

مدل سازی عددی دیوار مصالح بنایی تحت بارگذاری چرخه‌ای داخل صفحه با استفاده از مدل پلاستیسیته بتن آسیب دیده و بررسی اثر پارامترهای مختلف در آن

امیرحسین کریمی *

دکتری عمران، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

محمد سعید کریمی

استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

علی خیرالدین

استاد، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

عبدالعظیم امیر شاه کریمی

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

چکیده

در این تحقیق بررسی پارامتریک بر روی معیار پلاستیسیته بتن آسیب دیده که برای مدل سازی بتن و سایر مواد ترد و شکننده در نرم افزار آباکوس می‌باشد انجام شده است. از این معیار برای شبیه سازی دیوار مصالح بنایی تحت بارگذاری چرخه‌ای داخل صفحه استفاده شده است. در ابتدا معادلات این روش ارائه شده و سپس از این معیار برای شبیه سازی یک دیوار مصالح بنایی که نتایج آزمایشگاهی آن در دسترس می‌باشد استفاده شده است. ابعاد دیوار بررسی شده $1720 \times 1500 \times 195$ میلی متر (ضخامت \times ارتفاع \times طول) بوده که تحت بارگذاری چرخه‌ای داخل صفحه قرار گرفته است. اثر پارامترهایی همچون زاویه اتساع، کرنش ترک خورگی، آسیب، بازیابی سختی، تنش ترک خورگی و غیره بررسی شده و نحوه تأثیر هر یک از آنها در منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان دیوار مصالح بنایی ارائه شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که معیار پلاستیسیته بتن آسیب دیده قادر به شبیه سازی دیوار مصالح بنایی تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد. بررسی پارامتریک انجام شده درک قابل توجهی در زمینه تأثیر هر کدام از آنها در منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان حاصل از شبیه سازی عددی ارائه می‌دهد همچنین این معیار قادر به شبیه سازی اثر جمع شدگی (بینچینگ) در منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان نمی‌باشد و برای مواردی که اثر جمع شدگی در آن زیاد نمی‌باشد قابل اطمینان می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدل پلاستیسیته بتن آسیب دیده، دیوار مصالح بنایی، مدل سازی عددی، بارگذاری چرخه‌ای، رفتار غیر خطی.

* نویسنده مسئول: a_karimi_sazeh@yahoo.com

۱- مقدمه

آنالیز عددی با مقادیر به دست آمده از حس گرهای الکترونیکی مقایسه گردید و نشان داد که مقادیر به دست آمده از تحلیل انطباق خوبی با اعداد ثبت شده توسط حس گرها دارد. در تحقیقات دیگر [۱۵-۵] نیز از نرم افزارهای مختلف و همچنین معیارهای مختلف برای مدل سازی عددی سازه‌ها استفاده شده است. در هیچ کدام از تحقیقات ارائه شده در مورد جزئیات مدل سازی و همچنین در مورد نحوه تأثیر پارامترهای مدل سازی توضیحات ارائه نشده است. بنابراین شناختی در مورد نحوه تأثیر پارامترها بر مدل سازی وجود ندارد. در این تحقیق تلاش شده تا نحوه عملکرد معیار پلاستیسیته بتن آسیب دیده که برای شبیه سازی ماده بتن و همچنین ماده مصالح بنایی به کار می‌رود مورد بررسی قرار گیرد.

در این تحقیق یک دیوار مصالح بنایی به ابعاد $1720 \times 1500 \times 195$ میلی‌متر (ضخامت \times ارتفاع \times طول) در نرم افزار آباکوس به روش ماکرو مدل سازی شده است. برای مدل سازی مصالح بنایی از ماده بتن استفاده شده است. معیار پلاستیسیته بتن آسیب دیده معیاری است که برای شبیه سازی ماده مصالح بنایی به کار گرفته شده است. در این تحقیق ابتدا تابع تسلیم و پتانسیل جریان مربوط به معیار پلاستیسیته بتن آسیب دیده معرفی شده و پس از کالیبراسیون مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی اثر پارامترهای مختلف که در تعریف معیار پیشنهادی استفاده شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته‌اند و اثر هر کدام از آنها به طور مجزا در نمودار چرخه‌ای بار-تغییر مکان بررسی شده است.

۲- معیار پلاستیسیته بتن آسیب دیده

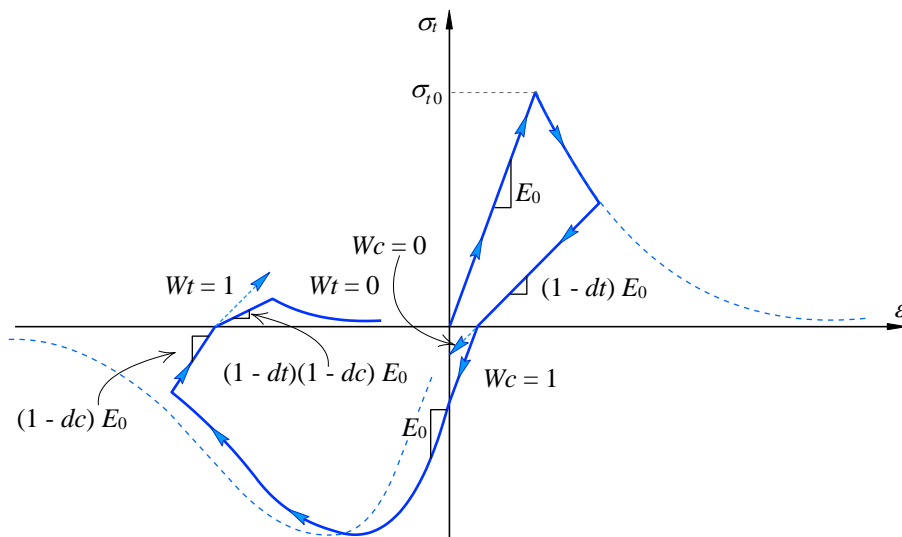
معیار پلاستیسیته بتن آسیب دیده برای مدل سازی دیوار مورد استفاده قرار گرفته است. این معیار یک مدل خسارت بر پایه پلاستیسیته برای بتن است. در این مدل فرض می‌شود که مهم‌ترین مکانیسم‌های خرابی برای بتن ترک خوردن در کشش و خرد شدن در فشار باشد. در این معیار فرض می‌شود که پاسخ بتن تحت اثر کشش و فشار تک محوری با استفاده از پلاستیسیته مبتنی بر خسارت تعریف شود. تحت اثر کشش تک محوری پاسخ تنش - کرنش تا رسیدن به تنش خرابی σ_{t0} از یک رابطه خطی پیروی می‌کند. تنش خرابی متناظر با آغاز ترک‌های ریز در بتن است، فراتر از تنش خرابی، تشکیل ترک‌های ریز به طور ماکروسکوپی با استفاده از پاسخ تنش - کرنش نرم شونده تعریف می‌شود. هنگامی

شبیه سازی‌های عددی اطلاعات قابل توجهی در مورد عملکرد سازه‌ها و عناصر سازه‌ای ارائه می‌دهند و همچنین باعث کاهش هزینه‌ها و سرعت عمل در تصمیم سازی‌ها می‌گردند. امروزه رفتار مواد مختلف مانند فولاد، آلومینیوم، بتن، سرامیک و غیره به راحتی در نرم افزارهای مختلف اجزاء محدود مدل سازی می‌شود. یکی از موادی که کاربرد زیادی در مهندسی عمران دارد مصالح بنایی می‌باشد که بسیاری از بناهای موجود در کشور و همچنین بناهای تاریخی کشور از این ماده ساخته شده‌اند. یکی از روش‌های مدل سازی این ماده پرمصرف در ساختمان‌ها استفاده از یک ماده ترد و شکننده که رفتاری مشابه آن دارد می‌باشد. بتن ماده‌ای است که از آن برای شبیه سازی ماده مصالح بنایی استفاده می‌شود. در تحقیقات مختلف از این ماده برای شبیه سازی مصالح بنایی استفاده شده است و همچنین در مطالعات مختلف شبیه سازی‌های عددی مورد استفاده قرار گرفته است.

