

بررسی آزمایشگاهی و مدل سازی عددی رفتار غیرخطی دیوارهای مصالح بنایی تحت بار چرخه‌ای داخل صفحه با در نظر گرفتن اثر چیدمان آجرچینی

امیرحسین کریمی^{۱*}، محمدسعید کریمی^۲، علی خیرالدین^۳، عبدالعظیم امیرشاه‌کریمی^۴

۱- دکترای مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۴- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله هدف اصلی، تحلیل غیرخطی رفتار چرخه‌ای داخل صفحه (برشی) دیوار آجری با در نظر گرفتن اثر چیدمان آجرچینی به وسیله روش اجزاء محدود می‌باشد. در این تحقیق، سه روش مختلف از چیدمان آجرچینی شامل آجرچینی راسته، آجرچینی خفته-راسته، و آجرچینی ضربی (هره‌چینی) مد نظر قرار گرفته است. بدین منظور، دیوارهایی به طول ۱۷۲۰، ارتفاع ۱۵۰۰ و ضخامت ۱۹۵ میلی‌متر در آزمایشگاه سازه بارگذاری و بررسی شده‌اند و سپس در نرم‌افزار آباکوس به صورت ماکرو شبیه‌سازی شده و نمودار چرخه‌ای نیرو-تغییر مکان آنها استخراج گردیده است. معیار رفتاری پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده در نرم‌افزار آباکوس، مدلی است که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مدل رفتاری، مکانیزم‌های اصلی شکست، ترک خوردگی در کشش و خردشدگی در فشار می‌باشد. منحنی پوش حاصل از تحلیل عددی در هر سه نوع چیدمان مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته ولی در منحنی چرخه‌ای حاصل برای نمونه‌های با آجرچینی خفته-راسته و ضربی اثر جمع‌شدگی به خوبی حاصل نگردید. در ضمن، این مقایسه نشان داد که معیار پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده که یک مدل رفتاری برای شبیه‌سازی ماده بتن می‌باشد می‌تواند برای مدل سازی ماده مصالح بنایی تحت بارگذاری لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: مصالح بنایی، دیوار برشی بنایی، چیدمان آجرچینی، بارگذاری چرخه‌ای، نمودار چرخه‌ای بار-تغییر مکان، مدل سازی عددی، آجر.

*نویسنده مسئول: امیرحسین کریمی

پست الکترونیکی: a_karimi_sazeh@yahoo.com

شناسه دیجیتال DOI: 10.22065/jsce.2016.41339

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2016.41339> 38895

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۳۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۸

۱- مقدمه

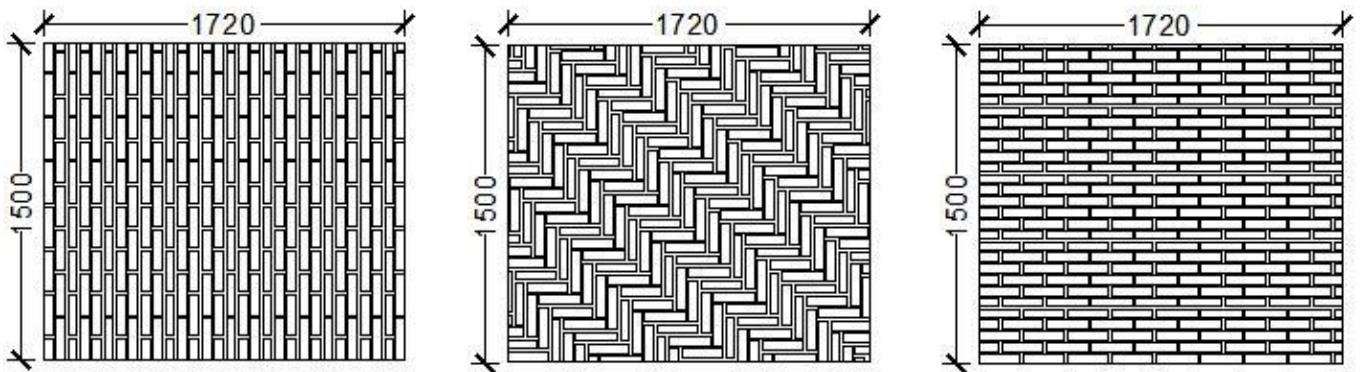
در بناهای تاریخی ایران آجرها به نحوی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند که نه تنها باربری سازه فراهم گردیده، بلکه زیبایی خاص و منحصر به فردی نیز به آن داده شده است. در دوره‌های تاریخی مختلف، بناهای متعددی ساخته شده که در هر کدام از آنها نقش و نگارهای متعددی از آجرکاری به جای مانده است. چیدمان‌های آجرچینی متنوعی در بناهای تاریخی ایران وجود دارد. سه نوع چیدمان آجرچینی که اغلب در بناهای تاریخی مشاهده می‌شود عبارتند از: چیدمان راسته؛ چیدمان خفته-راسته و چیدمان ضربی یا هره چینی. در چیدمان راسته، آجرها به صورت افقی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، شکل (۱-الف). در چیدمان خفته-راسته، یک آجر به صورت افقی و یک آجر دیگر به صورت قائم قرار گرفته و با تکرار این حالت دیوار شکل می‌گیرد، شکل (۱-ب). در چیدمان ضربی، آجرها به صورت ایستاده قرار گرفته و به این صورت دیوار شکل می‌گیرد، شکل (۱-ج).

در زمینه روش‌های مختلف آجرچینی تحقیقات زیادی صورت نگرفته است. در سال ۲۰۱۳ میلانی و همکاران [۱]، یک مدل سازگار برای پیوند خفته-راسته در سازه‌های مصالح بنایی ارائه کردند. ایشان یک روش ساده سینماتیکی در سطح یک سلول مصالح بنایی برای به دست آوردن مدول الاستیک داخل صفحه و میزان مقاومت مصالح بنایی برای روش آجرچینی خفته-راسته ارائه کردند. در سال ۲۰۰۸ سچی و همکاران [۲]، یک روش تحلیل حدی سینماتیکی برای استخراج سطوح شکست ماکروسکوپی دیوار مصالح بنایی که با استفاده از روش آجرچینی انگلیسی ساخته شده بود را ارائه کردند. در این تحقیق، رفتار یک دیوار سه‌بعدی با فرض اینکه از آجرهای با مقاومت نامحدود و درزهای اصطکاکی با مقاومت کششی - فشاری کم ساخته شده بود به صورت یک صفحه دوبعدی مورد بررسی قرار گرفت. در این روش، با فرض قانون جریان متحد برای مواد تشکیل دهنده و مودهای تغییرشکل، یک تقریب کرانه بالایی از سطوح شکست نحوه آجرچینی انگلیسی به صورت تابعی از لنگرهای خمشی و نیروهای برشی و پیچشی به دست آمد. در سال ۲۰۰۷ گوماتسه و همکاران [۳]، منشورها و دیوارهای آجری کوچکی را تحت بار فشاری آزمایش کردند. ایشان اثر دو نوع آجر معمول در کشور هندوستان را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، ایشان اثر دو نوع آجر و سه نوع ملات را در منشورها و دیوارهای ساخته‌شده مورد بررسی قرار دادند. منشورها و دیوارهای ساخته‌شده از مواد مختلف دارای دو نوع چیدمان بودند، یک سری از آنها با چینش راسته، و سری دیگر با چینش انگلیسی ساخته شده بودند. در این تحقیق، هدف اصلی، بررسی اثر مقاومت آجر و ملات در مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته‌شده بود. این تحقیق نشان داد که اختلاف زیادی در تحمل فشاری نمونه‌ها با آرایش آجرچینی راسته و آرایش آجرچینی انگلیسی وجود ندارد. حلبیان و همکاران [۴]، با استفاده از روش اجزاء محدود مجزا، رفتار داخل صفحه دیوارهای آجری با چیدمان‌های مختلف آجرچینی را تحت بارگذاری افزایشی یکنواخت (monotonic) مورد بررسی قرار دادند. تحقیقات معدود دیگری نیز در این زمینه صورت گرفته است [۵-۹].

