

# تشخیص خسارت لرزه اساس دیوارهای مصالح بنایی به کمک مدلسازی به روش المان مجزا

نوید مداحی<sup>۱</sup>، ناصر خاجی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاذ مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

\* [nkhaji@modares.ac.ir](mailto:nkhaji@modares.ac.ir)

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱۲/۲۰]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۷/۷]

**چکیده** - از روش‌های تشخیص خسارت لرزه اساس<sup>۱</sup> به دلیل بینشی که از رفتار دینامیکی کلی سازه می‌دهند، برای ارزیابی خسارت در سازه‌های بنایی، استقبال می‌شود. با توجه به ناهمگنی و پیچیدگی رفتار سازه‌های بنایی که بیشتر ناشی از رفتار غیرخطی سطوح تماس است، مدل‌سازی دقیق آن‌ها امری چالش برانگیز است. نظر به ماهیت ناپوسته و مرکب سازه‌های مصالح بنایی، مدل‌سازی به روش المان مجزا یکی از روش‌های مناسب برای مدل‌سازی این گونه سازه‌ها، به ویژه رفتار غیرخطی آن‌ها است. بدین منظور در اولین گام در این پژوهش، دیوارهای مصالح بنایی به روش ریزمدلسازی<sup>۲</sup> در نرم‌افزار 3DEC مدل‌سازی و رفتار غیرخطی آن با نتایج آزمایش‌های معتبر مقایسه و درستی آن بررسی شد. با توجه به این‌که نرم‌افزار 3DEC قادر به محاسبه مستقیم فرکانس‌های اصلی سازه نیست، هدف بعدی، ارائه روشی برای استخراج غیرمستقیم فرکانس و پارامترهای رفتاری دینامیکی در محیط نرم‌افزار المان مجزا است. نتایج روش پیشنهادی گفته شده با نتایج تحلیل فرکانسی در روش المان محدود مقایسه و از درستی عملکرد آن اطمینان حاصل شد. در مرحله‌ی بعد، به منظور یافتن رابطه‌ی بین رشد ترک و خسارت در دیوار با رفتار دینامیکی، سازه تحت تأثیر سطوح خسارت مختلف قرار گرفت و در هر سطح خسارت، فرکانس‌های اصلی آن استخراج شدند. در انجام تحلیل‌ها، فرکانس به‌عنوان شاخص رفتار دینامیکی، و جابه‌جایی بالای دیوار به‌عنوان شاخص خسارت انتخاب شدند. بر اساس داده‌های تحلیل شده، با وجود تغییرشکل کوچک سازه با افزایش سطوح خسارت، افت فرکانس نسبی قابل توجهی مشاهده می‌شود که متناسب با رشد و ظهور ترک در سازه است.

**واژگان کلیدی:** تشخیص خسارت، دیوار مصالح بنایی، روش المان مجزا، افت فرکانس

## ۱- مقدمه

مطالعه‌ی رفتار و بررسی عملکرد و خسارت در این نوع ساختمان‌ها را بی‌اهمیت دانست. همچنین یکی از مباحث اصلی در فضای معماری و شهرسازی امروز کشورها، موضوع حفظ بناهای تاریخی و معماری گذشته و دیدگاه متفاوت درباره‌ی چگونگی حفظ این فضاها ارزشمند قدیمی است. از آنجایی‌که یک سازه‌ی بنایی ساختاری مرکب دارد، در برابر بارگذاری اعمالی، رفتاری کاملاً

استفاده از مصالح بنایی در اجرای ساختمان‌ها از قرون گذشته در ایران و سایر نقاط جهان رواج داشته است. امروزه، استفاده از مصالح بنایی سستی در ساختمان‌های با اهمیت ویژه، در شهرهای بزرگ رو به کاهش نهاده است. با وجود این هنوز هم در بسیاری از شهرها و بیشتر مناطق روستایی، ساختمان‌های بنایی قسمت بزرگی از بافت شهر را تشکیل می‌دهند. با توجه به آسیب‌پذیر بودن این ساختمان‌ها در زلزله‌های گذشته و تعداد زیاد آن‌ها در نواحی لرزه‌خیز، نمی‌توان

1. Vibration-based  
2. Micro-modeling

انجام داد. در این پژوهش، آثار انواع هندسه‌ی دیوارها، اتصال خشک دیوارها و وجود بارگذاری قائم بررسی شد.

در این پژوهش، دیوارهای مصالح بنایی به روش المان مجزا مدل‌سازی و رفتار غیرخطی آن راستی آزمایی می‌شود. سپس روشی برای استخراج غیرمستقیم فرکانس و پارامترهای رفتاری دینامیکی در روش المان مجزا ارائه می‌شود. در ادامه، سازه تحت تأثیر سطوح مختلف خسارت قرار گرفته و در هر سطح خسارت، فرکانس‌های اصلی آن استخراج می‌شوند. نتایج به دست آمده حاکی از این واقعیت است که با وجود تغییرشکل کوچک سازه، با افزایش سطوح خسارت، افت فرکانس نسبی قابل توجهی مشاهده می‌شود که متناسب با رشد و ظهور ترک در سازه است.

## ۲- روش المان مجزا

نرم‌افزار 3DEC یک برنامه عددی سه‌بعدی است که بر اساس روش المان‌های مجزا برای مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته استفاده می‌شود. در این برنامه همان فرمولاسیون عددی روش دوبعدی نرم‌افزار UDEC استفاده می‌شود. در این نرم‌افزار، پاسخ ناپیوستگی‌هایی مانند درزه‌ها که در معرض بارهای استاتیکی و دینامیکی قرار دارند، به خوبی شبیه‌سازی می‌شود. درحالی‌که ناپیوستگی‌ها به عنوان شرایط مرزی بین بلوک‌ها تلقی می‌شوند، رفتار بلوک‌ها به صورت صلب یا تغییرشکل‌پذیر می‌تواند تعریف شود. بلوک‌های تغییرشکل‌پذیر به شبکه‌ای از المان‌های تفاضل محدود تقسیم می‌شوند، و هر المان بر اساس یک رابطه تنش- کرنش خطی یا غیرخطی پاسخ می‌دهد. حرکت نسبی ناپیوستگی‌ها نیز توسط روابط جابه‌جایی- نیرو در جهت‌های برشی یا نرمال است. این برنامه چندین مدل رفتاری برای بلوک‌ها و ناپیوستگی‌ها دارد. برنامه 3DEC بر اساس طرح محاسباتی لاگراژ است که برای مدل کردن حرکت‌های بزرگ و تغییر شکل سیستم‌های بلوکی بسیار مناسب است. جزئیات مربوط به هندسه‌ی مدل، رفتار مواد، شرایط اولیه، بارگذاری، و اطلاعات مورد نیاز برای تحلیل یک مدل مصالح بنایی، بر اساس روش المان مجزا است. بوئی و لیمام به منظور بررسی قابلیت نرم‌افزار 3DEC در مدل‌سازی رفتار سازه‌های بنایی، به مقایسه‌ی مدل‌های عددی و نتایج آزمایشگاهی در دو قسمت

