



کد مقاله: ۱-۱۱۹

تشریح پارامترها و نحوه بدست آوردن داده های ورودی در نرم افزار اجزا محدود

آباکوس برای مدلسازی انواع سازه های بتن مسلح

ناهید عسکری زاده^۱، محمدرضا محمدی زاده^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بندرعباس، nahid.askarizadeh@yahoo.com

۲- عضو هیأت علمی، دانشگاه هرمزگان

چکیده

بتن مسلح یکی از پیچیده ترین مصالح برای مدلسازی در نرم افزار اجزا محدود است. در مدلسازی عددی، تعریف رفتار دقیق مصالح در فشار و کشش در دو فاز الاستیک و پلاستیک می تواند اثرات زیادی در نتایج خروجی های نرم افزار اجزا محدود داشته باشد. مدل پلاستیک آسیب دیده بتن، تکنیکی است که قابلیت نشان دادن رفتار غیر خطی و خصوصیات خرابی مواد شبه ترد همانند بتن را دارد. در این مدل رفتار کاملاً فشاری باید شامل هر دو رفتار الاستیک و پلاستیک کامل بتن در نرم شدگی کرنشی آن باشد. همچنین در کشش نیز باید خواص بتن در دو فاز الاستیک و پلاستیک، شامل نرم شدگی کششی و سخت شدگی کششی تعریف شود. در این مطالعه ابتدا به مفاهیم و روشهای محاسبه ی پارامترهای مورد استفاده برای مدلسازی انواع سازه های بتن مسلح با بهره گیری از مدلهای تحلیلی هاگنستاد، کنت پارک، تورنفلد برای بیان رفتار منحنی تنش-کرنش فشاری بتن در نرم افزار آباکوس پرداخته می شود. سپس برای نمونه، یک دیوار برشی بتن مسلح با استفاده از داده های محاسبه شده و با استفاده از مدل پلاستیک آسیب دیده مدلسازی می شود. نتایج حاصل دقت قابل قبول مدل پلاستیک آسیب دیده در رفتار غیر خطی سازه های بتن مسلح را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: مدل پلاستیک آسیب دیده، مدلسازی عددی، بتن مسلح، آباکوس

۱- مقدمه

مهمترین مرحله در مدلسازی عددی سازه های بتن مسلح تعیین رفتار غیر خطی می باشد. در نرم افزار ABAQUS برای در نظر گرفتن خرابی و همچنین تعریف رفتار غیر خطی بتن که باید در بخش خواص مصالح مشخص گردد، به سه روش تعریف می شود: مدل ترک اندود^۱، ترک شکننده^۲، مدل پلاستیک آسیب دیده^۳ [۱]. مدل پلاستیک آسیب دیده، تنها مدلی است که در هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی قابل استفاده است.

¹ - smeared cracking

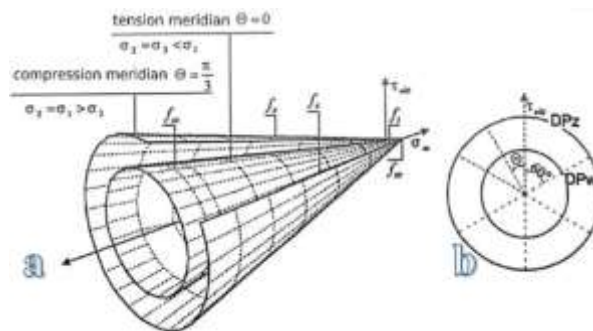
² -Brittle cracking

³ - Concrete damage plasticity

در مدل پلاستیک آسیب دیده دو فرض اصلی ترک خوردگی کششی^۴ و خرد شدن فشاری^۵ در مکانیزم گسیختگی در نظر گرفته می شود [۲]. در ترک خوردگی کششی در اثر کشش تک محوره، منحنی تنش- کرنش تا نقطه تنش خرابی σ_{t0} به صورت خطی تغییر می کند که این تنش با شروع و گسترش ترک های ریز در بتن همراه می باشد. پس از عبور از نقطه مذکور، خرابی ها به صورت ترک های قابل مشاهده در می آیند که به صورت منحنی نرم شوندگی در فضای تنش-کرنش نمایش داده می شود. در خرد شدن فشاری بتن، تحت فشار تک محوره، پاسخ تا رسیدن به نقطه جاری شدگی σ_{c0} به صورت الاستیک خواهد بود و رفتار در ناحیه پلاستیک عموماً به صورت منحنی سخت شوندگی بیان می شود که در نهایت با رسیدن به نقطه ی تنش نهایی σ_{cu} منحنی ها به صورت منحنی نرم شوندگی در می آید [۲]. این مدل معرفی شده با وجود سادگی نسبی خصوصیات اصلی بتن را ارضا می نماید. در این مطالعه به تشریح مفاهیم و نحوه ی بدست آوردن پارامترهای مدل پلاستیک آسیب دیده بتن پرداخته می شود و پارامترهای پلاستیک آسیب دیده برای دیوار برشی بتن مسلح محاسبه می گردد. در نهایت برای اطمینان از صحت و دقت کمیت پارامترهای تعریف شده در نرم افزار آباکوس، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می شود.

