

مدل سازی غیر خطی دیوار مصالح بنایی غیر مسلح تحت بار داخل صفحه و بررسی اثر پارامترهای مختلف در رفتار آن

امیرحسین کریمی^۱، محمد سعید کریمی^{۲*}، علی خیرالدین^۳، عبدالعظیم امیرشاه کریمی^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- استادیار، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استاد، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۴- استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله یک دیوار مصالح بنایی تحت بار داخل صفحه در نرم افزار آباکوس به صورت عددی مدل سازی شده است. برای مدل سازی ماده مصالح بنایی دیوار از ماده بتن موجود در کتابخانه مواد نرم افزار آباکوس استفاده شده است. روش پلاستیسیته بتن آسیب دیده در نرم افزار آباکوس، مدلی است که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا قواعد حاکم بر رفتار این مدل معرفی شده و سپس به صورت مجزا موارد ارائه شده، بررسی شده است. برای این منظور یک دیوار مصالح بنایی به ابعاد $100 \times 990 \times 100$ میلی متر که در آزمایشگاه تحت بار داخل صفحه قرار گرفته و نتایج آزمایشگاهی آن در دسترس می باشد در نرم افزار آباکوس مدل شده و پس از تعریف مشخصات مورد نیاز، اثر پارامترهای مختلف همچون زاویه اتساع، تنش ترک خوردگی، کرنش ترک خوردگی، ویسکوزیته و سایر موارد بررسی گردیده است. برای مدل سازی دیوار از روش ماکرو که یکی از روش های مدل سازی ماده مصالح بنایی هست استفاده شده است. پس از کالیبراسیون مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی اثر کلیه پارامترهای موجود در مدل پلاستیسیته بتن آسیب دیده مورد بررسی قرار گرفته است و اثر آن ها در نمودار بار-تغییر مکان همچنین کانتور تنش نشان داده شده است. بررسی دقیق پارامتریک انجام شده شناخت بهتری از نحوه عملکرد این پارامترها در مدل سازی ارائه می دهد و باعث می شود که کاربران شناخت بهتری از این پارامترها در مدل سازی ها داشته باشند، همچنین نسبت به رفتار مدل در نرم افزار احساس پیدا کنند.

کلمات کلیدی: دیوار مصالح بنایی، مدل سازی عددی، اجزاء محدود، رفتار غیر خطی، پلاستیسیته بتن آسیب دیده.

*نویسنده مسئول: محمد سعید کریمی

پست الکترونیکی: mskarimi@semnan.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2016.39572 شناسه دیجیتال

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2016.39572>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۵

۱- مقدمه

مصالح بنایی و تیر چوبی از قدیمی‌ترین مصالح ساختمانی هستند که در اکثر سازه‌های تاریخی موجود مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این سازه‌ها و مصالح در دوره تحصیلات مهندسی عمران در کشورهای مختلف کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با ظهور و پیدایش فولاد و بتن به عنوان مصالح کلیدی در قرن بیستم، مهندسان سازه در زمان حاضر علم محدودی در مورد مصالح بنایی و روش‌های استفاده از آنها را دارند [۱]. کمبود دانش در این زمینه باعث عدم ارزیابی صحیح ایمنی و همچنین ضعف در بهسازی ساختمان‌های موجود می‌شود. در مورد ساختمان‌های پیشرفته ضعف ناشی از این مصالح تنها در مرحله طراحی و احتمالاً نادیده گرفتن آنها به عنوان یکی از پارامترها در طراحی اولیه می‌باشد. با این حال، با توجه به ظرفیت باربری مناسب و اقتصادی بودن می‌توان یک گرایش جدید به استفاده از مصالح بنایی به وجود آورد. مصالح بنایی به عنوان قدیمی‌ترین مصالح ساختمانی به طور گسترده‌ای در کشورهای مختلف جهان به دلیل سهولت در ساخت، دوام بالا، معماری زیبا و هزینه نگهداری پایین مورد استفاده قرار گرفته است. در اغلب سازه‌های آجری، دیوارها به دلیل ناکارآمدی در شکل‌پذیری و ضعف مقاومت برشی یا خمشی، آسیب پذیرترین اعضا می‌باشند، لذا مطالعه و تحقیق در این زمینه باعث شناخت بهتر و کامل‌تر از نحوه رفتار این نوع سازه‌ها و همچنین ارائه روش‌های مناسب برای تقویت آنها می‌باشد [۲-۶]. در این تحقیق یک دیوار مصالح بنایی به ابعاد $100 \times 990 \times 100$ میلی‌متر در نرم افزار آباکوس به روش ماکرو مدل سازی شده است. برای مدل سازی مصالح بنایی از ماده بتن که یکی از مواد موجود در کتابخانه مواد از پیش تعریف شده نرم افزار می‌باشد استفاده شده است. مدل پلاستیسیته بتن آسیب دیده روشی است که برای شبیه سازی مصالح بنایی به کار گرفته شده است. در این تحقیق ابتدا تابع تسلیم و پتانسیل جریان مربوط به مدل پلاستیسیته بتن آسیب دیده معرفی شده و پس از کالیبراسیون مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی اثر پارامترهای مختلف که در تعریف مدل پیشنهادی استفاده شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته‌اند و اثر هر کدام از آنها به طور مجزا در نمودار بار-تغییر مکان و همچنین کانتور تنش بررسی شده است.

۲- 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 بازیافتن اثرات سختی را در بارگذاری‌های سیکلی (چرخشی) 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.

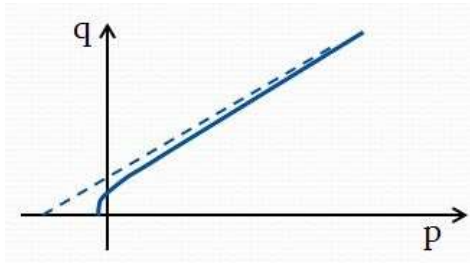
$$G = \sqrt{(\varepsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + q^2} - p \tan \psi \quad (1)$$

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

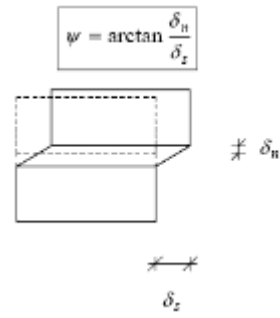
$$q = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s}} \quad (2)$$

در رابطه فوق S بردار تنش انحرافی می‌باشد.

در فرمول (۱)، ψ ، زاویه اتساع می‌باشد که مقدار بلندشدگی در اثر جابجایی برشی را مشخص می‌کند، شکل الف. 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 [۷].



ب



الف

شکل ۱: زاویه اتساع و خروج از مرکزیت، (الف) بلند شدگی و تورم نمونه در اثر جابجایی برشی، (ب) خروج از مرکزیت [۷].

خروج از مرکزیت θ : 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 ۱ ب. بنابراین در قسمت اول این تابع به یک منحنی تبدیل خواهد شد. مشتق دوم این منحنی توسط این پارامتر تعیین می‌شود. بدیهی است که اگر مقدار این پارامتر صفر در نظر گرفته شود، منحنی تبدیل به یک خط خواهد شد. مقدار این پارامتر اگر بسیار کوچک در نظر گرفته شود، باعث واگرایی حل در مراحل اولیه خواهد شد [۷]. در این مطالعه اثر این پارامتر نیز بررسی شده است.

