

# 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)

## چکیده

برخورد هواپیما، یک بارگذاری خارجی و فوق‌العاده است که بر طبق استانداردهای ایمنی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) باید در طراحی پوشش‌های بتنی محافظ نیروگاه‌های هسته‌ای مد نظر قرار گیرد. این بارگذاری می‌تواند ایجاد تخریب سازه‌ای کلی یا موضعی نموده و یا موجب نقص عملکرد سیستم‌های 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 هسته‌ای ساخت آلمان مطالعه گردد. برنامه اجزا محدود دینامیکی غیرخطی (NDARCS) با استفاده از المان‌های ۸ گره‌ای پوسته بتن مسلح مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصله با نتایج سایر محققان که از المان‌های سه‌بعدی استفاده کرده‌اند نیز مقایسه شده است. آئین‌نامه‌های محدودی، معیارهای طراحی برای این نوع بارگذاری معرفی کرده‌اند. این معیارها نیز در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. اثر کاهش ضخامت پوسته و تغییر معیار گسیختگی بتن بر روی رفتار پوشش نیز بررسی شده است.

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

## مقدمه

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<sup>۱</sup> نیروگاه می‌تواند در سه فاز ایجاد تخریب کند:

**الف- تخریب کلی<sup>۲</sup>:** 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 برآورد آن می‌باشد.

**ب- تخریب موضعی<sup>۳</sup>:** 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.

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) توصیه می‌کند، اگر محل نیروگاه در مکانی است که احتمال وقوع سانحه هوایی در مساحتی برابر یک هکتار بیشتر از  $10^{-6}$  در سال باشد، اثر برخورد هواپیما مد نظر قرار گیرد.

برخورد هواپیما یک بارگذاری فوق‌العاده محسوب شده و از دو حیث دارای اهمیت می‌باشد. نخست آنکه، در محل برخورد هواپیما با پوشش بتنی فشار هیدرواستاتیک به چندین برابر مقاومت فشاری بتن می‌رسد. بتن در این شرایط یک رفتار کاملاً غیرخطی از خود بروز می‌دهد. ثانیاً، سرعت اعمال بار در کسری از ثانیه بوده و موجب رفتار دینامیک از بتن می‌گردد. این مقاله ضمن بررسی

بین‌المللی انرژی اتمی نیز برای در نظر گرفتن 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 چرخشی است. برای انتگرال‌گیری در سطح از روش 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. نقاط گوس هر لایه در میان سطح آن واقع هستند و مولفه‌های تنش نیز در این نقاط محاسبه می‌شوند و فرض می‌شود که در ضخامت هر لایه ثابت باشند.

### مدل رفتاری غیرخطی دینامیک بتن

عموماً 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 DIF نسبت مقاومت نهایی دینامیک به مقاومت نهایی استاتیک می‌باشد. DIF تابع مستقیمی از رشد کرنش است. در بتن، این 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

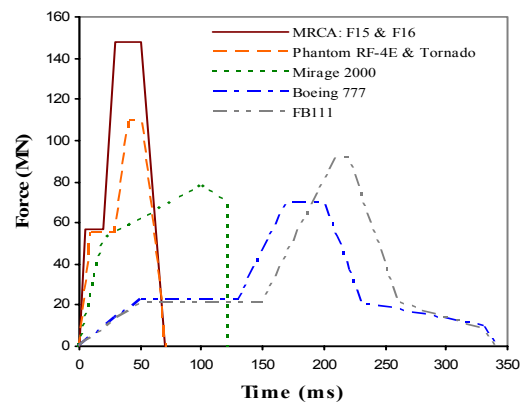
ج- تخریب اجزا نیروگاه در اثر ارتعاش<sup>۴</sup>: در اثر برخورد هواپیما سیستم‌های عملکردی راکتور که در نزدیکی محل برخورد قرار دارند ممکن است در اثر ارتعاش و ضربه وارده دچار اختلال و در نتیجه آسیب رسیدن به عملکرد نیروگاه شود.

