قابلیت‌های مورد نظر می‌توان به تحلیل رفتار غیرخطی اعضای سازه، تحلیل لرزه‌ای، مدل‌سازی خصوصیات مختلف مواد مورد نظر (فولاد و بتن) و توانایی ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ، رفتار بعد از کمانش و غیره اشاره کرد. به همین منظور در این تحقیق از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS جهت مدل‌سازی سازه‌ها استفاده شده است. این نرم افزار قابلیت حل مسایل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیرخطی را دارا می‌باشد و همچنین حاوی مجموعه المان‌های گسترده‌ای است که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان توسط این المانها مدل کرد. نرم‌افزار دارای مدل‌های رفتاری زیادی است که در مدل‌سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون، قابلیت بالایی را ممکن می‌سازد [۱۶].

### ۳-۲- انتخاب المان سازه‌ای

انتخاب المان صحیح که بتواند خواص مصالح مورد استفاده را مدل کند، باعث می‌شود که رفتار مدل به رفتار سازه واقعی نزدیک تر شود. همچنین به علت اینکه المان‌های مختلف باید در نقاط تماس، سازگاری داشته باشند، بهتر است که انتخاب نوع المان تنوع کمتری داشته باشد، تا به جواب‌های دقیق‌تری منتهی شود. به همین منظور در این تحقیق جهت تعریف المان‌های مورد نیاز در مدل‌سازی سازه‌های مورد بررسی، از المان‌های SHELL و SOLID استفاده شده است. برای مدل‌سازی ورق دیواربرشی و جان و بال ستون و تیر، از المان صفحه‌ای و برای مدل‌سازی بتن از المان حجمی و برای مدل نمودن برش گیرها از المان خطی استفاده گردید. برای تعریف المان مذکور، در



شکل ۲- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی لوبل و همکاران و مدل نرم افزار ABAQUS

### ۵- مدل سازی عددی

با توجه به قابل اعتماد بودن مدل سازی صورت گرفته، به معرفی مدل های مورد بررسی پرداخته می شود. برای بررسی کامل عملکرد ساختمان های بلندمرتبه از سازه های ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه استفاده شده است. در ابتدا سازه ها با استفاده از آیین نامه مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، ویرایش سال ۱۳۹۲ به روش مقاومت نهائی طراحی شده اند. برای بررسی بهتر نتایج، مدل ها به دو گروه تقسیم بندی شدند. گروه ها به این صورت تقسیم بندی شدند که در هر گروه، هر یک از سیستم های سازه ای دارای عملکرد مشابه باشند. در جداول ۲ و ۳ مشخصات مصالح و مدل های بررسی شده در مقاله ارائه شده است. برای بررسی واقع گرایانه تر مدل، سه دهانه انتخاب شده است. برای بررسی بهتر مدل از خاصیت تعریف مصالح، نمودار تنش- کرنش بتن به صورت چند خطی به نرم افزار معرفی گردیده و برای خاک از معیار دراگر- پراگر استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای خاک، عمق ۲۰ متر و طول ۸۰ متر مدل سازی شده و برای بتن از تنش صفحه ای استفاده شده است.

نیوتن-رافسون اصلاح شده و الگوریتم حل تری (طول کمان) می باشد که در این مقاله از روش تکرار نیوتن-رافسون برای تحلیل استفاده شده است. این روش برای مسائل با درجه غیرخطی بالا به کار می رود. در هر نمو بارگذاری، تکرارهای تعادلی جهت همگرایی مسأله در آن مرحله صورت می گیرد و در هر تکرار تعادلی، ماتریس سختی، احیا می گردد که در محاسبات عددی نرم افزار، روندی بسیار زمانبر است.

### ۲-۵-۳- تلورانس همگرایی

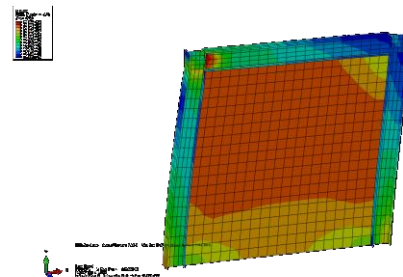
در مراحل تکرار تحلیل به عنوان معیار همگرایی می توان تلورانس مطلوب را بر مبنای بار، تغییر مکان، دوران یا کمیت های دیگر به برنامه معرفی کرد. حتی در نظر گرفتن دو یا چند معیار مذکور به صورت همزمان، امکان پذیر است. برنامه به صورت پیش فرض، نیرو و لنگر را مبنای همگرایی قرار می دهد. نکته مهم در کنترل جواب های خروجی این است که در هر حالت، باید نیرو معیار همگرایی باشد، زیرا اگر فقط جابجایی، معیار قرار گیرد، ممکن است در نتایج خطای زیادی وارد شود. بعد از تکرار دوم، در حالی که جواب با جواب حقیقی خیلی فاصله دارد، ادامه تحلیل با همگرا شدن جابجایی ها، متوقف می شود.

