

## مقایسه عملکرد سوخت های $U_3Si_2-Al$ و $U-Mo$ برای راکتور های تحقیقاتی کم قدرت

محمد همتی آسیابریکی\*<sup>(۱)</sup> - حسین خلفی<sup>(۲)</sup> - محمدعلی آذرفر<sup>(۳)</sup>

<sup>(۳)(۱)</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی هسته ای

<sup>(۲)</sup> نام سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه: علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده راکتور

### چکیده

این پژوهش به معرفی سوختی می پردازد که بتواند جایگزین سوخت  $U_3O_8-Al$  در راکتور تهران باشد. در همین راستا با توجه به  $LEU$  بودن سوخت راکتور تهران دو سوخت  $U_3Si_2-Al$  و  $U-Mo$  که در همین طبقه غنایی قرار دارند مد نظر قرار گرفته اند. با اشاره به برخی ویژگی های آنها در ادامه به کمک کد  $MTR-PC v3.0$  به بررسی برخی از پارامترها، در جهت امکان سنجی استفاده از این دو سوخت در راکتور مربوطه می پردازیم. بعد از مقایسه دو سوخت اشاره شده از بعضی جهات با یکدیگر، سوخت  $U_3Si_2-Al$  به عنوان سوخت منتخب، معرفی می گردد.

کلید واژه:  $MTR-PC v3.0$ ،  $U-Mo$ ،  $U_3Si_2-Al$ ،  $LEU$ ، سوخت پاشنده

### مقدمه

روند کار برای تهیه صفحه سوخت به این گونه است که ذره  $U_3Si_2$  در پودر آلومینیوم پراکنده می شود که در نتیجه این ترکیب، گوشت سوخت  $U_3Si_2-Al$  خواهد شد. در فرایند آماده سازی ذره  $U_3Si_2$  از روش ریخته گری استفاده شده و به طور مکرر به صورت پودر یا ذره کوچکی خرد می گردد تا به خوبی با پودر آلومینیوم سازگار شود. سپس گوشت سوخت در چارچوب غلاف  $Al-6061$  قرار داده، لحیم شده، به طور مکرر نورد گردیده و در دمای  $485^\circ C$  برای ۵۰ دقیقه تحت آزمون  $Blistered$  (متصلب)  $\{blistering\}$  حباب زایی: تشکیل حباب های سطحی در مواد جامد در نتیجه به تله افتادن اتم ها یا یون های کاشته و تابیده شده از پلاسما (به عنوان مثال، اتم ها یا یون های هلیوم و هیدروژن) قرار گرفته تا خواص مکانیکی مناسب و سازگاری خوبی بین ذرات سوخت و ماتریس  $Al$  و همچنین به همان خوبی مابین اجزای سوخت و غلاف، به دست آید. در همین زمان، صفحات سوخت به وسیله فرایند برگشت حرارتی در  $20^\circ C \pm 200$  یا بازپخت کامل در  $500^\circ C$  به مدت یک ساعت تحت عمل قرار می گیرند تا اثر روش های گرمایش مختلف روی ویژگی های مکانیکی صفحه سوخت با ساختار ساندویچی، ارزیابی شود. بررسی و درک درجه سازگاری بین ذرات  $U_3Si_2$  و غلاف مهمترین موضوع است. به ویژه وقتی ذرات سوخت مستقیماً با مخلوط  $Al$  در سوخت نوع صفحه  $U_3Si_2-Al$  تماس پیدا کند، بسیار مهم است که درباره شرایط واکنش ذرات سوخت با مخلوط  $Al$  بدانیم. اگر دمای عملیات حرارتی بیش از  $600^\circ C$  باشد، ذرات  $U_3Si_2$  در صفحه سوخت به سرعت با  $Al$  واکنش خواهد داد. [۱]، [۲]، [۶]

