فناوری و انرژی هسته ای

Journal home page: http://Nucte.sbu.ac.ir

فصلنامه فناوری و انرژی هسته ای، دوره اول، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱، ۱-۸

آنالیز ترمومکانیکی میله سوخت راکتور VVER-1000 در طول حادثه از دست رفتن خنک کننده با استفاده از کد FRAPTRAN

معصومه دهقانی‌زاده[۱]، محسن خردمند سعدی*[۱]، غلامرضا جهان‌فرنیا[۱]

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۱۸

چکیده

ارزیابی عملکرد سوخت در شرایط حادثه یک چالش مهم در آنالیز ایمنی به شمار می‌رود. بدین منظور، کدهای محاسباتی متعددی 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 غلاف می‌پردازند. هدف پژوهش حاضر، بررسی عملکرد میله سوخت راکتور VVER-1000 در حین حادثه از دست رفتن خنک کننده مدار اول با استفاده از مجموعه کدهای FRAPCON-4.0 و FRAPTRAN-1.5 می‌باشد. نمونه مورد بررسی میله سوخت راکتور VVER-1000 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. علاوه بر این، نتایج شبیه سازی صورت گرفته نشان داد که علاوه بر معیارهای ایمنی فعلی در طراحی سیستم‌های ایمنی حادثه LOCA لازم است شکست غلاف نیز به عنوان دیگر معیار ایمنی درنظر گرفته شود. این موضوع هم اکنون توسط کمیسیون نظام ایمنی آلمان (RSK) در تحلیل حادثه LOCA اعمال میگردد.

واژه های کلیدی: عملکرد میله سوخت، آنالیز ترمومکانیکی، کد FRAPCON، کد FRAPTRAN

۱- مقدمه

عموماً میله سوخت به عنوان اولین سد در برابر نشت مواد رادیواکتیو درنظر گرفته می‌شود. با این وجود در زمان وقوع حادثه، امکان آسیب به میله سوخت در اثر دماهای بالا و نیز وجود اختلاف فشار زیاد در 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 (Gomes et.al, 2015).

حادثه از دست رفتن خنک کننده مدار اول (LOCA) در زمره مهمترین حوادث مبنای طرح در

* Corresponding Author E-mail: Mohsen.Kheradmand@gmail.com

راکتورهای آب سبک است که فرکانس رخداد آن قابل توجه است. توالی رویدادها در چند دقیقه اولیه پس از شروع حادثه به سه فاز تقسیم می‌گردد: الف) فاز Blowdown که در آن خنک کننده با شدت فراوان از محفظه راکتور به بیرون می‌ریزد. ب) فاز Refill که طی آن سیستم خنک کننده اضطراری قلب (ECCS) شروع به پُرکردن محفظه فشار تا زیر قلب راکتور می‌کند. ج) فاز Reflood که طی آن سطح آب به حد کافی بالا می‌رود تا قلب را خنک کند. فاز Blowdown در حدود ۲۰ ثانیه طول می‌کشد و طی آن دمای غلاف تا حدود ۱۲۵۰ درجه کلوین بالا می‌رود. فاز Refill از زمان تزریق آب بور دار شروع شده و حدود ۱۰ تا ۱۵ ثانیه طول می‌کشد با این وجود به علت انتقال حرارت ضعیف بین میله سوخت و مخلوط آب و بخار موجود در قلب، دمای غلاف همچنان به افزایش خود ادامه می‌دهد و به حدود ۱۳۰۰ درجه کلوین می‌رسد. فاز Reflood از زمانیکه سطح آب به کف میله‌های سوخت می‌رسد شروع شده و پس از دوره‌ای در حدود ۶۰ ثانیه دمای غلاف، رو به کاهش می‌گذارد. تاکنون معیارهای پذیرش حادثه LOCA در طراحی سیستم ECCS به موارد زیر محدود بوده است: الف) ماکزیمم دمای غلاف از ۱۴۷۷ درجه کلوین تجاوز نکند. ب) کسر اکسید شدگی غلاف از ۱۷٪ ضخامت غلاف تجاوز نکند. ج) مدل‌هایی به منظور برهمکنش‌های بین بخار و فلز آلیاژ زیرکونیوم درنظر گرفته شود.