در سال ۲۰۱۵ یکرنگ‌نیا و آقابابایی [۱] با استفاده از نرم افزار آباکوس و با استفاده از ماده بتن حرم مطهر حضرت عسگری را که توسط تروریست‌ها تخریب شده بود مدل سازی کردند و با استفاده از اطلاعات به دست آمده طرح‌های مختلف را برای مقاوم سازی بنا ارائه کردند. در سال ۲۰۱۶ کریمی و همکاران [۲] با استفاده از معیار پلاستیسیته بتن آسیب دیده مقبره حضرت دانیال نبی را در نرم افزار آباکوس مدل سازی کردند. در تحقیق ایشان مقادیر حداکثر تنش‌های فشاری و کششی ایجاد شده در بنا و همچنین محل وقوع آن‌ها به دست آمد. این تحقیق نشان داد که سازه نیروهای ثقیلی ناشی از وزن خود بنا و بارهای زنده اعمالی را به خوبی تحمل می‌کند اما در برابر نیروهای لرزه‌ای اعمال شده به آن بسیار ضعیف بوده و دچار تخریب گسترده و غیر قابل جبران می‌گردد. در سال ۲۰۱۱ بتی و همکاران [۳] رفتار استاتیکی و لرزه‌ای کلیسای سانتا ماریا را مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق ارائه شده توسط ایشان سازه تحت بارگذاری‌های مختلف در نرم افزار اجزاء محدود انسیس مدل سازی شد و مقدار تنش‌ها و کرنش‌ها در نقاط مختلف سازه به دست آمد. در پایان طرح‌های مختلف برای مقاوم سازی بنا مورد بررسی قرار گرفت. بیندا و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۷ به بررسی رفتار قصر سلطنتی سن ویتال در ایتالیا پرداختند. برای مدل سازی از نرم افزار آباکوس استفاده کردند. نتایج به دست آمده از

ترک‌ها، سختی فشاری مقدار قبلی خود را باز می‌یابد. از سوی دیگر هنگامی که بار از فشاری به کششی تغییر می‌کند به دلیل تشکیل ترک‌های ریز ناشی از خرد شدگی در بتن، سختی کششی مقدار قبلی خود را باز نمی‌یابد. این رفتار بتن که متناظر با W_c و $W_t = 0$ است در شکل (۱) نشان داده شده است. با استفاده از این روش مدل‌سازی رفتار بتن به صورت مستقل از آرماتور در نظر گرفته می‌شود. 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 می‌آید. پارامترهای این معیار در بخش-های بعدی ارائه شده است.

که بتن از هر نقطه بر روی شاخه نرم شونده کرنش در منحنی تنش-کرنش باربرداری می‌شود پاسخ باربرداری با کاهش سختی الاستیک بتن تعریف می‌شود. کاهش سختی الاستیک با استفاده از دو پارامتر خسارت در کشش (d_t) و خسارت در فشار (d_c) مشخص می‌شود، این پارامترهای خسارت توابعی از کرنش‌های پلاستیک هستند. پارامترهای خسارت می‌توانند 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 جنبه‌های مهم پاسخ مکانیکی بتن تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای است، مشاهدات تجربی در مصالحی مانند بتن نشان می‌دهند، هنگامی که بار از حالت کششی به حالت فشاری تغییر می‌کند در اثر بسته شدن



شکل ۱- چرخه بارگذاری تک محوری برای مدل پلاستیسیته بتن آسیب دیده

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

در رابطه فوق، P : تنش هیدرواستاتیک، q : تنش انحرافی مایسز که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

در رابطه فوق S بردار تنش انحرافی می‌باشد. علامت $(:)$ در رابطه فوق یعنی اینکه عملیات ضرب بر روی تمامی مؤلفه‌های تانسور تنش انحرافی انجام می‌شود. سایر ترم‌های موجود در تابع پتانسیل جریان در ادامه ارائه شده است. زاویه اتساع در شکل (۲) و ترم خروج از مرکزیت در شکل (۳) نشان داده شده است.

۳- تابع پتانسیل جریان

مدل ماده‌ای استفاده شده در این تحقیق، ترک خوردگی در کشش و خردشدگی در فشار را با استفاده از قواعد پلاستیسیته شبیه سازی می‌کند. مدل ماده‌ای در این حالت از ترکیب پلاستیسیته سخت شونده چندگانه غیر متحد برای توصیف آسیب برگشت ناپذیر که در فرآیند ترک خوردگی ایجاد می‌شود تشکیل شده است. این مدل امکان بازیافت اثرات سختی را در بارگذاری‌های چرخه‌ای (سیکلی) دارد. پتانسیل جریانی که برای این مدل در نظر گرفته می‌شود تابع هیروبولیک دراکر-پراگر می‌باشد که در معادله (۱) ارائه شده است. این تابع در فضای فشار هیدرواستاتیک-تنش انحرافی مایسز تعریف می‌شود [۱۴].

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

$$\alpha = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}{2(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\sigma_c(\epsilon_c^{pl})}{\sigma_t(\epsilon_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{3(1 - k_c)}{2k_c - 1} \quad (6)$$

ترم‌های موجود در روابط بالا به صورت زیر تعریف شده‌اند.

σ_{max} : حداکثر تنش موجود، شکل سطح تسلیم در هر نقطه به وضعیت تنش آن نقطه بستگی دارد. وجود این پارامتر در تابع تسلیم این مسأله را تأیید می‌کند.

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

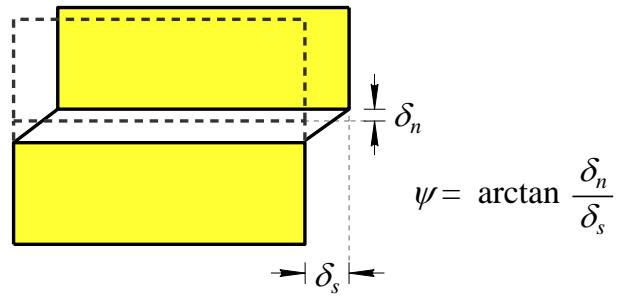
k_c : نسبت ثابت دوم تانسور تنش روی نصف‌النهار کششی به مقدار همین پارامتر روی نصف‌النهار فشاری، این پارامتر که می‌تواند بین ۰/۵ تا ۱ باشد، در واقع شکل مقطع عرضی سطوح بارگذاری را تعیین می‌کند. هر چه مقدار این پارامتر بزرگ‌تر باشد، شکل مقطع عرضی به دایره نزدیک‌تر خواهد شد. اگر مقدار این پارامتر برابر با یک در نظر گرفته شود، شکل مقطع عرضی سطح تسلیم شبیه دراکر-پراگر خواهد شد.

$\sigma_c(\epsilon_c^{pl})$ و $\sigma_t(\epsilon_t^{pl})$: تنش تک محوره در کرنش پلاستیک موجود، مقدار تنش معادل کرنش پلاستیک فشاری و کششی موجود از طریق تابع جدولی که کاربر معرفی کرده، تعیین می‌شوند.

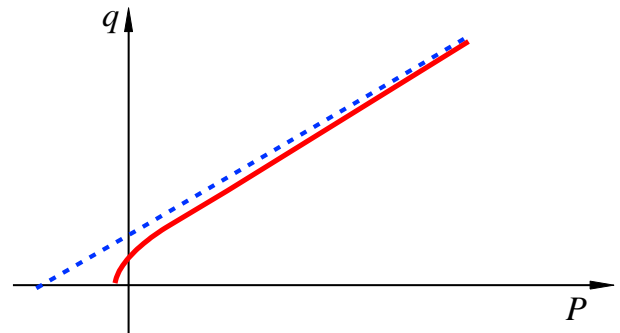
۵- مشخصات دیوار مورد مطالعه

اندازه اسمی نمونه $195 \times 150 \times 1720$ (ضخامت \times عرض \times طول) میلی متر می‌باشد. طرح دیوار در شکل (۴) نشان داده شده است. دیوار با آجررسی توپر (به ابعاد $195 \times 195 \times 45$ میلی متر) و ملات گچ و خاک ساخته شده است، [۲]. ضخامت درز ملات ۱۵ میلی متر می‌باشد.

آزمایش بر روی دیوار در آزمایشگاه سازه دانشگاه سمنان انجام شده است، [۲]. برخی از مشخصات به دست آمده از آزمایش بر روی نمونه‌ها در آزمایشگاه در جدول شماره (۱) ارائه شده است. یک‌سری از آزمایشات نیز برای به دست آوردن مشخصات مصالح انجام شده که نتایج آنها در جدول شماره (۱) ارائه شده است.



شکل ۲- زاویه اتساع



شکل ۳- اثر خروج از مرکزیت

در رابطه (۱)، ψ ، زاویه اتساع می‌باشد که مقدار بلندشدگی در اثر جابجایی برشی را مشخص می‌کند، شکل (۲). در واقع این پدیده اثر زبری سطح است که به این صورت نمایان می‌شود. بایستی توجه شود که مقدار تورم بستگی به مقدار تنش محوری دارد و با افزایش تنش محوری، زاویه تورم کم می‌شود. همچنین با شروع به لغزش، به علت صاف شدن سطوح، زاویه تورم به صفر میل می‌کند.

e ، معرف خروج از مرکزیت می‌باشد. تابع پتانسیل جریان در ابتدا محور هیدرواستاتیک را با زاویه 90° درجه قطع می‌کند و در ادامه شیب آن شروع به کاهش می‌کند تا به مقدار ψ برسد، شکل (۳). بنابراین در قسمت اول این تابع به یک منحنی تبدیل خواهد شد.

σ_{t0} : تنش ترک خوردگی می‌باشد. این پارامتر تنش ترک خوردگی در حالت کشش یک محوره را معرفی می‌کند.

۴- تابع تسلیم

تابع تسلیم پیشنهادی لی و فنوس در این مدل استفاده شده است [۱۱]. این تابع در رابطه زیر ارائه شده است.

