



## تأثیر کاهش پارامتر آسیب کششی در تحلیل غیرخطی سازه‌های بتن مسلح به روش آسیب پلاستیک بتن

احسان عراقی زاده<sup>۱</sup>، رامین طباطبایی میرحسینی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان، سیرجان، ایران.  
<sup>۲</sup> دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۷  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۲۲  
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۸  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷

### کلمات کلیدی:

آسیب پلاستیک بتن  
تحلیل غیرخطی  
پارامتر خسارت کششی بتن  
آباکوس  
بتن مسلح

**خلاصه:** عموماً یکی از قسمت‌های مهم در مدل‌سازی سازه‌های بتن مسلح، معرفی رفتار مصالح بتن و فولاد در نرم‌افزارهای اجزای محدود می‌باشد. در نرم‌افزار آباکوس برای تحلیل غیرخطی بتن مسلح روش‌های مختلفی وجود دارد، که یکی از این روش‌ها استفاده از مدل آسیب پلاستیک بتن است. در این روش، معرفی مشخصات مکانیکی بتن در قسمت‌های آسیب فشاری و کششی بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، بطوری که وارد نمودن تعداد نقاط زیاد پارامترهای آسیب فشاری و کششی بتن، باعث افزایش زمان تحلیل نرم‌افزار و گاهی سبب عدم همگرایی حل مسئله می‌گردد. در مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس به روش آسیب پلاستیک بتن دو شرط وجود دارد که بایستی رعایت گردند. اولاً کرنش‌های پلاستیک بتن مثبت باشند و ثانیاً با افزایش مقدار کرنش بتن، مقدار کرنش‌های پلاستیک بتن نیز صعودی باشند. به همین دلیل این دو شرط موجب حذف و کاهش برخی نقاط در اطلاعات ورودی مصالح بتن در روش آسیب پلاستیک بتن می‌گردند. در این تحقیق برای تحلیل یک سازه بتن مسلح با نرم‌افزار آباکوس در قسمت آسیب فشاری بتن، ابتدا تعداد نقاط پارامترهای تنش فشاری بتن، کرنش فشاری بتن و آسیب فشاری ( $d_f$ ) بطور کامل وارد می‌شوند. بعد در قسمت آسیب کششی بتن، تعداد نقاط پارامتر خسارت کششی بتن ( $d_t$ ) نیز بطور کامل وارد می‌گردند. سپس تعداد نقاط تنش کششی بتن و کرنش ترک‌خوردگی بتن کاهش داده می‌شوند تا تأثیر کاهش این نقاط بر ظرفیت سازه بتن مسلح مشخص شود. نتایج تحلیل غیرخطی سازه بتن مسلح در اثر کاهش تعداد نقاط پارامترهای مذکور به صورت منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی مشخص گردیده‌اند و نتایج نشان می‌دهند که با کاهش تعداد این نقاط، با خطای کمی، زمان اجرای تحلیل سازه بطور چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

تکیه می‌شود. محققین تحقیقات زیادی را برای مدل کردن بتن با استفاده از مدل‌های عددی پیشرفته آغاز کرده‌اند. یکی از این مدل‌ها که بر اساس تئوری مکانیک محیط‌های پیوسته می‌باشد، مدل آسیب دیدگی برای رفتار بتن است. روش‌های جدیدی برای محاسبه متغیرهای آسیب بتن بدست آمده‌اند. یکی از این روش‌ها بر اساس فرمول بندی لوبلینر و همکاران است [۱]. در این فرمول بندی، متغیرهای آسیب فشاری و کششی از تمام جهات مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یکی از مزایای این روش عدم نیاز به کالیبراسیون نتایج تجربی می‌باشد که یک استراتژی برای جلوگیری از حساسیت به

رفتار سازه‌های بتن مسلح در مقابله با نیروهای شدید مثل نیروی ناشی از حرکات زمین، بسیار پیچیده است و این پیچیدگی عمدتاً به دلیل مقابله مشترک بتن و فولاد با آن نیروها است. علاوه بر این افزایش آگاهی و نگرانی در مورد خطر لرزه‌ای در سراسر جهان باعث پیشرفت‌های جدید در مهندسی بتن مسلح شده است. با این حال مدل‌های عددی ساده به دلیل هزینه متوسط آن‌ها به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند و در بسیاری از مسائل به آن‌ها

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: tabatabaei@iauk.ac.ir



که اساس اکثر آنها بر روی جدا کردن آسیب در قسمت‌های فشاری و کششی استوار است و به وسیله قانون تغییر تدریجی، هر کدام از قسمت‌های کششی و فشاری بطور مجزا معین شده‌اند و آسیب کل نیز با تلفیق چند قاعده محاسبه می‌شود. تعدادی از قوانین تغییر تدریجی بر اساس فرمول کلی برای محاسبه آسیب در فشار و کشش دیده شده‌اند که این کار توسط هاسلر و همکار [۱۴] انجام شده است. در اکثر فرمول‌های ارزیابی آسیب پذیری، پارامترها باید به صورت آزمایشی کالیبره شوند و این موضوع توسط ال روب و کیم [۱۳] به صورت کامل تأیید گردیده است. سان و همکاران [۱۵] در چند مدل مختلف، سازه‌های بتن مسلح به روش آسیب پلاستیک بتن را، با مقاومت‌های مختلف و درجه حرارت‌های متفاوت، به وسیله نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی نموده و نتایج را با مدل آزمایشگاهی مقایسه و مورد بررسی قرار داده‌اند.

## ۲- کلیات

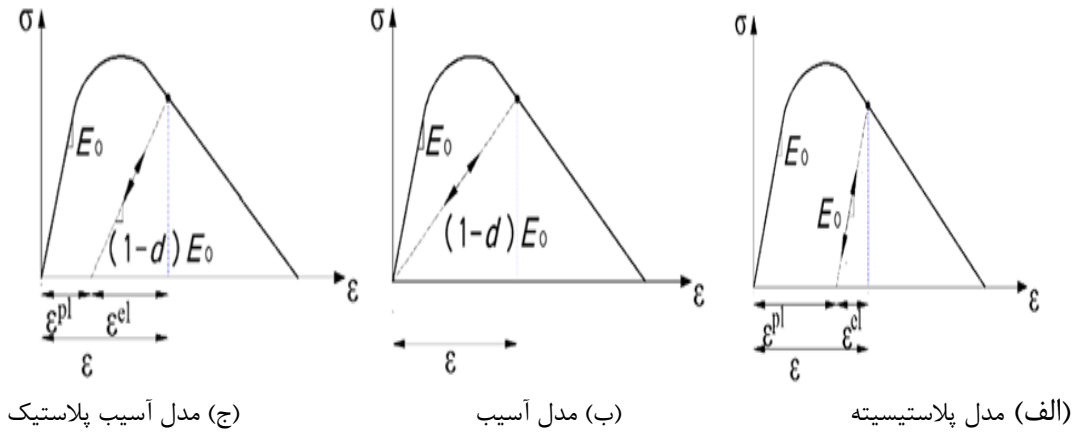
### ۲-۱- مدل‌سازی در نرم‌افزار

برای مدل‌سازی، بایستی ابتدا یک نرم‌افزار برای آنالیز غیرخطی سازه‌های بتن مسلح که توانایی آنالیز اجزاء محدود غیرخطی هندسی و مصالح را داشته باشد، انتخاب شود. نرم‌افزار آباکوس برای این کار مناسب و قدرتمند است. تعریف دقیق مصالح برای مدل‌سازی اجزای محدود با رفتار الاستیک و پلاستیک در قسمت‌های فشاری و کششی تأثیر زیادی در جواب‌های خروجی دارد. رفتار فشاری بتن، باید شامل هر دو حالت الاستیک و پلاستیک کامل بتن در نرم‌شدگی و سخت‌شدگی کرنش باشد. در مورد رفتار کششی بتن نیز باید خواص بتن در دو حالت الاستیک و پلاستیک برای نرم‌شدگی کششی، سخت‌شدگی کششی و اثر پیوستگی محلی در نظر گرفته شوند. نرم‌افزار آباکوس سه نوع ترک‌خوردگی برای خرابی مصالح را مدل‌سازی می‌کند که باید در بخش خواص مصالح تعریف شوند. انواع مدل‌سازی ترک‌خوردگی بتن در نرم‌افزار آباکوس شامل مدل ترک‌خوردگی بتن توده<sup>۲</sup>، مدل ترک‌خوردگی بتن ترد<sup>۳</sup> و مدل پلاستیسیته آسیب بتن<sup>۴</sup> می‌باشند. در روش آخر دو فرض اصلی در مکانیزم گسیختگی در نظر گرفته می‌شوند که شامل ترک‌خوردگی کششی<sup>۵</sup> و خردشدگی فشاری<sup>۶</sup> است