پیچیده، به ویژه در محدوده‌ی غیرخطی از خود نشان می‌دهد. پژوهش‌های بسیار زیادی بر روی رفتار سازه‌های مصالح بنایی با استفاده از روش المان محدود، تاکنون انجام شده که از جمله‌ی آن می‌توان به کارهای لورنسو و همکاران [۱] و راموس و همکاران [۲] اشاره کرد. با پیشرفت روش‌های عددی، روش المان مجزا<sup>۱</sup> که روش مناسبی برای مدل‌سازی این‌گونه سازه‌ها، که در ماهیت به صورت مرکب و ناپیوسته هستند، در اختیار پژوهشگران قرار گرفته است؛ هرچند که هنوز راستی آزمایی تحلیل سازه‌های مصالح بنایی با روش المان مجزا از چالش‌های پیش‌رو است [۳]. خسارت در سازه‌های مصالح بنایی عمدتاً ناشی از ترک‌ها، نشست پی، خوردگی مصالح و جابه‌جایی‌های بزرگ است. روش‌های تعیین خسارت لرزه‌آساس به‌علت کم‌ترین میزان دخالت فیزیکی در کاربری سازه و عدم تخریب سازه برای آزمایش مورد توجه هستند. فرض این‌که خسارت با کاهش سختی در سازه مرتبط است، برای سازه‌های بنایی قابل قبول است [۴]. روش‌های بسیاری در پیشینه پژوهشی برای تشخیص خسارت سازه‌ها گفته شده، اما تعداد محدودی برای سازه‌های مصالح بنایی قابل استفاده است. با توجه به رفتار پیچیده سازه‌های مصالح بنایی، تشخیص خسارت در آن‌ها کاری دشوار است. همچنین نظر به نبود توفیق تشخیص خسارت در این‌گونه سازه‌ها در برخی مطالعات گذشته، بررسی روش‌های سلامت‌سنجی لرزه‌آساس و کارایی آن‌ها در سازه‌های مصالح بنایی امری مهم است [۵]. در پژوهش‌های گذشته ثابت شده است که رفتار دینامیکی سازه متأثر از میزان خسارت وارد شده بر آن است. دانستن پارامترهای دینامیکی مناسب در تعیین خسارت سازه، نقشی اساسی ایفا می‌کند. یکی از این پارامترهای بسیار مهم فرکانس طبیعی سازه است [۶]. میشل و همکاران [۶] در یکی از معدود کارهایی که سازه‌های مصالح بنایی در ابعاد واقعی تا حد خرابی بارگذاری شدند، به بررسی تغییرات فرکانس در خرابی پیش‌رونده روی دو نمونه‌ی سازه‌ی بنایی پرداختند. در سال ۲۰۱۲، آزمایش لرزه‌محدود و آنالیز مودال روی برج نافوس کلیسای صوفیه‌ی حقیقا<sup>۲</sup> به منظور تشخیص خسارت موضعی و کمی‌سازی خسارت در ترکیه انجام شد [۷]. به- منظور بررسی مقاومت جانبی دیوارها، رستریو و همکاران [۸] یک سری آزمایش روی نمونه‌هایی با مقیاس یک‌پنجم و درزه‌ی خشک

1. Distinct Element Method (DEM)  
2. Hagia Sophia Bell-Tower

تنش‌های سربار دیوارها در جدول (۱) مشاهده می‌شود. در این پژوهش، به منظور نشان دادن قابلیت برنامه‌ی 3DEC در مدل‌سازی دیوارهای مصالح بنایی، دیوارها با مقادیر مختلف سربار مدل و تحلیل شده‌اند. قابل ذکر است نامگذاری دیوارها در مرجع به صورت (Shear Wall Compression load: SW30) انجام شده، که در مدل‌سازی حاضر نیز از همین اسامی استفاده می‌شود.

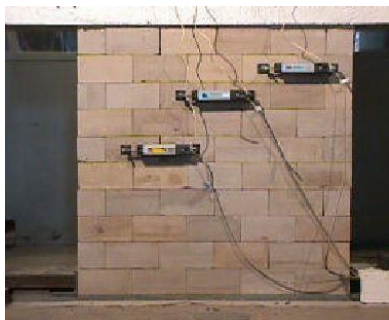
جدول (۱) میزان تنش‌ها و بارهای قائم برای دیوارهای SW30، SW100، SW200 و SW250

Wall	Vertical Load (kN)	Vertical Stress (MPa)
SW30	30	0.15
SW100	100	0.50
SW200	200	1.00
SW250	250	1.25

Table 1. Stress and corresponding vertical load values for SW30, SW100, SW200, SW250 walls

دیوارها از ده ردیف سنگی، به صورت خشکه‌چینی تشکیل شده‌اند. هر یک از بلوک‌های سنگی با سطح مقطع  $۰/۲۰ \times ۰/۲۰$  متر و ارتفاع  $۰/۱$  متر دیواری با ابعاد  $۱ \times ۱ \times ۰/۲$  m را تشکیل می‌دهند. همچنین بین سطح فوقانی دیوار و تیر بتونی روی آن به ابعاد  $۱/۶ \times ۰/۲۰ \times ۰/۲۰$  تماس خوبی وجود دارد. ابتدا یک بار فشاری عمودی به وسیله‌ی محرک هیدرولیکی، درحالی‌که نیرو کنترل می‌شود، اعمال شده تا جایی‌که بار مورد انتظار کاملاً به دیوار وارد شود. سپس بار افقی به تدریج به تیر بتنی وارد می‌شود. در حین آزمایش وقایع اصلی مثل باز شدن اتصالات و ظهور شکاف‌ها به وسیله‌ی عکس ثبت شدند. در (شکل ۱) هندسه و ابعاد نمونه‌ی آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

شکل (۱) ابعاد و هندسه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی لورنسو [۱]



رفتار داخل صفحه و رفتار خارج صفحه پرداختند [۹]. محب‌خواه و همکاران با مدل کردن یک میان‌قاب مصالح بنایی در قاب فولادی، آثار بازشو روی رفتار مرکب و میان‌قاب را مطالعه کردند [۱۰]. در این مطالعه که به وسیله‌ی نرم‌افزار المان مجزای UDEC انجام گرفت، آثار انواع بازشو و محل آن روی ظرفیت باربری قاب بررسی شد. در راستای بهبود روش المان مجزا، مطالعاتی در زمینه مدل‌سازی رفتار سازه‌های مصالح بنایی به روش المان مجزا-محدود به وسیله‌ی فوکوموتو و همکاران انجام گرفته است [۱۱]. بارالدی و همکاران، به منظور دستیابی به روشی مناسب برای مدل‌سازی سازه‌های بنایی، پژوهش جامعی بر روش‌های مدل‌سازی پیوسته و مجزا انجام دادند که نتایج آن بیانگر تناسب روش المان مجزا برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی سازه‌های بنایی بوده است [۱۲].

### ۳- راستی آزمایی

هدف از این بخش، بررسی عملکرد صحیح مدل‌های استفاده شده و کنترل درستی اجرای برنامه در تحلیل و بررسی مسائل است. برای همین منظور نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی معتبر با نتایج خروجی از نرم‌افزار استفاده شده در این مطالعه، مقایسه و بررسی شد. در ابتدا یک دیوار با درزه‌ی خشک را مدل‌سازی می‌کنیم. در مدل‌سازی این دیوار از بلوک‌های تغییرشکل‌پذیر با رفتار الاستیک، و درزه‌ها با رفتار موهر-کولمب استفاده شده است. عملکرد نرم‌افزار در تخمین مکانیسم خرابی دیوارهای مصالح بنایی در قالب یک مدل دیوار تحت نشست تکیه‌گاهی بررسی شده است. با توجه به مجهول بودن مقادیر ضرایب سختی برشی ( $k_s$ ) و سختی نرمال ( $k_n$ ) درزه در برخی مثال‌ها، این مقادیر به کمک تحلیل‌های عددی متعدد و مطالعه‌ی روند همگرایی به نتایج تجربی، به دست آمده‌اند.

#### ۳-۱- دیوار سنگی تحت بار قائم و درون صفحه

در سال ۲۰۰۵، یک مطالعه تجربی در دانشگاه کاتالونیا بارسلونا با همکاری دانشگاه مینهو به منظور بررسی رفتار دیوارهای سنگی مصالح بنایی با درزه‌ی خشک صورت گرفت [۱]. این آزمایش‌ها بر روی هفت دیوار با سطوح مختلف تنش قائم از  $۰/۱۵$  تا  $۱/۲۵$  مگاپاسکال، اجرا شد. پس از اعمال بار قائم، بار افقی به صورت مونوتونیک تا مرز خرابی به دیوارها وارد شد. مقادیر بارها و

مشخصات مصالح و درزه‌های مورد استفاده در مدل 3DEC در جدول (۲) آمده است. پس از انجام تحلیل، نتایج حاصل از آزمایش و نتایج تحلیل 3DEC در دو حالت بلوک‌های صلب و تغییر شکل-پذیر بررسی و مقایسه شد. در کنار آن، نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود ارائه شده در مرجع مربوطه نیز برای مقایسه ارائه می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، هماهنگی بین پاسخ‌های عددی، تجربی و نتایج حاصل از برنامه‌ی 3DEC، رضایت بخش است. مشاهده‌ی نمودار بار افقی در برابر تغییر مکان بالای دیوار در (شکل-های ۳ تا ۶) برای هر چهار دیوار، و تفاوت‌های بین بارهای فروریزش در جدول (۴) بیان‌گر این مطلب است.

