

## ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES FOR DEVELOPMENT OF CAPACITY CURVE IN A CONFINED MASONRY WALL

Khshaiar Pourazin,

Sassan Eshghi,

Ph.D., International Institute of Earthquake  
Engineering and Seismology, Tehran, Iran.  
pourazin@iiees.ac.ir

Assistant Professor, International Institute of Earthquake  
Engineering and Seismology. s.eshghi@iiees.ac.ir

**Abstract:** In accordance with some codes of practice for seismic resistant design of buildings (e.g. Iranian Standard No. 2800 – 3<sup>rd</sup> edition), bond-beams and tie-columns must be used in all load carrying walls of unreinforced masonry buildings. Building integrity and behavior of structural components such as walls can be improved by anchoring the floors and roof to the walls and by confining the walls. Capacity curves of such load carrying walls in seismic prone areas of Iran should be determined. For this purpose, two identical specimens of confined masonry walls have been made and experimental work on them have been carried out under static monotonic lateral loading. After gathering the experimental data, the same wall has been modeled by finite element analysis. In the model, the masonry panel has been assumed to be continuum and studied by multisurface plasticity Rankine-Hill model with low orthotropic factor. Since the reinforced concrete (RC) bond-beams and tie-columns may be cracked, the Rankine yield surface is used in their modeling. Sliding, cracking, and gap opening at the interface between the masonry panel and the surrounding bond-beams and tie-columns has been modeled too. Based on the experimental and numerical results, the obtained crack pattern and capacity curves are compared and good agreement is found.

## مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی برای توسعه منحنی ظرفیت در دیوارهای آجری کلافدار

خشایار پورآذین و ساسان عشقی

**چکیده:** بر اساس مقررات فصل سوم آئین نامه ۲۸۰۰ (ویرایش ۳) در تمام دیوارهای سازه ای ساختمان های با مصالح بنائی باید از کلافهای افقی و قائم استفاده شود و این موضوع درمورد کلیه مناطق با خطرهای نسبی مختلف کاربرد دارد. رفتار ساختمان های بنائی حین بروز زلزله به سه عامل مقاومت، سختی و شکل پذیری اجزاء سازه ای به صورت مجزا از یک سو و پیوند بین آن اجزاء از سوی دیگر بستگی پیدا می کند. بنابراین جهت بهبود رفتار چنین ساختمان هایی حین بروز زلزله لازم است تقویت ساختمان از دو دیدگاه متفاوت انجام گردد. با استفاده از کلافهای افقی و قائم بهبود انسجام و یکپارچگی کلی ساختمان نظیر اتصال دیوارها با هم و اتصال سقف با دیوارها از یک سو و تقویت اجزاء سازه ای ساختمانهای بنائی نظیر دیوارهای باربر امکانپذیر می باشد. اما منحنی ظرفیت برای چنین دیوارهایی با هدف استفاده در تحلیل بار افزون همچنان مورد نیاز می باشد. برای این منظور ۲ نمونه دیوار آجری کلافدار در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله ساخته شده و مورد آزمایش استاتیکی یکنواخت قرار می گیرند. از طرف دیگر با استفاده از نرم افزار DIANA تحلیل استاتیکی غیر خطی دیوار آجری کلافدار ساخته شده انجام می گردد. برای مدلسازی

تاریخ وصول: ۸۵/۲/۱۰

تاریخ تصویب: ۸۸/۲/۷

خشایار پورآذین، دکترای مهندسی عمران و مهندسی زلزله، pourazin@iiees.ac.ir

دکتر ساسان عشقی، استادیار پژوهشگاه سازه پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، s.eshghi@iiees.ac.ir

دیوار آجری از مدل تنش مسطح برای مصالح نیمه شکننده ارتوتروپیک استفاده می شود. رفتار مصالح ارتوتروپیک با استفاده از معیار هیل در فشار و معیار رانکین در کشش مدلسازی می گردد. همچنین برای حد فاصل بین دیوار آجری و اعضای بتن مسلح افقی و قائم از المان حد فاصل که در مدلسازی میکرو به کار می رود استفاده می شود. به علاوه از معیار گسیختگی رانکین برای مدلسازی کلاف های افقی و قائم استفاده میگردد. بخشی از پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل استاتیکی غیر خطی دیوار آجری کلافدار در آزمایشگاه سازه تعیین می گردند و بخش دیگری از آنها به روش تحلیلی محاسبه می شوند. بر اساس نتایج بدست آمده، منحنیهای ظرفیت و نواحی ترک خورده که از روش تحلیلی و روش آزمایشگاهی به دست آمدند با یکدیگر مقایسه می شوند.

### واژگان کلیدی: منحنی ظرفیت، الگوی ترک خوردگی، مدلسازی ماکرو، مدلسازی المان حد فاصل

پذیری مورد انتظار بیشتر از ساختمانهای مشابه ولی فاقد سیستم کلاف بندی می باشد. از طرف دیگر بیشتر ساختمانهای آسیب دیده بر اثر زلزله های اخیر از نوع بنائی غیر مسلح بوده که برخی از آنها دارای کلافهای افقی و قائم مطابق استاندارد ۲۸۰۰ می باشند. یک نمونه از چنین ساختمانهایی که در زلزله درب آستانه (سیلاخور، ۸۵/۱/۱۱) آسیب دیده است در شکل ۱ نشان داده شده است.

#### ۱. مقدمه

ساختمانهای بنائی غیر مسلح (URM) حداکثر تا دو طبقه (بدون احتساب یک طبقه زیر زمین) در مناطق شهری و روستائی به دلیل سادگی ساخت و در دسترس بودن مصالح مورد استفاده هستند. در این ساختمانها که بیشتر با کاربری مسکونی، آموزشی، امداد رسانی و غیره کاربرد دارند از کلافهای افقی و قائم مطابق استاندارد ۲۸۰۰ استفاده می شود. در این قبیل ساختمانها مقاومت، سختی و شکل



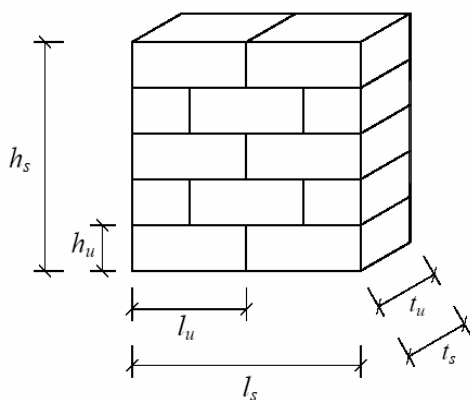
شکل ۱. ترک خوردگی مایل در دیوار یک ساختمان آجری کلافدار (زلزله سیلاخور)

برای ساخت چنین ساختمانهایی استفاده کرد. بدیهی است در چنین شرایطی روش ارائه شده در آئین نامه لرزه ای برای طراحی کافی به نظر نمی رسد. از طرف دیگر در روشهای طراحی لرزه ای موجود که در آئین نامه های سایر کشورها ارائه گردیده است تمایل به استفاده از روش طراحی بر اساس عملکرد افزایش یافته است. اولین گام در این روش استفاده از منحنی ظرفیت ساختمان است که بر اساس آن نقطه عملکرد یا تغییر مکان هدف در ساختمان تعیین می گردد.

توجه به این نکته ضروری است که بخشی از آسیبهای وارد بر ساختمان های آجری کلافدار در زلزله های گذشته ناشی از فقدان توصیه های اجرائی مناسب برای مناطق با خطر نسبی زیاد و نیز عدم تمایل به استفاده از روشهای تحلیلی مناسب برای این قبیل ساختمانها در آئین نامه طراحی لرزه ای می باشد. مطابق روش ارائه شده در آئین نامه زلزله ایران، سطح عملکرد و میزان آسیب پذیری لرزه ای چنین ساختمانهایی قابل تعیین نبوده و فقط می توان از آن

پژوهشگاه قادر به اعمال بار فشاری تا حد 720 kN بر نمونه‌ها می‌باشد و نمونه آجری مورد آزمایش در صورتی که با آجر کامل ساخته شود قادر به تحمل بار فشاری بیش از این مقدار می‌باشد لذا تصمیم گرفته شد که ابتدا هر یک از آجرهای کامل به وسیله دستگاه فرز به چهار قطعه مساوی تقسیم شده و سپس هر یک از قطعات به صورت یک آجر کامل در ساخت نمونه آجری مورد استفاده قرار گیرند.

به این ترتیب سطح نمونه که تحت تاثیر تنش فشاری قرار می‌گیرد به ۲۵ درصد سطحی که از ساخت نمونه با آجر کامل حاصل می‌شود کاهش می‌یابد. بنابراین نمونه‌های آجری طوری ساخته می‌شوند که اولاً جدول ۱ در مورد آنها صدق کند و ثانیاً طول و عرض نمونه‌ها کوچکتر از مقدار واقعی باشند. بدلیل محدودیت ارتفاع نمونه‌های آجری مطابق جدول ۱، در ساخت نمونه‌ها از آجرهای مقیاس شده استفاده نمی‌شود. از طرف دیگر با چهار قسمت شدن هر آجر، جهت قرار گرفتن آن در نمونه‌های ساخته شده منطبق بر جهت واقعی می‌باشد.



