



## بررسی ماده جدید غلاف برای رآکتور NuScale بر مبنای خواص نوترونیکی و ترمومکانیکی با استفاده از غلاف‌های M5، E110، Zircaloy 4 و FeCrAl

حسین زایر محمدی ریشه‌ری، مجید زیدآبادی نژاد\*

گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، صندوق پستی: ۷۶۳۱۸۸۵۳۵۶، کرمان - ایران

\*Email: m.zeidabady@kgut.ac.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۸/۱۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۹

### چکیده

غلاف سوخت‌های هسته‌ای یکی از مهم‌ترین اجزا رآکتور هسته‌ای محسوب می‌شود. این غلاف‌ها از آلیاژ زیرکونیم ساخته می‌شوند؛ اما این آلیاژ خواص ترمومکانیکی چندان مناسبی ندارند؛ لذا در این پژوهش سعی شده با تغییر مواد غلاف به‌کاررفته در رآکتور NuScale به یک غلاف با خواص نوترونیکی و ترمومکانیکی مناسب دست پیدا شود. تغییر در مواد به‌کاررفته در قلب رآکتور موجب تغییر در ضریب تکثیر مؤثر و طول بازه سوخت‌گذاری می‌گردد. در این پژوهش با شبیه‌سازی رآکتور NuScale که از غلاف M5 بهره می‌برد به‌عنوان رآکتور معیار و همچنین شبیه‌سازی این رآکتور همراه تغییر غلاف با سه نوع دیگر آلیاژهای رایج که دو نوع آن آلیاژ زیرکونیم و یک نوع آن آلیاژ FeCrAl است، ضریب تکثیر مؤثر و طول دوره سوخت‌گذاری به‌عنوان مهم‌ترین نتایج نوترونیکی به دست آورده شد. نتایج نشان داد که این آلیاژهای زیرکونیمی با خواص ترمومکانیکی مختلف، تفاوت چندانی در محبت نوترونیک قلب ندارند؛ ولی آلیاژ FeCrAl با داشتن خواص ترمومکانیکی عالی تأثیر منفی بر ضریب تکثیر مؤثر و طول دوره سوخت‌گذاری دارد. در نهایت به‌منظور جبران تأثیر منفی آلیاژ FeCrAl بر خواص نوترونیک دو راهکار استفاده شد که راهکار استفاده از FeCrAl به‌عنوان پوشش بر یک غلاف زیرکونیمی نتایج نوترونیکی خیلی خوبی را نشان داد.

**کلیدواژه‌ها:** غلاف‌های زیرکونیمی، آلیاژ FeCrAl، غلاف سوخت، رآکتور NuScale

## Investigating new cladding material for NuScale reactor based on neutronic and thermo-mechanical properties using M5, E110, Zircaloy 4 and FeCrAl claddings

H. Zayermohammadi Rیشه‌ری, M. Zaidabadi Nejad\*

Nuclear Engineering Department, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, P.O.Box: 7631885356, Kerman - Iran

Research Article

Received 3.11.2022, Accepted 9.1.2023

### Abstract

Nuclear fuel clads are among the most important components of a nuclear reactor. These clads are typically made of zirconium alloy; However these alloys do not possess the best thermo-mechanical properties. Therefore, in this study we attempted to achieve a clad with more suitable neutronic and thermo-mechanical properties by changing the clad materials used in the NuScale reactor. The changes in the material used in the reactor core cause a change in the effective multiplication factor as well as the length of the refueling interval. These effective multiplication factors and refueling period were obtained as the most important neutronic results within this research through simulating the NuScale reactor that uses the M5 cladding as a reference reactor and furthermore, the simulation of this reactor accommodating a clad change with three other types of common alloys, two of which are zirconium alloy and one of which is FeCrAl alloy. The results reveal that zirconium alloys in tandem with different thermo-mechanical properties are not much different in the neutronic matter of the core. In addition, FeCrAl alloy however endowed with excellent thermo-mechanical properties has a negative compact on the effective multiplication factor and the duration of the fueling period. Ultimately, in order to compensate for the negative effect of FeCrAl alloy on the neutronic properties, two solutions were used; The solution of using FeCrAl as a coating on a zirconium clad which presented outstanding neutronic results.

**Keywords:** Zirconium alloys, FeCrAl alloy, Fuel cladding, NuScale reactor



## ۱. مقدمه

و تحقیقات گسترده‌ای نیز بر روی این موضوع انجام شده است [۶-۹].

در این پژوهش با بررسی غلاف‌های M5 (غلاف اصلی رآکتور NuScale)، ۴ Zircaloy (رایج‌ترین غلاف مورد استفاده در رآکتورهای آب سبک غربی) و غلاف مورد استفاده در رآکتورهای روسی VVER-1000<sup>۴</sup> از جنس Zr+۱%Nb موسوم به E110، به تأثیر این غلاف‌ها بر پارامترهای نوترونیکی در یک رآکتور ماژولار کوچک پرداخته شده است و در نهایت با شبیه‌سازی این رآکتور با نوع جدیدی از آلیاژ FeCrAl، تأثیرات این آلیاژهای مختلف را با یکدیگر مقایسه کرده‌ایم.

