

# بررسی آزمایشگاهی تأثیر نقص‌های اجرایی در مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد فولادی در لایه شاتکریت به عنوان روش بهسازی دیوارهای آجری

هادی صبوری<sup>۱</sup>، محمد یکرنگ‌نیا<sup>۲\*</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۲- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

\*تهران، صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۸۵، [hadisabouri1377@gmail.com](mailto:hadisabouri1377@gmail.com)

## چکیده

ساختمان‌های بنایی تقویت‌نشده به دلیل هزینه‌های ساخت به نسبت پایین در سراسر جهان محبوب هستند، حتی اگر در معرض آسیب‌های اساسی ناشی از زلزله‌های متوسط باشند. بسیاری از ساختمان‌هایی که آسیب‌های ناشی از زلزله‌های گذشته را تجربه کرده‌اند، برای این که بتوانند در برابر زلزله‌های آینده مقاومت کنند، باید ارتقا یابند یا حداقل به حالت سالم بازگردند. در بسیاری از موارد، بازسازی به دلیل محدودیت‌های مالی و زمانی بهترین انتخاب نیست. شاتکریت تقویت‌شده با مش فولادی یک روش ارزان و ساده و در عین حال مؤثر برای تعمیر و بهسازی است. این مطالعه تأثیر جزئیات اجرایی در حین ساخت شاتکریت را در مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد آن ارائه می‌کند. برای اثبات کاهش اثربخشی شاتکریت هنگام عدم رعایت الزامات آیین‌نامه‌ای و همچنین بررسی میزان اهمیت هر یک از این جزئیات اجرایی، یک سری آزمایش‌های تجربی بر روی دیوارهایی در مقیاس کامل با شاتکریت یک‌طرفه به ضخامت ۵۰ میلی‌متر انجام شد. بررسی‌ها نشان داد عدم برداشت درست نازک‌کاری، مقدار نامناسب پوشش میلگرد، استفاده از میلگرد فاقد آج و استفاده از میلگرد زنگ‌زده به ترتیب ۵۷/۸، ۵۵/۲، ۲۵ و ۷/۵ درصد باعث کاهش اثربخشی شاتکریت در مقاوم‌سازی می‌شود.

## واژگان کلیدی

شاتکریت، ساختمان‌های بنایی تقویت نشده، مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد، جزئیات اجرایی، خوردگی میلگرد

## Experimental Evaluation of The Effect of Implementation Defects on The Pullout Resistance of Steel Rebar in The Shotcrete Layer as A Retrofit Method for Structural Brick Masonry Infill Walls in Steel Structures

H. Sabori, M. Yekrangnia

### Abstract

Unreinforced masonry (URM) buildings are rather popular around the globe due to low construction costs, even although they can be prone to substantial damage caused by even moderate earthquakes. In many cases, reconstruction is not the best choice because of financial and time restrictions. Shotcrete reinforced with steel mesh (SRS) is a cheap and simple yet effective method of repair/retrofit. This paper presents the results of experimental study with the aim of evaluating the effects of construction imperfections of steel reinforced shotcrete, as a retrofit method for URM walls, on the rebar pull-out resistance. For this purpose, a total of full scale URM specimens with one-sided 50 mm-thick shotcrete layer having a single steel rebar were made and tested. The results show in the case the wall's finishing is not removed, the steel rebar cover is not sufficient, the plain steel rebar is used, and, use of rebar without a tread, there is 57.8%, 55.2%, 25% and 7.5% decrease in the pullout resistance of the specimens, respectively.

### Keywords

Shotcrete, Unreinforced masonry, Pullout resistance, Implementation details, Regulatory requirements

## ۱- مقدمه

یکی از قدیمی‌ترین و رایج‌ترین انواع سیستم‌های ساختمانی در جهان، ساختمان‌های بنایی می‌باشند. به طوری که بیش از ۳۰ درصد جمعیت جهان در ساختمان‌های مصالح بنایی ساکن هستند [۱]. علاوه بر این در کشور ما نیز استفاده از مصالح بنایی به ویژه نوع آجری آن، غالباً برای ساخت واحدهای مسکونی یک یا چندطبقه و یا واحدهای تجاری و تولیدی، مدارس و بیمارستان‌های شهرهای متوسط، کوچک، بخش‌ها و روستاها متداول است. علت اصلی این کاربرد وسیع، آسان بودن تولید آجر، حمل و نقل متداول، پایین بودن هزینه‌ها، عدم نیاز به تکنولوژی برتر در مراحل ساخت و ساز و هم‌چنین تصور عمومی و کلی مبنی بر عدم نیاز به تخصص ویژه در همه مراحل فوق را می‌توان نام برد. نکته‌ای که باید در مورد ساختمان‌های بنایی به آن اشاره کرد این است که در احداث این‌گونه ساختمان‌ها در کشور، ضوابط و دستورالعمل‌های مربوط به فرایند ساخت و ساز چندان به ویژه قبل از سال ۱۳۸۴ مورد توجه قرار نگرفته است و ساختمان‌های موجود بنایی اغلب در برابر زلزله آسیب‌پذیرند. هم‌چنین ایران یکی از کشورهای لرزه‌خیز دنیا است و وقوع زلزله‌ای مهیب در هر ۱۰ سال نشان‌دهنده خطر دائمی است که ضرورت توجه به بحث ایمن‌سازی ساختمان‌ها را دوچندان می‌کند. تجربه زلزله‌های گذشته نشان داده است ساختمان‌هایی که خسارت‌هایی را از زلزله‌های پیشین متحمل شده‌اند و یا دچار مشکلاتی در اجزای سازه‌ای خود بوده‌اند، عملکرد بسیار نامناسبی در برابر زلزله‌های بعدی از خود بروز می‌دهند. با بررسی آمار زلزله‌خیزی در ایران، مشخص شده است که ایران در هر ۱۰ سال با یک فاجعه انسانی روبه‌رو گردیده است که زلزله بم، منجیل، طیس، بوئین‌زهرا، اهر-ورزقان و سرپل ذهاب از این جمله‌اند. هم‌چنین در هر ۲/۵ سال ایران با یک زلزله بزرگ‌تر از ۵/۶ ریشتر روبه‌رو بوده است. بر این اساس طبق محاسبات، احتمال وقوع حداقل یک زلزله با بزرگی بیش‌تر از ۵/۶ ریشتر در کشور در یک دوره ۱۰ ساله نزدیک به ۹۹ درصد خواهد بود. از آن جایی که رخداد زلزله‌ای ۵/۶ ریشتری می‌تواند منجر به تخریب بسیاری از ساختمان‌های شهری و روستایی موجود در ایران گردد، توجه به خطر زلزله از سوی مسئولان و دست‌اندرکاران و مردم بیش‌تر روشن می‌گردد [۲]. قرار گرفتن

ایران در منطقه‌ای با خطر لرزه‌ای زیاد و بسیار زیاد و هم‌چنین آسیب‌پذیری ساختمان‌های مصالح بنایی ساخته شده در کشور، باعث بررسی روش‌هایی برای مقاوم‌سازی این ساختمان‌ها شده است. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی توسط محققین برای بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوارهای بنایی غیرمسلح انجام شده است. این تحقیقات سبب ارائه تکنیک‌های مختلفی برای مقاوم‌سازی این ساختمان‌ها تحت عنوان بهسازی لرزه‌ای شده است که یکی از متداول‌ترین این روش‌ها شاتکریت<sup>۱</sup> می‌باشد. این روش علی‌رغم عملکرد بسیار خوبی که در زلزله‌های پیشین نشان داده است، هم‌چنان نیازمند به بررسی بیش‌تر می‌باشد. در آئین‌نامه‌های مختلف برای اجرای شاتکریت، الزامات اجرایی گوناگونی توصیه شده است که برخی از این الزامات عبارت‌اند از: تر بودن سطح دیوار قبل از اجرای شاتکریت، برداشت صحیح نازک‌کاری و... . متأسفانه در کشور ما این الزامات توسط پیمانکارهای مختلف با کیفیت‌های متفاوتی انجام می‌گیرد. در این تحقیق تأثیر هریک از این الزامات و میزان اهمیت آن‌ها در عملکرد شاتکریت بررسی می‌شود. میزان اهمیت هر سازه از دیدگاه لرزه‌ای با توجه به مجموعه‌ای از شرایط از قبیل: نوع کاربری، وضعیت استفاده از ساختمان پس از وقوع بحران، میزان خسارات مالی و تلفات ناشی از زلزله مشخص می‌گردد. با توجه به این که اکثر ساختمان‌های مصالح بنایی که با شاتکریت تقویت می‌شوند مدارس کشور هستند و این سازه‌ها اگر پس از وقوع زلزله آسیب جدی ببینند خسارات مالی و تلفات جانی زیادی در بر خواهند داشت. علی‌الخصوص در مورد کشور ما که در منطقه‌ای با خطر لرزه‌ای زیاد و بسیار زیاد واقع شده است و علاوه بر مدارس، سازه‌های مصالح بنایی بخش زیادی از سازه‌های کشور را تشکیل می‌دهند. این دلایل اهمیت و ضرورت بررسی الزامات اجرایی شاتکریت را بیش از پیش نشان می‌دهد.

## ۲- مبانی نظری و پیشینه تحقیق

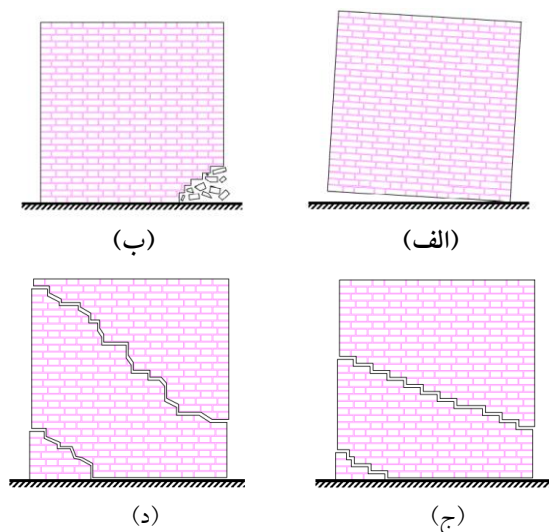
به طور کلی و طبق جامع‌ترین تعریف ارائه شده توسط سلمان‌پور و همکاران [۳]، عملکرد دیوارهای مصالح بنایی به دو دسته درون صفحه و برون صفحه تقسیم می‌شود. عملکرد برون صفحه به چرخش کل یا قسمتی از دیوار حول محور طولی کف یا میانه

<sup>1</sup> Shotcrete

اشاره دارد که در نهایت منجر به واژگونی و ریزش دیوار در راستای عمود بر صفحه می‌شود.

