



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

بررسی رفتار دینامیکی قلب راکتور تحقیقاتی تهران در هنگام وقوع زلزله

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور
محمد رضا خادمی*، محمد جواد البرزی، امین داوری، افشین هدایت

چکیده:

اطمینان از ایمنی راکتورهای هسته‌ای تحت شرایط زلزله یکی از اساسی‌ترین نگرانی‌های موجود در ارتباط با عملکرد آن‌ها می‌باشد. لذا تحلیل‌های انجام شده باید در قطعات و اجزای مختلف راکتور و تحت شرایط طراحی زلزله صورت پذیرد. از میان روش‌های مختلف، بکارگیری روش اجزاء محدود معمول‌ترین روش به منظور تحلیل این پدیده پیچیده می‌باشد. هدف از انجام این پروژه، مطالعه و بررسی ساختار قلب راکتور تحقیقاتی تهران در اثر بارهای ناشی از زلزله و ارائه یک مدل به کمک روش اجزاء محدود سه‌بعدی می‌باشد. همچنین رفتار شکست در المان‌های سوخت موجود در قلب راکتور در شرایط بارگذاری زلزله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

کلید واژه: راکتور تحقیقاتی تهران، روش اجزاء محدود، قلب راکتور، شبیه‌سازی زلزله

۱- مقدمه

در راکتورهای هسته‌ای، شناسایی سازه‌ها و اجزایی که تحت بارگذاری زلزله دچار آسیب می‌شوند، ضروری است. روند انجام کار به طور معمول یا با استفاده از تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌ها صورت می‌پذیرد یا به کمک انجام آزمایش مشابه با واقعیت و مقایسه با آزمایشات قبلی انجام می‌شود.

مدل‌های ریاضی بسیاری به منظور پیش‌بینی رفتار دینامیکی یک ساختار صورت پذیرفته است. در بین آن‌ها دو مدل همگن ارائه شده توسط Schumann [۱] و Brochard [۲] به طور گسترده استفاده می‌شوند. با این وجود، همانطور که Zhang [۳] بیان کرده است، هر دو مدل به صورت دوطبقه‌ای می‌باشند. Zhang [۴-۵] یک مدل سه-بعدی همگن را پیشنهاد نموده است. Kayvani و همکارانش [۶] با استفاده از روش اجزاء محدود سه‌بعدی و بکارگیری مدل طیفی، ساختمان سایت یک راکتور تحقیقاتی ۲۰ مگاواتی را در استرالیا مورد بررسی قرار داده‌اند. شرکت معتبر INVAP [۷] در مطالعه‌ای محفظه کندکننده راکتور تحقیقاتی OPAL را در هنگام وقوع زلزله تحلیل نموده است. Forasassi و Frano [۸] با استفاده از همین روش، تحلیل تنشی یک راکتوراز نوع مقیاس کوچک را

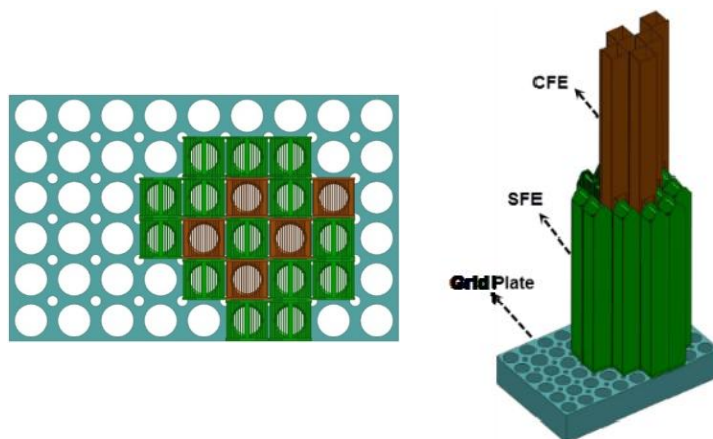
^۱Finite Element Method (FEM)



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

در اثر بارهای زلزله انجام داده‌اند. از میان رویکردهای صحیح موجود، رویکرد استفاده از روش اجزاء محدود در عمل بیشترین کاربرد را دارد. استفاده از این روش بستگی به اجزای ساختار و مدل اجزاء محدود آن دارد. یکی از رویکردهای شبیه‌سازی حرکت زمین استفاده از مقداری مشابه با واقعیت و در نظر گرفتن مقیاسی از آن است تا بتوان به اتفاق مورد نظر دست یافت. معمول‌ترین روش بکارگرفته شده، مقیاسی نسبت به بالاترین شتاب زمین^۲ می‌باشد؛ اگرچه این روش تنها روش موجود نمی‌باشد [۹].



