



Effect of Tensile Damage Parameter Reducing in Non-linear Analysis of Reinforced Concrete Structures using Concrete Damage Plasticity Method

E. Aragheizadeh¹, R. Tabatabaei Mirhosseini^{2,*}

¹ Civil Engineering Department, Islamic Azad University (Sirjan Branch), Sirjan, Iran.

² Civil Engineering Department, Islamic Azad University (Kerman Branch), Kerman, Iran.

ABSTRACT: Introducing the behavior of reinforced concrete materials is generally considered as one of the complex parts of modeling in finite element software. Thus, entering accurate material information has an effective role in software output results. There are several methods in ABAQUS software for nonlinear analysis of reinforced concrete, one of which is the use of a Concrete Damage Plasticity (CDP) model. In this method, entering the mechanical properties of concrete is of special importance, so that in case of insufficient data entry, many errors are created in the results and sometimes cause no convergence despite spending a lot of time analyzing in the software. In numerical modeling in ABAQUS using the CDP method, two conditions must be observed. Firstly, the sign of the plastic strains of the concrete are positive and secondly, with increasing the concrete strain, the plastic strains of concrete are also upward. These conditions cause the elimination and reduction of some points in the input information of concrete materials in the CDP method. In this study, the analysis procedure is performed by varying the number of stress points and tensile strain and tensile damage parameter (dt), this analysis is repeated. The results obtained by nonlinear analysis of reinforced concrete structure due to the reduction of the number of points of the mentioned parameters are specified as force-displacement curves and the results show that by reducing the number of these points, with a minor error, the time of structural analysis is significantly reduced.

Review History:

Received: 9/17/2020

Revised: 12/12/2020

Accepted: 1/27/2021

Available Online: 2/15/2021

Keywords:

Concrete damage plasticity model

Non-linear Analysis

Concrete tensile damage parameter

Abaqus

Reinforced concret

1. INTRODUCTION

The behavior of reinforced concrete structures in the face of extreme forces such as the force of ground motion is very complex, and this complexity is mainly due to the joint confrontation of concrete and steel with those forces. In addition, increasing seismic awareness and concern around the world has led to new advances in reinforced concrete engineering. However, simple numerical models are widely used and relied on in many issues due to their average cost. Researchers have begun extensive research into modeling concrete using advanced numerical models. Chen *et al.* in a study entitled constitutive relations of concrete showed that the nonlinear response of concrete can be expressed using the theory of plasticity or the theory of damage, but none of these methods alone can describe this phenomenon [1]. Lin *et al.* also confirmed this subject in another study [2]. Many models of isotropic plastic damage from 1996 to 2008 have been proposed by many researchers [3-8]. Several different models have been simulated reinforced concrete structures with the concrete plastic damage method, with different strengths and different temperatures, using ABAQUS software and the results with experimental models have been compared [9]. In the present study, to analyze the reinforced concrete structure

*Corresponding author's email: tabatabaei@iauk.ac.ir

using ABAQUS in the section of concrete compressive damage, first, the number of points of the parameters of concrete compressive stress, concrete compressive strain, and compressive damage (d_c) are completely entered as input of the software. In the section of tensile damage of concrete, the number of points of the parameter of tensile damage of concrete (d_t) are completely entered. Then, the number of tensile stress points of concrete and the cracking strain of concrete are reduced to determine the effect of reducing these points on the capacity of reinforced concrete structures.

2. MODELING IN SOFTWARE

The precise definition of materials for finite element modeling with elastic and plastic behavior in compressive and tensile parts has a great impact on output responses. The compressive behavior of concrete should include both elastic and full plastic properties of the concrete in softening and stiffening. Regarding the tensile behavior of concrete, the properties of concrete in both elastic and plastic states for tensile softening, tensile hardening, and local bonding effect must be considered. Relationships between compressive stress in terms of fracture strain and tensile stress in terms of crack strain and relations between damage parameters are obtained [10]. To ensure the accuracy of the simulated