در این مقاله سعی می‌شود 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 خرد شدن و اعوجاج هواپیما مستهلک می‌شود. با توجه به آنکه هواپیما یک پرتابه بسیار نرم محسوب می‌شود انرژی برخورد منحصر و وابسته به نحوه توزیع جرم هواپیما و سرعت برخورد است. کل انرژی ناشی از برخورد که منجر به تخریب هواپیما در سطح برخورد می‌گردد توسط [۱] به صورت زیر نشان داده شده است:

$$F(t) = F_c(x_t) + \mu \cdot m(x_t) \cdot V(t)^2 \quad (1)$$



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

در این رابطه  $\mu$  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. [۲] 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 اندازه‌گیری می‌باشد. این نتایج توسط آژانس

$$\theta = \frac{1 - \sqrt{3}(s_{ij}s_{jk}s_{ki})}{3 \cdot 2(s_{ij}s_{ji})^{3/2}} \quad (4)$$

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

$$\dot{f}(\dot{\xi}, \dot{\rho}, \theta) = \dot{\rho} - \dot{\rho}_f(\dot{\xi}, \theta) = 0 \quad |\theta| \leq 60^\circ \quad (5)$$

همانطور که ملاحظه می‌شود، 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  $\dot{\xi}$  در این معیار با  $\dot{\xi}$  می‌توان سطح گسیختگی دینامیک را به صورت رابطه ۶ تعریف کرد.

$$\dot{\rho}_f(\dot{\xi}, \theta) = \frac{1}{2a}(-b \cos \theta + c + \sqrt{(b \cos \theta + c)^2 - 4a(d\dot{\xi} - I)}) \quad (6)$$

در این رابطه  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  ثابتهای ماده هستند. ب- معیار اتوسن [۷]

$$\dot{\rho}_f(\dot{\xi}, \theta) = \frac{1}{2a}(-\sqrt{2}\lambda(\theta) + \sqrt{2\lambda^2(\theta) - 8a(\sqrt{3}b\dot{\xi} - I)}) \quad (7)$$

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

$$\lambda(\theta) = \begin{cases} c \cos(\frac{1}{3} \cos^{-1}(d \cos 3\theta)) & , \cos 3\theta \geq 0 \\ c \cos(\frac{2}{3} - \frac{1}{3} \cos^{-1}(d \cos 3\theta)) & , \cos 3\theta \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

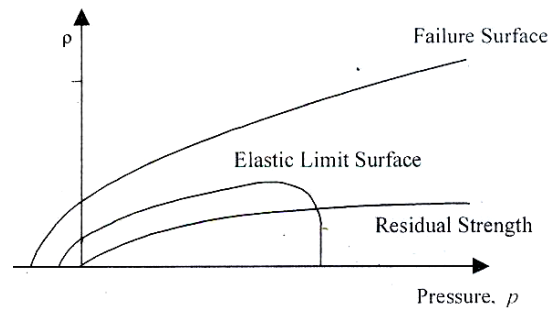
ج- معیار ویلام-وارنک [۸]

$$\dot{\rho}_f(\dot{\xi}, \theta) = \frac{\dot{s}(\dot{\xi}, \theta) + \dot{i}(\dot{\xi}, \theta)}{\dot{v}(\dot{\xi}, \theta)} \quad (9)$$

$$\dot{s}(\dot{\xi}, \theta) = 2\dot{\rho}_c(\dot{\rho}_c^2 - \dot{\rho}_t^2) \cos \theta \quad (a-9)$$

$$\dot{i}(\dot{\xi}, \theta) = \rho_c(2\dot{\rho}_t - \rho_c)\sqrt{\dot{u}(\dot{\xi}, \theta)} \quad (b-9)$$

گسیختگی بسط می‌یابد. اما در مدل غیرخطی دینامیک که در ذیل ارائه می‌شود، چهار سطح تسلیم اولیه کلاهدار، 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 می‌دهد.



شکل ۲: مدل بنیادی بتن.

### سطح تسلیم اولیه کلاهدار

سطح تسلیم اولیه، محدوده الاستیک بتن را تحت وضعیت چندمحوری تنش نشان می‌دهد. در مسائلی که بتن تحت فشار هیدرواستاتیک بالایی می‌باشد، بتن از همان ابتدا رفتار پلاستیک خواهد داشت لذا استفاده از یک سطح تسلیم اولیه که مشابه سطح گسیختگی در یک مقیاس کوچکتر باشد موجب افزایش سختی سازه به صورت کاذب می‌شود. برای رفع این نقیصه یک کلاهدار روی سطح تسلیم اولیه قرار داده می‌شود که محدوده الاستیک را نشان دهد. پارامتر  $\dot{\xi}_c$  کنترل کننده محل این کلاهدار می‌باشد.

