

تحلیل ایمنی بحرانی شدن مجتمع‌های سوخت راکتور قدرت ۱۰۰۰-VVER در حادثه آب

گرفتگی انبار نگهداری سوخت تازه

میثم شهبابی زاده*، کیوان تفضلی

سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت تولید و توسعه

چکیده

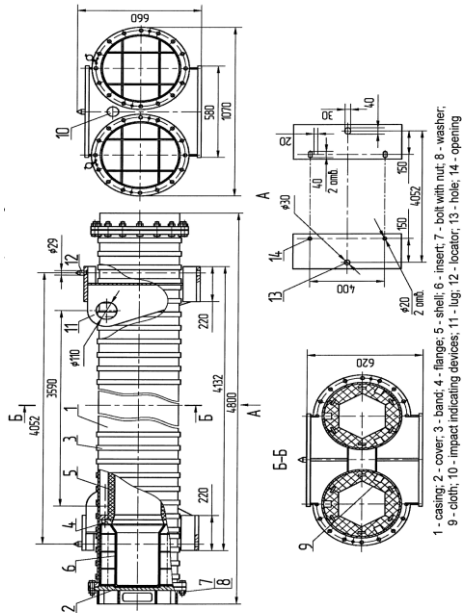
هدف از انجام این تحقیق، بررسی ایمنی بحرانی شدن^۱ محفظه‌های حمل سوخت حاوی مجتمع‌های سوخت تازه نیروگاه هسته‌ای از نوع VVER-۱۰۰۰ که در یک انبار ویژه با چیدمان مشخص نگهداری می‌شوند می‌باشد. محاسبات بحرانی شدن با استفاده از کد مونت کارلو MCNPX-۲٫۶ نشان می‌دهد که در بدترین حالت (حادثه ماورای طرح) هنگامی که، آب با چگالی 1 g/cm^3 تمامی محفظه‌ها را در برگرفته و به درون آنها نفوذ کند، سپس از پیرامون محفظه‌ها تخلیه شود، میزان ضریب تکثیر کمتر از یک و برابر 0.98117 می‌باشد. در حالت نگهداری استاندارد محفظه‌ها و بروز حادثه مبنای طرح، میزان ضریب تکثیر کمتر از مقدار فوق بوده و در محدوده‌ی مجاز می‌باشد.

کلید واژه: VVER-۱۰۰۰، بحرانی شدن، MCNPX-۲٫۶، محفظه حمل سوخت تازه، مجتمع سوخت

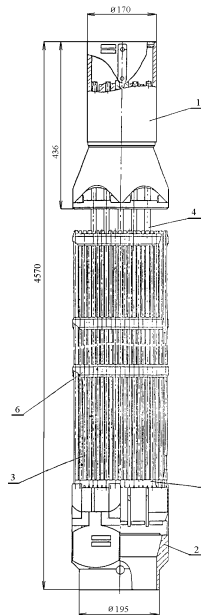
۱- مقدمه

به منظور صدور پروانه بهره‌برداری انبار نگهداری مجتمع‌های سوخت تازه در یک نیروگاه هسته‌ای، لازم است تحلیل‌های ایمنی مختلفی از جمله مقاومت در برابر زلزله، آتش‌سوزی، سقوط هواپیما، موج ضربه‌ای و ... برای این انبار صورت پذیرد. یکی از موارد تحلیل ایمنی دارای اهمیت، بررسی بحرانی شدن مجتمع‌های سوخت در حوادث مختلف مانند وقوع سیل و آب گرفتگی می‌باشد. جهت حمل و نقل و نگهداری مجتمع‌های سوخت در انبار، از محفظه‌های ویژه‌ای با نام TK-C^o-B استفاده می‌شود [۱]. هر کدام از این محفظه‌ها ظرفیت نگهداری دو مجتمع سوخت تازه را دارا می‌باشند (شکل ۱). در این مقاله تحلیل ایمنی بحرانی شدن انبار سوخت حاوی ۴۸ محفظه حمل و نقل سوخت تازه در حالت نگهداری استاندارد و در هنگام وقوع سیل و آب گرفتگی مورد مطالعه قرار گرفته است. این تعداد محفظه به سه قسمت تقسیم شده و هر کدام از قسمت‌ها در بلوک‌های جداگانه با فاصله از یکدیگر نگهداری می‌شوند. در هر بلوک تعداد ۱۶ محفظه در ۴ ردیف و ۴ ستون نگهداری می‌شوند. مجتمع‌های سوخت مورد استفاده در نیروگاه هسته‌ای از نوع VVER-۱۰۰۰ شش ضلعی بوده (شکل ۲) و متوسط غنای اورانیوم ۲۳۵ این مجتمع‌های سوخت از $1/6\%$ تا $4/02\%$ متغیر می‌باشد [۲]. حداکثر غنای اورانیوم ۲۳۵ مجاز مجتمع‌های سوخت برای حمل و نگهداری در این محفظه‌ها $4/45\%$ می‌باشد [۳].

