

بررسی عددی عملکرد داخل صفحه دیوارهای بنایی تقویت شده با مصالح مرکب پایه سیمانی مهندسی با تاکید بر تاثیر اتصال به شالوده

علیرضا نماینده نیاسر^۱، فرشید جندقی علایی^{۲*}، سید سهیل مجیدزمانی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار گروه مهندسی سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استادیار بخش مهندسی سازه، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

*fjalae@shahroodut.ac.ir

تاریخ دریافت ۹۷/۲/۲۹

تاریخ پذیرش ۹۷/۱۲/۲۲

چکیده

وسعت احداث سازه‌های بنایی و ضعف آنها در برابر زلزله، ضرورت پژوهش راجع به روش‌های نوین بهسازی لرزه‌ای این سازه‌ها را دو چندان می‌نماید. اخیراً در کنار روش‌های متداولی چون مش و شاتکریت و الیاف پلیمری، مصالح مرکب پایه سیمانی مهندسی برای تقویت دیوارهای بنایی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌است. وجه تمایز این نوع مصالح نوین، شکل‌پذیری بالا در کشش می‌باشد. در این پژوهش تاثیر این مصالح روی عملکرد دیوارهای باربر بنایی با مودهای شکست داخل صفحه به صورت عددی بررسی شده‌است. نتایج پژوهش مبتنی بر روش عددی است که برای درستی آزمایشی مدل از اطلاعات موجود آزمایشگاهی استفاده شده‌است. روش تقویت به صورت یک و دو طرفه در نظر گرفته شده‌است. همچنین لایه تقویت به دو صورت متصل و جدای از شالوده زیر دیوار باربر مدل شده‌است. تغییر مود شکست دیوار تقویت شده از حالت ترد به شکل پذیر همراه با رفتار سخت‌شوندگی در ناحیه غیرخطی از نتایج مشترک مدل‌ها است. افزایش مقاومت و جذب انرژی از دیگر نتایج پژوهش است که مقدار آن بسته به چگونگی اتصال لایه تقویت به شالوده متغیر است. در شرایطی که بین لایه تقویت و شالوده اتصال برقرار شود مقاومت برای حالت تقویت یک و دو طرفه به ترتیب ۳/۵ و ۶ برابر دیوار تقویت نشده است. این مقدار در جذب انرژی به ترتیب ۳ و ۶/۵ بدست آمده است. همچنین تاثیر اتصال لایه تقویت با شالوده در بهبود رفتار دیوارهای با مود شکست لغزش درز ملات به مقدار محسوسی از دیوارهای با مود شکست قطری بیشتر است.

واژگان کلیدی - دیوار بنایی باربر، مصالح مرکب پایه سیمانی مهندسی، روش عددی، بهسازی لرزه‌ای

۱- مقدمه

کیفیت مصالح مصرفی و کیفیت اجرا در برابر زلزله آسیب‌پذیر هستند. پس همواره بررسی روش‌های گوناگون بهسازی لرزه‌ای این قبیل از ساختمان‌ها مورد توجه پژوهشگران است.

در سراسر جهان تعداد قابل توجهی از ساختمان‌های مصالح بنایی غیرمسلح احداث شده‌است که بعلت نقصان طراحی،

ملات ECC بین ۵/۰ تا ۶/۰٪ است. الیاف مهندسی شامل الیاف فولادی و الیاف PVA هست. همچنین بسته به ترکیبات ماتریس، مقادیر مقاومت محوری کششی این نوع مصالح در محدوده ۲ تا ۸ مگاپاسکال است [4].

پژوهش‌های متعددی راجع به تاثیر این نوع مصالح بر عملکرد سازه‌های بتنی و میانقاب‌های بنایی انجام شده‌است. نتایج این پژوهش‌ها بیانگر بهبود رفتار سازه تقویت شده دارد [4,6].

شکل ۱. رفتار ملات ECC تحت کشش مستقیم [4]

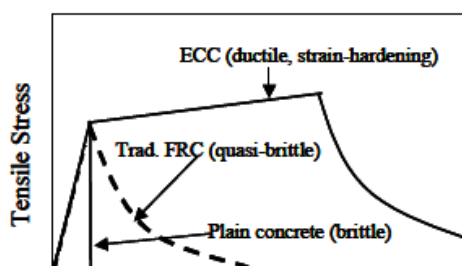


Fig. 1. ECC tensile behavior [4]

اینکهام و همکاران پژوهش‌های آزمایشگاهی برای بررسی تاثیر ملات ECC با الیاف PVA روی دیوارک‌های بنایی و مقاومت کششی قطری انجام داده‌اند [5]. این پژوهش روی ۲۵ نمونه دیوارک بنایی به ابعاد ۱۲۰ سانتی‌متر و ضخامت‌های ۱۱، ۲۲، ۳۵ و ۴۷ سانتی‌متر که به وسیله لایه ملات ECC و به صورت یک طرفه تقویت شده‌اند انجام شده‌است. نتایج آزمایش‌ها بیانگر افزایش ۱۳۰٪ تا ۵۱۴٪ مقاومت کششی قطری و به طور متوسط ۲۲۰٪ جذب انرژی دیوارک‌های تقویت شده است. البته این افزایش وابسته به ضخامت دیوارک، ضخامت ملات ECC و میزان چسبندگی آجر و ملات ECC است. همچنین الگوی ترک‌خوردگی دیوارک‌های تقویت شده بیانگر افزایش عرض ناحیه ترک‌خوردگی هست.

در این پژوهش به بررسی عددی اثر ملات ECC روی عملکرد داخل صفحه دیوار باربر بنایی که همزمان تحت بار جانبی و ثقلی است پرداخته می‌شود. متغیرهایی همچون نوع مود شکست، چگونگی اتصال ملات ECC به شالوده زیر دیوار و تقویت یک یا دو طرفه در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته‌است.

پارامترهای موثر ایجاد مود شکست داخل صفحه دیوارهای بنایی که یکی از عوامل تعیین کننده رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی و تعیین کننده میزان شکل‌پذیری، مقاومت و سختی دیوار است به عوامل متعددی همچون مشخصات مکانیکی مصالح، روش آجرچینی، نسبت ارتفاع به طول دیوار و میزان بار ثقلی وابسته است. مودهای شکست داخل صفحه دیوار باربر بنایی شامل چهار مود لغزش درز ملات، گهواره‌ای، شکست قطری و خردشدگی فشاری است [1]. دو مود اول، جزء مودهای شکل‌پذیر (کنترل‌شونده توسط تغییر مکان) و دو مود آخر جزء مودهای ترد (کنترل‌شونده توسط نیرو) می‌باشند. از مقایسه منحنی ظرفیت دیوار بنایی در مودهای شکل‌پذیر با منحنی ظرفیت سایر مصالح شکل‌پذیر همچون فولاد، تفاوت شکل منحنی و نوع رفتار این مصالح قابل تامل است.