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



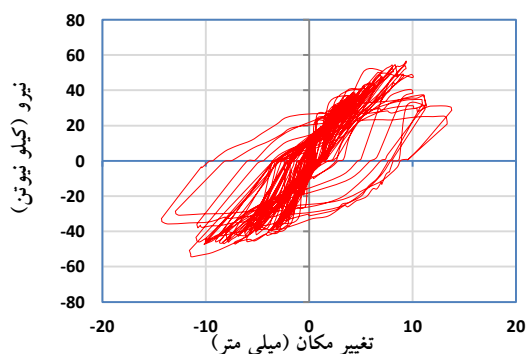
شکل ۴- طرح دیوار، الف) ابعاد دیوار بر حسب میلی متر، ب) هندسه دیوار و شرایط مرزی در آزمایشگاه، ج) دیوار در پایان آزمایش

جدول ۱- مشخصات مصالح به کار گرفته شده در دیوار

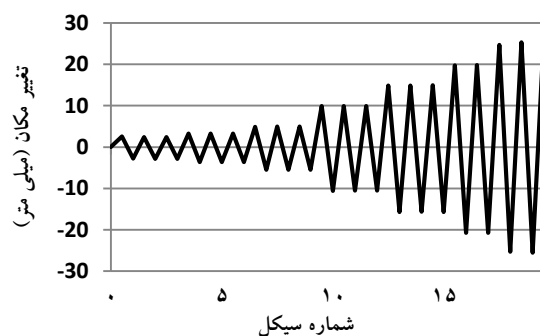
| مشخصات | میانگین | انحراف استاندارد |
|---|---------|------------------|
| مقاومت فشاری ملات (MPa) | ۵/۱۳ | ۱/۵۳ |
| مقاومت فشاری آجر (MPa) | ۲۰/۷ | ۶/۸۶ |
| مقاومت فشاری منشور مصالح بنایی (منشور ساخته شده از پنج ردیف آجر چینی) (MPa) | ۴/۱۱ | ۰/۶۷ |
| مدول الاستیسیته (MPa) | ۱۳۰ | |
| ضریب پواسن | ۰/۱۵ | |

تجهیزات آزمایش که شامل نمونه، سیستم بارگذاری و قاب صلب می باشد در شکل (۴-ب) نشان داده شده است. در شکل (۴-ج) وضعیت دیوار در پایان آزمایش نشان داده شده است. بار چرخه ای جانبی با استفاده از دو جک هیدرولیکی ۱۰۰ کیلو نیوتنی به دو طرف نمونه در بالای دیوار اعمال شده است. هر سیکل بارگذاری شامل دو نیم سیکل می باشد. نیم سیکل اول از سمت راست به چپ و نیم سیکل دوم از سمت چپ به راست می باشد. با استفاده از دو دستگاه اندازه گیری تغییر مکان (LVDT)، جابجایی های ایجاد شده در اثر بارگذاری اندازه گیری شده و به وسیله یک دستگاه اتوماتیک ثبت شده است. قبل از اعمال بار جانبی یک پیش فشار برای شبیه سازی بار

ثقلی با استفاده از یک جک هیدرولیکی ۲۰۰ کیلو نیوتنی به بالای دیوار و به صورت یکنواخت اعمال گردیده است. بارگذاری دیوار به این صورت است که ابتدا یک پیش فشار به مقدار ۵۸ کیلو نیوتن به صورت کنترل نیرو بر تیر صلب ناودانی شکل که به صورت وارونه بر روی دیوار قرار گرفته به صورت یکنواخت اعمال گردیده سپس با ثابت ماندن مقدار پیش فشار بار جانبی به صورت چرخشی (سیکلی) به تیر صلب فلزی اعمال شده است (به صورت جابجایی کنترل). بار پروتکل جانبی که به نمونه اعمال شده در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. نمودار چرخه ای بار-تغییر مکان به دست آمده از آزمایش در شکل (۵-ب) نشان داده شده است.



الف) پروتکل بارگذاری



ب) نمودار چرخه ای بار-تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی

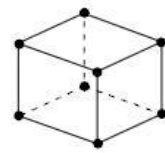
۶- شبکه بندی

نیروی برشی کمتری برای رسیدن به اتساع مورد نظر نیاز دارد و هرچه زاویه اتساع بیشتر باشد برای رسیدن به اتساع مورد نظر به نیروی بیشتری نیاز می‌باشد. بنابراین هرچه زاویه اتساع بیشتر باشد در منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان مقدار نیروی بیشتری مشاهده می‌شود و هرچه این مقدار کوچک‌تر باشد در منحنی بار-تغییر مکان به ازای یک تغییر شکل یکسان نیروی کمتری مشاهده می‌شود. هر چقدر رفتار برشی تر باشد این پارامتر اثر خود را بیشتر نشان می‌دهد.

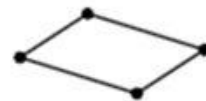
در شکل (۸)، اثر کرنش ترک خوردگی نشان داده شده است. در کرنش ترک خوردگی کوچک فرآیند حل متوقف می‌گردد و در مقادیر بزرگ نمودار چرخه‌ای بار-تغییر مکان وارد فاز کاهش مقاومت و سختی نمی‌شود و ترک خوردگی به درستی مدل سازی نشده و باعث دور شدن نمودار عددی و آزمایشگاهی از یکدیگر می‌شود. وقتی که کرنش ترک خوردگی به میزان کوچکی در نظر گرفته شود، دیوار در کرنش‌های کم دچار ترک خوردگی می‌شود. ترک‌های ایجاد شده ماتریس سختی را به هم ریخته و فرآیند حل متوقف می‌گردد. در حقیقت دیوار کرنش‌های بزرگ‌تر را نمی‌تواند تجربه کند و بنابراین دیوار باربری خود را از دست می‌دهد. هر چقدر میزان کرنش ترک خوردگی بزرگ‌تر در نظر گرفته شود دیوار در اثر تغییر شکل‌های اعمالی دچار ترک خوردگی نمی‌شود و بنابراین تغییر شکل‌های بیشتری را برای رسیدن به ترک خوردگی تحمل می‌کند.

در شکل (۹)، اثر تنش ترک خوردگی در منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان نشان داده شده است. هر چقدر تنش ترک خوردگی افزایش پیدا کند مقدار بار در منحنی چرخه‌ای نیز افزایش پیدا خواهد کرد. هر چقدر تنش ترک خوردگی کم باشد دیوار در تنش‌های کوچک‌تر دچار شکست می‌شود و بنابراین تنش‌های بزرگ‌تر را تحمل نمی‌کند و هرچه این پارامتر بزرگ‌تر در نظر گرفته شود دیوار در اثر تنش‌های بزرگ‌تر دچار شکست می‌شود و بنابراین در منحنی بار-تغییر مکان مقدار بار بیشتری ثبت می‌شود. در شکل (۱۰)، اثر پارامتر σ_{b0}/σ_{c0} بر روی نمودار چرخه‌ای بار-تغییر مکان ارائه شده است. وقتی این پارامتر کوچک در نظر گرفته شود، آنالیز متوقف می‌گردد. مقادیر بزرگ این پارامتر اثر قابل توجهی بر منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان نمی‌گذارد. مقدار این پارامتر بین ۱ تا ۱/۲۷ می‌باشد و توصیه نرم افزار عدد ۱/۱۶ می‌باشد.

برای شبکه بندی مدل از المان شش وجهی ده گرهی استفاده شده است. این المان لاگرانژی، از نوع مکعبی (Solid)، هشت گرهی و در هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی می‌باشد. اسم این المان در نرم افزار C3D8R می‌باشد، شکل (۶-الف). برای مدل سازی تیرهای فلزی که به صورت صلب فرض شده‌اند از المان R3D4 استفاده شده است، شکل (۶-ب). این المان که برای شبیه سازی سه بعدی قطعات صلب استفاده می‌شود، دارای چهار گره و در هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی می‌باشد.