### سطح گسیختگی

با تعریف سه نامتغیر تنش<sup>۵</sup> به صورت دینامیک و نرمال شده در فضای تنش‌های وسترگارد و رعایت قواعد جبر اندیسی داریم:

$$\dot{\xi} = \frac{\sigma_{ii}}{f_c(\dot{\epsilon})\sqrt{3}} \quad (2)$$

$$\dot{\rho} = \frac{\sqrt{s_{ij}s_{ij}}}{f_c(\dot{\epsilon})} \quad (3)$$

کرنش‌ها می‌باشد استفاده می‌شود. سطح گسیختگی بتن پس از خرد شدن به سطح مقاومت پسماند تنزل می‌یابد. 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:

$$f_c^* = B f_c \left( \frac{\xi}{\sqrt{3}} \right)^N \quad (12)$$

که B و N ثابت‌های ماده هستند.

### قاعده سخت‌شدگی

قاعده سخت‌شدگی، حرکت سطح بارگذاری یا سطح تسلیم جدید را در طی تغییر شکل پلاستیک تعریف می‌کند. این قاعده، رابطه بین سطوح تسلیم و کرنش پلاستیک موثر را تبیین می‌کند. در قاعده سخت‌شدگی ایزوتروپ با استفاده از روابط تنش-کرنش تک‌محوری داریم [۱۱]:

$$\sigma = E_0 \varepsilon - \frac{1}{2} \frac{E_0}{\varepsilon_0} \varepsilon^2 \quad (13)$$

که  $E_0$  مدول الاستیسیته اولیه؛  $\varepsilon$  کرنش کل و  $\varepsilon_0$  کرنش کل به ازای تنش حداکثر است.

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_e \quad (14)$$

که  $\varepsilon_p$  کرنش موثر پلاستیک و  $\varepsilon_e$  کرنش الاستیک می‌باشد. با جایگذاری رابطه ۱۴ در ۱۳ داریم:

$$\sigma = E_0 \varepsilon_p + \sqrt{2 E_0^2 \varepsilon_0 \varepsilon_p}, 0.3 f_c < \sigma < f_c \quad (15)$$

با استفاده از مقدار فعلی کرنش پلاستیک موثر، میزان تنش موثر که مبین سطح تسلیم کنونی است، به دست می‌آید.

### قاعده جریان

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

$$\dot{u}(\xi, \theta) = 4(\dot{\rho}_c^2 - \dot{\rho}_t^2) \cos^2 \theta + 5\dot{\rho}_t^2 - 4\dot{\rho}_c \dot{\rho}_t \quad (c-9)$$

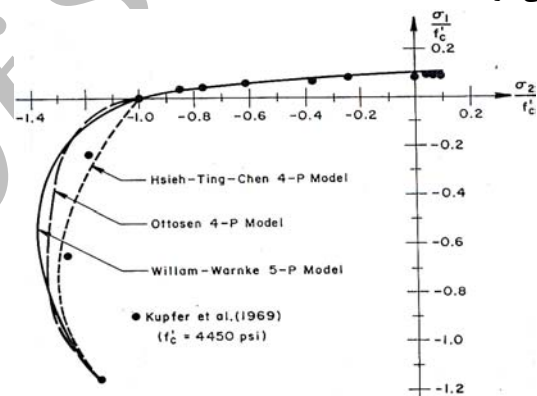
$$\dot{v}(\xi, \theta) = 4(\dot{\rho}_c^2 - \dot{\rho}_t^2) \cos^2 \theta + (\dot{\rho}_c - 2\dot{\rho}_t)^2 \quad (d-9)$$

که در این روابط  $\dot{\rho}_c$  و  $\dot{\rho}_t$  مولفه‌های تنش عمود بر محور هیدرواستاتیک به ازای  $\theta=0^\circ$  و  $\theta=60^\circ$  می‌باشند.

$$\dot{\rho}_t = -\frac{1}{2c} \left( b + \sqrt{b^2 - 4c \left( a - \frac{\xi}{\sqrt{3}} \right)} \right) \quad (10)$$

$$\dot{\rho}_c = -\frac{1}{2e} \left( d + \sqrt{d^2 - 4e \left( a - \frac{\xi}{\sqrt{3}} \right)} \right) \quad (11)$$

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



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

### سطح مقاومت پسماند

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 می‌باشد. برخلاف بارگذاری تک‌محوری، بتن خردشده در حالت محصور هم توانایی باربری دارد. لذا در نظر گرفتن 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 ( $\varepsilon_c$ ) در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور از یک معیار کرنشی که تبدیل یافته معیار تسلیم بر حسب