بهر حال در این حادثه، از دست رفتن قدرت خنک کنندگی در کنار افت فشار شدید، تنش بسیار بزرگی بر میله های سوخت اعمال می‌کند. 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 Refill و Reflood می‌شود (Massih and Jernkvist, 2015). توجه به این نکته سبب شده تا برخی از واحدهای قانونی علاوه بر الزامات فوق، الزامات دیگری در خصوص شکست غلاف را برای حادثه LOCA درنظر بگیرند. به عنوان مثال کمیسیون نظام ایمنی آلمان RSK، الزام می‌دارد تا تعداد کل میله‌های سوخت آسیب دیده طی حادثه LOCA از ۱۰٪ میله‌های بارگذاری شده تجاوز نکند. بنابراین آنالیز ایمنی حادثه LOCA بایستی شامل مدلی برای پیش‌بینی میزان 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 (Massih and Jernkvist, 2015; Manngård et.al, 2011). 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. در این پژوهش، عملکرد میله سوخت راکتور VVER در آزمایش IFA650.6 با استفاده از کد FRAPTRAN-1.5 (Geelhood et.al, 2014) مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش مدل‌سازی

میله سوخت آزمایش IFA-650.6 از یک راکتور VVER-1000 به نام لوویزا[1] که در کشور فنلاند واقع است انتخاب شده است. این میله برای چهار سیکل تحت تابش قرار گرفته و میزان مصرف سوخت این میله به 55.5 GWd/MTU رسیده است. بعد از این مرحله و بازسازی سوخت، میله سوخت در معرض حادثه LOCA در راکتور هالدن[2] قرار می‌گیرد (Geelhood et.al, 2016). 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 آماده سازی، 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 (Massih and Jernkvist, 2015).

مشخصات و شرایط کلی میله‌ی UO_2 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.

جدول۱- داده‌های میله سوخت در آزمایش IFA 650.6 (Manngård and Stengård, 2016)

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
قطر قرص سوخت (mm)	7.55	ضخامت گپ (mm)	0.111
قطر سوراخ داخلی پلت (mm)	1.484	جنس سوخت	UO_2
طول پلت سوخت (mm)	10	جنس غلاف	E110 (Zr-1%Nb)
طول میله سوخت (mm)	480	گاز داخل میله	٪95 آرگون- ٪5 هلیوم
قطر خارجی غلاف (mm)	9.13	فشار داخل (MPa)	3.0
ضخامت غلاف (mm)	0.679	میزان مصرف سوخت (MWd/kgU)	55.5

غلاف مورد استفاده در راکتورهای VVER-1000 آلیاژی شامل زیرکونیوم و ۱٪ نئوبیوم است که نام تجاری آن EH-110 می‌باشد. در کد FRAPCON-4.0 (Geelhood et.al. 2015) خصوصیات این غلاف وجود ندارد، بنابراین برای دوره زمانی پرتودهی اولیه ماده M5 در نظر گرفته شده است. ترکیب شیمیایی این ماده با EH-110 یکسان می‌باشد. پروفایل توان محوری به صورت یکنواخت فرض شده است. براساس داده‌های فوق کد FRAPCON-4.0 اجرا شده و فایل آغازین کد FRAPTRAN ایجاد می‌گردد. در مرحله ساخت مجدد میله سوخت جهت بارگذاری در راکتور هالدن، پاره‌های شکافت گازی تولید شده در مرحله پرتودهی تخلیه شده و دوباره میله سوخت با فشار ۳۰ بار از آرگون و هیدوژن پر می‌شود. بنابراین در فایل آغازین FRAPTRAN، مقادیر گازهای موجود در میله به صورت دستی اصلاح گردید. برخلاف کد FRAPCON-4.0، خصوصیات غلاف EH-110 در پایگاه داده کد FRAPTRAN موجود است.