## ۲. روش تحقیق

## ۲.۲ مشخصات رآکتور مرجع

به منظور تأثیر استفاده از غلاف‌های مختلف رآکتور هسته‌ای NuScale به عنوان رآکتور مرجع در نظر گرفته شده است. خلاصه مشخصات این رآکتور در جدول ۱ ارائه و الگوی چیدمان مجتمع‌های سوخت با غناهای مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. قلب این رآکتور از سه نوع مجتمع سوخت با غناهای ۴/۰۵، ۴/۵۵ و ۲/۶ درصد از اورانیم ۲۳۵ تشکیل شده است و در ۱۲ مجتمع نیز از میله‌های سوخت حاوی سموم جاذب نوترون به منظور هموار کردن توان شعاعی و افزایش طول چرخه سوخت‌گذاری استفاده شده است. میله‌های سوخت توپر با آرایه ۱۷×۱۷ درون مجتمع سوخت با طول گام ۱٫۲۵۹ سانتی‌متر قرار گرفته‌اند. مجتمع‌های سوخت حاوی سم جاذب نوترون شامل ۲۳۲ میله سوخت UO<sub>2</sub>، ۳۲ میله سوخت UO<sub>2</sub>+Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و ۲۵ میله هدایت می‌شود و مجتمع‌های بدون سم جاذب نوترون شامل ۲۶۴ میله سوخت و ۲۵ میله هدایت می‌شوند [۱۰].

## ۲.۲ غلاف‌های مورد بررسی

در این مقاله رایج‌ترین غلاف‌های استفاده شده در رآکتورهای آب سبک مورد بررسی نوترونیک قرار داده شده‌اند. غلاف‌های پایه زیرکونیومی نظیر M5، ۴ Zircaloy و E110 که ترکیبات آلیاژ آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. برای افزایش استحکام و بهبود عملکرد مکانیکی غلاف در آلیاژهای زیرکونیوم از فلزاتی مثل قلع (Sn)، نیوبیم (Nb)، آهن (Fe) و کروم (Cr) استفاده می‌شود. سپس این غلاف‌های پایه زیرکونیومی با نوع جدیدی از آلیاژ FeCrAl که مشخصات آن نیز در جدول ۲ آورده شده است با یکدیگر مقایسه شده‌اند. هم‌چنین خواص ترمو-فیزیکی FeCrAl و آلیاژ زیرکونیومی در شکل‌های ۲ تا ۴ آورده شده است [۱۲، ۱۳].

افزایش روزافزون تقاضا برای انرژی هسته‌ای باعث توسعه مفهوم رآکتور ماژولار کوچک (SMR<sup>۱</sup>) شده است تا قادر باشد برق را برای مکان‌های دورافتاده تأمین و سیستم‌های انرژی با توزیع بیش‌تر ایجاد کند. SMRها رآکتورهایی هستند که خروجی توان آن‌ها کم‌تر از ۳۰۰ مگاوات الکتریکی است. طراحی کوچک‌تر و فشرده‌تر رآکتورهای ماژولار کوچک نسبت به رآکتورهای قدرت رایج، امکان حمل‌ونقل آن‌ها به وسیله قطار یا کامیون را به سمت سایت نیروگاه هسته‌ای ممکن می‌سازد [۱]. در حال حاضر، کشورهایی نظیر ایالات متحده، چین، روسیه و کره جنوبی در حال طراحی و توسعه این رآکتورها هستند. به دلیل شناخت بیش‌تر و رایج بودن تکنولوژی رآکتورهای آب سبک، اکثر طراحی‌های موجود و رآکتور مورد پژوهش در این مقاله (NuScale) از این نوع هستند [۲]. با وجود ایمنی ذاتی و صرفه اقتصادی بهتر SMRها نسبت به رآکتورهای قدرت رایج؛ می‌توان هم‌چنان به بهبود و ارتقا آن‌ها پرداخت. هم‌چنین پس از فاجعه هسته‌ای فوکوشیما دایچی که در سال ۲۰۱۱ میلادی رخ داد باعث شد تا ارائه راهکار برای افزایش ایمنی رآکتورهای هسته‌ای به موضوعی داغ در مهندسی هسته‌ای تبدیل شود [۳]. در مبحث ایمنی رآکتورهای هسته‌ای از اولین و مهم‌ترین سدهای مقابله با حادثه، غلاف میله سوخت است. در حال حاضر سوخت اکثر رآکتورهای آب سبک (LWRs<sup>۲</sup>) که در سرتاسر جهان در حال کار هستند بر اساس ترکیبی از قرص‌های اکسید اورانیم (UO<sub>2</sub>) در یک غلاف از جنس زیرکونیوم (Zr) تشکیل شده است. این ترکیب دهه‌هاست که در رآکتورهای آب سبک مورد استفاده قرار گرفته و از دلایل اصلی استفاده از زیرکونیوم در غلاف سوخت‌های هسته‌ای جذب پایین نوترون‌های حرارتی و شفافیت در مقابل عبور آن‌ها است. غلاف‌های زیرکونیومی با وجود مزایای بیان شده، معایبی نیز دارند که یکی از بارزترین آن‌ها خوردگی این غلاف در دماهای بالا است. در شرایطی مانند حادثه از دست رفتن خنک‌کننده (LOCA<sup>۳</sup>)، دمای قلب رآکتور افزایش می‌یابد و باعث واکنش آلیاژ زیرکونیومی با سیال خنک‌کننده می‌شود و آلیاژ زیرکونیومی در دمای بالا به آسانی اکسید شود. هم‌چنین اگر این افزایش دما به ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد یا بیش‌تر برسد می‌تواند باعث واکنش آلیاژ با بخار آب شود و گاز قابل احتراق هیدروژن را تولید کند [۴]. از این رو، آلیاژ FeCrAl به دلیل مقاومت بسیار خوبی که در برابر اکسیداسیون در محیط‌های دارای سیال با دمای بالا دارد [۵] از گزینه‌های مطرح برای جایگزین کردن آلیاژهای زیرکونیومی است

