



آنالیز حادثه SBO در راکتور VVER-1000/446 با استفاده از کد RELAP5/SCDAP

سلطان محمدی، سعید - پیروزمند، احمد*

دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته‌ای

چکیده:

آنالیز رفتار قلب راکتور در طی شرایط حوادث شدید خصوصاً بعد از حادثه فوکوشیما اهمیت بسیاری پیدا کرده است. در این مقاله با مدلسازی راکتور VVER-1000/V446 نیروگاه هسته‌ای بوشهر در شرایط عدم وجود تمام منابع مورد نیاز تامین جریان برق متناوب نیروگاه (SBO)^۱، تلاش شد تا دنباله‌ی رویدادهای مرتبط بررسی شده و میزان تاثیرگذاری این حادثه بر قلب راکتور سنجیده شود. مدلسازی این حادثه با کد هسته‌ای RELAP5/SCDAP-3.4 صورت گرفته است و صحت سنجی مدل حاصل قبل از شروع گرمایش قلب^۲ با داده‌های موجود در FSAR^۳ صورت گرفته است. در ادامه رفتار قلب بعد از وقوع گرمایش مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: Station Blackout, VVER-1000/V446, RELAP5/SCDAP, Severe Accident

Analysis of Station Blackout (SBO) Accident in VVER-1000/V446 Reactor Using RELAP5/SCDAP Code

Saied Soltanmohammadi, Ahmad Pirouzmand*

Department of Nuclear Engineering, School of Mechanical Engineering, Shiraz University

Abstract:

Analysis of the reactor core behavior during severe accidents, especially after the Fukushima accident, has become very crucial. In this paper, with modeling the VVER-1000/V446 nuclear reactor at station blackout (SBO) conditions, the sequence of related events and the effect of this accident on the reactor core are investigated. Modeling the accident is carried out by RELAP5/SCDAP-3.4 code and is verified by comparing the model results with plant FSAR data before the onset of core heat up. The behavior of core is examined after the core heat up using the developed model as well.

Keywords: Severe Accident, RELAP5/SCDAP, VVER1000/V446, Station Blackout

مقدمه :

تجارب بین المللی بدست آمده از کارکرد نیروگاه‌های هسته‌ای نشان می‌دهد که از دست دادن جریان برق داخلی (On-Site) و خارجی (Off-Site) و عدم در دسترس بودن ژنراتورهای تغذیه برق اضطراری از مهمترین حوادث شکل گرفته در راکتورهای هسته‌ای است. درس‌های گرفته شده از حوادث SBO رخ داده

¹ Station Blackout

² Core Heat up

³ Final Safety Analyses Report



در سال‌های اخیر و گذشته آن‌را به عنوان یک معیار محدود کننده در طراحی حاشیه‌های ایمن^۱ راکتور، تهیه دستورالعمل‌های مدیریت حوادث شدید و تست‌های استرس^۲ برای بسیاری از نیروگاه‌های هسته‌ای معرفی نموده است [۱-۳]. با توجه به طراحی خاص راکتور VVER-1000/446 و اهمیت درک پدیده‌های مختلف حوادث شدید، زمانبندی رویدادها و تدوین نقش اپراتور و سایر اقدامات مهار کننده، در این مقاله حادثه SBO توسط کد محاسباتی RELAP5/SCDAP در شرایط عدم دخالت اپراتور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

روش کار:

ابتدا مدل راکتور VVER-1000/446 با استفاده از داده‌های FSAR و سایر مدارک نیروگاه در کد RELAP5/SCDAP پیاده‌سازی و مورد صحت‌سنجی قرار گرفت [۴]. سپس سناریوی حادثه SBO مطابق اطلاعات موجود در فصل پانزدهم FSAR در مدل موجود اعمال گردید. جدول (۱) دنباله رویدادهای این حادثه را بر حسب زمان نشان می‌دهد. در لحظه‌ی شروع حادثه تمامی پمپ‌های خنک‌کننده مدار اول و همچنین پمپ‌های اصلی و اضطراری آب تغذیه مدار دوم از دسترس خارج می‌شوند و جریان برق فشارنده^۳ و شیرهای BRU-K نیز قطع می‌گردند. مطابق داده‌های FSAR گرمایش قلب در حدود ۷۰۰۰ ثانیه بعد از شروع حادثه اتفاق می‌افتد. در جدول شماره (۲) مقادیر پارامترهای اصلی راکتور در مدل‌سازی با کد RELAP5/SCDAP با مقادیر موجود در FSAR مقایسه شده است. لازم به ذکر است در مدل‌سازی صورت گرفته حادثه پس از گذشت ۲۰۰ ثانیه که راکتور در حالت پایدار عمل می‌کند اعمال گردیده است و در نمودارهایی که در بخش نتایج آورده شده اند به خوبی قابل مشاهده است. همچنین نودبندی مدل ورودی کد RELAP5/SCDAP در شکل (۱) قابل مشاهده است.

جدول (۱): دنباله‌ی رویداد‌های مرتبط با زمان طی حادثه‌ی SBO در راکتور بوشهر [۵]

Time moment, s	Event	Interlocks, setpoint for actuation or other reason
0.0	Trip of all RCP sets Trip of the main and auxiliary feedwater systems of the secondary side Trip of makeup-blowdown system of the primary system BRU-K disconnection Disconnection of PRZ system power supply	Loss of all ac off-site and on-site power supply sources (power unit blackout)
0.6	Closing the turbine generator stop valves	Turbine emergency protection action
1.4	Scram signal generation	NPP blackout
1.7	The onset of control rod motion	Emergency protection action
5.0	BRU-A opening	Reaching SG pressure of 7.15 MPa
2800.0	SG drainage	
7000.0	Onset of the core heat-up	

