

Evaluation and Comparison of Capability of Finite Element and Discrete Element Methods for Predicting In-plane Behavior of Unreinforced Masonry Wall

Mehrdad Aalijahan¹, Gholamreza Zamani Ahari^{2*}

1- MSc, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

ABSTRACT

In general, masonry structures are divided into two categories in terms of the connection between components: mortar-free masonry, which is called dry joint, and structures that use mortar to connect the components. Due to environmental conditions, when the mortar loses its adhesion over time, the components of the wall can be considered as discrete elements. The poor performance of masonry structures leads to the failure of a significant number of these structures even in moderate earthquakes. In particular, in-plane failure in the walls of masonry structures is very common. The results of laboratory research show that shear failure is very likely in lateral loading. One of the characteristics of this failure mode is its ability to resist high shear force and low ductility, which leads to brittle failure in the wall. Previous numerical studies on masonry structures have been mainly based on the finite element method in which the wall components are considered as continuous elements and the local behavior of the constituent parts of the walls is ignored and causes their real function to be misunderstood. In this paper, first, the specifications of unreinforced masonry wall specimens were determined based on the results obtained from previous experiments, and then numerical models were calibrated and analyzed using two software ABAQUS (finite element software) and 3DEC (discrete element software). Then, behavioral diagrams of walls with different characteristics were extracted under different loading conditions. Finally, a comprehensive comparison between the results obtained from the discrete element and finite element methods was presented. Finally, it was concluded that the discrete element approach provides a more accurate prediction of unreinforced masonry walls than finite element one.

ARTICLE INFO

Receive Date: 19 December 2020

Revise Date: 26 February 2021

Accept Date: 15 April 2021

Keywords:

Unreinforced masonry structure

Discrete element method

Finite element method

Masonry wall

Dry Joint

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.262722.2314>

*Corresponding author: Gholamreza Zamani Ahari

Email address: g.zamani@urmia.ac.ir

بررسی و مقایسه قابلیت روش های المان محدود و المان مجزا برای پیش بینی رفتار داخل صفحه‌ی دیوار بنایی غیر مسلح

مهرداد عالی جهان^۱، غلامرضا زمانی اهری^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران-سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

به طور کلی سازه‌های بنایی از نظر اتصال بین اجزا به دو دسته تقسیم می‌شوند: سازه بنایی بدون ملات که به آن اتصال خشک اطلاق می‌شود و سازه‌هایی که از ملات جهت اتصال اجزای متشکله با یکدیگر استفاده می‌شود. در اثر شرایط محیطی، وقتی که ملات طی گذر زمان چسبندگی خود را از دست می‌دهد، اجزای تشکیل دهنده‌ی دیوار را می‌توان به صورت مجزا از هم در نظر گرفت. عملکرد ضعیف سازه‌های بنایی، منجر به شکست و خرابی تعداد قابل توجهی از این سازه‌ها حتی در زلزله‌های متوسط می‌شود. به ویژه، شکست درون صفحه‌ای در دیوارهای سازه‌های بنایی بسیار مشهود است. نتایج تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که حالت شکست برشی در بارگذاری جانبی بسیار محتمل است. یکی از ویژگی‌های این حالت شکست، توانایی مقاومت در برابر نیروی برشی زیاد و قابلیت شکل پذیری کم است که منجر به شکست ترد در دیوار می‌شود. مطالعات عددی پیشین بر روی سازه‌های بنایی به طور عمده بر اساس روش اجزای محدود بوده که در آن اجزای دیوار به صورت المان‌های پیوسته در نظر گرفته می‌شوند و در عمل، رفتار محلی بخش‌های تشکیل دهنده‌ی دیوارها نادیده گرفته شده و باعث می‌شود عملکرد آنها به درستی درک نشود. در این مقاله، ابتدا مشخصات نمونه‌های دیوار بنایی غیر مسلح براساس نتایج بدست آمده از آزمایش‌های قبلی، تعیین شده و سپس مدل‌های عددی با استفاده از دو نرم افزار ABAQUS (نرم‌افزار المان محدود) و 3DEC (نرم‌افزار المان گسسته) کالیبره شده و مورد تحلیل قرار گرفتند. در ادامه، نمودار رفتاری دیوارها با مشخصات مختلف تحت شرایط بارگذاری متفاوت استخراج گردیدند. در نهایت، مقایسه جامعی میان نتایج حاصله از روش‌های اجزای گسسته و اجزای محدود ارائه شد. در نهایت چنین نتیجه گیری شد که رویکرد اجزای گسسته پیش‌بینی دقیق‌تری از دیوارهای بنایی غیر مسلح نسبت به اجزای محدود ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: سازه بنایی غیر مسلح، روش اجزای گسسته، روش اجزای محدود، دیوار بنایی، اتصال خشک.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.262722.2314	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.262722.2314	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۱/۲۶	۱۴۰۰/۰۱/۲۶	۱۳۹۹/۱۲/۰۸	۱۳۹۹/۰۹/۲۹
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				غلامرضا زمانی اهری		
				g.zamani@urmia.ac.ir		

۱- مقدمه

کشور ایران مهد یکی از قدیمی ترین تمدن های تاریخ بوده و موطن سازه های بنایی با سابقه تاریخی ۴۰۰۰ ساله می باشد. مشکل اصلی در حفظ، نگهداری و توسعه این سازه ها رفتار ناشناخته ی آن ها در برابر بارهای وارده، به خصوص بارهای جانبی و دینامیکی می باشد. یک گام مهم در تحلیل و ارزیابی سازه های بنایی، یافتن یک راه حل عددی مناسب برای پیش بینی پاسخ سازه در مقابل بارگذاری های مختلف است. در حال حاضر روش اجزای محدود به عنوان یک ابزار توانمند در مدل سازی و آنالیز سازه های بنایی به شمار می رود اما دارای محدودیت هایی مانند: وابستگی به مش بندی، زمان تحلیل طولانی برای دست یابی به پاسخ های دقیق و ناتوانی در تحلیل تغییر مکان های بزرگ می باشد. روش کاربردی دیگر، رویکرد اجزای گسسته است که براساس مدل سازی المان های سازه به صورت گسسته بنا نهاده شده و محدودیت های ذکر شده در روش اجزای محدود برای مدل سازی سازه های بنایی را ندارد. امروزه مقبولیت روش اجزای گسسته به عنوان یک رویکرد کارآمد برای حل مسائل مهندسی در محیط های ناپیوسته (مانند مکانیک سنگ، مکانیک مواد پودری، جریان مواد دانه ای) در حال افزایش است [۱]. عملکرد این روش در سه مرحله: مقدار دهی اولیه و تعیین گام زمانی و پس پردازش صورت می گیرد که فرآیند آن با ایجاد یک مدل، تعیین موقعیت مکانی تمام ذرات و اختصاص سرعت اولیه به هر یک از آنها شروع می شود. محاسبه نیروی اعمالی به هر یک از این ذرات، به کمک داده های اولیه و قوانین فیزیک صورت می گیرد و به منظور محاسبه ی تغییرات مکانی و سرعت هر ذره در طول یک گام زمانی، یک روش انتگرال گیری مبتنی بر قوانین حرکتی نیوتن مورد استفاده قرار می گیرد و سپس موقعیت های مکانی جدید برای محاسبه نیروی گام بعدی به کار می رود. این فرآیند به صورت پی در پی ادامه می یابد تا نتیجه ی نهایی شبیه سازی بدست می آید. از مزایای روش اجزای مجزا می توان به امکان مطالعات جزئی روی میکرو دینامیک جریان ذره ای اشاره کرد ولی این روش معایبی نیز دارد که می توان به محاسبات زمان بر آن اشاره کرد و وجود تعداد زیاد ذرات در طراحی، نیازمند توان و تجهیزات محاسباتی بالا می باشد. روش اجزای گسسته برای شبیه سازی حالت های شکست شامل انتشار ترک در امتداد درزها یا ناپیوستگی های بین بلوک ها مناسب است. طی مطالعات، محققین در صحت سنجی نتایج حاصل از آنالیز به روش اجزای گسسته با نتایج حاصل از آزمایش بر روی انواع سازه های بنایی، به عملکرد و دقت بهتر این روش پی بردند. در این مقاله روش های ارزیابی براساس پاسخ استاتیکی سازه های بنایی ارائه شده است. ابتدا روش های تحلیل سازه های بنایی معرفی، و مزایا و معایب هر یک ذکر شده و پس از آن توانایی روش های اجزای گسسته و اجزای محدود در قالب مطالعه موردی، بررسی و مقایسه شده و در نهایت نتیجه گیری و مقایسه جامعی بین روش اجزای گسسته و اجزای محدود ارائه گردیده است.

۲- مرور ادبیات

روش المان گسسته اولین بار توسط کاندال^۱ (۱۹۸۸، ۱۹۸۰) با برنامه های کامپیوتری 3DEC و UDEC، برای مسائل دو بعدی و سه بعدی مکانیک سنگ ابداع شد (ایتسکا^۲ ۱۹۹۲، ۱۹۹۴) [۱]. در طول تاریخ در نواحی لرزه خیز، ساختمان ها و دیوارهای بنایی غیرمسلح عملکرد ضعیفی از خود نشان داده اند و در طول قرن های گذشته ساختمان های زیادی با دیوارهای غیرمسلح تحت بارهای اعمالی ناشی از زلزله فرو ریخته اند [۲-۳]. این باعث شده است که با وجود همه شواهد مخالف در هزاران ساختمان که در زمین لرزه سالم باقی ماندند، این نتیجه گرفته شود که دیوارهای بنایی غیرمسلح نمی توانند در برابر بارهای دینامیکی مقاومت کنند [۴].

محققین در راستای تحقیقات خود به مدل سازی دیوارهای بنایی سنگی با دو روش اجزای محدود و اجزای گسسته پرداخته اند. روش المان محدود یکی از پرکاربردترین روش های عددی در زمینه مهندسی است که اولین بار به وسیله ترنر و همکاران در سال ۱۹۵۶ جهت استفاده در تحلیل ساختمان ارائه شد [۵]. در این روش، هندسه مسئله به یک سری المان تقسیم می شود که در نقاط گرهی با یکدیگر ارتباط دارند و روابط تنش- کرنش به وسیله معادلات مشخص می شوند. از میان نرم افزارهایی که مبتنی بر این روش کار می کنند می توان به ABAQUS، ANSYS و PLAXIS اشاره نمود.

