

## بررسی عملکرد ترمومکانیکی میله سوخت راکتور VVER در حادثه LOCA با استفاده از کد FRAPTRAN

معصومه دهقانی‌زاده، غلامرضا جهان‌فرنیا، محسن خردمند سعدی\*

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی هسته‌ای، تهران-ایران

### چکیده:

ارزیابی عملکرد سوخت در شرایط حادثه یک چالش مهم در آنالیز ایمنی به شمار می‌رود. بدین منظور، کدهای محاسباتی مختص بررسی عملکرد میله سوخت توسعه یافته‌اند. این کدها به بررسی پدیده‌های حاکم بر رفتار میله سوخت در حین حادثه شامل تغییر فاز غلاف، اکسید شدن زیرکونیوم، تغییر شکل خزشی و شکست آلیاژ زیرکونیوم می‌پردازند. هدف پژوهش حاضر، بررسی عملکرد میله سوخت راکتور VVER در حین حادثه LOCA با استفاده از مجموعه کدهای FRAPCON4.0 و FRAPTRAN1.5 می‌باشد. نمونه مورد بررسی میله سوخت راکتور VVER در آزمایش IFA-650.6 است. مقایسه نتایج بدست آمده با دیگر نتایج تئوری و تجربی منتشر شده، مؤید اعتبار کد در آنالیز ترمومکانیکی میله سوخت VVER می‌باشد.

کلمات کلیدی: عملکرد میله سوخت، آنالیز ترمومکانیکی، کد FRAPCON، کد FRAPTRAN

### ۱. مقدمه:

در زمان وقوع حادثه در نیروگاه‌های هسته‌ای، امکان آسیب رسیدن به میله سوخت در دماهای بالا و نیز در اثر اختلاف فشار زیاد طرفین غلاف سوخت، وجود دارد. مشخصات شکست وابسته به پدیده‌های مختلف فیزیکی است، که در قالب مدل‌های مختلف در کدهای محاسباتی لحاظ می‌گردند. آزمایش‌های بسیاری به طور پیوسته روی مواد مختلف و شرایط متفاوت بهره‌برداری در راکتورهای آزمایشگاهی و تحقیقاتی انجام می‌گیرد و متناسب با آن، مدل‌های محاسباتی نیز به‌روز می‌گردند. در ابزارهای تحلیلی برای پیش‌بینی رفتار سوخت در شرایط حادثه معیارهای تجربی وجود دارد که بر مبنای آن زمانی که میله سوخت آن‌قدر ضعیف می‌شود تا به نقطه شکست (burst) برسند را تعیین می‌کند [۱].

در حادثه LOCA در راکتورهای آب سبک، آلیاژ زیرکونیوم در معرض دماهای بالا (بالای ۷۰۰ کلوین) و فشار بسیار زیاد داخل قرار می‌گیرد. این شرایط می‌تواند منجر به انبساط به سمت خارج غلاف (بادکردگی) بر اثر مکانیزم‌های خزش شده و نهایتاً منجر به شکست غلاف گردد. همچنین باد کردن غلاف سطح مقطع

زیرکانال برای عبور سیال آب را کاهش داده و باعث بسته شدن مسیر جریان در فازهای Reflood و Refill حادثه‌ی LOCA می‌شود [۲].

در حادثه LOCA یک معیار شکست لازم است، تا بتوان دما، زمان شکست غلاف، و همچنین تنش هوپ و کرنش محل ترکیدگی را تعیین کرد. رفتار غلاف در طول حادثه تحت کنترل تغییر فاز غلاف، اکسید شدن زیرکونیوم، تغییر شکل خزشی و شکست آلیاژ زیرکونیوم بوده که همگی در عرض چند دقیقه رخ می‌دهند. معیار شکست غلاف عموماً به عنوان موردی از معیارهای پذیرش LOCA نیست، اما آنالیز ایمنی حادثه LOCA بایستی شامل مدلی برای پیش‌بینی باد کردگی و ترکیدن میله سوخت با توجه به دمای غلاف و اختلاف فشار بین داخل و خارج غلاف به صورت تابعی از زمان باشد [۲].

