

بررسی روش المان مجزا در مدل سازی رفتار غیر خطی سازه های مصالح بنایی

نوید مداحی

کارشناس ارشد مهندسی عمران-زلزله، دانشگاه تربیت مدرس

navid.maddahi@modares.ac.ir

ناصر خاجی

استاد مهندسی عمران-زلزله، دانشگاه تربیت مدرس

nkhaji@modares.ac.ir

چکیده

به علت این که سازه ی بنایی یک ساختار مرکب دارد، در برابر بارگذاری رفتار کاملاً پیچیده مخصوصاً در محدوده ی غیرخطی از خود نشان می دهد. تحقیقات بسیار زیادی بر روی رفتار سازه های مصالح بنایی با استفاده از روش المان محدود، تاکنون انجام شده است. با پیشرفت روش های عددی، روش المان مجزا که روش مناسبی برای مدل سازی این گونه سازه ها، که در ماهیت به صورت مرکب و ناپیوسته هستند، در اختیار محققین قرار گرفت، هر چند هنوز صحت سنجی سازه های مصالح بنایی با روش المان مجزا از چالش های پیش رو است. با توجه به ناهمگنی و پیچیدگی رفتار سازه های بنایی که اکثراً ناشی از رفتار غیرخطی سطوح تماس می باشد، مدل سازی دقیق آن ها امری چالش برانگیز است. نظر به ماهیت ناپیوسته و مرکب سازه های مصالح بنایی، مدل سازی به روش المان مجزا یکی از روش های مناسب برای مدل سازی این گونه سازه ها، مخصوصاً رفتار غیرخطی آن ها می باشد. هدف از این مطالعه، بررسی عملکرد مدل سازی به روش المان مجزا در تحلیل و بررسی رفتار غیرخطی سازه مصالح بنایی می باشد. برای همین منظور نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی معتبر با نتایج خروجی از نرم افزار استفاده شده در این مطالعه مقایسه می شود. در ابتدا به بررسی رفتار یک درزه ی ساده با رفتار موهر- کولمب می پردازیم و پس از کسب نتایج قابل قبول یک دیوار با درزه ی خشک را مدل سازی می کنیم. در مدل سازی این دیوار از بلوک های تغییر شکل پذیر با رفتار الاستیک و درزه ها با رفتار موهر- کولمب استفاده شده است. سپس به منظور بررسی رفتار چسبندگی مدل موهر- کولمب برای مصالح، مثال دیگری با ویژگی درزه های چسبنده و بلوک های تغییر شکل پذیر مدل سازی شده است. با توجه به مجهول بودن مقادیر ضرایب سختی برشی و سختی نرمال درزه در برخی مثال ها، این مقادیر به کمک تحلیل های عددی متعدد و مطالعه ی روند همگرایی در دسترسی به نتایج تجربی به دست آمده اند.

واژگان کلیدی: مصالح بنایی، رفتار غیر خطی، روش المان مجزا

۱- مقدمه

استفاده از مصالح بنایی در اجرای ساختمان‌ها از قرون گذشته در ایران و سایر نقاط جهان رواج داشته است. با تولد مصالح فولادی و بتنی به عنوان عناصر اصلی سازه‌ای، استفاده از مصالح بنایی سنتی در ساختمان‌ها با اهمیت ویژه، در شهرهای بزرگ رو به کاهش نهاد. با وجود این هنوز هم در بسیاری از شهرها و اکثر 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 لرزه-خیز، نمی‌توان مطالعه‌ی رفتار و بررسی عملکرد و خسارت در این نوع ساختمان‌ها را بی اهمیت 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.

به علت این‌که سازه‌ی بنایی یک ساختار مرکب دارد، در برابر بارگذاری رفتار کاملاً پیچیده مخصوصاً در محدوده‌ی غیرخطی از خود نشان می‌دهد. تحقیقات 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 (Lourenço, Oliveira, Roca, & Orduña, 2005) و راموس (Ramos, Aguilár, Lourenço, & Moreira, 2013) اشاره کرد. با پیشرفت روش‌های عددی، روش المان مجزا^۱ که روش مناسبی برای مدل‌سازی این‌گونه سازه‌ها، که در ماهیت به‌صورت مرکب و ناپیوسته هستند، در اختیار محققین قرار گرفت، هرچند که هنوز صحت‌سنجی سازه‌های مصالح بنایی با روش المان مجزا از چالش‌های پیش‌رو است (Lemos, 2007).

۲- روش المان مجزا

3DEC یک برنامه عددی سه‌بعدی است که بر اساس روش المان‌های مجزا برای مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این برنامه همان فرمولاسیون عددی روش دوبعدی نرم‌افزار UDEC مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نرم افزار پاسخ ناپیوستگی‌هایی مانند درزه‌ها که در معرض بارهای استاتیکی و دینامیکی قرار دارند، به خوبی شبیه‌سازی می‌شود. در حالی که ناپیوستگی‌ها به عنوان شرایط مرزی بین بلوک‌ها تلقی می‌شوند، رفتار بلوک‌ها به‌صورت 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 جابجایی- نیرو در جهات برشی یا نرمال می‌باشد. این برنامه چندین مدل رفتاری برای بلوک‌ها و ناپیوستگی‌ها دارد. برنامه 3DEC بر اساس طرح محاسباتی لاگرانژ می‌باشد که برای مدل کردن حرکت‌های بزرگ و تغییر شکل سیستم‌های بلوکی بسیار مناسب است. جزئیات مربوط به هندسه‌ی مدل، رفتار مواد، شرایط اولیه، بارگذاری، اطلاعات مورد نیاز برای تحلیل یک مدل مصالح بنایی بر اساس روش المان مجزا می‌باشند.