سوخت پاشنده (مخلوط سوختی که در آن ذرات ریز قرار گرفته در فاز حاوی سوخت در میان ماتریسی از مواد غیر شکافت پذیر پاشیده می‌شود)  $U_3Si_2$  با توجه به تراکم بالای اورانیوم در گوشت سوخت، دارای سازگاری خوبی با آلومینیوم، هدایت حرارتی بالا، مقاومت عالی در رسیدن به آستانه تاول زنی (در حدود  $515^\circ C$ )، توانایی بالای حفظ گاز ناشی شکافت، قابلیت انتشار کم از فرار محصولات شکافت، بهتر است. آلیاژ آلومینیوم به عنوان ماده ملبس با توجه به بالا بودن ضریب هدایت حرارتی، کوچکی سطح مقطع جذب نوترون و هزینه‌های پایین انتخاب شده است. [۳]

محدودیت روی حداکثر چگالی اورانیوم در  $U_3Si_2$  باعث انجام یک بررسی بر روی ترکیبات دیگر اورانیوم گردید که منجر به چگالی‌های اورانیوم بالاتری گردید.

تعدادی از ترکیبات دیگر ارزیابی شدند، از جمله  $U_7Fe$ ،  $U_7Mn$  و افزودنی‌های عنصر سوم به  $UMo$  برای تشکیل ترکیبات سه‌تایی. به هر حال، این شرایط اصلاحات کمی به وجود آورد، که مزایای آنها دارای بهره کافی نبود.

پودر  $UMo$  به وسیله خرد کردن تولید می‌شود. پودر تولیدشده حاوی یک تعداد زیادی ذره ریز است که دارای نسبت سطح به حجم بالایی هستند. برای تولید صفحه  $UMo$ ، از فرایند پیشرفته اختصاصی استفاده می‌شود که به تازگی برای صفحات  $U_3Si_2$  با چگالی‌هایی در حدود  $6 g U/cm^3$  ارائه شده است. کسر حجمی ذرات سوخت  $UMo$  همواره حدود ۵۰٪ است ولی تخلخل در گوشت به پودر به کار رفته بستگی دارد. این تخلخل بیشتر از ۱۰٪ برای پودر دانه ای و کمتر از ۴٪ برای پودر ذره‌ای است. چگالی گوشت سوخت کمی بیش از  $8 g/cm^3$  است. [۱۶]، [۱۵]

سوخت  $U-Mo$  استفاده شده در محاسبات از نوع سوخت پاشنده با یک چگالی پایین برای این دسته از سوخت‌های چگالی بالا، محسوب می‌شود. سوخت پاشنده  $U-Mo$  می‌تواند چگالی بالایی از اورانیوم در حدود  $8 gU/cm$  تا  $9 gU/cm$  و سوخت یکپارچه  $U-Mo$  نیز چگالی اورانیومی در حدود  $12 gU/cm$  تا  $15 gU/cm$  را پذیرا باشد [۱۵]. با این چگالی اورانیوم در بسته‌های سوختی، تعداد عناصر سوخت مورد استفاده در راکتور می‌تواند کاهش یابد، که کاهش تعداد عناصر سوختی مصرف شده و ذخیره شده در مخزن راکتور را در پی خواهد داشت.

در سوخت‌های HEU در صد وزنی آلومینیوم به کار رفته به عنوان ماترس سوخت، در حدود ۷۵ تا ۷۸ درصد بوده در حالی که در صد وزنی آن در سوخت‌های LEU اولیه نظیر  $U_3O_8-Al$  در حدود ۲۰ درصد می‌باشد ولی مقدار آن در دو سوخت معرفی شده افزایش یافته است تا جایی که برای سوخت پاشنده  $U-Mo$  در حدود ۳۵ درصد می‌باشد. که با توجه به ویژگی‌های ذکر شده آلومینیوم نقش عمده ای در عملکرد بهتر سوخت‌های جدید ایفا می‌کند.