۲- مدل پلاستیک آسیب دیده بتن

مدل پلاستیک آسیب دیده بتن، تعمیم یافته ی معیار شکست دراگر-پراگر^۶ می باشد. این معیار یک سطح شکست مخروطی مطابق شکل ۱، دارد و یکی از ثوری های قوی در مدلسازی شکست بتن مسلح می باشد [۳]. این مدل با استفاده از مفاهیم الاستیک آسیب دیده ایزوتروپیک و پلاستیک کششی و فشاری، رفتار غیر خطی بتن را بیان می کند. این مدل قابلیت استفاده در محاسبات استاتیکی و دینامیکی را داراست و شامل فرضیات زیر می باشد: ۱- قابلیت مدلسازی بتن در انواع مختلف سیستم های سازه ای مانند: المان تیر، خرپایی، پوسته و سه بعدی. ۲- قابلیت کاربرد در بتن مسلح و غیر مسلح. ۳- قابلیت استفاده تحت بارگذاری های یکنواخت، نوسانی و دینامیکی. ۴- در نظر گرفتن حساسیت نمونه به نرخ کرنش. ۵- در نظر گرفتن تاثیرات بازیابی سختی الاستیک در بارگذاری های دوره ای. ۶- قابلیت استفاده از ویسکوالاستیک در معادلات اساسی برای رسیدن به همگرایی بهتر در بخش نرم شوندگی.



شکل ۱: سطوح مرزی معیار دراگر-پراگر، (a) شکل کلی، (b) صفحه دویاتوریک [۳]

⁴ - tensile cracking

⁵ - compressive crushing

9-Drucker-Pruger

۳- زاویه اتساع (φ)

زاویه ی اتساع کرنش پلاستیک، بر اثر برش را در فاز بعد از الاستیک تعریف می نمایند. هنگامی که $\varphi = 0$ باشد، ماده هیچ گونه تغییر حجم کرنشی ندارد. در حقیقت زاویه اتساع رابطه ی بین حجم و کرنش برشی را مطابق رابطه ی زیر بیان می کند:

$$(1) \varphi = -\frac{\delta \varepsilon_V}{\delta \gamma}$$

ε_V : کرنش حجمی، $\delta \gamma$: کرنش برشی

برای بتن مسلح زاویه ی اتساع بین 20° تا 40° خواهد بود. هر چه مقدار این زاویه کوچکتر باشد رفتار مصالح ترد و هر چه این زاویه بزرگتر باشد ماده از خود رفتاری مانند مواد شکل پذیر نشان می دهد.

۴- پتانسیل خروج از مرکزیت پلاستیک^۸

عدد کوچک مثبتی است که برابر نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری بتن می باشد. مقدار پیش فرض آن $0/1$ است. وقتی که این عدد صفر باشد در واقع شکل مریدین تبدیل به یک خط راست می شود (معیار دراگر-پراگر کلاسیک)^[۳].

۵- پارامتر f_{c0}/f_{b0}

این پارامتر مشخصات تابع گسیختگی را بیان می کند. در برخی مقالات علمی این نسبت را برابر با $1/17$ در نظر گرفته شده است [۱]. اغلب منابع مقدار $1/16$ و $1/25$ را وابسته به مقاومت بتن و درجه ی محصور شدگی معرفی کرده اند.

۶- پارامتر k_c

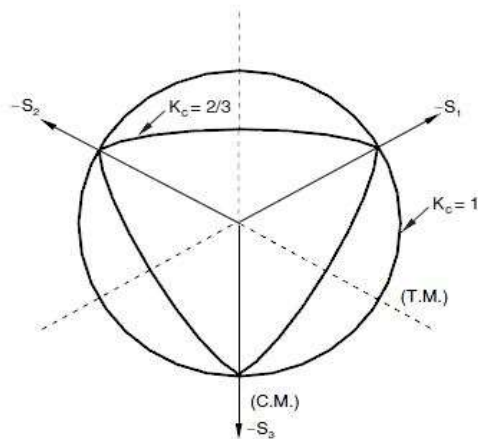
طبق اصلاح صورت پذیرفته در مدل پلاستیک آسیب دیده بتن، لزومی بر دایروی بودن صفحه ی دویاتوریک^۹ وجود ندارد و می تواند شکل دیگری نیز داشته باشد. شکل این صفحه با ضریب k_c تعیین می شود. این ضریب مقداری بیش از $0/5$ دارد و وقتی مساوی یک باشد شکل دایره و یا همان معیار دراگر-پراگر^{۱۰} بدست می آید. از لحاظ فیزیکی، k_c نسبت فاصله بین محور هیدرواستاتیک با مریدین فشاری و مریدین کششی می باشد. در مدل پلاستیک آسیب دیده بتن مقدار پیش فرض مطابق شکل ۲، ضریب $2/3$ می باشد که براساس آزمایشهای فشاری سه محوره و تحلیل های عددی پیشنهاد شده است.

⁷ -Dilation Angle

⁸ -eccentricity

⁹ -Deviatoric plane

¹⁰ -Drucker-pruge



شکل ۲: صفحه دوپاتوریک در مدل پلاستیک آسیب دیده بتن [۳]

۷- پارامتر ویسکوالاستیک^{۱۱}

این پارامتر که در مدل پلاستیک آسیب دیده بتن وجود دارد در واقع برای همگرایی بهتر گام ها استفاده می شود و مقدار آن را بایستی با چند بار تحلیل بدست آورد. پارامتر ویسکوالاستیک کوچکترین عدد مثبتی است که باعث همگرایی بهتر تحلیل می شود. این پارامتر امکان خروج تدریجی از سطح پتانسیل پلاستیک را در شرایط ناهمگرایی های جزئی تحلیل فراهم می سازد [۳].