جدول (۲) مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل عددی بلوک‌ها

Walls SW30, SW100, SW200, SW250	
Specific Weight (tonf/m <sup>3</sup> )	2.5
Bulk Modulus (kN/m <sup>2</sup> )	8.61E6
Young's Modulus (kN/m <sup>2</sup> )	1.55E7
Shear Modulus (kN/m <sup>2</sup> )	6.45E6
Poisson's Ratio	0.2
Foundation and Loading Beam	
Specific Weight (tonf/m <sup>3</sup> )	2.5
Bulk Modulus (kN/m <sup>2</sup> )	1.75E7
Young's Modulus (kN/m <sup>2</sup> )	3.15E7
Shear Modulus (kN/m <sup>2</sup> )	1.31E7
Poisson's Ratio	0.2

Table 2. Material properties used for blocks in numerical model

جدول (۳) مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل عددی درزه‌ها

Shear Stiffness (kN/m <sup>3</sup> )	2.45E6
Normal Stiffness (kN/m <sup>3</sup> )	5.87E6
Friction Angle (Degree)	31.8
Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	0
Dilation Angle (Degree)	0

Table 3. Material properties used for joints in numerical model

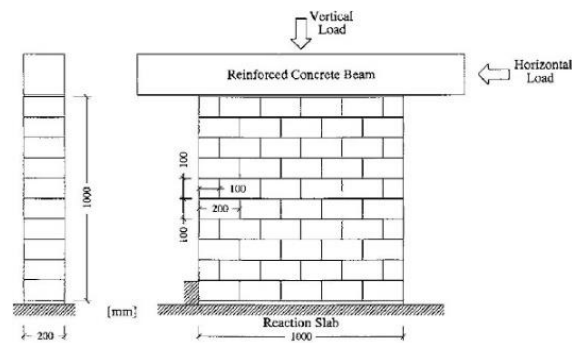


Fig. 1. Adopted geometry for the dry stone masonry walls and schematic loading arrangement [1]

در ادامه بررسی مدل‌های آزمایشگاهی در مطالعه مرجع، تحلیل‌های عددی با استفاده از مدل شکست مشترک چند سطحی [۱] و روش اجزا محدود اجرا شدند. در این روش فرض بر این است که رفتار غیرالاستیک روی درزه‌ها متمرکز شده، و واحدهای سنگی به صورت الاستیک رفتار می‌کنند. برای بررسی رفتار این دیوار یک مدل در 3DEC ایجاد شد که هندسه‌ی آن در (شکل ۲) قابل مشاهده است. قابل گفتن است به علت مدول الاستیسیته‌ی بالای مصالح سنگی و تمرکز خرابی دیوار در درزه‌ها، در مدل‌سازی مرحله‌ی اول، المان‌های مصالح به صورت صلب فرض شده‌اند. سپس یک بار دیگر مدل‌سازی با بلوک‌های تغییر شکل‌پذیر و الاستیک انجام گرفت و نتایج با هم مقایسه شدند. در مدل‌سازی سعی شده است تا شرایط مرزی مدل شبیه شرایط آزمایشگاهی ایجاد شود.

شکل (۲) هندسه‌ی بلوک‌ها و درزه‌های ساخته شده در مدل عددی

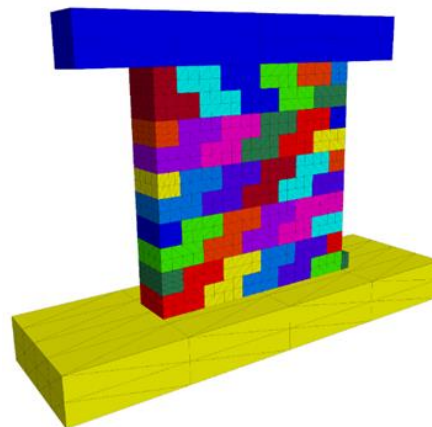


Fig. 2. Blocks and joints in numerical model

جدول (۴) نتایج مقاومت نهایی مدل آزمایشگاهی و تحلیل عددی

Failure Load (kN)					Wall
Failure Load Ratio (Rigid Blocks)	Failure Load Ratio (Deformable Blocks)	3DEC (Deformable Blocks)	3DEC (Rigid Blocks)	Experimental Results	
0.74	0.82	18.3	16.6	22.4	SW30
1.08	1.05	47.1	48.4	45.0	SW100
1.28	1.10	77.6	89.9	70.3	SW200
1.06	-	-	109.0	102.7	SW250

Table 4. Wall ultimate strength for experimental specimen and numerical method

در پاسخ سازه، با شروع جابه‌جایی دیوار، به علت خشک بودن سیستم و نبود ملات ساز و کار غیرخطی فعال می‌شود. در نتایج آزمایشگاهی نمونه اول و دوم نیز لرزش‌ها و ارتعاشاتی دیده می‌شود که ناشی از لغزش ناگهانی و عدم وجود ملات بین مصالح است. فقدان ملات بین بلوک‌ها، تنش را در نقاط تماس متمرکز می‌کند، و این منجر به شکاف عمودی نابه‌هنگام در واحدهای بنایی می‌شود، که منجر به افت ناگهانی و اختلاف نمودار آزمایشگاهی نمونه اول و دوم شده است. در نمونه‌های با تنش سربار بالاتر، خطر کماتش با یک ترک مورب کامل، نسبت به نمونه‌های با تنش کمتر وجود دارد، که همانطور که در نمودار SW250 مشاهده شد، نتایج نمونه دوم به علت کماتش و خرابی، قبل از رسیدن به حد خرابی از نتایج کنار گذاشته شده است. این الگوی خرابی در آزمایش‌ها به ثبت رسیده است. مدل برنامه‌ی 3DEC نیز در (شکل ۷) این سازوکار را به خوبی نشان می‌دهد؛ اما در کل رفتار شکل‌پذیری مشاهده شد که نشان‌گر خرابی در مودهای گهواره‌ای و برش ملات است. در بارهای قائم کمتر، دیوار تمایل به بازشدگی و چرخش ساده‌ی نیمه‌ی دیوار داشت و خرابی کمی در مصالح سنگی ایجاد شد؛ اما با افزایش بار قائم، نمونه‌ها دچار تغییرشکل و خرابی بیشتری در مصالح سنگی (بلوک‌ها) شدند و مود خرابی خردشدگی پاشنه در کنار گسیختگی برشی نمایان شد.

با توجه به (شکل ۷) می‌توان گفت که 3DEC به خوبی مودهای خرابی، به ویژه در حالتی که بارهای قائم کم بوده و خرابی در درزه-

