ارزیابی اثر برخورد هواپیما به پوشش بتنی محافظ نیروگاه هسته ای

ایرج محمودزاده کنی دانشیار دانشکده مهندسی عمران- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران imkani@ut.ac.ir **علیرضا باقری نقرهدهی**

alireza.bagheri.ir@gmail.com فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران (تاریخ دریافت ۸۴/۴/۲۶ ، تاریخ تصویب ۸۴/۷/۱۶)

چکیدہ

برخورد هواپیما، یک بارگذاری خارجی و فوق العاده است که بر طبق استانداردهای ایمنی آژانس بین المللی انرژی اتمی (IAEA) باید در طراحی پوشش های بتنی محافظ نیروگاه های هسته ای مد نظر قرار گیرد. این بارگذاری می تواند ایجاد تخریب سازه ای کلی یا موضعی نموده و یا موجب نقص عملکرد سیستم های ایمنی یا اجزا دیگر گردد. در این مقاله سعی شده است با استفاده از منحنی تاریخچه بار-زمان Riera، (که توسط آژانس هم توصیه شده است.)، رفتار کلی پوشش بتنی یک نیروگاه هسته ای ساخت آلمان مطالعه گردد. برنامه اجزا محدود دینامیکی غیرخطی (NDARCS) با استفاده از المان های ۸ گره ای پوسته بتن مسلح مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصله با نتایج سایر محققان که از المان های سهبعدی استفاده از المان های ۸ گره ای پوسته بتن مسلح مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصله با کرده در این معیارها نیز در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. آئین نامه های محدودی، معیاره ای طراحی برای این نوع بارگذاری معرفی کرده د. این معیارها نیز در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. اثر کاهش ضخامت پوسته و تغییر معیار گرسیختگی بتن بر روی رفتار پوشش

واژه های کلیدی : نیروگاه هسته ای، مدل بنیادی بتن، برخورد هواپیما، ساختمان راکتور، بارگذاری دینامیک، آهنگ کرنش، تحلیل غیرخطی اجزاء محدود

مقدمه

بعد از واقعه ۱۱ سپتامبر، مساله ایمنی نیروگاههای هستهای در برابر برخورد هواپیما از اهمیت بیشتری برخوردار شد. زیرا انهدام یک نیروگاه هستهای میتواند منجر به انتشار مواد رادیواکتیو در سطح گستردهای شود و به تبع آن ایجاد یک فاجعه زیستمحیطی نماید. با توجه به اهمیت موضوع، آژانس بینالمللی انرژی اتمی (IAEA) به اهمیت موضوع، آژانس بینالمللی انرژی اتمی (IAEA) توصیه میکند، اگر محل نیروگاه در مکانی است که احتمال وقوع سانحه هوایی در مساحتی برابر یک هکتار بیشتر از ⁶-10 در سال باشد، اثر برخورد هواپیما مد نظر قرار گیرد.

برخورد هواپیما یک بارگذاری فوق العاده محسوب شده و از دو حیث دارای اهمیت می باشد. نخست آنکه، در محل برخورد هواپیما با پوشش بتنی فشار هیدرواستاتیک به چندین برابر مقاومت فشاری بتن می رسد. بتن در این شرایط یک رفتار کاملا غیر خطی از خود بروز می دهد. ثانیا، سرعت اعمال بار در کسری از ثانیه بوده و موجب رفتار دینامیک از بتن می گردد. این مقاله ضمن بررسی

اثرات برخورد هواپیما و در نظر گرفتن اثرات دینامیکی و غیرخطی آن بر روی پوششهای بتنی، سعی در ارائه معیاری مناسب برای طراحی پوششها، تحت این بار فوقالعاده دارد.

> برخورد هواپیما اثرات ناشی از برخورد هواپیما

برخورد هواپیما به پوشش بتنی محافظ^ا نیروگاه میتواند در سه فاز ایجاد تخریب کند:

الف - تخریب کلی^۲ : ناشی از انرژی وارده از برخورد هواپیما به عنوان یک پرتابه نرم واحد، به یک هدف که وابسته به خصوصیات دینامیکی هدف بوده و نیازمند تحلیلهای عددی برای براورد آن میباشد.

ب- تخریب موضعی⁷ : ناشی از برخورد قطعات ثانویه هواپیما نظیر موتور به عنوان یک پرتابه سخت با یک هدف صلب که مستقل از خصوصیات دینامیکی هدف بوده و بر پایه روابط تجربی قابل ارزیابی است.

ج - تخریب اجزا نیروگاه در اثر ارتعاش⁵: در اثر برخورد هواپیما سیستمهای عملکردی راکتور که در نزدیکی محل برخورد قرار دارند ممکن است در اثر ارتعاش و ضربه وارده دچار اختلال و در نتیجه آسیب رسیدن به عملکرد نیروگاه شود.