شکل ۲. ابعاد واحد آجر (اندیس II) و ابعاد نمونه آزمایشگاهی (اندیس S)

در مقاله حاضر، با استفاده از تحلیل استاتیکی غیر خطی یک دیوار آجری کلافدار که در آزمایشگاه ساخته شده است سعی گردید تا الگوی ترک خوردگی، توزیع تنشهای اصلی ماکزیمم و مینیمم و منحنی ظرفیت آن به دست آمده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شود. برای این کار از نرم افزار DIANA (Version 9.2) استفاده گردید. محدوده کاربرد چنین تحلیلی رفتار داخل صفحه دیوار آجری کلافدار است. اما در عمل ترکیبی از رفتار داخل صفحه و رفتار خارج از صفحه دیوار باید در نظر گرفته شود زیرا زلزله چند مولفه ای است [۱۴-۱۵]. اما اگر سقف ساختمان دیافراگم صلب باشد تغییر مکان داخل صفحه دیوارها بر طراحی لرزه ای آنها حاکم خواهد بود.

### ۳. برنامه مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای مدلسازی ماکروی دیوار آجری

برای تعیین پارامترهای مورد نیاز در مدلسازی ماکروی دیوار آجری، نمونه‌هایی مشتمل بر ۳ نمونه آجری در فشار و ۳ نمونه آجری در کشش در آزمایشگاه ساخته شده و تحت آزمایش تک محوره توسط دستگاه یونیورسال قرار گرفتند.

#### ۱-۳. ساخت نمونه‌های آجری در آزمایش فشاری و نتایج آزمایش

سه نمونه آجری برای آزمایش فشاری تک محوره ساخته شدند. این نمونه‌ها مطابق استاندارد یوروکد ۶ (Eurocode 6) بخش EN 1052-1 تحت عنوان ((تعیین مقاومت فشاری)) ساخته می‌شوند. کلیه ابعادی که در ساخت قطعات مزبور مورد استفاده بوده است بر اساس اندازه‌هایی است که در استاندارد فوق پیشنهاد شده و در شکل ۲ و جدول ۱ به صورت خلاصه شده ارائه گردیده اند (اندازه‌های نمونه‌های ساخته شده بر اساس سطر اول جدول ۱ می‌باشند). به دلیل آن که دستگاه یونیورسال در آزمایشگاه سازه

جدول ۱. روابط موجود بین ابعاد واحد آجر و ابعاد نمونه آزمایشگاهی [۹]

| ابعاد نمونه آزمایشگاهی |                                           |               | ابعاد واحد آجر |            |
|------------------------|-------------------------------------------|---------------|----------------|------------|
| $t_s$ (mm)             | $h_s$ (mm)                                | $l_s$ (mm)    | $h_u$ (mm)     | $l_u$ (mm) |
| $t_u \geq$             | $3t_s \geq$<br>$15t_s \leq$<br>$l_s \geq$ | $5h_u \geq$   | $150 \leq$     | $300 \leq$ |
|                        |                                           | $3h_u \geq$   | $150 >$        |            |
|                        |                                           | $5h_u \geq$   | $150 \leq$     | $300 >$    |
|                        |                                           | $3h_u \geq$   | $150 >$        |            |
|                        |                                           | $2l_u \geq$   |                |            |
|                        |                                           | $1.5l_u \geq$ |                |            |

گرفت. برای ساختن این نوع ملات لازم است نسبت اختلاط حجمی سیمان به ماسه برابر ۱ به ۴ بوده و قبل از تهیه ملات باید ماسه و سیمان را به صورت کاملاً خشک داخل یک استانبولی با هم مخلوط

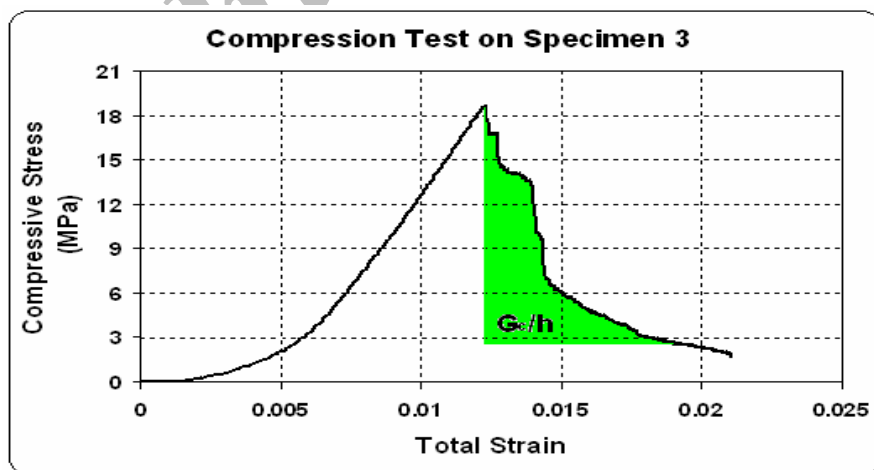
پیش از ساخت نمونه آجری لازم است ملات مورد نیاز مطابق مشخصات فنی عمومی راه تهیه گردد. نسبت اختلاط پیشنهاد شده در این مشخصات برای ساختن ملات تیپ II مورد استفاده قرار



شکل ۳. نحوه ترک خوردگی و گسترش شکست در نمونه شماره ۳ در زمان انتهای آزمایش

آزمایش ها بر روی نمونه های آجری در شرایط کنترل شونده توسط جابجائی انجام شدند و جابجائی های ایجاد شده توسط LVDT موجود بر روی دستگاه یونیورسال ثبت گردید. در شکل ۴ نمودار رفتار فشاری نمونه شماره ۳ نشان داده شده است. پارامترهای مورد نیاز برای رفتار پلاستیک این نمونه ها شامل مقاومت فشاری و انرژی شکست فشاری می باشند. این پارامترها که در مدلسازی ماکروی دیوار آجری مورد استفاده قرار می گیرند به همراه پارامترهای الاستیک، جزو خصوصیات فشاری مصالح طبقه بندی می شوند.

نمود تا مخلوط یکنواختی حاصل شود. سپس به تدریج آب به آن اضافه نمود و مخلوط را به هم آمیخت تا طرح تقریبی اختلاط ماسه، سیمان و آب رعایت گردد. در این آزمایش به دلیل نیاز به حضور کلاهک فشاری در بالا و پائین نمونه ها از ملات لیسسه ای با نسبت اختلاط دو حجم ماسه الک شده در مقابل یک حجم سیمان به عنوان کلاهک فشاری استفاده گردید. ماسه الک شده به دلیل داشتن خاک، پیش از استفاده در ساخت ملات لیسسه ای با آب تمیز شستشو داده می شود. پس از ساخت ملات لیسسه ای یک لایه از آن به ضخامت ۱۰ میلیمتر بر روی نایلون قرار گرفته و روی آن رگ اول آجر چیده می شود. کلیه قطعات آجر که در ساخت این نمونه ها مورد استفاده قرار می گیرند خیس شده تا رطوبت ملات را به خود جذب نکنند. پس از چیده شدن رگ اول آجر با استفاده از تراز از افقی بودن این رگ در دو جهت اطمینان حاصل می شود و این عمل در رگهای دیگر نیز تکرار می شود. برای ساخت ملات ماسه سیمان که در بین رگهای آجر چینی و نیز در درزهای قائم بین آجرها (هرزه ملات) مصرف می شود از ملات تیپ II استفاده می گردد. ضخامت نمونه های آجری ساخته شده نصف ضخامت دیوار یک آجره (دیوار ۲۲ سانتیمتری) می باشد. آزمایش فشاری تک محوره بر روی نمونه های آجری به ابعاد  $115 \times 235 \times 402 \text{ mm}^3$ ،  $110 \times 245 \times 385 \text{ mm}^3$  و  $113 \times 243 \times 376 \text{ mm}^3$  انجام گردید. این نمونه ها از دو انتها برای تغییر مکان جانبی آزاد بوده و هدف از قرار دادن کلاهک فشاری در طرفین آنها کاهش میزان تنشهای اصطکاکی محدود کننده حرکت جانبی و اعمال تنش یکنواخت بر نمونه ها می باشد. نحوه ترک خوردگی و گسترش شکست فشاری در نمونه شماره ۳ پس از اتمام آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۴. نتیجه آزمایش فشاری بر روی نمونه آجری شماره ۳

مراحل ساخت این نمونه ها نظیر مراحل ساخت نمونه های آجری در آزمایش فشاری می باشد با این تفاوت که در دو طرف نمونه ها نیاز به کلاهک فشاری وجود ندارد. برای اعمال یکنواخت نیروی کششی بر نمونه های آجری باید صفحات فولادی را در بالا و پائین

۲-۳. ساخت نمونه های آجری در آزمایش کششی و نتایج آزمایش

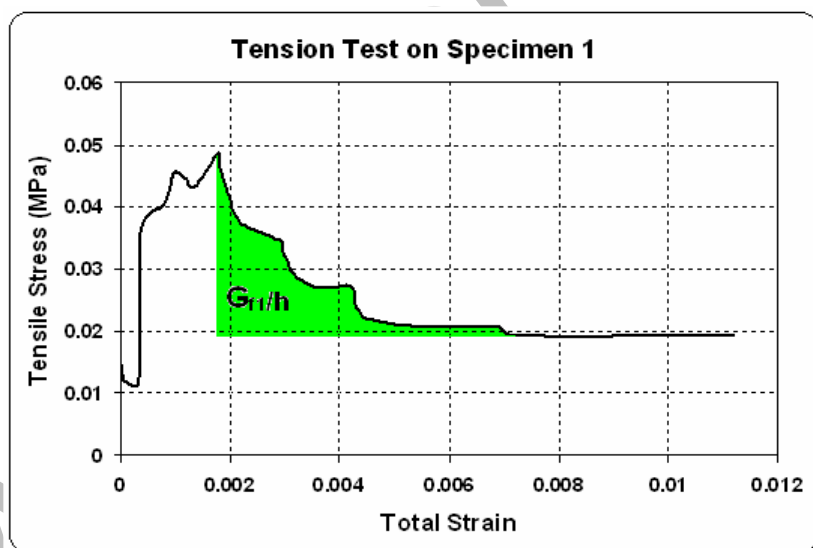
برای انجام آزمایش کششی تک محوره، سه نمونه آجری با ابعادی مشابه ابعاد نمونه های آجری در آزمایش فشاری ساخته شدند.



