

بررسی سیستم‌های تست نشتی سوخت‌های تازه تولید، به منظور تحلیل انتشار محصولات شکافت در شرایط عادی و حادثه

سرشار، نگین^(۱) - ستوده، محمد^(۲) - میروکیلی، سید محمد^(۲) - ره‌گشای، محمد^(۱)

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی هسته‌ای، تهران، ایران
سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور

چکیده

سوخت هسته‌ای تازه تولید، جهت استفاده در راکتور باید تمامی جنبه‌های تضمین کیفیت را پوشش داده باشد. با انجام تست‌های سوخت، می‌توان به هدف اصلی که رسیدن به استانداردهای جهانی و اطمینان از کیفیت سوخت و در نهایت ایمنی راکتور است، رسید. نویسندگان مقاله، برای اولین بار پروژه‌ای را در زمینه طراحی و ساخت سیستم تست نشتی سوخت تازه تولید در کشور آغاز نموده‌اند. در این مقاله با بررسی (اصول طراحی و معیارها، اجزای سیستم و فرآیندها) طرح‌های مختلف، مزایا و معایب آنها را شناسایی کرده و مورد سنجش قرار می‌دهیم. این طرح‌ها دارای قالب ساختاری یکسان می‌باشند، ولی نتایج نشان می‌دهد که اتمسفر القائی و چیدمان اجزاء سیستم، می‌تواند نتایج متفاوتی از انتشار و شناسایی رادیونوکلیدها را رقم زند.

کلمات کلیدی: تست نشتی سوخت هسته‌ای، انتشار محصولات شکافت، ذوب سوخت.