۱- Cundall

۲- ITASCA (3DEC Software Company)

ویلیامز و همکارانش (۱۹۹۹) در مطالعات خود نشان دادند که می‌توان روش اجزای گسسته را به عنوان یک روش المان محدود تعمیم یافته در نظر گرفت. آن‌ها با بررسی انواع اشکال سه بعدی با ساختارهای نقطه‌ای به این نتیجه رسیدند که روش اجزای مجزا در تحلیل‌های ریزساختارهای گسسته‌ی اشکال، عملکرد دقیق و مطلوبی را از خود نشان می‌دهد [۶].

واسکنسلوس بر روی سازه‌های بنایی تاریخی با اتصال خشک واقع در کشور پرتغال که ساخته شده از انواع گرانیت هستند، مطالعه و بررسی‌های گسترده‌ای انجام داده است که در طی تحقیقات خود، مشخصات فیزیکی هر کدام از این نوع سنگ‌ها را تحت آزمایش‌های مربوطه بدست آورد. همچنین عملکرد لرزه‌ای داخل صفحه‌ی سه نوع دیوار بنایی را تحت ۲۴ آزمایش و نیز تحت سه نوع بارگذاری فشاری به منظور بررسی مقاومت، ظرفیت تغییرشکل، پاسخ بار-جاب‌جایی، مؤلفه‌های سختی و حالات شکست مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که افزایش کوچک در بار عمودی، به دلیل بهبود مکانیزم اتصال بین واحدهای بنایی، دیواری با مقاومت بیشتر را در پی خواهد داشت. افزایش قابل توجه فشار محوری، حالت شکست را از خمشی به برشی تغییر می‌دهد [۷]. گیاموندو و همکارانش در سال ۲۰۱۴ با هدف قیاس نتایج عددی و ارزیابی عملکرد استراتژی‌های مختلف محاسباتی برای انتخاب بهترین رویکرد بر روی سازه‌های بنایی با مقاومت تضعیف یافته کار کردند. لازم به ذکر است که مواد مورد استفاده و کیفیت اتصالات به‌طور قابل توجهی بر عملکرد مکانیکی ساختار کلی سازه‌ی بنایی تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان دادند که برای مقاومت برشی کم، با تأکید بر روی رفتار اتصالات، رویکرد روش اجزای مجزا که پارامترهای کمتری برای مدل‌سازی نیاز دارد، بهتر عمل می‌کند. از آنجا که بلوک‌ها، استحکام به مراتب بالاتری از ملات دارند، رفتار غیرخطی آن‌ها تأثیر زیادی بر نتایج نهایی نداشت. با اینکه در مقیاس بزرگ، هر دو رویکرد روش اجزای گسسته و روش اجزای محدود برای مدل‌سازی رفتار تا اولین ترک خوب بودند، اما رویکرد اجزای مجزا در ساختارهای دانه‌ای در مقیاس کوچک برای پیش‌بینی رفتار تا هنگام شکست، بسیار مطلوب بود [۸]. تحقیقات زیادی بر روی تقویت سازه‌های تاریخی و بررسی عددی و تجربی این نوع سازه‌ها صورت گرفته است و روش اجزای گسسته نیز در این بین با توسعه‌ی زیادی همراه بوده است که یکی از مطالعات ارزشمند در این زمینه می‌توان به تحقیقات ایسمولجانویک و همکارانش بر روی مدل المان گسسته محدود برای سازه‌های بلوکی با اتصالات خشک تقویت شده با گیره و میله فولادی اشاره نمود. آن‌ها سعی داشتند تا با چندین الگوریتم عددی، عملکرد بلوک‌های تقویت شده با گیره و میله فولادی را در دو نوع مختلف گیره و با در نظر گرفتن رفتار سیکلی، تسلیم شدگی، شکست و تأثیر بیرون کشیدن گیره و میله‌ی این سازه بنایی را بررسی کنند. نتایج این مطالعه، عملکرد بسیار مناسب این روش جهت تقویت بلوک‌ها با گیره و میله برای سازه‌های تاریخی را نشان داد [۹]. در بررسی لرزه‌ای سازه‌های میراث فرهنگی برای ارزیابی رفتار این نوع سازه‌ها در برابر بارگذاری‌های مختلف در بین محققین بسیار حائز اهمیت بوده که از این میان می‌توان به مطالعات صورت پذیرفته توسط چاکتی و همکارانش بر روی رفتار لرزه‌ای یک سازه‌ی تاریخی بنام مسجد مصطفی پاشا اشاره نمود. ایشان به روش المان مجزا و در مقیاس ۱:۱۰ این مسجد را در آزمایشگاه بر روی میز لرزان ساختند که از هفت شتاب نگاشت یک محوره و سه محوره استفاده کردند و مشخصات زلزله‌ی مونت نگرو را برای تحلیل لرزه‌ای اعمال کردند. مدل عددی به خوبی، مناطق ترک و سطح آسیب را از طریق جاب‌جایی بین بلوک‌ها پیش بینی کرد. نتایج نشان دادند که مدل‌های مبتنی بر روش اجزای گسسته را می‌توان در بررسی رفتار دینامیکی و ارزیابی بناهای تاریخی با دقت بالا به کار برد [۱۰].

بووی و همکارانش بر روی رفتار درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای دیوار بنایی با اتصالات خشک به روش المان مجزا کار کردند که با هدف بهبود شناخت رفتار مکانیکی دیوار بنایی آجری با اتصالات خشک، نتایج آزمایشگاهی مقیاس کامل را با نتایج حاصل از نرم‌افزار 3DEC بررسی کردند و بر روی مکانیزم‌های شکست و ظرفیت نهایی دیوار کار کردند. نتایج بدست آمده حاکی از این است که روش المان مجزا، روش مناسبی برای پیش‌بینی باربری نهایی و مدهای شکست دیوار بنایی تحت بارگذاری درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای با اتصالات خشک است و ابعاد بلوک‌ها و نحوه‌ی آرایش و چیدمان آنها تا حد زیادی بر روی مکانیزم شکست تأثیرگذار می‌باشد [۱۱]. در سال ۲۰۱۷ میگلینا و همکارانش بر روی مدل‌سازی المان محدود گسسته (FDEM) تحت آزمایش‌های چرخه‌ای معکوس بر روی سازه‌های بنایی غیرمسلح کار کردند. این رویکرد در دانشگاه تورنتو توسعه داده شد و نرم‌افزاری تحت عنوان Y-Brick ارائه گردید که با آزمون‌های مقیاس کامل واقعی بر روی سازه‌های بنایی در معرض بارهای سیکلی اعتبارسنجی شد که قادر به شناسایی موقعیت ترک‌های موجود در سازه‌ها

بود. نتایج نشان دهنده تطابق بسیار خوب بین آزمایش تجربی و مدل عددی است که در نتیجه، نرم افزار Y-Brick می تواند به عنوان ابزاری معتبر در زمینه مدل سازی سازه های بنایی مورد استفاده قرار گیرد [۱۲].

فوکومتو و همکارانش بر روی تأثیر شکل بلوک ها بر رفتار لرزه ای دیوارهای سازه های بنایی نگهبان و بررسی عددی با استفاده از مدل سازی المان مجزا کار کردند. مدل سازی با دو شکل بلوکی مکعب و گوه ای شکل انجام شدند و مقاومت دیوار بنایی در برابر زلزله مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیقات ایشان بیانگر این موضوع بود که مدل سازی این نوع دیوارها با روش المان مجزا پاسخ های بهتری نشان می دهند که بیانگر عملکرد مناسب این روش است. مقاومت لرزه ای در دیوار با بلوک های گوه ای شکل، بیشتر از دیوار با بلوک های مکعب مستطیل بود و تفاوت در پایداری، ناشی از اختلاف در وجود اصطکاک بین بلوک های سنگی و خاکریز بود [۱۳].

یکی از روش های نوین برای بررسی رفتار سازه های تاریخی توسط پانتو و همکارانش در طی مطالعه ای بر روی رویکرد مدل سازی المان ماکرو برای ارزیابی لرزه ای کلیساهای سنگی تاریخی ارائه گردید. در این تحقیق یک روش مدل سازی برای رفتار غیرخطی ساختمان های آجری قدیمی تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی در نظر گرفته شد. رویکرد پیشنهاد شده مبتنی بر مفهوم المان مجزا بوده و با هدف ثبت رفتار غیرخطی مدل یک کلیسا به سبک Basilica (کلیسایی با سالن طولانی) به وسیله مجموعه ای از چندین جزء گسسته صورت پذیرفت. نتایج به دست آمده، قابلیت و عملکرد روش اجزای مجزای پیشنهاد شده را برای بررسی اندرکنش پیچیده بین پاسخ های درون و خارج از صفحه ای دیوارهای بنایی نشان دادند [۱۴]. لینگل در سال ۲۰۱۷ بر روی تحلیل اجزای مجزای طاق های سنگی با معماری گوتیک^۳ تحت اثر نیروی وزن خود و جابه جایی افقی تکیه گاه ها کار کردند و چگونگی تأثیر انحراف محور مرکزی از محور طاق، بر رفتار مکانیکی طاق های رومی گوتیک و الگوهای بازشدگی ترک را بررسی کردند. نتایج نشان دادند که پس از رسیدن جابه جایی به حد نهایی خود، انرژی در محدوده مورد تحلیل، تقریباً ثابت می ماند و آستانه جابه جایی با افزایش انحراف خط مرکزی، افزایش می یابد. علاوه بر این، انحراف بیش از حد مرکز طاق می تواند منجر به شکست برشی در اطراف طاق های ضریبی شود [۱۵].