## روش کار

به چگونگی روش های تولید هر دو نوع سوخت  $U_3Si_2-Al$  و  $U-Mo$  و همچنین اشکالاتی که در فرایند ساخت هر یک از آنها می‌تواند وجود داشته باشد، در مقدمه اشاره شد. مشخص است که ساخت سوخت

U-Mo نسبت به  $U_3Si_2-Al$  به تکنولوژی پیشرفته تری نیازمند بوده و فرایند ساخت آن پیچیده تر است و بر این اساس هزینه ساخت سوخت بالاتر می باشد. ولی برای مقایسه دقیق تر بین این دو نوع سوخت بایستی به عملکرد این سوخت ها در قلب راکتور نیز پرداخته شود و مشخصه هایی از قبیل شار نوترون ها نیز بایستی دقیقاً برآورد و محاسبه شوند تا مقایسه بتواند در مقیاس دقیق تری صورت پذیرد. به همین دلیل محاسبات قلب برای هر دو نوع سوخت بایستی انجام شود. برای انجام محاسبات مورد نظر از کدی به نام  $MTR-PC v3.0$  که شامل یک مجموعه ۳۵ تایی از برنامه ها می باشد استفاده می کنیم.

در شروع کار برای اجرای کد WIMS نیاز به یک ورودی با پسوند wii داریم. این ورودی شامل داده هایی است که با استفاده از مشخصات بسته سوختی از جمله مشخصات هندسی آن، بدست می آید. فایل های ورودی نوشته شده را انتخاب کرده، آن را اجرا می کنیم. خروجی حاصل از این قسمت شامل دو دسته فایل با پسوندهای wio و wip می باشد. برای اجرای برنامه  $POSWIMS-v2.0$  دسته فایل های با پسوند wip را انتخاب کرده و آن را نیز اجرا می کنیم. خروجی حاصل از این مرحله به صورت فایل های با پسوند new شناخته می باشد. نوبت اجرای برنامه  $HXS-v4.1$  می باشد که به کمک فایل های ساخته شده با پسوند new کتابخانه ای شامل اطلاعات مربوط به فایل های wio و ترکیب گروه های انرژی در برنامه  $POSWIMS-v2.0$  به تعداد گروه های مد نظر، ساخته می شود. [۱۲]

در مرحله بعد برای اجرای کد CITVAP نیاز به فایل ورودی با پسوند cii خواهیم داشت. این فایل با توجه به هندسه قلب و مشخصات مربوط به آن ساخته می شود. به کمک کتابخانه تهیه شده در مرحله قبل این برنامه نیز اجرا می گردد. خروجی این قسمت هم به صورت فایل با پسوند cio خواهد بود. با توجه به ورودی برنامه CITVAP می توان در فایل خروجی به نتایجی همچون شار قلب، چگالی قدرت، ضریب تکثیر موثر و غیره دست یافت. [۱۲]

مشخصات سوخت های  $U_3Si_2-Al$ ،  $U_3O_8-Al$  و U-Mo برای انجام محاسبات، در جدول ۱ آورده شده است. چیدمانی که برای محاسبات زیر در نظر گرفته شده است یکی از چیدمان های مربوط به قلب راکتور تحقیقاتی تهران است که در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات راکتور تحقیقاتی مورد بررسی با چیدمان قلب شکل ۱ [۵]، [۷]، [۱۴]، [۱۵]