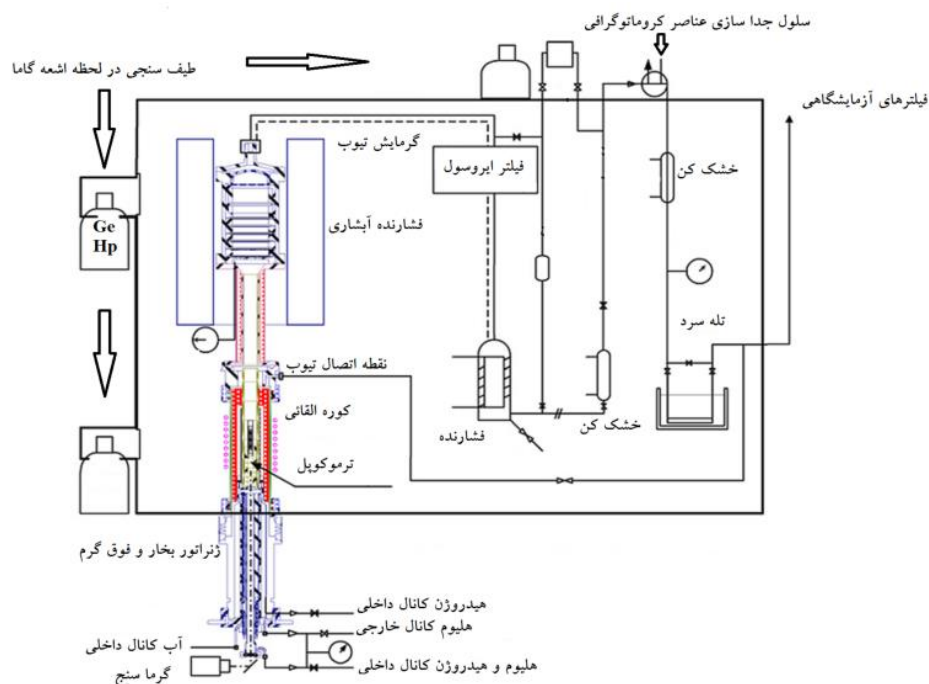
مقدمه

سوختی که برای نخستین بار طراحی و تولید می‌شود، لازم است تمامی مراحل اعتبارسنجی و صحت‌گذاری را طی نماید [1]. به همین دلیل، آزمایشگاه‌ها و راکتورهای مخصوص تست سوخت ایجاد شده و در آنها آزمون‌های زیادی طراحی و اجرا می‌شوند. تست‌های سوخت تازه تولید، شامل تست‌های قبل، حین و پس از پرتودهی می‌باشند. یکی از مهمترین تست‌ها، تست نشتی سوخت تازه تولید است، که به دو روش مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش اول، که در حال حاضر در راکتور تحقیقاتی تهران از آن برای میزان انتشار محصولات شکافت از سوخت مصرف شده استفاده می‌شود، Sippling Test است. در این روش سوخت پس از پرتودهی، در یک محفظه‌ی آب پاک و سختی‌گیری شده قرار داده می‌شود و از آن آب نمونه برداری شده و اسپکترومتری لازم بر روی آن انجام خواهد شد [2]. از محدودیت‌های این روش (عدم بیان دقیق میزان نشت محصولات شکافت، قادر نبودن به شبیه‌سازی شرایط حادثه و ...) می‌باشد. روش دوم تست نشتی در شرایط خلأ نسبی می‌باشد. روش کار بدین صورت است که با قرار دادن میله یا صفحه سوخت نمونه، در یک تیوب کوره نسبتاً خلأ، با دمیدن و نمونه برداری از جو (هوا، بخار، گاز هلیوم و آرگون) درون آن می‌توان کوچکترین نشتی‌ها را آشکار ساخت. کشورمان ایران دارای تکنولوژی ساخت سوخت هسته‌ای می‌باشد. از سوی دیگر، راکتور تهران، تنها راکتور تحقیقاتی در حال بهره‌برداری کشور است که می‌تواند تست سوخت

را، بر روی سوخت‌های تازه تولید شده، مورد بررسی قرار دهد. با توجه به اینکه دانش و تجربه روش دوم در کشور وجود ندارد، با انجام این پژوهش، می‌توان به هدف اصلی که ارتقاء سوخت تولید داخل و رساندن آن به استاندارد های جهانی است، دست یافت. این کار جهت حصول اطمینان از صحت و سلامت سوخت و در نهایت افزایش ایمنی راکتور، کارکنان و مردم عادی در برابر حوادث شدید می‌باشد.

روش کار

در طرح مورد بررسی، نمونه‌های سوخت تازه تولید در راکتور در شرایط نرمال کاری در فرسایش سوخت (Burnup) های مختلف تابش داده می‌شود، و پس از خارج کردن از راکتور درون کوره القایی که دارای خلاء نسبی است گذاشته می‌شود. برای شبیه سازی شرایط حادثه، درجه حرارت سوخت را درون کوره افزایش می‌دهیم. با عبور یک سیال (هوا، بخار، هیدروژن، آرگون) از روی نمونه سوخت، و هدایت آن به سمت تله های مختلف (تله چارکل اکتیو، تله ابروسول، تله سرد و...) تعبیه شده در مسیر جریان می‌توان محصولات شکافت به دام افتاده را شناسایی و میزان انتشار آنها را در درجه حرارت‌های مشخص شده بررسی کرد.



شکل ۱: حلقه آزمایش برای VERCORS 1-6 [7].

در این مقاله به شرح پنج تست، برای سوخت های میله‌ای و صفحه‌ای می‌پردازیم: اولین آزمایش [3] مورد بررسی، در آزمایشگاه ملی اوک ریج ORNL، بر روی نمونه سوخت فلزی UO_2 ، به طول (cm) 15.2 از یک میله سوخت راکتور BWR مانتیسولو، در سال ۱۹۹۵ صورت گرفت. میزان Burnup

سوخت در حدود (40 MWd/kgU) و نمونه سوخت در یک کوره القایی در مدت (۲۰ دقیقه) در شرایط دمایی (K) 2000-2300 در یک فضای مرطوب، مملو از گاز هلیوم حرارت داده شد. با اندازه گیری صحیح میزان انتشار محصولات شکافت در این تست و مقایسه این نتایج با داده‌های تست‌های قبلی، به طور کلی رفتار یکسانی برای محصولات شکافت مشاهده شد، به جز محصولات شکافت مانند: مولیبدنیوم و روتنیوم که در جو هوا و بخار، نسبت به بخار در دما و زمان مشابه نسبتاً بیشتر انتشار یافته‌اند. آزمایشات نهایی نشان داد در تست جو (مخلوطی از هوا، بخار و هلیوم)، با عبور جریان سیال از پایین کوره به سمت بالا، بیشترین اکسیداسیون در انتهای پایین نمونه سوخت رخ داده است و با افزایش ارتفاع واکنش اکسیژن موجود در هوا به همراه بخار با غلاف فلزی زیرکالوی داغ کاهش می‌یابد.

