

## بررسی تحلیلی رفتار دیوار آجری تقویت شده با شبکه آرماتور و شاتکریت

فریبرز ناطقی الهی\*، سروش قدس\*\*  
پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

(دریافت مقاله: ۸۳/۳/۴ - دریافت نسخه نهایی: ۸۵/۱/۱۶)

**چکیده** - یکی از روشهای موثر برای مقاوم سازی ساختمانهای آجری اعمال شاتکریت مسلح شده با شبکه آرماتور به سطح دیوار است. برای ارزیابی رفتار دیوار آجری تقویت شده با روکش نمی‌توان از روشهای تحلیلی مبتنی بر معادلات ساده نظریه الاستیسیته استفاده کرد، لذا به کارگیری روشهای عددی در این زمینه اجتناب ناپذیر است.

در این پژوهش برای ارزیابی رفتار دیوار آجری تقویت شده با روکش مسلح، مدلسازی دیوار آجری با استفاده از نرم افزار المان محدود ANSYS انجام گرفته است. برای اطمینان از صحت مدلسازی، از نتایج آزمون آزمایشگاهی برای کالیبراسیون مدل استفاده شده است. سپس مدل کالیبره شده برای مدلسازی دیوار تقویت شده تعمیم داده شده و در نهایت نتایج تحلیل دیوارهای آجری ساده و نظیر تقویت شده آنها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: ترک خوردگی، دیوار آجری، شاتکریت، شبکه آرماتور، منحنی هیستریزیس.

## Analytical Assessment of the Behaviour of the Masonry Wall Strengthened by Steel Mesh and Shotcrete

F. Nateghi, and A. S. Ghods

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

**Abstract:** *An effective approach for strengthening masonry buildings is to apply shotcrete reinforced with mesh on the surface of the wall. It is not possible to assess the behaviour of coated walls solely using analytical approaches based on simple equations of theory of elasticity without the use of numerical methods. Unreinforced masonry wall is modelled in this study using the finite element software "ANSYS" to assess the behavior of walls strengthened with reinforced jacket. The accuracy of the model is ensured by calibrating the model against results obtained from laboratory tests. Then the calibrated model is*

\*\* - کارشناس ارشد سازه

\* - استاد

generalized to model the strengthened wall and, finally, the analytical results obtained from masonry walls and strengthened walls are compared and evaluated.

**Keywords:** ANSYS, Masonry wall, Shotcrete, Solid65, Steel mesh.

## ۱- مقدمه

یکی از روشهای موثر و آسان در مقاوم سازی ساختمانهای بنایی استفاده از روکش بتن مسلح به روی سطح دیوار است که معمولاً به صورت بتن پاشیده به سطح دیوار اعمال می شود اعمال روکش بتن مسلح به دیوار باعث افزایش سختی، مقاومت و نیز بهبود مشخصات لرزه ای دیوار آجری می شود.

علی رغم اینکه اعمال این روش به سادگی ممکن است لیکن بررسی کمی میزان افزایش مقاومت و همچنین ارزیابی رفتار دیوار تقویت شده با شبکه آرماتور و شاتکریت با روابط تحلیلی ساده امکانپذیر نیست. در سالهای اخیر روشهای عددی برای بررسی رفتار دیوارها و ساختمانهای بنایی گسترش یافته اند لیکن نتایج این تحلیلها زمانی قابل اعتماد است که نتایج آنها با آزمونهای آزمایشگاهی نمونه های مشابه تطبیق داده شود.

لذا در این پژوهش به منظور ارزیابی مقاومت دیوار آجری تقویت شده، در ابتدا مدل المان محدود دیوار آجری غیر مسلح به کمک نرم افزار المان محدود ANSYS مورد تحلیل قرار گرفته و از نتایج نمونه آزمایشگاهی متناظر با آن برای تطابق و کالیبراسیون مدل بهره گیری شده است. در مرحله بعد مدل کالیبره شده برای بررسی رفتار دیوار تقویت شده تعمیم داده شده است و در نهایت از مقایسه پارامترهای رفتاری دیوار آجری غیرمسلح و نظیر تقویت شده آنها، نتیجه گیری در مورد تاثیر روکش مسلح بر رفتار دیوار آجری به عمل آمده است.