الف) المان C3D8R



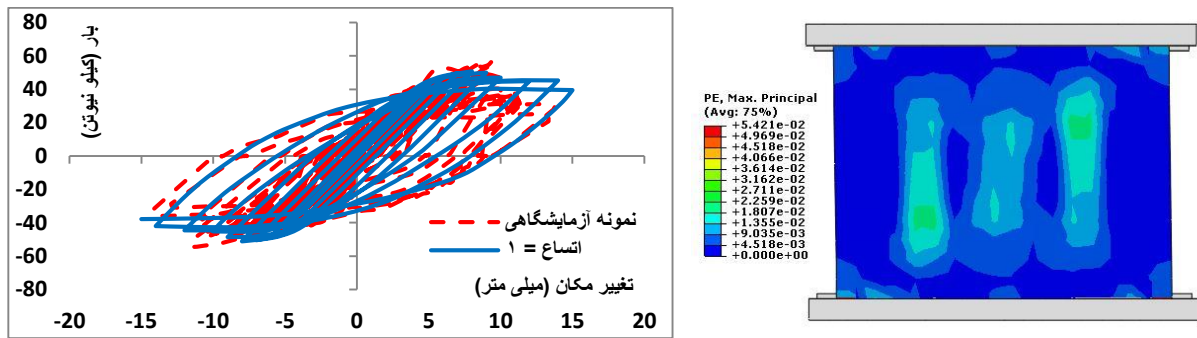
ب) المان R3D4

شکل ۶- المان‌های استفاده شده در مدل سازی

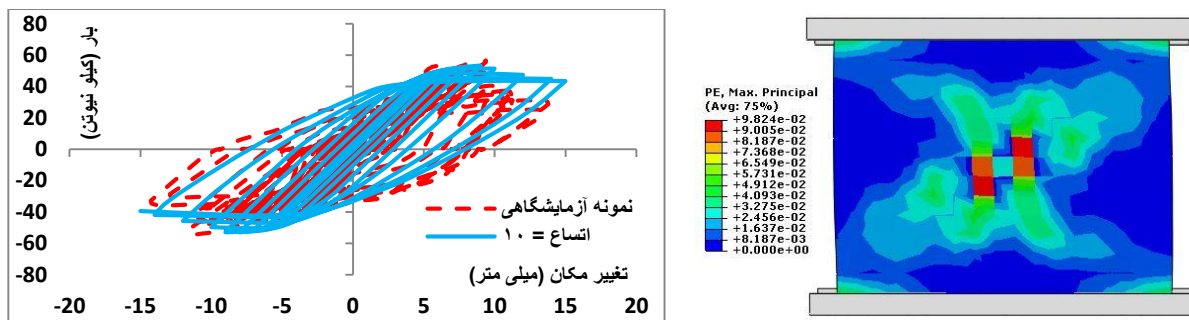
۷- نتایج آنالیز و بررسی پارامترها

در این قسمت پارامترهای مختلف بررسی شده‌اند و اثر آنها بر روی نمودار چرخه‌ای بار-تغییر مکان و همچنین کانتور کرنش نشان داده شده است. پارامترهای زاویه اتساع، کرنش ترک خوردگی، تنش ترک خوردگی، σ_{b0}/σ_{c0} ، آسیب، بازیابی سختی (ریکاوری) و KC بررسی شده است. بعضی از پارامترها خارج از بازه‌ای که نرم افزار ارائه کرده نیز مقدار دهی شده‌اند تا اثر آنها به صورت شفاف‌تری نشان داده شود.

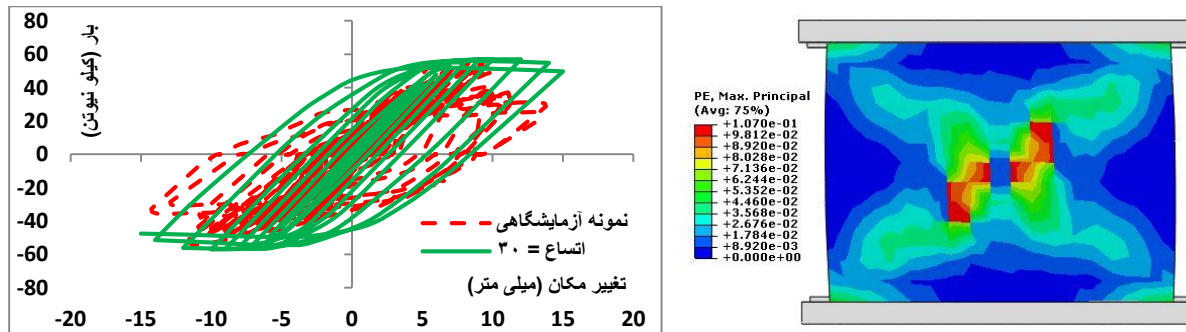
در شکل (۷)، اثر پارامتر زاویه اتساع ارائه شده است. اثر زاویه اتساع به این صورت است که هر چه زاویه اتساع بیشتر شود، دیوار باربری بیشتری از خود نشان می‌دهد و انطباق نمودار آزمایشگاهی و آنالیز عددی کمتر می‌شود. وقتی که زاویه اتساع کوچک باشد نمودار چرخه‌ای بار-تغییر مکان در وضعیت بابر داری به صورت منحنی می‌باشد و وقتی که زاویه اتساع بزرگ‌تر می‌شود این حالت منحنی به حالت خطی تبدیل می‌شود. زاویه اتساع میزان بلند شدگی در اثر تغییر شکل برشی می‌باشد. هر چقدر زاویه اتساع کم باشد به



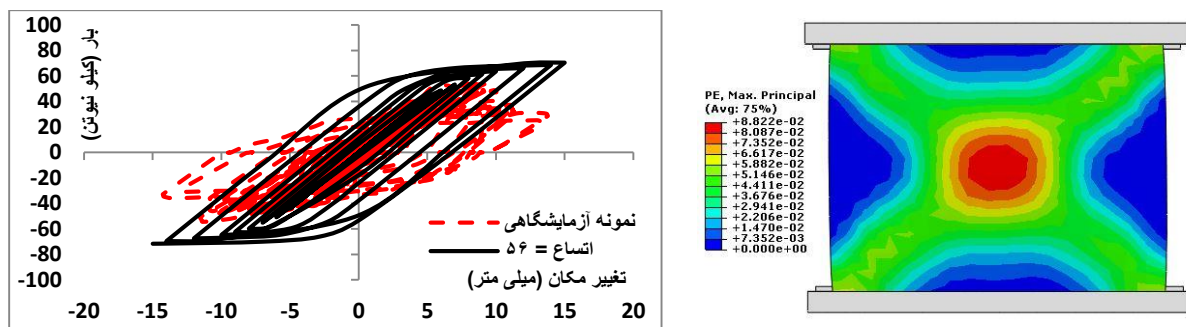
الف) مقدار زاویه اتساع یک درجه



ب) مقدار زاویه اتساع ده درجه

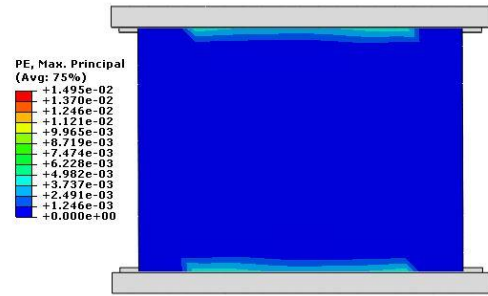
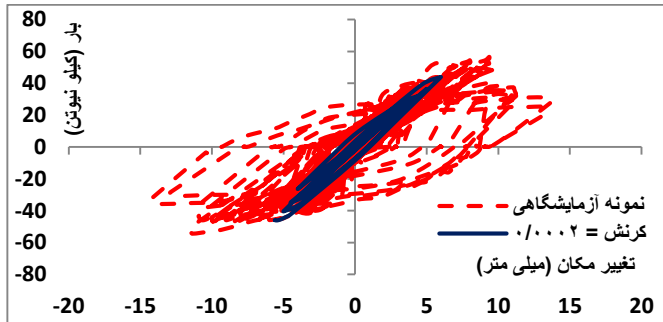


ج) مقدار زاویه اتساع سی درجه

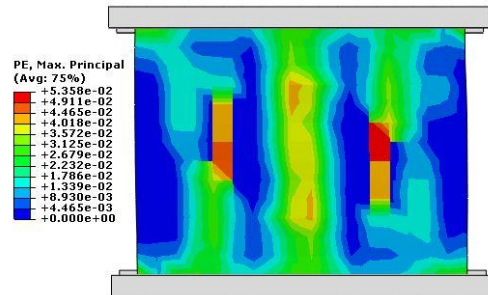
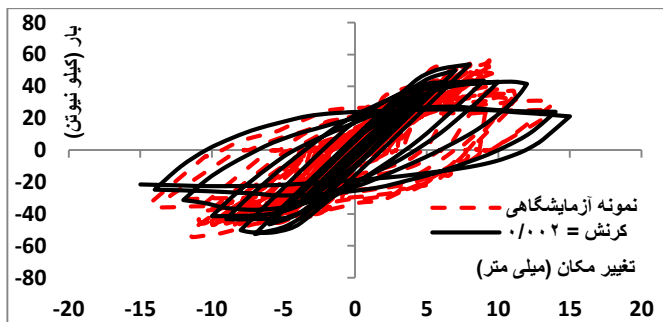


د) مقدار زاویه اتساع پنجاه و شش درجه

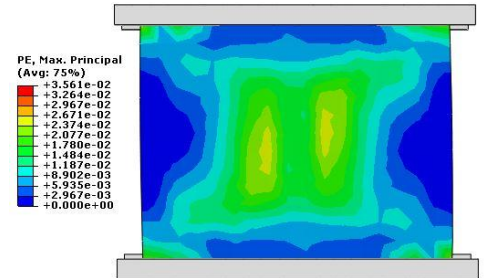
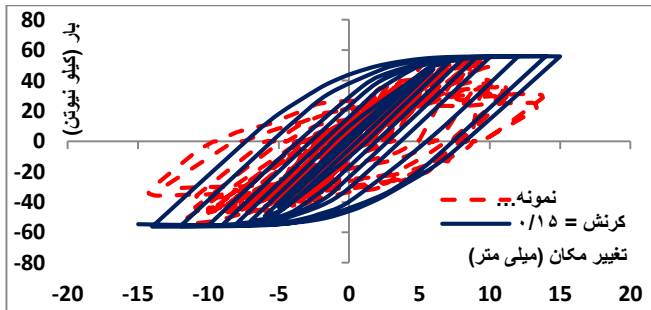
شکل ۷- اثر پارامتر زاویه اتساع بر روی منحنی چرخه ای بار-تغییر مکان