در تحقیق حاضر، با استفاده از روش مدل‌سازی ماکرو که یکی از روش‌های مدل‌سازی سازه‌های مصالح بنایی می‌باشد، سه چیدمان مختلف آجرچینی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. برای صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی سه دیوار با چیدمان‌های مورد نظر در این مطالعه در آزمایشگاه سازه دانشگاه سمنان بارگذاری و آزمایش شدند. نرم‌افزار آباکوس دارای مدل‌های رفتاری زیادی است که در مدل‌سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون همانند فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن غیرمسلح، فوم‌های فبری و نیز مواد شکننده، و همچنین مصالح ژئوتکنیکی نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می‌سازد. معیار رفتاری پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده - که یکی از معیارهای رفتاری مواد موجود در کتابخانه مواد نرم‌افزار آباکوس می‌باشد- در این تحقیق برای شبیه‌سازی رفتار مصالح دیوارهای بنایی مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در مرحله اول این تحقیق، نمونه دیوارهایی با چیدمان‌های مورد نظر، شکل (۱)، در آزمایشگاه سازه دانشگاه سمنان ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌ها دارای اندازه اسمی $۱۷۲۰ \times ۱۵۰۰ \times ۱۹۵$ (ضخامت \times عرض \times طول) میلی‌متر بودند. دیوارها با آجر رسی توپر (به ابعاد $۱۹۵ \times ۱۹۵ \times ۴۵$ میلی‌متر) و ملات گچ و خاک (با نسبت حجمی یک به یک)، با ضخامت درز ملات ۱۵ میلی‌متر ساخته شدند.



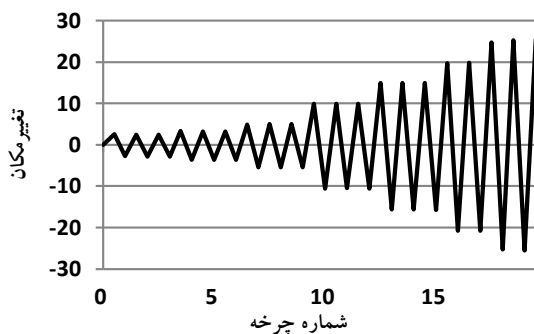
شکل ۱: طرح‌های مختلف بررسی شده چیدمان آجرچینی دیوارها (ابعاد بر حسب میلی‌متر)، الف) نمونه با چیدمان راسته، ب) نمونه با چیدمان خفته-راسته، ج) نمونه با چیدمان ضربی.

یک سری از آزمایشات نیز برای به دست آوردن مشخصات مصالح انجام شده که نتایج آنها در جدول شماره (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات مصالح به کار گرفته شده در دیوارهای آزمایش شده

مشخصات	میانگین	انحراف استاندارد
مقاومت فشاری نمونه مکعبی ملات (MPa)	۵/۱۳	۱/۵۳
مقاومت فشاری آجر (MPa)	۲۰/۷	۶/۸۶
مقاومت فشاری منشور مصالح بنایی (منشور ساخته شده از پنج ردیف آجرچینی) (MPa)	۴/۱۱	۰/۶۷

تجهیزات آزمایش شامل نمونه دیوارها، سیستم بارگذاری و قاب صلب می‌باشد که در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. بار چرخه‌ای جانبی (مطابق شکل ۲-ب) با استفاده از دو جک هیدرولیکی صد کیلو نیوتنی در بالای دیوار و به دو طرف نمونه اعمال شده است. هر چرخه بارگذاری شامل دو نیم چرخه می‌باشد. نیم چرخه اول از سمت راست به چپ، و نیم چرخه دوم از سمت چپ به راست می‌باشد. با استفاده از دو دستگاه اندازه‌گیری تغییر مکان (LVDT)، جابجایی‌های ایجاد شده در اثر بارگذاری اندازه‌گیری و به وسیله یک دستگاه اتوماتیک ثبت شده‌اند. قبل از اعمال بار جانبی، یک پیش فشار به میزان ۵۸ کیلونیوتن برای شبیه‌سازی بار ثقلی با استفاده از یک جک هیدرولیکی دویست کیلونیوتنی به بالای دیوار و به صورت یکنواخت (به صورت کنترل نیرو) بر روی یک تیر صلب ناودانی شکل (پروفیل ناودانی شماره ده تقویت شده با ورق فلزی) که به صورت کلاهک بر روی دیوار قرار گرفته اعمال گردیده است. سپس با ثابت ماندن مقدار پیش فشار، بار جانبی پروتکل به صورت چرخه‌ای به تیر صلب ناودانی شکل اعمال شده است (به صورت جابجایی کنترل).



(ب)



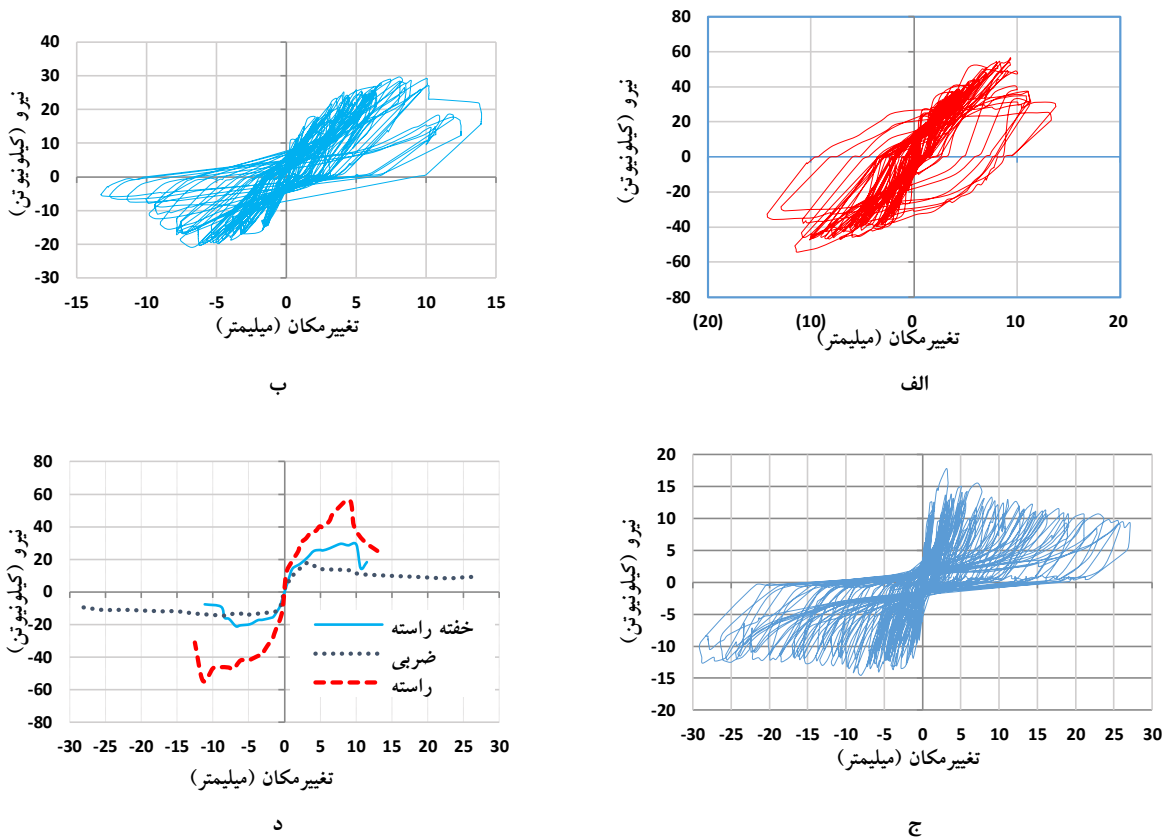
(الف)

شکل ۲: تجهیزات آزمایش و بارگذاری، الف) برپایی و تجهیزات آزمایش و ب) پروتکل بارگذاری اعمالی.