از طرفی ظرفیت دیوار بنایی باربر برای هر یک از مودهای شکست تابع ویژگی‌های مکانیکی همچون مقاومت برشی درز ملات، مقاومت فشاری منشور بنایی و مقاومت کششی قطری است که بهبود آنها می‌تواند باعث افزایش ظرفیت برشی، شکل‌پذیری و تغییر مود دیوار از ترد به شکل‌پذیر شود. بیشتر پژوهش‌های انجام شده برای بهسازی دیوار بنایی باربر و پژوهش‌های مرتبط با آن شامل روش مش فولادی و بتن پاششی و استفاده از مصالح الیاف پلیمری است [2-3]. به تازگی در کنار روش‌های مذکور استفاده از مصالح مرکب پایه سیمانی مهندسی که به اختصار تحت عنوان ملات ECC نامبرده می‌شود، به دلیل شکل‌پذیری بالای آنها در کشش و همچنین بهبود انسجام بین واحدهای بنایی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌است.

مصالح مرکب پایه سیمانی الیافی که به اختصار FRC نامیده می‌شود، نوع معمولی مصالح پایه سیمانی است که دارای رفتار نرم شوندگی کرنشی در کشش است. با تغییر ماتریس و نوع الیاف، رفتار این مصالح بهبود یافته و می‌تواند ضمن رفتار سخت‌شوندگی کرنشی، دارای اختلاف ظرفیت کرنشی-کششی معناداری نسبت به مصالح FRC باشد. ملات ECC در این دسته‌بندی قرار می‌گیرد. مطابق شکل (۱) دامنه تغییرات کرنش کششی برای ملات معمولی ۰/۰۱۵٪ و برای

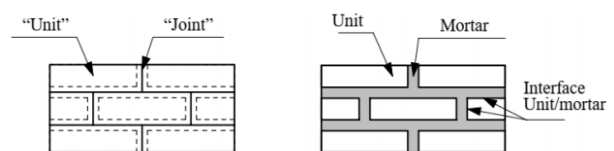
۲- چگونگی مدلسازی

برای مدلسازی نمونه‌های بنایی و ملات ECC از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است [12]. برای مدلسازی واحدهای بنایی و ملات ECC از المان C3D8R نرم‌افزار استفاده شده است. روش تحلیل از نوع صریح و بارگذاری به صورت بارافزون و بر اساس کنترل تغییر مکان است. در این پژوهش از دو دسته مدل شامل مدل درستی آزمایی لایه ECC و دیگری مدل بررسی عملکرد دیوار بنایی باربر که با ملات ECC تقویت شده‌اند استفاده شده است.

۲-۱- روش مدلسازی دیوار بنایی

دیوار بنایی به دلیل نوع اجزای تشکیل دهنده آن شامل واحد بنایی و ملات، از نوع مصالح مرکب ناهمگن و غیریکنواخت است. شناخت رفتار این نوع مصالح از ملزومات انتخاب روش مناسب برای مدلسازی و یا انتخاب روش بهبود رفتار آنها است. فرض مصالح همگن یا ناهمگن برای مدلسازی دیوار بنایی تاثیر بالایی روی دقت نتایج دارد. براین اساس مدل‌های درشت مقیاس برای فرض مصالح همگن و مدل‌های ریز مقیاس برای فرض مصالح ناهمگن بنایی استفاده می‌شود. مطابق شکل (۲) مدلسازی سطح ریزمقیاس می‌تواند به دو دسته مدلسازی در سطح ریزشده مصالح و مدلسازی در سطح ساده شده مصالح تقسیم شود. در سطح ریزشده، خواص هر یک از اجزاء مصالح تشکیل دهنده شامل واحد بنایی و ملات به صورت مجزا تعریف می‌شوند [7].

شکل ۲. روش مدلسازی دیوارهای بنایی [7]



الف. مدلسازی ریز مقیاس ب. مدلسازی ریز مقیاس ساده شده

Fig. 2. Masonry wall modeling method [7]

ضمن آنکه سطح تماس ملات و واحد بنایی با اتصال گسسته برای تاثیر ویژگی‌های چسبندگی برشی و کششی تعریف می‌شود. در مدل ریزمقیاس ساده شده که روش مورد استفاده

این پژوهش است لایه ملات و لایه تماسی با یکدیگر همگن شده و با ضخامت صفر مدلسازی می‌شوند. مطابق شکل (۳) لایه تماسی در سه مود شکست نرمال، برشی داخل صفحه و برشی خارج از صفحه مدلسازی می‌شود. در این ارتباط مقادیر پارامترهای سختی (k)، مقاومت (Traction) و انرژی شکست (G_f) یا لغزش (Separation) نیاز است.

شکل ۳. موده‌های شکست و رفتار تنش-لغزش المان تماسی [12]

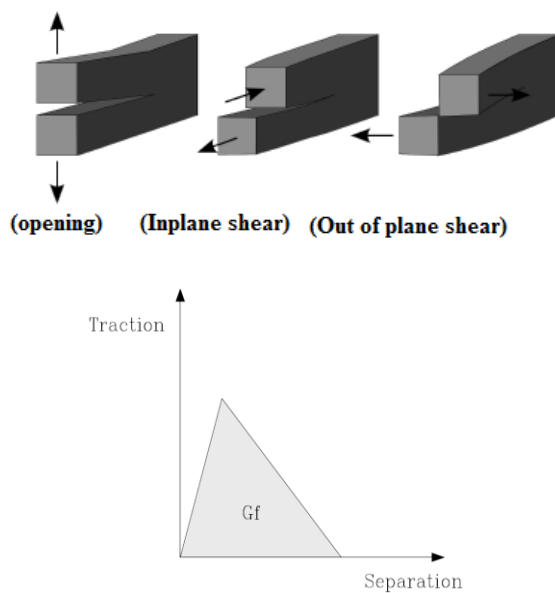


Fig. 3. Typical traction-separation behavior and fracture modes [12]

۲-۲- روش مدلسازی ملات ECC

برای مدلسازی ملات ECC نیاز به منحنی تنش-کرنش در فشار و کشش است. در این ارتباط هان و همکاران، منحنی پوش چند خطی مطابق شکل (۴) پیشنهاد داده اند [8].

شکل ۴. پوش منحنی‌های شکست ملات ECC. الف- کششی. ب- فشاری

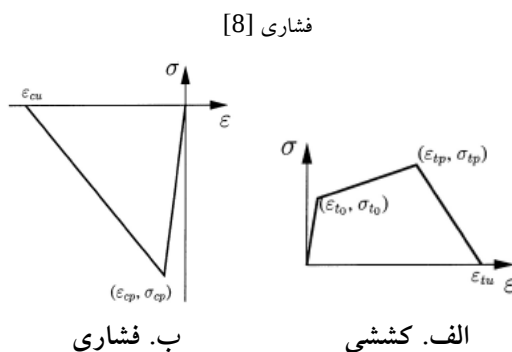


Fig. 4. Schematic of ECC failure envelope [8]

Fig. 5. Masonry wallette test setup [5]
جدول ۲. مشخصات مصالح بنایی برای مدل سازی [5]

f'_b (MP)	f'_j (MP)	f'_m (MP)	E (MP)	ν
16.3	1.0	5.3	11200	0.15

Table.2. Wall Properties for Modeling [5]

در جدول فوق f'_b ، f'_j و f'_m به ترتیب مقاومت فشاری آجر، ملات و منشور بنایی و E و ν به ترتیب مدول الاستیسته و ضریب پواسون مصالح بنایی است. باتوجه به آنکه ملات بنایی دارای طرح اختلاط ۱:۲:۹ (ماسه-سیمان-آهک) می باشد پس برای سایر پارمترهای مورد نیاز برای مدل سازی رفتار غیرخطی دیوارک بنایی از نتایج مشابه ارائه شده توسط پلایجم استفاده شده است [10]. این پارمترها مطابق جدول (۳) شامل k_{nn} ، k_{tt} و k_{ss} به ترتیب سختی نرمال و برشی داخل و خارج صفحه المان تماسی است. همچنین مطابق جدول (۴) f_{nn} ، ν_{11} و ν_{22} به ترتیب مقاومت کششی، مقاومت برشی داخل و خارج از صفحه و G_f انرژی شکست المان تماسی است.