این اجزا جزو عضو میان‌قاب سازه می‌باشد و میان‌قاب یک عضو لاینفک سازه‌ای ساختمان‌های فولادی می‌باشد که روی رفتار قاب یا اسکلت تأثیرگذار است. در واقع اگر به اجزای قاب شامل تیرها و ستون‌ها توجه نشود می‌تواند سبب آسیب‌های جدی در سایر اجزا شود. عملکرد میان‌قاب به خصوص در زلزله‌های اخیر مانند بم و کرمانشاه به هیچ وجه مناسب نبوده است. در واقع یکی از تمهیدات اندیشیده شده در راستای بهبود رفتار لرزه‌ای این ساختمان‌ها، جداسازی میان‌قاب از قاب اطراف می‌باشد که برای ساختمان‌های موجود کار بسیار سختی می‌باشد و مراحل اجرایی پیچیده‌ای دارد و غیرقابل اجرا است ولی در مقابل اگر اعضای قاب کفایت لازم را داشته باشند، ما به سمت مقاوم‌سازی میان‌قاب خواهیم رفت. عملکرد درون صفحه، خود شامل دو رفتار خمشی و برشی است و هر رفتار به دو صورت در دیوار نمایان می‌شود. شکل (۱) تصویری کلی از انواع مودهای خرابی درون صفحه دیوارهای مصالح بنایی را نشان می‌دهد که شامل شکست‌های خمشی گهواره‌ای و خردشدگی پنجه، شکست‌های برشی لغزش ملات و کشش قطری می‌شوند. طبق تعریف شکست گهواره‌ای، اغلب در دیوارها با نسبت ابعاد (ارتفاع به طول) بزرگ‌تر از یک و یا در صورت بالا بودن نسبت لنگر خمشی به نیروی برشی، در پای دیوار اتفاق می‌افتد و در حین آن دیوار طی رفتار خمشی، همانند یک جسم صلب حول پاشنه خود دوران می‌کند. در برخی موارد، مجموع بار ثقلی و نیروی ناشی از وزن دیوار به قدری زیاد است که پس از دوران جزئی دیوار، منجر به خرد شدن آجرهای گوشه پایین (پاشنه) دیوار می‌شود. همچنین، ممکن است به دلیل چرخش بیش از حد دیوار حول پاشنه، شاهد چنین نوع خرابی که شکست خردشدگی پاشنه نام دارد، باشیم. شکست‌های برشی در دیوارهایی که به دلیل نسبت ابعاد (ارتفاع به طول) کم‌تر از یک، بار ثقلی زیاد، بسته‌بودن وجه فوقانی دیوار که مانع حرکت خمشی دیوار می‌شود، و یا ضعیف‌بودن ملات که منجر به ازدست‌رفتن یکپارچگی دیوار می‌شود، قادر به تغییر شکل خمشی نباشند، اتفاق می‌افتد. در شکست لغزش ملات، نیروی جانبی با تأثیر بر ملات، باعث ضعیف‌شدن اتصال بین ملات و آجر، باز شدن درزهای دیوار، و لغزش قسمت فوقانی دیوار روی قسمت تحتانی می‌شود. در صورتی که نیروی محوری قابل ملاحظه‌ای به

دیوار اعمال شده باشد، ترک‌های ایجاد شده به درزها محدود نشده و نیروی جانبی قادر به شکستن و جداکردن آجرها و بروز شکست کشش قطری نیز خواهد بود. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده، شکست‌های برشی می‌توانند در دو ناحیه تحتانی و میانی دیوار تشکیل شوند. ذکر این نکته ضروری است که هرچند در هر دو نوع شکست برشی، قسمتی از ملات و یا آجر به کشش افتاده است، واژه "کشش" در عبارت شکست "کشش قطری" به تسلیم آجر تحت تنش‌های کششی اشاره دارد. همچنین، توجه شود که شکست‌های فوق همگی برای دیوارهای تحت بار یک‌طرفه افزایشده تعریف می‌شوند؛ در واقعیت، خرابی‌های ایجاد شده در دیوار می‌تواند بسته به نوع بارگذاری (رفت و برگشتی یا یک‌طرفه)، چینش و ابعاد بازشوها، و همچنین اتصال با اعضای دیگر ساختمان نظیر سقف و دیوارهای متعامد، ترکیبی از دو یا چند مود خرابی باشد.



شکل ۱- مودهای خرابی درون صفحه دیوارهای مصالح

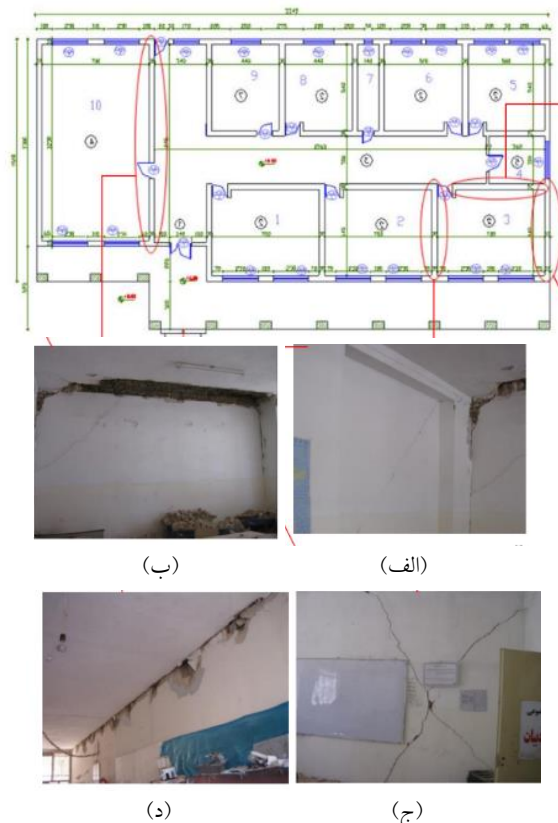
بنایی منفرد تحت بار افزایشده چپ به راست: (الف) شکست

خمشی گهواره‌ای، (ب) شکست خمشی خردشدگی پنجه، (ج)

شکست برشی لغزش ملات، (د) شکست برشی قطری [۳]

علاوه بر موارد توضیح داده شده در بخش قبل، عملکرد و خرابی‌های دیوارهای پیرامونی و داخلی ساختمان‌ها به عوامل پیچیده‌تری از قبیل اتصال دیوارهای هم‌مرس شکل (۲-الف)، نوع سقف شکل (۲-ب)، باربر یا غیر باربر بودن دیوار شکل (۲-ج)، موقعیت بازشوها، و اتصال دیوار و سقف شکل (۲-د) وابسته است.

متداول‌ترین انواع خرابی دیده شده در ساختمان‌های آجری، به ترتیب بیش‌ترین تعداد رخداد به کم‌ترین عبارت‌اند از: ترک‌های قطری و افقی دیوارهای باربر و غیر باربر، واژگونی برون صفحه دیوارهای غیر باربر پیرامونی، حرکت گهواره‌ای و ترک‌های قطری برشی در پایه‌های بین و کنار بازشوها، لغزش سقف روی دیوارها در ناحیه اتصال سقف به دیوار، خردشدگی پاشنه و ترک‌های مورب در گوشه‌های بازشوها و ریزش دهانه آخر سقف‌های طاق ضربی (که از متداول‌ترین انواع سقف اجرا شده



شکل ۲- خرابی‌های یک مدرسه آجری حین زلزله سال ۱۳۹۶ کرمانشاه: (الف) خرابی ناحیه اتصال دیوارهای متعامد، (ب) ریزش دهانه آخر سقف طاق ضربی، (ج) ترک قطری دیوار باربر، (د) لغزش سقف روی دیوار [۳]

در ساختمان‌های آجری هستند). همان‌طور که در قسمت‌های قبل نیز بیان شد، ساختمان‌های بنایی تقویت نشده (URM) به طور

گسترده‌ای به عنوان یک تکنیک ساختمانی در سراسر جهان حتی مناطق لرزه‌ای فعال استفاده می‌شود. فلسفه طراحی این سازه‌ها بر بارگذاری گرانشی متمرکز شده است و بسیاری از ساختمان‌های بنایی تقویت نشده به طور بالقوه در برابر زلزله آسیب‌پذیر هستند. با توجه به وجود تعداد زیادی ساختمان ساخته شده به صورت بنایی تقویت نشده، بازسازی مناسب‌ترین راه‌حل نیست. این امر ضرورت ارزیابی لرزه‌ای و در نظر گرفتن تکنیک‌های مقاوم‌سازی مناسب برای این سازه‌ها را نشان می‌دهد. چندین تکنیک مرسوم برای مقاوم‌سازی سازه‌های بنایی ارائه شده است. این روش‌ها را می‌توان به موارد زیر طبقه‌بندی کرد: عملیات سطحی متشکل از فروسیمان<sup>۲</sup>، شاتکریت<sup>۳</sup>، پلیمر تقویت شده با الیاف<sup>۴</sup> و ملات تقویت شده نساجی<sup>۵</sup>، تزریق گروت و اپوکسی<sup>۶</sup>، تقویت خارجی، محصور کردن و پس کشش<sup>۷</sup> اشاره کرد. تمرکز اصلی تحقیق شابدین<sup>۸</sup> و همکاران [۴] بر مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی با استفاده از روش شاتکریت است. پاشش لایه بتنی روی دیوارهای مصالح بنایی که با نام شاتکریت شناخته می‌شود، با و بدون شبکه میلگرد، یکی از روش‌های مؤثر در بهسازی لرزه‌ای سازه‌های جدید و هم‌چنین تعمیر سازه‌های قدیمی و آسیب‌دیده است. ترتیب اعمال این لایه تقویتی به همراه شبکه میلگرد، بدین صورت است که ابتدا شبکه میلگرد برای تقویت مقاومت کششی و خمشی به دیوار متصل می‌شود و سپس، صرف‌نظر از شیوه اختلاط مصالح (خشک و یا تر)، لایه بتنی به وسیله یک نازل و با سرعت و فشار زیاد بر روی سطوح مورد نظر پاشیده می‌شود. عملکرد یک سازه تقویت شده می‌تواند به کلی متفاوت از حالت تقویت نشده خود باشد. با توجه به مطالعه قیاسی و همکاران [۵] خرابی‌های دیوارهای ساده (تقویت نشده) عموماً به صورت متمرکز در نواحی کلیدی (پای دیوار، پاشنه و یا قطر دیوار) با ایجاد ترک‌های عریض اتفاق می‌افتد. افزودن شاتکریت به دیوارها نه تنها یک لایه مقاوم و سخت را به المان‌های باربر دیوار اضافه می‌کند، بلکه به دلیل پیوند تشکیل شده بین بتن و قسمت بنایی در صورت اجرای اصولی، شکل‌پذیری دیوار افزایش یافته و هم‌چنین لایه تقویتی باعث پراکنده شدن خرابی‌ها در سطحی گسترده‌تر و تغییر مودهای خرابی دیوار می‌شود. هم‌چنین،

<sup>6</sup> Grout and epoxy injection

<sup>7</sup> Post-tensioning

<sup>8</sup> Shabdin

<sup>1</sup> Un-Reinforced Masonry

<sup>2</sup> Ferrocement

<sup>3</sup> Shotcrete

<sup>4</sup> Fiber reinforced polymer

<sup>5</sup> Textile reinforced mortar

ضخامت‌های مختلف لایه تقویتی، جزئیات طراحی مختلف و شیوه‌های متفاوت اجرا، به رفتارهای متفاوتی از دیوارها ختم می‌شوند و در نظر نداشتن این موضوع حین طراحی و یا ارزیابی سازه‌ها منجر به افت کارایی برنامه تقویتی می‌شود [۵].