در این پژوهش، عملکرد میله سوخت راکتور VVER در آزمایش IFA650.6 با استفاده از کد FRAPTRAN1.5 [۳] مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. روش مدل‌سازی

میله سوخت آزمایش IFA-650.6 از یک میله VVER انتخاب شده که در نیروگاه لویزا<sup>۱</sup> برای چهار سیکل تابش و میزان مصرف سوخت این میله ۵۵,۵ GWd/MTU می‌باشد. بعد از این مرحله و بازسازی سوخت، میله سوخت در معرض حادثه LOCA در راکتور هالدن<sup>۲</sup> قرار می‌گیرد [۴].

روش کلی آزمایش IFA-650.6 به این صورت است که، پیش از انجام آزمایش LOCA، توان راکتور تا رسیدن به یک سطح معین در میله‌ی سوخت تنظیم شده، سپس گرمکن با توان ثابت روشن می‌گردد. در فاز آماده‌سازی، راکتور (در اثر چرخش اجباری) با استفاده از مدار جریان خارجی کار می‌کند. پس از رسیدن به توان دلخواه سوخت، تجهیزات آزمایش از مدار خارجی جدا شده و اجازه داده می‌شود تا دماها در اثر چرخش طبیعی برای چند دقیقه پیش از وقوع حادثه‌ی LOCA، پایدار شوند. فاز blowdown از طریق باز کردن شیرها به تانک تخلیه آغاز می‌شود. در این فاز فشار خنک کننده به سرعت افت می‌کند [۲].

مشخصات و شرایط کلی میله‌ی UO<sub>2</sub> که در آزمایش IFA-650 مورد استفاده قرار گرفته، در جدول (۱) داده شده است. ابعاد میله سوخت و تاریخچه توان از اطلاعات میله سوخت اولیه بدست آمده است.

در کد FRAPCON4.0 [۵] خصوصیات غلاف E110 (Zr-1%Nb) وجود ندارد، بنابراین برای دوره زمانی پرتودهی اولیه ماده M5 در نظر گرفته شده است چرا که ترکیب شیمیایی یکسانی با E110 دارد. پروفایل توان محوری به صورت یکنواخت فرض شده است. براساس داده‌های فوق کد FRAPCON4 اجرا شده و در نهایت فایل آغازین کد FRAPTRAN ایجاد می‌گردد. این فایل شامل همان گازی است که از داده‌های

<sup>1</sup> Lovissa

<sup>2</sup> Halden

اولیه استخراج شده است. اما بعد از پرتو دهی اولیه، در مرحله ساخت مجدد میله سوخت، دوباره میله سوخت با فشار ۳۰ بار از آرگون و هیدوژن پر می شود. بنابراین به صورت دستی این مقادیر در فایل آغازین FRAPTRAN اصلاح می گردد. برخلاف کد FRAPCON4، خصوصیات غلاف E110 در پایگاه داده کد FRAPTRAN موجود است.

جدول (۱): داده های میله سوخت در آزمایش IFA 650.6 [۶]