مش بندی است و یک الگوریتم خاص برای اجرا در نرم‌افزار آباکوس ارائه می‌نماید. تحقیقات گسترده به وضوح نشان می‌دهند که برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن، استفاده همزمان از مدل آسیب و مدل پلاستیک بتن مؤثرترند. مدل پلاستیک برای بتن می‌تواند با سخت شدن ایزوتروپیک توصیف شود، اگرچه آسیب در بسیاری از موارد ایزوتروپیک نیست اما ترجیحاً از جهاتی قابل توجیه است [۲].  
چن و همکاران [۳] که در یک تحقیق، تحت عنوان روابط ساختاری تشکیل دهنده بتن، نشان دادند که پاسخ غیرخطی بتن را می‌توان با استفاده از تئوری پلاستیسیته یا تئوری آسیب دیدگی بیان نمود، ولی هیچ یک از این روش‌ها به تنهایی قادر به توصیف این پدیده نیستند. لین و همکاران [۴] نیز در تحقیق دیگری این مطلب را تأیید کردند. گراسل و جیراسک [۵] در مقاله‌ای با عنوان مدل آسیب پلاستیک برای شکست بتن، بیان کردند که مدل‌های پلاستیکی ممکن است بیان‌کننده تغییر شکل در بتن با محدودیت بالا باشند، اما نمی‌توانند میزان کاهش سختی را در نتایج آزمایشگاهی نشان دهند. مازارس و کابوت [۶] طی تحقیقات گسترده‌ای در مورد تئوری آسیب پیوسته، نشان دادند که مدل‌های آسیب، بر اساس کاهش تدریجی سختی الاستیک بنا شده‌اند و تنها می‌توانند کاهش سختی تنش کششی و محدود شدن اندک سختی فشاری را بیان کنند؛ اما برای نمایش تغییر شکل‌های غیربرگشت‌پذیر در نمونه‌های آزمایشگاهی و نمایش افزایش حجم غیرالاستیک فشاری، مناسب نیستند. در مقاله ای فی چنت و همکاران [۷] تحقیق کردند که مدل پلاستیک برای بتن را می‌توان با سخت شدن ایزوتروپیک توصیف کرد هرچند که، آسیب در بسیاری از موارد ایزوتروپیک نیست؛ اما ترجیحاً از جهاتی قابل توصیف است. بسیاری از مدل‌های آسیب ایزوتروپیک پلاستیک از سال ۱۹۹۶ تا سال ۲۰۰۸ توسط محققین زیادی پیشنهاد شده‌اند از جمله توسط لی و فنوس [۸]، فاریا و همکاران [۹] و گراسل و جیراسک [۱۰]. اورتیز [۱۱]، سیمو و همکاران [۱۲] و ال روب و کیم [۱۳] تحقیق کردند که حتی اگر مدل آسیب ایزوتروپیک یک فرض ساده باشد، به دلیل سادگی و دقت کافی آن در بسیاری از مسائل باید مورد توجه قرار گیرد. فاریا و همکاران [۹] طی مقاله‌ای تحقیق کردند که تابع تسلیم می‌تواند به عنوان بارگذاری مدل آسیب شناخته شود و قانون تغییر تدریجی مدل آسیب باید در آن اعمال شود. تعدادی از پژوهشگران، قوانین تغییر تدریجی<sup>۱</sup> متفاوتی را پیشنهاد داده‌اند

2 Smearred crack concrete model  
3 Brittle crack concrete model  
4 Concrete damage plasticity model  
5 Tensile cracking  
6 Compressive crushing

1 Evolution law



شکل ۱. ارائه مدل آسیب پلاستیک بتن.

Fig. 1. Representation of CPDM. a) Plasticity Model. b) Damage Model. c) Plastic Damage Model

و غیر مسلح تحت بارگذاری‌های یکنواخت، نوسانی و دینامیکی ۳- در نظر گرفتن حساسیت نمونه به نرخ کرنش ۴- در نظر گرفتن تأثیر بازیابی سختی الاستیک در بارگذاری‌های دوره‌ای. ۵- قابلیت استفاده از ویسکوالاستیک در معادلات اساسی برای رسیدن به همگرایی بهتر در بخش نرم شوندگی، می‌باشند [۱۸].

شکل ۱ منحنی‌های تنش-کرنش برای مدل پلاستیسیته<sup>۲</sup>، مدل آسیب<sup>۳</sup> و مدل آسیب پلاستیک<sup>۴</sup> را نشان می‌دهد. در این شکل، شاخه بارگذاری با خطوط پر رنگ و شاخه باربرداری با خطوط کم رنگ نشان داده شده است [۱۹].

روابط بین تنش-کرنش در بارگذاری تک محوره فشاری و کششی بتن که در شکل ۱- ج نشان داده شده است به صورت زیر بدست می‌آید [۱].

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \quad (1)$$

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \quad (2)$$

در بارگذاری و باربرداری متناوب برای مدل آسیب پلاستیک، کاهش سختی الاستیک از رابطه ذیل بدست می‌آید [۸].

$$E = (1 - d) E_0 \quad (3)$$

[۱۶]. در ترک‌خوردگی کششی در اثر کشش تک محوره، منحنی تنش-کرنش تا نقطه تنش خرابی به صورت خطی تغییر می‌کند، که این تنش با شروع و گسترش ترک‌های ریز در بتن همراه می‌باشد. پس از عبور از نقطه مذکور، خرابی‌ها به صورت ترک‌های قابل مشاهده در می‌آیند و به صورت منحنی نرم شوندگی در فضای تنش-کرنش نمایش داده می‌شوند. در خرد شدن فشاری بتن تحت فشار تک محوره، پاسخ تا رسیدن به نقطه جاری شدگی به صورت الاستیک خواهد بود و رفتار در ناحیه پلاستیک عموماً به صورت منحنی سخت شوندگی بیان می‌شود و در نهایت با رسیدن به نقطه‌ی تنش نهایی، منحنی‌ها به صورت منحنی نرم‌شوندگی در می‌آیند. در این مدل معرفی شده با وجود سادگی نسبی، خصوصیات اصلی بتن را ارضا می‌کند [۱۷].

## ۲-۲- مدل آسیب پلاستیک بتن

مدل آسیب پلاستیک بتن، تعمیم یافته‌ی معیار شکست دراگر - پراگر<sup>۱</sup> می‌باشد که یکی از تئوری‌های قوی در مدل‌سازی شکست بتن مسلح است. این مدل با استفاده از مفاهیم آسیب الاستیک ایزوتروپیک و آسیب پلاستیک کششی و فشاری، رفتار غیرخطی بتن را بیان می‌کند که قابلیت استفاده در محاسبات استاتیکی و دینامیکی را نیز دارا می‌باشد. برخی قابلیت‌های این مدل نظیر ۱- قابلیت مدل‌سازی بتن در انواع مختلف سیستم‌های سازه‌ای مانند: المان تیری، المان خرابی، پوسته و المان‌های سه بعدی. ۲- قابلیت کاربرد در بتن مسلح

2 Plasticity model  
3 Damage model  
4 Plastic damage model

1 Drucker - Pruger

جدول ۱. پارامترهای مدل آسیب پلاستیک بتن

Table 1. Parameters of concrete plastic damage model

$K_c$	$\Psi$ (°)	$(f_{b0}/f_{c0})$	$\varepsilon$
0.7	31	1.16	0.1

چهار مقدار بوده که در جدول ۱ آورده شده است [۱۹] و [۲۰].