شکل (۳) نمودار بار جانبی در برابر جابه‌جایی بالای دیوار برای دیوار

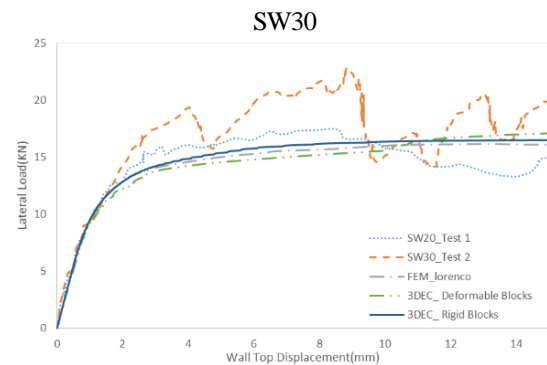


Fig. 3. Lateral load-displacement diagram for SW30 wall

شکل (۴) نمودار بار جانبی در برابر جابه‌جایی بالای دیوار برای دیوار SW100

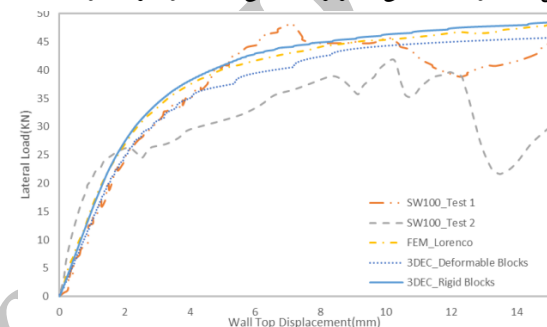


Fig. 4. Lateral load-displacement diagrams for SW100 wall

شکل (۵) نمودار بار جانبی در برابر جابه‌جایی بالای دیوار برای دیوار

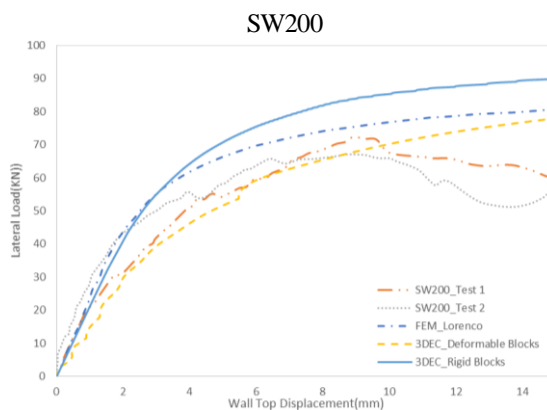


Fig. 5. Lateral load-displacement diagrams for SW200 wall

شکل (۶) نمودار بار جانبی در برابر جابه‌جایی بالای دیوار برای دیوار

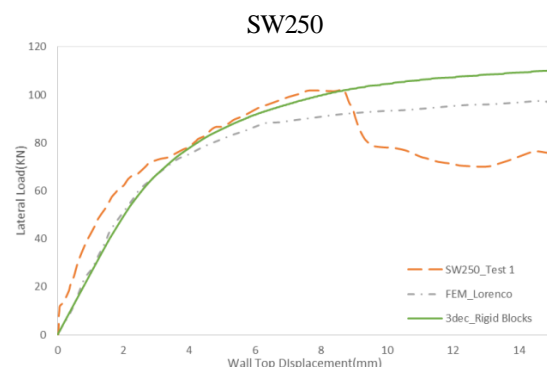


Fig. 6. Lateral load-displacement diagrams for SW250 wall

شکل (۹) مقایسه‌ی نمودار بار جانبی در برابر جابه‌جایی بالای دیوار برای دیوارهای

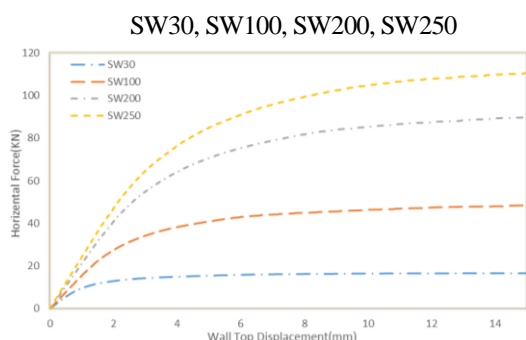


Fig. 9. Comparison of lateral load vs. wall's top displacement for walls SW30, SW100, SW200, SW250

### ۲-۳- دیوار بنایی تحت نشست تکیه‌گاهی

یکی از موارد مهم در بحث خرابی در سازه‌ها، به‌ویژه سازه‌های مصالح بنایی، سازوکار خرابی در آن‌ها است. به منظور راستی‌آزمایی روش المان مجزا در پیش‌بینی سازوکار خرابی سازه‌ها، مدل آزمایشگاهی یک دیوار بنایی قائم با درزه‌ی خشک، تحت بار وزن خود دیوار و نشست تکیه‌گاهی [۹] در نرم‌افزار مدل شد. همان‌گونه که در (شکل ۱۰) ملاحظه می‌شود، شرایط مرزی در همه جای دیوار آزاد است، مگر در پایین که بدون ملات و به‌صورت خشک-چینی روی یک سطح صاف قرار گرفته است. شرایط بارگذاری به-صورتی انتخاب شد که بیان‌گر نشست تکیه‌گاهی سازه باشد. برای این منظور، یک قسمت از پی (به‌صورت مجزا) تحت نیروی جک-های هیدرولیکی در جهت قائم جابه‌جا می‌شود و این جابه‌جایی تا حد خرابی دیوار ادامه پیدا می‌کند. هیچ ملاتی بین آجرها استفاده نشده است، پس تمامی مقاومت بین آجرها ناشی از اصطکاک خواهد بود. ابعاد دیوار برابر  $1/075 \times 1 \times 0/22 \text{ m}^3$  است که متشکل از آجرهای با ابعاد  $22 \times 10/5 \times 5 \text{ cm}^3$  است. آزمایش با نشست ۱۴ یک قسمت از دیوار به پایان می‌رسد. هم‌چنین در حین آزمایش، سطوح شکست و محل‌های آن مشخص و ضبط شدند. مدل‌سازی در نرم‌افزار با فرض چسبندگی و مقاومت کششی صفر در سطح مشترک بلوک‌ها انجام گرفت. مشخصات بلوک‌ها و مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی 3DEC در جدول (۵ و ۶) آمده است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش و 3DEC در (شکل ۱۱) نشان می‌دهد که مدل‌های 3DEC قدرت بسیار مناسبی در پیش‌بینی سازوکار خرابی و آنالیز خرابی دارد.

ها متمرکز بوده، را گزارش می‌دهد و با دقت مناسب مدل خرابی سازه را بیان می‌کند. در تخمین ظرفیت نیز همان‌گونه که پیشتر گفته شد، تخمین مناسبی از ظرفیت دیوار ارایه می‌دهد. در (شکل ۸) کانتورهای تغییر مکان در مصالح و درزه‌ها نشان داده شده‌اند.

شکل (۷) مقایسه‌ی سازوکار خرابی در مدل آزمایشگاهی و عددی

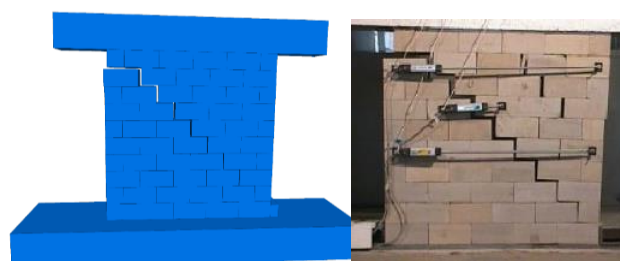


Fig. 7. Failure mechanism in experimental specimen and numerical method

شکل (۸) جابه‌جایی بلوک مدل عددی: (الف) کانتورهای جابه‌جایی (ب) بردارهای

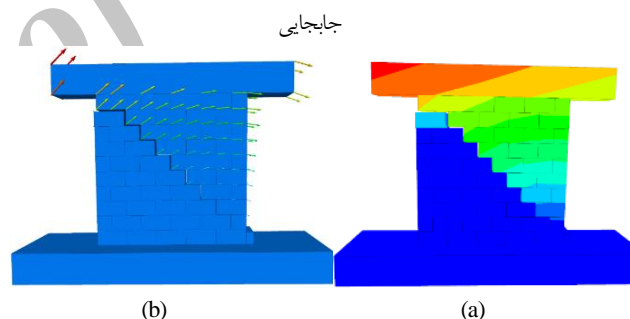


Fig. 8. Block displacement in numerical model: (a) Displacement contours (b) Displacement vectors

قابل گفتن است در حالتی که بیش‌تر خرابی دیوار معطوف به جابه‌جایی در درزه‌ها باشد (SW100 و SW30)، تغییر المان‌ها از صلب به شکل‌پذیر، در رفتار کلی سازه تغییرات خیلی زیادی ایجاد نمی‌کند.

در شکل (۹) مشاهده می‌شود که در دیوار تحت تنش‌های نرمال بالاتر، میزان سختی افزایش می‌یابد و این به‌خاطر افزایش تماس بین واحدهای بنایی است. در تأیید نتایج آزمایشگاهی مرجع برای تنش‌های قائم بالا، خطر کماتش با یک ترک مورب کامل در میان اتصال نسبت به نمونه‌های با تنش کم‌تر وجود دارد که در مدل‌های عددی نیز مشاهده شده است.

#### ۴- شناسایی لرزه اساس سیستم‌ها

شناسایی سیستم‌ها به معنی به دست آوردن پارامترهای مودال (فرکانس طبیعی، نسبت‌های میرایی و شکل‌های مودی) با استفاده از اندازه‌گیری پارامترهای رفتار دینامیکی سازه است. از پارامترهای مودال به دست آمده می‌توان در به‌روزرسانی مدل عددی سازه‌ها، تشخیص و پیدا کردن محل آسیب‌های احتمالی، و ارزیابی ایمنی سازه بعد از آسیب‌های شدید (که در اثر زلزله و یا دیگر بارگذاری‌ها به سازه وارد می‌شود) استفاده کرد. اساس روش‌های شناسایی سازه‌ها بر داده‌های اندازه‌گیری شده از تحریک ورودی و پاسخ خروجی، و استفاده از توابع پاسخ فرکانسی در حوزه‌ی فرکانس، استوار هستند. با امکان استخراج پارامترهای مودال سازه و بررسی آنها در سازه‌ی سالم در کنار سازه‌ی آسیب‌دیده، روش‌های خسارت‌سنجی لرزه‌اساس در سازه‌ها تعریف می‌شوند. این روش‌ها بر این اصل استوارند که به‌وجود آمدن آسیب در سازه، موجب تغییر در خصوصیات دینامیکی سازه (مانند فرکانس‌های طبیعی، شکل‌های مودی و نسبت‌های میرایی) می‌شود.