در سال ۲۰۱۸ میلادی یک روش جدید المان مجزای ماکرو یا به اختصار (DMEM) توسط تحقیقات کانیزارو و همکارانش صورت گرفت که از این روش برای ارزیابی رفتار غیرخطی سازه ای طاق بنایی استفاده گردید. این روش مبتنی بر گسسته سازی اجزاء ماکرو است که در آن هر المان صفحه ای به صورت یک چهار ضلعی مفصلی در نظر گرفته شده که با المان های مجاور از طریق رابط هایی با ضخامت صفر در ارتباط هستند و قابلیت تغییر شکل برشی داخلی به عنوان یک درجه آزادی و حرکت المان های صلب مدل ماکرو، با سه درجه آزادی را دارا می باشند. پاسخ ساختاری طاق های بنایی به شدت تحت تأثیر هندسه طاق، ابعاد بلوک سنگی و اندرکنش با مصالح خاکریز اطراف است. نتایج حاصله نشانگر توانایی بالای این روش در شبیه سازی مکانیزم اصلی شکست در سازه های طاق ضریبی با هندسه نامنظم بوده که با قیاس متعدد نتایج تحلیلی با آزمایشگاهی، قابلیت اطمینان و تناسب مدل در ارزیابی ظرفیت تحمل سازه های بنایی قوسی نمایان گردید [۱۶]. برخی منابع نیز به بررسی و مقایسه دو روش المان محدود و المان گسسته در تحلیل سازه های بنایی پرداخته اند و اشاره به این دارند که انتخاب نوع رویکرد محاسباتی بستگی به محیط و پارامترهای مسئله دارد. نتایج حاصل از این تحقیقات نشانگر عملکرد مناسب روش اجزای گسسته در ارزیابی سازه های تاریخی و بنایی بوده است [۱۷-۱۹].

۳- معرفی روش اجزای گسسته

روش المان گسسته یا به اختصار (DEM)، اولین بار در سال ۱۹۷۱ با همکاری کاندال و کارکنان شرکت ITESCA تحت کدهای کامپیوتری UDEC، برای حل مسائل دو بعدی توده سنگ درزه دار پایه ریزی شد که بعدها برای مسائل سه بعدی، نرم افزار 3DEC را ارائه نمودند. این رویکرد یکی از روش های عددی برای تعیین اندرکنش تعداد زیادی از ذرات کوچک می باشد. عملکرد این روش در سه مرحله: مقدار دهی اولیه، تعیین گام زمانی و پس پردازش صورت می گیرد. روش اجزای مجزا برای شبیه سازی حالت های شکست شامل انتشار ترک در امتداد درزه ها بسیار مناسب است. امروزه مقبولیت این روش به عنوان یک رویکرد کارآمد برای حل مسائل در محیط ناپیوسته در حال افزایش است و صنایع مختلفی از این رویکرد برای تحلیل مسائل بهره می برند. نرم افزار 3DEC مبتنی بر زبان برنامه نویسی FISH (مخفف

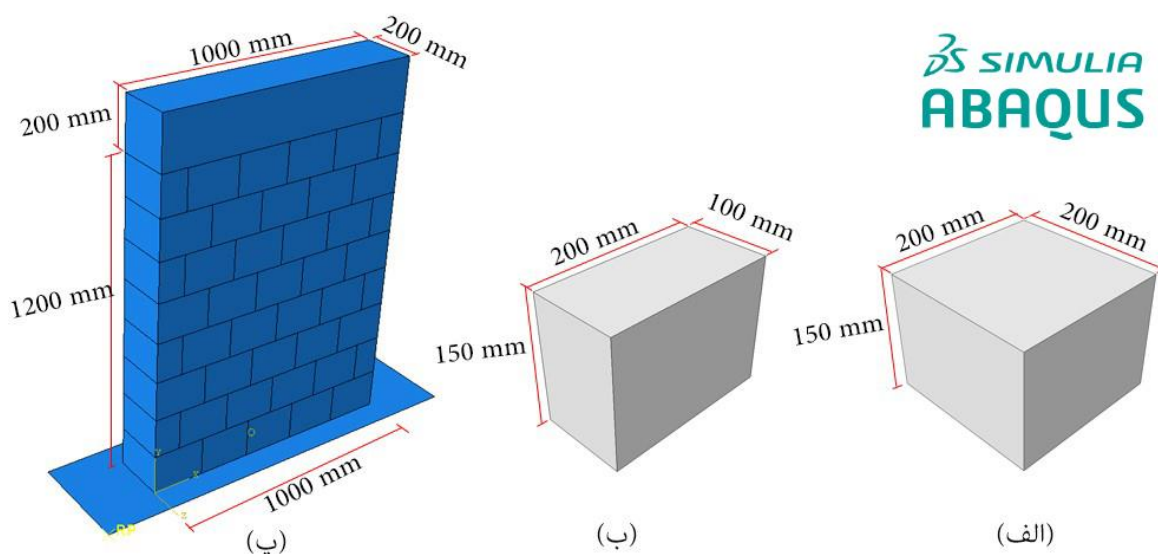
FLACISH) می‌باشد که کاربر را قادر می‌سازد تا متغیرها و عملگرهای جدیدی را بر طبق نیاز خود تعریف کند و جزو نرم‌افزارهای دستورمحور است که دارای ۹۰ دستور اصلی و بیش از ۴۰۰ تغییردهنده‌ی دستوری موسوم به کلیدواژه را داراست. در این روش از یک سری هندسه‌های بنیادی برای محاسبه‌ی اجزای مجزا بنام بلوک استفاده می‌شود که هر بلوک به عنوان یک نهاد مستقل با ID مشخص رفتار می‌کند که توسط صفحات ناپیوستگی (درزه‌ها) از یکدیگر جدا می‌شوند. بلوک‌ها توسط سطوح تماس با یکدیگر در ارتباط می‌باشند و هر سطح تماس؛ از زیرتماس‌هایی تشکیل شده است که نیروهای کنشی میان بلوک‌ها توسط آن‌ها به یکدیگر منتقل می‌شوند. بلوک‌ها می‌توانند به صورت صلب یا تغییرشکل‌پذیر مدل شوند که بلوک‌های تغییرشکل‌پذیر به نواحی چهار وجهی تفاضل محدود تقسیم می‌شوند که هر ناحیه توسط گره‌هایی بنام نقطه شبکه، با دیگر نواحی در ارتباط می‌باشند. در این نرم‌افزار چندین مدل ماده از پیش تعیین شده وجود دارند که می‌توان برای رفتار بلوک‌ها و درزه‌ها از آنها استفاده نمود [۲۰].

۴- مدل‌سازی عددی دیوار بنایی

ارزیابی عددی دیوار بنایی غیرمسلح در این مطالعه با استفاده از دو رویکرد اجزای محدود و اجزای گسسته توسط نرم‌افزارهای ABAQUS و 3DEC انجام شده است که هندسه و خصوصیات مکانیکی مدل دیوار بنایی دقیقاً بر اساس نمونه‌های تجربی آزمایش شده در پژوهش واسکنسلوس [۷]، صورت پذیرفته و سپس نتایج عددی به دست آمده با نتایج تجربی صحه‌گذاری شده‌اند. مدل‌سازی دیوار بنایی با استفاده از رویکرد میکرو ساده شده انجام گردیده است که در آن ضخامت ملات بین واحدهای بنایی و چسبندگی اتصالات برابر صفر در نظر گرفته شده است.

۴-۱- مدل‌سازی دیوار بنایی در نرم‌افزار ABAQUS

مشخصات و هندسه‌ی دیوار بنایی مورد مطالعه در این پژوهش، دقیقاً مطابق با دیوار آزمایش‌شده در پژوهش واسکنسلوس [۷]، می‌باشد که از دو نوع بلوک کامل و نیمچه تشکیل شده است که جنس آن از گرانیت دو میکا با دانه‌بندی متوسط می‌باشد. برای ایجاد اجزای ساختاری مدل دیوار بنایی از المان سه‌بعدی Solid و برای مدل‌سازی کف دستگاه آزمایش از المان Shell استفاده شده است. اتصالات بین بلوک‌ها به صورت خشک بوده و چسبندگی برابر صفر در نظر گرفته شده است. ابعاد بلوک‌های مورد استفاده در این مدل در شکل (۱) نشان داده شده است. بلوک‌ها در هشت ردیف بر روی یکدیگر مونتاژ شده که ترتیب قرارگیری بلوک‌های نیمچه و کامل، همانند مدل آزمایشگاهی می‌باشد. در قسمت فوقانی دیوار یک تیر به ابعاد $1000 \times 200 \times 200$ میلی‌متر مدل‌سازی شده است.



شکل ۱: هندسه‌ی بلوک‌ها و ابعاد دیوار بنایی: الف) بلوک کامل، ب) بلوک نیمچه، پ) مدل‌سازی دیوار بنایی با اتصال خشک در نرم‌افزار ABAQUS.

تمامی خصوصیات مکانیکی اعمال شده بر مدل بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی واسکنسلوس بوده و از آنجایی که گسیختگی دیوار ناشی از خرابی بلوک‌های مورد آزمایش نبوده؛ بر همین اساس بلوک‌های مدل به صورت الاستیک و ایزوتروپ در نظر گرفته شده‌اند. صفحه‌ی کف دیوار به صورت صلب مدل‌سازی شده و هیچ مشخصات مکانیکی بر آن اعمال نشده است. قبل از وارد کردن خصوصیات درزه‌ها در مدل دیوار بنایی، سطوح تماس بلوک‌های کامل و نیمچه نام‌گذاری و مشخص شدند. برای مدل‌سازی دیوار بنایی با اتصال خشک از یک چسب فرضی بین بلوکی استفاده شده که دارای سختی نرمال و برشی ضعیفی بوده و نشانگر خصوصیات ملات سازه-های تاریخی می‌باشد که طی گذر زمان تضعیف شده و از بین رفته است. خواص مربوط به اصطکاک با فرمول‌بندی پنالتی به کل سطوح تماس اعمال گردید. سپس بر اساس سطوح نام‌گذاری شده‌ی بلوک‌ها، خواص مربوط به چسب فرضی بر تماس‌هایی که به صورت دستی تعریف شده بودند، اعمال شد. در تعریف رفتار نرمال برای سطوح تماس بین بلوکی از سطوح سخت^۴ استفاده شده است تا از نفوذ سطوح مجاور تماسی به یکدیگر جلوگیری به عمل آید. برای اینکه بارهای افقی و قائم به راحتی بر بلوک‌های مدل انتقال یابد؛ از قید Tie برای اتصال سطوح تیر به بلوک‌های زیرین و همچنین، برای اتصال صفحه‌ی فونداسیون به بلوک‌های بستر استفاده شده است. مقادیر سختی نرمال و برشی بر تمامی سطوح مدل لحاظ گردید. یک قید از نوع جسم صلب^۵ نیز بر صفحه‌ی فونداسیون اعمال شده است. به خاطر مقادیر ضعیف تماس بین واحدها، در طی آنالیز مدل، اثر چسب فرضی به تدریج کاسته شده و در نهایت به‌طور کامل از بین می‌رود و تنها اثر اصطکاک در رفتار مماسی سطوح، تأثیرگذار خواهد بود. تمامی پارامترهای تخصیص یافته بر بلوک‌ها، تیر فوقانی و سطوح تماس در جدول (۱) و (۲) بیان شده‌اند.