در سال ۲۰۱۲ بوئی و لیمام به منظور بررسی قابلیت نرم‌افزار 3DEC در مدل‌سازی رفتار سازه‌های بنایی، به مقایسه‌ی مدل‌های عددی و نتایج آزمایشگاهی در دو قسمت رفتار داخل صفحه و رفتار خارج صفحه پرداختند (Bui & Limam, 2012). در سال ۲۰۰۸ محب‌خواه و تسنیمی با مدل کردن یک میان‌قاب مصالح بنایی در قاب فولادی، اثرات بازشو روی رفتار مرکب و میان‌قاب را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه که توسط نرم‌افزار المان مجزای UDEC انجام گرفت، اثرات انواع بازشو و محل آن روی ظرفیت باربری قاب مورد بررسی قرار گرفت (Mohebkah, Tasnimi, & Moghadam, 2008).

¹ Discrete Element Method (DEM)

۳- سیستم واحدها

به منظور جلوگیری از تکرار واحدهای پارامترهای استفاده شده، در ابتدا یک بار واحد همه‌ی پارامترها ذکر شده و از ذکر مجدد در متن خودداری شده است. قابل ذکر است واحد همه‌ی پارامترها مطابق جدول (۱) و جدول (۲) و می‌باشد مگر این که در متن واحدهای دیگری ذکر شده باشد.

جدول (۱) سیستم واحدهای پارامترهای مصالح

KN/m ²	مقاومت کششی	ton/m ³	وزن مخصوص
KN/m ²	چسبندگی	KN/m ²	مدول یانگ
degree	زاویه‌ی اصطکاک	-	نسبت پواسون
degree	زاویه‌ی اتساع	KN/m ²	مدول بالک
		KN/m ²	مدول برشی

جدول (۲) سیستم واحدهای پارامترهای درزه‌ها

KN/m ²	چسبندگی	KN/m ³	سختی برشی
Degree	زاویه‌ی اتساع	KN/m ³	سختی نرمال
KN/m ²	چسبندگی پس‌خرابی	KN/m ²	مقاومت کششی
Degree	زاویه‌ی اصطکاک پس‌خرابی	Degree	زاویه‌ی اصطکاک

۴- بررسی عملکرد مدل درزه‌ی موهر-کولمب در حالت ساده

به منظور بررسی صحت عملکرد مدل درزه‌ی موهر-کولمب، مثال زیر مدل‌سازی شده است. بدین صورت که دو بلوک روی هم و یک درزه با رفتار موهر-کولمب بین آن‌ها ایجاد شد. با تخصیص ویژگی‌ها به درزه و بلوک‌ها طبق جدول ، و تعریف مناسب شرایط مرزی و بارگذاری تحلیل انجام شد. پس از تحلیل و محاسبه‌ی خروجی‌ها، نتایج 3DEC با نتایج حل تحلیلی مقایسه شد. مشخصات بلوک‌ها و درزه‌ها به شرح جدول (۳) و جدول (۴) است:

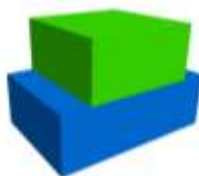
جدول (۳) مشخصات مصالح

بلوک‌ها	
۲/۵	وزن مخصوص
۶e۴	مدول بالک
۶e۴	مدول برشی
۰/۲	نسبت پواسون

جدول (۴) مشخصات درزه

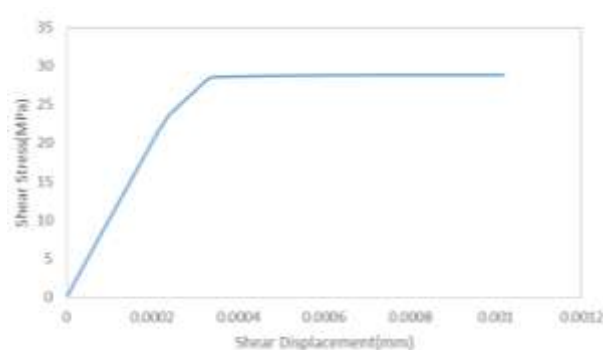
درزه	
۶e۱	سختی برشی
۶e۱	سختی نرمال
۳۰	زاویه‌ی اصطکاک
۴e۱/۵	چسبندگی
۱۵	زاویه اتساع

طبق شکل (۱) مدل تحت بارگذاری برش مستقیم قرار گرفت. بدین صورت در ابتدا یک تنش فشاری برابر با ۵۰ مگاپاسکال روی بلوک بالا اعمال شد که تا آخر نمونه ثابت خواهد ماند. سپس سرعت ثابتی به بلوک بالایی در جهت افقی تخصیص داده شد. شرایط مرزی به گونه ای تعریف شد که بلوک پایینی امکان حرکت نداشته باشد.

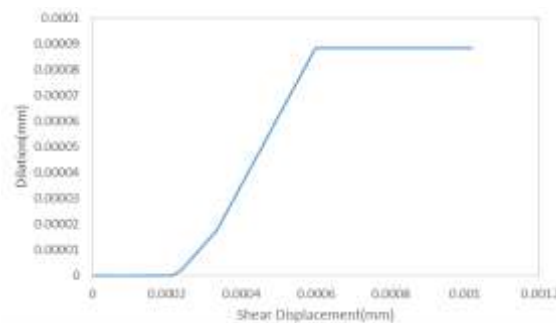


شکل (۱) هندسه ی مدل ساخته شده در نرم افزار

در مرحله ی اول مقدار چسبندگی برابر صفر انتخاب شد. در حین بارگذاری تغییر شکل برشی، تغییر شکل نرمال و تنش برشی محاسبه شدند. بررسی نمودارها در شکل (۲) نشان می دهد که درزه به صورت مناسب رفتار می کند. شیب بارگذاری تا رسیدن به نقطه ی اوج به صورت خطی است. پس از رسیدن تغییر شکل برشی به حد نهایی درزه شروع به اتساع می کند. اتساع تا رسیدن به حد تغییر شکل برشی برابر ۰/۶ (ورودی مدل) ادامه می یابد و سپس زاویه ی اتساع به صفر کاهش می یابد. اتساع میانگین حدوداً برابر ۰/۰۷۷ میلی متر محاسبه شد.