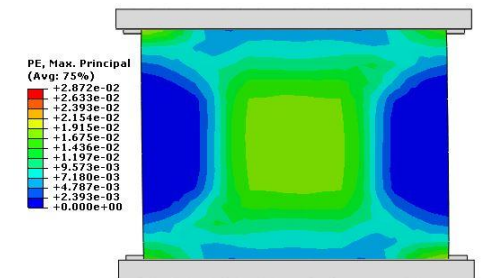
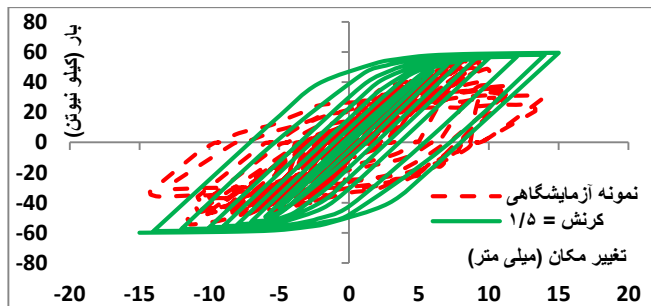
الف) کرنش برابر با ۰/۰۰۰۲



ب) کرنش برابر با ۰/۰۰۲

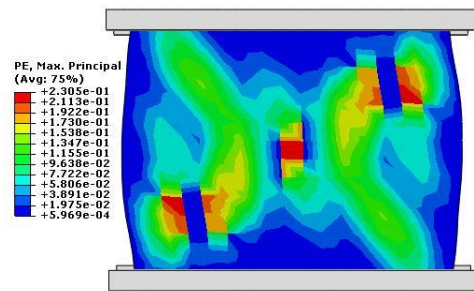
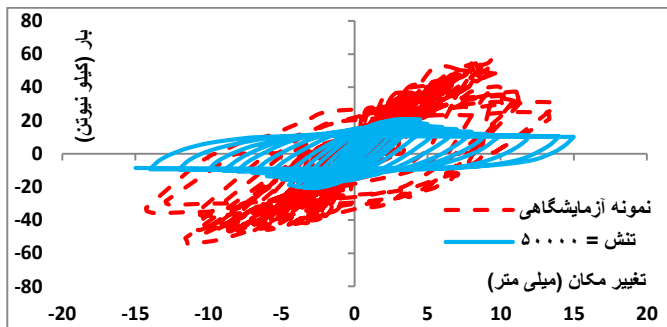


ج) کرنش برابر با ۰/۱۵

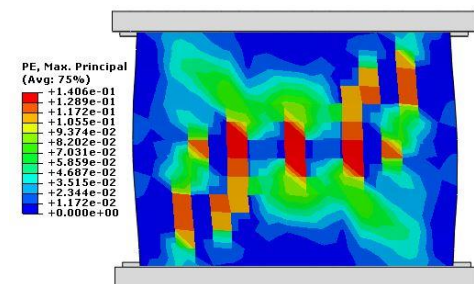
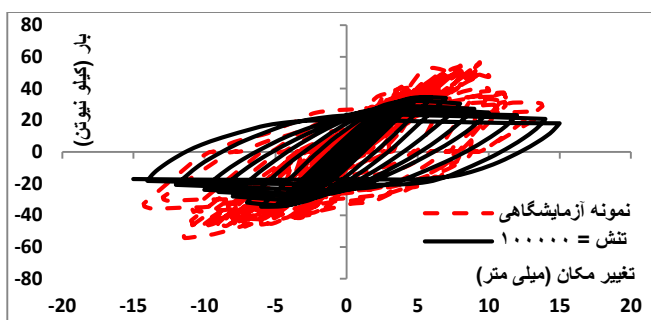


د) کرنش برابر با ۱/۵

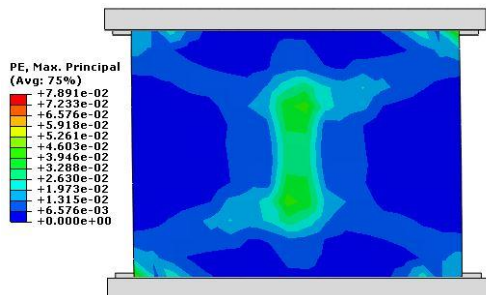
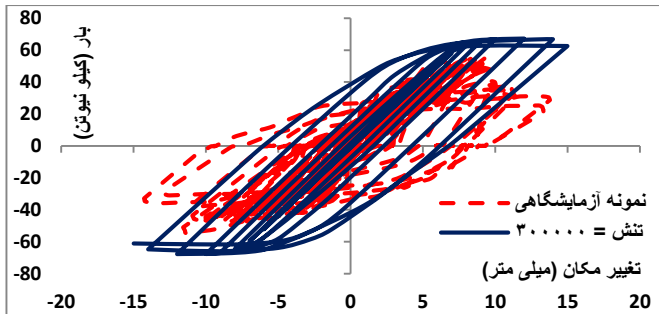
شکل ۸- بررسی اثر کرنش ترک خوردگی بر روی منحنی چرخه ای بار-تغییر مکان



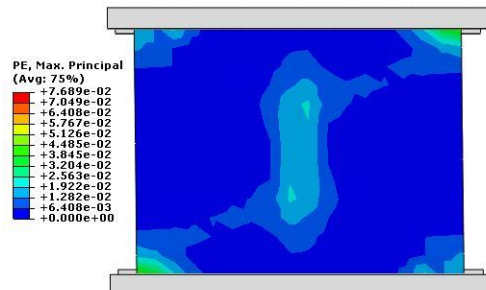
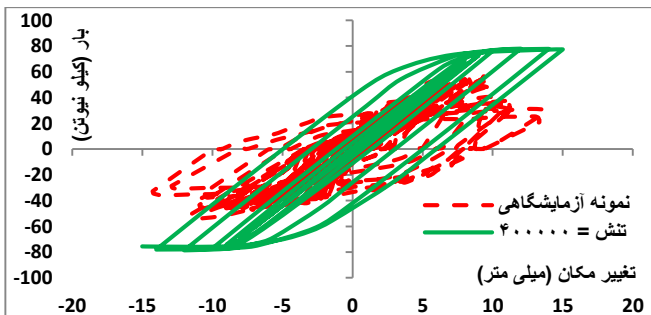
الف) تنش ترک خوردگی برابر با ۵۰ کیلو پاسکال