### ۴- صحت سنجی نرم افزار

جهت حصول اطمینان از نتایج ABAQUS یک مدل آزمایشگاهی که توسط لوبل و همکاران<sup>۱</sup> انجام شده است انتخاب و نتایج آن با مدل المان محدودی مقایسه شده که برای مدل سازی و صحت سنجی، از المان Shell استفاده گردیده است. در مدل آزمایشگاهی ضخامت ورق 1.5mm و تیر و ستون 75\*8 mm در نظر گرفته شدند. همچنین ارتفاع و عرض دهانه 90 سانتیمتر می باشند. مقایسه نتایج در جدول ۱ و شکل ۲ نشان می دهد که مدل سازی ABAQUS از دقت قابل قبولی برخوردار می باشد.

جدول ۱ - مشخصات مصالح مدل آزمایشگاهی لوبل و همکاران [۱۷]

اعضای دیوار برشی فولادی	ضریب ارتجاعی (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	ضریب پواسون
ورق	۲۰۰	۳۲	۰/۳
تیر و ستون	۲۰۰	۳۸	۰/۳



<sup>1</sup> Lubell et al.

نام مدل	ضریب ارتجاعی (GPa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)	سرعت موج (m/s)	تنش نهایی (MPa)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
فولاد	۲۰۰	۰/۳	۳۲	---	۴۶/۵	۷۸۵۰
بتن	۱۹	۰/۲	---	---	---	۲۴۰۰
خاک نوع ۴	۰/۱۸	۰/۴	---	۱۵۰	---	۱۷۰۰

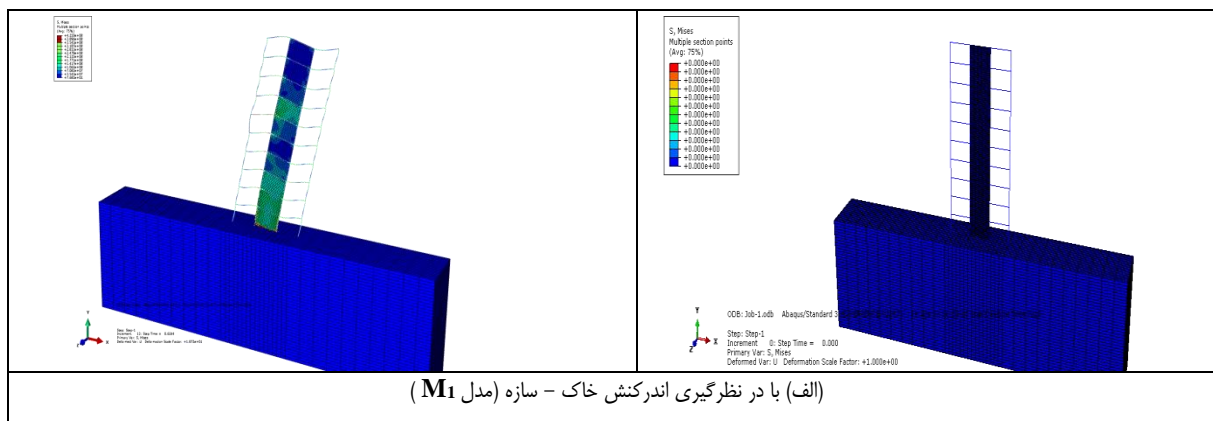
جدول ۳: مشخصات مدل های بررسی شده در پژوهش

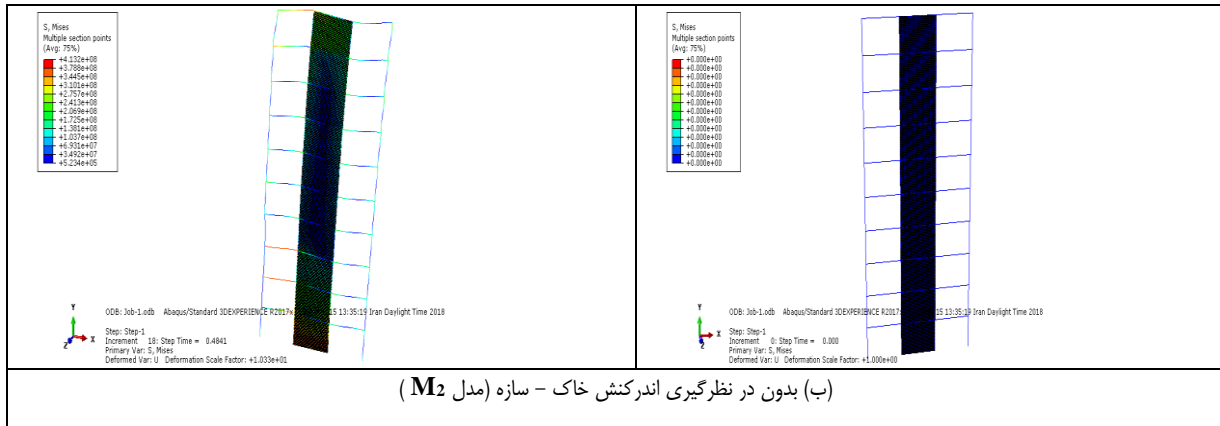
نام مدل	سیستم مقاوم در برابر بار جانبی	تعداد طبقات
M <sub>1</sub>	دیوار برشی فولادی	۱۰
M <sub>2</sub>	دیوار برشی فولادی	۱۰
M <sub>3</sub>	دیوار برشی فولادی	۱۵
M <sub>4</sub>	دیوار برشی فولادی	۱۵
M <sub>5</sub>	دیوار برشی بتنی	۱۰
M <sub>6</sub>	دیوار برشی بتنی	۱۰
M <sub>7</sub>	دیوار برشی بتنی	۱۵
M <sub>8</sub>	دیوار برشی بتنی	۱۵