جدول ۱: پارامترهای تخصیص یافته در تعریف خصوصیات مکانیکی بلوک‌های مدل و تیر فوقانی دیوار بنایی در نرم‌افزار ABAQUS.

نوع المان	پارامترهای الاستیک		
	وزن مخصوص <i>Density (kg/m³)</i>	<i>E (Gpa)</i>	<i>ν</i>
بلوک	2538.8	20.2	0.2
تیر	7850	200	0.3

جدول ۲: پارامترهای تخصیص یافته برای سطوح تماس مدل دیوار بنایی در نرم‌افزار ABAQUS.

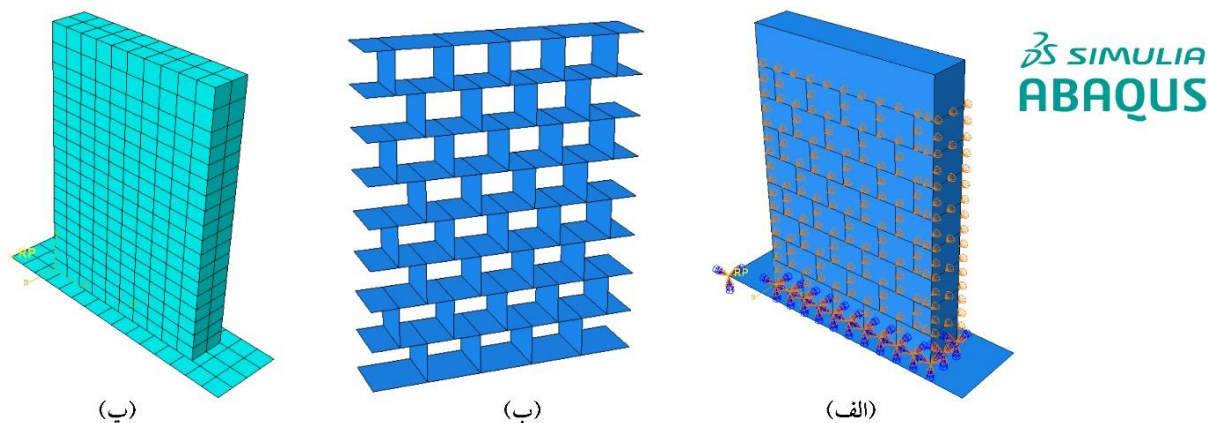
<i>K_{nn} (Mpa)</i>	<i>K_{ss} (Mpa)</i>	<i>K_{tt} (Mpa)</i>	ضرایب اصطکاک
8	3.33	3.33	0.65

شرایط مرزی مدل دقیقاً بر اساس نمونه‌های آزمایش شده توسط واسکنسلوس [۷]، بر مدل اعمال شد. از آنجایی که رفتار درون صفحه‌ای دیوار بنایی در این مدل مورد بررسی قرار گرفته است، در شرایط آغازین، از حرکت بلوک‌ها به سمت خارج از صفحه‌ی دیوار جلوگیری شد و همچنین از حرکت صفحه‌ی واقع بر کف مدل (فونداسیون) ممانعت به عمل آمد. پای دیوار توسط قید Encaster بر کف فونداسیون و به صورت تکیه‌گاه گیردار تعریف گردید. بارگذاری جانبی دیوار بنایی به صورت شبه‌استاتیکی یکنواخت بوده و از تحلیل Dynamic Explicit برای اعمال این نوع بار استفاده شده است. مدل تحت دو نوع بارگذاری قائم و افقی قرار داده شده و بار گرانشی بر تمام مدل به فونداسیون اعمال گردید. نحوه‌ی بارگذاری به این صورت بود که ابتدا بار قائم به‌طور کامل بر مدل اعمال شده و سپس بار جانبی به صورت کنترل جابه‌جایی به لبه‌ی تیر فوقانی تا تغییر مکان هدف ۳۰ میلی‌متر وارد گردید. مدل دیوار بنایی تحت سه نوع بارگذاری فشاری ۱۰۰، ۱۷۵ و ۲۵۰ کیلو نیوتن معادل تنش فشاری ۰/۵، ۰/۸۷۵، ۱/۲۵ مگاپاسکال بر روی سطح فوقانی تیر وارد شد. برای مش‌بندی تیر و بلوک‌های دیوار بنایی از المان C3D8R استفاده شده که دارای المان ۸ گرهی مکعبی شکل سه‌بعدی با فرمول‌بندی کاهش یافته و انتگرال-

۱- Hard Contact

۲- Rigid body

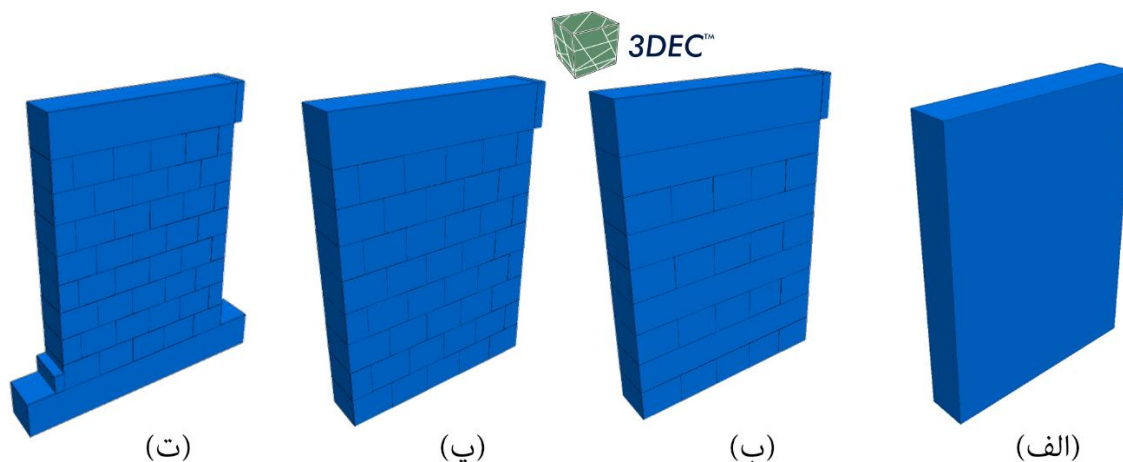
گیری گوس می‌باشد. برای مش‌بندی فونداسیون نیز از المان R3D4 استفاده شده که دارای المان چهار گرهی سه‌بعدی و صلب می‌باشد. ابعاد مش دیوار بنایی بر طبق روش حساسیت مش تعیین شده است تا افزایش تعداد المان‌ها هیچ تغییر چشم‌گیری بر نتایج ایجاد نکند. ابعاد مش مورد استفاده برای تمامی اجزای تشکیل‌دهنده‌ی مدل M1 برابر ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل (۲) نمایی از قیده‌های اعمال شده بر مدل، سطوح تماس بین بلوک‌ها و همچنین مش‌بندی دیوار بنایی نشان داده شده است.



شکل ۲: مشخصات مدل دیوار بنایی: الف) شرایط مرزی تکیه‌گاهی، ب) سطوح تماس بین بلوک‌ها، پ) مش‌بندی مدل دیوار بنایی در نرم‌افزار ABAQUS.

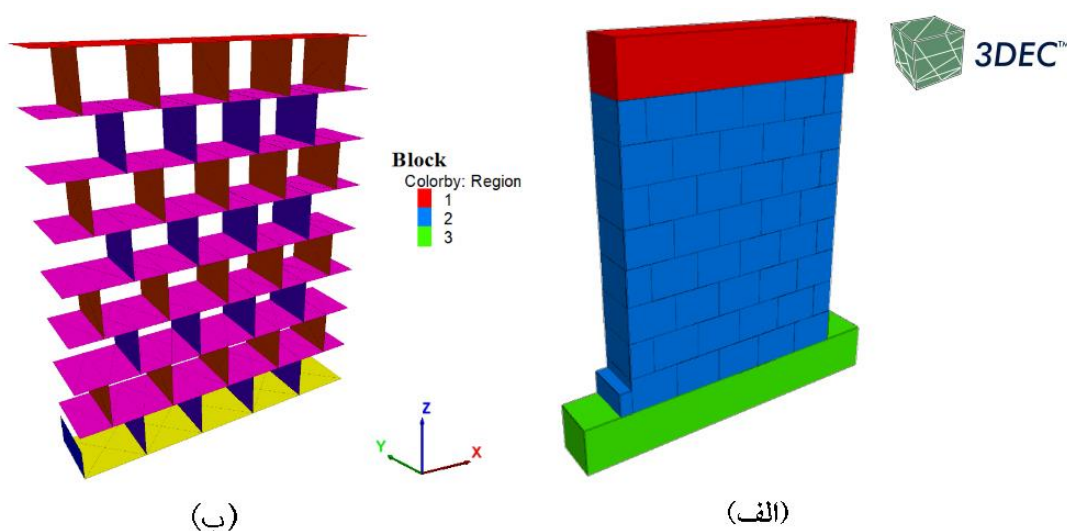
۲-۴- مدل‌سازی دیوار بنایی در نرم‌افزار 3DEC

نرم‌افزار 3DEC مبتنی بر رویکرد محاسباتی اجزای گسسته می‌باشد که نحوه‌ی مدل‌سازی در این نرم‌افزار به دو صورت انجام می‌پذیرد: ۱- تبدیل یک بلوک بزرگ به چندین بلوک کوچک‌تر، ۲- اتصال چندین بلوک کوچک جهت ایجاد یک بلوک بزرگ. که در این مطالعه از روش اول استفاده شده است. ابعاد و هندسه‌ی اجزای تشکیل‌دهنده‌ی دیوار بنایی همانند مدل آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده است. در این مطالعه ابتدا یک بلوک کامل مدل‌سازی شده و سپس توسط مجموعه‌ای از دستورات درزه‌ای، بلوک‌های کامل، نیمچه و همچنین تیر و فونداسیون دیوار بنایی ایجاد شده است. مراحل شبیه‌سازی در نرم‌افزار 3DEC در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳: مراحل شبیه‌سازی دیوار بنایی در نرم‌افزار 3DEC: الف) بلوک اصلی، ب) ایجاد بلوک‌های کامل، پ) ایجاد بلوک‌های نیمچه، ت) مدل نهایی دیوار.