ب) تنش ترک خوردگی برابر با ۱۰۰ کیلو پاسکال

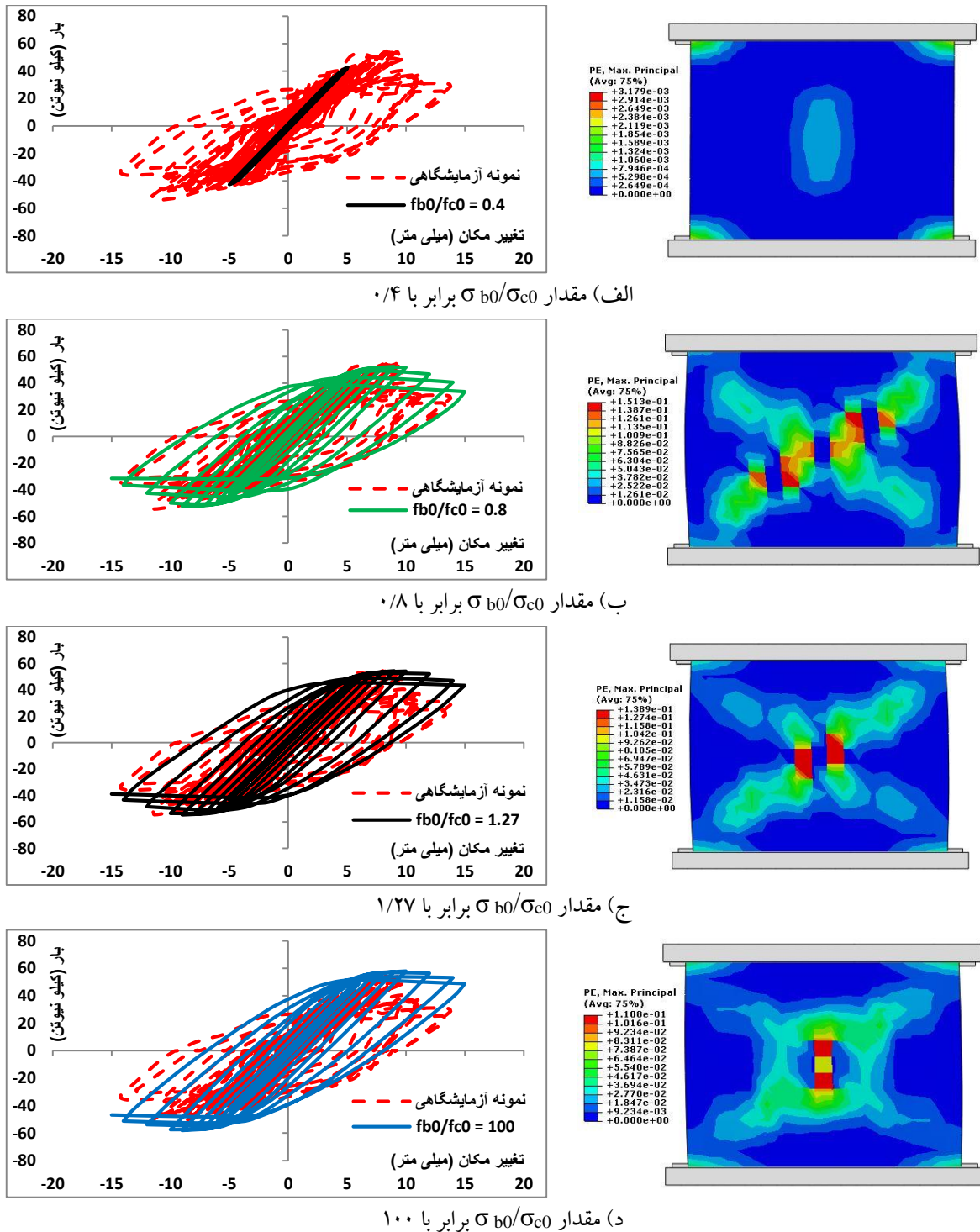


ج) تنش ترک خوردگی برابر با ۳۰۰ کیلو پاسکال



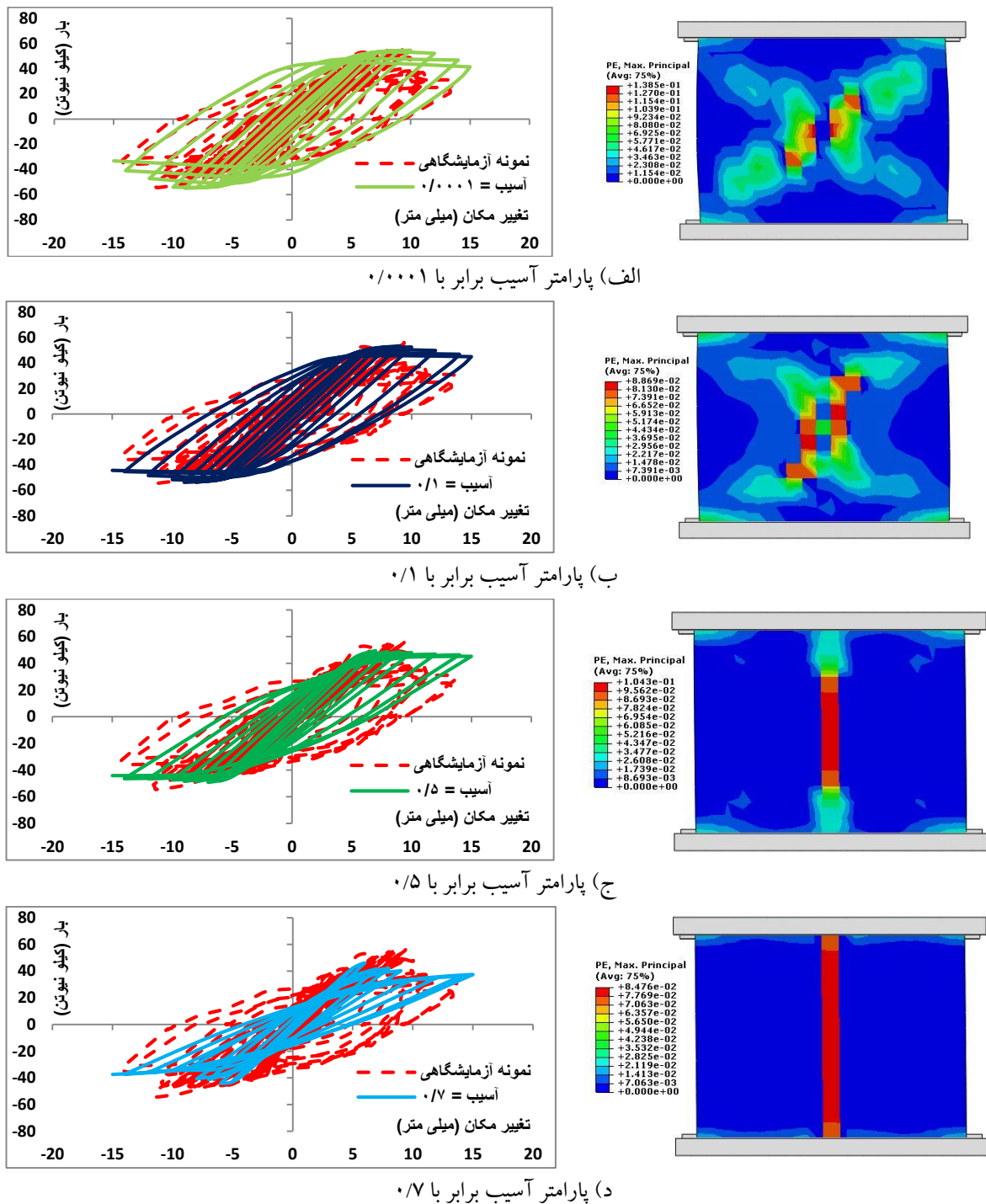
د) تنش ترک خوردگی برابر با ۴۰۰ کیلو پاسکال

شکل ۹- بررسی اثر تنش ترک خوردگی بر روی منحنی چرخه ای بار-تغییر مکان



شکل ۱۰- بررسی اثر σ_{b0}/σ_{c0} بر روی منحنی چرخه ای بار-تغییر مکان

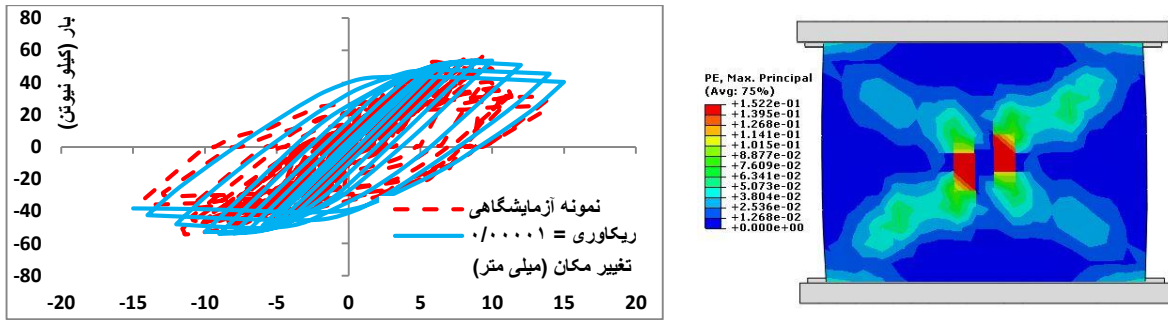
در شکل (۱۱) اثر پارامتر آسیب بر روی منحنی چرخه ای بار-تغییر مکان ارائه شده است. مقدار این پارامتر بین صفر تا یک می باشد. هر چقدر این پارامتر به عدد یک نزدیک تر باشد شیب منحنی چرخه ای در وضعیت باربرداری کمتر می شود. پارامتر آسیب در مدل سازی بارگذاری چرخه ای بسیار مهم و تأثیرگذار می باشد. مقدار صفر این پارامتر مبین این است که سختی الاستیک کاهش نیافته و مقدار یک آن نشان دهنده از دست دادن کامل سختی می باشد. همین طور که در شکل (۱۰) مشاهده می شود هرچقدر این عدد به صفر نزدیک تر باشد، شکل (۱۰-الف) سختی ماده در هنگام باربرداری کاهش نخواهد یافت و هرچقدر مقدار این پارامتر نزدیک به یک باشد در هنگام باربرداری سختی ماده کاهش پیدا می کند.



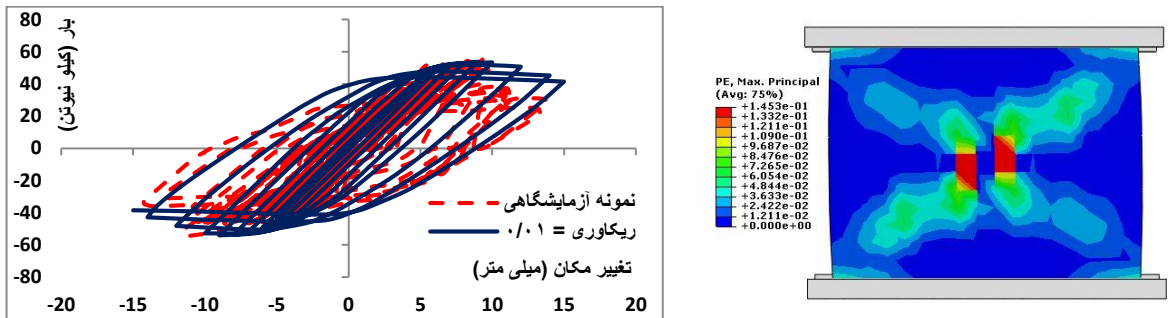
شکل ۱۱- بررسی اثر پارامتر آسیب بر روی منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان