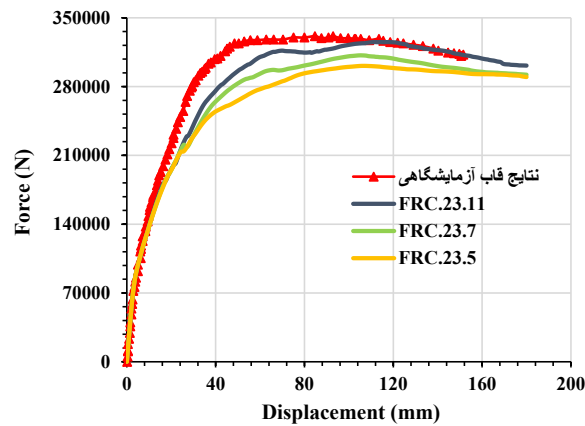


Fig. 1. Comparison of capacity (force-displacement) curves of frames modeled in ABAQUS with the experimental model.

models in ABAQUS, the results of a laboratory model are compared with the results of the simulated model analysis. The values of tensile damage of concrete and tensile stresses and cracking strains of concrete can be obtained using the relationships. These values are entered in the tensile behavior of concrete as input of the software. In this research, three models of reinforced concrete frames have been simulated by the concrete plastic damage method with different tensile behavior characteristics. These models are named FRC.XX.YY. In this designation, XX shows the number of tensile stress points in terms of concrete cracking strain and YY shows the number of cracking strain points in terms of the concrete tensile damage parameter. In the first model, the tensile behavior of concrete is completely considered using the CDP nonlinear analysis. So, the points related to tensile stress in terms of the tensile cracking strain of concrete are completely entered with 23 points, and the points related to the strain of concrete cracking in terms of tensile damage are completely entered with 11 points. Similarly, in the second and third models, the number of points related to the cracking stress of concrete is reduced in terms of tensile damage. Thus, YY values decrease from 11 points to 7 and 5 points, respectively. The output results of force values and lateral displacement of the structure and the number of analysis steps of these three models are obtained.

3. RESULTS AND DISCUSSION

One of the suitable methods for nonlinear analysis of reinforced concrete structures in the concrete plastic damage method is the use of a stepwise nonlinear static analysis. In this type of analysis, due to a large number of problem-solving steps and the short distance between them, it is possible to accurately assess the location of cracks, crack growth and investigate tensile and compressive damage in reinforced concrete structures. It is easy to compare simulated models with laboratory models. Fig. 1 compares the numerical results of the laboratory reinforced concrete frame capacity with those results of the nonlinear analysis of the three models FRC.23.11, FRC.23.7, and FRC.23.5. In FRC.23.11 model, the number of tensile and compressive behavior points of concrete is equal to the number of tensile and compressive behavior

points of the laboratory model. As can be seen in Figure 1, a comparison of the laboratory frame results curves with the FRC.23.11 model results shows that the modeling validation has been done well and the specifications of concrete and steel materials have been entered correctly into the software.

4. CONCLUSIONS

In the present study, it was found the analysis time is also reduced by reducing the number of points of tensile behavior, which is an effective application for the nonlinear analysis of the large reinforced concrete structures using the CDP method. On the other hand, by reducing the number of values of tensile behavior, a maximum of 10% error occurs in calculating the capacity of the structure, which in many analyzes, this error can be ignored. It should be noted that reducing the number of values of tensile behavior is not appropriate for the analysis of structures to compare the amount of damage in each element. Therefore, it is recommended to use the maximum number of tensile values for this type of analysis.

REFERENCES

- [1] A.C.T. Chen, W.-F. Chen, Constitutive relations for concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, 101 (1975).
- [2] F.B. Lin, Z.P. Bazant, J.C. Chern, A.H. Marchertas, Concrete model with normality and sequential identification, *Computers & structures*, 26 (1987) 1011-1025.
- [3] R. Faria, J. Oliver, M. Cervera, A strain-based plastic viscoelastic-damage model for massive concrete structures, *International journal of solids and structures*, 35 (1998) 1533-1558.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] J. Lee, G.L. Fenves, Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures, *Journal of engineering mechanics*, 124 (1998) 892-900.
- [7] M. Ortiz, A constitutive theory for the inelastic behavior of concrete, *Mechanics of Materials*, 4 (1985) 67-93.

- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] B. Alfarah, F. López-Almansa, S. Oller, New methodology for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures, *Engineering Structures*, 132 (2017) 70-86.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

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) 15-18.