مطالعات گسترده‌ای در زمینه تقویت دیوارهای مصالح بنایی به وسیله شاتکریت انجام شده که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌کنیم. مطالعه الگoadی<sup>۱</sup> و همکاران [۶] با هدف بررسی رفتار درون صفحه دیوارهای مقاوم‌سازی شده با استفاده از شاتکریت، بر روی سه دیوار به ترتیب متشکل از دیواری بدون هیچ مداخله‌ای در زمینه بهبود پاسخ، مقاوم‌سازی شده با یک لایه شاتکریت به ضخامت ۴۰ میلی‌متر و مقاوم‌سازی شده با دو لایه شاتکریت به ضخامت ۲۰ میلی‌متر انجام شده است که در آن آزمایش‌ها نشان داد که مقاوم‌سازی با استفاده از شاتکریت قادر است استحکام جانبی نمونه‌ها را تقریباً ۳/۶ برابر افزایش دهد. مطالعه قیاسی و همکاران [۵] با هدف توسعه روشی منطقی برای طراحی و ارزیابی لرزه‌ای دیوارهای بنایی غیرمسلح تقویت شده با لایه‌های بتن مسلح انجام شده است که دقت روابط ارائه شده آن در پیش‌بینی رفتار غیرخطی و حالت‌های شکست حاکم بر دیوارهای تقویت شده با مقایسه نتایج با نتایج تجربی بدست‌آمده در همان تحقیق تأیید شده است. در مطالعه دردایی و همکاران [۷] به دو روش تجربی و تحلیلی رفتار درون صفحه سه دیوار CURM<sup>۲</sup> را به طوری که اولین نمونه به عنوان دیوار مرجع بدون هیچ گونه مقاوم‌سازی و نمونه‌های دوم و سوم با استفاده از یک لایه الیاف فولادی به ضخامت ۵۰ میلی‌متر و شاتکریت پلی‌پروپیلن الیافی مقاوم‌سازی شده در یک طرف مورد آزمایش قرار گرفتند. مقایسه نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ظرفیت برشی دیوارهای مقاوم‌سازی شده با شاتکریت مشبک و شاتکریت پلی‌پروپیلن به ترتیب حدود ۹۲ درصد و ۸۷ درصد نسبت به دیوار مقاوم‌سازی نشده افزایش یافته است. همچنین یک مدل تحلیلی نیز در همان مطالعه بر اساس مدل‌سازی اجزا محدود میکرو برای کالیبره کردن رفتار مدل‌های عددی با دیواره‌های آزمایشی از نظر ظرفیت برشی و الگوی ترک اقتباس شد که مطابقت نتایج تحلیلی را با داده‌های تجربی نشان می‌دهد. در مطالعه‌ی شابدین و همکاران [۴] بر روی سه نمونه در مقیاس کامل، آزمایش‌های چرخه‌ای درون صفحه بر روی دیوارهای بنایی

آجری تقویت نشده با استفاده از شاتکریت انجام شد که در آن یک نمونه را بدون هیچ مداخله‌ای در زمینه بهبود پاسخ و بقیه را به مرزهای یک و هر دو طرف تقویت کردند. با توجه به نتایج، تقویت مرزهای دیوار در یک طرف دیوار URM رضایت‌کم‌تری را به همراه داشت. از سوی دیگر، روش پیشنهادی در تقویت مرزهای دیوار در دو طرف مؤثر بوده و رفتار دیوارهای تقویت شده را بسیار بهبود بخشید. همچنین در مطالعه‌ی قزلباش و همکاران [۸] یک ساختمان بنایی تک‌طبقه غیرمسلح نیم‌مقیاس با دهانه‌های نامتقارن را ابتدا به صورت مقاوم‌سازی نشده و سپس مقاوم‌سازی شده با استفاده از شبکه‌های فولادی و لایه شاتکریت مورد آزمایش میز لرزه قرار گرفت. نتایج حاکی از کفایت روش مقاوم‌سازی در ایجاد یک پیوند قوی است که منجر به عملکرد ترکیبی قابل‌قبولی بین لایه آجر و شاتکریت می‌شود. علاوه بر این، لایه شاتکریت ثابت کرده است که می‌تواند از انتشار بیش‌تر ترک‌های ایجاد شده قبلی جلوگیری کند که می‌تواند راه‌حلی عملی برای بازسازی ساختمان‌های بنایی آسیب‌دیده ارائه دهد. همچنین در مطالعه‌ی رضایی و همکاران [۹] که با هدف بررسی کارایی روش مقاوم‌سازی شاتکریت برای بهسازی لرزه‌ای دیوارهای بنایی غیرمسلح و محصور معمولی انجام شد و در آن شش دیوار بنایی در مقیاس بزرگ با استفاده از آجر سفالی پخته شده و ملات ماسه سیمان ساخته شد. نمونه‌های مقاوم‌سازی شده توسط شاتکریت افزایش قابل توجهی در استحکام جانبی و کاهش تدریجی مقاومت در رفتار پس از پیک نشان دادند، حتی اگر میلگردهای تقویت‌کننده شاتکریت نه به فونداسیون و نه به پیوندهای بتنی چسبیده باشند. در نهایت در مطالعه‌ی احتشامی و همکاران [۱۰] برای اثبات بهبود عملکرد دیوارهای مصالح بنایی مقاوم‌سازی شده با شاتکریت و بررسی پارامترهای بار عمودی، وجود بازشو و تأثیر آسیب‌های قبلی در آن مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا دیوارها بدون هیچ مداخله‌ای در زمینه بهبود پاسخ مورد آزمایش قرار گرفت سپس دیوارهای آسیب‌دیده با استفاده از شاتکریت یک‌طرفه ترمیم و مورد آزمایش قرار گرفت. دیوارهای تعمیر شده و مقاوم‌سازی شده حتی بهتر از دیوارهای URM سالم عمل کردند. نتایج بهبود قابل توجهی را در رفتار جانبی نشان داد که منجر به افزایش میانگین ۲۸۸ درصدی در ظرفیت استحکام جانبی شد. مطالعات گاتسکو و بوام [۱۱] و بوی و همکاران<sup>۳</sup>

<sup>3</sup> Gattesco and Boem

<sup>4</sup> Bui et al.

<sup>1</sup> ElGawady

<sup>2</sup> Confined Unreinforced Masonry



[۱۲] متعدد دیگری برای اثربخشی روش شاتکریت در مقاوم‌سازی دیوارهای مصالح بنایی انجام شده است که در تمامی آن‌ها شاتکریت به عنوان روشی کارآمد معرفی شده است.

اجرای فرآیند شاتکریت مستلزم رعایت الزاماتی است که در آیین‌نامه‌های مختلف اعم از دستورالعمل اجرای بتن پاشیده در مقاوم‌سازی مدارس [۱۳]، آیین‌نامه شاتکریت در استرالیا [۱۴]، آیین‌نامه شاتکریت هندوستان [۱۵]، آیین‌نامه ارتش آمریکا [۱۶] و... بیان شده است که متأسفانه این الزامات توسط پیمانکارهای مختلف با کیفیت‌های متفاوتی انجام می‌گیرد. علی‌رغم وجود مطالعات متعددی در زمینه اثربخشی شاتکریت برای بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوارهای بنایی غیرمسلح، تا کنون تأثیر و میزان اهمیت پارامترهای این الزامات بررسی نشده است. در این تحقیق تأثیر و میزان اهمیت دسته‌ای از این الزامات به صورت کمی در قالب پارامترهای زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. تمام بسترها یا سطوح باید تمیز، عاری از گرد و غبار، روغن، آب اضافی و سایر آلاینده‌هایی باشند که ممکن است در چسبندگی اختلال ایجاد کنند. به همین خاطر پارامتر وضعیت سطح آجری نمونه برای بررسی کمی اهمیت این پارامتر طراحی شده است. در جایی که آرماتور در معرض دید قرار می‌گیرد، باید عاری از زنگ‌زدگی، رسوب یا سایر مواد مضر باشد که می‌تواند بر دوام و چسبندگی آن تأثیر بگذارد. به همین خاطر پارامتر وضعیت زنگ‌زدگی میلگرد به منظور بررسی کمی اهمیت این پارامتر طراحی شده است. باید فضای کافی در اطراف آرماتور ایجاد شود تا امکان پوشش کامل با بتن سالم فراهم شود. به همین خاطر پارامتر میزان پوشش میلگرد برای بررسی کمی اهمیت این پارامتر طراحی شده است. هم‌چنین به منظور بررسی کمی اثر میلگرد آج‌دار یا ساده، پارامتر نوع میلگرد طراحی شده است.