شکل ۵. نحوه ترک خوردگی در نمونه شماره ۱ در زمان انتهای آزمایش

نمونه آجری بوسیله چسب به آن متصل نمود. برای انجام این کار از چسب بتن سیکادور (Sikadur-32) استفاده گردید که مطابق کاتالوگ سازنده دارای مقاومت کششی حدود ۱۸ تا ۲۰ مگاپاسکال می باشد.

آزمایش کششی تک محوره بر روی نمونه های آجری به ابعاد  $108 \times 230 \times 357 \text{mm}^3$  و  $105 \times 225 \times 361 \text{mm}^3$  انجام گردید. در شکل ۵ نحوه ترک خوردگی و جدا شدن نمونه شماره ۱ از محل اتصال رگ اول آجر چینی و بند افقی روی آن پس از اتمام آزمایش نشان داده شده است. آزمایشها بر روی نمونه های آجری در شرایط کنترل شونده توسط جایجائی انجام گردیدند و جایجائی ایجاد شده توسط LVDT موجود بر روی دستگاه یونیورسال ثبت شد. سرعت بارگذاری بر روی کلیه نمونه ها نظیر آزمایش فشاری ۰/۰۱ میلیمتر بر ثانیه بوده است. در شکل ۶ نمودار رفتار کششی نمونه شماره ۱ نشان داده شده است. پارامترهای مورد نیاز برای رفتار پلاستیک این نمونه ها شامل مقاومت کششی و انرژی شکست کششی می باشند. این پارامترها که برای مدلسازی ماکروی دیوار آجری مورد استفاده قرار می گیرند، جزو خصوصیات کششی مصالح طبقه بندی می شوند.



شکل ۶. نتیجه آزمایش کششی بر روی نمونه آجری شماره یک

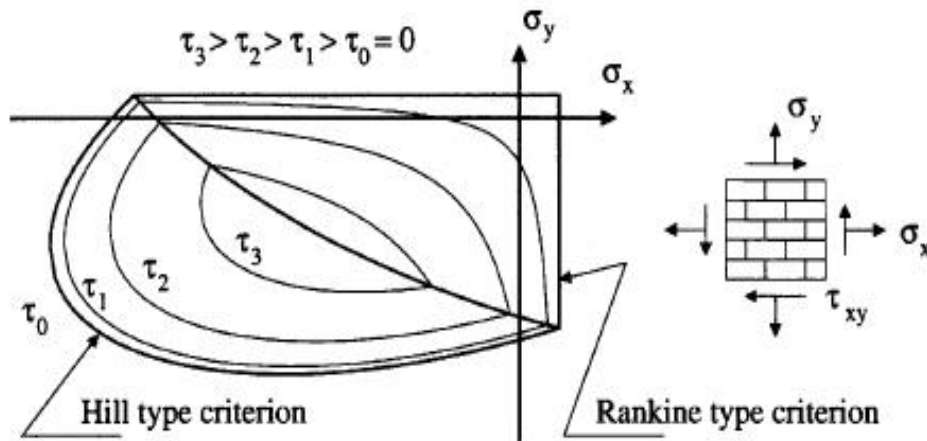
شونده فشاری و رفتار نرم شونده کششی در راستای هر یک از محورهای ماده است. این معیار برای مدلسازی مصالح غیر همسان تحت تنش داخل صفحه مناسب است که در آن از فرمولاسیون مصالح نیمه شکننده همسان برای بیان رفتار محوری استفاده می شود. یک مدل ماکروی کامل باید شامل ماده ای غیر همسان باشد که در آن مقاومت کششی و فشاری تابع راستای اعمال بار بوده و بتوان خواص پلاستیک متفاوتی را در راستای محورهای ماده در نظر گرفت. در این مدلسازی معیارهای تسلیم جداگانه ای برای کشش و فشار که بیان کننده مکانیزم های گسیختگی متفاوت است ارائه می

#### ۴. نحوه مدلسازی ماکروی دیوار آجری

یک تحلیل دقیق از سازه های بنائی به روش ماکرو مستلزم تعیین تمام حالات تنش در ماده مورد بحث می باشد. مشکلات از آنجا به وجود می آیند که غالباً نتایج آزمایشگاهی در این زمینه کمتر در دسترس بوده و فرمولاسیون رفتار غیر الاستیک غیر همسان غالباً پیچیده می باشد. معیار تسلیم که در این مقاله مورد استفاده قرار می گیرد نخستین بار توسط لورنسو [۱۰] ارائه گردید و متشکل از مفهوم پلاستیسیته مدرن به همراه ابزاری توانمند جهت نشان دادن رفتار غیر همسان ماده می باشد که شامل رفتار سخت شونده / نرم

هیل (Hill - type criterion) برای فشار و از معیار نوع رانکین (Rankine - type criterion) برای کشش استفاده می‌شود (شکل ۷).

شود. معیار تسلیم برای کشش بر مبنای ایجاد ترک در ماده می‌باشد حال آن که معیار تسلیم برای فشار بر مبنای ایجاد له شدگی در ماده است. جهت نشان دادن نحوه رفتار محوری ماده از معیار نوع



شکل ۷. سطوح تسلیم برای دیوار آجری تحت تنش داخل صفحه

با نتایج حاصل از نمونه های مشابه ساخته شده در آزمایشگاه هماهنگی خوبی را نشان دهد می‌توان به میزان صحت فرض رفتار ارتوتروپیک کم پی برد. لذا برنامه انجام آزمایش‌ها طوری تنظیم شد که بتوان از آنها اولاً پارامترهای مصالح ارتوتروپیک کم را برای انجام تحلیلهای دو بعدی برآورد نمود و ثانیاً با استفاده از این پارامترها، امکان معرفی آنها به نرم افزار جهت تحلیل‌های مقایسه ای نیز وجود داشته باشد. بنابر این می‌توان از پارامترهای موجود در جدولهای ۲، ۳ و ۴ برای معرفی رفتار دیوار آجری در مدل ساخته شده استفاده نمود:

جدول ۲. پارامترهای الاستیک مورد نیاز برای مدلسازی

| ماکرووی دیوار آجری |       |
|--------------------|-------|
| $E(MPa)$           | $\nu$ |
| ۲۵۰۰               | ۰/۱۱۵ |

در این مطالعات از فرض ساده کننده‌ای استفاده شد و آن مربوط به درجه رفتار غیر همسان دیوار آجری می‌باشد. با توجه به این که در مطالعات آزمایشگاهی مطابق میث هشتم مقررات ملی ساختمانی [۲] کلیه درزهای افقی و قائم نمونه های دیوار آجری و نمونه های دیوار آجری کلافدار به وسیله ملات پر گردیده است می‌توان فرض نمود که درجه رفتار غیر همسان دیوار آجری به کمترین میزان کاهش یافته است. از طرف دیگر طی مطالعات آزمایشگاهی که توسط پیچ [۱۲-۱۳] بر روی نمونه های آجری ساخته شده از آجر رسی توپر انجام گردید (Solid clay brick) نشان داده شد که

نسبتهای  $\frac{f_{mx}}{f_{my}}$  و  $\frac{f_{tx}}{f_{ty}}$  به عدد واحد بسیار نزدیک هستند و این

موضوع می‌تواند نشانگر میزان رفتار غیر همسان نمونه های دیوار آجری باشد که با شرایط مشابهی ساخته شده اند.

به ترتیب مقاومت فشاری و کششی در راستای محورهای  $x$  و  $y$  هستند. همچنین اگر نتایج تحلیل استاتیکی غیر خطی دیوار آجری کلافداری که با این فرض ساده کننده مدل شده است

جدول ۳. پارامترهای غیر الاستیک مورد نیاز برای مدلسازی ماکرووی دیوار آجری (کشش حاکم است)

| $G_{fy} (Nmm/mm^2)$ | $G_{fx} (Nmm/mm^2)$ | $\alpha$ | $f_{ty} (MPa)$ | $f_{tx} (MPa)$ |
|---------------------|---------------------|----------|----------------|----------------|
| ۰/۰۱۵۷۵             | ۰/۰۱۵۷۵             | ۱/۰۰     | ۰/۱۴۶۱۸        | ۰/۱۴۶۱۸        |

جدول ۴. پارامترهای غیر الاستیک مورد نیاز برای مدلسازی ماکرووی دیوار آجری (فشارحاکم است)