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





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

احسان عراقی زاده^۱، رامین طباطبایی میرحسینی^{۲*}

^۱ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان، سیرجان، ایران.
^۲ 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

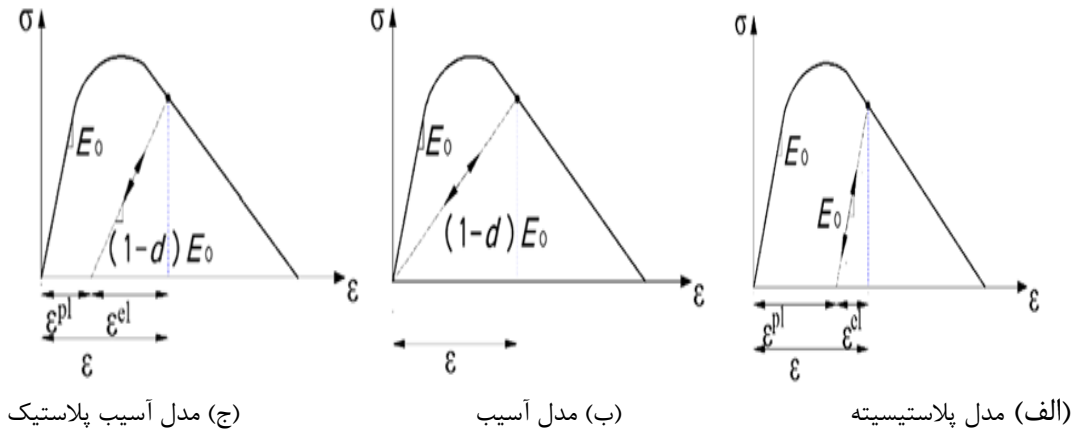
۲-۱- مدل‌سازی در نرم‌افزار

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^۲، مدل ترک‌خوردگی بتن ترد^۳ و مدل پلاستیسیته آسیب بتن^۴ می‌باشند. در روش آخر دو فرض اصلی در مکانیزم گسیختگی در نظر گرفته می‌شوند که شامل ترک‌خوردگی کششی^۵ و خردشدگی فشاری^۶ 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^۱ 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^۲، مدل آسیب^۳ و مدل آسیب پلاستیک^۴ 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 ۱-۱ 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^۱ 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	Ψ (°)	(f_{b0}/f_{c0})	ε
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].

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

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

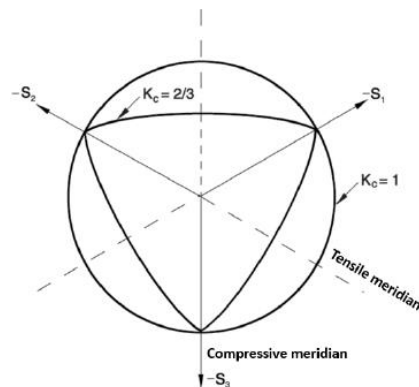
روابط بین تنش فشاری بر حسب کرنش خردشدگی و تنش کششی بر حسب کرنش ترک‌خوردگی به صورت زیر بیان شده است [۱].

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

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

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].

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

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

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

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

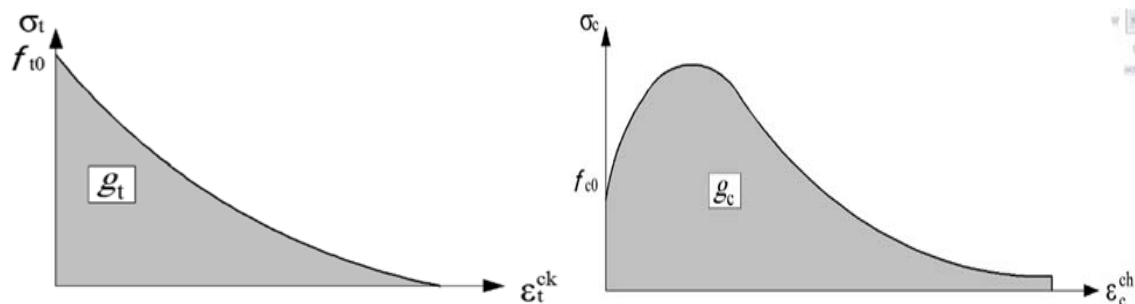
$$G = \sqrt{(\varepsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + q^2} - p \tan \psi \quad (8)$$

