

## بررسی و ارزیابی دیوار مصالح بنایی با بلوک لیکا به صورت مدل ساده و مدل تقویت شده با TRC

عرفان طباطبایی

کارشناسی ارشد رشته عمران، گرایش زلزله، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران.

نام نویسنده مسئول:

عرفان طباطبایی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۸

### چکیده

امروزه نیاز به استراتژی برای ایجاد سازه‌ی پایدار بیش از پیش مورد توجه است. افزایش خرابی، ظرفیت باربری سازه‌های موجود را کاهش می‌دهد. بنابراین مقاوم سازی سازه یک عامل مهم اقتصادی محسوب می‌شود. سازه‌های ساختمانی همواره در معرض خطر زلزله قرار دارند. مقاوم سازی سازه‌های موجود برای افزایش ظرفیت باربری می‌تواند به علت‌های تغییر کاربری، طراحی ضعیف یا ساخت و ساز ضعیف و استهلاک سازه نیاز باشد. با توجه به قرار گیری کشور در کمربند لرزه‌ای و آسیب پذیری شدید ساختمان‌ها در برابر زلزله، لزوم ارائه راهکارهای کارآمد و مناسب برای مقاوم سازی سازه‌های موجود در کشور ضروری می‌باشد. دیوارهای غیرسازه‌ای اغلب تحت اثر خرابی خارج صفحه قرار دارند. رفتار خارج از صفحه از دو لحاظ مهم است. یکی خارج شدن از قاب که باعث تغییر تنظیمات اولیه سازه و تغییر در سختی و مقاومت می‌شود و دیگری خرابی که شامل ریزش دیوار است. این رفتار به ویژگی‌های هندسی، مکانیکی و به ویژه نوع اتصال و قاب بستگی دارد. استفاده از مواد کامپوزیتی به خصوص TRC برای تقویت سازه‌های مصالح بنایی در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در این مقاله هدف، بررسی و ارزیابی دیوار مصالح بنایی با بلوک لیکا به صورت مدل ساده و مدل تقویت شده با TRC می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** بلوک لیکا، بارگذاری خارج صفحه، TRC، مصالح بنایی، خرابی.

## مقدمه

ارتقاء لرزه ای ساختمان های مصالح بنایی موجود برای حفظ حرکت زمینی لرزه ای احتمالی یک جنبه مهم است (کوراسیا و همکاران، ۲۰۱۹). اساس تجارب زلزله های گذشته آسیب های وارد بر دیوارها و آن دسته از آسیب های وارد بر سازه که در اثر عملکرد دیوارها ایجاد می شود در سه سطح کلی قابل بررسی می باشد؛

در سطح یک تنها دیوار دچار آسیب می گردد، این آسیب ها تحت عنوان شکست درون صفحه ای دیوار قابل بررسی بوده و در مورد دیوارهای مجزا و میانقاب ها صادق است.

در سطح دو، دیوار دچار آسیب شده و احتمال وارد شدن آسیب به دیگر عناصر غیرسازه ای و انسان ها نیز ایجاد می گردد. این دسته از آسیب ها تحت عنوان شکست برون صفحه ای دیوارها شامل دیوارهای مجزا و میانقاب ها قابل بررسی است. در سطح سه، دیوار موجب وارد شدن آسیب به سازه ساختمان می گردد. در این سطح ممکن است ابتدا دیوار دچار شکست، به ویژه شکست درون صفحه ای گردیده و سپس سازه دچار آسیب شود و یا دیوار دچار آسیب نشده بلکه به دلیل فرم، مصالح، نحوه اتصالات و چیدمان موجب آسیب دیدن سازه گردد، بدیهی است در صورت آسیب دیدن سازه، آسیب های وارد بر عناصر غیرسازه ای از جمله دیوارها و ایجاد خطرات جانبی برای انسانها نیز مورد انتظار می باشد. شکست درون صفحه ای زمانی به وقوع می پیوندد که جهت نیروهای وارده موازی دیوار باشد.

در ادبیات فنی در آیین نامه های ASCE، FEMA ۳۵۶، نشریه ۳۶۰ و دیگر آیین نامه های طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، روش های بهسازی لرزه ای ساختمان های مصالح بنایی ارائه گردیده است (کورکماز و همکاران، ۲۰۰۷؛ لورنکو و همکاران، ۱۹۹۷؛ بوره و همکاران، ۲۰۱۹). با توجه به اینکه هنوز هم بسیاری از سازه های موجود در کشور از نوع سازه های بنایی است، برای جلوگیری از خسارت ساختمان های موجود، باید مقاوم سازی و بهسازی شوند. شناخت دقیق انواع آسیب های وارده به ساختمان و یافتن روش های مناسب مقاوم سازی با تقویت قسمت های اصلی و باربر ساختمان و افزودن عناصر باربر اضافی و نوع سازه بنایی می تواند راهی برای دسترسی به ایمنی بالاتر در مقابل زلزله باشد (مکرم آیدنلو، ۱۳۹۲).

تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی بسیاری برای تقویت نمونه های دیوارهای مصالح بنایی انجام پذیرفته شده است، از جمله روش های تقویت می توان استفاده از FRP بر روی سطح دیوار مصالح بنایی (پارگی و همکاران، ۲۰۱۸). استفاده از نوار فولادی ضد زنگ (آنتونیو و همکاران، ۲۰۱۹). استفاده از ژئوگرید در اتصالات، استفاده از نوار فولادی ضد زنگ بین آجرها (سادک، لیس، ۲۰۱۳). جلوگیری از ترک های برشی دیوارهای مصالح بنایی با استفاده از مهار بندهای فولادی، تزریق دوغاب ملات سیمان (بیلگ و همکاران، ۲۰۱۹). کامپوزیت های سیمانی و یا چسب اپوکسی (دنگ و همکاران، ۲۰۱۹). شاکریت بتنی (۲۰۰۶)، TRC (دکاستر، جینز، ۲۰۱۷؛ هارتوگ، ۲۰۰۸؛ کادوالدر، ۲۰۱۵) و دیگر روشها برای مقاوم سازی دیوارهای مصالح بنایی اشاره کرد (دادرس اسلاملو، ۲۰۱۹).

در ساختمان های بنایی، عنصر اصلی باربر ثقلی و جانبی دیوارهای برشی آجری می باشد که بار سقف از طریق این دیوارها به پی منتقل می شود. دیوارهای ساخته شده از مصالح آجری و مانند (آن بلوک بتنی، سنگ، خشت) از مقاومت برشی قابل ملاحظه ای برخوردار است؛ اما رفتاری به شدت ترد و شکننده دارد و به محض رسیدن به مقاومت نهایی، تحلیل رفته و فرو می ریزد که به همین دلیل برای مناطق شدیداً لرزه خیز سیستم مناسبی نیست. یک ویژگی مشترک دیوارهای آجری غیرمسلح آن است که تحت شتاب پی، مادام که به حد آستانه نرسیده اند، آثار تخریب چندانی در آنها ظاهر نمی شود؛ اما به محض عبور از حد آستانه، دیوار شروع به یک حرکت چرخشی حول محور عمود بر دیوار بنام حرکت تلو می کند و این حرکت به نوبه خود موجب پیدایش تنش های خردکننده ای در پنجه دیوار میشود که نهایتاً به خرابی دیوار می انجامد. (مقدم، ۱۳۸۷).