## ۲- آزمایش مقاومت جانبی دیوار آجری غیر

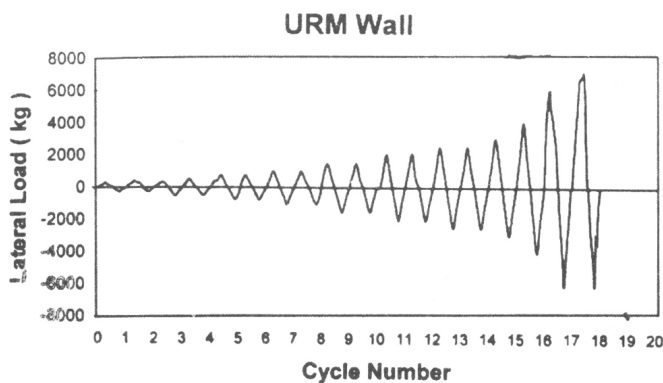
### مسلح

نتایج آزمایشگاهی استفاده شده در این پژوهش مربوط به گزارش آزمون دیوار آجری غیرمسلح تحت عنوان «بررسی تجربی روشهای مقاوم سازی ساختمانهای آجری نیم اسکلت

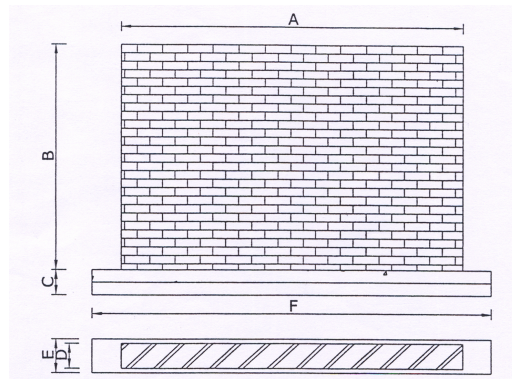
در برابر زلزله» است [۲]. در این آزمایش دیوار آجری غیرمسلح به کمک جک و به صورت استاتیکی تحت بار جانبی رفت و برگشتی قرار گرفته و آزمایش تا رسیدن به گسیختگی کامل دیوار آجری ادامه یافته است. با توجه به محدودیتهای آزمایشگاهی، دیوار آجری انتخابی در ابعاد واقعی با ضریب مقیاس ۱:۲ مدل شده است. شکل (۱) دیوار آزمون شده را نشان می دهد.

برای توزیع بار جانبی به صورت یکنواخت روی دیوار، تیر بارگذاری بتنی در بالای دیوار به ارتفاع ۲۰ سانتیمتر اجرا شده است که در دو انتهای تیر صفحات فلزی با شاخک داخل تیر بتنی قرار گرفته اند که این صفحات در بارگذاری جانبی بار جکها را به تیر بتنی و نهایتاً دیوار آجری انتقال می دهند. فونداسیون این دیوار داخل یک عدد ناودانی نمره ۳۰۰ که با پیچ و مهره به کف صلب آزمایشگاه محکم شده اجرا شده است [۲] آجرهای استفاده شده در دیوار مدل از نوع آجرهای فشاری (گری) است. مقاومت فشاری آجرهای مصرفی در محدوده ۱۵ Mpa تا ۱۶ Mpa قرار دارد. ملات مصرفی در ساخت دیوار ملات ماسه سیمان با نسبت سیمان به ماسه ۱ به ۶ بوده که ملات مصرفی معمول در اجرای اکثر ساختمانهای بنایی است [۲]. بار قائم به کمک بستهای قورباغه ای و تیرهای فولادی به دیوار اعمال شده است. میزان بار قائم وارده برابر  $35/4 \text{ KN/M}$  است. بار جانبی اعمالی به کمک جکهای فشاری و قابهای بارگذاری که مثلثی اند و در طرفین دیوار قرار می گیرند در سیکلهای مختلف رفت و برگشتی به دیوار وارد شده است. شکل (۲) رژیم بار جانبی سیکلی اعمال شده به دیوار مدل شده را نشان می دهد.

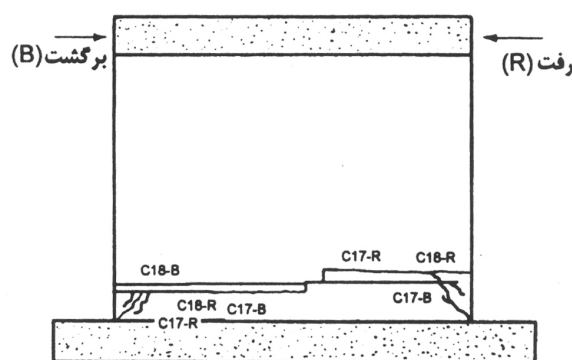
”دراثر اعمال بار جانبی رفت و برگشتی تا پایان سیکل شانزدهم که بار ۴ تن بر دیوار اعمال شد هیچ گونه ترک یا شکستگی در دیوار مشاهده نشد. در مرحله رفت سیکل هفدهم



شکل ۲- رژیم بار جانبی سیکلی اعمال شده به دیوار مدل [۲]



شکل ۱- مشخصات هندسی نمونه اصلی و مدل آزمایشگاهی [۲]