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

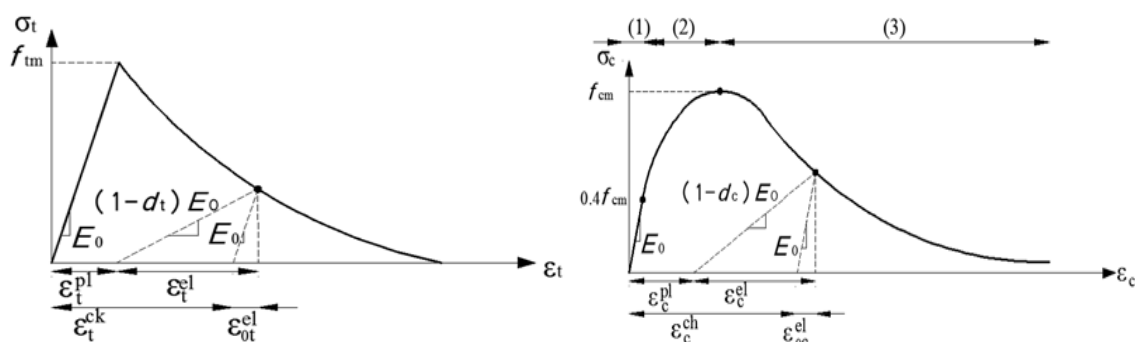
1 No damage
2 Destruction



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

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

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

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

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

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

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

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 ε_t از روابط زیر بدست می‌آیند [۱۸].

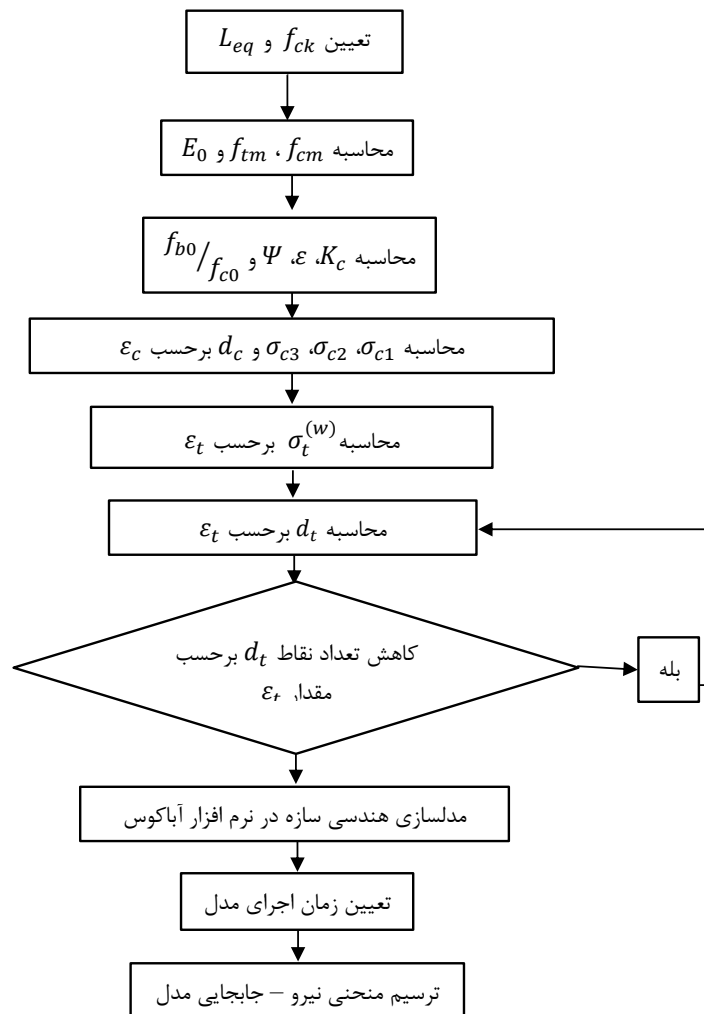
منحنی تنش-کششی بتن بر حسب کرنش کششی شامل یک قسمت خطی اولیه و یک شاخه نزولی که در شکل ۴-ب نمایش داده شده است، می‌باشد. رابطه بین تنش کششی بتن $\sigma_t^{(w)}$ و مقاومت کششی بتن f_{tm} در زیر نشان داده شده است [۲۲].