تنش ترک خوردگی، σ_{to} : روابط زیادی برای تعیین مقدار این تنش توسط محققین مختلف پیشنهاد گردیده است. رابطه آئین‌نامه آمریکا مطابق رابطه ۳ می‌باشد [۸]:

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

رابطه پیشنهادی آئین‌نامه بتن چین به صورت رابطه ۴ است [۹]:

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

در روابط بالا f'_c و f'_{cu} به ترتیب برابر مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای و مکعبی هستند. ارتباط این دو پارامتر به صورت زیر مطرح می‌شود [۸]:

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

۳- تابع تسلیم

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

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

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

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

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

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

پارامترهای موجود در روابط بالا به شکل زیر تعریف می‌گردند:

حداکثر تنش موجود، σ_{max} : شکل سطح تسلیم در هر نقطه به وضعیت تنش آن نقطه بستگی دارد. وجود این پارامتر در تابع تسلیم این مسأله را تأیید می‌کند. نسبت تنش فشاری حداکثر دو محوره به یک محوره، σ_{b0}/σ_{c0} : مقدار این پارامتر بین ۱ تا ۱/۲۷ متغیر است. هر چه این مقدار بیشتر باشد رفتار سخت‌تری از خود نشان خواهد داد. نسبت ثابت دوم تانسور تنش روی نصف‌النهار کششی به مقدار همین پارامتر روی نصف‌النهار فشاری، K_c : این پارامتر که می‌تواند بین ۰/۵ تا ۱ باشد [۱۰]، 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.

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

۴- ویسکوزیته

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 مسأله می‌توان بیان کرد که مهم‌ترین آنها کاهش سختی بسیار شدید پس از ترک خوردگی و تغییرات شیب بسیار زیاد در مقطع عرضی سطح تسلیم است [۷]. دووات و لیونز برای حل این مشکل پیشنهاد کردند که ماده بتن، به صورت یک ماده ویسکوپلاستیک در نظر گرفته شود [۷]. 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. در این مطالعه اثر پارامتر ویسکوزیته همانند سایر پارامترها مورد بررسی قرار گرفته است.

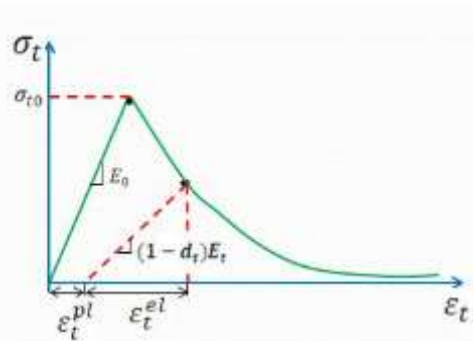
۵- تعریف رفتار فشاری و کششی

برای تعریف خصوصیت رفتار فشاری ماده از منحنی هاگنستاد استفاده شده است [۱۱]. برای تعریف رفتار فشاری بتن، می‌توان منحنی را به صورت یک جدول به نرم‌افزار معرفی کرد به شکلی که در یک ستون تنش فشاری و در ستون دیگر کرنش غیر الاستیک باشد. کرنش غیر الاستیک از تفاضل کرنش کل و کرنش الاستیک به دست می‌آید. نکته‌ای که وجود دارد این است که اولین کرنش غیر الاستیک حتماً باید صفر باشد در غیر این صورت نرم‌افزار پیغام خطا خواهد داد. در این مرحله ابتدا مقادیر منحنی هاگنستاد از فرمول زیر به دست آمد، شکل ۲ الف، سپس با تفاضل کرنش کل و الاستیک، کرنش پلاستیک محاسبه و به نرم‌افزار معرفی شد [۱۲].

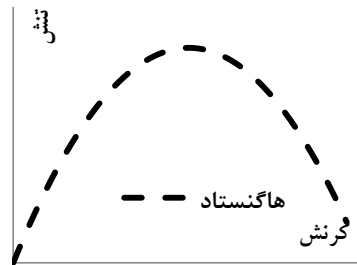
$$f_c = f_c'' \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (10)$$

تعریف رفتار کششی بتن برای تحلیل سازه‌های بتنی در نرم‌افزار آباکوس بسیار مهم و تأثیرگذار می‌باشد. این پارامتر نیز به صورت جدولی به نرم‌افزار معرفی می‌شود، اگر مقدار این پارامتر کوچک باشد موجب می‌شود ترک خوردگی موضعی در بتن ایجاد شود و باعث بروز رفتار ناپایدار در پاسخ کلی مدل گردد و مقدار بزرگ آن حل مسأله را آسان و راحت می‌کند اما با واقعیت تطابق ندارد. منحنی تنش-کرنش

بتن تحت تنش کششی، اندکی رفتار غیر خطی از خود نشان می‌دهد، اگرچه تا حدود تنشی معادل ۵۰ درصد مقاومت کششی بتن (f_t)، رفتار خطی است. کرنش کششی نظیر تنش کششی حداکثر بتن که با ϵ_t نشان داده می‌شود، در کشش خالص در حدود $0/0001$ و در کشش ناشی از خمش در محدوده $0/00014$ تا $0/0002$ می‌باشد [۱۱]. پس از رسیدن بتن به مقاومت کششی، در یک منطقه توسعه شکست که در مجاورت نقطه حداکثر تنش کششی قرار دارد، ریز ترک‌ها به وقوع می‌پیوندند که این مسأله منجر به نزول سریع ظرفیت کششی همراه با افزایش تغییر طول در منطقه کششی می‌گردد. در این مرحله رفتاری، تغییر طول در منطقه توسعه شکست متمرکز می‌شود، در حالی که در منطقه کششی بتن، تا حدودی بار و تنش به صورت الاستیک آزاد می‌شود. این مرحله آزاد شدن بار (باربرداری) از بتن را می‌توان با نمودار تنش در مقابل بازشدگی ترک و یا به صورت تنش در مقابل کرنش ترک خوردگی مطابق شکل ۲ب نمایش داد.



ب



الف

شکل ۲: تعریف رفتار فشاری و کششی، الف) رفتار فشاری، ب) رفتار کششی [۷].

۶- مشخصات هندسی دیوار مصالح بنایی

در این تحقیق، دیواری به ابعاد $100 \times 990 \times 1000$ میلی‌متر انتخاب شده است [۱]. دیوار از هجده ردیف آجر چینی ساخته شده که شانزده ردیف آن فعال بوده و دو ردیف اول و آخر در تیرهای فلزی که شرایط مرزی و بارگذاری به آن‌ها اعمال شده قرار گرفته‌اند، شکل ۳. در شکل ۳ الف پیکانی که بر روی آن یک دایره قرار گرفته جایابی را نشان می‌دهد. دیوار از آجرهای توپر رسی به ابعاد $100 \times 52 \times 210$ (بر حسب میلی‌متر) و ملات به ضخامت ۱۰ میلی‌متر ساخته شده است.