در این مقاله سعی می شود رفتار کلی پوشش بتنی محافظ نیروگاه تحت اثر این بارگذاری ارزیابی شود.

نیروی ناشی از برخورد هواپیما

بارهای طراحی ناشی از برخورد هواپیما از محاسبه انرژی جنبشی ناشی از برخورد هواپیما با هدف به دست میآید. مقداری از این انرژی جنبشی به واسطه خردشدن و اعوجاج هواپیما مستهلک میشود. با توجه به آنکه هواپیما یک پرتابه بسیار نرم محسوب میشود انرژی هواپیما یک پرتابه بسیار نرم محسوب میشود انرژ برخورد منحصرا وابسته به نحوه توزیع جرم هواپیما و سرعت برخورد است. کل انرژی ناشی از برخورد که منجر به تخریب هواپیما در سطح برخورد می گردد توسط [۱] به صورت زیر نشان داده شده است: $F(t) = F_c(x_t) + \mu \cdot m(x_t) \cdot V(t)^2$

(1)



شکل ۱: تاریخچه بار-زمان بارگذاری ناشی از برخورد هواپیما.

در این رابطه μ ضریب تغییر ممنتوم؛ F_c عدد ثابتی است که از آزمایش شکست هواپیما به دست میآید؛ V سرعت برخورد و m توزیع جرم هواپیما در طول میباشد. [7] با انجام یک سری آزمایشهای عملی و مقایسه آن با نتایج حاصل از مدلهای کامپیوتری نشان داد که میزان بار وارده از هواپیما به یک سازه صلب و مقاوم به خوبی قابل اندازه گیری میباشد. این نتایج توسط آژانس

بینالمللی انرژی اتمی نیز برای درنظرگرفتن برخورد هواپیما توصیه شده است[۳]. این نتایج در شکل (۱) نشان داده شدهاند.

مدل اجزا محدود

برای تحلیل اثر کلی از یک برنامه اجزا محدود (NDARCS) با استفاده از المانهای پوسته تبدیل یافته و مدل غیرخطی بتن استفاده شده است. المان بکار رفته در مدلسازی، المان پوسته تبدیل یافته میباشد که از تبدیل المان سهبعدی به دست آمده است[۵،۴]. این المان در هر گره دارای ۳ درجه آزادی انتقالی و ۲ درجه آزادی انتگرالگیری گوس با سه نقطه گوس در هر جهت استفاده شده است. در جهت ضخامت پوسته نیز از مدل لایهای استفاده شده است. در این مدل فرض میشود که پوسته در جهت ضخامت از چند لایه تشکیل شده است. مقاط گوس هر لایه در میان سطح آن واقع هستند و مولفههای تنش نیز در این نقاط محاسبه میشوند و فرض

مدل رفتاری غیرخطی دینامیک بتن

عموما معیار گسیختگی بتن تحت وضعیت سهمحوری تنش، با سه ثابت تنش بیان میشود. در این مقاله سعی شده است اثر بارگذاری دینامیک به صورت افزودن یک پارامتر دیگر در معرفی سطح گسیختگی و پاسخ معیارهای متداول گسیختگی بتن در برابر این پارامتر جدید بررسی گردد. رفتار بتن تحت بار دینامیک در مقایسه با بار استاتیک متفاوت است. سختی اولیه، مقاومت نهایی کششی و فشاری و ظرفیت کرنشی بتن تحت بار دینامیک افزایش مییابد. رفتار بتن تحت بار دینامیک تابع سرعت بارگذاری میباشد که با مفهوم رشد کرنش شناخته میشود. ضریب افزایش دینامیک III نسبت مقاومت نهایی دینامیک به مقاومت نهایی استاتیک میباشد. III میشود. مریب در نش ست می میباشد. تاین ضریب در فشار به ۲ و در کشش به ۶ هم میرسد.

در مدلهای غیرخطی استاتیک، سه سطح تسلیم اولیه، سطح بارگذاری و سطح گسیختگی وجود دارد. در این مدلها، سطح تسلیم اولیه و سطح گسیختگی ثابت بوده و سطح بارگذاری بتدریج از سطح تسلیم اولیه به سطح

گسیختگی بسط مییابد. اما در مدل غیرخطی دینامیک که در ذیل ارائه می شود، چهار سطح تسلیم اولیه کلاهکدار، سطح بارگذاری، سطح گسیختگی و سطح مقاومت پسماند تعریف شدهاند که به جز سطح مقاومت پسماند همگی تابعی از رشد کرنش بوده و دارای سطح ثابتی نیستند. شکل (۲)، مدل بنیادی بتن را در یک نصفالنهار نشان مىدهد.