1. Small Modular Reactor
2. Light-Water Reactors
3. Loss of Coolant Accident

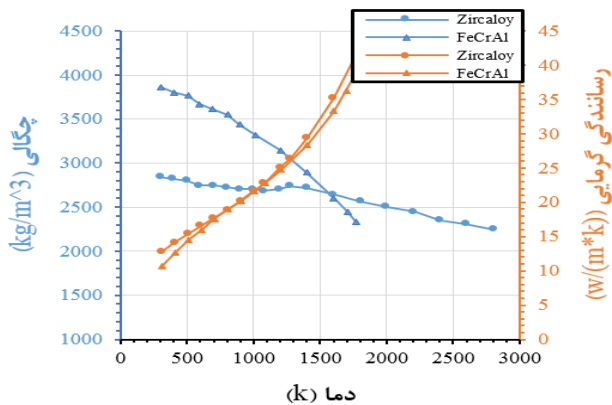


جدول ۲. مشخصات آلیاژهای M5، Zircaloy ۴، E110 و FeCrAl (مقادیر به درصد وزنی ارائه شده‌اند) [۱۴، ۱۵]

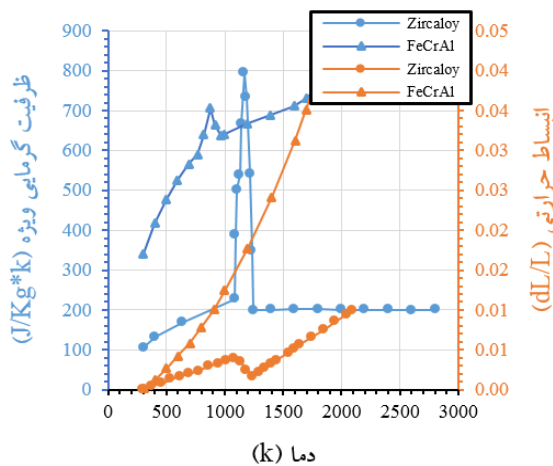
عنصر	FeCrAl	E110	Zircaloy ۴	M5
آلیاژ	FeCrAl	E110	Zircaloy ۴	M5
قلع	-	-	۱,۴۵	-
نیوبیم	-	۱	-	۱
اکسیژن	-	۰,۰۶	۰,۱۲۵	۰,۱۳۵
آهن	۷۵	۰,۰۰۹	۰,۲۱	۰,۰۳۸
کروم	۲۰	-	۰,۱	-
آلومینیم	۵	-	-	-
زیرکونیم	-	باقی مانده	باقی مانده	باقی مانده

جدول ۱. مشخصات راکتور NuScale [۱۰، ۱۱]

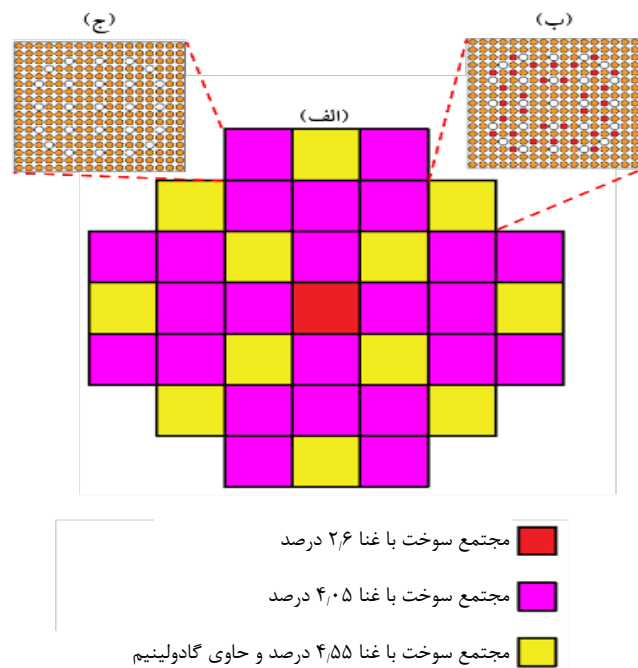
پارامتر	مقدار	واحد
توان حرارتی	۱۶۰	MWt
توان خروجی الکتریکی	۵۰	MWe
قطر قلب	۱۵۰,۵۷	cm
تعداد مجتمع‌های سوخت	۳۷	-
هندسه مجتمع سوخت	۱۷×۱۷	-
تعداد میله‌های سوخت	۲۶۴	-
طول گام مجتمع سوخت	۲۱,۵۰۳۶	cm
طول گام میله سوخت	۱,۲۵۹	cm
عرض مجتمع سوخت	۲۱,۴۲	cm
ارتفاع فعال میله سوخت	۲۰۰	cm
قطر قرص سوخت	۰,۸۱۱۵	cm
ضخامت گپ (Gap)	۰,۰۰۰۸	cm
ضخامت غلاف	۰,۰۰۶	cm
جنس غلاف	M5	-
جنس سوخت	UO <sub>2</sub>	-
سم جاذب مصرفی	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
بوریک اسید	۱,۲۲	gr
		kgH <sub>2</sub> O



شکل ۲. چگالی و رسانندگی گرمایی [۱۲].



شکل ۳. ظرفیت گرمایی ویژه و انبساط حرارتی [۱۲].



شکل ۱. (الف) الگوی چیدمان مجتمع‌های سوخت در قلب، (ب) مجتمع سوخت با آرایه ۱۷×۱۷ و حاوی میله‌های سموم جاذب نوترون و (ج) مجتمع سوخت با آرایه ۱۷×۱۷ بدون میله‌های سموم جاذب نوترون [۱۰].