¹ Safety Margins

² Stress Tests

³ Pressurizer

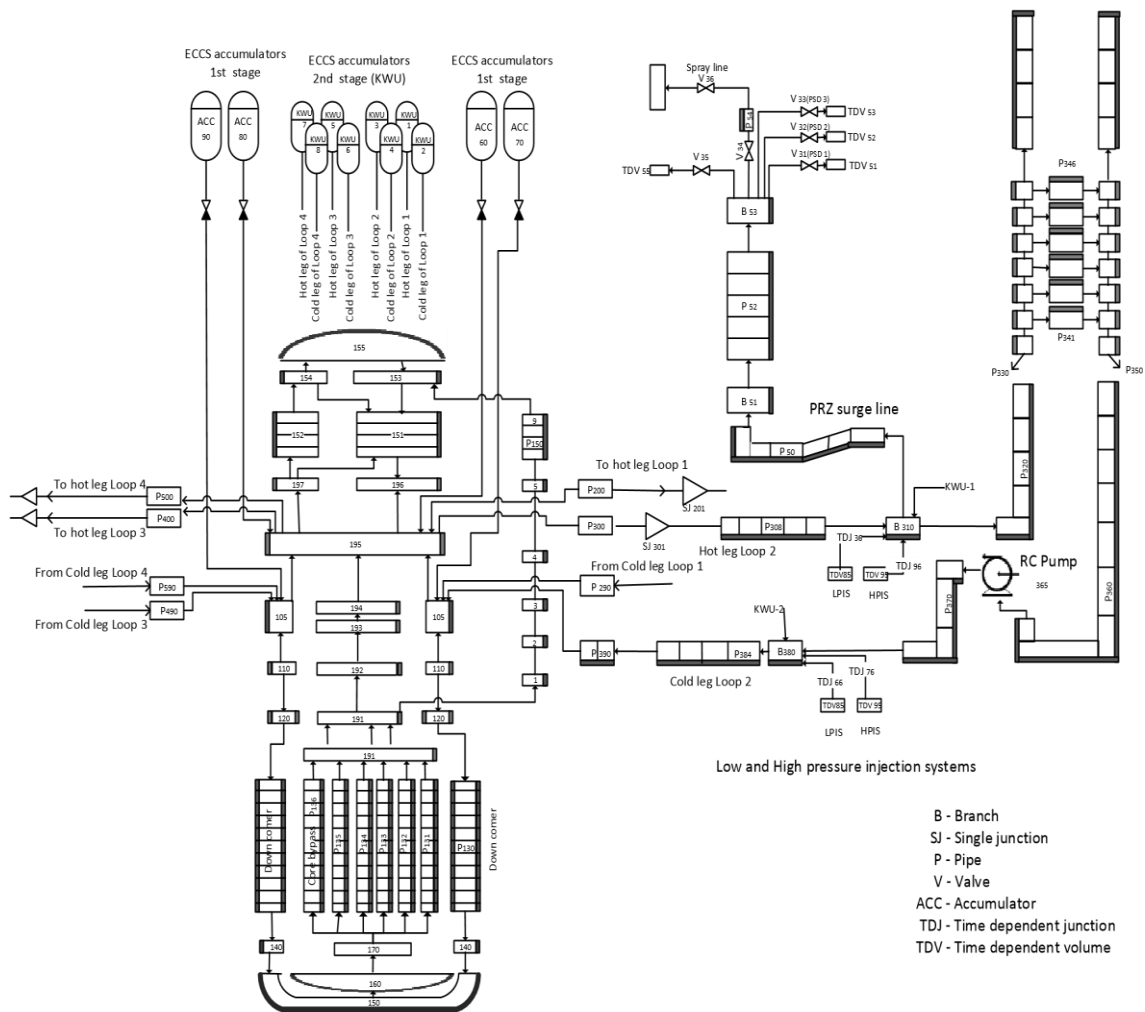


10000.0	End of calculation	
---------	--------------------	--

جدول (۲): مقایسه مقادیر پارامترهای موجود در FSAR برای کارکرد در حالت پایدار راکتور VVER1000/V446 نیروگاه

بوشهر با مقادیر حاصل از مدل‌سازی توسط کد RELAP5/SCDAP

Parameter	Design value [5]	RELAP5/SCDAP
Core power (MW)	3120	3120
Average coolant temperature at reactor outlet, (K)	594	594
Maximum coolant temperature at reactor inlet, (K)	564	564
Primary pressure, (MPa)	15.7	15.7
Mass flow rate through one loop, (kg/s)	4400	4403
Steam mass flow rate through SG (kg/s)	408	406
Steam generator water level (m)	2.4	2.35
Steam pressure in the SG steam header (MPa)	6.28	6.27
Steam temperature in the SG steam header (K)	551	551



شکل (۱): نودبندی مدل ورودی کد RELAP5/SCDAP برای مدار اولیه راکتور VVER1000/V446 [۴]

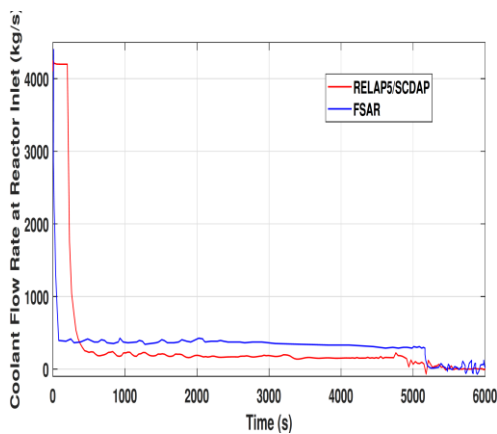


نتایج :

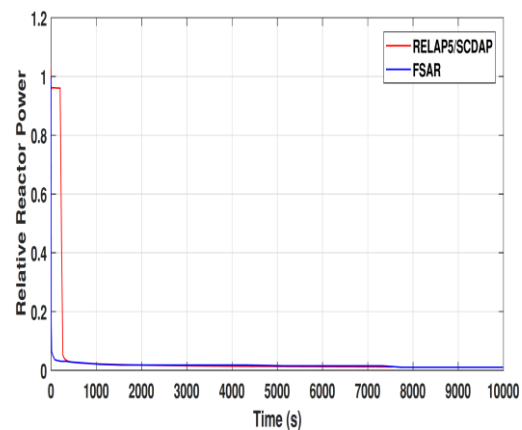
شرایط قلب قبل از گرمایش:

شکل (۱) نتایج حاصل از تحقیق را با داده های FSAR مقایسه می کند. همانطور که قابل مشاهده است پس از قطع کامل جریان برق متناوب نیروگاه پمپ ها خاموش شده و فشار مدار اول به سرعت کاهش می یابد. با رسیدن مقدار آن به $14,7 \text{ MPa}$ سیگنال خاموشی ارسال شده و با ورود میله های کنترل به داخل قلب، راکتور خاموش می شود و گرمای واپاشی^۱ به اصلی ترین منبع حرارتی راکتور تبدیل می شود که این پدیده باعث ایجاد گردش طبیعی خنک کننده و برداشت حرارت از قلب می شود. (شکل ۲- الف) و (ب)).

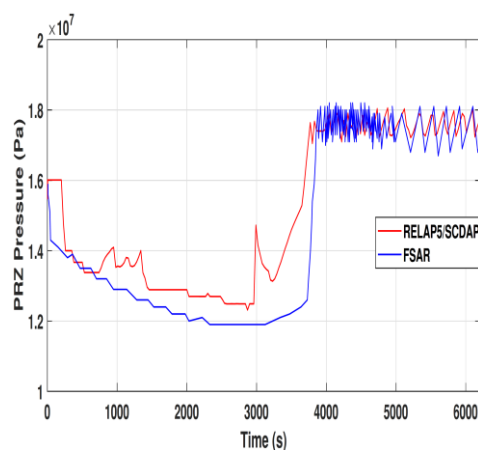
به علت کاهش بودن روند تولید گرمای واپاشی و همچنین وجود گردش طبیعی خنک کننده در مدار اول و به دنبال آن برداشت حرارت توسط سیال مدار ثانویه، فشار مدار اول روندی کاهشی پیدا میکند. از طرفی به علت قطع شدن پمپ های مدار دوم و به دنبال آن افزایش فشار در مولدهای بخار^۲ شیرهای کنترل فشار



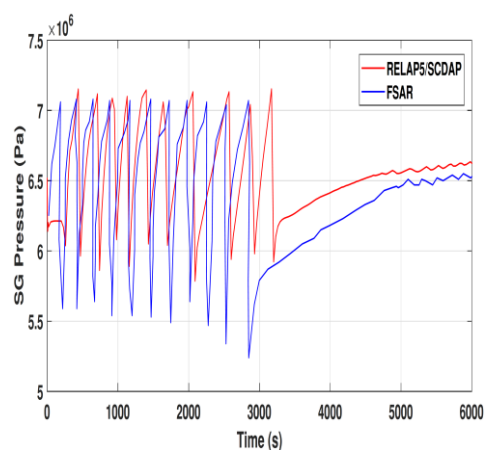
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