۸- روابط تنش- کرنش فشاری بتن

تنش های فشاری به صورت تابعی از کرنش های غیر الاستیک ϵ_c^{in} قابل تعریف هستند. منحنی تنش-کرنش در ناحیه نرم شوندگی کرنش (بعد از تنش نهایی) قابل تعریف اند. مقادیر سخت شدگی به جای کرنش پلاستیک ϵ_c^{pl} ، به صورت کرنش غیر الاستیک ϵ_c^{in12} داده می شوند. کرنش غیر الاستیک فشاری بصورت تفاضل کرنش الاستیک مربوط به بتن آسیب ندیده از کرنش کل تعریف می شود [۴].

$$\epsilon_c^{in} = \epsilon_c - \epsilon_{0c}^{el} \quad (2)$$

$$\epsilon_c^{in} = \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (3)$$

ϵ_c^{in} : کرنش غیرالاستیک فشاری، ϵ_{0c}^{el} : کرنش الاستیک بتن آسیب ندیده، ϵ_c : کرنش کل، E_0 : مدول الاستیسیته اولیه بتن، σ_c : تنش حداکثر فشاری

نرم افزار آباکوس بصورت خودکار با استفاده از رابطه زیر، مقادیر کرنش غیر الاستیک را به مقادیر کرنش پلاستیک تبدیل می کند [۲].

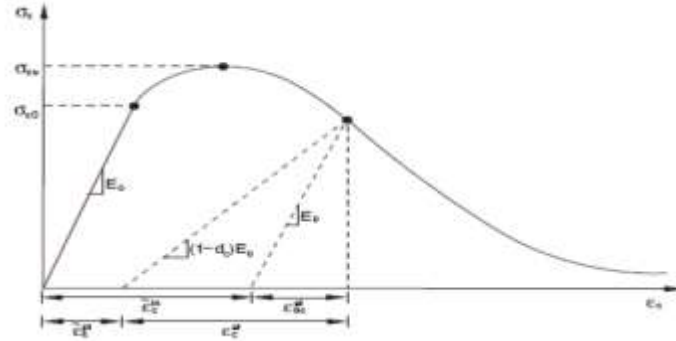
$$\epsilon_c^{in} = \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (4)$$

¹¹ - viscosity parameter

¹² -inelastic strain

ϵ_c^{pl} : کرنش پلاستیک، d_c : پارامتر آسیب بتن در فشار.

نرم افزار آباکوس در صورت منفی بودن مقادیر کرنش پلاستیک و یا کاهش آن با افزایش کرنش غیر الاستیک، پیغام خطا خواهد داد که نشان دهنده نادرست بودن منحنی های آسیب فشاری می باشد. در شکل ۳، نمودار تنش بر حسب کرنش غیر الاستیک نشان داده شده است.



شکل ۳: تعریف کرنش فشاری غیر الاستیک برای بیان سخت شدگی فشاری [۲]

همانطور که در شکل فوق دیده می شود در اثر باربرداری از نمونه در قسمت نرم شونده، شیب منحنی باربرداری کمتر از شیب منحنی الاستیک است که نشان دهنده آسیب دیدگی نمونه می باشد. در واقع در منحنی های تنش-کرنش تک محوره، آسیب بتن توسط دو متغیر d_c و d_t مشخص می شود [۲]. این متغیر های آسیب به صورت زیر بیان می شود:

$$E = (1 - d_{t,c}) E_0 \quad (5)$$

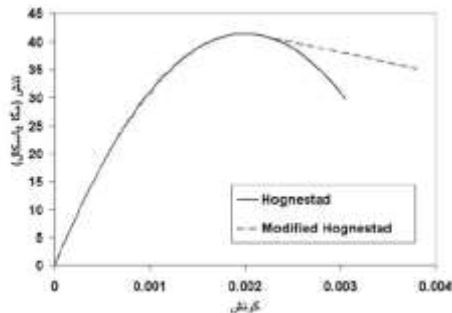
E : مدول الاستیسیته بتن آسیب دیده، d_t : پارامتر آسیب بتن در کشش، d_c : پارامتر آسیب بتن در فشار، E_0 : مدول اولیه (آسیب ندیده) بتن.