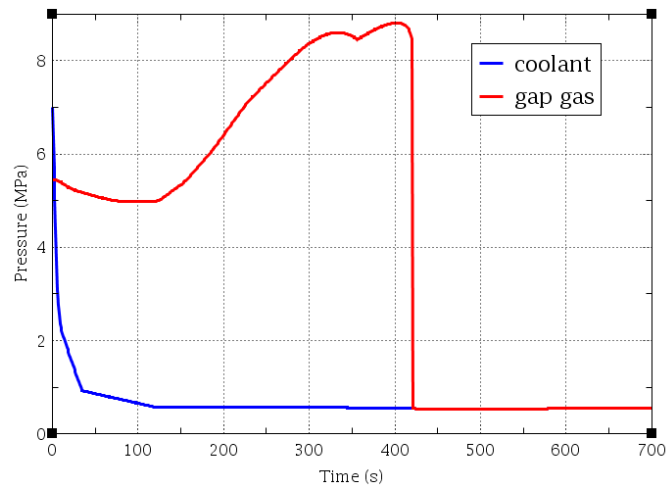
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۰/۱۱۱	ضخامت گپ (mm)	۷/۵۵	قطر قرص سوخت (mm)
UO <sub>2</sub>	جنس سوخت	۱/۴۸۴	قطر سوارخ داخلی پلت (mm)
E110 (Zr-1%Nb)	جنس غلاف	۱۰	طول پلت سوخت (mm)
۹۵٪ آرگون - ۵٪ هلیوم	گاز داخل میله	۴۸۰	طول میله سوخت (mm)
۳/۰	فشار داخل (MPa)	۹/۱۳	قطر خارجی غلاف (mm)
۵۵/۵	میزان مصرف سوخت (MWd/kgU)	۰/۶۷۹	ضخامت غلاف (mm)

همان طور که ذکر شد، هندسه خنک کننده برای این آزمایش یک شرایط حادثه LOCA نوعی می باشد که شامل یک میله سوخت داخل یک لوله داغ است. برای شروع آزمایش آب از داخل این لوله تخلیه می شود، و در نهایت اسپری فعال شده و راکتور خاموش می گردد تا آزمایش به پایان برسد. به جای مدل کردن این شرایط، ورودی کد FRAPTRAN به گونه ای تنظیم شده است که مقادیر دمای سطح غلاف اندازه گیری شده را به عنوان شرایط مرزی به کار ببرد. تاریخچه دمای سطح غلاف برای دو نقطه محوری موجود است. برای مدل کردن شرایط خنک کننده، میله به دو ناحیه تقسیم شده و تاریخچه دمایی برای هر کدام از ارتفاع های محوری برابر با دمای خنک کننده در همان ناحیه محوری در نظر گرفته شده است. به منظور ارضای این حالت که دمای خنک کننده و دمای سطح غلاف یکسان شود، ضریب انتقال حرارت بین غلاف و خنک کننده، بزرگ انتخاب شده است.

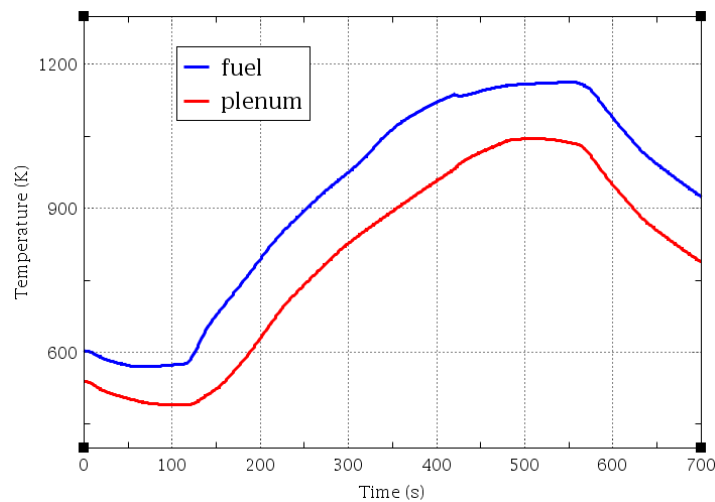
### ۳. نتایج مدل سازی

در این بخش، نتایج حاصل از مدل سازی آزمایش با استفاده از کد FRAPCON/FRAPTRAN ارائه شده و با دیگر نتایج منتشر شده مقایسه شده است. شکل (۱) تغییرات فشار خنک کننده و فشار گاز داخل میله سوخت را با زمان نشان می دهد. چنانچه از شکل مشخص است، فشار داخل میله تا فشار ۸/۸ مگاپاسکال افزایش می یابد تا این که به نقطه شکست در زمان ۴۲۰ ثانیه می رسد. در این زمان فشار داخل سریعاً کاهش یافته و به فشار سیستم می رسد. در شکل (۲) تغییرات دمای متوسط سوخت و گاز موجود در پلنوم نشان داده شده