^۱ Criticality Safety



شکل (۱) نمایی از محفظه حمل و نقل سوخت تازه راکتور VVER-۱۰۰۰ (TK-C^o-B)



شکل (۲) مجتمع سوخت راکتور VVER-۱۰۰۰

۱- کلاهک بالایی ۲- دم پایینی ۳- میله سوخت ۴- کانال هدایت کننده ۵- شبکه پایینی ۶- شبکه نگهدارنده

۲- روش محاسبات



در این تحقیق با استفاده از کد MCNPX-۲,۶ شبیه سازی هندسی تمام انبار فوق به همراه محفظه‌های حمل و نگهداری و مجتمع‌های سوخت تازه داخل آنها انجام گرفته (شکل ۳) و سپس با استفاده از کارت‌های اطلاعات مشخصات هر یک از این اجزاء مانند مواد تشکیل دهنده آنها، تالی‌های مورد درخواست و سایر موارد در ورودی کد داده شده‌اند. به منظور داشتن حاشیه‌ی ایمنی بالا در انجام محاسبات شرایط محافظه‌کارانه‌ی زیر در شبیه‌سازی مساله لحاظ شده است:

- غنای اورانیوم ۲۳۵ تمام میله‌های سوخت مساوی $4.4/4.5\%$ (بیشینه مجاز نگهداری و حمل توسط محفظه‌های TK-C۵-B) باشد؛
- هیچ جاذب نوترونی در داخل محفظه‌ها وجود نداشته باشد؛
- دمای آب برابر با دمای محیط باشد. (20°C)

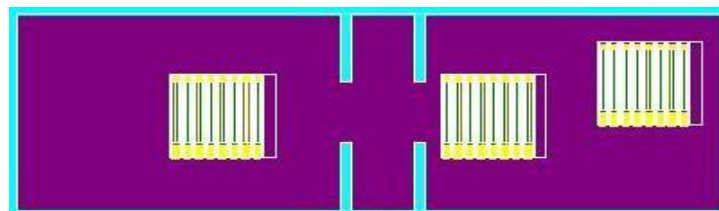
با توجه به اینکه در ارزیابی ایمنی، لازم است حوادث در سطوح مختلف بررسی شوند، محاسبات برای حالات زیر انجام شده است:

۱-۲. **حالت اول** (نگهداری استاندارد): چیدمان محفظه‌ها مطابق طرح بوده و انبار کاملاً خشک باشد.

۲-۲. **حالت دوم** (حادثه مبنای طرح): چیدمان محفظه‌ها مطابق شرایط استاندارد باشد، انبار از آب با چگالی 1 g/cm^3 پر شود و آب به داخل محفظه‌ها نفوذ نکند؛ سپس آب با گام‌هایی به اندازه ارتفاع یک محفظه حمل سوخت (۶۲ سانتیمتر) از بین محفظه‌ها تخلیه شود.

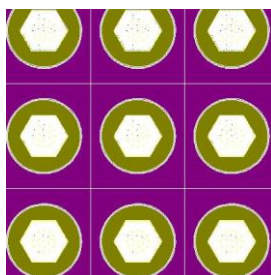
۳-۲. **حالت سوم** (حادثه ماورای طرح): چیدمان محفظه‌ها برهم خورده و همه محفظه‌ها در کنار یکدیگر در شبکه‌ای به ابعاد $62 \times 55\text{ cm}$ قرار گیرند، انبار از آب با چگالی 1 g/cm^3 پر شود، آب به داخل محفظه‌های حمل سوخت نفوذ کند و تمام فضاها را پر نماید؛ سپس سطح آب با گام‌هایی به اندازه ارتفاع یک محفظه حمل سوخت (۶۲ سانتیمتر) پایین آید. هنگام خروج آب از انبار و فضای بین محفظه‌ها دو فرض زیر برای انجام محاسبات در نظر گرفته شده است:

- ۱-۳-۲. آب از داخل محفظه‌ها همزمان با پایین آمدن آب بین آنها خارج شود؛
- ۲-۳-۲. آب داخل محفظه‌ها باقی مانده ولی آب بین آنها خارج شود.