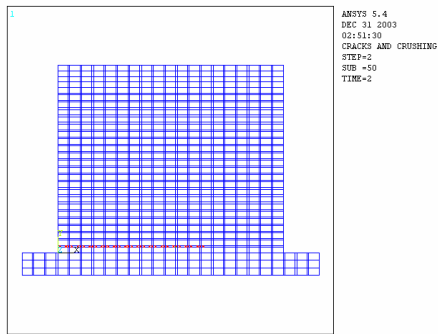
شکل ۳ - ترکهای ایجاد شده در دیوار آجری [۲]

### ۳- مدل تحلیلی دیوار آجری

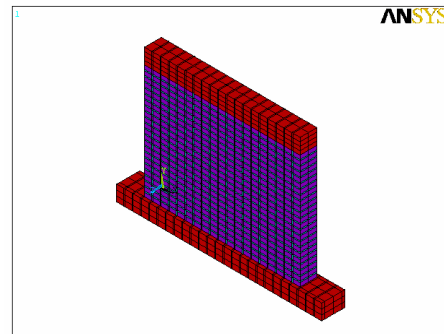
باتوجه به نتایج آزمایش فوق می‌توان مدل المان محدود این دیوار آجری را ساخت و از نتایج این آزمایش برای کالیبراسیون نتایج استفاده کرد. مدلسازی رایانه‌ای دیوار آجری با استفاده از نرم‌افزار ANSYS 5.4 و المان SOLID65 انجام شد. از آنجایی که تنها المانی که در برنامه ANSYS توانایی مدلسازی ترک را دارد المان SOLID65 است، می‌توان آن را برای مدل کردن دیوارها و ساختمانهای آجری به‌کاربرد.

این المان رفتاری ترد داشته و در اثر کشش ترک‌خورده و در فشار خرد می‌شود. در واقع این المان قابلیت مدلسازی مصالح بتنی را داراست و در سه جهت دلخواه می‌توان برای آن آرماتورگذاری تعریف کرد [۱]. باتوجه به اینکه رفتار اجزای آجری (ملات و آجر) تا حدود زیادی نزدیک به رفتار مصالح بتنی است می‌توان دیوار آجری را به کمک این المان مدل کرد.

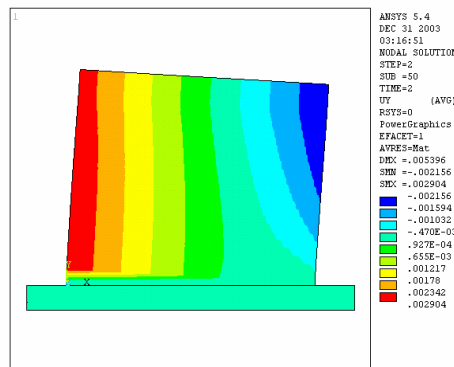
بار جانبی ۶ تن به دیوار اعمال شد که باعث بروز ترک خمشی و تغییر مکان ناگهانی در دیوار شد که تا ۲/۳ طول دیوار ادامه یافت. در مرحله برگشت سیکل هفدهم نیز بار جانبی ۶ تن وارد شد که باعث بروز ترک در جهت مخالف شد که دقیقاً در امتداد ترک ایجاد شده در مرحله قبل قرار گرفت. در مرحله رفت سیکل هجدهم بار ۷/۱ تن به دیوار اعمال شد که در این مرحله از بارگذاری ترکهای سیکل قبلی از هم باز شده و قسمت فوقانی دیوار حول محور قائم دوران کرد. در این مرحله خردشدگی در ناحیه فشاری دیوار ایجاد شد. در مرحله برگشت سیکل هجدهم ترک افقی جدید در ناحیه کششی دیوار ایجاد شد. این ترک تا حدود ۱/۵ سانتیمتر باز شده و سرانجام با ادامه بارگذاری اتصال مربوط به بارگذاری قائم بریده شده و کار عملاً به اتمام رسید [۴]. شکل (۳) ترکهای ایجاد شده در دیوار را نشان می‌دهد.



شکل ۵- ترک ایجاد شده در دیوار (بار جانبی رفت 60 KN) [۴]



شکل ۴- مدل المان محدود دیوار آجری غیرمسلح [۴]

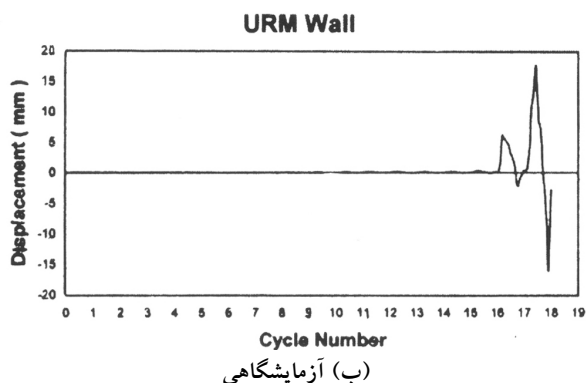


شکل ۶- کانتور جابه‌جایی قائم در دیوار (بار جانبی 60KN) [۴]

