

ارزیابی رفتار برشی دیوارهای بنایی تقویت شده به وسیله الیاف پلیمری و شاتکریت

محسن ایزدی نیا^{*}، رحمت‌الله پورجعفری^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
۲- کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

چکیده

خسارت‌های گسترده در تعداد زیادی از ساختمان‌های موجود تحت برش درون صفحه، نیاز به تکنیک‌های مقاوم‌سازی سازه‌ای برای ساختمان‌های بنایی را نشان می‌دهد. FRP و شاتکریت تکنیک‌های مقاوم‌سازی هستند که می‌توانند برای تقویت و ترمیم سازه‌های بنایی استفاده شوند. دیوارهای بنایی تقویت شده با FRP و شاتکریت می‌توانند افزایش زیادی در مقدار برخی از پارامترهای رفتاری مثل مقاومت، جذب انرژی و سختی نشان دهند. اما مقایسه و تأثیر شاتکریت و FRP به صورت یکطرفه بر رفتار برشی دیوارهای بنایی تحت نیروهای جانبی تا کنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی روش‌های مدل‌سازی عددی به معرفی دو مدل آزمایشگاهی متفاوت از نوع دیوار آجر رسی تقویت شده با نوارهای FRP افقی و بلوک سیمانی تقویت شده با شاتکریت پرداخته می‌شود. در انتها به مدلسازی و تحلیل شش دیوار تحت بارهای جانبی با استفاده از تحلیل غیر خطی بارافزون در نرم افزار آباکوس پرداخته شده است. نتایج آنالیزهای انجام شده بیانگر اثر مطلوب تقویت دیوارهای بنایی غیرمسلح با شاتکریت یکطرفه و FRP صفحه‌ای می‌باشد. به طوری که سختی و مقاومت دیوار بواسطه افزودن شاتکریت در یک طرف دیوار به میزان قابل توجه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین میزان افزایش جذب انرژی برای تقویت کننده‌های FRP برای دیوارهای بنایی ۶۰ الی ۷۰ درصد و برای شاتکریت ۷۰ الی ۹۰ درصد مشاهده شده است بنابراین تقویت دیوارهای بنایی با شاتکریت یکطرفه اثری مطلوب تر نسبت به FRP دارد.

کلمات کلیدی: برش درون صفحه، FRP، شاتکریت، دیوارهای بنایی، اجزای محدود، آباکوس

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:					
10.22065/JSCE.2018.102443.1361	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.102443.1361	۱۳۹۸/۰۹/۰۱	۱۳۹۶/۱۲/۱۲	۱۳۹۶/۱۲/۱۲	۱۳۹۶/۱۱/۲۷	۱۳۹۶/۰۸/۰۵

محسن ایزدی نیا

izadinia@iaun.ac.ir

*نویسنده مسئول:

پست الکترونیکی:

Evaluation of Shear Behaviour of Masonry Walls Strengthened by FRP Laminates and Shotcrete

Mohsen Izadinia^{1*}, Rahmatollah Pourjaafary²

1-Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
2-M.Sc. in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

ABSTRACT

Extensive damages in a large number of existing buildings under in-plane shear has shown the need of structural strengthening techniques for masonry structures. FRP and shotcrete are strengthening techniques which can be used to repair or strengthen masonry structures. Masonry walls strengthened with FRP and shotcrete can greatly increase some behaviour parameters such as strength, energy absorption and stiffness, but the comparison and effect of single-faced FRP and shotcrete layers on shear behavior of masonry walls under lateral loads have not been studied so far. In this research in order to evaluate and validate numerical modelling approaches, two kinds of experimental masonry wall models made by clay bricks and concrete blocks strengthened by FRP and shotcrete were introduced. At the end, modelling and analysis of six walls under lateral loads using the nonlinear analysis of pushover in Abaqus software has been investigated. The results of the analysis show the feasible effect of strengthening unreinforced walls with single-faced shotcrete and FRP, so that the stiffness and strength of the wall increases significantly due to the addition of shotcrete to one side of the wall. Also, amount of energy absorption increase for FRP is 60-70% and for shotcretes 70 to 90%. Therefore strengthening by single-faced shotcrete has a more feasible effect.

ARTICLE INFO

Received: 27/10/2017
Revised: 16/02/2018
Accepted: 03/03/2018

Keywords:

In-plane shear,
FRP,
Shotcrete,
Masonry wall,
Finite elements,
Abaqus.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.102443.1361

*Corresponding author: Mohsen Izadinia
Email address: izadinia@iaun.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده از مصالح بنایی یکی از قدیمی ترین روش‌های ساخت و ساز در ایران و جهان به حساب می‌آید به طوری که بخش عمده‌ای از ساختمان‌ها را تشکیل می‌دهد. با وجود مصالح جدید که در دهه اخیر به جای مصالح بنایی استفاده شده، روش اتصال آجرها یا بلوک‌ها به همدیگر مانند قرن‌ها قبل می‌باشد. بنابراین بررسی آسیب‌پذیری و مطالعه روی حالت‌های شکست این سازه‌ها در اثر زلزله یا باد دارای اهمیت خاصی می‌باشد. ویژگی‌های مهم سازه‌های بنایی سادگی ساخت، صلبیت، دوام، پایداری، مقاومت در مقابل صدا و آتش می‌باشد. نظر به اینکه در ساختمان‌های بنایی تنها عامل مقاوم در برابر نیروی افقی همچون باد یا زلزله دیوار برشی بنایی بوده و انهدام آن‌ها معادل تخریب کل ساختمان و فرو ریختن سقف می‌باشد، از این رو وقوع زمین لرزه‌های مکرر در کشور منجر به تلفات فراوان و خسارت مالی شدید می‌گردد و بنابر این حفظ جان هموطنان و سرمایه‌های ملی اتخاذ تدابیری جهت افزایش مقاومت ساختمان‌ها ضروری می‌باشد. ارزیابی و مقاوم‌سازی دیوارهای برشی بنایی کلید این موضوع برای پاسخ‌های ایمن تر این ساختمان‌ها تحت بارهای جانبی مثل طوفان و زلزله می‌باشد. به طوریکه بررسی رفتار داخل صفحه و مقایسه علمی بین مدل‌های مختلف دیوار برشی بنایی پس از تقویت با الگوها و مصالح متفاوت همچون FRP و شاتکریت در مناطق زلزله خیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد. کامپوزیت‌های الیاف پلیمری (FRP) و شاتکریت که در دهه‌های اخیر دستخوش پیشرفت شده به عنوان یک تقویت کننده اختیاری برای مقاوم‌سازی ساختمان‌ها به کار می‌رود و عامل گرایش برخی از محققان به دیوار بنایی و این دو نوع تقویت کننده برای دیوارهای بنایی است، از قبیل: الساندری و بریبا در سال ۱۹۸۷ [۱]، مهدی حاج اسماعیلی در سال ۲۰۰۱ [۲]، والوزی و همکاران در سال ۲۰۰۲ [۳]، م. گودرزی دهریزی در سال ۲۰۰۷ [۴]، ساننا مریا و الکینو در سال ۲۰۱۰ [۵]، روکا و ارایزا در سال ۲۰۱۰ [۶]، ا. کالایی و م. زمان کبیر در سال ۲۰۱۲ [۷]، کونتسینقا و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۸]، م. ح. سقفی و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۹]، گاتولی و همکاران در همان سال [۱۰]، ایی وی لین و همکاران در همان سال [۱۱].

۲- تئوری دیوار برشی

۲-۱- مکانیزم‌های شکست داخل صفحه دیوارهای برشی

مکانیزم‌های شکست داخل صفحه (مودهای شکست) یک دیوار بنایی در چهار گروه تقسیم می‌شوند که در شکل (۱) ارائه شده‌اند.