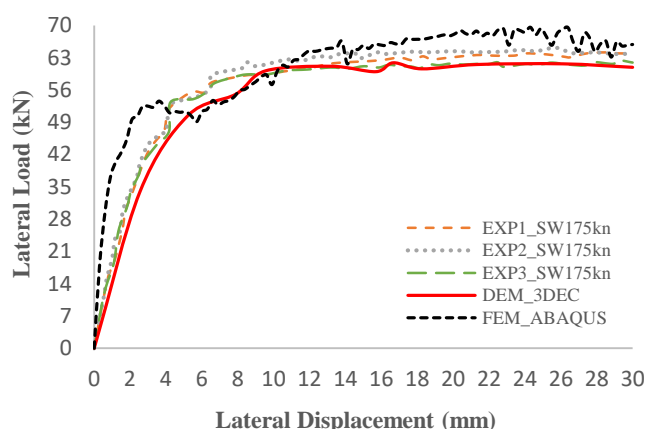
از تکنیک ناحیه بندی برای تخصیص خواص مکانیکی بر مدل استفاده گردیده و دیوار به سه بخش (تیر فوقانی، بلوکها و فونداسیون)، ناحیه بندی شده است. بلوکهای مدل به صورت الاستیک و ایزوتروپ شبیه سازی شدند. رفتار بلوکی اعمال شده به هر سه ناحیه ی مدل شامل چگالی، مدول برشی و مدول حجمی بوده است. ناپیوستگی ها به صورت رفتار درزه ای با پلاستیسیته کامل موهر کولمب شبیه سازی شدند و مقادیر سختی نرمال، سختی برشی، زاویه ی اصطکاک، زاویه ی اتساع، ضریب چسبندگی به درزه ها اعمال گردید. نحوه ی اعمال بار بر مدل دقیقاً مشابه شرایط بارگذاری آزمایشگاهی بود. نیروی گرانش و بار قائم در ابتدا به طور کامل بر مدل وارد شده و سپس بار جانبی شبه استاتیکی به روش کنترل جابه جایی بر لبه ی تیر فوقانی به صورت یکنواخت و یک طرفه اعمال گردید. در نرم افزار 3DEC برای اعمال قیود و شرایط مرزی تکیه گاهی در مدل، باید سرعت بلوکها را در جهات مورد نظر محدود نمود. بنابراین سرعت نواحی دارای شرایط مرزی جهت جلوگیری از حرکت بلوکها در جهت خارج از صفحه ی دیوار و همچنین حرکت فونداسیون و پاشنه ی دیوار محدود گردید. در شکل (۴) ناحیه بندی های مدل و همچنین درزه های ایجاد شده مدل دیوار بنایی در نرم افزار 3DEC نشان داده شده است.



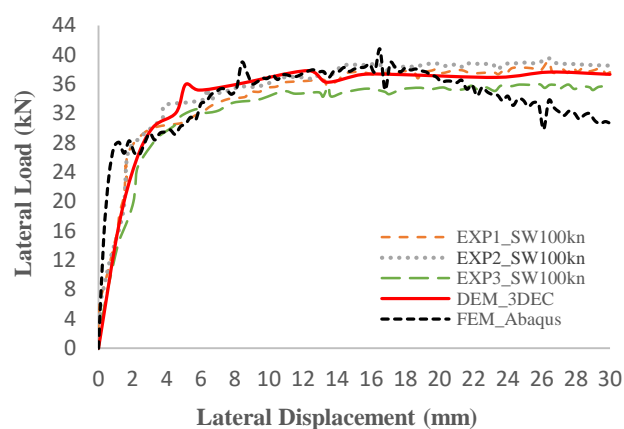
شکل ۴: مدل دیوار بنایی در نرم افزار 3DEC: الف) ناحیه بندی مدل، ب) سطوح تماس ایجاد شده در مدل دیوار بنایی در نرم افزار 3DEC.

۵- نتایج مدل سازی

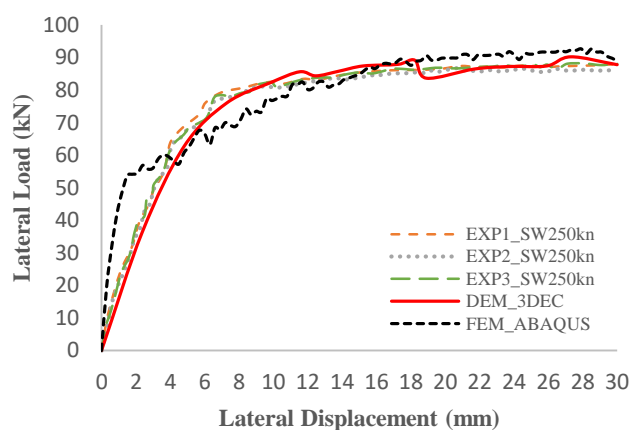
مدل بنایی با اتصال خشک تحت سه نوع بارگذاری قائم و بار جانبی به صورت کنترل جابه جایی تا تغییر مکان هدف در دو نرم افزار تحلیل گردید. نتایج عددی تحت بار ۱۰۰ کیلونیوتن، مطابقت بسیار بالایی با نتایج تجربی داشت. برای هر سطح از بار قائم، سه نمونه از دیوار بنایی با اتصال خشک مورد تحلیل قرار گرفت که نتایج حاصل از آنها با نام EXP1 تا EXP3 ارائه شده است (شکل (۵)). ناحیه ی الاستیک حاصل از نرم افزار 3DEC تقریباً منطبق بر نتایج تجربی می باشد و تا تغییر مکان هدف نیز این تطابق حفظ شده است ولی شیب منحنی ناحیه ی الاستیک حاصل از نرم افزار ABAQUS، بیشتر از شیب منحنی های حاصل از آنالیزهای تجربی می باشد. این بدین معنا است که رویکرد اجزای محدود سختی اولیه ی بالاتری برای دیوار بنایی تحت بار ۱۰۰ کیلونیوتن ثبت نموده است. در محدوده ی بار جانبی ۲۸ کیلونیوتن، بلوکها شروع به لغزش های بزرگی کرده اند که این لغزش در امتداد درزه ها باعث ایجاد نوسانات بزرگی در نمودار شده است. منحنی اجزای محدود نشان می دهد که پس از جابه جایی ۲۰ میلی متر، مدل در مقابل بارهای جانبی مقاومت خود را رفته رفته از دست داده و با کاهش ۲۷/۵ درصدی ظرفیت باربری همراه است، در حالی که نتایج تجربی ناقص این موضوع می باشند. این پدیده ممکن است به خاطر ایجاد بازشدگی ترک های برشی در دیوار بنایی باشد.



(ب)



(الف)



(پ)

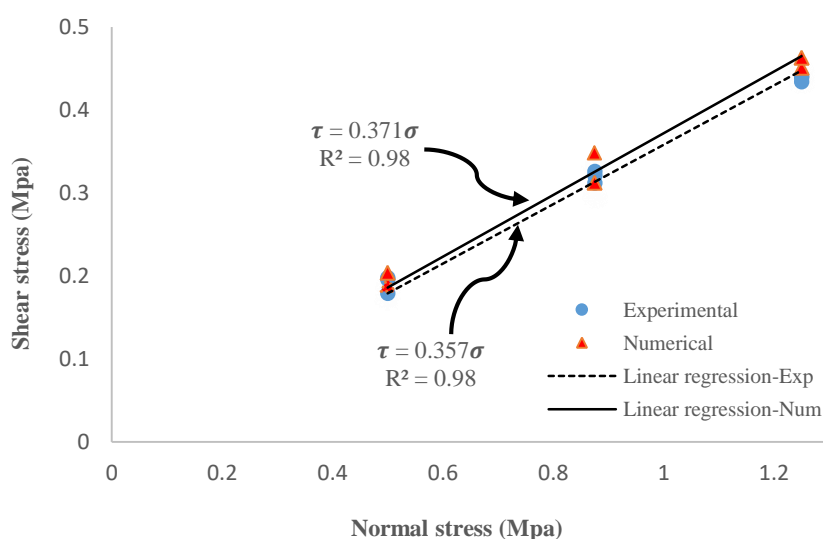
شکل ۵: مقایسه‌ی منحنی‌های بار-جاب‌جایی آزمایشگاهی با نتایج عددی دیوار بنایی: الف) تحت بار قائم ۱۰۰ کیلو نیوتن، ب) تحت بار قائم ۱۷۵ کیلو نیوتن، پ) تحت بار قائم ۲۵۰ کیلو نیوتن.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مطابقت بسیار خوبی بین نتایج عددی نرم‌افزار 3DEC و نتایج تجربی وجود دارد. با دقت به نمودارهای بدست آمده از تحلیل، می‌توان به این پدیده پی برد که تحت افزایش بار وارد بر دیوار بنایی، مقدار سختی اولیه نیز افزایش یافته است. مقادیر سختی اولیه ثبت شده از تحلیل نرم‌افزار ABAQUS اختلاف زیادی با نتایج تجربی دارند که نشانگر شکل‌پذیری کم دیوارهای بنایی در ناحیه‌ی الاستیک می‌باشد. تحت بار ۱۷۵ کیلو نیوتن، ظرفیت نهایی بار جانبی حاصل از تحلیل نرم‌افزار ABAQUS در حدود ۵/۷ درصد بیشتر از مقدار پیشینه‌ی بار جانبی حاصل از آنالیز تجربی بدست آمده است. در حالت کلی، نتایج نشانگر این موضوع هستند که رویکرد اجزای مجزا مطابقت بسیار بالایی نسبت به اجزای محدود در تحلیل و ارزیابی دیوارهای بنایی با اتصال خشک داشته و به دلیل تطابق بسیار بالا با نتایج تجربی، عملکرد این روش در آنالیز رفتار سازه‌های بنایی دقیق‌تر می‌باشد. مقادیر انرژی جذب شده، سختی اولیه و حداکثر ظرفیت بار جانبی تحت سه سطح از بار قائم فشاری در جدول (۳) بیان شده‌اند. لازم به ذکر است که میانگین درصد اختلاف با نتایج تجربی در داخل پرانتز بیان شده‌اند.