۴ نتایج تحلیل های به دست آمده از پاسخ سازه برای مدل های مختلف در سازه های ۱۰ و ۱۵ طبقه ارائه شده است. نتایج حاصله، مربوط به جابجایی تسلیم، میزان جذب انرژی، مقاومت نهایی، مقاومت تسلیم و نمودار بار- جابجایی برای مدل های مختلف دارای دیوار برشی های فولادی و بتنی در سازه های ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

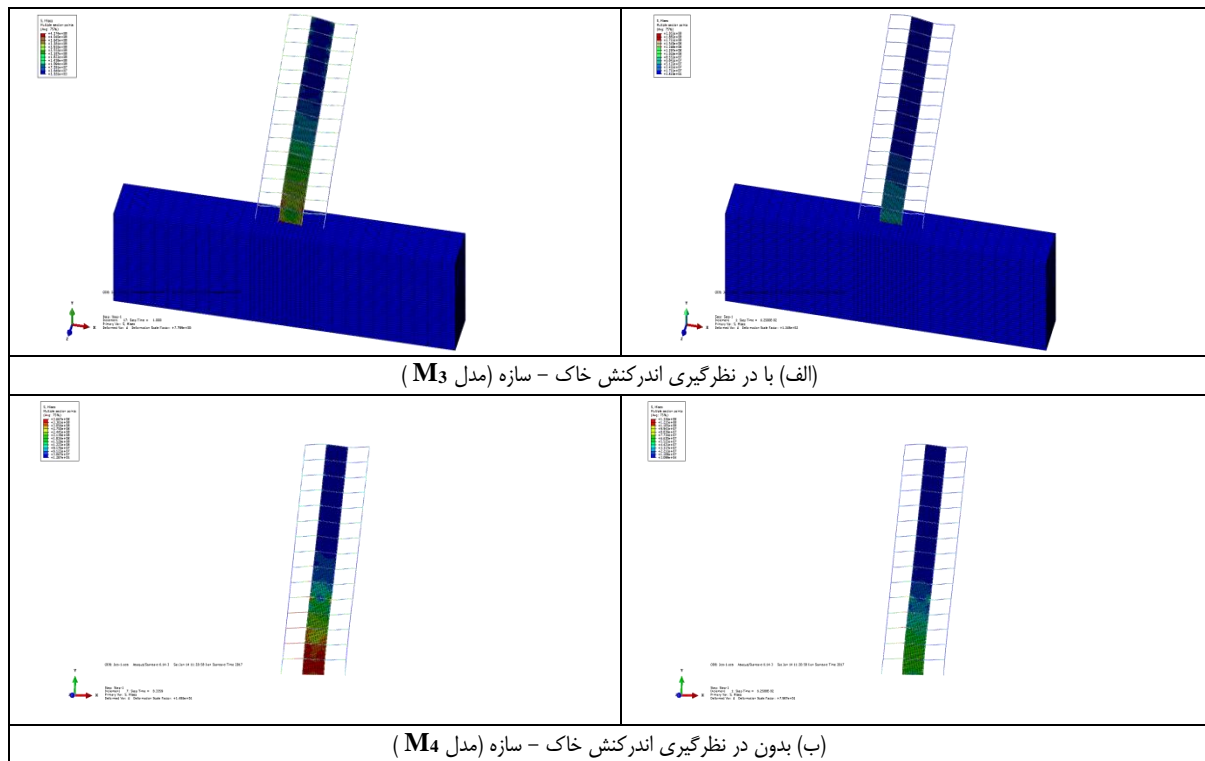
### ۶- تحلیل نتایج مدل سازی ها

در این بخش ابتدا نتایج مربوط به نمونه مدل سازی شده و خطوط همتراز تنش تسلیم، در سازه های ۱۰ و ۱۵ طبقه ارائه شده است. بخش اول، نتایج مربوط به سازه های دارای دیوار برشی فولادی (شکل های ۳ و ۴) و بخش دوم، نتایج مربوط به سازه های دارای دیوار برشی بتنی (شکل های ۵ و ۶) می باشد. مطابق نتایج بدست آمده، شروع محل تسلیم و شروع رفتار غیرخطی اجزاء سازه ای در مدل بررسی شده، از پای سازه بوده است. همچنین براساس منحنی های تراز تنش تسلیم، می توان شاهد تسلیم شدن دیوار برشی بود و نتیجه گرفت که مراحل تسلیم شدن سازه از طبقات پایین شروع می شود. در جدول