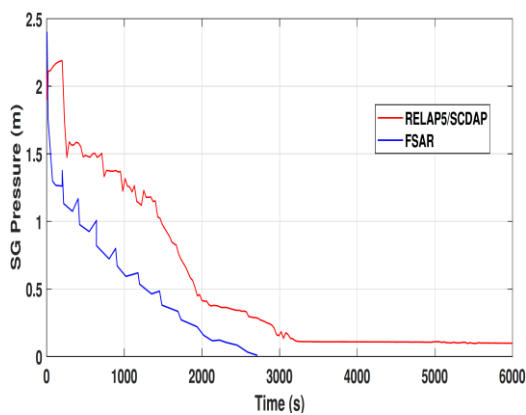
¹ Decay Heat

² Steam Generator

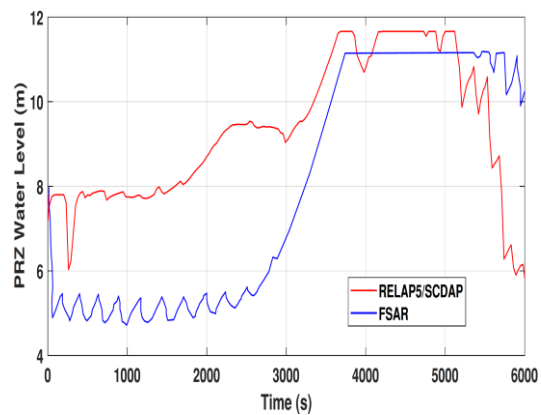


شکل (۲): الف) توان نسبی راکتور، ب) دبی سیال خنک کننده در ورودی قلب، ج) فشار در PRZ، د) فشار در SG در BRU-A به صورت متوالی باز و بسته می‌شوند تا از این طریق مقدار فشار در یک بازه مشخص ثابت بماند اما این باز و بست متوالی باعث خروج بخار از SG شده و موجودی آب مدار دوم کاهش می‌یابد. پس از آن روند افزایش ناگهانی فشار در مدار اول مشاهده می‌شود. (شکل ۲ - ج) و (د)).

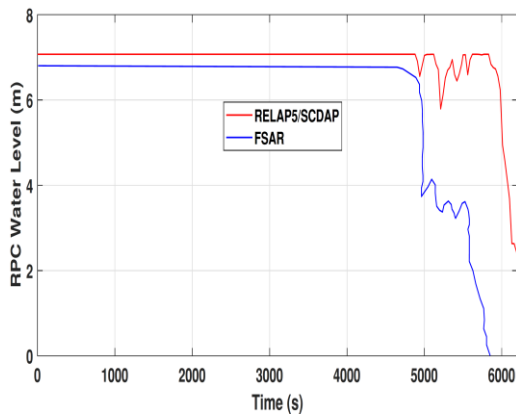
همچنین همانطور که در شکل (۳) قابل مشاهده است در ابتدای بروز حادثه و با کاهش فشار مدار اول موجودی آب داخل PRZ با خارج شدن به مدار کاهش یافته و سطح آب داخل آن دچار افت ناگهانی می‌شود. اما پس از آن به دنبال افزایش فشار ناشی از بالا رفتن دمای خنک کننده و عدم تبادل حرارت در مولد بخار و همچنین در دسترس نبودن اسپری آب در فشارنده به علت قطع برق، سطح آب بالا رفته و فشار در قسمت فوقانی PRZ افزایش می‌یابد و باعث باز و بسته شدن خودکار شیرهای کنترل و ایمنی فشارنده^۱ شده و موجودی سیال خنک کننده مدار اول کاهش می‌یابد. سطح آب موجود در داخل PRZ برای مدتی حدوداً ثابت شده و پس از آن کاهش می‌یابد ضمن اینکه سطح آب SG روند کاهشی تا اتمام سیال را دارد.



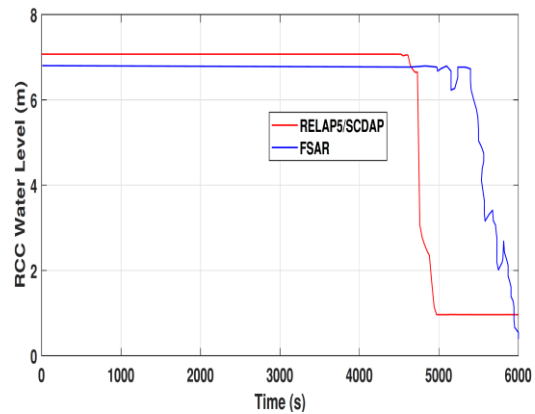
(ب)



(الف)



(د)