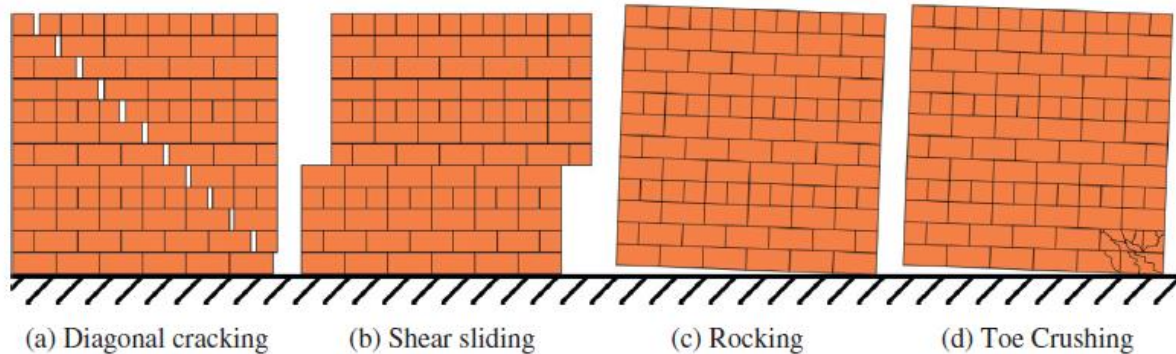
۱- مکانیزم شکست برشی (پله‌ای) (Diagonal cracking): این نوع شکست با ترک‌های قطری (عموماً با الگوی پله‌ای) همراه است و در دیوارهایی با نسبت کوچک ارتفاع به طول (پهن) $L \gg H$ اتفاق می‌افتد در این حالت بخش جدا شده، بر روی بخش پایینی می‌لغزد و تغییرشکل‌های بزرگ رخ می‌دهد (شکل ۱ a).

۲- مکانیزم لغزش (Shear sliding): این نوع شکست عموماً برای دیوارهای نسبتاً کوتاه و با نیروی محوری کوچک و یا در دیوارهای با ملات ضعیف اتفاق می‌افتد (شکل ۱ b).

۳- مکانیزم شکست خمشی (Rocking): این مکانیزم گسیختگی که در شکل (۱ c) دیده می‌شود، همراه با ظهور ترک‌های کششی در بندهای افقی واقع در منطقه کششی، آغاز می‌گردد. این ترک‌ها از پایین‌ترین بند افقی آغاز شده و متناسب با افزایش بار، در جهت افقی و قائم (ظهور ترک در سایر بندهای افقی) گسترش می‌یابند. عموماً اگر بار قائم کم باشد، ترک‌های مذکور گسترده تر بوده و ترک‌خوردگی با لغزش در بندهای افقی نیز همراه می‌شود.

۴- مکانیزم خردشدگی پنجه (Toe crushing): هنگامی که بار قائم بزرگ باشد، شکست خمشی با شکست در گوشه فشاری دیوار همراه است. این نوع شکست غالباً در دیوارهای بلند ($L \ll H$) رخ می‌دهد که ترک‌هایی نیز در قسمت پاشنه و پنجه ایجاد می‌کند (شکل ۱ d).

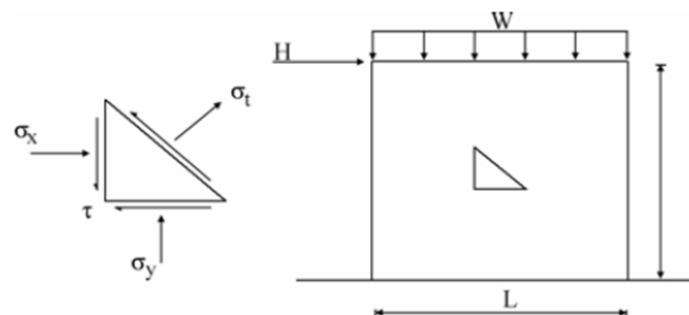
۵- مکانیزم‌های ترکیبی (ظهور همزمان ترک در آجرها و ملات‌ها): این نوع شکست معمولاً برای دیوارهای مربعی $L=H$ رخ می‌دهد (کشش در پاشنه، فشار در پنجه و برش در طول قطر). در این حالت ترک‌ها از بندهای افقی آغاز شده و از میان بلوک‌ها عبور می‌کنند. در حقیقت این نوع مکانیزم شکست، نوع دیگری از مکانیزم شکست برشی است که ترک‌ها از میان بلوک‌ها هم عبور می‌کنند. [۱۲].



شکل ۱: دیوار برشی تحت بار قائم و افقی و نقاط بحرانی آن: (a) شکست قطری (برشی) (b) لغزش برشی (c) خمشی (d) خردشدگی پنجه

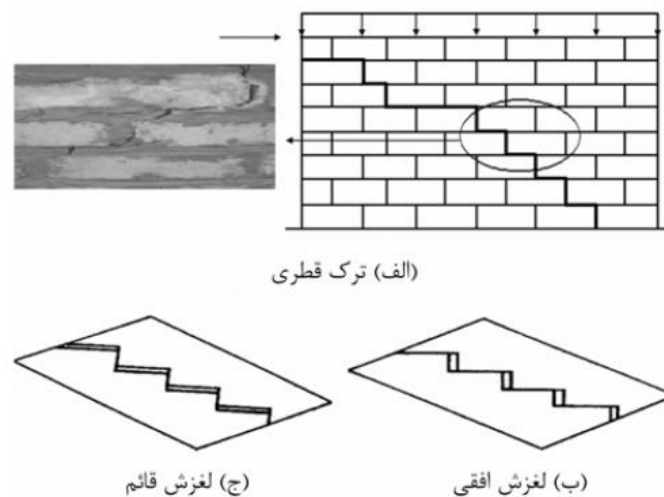
۲-۲- بررسی لغزش ناشی از شکست برشی

هنگامی که یک دیوار برشی تحت اثر همزمان نیروی افقی و قائم قرار می‌گیرد، وضعیت تنش‌ها در داخل اجزاء دیوار مطابق (شکل ۲) خواهد بود. ملاحظه می‌شود که سه سطح شکست شامل سطح مایل، سطح افقی و سطح قائم وجود دارد.



شکل ۲: وضعیت تنش‌ها در المان یک دیوار برشی تحت اثر همزمان نیروهای افقی و قائم

شکست روی سطح مایل از نوع کششی است و از میان خود آجرها می‌گذرد بنابراین زمانی که σ_t به حد مقاومت کششی آجرها برسد شکست آغاز می‌شود. معمولاً آجرها از مقاومت کششی نسبتاً خوبی برخوردارند و این شکست رخ نمی‌دهد، زیرا قبل از آن که σ_t به حد مقاومت آجر نزدیک شود، لغزش برشی روی سطوح افقی یا قائم صورت می‌گیرد. در شرایطی که از آجر سوراخدار و ملات بسیار قوی استفاده شود، مقاومت برشی درزهای افقی و قائم افزایش یافته و شکست روی سطح مایل اتفاق می‌افتد و از میان آجرها می‌گذرد که البته در عمل این حالت کمتر پیش می‌آید. شکست برشی روی یکی از سطوح افقی و قائم اتفاق افتاده، موجب لغزش افقی یا قائم می‌شود. به دلیل تفاوت چشمگیر مقاومت برشی آجر فشاری نسبت به ملات، سطوح لغزش همواره از درزهای افقی و قائم می‌گذرد (شکل ۳) و در هر حال، خواه منشأ شکست لغزشی افقی باشد و خواه قائم، یک ترک قطری در دیوار ایجاد می‌شود [۹].



شکل ۳: حالات شکست برشی: الف) ترک قطری ب) لغزش افقی ج) لغزش قائم

۳- نحوه مدلسازی دیوار مصالح بنایی توسط نرم افزار و اعتبارسنجی محاسبات عددی

۳-۱- انواع روش های مدلسازی دیوارهای آجری

مدلسازی دیوارهای بنایی به طور کلی به ۲ دسته مدلسازی میکرو (Micro) و مدلسازی ماکرو (Macro) تقسیم بندی می شود. لازم به ذکر است که مدلسازی عددی دیوارهای بنایی بسیار پیچیده می باشد و مدل های ارائه شده تا کنون نیز، هر کدام دارای یک سری محدودیت ها و مزایا هستند که کاربر با توجه به نیاز و امکانات خود از هر کدام از آنها می تواند استفاده کند.

۳-۱-۱- مدلسازی میکرو (Micro)

این نوع مدلسازی نیز خود به دو دسته مدلسازی میکرو دقیق و میکرو ساده شده^۱ تقسیم می شود. برای مدلسازی عددی یک دیوار بلوک سیمانی به شیوه مدلسازی میکرو دقیق، بلوک سیمانی، ملات و سطح تماس بین بلوک و ملات به طور جداگانه برای بلوک و ملات در نظر گرفته می شود. به طور عمده این نوع مدلسازی از نظر ساخت مدل و انجام محاسبات بسیار پیچیده است و عمدتاً برای مدلسازی در ابعاد بزرگ کاربردی ندارد و معمولاً برای مدل سازی دیوارهای در ابعاد کوچک به کار برده می شود.