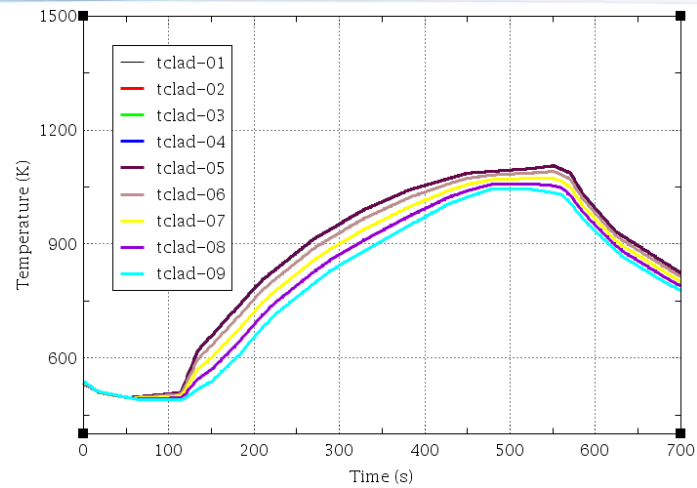
است. همچنین شکل (۳) بیانگر تغییرات دمای سطح غلاف (در ارتفاع‌های مختلف) می‌باشد. در این شکل‌ها زمان شروع گرم شدن (۱۲۰ s) و زمان خاموش‌سازی (۵۶۰ s) کاملاً مشخص است. در شکل (۴) تغییر طول غلاف و سوخت و در شکل (۵) میزان کرنش هوپ غلاف در ارتفاع‌های مختلف نشان داده شده است.



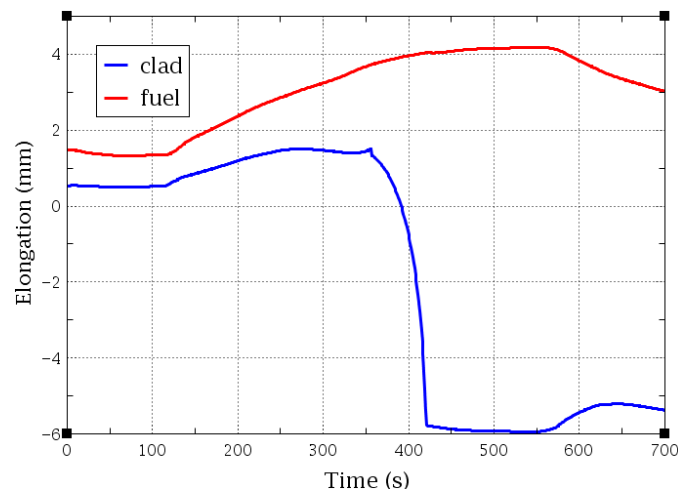
شکل ۱: تغییرات فشار در خنک‌کننده و گاز داخل میله سوخت



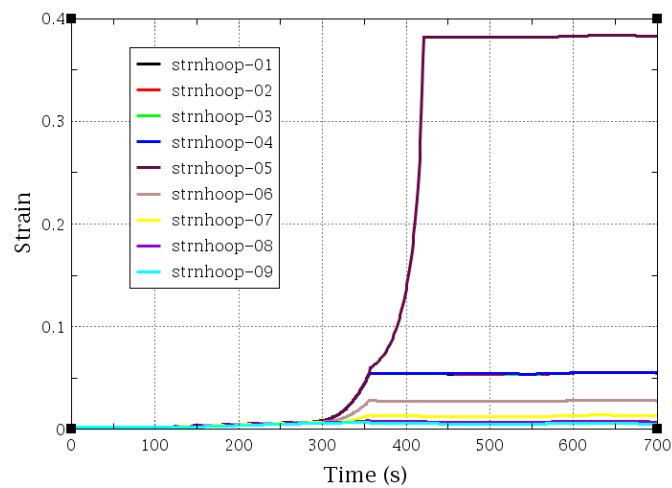
شکل ۲: تغییرات دمای متوسط سوخت و گاز پلنوم