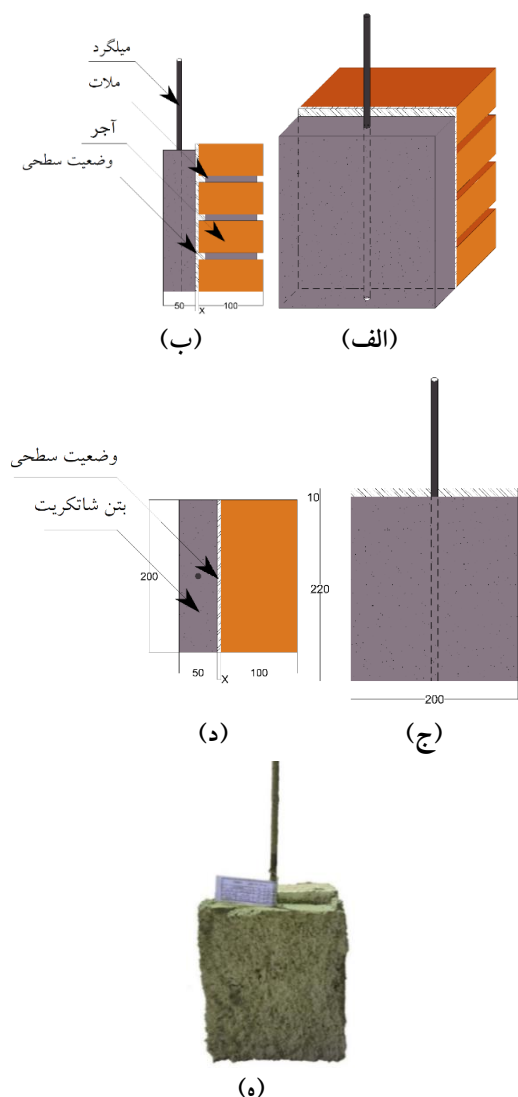
### ۳- مواد و روش تحقیق

این مطالعه به صورت تجربی و آزمایشگاهی انجام شده است و برنامه آزمایش آن شامل موارد زیر است.

#### ۳-۱- مشخصات نمونه‌ها

در این تحقیق هر نمونه مطابق شکل (۳) شامل چهار آجر بود که توسط ملات ماسه و سیمان به هم‌دیگر متصل شده بودند و در هر نمونه میلگرد فولادی آج‌دار یا ساده‌ای به قطر هشت میلی‌متر در

فاصله‌های معین از آجرها قرار داده شده و بتن در ضخامت ۵۰ میلی‌متر در یک وجه به سطح این چهار آجر شاتکریت شده بود.



شکل ۳- مشخصات ابعادی نمونه‌ها (اندازه‌ها بر حسب

میلی‌متر است): (الف) تصویر سه‌بعدی و شماتیک نمونه، (ب) تصویر شماتیک از نمای کناری نمونه، (ج) تصویر شماتیک از نمای روبه‌روی نمونه، (د) تصویر شماتیک از نمای بالای نمونه، (ه) تصویر واقعی از نمای روبه‌روی نمونه

در این تحقیق تعداد ۲۲ نمونه مطابق مشخصات جدول (۱) در دو بخش با ویژگی‌های مختلف ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند که ۸ نمونه اول به عنوان نمونه اولیه به منظور بررسی میزان درگیری میلگردها با بتن شاتکریت به گونه‌ای که میلگردها در آستانه گسیخته‌شدن قرار گیرند در نظر گرفته شد. ۱۴ نمونه

جدول ۱- مشخصات تمامی نمونه‌ها

| شماره | نوع میلگرد | وضعیت سطح آجری نمونه | زنگ زدگی میلگرد | پوشش میلگرد (mm) | میزان درگیری میلگرد با بتن (mm) |
|-------|------------|----------------------|-----------------|------------------|---------------------------------|
| ۱     | آج‌دار     | آجری تمیز            | x               | ۲۵               | ۷۰                              |
| ۲     | آج‌دار     | آجری تمیز            | x               | ۲۵               | ۱۲۰                             |
| ۳     | آج‌دار     | آجری تمیز            | x               | ۲۵               | ۱۷۰                             |
| ۴     | آج‌دار     | آجری تمیز            | x               | ۲۵               | ۲۲۰                             |
| ۵     | ساده       | آجری تمیز            | x               | ۲۵               | ۷۰                              |
| ۶     | ساده       | آجری تمیز            | x               | ۲۵               | ۱۲۰                             |
| ۷     | ساده       | آجری تمیز            | x               | ۲۵               | ۱۷۰                             |
| ۸     | ساده       | آجری تمیز            | x               | ۲۵               | ۲۲۰                             |
| ۹     | آج‌دار     | آجری تمیز            | x               | ۲۵               | ۱۵۰                             |
| ۱۰    | آج‌دار     | گچ خراشیده شده       | x               | ۲۵               | ۱۵۰                             |
| ۱۱    | آج‌دار     | گچ                   | x               | ۲۵               | ۱۵۰                             |
| ۱۲    | آج‌دار     | رنگ‌روغنی            | x               | ۲۵               | ۱۵۰                             |
| ۱۳    | آج‌دار     | آجری تمیز            | ✓               | ۲۵               | ۱۵۰                             |
| ۱۴    | آج‌دار     | آجری تمیز            | x               | ۳۰               | ۱۵۰                             |
| ۱۵    | آج‌دار     | آجری تمیز            | x               | ۲۰               | ۱۵۰                             |
| ۱۶    | ساده       | آجری تمیز            | x               | ۲۵               | ۲۰۰                             |
| ۱۷    | ساده       | گچ خراشیده شده       | x               | ۲۵               | ۲۰۰                             |
| ۱۸    | ساده       | گچ                   | x               | ۲۵               | ۲۰۰                             |
| ۱۹    | ساده       | رنگ‌روغنی            | x               | ۲۵               | ۲۰۰                             |
| ۲۰    | ساده       | آجری تمیز            | ✓               | ۲۵               | ۲۰۰                             |
| ۲۱    | ساده       | آجری تمیز            | x               | ۳۰               | ۲۰۰                             |
| ۲۲    | ساده       | آجری تمیز            | x               | ۲۰               | ۲۰۰                             |

سیمان آن پرتلند تیپ ۲ تولید شده در کارخانه سیمان تهران مطابق با ضوابط و استاندارد ASTM C150 [۱۷] و با مشخصات جدول (۲) است. ماسه استفاده شده از معادن نزدیک تهران تهیه شده است و مدول نرمی و درصد جذب رطوبت آن به ترتیب برابر ۳/۱۳ و ۳/۷ است. آب مصرفی نیز آب قابل شرب شهر تهران است که از کیفیت مطلوبی جهت ساخت بتن برخوردار است. مطابق جدول (۳) میانگین مقاومت فشاری شش نمونه مکعبی با ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر از بتن شاتکریت ۲۵/۸۳ مگاپاسکال و  $STDV^1$  آن‌ها برابر ۰/۹۵ و میانگین مقاومت کششی شش نمونه استوانه‌ای در ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر از بتن شاتکریت ۳/۳۵

بعدی برای بررسی اهمیت برداشت نازک‌کاری از سطح دیوار و یا وجود گچ و رنگ در سطح آن، نوع میلگرد فولادی آج‌دار یا ساده، میزان پوشش‌های مختلف و زنگ یا عدم وجود زنگ‌زدگی میلگرد استفاده شده در شاتکریت ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند.

### ۲-۳- خواص مصالح

در این بخش اجزای تشکیل‌دهنده یک نمونه متشکل از بتن و مواد تشکیل‌دهنده آن، میلگرد، آجر و... معرفی می‌شود. بتن استفاده شده برای شاتکریت از سیمان، ماسه و آب تشکیل شده است که

<sup>1</sup> Standard deviation



جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان

| مشخصات فیزیکی             |           | ساختار شیمیایی (%) |                  |                                |                 |      |                                |       |                  | ماده  |
|---------------------------|-----------|--------------------|------------------|--------------------------------|-----------------|------|--------------------------------|-------|------------------|-------|
| بلین (cm <sup>2</sup> /g) | وزن مخصوص | LOI                | K <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | SiO <sub>2</sub> |       |
| ۳۴۷۵                      | ۳,۱۳      | ۱,۷                | ۰,۷۱             | ۳,۲۳                           | ۶,۷۹            | ۲,۶۹ | ۳,۶۳                           | ۶۳,۰۱ | ۱۹,۴۲            | سیمان |

جدول ۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری و کششی بتن و ملات

| روز | شماره | ماده | ابعاد (mm) | تنش (MPa) |
|-----|-------|------|------------|-----------|
| ۱   | ۱     | بتن  | ۵۰*۵۰*۵۰   | ۲۶,۴      |
| ۱   | ۲     | بتن  | ۵۰*۵۰*۵۰   | ۲۵,۴      |
| ۱   | ۳     | بتن  | ۵۰*۵۰*۵۰   | ۲۶,۱      |
| ۲   | ۱     | بتن  | ۵۰*۵۰*۵۰   | ۲۴,۱      |
| ۲   | ۲     | بتن  | ۵۰*۵۰*۵۰   | ۲۶,۷      |
| ۲   | ۳     | بتن  | ۵۰*۵۰*۵۰   | ۲۶,۳      |
| ۱   | ۱     | بتن  | ۲۰۰*۱۰۰    | ۳,۴       |
| ۱   | ۲     | بتن  | ۲۰۰*۱۰۰    | ۳,۳       |
| ۱   | ۳     | بتن  | ۲۰۰*۱۰۰    | ۳,۴       |
| ۲   | ۱     | بتن  | ۲۰۰*۱۰۰    | ۳,۱       |
| ۲   | ۲     | بتن  | ۲۰۰*۱۰۰    | ۳,۵       |
| ۲   | ۳     | بتن  | ۲۰۰*۱۰۰    | ۳,۴       |
| ۱   | ۱     | ملات | ۵۰*۵۰*۵۰   | ۲۳,۴      |
| ۱   | ۲     | ملات | ۵۰*۵۰*۵۰   | ۲۲,۴      |
| ۱   | ۳     | ملات | ۵۰*۵۰*۵۰   | ۲۸,۹      |
| ۲   | ۱     | ملات | ۵۰*۵۰*۵۰   | ۲۴,۷      |
| ۲   | ۲     | ملات | ۵۰*۵۰*۵۰   | ۲۴,۸      |
| ۲   | ۳     | ملات | ۵۰*۵۰*۵۰   | ۲۴,۵      |
| ۱   | ۱     | ملات | ۲۰۰*۱۰۰    | ۲,۶       |
| ۱   | ۲     | ملات | ۲۰۰*۱۰۰    | ۲,۵       |
| ۱   | ۳     | ملات | ۲۰۰*۱۰۰    | ۳,۲       |
| ۲   | ۱     | ملات | ۲۰۰*۱۰۰    | ۲,۷       |
| ۲   | ۲     | ملات | ۲۰۰*۱۰۰    | ۲,۷       |
| ۲   | ۳     | ملات | ۲۰۰*۱۰۰    | ۲,۷       |