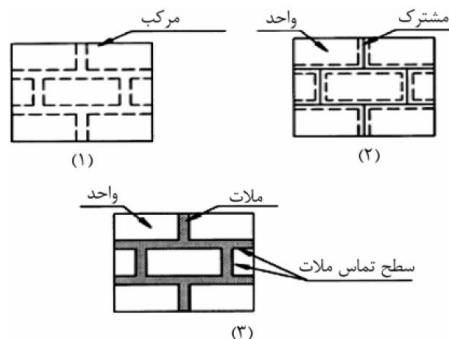
در مدلسازی میکرو ساده شده کار به این ترتیب است که بلوک سیمانی به همراه نیمی از ملات اطراف آن به صورت یک بلوک معادل در نظر گرفته می شود و رفتار ملات و سطح تماس بین بلوک و ملات در رفتار بلوک های معادل و سطح تماس بلوک های معادل در مدل، گنجانده می شود.

۳-۱-۲- مدلسازی ماکرو (Macro)

به دلیل پیچیدگی قابل توجه مدلسازی به روش میکرو و حجم محاسبات قابل توجه در آن، شیوه دیگر مدلسازی دیوار بلوک سیمانی به صورت یک ماده یکدست و هموزن در نظر گرفته می شود. از این رو برای شبیه سازی رفتار دیوار بلوک سیمانی از یک ماده معادل که دارای ویژگی ها و خصوصیات معادل بلوک و ملات است و می تواند رفتار دیوار بلوک سیمانی که ترکیبی از رفتار بلوک، ملات و سطح تماس بین آنها می باشد را نمایش دهد، استفاده می شود. بدیهی است که مدلسازی و انجام محاسبات در این روش بسیار ساده تر از روش میکرو است. از سوی

^۱ Simplified micro modelling

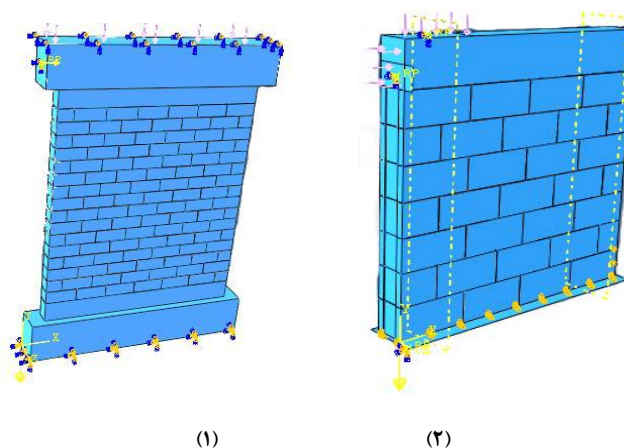
دیگر، دقت روش میکرو به مراتب بیشتر از روش ماکرو است. از این رو کاربر باتوجه به نیاز خود و امکانات موجود، از هر کدام از این شیوه‌های مدل‌سازی استفاده می‌کند. در شکل ۴، سه روش مدل‌سازی مذکور برای دیوارهای بلوک سیمانی نشان داده شده است.



شکل ۴: انواع روش‌های مدل‌سازی دیوارهای بلوک سیمانی (۱) مدل‌سازی ماکرو (۲) مدل‌سازی میکرو ساده شده (۳) مدل‌سازی میکرو دقیق

۳-۲- روش مدل‌سازی دیوار در تحقیق حاضر

در تحقیق حاضر از روش میکرو ساده شده برای مدل‌سازی دیوارهای مصالح آجری و بلوک سیمانی استفاده شده است. با توجه به اینکه بررسی رفتار دیوارها به سه صورت غیر مسلح، تقویت شده با FRP و شاتکریت در نظر می‌باشد، نامگذاری دیوارها به ترتیب به صورت BURM، BFRM و BSRM انجام می‌گیرد در نامگذاری‌ها B به معنی Brick، M بیانگر Masonry و UR، FR، SR به ترتیب به معنای Unreinforced، FRP-Reinforced و Shotcrete-Reinforced می‌باشند که برای دیوارهای بلوک سیمانی از CB که به معنای Concrete-Block می‌باشد در نامگذاری‌ها استفاده شده است. مدل‌سازی بتن تیرهای مرزی، شاتکریت و بلوک‌های سیمانی و آجرهای رسی در نرم‌افزار آباکوس توسط اجزای مکعبی هشت گرهی سه بعدی ($C3D8R^2$) با سه درجه آزادی در هر گره و مدل‌سازی میلگردهای شاتکریت توسط اجزای خرابایی دو گرهی سه بعدی با سه درجه آزادی در هر گره ($B31^3$) انجام شده است. صفحات پلیمری کربنی (FRP) توسط اجزای چهارگره‌ای پوسته مدل شده است. در شکل ۵ شرایط مرزی و بارگذاری دیوارهای مصالح آجری و بلوک سیمانی در نرم‌افزار آباکوس نمایش داده شده است. تحلیل مدلها به صورت کنترل شونده توسط نیرو می‌باشد. اندرکنش بین بلوکها یا آجرها در محل رجهای افقی و قائم به کمک اجزای میان رویه با خواص چسبندگی و اصطکاک لحاظ شده است.



شکل ۵: شرایط مرزی و بارگذاری (۱) دیوار آجری (۲) دیوار بلوک سیمانی

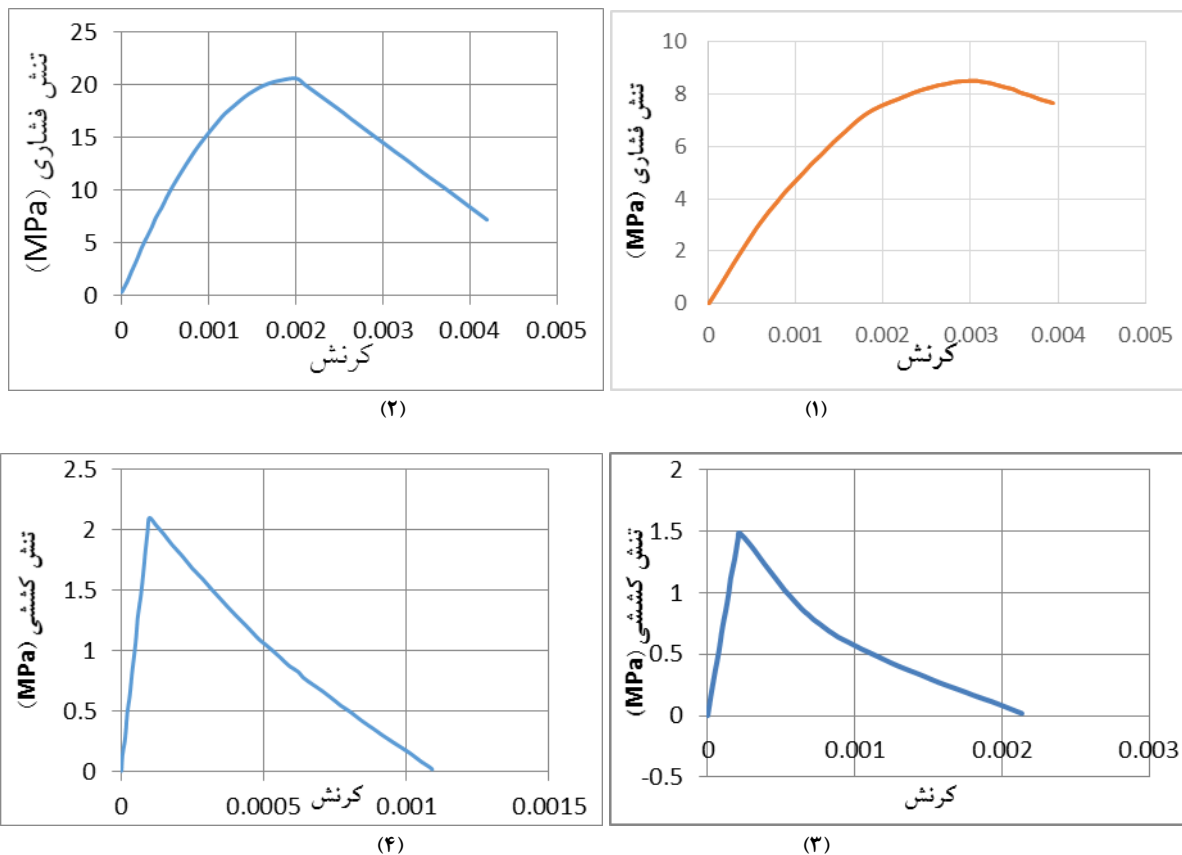
² 8-node linear brick, reduced integration with hourglass control