۹- معرفی رابطه ی تنش-کرنش برای تعریف بتن در فشار به کمک منحنی هاگنستاد

معرفی رابطه ی تنش-کرنش تک محوری بتن در فشار و کشش از پارامترهای مهم در معرفی مدل پلاستیک آسیب دیده بتن به نرم افزار می باشند. برای معرفی رابطه ی تنش-کرنش فشاری تک محوره بتن به نرم افزار، از رابطه ی هاگنستاد^{۱۳} اصلاح شده در شکل ۴، استفاده شده است. از روابط (۶) و (۷) به منظور معرفی تنش فشاری بتن بر حسب کرنش فشاری به نرم افزار استفاده می گردد. در این روابط ϵ_0 کرنش نظیر تنش حداکثر است. در تحقیق حاضر برای نمونه هایی که اطلاعاتی از مقدار ϵ_0 آنها در دست نبوده از مقدار 0.002 استفاده شده است که مقداری منطقی برای بتن های معمولی است [۵]. در رابطه ی (۷) f_c'' تنش حداکثر در عضو بتنی است. ضریب k_g را می توان برای بتن های با مقاومت فشاری استوانه ای ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و مساوی و بزرگتر از ۳۵ مگاپاسکال به ترتیب برابر ۱، ۰/۹۷، ۰/۹۵، ۰/۹۳ و ۰/۹۲ در نظر گرفت. شاخه نزولی منحنی هاگنستاد اصلاح شده به صورت خطی است که از نقطه ی (ϵ_0, f_c'') تا نقطه ی $(\epsilon_u, 0.85f_c'')$ امتداد دارد. مقدار ϵ_u متناظر با کرنش نهایی نظیر شکست فشاری بتن است، که برای انواع بتن از ۰/۰۰۳ تا بالاتر از ۰/۰۰۵ گزارش شده است. در این تحقیق مقدار آن برابر با ۰/۰۰۳۸ در نظر گرفته شده است. منحنی هاگنستاد اصلاح شده نزدیک به منحنی تنش-کرنش واقعی بتن است [۶].

$$= f_c' \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (6) f_c$$

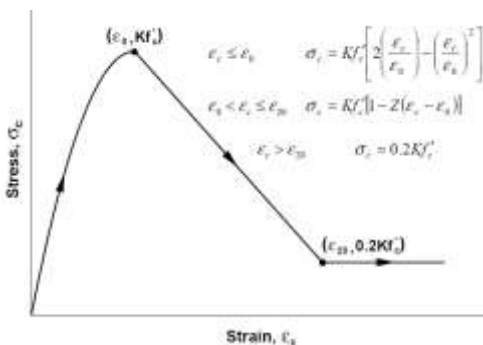
$$= k_s f_c' \quad (7) f_c''$$



شکل ۴: منحنی هاگنستاد و هاگنستاد اصلاح شده بتن در فشار [۵]

۱۰- معرفی رابطه ی تنش- کرنش برای تعریف بتن در فشار به کمک منحنی کنت پارک

برای معرفی رابطه ی تنش-کرنش فشاری تک محوره بتن به نرم افزار می توان از رابطه ی کنت پارک مطابق شکل ۵، استفاده نمود. از روابط (۸) تا (۱۶) به منظور معرفی تنش فشاری بتن بر حسب کرنش فشاری به نرم افزار استفاده می گردد [۷]. در این روابط ε_0 کرنش نظیر تنش حداکثر است.



شکل ۵: منحنی کنت پارک بتن در فشار [۷]

$$(8) \sigma_c = K f_c' \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon_0$$

$$(9) \sigma_c = K f_c' [1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_0)] \quad \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{20}$$

$$\varepsilon_c > \varepsilon_{20}$$

$$(10) \sigma_c = 0.2 K f_c'$$

$$E_t = \frac{2Kf'_c}{\varepsilon_0} \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right) \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \quad (11)$$

$$E_t = -ZKf'_c \quad \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{20} \quad (12)$$

$$E_t = 0 \quad \varepsilon_c > \varepsilon_{20} \quad (13)$$

در روابط بالا پارامترهای ε_0, K, Z از روابط زیر محاسبه می شوند.

$$\varepsilon_0 = 0.002K \quad (14)$$

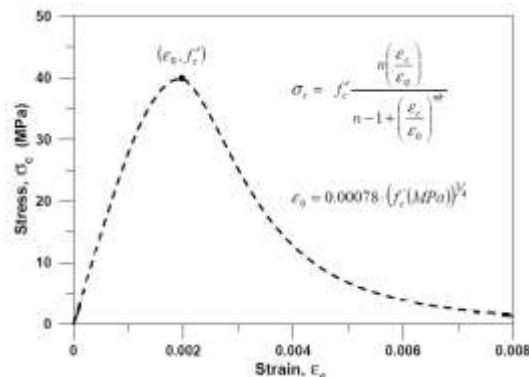
$$K = 1 + \frac{\rho_s f_y h}{f'_c} \quad (15)$$

$$Z = \frac{0.5}{\frac{3+0.29f'_c}{145f'_c-1000} + 0.75\rho_s \sqrt{\frac{h'}{s_h}} - 0.002K} \quad (16)$$

که در روابط فوق، ε_0 : کرنش نظیر تنش حداکثر در بتن، ε_{20} : کرنش بتن در ۲۰ درصد ماکزیمم تنش فشاری، ε_c : کرنش بتن، K : جهت محاسبه افزایش مقاومت به علت محصور شدن بتن توسط آرماتورهای عرضی، Z : شیب ناحیه ی نرم شدگی، f'_c : مقاومت فشاری ۲۸ روزه سیلندری بر حسب مگاپاسکال، $f_y h$: مقاومت تسلیم آرماتورهای عرضی، ρ_s : نسبت حجم آرماتور عرضی به حجم بتنی که آرماتور عرضی در آن قرار دارد، s_h : فاصله ی مرکز به مرکز آرماتورهای عرضی، h' : عرض بتن اندازه گیری شده در خارج از آرماتورهای عرضی.