که  $\gamma_c$  و  $\delta_c$  ثابت‌های فشاری ماده برحسب مقاومت بتن می‌باشند.

$$\log \gamma_c = 6.156 \delta_c - 2 \quad (19)$$

$$\delta_c = \frac{I}{(5 + 0.9 f_c)} \quad (20)$$

در روابط ۱۷ و ۱۸  $\dot{\epsilon}_s$  یک عدد ثابت بوده و نشانگر رشد کرنش در حالت آزمایش استاندارد استاتیک یعنی  $30 \times 10^{-6}$  می‌باشد. با توجه به آزمایشات صورت گرفته [۱۴] رابطه ارائه شده توسط CEB در کشش مناسب نبوده و روابط ذیل توصیه می‌شوند:

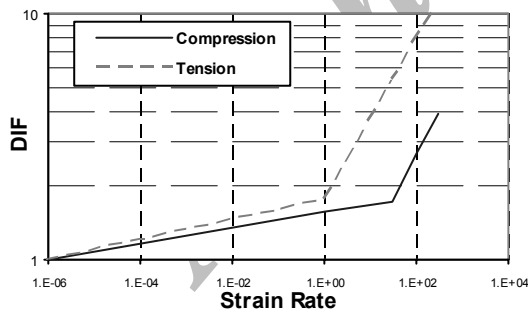
$$\dot{f}_t = f_t \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{\delta_t}, \text{ for } \dot{\epsilon} \leq 1s^{-1} \quad (21)$$

$$\dot{f}_t = f_t \gamma_t \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{\frac{1}{3}}, \text{ for } \dot{\epsilon} > 1s^{-1} \quad (22)$$

$$\log \gamma_t = 6 \delta_t - 2 \quad (23)$$

$$\delta_t = \frac{I}{(1 + 0.8 f_c)} \quad (24)$$

در شکل (۵) اثر سرعت بارگذاری و مقایسه بین روابط ارائه شده مشخص می‌باشد.



شکل ۵: اثر سرعت بارگذاری در مقاومت کششی و فشاری بتن.

### سخت‌شدگی کششی

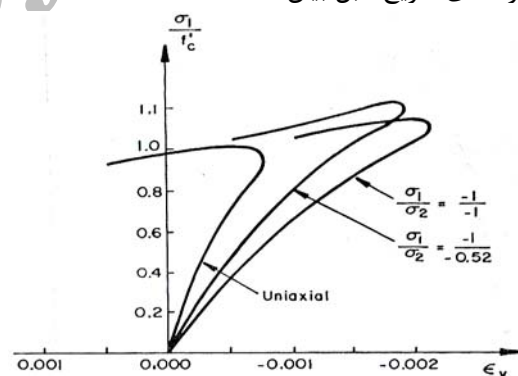
رفتار بتن تحت تنش‌های کششی، تا رسیدن به حد شکست که با یک معیار تنش کششی حداکثر تعریف می‌شود به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود ترک‌ها فقط در صفحات عمود بر صفحه

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 می‌شود که از دیدگاه عددی به هیچ وجه مطلوب نیست. ثانیاً، 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 جریان متحد و شرط تعامد بردار میزان تغییر شکل پلاستیک بر سطح تسلیم در نظر گرفته می‌شود:

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma_{ij}} \quad (16)$$

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 می‌شود. در فشار، از رابطه انجمن بتن اروپا (CEB) استفاده شده است [۱۳]. محدوده عملکرد این رابطه از رشد کرنش  $30 \times 10^{-6} s^{-1}$  تا  $300 s^{-1}$  است.