### ۳-۲- محاسبه پارامترهای آسیب بتن

در شکل ۳ انرژی اتلاف شده به وسیله آسیب نشان داده شده است.  $g_c$  و  $g_t$  نیز به ترتیب انرژی تلف شده واحد حجم به وسیله آسیب فشاری و کششی بتن در طول مرحله تخریب کل سازه را بیان می‌کند [۱۸].

در روابط زیر  $d_c$  و  $d_t$  به ترتیب آسیب فشاری بتن و آسیب کششی بتن هستند که مقدار آن‌ها بین ۰ (بدون آسیب) و ۱ (تخریب) می‌باشد [۱۸].

$$d_c = \frac{1}{g_c} \int_0^{\varepsilon_c^{ch}} \sigma_c d\varepsilon_c^{ch} \quad g_c = \int_0^{\infty} \sigma_c d\varepsilon_c^{ch} \quad (10)$$

$$d_t = \frac{1}{g_t} \int_0^{\varepsilon_t^{ck}} \sigma_t d\varepsilon_t^{ck} \quad g_t = \int_0^{\infty} \sigma_t d\varepsilon_t^{ck} \quad (11)$$

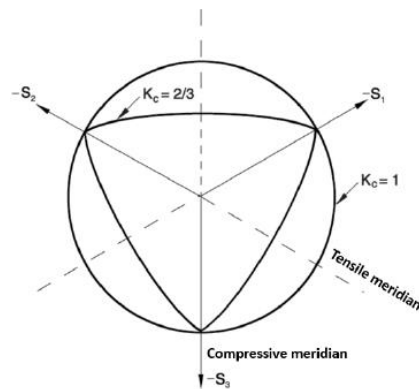
روابط بین تنش فشاری بر حسب کرنش خردشدگی و تنش کششی بر حسب کرنش ترک‌خوردگی به صورت زیر بیان شده است [۱].

$$\sigma_c = f_{c0} [(1 + a_c) \exp(-b_c \varepsilon_c^{ch}) - a_c \exp(-2b_c \varepsilon_c^{ch})] \quad (12)$$

$$\sigma_t = f_{t0} [2(1 + a_t) \exp(-b_t \varepsilon_t^{ck}) - a_t \exp(-2b_t \varepsilon_t^{ck})] \quad (13)$$

پس از جایگزینی روابط (۱۲) و (۱۳) در روابط (۱۰) و (۱۱)، نتایج ذیل بدست می‌آیند [۲۱].

$$d_c = 1 - \frac{1}{2 + a_c} [2(1 + a_c) \exp(-b_c \varepsilon_c^{ch}) - a_c \exp(-2b_c \varepsilon_c^{ch})] \quad (14)$$



شکل ۲. سطح تسلیم در پلان انحراف برای چندین مقدار.   
 Fig. 2. Yield surface in the deviatoric plan for several values of  $K_c$

در مدل پلاستیسیته روابط ذیل برقرار می‌باشند [۸].

$$F = \frac{1}{1 - \alpha} (q - 3\alpha p + \beta \langle \sigma_{max} \rangle - \gamma \langle \sigma_{max} \rangle) - \bar{\sigma}_c = 0 \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{(f_{b0}/f_{c0}) - 1}{2(f_{b0}/f_{c0}) - 1} \quad \beta = \frac{\bar{\sigma}_c}{\bar{\sigma}_t} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad \gamma = \frac{3(1 - K_c)}{2K_c - 1} \quad (5)$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1 - d_c)} \quad (6)$$

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1 - d_t)} \quad (7)$$

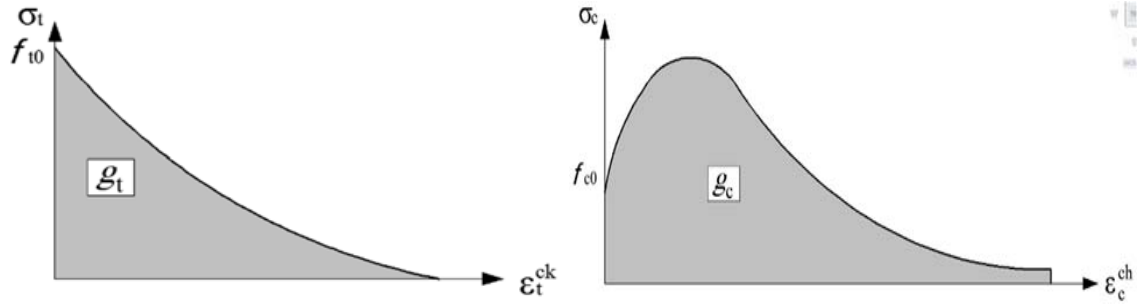
$$G = \sqrt{(\varepsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + q^2} - p \tan \psi \quad (8)$$

$K_c$  نسبت بین تنش انحرافی کشش تک محوره به تنش انحرافی فشاری تک محوره که مقدار آن بین ۰/۵ (سطح تنش تسلیم رانکین) و ۱/۰ (سطح تنش تسلیم وان مایسز) می‌باشد. در صورت جایگزینی زاویه شکست ۳۲ درجه در رابطه (۹)، مقدار  $K_c$  برابر ۰٫۷ بدست می‌آید. در شکل ۲ سطح تسلیم در پلان انحراف برای مقادیر مختلف  $K_c$  بین ۰/۵ تا ۱/۰ نشان داده شده است [۱۹].

$$K_c = \frac{3 - \sin \phi}{3 + \sin \phi} \quad (9)$$

پارامترهای مؤثر در مدل آسیب پلاستیک بتن (CPDM) دارای

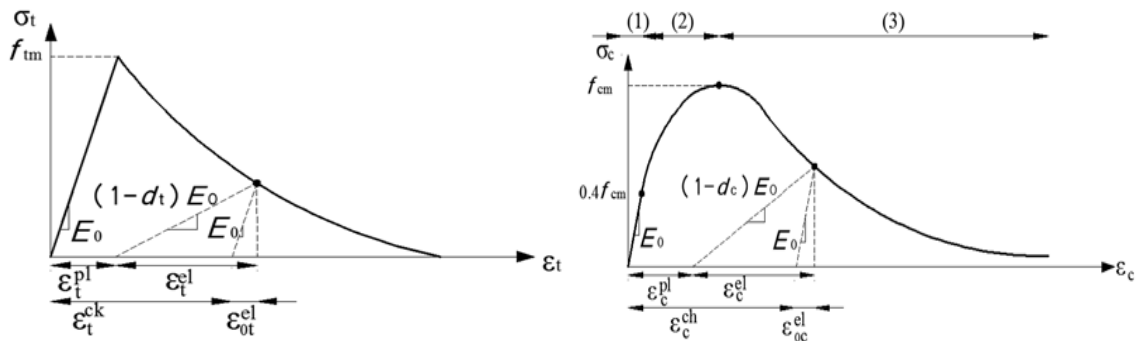
1 No damage  
2 Destruction



الف) تنش فشاری (gc)      ب) تنش کششی (gt)

شکل ۳. بخش‌های انرژی تلف شده به وسیله آسیب.

Fig. 3. Parts of energy dissipated by damage. a) Compression (gc). b) Tension (gt)



الف) رفتار فشاری بتن      ب) رفتار کششی بتن

شکل ۴. رفتار بتن در مدل تک محوره.