روش‌های مختلف تشخیص مودال در آزمایش لرزه محدود، هم در حوزه‌ی زمان و هم در حوزه‌ی فرکانس وجود دارد که محبوب‌ترین آن‌ها عبارتند از: تجزیه حوزه‌ی فرکانس و برداشت نقاط اوج. روش برداشت نقاط اوج از چگالی طیفی توان، یک روش مبتنی بر حوزه‌ی فرکانس است و به دلیل قدمت آن حائز اهمیت می‌باشد. اولین روش، تشخیص سازه‌ی مودال خروجی-تنها<sup>۴</sup> است که در اواخر دهه‌ی ۷۰ ارائه شد که به سبب سادگی استفاده از آن، محبوب گردید. روش تجزیه‌ی مقادیر تکین<sup>۵</sup>، ادامه‌ی روش برداشت نقاط اوج است. در مقایسه با روش برداشت نقاط اوج، این روش با فرکانس‌ها در مودهای نزدیک بهتر کار می‌کند. به علاوه در مقایسه با سایر روش‌ها، این روش درک بهتری از کاربر را درباره‌ی داده‌هایی که با آن کار می‌کند، در حوزه‌ی فرکانس به دست می‌دهد.

#### ۴-۱- تشخیص سازه‌ای در نرم‌افزار المان مجزا

همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، استخراج پارامترهای مودال سازه براساس ویژگی‌های دینامیکی آن‌ها، یک قدم اصلی در تشخیص

شکل (۱۰) مدل عددی و آزمایشگاهی دیوار

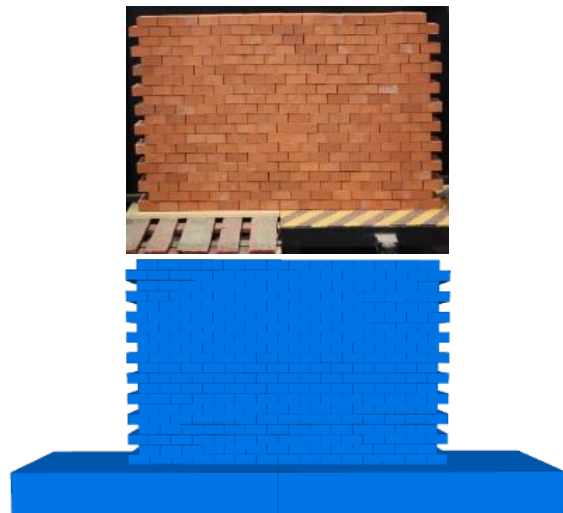


Fig. 10. Experimental and numerical model of the wall

جدول (۵) مشخصات بلوک‌های استفاده شده در مدل دیوار

Specific Weight (tonf/m <sup>3</sup> )	2.2
Poisson's Ratio	0.2

Table 5. Material properties used for blocks in numerical model of the wall

جدول (۶) مشخصات درزه‌های مورد استفاده در مدل

Shear Stiffness (kN/m <sup>3</sup> )	0.82E7
Normal Stiffness (kN/m <sup>3</sup> )	1.96E7
Friction Angle (Degree)	38

Table 6. Material properties used for joints in numerical model

شکل (۱۱) مقایسه سازوکار خرابی دیوار تحت نشست تکیه‌گاهی در مدل عددی و آزمایشگاهی

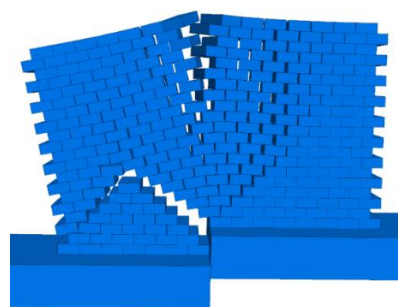


Fig. 11. Failure mode of experimental and numerical model for the wall subjected to support settlement

4. Out-put only modal identification

5. Singular Value Decomposition (SVD)

گفتن است رفتار الاستیک درزه‌ها در 3DEC با سختی برشی ( $K_s$ ) و سختی نرمال ( $K_n$ ) کنترل می‌شود.

برای انجام تشخیص سازه‌ای با این روش در مطالعات آزمایشگاهی، در بیشتر موارد از تحریک ضربه‌ی چکش استفاده می‌شود. در مقایسه‌ای که راموس و همکاران [۱۴] روی تشخیص سازه‌ای یک دیوار بنایی انجام دادند، تحریک ضربه جواب بسیار بهتری از تحریک ارتعاشات محیطی داده است، و بنابراین ضربه برای تحریک سازه انتخاب شد. مسأله‌ی بعدی، انتخاب بزرگی و جهت ضربه بود. اندازه‌ی ضربه باید نسبتاً ضعیف باشد تا سازه تغییر شکل بزرگ ندهد و ارتعاش آن باعث تغییر شکل پلاستیک در سازه نشود. برای بزرگی اندازه‌ی ضربه، ۵۰ نیوتن انتخاب شد. برای انتخاب جهت ضربه، تحلیل‌های متفاوتی با انواع ضربه به صورت شکل (۱۲) بررسی شد که ضربه در راستای قطر دیوار به بهترین شکل همه‌ی موده‌های داخل صفحه، خارج صفحه و پیچشی را تحریک می‌کرد. بنابراین ضربه در راستای قطر دیوار برای تحریک سازه انتخاب و پس از تحریک سازه، پاسخ آن در ۱۰ نقطه به مدت یک ثانیه در جهت خارج صفحه و داخل صفحه (جهت‌های Z و X)، ثبت شد. نقاط ثبت پاسخ سازه در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

سپس فرکانس‌های طبیعی سازه به وسیله‌ی روش برداشت نقاط اوج استخراج شدند. در روش برداشت نقاط اوج، با تبدیل فوریه‌ی داده‌ها از حوزه‌ی زمان به حوزه‌ی فرکانس، مقادیر فرکانس‌های طبیعی را با انتخاب کردن نقاط اوج از طیف فوریه می‌توان بدست آورد.

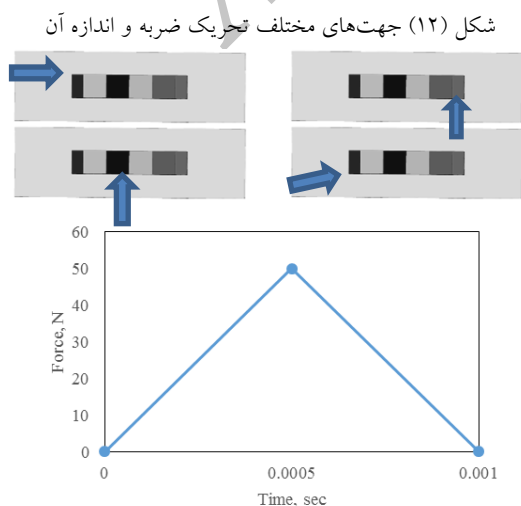


Fig. 12. Impact excitation directions and magnitudes

خسارت سازه‌ها است. به علت پیچیده بودن ماهیت و رفتار سازه‌های مصالح بنایی، به ویژه سازه‌های آسیب دیده، این مسئله شکل پیچیده‌تری نیز به خود می‌گیرد. در حالت کلی، برخلاف بیشتر نرم‌افزارهای اجزای محدود، نرم‌افزارهای المان مجزا ویژگی‌های دینامیکی سازه مثل فرکانس و شکل مود را به صورت مستقیم نمی‌دهند. با توجه به این که این ویژگی‌ها برای سلامت‌سنجی سازه مورد نیاز است، هدف این بخش، ارائه‌ی یک روش برای ارزیابی شاخص‌های دینامیکی سازه‌ی مصالح بنایی (فرکانس و شکل مود) در نرم‌افزار 3DEC است. بحث شناسایی سازه در نرم‌افزارهای المان مجزا، تنها یک‌بار به وسیله‌ی بوئی و همکاران [۱۳] برای حالت‌های ساده انجام شده است. بنابراین، هدف اول، بررسی توانایی نرم‌افزار برای تشخیص سازه‌ی به صورت مناسب است. برای این منظور، در نرم‌افزار، یک دیوار بنایی مدل شده، و با روش پیشنهادی، فرکانس و شکل مود آن‌ها محاسبه شده و با مدل عددی یک‌پارچه ساخته شدن در یک نرم‌افزار المان محدود مقایسه می‌شود.