در شکل (۱۲) اثر پارامتر بازیابی سختی (ریکاوری) ارائه شده است. مقدار این پارامتر بین صفر تا یک می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده مقادیر کوچک و بزرگ این پارامتر اثر قابل توجهی بر روی نمودار چرخه‌ای نمی‌گذارد. مقدار این پارامتر نیز بین صفر تا یک می‌باشد. مقدار یک این پارامتر بیان‌کننده این است که در هنگام تغییر جهت بارگذاری سختی ماده به کلی بازیابی شده است و مقدار صفر آن بیان‌کننده این است که در هنگام تغییر جهت بارگذاری سختی ماده به کلی از دست رفته است. بنابراین در شکل (۱۲-الف) با مقدار کم این پارامتر باید بازیابی سختی ناچیزی در منحنی چرخه‌ای مشاهده می‌شد و در شکل (۱۲-د) بازیابی سختی به کلی انجام می‌شد اما در هیچ‌کدام از این شکل‌ها، شکل (۱۲-الف تا د)، اثر قابل توجهی از بازیابی

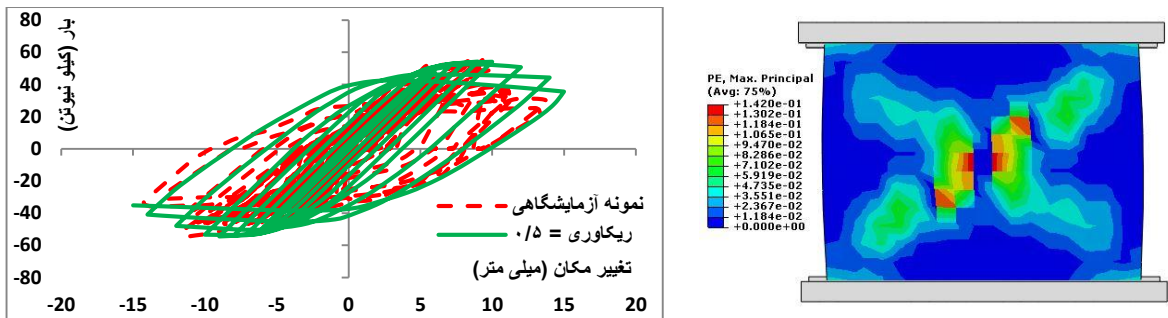
سختی مشاهده نمی شود و نشان می دهد که این پارامتر به خوبی نقطه نظرات یک محقق را بررسی نمی کند و برای اینکه اثر این پارامتر مشاهده شود باید مطالعات بیشتری انجام شود و یا تغییراتی در کد نویسی برنامه صورت پذیرد.



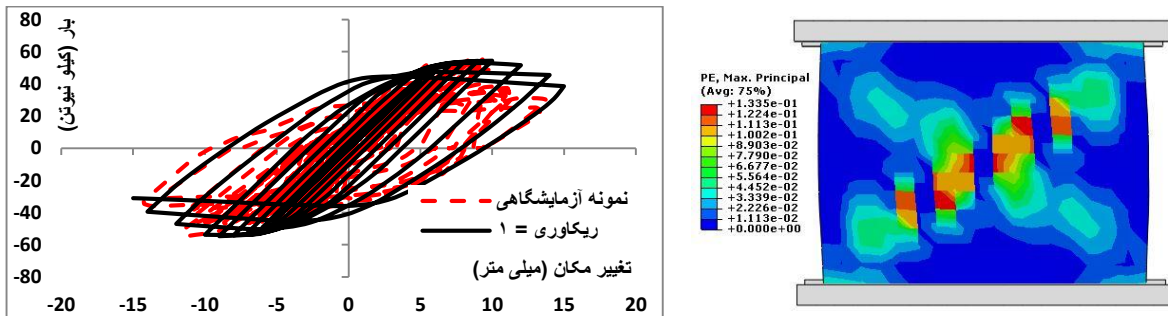
الف) پارامتر بازیابی سختی برابر با 0.00001



ب) پارامتر بازیابی سختی برابر با 0.1



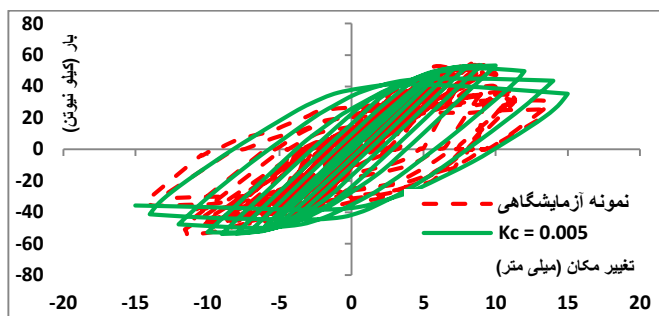
ج) پارامتر بازیابی سختی برابر با 0.5



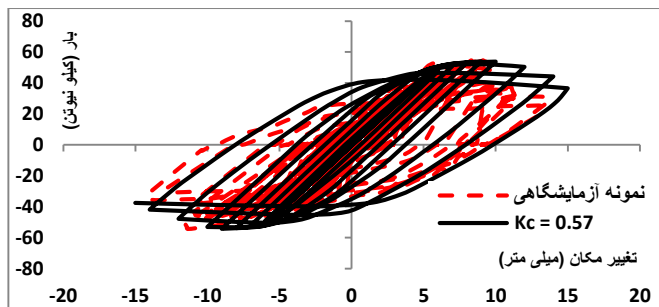
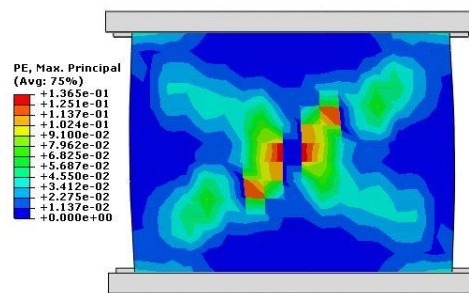
د) پارامتر بازیابی سختی برابر با 1

شکل ۱۲- اثر پارامتر بازیابی سختی (ریکاوری) بر روی منحنی چرخه ای بار-تغییر مکان

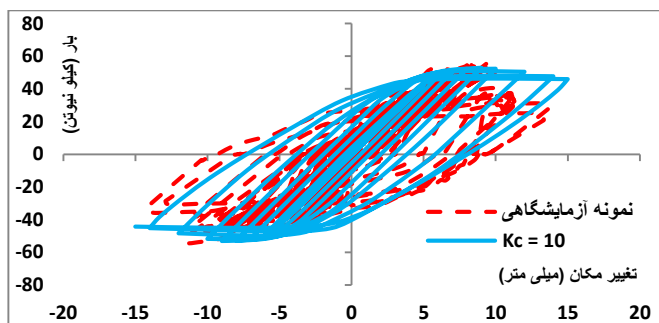
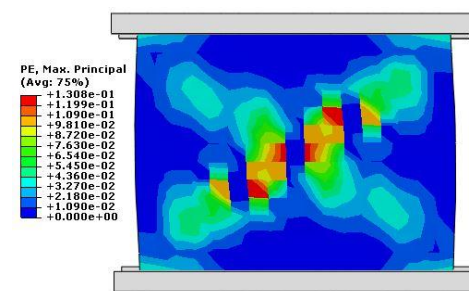
در شکل (۱۳) اثر پارامتر KC ارائه شده است. در مقادیر کوچک این پارامتر منحنی چاق می باشد و در مقادیر بزرگ آن منحنی چرخه ای به صورت جزئی لاغرتر می شود. مقدار این پارامتر بین 0.5 تا ۱ می باشد. البته در محدوده مجاز ارائه شده توسط نرم افزار تفاوت قابل ملاحظه ای مشاهده نمی شود و این نشان می دهد که این پارامتر اثر چندانی بر روی منحنی چرخه ای بار-تغییر مکان نمی گذارد.



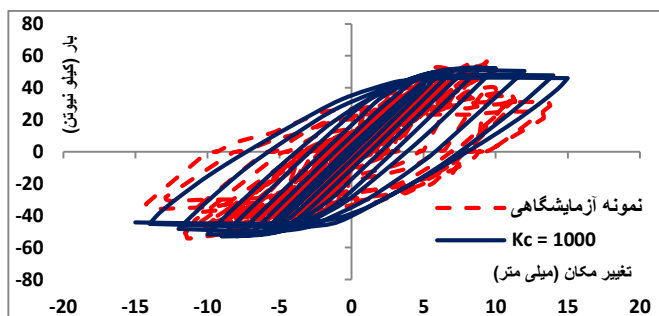
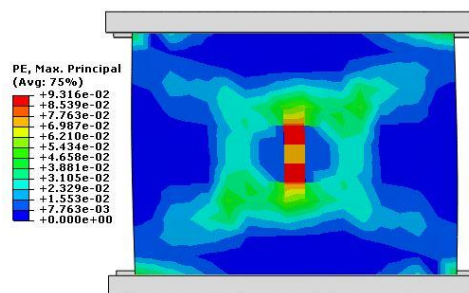
الف) Kc برابر با ۰/۰۰۵