جدول ۳. مشخصات سختی المان تماسی مصالح بنایی [10]

k_{nn} (N/m3)	k_{tt} (N/m3)	k_{ss} (N/m3)
$1.7 E^{11}$	$8E^{10}$	$8E^{10}$

Table. 3. Stiffness Properties of Interface Element [10]

جدول ۴. مشخصات مقاومتی المان تماسی مصالح بنایی [10]

f_{nn} (Mpa)	ν_{11} (Mpa)	ν_{22} (Mpa)	G_f (N/m)
0.1	0.08	0.08	5

Table. 4. Stiffness properties of Interface Element [10]

مشخصات فشاری و کششی مصالح ECC مورد استفاده برای تقویت دیوارک بنایی مطابق شکل (۶) است. این اطلاعات مطابق نتایج آزمایش کشش مستقیم و آزمایش فشاری طرح اختلاط مندرج در جدول (۱) است. ضخامت لایه ملات ECC در مدل سازی ۱۰ و ۲۰ میلی متر لحاظ شده است.

در منحنی تنش-کرنش کششی، σ_{t0} و ϵ_{t0} به ترتیب تنش و کرنش در اولین ترک خوردگی و σ_{tp} و ϵ_{tp} به ترتیب تنش و کرنش در بیشترین مقدار کرنش سختی و ϵ_{tu} کرنش کششی نهایی ملات ECC است.

در منحنی تنش-کرنش فشاری، σ_{cp} و ϵ_{cp} به ترتیب تنش و کرنش بیشینه ملات ECC و ϵ_{cu} کرنش نهایی است. مقادیر پارامترهای فوق از طریق نتایج آزمایشگاهی تعیین می شود.

۳- اعتبار سنجی مدل عددی

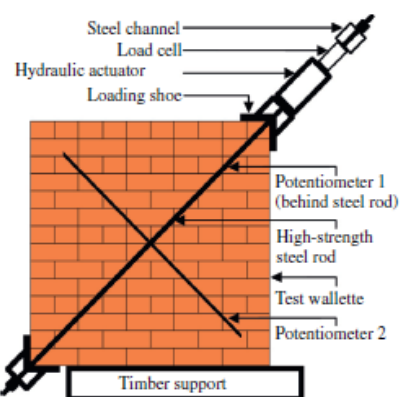
در این پژوهش برای درستی آزمایی فرضیه های مدل سازی تقویت با ملات ECC از نتایج مطالعات آزمایشگاهی اینگهام و همکاران استفاده شده است [5]. ابعاد دیوارک بنایی انتخاب شده $1200 \times 1200 \times 220$ میلی متر است. طرح اختلاط ملات ECC برگرفته از نتایج پژوهش های لی و همکاران، مطابق جدول (۱) است [9]. ابعاد آجرها $210 \times 110 \times 65$ میلی متر در نظر گرفته شده است. جزییات نمونه آزمایشگاهی مطابق شکل (۵) و مشخصات مصالح بنایی مطابق جدول (۲) می باشد.

جدول ۱. مشخصات طرح اختلاط ملات ECC [5]

Materials	Kg/m3
Sand	640
Cement	800
Fly ash	240
Water	374
Fiber	26
Additives	0.3

Table. 1. ECC mix properties [5]

شکل ۵. جزییات نمونه آزمایشگاهی دیوارک بنایی [5]



ضخامت ملات ECC است. مطابق شکل (۷) نتایج مدل‌های عددی درستی آزمایشی، اختلاف ناچیزی با نتایج آزمایشگاهی (کمتر از ۲۰ درصد) دارد که این اختلاف به دلیل شرایط آزمایشگاهی و مشخصات مصالح قابل پذیرش است.

۴- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

برای بررسی اثر ملات ECC روی دیوار بنایی برابر از نمونه‌های دیوار بنایی شاهد با مقیاس ۱:۲ که توسط معرفت و همکاران آزمایش شده‌اند، استفاده شده است [11]. بر این اساس دو نمونه دیوار شاهد (تقویت نشده) به ابعاد (طول، ارتفاع، ضخامت) (۲۷۰۰، ۱۶۰، ۱۹۰۰ میلی‌متر و ۱۴۰۰، ۱۱۰ میلی‌متر که به ترتیب بیانگر مود شکست لغزش پای دیوار (شکل‌پذیر) و مود شکست برش قطری (ترد) هستند انتخاب شده‌اند. این نمونه‌ها در آزمایشگاه تحت بارگذاری سیکلیک آزمایش شده‌اند. مطابق مطالعات فوق بار تقبی برابر ۱/۰ مگاپاسکال لحاظ شده‌است. سایر مشخصات مصالح بنایی مطابق جدول‌های (۵ و ۶) است.

جدول ۵. مشخصات سختی المان تماسی بنایی [10]

k_{nn} (N/m ³)	k_{tt} (N/m ³)	k_{ss} (N/m ³)
$1E^{11}$	5E10	5E10

Table. 5. Stiffness Properties of Interface Element [10]

جدول ۶. مشخصات مقاومتی المان تماسی بنایی [10]

f_{nn} (Mpa)	v_{11} (Mpa)	v_{22} (Mpa)	G_f (N/m)
0.147	0.145	0.145	5

Table. 6. Strength Properties of Interface Element [10]

۵- نتایج حاصل از مدلسازی عددی

نتایج عددی بررسی اثر ملات ECC روی دیوارهای بنایی برابر با دو مود شکست قطری و لغزش درز ملات که مشخصات آنها در بند (۴) تشریح شد در دو حالت اتصال عدم اتصال لایه ملات ECC به شالوده در ادامه ارائه می‌شود. لایه ملات ECC به صورت یک و دو طرفه و به ضخامت ۲۰ میلی‌متر است. مشخصات ملات ECC مطابق بند (۳) در نظر گرفته شده‌است.