گزارش دوم [4] در رابطه با سری آزمایش‌های HI/VI می‌باشد، که در شرایط دمایی مختلف بررسی می‌شود. این آزمایش کاری مشترک میان کشور آمریکا و فرانسه است. بنابراین به عنوان یک نیاز بین المللی خیلی مهم پس از حوادث تری مایل آیلند در سال ۱۹۷۹ و چرنوبیل در ۱۹۸۶ برای درک و پیش بینی خطرات ناشی از حوادث شدید، این آزمایش در آزمایشگاه ملی اوک ریج ORNL و کمیساری انرژی اتمی فرانسه در سال ۱۹۹۶ انجام شد. آزمایش بر روی انتشار محصولات شکافت از نمونه سوخت فلزی UO_2 به طول (cm) 15 و جرم (gr) 100، در راکتور LWR، در رنج دمایی (C) ۱۶۷۵ تا (C) ۲۷۰۰، صورت گرفت. در اینجا به منظور بررسی اثرات جهت گیری نمونه سوخت در تخریب آن و انتشار محصولات شکافت، کوره القایی طوری طراحی و ساخته شد که اجازه دهد نمونه سوخت به طور عمودی در طول گرمایش قرار بگیرد. در تست VI-3 در بخار، غلاف به طور کامل اکسید شده و نمونه سوخت دست نخورده باقی ماند. در تست VI-5 در هیدروژن سوخت به طور کامل ذوب شده و نمونه سوخت متلاشی گردید و کسر بزرگی از تلریوم و آنتیموان از سوخت و غلاف انتشار یافت و در انتهای تیوب تهنشین شد. در تست‌های ذکر شده در بالا، محصولات شکافت فرار (مانند: سزیوم و کریپتون) خیلی سریع و تقریباً به طور کامل (100%) در مدت ده دقیقه و در درجه حرارت (K) 2000-2720 انتشار یافتند (جدول 1). با مطالعه داده‌های موجود و متعدد این نتیجه حاصل شد که BURNUP نیز نقش مهمی در انتشار محصولات شکافت دارد، به طور مثال: با رسیدن BURNUP به (GWd/tU) ۲۰ انتشار گازهای شکافت 100% خواهد بود. تنها ضعفی که در این آزمایش به آن اشاره شد، این است که داده‌های بدست آمده در اینجا برای تحقیق و بررسی دقیق پارامترها به اندازه کافی زیاد نبوده است.

گزارش سوم [5] تست VERCORS می‌باشد، که یک برنامه آزمایش تحلیلی بر روی انتشار محصولات شکافت و آکتینیدهای میله سوخت تابش دیده است. این آزمون در سال 2010 در کاری مشترک میان برق فرانسه و مؤسسه حفاظت رادیولوژی و ایمنی هسته‌ای، در سایت آزمایشگاهی گرنوبل، در یک سلول داغ، در دوره ۱۴ ساله (1989-2002) در سه مرحله انجام شد. این آزمایشات بر روی سوخت UO_2 و سوخت MOX

متمرکز بوده است. هدف این برنامه فراهم کردن امکان تعیین دقیق محصولات شکافت انتشار یافته در شرایط حادثه در راکتور PWR، و همچنین شناسایی الگوی رفتاری مشابه میان برخی از محصولات شکافت بوده است. به طور خلاصه در اینجا این امکان فراهم شد تا محصولات شکافت (FP) را به چهار دسته با فراریت-های مختلف دسته بندی کرد: ۱-FP فرار- شامل گازهای شکافت که در دمای (C) 2896 به طور کامل منتشر می شوند، 2-FP نیمه فرار- ترکیبی از مولیبدنیوم، رادیوم، باریوم و... می باشند، که در نزدیکی نقطه انتشارشان ته نشین می شوند، 3-FP با 0 فراریت کم- مانند: روتنیوم، سزیوم، استرانسیوم و... که به طور میانگین در حدود 3-10% انتشار می یابند، 4-FP های غیر فرار- که انتشار نمی یابند و به وسیله طیف سنجی گاما اندازه گیری می شوند. اکتینیدها نیز هر کدام رفتار خاصی دارند، با این وجود آنها را می توان به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول شامل U و NP با رفتار مشابه (FP با فراریت کم)، و دومین دسته Pu که به طور نمونه کمتر از 0.1% انتشار می یابند. در این آزمایش دو تغییر عمده رخ داده است، اول اینکه از VERCORS-3 به بعد، دمای هدف از (C) 2346 به (C) 2843 ارتقاء پیدا کرده و دوم اینکه، این کار سبب مقاوم سازی تجهیزات داخل سیستم در برابر درجه حرارت های بالاتر شرایطی مشابه شرایط حادثه شده است، چیدمان این سیستم به صورت مدار حلقوی که در (شکل ۱) نشان داده شده است، می باشد.