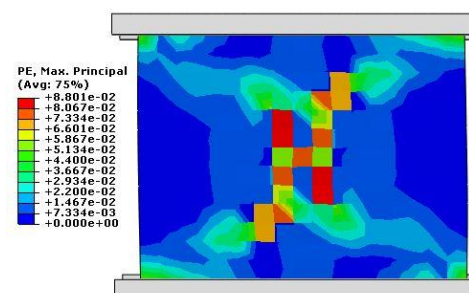
ب) Kc برابر با ۰/۵۷



ج) Kc برابر با ۱۰



د) Kc برابر با ۱۰۰۰



شکل ۱۳- بررسی اثر پارامتر Kc بر روی منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان

۸- نتیجه گیری

مصالح بنایی که نتایج آزمایشگاهی آن در دسترس بود در نرم افزار آباکوس تحت بارگذاری چرخه‌ای شبیه سازی شد. منحنی هیستریزس به دست آمده از مدل سازی عددی انطباق خوبی با نتیجه آزمایشگاهی داشت. پس از کالیبراسیون دیوار ذکر شده اثر پارامترهای مختلف در معیار پلاستیسیته بتن آسیب دیده همچون

در این تحقیق از روش شبیه سازی بتن برای مدل سازی مصالح بنایی استفاده شده است. از معیار پلاستیسیته بتن آسیب دیده که یکی از روش‌های مدل سازی ماده بتن در نرم افزار آباکوس می-باشد استفاده شد. در ابتدا این معیار تعریف گردید سپس یک دیوار

زاویه اتساع، کرنش ترک خوردگی، تنش ترک خوردگی، σ_{b0}/σ_{c0} ، پارامتر آسیب، بازیابی سختی و پارامتر Kc مورد بررسی قرار گرفت.

در این قسمت نتایج به دست آمده از آنالیز ارائه شده است.

زاویه اتساع: اثر زاویه اتساع به این صورت است که هر چه زاویه اتساع بیشتر شود، دیوار باربری بیشتری از خود نشان می دهد و انطباق نمودار آزمایشگاهی و آنالیز عددی کمتر می شود. وقتی که زاویه اتساع کوچک باشد در نمودار بار-تغییر مکان میزان بار کمتری مشاهده می شود.

کرنش ترک خوردگی: در کرنش ترک خوردگی کوچک آنالیز دیوار با شکست مواجه شده و فرآیند حل متوقف می گردد. وقتی که کرنش ترک خوردگی افزایش یابد، دیوار کاهش سختی و زوال مقاومت را تجربه نمی کند. در کرنش با مقدار بزرگ در منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان کاهش مقاومت و زوال سختی مشاهده نمی شود.

تنش ترک خوردگی: هر چه تنش ترک خوردگی کمتر باشد منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان نیز مقدار بار کمتری را نشان می دهد و هر چه مقدار این پارامتر بیشتر شود مقدار بار تحمل شده توسط دیوار افزایش می یابد. همچنین با افزایش این مقدار کاهش مقاومت و زوال سختی نیز در منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان مشاهده نمی شود.

σ_{b0}/σ_{c0} : این پارامتر اثر قابل توجهی در منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان ندارد. در مقادیر کوچک این پارامتر فرآیند حل متوقف می گردد و در مقادیر بزرگ اثر خاصی بر روی منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان نمی گذارد.

پارامتر آسیب: این پارامتر در منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان اثر قابل توجهی می گذارد. هرچقدر مقدار این پارامتر بزرگ تر باشد در هنگام باربرداری و تغییر جهت بارگذاری سختی دیوار کاهش بیشتری پیدا می کند و هرچقدر این مقدار کمتر باشد، سختی دچار تغییرات کمتر خواهد شد.

بازیابی سختی (ریکاوری): این پارامتر اثر بازیابی سختی را در هنگام تغییر جهت بارگذاری نشان می دهد. نتایج آنالیزهای مختلف نشان داد که این پارامتر اثر قابل توجهی بر منحنی چرخه‌ای بار-تغییر مکان نمی گذارد. شاید دلیل اصلی اینکه نرم افزار آباکوس

قادر به شبیه سازی اثر جمع شدگی نمی باشد قدرت پائین این نرم افزار در شبیه سازی اثر بازیابی سختی یا همان ریکاوری می باشد.

پارامتر Kc : این پارامتر اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی منحنی بار-تغییر مکان نمی گذارد و در محدوده تعیین شده توسط راهنمای نرم افزار (بین ۰/۵ تا ۱) تفاوت چندانی در منحنی مشاهده نمی شود.

۹- مراجع

[1] Yekrangnia M, Mobarake A. Restoration of Historical Al-Askari Shrine. II: Vulnerability Assessment by Numerical Simulation. Journal of Performance of Constructed Facilities. 2015;04015031.

[۲] کریمی، امیرحسین. کریمی، محمدسعید. خیرالدین، علی. شاه کریمی، عبدالعظیم امیر. تحلیل عددی لرزه‌ای سازه‌های تاریخی با در نظر گرفتن اثر چیدمان آجرچینی، مطالعه موردی " مقبره دانیال نبی ". رساله دکتری. دانشگاه سمنان. ۱۳۹۶.

[3] Betti M, Vignoli A. Numerical assessment of the static and seismic behaviour of the basilica of Santa Maria all'Impruneta (Italy). Construction and Building Materials. 2011;25(12):4308-24.

[4] Taliercio A, Binda L. The Basilica of San Vitale in Ravenna: Investigation on the current structural faults and their mid-term evolution. Journal of Cultural Heritage. 2007; 8(2):99-118.

[5] Peña F, Lourenço PB, Mendes N, Oliveira DV. Numerical models for the seismic assessment of an old masonry tower. Eng Struct. 2010;32(5):1466-78.

[6] Mistler M, Butenweg C, Meskouris K. Modelling methods of historic masonry buildings under seismic excitation. Journal of Seismology. 2006;10(4):497-510.

[7] Pegon P, Pinto AV, Gérardin M. Numerical modelling of stone-block monumental structures. Computers & Structures. 2001;79(22-25):2165-81.

[8] Ramalho MA, Taliercio A, Anzani A, Binda L, Papa E. A numerical model for the description of the nonlinear behaviour of multi-leaf masonry walls. Advances in Engineering Software. 2008;39(4):249-57.

[9] Roca P, Cervera M, Pelà L, Clemente R, Chiumenti M. Continuum FE models for the analysis of Mallorca Cathedral. Eng Struct. 2013;46:653-70.

[10] Romera LE, Hernández S, Gutierrez R. Numerical characterization of the structural behaviour of the Basilica of Pilar in Zaragoza (Spain). Part 2: Constructive process effects.

Advances in Engineering Software. 2008;39(4):315-26.

[11] Romera LE, Hernández S, Reinoso JM. Numerical characterization of the structural behaviour of the Basilica of Pilar in Zaragoza (Spain). Part 1: Global and local models. Advances in Engineering Software. 2008;39(4):301-14.

[12] Russo G, Bergamo O, Damiani L, Lugato D. Experimental analysis of the "Saint Andrea" Masonry Bell Tower in Venice. A new method for the determination of "Tower Global Young's Modulus E". Eng Struct. 2010;32(2):353-60.

[13] Russo S. Testing and modelling of dynamic out-of-plane behaviour of the historic masonry façade of Palazzo Ducale in Venice, Italy. Eng Struct. 2013;46:130-9.

[14] ABAQUS Ins. ABAQUS Analysis user manual, V 6.11. 2007.

[۱۵] کریمی، امیرحسین. کریمی، محمدسعید. خیرالدین، علی. شاه

کرمی، عبدالعظیم امیر. مطالعه آزمایشگاهی بر روی مقایسه رفتار لرزه ای یک دیوار بنایی توپر با دیوار بنایی دارای طاق. دومین همایش ملی مهندسی سازه ایران. دانشگاه امیر کبیر. ۱۳۹۴.

Numerical Modeling of Masonry Wall Under In-Plane Cyclic Loading With Using the Concrete Damaged Plasticity Model and Assessment of Its Parameters

Amir Hossein Karimi *

PhD , Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Mohammad Saeed Karimi

Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Ali Kheyroddin

Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Abdulazim Amir Shahkarami

Assistant Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Amir kabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, the parametric investigation was carried out on the concrete damaged plasticity criterion which was used for modeling concrete and other brittle and crispy materials in ABAQUS software. This criterion was used to simulate masonry wall under in-plane cyclic loading. The equations of the criterion were first presented, and then the criterion was used to simulate masonry wall the laboratory results of which is available. The dimensions of the wall under investigation were 195×1500×1720 mm (thickness, height, and length, respectively) which were under in-plane cyclic loading. The effect of parameters such as cracking strain, dilation angle, damage, cracking stress, stiffness recovery, and the like was investigated, and the impact of each was presented in the hysteretic curve of the masonry wall. The results indicated the concrete damaged plasticity criterion was useful in simulating the masonry wall under in-plane cyclic loading, but not useful in simulating the effect of pinching on the hysteretic curve. The parametric investigation gave us a substantial understanding of the impact of each of them in the hysteretic curve derived from numerical simulation.

Keywords: Concrete Damaged Plasticity Model, Masonry Wall, Numerical Modeling, Cyclic Loading, Non-Linear Behavior.

* Corresponding Author: a_karimi_sazeh@yahoo.com