۲/۷۳ مگاپاسکال و STDV آن‌ها برابر ۰/۲۴ است. میلگردهای مصرفی در این تحقیق، میلگردهای فولادی به قطر هشت میلی‌متر در انواع آج‌دار و ساده هستند. میلگردهای آج‌دار به شکل جناقی، گرم‌نورد شده، از نوع A3، تهیه شده از بازار آهن تهران با وزن واحد طولی ۰/۳۸۹ کیلوگرم بر متر بودند. نمودار تنش کرنش این میلگردها تحت بارکشی در شکل (۴-الف) آمده است. اما میلگردهای نوع ساده سرد نورد شده، از نوع A1، تهیه شده از بازار آهن تهران با وزن واحد طولی ۰/۳۵۱ کیلوگرم بر متر هستند. نمودار تنش کرنش آن‌ها نیز تحت بارکشی در شکل (۴-ب) آمده است. میلگردهای زنگ‌زده نیز به مدت دو ماه به صورت یک روز در میان به طور کامل داخل آب قرار گرفتند و سپس خشک شدند. میلگردهای این دسته نیز مشابه میلگردهای آج‌دار و ساده فاقد زنگ‌زدگی بودند؛ ولی به علت تماس با رطوبت، نمودار تنش و کرنش آن‌ها مطابق شکل (۴-ج) شده بود. همان‌طور که در شکل (۵) نیز نشان‌داده شده است میلگردهای یاد شده لایه‌لایه شده بودند. آجر استفاده شده در این تحقیق آجر فشاری با متوسط ابعاد ۵۰×۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر و متوسط وزن مخصوص این نوع آجر ۱۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و وزن یک آجر نیز به طور متوسط ۲ کیلوگرم بوده و گچ مصرفی نیز گچ سمنان، تولید شده مطابق استاندارد 1-12015 [۱۸] ملی ایران بود.

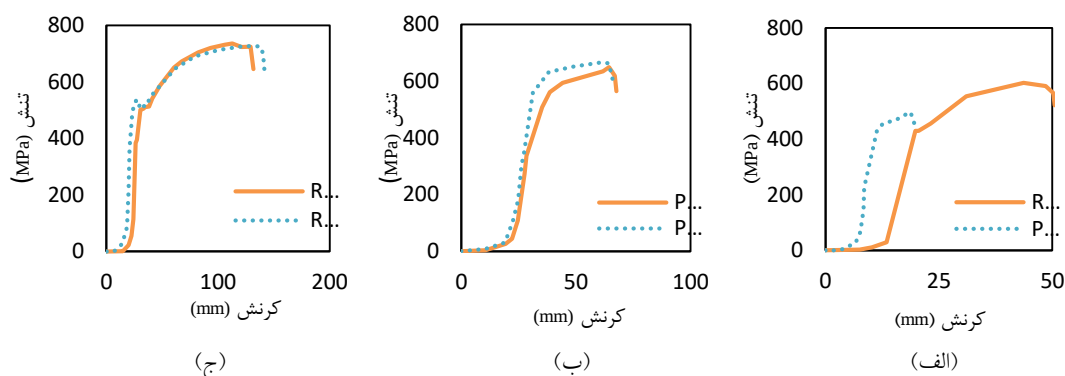
### ۳-۳- طرح اختلاط

طرح اختلاط‌های به‌دست‌آمده برای بتن شاتکریت و ملات استفاده شده بین آجرها در این قسمت ارائه می‌شود. طرح اختلاط استفاده شده برای بتن شاتکریت با مشخصات ذکر شده در جدول (۳) بر مبنای مبحث نهم مقررات ملی ساختمان [۱۹] تهیه شده بود و ملات استفاده شده در بین آجرها نیز ملات ماسه و سیمان با نسبت سه به یک با مشخصات ذکر شده در همان جدول است.

### ۴-۳- فرایند ساخت

برای ساخت نمونه‌ها، در یک سطح صاف چهار آجر به صورت

مگاپاسکال و STDV آن‌ها برابر ۰/۱۴ است. در ساخت ملات بین آجرها دقیقاً از مصالح استفاده شده برای تهیه بتن شاتکریت استفاده شده است. نتایج میانگین آزمایش مقاومت فشاری شش نمونه مکعبی از ملات ۲۴/۱ مگاپاسکال و STDV آن‌ها برابر ۰/۹۹ و میانگین مقاومت کششی شش نمونه استوانه‌ای از ملات

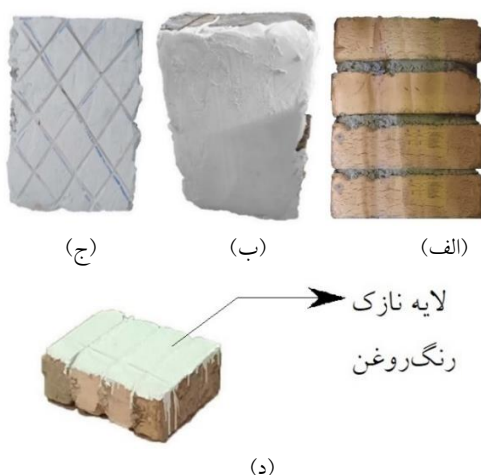


شکل ۴- نمودار تنش-کرنش میلگردهای فولادی: (الف) میلگردهای فولادی آج‌دار بدون زنگ، (ب) میله‌های فولادی ساده بدون زنگ‌زدگی (ج) میلگردهای فولادی آج‌دار و ساده زنگ‌زده

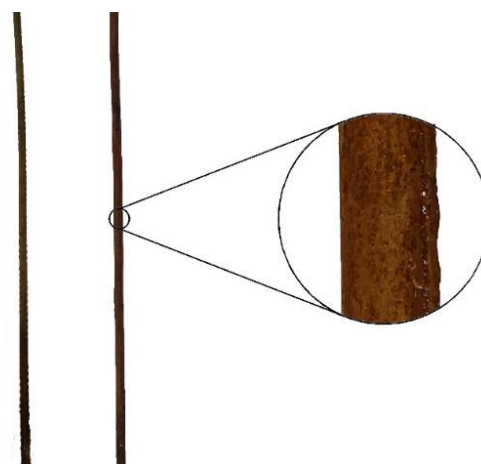
که با سنگ فرز برای اتصال بتن شاتکریت و سطح دیوار ایجاد شده که X در این حالت نیز ۱۰ میلی‌متر است. آخرین حالت مطابق شکل (۶-۵)، رنگ روغنی است که X در این حالت ۱ میلی‌متر است.

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان

| محتویات |            |           |         |
|---------|------------|-----------|---------|
| ماده    | سیمان (kg) | ماسه (kg) | آب (kg) |
| شاتکریت | ۴۰۰        | ۱۷۵۰      | ۲۰۰     |
| ملات    | ۳۶۰        | ۱۰۸۰      | ۲۵۸     |



شکل ۶- انواع وضعیت‌های سطحی: (الف) آجری تمیز و عاری از هرگونه رنگ و گچ، (ب) گچ، (ج) گچ خراشیده شده، (د) رنگ‌روغنی

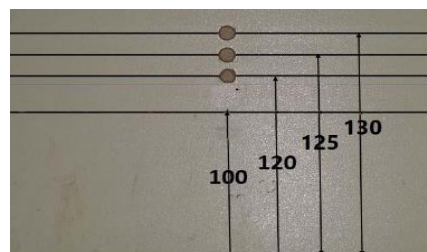


شکل ۵- میلگردهای زنگ‌زده و لایه‌لایه شده

سطح تمام نمونه‌ها پنج دقیقه قبل از اجرای شاتکریت به وسیله جریان مستقیم آب تر شده بود. دمای محیط کارگاه در زمان ساخت نمونه‌ها ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود. مقادیر پوشش بتن در این تحقیق ۳۰، ۲۵ و ۲۰ میلی‌متر بود. برای ایجاد این فواصل ثابت ماندن آن‌ها حین اجرای شاتکریت، از تخته‌هایی به ضخامت ۳ میلی‌متر استفاده شده بود. در سطح این تخته‌ها سوراخ‌هایی مطابق شکل (۷) در فواصل ۱۳۰، ۱۲۵ و ۱۲۰ میلی‌متر از کف

شاغولی با استفاده از ملات ماسه و سیمان با نسبت ۳ به ۱ به هم‌دیگر متصل شدند. در شکل (۳) قسمت هاشورخورده با ضخامت X، قسمتی نمادین برای نشان‌دادن وضعیت سطحی نمونه‌هاست که شامل ۴ وضعیت است. اولین حالت مطابق شکل (۶-الف)، وضعیت آجری تمیز و عاری از هرگونه رنگ و گچ است که X در این حالت صفر است. دومین حالت مطابق شکل (۶-ب)، اندود گچ که X در این حالت ۱۰ میلی‌متر است. سومین حالت مطابق شکل (۶-ج)، اندود گچ به همراه خراش‌هایی است

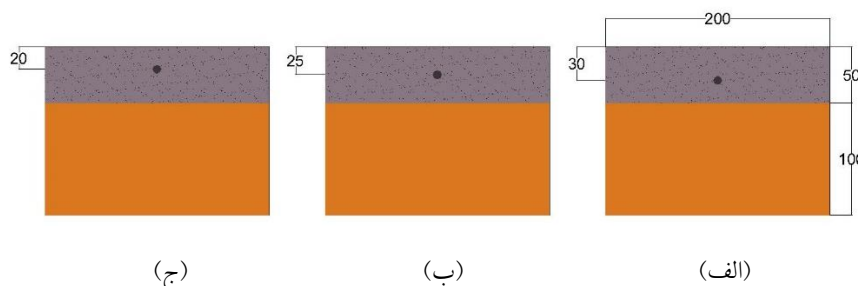
ایجاد شده بود و میلگردها با توجه به پوشش مورد نیاز در سوراخ مورد نظر قرار می‌گرفتند. ۱۰۰ میلی‌متر اول از سطح زمین توسط آجر پر می‌شد و بدین ترتیب میلگردها در فواصل ۲۵، ۳۰ و ۲۰ میلی‌متری مطابق شکل (۸) قرار می‌گرفتند. میلگردهای ساده و آج‌دار در نمونه‌های مختلف دارای میزان درگیری متفاوتی بودند.



شکل ۷- تخته سه میلی با سوراخ‌ها (اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر هستند).