نمودارهای چرخه‌ای بار-تغییرمکان و نتایج به دست آمده از آزمایش در شکل (۳) نشان داده شده است. در نمونه با چیدمان ضربی یک لاغری شدید مشاهده می‌شود و در نمونه با چیدمان خفته-راسته نیز این لاغری به صورت ملایم‌تر مشاهده می‌شود. اطلاعات به دست آمده از آزمایشات در جدول شماره (۲) ارائه شده است.

جدول ۲: اطلاعات به دست آمده از آزمایش بر روی دیوار

نمونه	پوش	وضعیت تسلیم		وضعیت نهایی		سختی kN/mm	ضریب پواسن
		بار (کیلو نیوتن) جابجایی (میلی متر)	بار (کیلو نیوتن) جابجایی (میلی متر)	بار (کیلو نیوتن) جابجایی (میلی متر)	بار (کیلو نیوتن) جابجایی (میلی متر)		
نمونه راسته	مثبت	۳۸	۳	۵۶/۵۳	۹/۳۷	۱۵/۱۹	۰/۱۵
	منفی	۳۹	۲/۲	۵۴/۴۶	۱۱/۳۸		
نمونه خفته-راسته	مثبت	۲۱	۲/۱	۲۹/۵۴	۸/۰۱	۱۰/۸۱	۰/۱۵
	منفی	۱۵	۱/۲	۲۰/۸۸	۶/۷۹		
نمونه ضربی	مثبت	۱۶	۱/۸	۱۷/۸۶	۳/۱۳	۱۱/۲۵	۰/۱۵
	منفی	۱۲/۷۵	۱	۱۴/۵۴	۷/۹۷		



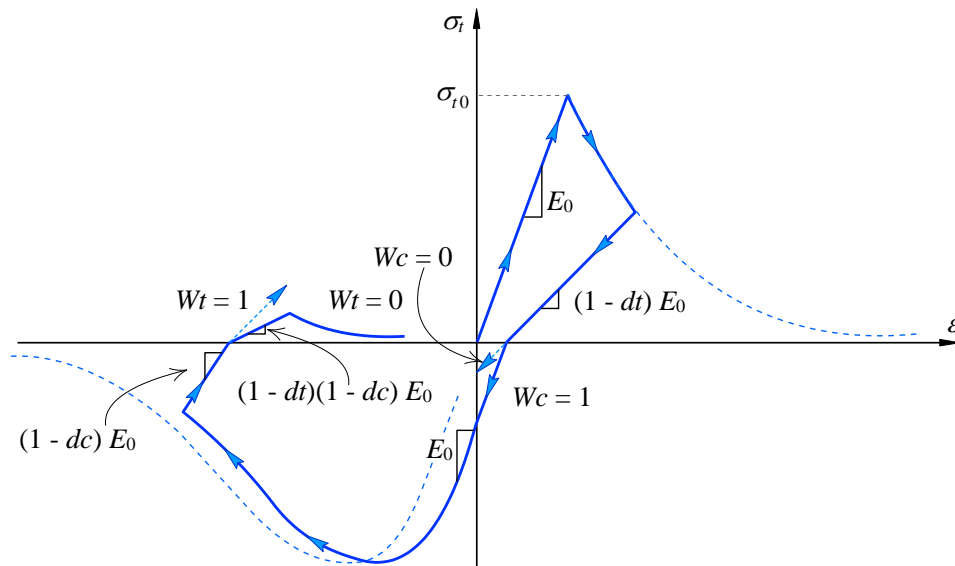
شکل ۳: منحنی‌های چرخه‌ای بار-تغییرمکان آزمایشگاهی دیوارهای بنایی با چیدمان‌های مختلف، الف) نمونه با چیدمان راسته، ب) نمونه با چیدمان خفته-راسته، ج) نمونه با چیدمان ضربی، د) مقایسه منحنی پوش هر سه نمونه.

۳- مدل سازی عددی

برای مدل سازی عددی از نرم افزار آباکوس و مدل پلاستیسیته بتن آسیب دیده استفاده شده است. این مدل در ادامه توضیح داده شده است.

۳-۱- مدل پلاستیسیته بتن آسیب دیده

مدل پلاستیسیته بتن آسیب دیده برای مدل سازی رفتار مصالح دیوار بنایی مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل یک مدل خسارت بر پایه رفتار پلاستیک برای بتن است. در این مدل فرض می شود که مهم ترین مکانیسم های خرابی برای بتن ترک خوردن در کشش، و خرد شدن در فشار می باشد. در این مدل فرض می شود که پاسخ بتن تحت اثر کشش و فشار تک محوری با استفاده از پلاستیسیته مبتنی بر خسارت تعریف می شود. تحت اثر کشش تک محوری پاسخ تنش- کرنش تا رسیدن به تنش خرابی σ_{t0} از یک رابطه خطی پیروی می کند. تنش خرابی متناظر با آغاز ترک های ریز در بتن است. فراتر از تنش خرابی تشکیل ترک های ریز با استفاده از پاسخ تنش- کرنش نرم شونده تعریف می شود. هنگامی که بتن از هر نقطه بر روی شاخه نرم شونده کرنش در منحنی تنش- کرنش بار برداری می شود پاسخ بار برداری با کاهش سختی الاستیک بتن تعریف می شود. کاهش سختی الاستیک با استفاده از دو پارامتر خسارت در کشش (d_t) و خسارت در فشار (d_c) مشخص می شود، این پارامترهای خسارت تابعی از کرنش های پلاستیک هستند. پارامترهای خسارت می توانند مقادیری از صفر- که بیانگر رفتار بدون خسارت است- تا یک- که بیانگر از دست دادن کامل سختی است- را اختیار کنند. بازیابی سختی یکی از جنبه های مهم پاسخ مکانیکی بتن تحت بارگذاری چرخه ای است. مشاهدات تجربی در مصالحی مانند بتن نشان می دهند هنگامی که بار از کششی به فشاری تغییر می کند در اثر بسته شدن ترک ها سختی فشاری مقدار قبلی خود را باز می یابد. از سوی دیگر، هنگامی که بار از فشاری به کششی تغییر می کند به دلیل تشکیل ترک های ریز ناشی از خردشدگی در بتن سختی کششی، مقدار قبلی خود را باز نمی یابد. این رفتار بتن که متناظر با $W_t = 0$ و $W_c = 1$ است در شکل (۴) نشان داده شده است. با استفاده از این روش، مدل سازی رفتار بتن به صورت مستقل از آرماتور در نظر گرفته می شود. پارامترهای خسارت d_t و d_c افزایش یابنده هستند که در هر گام زمانی در طول تحلیل، مقدار آنها به صورت حداکثر مقدار به دست آمده در انتهای گام قبلی و مقدار متناظر آنها با گام فعلی به دست می آید. پارامترهای پلاستیسیته این مدل در بخش های بعدی به تفصیل ارائه شده است.



شکل ۴: چرخه بارگذاری تک محوری برای مدل پلاستیسیته بتن آسیب دیده [۱۰].

۳-۲- معیار تسلیم

۳-۲-۱- تابع پتانسیل جریان

مدل مصالح استفاده شده در این تحقیق، ترک خوردگی در کشش و خردشدگی در فشار را با استفاده از قواعد پلاستیسیته شبیه سازی می کند. مدل مصالح در این حالت از ترکیب پلاستیسیته سخت شونده چندگانه غیرمتحد برای توصیف آسیب برگشتناپذیر که در فرآیند ترک خوردگی ایجاد می شود تشکیل شده است. این مدل امکان باز یافتن اثرات سختی را در بارگذاری های چرخه ای دارد. پتانسیل جریانی که

برای این مدل در نظر گرفته می‌شود تابع هیپربولیک دراکر-پراگر می‌باشد که در معادله (۱) ارائه شده است. این تابع در فضای فشار هیدرواستاتیک-تنش انحرافی مایسز تعریف می‌شود.