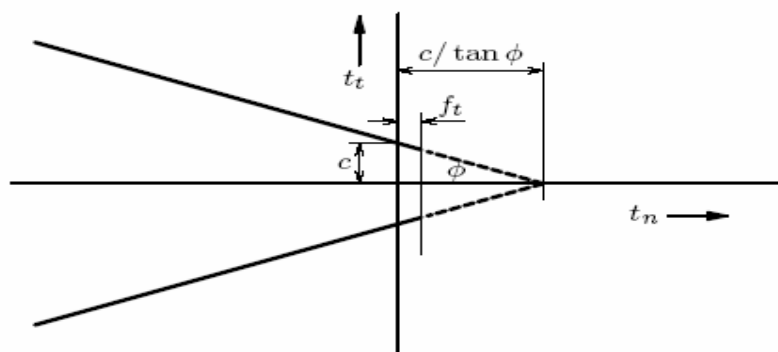
| $K_p$    | $G_{fey} (Nmm/mm^2)$ | $G_{fex} (Nmm/mm^2)$ | $\gamma$ | $\beta$ | $f_{my} (MPa)$ | $f_{mx} (MPa)$ |
|----------|----------------------|----------------------|----------|---------|----------------|----------------|
| ۰/۰۰۰۶۴۵ | ۲۹/۳۳۹۰              | ۲۹/۳۳۹۰              | ۳/۰۰     | -۱/۰۰   | ۱۶/۳۷۶۸        | ۱۶/۳۷۶۸        |

$$k_n = \frac{E_c E_m}{t_c (E_c - E_m)} \quad (1)$$

$$k_s = \frac{G_c G_m}{t_c (G_c - G_m)} \quad (2)$$

که در آنها  $E_c$ ،  $E_m$ ،  $G_c$  و  $G_m$  به ترتیب مدول ارتجاعی دیوار آجری، مدول ارتجاعی بتن، مدول برشی دیوار آجری و مدول برشی بتن می باشند. همچنین در روابط فوق  $t_c$  ضخامت المان حد فاصل است که برابر واحد فرض می گردد. برای مدلسازی حد فاصل بتنی بین دیوار آجری و کلاف بتنی از مدل اصطکاک کولمب که بر مبنای پلاستیسیته است استفاده می شود. در این مدل که شباهت زیادی به مدل پلاستیسیته مور - کولمب در محیط های پیوسته دارد فقط می توان از معیار اصطکاکی کولمب با در نظر گرفتن نقطه قطع کششی استفاده نمود. در این مدلسازی اگر زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$  و زاویه اتساع یافتگی  $\psi$  با هم برابر باشند پلاستیسیته متحد حاکم خواهد بود اما اگر زاویه اتساع یافتگی کوچکتر از زاویه اصطکاک داخلی باشد پلاستیسیته غیر متحد حاکم می گردد. همچنین نقطه قطع کششی باید رابطه زیر را ارضا کند:

$$f_t \leq \frac{c}{\tan \phi} \quad (3)$$



شکل ۸. معیار اصطکاکی کولمب

اصطکاکی المان حد فاصل حاکم است. پارامترهای الاستیک و غیر الاستیک مورد نیاز برای مدلسازی المان حد فاصل در جدول های ۵ و ۶ ارائه شده اند.

#### جدول ۵. پارامترهای الاستیک مورد نیاز برای مدلسازی

##### المان حد فاصل

| $k_n (N/mm^3)$ | $k_s (N/mm^3)$ |
|----------------|----------------|
| ۲۸۰۰/۰         | ۱۲۰۰/۰         |

که در جدول ۳ پارامتر  $\alpha$  عبارتند از ضریب تاثیر توزیع تنش برشی بر گسیختگی کششی و در جدول ۴ پارامترهای  $\beta$  و  $\gamma$  به ترتیب عبارتند از ضریب کنترل کننده اندرکنش بین مقادیر تنش قائم در حالت گسیختگی فشاری و ضریب تاثیر توزیع تنش برشی بر گسیختگی فشاری می باشند.

از  $G_{fcy}$  و  $G_{fex}$ ،  $G_{fy}$ ،  $G_{fx}$  به ترتیب انرژی شکست ناشی از کشش در راستای  $X$ ، انرژی شکست ناشی از کشش در راستای  $Y$ ، انرژی شکست ناشی از فشار در راستای  $X$  و انرژی شکست ناشی از فشار در راستای  $Y$  می باشند. همچنین  $E$  و  $V$  در جدول ۲ مدول الاستیسیته و ضریب پواسون دیوار آجری هستند. ضریب کرنش معادل خمیری متناظر با مقاومت فشاری حداکثر نمونه ها می باشد.

#### ۵. المان حد فاصل دیوار آجری و کلاف بتنی

مطابق استاندارد ۲۸۰۰، دیوار آجری و کلاف های افقی و قائم به هم متصل بوده یا به عبارت دیگر اجرای کلاف افقی و قائم بتن مسلح بعد از چیدن دیوار آجری انجام می شود تا دیوار آجری کلافدار به صورت یکپارچه درآید. بنابراین حضور المان حد فاصل بین دیوار آجری و کلاف بتنی یک ضرورت است. رفتار الاستیک المان حد فاصل بتنی به وسیله روابط زیر تعیین می شود:

نحوه عملکرد معیار کولمب در شکل ۸ نشان داده شده است. مقاومت کششی و برشی بتن در این مطالعات بر اساس بخشهای ۱۱-۲-۱-۱ و ۱۱-۳-۱-۱ و ۲-۱-۳-۱-۱ آئین نامه ACI [۴] محاسبه می شوند. با استفاده از این بخش ها می توان موقعیت سطوح سیلان را در فضای تنش برای المان حد فاصل دیوار آجری و کلاف بتنی بر آورد نمود. اما باید توجه داشت که تنها یک عدد به عنوان زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$  باید معرفی شود و چون بخش عمده ای از مود اصطکاکی کولمب در ناحیه فشاری قرار دارد می توان فرض نمود که زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از بخش ۱۱-۳-۱-۱ بر رفتار

مقاومت کششی و انرژی شکست به عنوان پارامترهای بتن و قابلیت تاثیر دادن تمام حالت های بارگذاری شامل دینامیکی و استاتیکی بر روی نمونه قبل از تحلیل آن می باشد. برای محاسبه مقاومت کششی بتن از بخش ۱۱-۲-۱-۱ آئین نامه ACI 318-02 استفاده می گردد و برای به دست آوردن انرژی شکست کششی بتن می توان از رابطه ای که توسط CEB-FIP 1991 [۶] ارائه گردیده است به شرح زیر استفاده نمود :

$$G_F^I = \alpha_F \cdot \left(\frac{f_c'}{10}\right)^{0.7} \quad (۴)$$

که در آن  $\alpha_F$  ضریبی است که بستگی به اندازه حداکثر درشت دانه دارد ( به عنوان مثال اگر اندازه حداکثر درشت دانه برابر ۳۲ میلیمتر باشد مقدار  $\alpha_F$  برابر  $0.058 \text{ Nmm/mm}^2$  خواهد بود). همچنین  $f_c'$  در رابطه فوق مقاومت فشاری ۲۸ روزه متوسط نمونه های استوانه ای استاندارد می باشد. پارامترهای الاستیک و غیر الاستیک مورد نیاز برای مدلسازی بتن در جدول های ۷ و ۸ ارائه گردیده اند.

#### جدول ۷. پارامترهای الاستیک مورد نیاز برای مدلسازی

| بتن             |       |
|-----------------|-------|
| $E(\text{MPa})$ | $\nu$ |
| ۲۶۴۵۸           | ۰/۲   |

#### جدول ۸. پارامترهای غیر الاستیک مورد نیاز برای مدلسازی بتن

| $f_c'(\text{MPa})$ | $f_t(\text{MPa})$ | $G_f^I (\text{N.mm/mm}^2)$ | $h(\text{mm})$ |
|--------------------|-------------------|----------------------------|----------------|
| ۲۸/۰۰              | ۲/۹۴              | ۰/۱۲                       | ۶۳             |

اند بر روی آن اعمال می شود. در این تحلیل ، بار جابجائی کششی مورد نظر بر مرکز صفحه فولادی فوقانی در جهت  $Z +$  اعمال شده به طوری که صفحه فولادی تحتانی در برابر جابجائی هائی در راستای  $X, Y$  و  $Z$  مقید شده است. اندازه بار در هر گام بارگذاری به صورت خودکار توسط نرم افزار با توجه به مقدار حداکثری برابر  $0.00001$  مقدار بار جابجائی (۱۰ میلیمتر) محاسبه می شود. ترک خوردگی در قطعه بتن مسلح مورد مطالعه در آخرین گام بارگذاری در شکل ۹-الف به صورت کانتور نشان داده شده است. سطوح کرنش ترک خوردگی نرمال  $\epsilon_{mm}^{cr}$  که در سمت چپ شکل مزبور ارائه گردیده است نشان می دهد که ترک خوردگی در ناحیه وسط قطعه بتن مسلح شدیدتر از سایر نواحی می باشد. همچنین در شکل ۹-ب تنش در آرماتورهای طولی در آخرین گام بارگذاری

#### جدول ۶. پارامترهای غیر الاستیک مورد نیاز برای

##### مدلسازی المان حد فاصل

| $c(\text{MPa})$ | $\tan \phi$ | $\tan \psi$ | $f_t(\text{MPa})$ |
|-----------------|-------------|-------------|-------------------|
| ۰/۸۸            | ۰/۰۶۵       | ۰/۰۰        | ۲/۹۴              |