#### ۲-۴- روش پیشنهادی

برای شناسایی سازه در محیط نرم‌افزار 3DEC روندی مشابه به مراحل شناسایی سازه در آزمایشگاه انجام شد. بدین صورت که با تحریک سازه به صورت مناسب (از جهت اندازه و راستا) پاسخ سازه در نقاط معینی برداشت شد. سپس با آنالیز پاسخ برداشته شده در حوزه‌ی فرکانس و استفاده از روش‌های تشخیص سازه‌ی مانند تجزیه در حوزه زمان و برداشت نقاط اوج، فرکانس‌ها و شکل مودها استخراج شدند. در ادامه، روش استفاده شده و نیز راستی آزمایی آن برای دیوار نمونه SW30 آورده شده است.

برای بررسی توانایی روش گفته شده در تعیین فرکانس‌ها و شکل موده‌های سازه، یک آنالیز مودال در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS برای مقایسه انجام شد. برای این منظور، یک دیوار مشخص (SW30) در آباکوس به صورت یک‌پارچه مدل شد. نرم‌افزار مزبور مقادیر بردار ویژه‌ی سازه را به دست می‌آورد. در مدل ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس، از المان‌های C3D8R استفاده، و سازه در محدوده‌ی رفتار الاستیک خود تحلیل شد. در کنار حل المان محدود، همان دیوار در 3DEC با فرض محیط ناپیوسته و ریزمدل‌سازی، پیاده‌سازی شد. بلوک‌ها به صورت تغییر شکل‌پذیر و الاستیک و درزه‌ها در محدوده‌ی رفتار الاستیک تعریف شدند. قابل



جدول (۷) مقایسه فرکانس‌های حاصل از تکنیک برداشت اوج و

روش المان محدود

Error (%)	DEM	FEM	
7	76.75	71.69	Mode 1
4	164.24	170.27	Mode 2
3	254	247.06	Mode 3
1	391	393.33	Mode 4
5	488	513.67	Mode 5
2	540	551.81	Mode 6

Table 7. Frequencies extracted by pick picking method and FEM

شکل (۱۵) مقایسه‌ی شکل مودهای حاصل از تحلیل روش تجزیه در

حوزه‌ی زمان و آباکوس

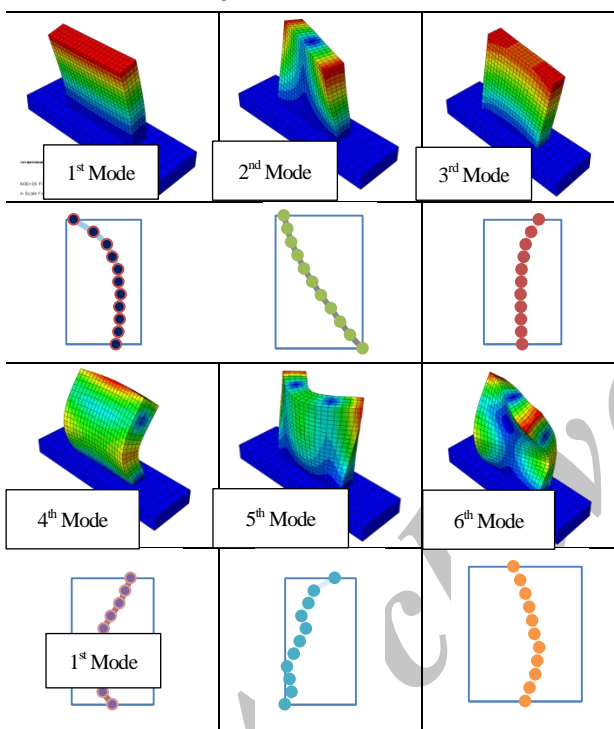


Fig. 15. Modeshapes extracted from FDD and FEM

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی به ویژه در شکل مودهای اولیه، بین شکل مودها حاصل از تحلیل آباکوس و روش تجزیه در حوزه‌ی فرکانس وجود دارد.

## ۵- بررسی پارامترهای مودال در سطوح خسارت مختلف

در بخش‌های قبل به بررسی کارایی روش المان مجزا در مدل‌سازی رفتار سازه‌های مصالح بنایی و استخراج پارامترهای مودال سازه پرداخته شد. در این بخش، هدف آن است تا با بررسی مدل‌هایی ساده از سازه‌های بنایی، رابطه‌ای میان پارامترهای مودال سازه

شکل (۱۳) نقاط برداشت پاسخ سازه بعد از تحریک ضربه

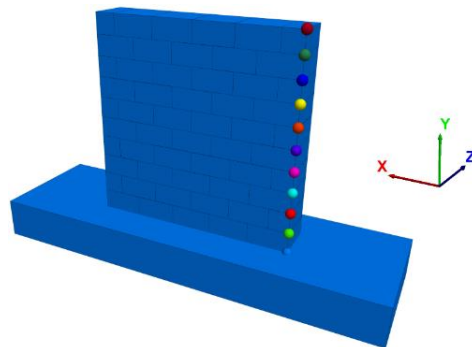


Fig. 13. Measurement points of wall response from impact excitation

در شکل (۱۴) طیف توان فوریه‌ی حاصل از ارتعاشات در جهت داخل و خارج صفحه مشاهده می‌شود. نقاط متناظر با شش مود اول سازه انتخاب شدند. در جدول (۷) مقادیر فرکانس‌های حاصل از مدل‌سازی به روش المان مجزا و المان محدود مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود روش پیشنهادی دقت قابل‌قبولی در تخمین فرکانس‌های طبیعی سازه دارد.

برای به‌دست آوردن شکل مودهای سازه از روش تجزیه در حوزه‌ی زمان استفاده شد [۱۵]. در شکل (۱۵)، شش مود اول حاصل از تحلیل فرکانسی در آباکوس و روش تجزیه در حوزه‌ی زمان مقایسه شده‌اند.

شکل (۱۴) طیف فوریه‌ی حاصل از تحریک سازه (الف) در جهت خارج صفحه و (ب) در جهت درون صفحه

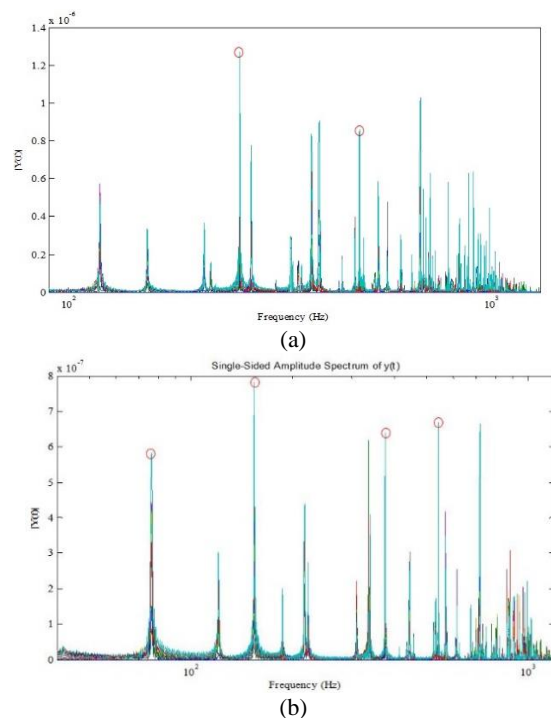


Fig. 14. Fourier spectrum from impact excitation of the structure: (a) out of plane impact, and (b) in-plane impact

شدیدی را تجربه می‌کند. با بازشدگی ترک، این افت فرکانس تا جابه‌جایی حدود ۶ تا ۸ میلی‌متر ادامه پیدا می‌کند. در پایان، با بازشدگی و خرابی دیوار، کاهش فرکانس در سازه شیب ملایم‌تری پیدا می‌کند.