۱۱- معرفی رابطه ی تنش-کرنش برای تعریف بتن در فشار به کمک منحنی تورنفلد

برای معرفی رابطه ی تنش-کرنش فشاری تک محوره بتن به نرم افزار می توان از رابطه ی تورنفلد مطابق شکل ۶، استفاده کرد. از روابط (۱۷) تا (۲۲) به منظور معرفی تنش فشاری بتن بر حسب کرنش فشاری به نرم افزار استفاده می گردد [۷]. در این روابط ε_0 کرنش نظیر تنش حداکثر است.



شکل ۶: منحنی تورنفلد بتن در فشار [۷]

$$\sigma_c = f'_c \frac{n \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)}{n - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^n} \quad (17)$$

$$(18) n = 0.8 + \frac{f'_c(MPa)}{17}$$

$$K=1 \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (19)$$

$$K=0.67 + \frac{f'_c(MPa)}{62} \quad \varepsilon_0 \leq \varepsilon \quad (20)$$

برای بتن با مقاومت فشاری کمتر از ۲۰ مگاپاسکال n و K از روابط ۲۱ و ۲۲ پیروی می کند:

$$(21) n = 1.55 + \left(\frac{f'_c(MPa)}{32.4}\right)^3$$

$$K=1 \quad (22)$$

f'_c : مقاومت فشاری ۲۸ روزه سیلندری بر حسب مگاپاسکال، ε_0 : کرنش نظیر تنش حداکثر در بتن.

۱۲- روابط تنش-کرنش کششی بتن

بطور کلی مشخص کردن رفتار پس از شکست کششی در بتن و بیان تنش های بعد از شکست بصورت تابعی از کرنش ترک خورده ε_t^{ck} می باشد. کرنش ترک خورده^{۱۴} بصورت کرنش کل منهای کرنش الاستیک بتن آسیب ندیده تعریف می شود [۴]

$$= \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el} \quad (23) \varepsilon_t^{ck}$$

$$= \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (24) \varepsilon_{0t}^{el}$$

ε_t^{ck} : کرنش شکست یا کرنش ترک خورده، ε_t : کرنش کل، ε_{0t}^{el} : کرنش الاستیک بتن آسیب ندیده، σ_t : حداکثر تنش کششی، E_0 : مدول الاستیسیته اولیه بتن.

این برنامه به طور خودکار مقادیر کرنش ترک خورده را به مقادیر کرنش پلاستیک تبدیل می کند [۲].

$$= \varepsilon_t^{in} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (25) \varepsilon_t^{pl}$$

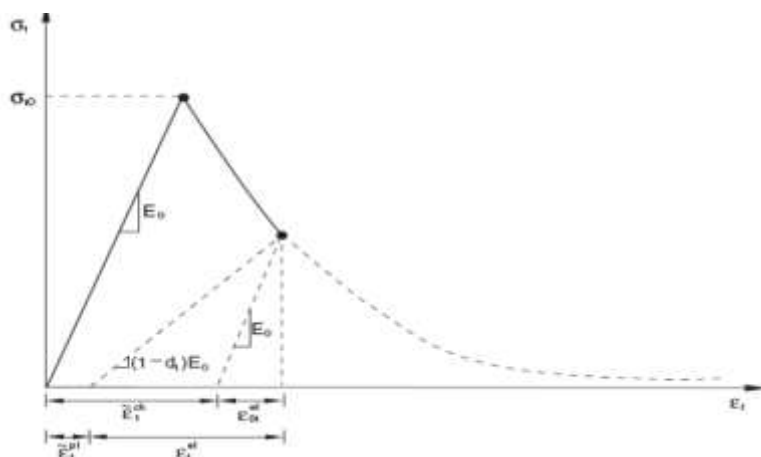
ε_t^{pl} : کرنش پلاستیک، d_t : پارامتر آسیب بتن در کشش.

نرم افزار آباکوس در صورت منفی بودن مقادیر کرنش پلاستیک و یا کاهش آن با افزایش کرنش غیر الاستیک، پیغام خطا خواهد داد که نشان دهنده نادرست بودن منحنی های کششی است و برنامه آباکوس پیغام خطا صادر می کند. اگر نتایج آزمایشگاهی حاصل از آزمایش شکافت استوانه و یا کشش مستقیم در دسترس نباشد، برای بدست آوردن ماکزیمم تنش کششی می توان از رابطه ی زیر استفاده کرد [۳].

$$= 0.3 \sigma_c^{\frac{2}{3}} \quad (26) \sigma_t$$

σ_c : حداکثر تنش فشاری، σ_t : حداکثر تنش کششی.

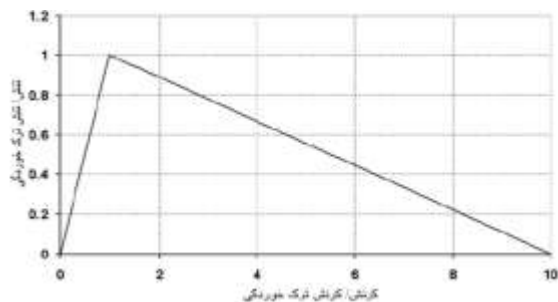
در شکل ۷، نمودار تنش بر حسب کرنش ترک خورده نشان داده شده است.