سطح تسليم اوليه كلاهك دار

سطح تسليم اوليه، محدوده الاستيک بتن را تحت وضعیت چندمحوری تنش نشان میدهد. در مسائلی که بتن تحت فشار هيدرواستاتيك بالايي ميباشد، بتن از همان ابتدا رفتار پلاستیک خواهد داشت لذا استفاده از یک سطح تسلیم اولیه که مشابه سطح گسیختگی در یک مقياس كوچكتر باشد موجب افزايش سختى سازه به صورت کاذب می شود. برای رفع این نقیصه یک کلاهک روی سطح تسلیم اولیه قرار داده می شود که محدوده الاستیک را نشان دهد. پارامتر ξ کنترل کننده محل این كلاهك مي باشد.

$$\dot{\xi} = \frac{\sigma_{ii}}{f_c(\dot{\varepsilon})\sqrt{3}}$$

(٢)

(٣)

 $\dot{s}(\dot{\xi},\theta) = 2\dot{\rho}_c(\dot{\rho}_c^2 - \dot{\rho}_t^2)\cos\theta$ $\dot{t}(\dot{\xi},\theta) = \rho_c(2\dot{\rho}_t - \rho_c)\sqrt{\dot{u}(\dot{\xi},\theta)}$ (b-9)

$$\theta = \frac{1}{3} \frac{-\sqrt{3}(s_{ij}s_{jk}s_{ki})}{2(s_{ij}s_{ji})^{\frac{1}{2}}}$$

 $\dot{\epsilon}$ که در آن σ_{ii} تنش هیدرواستاتیک؛ s_{ij} تنش انحرافی؛ رشد کرنش و $f_c(\dot{\varepsilon})$ مقاومت دینامیک بتن میباشد. رابطه سطح گسیختگی در حالت کلی به صورت زیر تعريف می شود:

 $\dot{f}(\dot{\xi},\dot{\rho},\theta) = \dot{\rho} - \dot{\rho}_f(\dot{\xi},\theta) = 0 \quad |\theta| \le 60^\circ$

همانطور که ملاحظه می شود، علامت نقطه، نشانگر وابسته بودن پارامتر به رشد کرنش میباشد. در حقیقت سطح گسیختگی علاوه بر سه ثابت تنش تابعی از رشد کرنش نیز میباشد. برای بررسی اثر بارگذاری دینامیک و افزودن پارامتر رشد کرنش، چندین معیار گسیختگی به شرح ذیل انتخاب شدهاند: الف- معیار سای-تینگ-چن[۶]

با جایگزینی کے در این معیار با غمی توان سطح گسیختگی دینامیک را به صورت رابطه ۶ تعریف کرد. $\dot{\rho}_f(\dot{\xi},\theta) = \frac{l}{2a}(-b\cos\theta + c + c)$

$$\sqrt{(b\cos\theta+c)^2-4a(d\xi-l))}$$

$$\dot{\rho}_{f}(\dot{\xi},\theta) = \frac{1}{2a}(-\sqrt{2}\lambda(\theta) + \sqrt{2\lambda^{2}(\theta) - 8a(\sqrt{3}b\dot{\xi} - I)})$$
(Y)

که در این رابطه (
$$\lambda(\theta)$$
 به صورت زیر تعریف می شود:

$$\lambda(\theta) = \begin{cases} c\cos(\frac{l}{3}\cos^{-l}(d\cos 3\theta)) & ,\cos 3\theta \ge 0 \\ c\cos(\frac{\pi}{2} - \frac{l}{3}\cos^{-l}(d\cos 3\theta)) & ,\cos 3\theta \le 0 \end{cases}$$

(۴)

(۵)

$$\dot{\rho}_{f}(\dot{\xi},\theta) = \frac{\dot{s}(\dot{\xi},\theta) + \dot{t}(\dot{\xi},\theta)}{\dot{v}(\dot{\xi},\theta)}$$

(11)

$$\dot{v}(\dot{\xi},\theta) = 4(\dot{\rho}_c^2 - \dot{\rho}_t^2)\cos^2\theta + (\dot{\rho}_c - 2\dot{\rho}_t)^2$$

$$(d-9)$$

 $\dot{u}(\dot{\xi},\theta) = 4(\dot{\rho}_c^2 - \dot{\rho}_t^2)\cos^2\theta + 5\dot{\rho}_t^2 - 4\dot{\rho}_c\dot{\rho}_t$

که در این روابط $\dot{
ho}_{t}$ و $\dot{
ho}_{c}$ مولفههای تنش عمود بر محور هیدرواستاتیک به ازای $\theta = 0^{\circ}$ و $\theta = 0^{\circ}$ میباشند.

$$\dot{\rho}_{t} = -\frac{1}{2c}(b + \sqrt{b^{2} - 4c(a - \frac{\dot{\xi}}{\sqrt{3}})})$$
(1.)

$$\dot{\rho}_{c} = -\frac{1}{2e}(d + \sqrt{d^{2} - 4e(a - \frac{\dot{\xi}}{\sqrt{3}})})$$

مقایسه بین معیارهای گسیختگی فوق در حالت استاتیک با نتایج آزمایشگاهی[۹] در شکل (۳) ملاحظه



شکل ۳: مقایسه معیارهای گسیختگی با نتایج آزمایش دو محوری.