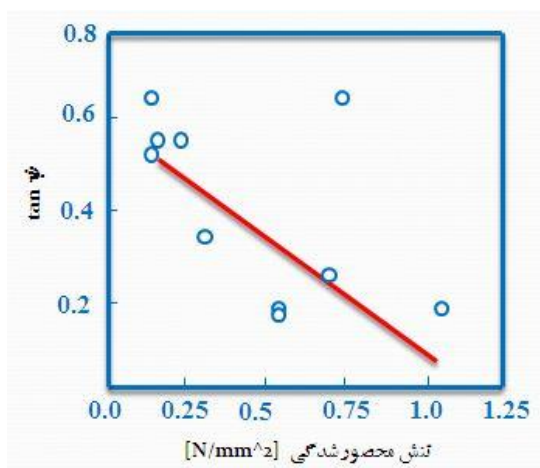
$$G = \sqrt{(\varepsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + q^2} - p \tan \psi \quad (1)$$

در رابطه فوق، P: تنش هیدرواستاتیک، q: تنش انحرافی مایسز که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

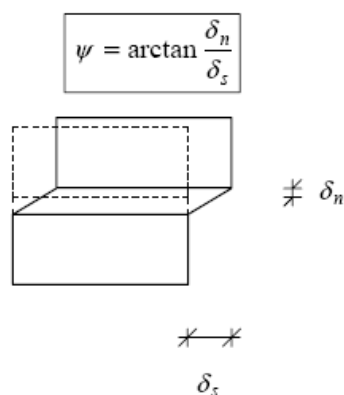
$$q = \sqrt{\frac{3}{2} s : s} \quad (2)$$

در رابطه فوق S بردار تنش انحرافی می‌باشد. سایر پارامترهای موجود در فرمول (۱) در زیر تعریف شده‌اند:

ψ : زاویه اتساع (انبساط برشی)، این پارامتر مقدار بلندشدگی در اثر جابجایی برشی را مشخص می‌کند، (شکل ۵-الف). در واقع این پدیده اثر زبری سطح است که به این صورت نمایان می‌شود. بایستی توجه شود که مقدار انبساط برشی بستگی به مقدار تنش فشاری (محصورشدگی) دارد و با افزایش این تنش فشاری، زاویه اتساع کم می‌شود. همچنین، با شروع لغزش و تحت تنش‌های فشاری زیاد، به علت از بین رفتن ناهمواریهای سطحی و صاف شدن سطوح قبل از لغزش، زاویه اتساع به سمت صفر میل می‌کند، که این تغییرات در شکل (۵-ب) نشان داده شده است [۱۰].



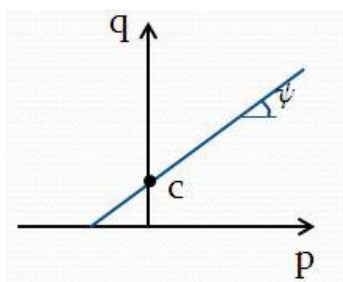
ب



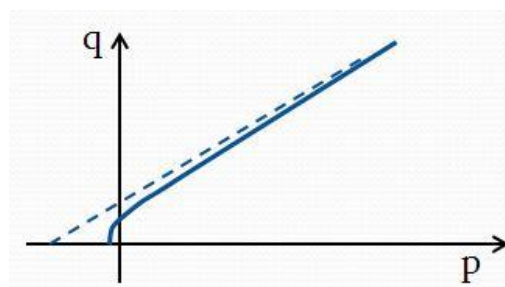
الف

شکل ۵: زاویه اتساع الف) تعریف زاویه اتساع (یا انبساط برشی)، و ب) کاهش زاویه اتساع با افزایش تنش فشاری محصورکنندگی [۱۰].

ε : خروج از مرکزیت، تابع پتانسیل جریان در ابتدا محور افقی تنش هیدرواستاتیک را با زاویه ۹۰ درجه قطع می‌کند که تحت این شرایط، این تابع در واقع یک منحنی خواهد بود (خط توپر در شکل ۶-الف). در ادامه حل، شیب آن در محل تقاطع با محور افقی شروع به کاهش می‌کند تا به مقدار ψ برسد (خط منقطع در شکل ۶-الف). اگر از ابتدا، مقدار پارامتر خروج از مرکزیت صفر در نظر گرفته شود، این منحنی تبدیل به یک خط خواهد شد (شکل ۶-ب). مقدار این پارامتر اگر بسیار کوچک در نظر گرفته شود، باعث واگرایی حل در مراحل اولیه خواهد شد [۱۰].



ب



الف

شکل ۶: اثر خروج از مرکزیت بر تابع جریان؛ الف) با اثر خروج از مرکزیت، ب) بدون اثر خروج از مرکزیت [۱۰].

σ_{to} : تنش ترک خوردگی، روابط مختلفی برای تعیین مقدار این تنش توسط برخی محققین پیشنهاد گردیده است. رابطه آئین نامه آمریکا مطابق رابطه (۳) می باشد، [۱۱]:

$$\sigma_{to} = 0.7 \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

رابطه پیشنهادی آئین نامه بتن چین به صورت رابطه (۴) می باشد [۱۲]:

$$\sigma_{to} = 0.395 (f'_{cu})^{0.55} \quad (4)$$

در روابط بالا f'_c و f'_{cu} به ترتیب برابر مقاومت ۲۸ روزه نمونه های استاندارد استوانه ای و مکعبی هستند. ارتباط این دو پارامتر به صورت زیر مطرح می شود [۱۱]:

$$f'_c = 0.8 f'_{cu} \quad (5)$$

در نرم افزار آباکوس مقدار ده درصد مقامت فشاری مصالح برای تنش ترک خوردگی پیشنهاد گردیده که در مطالعه حاضر نیز همین مقدار استفاده شده است.

۳-۲-۲- تابع تسلیم

تابع تسلیم پیشنهادی لی و فنوس در این مدل استفاده شده است. این تابع مطابق رابطه (۶) ارائه شده است.

$$F = \frac{1}{1-\alpha} [q - 3ap + \beta(\epsilon^{pl}) \times (\hat{\sigma}_{max}) - \gamma \times (-\hat{\sigma}_{max})] - \sigma_c(\epsilon^{pl}) = 0 \quad (6)$$

در این رابطه مقدار β ، α و γ از روابط زیر تعیین می شوند:

$$\alpha = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}{2(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\sigma_c(\epsilon_c^{pl})}{\sigma_t(\epsilon_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{3(1 - k_c)}{2k_c - 1} \quad (9)$$

پارامترهای موجود در روابط بالا به صورت زیر تعریف می گردند:

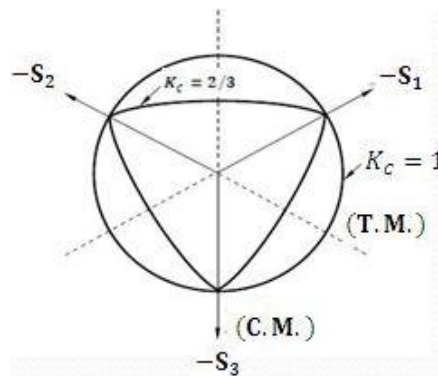
σ_{max} : حداکثر تنش موجود.

σ_{b0}/σ_{c0} : نسبت تنش فشاری حداکثر دوماحوره به تک‌محوره، مقدار این پارامتر بین ۱ تا ۱/۲۷ متغیر است. هر چه این مقدار بیشتر باشد ماده رفتار سخت‌تری از خود نشان خواهد داد.