#### ۶. خصوصیات مصالح در کلافهای افقی و قائم بتن مسلح

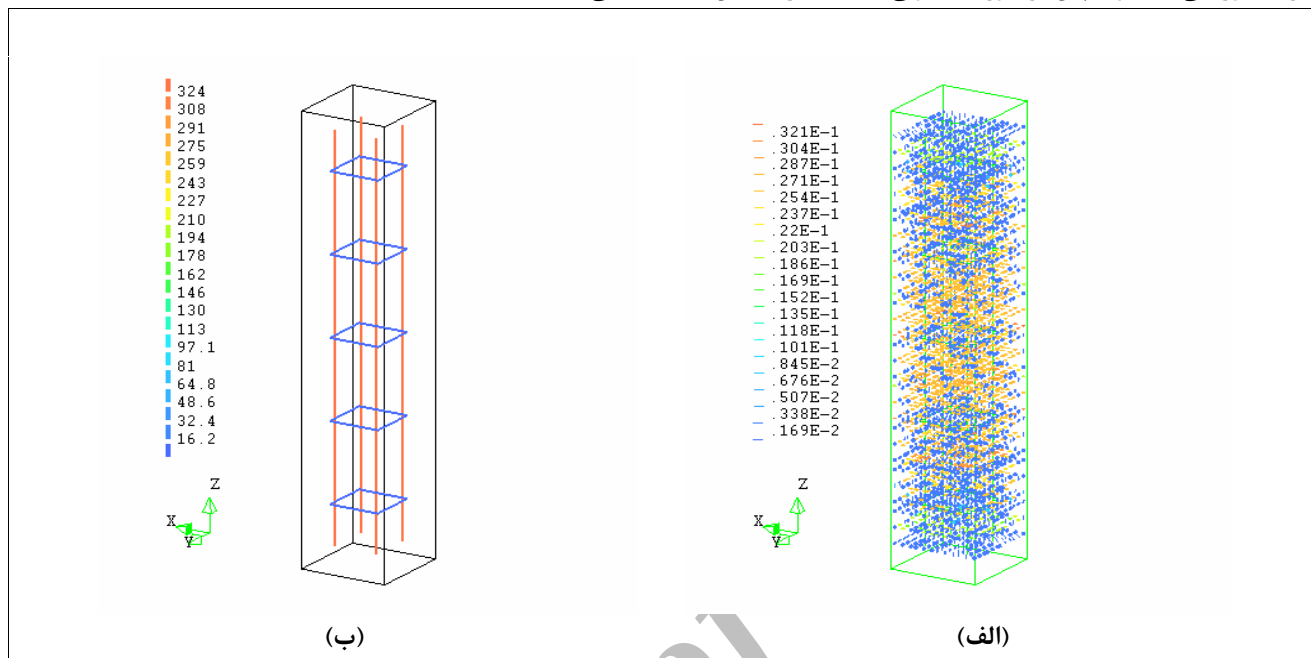
برای مدلسازی نحوه رفتار کلافهای افقی و قائم بتن مسلح از معیار گسیختگی رانکین ساده شده استفاده گردید. به دلیل عدم وجود معیارهای گسیختگی مناسب برای بتن مسلح که با انجام آزمایش هائی نرم شوندگی یا سخت شوندگی کرنش در آنها تائید شده باشد از معیار فوق که برای محیط های شکننده مناسب است استفاده گردید. برای بدست آوردن تنش سیلان رانکین ابتدا مدل سه بعدی یک کلاف بتن مسلح بوسیله نرم افزار DIANA ایجاد می گردد. مدل کلاف بتنی دارای ابعاد  $210 \times 210 \times 1000 \text{ mm}^3$  می باشد و چهار عدد آرماتور طولی آجدار (از نوع AII) با قطر ۱۰ میلیمتر و ۵ عدد آرماتور عرضی (از نوع AI) به قطر ۶ میلیمتر به فاصله ۲۰۰ میلیمتر درون آن مقید شده اند. سپس مدل تحت بار کشش محوری قرار می گیرد و به طور همزمان منحنی بار - تغییر مکان آن محاسبه می شود. برای معرفی خصوصیات بتن از مدل مائکاو [۸] و برای جاری شدن آرماتورها از معیار فون میزس استفاده گردید. مدل بتن مائکاو ترکیبی از یک مدل پلاستیسیته خسارت چند محوره برای له شدگی در ناحیه فشاری و مدل ترک خوردگی بر اساس کرنش کل در ناحیه کششی می باشد. از نکات قابل توجه در این مدل معرفی پارامترهای مهندسی نظیر مقاومت فشاری ،

که در جداول فوق  $E$  و  $\nu$  عبارتند از مدول ارتجاعی و نسبت پواسون بتن،  $h$  عرض باند ترک خورده (Crack band width) و  $G_F^I$  انرژی شکست مود اول می باشد. برای مدل کردن بتن از المان ۲۰ گرهی CHX60 که آرماتورهای طولی و عرضی در آن مقید شده اند استفاده می شود. موقعیت این آرماتورها با توجه به فاصله آنها از گوشه های قطعه بتنی تعیین شده و به نرم افزار معرفی می گردند. برای معرفی آرماتورهای طولی و عرضی از معیار پلاستیسیته فون میزس بدون سخت شوندگی و با تنش جاری شدن ۳۴۰ و ۲۲۰ مگاپاسکال استفاده گردید. مدول ارتجاعی برای آرماتورهای طولی و عرضی برابر ۲۱۰۰۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته می شود. بار کششی محوری به وسیله دو قطعه فولادی به ابعاد  $210 \times 210 \times 50 \text{ mm}$  که در بالا و پائین قطعه بتن مسلح نصب شده

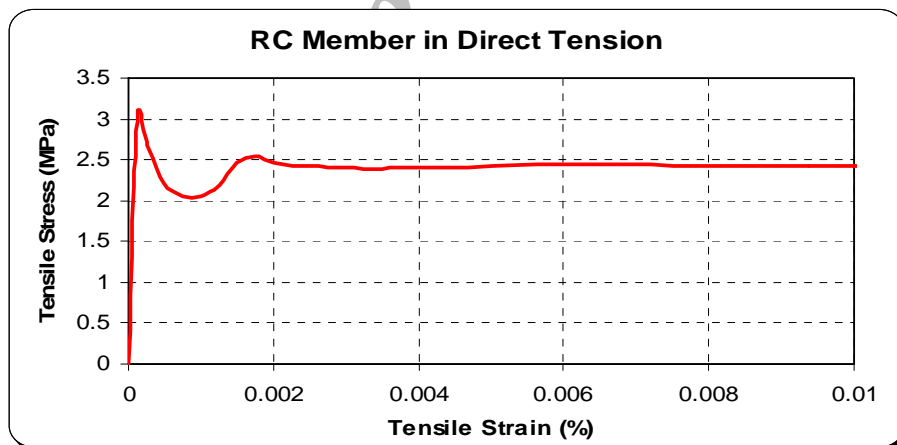


می رسند. بنابراین حد جاری شدن معیار رانکین برای مدلسازی کلافهای افقی و قائم بتن مسلح از نقطه آغاز ترک خوردگی قطعه مورد نظر به دست می آید و آن تقریباً برابر ۳/۰ مگاپاسکال می باشد.

نشان داده شده است. مطابق این شکل کلیه آرماتورهای طولی تا حد جاری شدن کشیده شده اند. در شکل ۱۰ منحنی رفتار کششی کلاف بتن مسلح ارائه گردیده است که مطابق آن ابتدا بتن دچار ترک خوردگی شده و سپس آرماتورهای طولی به حد جاری شدن



شکل ۹. قطعه بتن مسلح در کشش در آخرین گام بارگذاری الف - فرم کانتور ترک خوردگی ، ب- تنش در آرماتورهای طولی