شکل ۷: تعریف کرنش ترک خوردگی برای بیان سخت شدگی کششی [۲]

۱۳- معرفی رابطه ی تنش-کرنش بتن در کشش برای استفاده در آباکوس

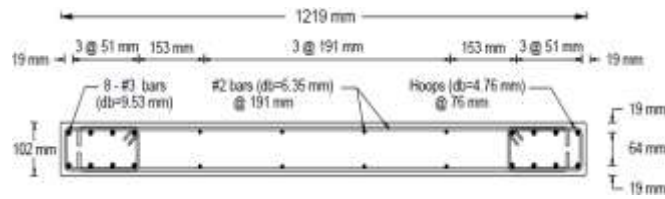
معرفی رابطه ی تنش-کرنش بتن در کشش تنها به اثرات بعد از ترک خوردگی که در واقع معرف اثرات سخت شدگی است، اختصاص دارد. اثر سخت شدگی کششی بیانگر این مطلب است که سختی ماده پس از ترک خوردن ناگهان صفر نمی شود بلکه در اثر درگیری دانه ها و عمل فولادها، ماده قابلیت انتقال بار را از طریق فضای بین ترک ها دارا می باشد. در مدلسازی انجام شده در این مطالعه برای منحنی تنش-کرنش بتن بعد از ترک خوردگی، از رابطه ی توصیه شده توسط دستورالعمل نرم افزار استفاده شده است. این مدل رابطه ی تنش-کرنش بتن بعد از ترک خوردگی را به صورت خطی فرض می نماید که تا کرنش نهایی ۱۰ برابر کرنش ترک خوردگی ادامه دارد. شکل ۸، رابطه ی تنش-کرنش بتن در کشش تک محوره را معرفی می نماید.



شکل ۸: پاسخ بتن در کشش تک محوره توصیه شده در نرم افزار اجزا محدود [۲]

۱۴- مدلسازی عددی دیوار برشی بتن مسلح تحت بار جانبی

تامسون و همکاران در سال ۲۰۰۴ طی تحقیقات خود دیوار برشی بتن مسلح را با مشخصات ذکر شده در شکل ۹ را مورد آزمایش قرار دادند. در این مطالعه دیوار برشی بتن مسلح مذکور برای مدلسازی با استفاده از مدل پلاستیک آسیب دیده بتن، انتخاب شده است.



شکل ۹: مقطع دیوار برشی بتن مسلح تامسون و همکاران [۸]

مشخصات مصالح بتن

$$= 31.6 \text{ Mpa}, \nu = 0.2, \rho = 2.4e - 5 \frac{N}{mm^2} \quad (27) f'_c$$

$$= 4700\sqrt{f'_c} = 4700\sqrt{31.6} = 26420.52 \text{ Mpa} \quad (28) E_0$$

مشخصات مصالح فولاد

$$= 420 \text{ Mpa}, F_u = 600 \text{ Mpa}, E = 168000 \text{ Mpa}, \nu = 0.3, \rho = 7.85e - 5 \frac{N}{mm^2} \quad (29) F_y$$

نرم افزار ABAQUS برای بتن از المان هشت گره ای C3D8R معمولی استفاده می کند. انتگرال گیری عددی این المان به روش گوس انجام می پذیرد و بار به صورت کنترل جابجایی اعمال می شود. برای معرفی قیود بین بتن و فولاد از قید embedded regions استفاده شده که درجات آزادی المان های فولادی را به درجات آزادی المان های بتن اطراف آن مقید می کند. المان مورد استفاده برای فولادها، المان T3D2 است. تحلیل از نوع استاتیکی غیر خطی است، طبق توضیحات و روابط ذکر شده، پارامترهای مدل پلاستیک آسیب دیده بتن به صورت زیر وارد می شود.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل پلاستیک آسیب دیده

Dilation Angle	Eccentricity	Fb0/fc0	k	Viscosity parameter
۳۶	۰/۱	۱/۱۶	۰/۶۶۷	۰/۰۵

۱۵- محاسبه مشخصات مصالح فشاری بتن به کمک منحنی هاگنستاد

در سربارگ compressive behavior طبق روابط (۶) و (۷)، داده های ورود به نرم افزار را محاسبه می کنیم.

$$= k_s f'_c \quad (30) f_c''$$

$$= 0.93 * 31.6 = 29.388 \text{ Mpa} \quad (31) f_c''$$

$$0.5 * f_c'' = 0.5 * 29.388 = 14.694 \text{ Mpa} \quad (32)$$

$$= 1.8 * \frac{f_c''}{E_0} = 1.8 * \frac{29.388}{26420.52} = 0.002 \quad (33) \epsilon_0$$

تنش فشاری بتن برای قسمت غیر خطی نمودار از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$\left(\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2\right) = 29.388 * \left(\frac{2\varepsilon_c}{0.002} - \left(\frac{\varepsilon_c}{0.002}\right)^2\right) \quad (34) f_c = f_c''$$

برای بدست آوردن تنش فشاری در قسمت غیر خطی منحنی هاگنستاد، کرنش ها با متغیر ε_c در رابطه ی (۳۴) جایگزین می شود و تنش متناظر با آن محاسبه می گردد.