K_c : نسبت ثابت دوم تانسور تنش بر روی نصف‌النهار کششی به مقدار همین پارامتر بر روی نصف‌النهار فشاری، این پارامتر که می‌تواند بین ۰/۵ تا ۱ باشد [۱۳] و در واقع این پارامتر شکل مقطع عرضی سطوح بارگذاری را تعیین می‌کند. هر چه مقدار این پارامتر بزرگ‌تر باشد، شکل مقطع عرضی به دایره نزدیک‌تر خواهد شد، شکل (۷). اگر مقدار این پارامتر برابر با یک در نظر گرفته شود، شکل مقطع عرضی سطح تسلیم شبیه دراکر-پراگر می‌گردد. در شکل (۷) منظور از (T.M) نصف‌النهار کششی و منظور از (C.M) نصف‌النهار فشاری است.

$\sigma_c(\epsilon^{pl}_c)$ و $\sigma_t(\epsilon^{pl}_t)$: تنش‌های تک‌محوره متناظر با کرنش‌های پلاستیک موجود، مقدار تنش‌های فشاری و یا کششی نظیر کرنش‌های پلاستیک فشاری و یا کششی موجود بصورت جدولی که کاربر معرفی می‌نماید، تعیین می‌شوند.

پارامتر دیگری که در مدل پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده وجود دارد و در هنگام مدل‌سازی باید در نظر گرفته شود، پارامتر ویسکوزیته می‌باشد. حل المان محدود بر اساس تئوری پلاستیسیته‌ای که در قسمت‌های قبلی توضیح داده شد، دارای پتانسیل بسیار زیادی برای واگرایی زودرس است. دلایل بسیار زیادی برای این مسئله می‌توان بیان کرد که مهم‌ترین آنها کاهش سختی بسیار شدید پس از ترک‌خوردگی و تغییرات شیب بسیار زیاد در مقطع عرضی سطح تسلیم است [۱۰]. دووات و لیونز برای حل این مشکل پیشنهاد کردند که ماده بتن، به صورت یک ماده ویسکوپلاستیک در نظر گرفته شود [۱۰]. این موضوع باعث می‌شود که در طی به‌دست آمدن معادلات در هر مرحله، یک زمان آرامش وجود داشته باشد. وجود این زمان آرامش باعث می‌شود که حساسیت حل نسبت به سطوح تسلیم کاهش یابد و در نتیجه مشکلات همگرایی تا حدی بهبود یابد. طبیعی است که مقدار این زمان آرامش باید به حدی کوچک باشد که بتوان از تأثیرات آن بر پاسخ کلی سازه صرف نظر کرد.



شکل ۷: اثر مقدار K_c بر روی شکل مقطع عرضی تابع تسلیم [۱۰].

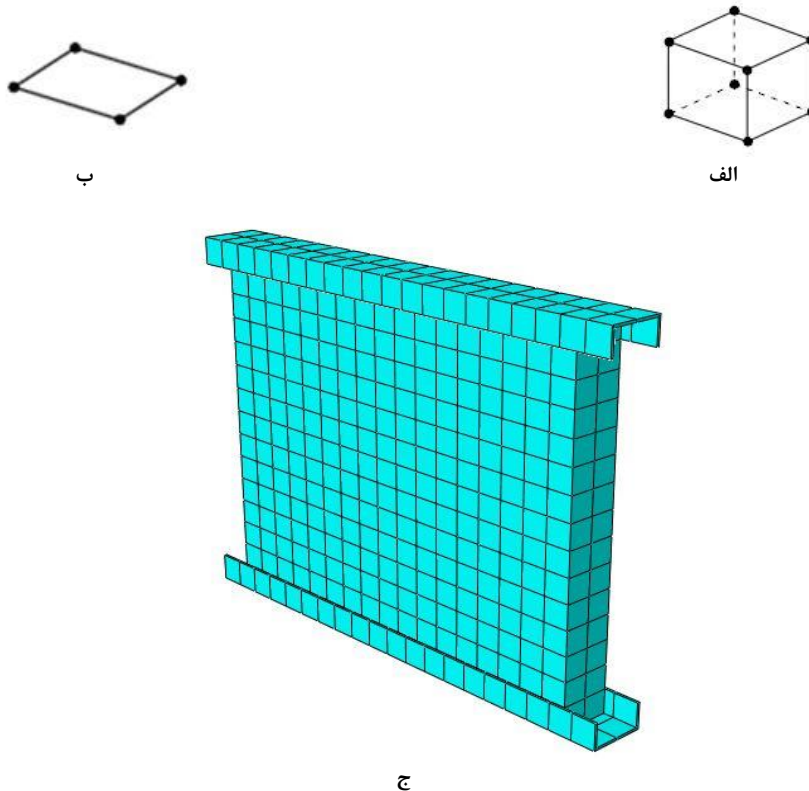
در جدول (۳) پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل رفتاری پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده در مدل‌سازی هر یک از دیوارها با چیدمان‌های متفاوت ارائه شده است.

جدول ۳: پارامترهای مدل رفتاری پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده برای سه چیدمان مورد مطالعه

پارامتر	K_c	ϵ	ψ	ویسکوزیته	σ_{b0}/σ_{c0}	wt	wc	dc	dt
نمونه راسته	۰/۵۷	۰/۱	۱۵	۰/۰۰۵	۱/۱۶	۰/۳	۰/۳	۰/۰۵	۰/۰۵
نمونه خفته-راسته	۰/۵۷	۰/۱	۱۵	۰/۰۰۵	۱/۱۶	۰/۳	۰/۳	۰/۰۵	۰/۰۵
نمونه ضربی	۰/۵۷	۰/۱	۱۵	۰/۰۰۵	۱/۱۶	۱e-۶	۱e-۶	۰/۰۹	۰/۰۹

۴- شبکه بندی

برای شبکه بندی آجرها از المان C3D8R معرفی شده در نرم افزار آباکوس استفاده شد، شکل (۸-الف). این المان، لاگرانژی از نوع Solid، هشت گرهی، تابع شکل آن در هر امتداد درجه یک، و در هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی (و با نقاط انتگرال گیری گوسی کاهش یافته) می باشد. برای مدل سازی تیرهای فلزی که به صورت صلب فرض شده اند از المان R3D4 استفاده شده است، شکل (۸-ب). این المان برای شبیه سازی سه بعدی قطعات صلب استفاده می شود، دارای چهار گره و در هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی می باشد. دیوار و تیرهای صلب پس از شبکه بندی شده در شکل (۸-ج) نشان داده شده است.



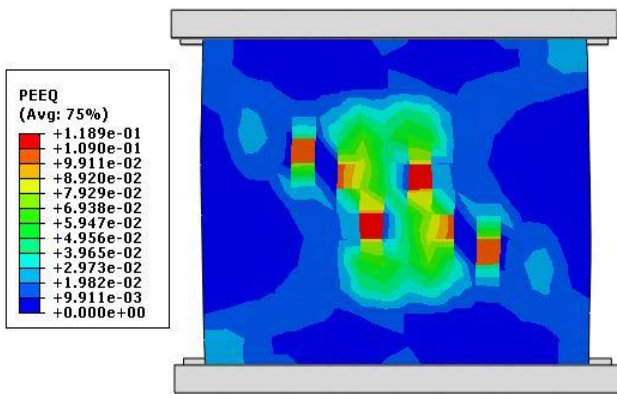
شکل ۸: المان های استفاده شده در مدل سازی عددی دیوارهای بنایی: الف) المان سه بعدی C3D8R برای شبکه بندی دیوار؛ ب) المان صلب R3D4 برای شبکه بندی تیرهای صلب، ج) دیوار و تیرهای شبکه بندی شده.

۵- نتایج به دست آمده از تحلیل های عددی

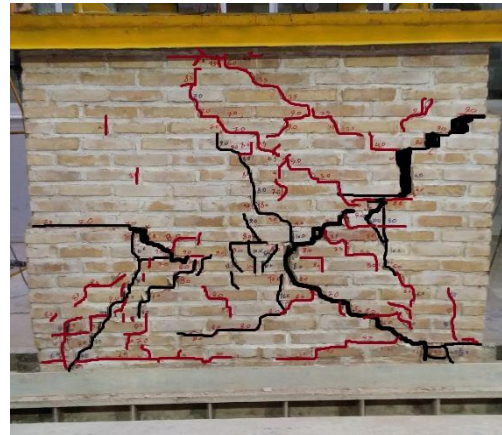
در این قسمت نتایج به دست آمده از تحلیل عددی که منحنی چرخه ای بار-تغییر مکان می باشد همراه با تصویر دیوار آزمایش شده در مرحله پایانی آزمایش و همچنین کانتور کرنش پلاستیک معادل در مرحله پایانی برای هر کدام از دیوارها به صورت مجزا ارائه شده است.