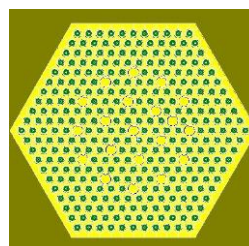


شکل (۳) نمایی از انبار و محل قرارگیری سه بلوک محفظه‌های حمل سوخت در حالت نگهداری استاندارد (برش افقی - خروجی کد MCNP)

شکل ۴ سطح مقطع شبیه سازی شده یک مجتمع سوخت و تعدادی از محفظه‌های حاوی مجتمع سوخت را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل (۴) (الف) سطح مقطع یک مجتمع سوخت، (ب) سطح مقطع تعدادی از محفظه‌های حاوی مجتمع سوخت (خروجی کد MCNP)

۳- نتایج محاسبات

۳-۱. در حالت نگهداری استاندارد محفظه‌های حمل سوخت تازه در انبار، مقدار ضریب تکثیر مؤثر با استفاده از کد MCNPX-۲.۶ برای مجتمع‌های سوخت با غنای ۴/۴۵٪ عدد 0.00098 ± 0.00005485 بدست آمده است. ۳-۲. نتایج محاسبه ضریب تکثیر مؤثر در حادثه مبنای طرح در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) ضریب تکثیر محفظه‌های حاوی مجتمع سوخت با غنای ۴/۴۵٪ بر حسب تغییر ارتفاع آب

۱۸۶		۱۲۴		۶۲		۰		ارتفاع آب
K _{eff}	Std.D	K _{eff}	Std.D	K _{eff}	Std.D	K _{eff}	Std.D ^۲	
۰,۳۹۴۰	۰,۰۰۰۰۹	۰,۴۹۳۲	۰,۰۰۰۱۰	۰,۵۳۹۰	۰,۰۰۰۱۰	۰,۵۷۰۰	۰,۰۰۰۱۱۸	نتایج
۵	۶	۰	۲	۲	۷	۱		

(* ارتفاع آب از کف پایین‌ترین محفظه‌های حمل سوخت (cm))

- هنگامی که ارتفاع آب از پایین محفظه‌های حمل سوخت ۱۸۶ سانتیمتر است بدین معنی است که آب از اطراف بالاترین ردیف محفظه‌های حمل سوخت خارج شده است.
- همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهند هنگامی که آب، از بین محفظه‌ها خارج می‌شود، به دلیل کاهش جذب حرارتی آب، ضریب تکثیر افزایش می‌یابد.

۳-۳. نتایج محاسبه ضریب تکثیر مؤثر برای حادثه ماورای طرح در حالت اول که آب بصورت همزمان از داخل محفظه‌ها و انبار خارج می‌شود، در جدول (۲) آورده شده است.

^۲ Standard Deviation

جدول (۲) ضریب تکثیر محفظه‌های حاوی مجتمع سوخت با غنای ۴/۴۵٪ بر حسب تغییر ارتفاع آب بیرون محفظه‌ها (آب از داخل و بیرون محفظه‌ها همزمان خارج می‌شود).

۴۳۴		۳۷۲		۳۱۰		۲۴۸		ارتفاع آب *
K _{eff}	Std.D	K _{eff}	Std.D	K _{eff}	Std.D	K _{eff}	Std.D	
۰,۸۶۸۶۲	۰,۰۰۰۰۳۲	۰,۸۶۸۵۱	۰,۰۰۰۰۲۵	۰,۸۶۸۶۶	۰,۰۰۰۰۲۶	۰,۸۶۸۸۰	۰,۰۰۰۰۲۶	نتایج

ادامه‌ی جدول (۲)