1. Thermal Conductivity
2. Specific Heat Capacity
3. Thermal Expansion



۱. محاسبات سلولی: حل معادله ترابرد نوترون در نزدیکی میله‌های سوخت شامل هندسه، مواد تشکیل‌دهنده گوشت سوخت، غلاف و کندکننده/خنک‌کننده.

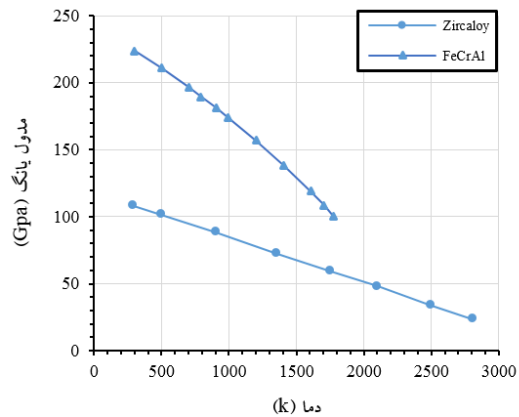
۲. محاسبات قلب: حل معادله پخش برای کل رآکتور. رفتار نوترونیکی قلب با غلاف‌های مختلف توسط کد محاسبات سلولی (WIMS-D5b) و کد محاسبات قلب (CITATION) مورد بررسی قرار گرفته است [۱۷، ۱۸].

در ابتدا برای تولید ثابت گروهی  $(D, \sum_a, \sum_r, \nu \sum_f)$  هرکدام از مجتمع‌های سوخت با غنا و غلاف موردنظر جداگانه در شرایط پاک و سرد<sup>۴</sup> و شرایط تمام قدرت<sup>۵</sup> در کد WIMS مدل‌سازی شد. پاک و سرد بدین معناست که دمای رآکتور در حدود دمای اتاق قرار دارد و قلب بدون سموم جاذب (مصرفی، محلول یا محصولات شکافت) است. اما در شرایط تمام قدرت دمای سوخت و خنک‌کننده به ترتیب ۶۸۰ و ۵۵۸ درجه کلوین در نظر گرفته شده و از سموم جاذب مصرفی (گادولینیم) و محلول (اسید بوریک) صرف‌نظر نشده است. در این مقاله برای محاسبات سلولی از مدل ریاضی گسسته  $(S_N \text{ method})$  نمودن متغیر جهت استفاده شده است. در این روش اقدام به گسسته‌سازی جهت یا زاویه  $\Omega$  می‌کنیم و معادله ترابرد برای تعداد محدودی زاویه مشخص  $\Omega_m$  حل می‌شود. به هر یک از این جهت‌ها وزنی  $(w_m)$  نسبت داده می‌شود که هر یک از این وزن‌ها مشخص‌کننده یک ناحیه یا سطح روی کره واحد است و جمع  $(w_m)$  تمام این وزن‌ها برای جهت‌های مختلف برابر با یک می‌باشد.

کتابخانه این کد برای رآکتورهای حرارتی آب سبک تولید گردیده و شامل ۶۹ گروه انرژی است [۱۷] که برای محاسبات این پژوهش بازه‌های گروه‌های انرژی به صورت دوگروهی سریع و حرارتی تقسیم‌بندی شده‌اند. گروه‌های ۱ تا ۴۵ به‌عنوان گروه سریع و ۴۵ تا ۶۹ به‌عنوان گروه حرارتی.

سپس با استفاده از ثابت گروهی به‌دست‌آمده از کد سلولی و انتقال آن‌ها به کد CITATION که معادله پخش چند گروهی را به روش SOR<sup>۶</sup> در چند بُعد حل می‌کند [۱۸]، به محاسبات قلب پرداختیم. قلب رآکتور مطابق الگوی چینی (شکل ۲) در این کد نوشته شده است.

به‌منظور بررسی تأثیر غلاف‌ها بر پارامترهای نوترونیک، محاسبات مصرف سوخت برای یک مجتمع با غلاف‌های مختلف



شکل ۴. مدول یانگ<sup>۱</sup> [۱۲، ۱۳].

در شکل ۳، جهش شدید و ایجاد قله برای ظرفیت گرمایی ویژه آلایژ زیرکونیم نتیجه تغییر فاز از ۱۰۹۰ تا ۱۲۴۸ درجه کلوین است و هم‌چنین قله ایجاد شده در دمای حدود ۸۰۰ درجه کلوین به دلیل یک گذار فاز مغناطیسی<sup>۲</sup> است [۱۲].

### ۳.۲ شبیه‌سازی نوترونیک

برای به‌دست‌آوردن پارامترهایی نظیر شار نوترون و ضریب تکثیر<sup>۳</sup> نیاز به حل معادله ترابرد نوترون داریم. این معادله به‌صورت زیر نوشته می‌شود [۱۶]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + v \hat{\Omega} \cdot \vec{\nabla} + v \sum_t n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) = \int \chi \pi d\hat{\Omega}' \int_0^\infty dE' v' \sum_s s(E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) n(\vec{r}, E', \hat{\Omega}', t) + S(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) \quad (1)$$

که در معادله ۱،  $n$  چگالی نوترون،  $\sum_t n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t)$  سطح مقطع ماکروسکوپی کل در زمان  $t$  مکان  $r$ ، انرژی  $E$  و زاویه  $\hat{\Omega}$  است،  $\int \chi \pi d\hat{\Omega}' \int_0^\infty dE' v' \sum_s s(E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega})$  تعداد نوترون‌های منتشر شده در انرژی و زاویه مناسب و  $S$  چشمه در نظر گرفته می‌شود.