سطح مقاومت يسماند

کل فرایند انهدام بتن در حالت محصور به ترتیب شامل پاسخ الاستیک، جریان پلاستیک، تشکیل ترکهای میکروسکوپی و ماکروسکوپی، خرد شدن، پودر شدن و جریان سیال پودرها می باشد. برخلاف بارگذاری تکمحوری، بتن خردشده در حالت محصور هم توانایی باربری دارد. لذا درنظرگرفتن مقاومت آن در پاسخ سازه نقش مهمی را دارد. حرکت پودرها و حذف ماده از جلوی پرتابه نیز در حل مسایل مربوط به نفوذ در بتن نقش کلیدی دارد. رفتار خردشدگی بتن با کنترل معیار کرنش حداکثر (ϵ_c) درنظر گرفته می شود. برای این منظور از یک معيار كرنشى كه تبديليافته معيار تسليم بر حسب

كرنشها مىباشد استفاده مىشود. سطح گسيختگى بتن پس از خرد شدن به سطح مقاومت پسماند تنزل می یابد. این سطح مادامیکه فشار هیدرواستاتیک به کشش تبدیل نشده است وجود دارد و پس از آن بتن کنده شده و کلیه مقاومت خود را از دست میدهد. [۱۰] مقاومت پسماند را به صورت ذیل پیشنهاد مینماید:

$$f_c^* = B f_c \left(\frac{\xi}{\sqrt{3}}\right)^N$$

(17)

که B و N ثابتهای ماده هستند.

قاعده سخت شدگی

قاعده سختشدگی، حرکت سطح بارگذاری یا سطح تسلیم جدید را در طی تغییر شکل پلاستیک تعریف مى كند. اين قاعده، رابطه بين سطوح تسليم و كرنش پلاستیک موثر را تبیین میکند. در قاعده سختشدگی ایزوتروپ با استفاده از روابط تنش-کرنش تکمحوری داريم[11]:

 $\sigma = E_0 \varepsilon - \frac{1}{2} \frac{E_0}{\varepsilon_0} \varepsilon^2$ ϵ_0 که E_0 مدول الاستیسیته اولیه؛ ϵ کرنش کل و کرنش کل به ازای تنش حداکثر است. $\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_e$ (14)

که ϵ_p کرنش موثر پلاستیک و ϵ_p کرنش الاستیک می باشد. با جایگذاری رابطه ۱۴ در ۱۳ داریم: $\sigma = E_0 \varepsilon_p + \sqrt{2E_0^2 \varepsilon_0 \varepsilon_p} , 0.3f_c < \sigma < f_c$ (1Δ)

با استفاده از مقدار فعلى كرنش پلاستيك موثر ، ميزان تنش موثر که مبین سطح تسلیم کنونی است، به دست مىآيد.

قاعده جريان

مطالعات آزمایشگاهی نشان میدهد در روند بارگذاری فشاری کاهش حجم غیرخطی با تسلیم شدن بتن آغازشده و در محدوده هفتادوپنج تا نود درصد مقاومت نهایی به افزایش حجم پلاستیک تبدیل می شود (شکل ۴). این رفتار با قاعده جریان متحد همخوانی ندارد و شرط تعامد

بردار میزان تغییر شکل پلاستیک بر سطح تسلیم منجر به افزایش حجم زیادی میشود. با استفاده از قاعده جریان غیرمتحد و اصلاح مولفه حجمی تابع سطح گسیختگی و تبدیل ضریب ثابت آن به صورت تابعی از پارامتر سختشدگی، میتوان از افزایش حجم بیش از حد جلوگیری کرد.

اما استفاده از قاعده جریان غیرمتحد منجر به ایجاد ماتریس سختی غیر متقارن می شود که از دیدگاه عددی به هیچ وجه مطلوب نیست. ثانیا، وحدت جواب تضمین شده نیست و ممکن است که در یک سیکل بارگذاری و باربرداری، انرژی تولید شود[۱۲]. لذا برای بیان روابط تنش-کرنش در محدوده پلاستیک، قاعده بیان روابط تنش-کرنش در محدوده پلاستیک، قاعده جریان متحد و شرط تعامد بردار میزان تغییر شکل پلاستیک بر سطح تسلیم در نظر گرفته می شود: $d \varepsilon_{ij}^{p} = d\lambda \frac{\partial \dot{f}(\dot{\sigma})}{\partial s}$

(18)

با داشتن تابع جریان، مولفههای بردار جریان به صورت عبارتهای صریح قابل بیان است.