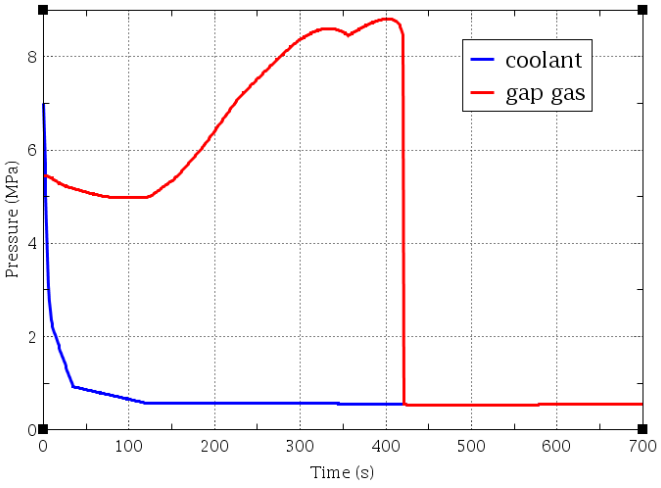
همان‌طور که ذکر شد، هندسه خنک‌کننده برای این آزمایش یک شرایط حادثه LOCA نوعی می‌باشد که شامل یک میله سوخت داخل یک لوله داغ است. برای شروع آزمایش آب از داخل این لوله تخلیه می‌شود، و در نهایت اسپری فعال شده و راکتور خاموش می‌گردد و آزمایش به پایان می‌رسد. ورودی کد FRAPTRAN به گونه‌ای تنظیم شده است که مقادیر دمای سطح غلاف اندازه‌گیری شده را به عنوان شرایط مرزی به کار ببرد. تاریخچه دمای سطح غلاف برای دو نقطه محوری موجود است. برای مدل کردن شرایط خنک‌کننده، میله به دو ناحیه تقسیم شده و تاریخچه دمایی برای هر کدام از ارتفاع‌های محوری برابر با دمای خنک‌کننده در همان ناحیه محوری در نظر گرفته شده است. به منظور ارضای این حالت که دمای خنک‌کننده و دمای سطح غلاف یکسان شود، ضریب انتقال حرارت بین غلاف و خنک‌کننده، بزرگ

انتخاب شده است.

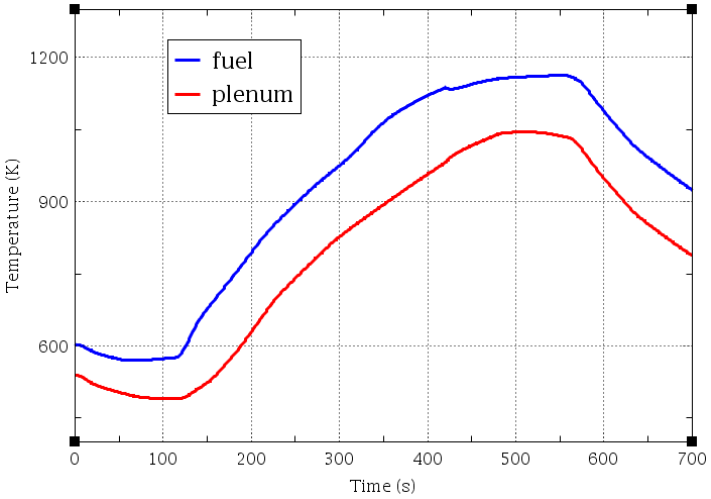
۳- نتایج مدل‌سازی

در این بخش، نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمایش با استفاده از کد FRAPCON/FRAPTRAN ارائه شده و با دیگر نتایج منتشر شده مقایسه شده است. شکل (۱) تغییرات فشار خنک‌کننده و فشار گاز داخل میله سوخت را با گذشت زمان نشان می‌دهد. چنانچه از شکل مشخص است، فشار داخل میله تا فشار ۸/۸ مگاپاسکال افزایش می‌یابد تا این‌که پس از ۴۲۰ ثانیه به نقطه شکست می‌رسد. در این زمان فشار داخل سریعاً کاهش یافته و به فشار سیستم می‌رسد.