با استفاده از روش‌های تحلیلی و ساده حل معادله ترابرد برای کل رآکتور امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، برای ساده‌سازی معادله ترابرد از تقریب‌هایی مانند معادله پخش چند گروهی را در نظر می‌گیرند.

پس در این پژوهش، روش حل به دو بخش کلی تقسیم شده است:

4. Cold and Clean

5. Full Power

6. Successive Over Relaxation

Journal of Nuclear Science and Technology

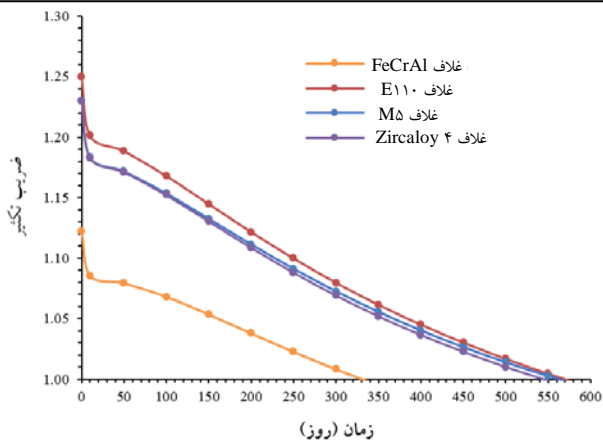
Vol. 45 (2), Serial Number 107, 2024, P 29-36

1. Young's Modulus

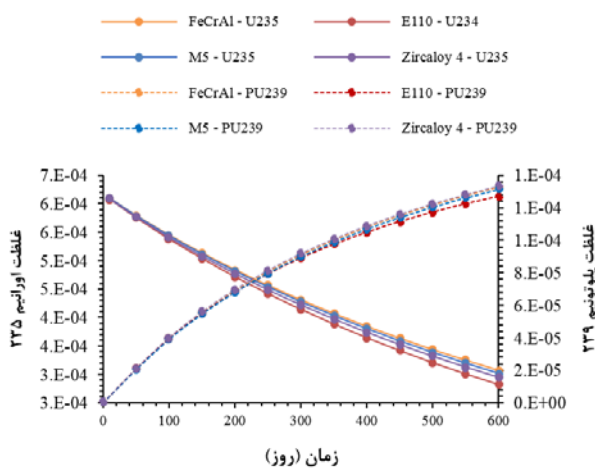
2. Magnetic Phase Transition

3. Multiplication Factor (k)

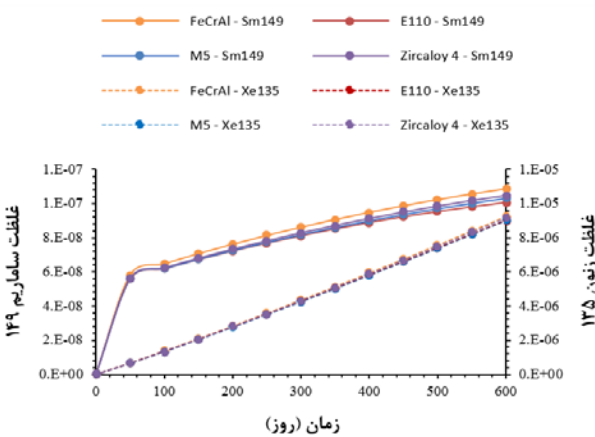




شکل ۵. ضرب تکثیر یک مجتمع سوخت تا مدت‌زمان بحرانی بودن در شرایط تمام قدرت برای چهار غلاف مختلف.



شکل ۶. چگالی اتمی ( $\frac{atom}{barn.cm}$ ) اورانیم ۲۳۵ و پلوتونیم ۲۳۹ پس از گذشت ۶۰۰ روز در شرایط تمام قدرت مؤثر برای چهار غلاف مختلف.



شکل ۷. چگالی اتمی ( $\frac{atom}{barn.cm}$ ) ساماریم و زنون پس از گذشت ۶۰۰ روز در شرایط تمام قدرت مؤثر برای چهار غلاف مختلف.

بر حسب تعداد روز در شرایط تمام قدرت مؤثر (EFPD) به دست آورده شد. برای محاسبات مصرف سوخت از کارت POWERC در ورودی کد WIMS استفاده شده است.

### ۳. نتایج

ضرب تکثیر مؤثر یکی از کلیدی‌ترین فاکتورها برای کارکرد و کنترل رآکتور است [۱۶]. هر تغییری در خواص مواد به‌کاررفته در قلب رآکتور و هندسه موجب تغییر بحرانیات قلب و ازاین‌رو تغییر در ضرب تکثیر مؤثر می‌شود. با استفاده از شبیه‌سازی رآکتور NuScale با غلاف M5 در شرایط قلب پاک و سرد ضرب تکثیر قلب رآکتور به دست آورده شد. سپس از غلاف‌های دیگر استفاده شد و قلب رآکتور موردنظر مجدداً با این میله سوخت جدید شبیه‌سازی شد و ضرب تکثیر بار دیگر به دست آورده شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از آلیاژهای متفاوت زیرکونیم با خواص ترمومکانیکی مختلف به‌عنوان غلاف سوخت هسته‌ای تأثیر یکسانی بر نوترونیک قلب رآکتور دارند. اما آلیاژ FeCrAl که دارای خواص ترمومکانیکی بهتری است به دلیل سطح مقطع جذب نوترون بسیار بالا باعث کاهش ضرب تکثیر مؤثر در قلب می‌شود.