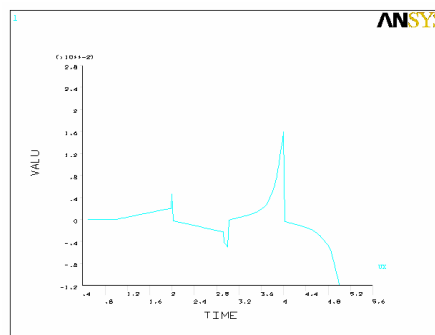
گسترده، نیروی وزن نیز با اعمال شتاب قائم برابر  $g = 9/81 \frac{m}{s^2}$  به مدل وارد شد. برای اعمال بار جانبی به تیر بارگذاری در مدل، بار متمرکز روی گره‌های انتهایی تیر بارگذاری پخش شد. برای انطباق مدل رایانه‌ای و آزمایشگاهی بارها به صورت مرحله‌ای و مطابق با بارهای وارد شده در آزمون به مدل رایانه‌ای اعمال شد. لازم به ذکر است دیوار در اثر بارگذاری جانبی ترک خورده و تحلیل غیرخطی شد، لذا بار به جهت همگرایی تحلیل به صورت تدریجی و در چندین زیرمرحله وارد شد. بررسی نتایج تحلیل مسئله در مراحل مختلف بارگذاری نشان از انطباق نسبتاً مناسب نتایج تحلیل با نتایج آزمایش داد. برای مثال به موارد ذیل می‌توان اشاره کرد:

۱- نمودار جابه‌جایی افقی تحلیلی و آزمایشگاهی انتهای دیوار در شکل (۷) ترسیم شده است. (لازم به ذکر است در شکل ۷-الف نمودار جابه‌جایی تحلیلی انتهای دیوار به دلیل جابه‌جایی بسیار کم دیوار در محدوده الاستیک (قبل ترک) و به لحاظ محدودیت در حافظه رایانه تنها در

از آنجایی که هدف، ساخت مدل ناهمگن است، هم آجرها و هم ملات با استفاده از این المان، لیکن با در نظر گرفتن خصوصیات مقاومتی متفاوتی برای هر یک مدل شدند. ابعاد آجرهای در نظر گرفته شده در مدل رایانه‌ای  $20 \times 11 \times 5 \text{ cm}$  و ضخامت لایه‌های افقی و قائم ملات نیز برابر  $1/5 \text{ cm}$  منظور شد. برای تطابق بیشتر مدل تحلیلی و نمونه آزمایشگاهی به لحاظ هندسی به صورت یک‌در میان در ردیف‌های متوالی دیوار، ردیف افقی دیوار با یک آجر نیمه آغاز شد. برای توزیع یکنواخت بار قائم و بار جانبی روی دیوار، مشابه نمونه آزمایشگاهی تیر بارگذاری به مقطع  $17/5 \times 20 \text{ cm}$  و همچنین فونداسیون بتنی به ابعاد  $270 \times 30 \times 20 \text{ cm}$  مدل‌سازی شد. برای مدل‌سازی تیر و فونداسیون نیز از المان SOLID65 لیکن با مقاومت کششی و فشاری بالاتر استفاده شد. شکل (۴) دیوار مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد. بار قائم وارد بر مدل عبارت است از بار گسترده خطی  $34/2 \text{ KN/M}$  در تراز بالای تیرگذاری به صورت یکنواخت به آن وارد شد. علاوه بر این بار

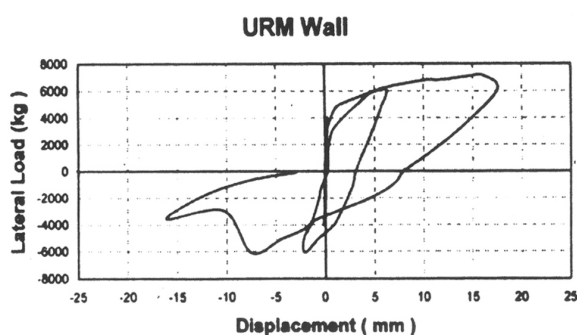


(ب) آزمایشگاهی

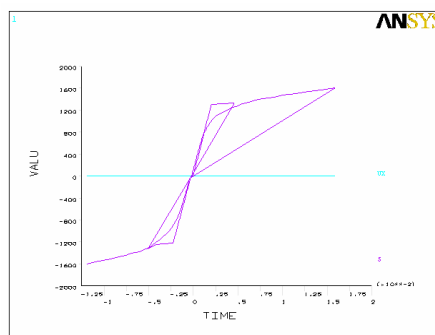


(الف) تحلیلی

شکل ۷-جابجایی افقی انتهای دیوار آجری [۴]



(ب) آزمایشگاهی



(الف) تحلیلی

شکل ۸- مقایسه منحنی هیستریزس دیوار آجری [۴]