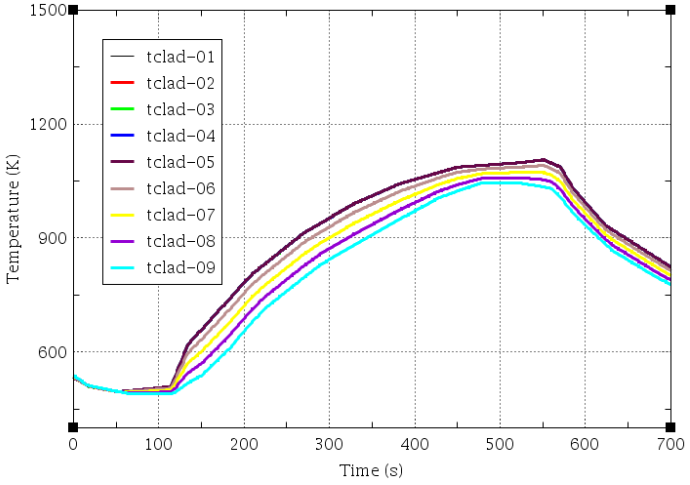
در شکل (۲) تغییرات دمای متوسط سوخت و گاز موجود در پلنوم نشان داده شده است. همچنین شکل (۳) بیانگر تغییرات دمای سطح غلاف (در ارتفاع‌های مختلف) می‌باشد. در این شکل‌ها زمان شروع گرم شدن (ثانیه ۱۲۰) و زمان خاموش‌سازی (ثانیه ۵۶۰) کاملاً مشخص است. همانگونه که از شکل (۳) نتیجه گرفته می‌شود، در حادثه LOCA اعمال شده، دمای سطح غلاف از معیار ۱۴۷۷ درجه کلوین تجاوز نمی‌کند. با این وجود در طول حادثه غلاف به نقطه شکست خود رسیده است. بنابراین لازم است در آنالیز حادثه LOCA، معیار شکست غلاف نیز در کنار سایر معیارها درنظر گرفته شود.



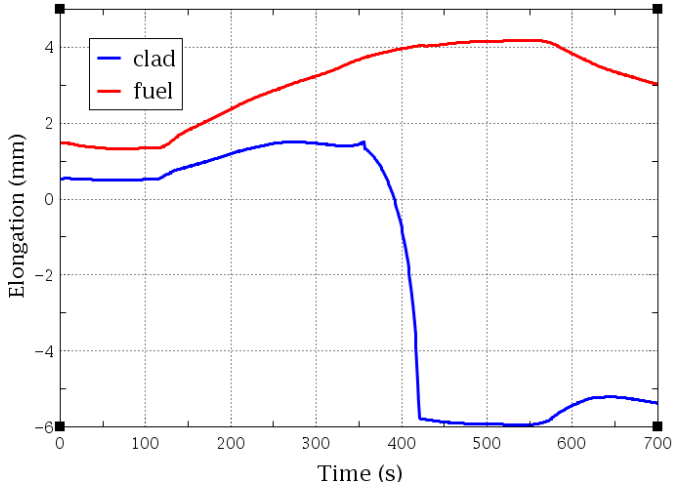
شکل ۱- تغییرات فشار در خنک‌کننده و گاز داخل میله سوخت



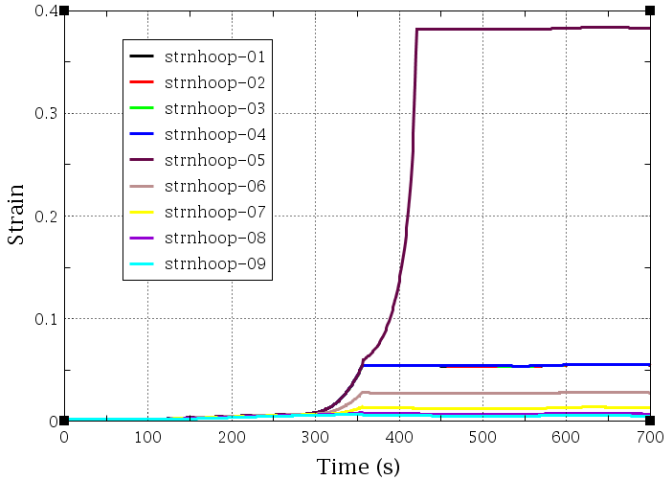
شکل ۲- تغییرات دمای متوسط سوخت و گاز پلنوم



شکل ۳- تغییرات دمای غلاف در ارتفاع‌های مختلف



شکل ۴:-تغییر طول غلاف و سوخت



شکل ۵-کرنش هوپ غلاف در ارتفاع‌های مختلف

در شکل (۴) تغییر طول غلاف و سوخت و در شکل (۵) میزان کرنش هوپ غلاف در ارتفاع‌های مختلف نشان داده شده است. در این دو شکل نقطه شکست غلاف پس از ۴۲۰ ثانیه بوضوح مشخص است.