جدول ۳: مقایسه نتایج عددی و تجربی مقادیر انرژی جذب شده، مقادیر سختی اولیه و ظرفیت بار جانبی دیوار تحت چهار سطح از بار قائم فشاری (میانگین درصد اختلاف نتایج عددی با نتایج تجربی در داخل پرانتز بیان شده‌اند).

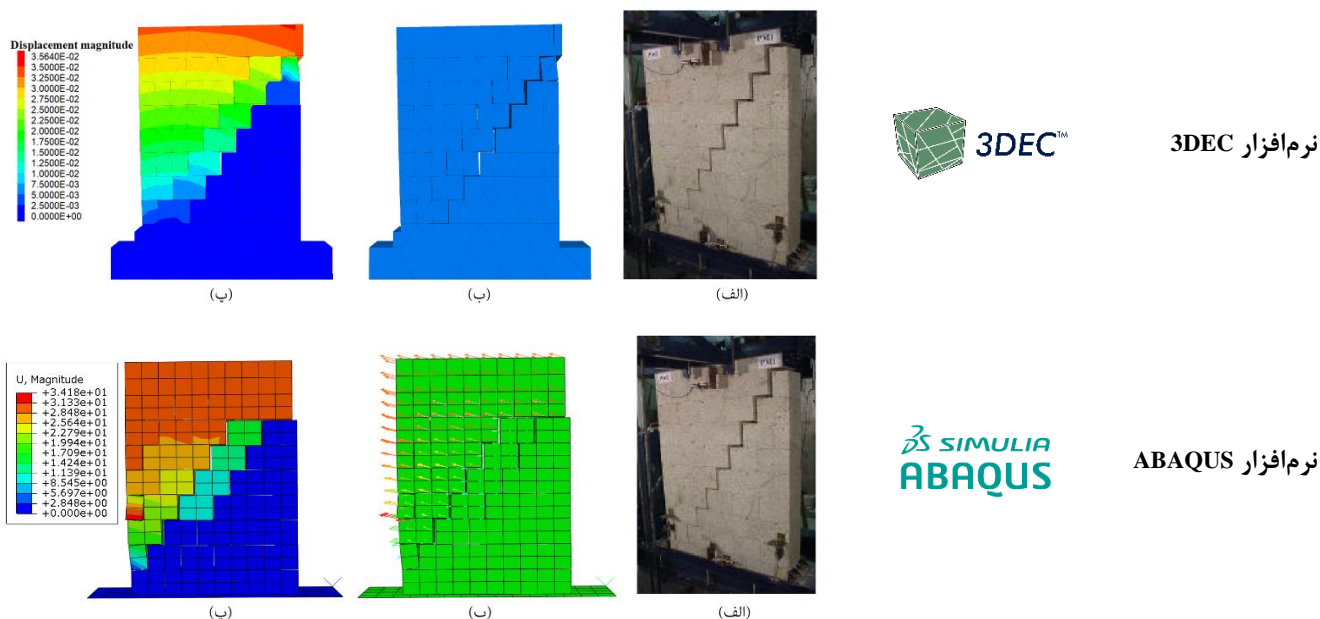
معیار	Walls	G_f EXP1 (kN.mm)	G_f EXP2 (kN.mm)	G_f EXP3 (kN.mm)	G_f 3DEC (kN.mm)	G_f ABAQUS (kN.mm)
انرژی جذب شده	SW100	1037.66	1065.64	978.17	1040.25 (1.27%)	1021.10 (0.48%)
	SW175	1715.70	1748.33	1683.98	1673.26 (2.45%)	1820.02 (5.76%)
	SW250	2318.97	2283.08	2310.66	2287.10 (0.69%)	2361.12 (2.45%)
	Walls	K_0 EXP1 (kN/mm)	K_0 EXP2 (kN/mm)	K_0 EXP3 (kN/mm)	K_0 3DEC (kN/mm)	K_0 ABAQUS (kN/mm)
سختی اولیه	SW100	13.14	12.86	12.93	13.22 (1.92%)	42.68 (229%)
	SW175	14.93	15.32	15.11	14.37 (5.69%)	46.29 (206%)
	SW250	18.62	17.35	18.57	17.45 (4.18%)	49.64 (173%)
	Walls	H_{max} EXP1 (kN)	H_{max} EXP2 (kN)	H_{max} EXP3 (kN)	H_{max} 3DEC (kN)	H_{max} ABAQUS (kN)
حداکثر ظرفیت بار جانبی	SW100	39.19	39.53	35.96	37.85 (0.97%)	40.78 (6.69%)
	SW175	64.16	65.17	62.45	62.94 (1.56%)	69.65 (8.96%)
	SW250	87.83	86.75	88.19	90.21 (2.97%)	92.70 (5.83%)

نتایج گویای این مطلب است که رویکرد اجزای گسسته پیش‌بینی بهتری از ظرفیت بار جانبی قابل تحمل دیوارهای بنایی را ارائه می‌کند و مطابقت بسیار بالایی با نتایج تجربی دارد. در حالی که با میانگین‌گیری درصد اختلافات بدست آمده از تحلیل، رویکرد اجزای محدود اختلاف ۷/۱۶ درصدی با نتایج تجربی را نشان می‌دهد و این مقدار در تحلیل حاصل از روش اجزای گسسته کمتر از ۲ درصد می‌باشد. هرچه دیوار تحت بار قائم بیشتر قرار گیرد، سختی سازه و مقدار انرژی جذب شده نیز افزایش خواهد یافت. یک تحلیل رگرسیونی اصلاح شده‌ی خطی بر اساس نتایج تجربی از ظرفیت بار جانبی بدست آمده از مدل دیوار بنایی و نتایج حاصل از تحلیل عددی، بین تنش برشی و تنش نرمال انجام گردید که در شکل (۶) ارائه شده است. ضریب همبستگی هر دو نمودار در حدود ۰/۹۸ حاصل شده است که نشانگر قطعیت در رابطه‌ی مستقیم ارائه شده برای تنش نرمال و تنش برشی می‌باشد. بر اساس شیب بالای این نمودارها، می‌توان گفت که میزان حساسیت متغیر وابسته به متغیر مستقل بسیار زیاد می‌باشد و با افزایش تنش‌های نرمال در مدل، تنش‌های برشی نیز متقابلاً افزایش چشمگیری خواهند داشت.

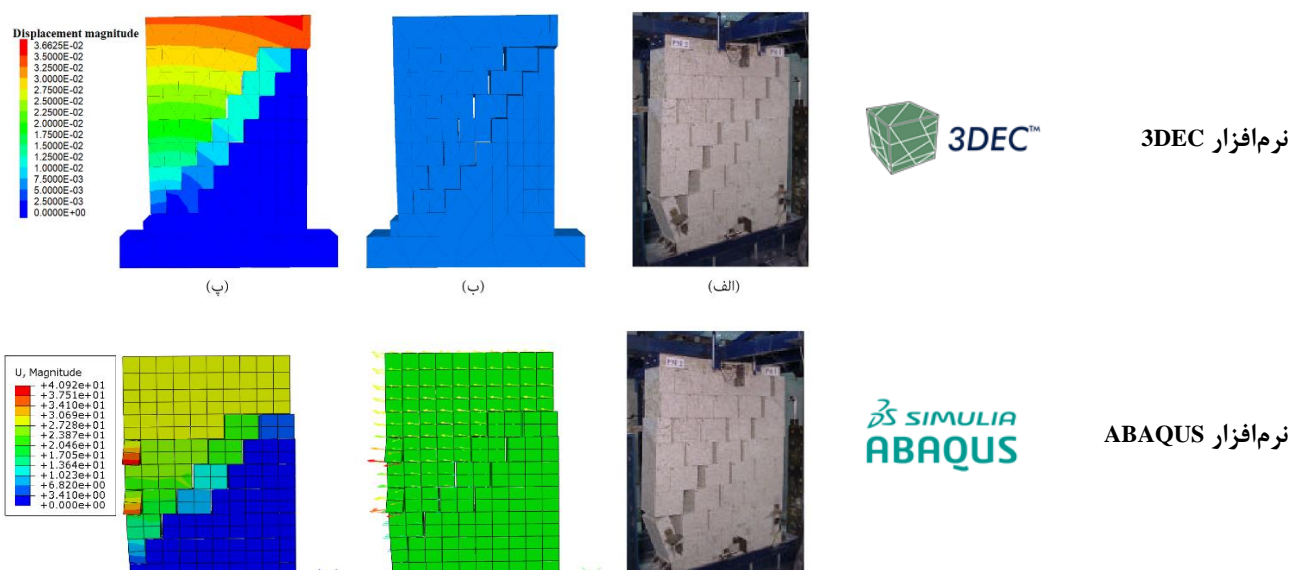


شکل ۶: رابطه‌ی بین تنش نرمال و تنش برشی بدست آمده از تحلیل رگرسیونی.