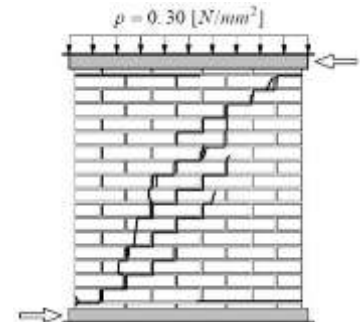
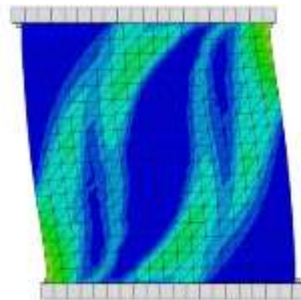
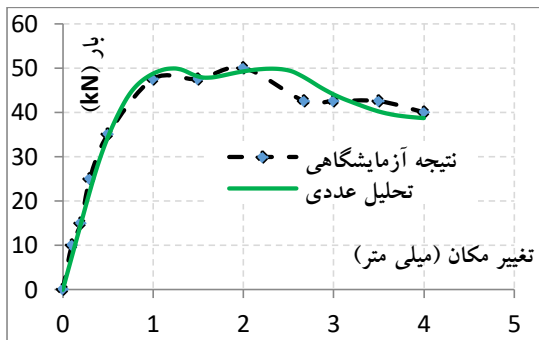
ملات به کار رفته در ساخت دیوار از ترکیب حجمی سیمان : آهک : ماسه به مقادیر ۹:۲:۱ ساخته شده است. بارگذاری دیوار به این صورت است که ابتدا بار قائم P به دیوار اعمال شده و سپس بارگذاری افقی به صورت افزایش یابنده به دیوار وارد می‌شود. شرایط مرزی بارگذاری به این صورت است که تیرهای فلزی که در بالا و پایین دیوار قرار دارند شرایط محصورشدگی را به وجود می‌آورند به این صورت که تیرها به صورت افقی می‌مانند و از هر گونه تغییر مکان قائم جلوگیری می‌کنند. مشخصات مصالح مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات مصالح استفاده شده در ساخت دیوار [۱].

E	ν	F_t	F_m
مدول الاستیسیته	ضریب پواسن	مقاومت کششی	مقاومت فشاری
۱۶۷۰۰ MPa	۰/۱۵	۰/۱۶ MPa	۱۱/۵ MPa

مقدار بار P که به صورت پیش فشار به دیوار اعمال شده است $0/3$ کیلو نیوتن بر میلی‌متر مربع (بار معادل ۳۰ کیلو نیوتن) بوده که قبل از اعمال بار جانبی به قسمت فوقانی دیوار اعمال گردیده است. نحوه توزیع ترک خوردگی در آزمایشگاه در شکل ۳ الف نشان داده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده یک ترک کششی افقی در بالا و پایین دیوار رخ داده که بر اساس گزارش محقق مربوطه در مراحل اولیه بارگذاری رخ داده‌اند سپس ترک‌های قطری که منجر به شکست دیوار شده‌اند اتفاق افتاده‌اند. ترک‌های قطری همزمان با ترک‌های

ایجاد شده در آجرها و خردشدگی پنجه‌های فشاری در دیوار ایجاد شده‌اند. دیواری که مشخصات آن ذکر گردید برای کالیبراسیون مورد استفاده قرار گرفت و در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس مدل گردید. نتایج به دست آمده در شکل ۳ ب ارائه شده است و نمودار بار-تغییر مکان استخراج شده از مدل سازی عددی تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد، شکل ۳ ج.



ج

ب

الف

شکل ۳: نتایج بدست آمده از مدل سازی عددی؛ الف) دیوار آزمایش شده، ب) کانتور تنش به وجود آمده در دیوار، ج) نمودار بار-تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی و نمونه شبیه سازی شده.

۷- شبکه بندی

برای شبکه بندی مدل از المان چهار وجهی ده گره‌ای استفاده شده است. این المان، لاگرانژی از نوع مکعبی (Solid)، ده گره‌ای، تابع شکل آن درجه دو و در هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی می‌باشد. اسم این المان در نرم افزار C3D10 می‌باشد.

۸- بررسی پارامترهای تعریف شده در منحنی بار-تغییر مکان

در این قسمت پارامترهای مختلف بررسی شده‌اند و اثر آنها بر روی نمودار بار-تغییر مکان و همچنین کانتور تنش نشان داده شده است.

۸-۱- تحلیل نتایج

معیار پلاستیسیته بتن آسیب دیده که برای شبیه سازی دیوار مصالح بنایی در نظر گرفته شد توانست به خوبی منحنی حاصل از نتایج آزمایشگاهی را شبیه سازی کند. تحلیل نتایج برای پارامترهای مختلف معیار ذکر شده به صورت زیر می‌باشد. برای برخی از پارامترها مقداری بیشتر و یا کمتر از حد مجاز ارائه شده توسط راهنمای نرم افزار تعریف شده تا اثر آنها به صورت بزرگ نمایان شده نشان داده شود.

زاویه اتساع: این پارامتر مقدار بلند شدگی در اثر تغییر شکل برشی را مشخص می‌کند. در این نمونه به دلیل اینکه شرایط مرزی دیوار به صورتی است که از تغییر شکل قائم (بلند شدگی) آن ممانعت به عمل می‌آید لذا هر چقدر زاویه اتساع بزرگتری برای ماده تعریف شود به نیروی برشی بزرگتری نیاز هست که بتواند تغییر شکل برشی لازم را برای اتساع مورد نظر به وجود آورد. لذا با افزایش زاویه اتساع میزان حداکثر نیروی تحمل شده در دیوار نیز افزایش می‌یابد، شکل ۴.

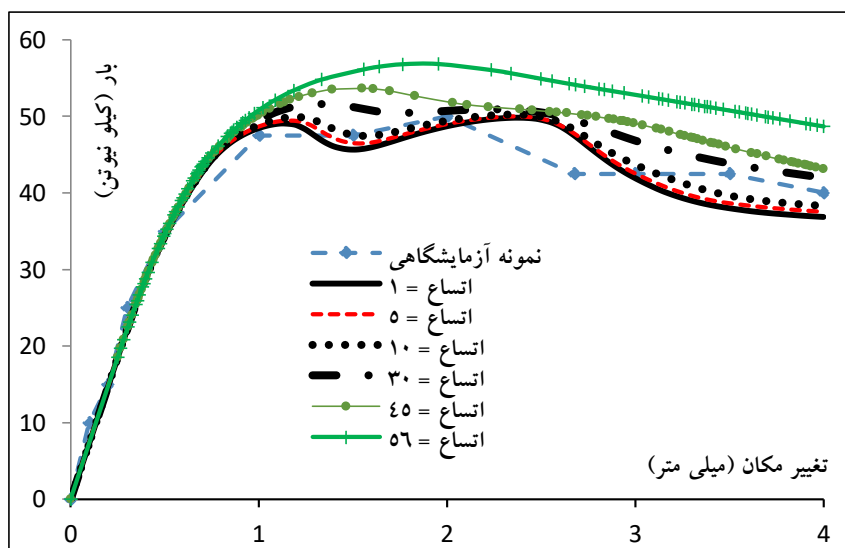
خروج از مرکزیت: عدد ۰/۱ برای این پارامتر توسط راهنمای نرم افزار در نظر گرفته شده است. نمودارهای بار-تغییر مکان در اعداد نزدیک به مقدار پیشنهادی نرم افزار انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند ولی مقادیر بزرگتر باعث می‌شوند که نمودارهای حاصل از آنالیز عددی با نمودار آزمایشگاهی فاصله بگیرند و هماهنگی مطلوبی ایجاد نشود، شکل ۵. اثر تغییرات زاویه اتساع و خروج از مرکزیت در شکل ۶ ارائه شده است.