هم‌چنین مطابق شکل ۵ ضرب تکثیر یک مجتمع سوخت تا انتهای بحرانی بودن را نشان می‌دهد و همان‌طور که مشاهده می‌شود با استفاده از غلاف FeCrAl طول کارکرد و عمر این مجتمع سوخت به کم‌تر از ۳۵۰ روز می‌رسد. درحالی‌که غلاف‌های زیرکونیمی عملکرد مناسب‌تری از خود نشان می‌دهند. در ادامه میزان مصرف سوخت ( $^{235}\text{U}$ ) و تولید پلوتونیم به‌عنوان دو ماده شکاف اصلی رآکتور در شکل ۶ و میزان تولید سموم جاذب نوترون (ساماریم و زنون) در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۳. ضرب تکثیرهای مؤثر و راکتیویته اضافی برای هر یک از میله‌های سوخت در شرایط قلب پاک و سرد

آلیاژ	ضرب تکثیر مؤثر	راکتیویته اضافی
M5	۱,۲۹۴۴۱	۰,۲۲۷۴۵
Zircaloy 4	۱,۲۹۴۴۲	۰,۲۲۷۴۶
E110	۱,۲۹۴۷۱	۰,۲۲۷۶۳
FeCrAl	۱,۲۰۳۶۸	۰,۱۶۹۲۲

#### 1. Effective Full Power Days



#### ۲.۴ راهکار دوم: استفاده از آلیاژ FeCrAl به عنوان پوشش بر روی

##### غلاف زیرکونیمی

به عنوان راهی برای جلوگیری از تولید هیدروژن و شکنندگی غلاف زیرکونیمی توسط اکسیداسیون، ایده‌هایی مانند پوشش غلاف با لایه پیشگیری از اکسیداسیون پدید آمده است. در واقع، در میان مفاهیم متعدد سوخت قابل تحمل در برابر حادثه، مفهوم پوشش غلاف در حال حاضر توجه جهانی را به خود جلب کرده است و تاکنون برخی از نشانه‌های موفقیت در پیشگیری از اکسیداسیون در مقیاس آزمایشگاهی برای چند نامزد پوشش بر غلاف تأیید شده است [۱۹-۲۲] و یکی از این مواد جهت پوشش آلیاژ FeCrAl است [۲۳-۲۵]. روش پوشش‌دهی پاشش سرد (Cold Spraying) و پاشش پلاسما (Plasma Spraying) از روش‌هایی هستند که به منظور پوشش‌دهی غلاف زیرکونیمی با FeCrAl استفاده می‌شوند. چالش استفاده از غلاف روکش‌کاری شده زیرکونیم با FeCrAl تشکیل یوتکتیک نقطه ذوب کم بین آهن و زیرکونیم در دمای ۹۲۸ درجه سانتی‌گراد است [۲۶]. به همین جهت از یک لایه داخلی مولیبدن با ضخامت بسیار کم بین دو آلیاژ مورد نظر استفاده می‌شود تا از این نقطه ذوب کم را افزایش دهد [۲۷].

در این بخش از مقاله حاضر یک غلاف زیرکونیمی (E110) پوشش داده شده با آلیاژ FeCrAl با استفاده از کدهای نوترونی WIMS و CITATION مورد بررسی قرار داده شده است. ضخامت لایه زیرکونیمی و ضخامت لایه محافظ به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۰۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است و در این صورت تغییری در قطر میله سوخت ایجاد نمی‌شود.

نتیجه شبیه‌سازی غلاف معرفی شده در راهکار دوم در شکل ۹ با غلاف مرجع (M5) و غلاف آهنی با ضخامت ۰/۰۶ سانتی‌متر مقایسه و نشان داده شده است. ضریب تکثیر مؤثر و راکتیویته اضافی قلب با استفاده از این غلاف در شرایط پاک و سرد نیز به ترتیب ۱/۲۷۲۲ و ۰/۲۱۳۹ محاسبه گردید.

بر اساس نتایج به دست آمده قابل مشاهده است که استفاده از FeCrAl به عنوان پوشش بر یک غلاف زیرکونیمی علاوه تأثیرات مثبتی که می‌تواند بر مقاومت غلاف داشته باشد تأثیر منفی کمی بر روی ضریب تکثیر داشته و مدت زمان بحرانی بودن رآکتور با غلاف معرفی شده برابر با غلاف رآکتور مرجع است.

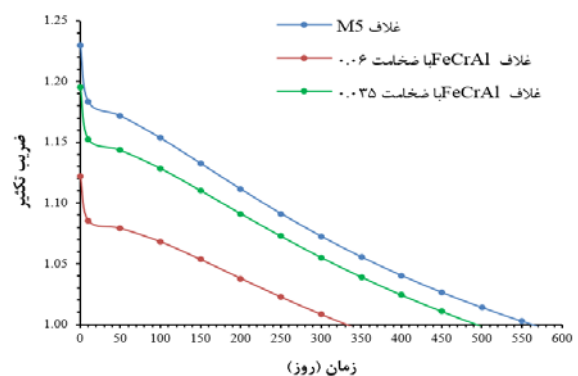
#### ۴. بهبود غلاف FeCrAl

آلیاژ FeCrAl نیز همانند سایر غلاف‌ها در کنار مزیت‌ها، معایبی نیز دارد. از مهم‌ترین معایب آلیاژ FeCrAl سطح مقطع جذب نوترون بالاتر آن به نسبت آلیاژهای زیرکونیمی است و همان‌طور که در بخش ۳ از نتایج شبیه‌سازی‌های نوترونیکی قابل نتیجه‌گیری است تأثیر منفی زیاد آن بر طول عمر و راکتیویته اضافی قلب است. از این رو، در این پژوهش دو راهکار جهت رفع معایب این غلاف ارائه شده و راهکارهای ارائه شده از دیدگاه نوترونیکی و مدت زمان بحرانی بودن رآکتور مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند.