شکل ۶. پارامترهای مدلسازی ملات ECC [8,9]

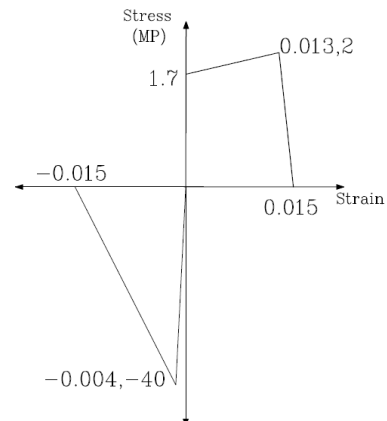


Figure 6. Parameters of ECC modeling in tensile [8,9]

شکل ۷. نتایج آزمایشگاهی [5] و عددی دیوارک بنایی

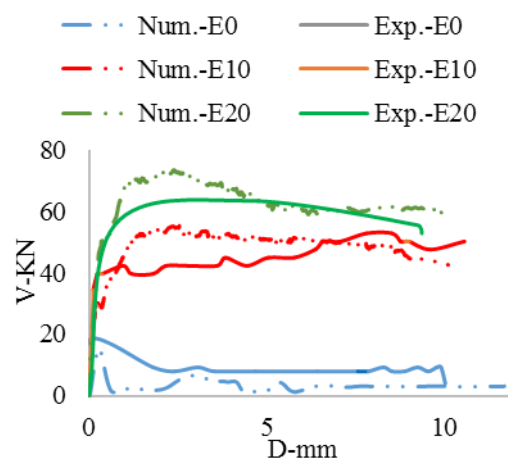


Fig. 7. Results of Wallette Exp. [5] & Num.

همچنین فرض شده‌است که خرابی دیوار تقویت شده ناشی از جدایی لایه ECC و دیوار بنایی نیست. پس برای اتصال ملات ECC و دیوار بنایی از روش TIE کردن نرم‌افزار استفاده می‌شود. درستی این فرض از طریق رابطه (۱) بررسی می‌شود [5]. بنابراین برای لایه‌های با ضخامت ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر جدایی لایه ملات ECC و دیوار بنایی اتفاق نمی‌افتد.

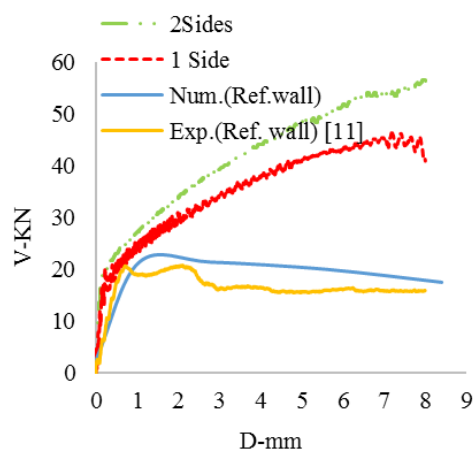
$$V_{\tau_{ECC}} = K_{wt} \times 0.12 f_b \times E_{ECC} \times M \times A_{Bond}$$

$$M = 0.0033(1 - e^{-82t_{ECC}}) \quad (1)$$

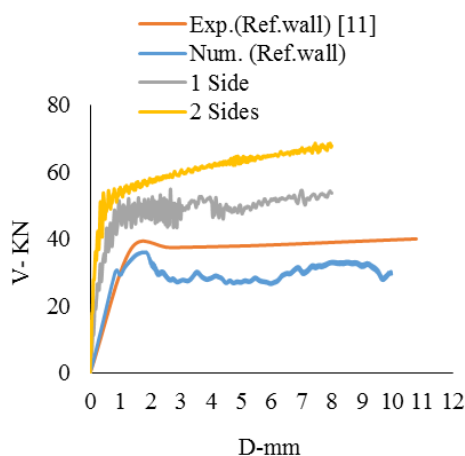
در رابطه بالا K_{wt} ، f_b ، E_{ECC} ، A_{Bond} ، t_{ECC} به ترتیب ضریب کاهش ضخامت دیوار، مقاومت فشاری منشور بنایی، مدول الاستیسته ملات ECC، سطح تماس دیوار و ملات ECC و

ترک خوردگی دیوار در پنجه آن است. برای دیوار با مود شکست لغزشی، ترک خوردگی دیوار در دو حالت یک و دو طرفه فقط در پای دیوار است. کانتورهای کرنش پلاستیک ملات ECC بجز در ناحیه پنجه دیوار در سایر نقاط بیانگر عدم رخداد رفتار غیرخطی لایه ECC است. هرچند مود شکست دیوار تقویت شده از نوع گهواره‌ای است. اما در مرحله بعد از ترک خوردگی و تسلیم دیوار، شیب منحنی تسلیم مثبت است که به دلیل وجود ملات ECC، شیب منفی ناشی از خردشدگی فشاری و اثر بار ثقیلی به تاخیر می‌افتد. این کاهش سختی بدون تحمل تغییر شکل بالا می‌تواند نقطه ضعف دیوار تقویت شده تحت نیروهای خارج صفحه دیوار باشد.

شکل ۹. منحنی نیرو- تغییر مکان (بدون آرما تور دوخت)



الف- مود شکست قطری



ب- مود شکست لغزش درز ملات

Fig. 9. Force- displacement plots of specimens (without dowel)

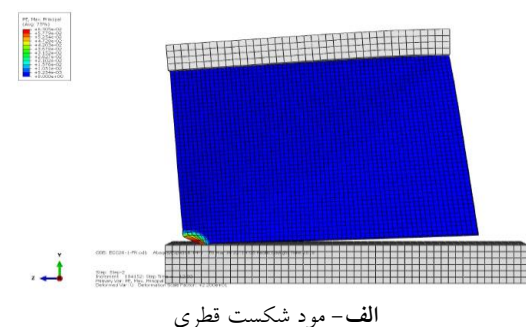
۵-۱- نتایج بدون اتصال به شالوده

نتایج حاصل از تحلیل شامل میزان کرنش پلاستیک ملات ECC و همچنین منحنی رفتاری دیوار برای دو مود لغزشی قطری در شکل‌های (۸ - ۹) ارائه شده است.

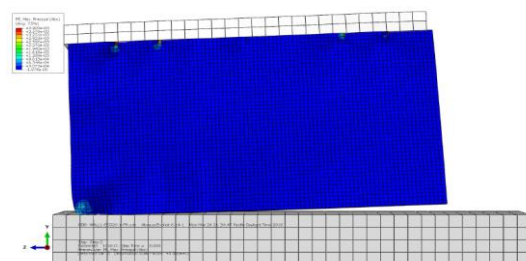
۵-۱-۱- مشخصات مود شکست

مطابق شکل (۸)، مود شکست نمونه‌های تقویت شده در هر دو حالت مود شکست به صورت مود گهواره‌ای همراه با خردشدگی فشاری است. به دلیل یکپارچگی دیوار ناشی از ملات ECC، مود شکست دیوار تقویت شده شکل‌پذیر و منحنی نیرو- تغییر مکان با شیب مثبت است.