شکل ۴ :کرنش حجمی تحت تنش دو محوری.

سرعت بارگذاری

برای ارزیابی اثر سرعت بارگذاری از مفهوم رشد کرنش استفاده می شود. در فشار، از رابطه انجمن بتن اروپا (CEB) استفاده شده است[۱۳]. محدوده عملکرد این رابطه از رشد کرنش¹⁻⁶ s⁻¹ 200 است.

$$\dot{f}_c = f_c \left(\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}_s}\right)^{1.026\delta_c}$$
, for $\dot{\varepsilon} \le 30s^{-1}$

$$\dot{f}_c = f_c \gamma_c \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}\right)^{\frac{1}{3}}$$
, for $\dot{\varepsilon} > 30s^{-1}$

که γ_c و δ_c ثابتهای فشاری ماده برحسب مقاومت بتن میباشند.

 $\log \gamma_c = 6.156\delta_c - 2$

$$\delta_c = \frac{l}{(5+0.9f_c)} \tag{(7.)}$$

(19)

(۲۳)

در روابط ۱۷ و ۱۸ غ یک عدد ثابت بوده و نشانگر رشد کرنش در حالت آزمایش استاندارد استاتیک یعنی 301×30 میباشد. با توجه به آزمایشات صورت گرفته [۱۴] رابطه ارائهشده توسط CEB در کشش مناسب نبوده و روابط ذیل توصیه میشوند:

$$\dot{f}_{t} = f_{t} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{s}}\right)^{\delta_{t}} , \text{ for } \dot{\varepsilon} \leq ls^{-l}$$
(71)

$$\dot{f}_{t} = f_{t} \gamma_{t} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{s}}\right)^{\frac{l}{3}} , \text{ for } \dot{\varepsilon} > ls^{-l}$$
(YY)

 $\log \gamma_t = 6\delta_t - 2$

$$\delta_{t} = \frac{1}{(1+0.8f_{c})}$$
 (۲۴ در شکل (۵) اثر سرعت بارگذاری و مقایسه بین روابط





سخت شدگی کششی رفتار بتن تحت تنشهای کششی، تا رسیدن به حد شکست که با یک معیار تنش کششی حداکثر تعریف می شود به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته می شود. فرض می شود ترکها فقط در صفحات عمود بر صفحه

(1Y)

(1)

$$G_{12}^{c} = 0.25G(1 - \frac{\varepsilon_{1}}{0.004})$$
(78)

$$G_{12}^{c} = 0.0 \quad if \varepsilon_{1} > 0.004$$

$$G^c = G^c$$

$$G_{23}^c = \frac{5}{6}G$$
(YA)

1211

(٣١)

(37)

(۳۳)

$$G_{13}^{c} = 0.25G(1 - \frac{\varepsilon_{1}}{0.004})$$
(7.)

$$G_{13}^c = 0.0 \quad if \varepsilon_1 > 0.004$$

$$G_{23}^{c} = 0.25G(1 - \frac{\varepsilon_2}{0.004})$$

$$G_{23}^c = 0.0 \quad if \varepsilon_2 > 0.004$$

$$G_{12}^c = 0.5Min(G_{13}^c, G_{23}^c)$$
(°°F)

در این روابط G مدول برشی بتن ترک نخورده؛ G^c مدول برشی بتن ترک خورده و عکرنش کششی میباشد.

رفتار فولاد

میلگردهای مسلح کننده، به صورت لایههای فولادی با ضخامت معادل مدل می شوند. هر لایه فولادی یک رفتار تکمحوری الاستوپلاستیک کامل دارد و فقط نیروی محوری در امتداد میلگرد را می تواند تحمل کند. رفتار فولاد در کشش و فشار یکسان در نظر گرفته می شود. برای گسیختگی فولاد معیار حداکثر کرنش در نظر گرفته می شود.

تحليل پوشش محافظ راكتور هستهاي

با استفاده از مطالب فوق الذکر و استفاده از نسخه اصلاح شده برنامه تحلیل دینامیکی غیرخطی پوستههای بتن مسلح(NDARCS) [۴و۵]، تحلیل برخورد هواپیمای Phantom F4 روی پوشش محافظ ساختمان راکتور سازه ایجاد شوند. به علت وجود اثرات اتصالی بتن با میلگرد، بتن ترک خورده در حد فاصل بین ترکها، یک مقدار نیروی کششی قائم بر صفحه ترک را تحمل می نماید.