#### ۱.۴ راهکار اول: کاهش ضخامت غلاف FeCrAl

بر اساس پژوهش‌های انجام شده بر روی این آلیاژ در صورت کاهش ضخامت، FeCrAl هم‌چنان مقاومت خوبی در مقابل اکسیداسیون و حوادث دارد [۶]. از این رو در این مقاله، ضخامت این غلاف را تا ۴۰ درصد نسبت به ضخامت غلاف مورد استفاده در رآکتور مرجع کاهش داده شده است. لازم به ذکر است که با کاهش ضخامت غلاف فاصله بین میله‌های سوخت (Rod-to-Rod) نیز افزایش داده شده و در این صورت حجم کندکننده و خنک‌کننده بین میله‌های سوخت افزایش یافته است. نتیجه شبیه‌سازی غلاف معرفی شده در راهکار اول در شکل ۸ با دو غلاف دیگر مقایسه و نشان داده شده است. ضریب تکثیر مؤثر و راکتیویته اضافی قلب با استفاده از این غلاف در شرایط پاک و سرد به ترتیب ۱/۲۶۹۳ و ۰/۲۱۲۲ است.

بر اساس نتیجه به دست آمده قابل مشاهده است که کاهش ضخامت غلاف با آلیاژ FeCrAl، تأثیر بسزایی بر مدت زمان بحرانی بودن داشته و آن را بهبود بخشیده (۵۰۰ روز)؛ هرچند که به نسبت غلاف اصلی رآکتور مرجع مدت زمان کم‌تری بحرانی بوده است.

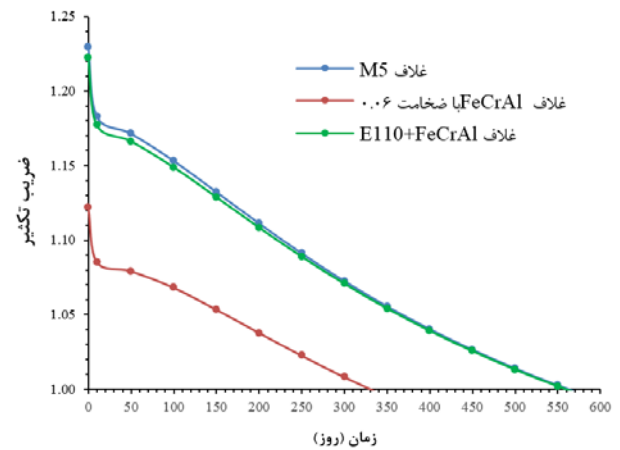


شکل ۸. ضریب تکثیر یک مجتمع سوخت تا مدت زمان بحرانی بودن در شرایط تمام قدرت برای غلاف اصلی رآکتور مرجع، غلاف FeCrAl با ضخامت مشابه غلاف رآکتور مرجع و غلاف بهبود یافته.



## مراجع

1. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*, IAEA (2014).
2. Ingersoll D.T, Carelli M.D. Handbook of small modular nuclear reactors. Elsevier. (2014).
3. Zinkle Steven J, Kurt A. Terrani, Jess C. Gehin, Larry J. Ott, Lance Lewis Snead. Accident tolerant fuels for LWRs: A perspective. *Journal of Nuclear Materials*. 2014;448(1-3).
4. Pint B.A, Terrani K.A, Brady M.P, Cheng T, Keiser J.R, High temperature oxidation of fuel cladding candidate materials in steam-hydrogen environments. *J. Nucl. Mater.* 2013;440.
5. Pan D, Zhang R, Wang H, Lu C, Liu Y. Formation and stability of oxide layer in FeCrAl fuel cladding material under high-temperature steam. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;684.
6. Chen P, Qiu B, Wu J, Zheng M, Gao S, Zhang K, Zhou Y, Wu Y. A comparative study of in-pile behaviors of FeCrAl cladding under normal and accident conditions with updated FROBA-ATF code, *Nuclear Engineering and Design*. 2021;371.
7. Quadackers W.J, Elschner A, Speier W, Nickel H. Composition and growth mechanisms of alumina scales on FeCrAl-based alloys determined by SNMS. *Appl. Surf. Sci.* 1991;52.
8. Badini C, Laurella F. Oxidation of fecral alloy: influence of temperature and atmosphere on scale growth rate and mechanism. *Surf. Coat. Technol.* 2001;135.
9. Nychka J.A, Clarke D.R. Quantification of aluminum outward diffusion during oxidation of FeCrAl alloys. *Oxid. Met.* 2005;63.
10. NuScale Power LLC, NuScale Standard Plant Design Certification Application. *US Nuclear Regulatory Commission (NRC)*. (2016).
11. Sadegh-Noedoost A, Faghihi F, Fakhraei A, Amin-Mozafari, M. Investigations of the fresh-core cycle-length and the average fuel depletion analysis of the NuScale core. *Annals of Nuclear Energy*. 2020;136.
12. Ott L.J, Robb K.R, Wang D. Preliminary assessment of accident-tolerant fuels on LWR performance during normal operation and under DB and BDB accident conditions. *Journal of Nuclear Materials*. 2014;448(1-3).
13. Wu X, Kozlowski T, Hales J.D. Neutronics and fuel performance evaluation of accident tolerant FeCrAl cladding under normal operation conditions. *Annals of Nuclear Energy*. 2015;85.
14. Lemaignan C. 2.07-Zirconium alloys: properties and characteristics. *Comprehensive Nuclear Materials*. 2012.