شکل ۸. کرنش پلاستیک ملات ECC (تقویت یکطرفه- بدون آرما تور دوخت)



الف- مود شکست قطری



ب- مود شکست لغزش درز ملات

Fig. 8. ECC plastic strain (1 Side- without dowel)

الگوی ترک خوردگی دیوار بنایی برای مود شکست قطری با تقویت یکطرفه مانند قبل از تقویت و با باند وسیعتر است. منظور از باند وسیعتر افزایش محدوده ترک در سمت دیوار بنایی نسبت به حالت ترک نخورده است. دلیل این افزایش وسعت ترک خوردگی انسجام ناشی از حضور لایه ملات ECC هست. لیکن برای حالت تقویت دو طرفه

۵-۱-۲- بررسی پارامترهای رفتاری

برای تعیین سایر مشخصات غیرخطی دیوار مدل ساده شده مطابق ASCE 41-13 و شکل (۱۰) ترسیم شده است [1]. در این شکل V_d و V_y نیروی برشی حداکثر و تسلیم سازه، Δ_y و Δ_d تغییر مکان متناسب با برش حداکثر و تسلیم سازه هستند. K_i و K_e سختی جانبی موثر و سختی جانبی الاستیک سازه، α_1 و α_2 شیب ناحیه سخت شونده و شیب ناحیه نرم شونده سازه است. در این ارتباط لازم است سطح مدل چند خطی با مدل اصلی برابر باشد. ضمن آنکه باید محل تقاطع دو مدل در ۶۰ درصد نقطه تسلیم (V_y) باشد. نتایج بدست آمده از مدل ساده شده در جدول (۷) ارائه شده است.

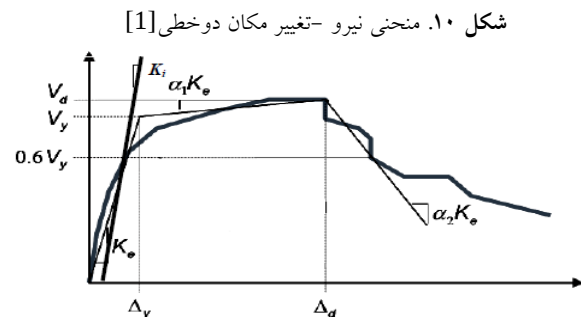


Figure 10. Bilinear force- displacement plots [1]

جدول ۷. ویژگی‌های رفتاری دیوار مرجع و تقویت شده با ملات ECC (بدون آرماتور دوخت)

Failure mode	Model type	F_u (K.N)	F_y (K.N)	E (N.m)	K (N.m)
D.T	Reference	18.8	16	110	84
	1Side	44	28	263	90
	2 Sides	56	28	335	102
B.I	Reference	38	32	250	110
	1 Side	54	47	384	135
	2 Sides	68	54	479	145

Table 7. Properties of Reference and Strengthened Wall (Without Dowel)

- مقاومت تسلیم

منحنی نیرو- تغییر مکان دیوار بیانگر افزایش مقاومت تسلیم ۱/۵ تا ۱/۸ برابر نسبت به حالت تقویت نشده است. این

افزایش مقاومت برای حالت یک و دو طرفه تفاوت محسوسی نداشته و تقریباً یکسان است. دلیل آن حاکم شدن مود گهواره‌ای و عدم تاثیر ملات ECC در محدوده غیرخطی است.

- مقاومت نهایی

پس از ترک خوردگی دیوار و با افزایش تغییر مکان، کاهش سختی همراه با افزایش مقاومت ملاحظه می‌شود که این حالت برای نمونه با مود شکست قطری قابل توجه است. این افزایش برای مقاومت نهایی حالت یک و دو طرفه دیوار با مود شکست قطری به ترتیب ۲/۳ و ۳ برابر حالت تقویت نشده می‌باشد ولی برای مود شکست لغزش درز ملات این مقدار به ترتیب ۱/۴ و ۱/۸ برابر حالت تقویت نشده است که نسبت به مود قطری تفاوت محسوس دارد. دلیل این اختلاف مقاومت نهایی در هر دو مود می‌تواند تغییر مود شکست قطری به مود گهواره‌ای ناشی از عملکرد ملات ECC باشد، در حالی که برای مود شکست برش درز ملات، تغییر رفتار اتفاق نمی‌افتد.

- جذب انرژی

جذب انرژی یکی از معیارهای بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها است. هر چند مبنای تعیین میزان جذب انرژی سازه‌ها منحنی چرخه‌ای سازه است لکن در این پژوهش فقط برای مقایسه جذب انرژی دو سازه تقویت شده و تقویت نشده از مساحت زیر منحنی ظرفیت سازه استفاده شده است.

با توجه به مقدار مساحت زیر منحنی نیرو- تغییر مکان، شکل‌پذیری دیوار نسبت به حالت تقویت نشده، به ویژه مود شکست قطری، افزایش چشمگیری داشته است. این مقدار برای مود شکست قطری و برای حالت یک و دو طرفه به ترتیب ۲/۴ و ۳ برابر حالت تقویت نشده است. برای مود شکست لغزش درز ملات به ترتیب حدود ۱/۵ و ۱/۹ برابر دیوار تقویت نشده است.

- سختی

از دیگر ویژگی‌های رفتاری دیوار، سختی آن است که برای دیوار تقویت شده با ملات ECC تغییر قابل توجهی برای هر دو مود شکست نسبت به حالت تقویت نشده ملاحظه نمی‌شود.

شکل ۱۲. کرنش پلاستیک ECC (مود لغزشی - با آرماتور دوخت)

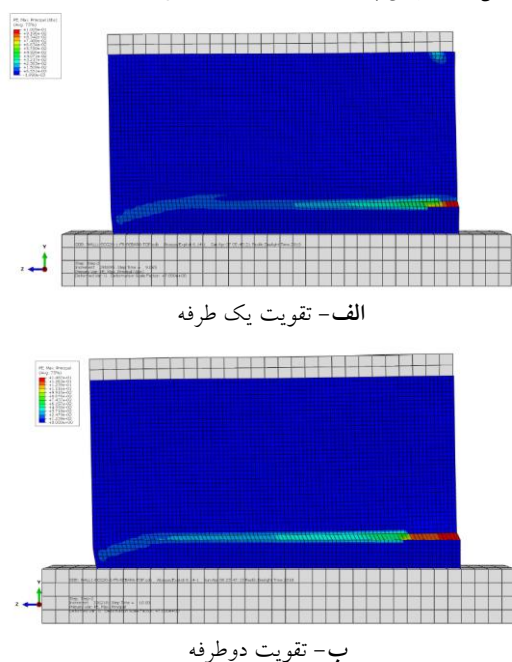


Fig. 12. ECC plastic strain (bed joint failure mode- with dowel)

شکل ۱۳. منحنی نیرو- تغییر مکان نمونه‌ها (با آرماتور دوخت)