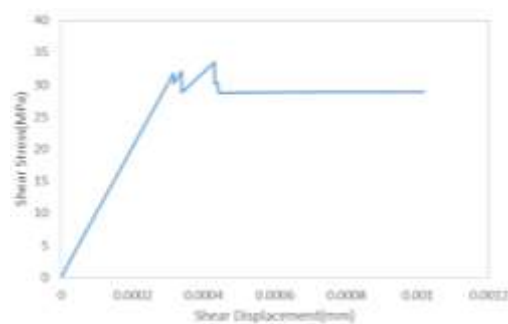
(الف)



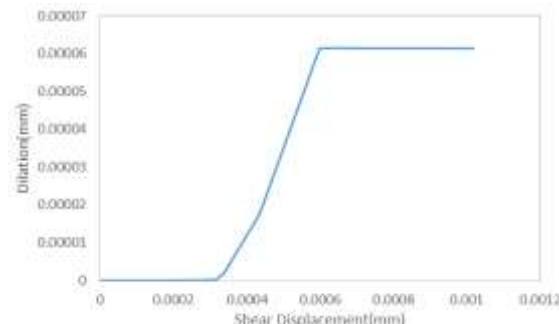
(ب)

شکل (۲) رفتار درزه ی موهر-کولمب بدون چسبندگی (الف) تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی (ب) تغییرات اتساع در برابر جابجایی برشی

باید خاطرنشان کرد زاویه ی اتساع معرفی شده تخمینی خطی از زاویه ی اتساع در کل مراحل بازشدگی درزه است. در مرحله ی دوم با تعریف چسبندگی رفتار نرم شدگی درزه را بررسی می کنیم. بعد از رسیدن به خرابی چسبندگی برابر صفر می شود. شکل (۳) اثر نرم شدگی در نمودار را نشان می دهد. باید خاطرنشان کرد که افت مقاومت به صورت ناگهانی رخ می دهد. در این حالت (وجود چسبندگی) میزان اتساع از حالت قبل کم تر است، زیرا تغییر شکل برشی بیش تری قبل از شکست برشی درزه در آن اتفاق می افتد.



(الف)



(ب)

شکل (۳) رفتار درزهی موهر-کولمب با چسبندگی (الف) تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی (ب) تغییرات اتساع در برابر جابجایی برشی

τ_{res} و τ_{max} را در مدل موهر-کولمب برای حالت بدون چسبندگی به صورت زیر می توان محاسبه کرد.

$$\tau_{max} = c + \sigma \tan \phi$$

$$\tau_{max} = 50 \times \tan(30) = 28.867 MPa$$

$$\Delta s_{elastic} = \frac{\tau_{max}}{k_s} = \frac{28.86 MPa}{100000 MPa/m} = 2.886 \times 10^{-4} m$$

$$dilatation = (6 - 2.886) \times 10^{-4} \times \tan(15) = 8.33 \times 10^{-5} = 0.083$$

$$c = 15 MPa \Rightarrow \tau_s = 15 + 20 \tan(30^\circ) = 38.86 MPa$$

$$\tau_{res} = 28.86 MPa$$

مقایسه ای بین روش تحلیلی و 3DEC در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول (۵) مقایسه ی نتایج 3DEC و تحلیل برای حالت بدون چسبندگی

اتساع	مقاومت برشی	
۰/۰۸۳۳	۲۸/۸۶۸	تحلیلی
۰/۰۷۷۸	۲۸/۸۶۳	3DEC

با مقایسه ی نتایج 3DEC و نتایج تحلیلی به عملکرد مدل رفتاری کوهر-کولمب در نرم افزار 3DEC مشاهده شد.

۱-۱- دیوار سنگی مصالح بنایی با درزهی خشک تحت بار قائم و درون صفحه (Lourenço et al., 2005)

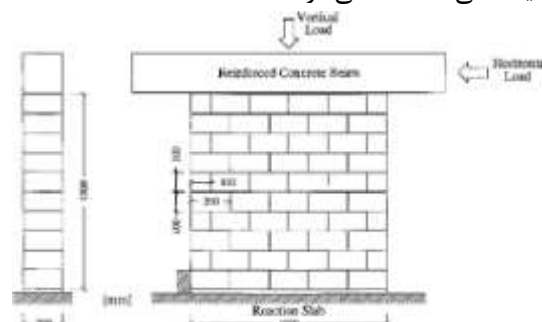
در سال ۲۰۰۵ یک مطالعه تجربی در دانشگاه کاتالونیای بارسلونا با همکاری دانشگاه مینهو به منظور بررسی رفتار دیوارهای سنگی مصالح بنایی با درزهی خشک صورت گرفت. این آزمایش ها بر روی هفت دیوار با سطوح مختلف تنش قائم از ۰/۱۵ تا ۱/۲۵ مگا پاسکال، اجرا گردید. پس از اعمال بار قائم، بار افقی به صورت مونوتونیک تا مرز خرابی به دیوارها وارد شد. مقادیر بارها و تنش های سربار دیوارها در جدول (۶) مشاهده می گردد. در این تحقیق به منظور نشان دادن قابلیت برنامه ی 3DEC در مدل سازی دیوار مصالح بنایی، دیوارها با مقادیر مختلف سربار مدل و تحلیل شده اند. قابل ذکر است نامگذاری دیوارها در مرجع بصورت (Shear*Wall*Compression load: SW30) انجام شده است که در مدل سازی نیز از همین اسامی استفاده می شود.