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

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

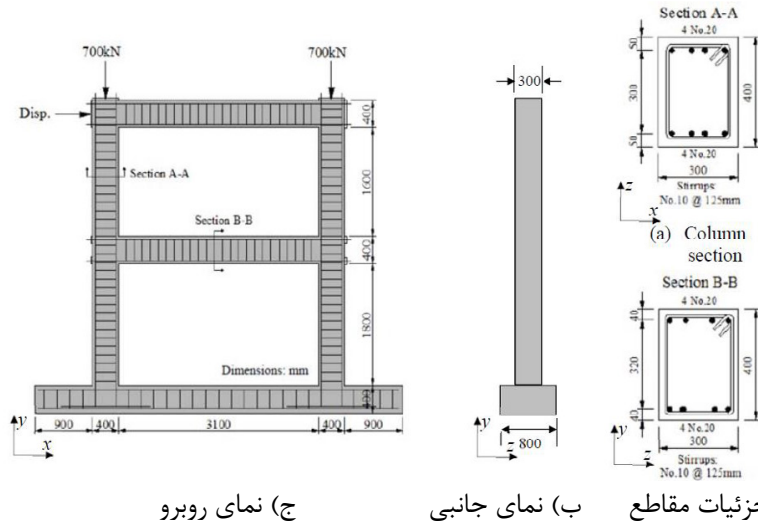
$$\frac{\sigma_t^{(w)}}{f_{tm}} = \left[1 + \left(c_1 \frac{w}{w_c} \right)^3 \right] e^{-c_2 \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) e^{-c_2} \quad (23)$$

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



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

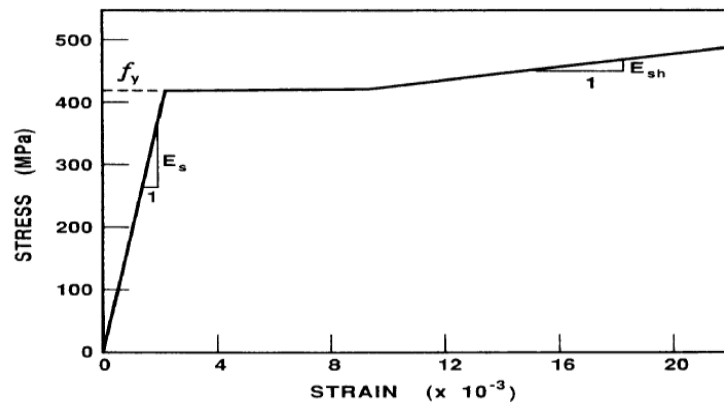
Fig. 5. Flowchart algorithm of damage parameters and execution of numerical solution



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

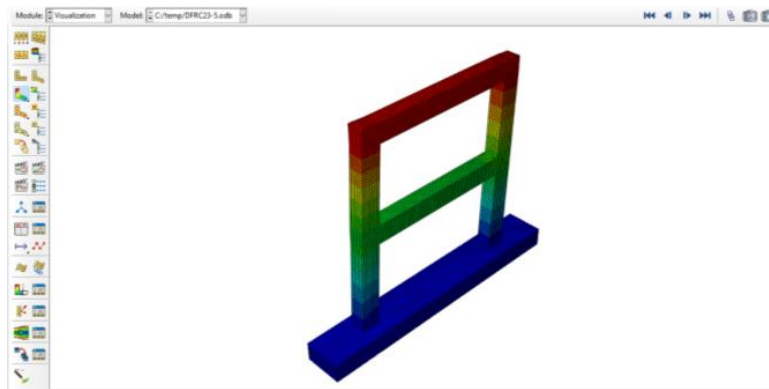
Table 2. Steel parameters for reinforced concrete frame

Bar No.	D_b (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_s (GPa)	E_{sh} (MPa)	ε_{sh}	ε_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.