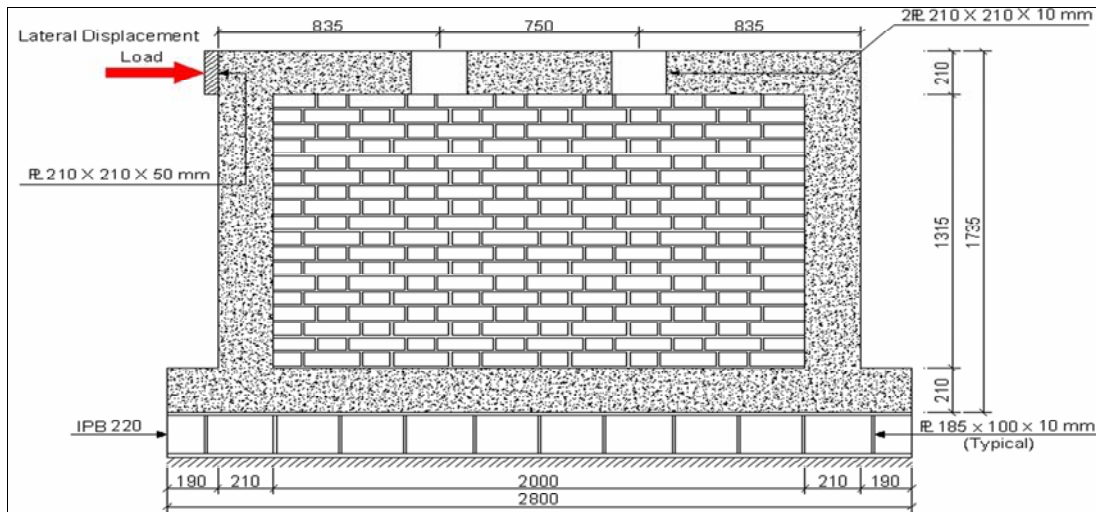


شکل ۱۰. منحنی رفتار کششی کلاف بتن مسلح

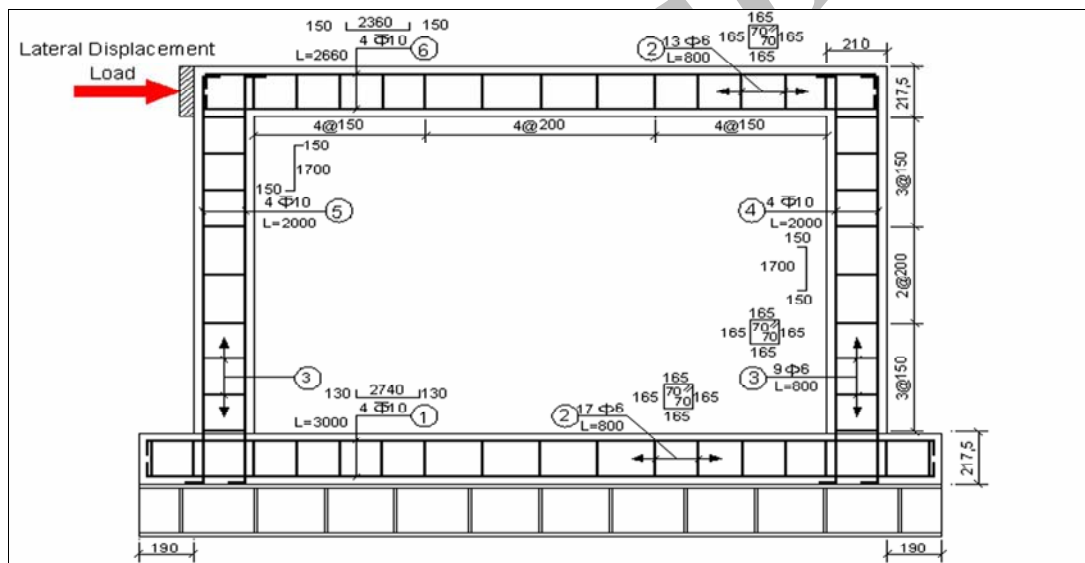
شده اند. دیوار از آجر فشاری با ابعاد متوسط 210x105x52 mm ساخته شده که ضخامت بندهای افقی و قائم آن 10 mm می باشند. ملات مورد استفاده در این دیوار تپ II بوده که مشخصات آن در بخش ۳-۱ ارائه گردید. کلیه بندهای افقی و قائم دیوار به وسیله ملات پر گردیدند. کلاف افقی زیرین در مقابل حرکت افقی مقید شده و کلاف افقی فوقانی حرکت جانبی استاتیکی را به دیوار آجری و کلافهای قائم منتقل می سازد. جهت مقایسه نتایج، از این دیوار دو نمونه در آزمایشگاه سازه ساخته شد و هر دو تحت آزمایش بارگذاری استاتیکی یکنواخت قرار گرفتند.

## ۷. مطالعات آزمایشگاهی بر روی دیوارهای آجری کلافدار

سیستم سازه ای مورد مطالعه شامل دیواری است آجری با ضخامت ۲۱۰ میلیمتر که به وسیله کلافهای افقی و قائم به ابعاد 210x210 mm محصور شده است. دیوار آجری کلافدار مورد مطالعه یک طبقه بوده و دارای یک دهانه است که مشخصات هندسی دیوار به همراه نحوه آرماتورگذاری کلافهای افقی و قائم آن که مطابق فصل سوم استاندارد ۲۸۰۰ هستند در اشکال ۱۱ و ۱۲ نشان داده



شکل ۱۱. نمای دیوار آجری کلافدار ساخته شده در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه زلزله شناسی



شکل ۱۲. آرماتورگذاری کلافها در دیوار آجری کلافدار ساخته شده در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه زلزله شناسی

ابعاد نمونه های ساخته شده در آزمایشگاه باشند. روش ساخت این نمونه ها بدین ترتیب است که ابتدا قطعات فولادی اتصال دهنده کف قوی آزمایشگاه و دیوار آجری کلافدار، در محل مونتاژ شده و بال تحتانی تیر آهن IPB-220 بوسیله پیچ های پر مقاومت به قطر حداقل ۲۲ و حداکثر ۲۴ میلیمتر به کف قوی آزمایشگاه متصل می گردد. در گام بعد کلاف افقی بتن مسلح زیرین ساخته می شود. مطابق استاندارد ۲۸۰۰، ساخت دیوار آجری پیش از ساخت کلافهای قائم و افقی فوقانی انجام گردید تا دیوار آجری و کلافها به صورت کاملاً یکپارچه در آیند. کلیه نمونه ها پس از ساخت به مدت ۲۸ روز تحت شرایط عمل آوردن مرطوب قرار داشتند. پس از طی دوره عمل آوردن مرطوب برای مشاهده نحوه ترک خوردگی و گسترش شکست در دیوارهای آجری کلافدار ساخته شده حین اعمال بار جانبی از ملات گچ به ضخامت یک سانتیمتر در یک

نسبت ارتفاع به طول ( $h/L$ ) پانل آجری در دیوار آجری کلافدار برابر  $\frac{1}{1.5}$  انتخاب گردید. این نسبت بدین علت انتخاب گردید تا رفتار نمونه های ساخته شده نشانگر رفتار بخش بزرگی از دیوارهای آجری کلافدار ساخته شده در سطح کشور باشند. نمونه های ساخته شده در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه دارای مقیاس  $\frac{1}{2}$  بوده که می توانند نشانگر یک دهانه داخلی از یک ساختمان یک طبقه آجری کلافدار باشند. اگر ابعاد هندسی دیوار دو برابر شوند میتوان به دیوار آجری کلافداری دست یافت که پانل آجری آن به طول ۴ متر، ارتفاع ۲/۶۳ متر و ضخامت ۰/۴۲ متر باشد (دیوار دو آجره). البته ذکر این نکته نیز ضروریست که دیوارهای آجری کلافدار آزمایش شده صرفاً برای تایید نتایج تحلیل ساخته شده اند زیرا در مدل تحلیلی ابعاد به کار رفته برای دیوار آجری کلافدار باید نظیر

با ترک خوردگی مایل در پانل آجری آغاز شده و پس از گسترش آن در پانل آجری ترک خوردگی مایل به انتهای کلافهای قائم نفوذ می کند در هر دو نمونه ساخته شده در آزمایشگاه مشاهده گردید. ترک خوردگی مایل در مکانهایی اتفاق می افتد که تنش اصلی ماکزیمم که متأثر از تنشهای افقی و قائم است از مقاومت کششی دیوار بیشتر باشد. ترک خوردگی مایل در این نمونه ها از بندهای افقی یا قائم در پانل آجری و یا مستقیماً از واحدهای آجری عبور کرده و سرانجام به محل تلاقی کلافهای افقی و قائم در نزدیکی محل اعمال بار وارد می شود. گسیختگی برشی در نمونه B در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مطابق این شکل کلاف افقی فوقانی مقداری به سمت بالا حرکت قائم خواهد داشت که این وضعیت می تواند به ایجاد ترک خوردگی مایل در پانل آجری کمک کند.



شکل ۱۳. گسیختگی برشی و ترک خوردگی مایل در دیوار آجری کلافدار B

بتنی در دیوار آجری را تامین کند [۱۱]. اما المان حد فاصل قادر به تامین چنین شرطی نیست. به علاوه المان حد فاصل و المان تماس می توانند دچار ترک خوردگی (Discrete cracking) شده و در محل ترک خوردگی دو قطعه مجاور از هم جدا شده و یا بر روی هم بلغزند. در تحلیل انجام یافته اندازه بار در هر گام بارگذاری توسط نرم افزار به صورت خودکار با اندازه حداکثری برابر  $0/0001$  مقدار بار جابجائی (۴۰ میلیمتر) محاسبه و بر نمونه اعمال می شود. روش تکرار مورد استفاده در این مطالعه نیوتن-رافسون عادی (Regular Newton-Raphson) می باشد. پس از آن که دیوار آجری کلافدار تحت اثر وزن خود تحلیل گردید بار افقی افزایشده جانبی بر کلاف افقی فوقانی از چپ به راست اعمال می شود. در چنین شرایطی دو تحلیل غیر خطی استاتیکی به صورت پیوسته انجام می گردد به طوری که نتایج حاصل از آخرین گام در اولین تحلیل با نتایج حاصل از اولین گام در دومین تحلیل ادامه می یابد. رفتار ارتوتروپیک دیوار آجری قابل مدلسازی با مدل های استاندارد ترک

سمت دیوارها استفاده شد. بار جابجائی استاتیکی توسط یک اکچوایاتور ۵۰۰ کیلونیوتنی بر نمونه ها اعمال می شود. بار اعمال شده بر روی نمونه ها به صورت کنترل شونده توسط تغییرمکان است که سرعت آن برابر  $0/04$  میلیمتر بر ثانیه می باشد. در این آزمایش نمونه ها فقط تحت اثر وزن خود هستند و بار قائم خارجی بر روی آنها اعمال نگردید. همچنین برای اندازه گیری و مشاهده کرنش و جابجائی در نمونه های ساخته شده از کرنش سنج های (PL-60-11) و جابجائی سنج های (CDP-50 and SDP-300D) استفاده گردید که در محل های مورد نظر نصب گردیدند. طبق نتایج این آزمایش، گسیختگی برشی که مود غالب در دیوارهای آجری کلافدار تحت بارگذاری لرزه ای است [۵] در انتهای بارگذاری بر روی نمونه ها ایجاد می گردد. این نوع گسیختگی که

## ۸. مطالعات تحلیلی بر روی دیوار آجری کلافدار ساخته شده در آزمایشگاه

در این مطالعه تحلیل بار افزون بر روی یک دیوار آجری کلافدار که نمونه مشابه آن در آزمایشگاه ساخته شده و آزمایش شده است توسط نرم افزار DIANA انجام می گردد. هدف از انجام این مطالعه به دست آوردن الگوی ترک خوردگی، توزیع تنشهای اصلی ماکزیمم و مینیمم و نیز به دست آوردن منحنی نیرو - تغییر مکان (منحنی ظرفیت) برای دیوار آجری کلافدار می باشد. الگوی ترک خوردگی و منحنی ظرفیت را مستقیماً می توان با نتایج حاصل از آزمایش نمونه های دیوار آجری کلافدار مقایسه نمود. برای مدلسازی کلافهای افقی و قائم و پانل آجری از المانهای ۸ گرهی CQ16M [۷] استفاده گردید. برای مدلسازی حد فاصل بین کلافهای بتن مسلح و دیوار آجری از المانهای خطی ۶ گرهی CL12I [۷] استفاده می شود. المان CL12I یک المان حد فاصل است که با المان تماس متفاوت است. المان تماس می تواند شرط عدم نفوذ کلاف