جدول (۶) میزان تنش ها و بارهای قائم برای دیوارهای SW250، SW200، SW100، SW30 و SW250

دیوار	بار قائم KN	تنش قائم MPa
SW۳۰	۳۰	۰/۱۵
SW۱۰۰	۱۰۰	۰/۵

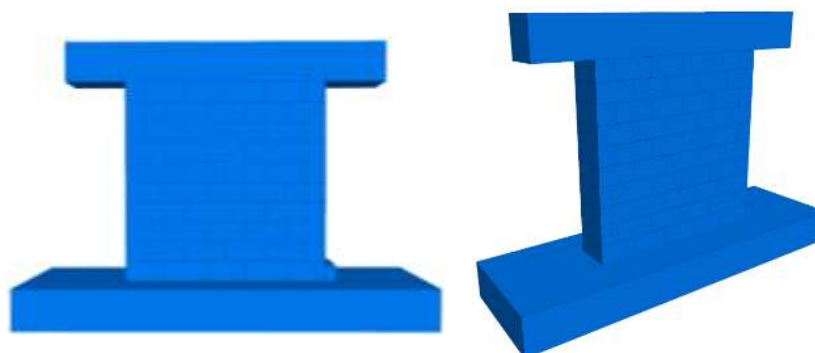
SW۲۰۰	۲۰۰	۱
SW۲۵۰	۲۵۰	۱/۲۵

دیوارها از ده ردیف سنگ، به صورت خشکه چینی تشکیل شده اند. بین سطح فوقانی دیوار و تیر بتونی به ابعاد m^3 $0/۲۰ \times 0/۲۰ \times ۱/۶$ تماس خوبی وجود دارد. ابتدا یک بار فشاری عمودی به وسیله ی محرک هیدرولیکی، در حال که نیرو کنترل می شود، اعمال شده تا جایی که بار مورد انتظار کاملاً به دیوار وارد شود. سپس بار افقی به تدریج به تیر بتنی وارد می شود. در حین آزمایش وقایع اصلی مثل باز شدن اتصالات و ظهور شکافها توسط عکس ثبت شدند. در شکل (۴) هندسه و ابعاد نمونه ی آزمایشگاهی مشاهده می شود:



شکل (۴) ابعاد و هندسه ی نمونه ی آزمایشگاهی لورنزو (Lourenço et al., 2005)

در ادامه بررسی مدل های آزمایشگاهی در مطالعه مرجع، تحلیل های عددی با استفاده از مدل شکست مشترک چند سطحی که توسط لورنسو و راتس^۲ در سال (۱۹۹۷) پیشنهاد شده، و روش اجزا محدود اجرا شدند. در این روش فرض را بر این می گذارند درحالی که رفتار غیر الاستیک روی درزه ها متمرکز شده است، واحدهای سنگی به صورت الاستیک رفتار می کنند. برای بررسی رفتار این دیوار یک مدل در 3DEC ایجاد شد که هندسه ی آن در شکل (۵) قابل رویت است:



شکل (۵) هندسه ی بلوکها و درزه های ساخته شده در مدل عددی

قابل ذکر است به علت مدول الاستیسیته ی بالای مصالح سنگی و تمرکز خرابی دیوار در درزه ها، در مدل سازی مرحله ی اول المان های مصالح به صورت صلب فرض شده اند. سپس یکبار دیگر مدل سازی با بلوک های تغییر شکل پذیر و الاستیک انجام گرفت و نتایج با هم مقایسه شدند. در مدل سازی سعی شده است تا شرایط مرزی مدل شبیه شرایط آزمایشگاهی ایجاد شود. مشخصات مصالح و درزه های مورد استفاده در مدل در جدول (۷) و جدول (۸) آمده است:

جدول (۷) مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل 3DEC

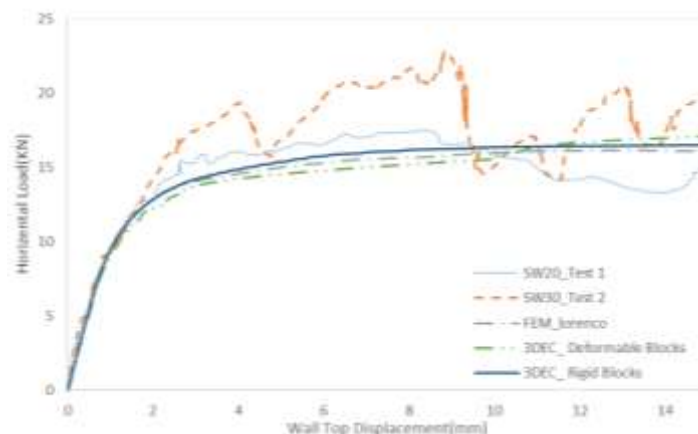
² Lourenço and Rots

بلوکها	
دیوار	
۲/۵	وزن مخصوص
۶e۸/۶۱	مدول بالک
۷e۱/۵۵	مدول یانگ
۶e۶/۴۵	مدول برشی
۰/۲	نسبت پواسون
پی و تیر بارگذاری	
۲/۵	وزن مخصوص
۷e۱/۷۵	مدول بالک
۷e۳/۱۵	مدول یانگ
۷e۱/۳۱	مدول برشی
۰/۲	نسبت پواسون

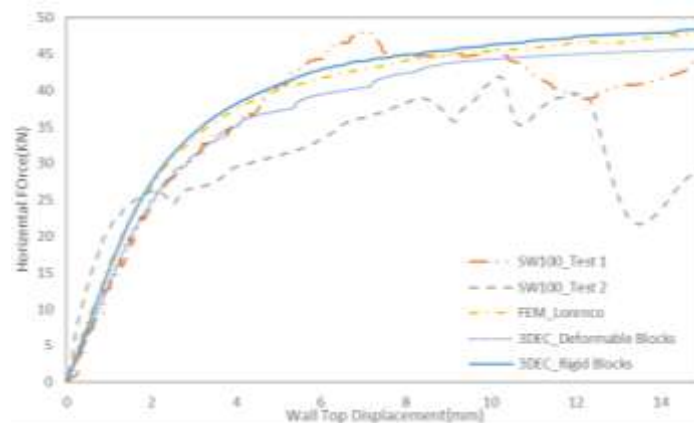
جدول (۸) مشخصات درزه های مورد استفاده در مدل 3DEC