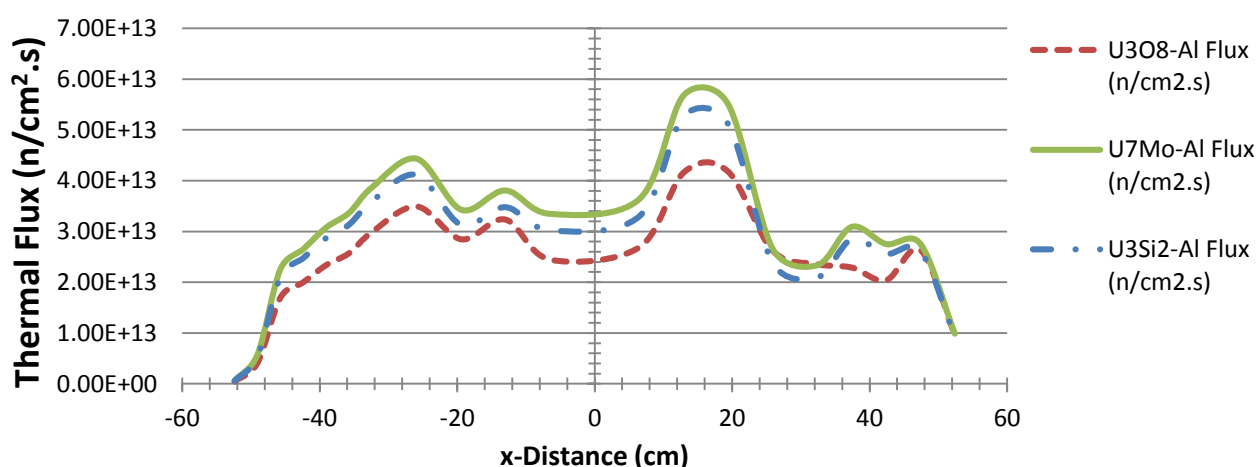
| پارامتر                             | سوخت شماره ۱                   | سوخت شماره ۲                   | سوخت شماره ۳                   |
|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| خنک کننده، کند کننده                | آب                             | آب                             | آب                             |
| بازتابنده                           | آب، گرافیت                     | آب، گرافیت                     | آب، گرافیت                     |
| قدرت حرارتی (MW)                    | ۵                              | ۵                              | ۵                              |
| ماده غلاف سوخت                      | Al-۶۰۶۱                        | Al-۶۰۶۱                        | Al-۶۰۶۱                        |
| ماده سوخت (معرف)                    | $U_3O_8-Al$ (TRR)              | $U_3Si_2-Al$ (IAEA)            | $U_3Mo-Al$ (ANL)               |
| غنا سوخت (w%)                       | ۲۰                             | ۱۹/۷۵                          | ۱۹/۵                           |
| چگالی اورانیوم در سوخت ( $g/cm^3$ ) | ۲/۹۶                           | ۴/۵                            | ۴/۵                            |
| ابعاد بسته سوختی ( $cm^3$ )         | $۸۹/۷ \times ۷/۷۱ \times ۸/۰۱$ | $۸۸/۲ \times ۷/۷۱ \times ۸/۰۱$ | $۸۸/۲ \times ۷/۷۱ \times ۸/۰۱$ |



با در نظر گرفتن چیدمان شکل ۱، نمودار شار متوسط نوترون های حرارتی حاصل از نتایج محاسبات برای هر سه سوخت در راستای محور X در شکل ۲ آورده شده است. همچنین برخی دیگر از نتایج بدست آمده از محاسبات به صورت جدول ۲ به مقایسه گذاشته شده است.

جدول ۲- مقایسه نتایج بدست برای چیدمانی قلب راکتور تهران در حالت بیرون بودن کامل میله های کنترل و با در نظر گرفتن وضعیت تازه (Fresh)، تمیز (Clean) و سرد (Cold) برای قلب

| پارامتر           | سوخت شماره ۱                | سوخت شماره ۲                | سوخت شماره ۳                |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| متوسط شار حرارتی  | $3,05E+13 \text{ n/cm}^2.s$ | $3,55E+13 \text{ n/cm}^2.s$ | $4,10E+13 \text{ n/cm}^2.s$ |
| حداکثر شار حرارتی | $1,36E+14 \text{ n/cm}^2.s$ | $1,36E+14 \text{ n/cm}^2.s$ | $1,44E+14 \text{ n/cm}^2.s$ |
| متوسط چگالی قدرت  | $57,4 (W/cm^3)$             | $63,5 (W/cm^3)$             | $63,8 (W/cm^3)$             |
| حداکثر چگالی قدرت | $97,8 (W/cm^3)$             | $120 (W/cm^3)$              | $120 (W/cm^3)$              |
| ضریب تکثیر موثر   | ۱,۱۵۰۲۰۷                    | ۱,۱۸۳۹۲۵                    | ۱,۱۸۸۱۵۸                    |
| $\Delta k/k$      | ۰,۱۳۰۵۹۱                    | ۰,۱۵۵۳۵۲                    | ۰,۱۵۸۳۶۱                    |



شکل ۲- شار متوسط نوترون های حرارتی در راستای محور X برای سه سوخت  $U_3O_8-Al$  و  $U_3Si_2-Al$  و  $U_7Mo-Al$