قسمت‌هایی از میلگردها که نیاز به درگیری با بتن نداشتند مطابق شکل (۹) توسط نوار تفلون محدود شده و یک لایه نازک گریس روی آن‌ها مالیده شده بود. در نهایت بخش‌های چهار آجری انتخاب شده و بر روی یک سطح به نسبت صاف قرار داده شده و در دو سر نمونه قرار داده شده و با استفاده از تکیه‌گاه مناسبی در جای خود ثابت و محکم می‌شدند و میلگردهای مورد نظر پس از تعیین میزان درگیری در موقعیت مناسب با مشخصات نمونه قرار داده شده و برای ایجاد فاصله‌ای به مقدار یک سانتی‌متر بین بتن شاتکریت و سطح بالاترین آجر به دلیل وارد شدن کشش به طور مستقیم به میلگرد و بتن، یونولیتی روی میلگرد قرار داده می‌شد.

پس از آماده شدن بتن با طرح اختلاط طرح شده پاشش بتن با فشار روی نمونه‌ها با استفاده از ملات‌پاش مطابق شکل (۱۰-الف)



شکل ۸- نحوه قرارگیری میلگرد داخل ملات با میزان پوشش‌های متفاوت (اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر می‌باشد): (الف) نمونه با پوشش ۳۰ میلی‌متر، (ب) نمونه با پوشش ۲۵ میلی‌متر، (ج) نمونه با پوشش ۲۰ میلی‌متر

از دستگاه<sup>۱</sup> UTM در آزمایش‌های این تحقیق استفاده شده است. مدل دستگاه استفاده شده نیز Zwick/Roel Z150 مطابق شکل (۱۱-ج) است و سرهم‌بندی استفاده شده در این آزمایش مطابق شکل (۸-الف) از سه پلیت<sup>۲</sup>، چهار میله رزوه شده و ۱۶ مهره تشکیل شده است. اولین پلیت دارای ۴ سوراخ با قطرهای ۲ سانتی‌متر برای اتصال به دستگاه است و دارای دو صفحه موازی به فاصله ۳ سانتی‌متر از هم‌دیگر بوده که در مرکز پلیت قرار گرفته‌اند. در واقع این پلیت رابطی بین دستگاه و بدنه سرهم‌بندی است. دو پلیت دیگر به طور مشابه دارای ۴ سوراخ با قطرهای ۲ سانتی‌متر هستند. دومین پلیت نیز دارای یک صفحه در مرکز است و برای اتصال به پلیت پایینی از آن استفاده می‌شود. دو پلیت بالایی با استفاده از میله رزوه شده و مهره در فواصل ۷۰

متصل به پمپ باد با فشار ۰/۴ مگاپاسکال انجام شده است. ۲۴ ساعت پس از آجرکاری یا شاتکریت، گونی‌های تهیه شده را مطابق شکل (۱۰-ب) روی آن‌ها قرار داده و به مدت ۷ روز مرطوب نگه داشته می‌شدند.



شکل ۹- میلگردهای آج‌دار و ساده محدود شده با نوار تفلون و گریس

۳-۵- دستگاه و سرهم‌بندی آزمایش

<sup>2</sup> Plate

<sup>1</sup> Universal Testing Machine

نمونه داخل سرهم‌بندی و آویزان کردن نمونه از فک دستگاه است. شکل (۸-ب) نیز نمونه قرارگرفته داخل سرهم‌بندی و زیر فک دستگاه را نشان می‌دهد.

سانتی‌متری از هم‌دیگر ثابت شده‌اند. در مرکز پلیت سوم سوراخ دایره‌ای شکل به قطر ۴ سانتی‌متر ایجاد شده و تا مرکز یک ضلع ادامه پیدا کرده است. این امتداد در واقع مسیری برای وارد کردن

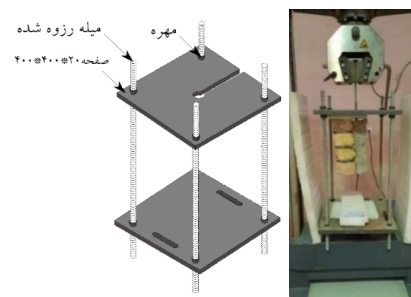


(ب)

(الف)

شکل ۱۰- نمونه‌ها در مراحل ساخت: (الف) نمونه‌ها در حال شاتکریت شدن، (ب) نمونه‌ها در حال عمل‌آوری

در این بخش نتایج تمامی آزمایش‌ها و تحلیل‌هایی مربوط به آن‌ها در ۲ قسمت متشکل از مدهای خرابی و نمودارهای نیرو-جابجایی به‌دست‌آمده ارائه می‌شود. جدول (۴) مشخصات و نتایج آزمایش تمامی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



(ب)

(الف)

۴-۱- طبقه‌بندی مدهای خرابی  
در این بخش به طور کلی در ۲۲ نمونه ساخته شده، ۶ مد ظاهر شده در جدول (۵) بیان می‌شوند.



(ج)

۴-۲- نتایج نمودارهای نیرو-تغییر مکان  
در این بخش نمودارهای نیرو-تغییر مکان به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها در دو بخش نمونه‌های اولیه و نمونه‌هایی با پارامترهای متغیر متشکل از نوع میلگرد، وضعیت سطح آجری نمونه، زنگ‌زدگی میلگرد و پوشش میلگرد، مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۲-۱- بررسی مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد نمونه‌های اولیه

همان‌طور که در جدول (۴) و شکل (۱۲-الف) مشهود است میلگردهای آجدار با میزان درگیری‌های ۷۰ و ۱۲۰ میلی‌متر سرخورده و از بتن بیرون آمده‌اند و میلگردهای آجدار با میزان درگیری‌های ۱۷۰ و ۲۲۰ میلی‌متر جاری شده‌اند. برای این که در

شکل ۱۱- دستگاه و سرهم‌بندی آزمایش: (الف) تصویر شماتیک از سرهم‌بندی استفاده شده (اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر هستند)، (ب) تصویر نمونه تعبیه شده در سرهم‌بندی زیر فک، (ج) دستگاه استفاده شده در آزمایش‌ها دستگاه

۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها

جدول ۴- مشخصات و نتایج تمامی نمونه‌ها

| شماره | نوع<br>میلگرد | وضعیت سطح<br>آجری نمونه | پوشش<br>میلگرد (mm) | زنگ‌زدگی<br>میلگرد | میزان درگیری<br>میلگرد با بتن<br>(mm) | حداکثر<br>نیرو (kN) | مد خرابی                 |
|-------|---------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------|--------------------------|
| ۴     | آج‌دار        | آجری تمیز               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۲۲۰                                   | ۳۱,۲۵               | R.R <sup>۱</sup>         |
| ۳     | آج‌دار        | آجری تمیز               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۱۷۰                                   | ۳۰,۸۶               | R.R                      |
| ۸     | ساده          | آجری تمیز               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۲۲۰                                   | ۲۴,۴۵               | R.R                      |
| ۹     | آج‌دار        | آجری تمیز               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۱۵۰                                   | ۲۴,۱۶               | R.P <sup>۲</sup>         |
| ۱۳    | آج‌دار        | آجری تمیز               | زنگ‌زده             | ۲۵                 | ۱۵۰                                   | ۲۲,۰۷               | R.P                      |
| ۲     | آج‌دار        | آجری تمیز               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۱۲۰                                   | ۱۸,۷۰               | R.P                      |
| ۷     | ساده          | آجری تمیز               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۱۷۰                                   | ۱۸,۳۳               | R.P                      |
| ۱۶    | ساده          | آجری تمیز               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۲۰۰                                   | ۱۶,۲۷               | R.P                      |
| ۱     | آج‌دار        | آجری تمیز               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۷۰                                    | ۱۵,۸۲               | R.P                      |
| ۶     | ساده          | آجری تمیز               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۱۲۰                                   | ۱۵,۲۶               | R.P                      |
| ۲۰    | ساده          | آجری تمیز               | زنگ‌زده             | ۲۵                 | ۲۰۰                                   | ۱۵,۲۳               | R.P                      |
| ۱۴    | آج‌دار        | آجری تمیز               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۳۰                 | ۱۵۰                                   | ۱۳,۵۲               | R.P / C-M.D <sup>۳</sup> |
| ۵     | ساده          | آجری تمیز               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۷۰                                    | ۱۳,۱۳               | R.P                      |
| ۲۱    | ساده          | آجری تمیز               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۳۰                 | ۲۰۰                                   | ۱۲,۰۲               | R.P / C-M.D              |
| ۱۰    | آج‌دار        | گچ خراشیده شده          | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۱۵۰                                   | ۱۰,۹۹               | C-M.D <sup>۴</sup>       |
| ۱۷    | ساده          | گچ خراشیده شده          | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۲۰۰                                   | ۱۰,۵۸               | C-M.D                    |
| ۱۱    | آج‌دار        | گچ                      | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۱۵۰                                   | ۹,۳۳                | C-M.D                    |
| ۱۸    | ساده          | گچ                      | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۲۰۰                                   | ۹,۱۵                | C-M.D                    |
| ۱۵    | آج‌دار        | آجری تمیز               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۰                 | ۱۵۰                                   | ۶,۰۱                | C.S <sup>۵</sup>         |
| ۲۲    | ساده          | آجری تمیز               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۰                 | ۲۰۰                                   | ۵,۳۱                | C.S                      |
| ۱۹    | ساده          | رنگ‌روغنی               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۲۰۰                                   | ۴,۸۶                | C-M.D / S <sup>۶</sup>   |
| ۱۲    | آج‌دار        | رنگ‌روغنی               | فاقد زنگ‌زدگی       | ۲۵                 | ۲۰۰                                   | ۴,۱۰                | C-M.D/ S                 |

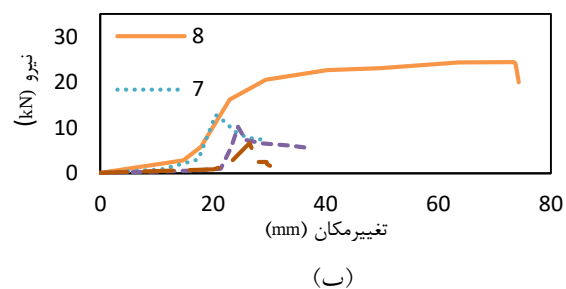
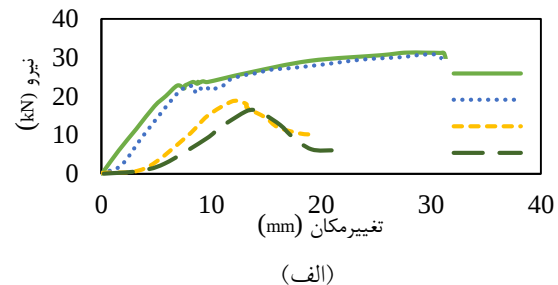
نمونه‌های بعدی مقدار پیوستگی میلگرد آج‌دار با بتن به گونه‌ای باشد که میلگرد در آستانه گسیخته شدن قرار گیرد، مقدار ۱۵۰ میلی‌متر به عنوان میزان درگیری میلگردهای آج‌دار با بتن در نظر

گرفته شد. هم‌چنین همان‌طور که در جدول (۴) و شکل (۱۲)- (ب) مشهود است میلگردهای ساده با میزان درگیری‌های ۷۰، ۱۲۰ و ۱۷۰ میلی‌متر سر خورده و از بتن بیرون آمده است و

- 1 Rebar rupture
- 2 Rebar pullout
- 3 Rebar pullout and concrete-masonry debonding
- 4 Concrete-masonry debonding
- 5 Concrete spalling
- 6 Concrete-masonry debonding and splitting



میلگرد ساده با میزان درگیری ۲۲۰ میلی‌متر جاری شده است. برای این که در نمونه‌های بعدی مقدار پیوستگی میلگرد ساده به گونه‌ای باشد که میلگرد در آستانه گسیخته شدن قرار گیرد، مقدار ۲۰۰ میلی‌متر به عنوان میزان درگیری میلگرد ساده با بتن در نظر گرفته شد.