درزه	
۶e۲/۴۵	سختی برشی
۶e۵/۸۷	سختی نرمال
۳۱/۸	زاویه ی اصطکاک
۰	چسبندگی
۰	زاویه ی اتساع

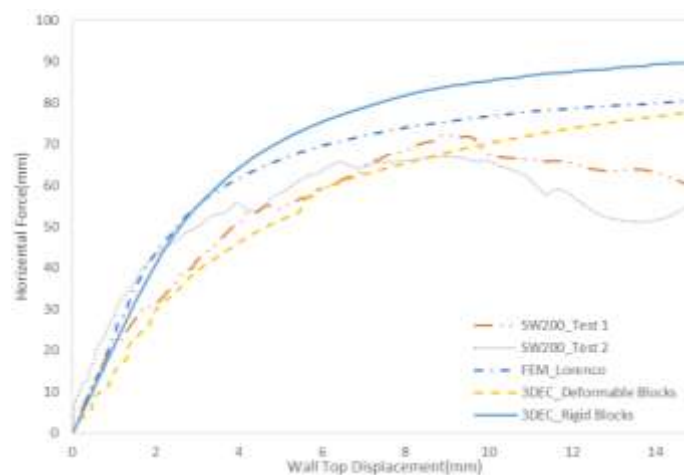
پس از انجام تحلیل، به مقایسه ی نتایج حاصل از آزمایش و نتایج تحلیل 3DEC در دو حالت بلوک های صلب و تغییر شکل پذیر می پردازیم. در کنار آن، نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود ارائه شده در مرجع نیز به سبب مقایسه ارائه می شود. تطابق بین پاسخ های عددی، تجربی و نتایج حاصل از برنامه ی 3DEC، نسبتاً رضایت بخش است. مشاهده ی نمودار بار افقی در برابر تغییر مکان بالای دیوار در شکل (۶) الی شکل (۹) برای هر چهار دیوار و تفاوت های بین بارهای فروریزش در جدول (۹) مبین این مطلب است.



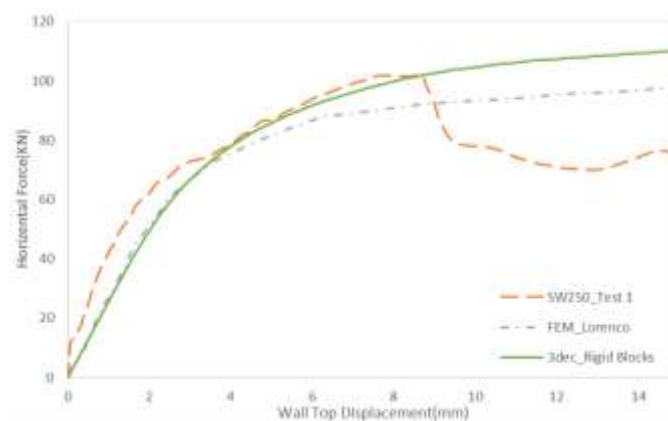
شکل (۶) نمودار بار افقی در برابر جابجایی بالای دیوار برای دیوار SW30



شکل (۷) نمودار بار افقی در برابر جابجایی بالای دیوار برای دیوار SW100



شکل (۸) نمودار بار افقی در برابر جابجایی بالای دیوار برای دیوار SW200



شکل (۹) نمودار بار افقی در برابر جابجایی بالای دیوار برای دیوار SW250

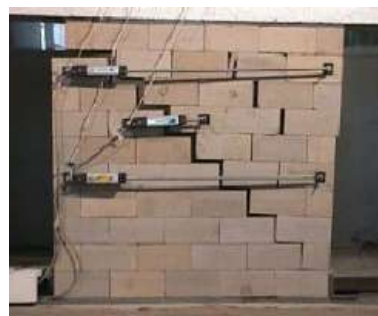
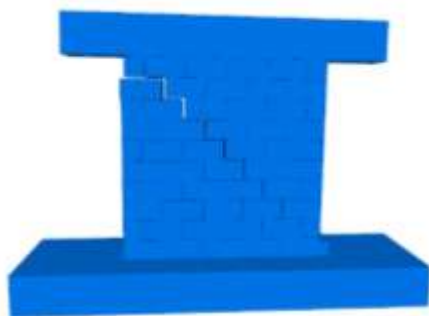
جدول (۹) نتایج مقاومت نهایی مدل آزمایشگاهی و تحلیل عددی

بار خرابی	دیوار
-----------	-------

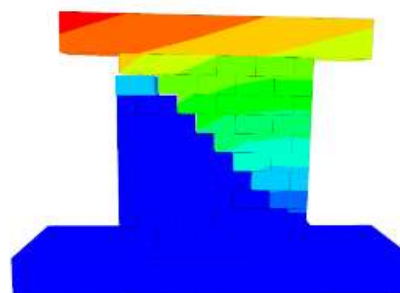
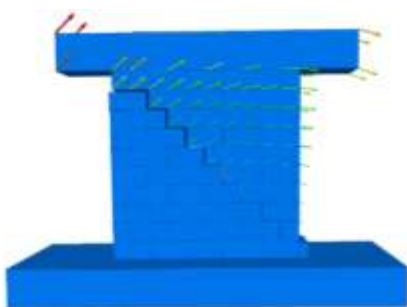
نسبت بار خرابی برای بلوکهای صلب	نسبت بار خرابی برای بلوکهای شکل پذیر	3DEC تغییر شکل پذیر	3DEC صلب	نتیجه ای آزمایشگاهی	
۰/۸۲	۰/۷۴	۱۸/۳	۱۶/۶	۲۲/۴	SW30
۱/۰۵	۱/۰۸	۴۷/۱	۴۸/۴	۴۵	SW100
۱/۱	۱/۲۸	۷۷/۶	۸۹/۹	۷۰/۳	SW200
-	۱/۰۶	-	۱۰۹	۱۰۲/۷	SW250