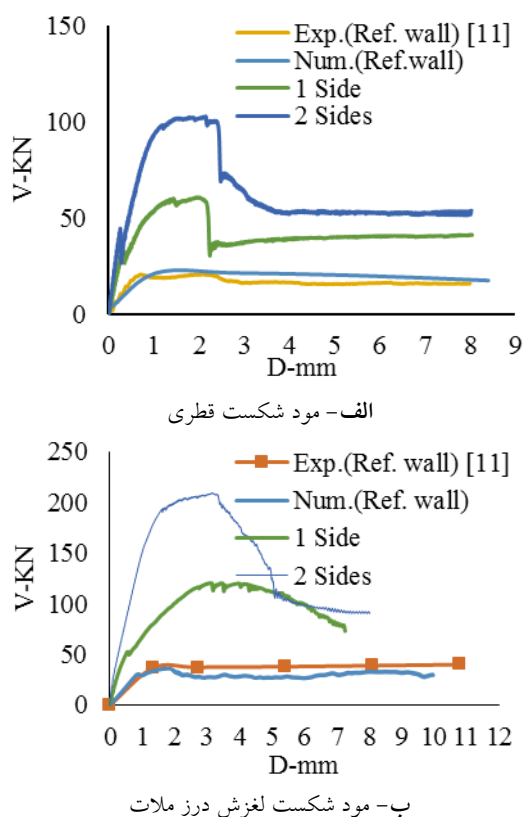


Fig. 13. Force-displacement plots of specimens (with dowel)

کانتورهای کرنش پلاستیک ملات ECC در هر دو مود بیانگر آن است که بجز در ناحیه پنجه دیوار، در محل انتهایی

۵-۲- نتایج حالت با اتصال به شالوده

با توجه به آنکه در مدل قبلی به دلیل حاکم شدن مود گهواره‌ای از ظرفیت غیرخطی ملات ECC استفاده نشده است به عنوان یک راهکار، ملات ECC به شالوده زیر دیوار متصل می‌شود. در این ارتباط از تعدادی آرماتور دوخت نمره ۶ با فاصله ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر استفاده شده است. طول آرماتورها ۳۵ سانتی‌متر است که ۱۵ سانتی‌متر آن در شالوده و مابقی در ملات ECC مهار شده است. در مدلسازی فرض بر آن است که بین آرماتورها با شالوده و ملات ECC چسبندگی کافی وجود دارد. با توجه به طول مهاری آرماتورها این فرض به واقعیت نزدیک است. برای مدلسازی آرماتورهای دوخت از المان BEAM نرم‌افزار استفاده شده است.

۵-۲-۱- مشخصات مود شکست

مطابق شکل‌های (۱۱ و ۱۲) مود شکست نمونه‌های تقویت شده برای دو حالت مود شکست قطری و لغزش درز ملات در بالای آرماتور دوخت به صورت مود برشی همراه با خردشدگی فشاری است.

شکل ۱۱. کرنش پلاستیک ECC (مود قطری - با آرماتور دوخت)

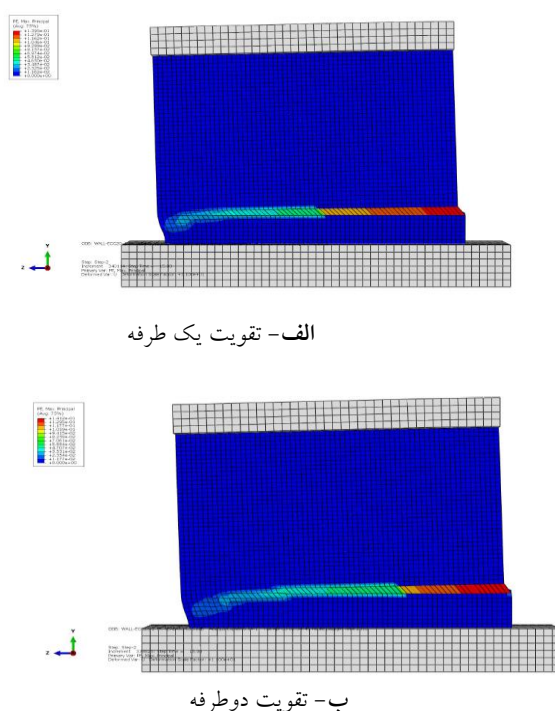


Fig. 11. ECC plastic strain (diagonal failure mode- with dowel)

شکل ۱۴. نسبت مقاومت تسلیم نمونه تقویت شده به مرجع

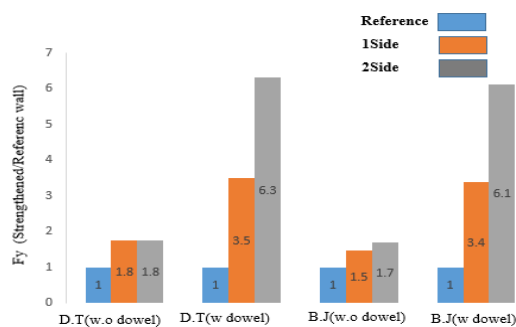


Fig. 14. The ratio of yield strength of strengthened specimens to reference ones

- مقاومت نهایی

برای بررسی مقاومت نهایی دیوار تقویت شده با ملات ECC و آرماتور دوخت، نتایج تحلیل برای هر دو مود شکست و حالت با و بدون آرماتور دوخت در شکل (۱۵) ارائه شده است. برای دیوار با فرض آرماتور دوخت، مقدار مقاومت نهایی دیوار در مدل یک و دو طرفه هر دو مود شکست به ترتیب ۳/۱ و ۴/۵ برابر دیوار تقویت نشده است.

شکل ۱۵. نسبت مقاومت نهایی نمونه تقویت شده به مرجع

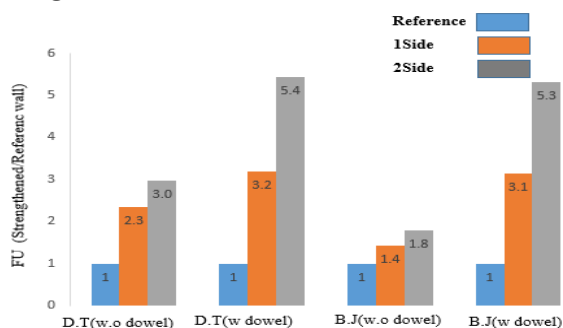


Fig. 15. The ratio of ultimate strength of strengthened specimens to reference ones

اما از مقایسه نتایج حالت با و بدون آرماتور دوخت ملاحظه می‌شود که اثر اتصال ملات ECC به شالوده روی مود شکست لغزش درز ملات بیشتر از حالت قطری است.

- جذب انرژی

میزان انرژی جذب شده برای مود با شکست لغزش درز ملات و قطری در حالت با آرماتور دوخت و برای یک و دو طرفه به ترتیب ۳ و ۴/۵ برابر حالت تقویت نشده است (شکل ۱۶).

آرماتور دوخت نیز رفتار غیرخطی در لایه ملات ECC اتفاق افتاده است. مشارکت ملات ECC و همچنین یکپارچگی دیوار، باعث بهبود رفتار دیوار نسبت به حالت تقویت بدون آرماتور دوخت است.