ویسکوزیته: این پارامتر در شبیه‌سازی به ماده بتن کمک می‌کند که پس از ترک‌خوردگی و کاهش شدید سختی فرآیند حل متوقف نگردد. حال اگر این پارامتر به مقدار بزرگ تعریف شود ماده رفتاری به صورت ویسکوپلاستیک خواهد داشت و کاهش سختی را تجربه نخواهد کرد، شکل ۷. بنابراین در مقادیر بزرگ این پارامتر منحنی بار-تغییر مکان وارد شاخه نزولی نمی‌شود و به صورت خطی به باربری خود ادامه می‌دهد. اگر این پارامتر کوچک در نظر گرفته شود فرآیند حل دچار ناپایداری‌های کلی و یا ناپایداری‌های موضعی می‌شود، شکل ۷.

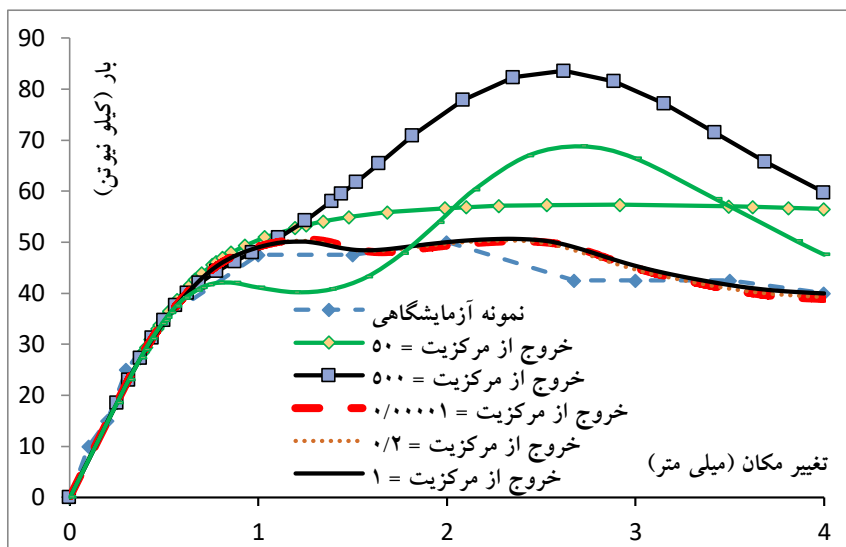
σ_{b0}/σ_{c0} : بازه تعریف شده برای این پارامتر در راهنمای نرم‌افزار بین ۱ تا ۱/۲۷ می‌باشد و مقدار پیشنهادی آن ۱/۱۶ می‌باشد. مقادیر کوچکتر از یک برای این نرم‌افزار باعث واگرایی فرآیند حل می‌گردد و مقادیر بزرگتر از ۱/۲۷ اثر قابل توجهی بر روی منحنی بار-تغییر مکان نمی‌گذارد، شکل ۸. تغییرات ویسکوزیته و تغییرات σ_{b0}/σ_{c0} بر روی حداکثر بار تحمل شده توسط دیوار در شکل ۹ ارائه شده است.

تنش و کرنش ترک‌خوردگی: تنش ترک‌خوردگی حداکثر تنش قابل تحمل ماده در کشش می‌باشد. هر چقدر این پارامتر بزرگتر تعریف شود، نمونه دیرتر دچار ترک‌خوردگی کششی می‌شود بنابراین در مقدار تنش‌های بزرگتری دچار شکست می‌شود و در نتیجه باربری بیشتری از خود نشان می‌دهد، شکل ۱۰. این نتیجه گیری برای کرنش نیز صادق می‌باشد، زیرا وقتی که برای نمونه کرنش ترک‌خوردگی بیشتری تعریف شود، نمونه تا زمانی که به کرنش ترک‌خوردگی نرسیده باربری بیشتری از خود نشان می‌دهد و دیرتر دچار شکست می‌شود، شکل ۱۱. تغییرات تنش و کرنش ترک‌خوردگی در شکل ۱۲ ارائه شده است.

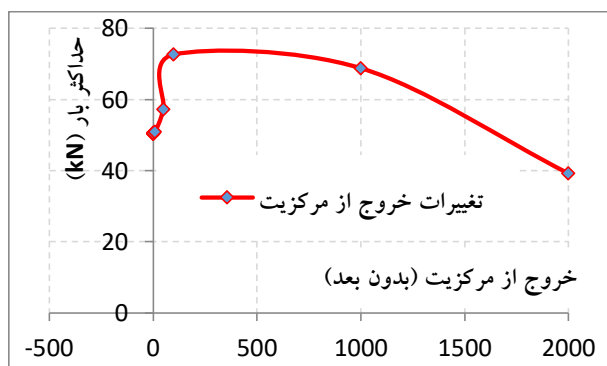
Kc: بازه تعریف شده برای این پارامتر در راهنمای نرم‌افزار بین ۰/۵ تا ۱ می‌باشد. مقدار پیشنهادی آن ۰/۶۷ می‌باشد. اثر این پارامتر روی منحنی بار-تغییر مکان به صورت خیلی جزئی می‌باشد. این پارامتر شکل مقطع عرضی سطح تسلیم را مشخص می‌کند و اگر این پارامتر به مقدار یک در نظر گرفته شود، شکل مقطع عرضی سطح تسلیم شبیه به معیار دراکر-پراگر خواهد شد، شکل ۱۳. تغییرات این پارامتر در شکل ۱۴ می‌باشد.



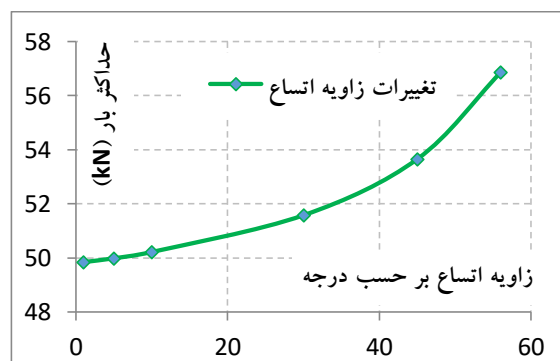
شکل ۴: اثر زاویه اتساع بر روی منحنی بار-تغییر مکان.



شکل ۵: اثر پارامتر خروج از مرکزیت بر روی منحنی بار-تغییر مکان.