در پاسخ سازه خصوصاً بعد از خرابی، لرزشها و ارتعاشاتی دیده می شود که ناشی از لغزش ناگهانی و عدم وجود ملات بین مصالح است. فقدان ملات بین بلوکها، تنش را در نقاط تماس متمرکز می کند، و این منجر به شکاف عمودی نابهنگام در واحدهای بنایی می شود. این الگوی خرابی در آزمایشات به ثبت رسیده است. مدل برنامه ای 3DEC نیز در شکل (۱۰) این مکانیسم را به خوبی نشان می دهد، اما در کل رفتار شکل پذیری مشاهده شد که نشانگر خرابی در مودهای گهواره ای^۳ و برش ملات است. در بارهای قائم کم تر دیوار تمایل به بازشدگی و چرخش ساده ی نیمه ی دیوار داشت و خرابی کمی در مصالح سنگی ایجاد شد اما با افزایش بار قائم نمونه ها دچار تغییر شکل و خرابی بیش تری در مصالح سنگی (بلوکها) شدند و مود خرابی خردشدگی پاشنه در کنار گسیختگی برش نمایان شد.

با توجه به شکل (۱۰) قابل بیان است که 3DEC به خوبی مودهای خرابی مخصوصاً در حالتی که بارهای قائم کم بوده و خرابی در درزه ها متمرکز بوده را گزارش می دهد و با دقت مناسب مدل خرابی سازه را بیان می کند. در تخمین ظرفیت نیز همان طور که قبلا ذکر شد، تخمین مناسبی از ظرفیت دیوار ارایه می دهد. در ادامه در شکل (۱۱) کنتورهای تغییر مکان در مصالح و درزه ها نشان داده شده اند.



شکل (۱۰) مقایسه ی مکانیزم خرابی در مدل آزمایشگاهی و عددی



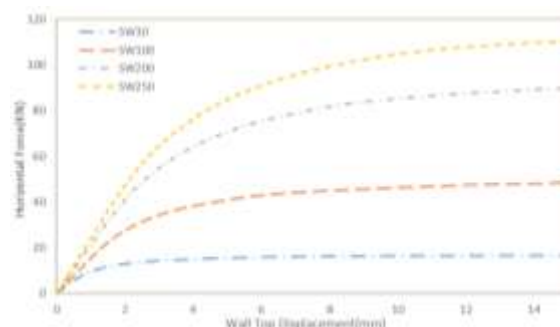
³ Rocking

(ب)

(الف)

شکل (۱۱) جابجایی بلوک مدل عددی (الف) کنتورهای جابجایی (ب) بردارهای جابجایی

قابل ذکر است در حالتی که بیش تر خرابی دیوار معطوف به جابه جایی در درزه ها باشد (SW30 و SW100)، تغییر المان ها از صلب به شکل پذیر، در رفتار کلی سازه تغییرات خیلی زیادی ایجاد نمی کند.



شکل (۱۲) مقایسه ی نمودار بار افقی در برابر جابجایی بالای دیوار برای دیوار با بار قائم مختلف

در شکل (۱۲) مشاهده می شود که در دیوار تحت تنش های نرمال بالاتر میزان سختی افزایش می یابد و این به خاطر افزایش تماس بین واحدهای بنایی می باشد. در تایید نتایج آزمایشگاهی مرجع برای تنش های قائم بالا خطر کمانش با یک ترک مورب کامل در میان اتصال نسبت به نمونه های با تنش کم تر وجود دارد که در مدل های عددی نیز مشاهده شد.

۵- مدل سازی دیوار مصالح بنایی با ملات (Dumova-Jovanosla & Churilow, 2009)

نظر بر این که در کنار سازه های مصالح بنایی یا درزه های خشک، بسیاری از ساختمان های بنایی در بین مصالح از ملات بهره می برند، بر آن شدیم تا علاوه بر سازه ی سنگی با درزه ی خشک، یک دیوار بنایی با آجر و ملات بین آن را نیز مدل کرده تا از صحت عملکرد نرم افزار در هر دو حالت اطمینان حاصل شود. از سوی دیگر در مدل قبل علاوه بر عدم وجود ملات بین مصالح، از مدل رفتاری الاستیک برای بلوک ها استفاده کردیم. با توجه به نوع شکست و رفتار آجر در دیوار بنایی، در این مدل از رفتار موهر-کولمب برای مدلسازی رفتار بلوک ها استفاده می کنیم.

در سال ۲۰۰۸ یک سری آزمایش روی دیوارهای بنایی با آجر و ملات برای بررسی عده های خرابی و مشخصات مصالح انجام شد. در این تحقیق سه دیوار تحت بارگذاری قائم و جانبی به صورت هم زمان قرار گرفتند. بارگذاری جانبی به صورت رفت و برگشتی انجام شد. پس از انجام آزمایش و ثبت خرابی ها و منحنی رفت و برگشتی یک مدل به وسیله ی اعمال مجزا در نرم افزار UDEC پیاده شد یا تطابق نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل عددی مقایسه شد. در شکل (۱۳) هندسه ی مدل و شرایط آزمایشگاهی نشان داده شده است. دیوارها با ابعاد $250 \times 175 \times 30 \text{ cm}^3$ از آجرهایی به ابعاد $24/5 \times 24 \times 30 \text{ cm}^3$ ساخته شدند. میزان تنش قائم برابر $0/6$ ، $0/9$ و $1/2$ مگاپاسکال در سطح دیوار انتخاب شد.