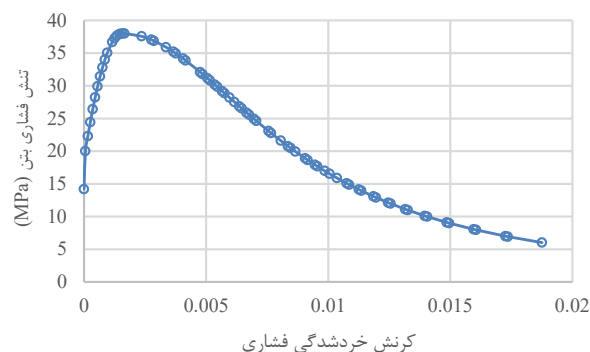
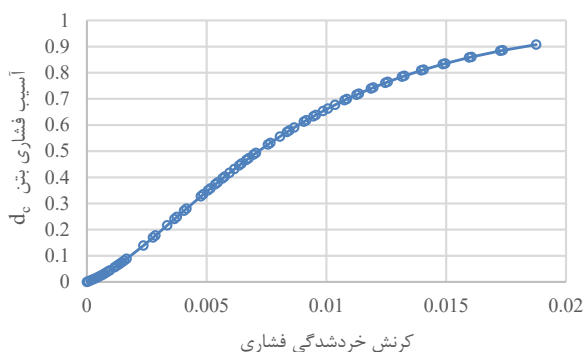
۴-۱ مدل‌سازی رفتار فشاری آسیب پلاستیک بتن از رابطه (۱۴) و با داشتن کرنش‌های فشاری، مقادیر آسیب فشاری بتن و از روابط (۱۸) تا (۲۲)، تنش‌های فشاری و کرنش‌های خرد شدگی بتن بدست می‌آیند. این مقادیر در قسمت رفتار فشاری بتن در نرم‌افزار آباکوس وارد می‌گردند. مقادیر عددی این پارامترها در شکل ۹ ارائه شده است.

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

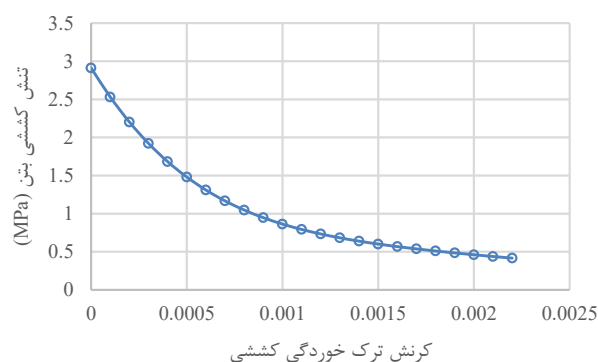
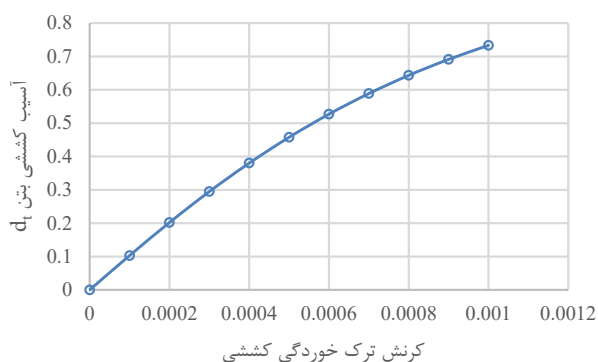
برای شبیه‌سازی و تحلیل عددی مدل‌های پیشنهادی، ابتدا توسط نرم‌افزار آباکوس ۲۰۱۶ مدل آزمایشگاهی شبیه‌سازی می‌گردد. پس از اطمینان از صحت نتایج مدل شبیه‌سازی شده با مدل آزمایشگاهی، مشخصات مصالح بتن، تغییر داده می‌شود و مدل‌های جدید، آنالیز می‌گردند.



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)

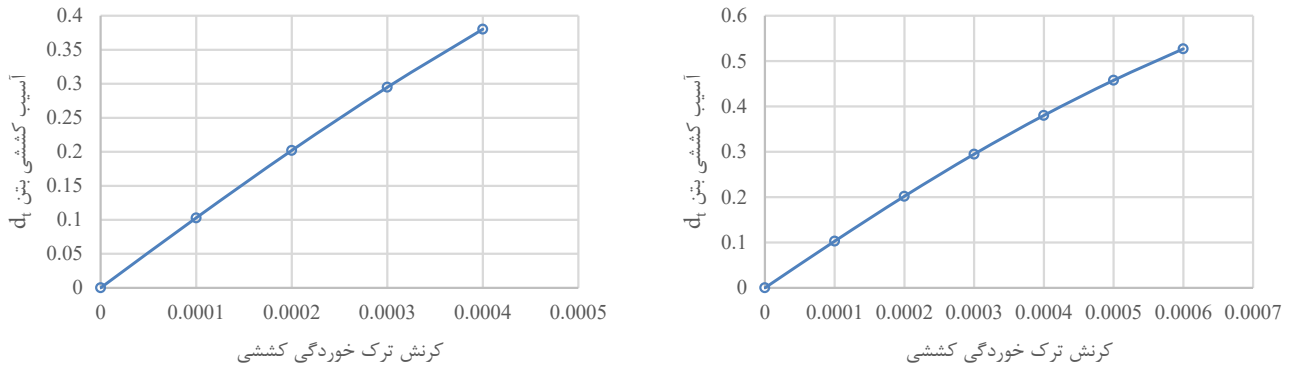
شکل ۱۰. پارامترهای کششی آسیب پلاستیک بتن (مدل اول).