جهت بررسی رفتار لرزه ای این سازه ها تحقیقات متعددی توسط افراد مختلف انجام شده است. گامباروتا و اگومارسینو (گامباروتا، لاگومارسینو، ۱۹۹۷). بر اساس ویژگی های ملات بین آجرها و در نظر گرفتن معادله مشخصه آنها اقدام به تحلیل اجزای محدود و بررسی حرکت جانبی دیوار برشی آجری نموده اند. پاسخ های حاصل از این مدل با نتایج آزمایشگاهی حاصل از بارگذاری جانبی بر روی نمونه هایی از دیوارهای آجری مقایسه شده است. در ایران نیز در این ارتباط پس از خرابی این نوع سازه ها در زلزله های اخیر تحقیقات مختلفی صورت گرفته است.

تحقیقات انجام شده نشان می دهد مصالح بنایی دارای مقاومت کششی و فشاری بسیار پایین است که این امر، سبب رفتار ترد مصالح بنایی در حین اعمال بارهای لرزه ای شده و باعث می شود مصالح وارد ناحیه پلاستیک نشوند و دچار گسیختگی ترد شوند. این گسیختگی ممکن است از ناحیه ملات و یا آجر و یا لغزش درز مصالح باشد. بعد از گسیختگی مقاومت دیوار آجری به شدت کاسته می شود.

وجود ساختمان های بنایی به جا مانده از گذشته و یا بناهای تاریخی با ارزش با اشکال متنوع معماری باعث شده که برای بررسی اینگونه سازه ها در زلزله از مدلسازی عددی این ساختمان ها استفاده شود. مطالعات گسترده ای در مورد رفتار درون صفحه دیوار برشی به صورت آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته است. محققین بسیاری به ارائه روش هایی برای مدلسازی دیوارهای آجری به شیوه های مختلف پرداخته اند.

پیچ (۱۹۷۸) از اولین کسانی بود که به مدلسازی عددی آجر کار تحت ترکیب نیروهای درون صفحه به صورت مدلسازی میکرو پرداخت. در مدل وی آجرها رفتار کاملاً خطی دارند و رفتار غیرخطی آجر کار ناشی از رفتار درزهای ملات در نظر گرفته شده است. وی از معیار زوال مور- کلمب جهت مدلسازی درزهای ملات استفاده کرد.

لورنکو و روتز (۱۹۹۷) به ارائه المان تماسی جهت مدلسازی دیوارهای آجری به روش مدلسازی میکرو پرداختند. معیار زوال حاکم در بر درزهای ملات در این روش مدلسازی، ترکیبی از معیار زوال مور- کلمب با معیار حداکثر مقاومت کششی به همراه یک کلاهک فشاری می باشد. علاوه بر آن یک المان تماسی داخلی برای آجر جهت مدلسازی شکست کششی و برشی در واحدهای بنایی استفاده شده است. فعالیت های کاپوس و همکاران (۲۰۰۲) و جیاردانو (۲۰۰۰) و همکاران به مدلسازی ماکرو ساختمان های آجری در ابعاد بزرگ در نرم افزار Ansys و Abaqus پرداخته اند. باتوجه به آنچه تا کنون ذکر شد این مقاله می خواهد به نقش TRC در مقاوم سازی دیوارهای غیر سازه ای جداسازی شده را بررسی کند.

## انواع شکست دیوار

با افزایش بار خارج صفحه میزان جذب انرژی و نیروی برش پایه کاهش می یابد و مدل سوم کامل خراب شده است و در نود درصد ناحیه از دیوار از حالت الاستیک خارج شده و ترک و خورده شدگی رخ داده است. از این رو در این مدل با اعمال بارگذاری دیوار قابلیت تحمل کل بار وارده را ندارد.

بسته به این که دیوار به صورت مجزا بوده یا داخل قاب قرار گرفته باشد، حالت های مختلفی جهت شکست درون صفحه ای قابل بررسی می باشد. شکست درون صفحه ای دیوار مجزا بسته به تناسبات دیوار و ترکیب نیروهای وارده به سه صورت ذیل رخ می دهد:

**شکست برشی:** دیوارهای پهن که از نسبت ارتفاع به طول کمتر از واحد برخوردارند و بار قائم زیادی نیز بر آنها وارد می شود، تحت نیروهای جانبی دچار شکست برشی می شوند. در شکست برشی، ترک های ۴۵ درجه در دیوار ایجاد می شود که از گوشه پایین دیوار شروع شده و بالا می رود، به دلیل عوض شدن جهت نیروهای زلزله این ترک ها به صورت ضربدری و دو طرفه خواهد بود.

**شکست برشی لغزشی:** زمانی که دیوار تحت برش خالص قرار گرفته یا بار جانبی در مقایسه با بار قائم بزرگ باشد و نسبت ارتفاع به طول دیوار کمتر از ۱/۵ به ۱ و در حدود ۱ به ۱ باشد در پایه دیوار ترک افقی ایجاد خواهد شد که به ترک برشی لغزشی معروف است.

**شکست خمشی:** در صورتی که مقاومت برشی دیوار به اندازه کافی بوده و نسبت ارتفاع به طول در حدود ۲ به ۱ باشد، شکست خمشی رخ می دهد. شکست برون صفحه ای عمدتاً زمانی به وقوع می پیوندد که جهت نیروهای وارده عمود بر دیوار باشد. شکست برون صفحه ای دیوار مجزا بسته به تناسبات دیوار به دو صورت شکست خمشی در راستای قائم و شکست خمشی در راستای افقی رخ می دهد

**شکست خمشی در راستای قائم:** اگر تنش کششی منجر به شکست، موازی درزهای افقی آجرها باشد، ترک قائم در ارتفاع دیوار به وجود می آید این شکست معمولاً هنگامی به وجود می آید که طول دیوار زیاد باشد.

**شکست خمشی در راستای افق:** اگر تنش کششی منجر به شکست، عمود بر درزهای افقی آجرها باشد، ترک افقی در میانه دیوار به وجود می آید این شکست معمولاً هنگامی به وجود می آید که ارتفاع دیوار زیاد باشد. یکی از عوامل مؤثر در فروپاشی برون صفحه ای دیوارها ناشی از ضعف ذاتی و عدم یکپارچگی اجزای دیوار با یکدیگر به ویژه ضعف ملات به کاررفته در پیوند بین واحدهای بنایی و ضعف اتصال در دیوارهای دوجداره بوده است. دیوارهای خارجی در سال های اخیر به دلیل مسایل مربوط به عملکرد حرارتی و اصلاح پل های حرارتی دچار تغییر گردیده و این امر خطرات جدیدی را در اثر کمبود اتصال جدار خارجی به داخلی، کاهش پهنای تکیه گاهی جدار خارجی و... وجود آورده است (نوری فرد، مهدی زاده، ۲۰۱۶).