۵-۱- دیوار با چیدمان آجرچینی راسته

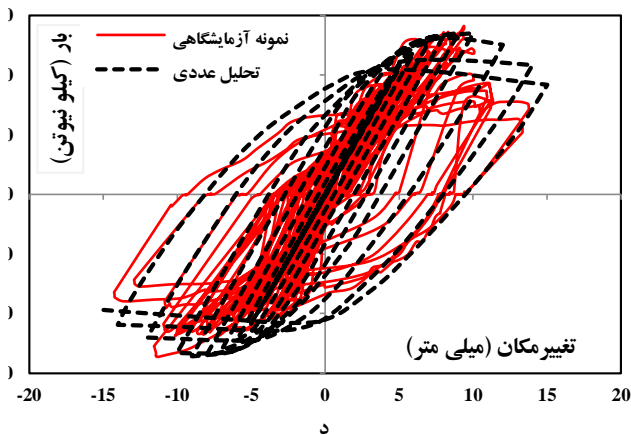
در شکل (۹) نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی و تحلیل عددی دیوار، با چیدمان آجرچینی راسته ارائه شده است. در شکل (۹-الف) دیوار آزمایش شده در آزمایشگاه نشان داده شده است. در شکل (۹-ب) کانتور کرنش پلاستیک معادل و در شکل (۹-ج) منحنی چرخه ای بار-تغییر مکان حاصل از مدل سازی عددی ارائه شده است. همان طور که در شکل (۹-د) نشان داده شده است، منحنی به دست آمده از تحلیل عددی انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. در این دیوار کاهش قابل توجهی در سختی دیوار در هنگام تغییر جهت بارگذاری مشاهده نشده و منحنی چرخه ای بار-تغییر مکان حاصل از تحلیل عددی مطابقت خوبی با نمونه آزمایشگاهی دارد.



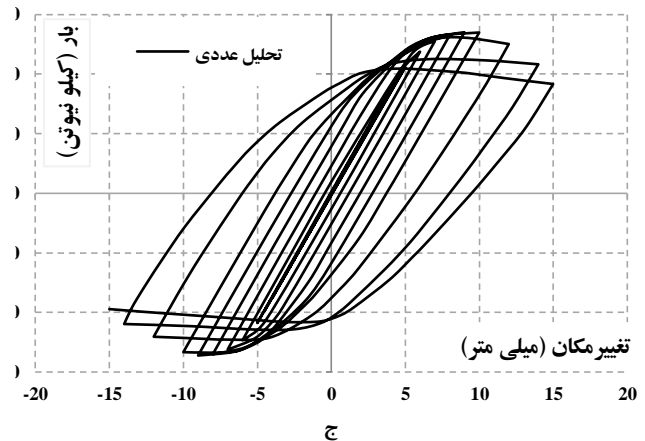
ب



الف



د

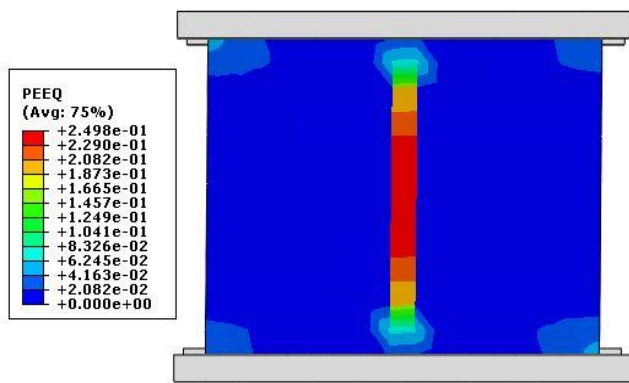


ج

شکل ۹: نتایج تحلیل عددی دیوار بنایی با چیدمان راسته در نرم افزار آباکوس و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، الف) ترک خوردگی در دیوار با چیدمان راسته در تغییر مکان ۱۵ میلی متر، ب) کانتور کرنش پلاستیک معادل در تغییر مکان ۱۵ میلی متر، ج) منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان حاصل از تحلیل عددی، د) مقایسه منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی.

۲-۵- دیوار با چیدمان آجرچینی خفته-راسته

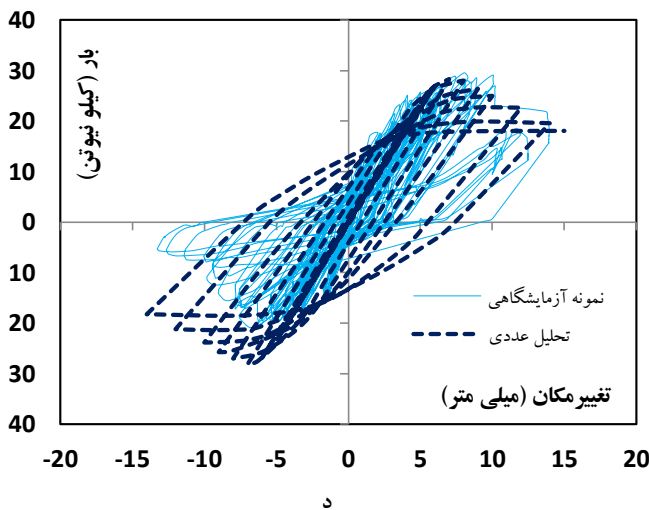
شکل (۱۰) نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی بر روی دیوار با چیدمان خفته-راسته را نشان می‌دهد. در نتایج آزمایشگاهی این دیوار اثر جمع‌شدگی (پدیده لاغر شدن منحنی‌های چرخه‌ای در مبدأ مختصات) در منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان آن مشاهده می‌شود. در منحنی به دست آمده از تحلیل عددی این دیوار هم تا حدی اثر جمع‌شدگی مشاهده می‌شود. در شکل (۱۰-الف) دیوار آزمایش شده در آزمایشگاه نشان داده شده است. در شکل (۱۰-ب) کانتور کرنش پلاستیک معادل و در شکل (۱۰-ج) منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان حاصل از مدل سازی عددی ارائه شده است. جمع‌شدگی (اثر پینچینگ) به وجود آمده در این نمونه بیشتر از نمونه با آجرچینی راسته می‌باشد.