³ 2-node linear 3-D truss

۳-۳- مدل‌های رفتاری اجزای مختلف دیوار و مقادیر پارامترها در روش میکرو ساده شده

۳-۳-۱- مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن^۴

در نرم‌افزار المان محدود آباکوس رفتار غیرخطی مصالح ترد را می‌توان به سه روش مدل ترک پخشی^۵، مدل شکست ترد^۶ و مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن تعریف کرد. هر یک از این مدل‌ها دارای مزایایی می‌باشند که می‌توانند بر حسب نیاز مورد استفاده قرار گیرند [۱۳]. مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن تنها مدلی است که در هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی قابل استفاده است. در این پژوهش و اعتبار سنجی‌های آن برای مدل کردن بتن در تیرهای فوقانی و تحتانی، شاتکریت، بلوک‌های سیمانی و آجرهای رسی از مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن استفاده شده است و اندرکنش بین بلوک‌ها یا آجرهای رسی مطابق بخش ۳-۵ لحاظ شده است. برای تعریف رفتار بتن مربوط به تیرهای مرزی و شاتکریت تحت فشار محوری از منحنی رفتاری که توسط کنت و پارک ارائه شده است [۱۴] و برای بلوک‌های سیمانی و آجرهای رسی تحت فشار محوری از منحنی رفتاری کاشیک [۱۵] استفاده شده است. منحنی رفتاری اجزای مزبور (تیرهای مرزی، شاتکریت، بلوک‌های سیمانی و آجرهای رسی) در حالت کشش محوری براساس مدل کنت و پارک [۱۴] تعریف شده است. منحنی برخی از این اجزا در فشار و کشش محوری مطابق شکل ۶ می‌باشد.



شکل ۶: منحنی رفتاری تنش-کرنش اجزا (۱) بلوک سیمانی تحت فشار (۲) بتن تحت فشار (۳) بلوک سیمانی تحت کشش (۴) بتن تحت کشش

در جداول ۳ و ۴ مقادیر خواص مصالح اجزای دیوار بر اساس منحنی‌های رفتاری و مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن در تحقیق حاضر اشاره شده است.

⁴ Concrete Damage Plasticity

⁵ Smeared Cracking

⁶ Brittle cracking

جدول ۱: مقادیر خواص در مدل برای تیرهای مرزی و شاتکریت

E (MPa) مدول الاستیسیته	ν ضریب پواسون	f'_c (MPa) مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای	f_t (MPa) مقاومت کششی	g (Kg/m ³) وزن مخصوص	ψ زاویه اتساع	K نسبت ثابت دوم تانسور تنش روی نصف النهارهای کششی و فشاری	e پتانسیل خروج از مرکزیت	(Fb ₀ / Fc ₀) نسبت مقاومت فشاری دوماحوره به مقاومت فشاری تک‌محوره	پارامتر ویسکوزیته
22088	0.2	20.6	2.06	2400	35	0.666	0.1	1.16248	0.001

جدول ۲: مقادیر خواص در مدل برای بلوک‌های سیمانی

E (MPa) مدول الاستیسیته	ν ضریب پواسون	f'_c (MPa) مقاومت فشاری منشور بنایی	f_t (MPa) مقاومت کششی	g (Kg/m ³) وزن مخصوص	ψ زاویه اتساع	K نسبت ثابت دوم تانسور تنش روی نصف النهارهای کششی و فشاری	e پتانسیل خروج از مرکزیت	(Fb ₀ / Fc ₀) نسبت مقاومت فشاری دوماحوره به مقاومت فشاری تک‌محوره	پارامتر ویسکوزیته
7000	0.15	8.5	1.5	2000	25	0.67	0.1	1.16	0.001

جدول ۳: مقادیر خواص در مدل برای آجرهای رسی

E (MPa) مدول الاستیسیته	ν ضریب پواسون	f'_c (MPa) مقاومت فشاری منشور بنایی	f_t (MPa) مقاومت کششی	g (Kg/m ³) وزن مخصوص	ψ زاویه اتساع	K نسبت ثابت دوم تانسور تنش روی نصف النهارهای کششی و فشاری	e پتانسیل خروج از مرکزیت	(Fb ₀ / Fc ₀) نسبت مقاومت فشاری دوماحوره به مقاومت فشاری تک‌محوره	پارامتر ویسکوزیته
6618	0.22	11	1.5	2000	25	0.67	0.1	1.16	0.001

۳-۳-۲- مدل رفتاری صفحات پلیمر کربنی (FRP)

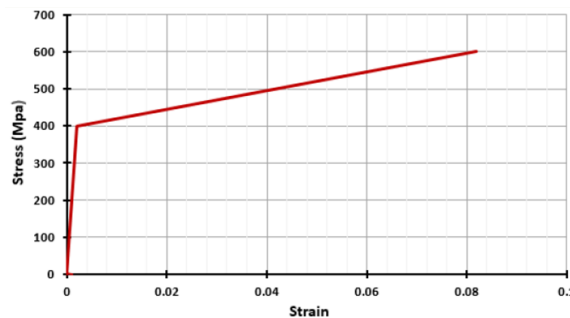
رفتار پلیمر کربنی ارتجاعی و خطی در محاسبات عددی لحاظ گردید. با توجه به عدم تفاوت چشمگیر بین مدل‌های ایزوتروپیک و ارتوتروپیک برای FRP [۱۶] در تحقیق حاضر رفتار FRP به صورت ایزوتروپ مدل شده است. در جدول ۴ مقادیر خواص هندسی و مکانیکی صفحات پلیمر کربنی (FRP) مشاهده می‌شود.

جدول ۴: مقادیر خواص هندسی و مکانیکی صفحات پلیمری (FRP)

E (MPa) مدول الاستیسیته	ν ضریب پواسون	f_t (MPa) مقاومت کششی حداکثر	g (Kg/m ³) وزن مخصوص	ضخامت اسمی (mm)	ابعاد FRP جهت تقویت دیوارهای آجری (m×m)	ابعاد FRP جهت تقویت دیوارهای سیمانی (m×m)
250000	0.28	2250	1000	25	2.0×1.976	1.56×1.33

۳-۳-۳- مدل رفتاری فولاد آرماتورهای شاتکریت

تنش تسلیم و نهایی آرماتورها به ترتیب برابر ۳۹۶/۱۳ و ۵۹۴/۲ مگاپاسکال و کرنش نهایی آرماتورها برابر با ۰/۰۸ می‌باشد. منحنی رفتاری فولاد آرماتور به صورت دو خطی در کشش و فشار مطابق شکل ۷ در محاسبات عددی تعریف گردید.



شکل ۷: منحنی رفتاری تنش - کرنش آرماتور

۳-۴- بررسی اعتبار مدل سازی

در این پژوهش جهت اعتبارسنجی مدل ها از دو پژوهش مختلف در زمینه تقویت دیوارهای بنایی با شاتکریت و FRP به ترتیب توسط محمودرضا ماهری در سال ۱۳۹۱ [۱۷] و سانتا مریا و الکینو^۷ از کشور اسپانیا در سال ۲۰۱۱ میلادی [۵] بهره گرفته شده است.

۳-۵- تعریف اندرکنش بلوک ها

از آنجایی که رفتار ملات تنها در محل رجهای افقی تعریف می شود، به رجهای افقی چسبندگی^۸ و اصطکاک^۹ و به رجهای قائم تنها اصطکاک نسبت داده می شود.

در نرم افزار ضریب اصطکاک برای درزهای قائم ۰/۹۵ و درزهای افقی ۰/۷۵ در نظر گرفته شده است [۱۷].

برای خاصیت چسبندگی بین سطوح نمودار یا مدل تنش- جدایی^{۱۰} استفاده شده است. این مدل هر دو حالت، از بین رفتن چسبندگی الاستیک و خرابی چسبندگی را شامل می شود.

ناحیه آغازین مدل شروع رفتار الاستیک خطی را نشان می دهد و برای مقادیر سختی در المانهای میان رویه یا پیش فرض نرم افزار استفاده شده است. با تخصیص پارامتر خرابی (که در ادامه گفته می شود) به محاسبات ناحیه پایانی نمودار الاستیک خطی نخواهد بود. s و t مختصات محلی سه بعدی در جهات عمود بر سطح میان رویه و دو جهت اصلی دیگر هستند.