#### ۴- بررسی مقاومت دیوار تقویت شده با شبکه

##### آرماتور و شاتکریت

با توجه به انطباق مناسب نتایج تحلیل مدل المان محدود و نتایج آزمون دیوار آجری در آزمایشگاه می‌توان این مدل را برای دیوارهای تقویت شده با مش و شاتکریت تعمیم داد و از نتایج به دست آمده از تحلیل آنها ارزیابی قابل اطمینانی از رفتار و مقاومت دیوارها به دست آورد. بدین منظور در ادامه این بحث مدل تحلیلی یک دیوار آجری غیر مسلح در حالت‌های مختلف (با بازشو و بدون بازشو) مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعد مدل‌های تقویت شده متناظر این دیوار نیز ساخته شد و نتایج پس از تحلیل با هم مقایسه شدند.

دیوار آجری انتخابی به طول ۳m و ارتفاع ۲m و ضخامت ۲۲cm است. برای اعمال بار قائم و جانبی به دیوار تیر بارگذاری

محدوده پلاستیک رفتار دیوار ترسیم شده است). جابه‌جایی افقی در آزمون و تحلیل قبل از وقوع ترک کم بوده که پس از وقوع ترک به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد (در هر دو مورد حدود ۵ mm)، همچنین میزان جابه‌جایی نهایی در هر دو مورد حدود ۱۵ mm است. همچنین بار وقوع ترک در دو مورد حدود ۶۰KN و بار نهایی حدود ۷۰KN است.

۲- در شکل (۸) تطابق منحنی هیستریزس تحلیلی و آزمایشگاهی را می‌توان ملاحظه کرد.

۳- مکانیزم وقوع ترکها و گسترش آنها در مدل و آزمون شبیه یکدیگر بوده و منشا ترکها در هر دو خمشی است. شکل (۵) ترک خوردگی دیوار در اثر بار ۶۰ KN را نشان می‌دهد که (دایره‌های قرمز رنگ در شکل نشان دهنده ترکها در جهت اصلی ۱ هستند) [۳]. کانتور جابه‌جایی قائم دیوار نیز در شکل (۶) آورده شده است.

جدول ۱- مقاومت حد ترک و گسیختگی نهایی در مدلها

دیوار آجری	وضعیت	بار جانبی در لحظه ترک اول	مقاومت نهایی	نسبت مقاومت حد نهایی به مقاومت ترک خوردگی
بدون بازشو	بدون تقویت	رفت ۵۸ KN	رفت ۷۲ KN	۱/۲
	تقویت شده میزان افزایش	رفت ۱۰۸ KN ۱/۹	رفت ۳۰۵ KN ۴/۲	۲/۸
بازشو به شکل پنجره	بدون تقویت	رفت ۴۲/۵ KN	رفت ۶۷ KN	۱/۶
	تقویت شده میزان افزایش	رفت ۶۴ KN ۱/۵	۲۰۰ KN برگشت ۳/۰	۱/۳
باز شو به شکل در	بدون تقویت	رفت ۴۲/۵ KN	رفت ۵۷ KN	۱/۳
	تقویت شده میزان افزایش	رفت ۷۰ KN ۱/۵	۲۰۰ KN برگشت ۳/۵	۲/۶

المانهای بنایی به خوبی متصل شده‌اند به گونه‌ای که در اثر اعمال بار جانبی و قائم، روکش از دیوار جدا نشده و کمانش نمی‌کند و کل مقطع به صورت یکپارچه عمل می‌کند. ضمناً فرض شد که آرماتورهای قائم روکش داخل فونداسیون ادامه یافته‌اند به گونه‌ای که طول مهاری مناسب آرماتورهای قائم تامین شده و این آرماتورها در پای دیوار می‌توانند به ظرفیت پلاستیک کامل خود برسند.

بار جانبی نیز مشابه حالت قبل به گره‌های جانبی تیر بارگذاری به صورت رفت و برگشتی اعمال شد. مقدار بار جانبی از مقدار حداقل که باعث وقوع اولین ترک در دیوار شود آغاز شد و تا مقداری که باعث گسیختگی کامل دیوارها شود (بسته به مقاومت هر دیوار) به صورت مرحله‌ای افزایش یافت.