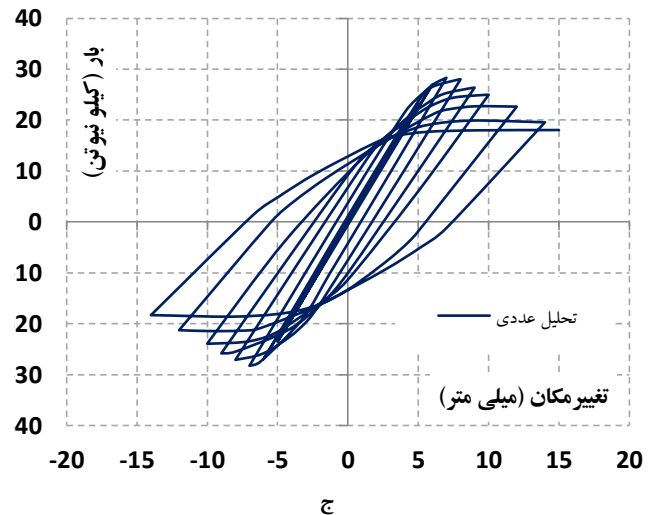
ب



الف



د

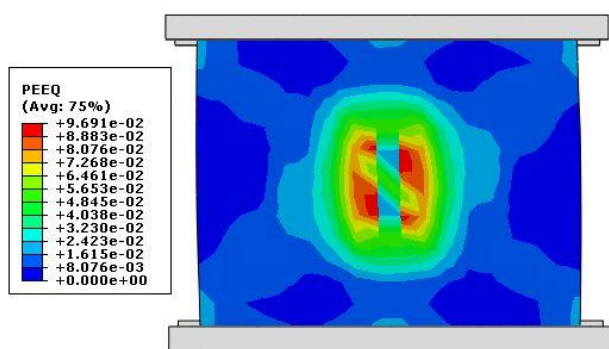


ج

شکل ۱۰: نتایج تحلیل عددی دیوار بنایی با چیدمان خفته-راسته در نرم‌افزار آباکوس و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، الف) دیوار با چیدمان خفته-راسته در تغییرمکان ۱۷ میلی‌متر، ب) کانتور کرنش پلاستیک معادل در تغییرمکان ۱۷ میلی‌متر، ج) منحنی چرخه‌ای بار-تغییرمکان حاصل از تحلیل عددی، د) منحنی چرخه‌ای بار-تغییرمکان تحلیل عددی و نمونه آزمایشگاهی.

۳-۵- دیوار با چیدمان آجرچینی ضربی

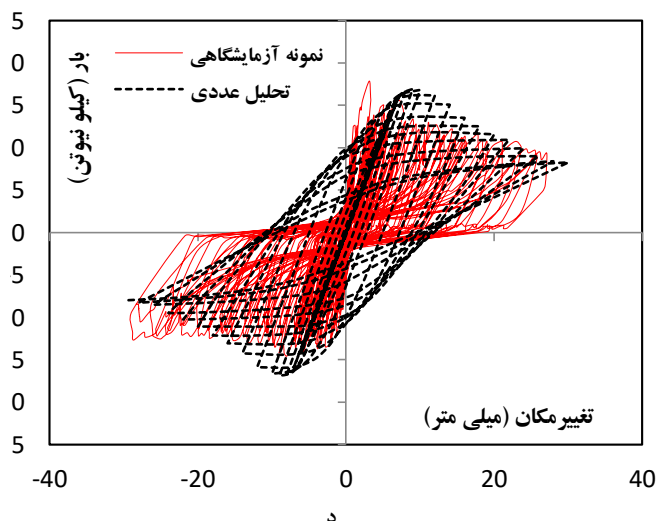
در شکل (۱۱) نتایج تحلیل عددی و مطالعه آزمایشگاهی در نمونه با چیدمان ضربی ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، منحنی پوش در دو حالت انطباق خوبی با یکدیگر دارند اما منحنی چرخه‌ای بار-تغییرمکان حاصل از تحلیل عددی انطباق خوبی با نتیجه آزمایشگاهی ندارد. این نشان می‌دهد که نرم‌افزار آباکوس قادر به شبیه‌سازی اثر جمع‌شدگی در رفتار چرخه‌ای ماده بتن نمی‌باشد و برای به دست آوردن این اثر، باید مدل‌های رفتاری معرفی شده مناسب دیگری که در قالب زیربرنامه برای آباکوس تعریف می‌شوند، بکار گرفته شوند. در منحنی چرخه‌ای بار-تغییرمکان نمونه آزمایشگاهی این دیوار بنایی، پس از باربرداری در یک جهت و اعمال نیرو (به صورت تغییرمکان) در جهت مخالف، سختی نمونه به شدت کاهش یافته و به عدد صفر متمایل می‌شود. این پدیده به دلیل وجود ترک‌های ایجادشده در دیوار می‌باشد که در زمان تغییر جهت بارگذاری، این ترک‌ها شروع به بسته شدن می‌کنند و تا وقتی که به طور کامل بسته نشوند، دیوار از خود باربری نشان نمی‌دهد. بنابراین، به دلیل اینکه این ترک‌ها در نمونه عددی شبیه‌سازی نشده‌اند نمی‌توان منحنی چرخه‌ای بار-تغییرمکان حاصل شده در آزمایشگاه را به طور دقیق و کامل در تحلیل عددی مشاهده کرد.



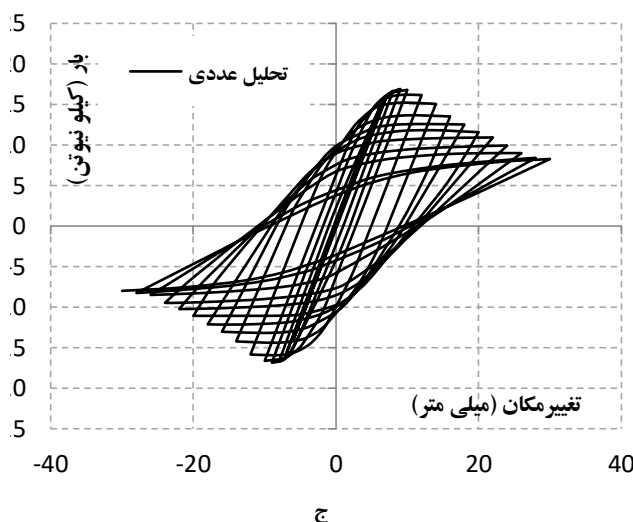
ب



الف



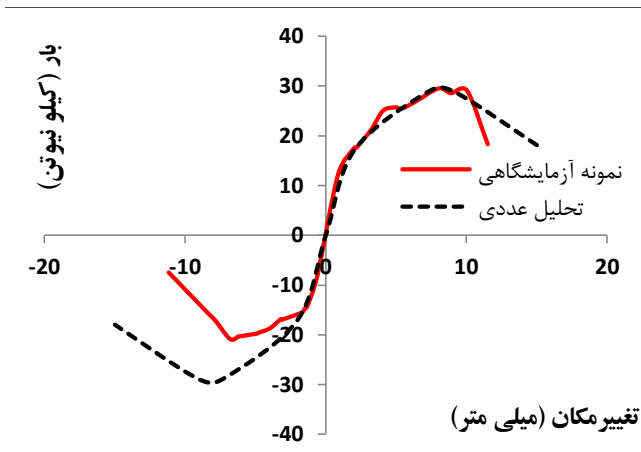
د



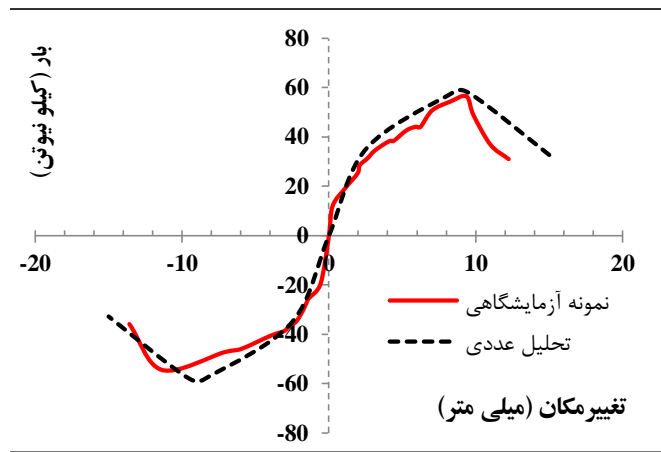
ج

شکل ۱۱: تحلیل دیوار با چیدمان ضربی در نرم افزار آباکوس، الف) دیوار با چیدمان ضربی در تغییر مکان ۳۰ میلی متر، ب) کانتور کرنش پلاستیک معادل در تغییر مکان ۳۰ میلی متر، ج) منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان حاصل از تحلیل عددی، د) منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان تحلیل عددی و نمونه آزمایشگاهی.