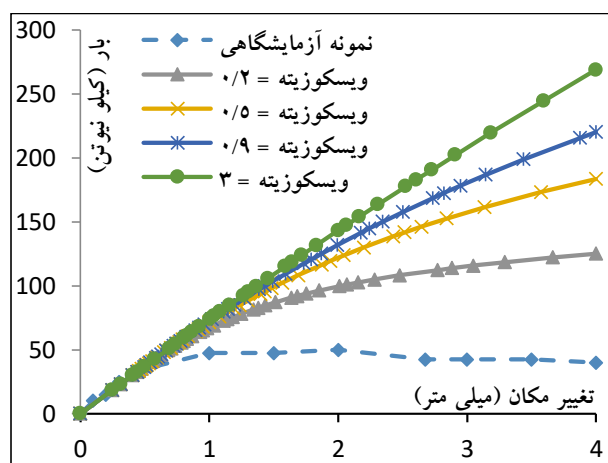
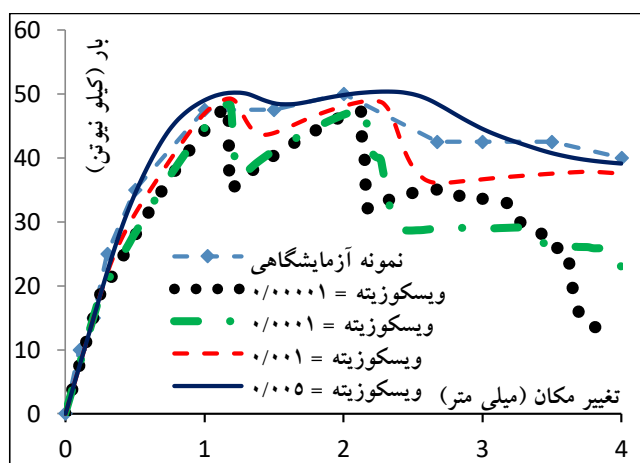


ب

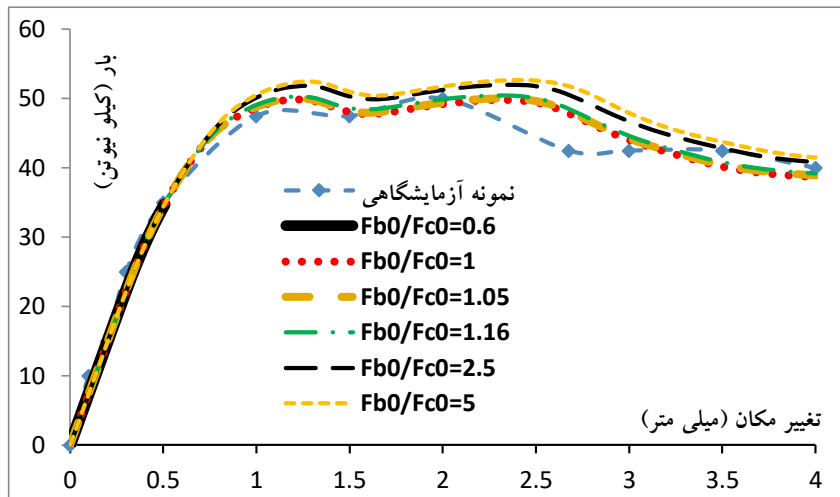


الف

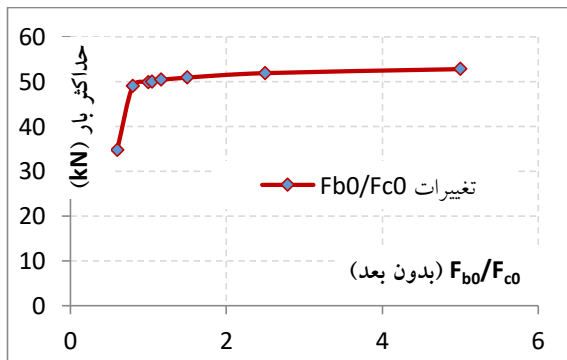
شکل ۶: بررسی اثر تغییرات زاویه اتساع و خروج از مرکزیت: الف) اثر زاویه اتساع، ب) اثر خروج از مرکزیت.



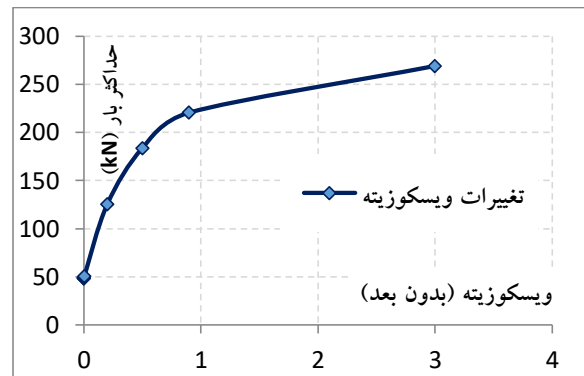
شکل ۷: بررسی اثر پارامتر ویسکوزیته بر روی منحنی بار-تغییر مکان.



شکل ۸: بررسی اثر پارامتر $b_0\sigma / \sigma_{c0}$ بر روی منحنی بار-تغییر مکان.

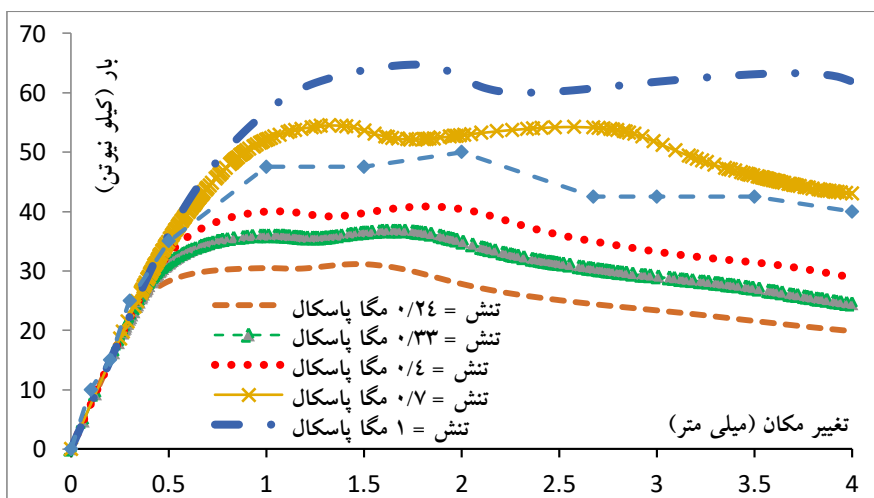


ب

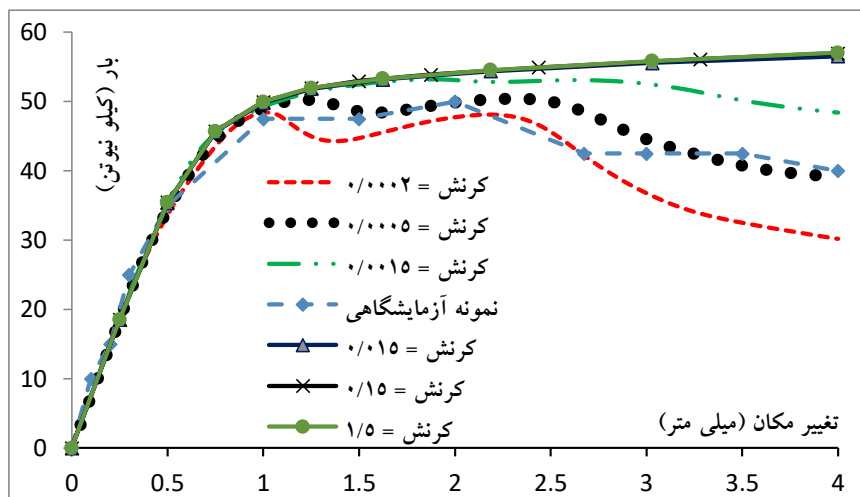


الف

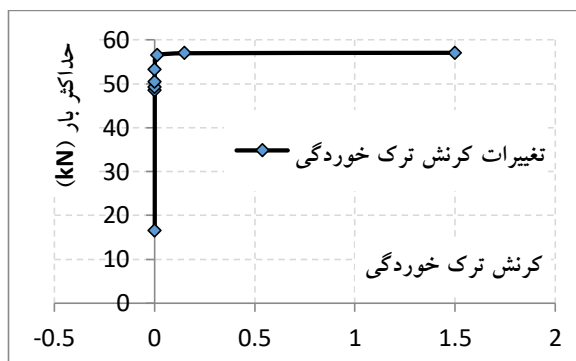
شکل ۹: بررسی اثر تغییرات ویسکوزیته و $b_0\sigma / \sigma_{c0}$ (الف) اثر ویسکوزیته، (ب) اثر $b_0\sigma / \sigma_{c0}$.