#### ۵- بررسی تأثیر روکش در مقاومت و رفتار دیوار آجری

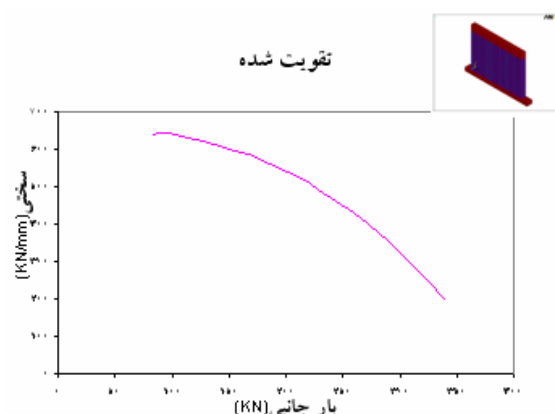
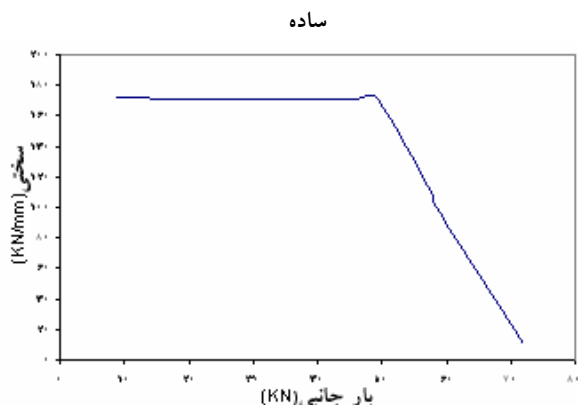
نتایج تحلیل نشان می‌دهد اضافه شدن روکش تأثیرات مهمی در مقاومت و سختی دیوارها دارد که به‌طور مختصر می‌توان موارد زیر را جمع بندی کرد:

#### ۵-۱- ترک خوردگی و مقاومت نهایی

دیوارهای تقویت شده در مقایسه با دیوارهای ساده در بار جانبی بالاتری ترک خورده اولین ترکها نیز در المانهای شاتکریت ظاهر شدند. جدول (۱) نشان دهنده مقاومت حد الاستیک (ترک) و مقاومت در لحظه گسیختگی است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در اثر اعمال روکش میزان مقاومت

به مقطع  $22 \times 30 \text{ cm}$  در بالای دیوار مدلسازی شد. بار قائم وارد به دیوار نیز برابر  $24/5 \text{ KN/m}$  در نظر گرفته شد. برای بررسی اثر بازشو در دیوار آجری و همچنین تأثیر تقویت دیوار در این حالت، مدل دیوار با بازشو نیز مورد بررسی قرار گرفت. در مورد اول بازشو به صورت پنجره و به ابعاد  $110 \times 80 \text{ cm}$  و در مرحله بعد دیوار آجری با بازشو به صورت درب به ابعاد  $90 \times 140 \text{ cm}$  در بخش میانی دیوار به صورت متقارن در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه وجود بازشو باعث ایجاد ترک و تغییر شکلهای زیاد دیوار در محل بازشو به علت بار قائم خواهد شد لذا تیر نعل درگاهی بتنی در بالای پنجره و درب مدلسازی شد.

در مرحله بعد دیوار آجری تقویت شده مدلسازی شد. با توجه به اینکه شاتکریت به همراه مش روی دیوار در حقیقت بتن مسلح ایجاد می‌کنند لذا المان استفاده شده برای مدلسازی شاتکریت نیز المان SOLID65 است. المانهای شاتکریت در مقایسه با المانهای بنایی، صلبیت همچنین مقاومت کششی و فشاری بالاتری دارند. المانهای روکش در دو طرف دیوار و به ضخامت  $5 \text{ cm}$  در هر طرف منظور شد. شبکه آرماتور مصرفی در بتن تقویت دیوار به صورت آرماتورهای به قطر  $8 \text{ mm}$  در فواصل  $10 \text{ cm}$  در نظر گرفته شد ( $\Phi 8 @ 10 \text{ cm}$ ). مقدار آرماتور به صورت درصد حجمی به المان SOLID65 داده می‌شود، لذا درصد آرماتور المانهای شاتکریت برابر (۱٪) به دست می‌آید که در جهت افقی و قائم اعمال شد. در مدلسازی شاتکریت فرض می‌شود که المانهای بتن به



شکل ۹- مقایسه منحنی تغییرات سختی دیوارهای تقویت شده و تقویت نشده با بار جانبی [۴]

شده به صورت گرماسست و به هر میزان که منحنی هیستریزس چاق تر باشد این انرژی تلف شده بیشتر خواهد بود [۲]. لذا برای بررسی میزان جذب انرژی دیوار روکش شده و دیوار بدون روکش، منحنی هیستریزس دیوارها ترسیم شده است (شکل ۹).

همان طور که ملاحظه می شود در دیوار آجری ساده میزان جذب انرژی در محدوده رفتار الاستیک بسیار کم و برابر صفر است. بعد از ترک خوردگی سطح زیر منحنی به یکباره افزایش یافته که نشانگر جذب و اتلاف انرژی زیاد است اما باید توجه کرد که روند جذب انرژی بالا تنها در یک یا دو سیکل ادامه می یابد و در سیکلهای بعدی متوقف می شود.