۲-۲-۵- بررسی پارامترهای رفتاری

مانند حالت بدون آرماتور دوخت، برای تعیین سایر مشخصات غیرخطی دیوار از جمله سختی دیوار تقویت شده، میزان جذب انرژی و نقطه تسلیم، مدل چندخطی مطابق شکل (۱۰) ترسیم شده است. نتایج در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول ۸. ویژگی‌های رفتاری دیوار مرجع و تقویت شده با ملات ECC و آرماتور دوخت

Failure mode	Model type	F_u (K.N)	F_y (K.N)	E (N-m)	K (N-m)
D.T	Ref. [11]	18.8	16	110	84
	1Side	60	56	335	90
	2 Sides	102	101	507	102
B.J	Ref. [11]	38	32	250	110
	1 Side	119	108	690	135
	2 Sides	202	196	1100	145

Table 8. Properties of Reference and Strengthened Wall (With Dowel)

- مقاومت تسلیم

از مقایسه نتایج دیوار تقویت شده با فرض بکارگیری آرماتور دوخت، ملاحظه می‌شود که مقاومت تسلیم دیوار با تقویت یک و دو طرفه به ترتیب ۳/۵ و ۶/۳ برابر دیوار تقویت نشده است (شکل ۱۴). این افزایش مقاومت برای هر دو مود لغزش درز ملات و قطری تقریباً برابر است. از مقایسه نتایج حالت با و بدون آرماتور دوخت ملاحظه می‌شود که در حالت یک طرفه، میزان مقاومت تسلیم حالت با آرماتور دوخت به بیش از دو برابر حالت بدون آرماتور دوخت افزایش یافته است. دلیل افزایش مقاومت، مشارکت ملات ECC می‌باشد. اما برای حالت دو طرفه این نسبت ۳/۵ است که دلیل این تفاوت عدم تاثیر یک یا دو طرفه بودن لایه تقویت در حالت بدون آرماتور دوخت است.

تعدادی دیوارک بنایی تقویت شده است. در این رابطه t_{ECC} ، l_w ، f_t ، f_c به ترتیب مقاومت فشاری و کششی، طول و ضخامت لایه ECC است [5].

$$V_{ECC} = t_{ECC} (Z f_t + 0.18 \sqrt{f_c l_w}), Z = 0.72 l_w \quad (2)$$

مطابق جدول (۹) مقادیر محاسبه شده بر اساس رابطه (۲) در حالت بدون اتصال لایه ECC به شالوده تفاوت زیادی با نتایج عددی دارد. هر چند تفاوت این نتایج برای حالت با اتصال به شالوده به حداقل می‌رسد ولی در مواردی این اختلاف تا ۲ برابر است.

جدول ۹. مقاومت برشی دیوار طبق رابطه (۲) و نتایج عددی

Failure mode	Model type	E.Q (2)	Numerical	
			W.o. dowel	W.dowel
D.T	1Side	117	44	60
	2 Sides	214	56	102
B.J	1 Side	177	54	109
	2 Sides	316	68	202

Table.9. Shear Strength of Wall and ECC Based on E.Q (2) and Numerical Results

دلیل این اختلاف می‌تواند متفاوت بودن رفتار دیوارک بنایی با سایر مودهای شکست دیوار بنایی باربر و عدم توجه به رفتار دیوار بنایی باربر در مود گهواره‌ای باشد.

در جداول (۸ و ۹) و شکل‌های (۱۴ الی ۱۷)، واژه "D.T" و "B.J" به ترتیب معرف مودهای شکست قطری و لغزش درز ملات هستند. همچنین واژه "W. o. dowel" و "W. dowel" به ترتیب بیانگر دیوار با آرماتور دوخت و دیوار بدون آرماتور دوخت است.

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی عملکرد داخل صفحه دیوار بنایی باربر تقویت شده با ملات ECC پرداخته است. در این ارتباط دو نمونه دیوار شاهد با مقیاس ۱:۲ و مودهای شکست قطری و لغزش درز ملات که نتایج آزمایشگاهی نمونه شاهد آن طبق مرجع [11] در دسترس است با نرم افزار ABAQUS مدل‌سازی شده‌است. در این ارتباط عملکرد دیوارهای مورد

شکل ۱۶. نسبت مقدار جذب انرژی نمونه تقویت شده به مرجع

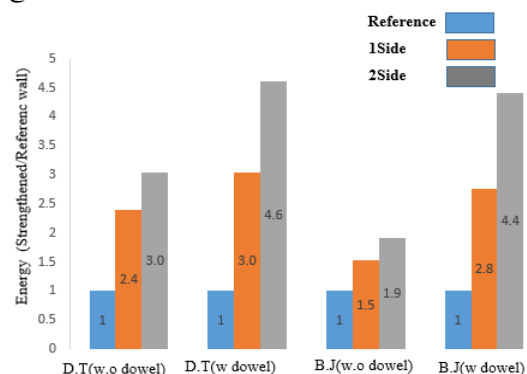


Fig. 16. The ratio of dissipated energy of strengthened specimens to reference ones

این مقدار برای حالت با آرماتور دوخت نسبت به بدون آن برای مود قطری یک و دو طرفه به ترتیب ۱/۲ و ۱/۵ است. برای مود لغزش درز ملات این مقدار به ترتیب ۱/۹ و ۲/۳ است. همانطور که مشاهده می‌شود تاثیر استفاده از آرماتور دوخت برای جذب انرژی در مود شکست لغزش درز ملات به میزان چشمگیری بیشتر از مود شکست قطری است.

- سختی

مطابق شکل (۱۷) تغییرات سختی دیوار تقویت شده در هر دو حالت با و بدون اتصال حدود ۳۰ درصد است. این میزان بیانگر عدم تغییر ملموس در سختی دیوار پس از تقویت است.

شکل ۱۷. نسبت سختی نمونه تقویت شده به نمونه مرجع

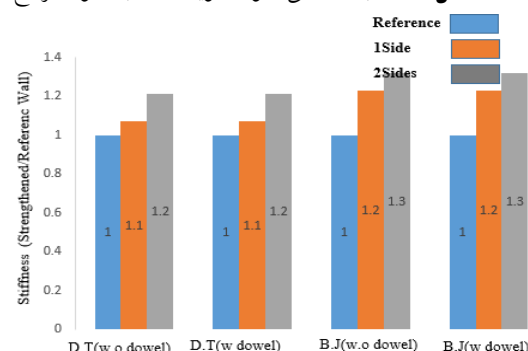


Fig. 17. The ratio of stiffness of strengthened specimens to reference ones

۳-۵- بررسی رابطه تعیین ظرفیت برشی دیوار تقویت شده با

ملات ECC

این‌گهام و همکاران رابطه (۲) برای محاسبه ظرفیت برشی لایه ملات ECC پیشنهاد داده‌اند. این رابطه مبتنی بر آزمایش

- باتوجه به نتایج این پژوهش، مقادیر مقاومت برشی ملات ECC براساس رابطه (۲) بسیار بالاتر از نتایج عددی برآورد می‌شود. در این ارتباط توصیه می‌شود، طی پژوهش‌های جداگانه‌ای، رابطه برای هر دو شرایط (اتصال و عدم اتصال لایه ملات ECC به شالوده) به طور دقیقتر واکاوی شود.