$$\dot{f}_c = f_c \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1.026 \delta_c}, \text{ for } \dot{\epsilon} \leq 30s^{-1} \quad (17)$$

$$\dot{f}_c = f_c \gamma_c \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{\frac{1}{3}}, \text{ for } \dot{\epsilon} > 30s^{-1} \quad (18)$$

$$G_{12}^c = 0.25G \left(1 - \frac{\varepsilon_1}{0.004}\right) \quad (26)$$

$$G_{12}^c = 0.0 \quad \text{if } \varepsilon_1 > 0.004 \quad (27)$$

$$G_{13}^c = G_{12}^c \quad (28)$$

$$G_{23}^c = \frac{5}{6}G \quad (29)$$

برای بتن ترک خورده در هر دو امتداد ۱ و ۲:

$$G_{13}^c = 0.25G \left(1 - \frac{\varepsilon_1}{0.004}\right) \quad (30)$$

$$G_{13}^c = 0.0 \quad \text{if } \varepsilon_1 > 0.004 \quad (31)$$

$$G_{23}^c = 0.25G \left(1 - \frac{\varepsilon_2}{0.004}\right) \quad (32)$$

$$G_{23}^c = 0.0 \quad \text{if } \varepsilon_2 > 0.004 \quad (33)$$

$$G_{12}^c = 0.5 \text{Min}(G_{13}^c, G_{23}^c) \quad (34)$$

در این روابط  $G$  مدول برشی بتن ترک نخورده؛  $G^c$  مدول برشی بتن ترک خورده و  $\varepsilon$  کرنش کششی می‌باشد.

### رفتار فولاد

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

### تحلیل پوشش محافظ راکتور هسته‌ای

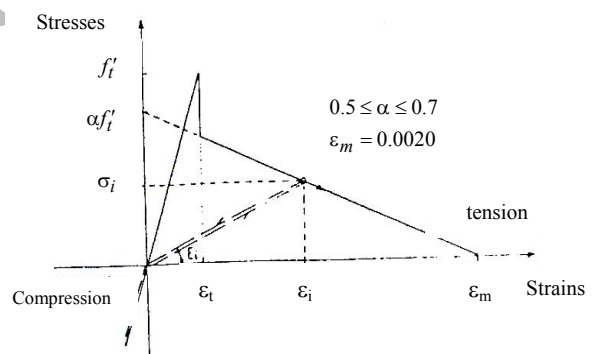
با استفاده از مطالب فوق‌الذکر و استفاده از نسخه اصلاح شده برنامه تحلیل دینامیکی غیرخطی پوسته‌های بتن مسلح (NDARCS) [۵ و ۴]، تحلیل برخورد هواپیمای Phantom F4 روی پوشش محافظ ساختمان راکتور

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 می‌نماید.

برای مدل‌سازی پدیده فوق از یک روش راهسازی تدریجی مولفه قائم تنش بتن در صفحه ترک خوردگی استفاده می‌شود، 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 می‌شود [۱۱].

$$E_i = \alpha \cdot f'_i \frac{(1 - \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_m})}{\varepsilon_i} ; \varepsilon_m < \varepsilon_i < \varepsilon_t \quad (25)$$