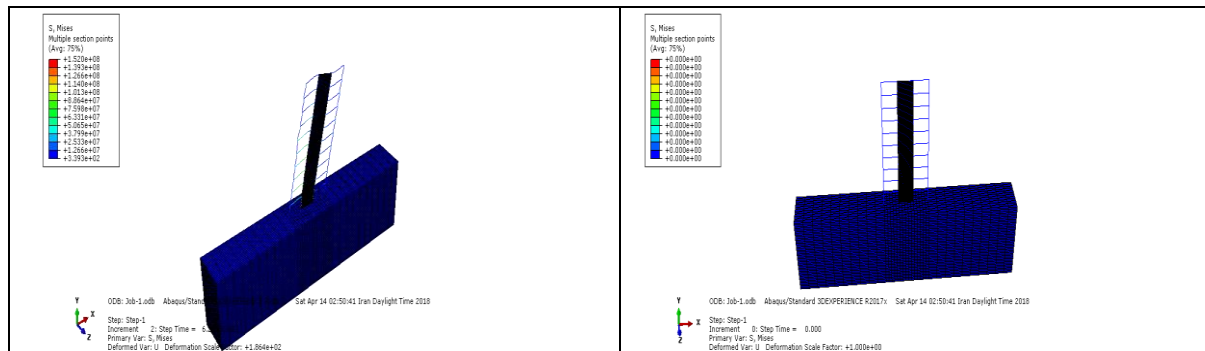


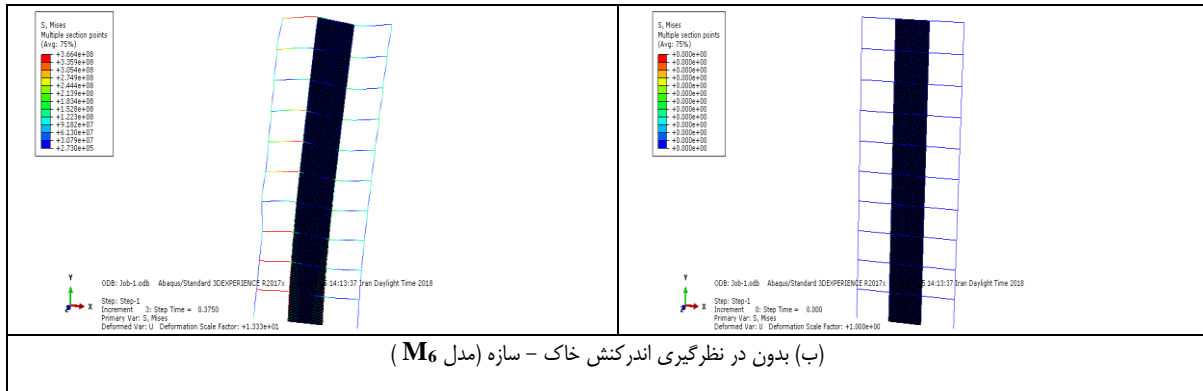


شکل ۳- نمونه مدل سازی شده و خطوط همتراز تنش تسلیم در سازه ۱۰ طبقه با دیوار برشی فولادی در نرم افزار ABAQUS

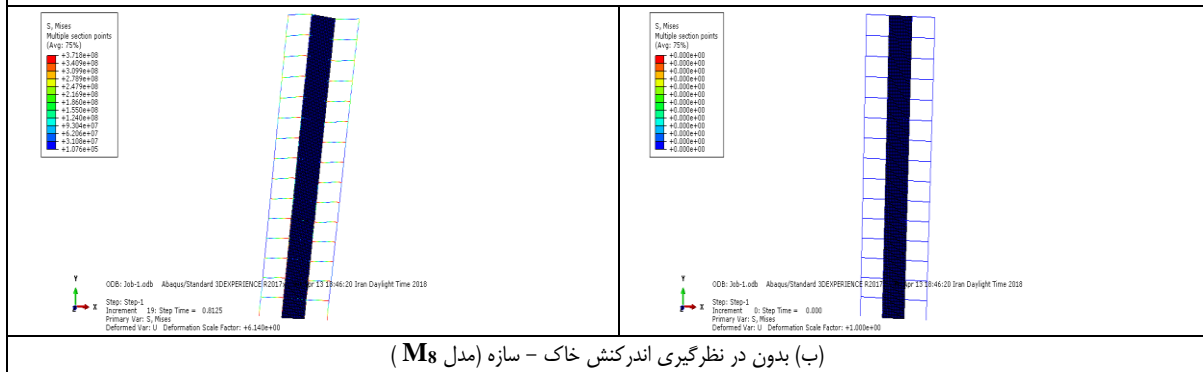
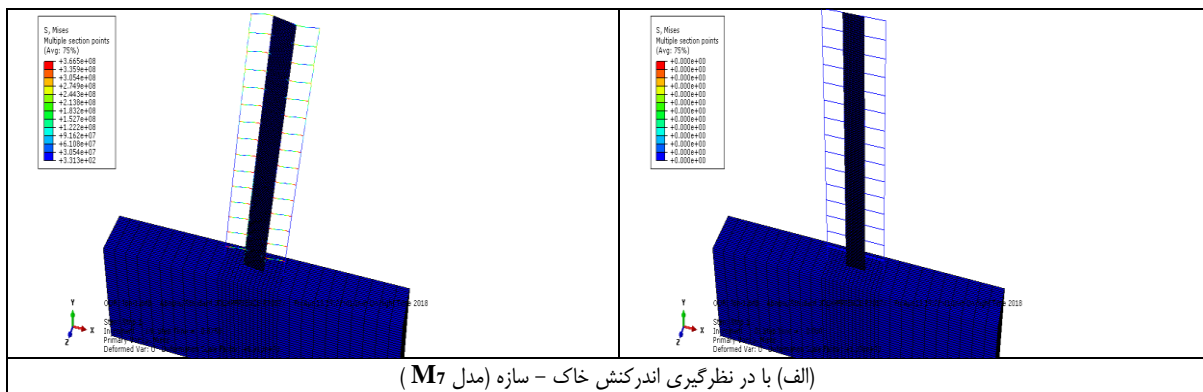