بخش خرابی شامل رفتار آغاز خرابی و گسترش خرابی می باشد. جهت تعریف بخش آغازین خرابی، نرم افزار چهار ضابطه تحت عنوان معیار شکست برای مدل سازی رفتار ملات به طور پیش فرض به صورت روابط ۱ الی ۴ ارائه می دهد [۱۳]:

$$\max \left\{ \frac{t_n}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1 \quad (1) \quad \text{معیار حداکثر تنش}$$

$$\max \left\{ \frac{\delta_n}{\delta_n^0}, \frac{\delta_s}{\delta_s^0}, \frac{\delta_t}{\delta_t^0} \right\} = 1 \quad (2) \quad \text{معیار حداکثر جدایش}$$

$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (3) \quad \text{معیار تنش مرتبه دوم}$$

$$\left\{ \frac{\delta_n}{\delta_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\delta_s}{\delta_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\delta_t}{\delta_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (4) \quad \text{معیار جدایش مرتبه دوم}$$

در محاسبات عددی از معیار تنش مرتبه دوم^{۱۱} به عنوان معیار شکست المانهای تماسی یا میان رویه استفاده شده است. آغاز خرابی هنگامی روی می دهد که معادله تنش درجه دوم شامل نسبت های تنش های اصلی به تنش بیشینه، به عدد یک برسد. تکامل خرابی بر پایه جابجایی مؤثر می باشد. بیشینه تنش ها در سه جهت اصلی در نرم افزار برای بلوک سیمانی به صورت زیر تعریف می شود.

⁷ H. Santa-Maria and P. Alcaino

⁸ Cohesion

⁹ Friction

¹⁰ Traction-Separation

¹¹ Quadratic stress criterion

تنش کششی ملات $t_n^o = 0.41 \text{ MPa}$

تنش برشی ملات $t_s^o = t_t^o = 0.58 \text{ MPa}$

مقادیر تنش به محض رسیدن به اولین خرابی، به پارامتر D (متغیر خرابی) وابسته بوده و از روابط ۵ الی ۸ به دست می آید:

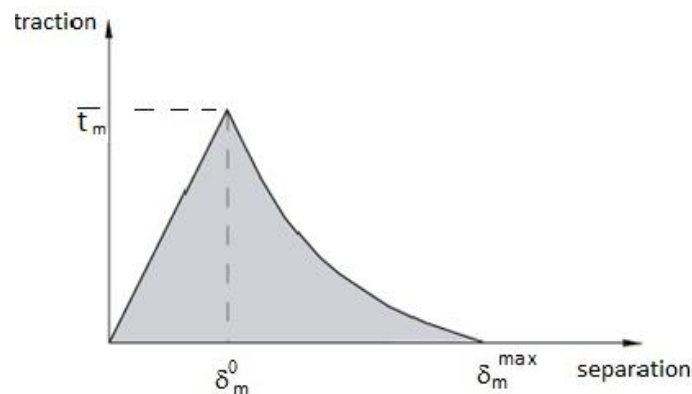
$$t_n = \begin{cases} (1-D)\bar{t}_n, & \bar{t}_n \geq 0 \\ \bar{t}_n, & \bar{t}_n < 0 \end{cases} \quad \text{در غیر اینصورت (بدون خسارت به سختی فشاری)} \quad (5)$$

$$t_s = (1-D)\bar{t}_s \quad (6)$$

$$t_t = (1-D)\bar{t}_t \quad (7)$$

$$D = 1 - \left\{ \frac{\delta_m^o}{\delta_m^{max}} \right\} \left\{ 1 - \frac{1 - \exp\left(-\alpha \left(\frac{\delta_m^{max} - \delta_m^o}{\delta_m^f - \delta_m^o} \right)\right)}{1 - \exp(-\alpha)} \right\} \quad (8)$$

متغیر خرابی میزان نرم‌شدگی را پس از وقوع اولین خرابی از صفر تا مقدار ۱ به صورت نمایی بیان می‌کند. در روابط بالا t تنش اسمی، δ جداشدگی متناظر و علامت‌های $-$ و 0 در پارامتر به معنای بیشینه مقدار آن می‌باشد. δ_m^o برابر جابجایی نسبی مؤثر در خرابی کامل، δ_m^{max} برابر مقدار بیشینه جابجایی مؤثر در طول تاریخچه بارگذاری که مقدار آن ۶ میلی متر در نظر گرفته شده و α پارامتر نمایی بی بعدی است که نرخ سیر تکاملی خرابی را تعیین می‌کند و مقدار آن ۱۰ در نظر گرفته شده است. منحنی نهایی تکامل خرابی در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: خاصیت چسبندگی بین سطوح در مدل تنش-جدایی

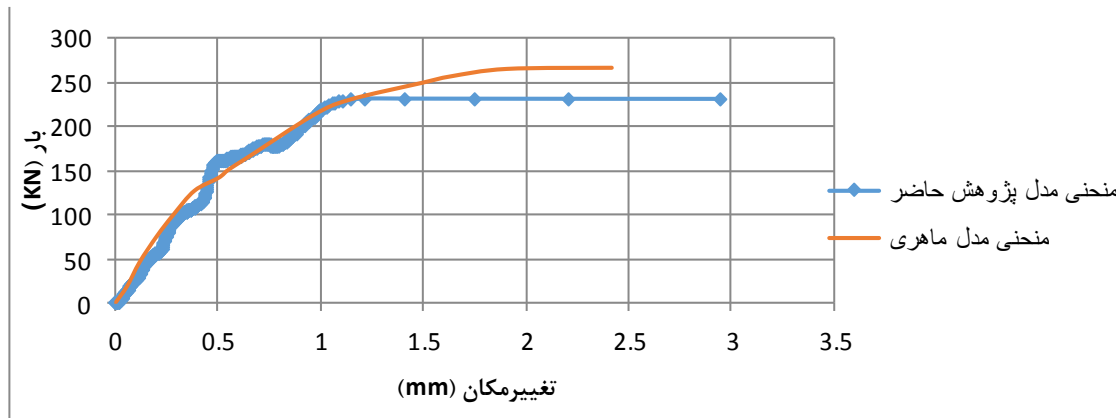
برای تعریف اندرکنش‌ها از ماژول interaction در نرم‌افزار استفاده می‌شود. مشخصات میان رویه استفاده شده در پژوهش جهت تعریف در نرم‌افزار، به طور خلاصه در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: اندرکنش درزها

مقدار	نام پارامتر
0.75	ضریب اصطکاک درزهای افقی
0.95	ضریب اصطکاک درزهای قائم
0.41	مقاومت کششی (Mpa)
0.58	مقاومت برشی (Mpa)
6	جابجایی پلاستیک (mm)

۴- پاسخ برشی دیوار تقویت شده با شاتکریت

منحنی‌های صحت‌سنجی نیرو- تغییر مکان جانبی دیوار بلوک سیمانی تقویت شده حاصل از نتایج ماهری [۱۷] و منحنی به دست آمده از مدل‌سازی عددی این پژوهش تا دررفت نسبی ۰/۱۸ درصد، در شکل ۹ نشان داده شده است.

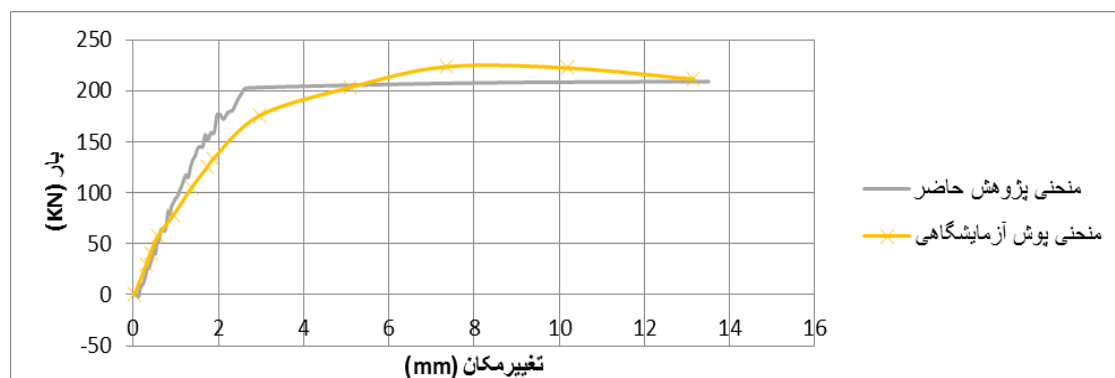


شکل ۹: منحنی نیرو- تغییر مکان جانبی دیوار بلوک سیمانی در دررفت ۰/۱۸ درصد

۵- پاسخ برشی دیوار تقویت شده با FRP

جهت بررسی اعتبارسنجی از مقاله سانتا مریا و الکینو^{۱۲} بهره گرفته شده است. ایشان چندین نمونه دیواربنایی تحت شرایط مختلف را بررسی کرده و برای تقویت دیوارها با لایه های FRP از دو نوع چیدمان افقی و قطری استفاده کردند. دیوارها با مقیاس واقعی و از آجر رسی توخالی^{۱۳} ساخته شده‌اند. نوارهای تقویتی FRP به کار رفته از الیاف کربنی می‌باشند. نمونه بررسی شده در این پژوهش H-NSRM-3*100-1 می‌باشد. این نمونه دارای چیدمان افقی^{۱۴} (H)، دیوار بدون تقویت میلگرد^{۱۵} (NSRW) دارای سه ردیف لایه الیاف کربنی در هر وجه با عرض ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد.