در مدل تقویت شده اگرچه دیوار پس از به وجود آمدن ترکها و وقوع تغییر شکل پلاستیک ظرفیت باربری خود را از دست نداده و می تواند بار جانبی تا بیش از دو برابر مقاومت حد ترک خوردگی را تحمل کند، لیکن میزان تغییر شکل جانبی و در نتیجه شکل پذیری دیوار به علت بالا بودن سختی و ترد بودن رفتار دیوار روکش شده کم است. همان گونه که در شکل (۱۰) ملاحظه می شود سطح زیر منحنیهای هیستریزس دیوار آجری تقویت شده بسیار کم بوده که نشان دهنده ظرفیت اتلاف انرژی پایین آن است.

علت کم بودن میزان شکل پذیری و جذب انرژی دیوار درصد نسبتا بالای آرماتور انتخابی برای المانهای شاکریت (۱٪) است. از آنجایی که شکل پذیری بتن کم بوده و ماده ای ترد محسوب می شود در مقاطع بتن مسلح، آرماتورهای فولادی

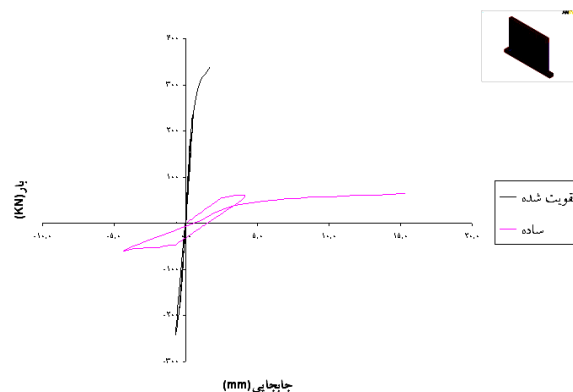
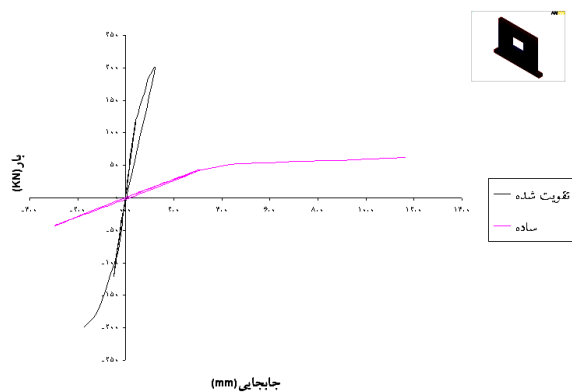
حد ترک ۱/۵ تا ۱/۹ برابر و مقاومت نهایی ۳ تا ۴/۲ برابر می شود. همچنین ستون انتهایی جدول (۱) نشان دهنده نسبت مقاومت در حد نهایی به مقاومت ترک خوردگی است. ملاحظه می شود که نسبت مقاومت حد نهایی به مقاومت حد الاستیک در دیوارهای تقویت شده نسبت به دیوارهای ساده تا ۳ برابر بیشتر است. این مطلب بدین معناست که دیوارهای روکش شده پس از ترک خوردگی و تغییر شکلهای پلاستیک ظرفیت باربری خود را از دست نمی دهند یا به عبارت دیگر همانند دیوارهای تقویت نشده وقوع ترک مساوی با انهدام کامل دیوار نیست.

#### ۵-۲- سختی

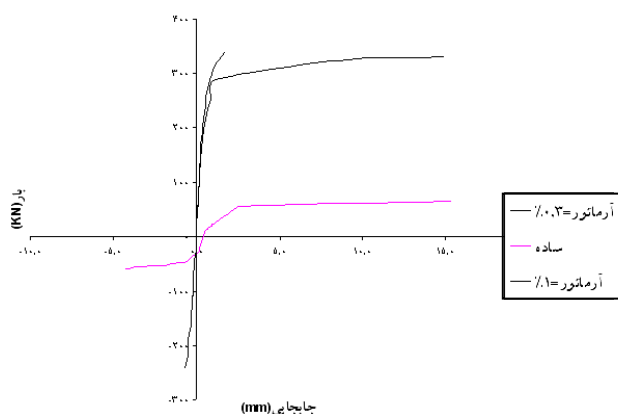
در اثر اعمال روکش سختی دیوار به طور مشخصی افزایش می یابد. شکل (۹) تغییرات سختی دیوار آجری تقویت شده و بدون تقویت را با بار جانبی نشان می دهند. با ایجاد روکش سختی جانبی دیوار تقریبا تا ۶ برابر افزایش یافت. نکته دیگر تغییرات سختی با بار جانبی است همان طور که ملاحظه می شود دیوار آجری بدون تقویت بلافاصله پس از به وجود آمدن ترک و تغییر شکلهای پلاستیک سختی خود را از دست می دهد (منحنی با شیب تندی سقوط می کند). لیکن در نمونه تقویت شده شیب منحنی ملایمتر بوده و سختی با روند کندتری کاهش می یابد.