References

۷- مراجع

1. ASCE/41-17. 2017 Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. Reston, Virginia, 20191-4382: American Society of Civil Engineers.
2. Kadam S., Singh Y. & Li B. 2014 Strengthening of unreinforced masonry using welded wire mesh and micro-concrete-Behaviour under in-plane action. Construction and Building Materials, 54, 247-257.
3. Alcaino P. & Santa-Maria H. 2008 Experimental response of externally retrofitted masonry walls subjected to shear loading. Journal of composites for construction, 12(5), 489-98.
4. Kesner K. & Billington S. L. 2004 Tension, compression and cyclic testing of engineered cementitious composite materials. Technical report MCEER-04-0002.
5. Lin Y., Wotherspoon L., Scott A. & Ingham J. 2014 In-plane strengthening of clay brick unreinforced masonry wallettes using ECC shotcrete. Engineering Structures, 66, 57-65.
6. Deng M., Y. S. 2018 Cyclic testing of unreinforced masonry walls retrofitted with engineered cementitious composites. Construction and Building Materials, 177, 395-408.
7. Lourenço P. & Rots J. 1997 Multisurface interface model for analysis of masonry structures. Journal of engineering mechanics, 123(7), 660-8.
8. Han T., Feenstra P. & Billington S. 2003 Simulation of highly ductile fiber-reinforced cement-based composite components under cyclic loading. Structural Journal, 100(6), 749-57.
9. Kim Y., Kong H. & Li V. 2003 Design of engineered cementitious composite suitable for wet-mixture shotcreting. Materials Journal, 100(6), 511-8.
10. Pluijm V. 1997 Non-linear behaviour of masonry under tension. HERON-ENGLISH EDITION, 42, 25-54.
11. ADarbhazni A., Marefat M. & Khanmohammadi M. 2014 Investigation of in-plane seismic retrofit of unreinforced masonry walls by means of vertical steel ties. Construction and Building Materials, 52, 122-9.
12. ABAQUS. 2013 online documentation. SIMULIA Inc.

اشاره پس از تقویت با ملات ECC و به صورت یک و دو طرفه و با ضخامت ۲۰ میلیمتر بررسی شده‌است. در این بررسی تاثیر اتصال لایه ECC به شالوده مورد توجه قرار گرفته‌است. همچنین این نتایج با روابط مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی دیوارک بنایی تقویت شده با ملات ECC [5] مقایسه شده‌اند. نتایج پژوهش عبارتند از:

- رفتار داخل صفحه دیوار باربر، پس از تقویت با ملات ECC بدون اتصال با شالوده، دارای مود گهواره‌ای و خردشدگی فشاری است. در این حالت ملات ECC عمدتاً باعث انسجام واحدهای بنایی و بدون رفتار غیرخطی است. این ملات باعث بهبود رفتار غیرخطی دیوار به‌ویژه با مود شکست قطری می‌شود. البته استفاده از لایه تقویت یک یا دو طرفه تفاوت چشمگیری روی مولفه‌های رفتاری داخل صفحه دیوار ندارد.

- رفتار داخل صفحه دیوار باربر، پس از تقویت با ملات ECC متصل به شالوده، دارای مود لغزش درز ملات و خردشدگی فشاری است. وجود آرماتورهای دوخت ضمن انسجام واحدهای بنایی، باعث افزایش مشارکت ملات ECC می‌شود به گونه‌ای که مقاومت برشی برای حالت یک و دو طرفه به ترتیب ۳/۵ و ۶ برابر تقویت نشده می‌شود. افزایش ۳ و ۴/۵ برابری جذب انرژی دیوار تقویت شده نسبت به تقویت نشده بیانگر حصول شکل‌پذیری نسبتاً بالا است.

- از مقایسه منحنی رفتاری داخل صفحه دیوار تقویت شده با و بدون اتصال ملات ECC به شالوده ملاحظه می‌شود که اثر استفاده از المان‌های آرماتور دوخت بر افزایش مقاومت و جذب انرژی دیوار بیشتر از حالت بدون آرماتور دوخت است. این میزان افزایش ناشی از مشارکت ملات ECC در تحمل برش پای دیوار است. البته این افزایش در دیوارهای با مود شکست لغزش درز ملات بیشتر از دیوارهای با مود شکست قطری است. همچنین یکی دیگر از مزایای این اتصال، کاهش اندک سختی دیوار همراه با افزایش مقاومت آن است که در افزایش مقاومت خارج از صفحه دیوار تاثیر به‌سزایی دارد.

Numerical Investigation of the In-plane Masonry Walls Performance, Strengthened Using ECC Materials, Focusing on the Effect of the Connection to the Foundation

Alireza Namayandeh Niasar¹, Farshid Jandaghi Alaei^{2*}, Sohail Majid Zamani³

1- PhD Candidate, Structural, Civil Eng. Dept., Shahrood University of Technology

2- Associate Prof., Civil Eng Dept., Shahrood University of Technology

3- Assistant Prof., Structural Engineering Dept., BHRC

*fjalaei@shahroodut.ac.ir

Abstract

The extent of masonry structures and their weaknesses against earthquakes will increase the need for research on new ways of seismic rehabilitation of these structures. Recently, in addition to conventional techniques such as Mesh, Shotcrete, and FRP, new materials such as ECC materials have been considered by the researchers to retrofit the masonry walls. The composite materials of cement base, which is one of the types of cement base materials, due to the presence of fibers in the matrix, has a significantly different tensile strain capacity than that of conventional concrete, so that the range of this parameter for a typical mortar is 0.015%, and for composite materials of ECC is from 0.5 up to 6%. In the present study, the effect of these materials on the performance of the bearing masonry walls with in-plane failure modes including the diagonal tension mode (brittle mode) and the bed-joint sliding mode (the ductile mode) were investigated. The results of the research are based on the numerical method. ABAQUS software was used for numerical modeling. Due to validate the model, the available laboratory information of as-built masonry walls has been used. The as-built masonry walls are half scale. The wall dimensions for diagonal tension mode and bed-joint sliding mode were 1900x1400x110 and 2700x1400x160 mm, respectively. The gravity load of the wall was 0.1 MP. The walls strengthened with 20 mm ECC layers on one and both sides. In one case, ECC layers were joint to the foundation and in other case were not. A change in failure mode of strengthened walls (brittle to ductile) and hardening behavior were the main achievement of this research. If the connection between ECC layers and the foundation is absent, the failure mode of strengthened walls will be toe-crushing and rocking mode. If the connection between ECC layers and the foundation is present, the failure mode of strengthened walls will be toe-crushing and bed-joint sliding mode. Other obtained results showed an effective increase in strength and dissipated energy. The extent of this increase depends on how ECC layer is connected to the foundation. If there is no connection between ECC layers and the foundation, the strength and dissipated energy of walls with diagonal tension failure mode for one-side and both-sides ECC layers will be 2.3 and 3 times, respectively, in comparison with those of as-built masonry walls. Whereas for the bed-joint sliding mode, the extent of wall strength and dissipated energy is 1.4 and 1.8. according to the obtained results and comparing the properties of the wall strengthened by one-side and both- sides ECC layers, a significant difference was not observed, especially in bed-joint sliding mode. Appositively, if there is a connection between ECC layers and the foundation, the strength of walls for one-side and both-sides ECC layers will be 3.5 and 6 times, respectively, in comparison with those of as-built masonry walls. Whereas the dissipated energy of walls will be 3 and 4.5 times. Based on these results, if the ECC layers and the wall foundation are connected, the capacity of strengthened walls will be optimized.

Keywords: Bearing Masonry Wall, Engineering Composite Cementation, Numerical Method, Seismic Rehabilitation.