شکل ۱. مدل‌سازی قلب راکتور تحقیقاتی تهران

در شرایط وقوع حادثه‌ای مانند زلزله در راکتور تحقیقاتی تهران، پیش‌بینی نحوه تغییر شکل اجزاء و ساختار تشکیل دهنده قلب نقش بسیار مهمی در جلوگیری یا به حداقل رساندن آسیب‌های ناشی از آن دارد. همچنین استفاده از روش اجزاء محدود به عنوان ابزاری در تحلیل تنش‌های چندین سیستم‌هایی در صنعت هسته‌ای پیشرفت روزافزون داشته است که در این پروژه محاسبات مربوط به توزیع تنش و کرنش در قلب راکتور با استفاده از این ابزار محاسباتی انجام می‌شود. در ابتدا مدل سه‌بعدی که شامل قلب و استخر راکتور است با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks مدل‌سازی (شکل ۱) و سپس شرایط بارگذاری زلزله در قلب و استخر راکتور تهران به کمک نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS بررسی خواهد شد. تحلیل صورت گرفته در این شبیه‌سازی اساساً به سه قسمت تقسیم می‌شود: (۱) تحلیل استاتیکی ساختار قلب راکتور در اثر فشارهای هیدروستاتیکی ناشی از آب استخر، (۲) بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی و شکل مدهای قلب راکتور تهران، (۳) تحلیل دینامیکی ساختار قلب راکتور تهران در اثر بارهای ناشی از زلزله.

۲- توصیف مسئله

^۲ Peak ground acceleration (PGA)



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

تئوری‌های بسیاری در زمینه دینامیک سازه‌ها و مهندسی زلزله وجود دارد. در اینجا از تئوری پاسخ طیفی^۳ در شبیه‌سازی زلزله بهره گرفته می‌شود. این تئوری در اکثر پژوهش‌های صورت گرفته مورد استفاده قرار می‌گیرد. پاسخ طیفی، نموداری از پاسخ زلزله یعنی شتاب، سرعت یا جابجایی نسبت به میزان فرکانس زلزله می‌باشد. در مهندسی زلزله برخلاف آنچه در دینامیک معمول است، پریود یا دوره زمانی ($T=1/f$) معمولاً به جای فرکانس بکار می‌رود. به منظور استفاده از این تئوری ماکزیمم شتاب زمین مورد نیاز می‌باشد تا مقدار طیف بدست آید. ماکزیمم شتاب زمین را می‌توان از روابط کاهش انرژی موج بدست آورد. معادلات و روابط تئوری مذکور را می‌توان در مرجع [۱۰] یافت.

۳- شبیه‌سازی حادثه زلزله

در قسمت‌هایی از صفحه مشبک، فشار هیدروستاتیکی معادل با فشار ستونی از ۸/۵ متر آب بر سطح آن وارد می‌شود.

$$P_h = \rho gh = 1000 \times 9.806 \times 8.5 = 85000 \text{ Pa} \downarrow \quad (1)$$

که در آن P_h معادل با فشار هیدروستاتیکی ۸/۵ متر آب می‌باشد. این فشار باید به سطوح بالایی صفحه مشبک^۴ وارد شود. همچنین در سطوح بالایی المان‌های سوخت نیز فشار هیدروستاتیکی وارد می‌شود. در این تحقیق نحوه حرکت زمین و شبیه‌سازی آن برای مجموعه قلب راکتور تهران به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. * ماکزیمم شتاب افقی زمین: ۰/۳۷ g * ماکزیمم شتاب عمودی زمین: ۰/۲۵ g. شکل نمودار پاسخ طیفی شتاب مورد نظر توسط موسسه IGNS (موسسه زمین شناسی و علوم هسته‌ای، ۲۰۰۱) و US NRC 1.60 بدست آمده است که مطابق با استانداردهای موجود در آژانس بین المللی اتمی می‌باشد [۱۱]. با استفاده از این روش، ماکزیمم هر طیف در نظر گرفته می‌شود تا شتاب طراحی در همه دوره‌های زمانی ماکزیمم شود.