شکل ۴- نمونه مدل سازی شده و خطوط همتراز تنش تسلیم در سازه ۱۵ طبقه با دیوار برشی فولادی در نرم افزار ABAQUS





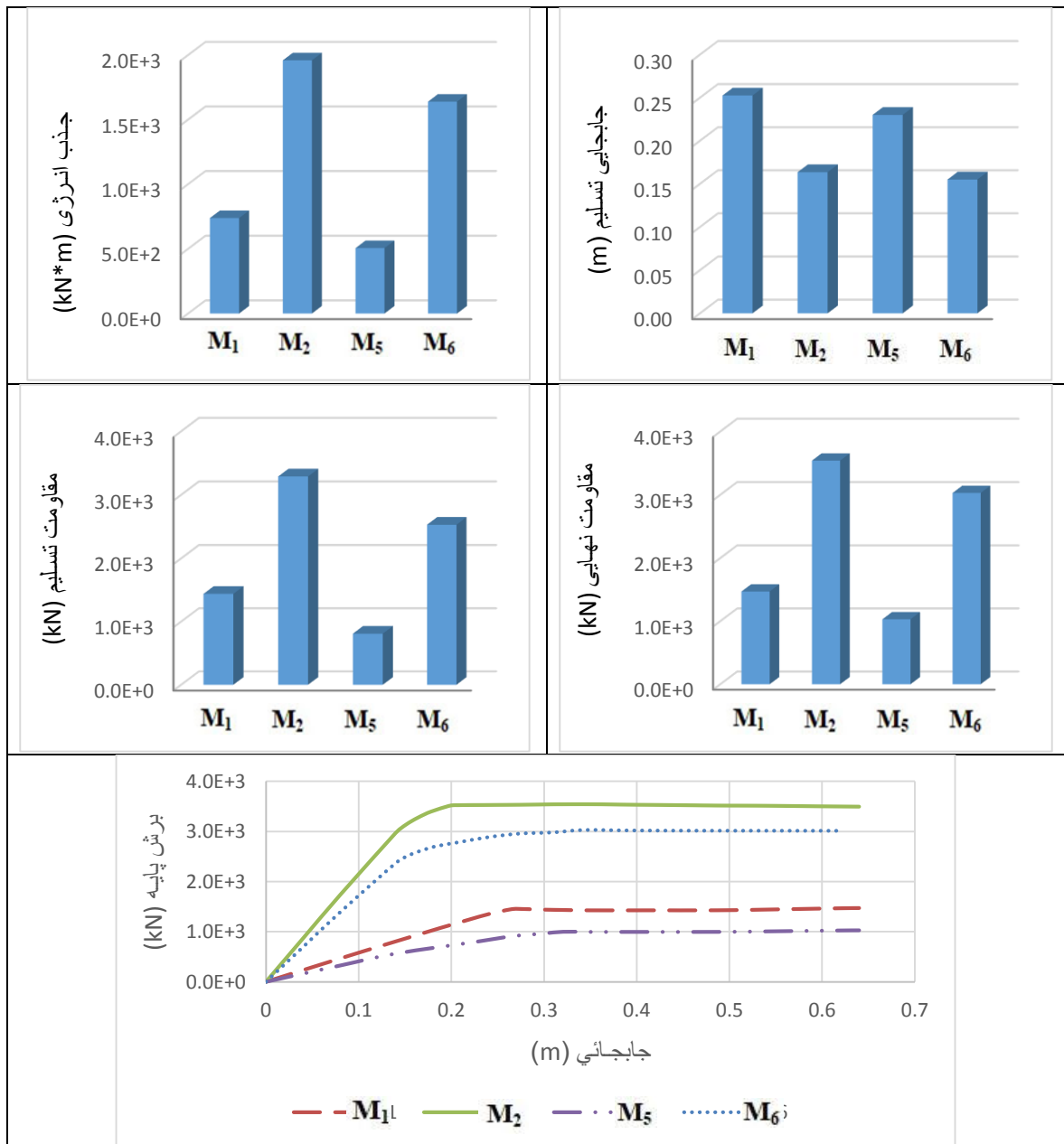
شکل ۵- نمونه مدل سازی شده و خطوط همتراز تنش تسلیم در سازه ۱۰ طبقه با دیوار برشی بتنی در نرم افزار ABAQUS