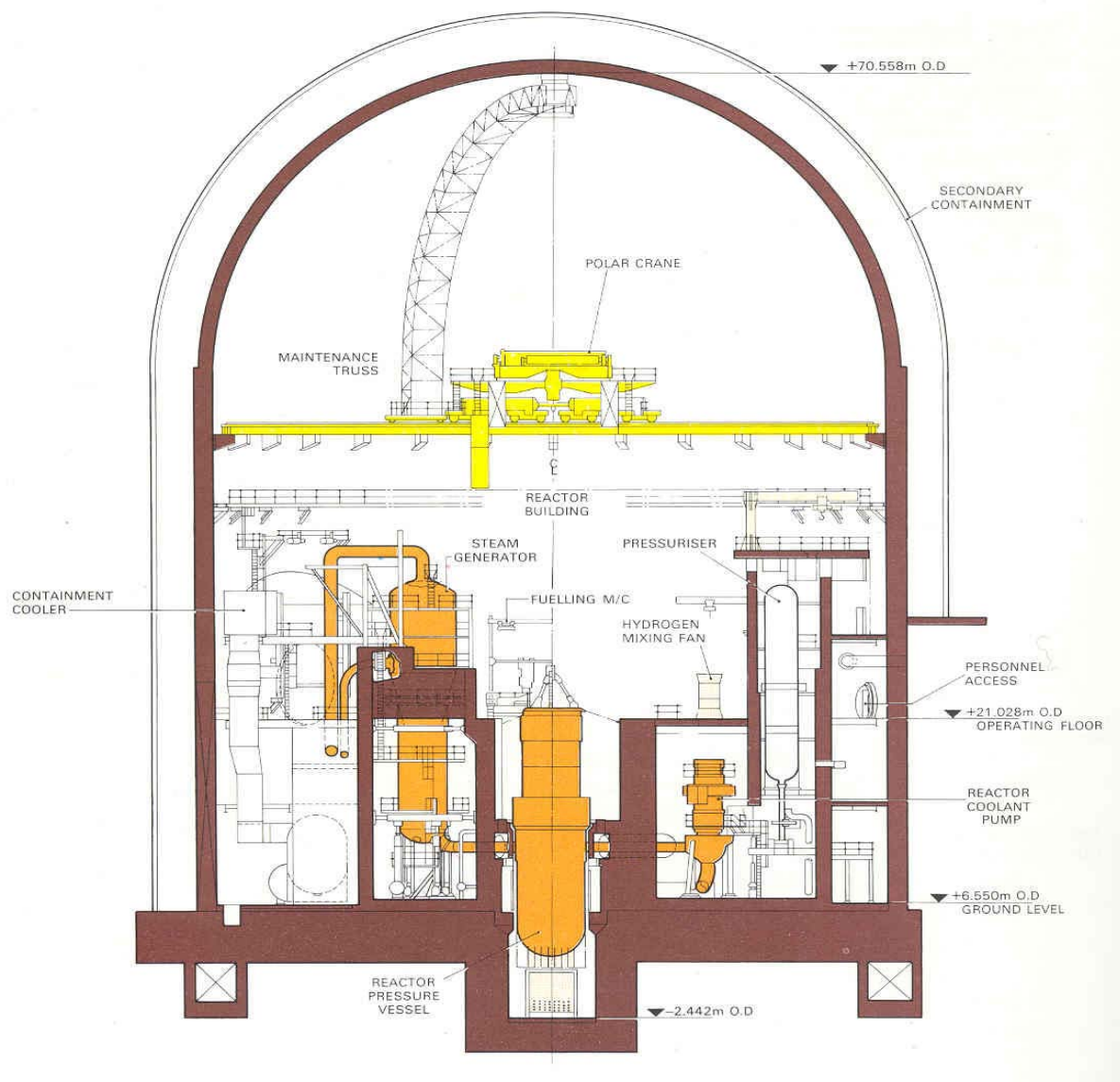
که  $\alpha$  و  $\varepsilon_t$  پارامترهای سخت‌شدگی کششی،  $\varepsilon_i$  حداکثر سابقه کرنش کششی و  $\varepsilon_m$  کرنش متناظر تنش کششی حداکثر می‌باشد. اگر ترک بسته شود یا به عبارت دیگر، مولفه قائم کرنش بر صفحه ترک منفی شود، بتن در همان امتداد رفتار ترک نخورده را به دست می‌آورد.



شکل ۶: رفتار بتن ترک‌خورده و مدل سخت‌شدگی کششی.

### پدیده انتقال برش

نتایج تجربی نشان می‌دهند که مقدار قابل ملاحظه‌ای از تنش برشی می‌تواند از طریق سطوح زبر ترک‌خورده منتقل شود. یک روش ساده برای احتساب اثرات قفل‌شدگی دانه‌ها در یک مدل ترک‌خوردگی گسترده، استفاده از یک مقدار مناسب برای مدول برشی ترک‌خورده است. برای این منظور از روابط تجربی [۱۱] استفاده شده است. برای بتن ترک‌خورده در امتداد ۱:



شکل ۷: برش از ساختمان راکتور نیروگاه Sizewell.

عوامل متعددی می‌باشد. 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 می‌باشد.

#### مشخصات هندسی پوشش‌های محافظ

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

Sizewell انگلستان که به صورت پیش‌تنیده ساخته شده و یک ساختمان راکتور طراحی شده توسط آلمان صورت گرفت. حداکثر نیروی وارده از هواپیما در صورت تعامد زاویه برخورد حاصل می‌شود. بیشترین اثر هم در محل تلاقی گنبد با دیواره استوانه‌ای می‌باشد که با در نظر گرفتن تعامد زاویه برخورد باعث می‌شود کل نیرو به صورت افقی به پوشش وارد شود [۱۵]. برشی از ساختمان راکتور نیروگاه Sizewell در شکل (۷) ملاحظه می‌شود.