جدول ۱. پاسخ طیفی شتاب که توسط US NRC 1.60 پیشنهاد شده است [۱۱].

۰/۳۸	۱/۲۴	۲/۵۴	۲/۳۲	۲/۱۱	۱/۰۰	ماکزیمم شتاب زمین (PGA)	ضریب دامنه دینامیکی
۰/۱۴	۰/۴۶	۰/۹۴	۰/۸۶	۰/۷۸	۰/۳۷	۰/۳۷	شتاب (m/s^2)
۳/۸۵	۱/۰۰	۰/۴۰	۰/۲۰	۰/۱۱	۰/۰۳	۰/۰۰	دوره تناوب (S)

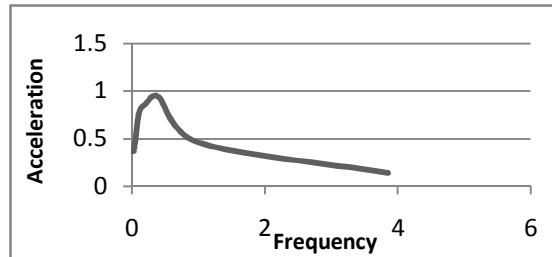
^۳ Response spectrum

^۴ Grid plate



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۲. شتاب بر حسب فرکانس با استفاده از داده های US

[۱۱] NRC 1.60

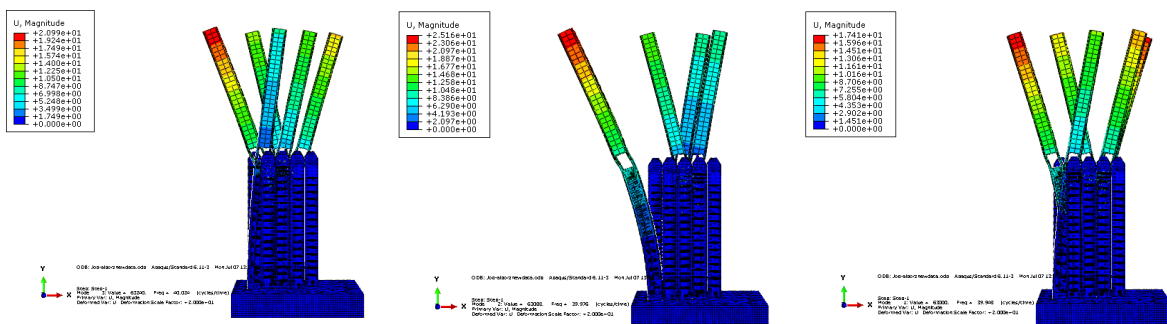
شکل ۲ شتاب بر حسب فرکانس را در این زلزله نشان می دهد. این داده ها به عنوان فایل ورودی به نرم افزار آباکوس اعمال می شود.

سه مود اول طبیعی مجموعه قلب راکتور تهران و شکل آن ها با استفاده از تحلیل ارتعاشاتی بدست می آید. فرکانس های بدست آمده در جدول ۲ مشخص شده است.

مود اول قلب راکتور تهران حول محوری موازی با محور Y در جهت شرق- غرب به چرخش در می آید و المان های سوخت در جهت شمال- جنوب نوسان می کنند. (شکل ۳). مود دوم در جهت شمال- جنوب دچار خمش می شود. هر دو مود سوم و چهارم به ترتیب در جهت خلاف عقربه های ساعت و در جهت عقربه های ساعت دچار پیچش می شوند.