شکل ۱۲- نمودار تنش کرنش نمونه‌های اولیه: (الف) نمونه‌ها با میلگرد آج‌دار، (ب) نمونه‌ها با میلگرد ساده

## ۲-۲-۴- بررسی مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد نمونه‌ها با پارامترهای مختلف

در این بخش نتایج آزمایش ۱۶ نمونه ساخته شده با مشخصات جدول مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تمامی نمونه‌های این بخش، مقدار تماس میلگرد آج‌دار و ساده با بتن به ترتیب ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر است. در اکثر نمونه‌های جدول (۴) روند ملموس و ثابتی با تغییر نوع میلگرد استفاده شده ایجاد شده است، به این ترتیب که در نمونه‌ها با پارامترهای یکسان مقاومت بیرون کشیدگی نمونه‌ها با نوع آج‌دار بیش‌تر از نمونه‌ها با نوع میلگرد ساده است. شکل (۱۳) نمودار نیرو-تغییر مکان این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. اما در شکل (۱۴) نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌هایی نمایش داده می‌شود که تغییر در نوع میلگرد آن‌ها تأثیر کلیدی در نتایج ایجاد نکرده است و تقریباً نمودار دو نمونه بر هم دیگر منطبق هستند. دلیل این روند با توجه به مد خرابی که در این نمونه‌ها اتفاق افتاده است، توجیه‌پذیر است. در نمونه‌هایی با وضعیت سطحی گچی خراشیده شده، گچی و رنگ روغنی

قبل از این که نیروی وارده باعث پیوستگی میلگرد در مکانیزم اصطکاکی شود، بتن از آجرها به دلیل ضعف ایجاد شده توسط گچ و رنگ کنده شده است و باعث کم اثر شدن وجود آجرها در میلگرد می‌شود. این فرایند در نمونه‌ها با میزان پوشش ۲۰ میلی‌متر نیز اتفاق افتاده است و قبل از این که نیروی وارده باعث پیوستگی میلگرد در مکانیزم اصطکاکی شود، بتن قلوه‌کن شده است.

جدول (۴) روند ملموس و ثابتی را با تغییر وضعیت سطحی نمونه‌ها نشان می‌دهد، به این ترتیب که مقاومت بیرون کشیدگی نمونه‌ها با سطح آجری تمیز بیش‌تر از نمونه‌هایی با وضعیت سطحی گچی خراشیده شده، گچی و رنگ روغنی است. شکل (۱۵) نمودار نیرو-تغییر مکان چهار نمونه با وضعیت‌های سطحی متفاوت برای میلگردهای آج‌دار و ساده را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول (۴) و همان‌طور که در شکل (۱۵) مشهود است، مقاومت بیرون کشیدگی نمونه شماره ۹ با سطح آجری تمیز به ترتیب ۵۴، ۶۱ و ۸۳ درصد بیش‌تر از نمونه‌ها با شماره‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ با وضعیت‌های سطحی گچی خراش‌دار، گچی و رنگ روغنی است. همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز بیان شد و از نتایج نیز مشهود است، باید به برداشت درست نازک‌کاری از دیوارهای مصالح بنایی توجه ویژه شود؛ زیرا وجود گچ حتی به صورت خراشیده شده نیز باعث تضعیف زیاد دیوارهای مصالح بنایی مقاوم شده با شاتکریت می‌شود. این روند تضعیف شدگی در سطوح رنگ آمیزی شده با رنگ روغنی نیز بیش‌تر از سطوح گچی است. هم‌چنین با توجه به نتایج جدول (۴) و همان‌طور که در شکل (۱۵) مشهود است، مقاومت بیرون کشیدگی نمونه شماره ۱۶ با سطح آجری تمیز به ترتیب ۳۵، ۴۴ و ۷۰ درصد بیش‌تر از نمونه‌ها با شماره‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ با وضعیت‌های سطحی گچی خراش‌دار، گچی و رنگ روغنی است.

از نتایج نمونه‌ها در جدول (۴) برمی‌آید که نمونه‌ها با میلگرد فاقد زنگ‌زدگی مقاومت بیرون کشیدگی بیش‌تری نسبت به نمونه‌ها با میلگرد زنگ‌زده تحمل کرده‌اند. شکل (۱۶) نیز نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌ها با میلگردهای متفاوت از نظر زنگ‌زدگی را نشان می‌دهد. در شکل (۱۶) نیز مشهود است نمونه‌ها با میلگرد زنگ‌زده مقاومت بیرون کشیدگی بیش‌تری را تحمل کرده‌اند؛ ولی این مقاومت بسیار شکننده است. به گونه‌ای که مقاومت بیرون کشیدگی نمونه‌ها با میلگرد فاقد زنگ‌زدگی به طور متوسط تنها ۷/۵ درصد کم‌تر از نمونه‌ها با میلگرد زنگ‌زده

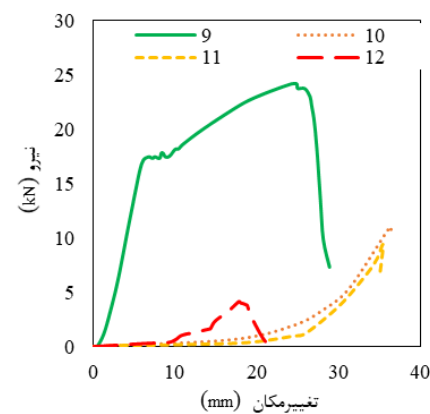
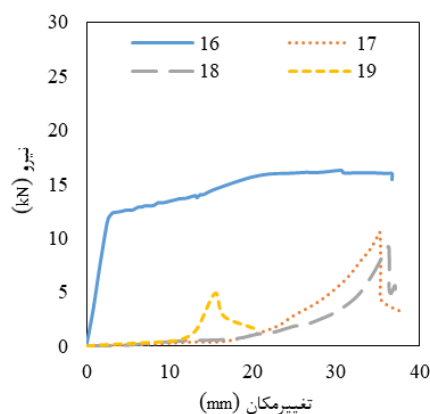
است که تأثیر ناچیز متغیرهای این پارامتر را در مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد نمونه‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۵- مشخصات مدهای پرتکرار ظاهر شده

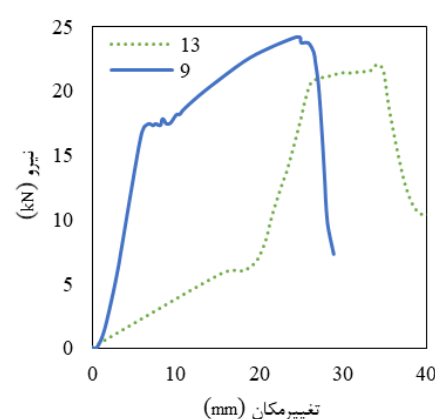
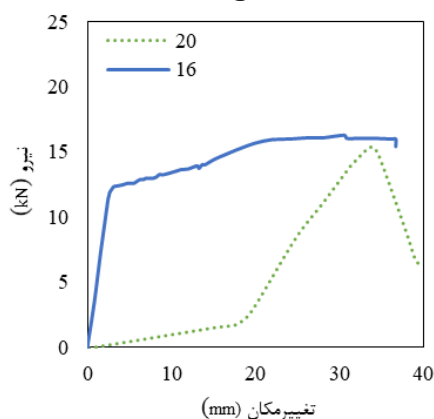
| شماره | مد شکست ظاهر شده                                 | علامت اختصاری | دلیل تشکیل                                                                      | تصویر شماتیک | تصویر واقعی |
|-------|--------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------|
| ۱     | گسیخته شدن میلگرد                                | R.R           | پوستگی مناسب به دلیل مقدار تماس بیش تر سطح میلگرد با بتن نسبت به نمونه‌های دیگر |              |             |
| ۲     | بیرون آمدن میلگرد                                | R.P           | کم تر کردن میزان درگیری میلگرد با بتن و زنگ‌زده شدن میلگرد                      |              |             |
| 3     | بیرون آمدن میلگرد با جدایش از آجر                | R.P/ C-M.D    | تغییر پوشش میلگرد به ۳۰ میلی‌متر و زنگ‌زدگی در برخی از میلگردها                 |              |             |
| ۳     | جدایش از آجرها                                   | C-M.D         | ضعف موجود در اتصال آجرها به بتن به دلیل رنگی بودن سطح آجرها و ضعف ذاتی گچ       |              |             |
| ۵     | قلوه‌کن شدن بتن                                  | C.S           | کاهش پوشش میلگرد به مقدار ۲۰ میلی‌متر                                           |              |             |
| ۶     | جدایش از آجرها با ایجاد ترک و دو نیم شدگی در بتن | C-M.D /S      | تغییر وضعیت سطح نمونه به رنگ‌روغنی                                              |              |             |