Fig. 4. Assumed uniaxial model of concrete behavior. a) Compression. b) Tension

$$\sigma_{c(1)} = E_0 \varepsilon_c \quad (18)$$

$$d_t = 1 - \frac{1}{2 + a_t} [2(1 + a_t) \exp(-b_t \varepsilon_t^{ck}) - a_t \exp(-2b_t \varepsilon_t^{ck})] \quad (15)$$

$$\sigma_{c(2)} = \frac{E_{ci} \frac{\varepsilon_c}{f_{cm}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cm}}\right)^2}{1 + \left(E_{ci} \frac{\varepsilon_c}{f_{cm}} - 2\right) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cm}}} \quad (19)$$

$$a_c = 2(f_{cm}/f_{c0}) - 1 + 2\sqrt{(f_{cm}/f_{c0})^2 - (f_{cm}/f_{c0})} \quad (16)$$

$$a_t = 2(f_{tm}/f_{t0}) - 1 + 2\sqrt{(f_{tm}/f_{t0})^2 - (f_{tm}/f_{t0})} \quad (17)$$

$$\sigma_{c(3)} = \left( \frac{2 + \gamma_c f_{cm} \varepsilon_c}{2 f_{cm}} - \gamma_c \varepsilon_c + \frac{\varepsilon_c^2 \gamma_c}{2 \varepsilon_{cm}} \right)^{-1} \quad (20)$$

#### ۴-۲ رفتار تک محوره بتن

شکل ۴- الف نشان دهنده تنش فشاری بتن بوده که قسمت ۱ منحنی به صورت خطی طبق رابطه (۱۸) و قسمت ۲ منحنی به صورت غیرخطی صعودی طبق رابطه (۱۹) و قسمت ۳ منحنی مطابق روابط (۲۰) تا (۲۲) می‌باشند [۲۱].

$$\gamma_c = \frac{\pi^2 f_{cm} \varepsilon_{cm}}{2 \left[ \frac{G_{ch}}{l_{eq}} - 0.5 f_{cm} \left( \varepsilon_{cm} (1 - b) + b \frac{f_{cm}}{E_0} \right) \right]^2}$$

$$w_c = 5.14 G_F / f_{tm}$$

$$b = \frac{\varepsilon_c^{pl}}{\varepsilon_c^{ch}} \quad (21)$$

رابطه بین مقاومت فشاری بتن  $f_{cm}$  و انرژی شکست در واحد سطح  $G_F$  به صورت ذیل می‌باشد [۲۲].

$$\varepsilon_{cm} = 0.0022 \quad f_{cm} = f_{ck} + 8$$

$$G_F = 0.073 f_{cm}^{0.18} \quad (24)$$

$$f_{tm} = 0.3016 f_{ck}^{2/3} \quad (22)$$

انرژی خرد شدگی بتن  $G_{ch}$  و کرنش کششی  $\varepsilon_t$  از روابط زیر بدست می‌آیند [۱۸].

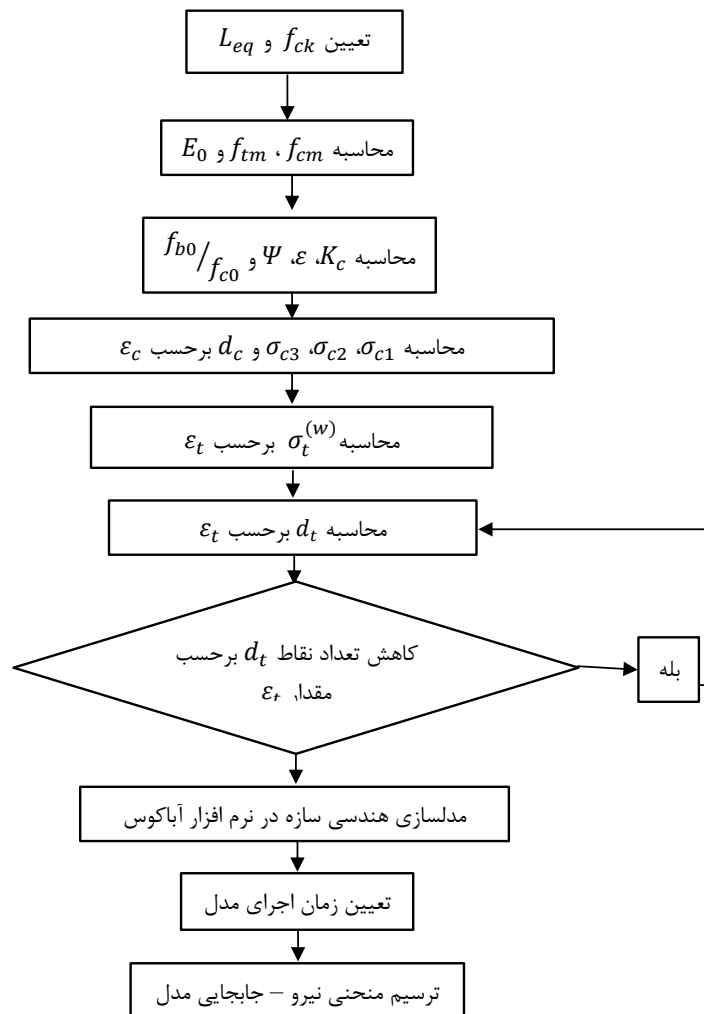
منحنی تنش-کششی بتن بر حسب کرنش کششی شامل یک قسمت خطی اولیه و یک شاخه نزولی که در شکل ۴-ب نمایش داده شده است، می‌باشد. رابطه بین تنش کششی بتن  $\sigma_t^{(w)}$  و مقاومت کششی بتن  $f_{tm}$  در زیر نشان داده شده است [۲۲].

$$G_{ch} = \left( \frac{f_{cm}}{f_{tm}} \right)^2 G_F \quad (25)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{tm} + w/leq \quad (26)$$

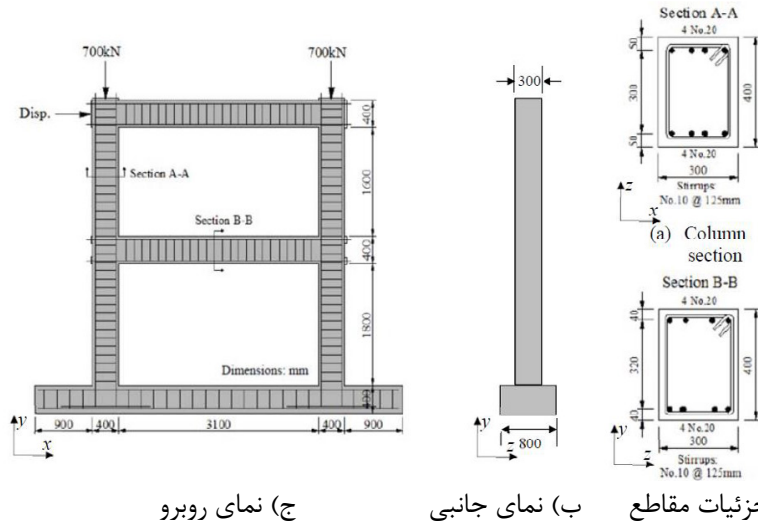
$$\frac{\sigma_t^{(w)}}{f_{tm}} = \left[ 1 + \left( c_1 \frac{w}{w_c} \right)^3 \right] e^{-c_2 \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) e^{-c_2} \quad (23)$$

در شکل ۵ فلوجارت مراحل تحلیل پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل ۵. فلوجارت الگوریتم پارامترهای آسیب و اجرای حل عددی.

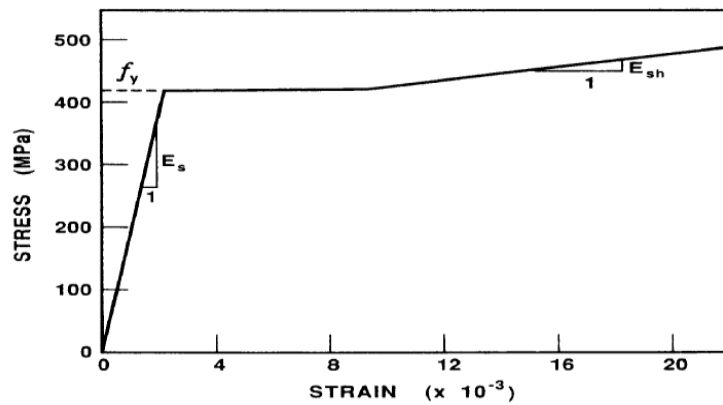
Fig. 5. Flowchart algorithm of damage parameters and execution of numerical solution



الف) جزئیات مقاطع (ب) نمای جانبی (ج) نمای روبرو

شکل ۶. سازه قاب بتن مسلح یک دهانه دو طبقه [۲۳].