برای مدلسازی پدیده فوق از یک روش رهاسازی تدریجی مولفه قائم تنش بتن در صفحه ترکخوردگی استفاده می شود، همانطور که در شکل (۶) ملاحظه میشود، در این روش، باربرداری و بارگذاری مجدد بتن ترکخورده، به صورت رفتار خطی با یک مدول الاستیسیته ظاهری E_i مدل می شود[۱۱].

$$E_i = \alpha \cdot \dot{f}_t \frac{(1 - \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_t})}{\varepsilon_i} ; \varepsilon_m < \varepsilon_i < \varepsilon_t$$

(۲۵)

که ۵ و _۲۵ پارامترهای سختشدگی کششی، _Ei حداکثر سابقه کرنش کششی و _Em کرنش متناظر تنش کششی حداکثر میباشد. اگر ترک بسته شود یا به عبارت دیگر، مولفه قائم کرنش بر صفحه ترک منفی شود، بتن در همان امتداد رفتار ترک نخورده را به دست میآورد.





پدیده انتقال برش

نتایج تجربی نشان میدهند که مقدار قابل ملاحظه ای از تنش برشی می تواند از طریق سطوح زبر تر کخورده منتقل شود. یک روش ساده برای احتساب اثرات قفل شدگی دانه ها در یک مدل تر کخورد گی گسترده، استفاده از یک مقدار مناسب برای مدول برشی تر کخورده است.برای این منظور از روابط تجربی [۱۱] استفاده شده است. برای بتن تر کخورده در امتداد ۱:



شکل ۷ : برش از ساختمان راکتور نیروگاه Sizewell .

Sizewell انگلستان که به صورت پیش تنیده ساخته شده و یک ساختمان راکتور طراحی شده توسط آلمان صورت گرفت. حداکثر نیروی وارده از هواپیما در صورت تعامد زاویه برخورد حاصل می شود. بیشترین اثر هم در محل تلاقی گنبد با دیواره استوانهای می باشد که با درنظر گرفتن تعامد زاویه برخورد باعث می شود کل نیرو به صورت افقی به پوشش وارد شود [۱۵]. برشی از ساختمان راکتور نیروگاه Sizewell در شکل (۲) ملاحظه می شود.

بررسی پارامترهای مصالح بتن مادهای با رفتار کاملا پیچیده و وابسته به عوامل

عوامل متعددی می باشد. در جدول (۱) سعی شده است پارامترهای مورد استفاده در مدل فوق معرفی شده و ضمن ارائه محدوده تغییرات آنها، مقدار مورد استفاده در تحلیل صورت گرفته ذکر شود. جدول (۲) نمایانگر مشخصات سطح گسیختگی سه معیار معرفی شده بر حسب ثابتهای هر یک می باشد.

مشخصات هندسی پوششهای محافظ جدول (۳) مقایسهای بین وضعیت هندسی و مادی به کار رفته در دو نیروگاه مورد بررسی ارائه میدهد.

نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۹، شماره ۵، دی ماه ۱۳۸۴

جدول ۱: مشخصات فیزیکی بتن و محدوده تغییرات آنها.

| مقدار پیش فرض | محدوده تغييرات | پارامتر |
|--------------------|------------------------|----------------|
| | 15-50 GPa | Е |
| 0.2 | 0.15-0.22 | ν |
| | 20-50 MPa | f _c |
| | 2-5 MPa | f_t |
| 0.3 f _c | 0.1-0.3 f _c | ξc |
| 0.9 | 0.9-1.5 | В |
| 0.7 | 0.5-0.7 | N |
| 0.6 | 0.5-0.7 | α |
| 0.002 | 0.001-0.002 | ε _t |
| 0.01 | 0.003-0.01 | εc |

نشان داده شده است.



شکل ۸: مقایسه تغییر مکان افقی در اثر برخورد هواپیما به پوشش نیروگاه Sizewell .

اثر معیار گسیختگی بتن

اثر تغییر معیارهای گسیختگی در دو حالت استاتیک و دینامیک بر روی تغییر مکان پوسته طراحی آلمان، در شکل (۹) و (۱۰) مشخص شده است.