شکل ۶- نمونه مدل سازی شده و خطوط همتراز تنش تسلیم در سازه ۱۵ طبقه با دیوار برشی بتنی در نرم افزار ABAQUS  
جدول ۴- نتایج تحلیل های پاسخ سازه برای مدل های مختلف در سازه های ۱۰ و ۱۵ طبقه

نام مدل	جابجایی تسلیم (m)	جذب انرژی (kN*m)	مقاومت نهایی (kN)	مقاومت تسلیم (kN)
M <sub>1</sub>	۰/۲۵۳	۷۳۷/۹۳۰	۱۴۷۰	۱۴۴۰
M <sub>2</sub>	۰/۱۶۴	۱۹۵۸/۸۰۰	۳۵۴۰	۳۲۹۰
M <sub>3</sub>	۰/۷۸۳	۲۲۲۵/۲۵۰	۴۱۰۰	۳۷۰۰
M <sub>4</sub>	۰/۴۷۱	۷۰۷۹/۸۰۰	۸۸۶۰	۶۴۹۰
M <sub>5</sub>	۰/۲۳۴	۵۰۵/۷۸۳	۱۰۲۹	۸۰۹
M <sub>6</sub>	۰/۱۵۵	۱۶۳۹/۰۳۰	۳۰۲۸	۲۵۳۰
M <sub>7</sub>	۰/۵۷۲	۱۷۲۰/۲۷۶	۳۰۶۰	۲۲۲۹
M <sub>8</sub>	۰/۳۱۲	۵۱۵۸/۱۸۶	۵۹۹۰	۵۸۵۰



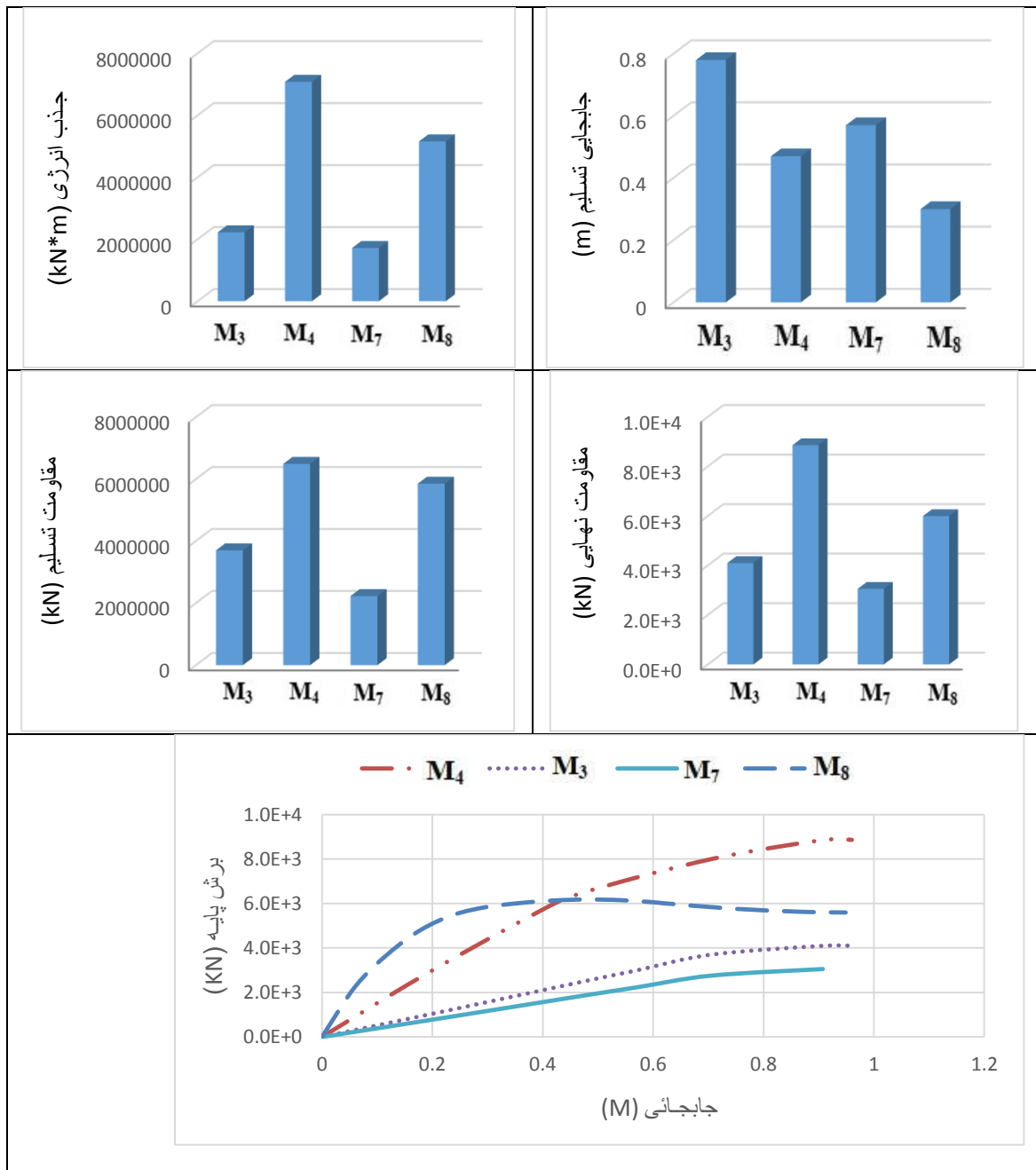


شکل ۷- مقایسه نتایج مربوط به پاسخ رفتار سازه‌های ۱۰ طبقه، دارای سیستم‌های دیوار برشی‌های فولادی و بتنی