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.

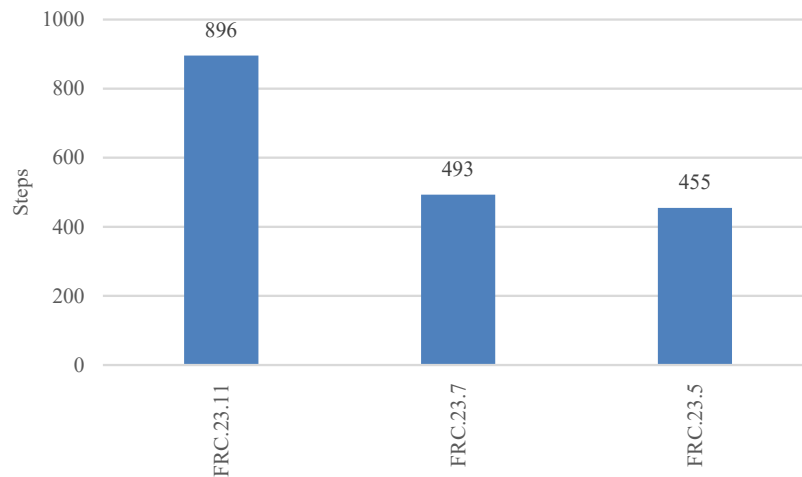
پس از تحلیل غیرخطی مدل‌های اول، دوم و سوم، نتایج خروجی مقادیر نیرو و جابه‌جایی جانبی سازه و تعداد گام‌های تحلیل این سه مدل بدست آورده شده است. در شکل ۱۲ مقادیر عددی در هر گام

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.

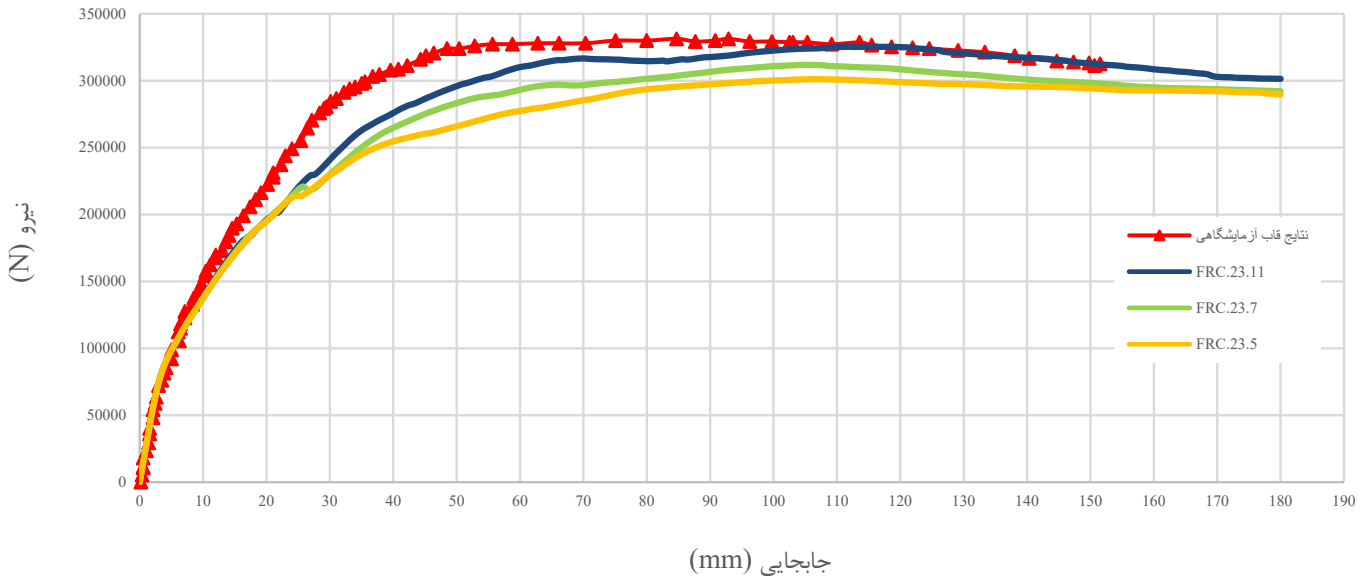
بتن مسلح وجود دارد. به همین دلیل مقایسه مدل‌های شبیه‌سازی شده با مدل آزمایشگاهی آسان می‌گردد.