اثر سرعت بارگذاری همانطور که در اشکال (۹) و (۱۰) مشخص است در نظر گرفتن رشد کرنش موجب کاهش ۱۰ تا ۲۰ درصدی در تغییر مکان پوسته می *گ*ردد. هر سه معیار با افزودن

| دول ۲ : پارامترهای معیارهای کسیحتگی | گسیختگ | عیارهای گ | پارامترهای ه | : ۲ | مدول |
|-------------------------------------|---------------|-----------|--------------|-----|------|
|-------------------------------------|---------------|-----------|--------------|-----|------|

| ويلام- وارنک | اتوسن | سای- تینگ-چن | |
|--------------|---------|-----------------|---|
| 0.1025 | 1.2759 | 1.0054 | a |
| -0.8403 | 3.1962 | 7.4638 | b |
| -0.091 | 11.7365 | 0.6869 | с |
| -0.4507 | 0.9801 | 5.6780 | d |
| -0.1018 | | | e |

جدول ۳: مشخصات هندسی و مصالح پوشش نیروگاهها.

| نیروگاہ طراحی آلمان | SIZEWELL | مشخصات |
|------------------------|----------|------------------|
| 62.8m | 48.32m | قطر خارجی |
| 60.07m | 66.97m | ارتفاع |
| 2.0m | 1.3m | ضخامت ديوار |
| 1.75m | 1.0m | ضخامت گنبد |
| 30 GPa | 38 GPa | Ec |
| 21 MPa | 35 MPa | f_c |
| 1.5 Mpa | 7.2 MPa | \mathbf{f}_{t} |

نتیجه گیری تربیبانی

مقايسه المان انتخابي

مقایسه نتایج بدست آمده از روش تحلیل بالا با معیار گسیختگی استاتیک، با نتایج [۱۶] که با استفاده از المانهای سه بعدی بیست گرهی و با معیار گسیختگی استاتیک صورت گرفته است، بیانگر این واقعیت است که المان پوسته تبدیلیافته علاوه بر آنکه از لحاظ صرفهجویی المان پوسته تبدیلیافته علاوه بر آنکه از لحاظ صرفهجویی ماناسبی نیز میباشد. در شکل (۸) مقایسه عکس العمل اثر برخورد روی تغییرمکان پوشش نیروگال

پارامتر رشد کرنش سازگار بوده و در حالت دینامیک اختلاف بین معیارها کاسته شده و به همگرایی بیشتری میرسند.



شکل ۱۰ : مقایسه تغییر مکان افقی در اثر برخورد هواپیما به پوشش نیروگاه طراحی آلمان تحت معیارهای مختلف





اثر كاهش ضخامت يوسته

آیین نامه های محدودی، معیارهای طراحی برای این نوع بارگذاری پیشنهاد می کنند. این معیارهای محدود در انتخاب ملاک ها نیز بسیار متفاوت عمل کرده اند. بعنوان مثال وزارت انرژی آمریکا (DOE) [۱۷]، معیاری براساس

نرم شدگی پوشش معرفی می کند، اما IAEA معیاری بر اساس کرنش حداکثر آرماتور ارائه می کند[۳].[۸] معیاری براساس حداکثر عرض ترک به منظور جلوگیری از نشت مواد رادیواکتیو پیشنهاد می کند که البته برای پوششهای دارای لایه محافظ فولادی² داخلی چندان معنیدار نیست. برای ارزیابی دقیقتر این معیارها اثر کاهش ضخامت پوشش در نتیجه حاصله ارزیابی شده است. شکل (۱۱) و (۱۲) اثر کاهش ضخامت پوشش را برای دو معیار طراحی معرفی شده نمایش می دهند. **الف – کرنش حداکثر در آرماتور**

با توجه به شکل (۱۲) و در نظر گرفتن حداکثر کرنش مجاز ٪۰/۷ [۳] برای فولاد مشخص است که حداقل ضخامت قابل قبول برابر ۱۵۰ cm میباشد. کرنش ماندگار پلاستیک در ضخامتهای کمتر به خوبی در شکل ملاحظه میشود.

ب- نرم شدگی پوشش

مفهوم نرم شدگی با نسبت تغییر مکان پوشش در حالت رفتار خمیری به تغییر مکان پوشش با فرض رفتار خطی برای بتن تعریف میشود. توصیه شده است این نسبت از ۳۰ فراتر نرود [۱۷].

برای پوشش حاضر در ضخامتهای ۱۷۵، ۱۵۰، ۱۲۵و ۱۰۰ سانتیمتر این نسبت به ترتیب برابر ۱۸/۶، ۲۳/۴، ۳۳/۳و ۵۵/۶ می باشد. ملاحظه می شود این معیار نیز ضخامت ۱۵۰ cm را برای پوشش مناسب میداند.



شکل ۱۲ : اثر کاهش ضخامت روی کرنش آرماتورهای پوشش نیروگاه طراحی آلمان تحت معیار گسیختگی دینامیک ویلام-وارنک.

خنثی با وجه کششی به فاصله تار خنثی تا محور

آرماتورها؛ s₁ و s₂ فاصله بین آرماتورها؛ d_c پوشش بتن؛ d_b

قطر آرماتورها و fs تنش در آرماتورها می باشد. عرض ترک

بحرانی به خوبی قابل اندازه گیری نمی باشد. براساس

مطالعات محدود صورت گرفته در این زمینه [۱۹] عرض

ترک ۳۵mm/۰ را پیشنهاد میکند. با محاسبه این رابطه عرض ترک حتی در ضخامت ۱۷۵ سانتیمتر نیز ناکافی بوده و در حدود ۵ برابر مقدار ذکر شده می باشد. منتهی

به علت وجود پوشش فولادی داخلی این معیار در این

مثال تعيين كننده نمى باشد.