مشهود است مقاومت بیرون کشیدگی آج‌دار نمونه شماره ۹ با میزان پوشش ۲۵ میلی‌متر به ترتیب ۴۳ و ۷۵ درصد بیشتر از نمونه‌ها با شماره‌های ۱۴ و ۱۵ با میزان پوشش‌های ۳۰ و ۲۰ میلی‌متر است. بدین ترتیب در تمامی نمونه‌ها مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد نمونه‌هایی با میزان پوشش ۲۵ میلی‌متر به ترتیب از نمونه‌هایی با پوشش ۳۰ و ۲۰ میلی‌متر است. دلیل این

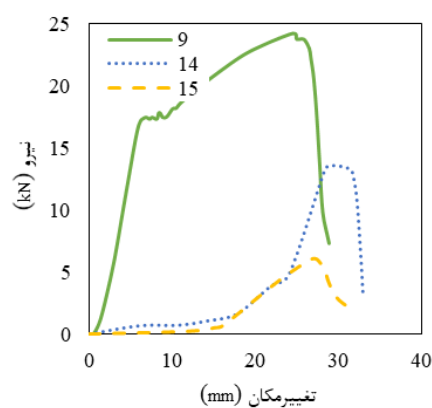
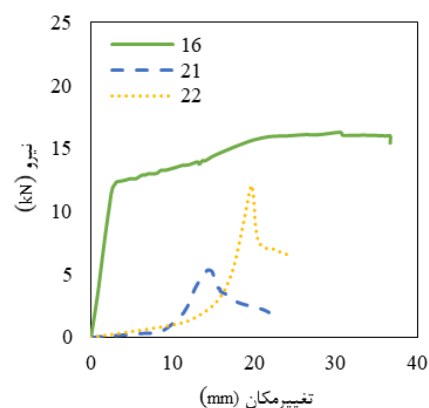
هم‌چنین جدول (۴) روند ملموس و ثابتی را با تغییر پوشش میلگرد نمونه‌ها نشان می‌دهد. به این ترتیب که مقاومت بیرون کشیدگی نمونه‌ها با میزان پوشش ۲۵ میلی‌متر به ترتیب بیش‌تر از نمونه‌ها با میزان پوشش ۳۰ و ۲۰ میلی‌متر است. شکل (۱۷) نمودار نیرو-تغییر مکان سه نمونه با پوشش‌های متفاوت میلگرد آج‌دار و ساده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۷)



شکل ۱۵- بررسی تأثیر شرایط زنگ‌زدگی میلگرد در نتایج نمونه‌ها



شکل ۱۶- نمودار نیرو - تغییر مکان مربوط به نمونه‌ها با وضعیت‌های سطحی متفاوت و با میلگردهای آج‌دار و ساده



شکل ۱۷- بررسی میزان پوشش‌های متفاوت در نتایج نمونه‌ها

روند با توجه به مدهای خرابی اتفاق افتاده در پوشش‌های مختلف توجیه‌پذیر است. در پوشش ۳۰ و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب مدهای خرابی C-M.D و C.S اتفاق می‌افتد. مد خرابی C-M.D به معنی جدایش از آجرها و مد خرابی C.S به معنی قله‌کن شدن بتن می‌باشد. پس در نتیجه نیرویی که صرف جدا کردن نمونه از آجرها می‌گردد، بیش‌تر از نیرویی است که صرف قله‌کن کردن بتن می‌شود. به همین دلیل نمونه‌ها با پوشش ۳۰ میلی‌متر مقاومت بیرون کشیدگی بیش‌تری نسبت به نمونه‌ها با میزان پوشش ۲۰ میلی‌متر دارند. هم‌چنین همان‌طور که در شکل (۱۷) مشهود است مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد ساده نمونه شماره ۱۶ با میزان پوشش ۲۵ میلی‌متر به ترتیب ۳۳ و ۷۰ درصد بیش‌تر از نمونه‌ها با شماره‌های ۲۱ و ۲۲ با میزان پوشش‌های ۳۰ و ۲۵ میلی‌متر است که نشان می‌دهد میلگرد ساده با پوشش‌های متفاوت نیز، عملکردی مشابه میلگردهای آج‌دار دارد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

برای بررسی تاثیر کمی پارامترهای برداشت نازک‌کاری از سطح دیوار و با وجود گچ و رنگ در سطح آن، نوع میلگرد فولادی آج‌دار یا ساده استفاده شده در شاتکریت، میزان کاورهای مختلف میلگرد و زنگ یا عدم وجود زنگ‌زدگی میلگرد استفاده شده درون لایه شاتکریت، آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد درون لایه شاتکریت بر روی نمونه‌ها در مقیاس کامل انجام شد و نتایج زیر حاصل شد.

۱- در حالتی که میزان درگیری‌های میلگرد آج‌دار و ساده با بتن شاتکریت به ترتیب مقادیر ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر باشد، میلگردها به آستانه گسیخته شدن خواهند رسید.

۲- در بررسی مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد نمونه‌ها با پارامترهای مختلف نتیجه گرفته شد که در نمونه‌ها با وضعیت سطحی آجری تمیز و عاری از رنگ و گچ مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد آن به ترتیب ۴۴/۵، ۵۲/۵ و ۷۶/۵ درصد بیش‌تر از نمونه‌ها با وضعیت سطحی گچی خراشیده شده، گچی بدون خراش و رنگ روغنی است.

۳- در بررسی مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد نمونه‌ها با پارامترهای مختلف نتیجه گرفته شد که مقاومت بیرون کشیدگی

میلگرد نمونه‌ها با پوشش ۲۵ میلی‌متر به ترتیب ۳۸ و ۷۲/۵ درصد بیش‌تر از نمونه‌ها با پوشش ۳۰ و ۲۰ میلی‌متر است.

۴- در بررسی مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد نمونه‌ها با پارامترهای مختلف نتیجه گرفته شد که در نمونه‌ها با پوشش ۲۵ میلی‌متر، آج‌دار بودن میلگرد استفاده شده و استفاده از میلگرد فاقد زنگ‌زدگی به عنوان یک عضو سازه‌ای مهم و تاثیرگذار در عملکرد نمونه‌ها به ترتیب باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد به میزان ۲۸ و ۱۱ درصد می‌شود.

۵- در بررسی مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد نمونه‌ها با پارامترهای مختلف نتیجه گرفته شد که در نمونه‌ها با پوشش ۳۰ میلی‌متر، آج‌دار بودن میلگرد استفاده شده به عنوان یک عضو سازه‌ای مهم و تاثیرگذار در عملکرد نمونه‌ها باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد به میزان ۷/۵ درصد می‌شود.

۶- در بررسی مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد نمونه‌ها با پارامترهای مختلف نتیجه گرفته شد که در نمونه‌ها با پوشش ۲۰ میلی‌متر، آج‌دار بودن میلگرد استفاده شده به ترتیب باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد به میزان ۱۰ درصد می‌شود.

#### ۶- مراجع

- [1] Forotan, Sh., Dardayi, S. and Shakib, H. (2015), "Evaluation of the performance of non-reinforced masonry buildings improved with perimeter shotcrete", 7th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, 24.
- [2] Mehdizade, A. (2011), "National report on building resistance and destroying and rebuilding schools in the Islamic Republic of Iran Ministry of Education", Organization for Renovation, Development and Equipment of Schools in the country, Tehran, 17.
- [3] Salmanpour, A.H., Mojsilovic, N. and Schwartz, J. (2012), "Deformation capacity of structural masonry: A review of theoretical research. In Proceedings", 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, 13.
- [4] Shabdin, M., Attari N.K.A. and Zargaran, M. (2018), "Experimental study on seismic behavior of Un-Reinforced Masonry (URM) brick walls strengthened

plane reinforcement for masonry walls using GFRP meshes", *Construction and Building Materials*, V. 88, pp. 94-104.

- [12] Bui, T.L., Si Larbi, A., Reboul, N. and Ferrier, E. (2015), "Shear behaviour of masonry walls strengthened by external bonded FRP and TRC", *Composite Structures*, V. 132, pp. 923-932.
- [13] Ministry of Education - Organization of Modernization, Development and Equipping of Iranian Schools (2010), Instruction No.10289/2-3156 for execution of sprayed concrete Rehabilitating schools, Tehran, 54.
- [14] Reported by AuSS (Australian Shotcrete Society). (2010), Recommended practice shotcreting in Australia, Second Edition. Canberra. pp. 245-250.
- [15] Bureau of INDIAN Standards, (1979), Recommended practice shotcreting, Fourth Edition, New Delhi, pp. 120-140.
- [16] Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC 20314-1000, (1993), Engineering and Design Standard Practice For Shotcrete. Washington, pp. 24-35.
- [17] Reported by ASTM Committee 150, (2016), Standard Specification for Portland Cement, Washington, pp. 57-65.
- [18] Iran Institute of Standards and Industrial Research (2013), Gypsum binders and gypsum plaster Part 1, Requirements, 1st.edition, Tehran, pp. 50-67.
- [19] Ministry of Roads and Urban Development, (2013), Topic 9 of Iran's National Building Regulations, design and implementation of reinforced concrete buildings.
- with shotcrete", *Bulletin of Earthquake Engineering*, pp. 3931-3956.
- [5] Ghiassi, B., Soltani, M. and Tasnimi, A.A. (2012), "Seismic evaluation of masonry structures strengthened with reinforced concrete layers", *Journal of Structural Engineering*, V.138, No. 6, pp. 729-743.
- [6] ElGawady, M.A., Lestuzzi, P. and Badoux, M. (2006), "Retrofitting of masonry walls using shotcrete. In 2006 NZSEE Conference, V. 45.
- [7] Dardaei, S., Shakib, H., Khalaf Rezaei, M. and Mousavi, M. (2015), "Analytical and experimental seismic evaluation of confined masonry walls retrofitted by steel-fiber and polypropylene shotcrete", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, V. 16, No. 4, pp. 271-280.
- [8] Ghezelbash, A., Beyer, K., Dolatshahi, K.M. and Yekrangnia, M. (2020), "Shake table test of a masonry building retrofitted with shotcrete", *Engineering Structures*, V. 219.
- [9] Rezaee, S.R.S., Soltani, M. and Nikooravesh, M. (2022), "Cyclic in-plane behavior of unreinforced and confined masonry walls retrofitted by shotcrete: Experimental investigation", *Engineering Structures*, V. 264.
- [10] Ehteshami, M., Razavi, S.A., Yekrangnia, M., Poursagari, P., and Abbasian, N. (2022), "Cyclic performance assessment of damaged unreinforced masonry walls repaired with steel mesh reinforced shotcrete", *Engineering Structure*, V. 118, No. 6, pp.729-743.
- [11] Gattesco, N. and Boem, I. (2015), "Experimental and analytical study to evaluate the effectiveness of an in-