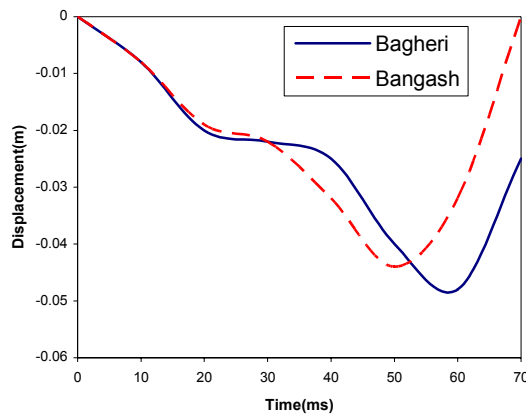
#### بررسی پارامترهای مصالح

بتن ماده‌ای با رفتار کاملاً پیچیده و وابسته به عوامل

جدول ۱: مشخصات فیزیکی بتن و محدوده تغییرات آنها.

مقدار پیش فرض	محدوده تغییرات	پارامتر
-----	15-50 GPa	E
0.2	0.15-0.22	v
-----	20-50 MPa	$f_c$
-----	2-5 MPa	$f_t$
$0.3 f_c$	$0.1-0.3 f_c$	$\xi_c$
0.9	0.9-1.5	B
0.7	0.5-0.7	N
0.6	0.5-0.7	$\alpha$
0.002	0.001-0.002	$\epsilon_t$
0.01	0.003-0.01	$\epsilon_c$

نشان داده شده است.



جدول ۲: پارامترهای معیارهای گسیختگی.

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

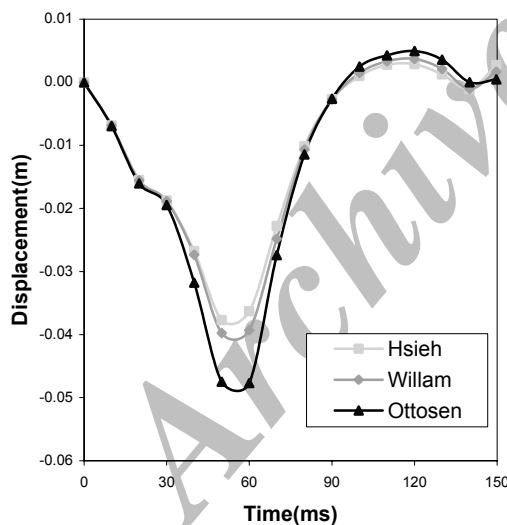
شکل ۸: مقایسه تغییر مکان افقی در اثر برخورد هواپیما به پوشش نیروگاه Sizewell.

### 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.

جدول ۳: مشخصات هندسی و مصالح پوشش نیروگاه‌ها.

مشخصات	SIZEWELL	نیروگاه طراحی آلمان
قطر خارجی	48.32m	62.8m
ارتفاع	66.97m	60.07m
ضخامت دیوار	1.3m	2.0m
ضخامت گنبد	1.0m	1.75m
$E_c$	38 GPa	30 GPa
$f_c$	35 MPa	21 MPa
$f_t$	7.2 MPa	1.5 Mpa



شکل ۹: مقایسه تغییر مکان افقی در اثر برخورد هواپیما به پوشش نیروگاه طراحی آلمان تحت معیارهای مختلف گسیختگی استاتیک.

### 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 می‌گردد. هر سه معیار با افزودن

### نتیجه گیری

#### مقایسه المان انتخابی

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 تبدیل یافته علاوه بر آنکه از لحاظ صرفه جویی در هزینه و زمان برتری دارد، دارای پاسخ‌های با دقت مناسبی نیز می‌باشد. در شکل (۸) مقایسه عکس العمل اثر برخورد روی تغییر مکان پوشش نیروگاه Sizewell



نرم شدگی پوشش معرفی می‌کند، اما IAEA معیاری بر اساس کرنش حداکثر آرماتور ارائه می‌کند [۳]. [۱۸] معیاری براساس حداکثر عرض ترک به منظور جلوگیری از نشت مواد رادیواکتیو پیشنهاد می‌کند که البته برای پوشش‌های دارای لایه محافظ فولادی 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 می‌دهند.