گزارش چهارم [6] به شرح یک آزمایش تجربی از آسیب صفحات سوخت و شکستگی آنها در درجه حرارت بالا پرداخته است. این آزمایش در سال ۱۹۸۲ در آزمایشگاه ملی اوک ریج ORNL انجام شد. هدف از انجام آزمایش، ارائه برنامه ای برای کاهش غنای سوخت راکتورهای تحقیقاتی بوده است. در این آزمایش سه صفحه سوخت شامل، یک صفحه سوخت U_3Si و دو صفحه سوخت U_3O_8 بررسی گردید. نمونه سوخت به صورت یک صفحه مستطیلی به طول (mm) 115 و عرض (mm) 50، با غلاف آلیاژ اورانیوم (۶۰۶۱) می-باشد. گاز هلیوم به عنوان جو مورد آزمایش در اینجا به شمار می آید. انتشار محصولات شکافت Cs^{134} و Cs^{137} در محدوده دمایی (C) 565 (C) 700 ملاحظه شده است. همچنین مشاهده شد که انتشار سزیم از صفحه از U_3Si بیشتر از صفحه U_3O_8 است (جدول شماره ۲).

آزمون پنجم [7] مورد بررسی در این مقاله، در رابطه با انتشار محصولات شکافت از سوخت تابش دیده در درجه حرارت بالا در آزمایشگاه توسعه مهندسی هانفورد (ریچلند) در سال ۱۹۷۰ می باشد. در اینجا دو نوع سوخت صفحه ای، آلیاژ اورانیوم آلومینیوم UAl_4 ، به ضخامت (mm) ۷۵ و پراکندگی ذرات U_3O_8 ، در قالب آلومینیوم به ضخامت (mm) 40 میلیمتر، که هر دو در غلاف آلومینیومی قرار داده شده بودند، به کار گرفته شده است. آزمایش در دو درجه حرارت (C) ۷۰۰ و (C) ۱۱۰۰ و در سه جو آرگون، هوا و بخار و در BURNUP، 52% انجام شد. با توجه به اینکه، سزیوم عمدتاً با میزان مشخصی از CsOH تشکیل می شود، زمانیکه یک اتمسفر (بخار/آرگون) موجود باشد، بر روی تیوب گرادیان حرارتی ته نشین می شود، و در نتیجه متوجه شدند که این ته نشین شدن با افزایش دما افزایش می یابد.

جدول شماره (1): مقایسه آزمون سوخت های میله ای [5],[4].

| VI-6 | VERCORS-6 | تست |
|----------------------------|--------------|------------------------|
| UO2 | UO2 | نوع سوخت |
| 42 | 60 | BURNUP (GWd/t) |
| 2583 | 2893 | درجه حرارت سوخت (C) |
| بخار و هیدروژن | ترکیب H2O+H2 | اتمسفردر پایان آزمون) |
| نرخ انتشار محصولات شکافت % | | |
| 67 | 98-100 | ید (I131,I133) |
| 0 | ~100 | زنون (Xe133) |
| 80 | 97 | سزیوم (Cs134,Cs137) |
| 75 | - | کریبتون (Kr85) |
| 64 | 98-100 | آنتیموان (Sb125,Sb127) |
| 14 | <4 | ایروپیوم (Eu154) |
| 0 | 0.6 | روتینیوم (Ru106) |

جدول شماره (2): مقایسه آزمون سوخت های صفحه ای [7],[6].

| آزمون پنجم | آزمون چهارم | تست |
|------------|-------------|---------------------------|
| UA14 U3O8 | U3Si U3O8 | نوع سوخت |
| 1100 1100 | 650650 | درجه حرارت نشت (C) |
| 260 291 | 240150 | بیشترین انتشار (mCi)Kr85 |
| 544642 | 415 2.2 | بیشترین انتشار (mCi)Cs134 |
| 615 732 | 251 1.2 | بیشترین انتشار (mCi)Cs137 |

نتایج

انجام آزمایش در شرایط جوی مختلف سبب تغییرات بسزایی بر روی انتشار محصولات شکافت می شود. در جو بخار، غلاف بطور کامل اکسید شده و نمونه سوخت دست نخورده باقی می ماند. در جو هیدروژن نیز سوخت به طور کامل ذوب شده و نمونه سوخت متلاشی می گردد، و کسر بزرگی از تلیوم و آنتیموان از سوخت و غلاف انتشار می یابد. در آزمایشات صفحه سوخت نیز مشاهده می شود، که با افزودن آرگون به هوای موجود میزان جذب I^{129} بر روی چارکل اکتیو افزایش یافته است. با توجه به داده های موجود در این آزمون ها این نتیجه حاصل می شود که افزایش درجه حرارت سوخت و همچنین BURNUP موجب انتشار 100% محصولات شکافت مانند: Sb^{127} و Sb^{125} ، Te^{132} ، I^{131} ، I^{137} ، Xe^{133} ، Cs^{134} و Cs^{137} می شود.