جدول ۲. فرکانس های طبیعی و پریود زمانی قلب راکتور

مود					
سوم		دوم		اول	
دوره تناوب	فرکانس	دوره تناوب	فرکانس	دوره تناوب	فرکانس
۰/۰۲۵۰۳	۳۹/۹۴۸	۰/۰۲۴۹۸	۴۰/۰۲۴	۰/۰۲۵۰۱	۳۹/۹۴۸



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

(الف)

(ب)

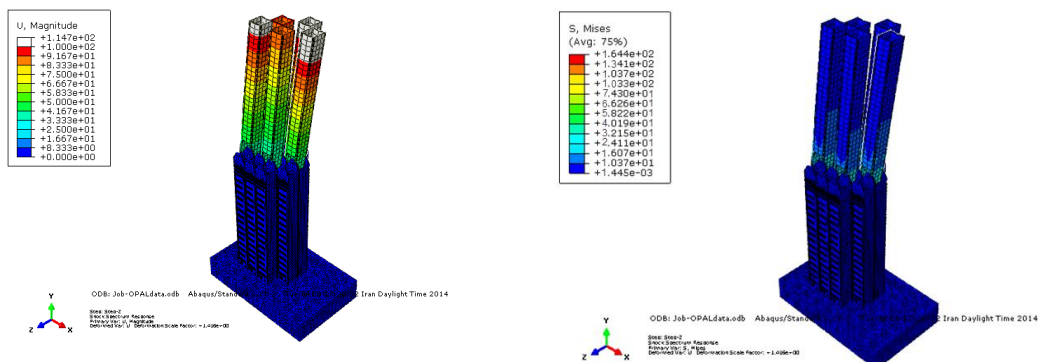
(ج)

شکل ۳. شکل مودهای قلب راکتور تهران (الف) مود اول (ب) مود دوم (ج) مود سوم - جابجایی‌ها بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

فشار ناشی از آب استخر به مجموعه قلب راکتور به عنوان یک پیش‌تنش، در تحلیل بارگذاری زلزله در نظر گرفته می‌شود. سپس با اعمال بار زلزله مطابق با جدول ۱، میزان تنش و جابجایی ایجاد شده در اثر بارگذاری زلزله به صورت زیر حاصل می‌شود.

ماکزیمم مقدار تنش 163MPa می‌باشد که از حد تسلیم آلومینیوم (110MPa) بالاتر می‌باشد (شکل ۴-الف)؛ ولی همانطور که مشخص است مجتمع‌های سوخت در ناحیه ایمن قرار گرفته و میله‌های کنترل (حدود ۲۵٪ از ساختار قلب) دچار آسیب می‌شوند که نقاط خطرناک در میله‌های کنترلی در شکل نشان داده شده است.

با در نظر گرفتن اثر سیال داخل استخر و سایر سازه‌های داخل استخر این مقدار بیشینه تنش می‌تواند کاهش یابد.



(ب)

(الف)

شکل ۴. الف) تنش فون مایز (بر حسب MPa) (ب) مقدار جابجایی بدست آمده از بارگذاری زلزله (بر حسب mm)

نتایج نشان می‌دهد که میزان تنش و جابجایی در جهت Y (جهت عمودی) از جهات و صفحات دیگر بالاتر می‌باشد. بنابراین ساختارهای موجود در قلب تهران ابتدا در صفحه Y-Z یا در جهات عرضی دچار شکست و آسیب خواهند شد. ماکزیمم شتاب زلزله در ثانیه ۰/۰۳ برابر ۳/۷ متر بر مجذور ثانیه ثبت می‌شود. ماکزیمم شتاب بالاتر در طی زمان کوتاه‌تر، اثرات تخریب زلزله را افزایش می‌دهد. در اینجا تنش‌های بالاتر ناشی از این بارگذاری



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

زلزله مؤید این مطلب است. لازم به ذکر است مجموعه قلب راکتور تهران یکبار توسط شرکت INVAP به وسیله نرم افزار SAP، تحلیل شده است که مقادیر بیشینه تنش در مجتمع های سوخت حدود 4 MPa و در میله های کنترلی حدود 41 MPa بدست آمده است که این مقدار اختلاف در نتایج می تواند به دلیل تفاوت در نوع بارگذاری زلزله باشد. همانطور که قبلاً ذکر شد در این مقاله نوع بارگذاری زلزله مطابق با استانداردهای جدید آژانس در نظر گرفته شده است.