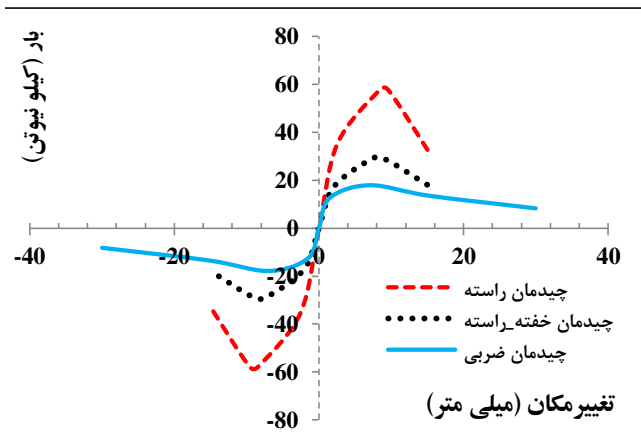
در شکل (۱۲) منحنی پوش برای هر سه نمونه به صورت مجزا ارائه شده است. همان طور که در شکل (۱۲) مشاهده می شود منحنی پوش حاصل از تحلیل عددی برای هر سه نمونه متقارن بوده ولی در نمونه‌های آزمایشگاهی به دلیل وجود شرایط آزمایشگاهی همچون خطا در ساخت نمونه‌ها و خطا در هنگام آزمایش، تقارن در منحنی پوش بطور کامل حاصل نشده است. در منحنی دیوار با چیدمان ضربی و دیوار با چیدمان خفته-راسته عدم تقارن بیشتری در منحنی پوش آزمایشگاهی دیده می شود، البته همان طور که از الگوی نمونه‌ها مشخص است ساخت دیوار با این چیدمان‌ها سخت تر می باشد و به دقت بیشتری نیاز دارد. نتایج حاصل از تحلیل عددی برای این دو نمونه در ناحیه مثبت (ناحیه اول مختصات) انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. در نمونه با چیدمان راسته هم در ناحیه مثبت و هم در ناحیه منفی (ناحیه سوم مختصات) انطباق خوبی بین تحلیل عددی و نتیجه آزمایشگاهی وجود دارد. منحنی پوش حاصل از تحلیل عددی هر سه دیوار در شکل (۱۲-د) ارائه شده است.



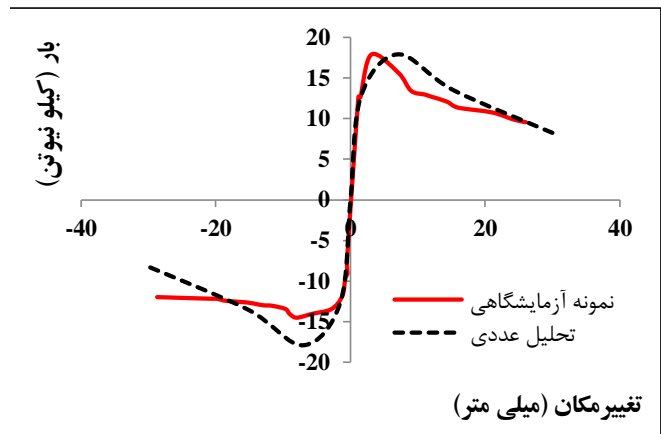
ب



الف



د



ج

شکل ۱۲: مقایسه منحنی پوش حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی برای هر سه نمونه دیوار بنایی، الف) نمونه راسته، ب) نمونه خفته-راسته، ج) نمونه ضربی، د) منحنی پوش هر سه نمونه.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق هدف اصلی مدل سازی عددی رفتار غیر خطی دیوارهای آجری با چیدمان‌های مختلف آجر چینی می‌باشد. سه چیدمان آجر چینی مختلف شامل آجر چینی راسته، آجر چینی خفته-راسته و آجر چینی ضربی (هره) مورد بررسی قرار گرفتند. برای این صحت سنجی مدل سازی عددی سه دیوار به ابعاد $195 \times 150 \times 172$ (ضخامت \times عرض \times طول) میلی‌متر در آزمایشگاه سازه دانشگاه سمنان ساخته شد و منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان مربوط به آنها استخراج گردید. پس از آن مدل سازی عددی این سه چیدمان در نرم افزار آباکوس انجام شد. مدل رفتاری پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده و روش شبیه سازی ماکرو برای مدل سازی دیوارها به کار گرفته شد. نتایج به دست آمده از تحلیل به این صورت بود که در چیدمان راسته، هم منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان و هم منحنی پوش حاصل از تحلیل عددی مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. در نمونه خفته-راسته، منحنی پوش انطباق خوبی با نتیجه آزمایشگاهی داشت ولی در منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان اثر جمع‌شدگی (پدیده لاغرشدن در مبدأ مختصات) که در منحنی آزمایشگاهی وجود داشت به خوبی حاصل نشد. در نمونه با چیدمان ضربی جمع‌شدگی بسیار شدیدی در منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان آزمایشگاهی وجود داشت که نرم‌افزار آباکوس به هیچ عنوان قادر به شبیه‌سازی صحیح آن نبود ولی منحنی پوش دو نمونه آزمایشگاهی و عددی مطابقت خوبی با یکدیگر داشتند. دو پارامتر

مهم در شبیه‌سازی چرخه‌ای دیوار، پارامتر خرابی^۱ و پارامتر بازیابی^۲ می‌باشند. پارامتر خرابی در هنگام باربرداری و پارامتر بازیابی در هنگام تغییر جهت بارگذاری تأثیر قابل توجهی در منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان نمونه عددی دارند. نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که مدل پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده قادر به شبیه‌سازی اثر جمع‌شدگی در نمودار چرخه‌ای بار-تغییر مکان نمی‌باشد.

مراجع

- [1] Milani, G. Cecchi, A. 2013. Compatible model for herringbone bond masonry: Linear elastic homogenization, failure surfaces and structural implementation. *International Journal of Solids and Structures*. 50(20-21):3274-96.
- [2] Cecchi, A. Milani, G. 2008. A kinematic FE limit analysis model for thick English bond masonry walls. *International Journal of Solids and Structures*. 45(5):1302-31.
- [3] Gumaste, KS. Nanjunda Rao, KS. Venkatarama Reddy, BV. Jagadish, KS. 2006. Strength and elasticity of brick masonry prisms and wallethes under compression. *Materials and Structures*. 40(2):241-53.
- [4] Halabian, AM. Mirshahzadeh, L. Hashemol-Hosseini, H. 2014. Non-linear behavior of unreinforced masonry walls with different Iranian traditional brick-work settings. *Engineering Failure Analysis*. 44:46-65.
- [5] Bacigalupo, A. Cavicchi, A. Gambarotta, L. 2012. A simplified evaluation of the influence of the bond pattern on the brickwork limit strength. *Advanced Materials Research*. 368:3495-508.
- [6] Bacigalupo, A. Gambarotta, L. 2012. Effects of layered accretion on the mechanics of masonry structures. *Mechanics based design of structures and machines*. 40(2):163-84.
- [7] Cecchi, A. Milani, G. Tralli, A. 2007. A Reissner-Mindlin limit analysis model for out-of-plane loaded running bond masonry walls. *International Journal of Solids and Structures*. 44(5):1438-60.
- [8] Cecchi, A. Sab, K. 2004. A comparison between a 3D discrete model and two homogenised plate models for periodic elastic brickwork. *International Journal of Solids and Structures*. 41(9-10):225.۷۶-۹
- [9] Cecchi, A. Sab, K. 2007. A homogenized Reissner-Mindlin model for orthotropic periodic plates: Application to brickwork panels. *International Journal of Solids and Structures*. 44(18-19):6055-79.
- [10] ABAQUS Ins. 2011. *ABAQUS Theory User Manual*, V 6.11.
- [11] Committee ACI. 1995. *Building code requirements for structural concrete : (ACI 318-95) ; and commentary (ACI 318R-95)*: Farmington Hills, MI : American Concrete Institute.
- [12] GB-50010. 2002. *Code for Design of Concrete Structures*, China Building Industry press, Beijing.
- [13] Chen, WF. 1982. *Plasticity in reinforced concrete*: Mc Graw-HILL.

1 Damage parameter

2 Recovery