امروزه نیاز به استراتژی برای ایجاد سازه ی پایدار بیش از پیش مورد توجه است. افزایش خرابی، ظرفیت باربری سازه های موجود را کاهش می دهد. بنابراین مقاوم سازی سازه یک عامل مهم اقتصادی محسوب می شود. سازه های ساختمانی همواره در معرض خطر زلزله قرار دارند. مقاوم سازی سازه های موجود برای افزایش ظرفیت باربری می تواند به علت های تغییر کاربری، طراحی ضعیف یا ساخت و ساز ضعیف و استهلاک سازه نیاز باشد. با توجه به قرار گیری کشور در کمربند لرزه ای و آسیب پذیری شدید ساختمان ها در برابر زلزله، لزوم ارائه ی راهکارهای کارآمد و مناسب برای مقاوم سازی سازه های موجود در کشور ضروری می باشد (کوانتریل، هولوی، ۱۹۹۸).

در سال های اخیر، علاقه به مطالعه دیوارهای مصالح بنایی، یعنی تأثیر آنها بر پاسخ لرزه ای ساختمان های موجود، افزایش یافته است. سهم حضور مصالح پرکننده در عملکرد لرزه ای یک ساختمان بسته به یک سری پدیده هایی که جنبه ها و مشخصات مکانیکی را توضیح می دهند، می تواند مطلوب یا نامطلوب باشد، از جمله سختی و مقاومت نسبی بین قاب ها و دیوارهای مصالح بنایی و نوع ارتباط بین دیوارهای غیرسازه ای و ساختارها (فارتادو و همکاران، ۲۰۱۶). در اواسط سال ۱۹۸۰ صفحات FRP<sup>۱</sup> به عنوان جایگزین صفحات فلزی برای مقاوم سازی انتخاب شدند. روش های تولید پیشرفته ی صفحات کامپوزیتی در طی دهه ۸۰ منجر به افزایش نسبت مقاومت به وزن و افزایش مقاومت خستگی صفحات جدید FRP نسبت به صفحات فلزی قبلی شد، اما استفاده از TRC<sup>۲</sup> برای مقاوم سازی سازه ها در دهه های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است:

ظرفیت باربری بالا، دوام بالا در برابر حمله ی شیمیایی، هزینه نگهداری پایین، اجرای آسان و خصوصاً رفتار شکل پذیر آن، استفاده از این ماده را در مقاوم سازی نسبت به روش های قبلی برتری می بخشد. علاوه بر این، در زمینه توسعه پایدار و شرایط سلامتی و ایمنی برای کارگران، باید به ماده ای جایگزین برای FRP توجه شود چرا که اغلب با رزین های اپوکسی بسیار سمی تولید می شود. ایده این است که ضمن حفظ یا حتی بهبود اتلاف ظرفیت سازه های تقویت شده، این رزین ها را با مواد سیمانی جایگزین کنید. از این رو، کامپوزیت های بتن مسلح با منسوجات TRC که یک ملات ریز دانه مناسب با آخرین نسل پارچه های نساجی ترکیب می کنند، از پیشرفت بیشتری بهره مند می شوند.

امروزه در طراحی ها، دیوارهای جداسازی شده کمتر مورد توجه می باشند. با توجه به تأثیر این المان ها در عملکرد لرزه ای سازه ها نیاز به تقویت آنها برای بهبود رفتار احساس می شود. استفاده از TRC به عنوان روشی برای مقاوم سازی سازه ها مبحث جدیدی است که در سه دهه ی اخیر مورد توجه قرار گرفته است. بتن مسلح شده با منسوجات یک ماده کامپوزیت نسبتاً جدید و پیشرفته است. این ماده به طور کلی ماتریس سیمانی و تقویت کننده الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیایی (AR) را تشکیل می دهد، اگرچه تقویت این ماده ممکن است از هر الیاف دیگری نیز باشد، به عنوان مثال، الیاف کربن، در مقابل آرماتورهای فلزی، شیشه های تک AR با الیاف کربن موجود در منسوجات را می توان تقریباً در هر جهت قرار داد. بنابراین می توان یک تقویت کننده بسیار مؤثر ایجاد کرد. با توجه به قطر بسیار کوچک تقویت کننده ها می توان عناصر بتنی جدید و بسیار نازک را به عنوان کاربرد مواد جدید بدست آورد. قطر الیاف در منسوجات تقویت کننده معمولاً یک یا دو بعد پایین تر از قطر ازم برای تقویت فولاد است.

<sup>1</sup> Fiber Reinforced Polymer

<sup>2</sup> Textile Reinforced Concrete

علاوه بر این، هیچگونه حداقل ضخامت پوشش بتنی برای جلوگیری از خوردگی آرماتور لازم نیست، زیرا الیاف نمی توانند مانند فولاد زنگ بزنند. هر دوی این مزایا امکان توسعه عناصر بتنی با ضخامت فقط ۱۰ تا ۲۰ میلی متر را فراهم می آورد. ضخامت کمتر ممکن است نه تنها برای عناصر جدید بتنی مفید باشد بلکه باعث تقویت سبک وزن سازه های بتنی موجود می شود. تقویت با بتن مسلح با منسوجات به طرز چشمگیری باعث افزایش بار تحمل بار نهایی و همچنین قابلیت سرویس دهی می شود. ظرفیت باربری بسیار بالا در مقایسه با FRC, FRP<sup>۳</sup> و رفتار شکل پذیر، این ماده را نسبت به روش های قبلی برتری می دهد. در مقایسه با FRC, TRC از تکنیک بافتی که در جهات تنش های اصلی قرار می گیرند برخوردار می باشد که منجر به کارایی بالاتر مواد مسلح کننده می شود.

### ویژگی بلوک ها

بلوکهای سیمانی، نوعی قطعات پیش ساخته بتنی با عیار سیمان کم هستند که طرح اختلاط بتن آنها براساس مقاومت مورد نیاز به دست می آید. بلوک سیمانی از اختلاط سیمان و آب با شن ریز دانه و ماسه، سبکدانه ها و یا دیگر سنگدانه های مناسب ساخته می شود. به طور معمول بلوکهای سیمانی به شکل های توخالی و توپر و بسته به وزنشان در انواع مختلف با وزن معمولی، نیمه سبک و سبک ساخته می شود و در ساخت دیوارهای باربر خارجی و داخلی، در تیغه های جداکننده دیوارهای غیرباربر، سقفهای تیرچه و بلوک و... مورد استفاده قرار میگیرد.