۱۸۶		۱۲۴		۶۲		۰		ارتفاع آب *
K _{eff}	Std.D	K _{eff}	Std.D	K _{eff}	Std.D	K _{eff}	Std.D	
۰,۸۶۹۰۶	۰,۰۰۰۰۲۵	۰,۸۶۹۰۲	۰,۰۰۰۰۲۶	۰,۸۶۸۱۳	۰,۰۰۰۰۲۶	۰,۶۲۱۴۲	۰,۰۰۰۰۲۳	نتایج

(* ارتفاع آب از کف پایین‌ترین محفظه‌های حمل سوخت (cm))

• در حالتی که ارتفاع آب داخل و بیرون محفظه با هم کاهش می‌یابد، کندکنندگی آب بین میله‌های سوخت کاهش می‌یابد که باعث کاهش ضریب تکثیر می‌شود.

۳-۴. نتایج محاسبه ضریب تکثیر موثر برای حادثه ماورای طرح در حالت دوم که آب در داخل محفظه‌ها باقی می‌ماند ولی آب اطراف آنها خارج می‌شود در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳) ضریب تکثیر محفظه‌های حاوی مجتمع سوخت با غنای ۴/۴۵٪ بر حسب تغییر ارتفاع آب بیرون محفظه‌ها (آب در داخل محفظه‌ها باقی می‌ماند و از اطراف آنها خارج می‌شود).

۴۳۴		۳۷۲		۳۱۰		۲۴۸		ارتفاع آب *
K _{eff}	Std.D	K _{eff}	Std.D	K _{eff}	Std.D	K _{eff}	Std.D	
۰,۸۶۸۵۸	۰,۰۰۰۰۲۹	۰,۸۷۰۳۷	۰,۰۰۰۰۳۶	۰,۹۳۷۹۳	۰,۰۰۰۰۹۰	۰,۹۶۴۵۶	۰,۰۰۰۰۳۶	نتایج

ادامه‌ی جدول (۳)

۱۸۶		۱۲۴		۶۲		۰		ارتفاع آب *
K _{eff}	Std.D	K _{eff}	Std.D	K _{eff}	Std.D	K _{eff}	Std.D	
۰,۹۷۳۱۳	۰,۰۰۰۰۳۰	۰,۹۷۶۰۶	۰,۰۰۰۰۲۹	۰,۹۷۹۷۷	۰,۰۰۰۰۲۹	۰,۹۸۱۱۷	۰,۰۰۰۰۲۸	نتایج

(* ارتفاع آب از کف پایین‌ترین محفظه‌های حمل سوخت (cm)

- در این حالت با کاهش ارتفاع آب از پیرامون محفظه‌های حمل سوخت و با توجه به اینکه آب در داخل آنها باقی می‌ماند میزان ضریب تکثیر افزایش می‌یابد. دلیل این امر کاهش جذب حرارتی نوترون‌ها در خارج محفظه‌ها است که در اثر کاهش ارتفاع آب حاصل می‌شود.

۴- نتیجه گیری

با توجه به چیدمان در نظر گرفته شده برای ۴۸ محفظه حمل و نقل سوخت تازه که حاوی ۹۶ مجتمع سوخت با غنای ۴/۴۵٪ می‌باشند، در حالت نگهداری استاندارد و حادثه مبنای طرح، خطر بحرانی شدن مجتمع‌ها به هیچ وجه وجود نداشته و استفاده از انبار نگهداری سوخت‌های تازه ایمن می‌باشد.

در حادثه ماورای طرح بیشترین مقدار ضریب تکثیر مؤثر هنگامی حاصل می‌شود که داخل تمامی محفظه‌های حاوی سوخت، پر از آب با چگالی 1 g/cm^3 بوده و آب اطراف آنها کاملاً تخلیه شده باشد. در این حالت مقدار ضریب تکثیر برای غنای ۴/۴۵٪، برابر ۰/۹۸۱۱۷ می‌باشد که زیر بحرانی بودن^۳ محفظه‌ها حفظ می‌شود.

۵- مراجع

- ۱- Package complete set, TK-C^o-B, KY ۰۴۰۱,۱۷,۰۰۰,۰۰۰ P۳
- ۲- Bushehr NPP final safety analysis report, chapter ۴
- ۳- Certificate-Permit for package design TK-C^o-B packaging for transportation of VVER-۱۰۰۰ FA, RUS/۳۰۱۴/IF-۹۶ (Rev.۵)

^۳ Subcriticality