#### ۵-۳- منحنی هیستریزس

سطح زیر منحنی هیستریزس نشان دهنده مقدار انرژی تلف



شکل ۱۰- مقایسه منحنی هیستریزس دیوارهای آجری تقویت شده و تقویت نشده [۴]



شکل ۱۱- پوش منحنیهای هیستریزس [۴]

الف) دیوار بدون روکش

ب) دیوار با روکش و درصد آرماتور ۱٪

پ) دیوار با روکش و درصد آرماتور ۰.۳٪

بدون بازشو با درصد آرماتورهای افقی و قائم برابر (۰.۳٪) تحلیل شد. در این حالت آرماتورهای کششی به حد تسلیم خود رسیده و تغییر مکان نهایی انتهای دیوار در لحظه قبل گسیختگی برابر ۸mm به دست آمد. شکل (۱۱) پوش منحنی هیستریزس دیوار در این حالت را در مقایسه با دیوار بدون روکش و دیوار روکش شده با درصد آرماتور ۱ درصد نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود کاهش میزان آرماتورها به (۰.۳٪) نه تنها مقاومت دیوار را کاهش نمی‌دهد بلکه باعث می‌شود میزان تغییر شکل‌های نهایی چند برابر شده و سطح زیر منحنی هیستریزس افزایش یابد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که به منظور عملکرد شکل پذیر دیوار تقویت شده باید درصد آرماتور المانهای شاتکریت را کاهش داد به گونه‌ای که در اثر اعمال بار جانبی رفت و برگشتی به حد تسلیم خود برسند.

علاوه بر فراهم نمودن مقاومت کششی، عامل اصلی افزایش شکل پذیری نیز محسوب می‌گردند زیرا آرماتورها در کشش تسلیم شده و قبل از رسیدن به حد گسیختگی تغییر شکل‌های زیاد تحمل می‌کنند. بالا رفتن درصد آرماتور در مقاطع بتنی باعث می‌شود تا آرماتورها که عامل اصلی شکل پذیری در مقاطع بتن مسلح‌اند در مقاومت گسیختگی بتن به حد تسلیم خود نرسیده و لذا مقطع به صورت ترد دچار شکست شود. با بررسی جدول خروجی المان میزان تنش آرماتورها را می‌توان به دست آورد. ملاحظه شد که در دیوارهای آجری روکش شده میزان تنش حداکثر آرماتورهای قائم در المانهای روکش به  $0/6F_y$  و کمتر محدود می‌شود و آرماتورها هنوز به تنش تسلیم نهایی خود نرسیده‌اند. لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که درصد آرماتور انتخابی ۱٪ در المانهای روکش زیاد است. برای بررسی این مورد، مدل دیوار آجری تقویت شده



## ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق نتایج ذیل پس از بررسی تحلیلیها و محاسبات و نمودارها به دست آمده است:

- ۱- ایجاد روکش بتنی مسلح در دیوار آجری تحلیل شده مقاومت حد الاستیک را به طور متوسط  $1/6$  برابر و مقاومت حد نهایی را  $3$  تا  $4/2$  برابر افزایش داد.
- ۲- دیوار آجری روکش دار برخلاف دیوارهای آجری ساده بعد از وقوع ترک مقاومت خود را از دست نداده و تا  $3$  برابر نیروی حد ترک خوردگی بار تحمل کرد.
- ۳- سختی دیوار روکش دار  $6$  برابر نسبت به دیوار بدون

روکش بیشتر شد.

۴- روند کاهش سختی در دیوار روکش دار نسبت به دیوار بدون روکش کندتر است.

۵- میزان آرماتور روکش بتنی نقش تعیین کننده ای در شکل پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی دیوارهای تقویت شده دارد. برای افزایش میزان شکل پذیری و جذب انرژی باید میزان آرماتور در المانهای روکش محدود شود. پیشنهاد می شود درصد آرماتور حداقل توصیه شده برای مقاطع خمشی ( $14/Fy$ ) در روکشهای بتنی قرار داده شود.

## مراجع

1. SAS IP Inc.; ANSYS Theory Manual; Edited by kohnke, Peter; 8th edition; 1997.
۲. تسنیمی، ع، بررسی تجربی روشهای مقاوم سازی ساختمانهای آجری نیم اسکلت در بابر زلزله (گزارش مرحله اول)؛ ج، ۱، تهران: کمیته فرعی-تخصصی مقابله با خطرات ناشی از زلزله و لغزش لایه های زمین، ۱۳۸۰.
3. SAS IP Inc.; ANSYS Element Manual, 9th Edition; 1997
۴. قدس، س، "مقاوم سازی دیوارهای آجری تقویت شده با شبکه آرماتور و شاتکریت"، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد سازه، تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران، زمستان ۱۳۸۲. زیر نظر دکتر فریبرز ناطقی الهی.