۴- بحث و نتیجه گیری

هر چند تحقیقات معدودی در ارتباط با بررسی قلب راکتور تهران در هنگام وقوع زلزله در سال های بسیار دور انجام شده است، اما تحلیلی جدید و صریح در ارتباط با طراحی ساختار قلب راکتور تحت بارگذاری های ناشی از زلزله وجود ندارد. تحلیل سه بعدی زلزله بسیار دقیق تر از حالتی است که حرکت لایه های زمین تنها به صورت مستقیم الخط مدل شود. در این تحقیق رفتار قلب راکتور تهران با استفاده از روش اجزاء محدود سه بعدی مورد بررسی قرار گرفت. مدل سازی ساختار قلب بر اساس ابعاد واقعی صورت پذیرفت و در آن همه المان های سوختی موجود در نظر گرفته شد. فرکانس های اصلی به کمک آنالیز ارتعاشی به دست می آید؛ زیرا نتایج حاصل از آن به عنوان بخشی از روند حل پاسخ طیفی زلزله می باشد. داده های پیشنهادی توسط US NRC 1.60 در شبیه سازی ها مد نظر قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل پاسخ طیفی زلزله شامل میزان جابجایی ها، تنش های محوری، تنش های کششی و برشی می باشد. پاسخ زلزله در جهت عمود بر زمین مستقل از پاسخ آن در دو جهت افقی دیگر گزارش شد. در جهت عمودی میزان تنش ها و جابجایی های بالاتری حاصل می شود.

شبیه سازی پدیده زلزله یکی از پیچیده ترین مسائلی است که الزامات فراوانی دارد. در تحقیق انجام شده اطلاعات بسیار مفیدی استخراج گردید؛ اما به منظور دستیابی به نتایجی دقیق تر لازم است به طور خاص نوع خاک و زمینی که راکتور تهران بر روی آن بنا شده است، مورد مطالعه قرار گیرد تا اثرات آن نیز بر روی شبیه سازی اعمال شود. نتایج به دست آمده از میزان تنش حاصل از بارگذاری زلزله، طراحی و ساخت یک پلت فرم جاذب انرژی در راکتور تحقیقاتی تهران را روشن می نماید؛ چرا که جاذب های انرژی مناسب می توانند امواج ناشی از زلزله را به زمین بازتاب و در نتیجه خسارات ناشی از زلزله را تا حد خوبی کاهش دهند.

۵- مراجع

1. Schumann U. "Homogenized equation of motion for rod bundles in the fluid with periodic structure", *Ingenieur-Archiv*, 50, 203-216, 1981.
2. Brochard D, Hammami L. "An homogenization method applied to the seismic analysis of LMFBR cores", *SMiRT 11 Transactions Vol. E*; 497-503, 1991.



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

3. Zhang RJ. "A unified 3-D homogenization model of beam bundle in fluid", Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology; 120, 56-61, 1998.
4. Zhang RJ. "Structural homogenized analysis for nuclear reactor core", Nuclear Engineering and Design; 183, 151-156, 1998.
5. Zhang RJ. "A beam bundle in a compressible inviscid fluid", Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics; to appear, 1999.
6. K. Kayvani, B. Schmidt & J. Steele, "Seismic Engineering for Replacement Research Reactor in Australia", Pacific conference on earthquake engineering, 2003.
7. Sungjoong (Shane) KIM, "Cold Neutron Beam Facilities at OPAL Research Reactor – Design challenges", 5th Australasian Congress on Applied Mechanics (ACAM), Brisbane, Australia, 10-12 December 2007.
8. G. Forasassi, R. Lo Frano, "Analysis of the external events effects in relation to the stress tests requirement", University Of PISA, Department of Mechanical Nuclear and Production Engineering ,November 2011.
9. Shome, N., Cornell, C. A., Bazzurro, P., and Carballo, J. E. "Earthquakes, records, and nonlinear responses." Earthquake Spectra, 14, 469-500, 1998.
10. J. H. Mattsson, "Earthquake analysis of pipe supports in nuclear power plants", Master's dissertation, Division of Structural Mechanics, LTH, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden, 2012.
11. Opal SAR chapter 2, "Safety Objectives and Engineering Design Requirements", Prepared by INVAP for Australian Nuclear Science and Technology Organization.