### بحث و نتیجه گیری:

نتایج به دست آمده از محاسبات نشان می دهد که شار نوترون های حرارتی در قلبی که با سوخت مولیبدنی کار می کند بالاتر از دو سوخت پاشنده دیگر می باشد ولی در عوض سختی آن دو چندان بوده و بین عناصر آلومینیوم موجود در ماتریس و غلاف با عناصر U-Mo موجب بروز ترک و شکست در سوخت می گردد که این مشکل برای سوخت ها یکپارچه U-Mo نیز به چشم می خورد که برای رفع این مشکل از Zr یا

افزایش درصد وزنی Si و Mn در آلیاژ آلومینیوم استفاده می‌شود که همچنان در مراحل آزمایشگاهی قرار دارد. همچنین در مقایسه دو سوخت U-Mo و  $U_3Si_2-Al$  مطالب گفته شده نشان می‌دهد که سوخت U-Mo مزیت‌هایی بر سوخت  $U_3Si_2-Al$  دارد. ولی ساخت سوخت‌های مولیبدنی مشکلات فنی داشته و نیاز به تکنولوژی بالایی دارد و طبعاً همه اینها باعث می‌شود که هزینه ساخت سوخت‌های مولیبدنی بسیار بیشتر از سوخت‌های سیلیسی باشد.

سوخت‌های سیلیسی از مخلوط پودر سیلیس و پودر اورانیوم به دست می‌آید ولی سوخت‌های مولیبدنی در واقع آلیاژ مولیبدن-اورانیوم است. مولیبدن ذاتاً فلزی سخت و دیرگداز و شکننده می‌باشد. در صنایع آلیاژسازی هنگامی که نیاز به استحکام و سختی بالاتری داشته باشیم مقدار جزئی از این پودر را به فلز میزبان اضافه می‌کنند و این باعث استحکام و سختی بیشتر آلیاژ به دست آمده می‌گردد. آلیاژ مولیبدن-اورانیوم نیز ترکیب سخت و شکننده می‌باشد و به همین دلیل است که در هنگام نورد کاری این کار بایستی در محیطی داغ و همچنین در تعداد دفعات زیاد انجام شود و در غیر این صورت صفحه دچار ترک‌های عرضی می‌گردد.

در تولید آزمایشگاهی کنترل کیفی بر روی قطعه تولید شده به طور صد در صد و به دفعات تکرار می‌شود و هر قسمت از قطعه تولید شده چندین بار مورد بازنگری و دقت قرار می‌گیرد. در تولید انبوه کنترل کیفی نمی‌تواند به همان ترتیب انجام شود یا کنترل کیفی به صورت آماری انجام می‌شود و یا در کنترل کیفی محصولات، دید وسیع‌تری مد نظر قرار می‌گیرد و طبعاً امکان اینکه قطعه ترک خورده‌ای از مرحله کنترل کیفی فرار کند بیشتر خواهد بود.

برای جلوگیری از وقوع این امر بایستی کنترل کیفی به صورت صد در صد روی قطعات تولید شده صورت گیرد و این مبنای هزینه بالاتر ساخت سوخت خواهد بود. علاوه بر اینکه هزینه‌های مربوط به باز فراوری قطعات معیوب نیز بایستی بر این هزینه ساخت اضافه شود. به همین دلیل با اینکه سوخت‌های مولیبدنی عملکرد نوترونی بهتری نسبت به سوخت‌های سیلیسی دارند ولی مشکلات ساخت و هزینه زیاد ساخت سوخت جبران این مزایا را نمی‌نماید. مقدار مواد سوختنی در سوخت‌های LEU نسبت به سوخت‌های HEU پایین‌تر است و این به این معنا است که حجم قلب با سوخت LEU بزرگتر از قلب با سوخت HEU می‌باشد. برای راکتورهایی که هنوز با سوخت HEU کار می‌کنند و ساختمان قلب طوری است که امکان اضافه کردن به حجم وجود نداشته باشد، شاید سوخت U-Mo با تمامی مشکلاتی که دارد تنها و یا بهترین باشد ولی برای راکتورهایی مثل راکتور تهران که قبلاً از HEU به LEU تبدیل شده اند و برای



راکتورهایی که هنوز تبدیل نشده و امکان افزایش حجم قلب را داشته باشند سوخت های U,Si بر سوخت های U-Mo ارجح تر هستند.