Fig. 6. First frame experiment [23]. a) Beam section. b) Side view. c) Front view



شکل ۷. نمودار تنش - کرنش فولاد در سازه قاب بتن مسلح [۲۴].

Fig. 7. Stress-strain diagram of steel in reinforced concrete frame structures [24]

### ۳- شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی

کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. در شکل ۶ مشخصات این قاب بتن مسلح به صورت، یک دهانه‌ی دو طبقه، نمایش داده شده است. در اشکال ۶- الف، ۶- ب و ۶- ج به ترتیب جزئیات مقاطع، نمای جانبی و نمای روبروی این قاب نشان داده شده‌اند [۲۳].

در مدل آزمایشگاهی، ضریب پواسون فولاد ۰/۳، چگالی نسبی فولاد ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشند. شکل ۷ نمودار تنش-کرنش فولاد و جدول ۲ مشخصات مکانیکی آرماتورهای مصرفی را نشان می‌دهند [۲۴].

پارامترهای مدل آزمایشگاهی محاسبه گردیده و در جدول ۳ نشان داده شده‌اند [۲۵].

برای اطمینان از صحت مدل‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس، نتایج یک مدل آزمایشگاهی با نتایج تحلیل مدل شبیه‌سازی شده، مقایسه می‌گردند. مدل آزمایشگاهی توسط ویکچو و امارا [۲۳] در آزمایشگاه به صورت استاتیکی تا زمان شکست و تخریب بتن، بارگذاری گردیده است. در مدل آزمایشگاهی، بار عمودی ۷۰۰ کیلو نیوتن به بالای قاب و تغییر مکان جانبی به مقدار ۱۸۰ میلی‌متر به صورت استاتیکی گام به گام وارد گردیده است. مقاومت مشخصه بتن برای نمونه استوانه‌ای استاندارد ۳۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته بتن ۲۳۶۷۰ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۲ و چگالی نسبی بتن ۲۴۰۰

جدول ۲. پارامترهای فولاد برای قاب مسلح بتنی

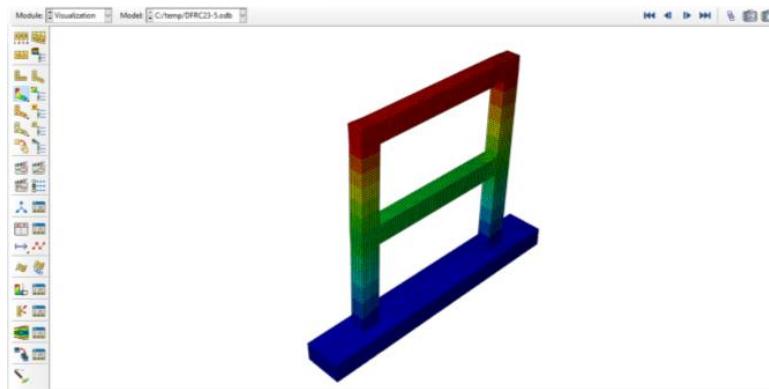
Table 2. Steel parameters for reinforced concrete frame

Bar No.	$D_b$ (mm)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$E_{sh}$ (MPa)	$\varepsilon_{sh}$	$\varepsilon_u$
20	19.5	418	596	192.5	3100	0.0095	0.0669
10	11.3	454	640	200	3100	0.0095	0.0695

جدول ۳. پارامترهای مدل‌سازی قاب بتن مسلح در آباکوس

Table 3. Parameters of reinforced concrete frame modeling in Abaqus

$f_{ck}$ (MPa)	$f_{cm}$ (MPa)	$f_{tm}$ (MPa)	$G_{ch}$ (N/mm)	$G_F$ (N/mm)	$b$	$a_c$	$a_t$	$l_{eq}$ (mm)	$b_c$	$b_t$
30	38	2.912	23.93	0.1405	0.75	7.873	1	50	156.83	1554.54



شکل ۸. مشخصات قاب بتن مسلح یک دهانه دو طبقه در آباکوس.

Fig. 8. Specifications of a reinforced concrete frame of two-story one-span in Abaqus.

۴-۱ مدل‌سازی رفتار فشاری آسیب پلاستیک بتن از رابطه (۱۴) و با داشتن کرنش‌های فشاری، مقادیر آسیب فشاری بتن و از روابط (۱۸) تا (۲۲)، تنش‌های فشاری و کرنش‌های خرد شدگی بتن بدست می‌آیند. این مقادیر در قسمت رفتار فشاری بتن در نرم‌افزار آباکوس وارد می‌گردند. مقادیر عددی این پارامترها در شکل ۹ ارائه شده است.

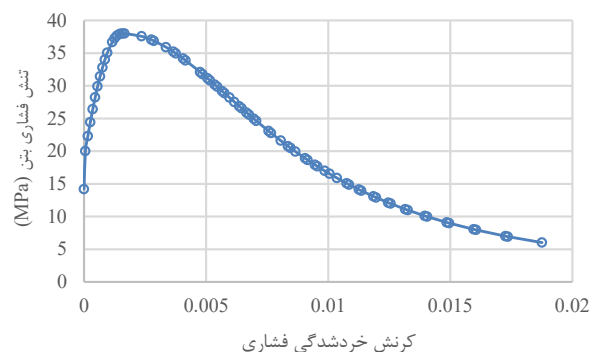
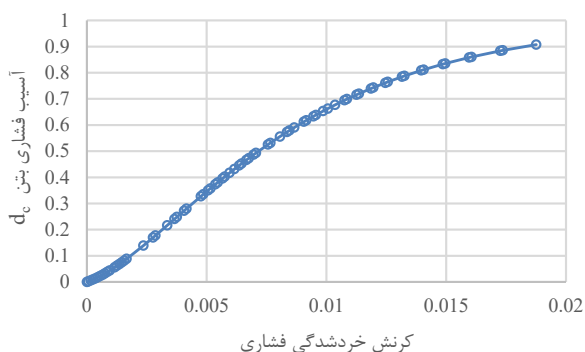
۴-۲ مدل‌سازی رفتار کششی آسیب پلاستیک بتن با استفاده از رابطه (۱۵) و با داشتن کرنش‌های کششی، مقادیر آسیب کششی بتن و از رابطه (۲۳)، تنش‌های کششی و کرنش‌های ترک‌خوردگی بتن بدست می‌آیند. این مقادیر در قسمت رفتار کششی

در شکل ۸ مش بندی اجزاء محدود مدل و تغییرشکل المان‌ها نمایش داده شده است که در آن آرماتورهای طولی و عرضی با المان خریابی دو گره‌ای (T3D2) و قسمت بتنی با المان سه بعدی شش وجهی ۸ گره‌ای (C3D8R) المان‌بندی شده است.

#### ۴- شبیه‌سازی و تحلیل عددی

برای شبیه‌سازی و تحلیل عددی مدل‌های پیشنهادی، ابتدا توسط نرم‌افزار آباکوس ۲۰۱۶ مدل آزمایشگاهی شبیه‌سازی می‌گردد. پس از اطمینان از صحت نتایج مدل شبیه‌سازی شده با مدل آزمایشگاهی، مشخصات مصالح بتن، تغییر داده می‌شود و مدل‌های جدید، آنالیز می‌گردند.