علیرغم اینکه به طور معمول این قطعات در دیوارهای غیر باربر استفاده می شود، داشتن حداقل مقاومت فشاری طبق استاندارد ملی ایران شماره ۷۷۸۲ الزامی است اما خصوصیات دیگری نیز مانند سبک بودن، مقاومت در برابر آتش، عایق حرارتی و صوتی این بلوکها مورد توجه مصرف کنندگان قرار دارد. در تولید این بلوکها از مواد پرکننده و ماسه برای تامین مقاومت فشاری بلوکها استفاده می شود، اما به منظور حفظ سبکی و خواص عایق بودن بلوک، این میزان در بهینه مقدار و در حد کنترل شده و تا جای ممکن از پرکننده های از نوع سبکدانه اصلی انتخاب شود. ضمن استفاده از سبکدانه بجای سنگین دانه ها در تولید این بلوکها معمولا منحنی دانه بندی بر خلاف بتن سازه های بصورت ناقص است تا بتوان به حداکثر ویژگی سبکی و عایقی دست پیدا کرد.

### استاندارد بلوک ها

در تولید بلوکهای سیمانی سبک به منظور تضمین کیفیت و تامین دوام بلوکها، باید از سبک دانه استاندارد به شماره استاندارد ملی ۷۶۵۷ استفاده شود. سبکدانه ها می تواند از نوع صنعتی (مانند شیل و رس منبسط شده) و یا انواع پوکه های معدنی باشد. تولید کننده بلوک باید نوع سبکدانه مصرفی در تولید بلوک را مشخص کند. بلوکهای سبک در رده های چگالی (وزن مخصوص ظاهری) مختلف تولید می شوند. در این خصوص مهندسان محاسب به منظور انطباق وزن طراحی شده با وزن دیوار اجرا شده، باید وزن یک قطعه بلوک، وزن یک متر مربع دیوار و رده چگالی مورد نظر را در طرح نقشه های اجرایی قرار دهند. رده بندی چگالی بلوکهای سبک توخالی و توپر در استاندارد ملی ایران شماره ۷۷۸۲ ارائه شده است. کلیه ویژگی های این بلوک ها نظیر جذب آب، مقاومت فشاری، میزان رطوبت، جمع شدگی، رفتار در برابر آتش و رواداری ها باید مطابق الزامات ارائه شده در این استاندارد باشد.

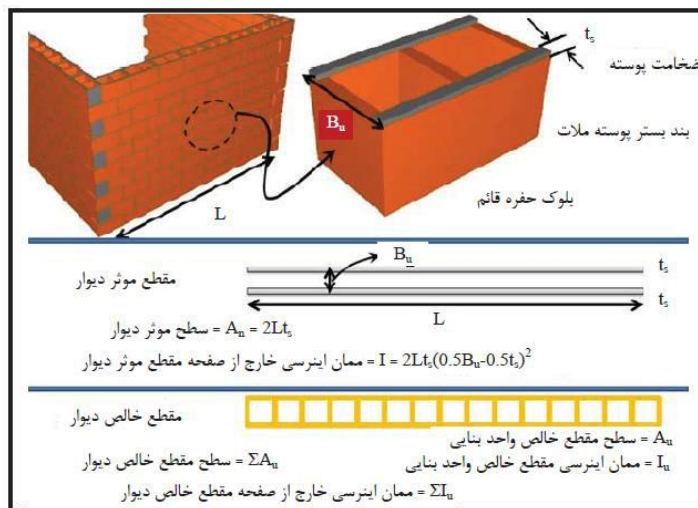
### مشخصات مقطع خالص و مقطع موثر

در محاسبات مربوط به تنش و مقاومت اسمی دیوار لازم است از مشخصات مقطع موثر دیوار استفاده شود. ممکن است سطح مقطع موثر دیوار در امتدادهای افقی و قائم با هم برابر نباشند. در این صورت میتوان از سطح مقطع موثر افقی دیوار در هر دو امتداد استفاده نمود. برای بلوکهای تو خالی مقطع موثر را میتوان برابر مقطع دو پوسته خارجی بلوک در نظر گرفت. برای محاسبه سختی یا لاغری دیوار میتوان از مقطع خالص واحدهای بنایی دیوار استفاده نمود. برای دیوارهای غیرسازه های در جهت اطمینان

<sup>3</sup> Fiber reinforced concrete

میتوان مقطع خالص دیوار را برابر مقطع موثر آن در نظر گرفت. این تقریب منجر به کاهش سختی دیوار میشود. لذا برای دیوارهای سازه‌های مناسب نمیباشد.

شکل (۱) نشان دهنده تفاوت مابین مقطع موثر و مقطع خالص یک دیوار ساخته شده با بلوکهای حفره قائم و بند بستر پوسته ملات میباشد. شایان ذکر است که از مقطع موثر به منظور محاسبه مقاومت دیوار و از مقطع خالص برای محاسبه سختی دیوار استفاده می شود. در صورتی که بند بستر از نوع تمام ملات باشد و جان انتهایی واحد بالایی دقیقاً بر روی جان میانی واحد تحتانی قرار گیرد، تفاوتی مابین مقطع موثر و مقطع خالص وجود نخواهد داشت. با توجه به اینکه این شرایط معمولاً در عمل ایجاد نمیگردد، لذا توصیه میشود در جهت اطمینان، سطح مقطع موثر دیوار بر اساس سطح مقطع پوسته واحدها و سطح مقطع خالص دیوار براساس سطح مقطع خالص واحدها به دست آید.



شکل ۱- مقطع موثر و خالص دیوار ساخته شده با بلوکهای توخالی حفره قائم و بند بستر پوسته ملات

### اتصالات دیوار

دیوارها و اتصالات آن باید برای نیروهای اینرسی خارج از صفحه طراحی و اجرا شوند. این دیوارها به جز در کف با پیش بینی درز انقطاع از سازه باربر جانبی به صورت جداسازی شده از سازه اصلی باید طراحی شوند. فواصل جداسازی دیوارها از قاب باید توسط مواد تراکم پذیر مناسب از قبیل پشم سنگ ضد رطوبت پر شوند. توصیه میشود برای جلوگیری از ترک خوردگی در نازک کاری از یک لایه سبکه الیاف یا رابیتس بر روی مواد تراکم پذیر استفاده شود.