صحت مدل‌سازی از مقایسه منحنی پوش^{۱۶} نظیر حاصل از روش آزمایشگاهی [۵] با منحنی پژوهش حاضر از تحلیل اجزاء محدود به اثبات می‌رسد. شکل ۱۰ منحنی‌های ارتباط بین بار جانبی محاسبه شده و جابجایی را نشان می‌دهند.



شکل ۱۰: منحنی نیرو- تغییر مکان جانبی دیوار مصالح بنایی آجری

¹²H. Santa-Maria and P. Alcaino

¹³Hollow clay bricks

¹⁴Horizontal

¹⁵No steel reinforcement wall

¹⁶Envelope curve

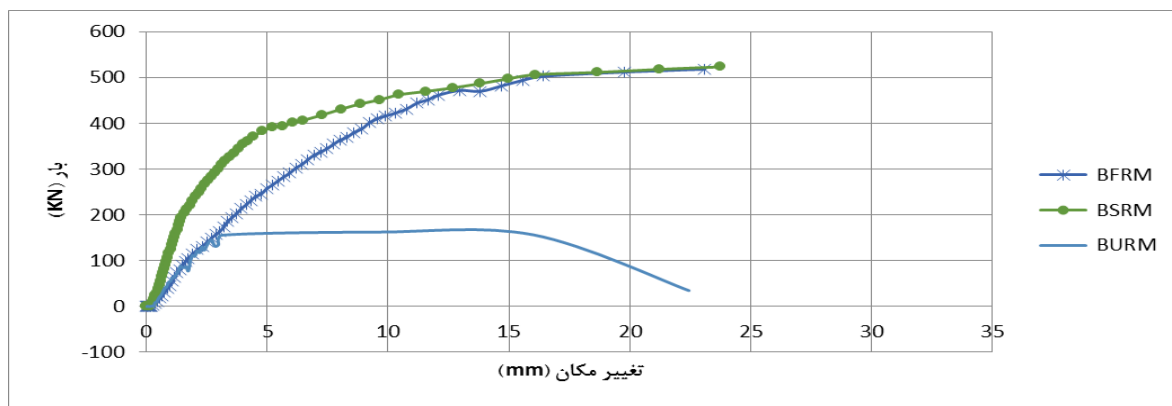
۶- مدل‌های عددی

جهت بررسی رفتار برشی دیوارهای بنایی تقویت شده با شاتکریت و FRP لازم است دیوارهای بنایی تقویت نشده هم مدلسازی شوند. در این پژوهش دو نوع مختلف دیوار بنایی آجری و دیوار بنایی بلوک سیمانی مدل شده‌اند که در مجموع شش مدل عبارتند از: دو نوع دیوار تقویت نشده، تقویت شده با شاتکریت و تقویت شده با الیاف کربنی مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند. بدین منظور دیوار آجری با ابعاد 1976×200 میلیمتر (بدون در نظر گرفتن تیرها) و دیوار بلوک سیمانی با ابعاد 1330×1560 میلی‌متر به صورت میکرو ساده شده مدلسازی گردیده و از نتایج و فرضیات اعتبارسنجی شده در بخش‌های قبل جهت تحلیل دیوارها استفاده شده است. در این پژوهش مدلسازی و تحلیل دیوار تحت دو بار افقی و قائم در نظر گرفته شده است.

در همه دیوارهای تحلیل شده مکانیزم شکست بصورت قطری یا ترکیبی از شکست قطری و یکی از مکانیزم‌هایی که در بخش ۲-۱ به آن اشاره شد، بودند.

۶-۱- مقایسه پاسخ نیرو- تغییر مکان ارائه شده جهت رفتار دیوارهای مصالح بنایی آجری

در این بخش جهت مقایسه و بررسی رفتار دیوارها، منحنی‌های نیروی برشی پایه- تغییر مکان از مدل‌های عددی استخراج شده است. که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. جابجایی تا ۲۲ میلی‌متر یعنی دررفت ۰/۷۵ درصد دیوار آجری در نظر گرفته شده است. پاسخ‌های مورد مطالعه جهت مقایسه این گونه دیوارها در جدول‌های ۶ و ۷ تهیه شده و درصد اختلاف بین نمونه‌ها نسبت به نمونه مبنا یعنی دیوار تقویت نشده محاسبه شده است. سپس در مقایسه دو نوع تقویت FRP و شاتکریت، FRP با میزان جذب انرژی کمتر مبنای مقایسه قرار گرفته است. شایان ذکر است که مقدار جذب انرژی نیز از محاسبه مساحت زیر منحنی به دست آمده است. سختی مؤثر دیوار نیز براساس شیب خطی که از مبدأ مختصات تا ۶۰ درصد مقاومت پیشینه رسم می‌شود، به دست آمده است. پارامتر جابجایی تسلیم Δ_y به میزان حداکثر جابجایی دیوار در ناحیه خطی (الاستیک) اطلاق می‌شود.



شکل ۱۱: منحنی تغییر مکان- بار جانبی برای دیوارهای آجری

نسبت شکل‌پذیری کلی سازه μ ، به صورت نسبت حداکثر جابجایی Δ_{max} به جابجایی جانبی تا نقطه تسلیم (جابجایی تسلیم) Δ_y تعریف می‌شود.

جدول ۶: پاسخ‌های به دست آمده از نتایج دیوارهای آجری

نام نمونه	مقاومت بیشینه (kN)	میزان جذب انرژی (J)	سختی مؤثر (kN/mm)	جابجایی تسلیم (mm)	شکل پذیری
BSRM	523.04	10202.80	98.07	5.60	3.93
BFRM	518.80	8805.84	47.89	12.00	1.83
BURM	156.43	2920.00	55.21	3.12	7.05

جدول ۷: مقایسه پاسخ‌های به دست آمده از نتایج دیوارهای آجری

اختلاف بین نمونه‌ها (درصد)	مقاومت بیشینه (درصد)	میزان جذب انرژی (درصد)	سختی مؤثر (درصد)	جابجایی تسلیم (درصد)	شکل پذیری (درصد)
BSRM - BURM	70.09	71.38	43.70	44.29	-79.49
BFRM - BURM	69.85	66.84	-15.29	74.00	-284.62
BFRM - BSRM	0.81	13.69	51.17	-114.29	53.33

نتایج پژوهش‌های به عمل آمده و تحلیل مدل‌های عددی انجام شده بر روی دیوارهای آجری نشان می‌دهد بالاترین مقاومت (۵۲۳/۰۴ کیلونیوتون) مربوط به دیوار تقویت شده با شاتکریت می‌باشد با وجود این بیشینه مقاومت دیوار تقویت شده با FRP در مقایسه با دیوار تقویت شده با شاتکریت اختلاف زیادی نداشته (۸۱/۰ درصد) اما تقویت کننده شاتکریت انعطاف بیشتری نسبت به FRP داشته و باعث جذب انرژی بیشتر تا ۱۳/۶۹ درصد شده که در مناطق زلزله خیز در مقابل نیروهای لرزه‌ای، شاتکریت روش بسیار مناسبی است. با این حال نصب FRP ساده‌تر از شاتکریت بوده و از نظر زمان هزینه کمتری دارد که تقریباً به همان مقاومت بیشینه شاتکریت می‌توان نزدیک شد. دیوار برشی غیرمسلح ساخته شده از مصالح آجری از مقاومت برشی قابل ملاحظه‌ای برخوردار است (۱۵۶/۴۳ کیلونیوتون) اما متأسفانه رفتاری ترد و شکننده دارد و با رسیدن به مقامت نهایی، فرو می‌ریزد. این مطلب نتایج تحقیق‌های گذشته همچون [۴] را تصدیق می‌کند. قسمت الاستیک منحنی دیوار مقاوم شده با شاتکریت شیب بیشتری نسبت به نمونه‌های دیگر دارد که این امر حاکی از ترک خوردگی دیرتر دیوار نسبت به دو مدل دیگر است و هنگامی که ترک در آن بوجود می‌آید پراکندگی بیشتری نسبت به دیگر مدل‌ها دارا می‌باشد. همچنین این پدیده باعث سختی مؤثر بیشتر ۵۱/۱۷ درصد نسبت به مدل مقاوم شده با FRP است.