شکل ۹. ضریب تکثیر یک مجتمع سوخت تا مدت‌زمان بحرانی بودن در شرایط تمام قدرت برای غلاف اصلی رآکتور مرجع، غلاف FeCrAl با ضخامت مشابه غلاف رآکتور مرجع و غلاف بهبود با پوشش یافته.

## ۵. نتیجه‌گیری

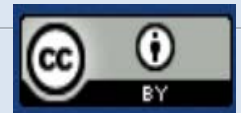
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از آلیاژهای متفاوت زیرکونیم با خواص ترمومکانیکی مختلف به‌عنوان غلاف سوخت هسته‌ای تأثیر یکسانی بر ضریب تکثیر قلب رآکتور و طول دوره سوخت‌گذاری دارند. اما آلیاژ FeCrAl که دارای خواص ترمومکانیکی بهتری است باعث کاهش ضریب تکثیر مؤثر و طول دوره سوخت‌گذاری در قلب رآکتور می‌گردد. به دلیل اهمیت بسیار زیاد خواص انتقال حرارت و ترمومکانیکی بسیار عالی آلیاژ FeCrAl سعی شد با استفاده از راهکارهایی تأثیر منفی این غلاف بر خواص نوترونیکی را جبران کرد. بدین منظور دو راهکار ارائه شد که در راهکار اول ضخامت غلاف نصف گردید و مشاهده شد اندکی از تأثیر منفی آن کاسته شد؛ ولی همچنان خواص نوترونیکی آن نصب به مرجع ضعیف‌تر بود؛ لذا از راهکار مؤثرتر دیگری استفاده شده که در آن یک غلاف زیرکونیمی (E110) پوشش داده شده با آلیاژ FeCrAl به‌عنوان راهی برای جلوگیری از تولید هیدروژن و شکنندگی غلاف زیرکونیمی توسط اکسیداسیون در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی این غلاف دیده شد که استفاده از FeCrAl به‌عنوان پوشش بر یک غلاف زیرکونیمی علاوه تأثیرات مثبتی که می‌تواند بر مقاومت غلاف داشته باشد تأثیر منفی بر روی خواص نوترونیکی نخواهد داشت.



15. George N.M, Terrani K, Powers J, Worrall A, Maldonado I. Neutronic analysis of candidate accident-tolerant cladding concepts in pressurized water reactors. *Annals of Nuclear Energy*. 2015;75.
16. Okumura K, Oka Y, Ishiwatari Y. Nuclear reactor design. *Springer Japan* 2014.
17. Donnelly J.V. WIMS-CRNL: A user's manual for the Chalk River version of WIMS. No. AECL--8955. *Atomic Energy of Canada Ltd*. 1986.
18. Fowler T.B, Vondy D.R. Nuclear reactor core analysis code: CITATION. No. ORNL-TM-2496. *Oak Ridge National Lab. Tenn*. 1969.
19. Koo Y.H, Yang J.H, Park J.Y, Kim K.S, Kim H.G, Kim D.J, Jung Y.I, Song K.W. KAERI's development of LWR accident-tolerant fuel. *Nuclear Technology*. 2014;186(2).
20. Kim H.G, Kim I.H, Jung Y.I, Park D.J, Park J.Y, Koo Y.H. High-temperature oxidation behavior of Cr-coated zirconium alloy. In Proceeding of LWR Fuel Performance Meeting/TopFuel. *Charlotte. USA*. 2013;842:846.
21. Yacout A.M, Pellin M, Billone M.C. Development and Testing of Nanolaminate Coatings for Conventional LWR Cladding. *Transaction of TopFuel*. 2013.
22. Park J.Y, Kim I.H, Jung Y.I, Kim H.G, Park D.J, Choi B.K. High temperature steam oxidation of Al<sub>3</sub>Ti-based alloys for the oxidation-resistant surface layer on Zr fuel claddings. *Journal of Nuclear Materials*. 2013;437(1-3).
23. Wang Y, Zhou W, Wen Q, Ruan X, Luo F, Bai G, Qing Y, Zhu D, Huang Z, Zhang Y, Liu T, Li R. Behavior of plasma sprayed Cr coatings and FeCrAl coatings on Zr fuel cladding under loss-of-coolant accident conditions. *Surface and Coatings Technology*. 2018;344.
24. Park D.J, Kim H.G, Jung Y.I, Park J.H, Yang J.H, Koo Y.H. Microstructure and mechanical behavior of Zr substrates coated with FeCrAl and Mo by cold-spraying. *Journal of Nuclear Materials*. 2018;504.
25. Kim I.H, Jung Y.I, Kim H.G, Jang J.I. Oxidation-resistant coating of FeCrAl on Zr-alloy tubes using 3D printing direct energy deposition. *Surface and Coatings Technology*. 2021;411.
26. Okamoto H. Fe-Zr (iron-zirconium). *Journal of Phase Equilibria*. 1993;14(5).
27. Dabney T, Johnson G, Yeom H, Maier B, Walters J, Sridharan K. Experimental evaluation of cold spray FeCrAl alloys coated zirconium-alloy for potential accident tolerant fuel cladding. *Nuclear Materials and Energy*. 2019;21.

**COPYRIGHTS**

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



## استناد به این مقاله

زایر محمدی ریشهری، حسین، زیدآبادی نژاد، مجید. (۱۴۰۳)، بررسی ماده جدید غلاف برای رآکتور NuScale بر مبنای خواص نوترونیکی و ترمومکانیکی با استفاده از غلاف‌های M۵، E۱۱۰، ۴ Zircaloy و FeCrAl. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*. ۱۰۷(۱)، ۲۹-۳۶. DOI: 10.24200/nst.2023.1246.1811

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1534.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1534.html)