شکل (۱۶) تغییرات فرکانس ۴ مود اول در سطوح خسارت مختلف برای دیوار با نسبت ابعادی ۱

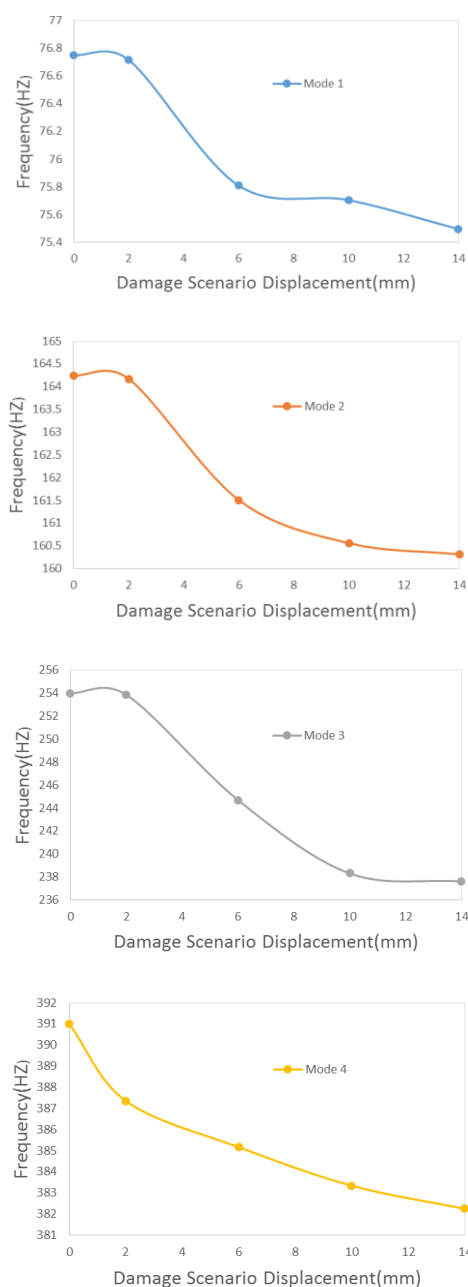


Fig. 16. Frequency-Damage scenario displacement diagrams of the first 4 modes for wall with  $H/B=1$

برای بررسی بیش‌تر تغییرات فرکانس و امکان تشخیص خسارت از روی تغییرات آن، نمودار درصد تغییرات فرکانس در هر

فرکانس طبیعی) و سطوح مختلف خسارت برقرار کنیم. برای این منظور، دیوار SW30 به عنوان نمونه انتخاب شد. در این راستا، جابه‌جایی نقطه‌ی بالای دیوار (به‌عنوان شاخص سطح خسارت) و فرکانس‌های طبیعی (به‌عنوان شاخص دینامیکی موردنظر) را انتخاب کردیم. روش کار به این گونه است که سازه را به صورت استاتیکی تا سطح خرابی (جابه‌جایی) مورد نظر بارگذاری کردیم. سپس در هر مرحله از بارگذاری، پارامترهای مودال سازه را استخراج کردیم. جابه‌جایی متناظر با سطوح خرابی اول، دوم، سوم و چهارم برابر ۲، ۴، ۱۰ و ۱۴ میلی‌متر انتخاب شدند. نتایج تحلیل‌ها در جدول (۸) آمده است.

جدول (۸) روند تغییرات فرکانس درمقابل سطوح خسارت دیوار

Mode Number	0 mm	2 mm	6 mm	10 mm	14 mm
1	22.00	21.99	21.73	21.70	21.64
2	46.82	46.80	46.04	45.77	45.70
3	54.05	54.02	52.07	50.71	50.56
4	107.20	106.20	105.60	105.10	104.80
5	107.80	107.70	106.20	105.50	105.20
6	122.30	122.00	120.80	120.40	120.10

Table 8. Frequency variation in different damage states of wall

در ادامه تغییرات فرکانس را برای چهار مود اول به صورت مجزا در شکل (۱۶) بررسی می‌کنیم. شروع باز شدن ترک قطری قابل رؤیت در جابه‌جایی حدود ۲/۵ میلی‌متر مشاهده شد. متناظر با جابه‌جایی حدود ۲/۵ میلی‌متر، فرکانس‌های سازه در چهار مود اول (تا جابه‌جایی ۲ میلی‌متر) تقریباً خط صاف و ثابت بوده و از ۴ تا حدود ۸ میلی‌متر با یک افت ناگهانی کاهش پیدا می‌کند.

روند شبه سه‌خطی مشاهده شده، ناشی از نوع رفتار غیرخطی سازه است که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود. در سطوح خسارت اولیه (بین صفر تا ۲ میلی‌متر جابه‌جایی)، افت فرکانس کوچکی در سازه مشاهده می‌شود که دلیل آن رفتار سازه و سطوح تماس در محدوده‌ی خطی است. در این محدوده، رشد ترک در سازه بسیار کم بوده و قابل مشاهده نیست. با ایجاد خسارت بیشتر در سازه و فعال شدن سازوکار غیرخطی رفتار سازه به ویژه در سطوح تماس (متناظر با ظهور ترک قطری)، سازه کاهش سختی و افت فرکانس

۰/۱۵ مگاپاسکال در دیوار SW30 به ۱/۲۵ مگاپاسکال در دیوار SW250، بار خرابی دیوار از ۲۲/۴ کیلونیوتن به ۱۰۲/۷ کیلونیوتن افزایش یافت. سپس دقت تشخیص سازوکار خرابی در حالت نشست تکیه‌گاهی یک نمونه دیوار بررسی و نتایج قابل قبولی مشاهده شد. در ادامه با توجه به عدم وجود ماژول تحلیل مودال در نرم‌افزار 3DEC، با ارایه‌ی روش شبیه‌سازی فرآیند آزمایشگاهی تشخیص خسارت سازه‌ای در نرم‌افزار 3DEC دقت این روش در تخمین فرکانس‌های اصلی سازه و شکل مودهای سازه بررسی شد. با بررسی انواع تحریک، ضربه در جهت قطر دیوار بهترین نتایج را برای استخراج فرکانس اصلی سازه ارایه کرد، که دلیل آن، تحریک مناسب مودهای داخل و خارج صفحه به‌صورت هم‌زمان بود. با بررسی شکل مودها و فرکانس‌های حاصل از روش برداشت نقاط اوج با نمونه‌ی مشابه در نرم‌افزار آباکوس، بیش‌ترین خطای مشاهده شده در تخمین فرکانس‌ها برابر ۷ درصد در مود اول و کمترین مقدار برابر ۱ درصد در مود چهارم بود، که نشان‌گر کارایی مناسب این روش می‌باشد. با این وجود در مودهای بالاتر به دلیل اغتشاش ناشی از ارتعاش، انتخاب فرکانس‌های اصلی مشکل است.

در ادامه، به منظور برقراری رابطه بین تغییر مکان بالای دیوار (به عنوان شاخص خسارت) و فرکانس سازه (به عنوان شاخص رفتار دینامیکی)، سطوح خسارت مختلفی به‌صورت استاتیکی متناظر با ۲، ۴، ۱۰ و ۱۴ میلی‌متر در سازه ایجاد، و در هر مرحله فرکانس‌های اصلی سازه استخراج شد. با بررسی نمودارهای تغییرات فرکانس در برابر سطوح خرابی، مشاهده شد که می‌توان نمودارها را با یک نمودار شبیه سه‌خطی ساده‌سازی کرد. همچنین شروع افت شدید فرکانس در سازه متناظر با بازشدگی ترک قطری اندکی بعد از جابه‌جایی متناظر سطح خسارت اول (۲ میلی‌متر)، همراه می‌شود. با توجه به شکل (۱۶) قابل گفتن است در سطح خسارت سوم (۱۰ میلی‌متر) بیشتر ظرفیت غیر خطی دیوار بسیج شده است و پس از آن افت فرکانس با شیب کمتری رخ می‌دهد. در نمودار همچنین مشاهده شد که درصد افت فرکانس نسبت به سطوح خرابی قبلی در مودهای داخل صفحه با شدت بیش‌تری رخ می‌دهد، که این امر به علت اثر مضاعف ترک قطری روی ارتعاش داخل صفحه نسبت به رفتار خارج صفحه است.

سطح نسبت به سطح قبل آن در شکل (۱۷) ارائه شده است. می‌توان دید که در مود سوم (داخل صفحه)، تغییرات فرکانس نسبت به مودهای خارج صفحه به مراتب بیشتر است. این امر به دلیل سازوکار خرابی غالب دیوار است؛ چرا که با شکست برشی ملات، میزان بازشدگی اثر بیشتری روی حرکات داخل صفحه دارد. در جابه‌جایی حدود ۶ میلی‌متر، نقاط اوجی در نمودار مشاهده می‌شود که معادل بیشترین نرخ کاهش سختی سازه در این سطح از خرابی است.