جابجایی الاستیک دیوار تقویت شده با FRP ۱۲ میلی‌متر بوده که این میزان اختلاف بالایی نسبت به دیوار با شاتکریت تقویت شده دارد که بیانگر اینست که دیوار تقویت شده با FRP در تغییر شکل‌های اولیه بیشتری بدون آسیب می‌ماند. اما طبق پژوهش [۵] تقویت دیوارهایی با ترک اولیه با FRP ممکن است سختی جانبی^{۱۷} از دست رفته را جبران نکند که در این پژوهش به دلیل سختی مؤثر بالاتر شاتکریت نسبت به FRP و شکل‌پذیری بالا می‌توان گفت تقویت دیوارهایی با ترک اولیه با شاتکریت راه مناسب تری نسبت به FRP است. در هر دو روش مقاوم‌سازی مود شکست برشی خالص که باعث شکست ترد دیوار گشته، مهار شده است. اما همانطور که از انرژی جذب شده در جدول‌ها و شکل‌های توزیع تنش‌ها نمایان است دیوار تقویت شده با شاتکریت با بروز رفتار ترکیبی خمشی و برشی توزیع ترک‌های مناسب تری نسبت به مدل‌های دیگر دارد.

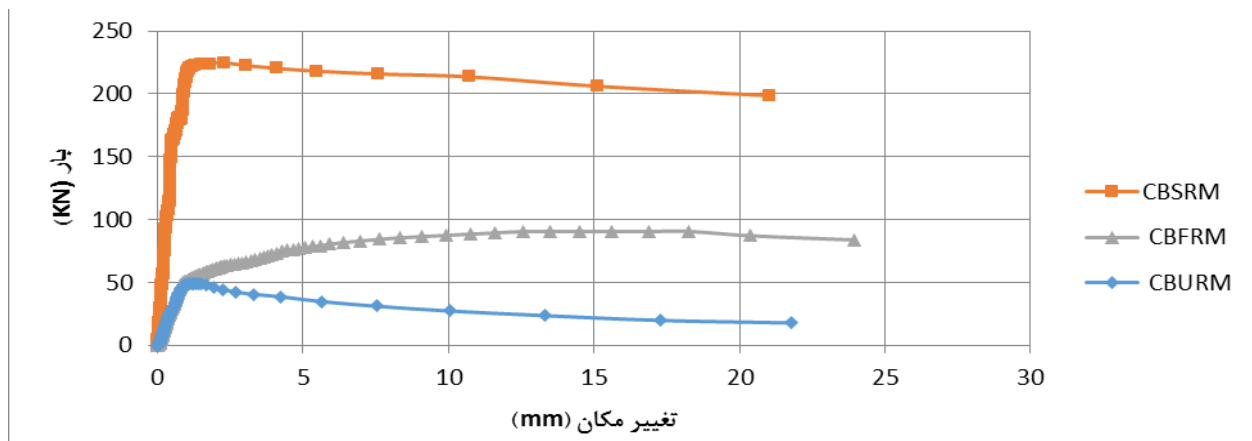
نتایج آزمایشگاهی [۶]، افزایش ظرفیت برشی در دیوارهای تقویت شده با صفحات FRP را طبق تجربیات به عمل آمده بین ۲۰ تا ۱۶۰ درصد اعلام کردند. که در این پژوهش پس از مدلسازی دیوار آجری، افزایش ظرفیت برشی تا ۶۹/۸۵ درصد حاصل گردید.

¹⁷ Lateral stiffness

سختی اولیه در دیوار تقویت شده با FRP متأثر از FRP نیست، همان طوری که نتایج تجربی حاصل از [۱۰] این موضوع را تأیید می کنند. اما با انسجام آجرها این سختی تا لحظه رسیدن به نقطه تسلیم ادامه یافته است. بنابراین شیب منحنی بار- تغییر مکان دیوار آجری تقویت شده با FRP و غیرمسلح باهم برابرند.

۲-۶- مقایسه پاسخ نیرو- تغییر مکان ارائه شده جهت رفتار دیوارهای بلوک سیمانی

در این بخش جهت مقایسه و بررسی رفتار دیوارهای بلوک سیمانی، منحنی‌های نیرو - تغییر مکان در شکل ۱۲ از مدل‌های عددی استخراج شده است. جابجایی تا ۲۲ میلی‌متر یعنی دررفت ۱/۶۵ درصد دیوار بلوک سیمانی در نظر گرفته شده است. پاسخ‌های مورد مطالعه جهت مقایسه این گونه دیوارها در جدول‌های ۸ و ۹ تهیه شده است.



شکل ۱۲: منحنی‌های تغییر مکان- بار جانبی در دیوارهای بلوک سیمانی

جدول ۸: پاسخ‌های به دست آمده از نتایج دیوارهای بلوک سیمانی

نام نمونه	مقاومت بیشینه (KN)	میزان جذب انرژی (J)	سختی مؤثر (KN/mm)	جابجایی الاستیک (mm)	شکل پذیری (mm)
CBSRM	224.92	4369.35	299.9	1.03	21.36
CBFRM	90.58	1947.42	45.29	0.75	29.33
CBURM	48.97	608.1	56.5	0.72	30.55

جدول ۹: مقایسه پاسخ‌های به دست آمده از نتایج دیوارهای بلوک سیمانی

اختلاف بین نمونه‌ها (درصد)	مقاومت بیشینه (درصد)	میزان جذب انرژی (درصد)	سختی مؤثر (درصد)	جابجایی الاستیک (درصد)	شکل پذیری (درصد)
CBSRM / CBURM	78.23	86.08	81.16	30.10	-43.02
CBFRM / CBURM	45.94	68.77	-24.75	4.00	-4.16
CBSRM / CBFRM	59.73	55.43	84.90	27.18	-37.31

نتایج پژوهش‌های به عمل آمده و تحلیل مدل‌های عددی انجام شده بر روی دیوارهای بلوک سیمانی نشان می‌دهد. در دیوارهای بلوک سیمانی اختلاف بین مقاومت بیشینه دیوار تقویت شده با FRP و شاتکریت ۵۹/۷۳ درصد است و بالاترین مقاومت بیشینه (۲۲۴/۹۲ کیلو نیوتن) مربوط به دیوار تقویت شده با شاتکریت می‌باشد همانطور که در دیوارهای آجری بالاترین مقاومت بیشینه مربوط به تقویت کننده شاتکریت است. در نتیجه شاتکریت یک طرفه مقاومت نهایی بیشتری برای دیوارهای بنایی فراهم می‌آورد.

طبق نتایج بدست آمده برای دیوارهای بنایی که با شاتکریت تقویت شده‌اند، افزایش ظرفیت برشی بین ۷۰ الی ۸۰ درصد و برای FRP بین ۵۰ الی ۷۰ درصد مشاهده گردید.

دیوار بلوک سیمانی تقویت شده با شاتکریت بیشترین جذب انرژی یعنی ۴۳۶۹/۳۵ ژول را داشته که باعث می‌شود در مناطق زلزله خیز در مقابل نیروهای لرزه‌ای، بهترین پیشنهاد باشد. در دیوارهای آجری نیز همین نتیجه برداشت شد که نشان می‌دهد تقویت کننده شاتکریت نسبت به FRP برای نیروهای لرزه‌ای مناسب تر است. هرچند که FRP باعث جذب انرژی بالایی در دیوارهای بنایی تقویت نشده، می‌گردد.

میزان افزایش جذب انرژی برای تقویت کننده‌های FRP برای دیوارهای بنایی ۶۰ الی ۷۰ درصد و برای شاتکریت ۷۰ الی ۹۰ درصد مشاهده شده است.