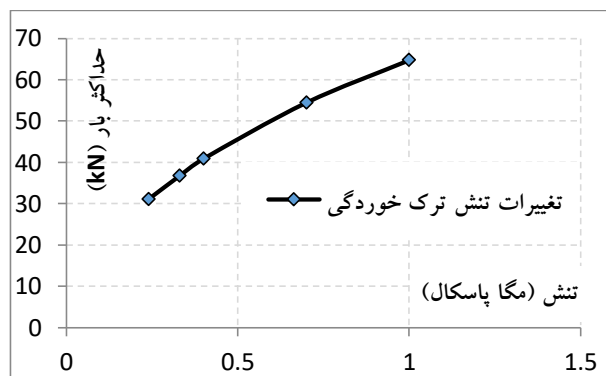
شکل ۱۰: بررسی اثر تنش ترک خوردگی بر روی منحنی بار-تغییر مکان.



شکل ۱۱: بررسی اثر کرنش ترک خوردگی بر روی منحنی بار-تغییر مکان.

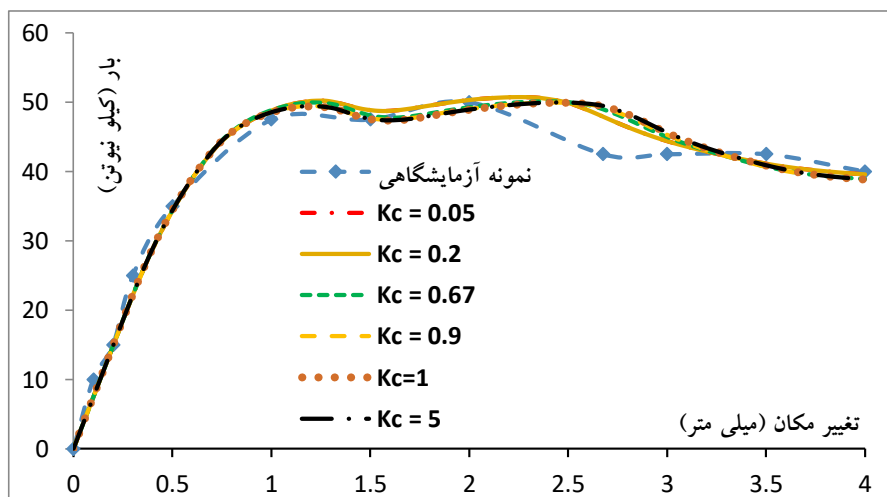


ب

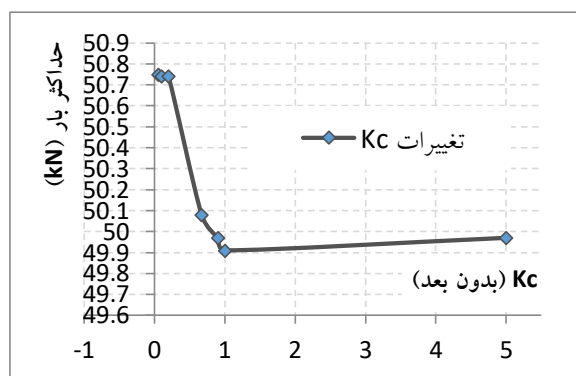


الف

شکل ۱۲: بررسی اثر تغییرات تنش ترک خوردگی و کرنش ترک خوردگی، الف) تنش ترک خوردگی، ب) کرنش ترک خوردگی.

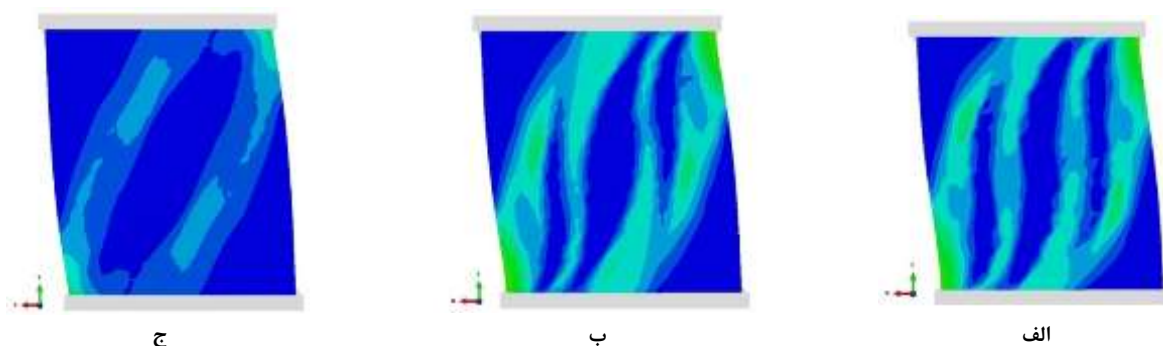


شکل ۱۳: بررسی اثر پارامتر K_c بر روی منحنی بار-تغییر مکان.

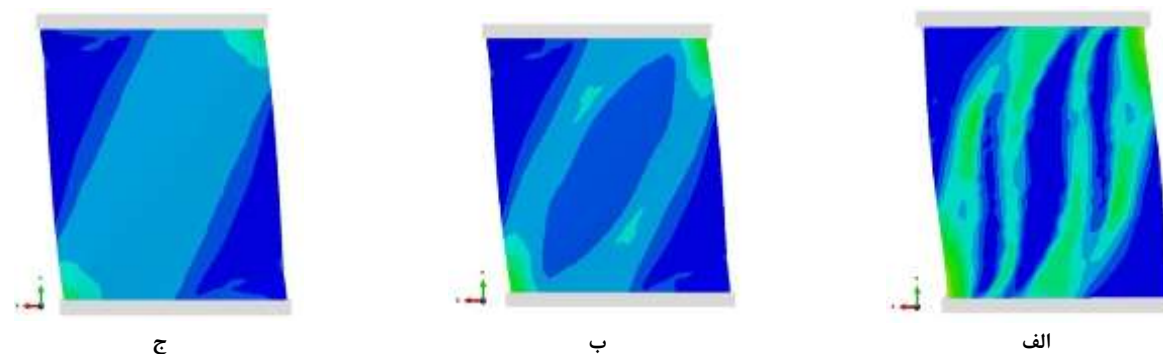


شکل ۱۴: بررسی اثر تغییرات پارامتر KC.