### شرایط بلوکهای سیمانی به منظور تحویل به کارگاه ساختمانی

- بلوکهای سیمانی باید پس از کسب مقاومت و دارا بودن کیفیت مناسب به شرح زیر به کارگاه ساختمانی تحویل داده شود.
- همه بلوکهای سیمانی باید دارای حداقل سن ۱۴ روزه باشند.
- همه بلوکهای سیمانی باید حداقل مقاومت مشخصه طراحی شده را به دست آورند.
- هیچ بلوک ساختمانی نباید بدون تاییدیه فنی تحویل داده شود. کلیه بلوکهای سیمانی تحویل داده شده بدون تاییدیه قابل قبول، باید برگشت داده شوند.
- پذیرش محصول رسیده به کارگاه ساختمانی از طریق داشتن مهر استاندارد و برجسب کنترل کیفیت انجام می شود. در صورت نداشتن مهر استاندارد ایران، بلوکها باید برای انجام آزمونهای لازم مطابق ویژگیهای استاندارد ملی ایران به آزمایشگاه معتبر کنترل کیفی ارسال شود. برای کنترل کیفیت لازم است بر روی یکی از سطوح راسته قطعات بنایی

غیرباربر، یا بر روی بسته بندی مشخصات قطعه تولیدی با برچسب الصاق شده حداقل ۴ درصد از قطعات نشانه گذاری شوند (ارشاد و همکاران، ۱۴۰۱).

## TRC

به دلیل خطر بالای خوردگی، آرماتورها نیاز به محافظت دارند بنابراین اغلب با یک لایه بتن اضافی پوشانده می شوند. با این حال، حملات خوردگی هنوز هم سازه ها را مدت ها قبل از عمر مفید تخمین زده شده، تخریب می کند. بنابراین، دو جایگزین برای تقویت بدون خطر خوردگی وجود دارد که دهه های گذشته مورد بررسی قرار گرفته؛ تقویت الیاف (FRC) و نساجی (TRC) در بتن. الیاف در بتن تازه مخلوط و در ساختار توزیع می شوند. تقویت با الیاف به خواص مواد، جهت گیری و توزیع بستگی دارد. با توجه به الیاف مخلوط در بتن، شناخت و تخمین رفتار و ظرفیت بتن تقویت شده با منسوجات (TRC) سخت است. تقویت با منسوجات را در مقایسه با تقویت با الیاف می توان کارآمدتر دانست زمانی که بتوان آن را در جهت صحیح و با توجه به تنش های اصلی در سازه قرار داد. از آنجایی که هر دو گزینه خطر خوردگی ندارند، سازه به بتن کمتری نیاز دارد که هم زیست محیطی پایدارتر و هم مقرون به صرفه تر است. ظرفیت تحمل بار TRC به چهار کمک اصلی بستگی دارد.

- کیفیت نساجی و بتن
- تعامل / پیوند بین نساجی و ماتریس بتنی
- مقدار فیبر
- جهت گیری و لایه

## منسوجات

منسوجات تقویتی می تواند در طرح های مختلف تولید شود. متداول ترین آن این است که تمام رشته ها به طور موازی و کشیده قرار گیرد. الیاف یا گره خورده، بافته شده، بدون بافته شده، چسبانده یا با هم جمع می شوند که مرسوم ترین منسوجات گره های دوتایی یا چند محوری است. مواد الیاف مناسب برای منسوجات تقویتی باید چندین مورد ضروری داشته باشند.

- قدرت کششی خوب
- کشیدگی زیاد شکستن
- خاصیت ارتجاعی بالاتر از مدول برای بتن

دلیل سوم ناشی از این است که حتی اگر ترک ها در بتن رخ دهند، سختی ساختار نباید کاهش یابد. چندین ماده وجود دارد که این خصوصیات را دارا هستند مانند: شیشه - کربن - بازالت - آرامید. مزایای اصلی استفاده از فیبر شیشه ای به عنوان تقویت کننده توانایی چسبندگی خوب و هزینه کمتر آن می باشد ولی الیاف شیشه با یون های قلیایی موجود در بتن واکنش نشان می دهند که منجر به کاهش حجم می شود، از این رو ظرفیت قدرت کمتری دارند. (سیمونسون، ۲۰۱۷؛ زرگران، ۲۰۱۷).

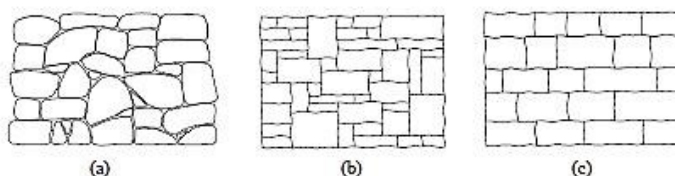
## مصالح دیوار چینی

مصالح سنگی یکی از قدیمی ترین مصالح ساختمانی می باشد، که توسط میراث فرهنگی مورد تایید قرار گرفته است. به چند دلیل می توان تاکید کرد که تجزیه و تحلیل سازه های مصالح بنایی ساده نیست:

- مصالح ساختمانی به عنوان مصالح کامپوزیت ترکیب شده از آجر متصل شده بوسیله ملات است
- مصالح ساختمانی موجود یک رفتار به شدت غیره خطی ارائه می دهد، بنابراین که رفتار خطی الاستیک به طور کلی می توان مناسب در نظر گرفت
- طرح سازه ای که می توان برای آنالیز و طراحی سازه های بنایی اتخاذ شده است خیلی پیچیده از آن است که برای بتن یا فولاد اتخاذ شده است، به عنوان یک المان بنایی اغلب بوسیله دو یا سه بعدی در نظر گرفته می شود.

به عنوان یک نتیجه، رفتار و تجزیه و تحلیل سازه های بنایی همچنان یکی از مهمترین زمینه های تحقیقاتی در مهندسی عمران توجه زیادی می شود.

رفتار مکانیکی از مصالح بنایی با توجه به جنبه پیچیده ناشی از حقیقت که مصالح بنایی یک ماده کامپوزیت می باشد که از واحدهای با منشأ طبیعی یا مصنوعی ساخته شده است (سنگ نامنظم، خشت، آجر و بلوک) که دارای اتصال خشک و یا اتصال ملات می باشند (ملات خاک رس، آهک و یا ملات ماسه سیمان). این واحدهای بنایی می تواند با اتصال با یکدیگر بوسیله روش های ساده یا فقط توسط انطباق ساده با ترکیبات مختلف طبقه بندی کرد (لورنکو، ۱۹۹۸).



شکل ۲- مصالح بنایی a- قلوه سنگ، b- سنگ بنا، c- سنگ ساختمانی

### مدل مصالح بنایی

تلاش های عمده ای به منظور فرموله کردن معیارهای تسلیم به منظور بیان مدل رفتاری مواد مختلف طی ۱۰۰ سال گذشته صورت گرفته است. اغلب معیارها فقط برای یک نوع کاده خاص مناسب هستند. تئوری پلاستیسیته برای مواد فلزی معمولاً بر پایه معیار تسلیم ترسکا و معیار تسلیم هوپر-فن میسر می باشد. و تئوری پلاستیسیته خاکها در بسیاری موارد بر پایه معیار تسلیم دراکر-پراگر می باشد. و تئوری پلاستیسیته سنگ بر اساس معیار مور-کولومب می باشد (ژانک، چن، ۱۹۹۱).