شکل (۱۳) مقایسه‌ی نمودار بار افقی در برابر جابجایی بالای دیوار برای دیوار با بار قائم
مختلف (Dumova-Jovanosla & Churilow, 2009)

در ابتدا بارگذاری قائم روی دیوار انجام شد. پس از اعمال بار قائم به صورت موثر روی دیوار، بارگذاری جانبی توسط جک‌های هیدرولیکی به صورت رفت و برگشتی در سه سیکل به دیوار وارد شد. در کنار مدل آزمایشگاهی، در تحقیق مرجع، برای مدل-سازی عددی از نرم‌افزار دو بعدی UDEC استفاده شد. در این تحقیق برای مدل‌سازی از نرم‌افزار سه‌بعدی 3DEC استفاده شد. هندسه کاملاً مطابق با نمونه آزمایشگاهی مدل و هم برای درزه‌ها و هم برای بلوک‌ها از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شد. شرایط مرزی و بارگذاری نیز به گونه‌ای انتخاب شدند تا بیش‌ترین مطابقت را با شرایط آزمایشگاهی داشته باشند. مشخصات مصالح و درزه‌های مورد استفاده در جدول (۱۰) و جدول (۱۱) آورده شده است.

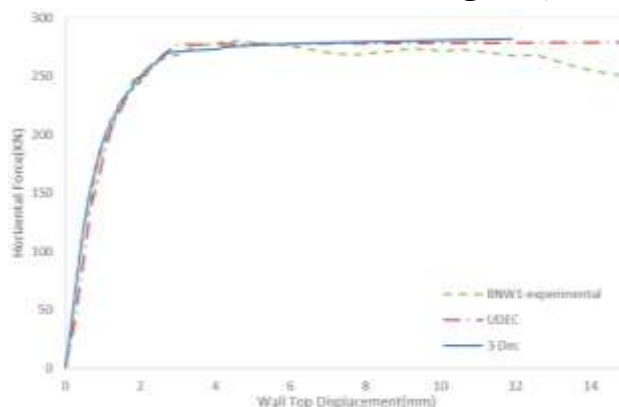
جدول (۱۰) مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل 3DEC

دیوار	
۱/۷۵۶	وزن مخصوص
e6۵	مدول یانگ
۰/۲	نسبت پواسون
۶e۲/۷۷	مدول بالک
۶e۲/۰۸	مدول برشی
۳e۱/۱۵	مقاومت کششی
۲e۲/۹	چسبندگی
۳۵	زاویه‌ی اصطکاک
۱۲	زاویه‌ی اتساع
پی و تیر بارگذاری	
۲/۵	وزن مخصوص
۷e۳/۱۵	مدول یانگ
۰/۲	نسبت پواسون
۷e۱/۷۵	مدول بالک
۷e۱/۳۱	مدول برشی

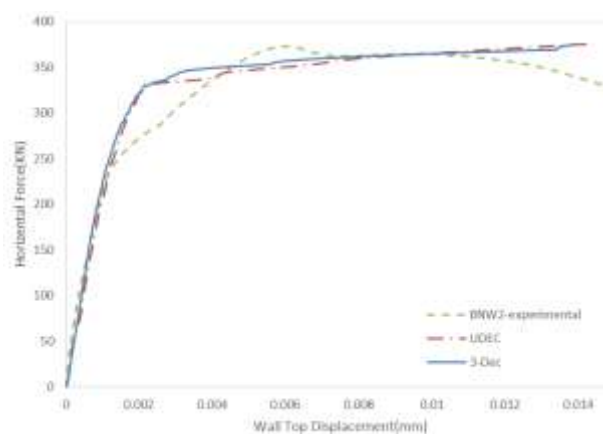
جدول (۱۱) مشخصات درزه‌های مورد استفاده در مدل 3DEC

۷e۱/۷۵	سختی برشی
۷e۳/۸۱	سختی نرمال
۲e۴/۴	مقاومت کششی
۳۱/۸	زاویه‌ی اصطکاک
۲e۴/۵	چسبندگی
۳۴	زاویه‌ی اتساع
۲e۱/۵	چسبندگی پس‌خرابی
۳۰	زاویه‌ی اصطکاک پس‌خرابی

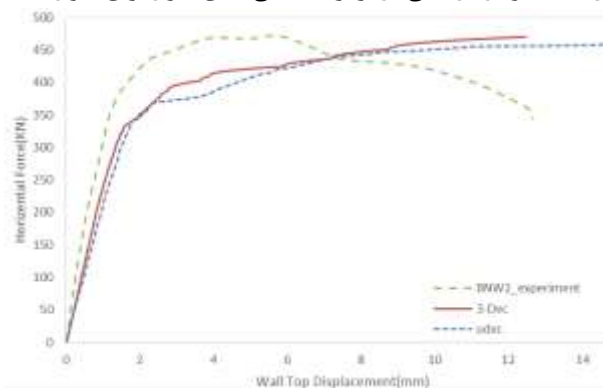
پس از تحلیل، نتایج مدل 3DEC و نتایج آزمایشگاهی برای سه دیوار مقایسه شدند. در دیوار اول و دوم که میزان بار قائم کم است، تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی دیده می شود (شکل (۱۴) و شکل (۱۵)). اما با افزایش بار قائم و تغییر مدل شکست نمونه از ترک قطری به خوردشدگی در پنجه و تمرکز خرابی در مصالح، قابلیت نرم افزار برای مدل سازی رفتار سازه افت می کند (شکل (۱۶)). قابل ذکر است که بارگذار در نرم افزار به صورت یک طرفه اعمال شده و نتایج آن با پوش حاصل از آزمایش چرخه ای نرم افزار مقایسه شده است که خود می تواند در تفاوت نتایج اثرگذار باشد. هم چنین یکی از چالش های در تحقیق مرجع یافتن پارامترهای مناسب برای ریز مدل سازی با مقایسه ی نتایج آزمایشگاهی و عددی بوده که طی آن پارامترهای در نظر گرفته شده را دست پایین می داند.