دیوار برشی غیرمسلح ساخته شده از مصالح بلوک سیمانی پس از رسیدن به مقاومت برشی خود (۴۸/۹۷ کیلونیوتن) رفتاری ترد و شکننده همانند دیوار آجری دارد و با رسیدن به مقاومت نهایی، فرو می‌ریزد. این مطلب نتایج تحقیق‌های گذشته همچون [۴] و نتایج دیوارهای آجری را تصدیق می‌کند.

قسمت الاستیک منحنی دیوار مقاوم شده با شاتکریت بیشترین شیب نسبت به نمونه‌های دیگر دارد که این امر حاکی از ترک خوردگی دیرتر دیوار نسبت به دو مدل دیگر است. همچنین این پدیده باعث سختی مؤثر بیشتر تا نرخ ۸۴/۹ درصد نسبت به مدل FRP شده است.

طبق پژوهش [۵] تقویت دیوارهایی با ترک اولیه با FRP ممکن است سختی جانبی^{۱۸} از دست رفته را جبران نکند که در این پژوهش به دلیل سختی مؤثر و مقاومت بالاتر دیوار تقویت شده با شاتکریت نسبت به FRP می‌توان گفت تقویت دیوارهایی با ترک اولیه با شاتکریت راه مناسب تری نسبت به FRP است که این موضوع نتایج دیوارهای آجری را تأیید می‌کند.

مقاومت بیشینه دیوارهای بلوک سیمانی تقویت شده تغییر بسیار زیادی نسبت به دیوار تقویت نشده کردند. این کمیت در CBFMR تا نرخ ۴۵/۹۴ و در CBSRM تا نرخ ۷۸/۲۳ تغییر کرده است.

سختی اولیه در دیوار تقویت شده با FRP متأثر از FRP نیست، همانطوری که نتایج تجربی حاصل از [۱۰] و نتایج دیوار آجری این موضوع را تأیید می‌کنند اما با انسجام آجرها این سختی تا لحظه رسیدن به نقطه تسلیم ادامه یافته و مقاومت بیشینه را افزایش داده است.

۷- نتیجه گیری

نتیجه گیری های به عمل آمده از بررسی های نظری، مطالعات و آنالیزهای عددی ارائه شده در این تحقیق به صورت زیر خلاصه می‌گردند.

- ۱- دیوارهای بنایی غیرمسلح ساخته شده از مصالح بلوک سیمانی پس از رسیدن به مقاومت برشی خود رفتاری ترد و شکننده دارند و با رسیدن به مقاومت نهایی، فرو می‌ریزند.
- ۲- بالاترین مقاومت برشی مربوط به دیوارهای بنایی تقویت شده با شاتکریت است به طوری که افزایش ظرفیت برشی بین ۷۰ الی ۸۰ درصد و برای FRP بین ۵۰ الی ۷۰ درصد مشاهده گردید.
- ۳- دیوارهای بنایی تقویت شده با شاتکریت بیشترین جذب انرژی را داشته که باعث می‌شود در مناطق زلزله خیز در مقابل نیروهای لرزه‌ای، بهترین پیشنهاد باشد و تقویت کننده شاتکریت نسبت به FRP برای نیروهای لرزه‌ای مناسبتر است. هرچند که FRP باعث جذب انرژی بالایی در دیوارهای بنایی تقویت نشده، می‌گردد. میزان افزایش جذب انرژی برای تقویت کننده‌های FRP برای دیوارهای بنایی ۶۰ الی ۷۰ درصد و برای شاتکریت ۷۰ الی ۹۰ درصد مشاهده شده است.

¹⁸Lateral stiffness

- ۴- سختی اولیه در دیوارهای بنایی تقویت شده با FRP متأثر از FRP نیست (شیب بخش خطی منحنی دیوار تقویت شده و تقویت نشده برابر است) اما با انسجام بلوک‌ها این سختی تا لحظه رسیدن به نقطه تسلیم ادامه یافته و مقاومت بیشینه را افزایش داده است.
- ۵- قسمت خطی منحنی دیوارهای مقاوم شده با شاتکریت بیشترین شیب را نسبت به نمونه‌های دیگر دارند که این امر حاکی از ترک خوردگی دیرتر دیوار نسبت به نمونه‌های دیگر است. همچنین این نوع مقاوم سازی باعث سختی مؤثر بیشتر نسبت به نمونه‌های مقاوم سازی شده با FRP شده است. در نتیجه شاتکریت می‌تواند سختی دیوارهای بنایی با ترک‌های اولیه را بهبود بخشد.
- ۶- در مدل های دیوارهای تقویت نشده، شکست قطری برشی دیوار بصورت پله ای بوده و ترک ها فقط از درز ملات بین بلوک‌های سیمانی عبور کرده و هیچ تمرکز تنش یا شکستی در بلوک ها مشاهده نگردید. علت وجود چنین ترک‌هایی در دیوارهای بنایی ضعف اتصال و چسبندگی بین ملات و بلوک‌ها می‌باشد.
- ۷- در دیوارهای بنایی آجری تقویت کننده FRP باتوجه به پارامترهای بدست آمده همانند مقاومت بیشینه که تقریباً به شاتکریت نزدیک بوده و در نظر گرفتن سرعت بالاتر در اجرا طرحی مناسب به حساب می‌آید.

مراجع

- [1] Alessandri, C. and Brebbia, A. (1987). Strength of masonry walls under static horizontal loads: boundary element analysis and experimental tests. *Engineering Analysis*, Vol. 4, No. 3, pp.118-134.
- [2] Hajesmaeily, M. (2001). *An experimental investigation of brick masonry buildings subjected to lateral loading*. M.Sc. thesis. Tarbiat Modares University.
- [3] Valluzzi, M.R., Tinazzi, D. and Modena, C. (2002). Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates, *Construction and Building Materials*. Vol.16, pp.409-416.
- [4] Godarzidehrizi, M. (2007). *Retrofitting of masonry buildings, existing methods and applications*, M.Sc. thesis. Gilan University.
- [5] Hernan, Santa-Maria. and Pablo, Alcaino. (2011). Repair of in-plane shear damaged masonry walls with external FRP. *Construction and Building Materials* 25, pp.1172-1180.
- [6] Roca, P. and Araiza, G. (2011). Shear response of brick masonry small assemblages strengthened with bonded FRP laminates for in-plane reinforcement. *Construction and Building Materials* 24, pp.1372-1384.
- [7] Kalali, A. and Zaman Kabir, M. (2012). Experimental response of double-wythe masonry panels strengthened with glass fiber reinforced polymers subjected to diagonal compression tests. *Engineering Structures* 39, pp.24-37.
- [8] Konthesingha, K.M.C. Masia, M.J. Petersen, R.B. Mojsilovic, N. and Simundic, G. (2013). Static cyclic in-plane shear response of damaged masonry walls retrofitted with NSM FRP strips – An experimental evaluation, *Engineering Structures* 50, pp.126-136.
- [9] Saghafi, M. H, Safakhah, S, Kheyroddin, A and Mohammadi, M. (2014). In-Plane Shear Behavior of FRP Strengthened Masonry Walls, *APCBEE Procedia* 9, pp.264 – 268.
- [10] Gattulli, V. Lampis, G. Marcari, G. and Paolone, A. (2014). Simulations of FRP reinforcement in masonry panels and application to a historic façade, *Engineering Structures* 75, pp.604-618.
- [11] Lin, Y. Wotherspoon, L. Scott, A. and Jason, M. (2014) In-plane strengthening of clay brick unreinforced masonry wall using ECC shotcrete, *Engineering Structures* 66, pp.57-65.
- [12] Thi-Loan Bui, A. Si Larbi, N. and Reboul, E. (2015). Shear behavior of masonry walls strengthened by external bonded FRP and TRC, *Composite Structures* 132, pp.923-932.
- [13] Abaqus (2014). *Abaqus Users' Manual*, Version 6.14, Dassault Systems Simulia Corp., Providence, RI, USA
- [14] Yusuf Sumer, Muharrem Aktas, (2015) "Defining Parameters for Concrete Damage Plasticity Model" *Challenge journal of structural mechanics*, 1 (3), pp 149-155.
- [15] Kaushik H.B., Rai, D.C., Jain S.K., (2007) "Stress-Strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, pp.729-739.
- [16] Obaidat, Y.T., Heyden, S. (2010) "The Effect of CFRP & CFRP/Concrete Interface Models When Modeling Retrofitted RC beams With FEM", *Journal of Composite Structures*, 92, pp.1391-1398.
- [17] Maheri, M.R. (2012) *Investigation of Seismic Vulnerability and Retrofitting of Concrete Block Walls*. Research report, University of Shiraz, Hormozgan schools rehabilitation organization.