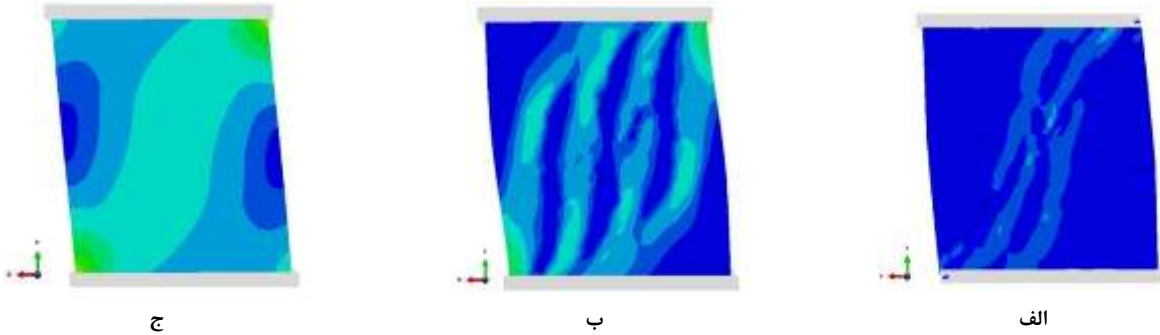
در شکل ۱۵ اثر پارامتر زاویه اتساع، در شکل ۱۶ اثر پارامتر خروج از مرکزیت، در شکل ۱۷ اثر پارامتر ویسکوزیته، در شکل ۱۸ اثر پارامتر σ_{b0}/σ_{c0} ، در شکل ۱۹ اثر تنش ترک خوردگی، در شکل ۲۰ اثر کرنش ترک خوردگی و در شکل ۲۱ اثر پارامتر KC بر روی کانتور تنش ایجاد شده در دیوار ارائه شده است.



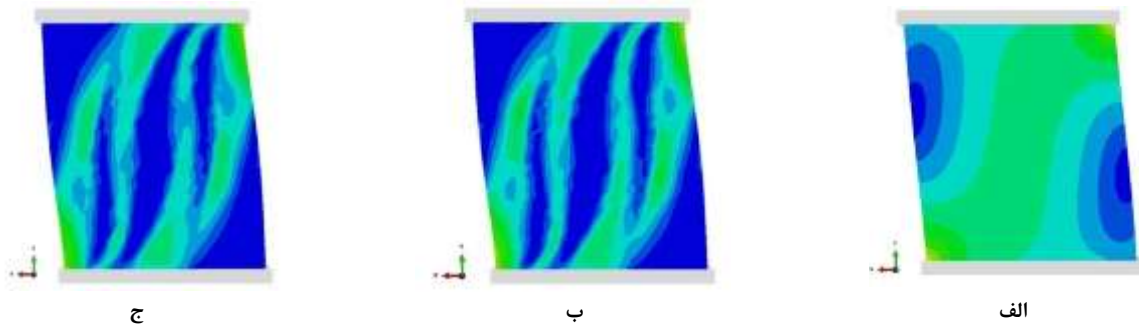
شکل ۱۵: اثر زاویه اتساع بر روی کانتور تنش؛ الف) اتساع ۱ درجه، ب) اتساع ۳۰ درجه، ج) اتساع ۵۶ درجه.



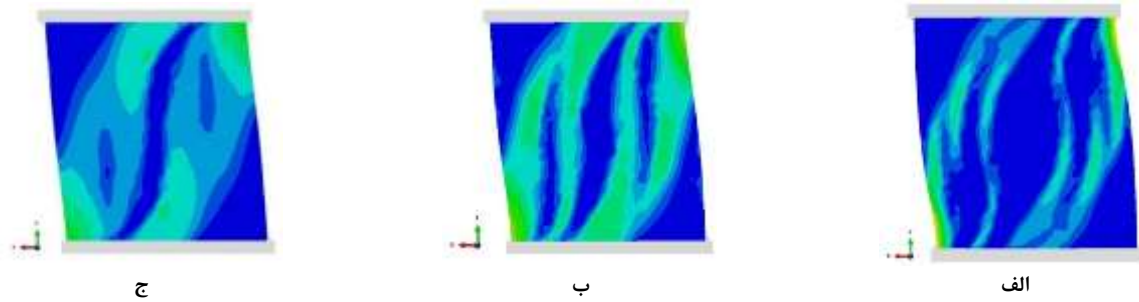
شکل ۱۶: اثر خروج از مرکزیت بر روی کانتور تنش؛ الف) $e=0.00001$ ، ب) $e=50$ ، ج) $e=100$.



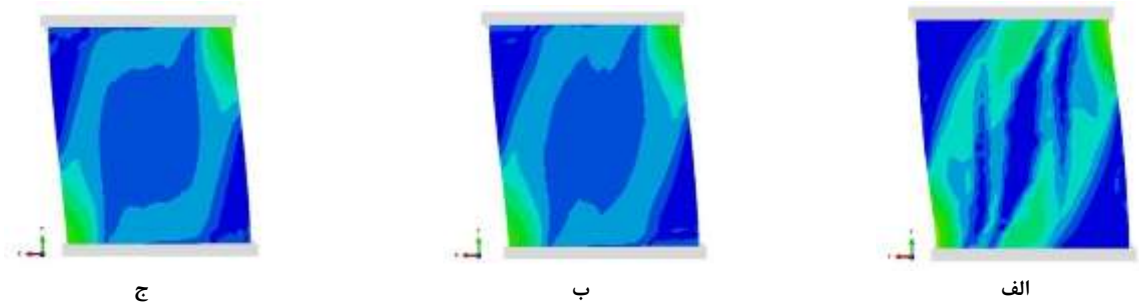
شکل ۱۷: اثر پارامتر ویسکوزیته بر روی کانتور تنش؛ (الف) ویسکوزیته=0.0001 (ب) ویسکوزیته=0.001 (ج) ویسکوزیته=0.005.



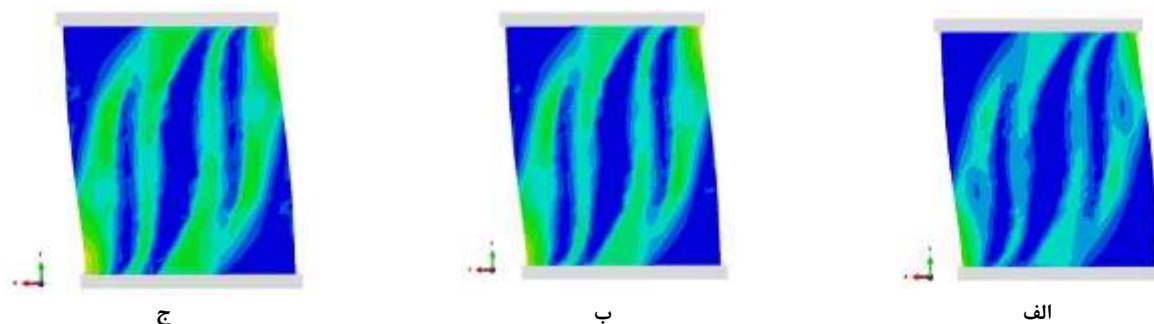
شکل ۱۸: اثر پارامتر σ_b0/σ_c0 بر روی کانتور تنش؛ (الف) $\sigma_b0/\sigma_c0=0.6$ (ب) $\sigma_b0/\sigma_c0=1.16$ (ج) $\sigma_b0/\sigma_c0=5$.