مدهای شکست منتهی از تحلیل دیوار بنایی با هر دو نرم افزار، مطابقت بسیار بالایی با نتایج تجربی داشتند. در طی آزمایش تجربی نمونه های دیوار بنایی، هیچ شکستی در بلوک ها ایجاد نگردید که علت اصلی آن می تواند به خاطر مقاومت کششی بالای بلوک ها - باشد. مد شکست دیوارها در هریک از سطوح بار قائم فشاری به صورت برشی - قطری بوده و در هیچ کدام، شکست در بلوک ها و نیز پاشنه ی دیوار رخ نداده است. مطابق اشکال (۷) و (۸)، مسیر ترک های برشی پیش بینی شده توسط تحلیل نرم افزار 3DEC انطباق خوبی با مسیر به دست آمده از نمونه های آزمایشگاهی را نشان می دهد و نشانگر غالب بودن اثر نسبت ابعادی به مقدار بار قائم در مد شکست دیوار و مسیر ترک است.



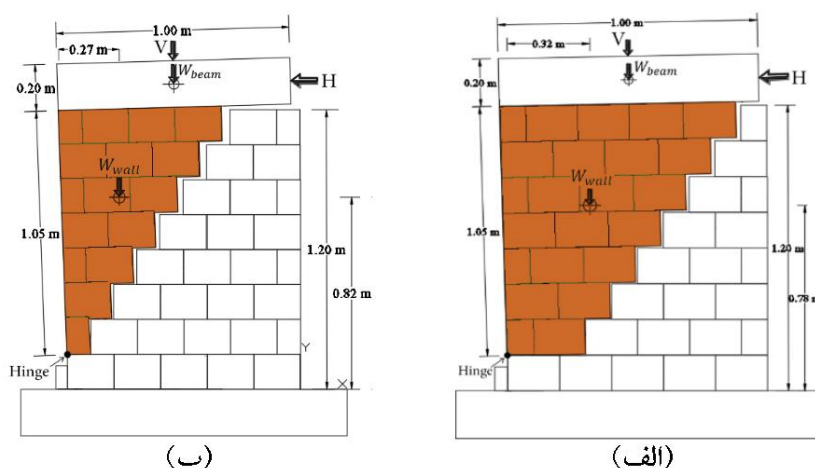
شکل ۷: مقایسه ی مد شکست منتهی از تحلیل مدل دیوار بنایی در دو نرم افزار تحت بار قائم ۱۰۰ کیلونیوتن: (الف) نمونه ی دیوار ترک خورده ی آزمایشگاهی، (ب) شکست ایجاد شده در مدل عددی، (پ) گرادیان جابه جایی ایجاد شده در مدل.



شکل ۸: مقایسه ی مد شکست منتهی از تحلیل مدل دیوار بنایی در دو نرم افزار تحت بار قائم ۱۷۵ کیلونیوتن: (الف) نمونه ی دیوار ترک خورده ی آزمایشگاهی، (ب) شکست ایجاد شده در مدل عددی، (پ) گرادیان جابه جایی ایجاد شده در مدل.

۶- روش های تقریبی محاسبه ظرفیت بار جانبی

ظرفیت بار جانبی دیوار بنایی در بررسی رفتار آن بسیار حائز اهمیت می باشد و به این خاطر در این پژوهش، با استفاده از دو روش: مدل ساده شده و روش STM (بندهای مورب توزیع شده) به بررسی ظرفیت بار جانبی دیوار بنایی پرداخته شده است. با استفاده از روش ساده شده که بر پایه روابط استاتیکی و لنگرگیری حول محور مشخص استوار است، رابطه ای برای بار جانبی بدست آمده تا به راحتی بتوان تخمینی از مقدار آن، تحت انواع بارهای قائم فشاری را بدست آورد. مختصات مرکز ثقل نواحی مختلف در نرم افزار AutoCAD محاسبه شده است. به دلیل اینکه تطابق بسیار بالایی بین مد شکست تحت بار قائم ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلونیوتن وجود داشت، فقط دو نوع مد شکست برای محاسبه روابط استفاده شده است. در شکل (۹) نمایی از مدل ساده شده از مد شکست دیوار بنایی تحت بار قائم ۱۰۰ و ۱۷۵ کیلونیوتن نشان داده شده است.



شکل ۹: مدل ساده شده از مد شکست دیوار بنایی: الف) تحت بار قائم ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلونیوتن، ب) تحت بار قائم ۱۷۵ کیلونیوتن.

همانطور که در شکل (۹) مشاهده می شود، با لنگرگیری حول محور مشخص شده و محاسبه ی وزن نواحی تیر و دیوار، برای هر سطح از بار قائم، روابط خطی (۱) و (۲) به صورت زیر حاصل می شوند:

$$H = 2.49 + 0.5V \quad (۱) \text{ برای مد شکست حالت الف)}$$

$$H = 2.064 + 0.5V \quad (۲) \text{ برای مد شکست حالت ب)}$$

در روابط (۱) و (۲)، V : بیانگر بار قائم وارد بر تیر فوقانی دیوار و H : ظرفیت بار جانبی دیوار بنایی می باشد. مقایسه ی مقادیر منتهی از روابط فوق برای ظرفیت بار جانبی دیوار بنایی تحت هر سطح از بار قائم در جدول (۴) نشان داده شده است.

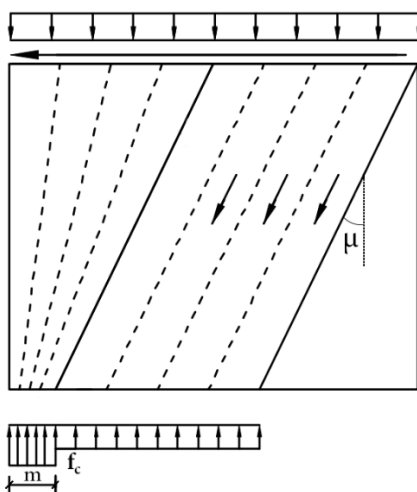
جدول ۴: مقادیر ظرفیت بار جانبی دیوار بنایی تحت سه سطح از بار قائم فشاری با روش مدل ساده شده.

Walls	$H_{max} \text{ EXP1}$ (kN)	$H_{max} \text{ EXP2}$ (kN)	$H_{max} \text{ EXP3}$ (kN)	$H_{max} \text{ Calculate}$ (kN)
SW100	39.19	39.53	35.96	52.06 (36.2%)
SW175	64.16	65.17	62.45	89.98 (40.7%)
SW250	87.83	86.75	88.19	127.07 (44.9%)

نتایج حاصل از بار جانبی بدست آمده از رابطه های (۱) و (۲)، به طور میانگین اختلافی در حدود ۴۰/۶ درصدی با نتایج تجربی داشته که با افزایش بار قائم وارد بر تیر فوقانی دیوار بنایی، اختلافات بیشتری با نتایج تجربی ملاحظه می شود. مقدار این اختلاف با افزایش

بار قائم بیشتر شده و نشانگر خطای بالای این روش در تخمین ظرفیت بار جانبی در بارهای قائم بزرگ می‌باشد. در ادامه بررسی ظرفیت دیوار بنایی با رویکرد STM آمده که روش دقیق‌تری نسبت به مدل ساده می‌باشد.

مدل بندهای مورب توزیع شده^۶ که بر گرفته از مدل STM^۷ می‌باشد؛ برای بررسی و ارزیابی ظرفیت بار جانبی دیوارهای برشی در پیوست A آیین‌نامه بتن ACI 318-02 بیان شده است، اما تقریباً هیچ اطلاعاتی در رابطه با کاربرد این رویکرد در سازه‌های بنایی ارائه نشده است. دلیل اصلی این امر نیز نبود اطلاعات کافی از رفتار ماهیت ترد سازه‌های بنایی و کاهش در انتقال تنش‌های کششی داخل صفحه‌ی دیوار می‌باشد. روکا [۲۱] در سال ۲۰۰۴ بر روی این مدل ساده شده به منظور ارزیابی مقاومت برشی دیوارهای بنایی تحقیقات گسترده‌ای انجام دادند. مدل STM در واقع یک روش طراحی کاربردی می‌باشد که همه‌ی اثرات بار ناشی از نیروی محوری، برشی، خمشی و حرارتی را به‌طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد. شکل (۱۰) نشانگر مدل بندهای مورب توزیع شده برای مدل دیوار بنایی می‌باشد.



شکل ۱۰: مدل بندهای مورب توزیع شده برای دیوار بنایی با اتصال خشک.

بر طبق شکل فوق، نحوه‌ی توزیع بار به صورت بندهای اصلاح شده می‌باشد که تنش‌های نرمال و برشی توسط بندهای ترسیم شده‌ی فشاری و کششی به انتهای دیوار انتقال می‌یابند که علت اصلی شکست‌های پاشنه‌ی دیوار نیز به خاطر همین انتقالات بار به گوشه‌ی سمت چپ دیوار می‌باشد که منجر به شکست بلوک در آن گوشه می‌گردد. طول ناحیه‌ی پلاستیک ایجاد شده در زیر بندهای اصلاح شده با نماد m نشان داده شده است؛ که برابر رابطه‌ی (۳) می‌باشد:

$$m = V / t f_c \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳)، V : بار قائم فشاری، t : ضخامت دیوار بنایی و f_c : مقاومت فشاری دیوار بنایی می‌باشد. در مدل STM، شیب بند-های موازی نسبت به خط قائم برابر مقدار ضریب اصطکاک در نظر گرفته می‌شود که با پارامتر μ در شکل (۱۰) نشان داده شده است. ضریب اصطکاک دیوار بنایی برابر ۰/۶۵ و مقاومت فشاری دیوار برابر ۷۳ مگاپاسکال می‌باشد. بر طبق روابط ارائه شده توسط روکا، اگر طول ناحیه‌ی پلاستیک کوچک‌تر از $L - h \times \mu$ باشد، برای محاسبه‌ی ظرفیت بار جانبی دیوار بنایی از رابطه‌ی (۴) استفاده می‌گردد:

$$H = V \times \mu \left[1 - \left(\frac{h}{2L} \right) \times \mu (1 - \nu) \right] \quad (4) \text{ اگر } m \leq L - h \times \mu \text{ باشد:}$$

در رابطه (۴)، V : بار قائم وارد بر تیر فوقانی دیوار، μ : ضریب اصطکاک، L : طول دیوار بنایی، h : ارتفاع دیوار بنایی و ν ضریبی می‌باشد که با استفاده از رابطه‌ی (۵) بدست می‌آید:

$$\nu = m / L = V / t L f_c \quad (5)$$

۱- Diagonal smeared struts model
۲- Strut and Tie model

در رابطه‌ی (۵)، m : طول ناحیه‌ی پلاستیک، L : طول دیوار بنایی، V : بار قائم وارد بر تیر فوقانی دیوار بنایی، t : ضخامت دیوار بنایی و در نهایت f_c : مقاومت فشاری دیوار بنایی می‌باشد.