بحث و نتیجه گیری

با بررسی این طرح ها مشاهده می شود، که تمامی طرح ها دارای یک قالب کلی برای تست نشتی سوخت تازه تولید می باشند. زمانیکه اجزاء این سیستم ها به تنهایی بررسی شوند، متوجه تأثیر به سزای آنها در روند

آزمایش می‌شویم. با توجه به مزایای طرح‌های ارائه شده مانند: بررسی اثرات جهت گیری نمونه سوخت در تخریب آن و انتشار محصولات شکافت در طول گرمایش (آزمون HI/VI). افزایش درجه حرارت از 2346(C) به 2846(C)، و رساندن BURNUP به 60(GWd/t) و افزایش مقاومت حرارتی تجهیزات داخل سیستم، و نزدیک کردن شرایط تست سوخت به شرایط حادثه در طرح VERCORS. تغییر اکسیداسیون و عبور سیال‌های مختلف از روی نمونه سوخت، برای جذب بیشتر محصولات شکافت انتشار یافته، مانند: آرگون در جذب I^{129} بر روی چارکل اکتیو، همچنین نحوه قرارگیری فیلترها در مسیر جریان. از معیابین طرح‌ها نیز می‌توان به مواردی مانند: اینکه بیشترین اکسیداسیون در انتهای پایینی سوخت صورت می‌گیرد و در بالای سوخت با افزایش ارتفاع واکنش اکسیژن موجود در هوا به همراه بخار با غلاف فلزی زیرکالیوم داغ، کاهش می‌یابد (آزمون HI/VI). کمبود داده‌های بدست آمده در این آزمایشات برای تحقیق و بررسی دقیق پارامترها، و نیاز به داده‌ها و آزمایشات بیشتر در این زمینه. با درکنار هم قرار گرفتن این عوامل و مزایای طرح‌های دیگر، می‌توان در نهایت طرحی ارائه داد، که با امکان سنجی ساخت، و دست یابی به دانش فنی در جهت ساخت سیستم تست نشتی سوخت هسته ای تازه تولید در داخل کشور اقدام کرد. با انجام این تست می‌توان اثبات کرد که سوخت تولید داخل از کیفیت مناسبی برخوردار بوده و استانداردهای لازم جهت طراحی و ساخت را دارا می‌باشد.

مراجع

- [1] Hitesh, R., Tanmoy, S., & Soumitra, K., Fuel Assembly Verification For Safe Operation Of Nuclear Power Plants, In Nuclear Technolog, Volume 192, pp1-9, (2014).
- [2] Zeituni, C. A., Terremoto, L.A.A., Silva, G.E.R., Failed MTR Fuel Element Detect In A Sipping Tests, In Instituto De Pesquisas Energéticas E Nucleares, pp1-8, Brazil, (2002).
- [3] Osborne, M.F., Lorenz, R. A., Travis, J. R., Collins, J. L., Webster, C. S., Data Summary Report For Fission Product Release Test VI-7, NUREG/CR-6318 ORNL/TM-12937, (1995).
- [4] Andre, B., Ducros, G., Leveque, J.P., Osborne, M.F., & Lorenz, R.A., Fission Product Releases At Severe Lwr Accident Conditions : ORNL/CEA Measurements Versus Calculations, Nuclear Technology, 114, pp23-50 (۱۹۹۶).
- [5] Pontillon, Y., Ducros, G., Malgouyres, P.P., Behaviour Of Fission Products Under Severe PWR Accident Conditions VERCORS Experimental Programme—Part 1: General Description Of The Programme, Volume 240, Issue 7, pp 1843-1852, France, (2010).
- [6] Posey, J. C., Release of Fission Products from Miniature Fuel Plates at Elevated Temperature; Proceeding of International Meeting on research and Test Reactor Core Conversions from HEU to LEU Fuels at ANL, (1982).
- [7] Baldwin, D. L., Holt, F. E., Woodley, R. E., Archer, D. V., Steele, R. T., Woodley R. E., The Release Of Fission Products From Irradiated SRP Fuels At Elevated Temperatures, HEDL-7598, (1970). , HEDL-7598, (1970).