شکل ۳: تغییرات دمای غلاف در ارتفاع‌های مختلف



شکل ۴: تغییر طول غلاف و سوخت



شکل ۵: کرنش هوپ غلاف در ارتفاع‌های مختلف

پارامترهای کلیدی محاسبه شده و مقایسه آن با سایر نتایج منتشر شده در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقدار مطلق سطح فشار داخل میله را نمی‌توان در طول آزمایش به صورت تجربی بدست آورد، اما به محض شکست غلاف فشار سریعاً تا سطح فشار سیستم کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که نتایج مدل‌سازی انجام شده با نتایج کد FRAPTRAN2.0 بسیار نزدیک است و با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در اندازه‌گیری‌های تجربی و تقریب‌های مدل‌سازی قابل قبول می‌باشد.

جدول (۲): مقایسه نتایج محاسبات با سایر نتایج منتشر شده

پارامتر	محاسبات FRAPTRAN1.5	تجربی [۶]	FRAPTRAN 2.0 [4]	FRAPTRAN -GENFLOW [6]	FRAPTRAN- QT1.4c [6]
زمان شکست (S)	۴۲۰	۵۲۵	۴۱۹	۵۳۰	۴۵۵
فشار قبل از شکست (MPa)	۸/۸	۶/۴	۸/۸	۴/۲	۴/۱
دمای غلاف قبل از شکست (°C)	۷۹۴	۸۳۰	-	۸۵۳	۸۴۰
ماکزیمم افزایش قطر غلاف	۳۶	۳۶	۳۶	۷۲	۸۹
افزایش ضخامت لایه اکسید	۱/۲	۲/۰	۱/۲	۱/۵	۳/۵

## ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش آنالیز ترمومکانیکی میله سوخت راکتور VVER در آزمایش IFA 650.6 با استفاده از مجموع کدهای FRAPCON4 و FRAPTRAN1.5 انجام گرفت. برخی از پارامترهای کلیدی ارائه شده و با دیگر نتایج منتشر شده مقایسه شد. این مقایسه نشان می‌دهد که کد FRAPTRAN1.5 موجود معتبر بوده و قابلیت مدل‌سازی و تحلیل ترمومکانیکی میله سوخت راکتور VVER در آن وجود دارد.

مراجع

- [1] Daniel de Souza Gomes, Antonio Teixeira Silva, Alfredo Abe, Claudia Giovedi and Marcelo Ramos Martins, "Simulation of The Effects of the Extend Fuel Rod Burn-Up under LOCA Scenario", International Nuclear Atlantic Conference, São Paulo, SP, Brazil, October 4-9, 2015.
- [2] Ali R. Massih, Lars Olof Jernkvist, "Assessment of data and criteria for cladding burst in loss-of-coolant accidents", Quantum Technologies, SSM 2015:46, 2015
- [3] K. J. Geelhood, W.G. Luscher, and J. M. Cuta, "FRAPTRAN-1.5: A computer code for the transient analysis of oxide fuel rods", Technical Report PNNL-19400, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, May 2014.
- [4] K. J. Geelhood, W.G. Luscher, and J. M. Cuta, "FRAPTRAN-2.0: Integral assessment", Technical Report PNNL-19400, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, May 2016.

- [5] Geelhood, K. J., W. G. Luscher, and C. E. Beyer, "FRAPCON-3.5: A computer code for the calculation of steady-state thermal-mechanical behavior of oxide fuel rods for high burnup", Technical Report NUREG/CR-7022, Vol. 1, US Nuclear Regulatory Commission.
- [6] Tero Manngård, Jan-Olof Stengård, "Evaluation of the Halden IFA-650 loss-of-coolant accident experiments 5, 6 and 7", Quantum Technologies, SSM 2014:19, 2014.