شکل ۱۹: اثر تنش ترک خوردگی بر روی کانتور تنش؛ (الف) تنش=0.24 مگا پاسکال (ب) تنش=0.07 مگا پاسکال (ج) تنش=1 مگا پاسکال.



شکل ۲۰: اثر کرنش ترک خوردگی بر روی کانتور تنش؛ (الف) کرنش=0.0015 (ب) کرنش=0.015 (ج) کرنش=0.15.



شکل ۲۱: اثر پارامتر Kc بر روی کانتور تنش؛ الف) $Kc=0.05$ ، ب) $Kc=0.67$ ، ج) $Kc=5$.

۹- نتیجه گیری

در این مقاله یک دیوار مصالح بنایی در نرم افزار آباکوس با استفاده از مدل پلاستیسیته بتن آسیب دیده شبیه سازی شده است. دیوار مورد نظر در ابتدا تحت یک پیش فشار به مقدار $0/3$ مگاپاسکال قرار گرفته سپس با ثابت ماندن مقدار این پیش فشار نیروی جانبی افزایش یابنده داخل صفحه به آن اعمال شده است. در این مقاله پس از تعریف مدل پلاستیسیته در نظر گرفته شده و تعریف پارامترهای مختلف در آن، نتایج به دست آمده از آزمایش در نرم افزار آباکوس اعتبار بخشی شده است. نتایج به دست آمده از تحلیل عددی نشان داد که این معیار قادر است ماده مصالح بنایی را به خوبی شبیه سازی کند. اثر پارامترهای مختلف در مدل استفاده شده همچون زاویه اتساع، خروج از مرکزیت، ویسکوزیته، نسبت تنش فشاری دو محوره به یک محوره $(\sigma_{b0}/\sigma_{c0})$ ، Kc (نسبت ثابت دوم تانسور تنش روی نصف النهار کششی به مقدار همین پارامتر روی نصف النهار فشاری)، کرنش ترک خوردگی و تنش ترک خوردگی در منحنی بار-تغییر مکان حاصل از شبیه سازی عددی بررسی شده است. نتایج به دست آمده به شرح زیر می باشد:

هرچه زاویه اتساع بیشتر باشد دیوار مقدار بار بیشتری را تحمل می کند. کانتور تنش در زاویه اتساع بالا، رفتار دیوار را متأثر کرده و رفتاری متفاوت از نتیجه آزمایشگاهی از خود نشان می دهد.

اثر خروج از مرکزیت به این صورت است که هرچه خروج از مرکزیت کمتر (البته نه به مقدار زیاد) باشد نمودار عددی و آزمایشگاهی مطابقت خوبی با هم دارند و هرچه خروج از مرکزیت زیاد شود، نمودار بار-تغییر مکان از نمودار آزمایشگاهی فاصله می گیرد. در کانتور تنش نیز مشاهده می شود که با افزایش خروج از مرکزیت توزیع تنش در دیوار کاملاً تغییر کرده و رفتار متفاوتی از خود نشان می دهد.

مقدار کم پارامتر ویسکوزیته باعث می شود که نمودار بار-تغییر مکان دچار ناپایداری موضعی شده و دچار فراز و فرودهای شدید شود و در مقادیر متوسط (در حدود $0/01$ تا $0/05$) انطباق خوبی با نمونه آزمایشگاهی وجود دارد. در مقادیر زیاد ویسکوزیته منحنی بار-تغییر مکان نرم شدگی را تجربه نمی کند و به صورت صعودی به رفتار خود ادامه می دهد. کانتورهای تنش نیز به خوبی اثر این پارامتر را نشان می دهند.

هرچقدر مقدار تنش ترک خوردگی افزایش یابد دیوار بار بیشتری را تحمل کرده و با افزایش تنش ترک خوردگی حداکثر بار جانبی تحمل شده توسط دیوار نیز افزایش می یابد.

اثر کرنش ترک خوردگی به این صورت است که مقادیر کم این پارامتر باعث ناپایداری موضعی و همچنین واگرا شدن فرآیند حل می شود و مقادیر زیاد آن باعث می شود که نمودار بار-تغییر مکان نرم شدگی پس از اوج نداشته باشد و به طور پیوسته افزایش باربری داشته باشد.

اثر $(b_0/\sigma_{c0}\sigma)$ به این صورت است که مقدار کم این پارامتر باعث ناپایداری تحلیل شده و حل متوقف می‌گردد. هرچه این مقدار افزایش یابد نقطه حداکثر نمودار بار-تغییر مکان نیز افزایش می‌یابد به این حالت که مقدار بار جانبی تحمل شده توسط دیوار افزایش می‌یابد. اثر افزایش این پارامتر به صورت جزئی می‌باشد یعنی اینکه افزایش زیاد این پارامتر باعث افزایش زیاد باربری نمی‌شود و به صورت جزئی باعث افزایش باربری می‌شود.

پارامتر K_c اثر قابل توجهی بر روی نمودار بار-تغییر مکان نمی‌گذارد و تغییر این پارامتر باعث تغییر اساسی در نمودار بار-تغییر مکان نمی‌شود اما همانطور که در کانتورهای تنش مشاهده می‌شود این پارامتر در توزیع تنش و کرنش در نمونه اثر گذار می‌باشد و برای مشاهده توزیع صحیح تنش و ترک خوردگی باید این پارامتر نیز به میزان مناسب در نظر گرفته شود.

مراجع

- [1] Lourenço PB. Computational Strategies for Masonry Structures. 1996(PhD thesis).
- [2] 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. 24-4308:(12) 25; 2011.
- [3] Mistler M, Butenweg C, Meskouris K. Modelling methods of historic masonry buildings under seismic excitation. Journal of Seismology. 2006;10(4):497-510.
- [4] 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.
- [5] Yekrangnia M, Mobarake A. Restoration of Historical Al-Askari Shrine. II: Vulnerability Assessment by Numerical Simulation. Journal of Performance of Constructed Facilities. 2015:04015031.
- [6] Karimi AH, Karimi MS, Kheyroddin A, Amirshahkarami, A. Experimental and numerical study on seismic behavior of an infilled masonry wall compared to an arched masonry wall. Journal of Structures. 2016;V8(144-153).
- [7] ABAQUSIns. ABAQUS Theory User Manual, V 6.7. 2007.
- [8] Committee ACI. Building code requirements for structural concrete : (ACI 318-95) ; and commentary (ACI 318R-95): Farmington Hills, MI : American Concrete Institute, [1995] ©1995; 1995.
- [9] GB-50010. Code for Design of Concrete Structures, China Building Industry press, Beijing. 2002.
- [10] Chen WF. Plasticity in reinforced concrete: Mc Graw-HILL; 1982.
- [11] داوودمستوفی-نژاد. طراحی سازه های بتن آرمه ۱۳۸۷.
- [12] ABAQUSIns. ABAQUS Analysis user manual, V 6.7. 2007.