معیار دراکر-پراگر (۱۹۵۲)، یک مدل ساده اصلاح شده از مدل ون میسر می باشد که تاثیر فشار هیدرواستاتیک را بر روی گسختگی نشان می دهد. در مورد مصالح پل های قوسی سنگی ذکر این نکته حائز اهمیت است که به دلیل مقاومت کم آنها در کشش باید از معیارهای گسختگی به صورت حذف قسمت کشش استفاده کرد (بیر، ۱۹۸۵).

ناهماهنگی مصالح بنایی که بستگی به روش کار و ترکیبات آن دارد (آجر و ملات)، منجر به ساختار پیچیده رفتار مصالح بنایی شده است. به طور کلی، رفتار مصالح بنایی میانگین رفتار آجر و ملات می باشد.

مصالح بنایی در معرض یک بار محوری نمودار تنش-کرنش به شکل ترد می باشد، که با تنش فشاری شکست بیشتر در کشش اتفاق می افتد.

#### فشار

OA که اساساً ناحیه خطی؛ AB که شاخص بوسیله رفتار غیر خطی، تا مقدار ماکزیمم تنش فشاری افزایش می باید؛ BC شکل رفتار غیر خطی و نرم شدگی می باشد.

#### کشش

OI ناحیه خطی خیلی کوتاه شده و II کاهش یافته بعلاوه، نقطه B نقطه پیک بار و نقطه C نقطه که مربوط به شکست فشاری مصالح بنایی است، می باشد.

ویژگی مهم مشترک تمام مواد چسبنده، رخ دادن اثر نرم شدگی می باشد، که به عنوان یک کاهش تدریجی مقاومت مکانیکی تحت بار تحمیلی پیوسته، پس از نقطه اوج بار تعریف شده است. رفتار نرم شدگی در فشار محوری، کشش و گسختگی برشی مشاهده می شود.

### مدل رفتاری درزها

در آنالیز المان محدود در جامدات، وضعیت خاصی در جاهایی که رفتار ناپیوسته بین المان های محدود اتفاق می افتد، رخ می دهد. سطوح بین مواد نامتشابه و اتصالات یا شکست در مواد نمونه هایی از این وضعیت می باشد.

جابه جایی المان های مجاور سطح تماس قابل چشم پوشی باشد و با بزرگ در نظر گرفتن  $ks$  و  $kn$  ها از شرایط بد عددی جلوگیری شود. معمولاً از دقت مضاعف (Double Precision) برای متغیرها در تحلیل عددی کامپیوتری استفاده می شود.



رفتار غیرخطی سطوح تماس با لغزش و جداسازی فعال شده و صفحه اتصال باید بدرستی توصیف شود. برای یک سطح تماس بدون مقاومت کششی، جداسازی صفحات تماس زمانی که نیروی نرمال صفحه تماس کششی شود (مثبت شود) رخ می دهد. روش های مختلفی برای اعمال قیدهای فوق وجود دارد. که از انواع آنها می توان به روش پنالتی و اگرانژ تعمیم یافته اشاره نمود. در اغلب روش های مقید کردن می توان از ضرایب اگرانژ استفاده نمود. ضرایب اگرانژ زمان حل را طوانی تر می کنند ولی از بروز خطاهای عددی حاصل از شرایط نامطلوب عددی در سختی های بالا جلوگیری می کند. در روش پنالتی نیروی تماس با مقدار نفوذ متناسب است. نرم شدن عددی مرتبط با روش پنالتی می تواند بیش از حد مقید شدن تماس را کاهش دهد و تعداد تکرارهای مورد نیاز تحلیل را کم کند. روش پنالتی هم بصورت خطی و هم بصورت غیرخطی می تواند رابطه فوق را تضمین کند. در حالت خطی که به حالت سختی ثابت معروف است رابطه بین نفوذ و فشار خطی است. با روش پنالتی غیرخطی سختی به صورت خطی در محدوده کمترین سختی اولیه ثابت و بیشترین سختی نهایی ثابت افزایش می یابد.

### بررسی سازه های مصالح بنایی

اکثر سازه های موجود در روستاها و مناطق روستایی با تاثیر پذیری از اقلیم محیط از مصالح بنایی هستند، همچنین برای ساخت بناهای جدید نیز از مصالح بنایی استفاده می شود. هنگام وقوع زلزله ساختمان های با مصالح بنایی روستایی دچار بیشترین خسارت می شوند و با توجه به اینکه درصد قابل توجهی از مردم جهان در ساختمان های ساخته شده در مصالح بنایی ساکن هستند، عدم توجه به مقاوم سازی اینگونه ساختمان ها، موجب تلفات جانی و مالی زیادی در زلزله ها می شود. بنابراین تحلیل آسیب پذیری لرزه ای و بهسازی لرزه ای این نوع ساختمان ها تحت اثر زلزله، دارای اهمیت خاصی می باشد. در این مقاله ابتدا به بررسی نقاط ضعف ساختمان های روستایی موجود پرداخته شده است، سپس مقایسه الزامات آئین نامه با روش های اجرا، عدم همخوانی این دو و نیز ضعف اجرایی این ساختمان ها ابتدا به صورت جزء جزء و سپس به صورت کلی تشریح گردیده است. در مرحله بعد تحلیل آسیب پذیری لرزه ای که نخستین گام برای مقاوم سازی ساختمان می باشد، انجام شده است. باید سطح آسیب پذیری ساختمان به صورت کیفی و کمی مشخص گردد.

سپس بحث در مورد فاکتور اقتصادی، بعد از ارزیابی خسارت وارده به ساختمان، تحلیل های سازه ای برای ارزیابی مقاومت سازه ای در مقابل بارهای جانبی، بایستی انجام پذیرد. در نهایت این که آیا مقاوم سازی مقرون به صرفه است یا نه. اگر هزینه تعمیر ساختمان آسیب دیده با توجه به ارزش باقی مانده ساختمان دارای توجه اقتصادی باشد، اقدام به بهسازی و مقاوم سازی می کنیم. و در انتها روش های بهسازی لرزه ای که شامل موارد زیر است:

- اجرای پشت بند و دیوار عرضی
- اصلاح مسیر انتقال بار از دیوارگم به دیوارها و کاف ها
- استفاده از روکش بتن مسلح
- کاستن عرض بازشوها و در صورت لزوم حذف بازشوها
- افزایش کمی-کیفی کلاف های قائم و افقی
- تعمیر ترک های ایجاد شده در دیوارها
- دوغاب ریزی
- رفع نامنظمی در پلان، کاهش اثرات پیچش و افزایش تراکم دیوار
- ایجاد قاب خمشی فلزی
- افزایش صلبیت سقف با اجرای مهاربند ضربدری یا دال بتنی
- کاهش وزن مرده بام - تقویت عایق کاری پی

افزایش انسجام ساختمان و تقویت اتصال بین دیوارهای متقاطع با کلاف بندی قائم که در موارد فوق شرح اجرا، نقاط ضعف و قدرت هر روش با توجه به اجرائی کردن، امکان سنجی و دیدگاه ها و امکانات محلی مورد بحث قرار گرفته است (رحیمی اصل و همکاران، ۱۳۹۰).