به‌طور کلی می‌توان گفت هم‌بستگی بین تغییرات ۳ تا ۴ مود در یک سطح خسارت می‌تواند بیان‌گر تغییرات در ویژگی‌های مودال و وقوع خسارت باشد.

شکل (۱۷) تغییرات فرکانس در سطوح خسارت مختلف نسبت به سطح خسارت قبل برای دیوار با نسبت ابعادی ۱

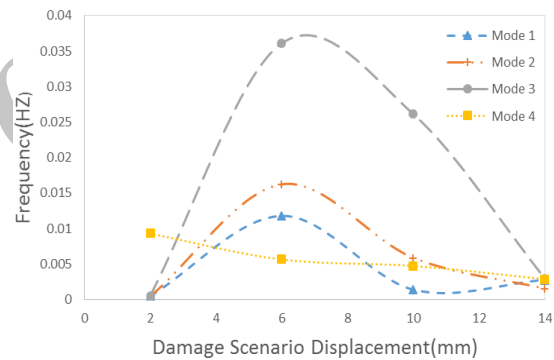


Fig. 17. Frequency-Damage scenario displacement diagram for wall with H/B=1

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، در ابتدا سعی بر آن شد تا با توجه به ناهمگن بودن سازه‌های مصالح بنایی، روشی برای مدل‌سازی دقیق آن‌ها شناسایی و بررسی شود. برای این منظور، کارایی روش المان مجزا برای دو هدف بررسی رفتار منحنی بار- تغییر مکان و سازوکار خرابی مورد مطالعه قرار گرفت. با این هدف، یک دیوار با درزه‌ی خشک و رفتار الاستیک مدل‌سازی شد که تخمین رفتار سازه با توجه به نتایج آزمایشگاهی قابل قبول بود. در این دیوار، با افزایش سر بار اولیه (ثابت)، مود خرابی به خردشدگی پاشنه متمایل شد که با بررسی تنش‌ها در حالت بلوک‌های الاستیک و بلوک‌های صلب، قابل مشاهده بود. همچنین مشاهده شد با افزایش تنش سربار دیوار از

## ۷- مراجع

## References

European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2014. 18(10): p. 1118-1129.

[14] Ramos, L., et al. Dynamic monitoring of historical masonry structures for damage identification. in Proc. 26th International Modal Analysis Conference, Orlando, Fl, USA. 2008.

[15] Brincker, R., L. Zhang, and P. Andersen, Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. Smart materials and structures, 2001. 10(3): p. 441.

[1] Lourenço, P.B., et al., Dry joint stone masonry walls subjected to in-plane combined loading. Journal of Structural Engineering, 2005. 131(11): p. 1665-1673.

[2] Ramos, L.F., et al., Dynamic structural health monitoring of Saint Torcato church. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013. 35(1): p. 1-15.

[3] Lemos, J.V., Discrete element modeling of masonry structures. International Journal of Architectural Heritage, 2007. 1(2): p. 190-213.

[4] Carpinteri, A., S. Invernizzi, and G. Lacidogna, In situ damage assessment and nonlinear modelling of a historical masonry tower. Engineering Structures, 2005. 27(3): p. 387-395.

[5] Ramos, L.F., et al. Damage identification in masonry structures with vibration measurements. in Structural Analysis of Historic Construction: Preserving Safety and Significance, Two Volume Set: Proceedings of the VI International Conference on Structural Analysis of Historic Construction, SAHC08, 2-4 July 2008, Bath, United Kingdom. 2008. CRC Press.

[6] Michel, C., et al., Quantification of fundamental frequency drop for unreinforced masonry buildings from dynamic tests. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011. 40(11): p. 1283-1296.

[7] Osmancikli, G., et al., Investigation of restoration effects on the dynamic characteristics of the Hagia Sophia bell-tower by ambient vibration test. Construction and Building Materials, 2012. 29: p. 564-572.

[8] Restrepo Vélez, L.F., G. Magenes, and M.C. Griffith, Dry stone masonry walls in bending—Part I: Static tests. International Journal of Architectural Heritage, 2014. 8(1): p. 1-28.

[9] Bui, T.T. and A. Limam, Masonry Walls under Membrane or Bending Loading Cases: Experiments and Discrete Element Analysis. Civil-Comp Press, 2012: p. Paper 119.

[10] Mohebkah, A., A. Tasnimi, and H. Moghadam, Nonlinear analysis of masonry-infilled steel frames with openings using discrete element method. Journal of constructional steel research, 2008. 64(12): p. 1463-1472.

[11] Fukumoto, Y., Yoshida, J., Sakaguchi, H., Murakami, A., The effects of block shape on the seismic behavior of dry-stone masonry retaining walls: A numerical investigation by discrete element modeling. Soils and Foundations, 2014. 54(6): p. 1117-1126.

[12] Baraldi, D., A. Cecchi, and A. Tralli, Continuous and discrete models for masonry like material: A critical comparative study. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2015. 50: p. 39-58.

[13] Bui, T., A. Limam, and Q. Bui, Characterisation of vibration and damage in masonry structures: experimental and numerical analysis.

# Vibration-Based Damage Identification of Masonry Walls Using Distinct Element Modeling

N. Maddahi<sup>1</sup>, N. Khaji<sup>2\*</sup>

1- M.Sc., Earthquake Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

2- Prof., Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

\* [nkhaji@modares.ac.ir](mailto:nkhaji@modares.ac.ir) (N. Khaji)

## Abstract

Dry-joint construction method is among the oldest techniques adopted in most of the ancient and historical masonry buildings. Historical structures constructed using this method are highly vulnerable today. In addition, the strength of mortar is strongly affected –in most cases- by the passage of time and corrosion. Thus, the structure behavior would most likely be dependent on the dry-joint characteristics. Therefore, non-destructive dynamic-based methods are attractive tools to assess the existing damages of masonry walls, as they are capable of capturing the global structural behavior. In this paper, micro-modeling approach is adopted for the evaluation of masonry walls. The approach is based on the application of Distinct Element Method (DEM) as assemblies of units consist of block and mortar. Idealization of discontinuous nature governing the nonlinear mechanical behavior of the mentioned units is considered through the modeling approach. Due to the heterogeneous and complex behavior of the interface between blocks and mortar, DEM seems to be the best-adapted approach for modeling this kind of structures, in particular for reproducing complex nonlinear post-elastic behavior. At the first step, micro-modeling strategy is used for masonry walls by DEM, and particularly post-elastic behavior is verified with valid experimental data. However, DEM does not directly obtain natural frequencies and mode shapes of the wall via a classic vibrational analysis. Therefore, the second objective of this study is to propose a technique to indirectly identify dynamic characteristics of masonry walls using DEM. The aim of this part is to check the capability of dynamic identification procedure, in the extraction of the dynamic characteristics of the masonry wall in the used DEM software. For this purpose, the dynamic behavior at low vibration levels of an existing masonry building subjected to forced hammer impact test, was investigated. By transforming the collected data of the dynamic response of wall from time domain to frequency domain -using Fast Fourier Transform (FFT)- natural frequencies can be found from Fourier amplitude spectrum. The proposed technique is then validated by comparison with the results of modal analysis which was carried out using Finite Element Method (FEM). The dynamic characteristics of walls (i.e., natural frequencies and mode shapes) may change when different levels of damage are induced to the wall. The proper knowledge of these variations is a key issue in order to study the seismic demand and seismic performance of structures. Aiming at finding adequate correspondence between dynamic behavior and internal crack growth, several numerical simulations are performed; progressive damage is induced in the wall; and sequential structural frequency identification analysis is then performed at each damage stage. In this paper, frequency and drift are selected as dynamic behavior and crack growth indices, respectively. Quantifying the relative frequency drop shows that although the shape does not vary significantly with increasing damage, there is a relation between frequency drop and damage variations -based on analyzed data. These properties are firstly modified in the elastic range, and then are developed in the inelastic range with increasing damages. It is also observed that while the failure mode of the wall is the diagonal cracking, the in-plane vibration mode shapes are much affected by the initiation of crack. On the other hand, modal properties of out-of-plane mode shapes are affected less by the diagonal crack.

**Keywords:** Damage identification, masonry walls, distinct element method, frequency drop