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.

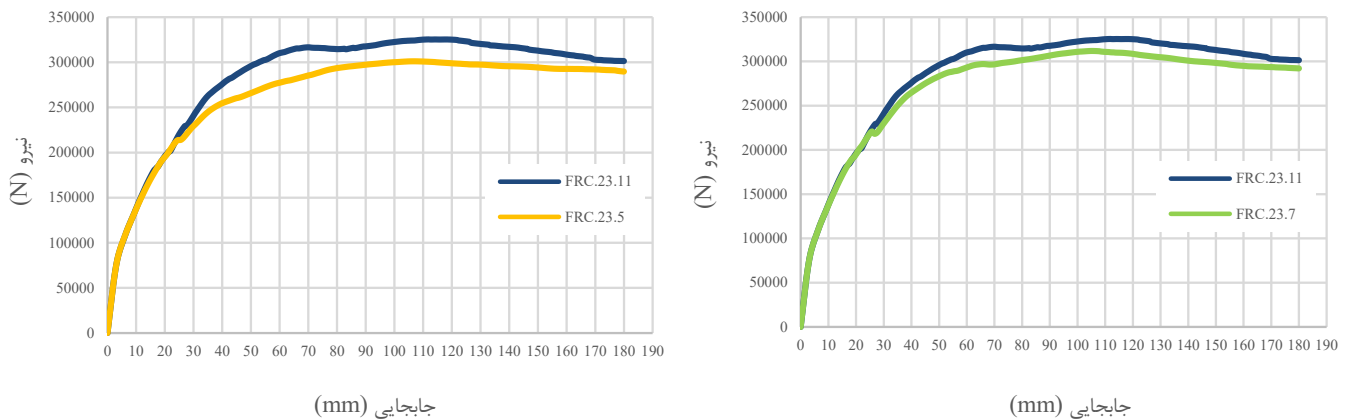
۵- نتایج و بحث

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 مسأله 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.
	علائم یونانی	فهرست علائم
	α	A مساحت، m^2
ضریب ثابت رابطه ۵	β	a_c / a_t ضرایب روابط ۱۲ و ۱۳
ضریب ثابت رابطه ۵	γ	b_c / b_t ضرایب روابط ۱۲ و ۱۳
ضریب ثابت رابطه ۵	ε_c^{el}	c_1 / c_2 ضرایب ثابت رابطه ۲۳
کرنش فشاری الاستیک با آسیب	ε_c^{pl}	D_b قطر میلگرد، mm
کرنش فشاری پلاستیک با آسیب	ε_{ch}	d پارامتر آسیب
کرنش فشاری خرد شدگی بدون آسیب	ε_{cm}	d_c پارامتر آسیب فشاری
کرنش فشاری بتن	ε_{0c}^{el}	d_t پارامتر آسیب کششی
کرنش فشاری الاستیک بدون آسیب	ε_{sh}	E مدول الاستیسیته کاهش یافته، N/mm^2
کرنش سخت شدگی فولاد	ε_t^{ck}	E_0 مدول الاستیسیته، N/mm^2
کرنش کششی ترک خوردگی بدون آسیب	ε_t^{el}	E_s مدول الاستیسیته فولاد، N/mm^2
کرنش کششی الاستیک با آسیب	ε_t^{pl}	E_{sh} شیب سخت شدگی فولاد، N/mm^2
کرنش کششی پلاستیک با آسیب	ε_{0t}^{el}	F تابع جریان
کرنش کششی الاستیک بدون آسیب	ε_{tm}	f_{b0} تنش تسلیم فشاری دو محوره، N/mm^2
کرنش کششی بتن	ε_u	f_{c0} تنش تسلیم فشاری تک محوره، N/mm^2
کرنش نهایی	σ_{t0}	f_{ck} مقاومت مشخصه بتن فشاری، N/mm^2
تنش کششی تک محوره در شکست، N/mm^2	φ	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، Ψ

خروج از مرکزیت سطح پتانسیل پلاستیک \in

چگالی، ρ 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)