ویژگی های خاص بناهای تاریخی از جمله محدودیت های مربوط به روشهای مرمت آنها، عدم توانایی تحمل نیروهای کششی توسط مصالح بنایی و ترد بودن این مصالح، روشهای مقاوم سازی و تحلیل دقیق نیروهای داخلی این قبیل بناها را پیچیده و مشکل می سازد. هر چند مطالعات آزمایشگاهی و نظری گسترده ای در زمینه رفتار سازه های با مصالح بنایی به ویژه دیوارها و میانقاب های آجری تحت بارهای ثقلی و زلزله در سه دهه گذشته انجام گرفته است (مرادی و همکاران، ۱۳۸۷). لیکن به طور خاص مطالعات نظری و آزمایشگاهی کمی بر روی مقاوم سازی بناهای تاریخی ایران و گنبد های آجری صورت پذیرفته است. پروفیسور هی مان از اولین کسانی بود که در قرن بیستم تحلیل های مدرن را بر روی سازه های قوس دار بر مبنای تئوری های کهن قرن ۱۷ میادی پیشنهاد کرد. وی با فرض مقاومت فشاری نامحدود، مقاومت کششی صفر و سختی اصطکاکی برای مصالح بنایی، مقدار حداقلی را برای نسبت ضخامت به دهانه قوس ها به عنوان راه حلی مطمئن ارائه داد (چیلک و همکاران، ۲۰۰۸).

هر چند برای بهسازی ساختمان های آجری روش هایی از قبیل استفاده از FRP، تقویت دیوارها با استفاده از بتن پاشی، اضافه کردن دیوارهای برشی جدید و پشت بند، تزریق اپوکسی ملات در درز آجرها و تعیبه کاف برای تامین انسجام سازه ای پیشنهاد شده است. لیکن با توجه به محدودیت های مربوط به قوانین مرمت آثار باستانی، استفاده از این روش ها محدود می گردد. طبق قوانین مرمت، روش های مقاوم سازی یک بنای تاریخی باید به گونه ای باشد که کمترین تغییر در وضعیت ظاهری آن را موجب گردد. علاوه بر این عدم شناخت کافی از خواص مکانیکی مصالح مصرفی در این بناها تحلیل و ارائه طرح مقاوم سازی آن را دشوار می سازد. پیش تنیده کردن یکی از روشهایی است که از دیرباز برای مقاوم سازی سازه های بنایی استفاده شده است. با این روش نیروهای کششی ایجاد شده در سازه تحت بارهای خارجی با استفاده از فشار ناشی از کابل های پیش تنیده جاسازی شده در آن، خنثی می گردد.

در ۲۰ سال گذشته، فعالیت پژوهشی قابل توجهی به منظور بررسی بهره برداری از مواد نوآورانه، مانند FRP برای تقویت سازه های بنایی انجام شده است.

الیاف تقویتی پلاستیکی (FRP) سیستم تقویتی حاضر که چندین مزیت دارد؛ از جمله مزایای FRP عبارت اند از:

- وزن مخصوص ناچیز و کم
- ایمنی در برابر خوردگی
- استحکام کششی بالا
- سادگی کاربرد این مواد

علاوه بر موارد ذکر شده، انعطاف پذیری و سازگاری با سطوح مورد استفاده مانند قوس ها مصالح بنایی، که اجازه استفاده گسترده در برخی شرایط آسیب دیده را می دهد (تریانتافیلو، فاردیس، ۲۰۰۸؛ بریکولی باتی، رورو، ۲۰۰۰؛ بریکولی باتی و همکاران، ۲۰۰۰؛ آیلو و همکاران، ۲۰۰۰؛ تریانتافیلو، ۱۹۹۸؛ کومو و همکاران، ۲۰۰۰؛ والوزی و همکاران، ۲۰۰۱؛ چن، ۲۰۰۲؛ لوسیانو و همکاران، ۲۰۰۲؛ باسیلیو و همکاران، ۲۰۰۴؛ فورابوسچی، ۲۰۰۴).

در حال حاضر مطالعات وسیعی برای تقویت قوس ها، در حال انجام می باشد. که طیف وسیعی از این مطالعات بر روی تقویت قوس ها با استفاده از FRP می باشد.

### نتیجه گیری

با بررسی یافته ها مشاهده می شود که خرابی در مدل ساده و تقویت شده تقریباً یکسان بوده است. در مدل تقویت شده با ورق TCR مشاهده می شود که با اضافه نمودن این ورق سختی دیوار افزایش یافته و در توزیع نیروی جانبی باعث افزایش ظرفیت دیوار شده است و توزیع نیرو در قاب اطراف دیوار به دلیل سختی بیشتری دیوار بیشتر شده است. جا به جایی خارج صفحه در مدل های تقویت شده با ورق TRC نسبت به مدل های تقویت نشده بسیار محدود می باشند.