شکل (۱۴) نمودار بار افقی در برابر جابجایی بالای دیوار برای دیوار BNW1



شکل (۱۵) نمودار بار افقی در برابر جابجایی بالای دیوار برای دیوار BNW2



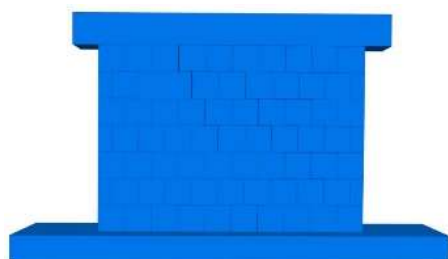
شکل (۱۶) نمودار بار افقی در برابر جابجایی بالای دیوار برای دیوار BNW3

در هر سه دیوار نمونه‌ی آزمایشی، مود اصلی خرابی، ترک قطری در دیوار بوده که در مدل های با بار قائم بالاتر هنگام وقوع ظرفیت نهایی با خردشدگی پاشنه همراه شده است. در نرم افزار نیز شکل خرابی به صورت قابل قبولی مشاهده شد. مقایسه‌ی بین ظرفیت نهایی به دست آمده از 3DEC و آزمایش در جدول (۱۲) آورده است.

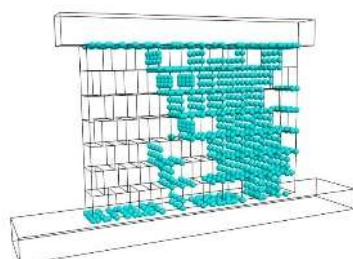
جدول (۱۲) نتایج مقاومت نهایی مدل آزمایشگاهی و تحلیل عددی

دیوار	آزمایشگاهی	3DEC	نسبت نتیجه‌ی آزمایشگاهی به 3DEC
BNW1	۲۸۳	۲۸۲	۱/۰۰۳۵۴۶
BNW2	۳۶۹/۵	۳۷۵	۰/۹۸۵۳۳۳
BNW3	۴۶۹	۴۷۰	۰/۹۹۷۸۷۲

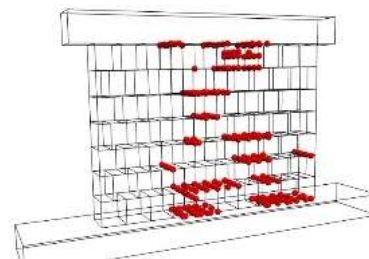
در شکل (۱۷) مکانیزم خرابی دیوار، وضعیت تنش‌ها در مصالح و درزه‌ها با توجه به معیار موهر- کولمب برای دیوار BNW1 مشاهده می شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۷) نتایج تحلیل دیوار BNW1 (الف) مکانیزم خرابی (ب) شکست کششی در درزه‌ها (ج) شکست برشی در درزه‌ها

در نهایت، با مقایسه‌ی سختی اولیه، مقاومت نهایی و مود خرابی دیوار بین نتایج آزمایشگاهی و 3DEC تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی به روش المان مجزا مشاهده شد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق در ابتدا سعی بر آن شد تا با توجه به ناهمگن بودن سازه‌های مصالح بنایی، روشی برای مدلسازی دقیق آن‌ها شناسایی و بررسی شود. بدین منظور کارایی روش المان مجزا (DEM) برای دو هدف بررسی رفتار منحنی بار- تغییر مکان و مکانیزم خرابی مورد مطالعه قرار گرفت. با این هدف دو دیوار یکی با درزه‌ی خشک و رفتار الاستیک و دیگری با وجود ملات بین بلوک‌ها و رفتار موهر کولمب بلوک‌ها مدل سازی شدند. در هر دو مورد تخمین رفتار سازه با توجه به نتایج آزمایشگاهی قابل قبول بود. اما با توجه به اهمیت رفتار غیر خطی سازه‌های بنایی با درزه‌ی خشک، در تخمین بار نهایی خطای بیش‌تری مشاهده شد. در هر دو سازه با افزایش سر بار اولیه (ثابت) مود خرابی به خردشدگی پاشنه متمایل گردید که با بررسی تنش‌ها در حالت بلوک‌های الاستیک و بلوک‌ها با رفتار موهر کولمب قابل مشاهده بود. در هر سه دیوار نمونه‌ی آزمایشی، مود اصلی خرابی، ترک قطری در دیوار بوده که در مدل های با بار قائم بالاتر هنگام وقوع ظرفیت نهایی با خردشدگی پاشنه همراه شده

است. در نرم افزار نیز شکل خرابی به صورت قابل قبولی مشاهده شد. مقایسه‌ی بین ظرفیت نهایی به دست آمده از 3DEC و آزمایش، مبین دقت مناسب مدل سازی به این روش در نخمین بار خرابی و ظرفیت دیوارهای بنایی می باشد.

۷- منابع

- Bui, T. T., & Limam, A. (2012). Masonry Walls under Membrane or Bending Loading Cases: Experiments and Discrete Element Analysis. *Civil-Comp Press*, Paper 119.
- Dumova-Jovanosla, E., & Churilow, S. (2009). Calibration of a numerical model for masonry with application to experimental results. *Protection of historical Buildings, Mazzolani*, 1139-1145.
- Lemos, J. V. (2007). Discrete element modeling of masonry structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 1(2), 190-213.
- Lourenço, P. B., Oliveira, D. V., Roca, P., & Orduña, A. (2005). Dry joint stone masonry walls subjected to in-plane combined loading. *Journal of structural engineering*, 131(11), 1665-1673.
- Mohebkhah, A., Tasnimi, A., & Moghadam, H. (2008). Nonlinear analysis of masonry-infilled steel frames with openings using discrete element method. *Journal of constructional steel research*, 64(12), 1463-1472.
- Ramos, L. F., Aguilar, R., Lourenço, P. B., & Moreira, S. (2013). Dynamic structural health monitoring of Saint Torcato church. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 35(1), 1-15.

Surf and download all data from SID.ir: www.SID.ir

Translate via STRS.ir: www.STRS.ir

Follow our scientific posts via our Blog: www.sid.ir/blog

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: www.sid.ir/workshop