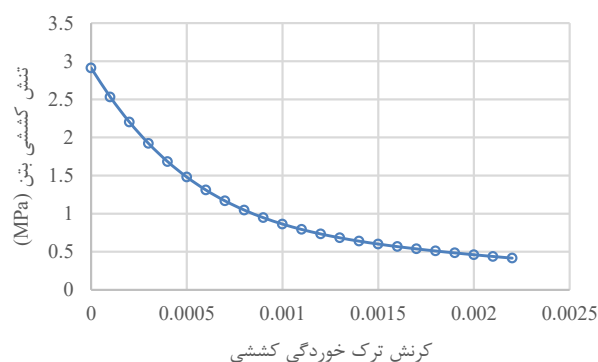
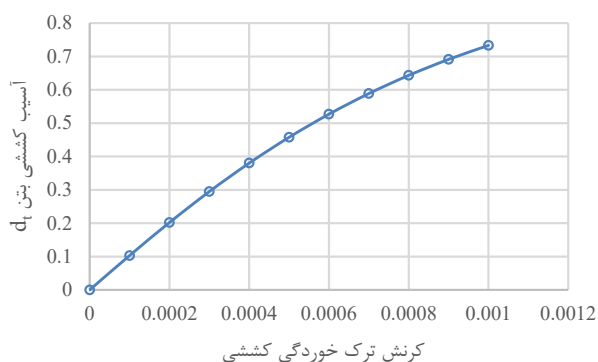




الف) کرنش خردشدگی فشاری - تنش فشاری بتن (تعداد ۷۳ نقطه)      ب) کرنش خرد شدگی فشاری - آسیب فشاری بتن (تعداد ۷۳ نقطه)

شکل ۹. پارامترهای فشاری آسیب پلاستیک بتن.

**Fig. 9. Compressive parameters of concrete plastic damage. a) Compressive crushing strain - compressive stress of concrete (73 points). b) Compressive crushing strain - compressive damage of concrete (73 points)**



الف) کرنش ترک خوردگی کششی - تنش کششی بتن (تعداد ۲۳ نقطه)      ب) کرنش ترک خوردگی کششی - آسیب کششی بتن (تعداد ۱۱ نقطه)

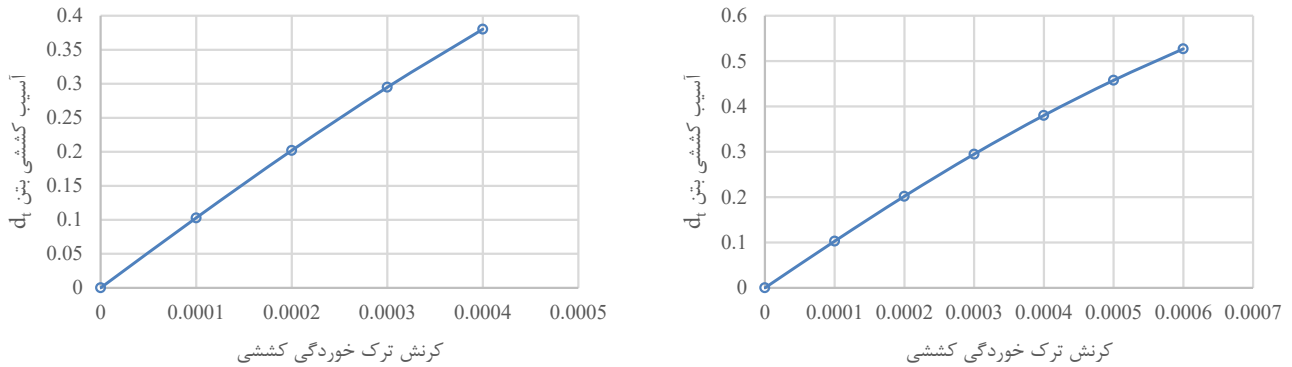
شکل ۱۰. پارامترهای کششی آسیب پلاستیک بتن (مدل اول).

**Fig. 10. Tensile parameters of concrete plastic damage (first model). a) Tensile cracking strain - Tensile stress of concrete (23 points). b) Tensile cracking strain - Tensile damage of concrete (11 points)**

آسیب کششی بطور کامل با تعداد ۱۱ نقطه وارد می‌گردند. این مقادیر عددی در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. به همین ترتیب، در مدل‌های دوم و سوم، تعداد نقاط مربوط به کرنش ترک خوردگی بتن برحسب آسیب کششی کاهش داده شده‌اند. بطوریکه، مقادیر YY از ۱۱ نقطه به ۷ و ۵ نقطه به ترتیب کاهش می‌یابند. در شکل ۱۱ مقادیر عددی پارامترهای رفتار کشش نشان داده شده‌اند.

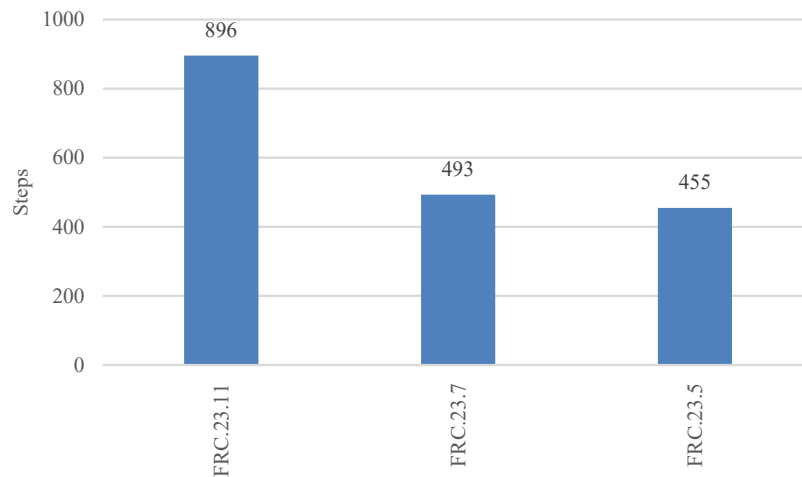
پس از تحلیل غیرخطی مدل‌های اول، دوم و سوم، نتایج خروجی مقادیر نیرو و جابه‌جایی جانبی سازه و تعداد گام‌های تحلیل این سه مدل بدست آورده شده است. در شکل ۱۲ مقادیر عددی در هر گام

بتن در نرم‌افزار آباکوس وارد می‌گردند. در این تحقیق سه مدل قاب بتن مسلح به روش آسیب پلاستیک بتن با مشخصات رفتار کششی مختلف، شبیه‌سازی شده است. این مدل‌ها به شکل FRC.XX.YY نام گذاری شده‌اند. در این نام‌گذاری XX تعداد نقاط تنش کششی بر حسب کرنش ترک خوردگی بتن و YY تعداد نقاط کرنش ترک خوردگی بر حسب پارامتر آسیب کششی بتن را نشان می‌دهند. در مدل اول، رفتار کششی بتن برای تحلیل غیرخطی آسیب پلاستیک بتن بطور کامل در نظر گرفته شده است. به عبارتی نقاط مربوط به تنش کششی برحسب کرنش ترک خوردگی کششی بتن بطور کامل و با تعداد ۲۳ نقطه و نقاط مربوط به کرنش ترک خوردگی بتن بر حسب



الف) کرنش ترک خوردگی کششی - آسیب کششی بتن (تعداد ۷ نقطه)      ب) کرنش ترک خوردگی کششی - آسیب کششی بتن (تعداد ۵ نقطه)  
 شکل ۱۱. نمودار کاهش تعداد نقاط آسیب کششی بتن (مدل‌های دوم و سوم).

Fig. 11. Graph of reducing the number of tensile damage points of concrete (second and third models). a) Tensile cracking strain - Tensile damage of concrete (7 points). b) Tensile cracking strain - Tensile damage of concrete (5 points)



شکل ۱۲. تعداد گام‌های تحلیل سازه سه مدل در روش استاتیکی گام به گام.  
 Fig. 12. Number of structural analysis steps of three models in the step-by-step static method.