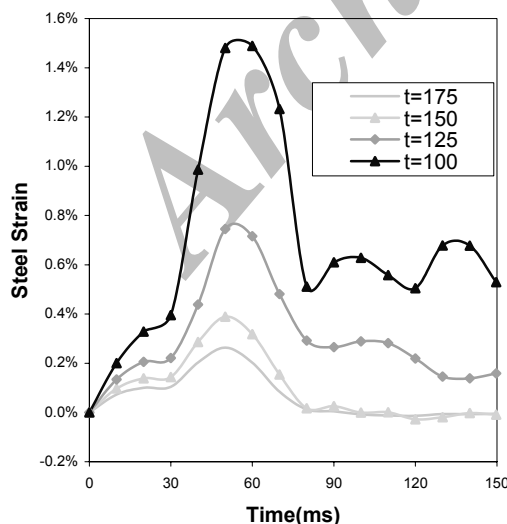
#### الف- کرنش حداکثر در آرماتور

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

#### ب- نرم شدگی پوشش

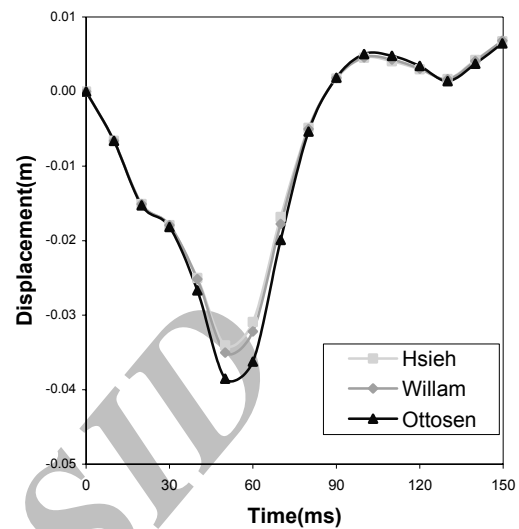
مفهوم نرم شدگی با نسبت تغییر مکان پوشش در حالت رفتار خمیری به تغییر مکان پوشش با فرض رفتار خطی برای بتن تعریف می‌شود. توصیه شده است این نسبت از ۳۰ فراتر نرود [۱۷].

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

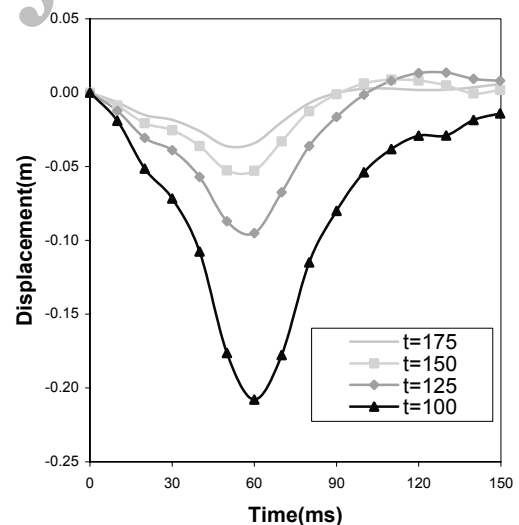


شکل ۱۲: اثر کاهش ضخامت روی کرنش آرماتورهای پوشش نیروگاه طراحی آلمان تحت معیار گسیختگی دینامیک ویلام-وارنک.

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 گسیختگی دینامیک.



شکل ۱۱: اثر کاهش ضخامت روی تغییر مکان افقی پوشش نیروگاه طراحی آلمان تحت معیار گسیختگی دینامیک ویلام-وارنک.

#### اثر کاهش ضخامت پوسته

آیین‌نامه‌های محدودی، معیارهای طراحی برای این نوع بارگذاری پیشنهاد می‌کنند. این معیارهای محدود در انتخاب ملاک‌ها نیز بسیار متفاوت عمل کرده‌اند. بعنوان مثال وزارت انرژی آمریکا (DOE) [۱۷]، معیاری براساس

## 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 می‌باشد:

$$g(X) = \frac{2.5w_c}{k\hat{\beta}\sqrt{\frac{8s_1s_2d_c}{\pi d_b}}} - f_s \quad (۳۵)$$

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

خنثی با وجه کششی به فاصله تار خنثی تا محور آرماتورها؛  $s_1$  و  $s_2$  فاصله بین آرماتورها؛  $d_c$  پوشش بتن؛  $d_b$  قطر آرماتورها و  $f_s$  تنش در آرماتورها می‌باشد. عرض ترک بحرانی به خوبی قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. براساس مطالعات محدود صورت گرفته در این زمینه [۱۹] عرض ترک  $0.45\text{mm}$  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 می‌باشد. منتهی به علت وجود پوشش فولادی داخلی این معیار در این مثال تعیین کننده نمی‌باشد.

## مراجع

- 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 پوسته‌های بتن مسلح." پایان‌نامه 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 hardening-softening 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.

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

Archive of SID