## منابع و مراجع

- [۱] مقدم، حسن (۱۳۸۷). طرح لرزه ای ساختمان های آجری، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، چاپ پنجم.
- [۲] ارشاد، لیلی؛ خرمی آذر، مریم؛ عطاری، نادر خواجه احمد؛ زرگران، مژده (۱۴۰۱). عملکرد لرزه ای و جزئیات اجرایی دیوارهای ساخته شده از بلوک سیمانی سبک ساخته شده از رس منبسط شده. مرکز تحقیقات راه.
- [۳] رحیمی اصل، مهدی؛ کیوانی، جعفر؛ فرزادی، محسن (۱۳۹۰). آسیب پذیری لرزه ای ساختمان های روستایی و مقاوم سازی ساختمانهای روستایی واقع در مناطق با خطر نسبی بسیار زیاد. مجموعه مقالات اولین کنفرانس بین المللی سکونتگاه های روستایی: مسکن و بافت - سال ۱۳۸۹.
- [۴] مرادی، علیرضا؛ سلطانی محمدی، مسعود؛ تسنیمی، عباسعلی (۱۳۸۷). ریز مدل سازی رفتار دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح تحت بار لرزه ای خارج صفحه ، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- [5] Ajay Chourasiaa, Shubham Singhalb, Jalaj Parashar. "Experimental investigation of seismic strengthening technique for confined masonry buildings" *Journal of Building Engineering* 25 (2019) 100834.
- [6] Azadeh Noorifard, Fatemeh Mehdizadeh. "conceptual assessment of seismic performance of non-structural walls in conventional medium rise buildings according to the experiences of past earthquakes", January 2016.
- [7] R. J. Quantrill & L. C. Hollaway. "The flexural rehabilitation of reinforced concrete beams by the use of prestressed advanced composite plates" *Composites science and technology* 58. 1259-127 (1998).
- [8] Andre Furtado, Hugo Rodrigues, Antonio Arede, Humberto Varum. "experimental evaluation of oue of plane capacity of masonry infill walls". *Engineering Structures* 111 (2016) 48-63.
- [9] Korkmaz, Kas ım Armagan, Fuat Demir, and Mustafa Sivri. "Earthquake assessment of R/C structures with masonry infill walls. " *International journal of science & technology* 2.2 (2007): 155-164.
- [10] Lourenço, Paulo José Brandão Barbosa. "Computational strategies for masonry structures" (1997): 1369-1369.
- [11] Borah, Bonisha, Vaibhav Singhal, and Hemant B. Kaushik. "Sustainable housing using confined masonry buildings. " *SN Applied Sciences* 1.9 (2019): 1-7.
- [12] ASCE/SEL41-06, Seismic rehabilitation of existing buildings, American Society of Civil Engineers. (2007).
- [13] F. Prestandard, commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 356), Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 7. (2000)
- [14] Parghi, Anant, and M. Shahria Alam. "A review on the application of sprayed-FRP composites for strengthening of concrete and masonry structures in the construction sector" *Composite Structures* 187(2018): 518-534.
- [15] Borri, Antonio, et al. "Stainless steel strip-A proposed shear reinforcement for masonry wall panels. " *Construction and Building Materials* 211 (2019): 594-604.
- [16] Sadek, H., and S. Lissel. "Seismic performance of masonry walls with GFRP and Geogrid Bed joint reinforcement. " *Construction and Building Materials* 41 (2013): 977-989.
- [17] Doran, Bilge, et al. "Numerical Modeling of Traditional Masonry Walls Strengthened with Grout Injection" *International Journal of Architectural Heritage*. (2019)
- [18] Deng, Mingke, Zhifang Dong, and Ping Ma. "Cyclic loading tests of flexural-failure dominant URM walls strengthened with engineered cementitious composite. " *Engineering Structures* 194 (2019): 173-182.
- [19] ElGawady, M. A. , P. Lestuzzi, and M. Badoux. "Retrofitting of masonry walls using shotcrete 2006" *NZSEE Conference, Paper. Vol. 45. 2006.*
- [20] De Koster, Jens. "Experimental Study of the Durability of Textile Reinforced Cementitious Composites" (2017).
- [21] Den Hartog, Eline. "Prefabrication of concrete shells. " (2008)

- [22] Council, Greater London. Handbook for Clerks of Works: Greater London Council Department of Architecture and Civic Design. Elsevier, 2013.
- [23] Cadwallader, Alan. Fragments of Colossae: Sifting through the Traces. ISD LLC, 2015.
- [24] Dadras Eslamlou, S, et al. "Effect of retrofitting on the structural factors for seismic assessment of unreinforced masonry structures: a review." *Australian Journal of Structural Engineering* 20, 1 (2019): 26-53.
- [25] Gambarotta, L. and Lagomarsino, S. (1997) Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls, Part I: the mortar joint model and its application, *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26(4), 423-439.
- [26] Lourenco, B. P. and Rots, J. G. (1997) Multisurface interface model for analysis of masonry structures, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 660-668.
- [27] Page, A. W. (1978) Finite element model for masonry, *Journal of the Structural Division, ASCE*, ST8, 1267-1285.
- [28] Kappos, A. J. , Penelis, G. G. , and Dracopoulos, C. G. (2002) Evaluation simplified models for lateral load analysis of unreinforced masonry. buildings, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 890-897.
- [29] Giordano , A. , Mele, E. , and Luca, A. (2002) Modeling of historical masonry structures: comparison of different approaches through a case. study, *Engineering Structures*, 1057-1069.
- [30] ELLEN SIMONSSON: Complex shapes with textile reinforced Concrete , Gothenburg, Sweden 2017.
- [31] Mojdeh Zargaran , Nader K. A. Attari , Saeid Alizadeh ,b, Parisa. Teymouri: Minimum reinforcement ratio in TRC panels for deflection hardening flexural performance.
- [32] Lourenço P. B. , Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behavior of masonry, P. Roca et al. (eds): *Structural Analysis. 1998. 57-91 of Historical Constructions II CIMNE, Barcelona, 5-91, 1998.*
- [33] Zhang, H. , Chen, W. F. (1991), "Structural Plasticity," Springer, USA.
- [34] Beer, G. (1985), "An Isoparametric Joint/Interface Element for Finite Element Analysis," *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 21(4), pp. 585-600.
- [35] Celik, O . C. , Sesigur,H. and Cili,F. (2008), "Seismic Evaluation and Retrofit of a 16th Century Historic Brick Masonry Dome in Istanbul Using Combined Steel Rings and CFRP Sheets", the 14<sup>th</sup> World Conference on The Earthquake Engineering, Beijing, China.
- [36] Triantafillou TC, Fardis MN. Strengthening of historic masonry structures with composite materials. *Mater Struct.* 1997;30:486\_96.
- [37] Briccoli Bati S, Rovero L. Consolidation of masonry arches through sheets of long carbon fibers composites. In: *Proceeding of the first national conference on mechanics of masonry structures strengthened with FRP materials: Modelling, testing, design, control. 2000. p. 53\_64.*
- [38] Briccoli Bati S, Rapallini M, Tralli A. Behavior of fiber reinforced barrel vaults under reversed cycles of spring settlements. In: *Proceeding of the first national conference on mechanics of masonry structures strengthened with FRP materials: Modelling, testing, design, control. 2000. p. 65\_74.*
- [39] Aiello MA, Galati N, La Tegola A. Collapse load of masonry arches strengthened with FRP sheets. In: *Proceeding of the first national conference on mechanics of masonry structures strengthened with FRP materials: Modelling, testing, design, control. 2000. p. 75\_84.*
- [40] Triantafillou TC. Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates. *J Compos Constr ASCE* 1998;2:96\_104.
- [41] Como M, Ianniruberto U, Imbimbo M. The capacity of masonry arches strengthened with FRP sheets. In: *Proceeding of the first national conference on mechanics of masonry structures strengthened with FRP materials: Modelling, testing, design, control. 2000. p. 155\_64.*
- [42] Valluzzi MR, Valdemarca M, Modena C. Behavior of brick masonry vaults strengthened by FRP laminates. *J Compos Constr ASCE* 2001;163\_9.
- [43] Chen JF. Load-bearing capacity of masonry arch bridges strengthened with fiber reinforced polymer composites. *Adv Struct Eng* 2002; 5:37\_44.

- [44] Luciano R, Marfia S, Sacco E. Reinforcement of masonry arches by FRP materials. In: ICCI'02 International conference on FRP composites in infrastructures. 2002.
- [45] Basilio I, Oliveira D, Lourenço P. Optimal FRP strengthening of masonry arches. In: 13th International brick and block masonry conference. 2004.
- [46] Foraboschi P. Strengthening of masonry arches with fiber-reinforced polymer strips. J Compos Constr ASCE 2004;191\_201.