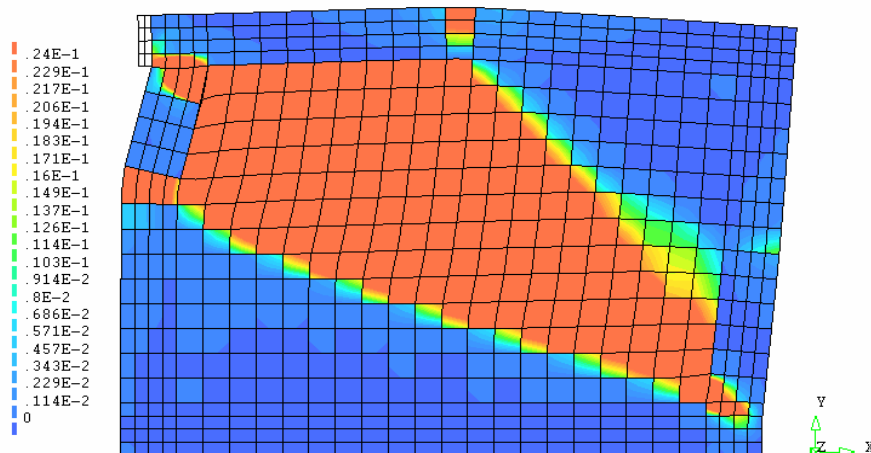
پذیر نمی باشد. از طرف دیگر ترک خوردگی در نمونه B در شکل ۱۵ نشان می دهد که گچ کاری انجام شده از برخی نواحی دیوار بر اثر ترک خوردگی جدا گردیده است. از مقایسه نتایج آزمایش و نتایج تحلیل در این قسمت توافق خوبی حاصل می شود. اول آن که ترک خوردگی مایل در پانل آجری تشکیل می شود. دوم آن که ترک خوردگی مایل تمایل به تمرکز در باند برشی عریضی را دارد که از یک سمت پانل آجری آغاز شده و در سمت دیگر پانل آجری خاتمه می یابد. عرض باند برشی در ناحیه نزدیک محل اعمال بار بیشتر از انتهای دیگر است. سوم آن که باند ترک خورده به محل اتصال اعضای بتن مسلح داخل می شود. این بدان معنا است که ترک خوردگی مایل ابتدا در پانل آجری تشکیل می شود و سپس به محل اتصال اعضای بتن مسلح نفوذ می کند. نتایج تحلیل در شکل ۱۴ همچنین نشان می دهند که کلاف افقی فوقانی در ناحیه وسط و کلاف قائم در سمت چپ دچار ترک خوردگی می شوند. به علاوه هیچ گونه نفوذ در قطعات مجاور المان حد فاصل و یا ترک خوردگی در المان مزبور بوجود نمی آید. این نتایج با نتایج حاصل از آزمایش توافق خوبی را نشان می دهند.

خوردگی که بر مبنای تئوری پلاستیسیته هستند، نمی باشد زیرا کار با چنین مدل هائی مستلزم در نظر گرفتن رفتار ایزوتروپیک در محدوده الاستیک می باشد [۸]. اما استفاده از مدل پلاستیسیته رانکین-هیل این امکان را فراهم می سازد تا رفتار ارتوتروپیک دیوار آجری در محدوده الاستیک نیز مدلسازی شود. در این مطالعه فرض گردیده است که به دلیل رفتار ارتوتروپیک کم دیوار آجری، رفتار ایزوتروپیک در محدوده الاستیک وجود دارد و این رفتار می تواند با رفتار ارتوتروپیک کم در محدوده پلاستیک ترکیب شود.

## ۹. نتایج مطالعات تحلیلی

### ۹-۱. کانتورهای ترک خوردگی در دیوار آجری کلافدار

کانتورهای ترک خوردگی در آخرین گام بارگذاری در شکل ۱۴ نشان داده شده اند. در این شکل نحوه ترک خوردگی دیوار آجری کلافدار بر روی مش تغییر مکان یافته نشان داده می شود. در حقیقت ترک خوردگی در جهت عمود بر جهت کرنش پلاستیک اصلی حداکثر ترسیم می شود زیرا در مصالح ارتوتروپیک نمایش ترک خوردگی به صورت پخش شده (Smearred Crack) امکان



شکل ۱۴. کانتورهای ترک خوردگی در آخرین گام بارگذاری



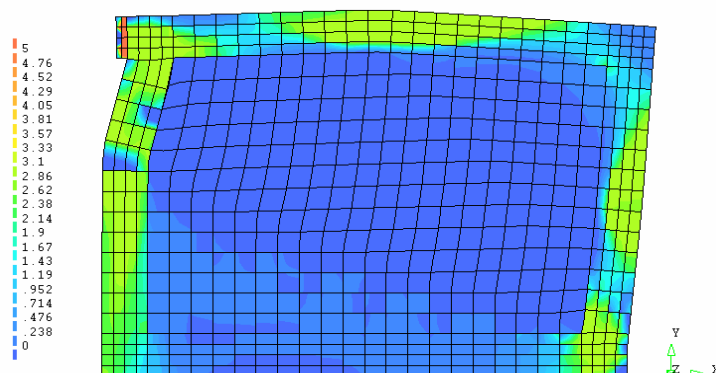
شکل ۱۵. جدا شدن گچ در اثر ترک خوردگی دیوار در آخرین گام بارگذاری

بوده و بنابراین ترک خوردگی در این ناحیه ناشی از له شدگی پانل آجری نمی باشد. از طرف دیگر این شکل به وضوح موقعیت ناحیه فشاری را در دیوار آجری کلافدار نشان می دهد. به دلیل چسبندگی بتن و دیوار آجری موقعیت دستک فشاری در این ناحیه طوری است که باند عریضی را در قسمت فوقانی دیوار اشغال کرده و در نزدیکی کلاف قائم سمت راست از عرض آن کاسته شده و دستک فشاری دچار چرخش به سمت پائین می شود. موقعیت و شکل دستک فشاری در دیوار آجری کلافدار مورد مطالعه با موقعیت و شکل دستک فشاری در قابهای بتن مسلح با میانقاب مصالح بنائی به هیچ وجه قابل مقایسه نمی باشد. نکته قابل تامل در این رابطه عدم انطباق دستک فشاری بر ناحیه ترک خورده است که می تواند باعث بهبود رفتار لرزه ای دیوار آجری کلافدار گردد.

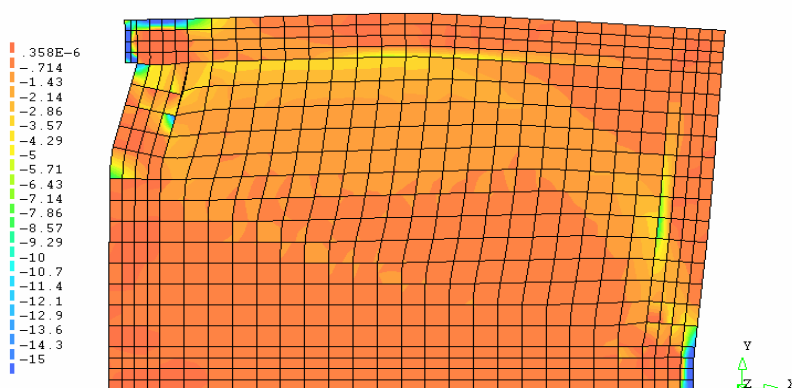
### ۹-۲. کانتورهای تنش اصلی حداکثر و تنش اصلی حداقل

کانتورهای تنش اصلی حداکثر در آخرین گام بارگذاری در شکل ۱۶ نشان داده شده است. چنان که از این شکل مشخص است در مناطقی از پانل آجری تنش اصلی حداکثر از مقاومت کششی پانل آجری ( $f_{tx}$  و  $f_{ty}$ ) بیشتر بوده و بنابراین در این مناطق ترک خوردگی کششی اتفاق خواهد افتاد. همچنین در مناطقی از کلافهای افقی و قائم نیز تنش موجود بیش از حد جاری شدن معیار رانکین می باشد که در این نواحی نیز ترک خوردگی کششی اتفاق می افتد. این مناطق با مناطق ترک خورده در شکل ۱۴ انطباق خوبی را نشان می دهد.