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 FRAPTRAN-2.0 بسیار نزدیک است که 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*	FRAPTRAN2.0 **	FRAPTRAN-GENFLOW*	FRAPTRAN-QT1.4c *
زمان شکست (S)	420	525	419	530	455
فشار قبل از شکست (MPa)	8.8	6.4	8.8	4.2	4.1
دمای غلاف قبل از شکست (°C)	794	830	-	853	840
ماکزیمم افزایش قطر غلاف	36	36	36	72	89
افزایش ضخامت لایه اکسید	1.2	2.0	1.2	1.5	3.5

* Manngård and Stengård, 2016
** Geelhood *et.al*, 2016

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش آنالیز ترمومکانیکی میله سوخت راکتور VVER-1000 در آزمایش IFA 650.6 با استفاده از مجموع کدهای FRAPCON-4.0 و FRAPTRAN-1.5 انجام گرفت. برخی از پارامترهای کلیدی ارائه شده و با دیگر نتایج منتشر شده مقایسه شد. این مقایسه نشان می‌دهد که کد FRAPTRAN-1.5 موجود معتبر بوده و قابلیت مدل‌سازی و تحلیل ترمومکانیکی میله سوخت راکتور VVER در آن وجود دارد. از طرف دیگر نتایج آزمایش و شبیه‌سازی نشان داد که در حادثه LOCA علاوه بر معیارهایی که تاکنون مورد استفاده قرار می‌گرفت، لازم است معیاری جهت شکست غلاف نیز درنظر گرفته شود موضوعی که هم اکنون توسط واحد قانونی نظام ایمنی آلمان لحاظ می‌گردد.

پی نوشت ها

[1] Loviissa
[2] Halden

مراجع

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.

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

Tero Manngård, Lars Olof Jernkvist, Ali R. Massih, " Evaluation of loss of coolant accident simulation tests with the fuel rod analysis code FRAPTRAN-1.4", Quantum Technologies AB, Report TR11-008V1, 2011

[4] 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.

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.

Geelhood, K. J., W. G. Luscher, P.A. Raynaud, I.E. Porter, “FRAPCON-4.0: A computer code for the calculation of steady-state thermal-mechanical behavior of oxide fuel rods for high burnup”, PNNL-19418, Vol.1 Rev.2, 2015.

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.

Nuclear Technology and Energy

Journal home page: http://Nucte.sbu.ac.ir

Nuclear Technology and Energy, Vol. 1, No. 1, Spring 2022, 1-8

Thermo-Mechanical Analysis of VVER-1000 Fuel Rods during Loss of Coolant Accident using FRAPTRAN code

M. Dehghanizadeh[1], M. Kheradmand Saadi*[1], Gh. Jahanfarnia[1]

[1]Department of Nuclear Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: 19 - 1 - 2021
Accepted: 9 - 12 - 2021

Abstract

Evaluating fuel performance in the event of an accident is an important challenge in safety analysis. To this end, several computational codes have been developed to evaluate the performance of the developed fuel rod. These codes examine the phenomena that governing the behaviour of the fuel rod during an accident include sheath phase alteration, zirconium oxidation, creep deformation, and sheath alloy failure. The aim of the present study is to investigate the performance of the VVER-1000 reactor fuel rod during an LOCA accident using FRAPCON-4.0 and FRAPTRAN-1.5 codes. The sample examined is the VVER-1000 reactor fuel rod in the IFA-650.6 test. Comparison of the obtained results with other published theoretical and experimental results confirms the validity of the code in thermo mechanical analysis of VVER fuel rod. In addition, the simulation results showed that the current safety criteria in the design of LOCA safety systems, it is necessary to consider sheath failure as another safety criterion. This is currently being addressed by the German Commission on Safety (RSK) in the analysis of the LOCA incident.

Keywords: Fuel rod performance, thermo mechanical analysis, FRAPCON code, FRAPTRAN code

*** Corresponding Author E-mail: Mohsen.Kheradmand@gmail.com**