جدول ۲: مقادیر تنش-کرنش فشاری برای بتن ۳۱,۶ مگاپاسکال

Stress	strain	ε_{oc}^{el}	ε_c^{in}	d_c	ε_c^{pl}
۱۶/۶۹	۰/۰۰۰۵۵	۰/۰۰۰۵۵	۰	۰	۰
۱۶/۰۴	۰/۰۰۰۶۵	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۴۵	۰	۰/۰۰۰۰۴۵
۱۷/۸۸	۰/۰۰۰۷۴	۰/۰۰۰۶۷	۰/۰۰۰۰۷۱	۰	۰/۰۰۰۰۷۱
۱۹/۵۸	۰/۰۰۰۸۴	۰/۰۰۰۷۴	۰/۰۰۰۱۰	۰	۰/۰۰۰۱۰
۱۵/۲۱	۰/۰۰۰۹۴	۰/۰۰۰۸۰	۰/۰۰۰۱۴	۰	۰/۰۰۰۱۴
۲۲/۵۸	۰/۰۰۱۰۳	۰/۰۰۰۸۵	۰/۰۰۰۱۸	۰	۰/۰۰۰۱۸
۲۳/۸۴	۰/۰۰۱۱۳	۰/۰۰۰۹۰	۰/۰۰۰۲۳	۰	۰/۰۰۰۲۳
۲۵/۰۳	۰/۰۰۱۱۲	۰/۰۰۰۹۴	۰/۰۰۰۲۸	۰	۰/۰۰۰۲۸
۲۶/۰۵	۰/۰۰۱۳۲	۰/۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰۳۴	۰	۰/۰۰۰۳۴
۲۶/۹۳	۰/۰۰۱۴۲	۰/۰۰۱۰۱	۰/۰۰۰۴۰	۰	۰/۰۰۰۴۰
۲۷/۶۸	۰/۰۰۱۵۱	۰/۰۰۱۰۴	۰/۰۰۰۴۷	۰	۰/۰۰۰۴۷
۲۸/۲۹	۰/۰۰۱۶۱	۰/۰۰۱۰۷	۰/۰۰۰۵۴	۰	۰/۰۰۰۵۴
۲۸/۷۷	۰/۰۰۱۷۱	۰/۰۰۱۰۸	۰/۰۰۰۶۲	۰	۰/۰۰۰۶۲
۲۹/۱۱	۰/۰۰۱۸۰	۰/۰۰۱۱۰	۰/۰۰۰۷۰	۰	۰/۰۰۰۷۰
۲۹/۳۱	۰/۰۰۱۹۰	۰/۰۰۱۱۰	۰/۰۰۰۷۹	۰	۰/۰۰۰۷۹
۲۹/۳۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱۱۱	۰/۰۰۰۸۸	۰	۰/۰۰۰۸۸
۲۶/۴۴	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۱۰۰	۰/۰۰۰۲۱	۰/۱	۰/۰۰۰۲۰
۲۳/۵۱	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۰۸۸	۰/۰۰۰۳۵	۰/۲	۰/۰۰۰۳۲
۲۰/۵۷	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۰۷۷	۰/۰۰۰۴۸	۰/۳	۰/۰۰۰۴۴
۱۷/۶۳	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۰۶۶	۰/۰۰۰۶۱	۰/۴	۰/۰۰۰۵۶
۱۴/۶۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۵۵	۰/۰۰۰۷۴	۰/۵	۰/۰۰۰۶۸
۱۱/۷۵	۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۸۷	۰/۶	۰/۰۰۰۸۰
۸/۸۱	۰/۰۱۰۴	۰/۰۰۰۳۳	۰/۰۱۰	۰/۷	۰/۰۰۰۹۲
۵/۸۷	۰/۰۱۱۶	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۱۱	۰/۸	۰/۰۱۰۴
۲/۹۳	۰/۰۱۲۸	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۱۲	۰/۹	۰/۰۱۱۶

۱۶. محاسبه مشخصات مصالح کششی بتن

ماکزیم تنش کششی بتن

$$= 0.3 * \sigma_c^{\frac{2}{3}} = 0.3 * (29.388)^{\frac{2}{3}} = 2.86 \text{ Mpa}$$

$$(35) \sigma_t$$

جدول ۳: مقادیر تنش- کرنش کششی بتن

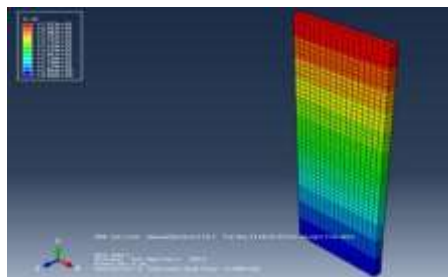
stress	strain	ε_{ot}^{el}	ε_T^{ck}	d_T	Plastic strain
۲/۸۶	۰/۰۰۰۱۰۸	۰/۰۰۰۱۰۸	۰	۰	۰
۲/۵۳	۰/۰۰۰۲۱۶	۰/۰۰۰۰۹۶	۰/۰۰۰۱۲	۰/۱	۰/۰۰۰۱۰۸
۲/۲۲	۰/۰۰۰۲۳۶	۰/۰۰۰۰۸۴	۰/۰۰۰۲۴۰	۰/۲	۰/۰۰۰۲۱۶
۱/۹۰	۰/۰۰۰۴۳۲	۰/۰۰۰۰۷۲	۰/۰۰۰۳۶۰	۰/۳	۰/۰۰۰۳۲۴
۱/۵۸	۰/۰۰۰۵۴۰	۰/۰۰۰۰۶۰	۰/۰۰۰۴۸۰	۰/۴	۰/۰۰۰۴۳۲
۱/۲۶	۰/۰۰۰۶۴۸	۰/۰۰۰۰۴۸	۰/۰۰۰۶۰	۰/۵	۰/۰۰۰۵۴۰
۰/۹۵	۰/۰۰۰۷۵۶	۰/۰۰۰۰۳۶	۰/۰۰۰۷۲۰	۰/۶	۰/۰۰۰۶۴۸
۰/۶۳	۰/۰۰۰۸۶۵	۰/۰۰۰۰۲۴	۰/۰۰۰۸۴۱	۰/۷	۰/۰۰۰۷۶۵
۰/۳۱	۰/۰۰۰۹۷۳	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۹۶۱	۰/۸	۰/۰۰۰۸۶۵

برای تعیین رفتار غیر خطی فولاد نیز از مدل پلاستیک کامل با رفتار دو خطی استفاده شده است.