کانتورهای تنش اصلی حداقل در آخرین گام بارگذاری در شکل ۱۷ نشان داده شده است. مطابق این شکل تنش اصلی حداقل در پانل آجری همواره کمتر از مقاومت فشاری پانل در راستای افقی و قائم



شکل ۱۶. تنش اصلی حداکثر در آخرین گام بارگذاری (تنش های کششی با علامت مثبت)



شکل ۱۷. تنش اصلی حداقل در آخرین گام بارگذاری (تنش های فشاری با علامت منفی)

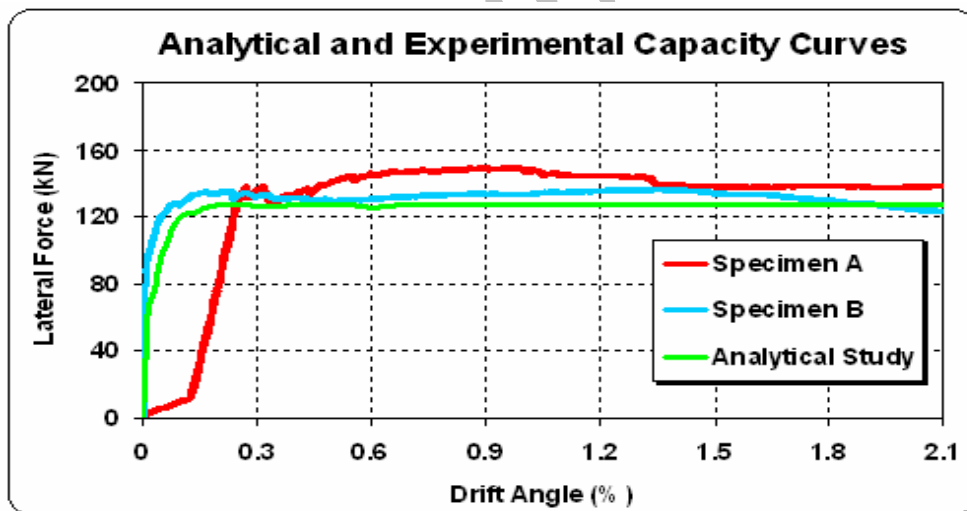
مقایسه بین منحنی های ظرفیت در مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی نشان می دهد که هماهنگی خوبی بین آنها وجود دارد. هر سه منحنی دارای روند مشابهی هستند. شکل منحنی ظرفیت تحلیلی مشابه شکل منحنی های ظرفیت آزمایشگاهی می باشد. سختی اولیه مدل تحلیلی بین سختی اولیه مدل های آزمایشگاهی قرار دارد. از زاویه دریفت حدود ۰/۳ درصد به بالا منحنی های ظرفیت تقریباً

### ۹-۳. منحنی های ظرفیت

منحنی های ظرفیت که از مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی به دست آمده اند در شکل ۱۸ نشان داده شده است. منحنی ظرفیت در مطالعه تحلیلی توسط نرم افزار DIANA و در نقطه اعمال بار جانبی محاسبه گردیده است. منحنی های ظرفیت در مطالعه آزمایشگاهی توسط اکچوایتور و در نقطه ای مشابه به دست آمده اند.

با افزایش جابجائی اعمال شده بر نمونه، موقعیت دستک فشاری در پانل آجری به سمت مناطقی که هنوز دچار ترک خوردگی نشده‌اند بطور پیوسته در حال تغییر است. این ویژگی است که تنها در دیوارهای آجری کلافدار مشاهده می‌شود و در قاب بتنی و میانقاب آجری دستک فشاری معمولاً بر روی ناحیه ترک خورده همواره متمرکز است. علت این امر را باید در وجود چسبندگی عضو بتنی و پانل آجری در دیوارهای آجری کلافدار جستجو کرد. انطباق دستک فشاری بر روی ناحیه ترک خورده در میانقاب باعث می‌شود که تمایل به کاهش مقاومت در قاب بتنی و میانقاب آجری بیشتر از دیوار آجری کلافدار با ابعاد مشابه باشد. دیوارهای آجری کلافدار A و B به ترتیب در زاویه دریفت ۰/۲۵ درصد و ۰/۰۷ درصد به مقاومت برشی خود دست می‌یابند. نکته قابل تامل این است که مقاومت برشی دیوارهای آجری کلافدار A و B تقریباً با هم برابر هستند. بعد از این مرحله مقاومت برشی دیوارها باید کاهش یابند که می‌تواند در اثر له شدگی پانل آجری و نیز از دست دادن مقاومت برشی دو انتهای کلافهای قائم این حالت اتفاق بیفتد. اما در دیوارهای آزمایش شده تا زاویه دریفت ۲/۱ درصد این وضعیت بوجود نیامده است.

با هم موازی می‌شوند. تفاوت‌ها و نقاط اشتراکی که در منحنی‌های ظرفیت نمونه‌های A و B مشاهده می‌شوند در ادامه بررسی می‌گردند. اختلافی که در سختی اولیه دیوار آجری کلافدار A نسبت به دیوار آجری کلافدار B مشاهده می‌شود ناشی از لغزش افقی است که در کلاف افقی فوقانی نسبت به پانل آجری در ابتدای آزمایش و در نمونه A مشاهده می‌شود. بدلیل مقاومت زیاد حد فاصل عضو بتنی و پانل آجری، لغزش اولیه در رگه آخر آجر چینی به صورت افقی اتفاق می‌افتد. با افزایش بار جانبی دامنه لغزش اولیه کاهش یافته و مکانیزم گسیختگی برشی با ترک خوردگی مایل بر نمونه A حاکم می‌گردد. بدین ترتیب سختی نمونه افزایش یافته و تا رسیدن به مقاومت برشی دیوار، سختی ثابت می‌ماند. اما روند گسیختگی در نمونه B به شکل دیگری رخ می‌دهد. ابتدا اولین ترک خوردگی قطری در دیوار آجری B در بار جانبی معادل ۷۹ کیلو نیوتن اتفاق می‌افتد. در دیوار آجری B با ادامه بارگذاری نرخ ترک خوردگیهای مایل افزایش یافته بطوریکه سختی دیوار دائماً در حال کاهش است. این روند تغییرات سختی تا رسیدن به مقاومت برشی دیوار ادامه دارد. مقاومت برشی دیوار (بار حداکثر قابل حمل توسط دیوار) بوسیله دستک فشاری در پانل آجری و نیز مقاومت برشی دو انتهای کلافهای قائم تامین می‌شود.



شکل ۱۸. مقایسه بین منحنی‌های ظرفیت

#### ۱۰. نتیجه گیری

این مطالعات با هدف تعیین کانتورهای ترک خوردگی، کانتورهای تنشهای اصلی حداقل و حداکثر و نیز بدست آوردن منحنی ظرفیت در دیوارهای آجری کلافدار انجام گردید. بر اساس نتایج به دست آمده موارد زیر ارائه می‌شوند:

- ۲- بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی، شکل تغییر مکان یافته مدل تحلیلی و مدل‌های آزمایشگاهی در هر گام بارگذاری با تقریب خوبی مشابه می‌باشند؛
- ۳- در مطالعات تحلیلی ترک خوردگی در پانل آجری و کلافهای افقی و قائم در مناطقی ایجاد می‌شود که در مطالعات آزمایشگاهی دچار ترک خوردگی گردیدند؛
- ۴- بر خلاف میانقابهای مصالح بنائی در قابهای فولادی یا بتن مسلح، دستک فشاری در دیوار آجری کلافدار متمرکز در باندهای

۱- کفایت مدل‌سازی به وسیله معیار پلاستیسیته رانکین-هیل برای دیوار آجری، معیار رانکین برای کلافهای افقی و قائم و نیز معیار اصطکاکی کولمب برای المان حد فاصل نشان داده شد؛

- [13] Page, A.W., "The Strength of Brick Masonry Under Biaxial Compression – Tension", Int. J. Masonry Constr., 1983, 3(1), pp.26-31.
- [14] Pourazin, Kh., Eshghi, S., "Behaviour of an Unreinforced Masonry Building Subjected to Horizontal Components of BAM-IRAN Earthquake (December 26,2003)", First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Switzerland, 3-8 September 2006, Paper Number 1582.
- [15] Pourazin, Kh., Eshghi, S., "Development of Capacity Curves for Confined Masonry Walls", 10<sup>th</sup> North American Masonry Conference, June 3-6, 2007, pp.503-517.

مایل که یک گوشه دیوار را به گوشه دیگر وصل می کند نمی باشد. بر اثر چسبندگی بین اعضای بتنی و پانل آجری در دیوار آجری کلافدار، شکل و موقعیت دستک فشاری متفاوت می باشد؛

۵- علیرغم مقاومت جانبی کم که در آزمایش دیوار آجری کلافدار به دست آمد شکل پذیری این نوع از دیوارها به اندازه کافی بزرگ می باشد (شکل پذیری حدود ۸). این بدان معناست که در دیوارهای آجری کلافدار ظرفیت جذب انرژی بر اثر عملکرد غیر الاستیک افزایش قابل توجهی می یابد.

### مراجع

- [۱] پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، "گزارش شناسائی زلزله درب آستانه سیلاخور"، فصل چهارم، اثر زلزله بر سازه های منطقه، ۱۳۸۵.
- [۲] دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، "طرح و اجرای ساختمانهای با مصالح بنایی"، مبحث هشتم، مقررات ملی ساختمان، وزارت مسکن و شهر سازی، ۱۳۸۴.
- [۳] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، "آئین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله"، استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش ۳)، ۱۳۸۴.
- [4] ACI 318-02, "Building Code Requirements for Structural Concrete", Reported by ACI committee 318, 2002.
- [5] Alcocer, S.M., Arias, J.G., Flores, L.E. , "Some developments on performance – based seismic design of masonry structures", Proceedings of an International Workshop on Performance – Based Seismic Design Concepts and Implementation, pp. 233-244, 2004.
- [6] CEB – FIP, "CEB – FIP Model Code 1990", Comite Euro International du Beton, 1993.
- [7] DIANA 2005, "DIANA Finite Element Analysis, User's Manual – Element Library", 2005, Delft: TNO Building and Construction Research.
- [8] DIANA 2005, "DIANA Finite Element Analysis, User's Manual – Material Library", 2005, Delft: TNO Building and Construction Research.
- [9] Eurocode 6, "Design of Masonry Structures", DD ENV 1996-1-1:1996, Part 1-1. General Rules for Buildings – Rules for Reinforced and Unreinforced Masonry.
- [10] Lourenco, P.B., "Computational Strategies for Masonry Structures", Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft, Feb 1996, The Netherlands.
- [11] Mohammadi, S., "Discontinuum Mechanics Using Finite and Discrete Elements", WIT press, 2003.
- [12] Page, A.W., "The Biaxial Compressive Strength of Brick Masonry", Proc.Intsn.Civ.Engrs., 1981, Part 2, 71, pp.893-906.