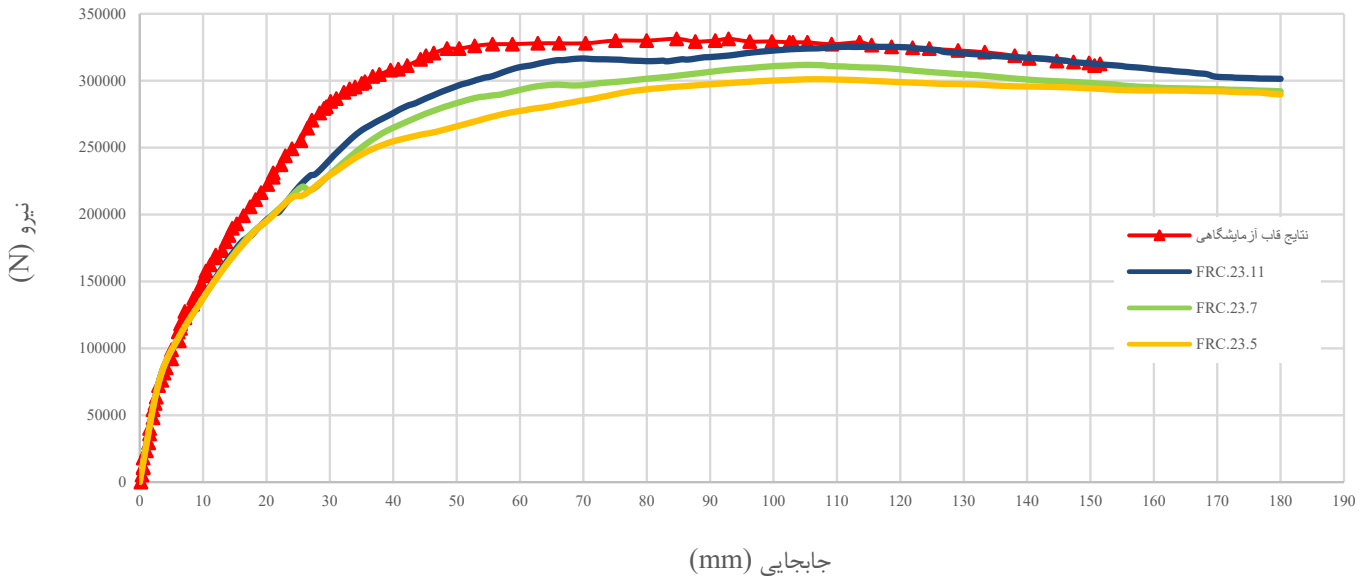
بتن مسلح وجود دارد. به همین دلیل مقایسه مدل‌های شبیه‌سازی شده با مدل آزمایشگاهی آسان می‌گردد.

در شکل ۱۳ نتایج عددی ظرفیت قاب بتن مسلح آزمایشگاهی با نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی سه مدل FRC.23.11 و FRC.23.7 و FRC.23.5 مقایسه شده‌اند. در مدل FRC.23.11 تعداد نقاط رفتار کششی و فشاری بتن، مساوی با تعداد نقاط رفتار کششی و فشاری مدل آزمایشگاهی می‌باشند. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، مقایسه منحنی نتایج قاب آزمایشگاهی با نتایج

تحلیل نشان داده شده است.

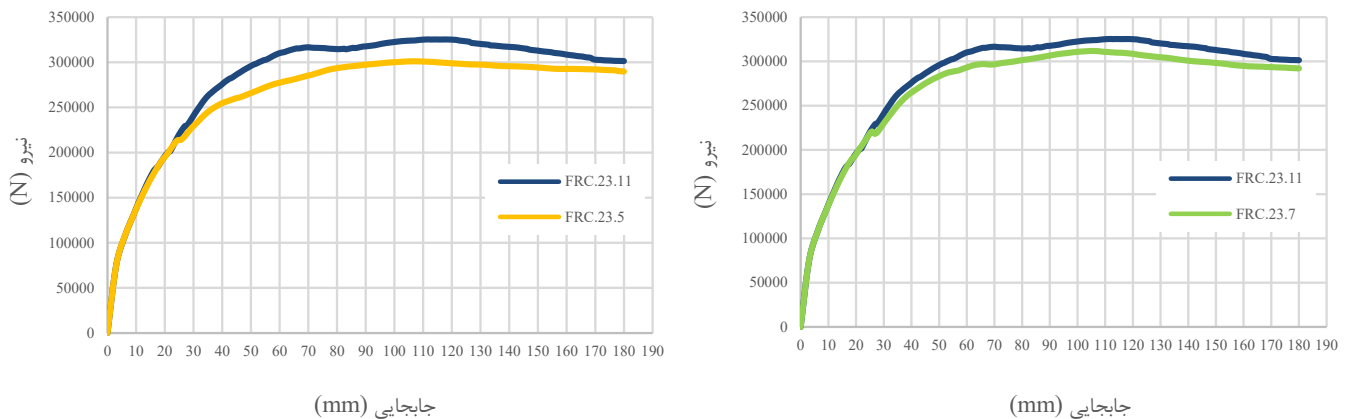
##### ۵- نتایج و بحث

یکی از روش‌های مناسب برای آنالیز غیرخطی سازه‌های بتن مسلح در روش آسیب پلاستیک بتن، استفاده از آنالیز غیرخطی استاتیکی گام به گام می‌باشد. در این نوع آنالیز، به دلیل تعداد زیاد گام‌های حل مسئله و فاصله کوتاه بین آن‌ها، امکان ارزیابی دقیق محل ترک خوردگی، رشد ترک و بررسی آسیب کششی و فشاری در سازه



شکل ۱۳. مقایسه منحنی ظرفیت (نیرو - جابه‌جایی) قاب‌های مدل‌سازی شده در آباکوس با مدل آزمایشگاهی.

Fig. 13 Comparison of capacity (force-displacement) curves of frames modeled in Abacus with experimental model.



شکل ۱۴. مقایسه منحنی‌های ظرفیت (جابه‌جایی - نیرو) قاب با مدل‌های رفتاری دوم و سوم.

Fig. 14. Comparison of capacity (displacement-force) curves of frame with second and third behavioral models.

تعداد نقاط در رفتار کششی، موجب کاهش زمان تحلیل شده و حداکثر ۱۰٪ خطا در محاسبه ظرفیت سازه بوجود می‌آید که این نتیجه برای تحلیل سازه‌های بتن مسلح به روش آسیب پلاستیک بتن با تعداد المان زیاد می‌تواند مؤثر باشد. بر اساس تحلیل عددی انجام شده نتایج ذیل حاصل گردید:

۱. در تحلیل غیرخطی قاب بتن مسلح به روش آسیب پلاستیک بتن، با کاهش تعداد نقاط مدل‌سازی مربوط به رفتار کششی از ۱۱ نقطه به ۷ و ۵ نقطه، به ترتیب زمان تحلیل سازه به میزان ۵۰٪ و ۴۵٪ کاهش یافته است.

مدل FRC.23.11 نشان می‌دهند که صحت‌سنجی مدل‌سازی به خوبی صورت گرفته است و مشخصات مصالح بتن و فولاد به درستی وارد نرم‌افزار شده است. همچنین در شکل ۱۴، نتایج ظرفیت سازه برای مدل‌های دوم و سوم با نتایج مدل اول مقایسه شده‌اند.