### مراجع

- [۱] XI-SHU WANG, "Mechanical Characterizations of the Dispersion  $U^{235}Si^{232}$ -Al Fuel Plate with Sandwich Structure", *Applied Composite Materials* ۱۰: ۱۵۹-۱۶۷, ۲۰۰۳.
- [۲] Di, Zhon-gxin and Guo, Yi-bai, "A Review of Microstructural Analysis on  $U^{235}Si^{232}$ -Al Plate- Type Fuel", *China Nuclear Information Centre Atomic Energy Publish (CNIC-۰۱۰۰۹)*, ۱-۱۶ (in English), ۲۰۰۴.
- [۳] Wang, Xi-shu, Zhu, Shui-qun and Xu, Yong, "Effects of Process Techniques of  $U^{235}Si^{232}$ -Al Dispersion Fuel Plates on the Mechanical Properties", *Journal of Nuclear Power Engineering*, in press (in Chinese), ۲۰۰۴.
- [۴] José E. R. da Silva, Antonio T. e Silva, "Program for in-Pile Qualification of High Density Silicide Dispersion Fuel At IPEN/CNEN-SP", Rio de Janeiro,RJ, Brazil, September ۲۷ to October ۲, ۲۰۰۹.
- [۵] Muhammad, F., Majid, A, "Effects of High Density Dispersion Fuel Loading on the Kinetic Parameters of a Low Enriched Uranium Fueled Material Test Research Reactor". *Annals of Nuclear Energy* ۳۵, ۱۷۲۰-۱۷۳۱, ۲۰۰۸.
- [۶] Muhammad,F., Majid, A, " Kinetic parameters of amaterial test research reactor fueled with high density  $U^{235}Si^{232}$  dispersion fuels". *Progress in Nuclear Energy* ۵۱, ۱۴۱-۱۴۵, ۲۰۰۹.
- [۷] IAEA, ۲۰۱۰, "Cost Aspects of the Research Reactor Fuel Cycle", IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES No. NG-T-۴,۳
- [۸] IAEA, ۲۰۰۷, "Utilization Related Design Features Of Research Reactors: A Compendium, IAEATECDOC-۴۵۵", International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [۹] IAEA, ۲۰۰۲, IAEA Seafesety Standards Series No.NS-G-۲,۵.
- [۱۰] IAEA, ۱۹۹۷, "Chinese Evaluated Neutron Data Library (CENDL-۲)", IAEA-NDS-۶۱, Rev. ۴.
- [۱۱] IAEA, ۱۹۹۳, "INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Assessment of Research Reactors and Preparation of the Safety Analysis Report". Safety series No. ۳۵-G۱ IAEA, Vienna.
- [۱۲] MTR\_PC V۳,۰ User Manual, ۲۰۰۶. Neutronic, Thermal Hydraulic and Shielding Calculations on Personal Computers. INVAP S.E., Nuclear Engineering Division.
- [۱۳] Safety Analysis Report for Tehran Research Reactor (TRR) ,AEOI, Oct ۲۰۰۲
- [۱۴] Lecot Carlos ,Assembly Sequence in TRR, INVAP, Apr ۱۹۹۳
- [۱۵] Hollie A. Longmire, Jack Gooch." Update on Uranium Molybden-Um Fuel Foil Fabrication Activities At The Y-۱۲ National Security Complex", RERTR ۲۰۱۰ \_ ۳۲nd International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, TN ۳۷۸۳۱ USA, October ۱۰-۱۴, ۲۰۱۰.
- [۱۶] C.R. Clark, et al, "Update on U-Mo Monolithic and Dispersion Fuel Development", the ۲۰۰۴ RERTR (Reduced Enrichment for Research and Test Reactors) International Meeting, ۲۰۰۴.