ج- عرض ترک

[۱۸] تابع زیر را بیانگر میزان اطمینان پوشش در برابر نشت مواد رادیواکتیو معرفی میکند. اگر مقدار تابع صفر و یا منفی شود به این مفهوم است که امکان تراوش مواد از ترک ایجاد شده موجود می باشد:

$$g(X) = \frac{2.5w_c}{k\hat{\beta}\sqrt{\frac{8s_1s_2d_c}{\pi d_b}}} - f_s$$

که در این رابطه w_c عرض ترک بحرانی برای نشت مواد رادیواکتیو؛ k ضریب شکست؛ $\hat{m{eta}}$ نسبت فاصله تار

مراجع

(۳۵)

- 1 Kar, K. (1979). "Impactive effects of tornado missiles and aircraft." *Journal of the Structural Division, ASCE,* Vol. 105, No. 11, PP. 2243-2260.
- 2 Riera, J. D. (1968). "On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces." *Journal of the Nuclear Engineering and Design*, Vol. 8, PP.415.
- 3 International Atomic Energy Agency, (1981). "External man-induced events in relation to nuclear power plant siting," *IAEA Safety Guides*, No. 50-SG-S5, Vienna, Austria.
- ۴- محمدی، س. "تحلیل غیرخطی پوسته های بتن مسلح." پایان نامه کارشناسی ارشد سازه دانشکده فنی دانشگاه تهران، (۱۳۷۱).

۵- محمودزاده کنی، ا. و محمدی، س. "تحلیل غیرخطی پوستههای بتن مسلح." نشریه دانشکده فنی, شماره ۵۹، (۱۳۷۲).

- 6 Hsieh, S. S., Ting, E. C. and Chen, W. F. (1982). "A plasticity fracture model for concrete." *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 18, No. 3, PP. 181-197.
- 7 Ottosen, N. S. (1977). "A failure criterion for concrete." *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 103, No. 4, PP. 527-535.
- 8 Willam, K. J. and Warnke, E. P. (1975). "Constitutive model for triaxial behavior of concrete." *International Association of Bridge and Structural Engineers Seminar on Concrete Structure Subjected to Triaxial Stresses*, Paper III-1, Bergamo, Italy.
- 9 Kupfer, H., Hilsdorf, H. K. and Rusch, H. (1969). "Behavior of concrete under biaxial stresses." ACI Journal, Vol. 67, No. 10, PP. 802-807.
- 10 Leppanen, J. (2002). "Dynamic behavior of concrete structures subjected to blast and fragment impacts." Doctoral Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- 11 Hinton, E. and Owen, D. R. J. (1984). Finite element software for plates and shells. Swansea, UK.
- 12 Crouch, R. S. and Tahar, B. (2000). "Application of a stress return algorithm for elasto-plastic hardeningsoftening models with high yield surface curvature." *European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering*, Barcelona, Spain.
- 13 Comite Euro-International du Beton, (1993). CEB-FIP model code 1990. Trowbridge, Wiltshire, UK.
- 14 Malvar, L. J. and Crawford, J. E. (1998). "Dynamic increase factor for concrete." *Twenty Eighths DDESB Seminar*, Orlando, Florida, US.
- ۱۵- محمودزاده کنی، ا. "آنالیز پوسته بتنی محافظ ساختمان راکتور نیروگاه بوشهر در مقابل اصابت هواپیما." چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران, دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۷۶).
- 16 Bangash, M. Y. H. (1999). Manual of numerical methods in concrete. Bristol, U.K.

- 17 Department of Energy, (1996). "Accident analysis for aircraft crash into hazardous facilities." *DOE Standard*, No. 3014-96, Washington D.C., Columbia, US.
- 18 Siddiqui, N. A., Iqbal, M. A., Abbas, H. and Paul, D. K. (2003). "Reliability analysis of nuclear containment without metallic liners against jet aircraft crash." *Journal of the Nuclear Engineering and Design*, Vol. 224, PP.11-21.
- 19 Suzuki, T., Takiguchi, K. and Hotta, H. (1992). "Leakage of gas through concrete cracks." *Journal of the Nuclear Engineering and Design*, Vol. 133, PP.121-130.

CN.

واژههای انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 Concrete Containment
- 2 Global Damage
- 3 Local Damage
- 4 Functional Failure Damage
- 5 Stress Invariant
- 6 Steel Containment Liner