با جای گذاری مقادیر بیان شده در رابطه‌ی (۴) برای هر سطح از بار قائم فشاری، ظرفیت بار دیوار بنایی بدست می‌آیند که در جدول (۵) بیان شده‌اند. مقادیر داخل پارانتر، بیانگر میانگین درصد اختلاف نتایج حاصل از روش STM با نتایج تجربی می‌باشد.

جدول ۵: مقادیر حداکثر ظرفیت بار جانبی دیوار بنایی تحت سه سطح از بار قائم فشاری به روش STM.

Walls	$H_{max} \text{ EXP1}$ (kN)	$H_{max} \text{ EXP2}$ (kN)	$H_{max} \text{ EXP3}$ (kN)	$H_{max} \text{ Calculate}$ (kN)
SW100	39.19	39.53	35.96	39.47 (3.27%)
SW175	64.16	65.17	62.45	68.84 (7.69%)
SW250	87.83	86.75	88.19	98.02 (11.91%)

همان‌طور که از جدول (۵) پیداست، مقادیر حاصل از این روش نسبت به روش ساده شده، اختلافات کمتری با نتایج تجربی دارند و با افزایش بار قائم وارد بر دیوار، این اختلافات نیز افزایش می‌یابد. در حالت کلی، هرچه مقدار بار قائم وارد بر دیوار بنایی با اتصال خشک افزایش یابد، به‌طوری که از حد مقاومت بلوک‌ها فراتر نرود تا منجر به شکست واحدها گردد، تماس‌های سخت‌تری بین بلوک‌ها برقرار شده و از لغزش‌های ناگهانی بلوک‌ها در سطوح تماس جلوگیری شده و ظرفیت بار جانبی دیوار نیز افزایش می‌یابد. اگر مقدار بار قائم بزرگ‌تر باشد، احتمال شکست در پاشنه‌ی دیوار (ناحیه‌ی پلاستیک) افزایش می‌یابد. استفاده از رابطه‌ی (۴) جهت تخمین ظرفیت بار جانبی دیوار بنایی با اتصال خشک، زمانی پیشنهاد می‌شود که دیوار تحت شرایط بارگذاری مورد نظر، دارای مد شکست برشی-قطری باشد.

۷- نتیجه‌گیری

نمودارهای بار جانبی به جابه‌جایی منته‌جه از رویکرد اجزای محدود (نرم‌افزار ABAQUS) و رویکرد اجزای گسسته (نرم‌افزار 3DEC) برای دیوار بنایی، مطابقت بسیار بالایی با نتایج تجربی داشتند. مدهای شکست حاصل از دو نرم‌افزار مذکور تطابق بالایی را با ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌ی آزمایشگاهی نشان دادند که مسیر ترک‌های ایجاد شده در نتایج، دقیقاً منطبق بر نواحی محتمل بروز ترک بودند. پارامترهای میزان جذب انرژی، ظرفیت بار جانبی و سختی اولیه برای مدل دیوار بنایی با اتصال خشک مورد محاسبه و بررسی قرار گرفتند که در این بین، روش اجزای محدود سختی اولیه بیشتری نسبت به نتایج تجربی نشان داد که خود دلیلی بر ضعف روش اجزای محدود در ارزیابی رفتار سیستم‌های ناپیوسته می‌باشد. منحنی حاصل از رویکرد اجزای محدود برای دیوار بنایی تحت بار قائم ۱۰۰ کیلو نیوتن نشانگر این موضوع است که پس از جابه‌جایی ۲۰ میلی‌متر، مدل در مقابل بارهای جانبی مقاومت خود را از دست داده و با کاهش ۲۷/۵ درصدی ظرفیت باربری مواجه گردید و این در حالی است که نتایج تجربی ناقص این موضوع می‌باشند. منحنی‌های منته‌جه از دو رویکرد نشان دادند که با افزایش بار قائم، مقدار سختی اولیه نمودار بار-جابه‌جایی و ظرفیت بار جانبی دیوار افزایش می‌یابد و به دلیل ایجاد تماس‌های سخت در سطوح تماس بین بلوکی، منجر به کاهش شکل‌پذیری و افزایش مدول یانگ دیوار می‌شود. درصد اختلاف‌های کم بدست آمده از نتایج رویکرد اجزای گسسته با نتایج تجربی، نشان دادند که رویکرد اجزای گسسته پیش‌بینی دقیق‌تری از دیوارهای بنایی با اتصال خشک نسبت به اجزای محدود ارائه می‌دهد. رویکرد اجزای محدود به طور میانگین اختلاف ۷/۱۶ درصدی در تخمین ظرفیت بار جانبی دیوار بنایی نسبت به نتایج تجربی داشته است. در حالی که این اختلاف در تحلیل حاصل از روش اجزای گسسته کمتر از ۲ درصد بوده است. در این پژوهش با استفاده از یک روش مدل ساده شده از دیوار بنایی، روابطی جهت بدست آوردن ظرفیت بار جانبی دیوارهای بنایی حاصل گردید که با صحت‌سنجی مقادیر حاصل از این روابط با نتایج تجربی، میانگین درصد اختلافی در حدود ۴۰/۶ درصد حاصل گردید در حالی که مقادیر ظرفیت بار جانبی بدست آمده از روش STM، اختلاف بسیار کمتری با نتایج تجربی داشتند که نشان دهنده‌ی توانایی بالای روش STM در ارزیابی ظرفیت بار جانبی قابل تحمل دیوار بنایی می‌باشد.

مراجع

- [۱] Cundall, P. A., St'rack, O. D. L., (1979), "A discrete numerical model for granular assemblies", Géotechnique, PP.47-65.
- [۲] Li, T., Silva, P.F., Belarbi, A., Nanni, A. and Myers, J.J., (2001), "Retrofit of un-reinforced infill masonry walls with FRP", Journal of Composites for Construction, Vol. 5, pp.559-563.
- [۳] ElGawady, M.A., Lestuzzi, P. and Badoux, M., (2005), "Aseismic retrofitting of unreinforced masonry walls using FRP", Composites Part B: Engineering, Vol. 37(2-3), pp.148-162.
- [۴] Tomazevic, M., (1999), "Earthquake-resistant design of masonry buildings", Imperial College Press, ISBN 1-86094-066.
- [۵] Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C., Topp, L. P., (1956), "Stiffness and deflection analysis of complex structures", Journal of Aeronautical Society, Vol. 23, pp. 805-823.
- [۶] Williams, J.R., Connor, R., (1999), "Discrete Element Simulation and the Contact Problem", Archives of Computational Methods in Engineering, PP.279-304.
- [۷] Vasconcelos, Graça, (2005), "Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: characterization of granites and behavior of ancient masonry shear walls", Minho University, Doctoral Thesis in Civil Engineering.
- [۸] Giamundo, V., Sarhosis, V., Lignola, G.P., Sheng, Y., Manfredi, G., (2014), "Evaluation of different computational modelling strategies for the analysis of low strength masonry structures", Elsevier, pp.160-169.
- [۹] Smoljanovic, Hrvoje, Zivaljic, N., Nikolic, Z., (2015), "A finite-discrete element model for dry stone masonry structures strengthened with steel clamps and bolts", Elsevier, pp.117-129.
- [۱۰] Çaktı, Eser, Saygılı, Özden, Lemos, Jose V., Oliveira, Carlos S., (2016), "Discrete element modeling of a scaled masonry structure and its validation", Elsevier, pp.224-236.
- [۱۱] Bui, T.T., Limam, A, Sarhosis, V., (2017), "Discrete element modelling of the in-plane and out-of-plane behavior of dry-joint masonry wall constructions", Elsevier, pp.277-294.
- [۱۲] Miglietta, Paola Costanza, Bentz, Evan C., Grasselli, (2017), "Finite/discrete element modelling of reversed cyclic tests on unreinforced masonry structures", Engineering Structures, Elsevier, pp.159-169.
- [۱۳] Fukumoto, Yutaka, Yoshida, Jun, Sakaguchi, Hide, "The effects of block shape on the seismic behavior of dry-stone masonry retaining walls: A numerical investigation by discrete element modeling", Elsevier, (2014).
- [۱۴] Pantò, B., Cannizzaro, F., Calì, I., (2016), "3D macro-element modelling approach for seismic assessment of historical masonry churches", Elsevier, pp.40-59.
- [۱۵] Lengyel, G., (2017), "Discrete element analysis of gothic masonry vaults for self-weight and horizontal support displacement", Elsevier, pp.195-209.
- [۱۶] Cannizzaro, F., Pantò, B., Caddemi, S., (2018), "A Discrete Macro-Element Method (DMEM) for the nonlinear structural assessment of masonry arches", Engineering Structures, Elsevier, Vol. 168, pp.243-256.
- [۱۷] Foti, D., Vacca, V., & Facchini, I., (2018), "DEM modeling and experimental analysis of the static behavior of a dry-joints masonry cross vaults", Construction and Building Materials, Vol. 170, pp.111-120.
- [۱۸] Baraldi, D., Cecchi, A., & Tralli, A., (2015), "Continuous and discrete models for masonry like material: A critical comparative study", European Journal of Mechanics-A/Solids, Vol. 50, pp.39-58.
- [۱۹] Senthivel, R., & Lourenço, P. B., (2009), "Finite element modelling of deformation characteristics of historical stone masonry shear walls", Engineering structures, Vol. 31(9), pp.1930-1943.
- [۲۰] UDEC, "Universal Distinct Element Code", Version 5.2, Manual of 3DEC, User's Guide, Minneapolis: ICG 2011.
- [۲۱] Roca, P., (2004), "Simplified methods for assessment of masonry shear-walls", International Workshop on Masonry Walls and Earthquakes, Guimarães, pp.101-118.