الف- با لحاظ نمودن اثر اندرکنش خاک- سازه ب- بدون لحاظ نمودن اثر اندرکنش خاک- سازه

مشاهده نمود که بیشترین مقاومت نهایی، متعلق به مدل  $M_2$  بوده و بعد از آن به ترتیب مدل های  $M_6$ ،  $M_1$  و  $M_5$  دارای مقاومت نهایی بیشتری می باشند. ضمناً نتایج بدست آمده نشان می دهد که بیشترین مقاومت تسلیم متعلق به مدل  $M_2$  و بعد از آن به ترتیب مدل های  $M_6$ ،  $M_1$  و  $M_5$  دارای مقاومت تسلیم بیشتری هستند.

براساس نتایج حاصله درخصوص پاسخ رفتار سازه های ۱۰ طبقه در شکل ۶ مشاهده می گردد که بیشترین جابجایی تسلیم، متعلق به مدل  $M_1$  بوده و بعد از آن به ترتیب مدل های  $M_5$ ،  $M_2$  و  $M_6$  دارای جابجایی تسلیم بیشتر می باشند. علاوه بر این، بیشترین جذب انرژی، متعلق به مدل  $M_2$  بوده و بعد از آن به ترتیب مدل های  $M_6$ ،  $M_1$  و  $M_5$  دارای جذب انرژی بیشتری هستند. همچنین می توان



شکل ۸- مقایسه نتایج مربوط به پاسخ رفتار سازه‌های ۱۵ طبقه دارای سیستم‌های دیوار برشی‌های فولادی و بتنی

الف- با لحاظ نمودن اثر اندرکنش خاک- سازه ب- بدون لحاظ نمودن اثر اندرکنش خاک- سازه

بیشترین مقاومت نهایی متعلق به مدل M<sub>4</sub> بوده و بعد از آن به ترتیب مدل‌های M<sub>8</sub>، M<sub>3</sub> و M<sub>7</sub> دارای مقاومت نهایی بیشتر هستند. طبق نمودار ۴-۱۲ بیشترین مقاومت تسلیم متعلق به مدل M<sub>4</sub> است و بعد از آن به ترتیب مربوط به مدل‌های M<sub>8</sub>، M<sub>3</sub> و M<sub>7</sub> می‌باشد.

براساس نتایج حاصله از پاسخ رفتار سازه‌های ۱۵ طبقه، در شکل ۷ مشاهده می‌گردد که بیشترین جابجایی تسلیم، متعلق به مدل M<sub>3</sub> بوده و بعد از آن به ترتیب مدل‌های M<sub>7</sub>، M<sub>4</sub> و M<sub>8</sub> دارای جابجایی تسلیم بیشتر می‌باشند. علاوه بر این، بیشترین جذب انرژی متعلق به مدل M<sub>4</sub> بوده و بعد از آن به ترتیب مدل‌های M<sub>8</sub>، M<sub>3</sub> و M<sub>7</sub> دارای جذب انرژی بیشتر هستند. هم‌چنین می‌توان دید که

- [6] Smith BS., Coull, A., "Tall building structures: analysis and design", New York, Wiley, (1991).
- [7] Astaneh-Asl, A., "Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls-SEONC Seminar", Paper Distributed and presented at the 2001 SEOANC Seminar, Structural Engineers Assoc of Northern California, November 7, (2001), San Francisco, (2001).
- [8] Behnamfar, F., Sugimura, Y., "Dynamic response of adjacent structures under spatially variable seismic waves", Probabilistic Engineering Mechanics, (14), pp. 33-44, (1999).
- [۹] بهنام‌فر، ف؛ کرمانی، م، "تغییرات فرکانس‌های طبیعی سازه‌های مجاور متکی بر خاک انعطاف‌پذیر"، ۱۳۸۱.
- [10] Nateghi, F., Tabrizi, A. and Behnamfar, F., "Structure-soil-structure effects on nonlinear response of tall buildings", First European Conf. Earthquake Eng. and Seismic, (13), pp. 206-215, (2006).
- [11] Poon, D.C., Shieh, S., Joseph, L.M., Chang, C., Structural design of Taipei 101; the World's Tallest Building. In: Proceedings of the CTBUH 2004 Seoul Conference, Seoul, Korea, pp. 271-72, (2004).
- [12] Housner, G. W., Trifunak, M. D., "Analysis of accelerograms - Parkfield earthquake", Bull of the Seismo. Society of America, Vol. 57, pp. 1193-1220, (1967).
- [13] Mollaioli, F., Decanini, L. D., "Characterization of the dynamic response of structures to damaging pulse-type near-fault ground motions", Meccanica, Vol. 41, pp. 23-46, (2006).
- [14] Moehle, J.P., "Seismic analysis, design and review for tall buildings", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 15, pp. 494-513, (2006).
- [15] Kalkan, E., Kunnath, S. K., "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings", Earthquake Spectra, Vol. 22, pp. 367-390, (2006).
- [۱۶] طالبی، ر؛ لطفی، م، "کتاب آموزش جامع و پیشرفته نرم‌افزار آباکوس" ۱۳۹۷.
- [17] Lubell, A., Prion, H.G.L., Ventura, C.E., Rezai, M., "Unstiffened steel plate shearwall performance under cyclic loading", Journal of Structural of Engineering, Vol. 4, pp. 126-128, (2000).

## ۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش رفتار لرزه‌ای سازه‌های با سیستم باربر جانبی دیوار برشی‌های فولادی و بتنی، با در نظرگیری اندرکنش خاک - سازه مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور با مدل سازی سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه در نرم افزار ABAQUS، تأثیر استفاده از دیوار برشی‌های فولادی و بتنی، با لحاظ اثر اندرکنش خاک و سازه و بدون آن در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از مدل سازی‌ها برای سازه‌های ۱۰ طبقه نشان داد که عملکرد سازه با دیوار برشی فولادی بهتر از دیوار برشی بتنی می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که با مقایسه مدل‌های  $M_5$  و  $M_1$ ، میزان مقاومت نهایی و جذب انرژی در سیستم با دیوار برشی فولادی به ترتیب افزایش ۴۲ و ۴۵ درصدی، نسبت به نوع بتنی داشته است. نتایج حاصل از مدل سازی‌ها برای سازه‌های ۱۵ طبقه نیز نشان داد که عملکرد سازه با دیوار برشی فولادی بهتر از دیوار برشی بتنی بوده است که با مقایسه مدل‌های  $M_3$  و  $M_7$ ، میزان مقاومت نهایی و جذب انرژی در این سیستم به ترتیب افزایش ۳۴ و ۲۹ درصدی نسبت به سیستم بتنی داشته است. علاوه بر این، نتایج با لحاظ نمودن اندرکنش خاک - سازه در مدل سازی‌های انجام شده برای همه سازه‌ها، نشان داد که وجود اندرکنش خاک - سازه، خروجی‌ها را به واقعیت نزدیک تر می‌کند.

## مراجع

- [1] Osma, A., Ghobarah, A. and Korol, R. M. "Implications of design philosophies for seismic response of steel moment frames", Earth. Eng. Struct. Dyn., Vol. 24, pp. 127-143, (1995).
- [2] LYNN S, BEEDLE., "High-Rise Habitat.HABITED", An International Journal., Vol. 2, No.1/2, pp. 0-3., Pergamon press, printed in Great Britain, (1977).
- [3] Kai hu., et al., "A Study on High-rise Structure with Oblique Columns by ETABS, SAP2000, MIDAS/GEN and SATWE", International Conference on Advances in Computational Modeling and Simulation. Procedia Engineering, pp. 474 - 480, (2012).
- [4] Mahgou, Y., Abbara, B., "Tall Buildings Legislations in Doha, Qatar", ASEAN Conference on Environment-Behavior Studies, Savoy Homann Bidakara Bandung Hotel, Bandung, Indonesia, pp. 14-17, June (2011).
- [5] Ali, M., "Evolution of concrete skyscrapers: from Ingalls to Jin Mao", Electronic Journal of Structural Engineering, (1), pp. 2-14, (2001).

# Evaluation and Comparison of Seismic Behavior of Steel High-rise Buildings Applying Concrete and Steel Shear Walls

Seyed Fathollah Sajedi

Associate professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran  
Farid Soleimani Moghadam

Ph.D. candidate, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

## Abstract

One of the effective factors in the designing process of buildings is how to control and manage the seismic force to achieve the optimal seismic resistance while maintaining proper ductility. In this regard, the application of various bracing systems in the construction of high-rise buildings, such as steel and concrete shear walls is a common solution. Therefore, in this research, once considering the soil-structure interaction and again without considering the impact of this interaction on two 10 and 15-story structures, different models of ABAQUS software were presented in the presence of steel and concrete shear walls. The nonlinear analytical method was investigated. For this purpose, by modeling the structures mentioned in the software, the effect of using steel and concrete shear walls was analyzed in terms of the impact of soil-structure interaction and without it. The results of modeling for 10-story structures showed that the performance of the structure with steel shear wall is better than concrete shear wall. In addition, the results obtained for the 15-story structure showed that the performance of this structure with steel shear wall was better than concrete shear wall. In general, the results present that the steel shear wall exhibits better behavior than the concrete shear wall. In general, it was found that by taking into account the soil-structure interaction in the modeling performed for both types of structures, the outputs are closer to reality.

**Keywords:** Ductility, Seismic strength, Steel high-rise structure, Steel shear wall, Concrete Shear wall.