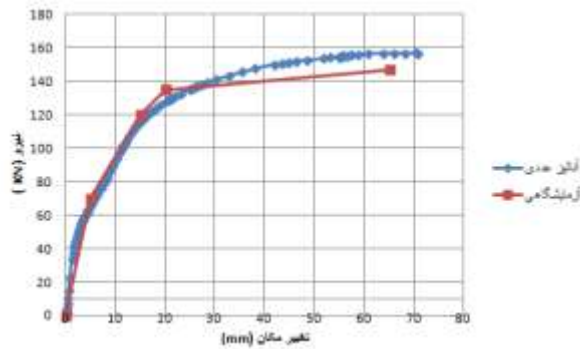
جدول ۴: مقادیر تنش- کرنش فولاد

stress	plastic strain
۴۲۰	۰
۶۰۰	۰/۱

در شکل ۱۰، کنتور جابجایی دیوار برشی بتن مسلح مدلسازی شده نشان داده شده است. همچنین نمودار بار-تغییر مکان حاصل از تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی در شکل ۱۱، برای مقایسه نشان داده شده است.



شکل ۱۰: کنتور جابجایی دیوار برشی بتن مسلح



شکل ۱۱: مقایسه نمونه بار-جابجایی تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی

۱۷. نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی مفاهیم مدل رفتاری پلاستیک آسیب دیده بتن و نحوه تعیین پارامترهای این مدل پرداخته شد. مدل پلاستیک آسیب دیده بتن که در نرم افزار اجزا محدود آباکوس استفاده می شود یکی از مناسب ترین الگوهای رفتار غیر خطی مصالح ترد همانند بتن می باشد. این مدل تعمیم یافته معیار شکست داگر-پراگر می باشد. برای تعیین پارامترهای مدل پلاستیک آسیب دیده ابتدا بایستی پارامترهایی را که تعیین کننده سطح گسیختگی مصالح می باشد تعیین کرد، سپس منحنی تنش- کرنش فشاری و کششی تعیین می شود. پارامتر خرابی مصالح که در این معیار در نظر گرفته شده است، برای بارگذاری چرخه ای بسیار مفید می باشد و می تواند کاهش سختی در طی بارگذاری های متناوب فشار و کشش را در مدلسازی عددی لحاظ نماید. در این مطالعه یک دیوار برشی بتن مسلح با مدل رفتاری پلاستیک آسیب دیده به صورت عددی مدلسازی گردید. نتایج حاصل نشان می دهد که مدل پلاستیک آسیب دیده بتن ابزار قدرتمندی برای مدلسازی رفتار غیر خطی بتن و خصوصیات خرابی آن می باشد و در صورت استفاده از روابط مناسب برای تعیین نمودار تنش-کرنش می توان، رفتار یک دیوار برشی بتن مسلح را با دقت بسیار بالایی پیش بینی نمود.

۱۸. مراجع

- [۱] فنایی، ن. سروش نیا، س؛ «کاملترین مرجع کاربردی ABAQUS» انتشارات نگارنده دانش؛ جلد دوم، چاپ دوم، صفحه ۲۹۲ تا ۲۹۶
- [2] Abaqus Analysis Users Manual, Version6-10
- [3] Kmiecik, P. and Kaminski, M.; "Modelling of Reinforced Concrete Structures and Composite Structures with Concrete Strength Degradation Taken into Consideration"; *Archives of Civil and Mechanical Engineering***XI**, No. 3 (2011)
- [4] Wahalathantri, B. L. and Thambiratnam, D. P.; "A Material Model for Flexural Crack Simulation in Reinforced Concrete Element Using ABAQUS"; *In Proceeding of the First International Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing, Queensland University of Technology, Brisbane, (2011) 260-264*
- [5] مستوفی نژاد، د؛ «سازه های بتن آرمه» انتشارات ارکان دانش؛ جلد اول، چاپ دوازدهم، صفحه ۳۹ تا ۴۲
- [6] Su, R. K.L. and Wong, S. M.; "Seismic Behavior of Slender Reinforced Concrete Shear Wall Under High Axial Load Ratio"; *Engineering Structures***29**, (2007) 1957-1965
- [7] Orakcal, K. Massone, L. Wallace, J.; "Analytical Modeling of Reinforced Concrete Walls for Prediction Flexural and Coupled Shear Flexural Responses"; *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, (2006) 36-38,176-179
- [8] Thomson, J. and Wallace, J.; "Displacement-Based Design of Slender Reinforced Concrete Structure Walls-Experimental Verification"; *Structure Engineering***130**, No. 4 (2004) 618-630