## ۶- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر اثرات ناشی از کاهش تعداد نقاط پارامتر خسارت کششی بتن در تحلیل به روش آسیب پلاستیک بتن توسط نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد با کاهش

تنش تسلیم، $N/mm^2$	$f_y$	۲. با مقایسه نتایج منحنی ظرفیت قاب بتن مسلح بدست آمده از
تابع پتانسیل در تابع هذلولی دراگر پراگر	$G$	روش آسیب پلاستیک بتن با نتایج مدل آزمایشگاهی مشخص گردید
انرژی خرد شدگی بتن، $N/mm$	$G_{ch}$	که با کاهش تعداد نقاط مدل سازی مربوط به رفتار کششی از ۱۱
انرژی شکست در واحد سطح، $N/mm$	$G_F$	نقطه به ۷ و ۵ نقطه، به ترتیب میزان خطا ۶/۵٪ و ۱۰٪ بوده است.
طول المان، $mm$	$l_{eq}$	۳. مقایسه نتایج تحلیل عددی قاب بتن مسلح با نتایج آزمایشگاهی
فشار هیدرواستاتیک، $N/mm^2$	$P$	نشان داد که روش آسیب پلاستیک بتن از همگرایی قابل قبولی
تنش مؤثر معادل وان مایسنز، $N/mm^2$	$q$	برخوردار است.
عرض ترک، $mm$	$w$	۴. در تحلیل عددی به روش آسیب پلاستیک بتن شیب منحنی
عرض ترک بحرانی، $mm$	$w_c$	کرنش ترک خوردگی کششی با پارامتر آسیب کششی قابل بیان است.
	<b>علائم یونانی</b>	<b>فهرست علائم</b>
	$\alpha$	$A$ مساحت، $m^2$
ضریب ثابت رابطه ۵	$\beta$	$a_c / a_t$ ضرایب روابط ۱۲ و ۱۳
ضریب ثابت رابطه ۵	$\gamma$	$b_c / b_t$ ضرایب روابط ۱۲ و ۱۳
ضریب ثابت رابطه ۵	$\varepsilon_c^{el}$	$c_1 / c_2$ ضرایب ثابت رابطه ۲۳
کرنش فشاری الاستیک با آسیب	$\varepsilon_c^{pl}$	$D_b$ قطر میلگرد، $mm$
کرنش فشاری پلاستیک با آسیب	$\varepsilon_{ch}$	$d$ پارامتر آسیب
کرنش فشاری خرد شدگی بدون آسیب	$\varepsilon_{cm}$	$d_c$ پارامتر آسیب فشاری
کرنش فشاری بتن	$\varepsilon_{0c}^{el}$	$d_t$ پارامتر آسیب کششی
کرنش فشاری الاستیک بدون آسیب	$\varepsilon_{sh}$	$E$ مدول الاستیسیته کاهش یافته، $N/mm^2$
کرنش سخت شدگی فولاد	$\varepsilon_t^{ck}$	$E_0$ مدول الاستیسیته، $N/mm^2$
کرنش کششی ترک خوردگی بدون آسیب	$\varepsilon_t^{el}$	$E_s$ مدول الاستیسیته فولاد، $N/mm^2$
کرنش کششی الاستیک با آسیب	$\varepsilon_t^{pl}$	$E_{sh}$ شیب سخت شدگی فولاد، $N/mm^2$
کرنش کششی پلاستیک با آسیب	$\varepsilon_{0t}^{el}$	$F$ تابع جریان
کرنش کششی الاستیک بدون آسیب	$\varepsilon_{tm}$	$f_{b0}$ تنش تسلیم فشاری دو محوره، $N/mm^2$
کرنش کششی بتن	$\varepsilon_u$	$f_{c0}$ تنش تسلیم فشاری تک محوره، $N/mm^2$
کرنش نهایی	$\sigma_{t0}$	$f_{ck}$ مقاومت مشخصه بتن فشاری، $N/mm^2$
تنش کششی تک محوره در شکست، $N/mm^2$	$\varphi$	$f_{cm}$ مقاومت فشاری بتن، $N/mm^2$
زاویه شکست، °		$f_{tm}$ مقاومت کششی بتن، $N/mm^2$
		$f_u$ تنش نهایی، $N/mm^2$

of concrete, *Mechanics of materials*, 4 (1985) 67-93.

- [12] J.C. Simo, J.W. Ju, Strain-and stress-based continuum damage models—I. Formulation, *International journal of solids and structures*, 23 (1987) 821-840.
- [13] R.K.A. Al-Rub, S.-M. Kim, Computational applications of a coupled plasticity-damage constitutive model for simulating plain concrete fracture, *Engineering Fracture Mechanics*, 77 (2010) 1577-1603.
- [14] U. Häussler-Combe, J. Hartig, Formulation and numerical implementation of a constitutive law for concrete with strain-based damage and plasticity, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 43 (2008) 399-415.
- [15] M. Sun, D. Xin, C. Zou, Damage evolution and plasticity development of concrete materials subjected to freeze-thaw during the load process, *Mechanics of Materials*, 139 (2019) 103192.
- [16] L. Qingfu, G. Wei, K. Yihang, Parameter calculation and verification of concrete plastic damage model of ABAQUS, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2020, pp. 12036.
- [17] K. Hibbitt, ABAQUS: User's Manual; Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc.: Pawtucket, RI, USA, (2013).
- [18] S. Oller, A continuous damage model for frictional materials, Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain, (1988).
- [19] S. Oller, *Nonlinear dynamics of structures*, (2014).
- [20] M. Poliotti, J.-M. Bairán, A new concrete plastic-damage model with an evolutive dilatancy parameter, *Engineering structures*, 189 (2019) 541-549.
- [21] F. Lopez-Almansa, B. Alfarah, S. Oller, Numerical simulation of RC frame testing with damaged plasticity model. Comparison with simplified models, in: *Second European conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, Turkey, 2014.
- [22] D.A. Hordijk, Tensile and tensile fatigue behaviour of concrete; experiments, modelling and analyses, *Heron*, 37 (1992).
- [23] F.J. Vecchio, M.B. Emara, Shear deformations in reinforced concrete frames, *ACI Structural journal*, 89 (1992) 46-56.

زاویه اتساع،  $\Psi$

خروج از مرکزیت سطح پتانسیل پلاستیک  $\in$

چگالی،  $\rho$   $\text{kg/m}^3$

## مراجع

- [1] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller, E. Oñate, A plastic-damage model for concrete, *International Journal of solids and structures*, 25 (1989) 299-326.
- [2] J. Faleiro, S. Oller, A.H. Barbat, Plastic-damage analysis of reinforced concrete frames, *Engineering Computations*, (2010).
- [3] A.C.T. Chen, W.-F. Chen, Constitutive relations for concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, 101 (1975).
- [4] F.B. Lin, Z.P. Bažant, J.C. Chern, A.H. Marchertas, Concrete model with normality and sequential identification, *Computers & structures*, 26 (1987) 1011-1025.
- [5] P. Grassl, M. Jirásek, Damage-plastic model for concrete failure, *International journal of solids and structures*, 43 (2006) 7166-7196.
- [6] J. Mazars, G. Pijaudier-Cabot, Continuum damage theory—application to concrete, *Journal of engineering mechanics*, 115 (1989) 345-365.
- [7] S. Fichant, C. La Borderie, G. Pijaudier-Cabot, Isotropic and anisotropic descriptions of damage in concrete structures, *Mechanics of Cohesive-frictional Materials: An International Journal on Experiments, Modelling and Computation of Materials and Structures*, 4 (1999) 339-359.
- [8] J. Lee, G.L. Fenves, Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures, *Journal of engineering mechanics*, 124 (1998) 892-900.
- [9] R. Faria, J. Oliver, M. Cervera, A strain-based plastic viscous-damage model for massive concrete structures, *International journal of solids and structures*, 35 (1998) 1533-1558.
- [10] P. Grassl, M. Jirásek, Plastic model with non-local damage applied to concrete, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30 (2006) 71-90.
- [11] M. Ortiz, A constitutive theory for the inelastic behavior

for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures, *Engineering Structures*, 132 (2017) 70-86.

[24] M.B. Emara, Shear deformations in reinforced concrete frames., (1992).

[25] B. Alfarah, F. López-Almansa, S. Oller, New methodology

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*E. Aragheizadeh, R. Tabatabaei Mirhosseini, Effect of Tensile Damage Parameter Reducing in Non-linear Analysis of Reinforced Concrete Structures using Concrete Damage Plasticity Method, Amirkabir J. Civil Eng., 53(1) (2021) 57-70.*

DOI: [10.22060/ceej.2021.19021.7031](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19021.7031)