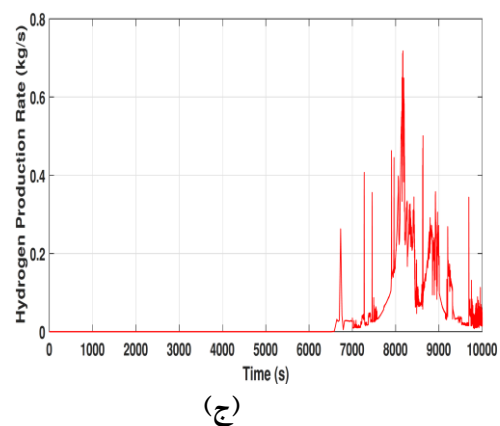
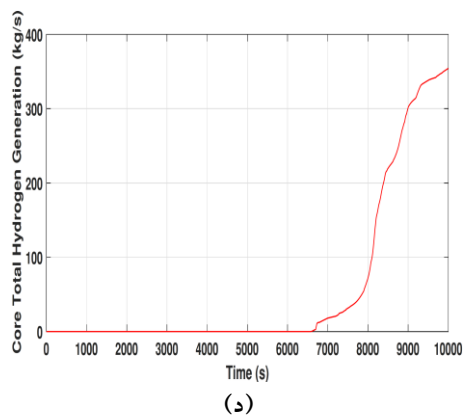
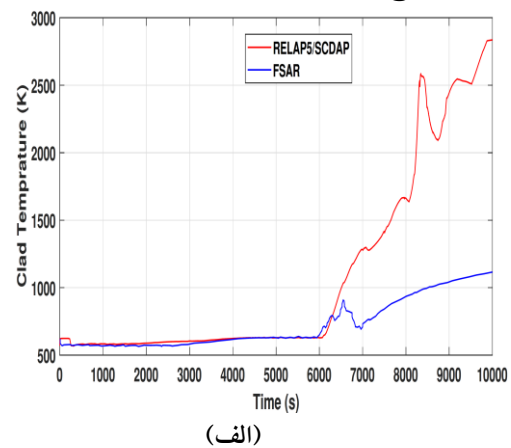
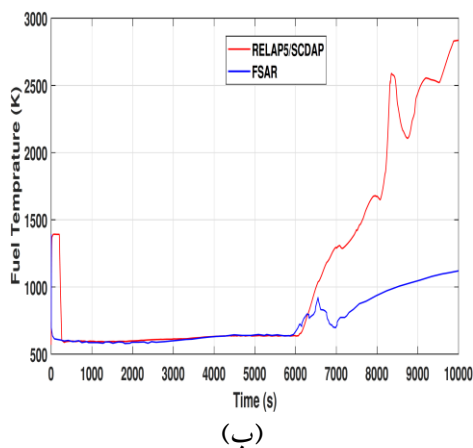
(ج)

¹ Pressurizer PSD



شکل (۳): الف) سطح آب موجود در PRZ، ب) سطح آب موجود در SG، ج) سطح آب در RCC^۱ و د) سطح آب در RPC^۲ شرایط قلب پس از گرمایش:

همزمان با افزایش دما و فشار مدار اول و دوم و از دست رفتن سیال خنک کننده در هر دو مدار و از طرفی عدم وجود سیستم های خنک کننده اضطراری به علت نبود جریان برق، دمای بخش های مختلف میله های سوخت از جمله غلاف و قرص سوخت افزایش پیدا می کند. با شروع این گرمایش تولید هیدروژن نیز آغاز می شود. در این مرحله، از واکنش اکسیداسیون غلاف سوخت می توان به عنوان اصلی ترین عامل گرمایش سوخت در کنار انرژی حاصل از واپاشی و دلیل اصلی وجود اختلاف بین نتایج پس از گرمایش قلب نام برد. همانطور که در شکل ۴- الف) و ب) قابل مشاهده است افزایش دمای قرص سوخت و غلاف از زمان حدود ۶۰۰۰ ثانیه اتفاق می افتد و تا آنجا که ساختارهای میله سوخت شروع به متخلخل شدن و بعد از آن ذوب شدن کنند، این روند سریع افزایش دما ادامه پیدا می کند. در این دوره نرخ تولید هیدروژن متفاوت است و می توان نرخ و مقدار کل هیدروژن آزاد شده را در شکل ۳- ج) و د) مشاهده کرد. مطابق شکل حداکثر نرخ تولید هیدروژن برابر با ۰٫۷۲ kg و مقدار کل هیدروژن تولید شده برابر با ۳۵۴ kg می باشد.



¹ Reactor Collection Chamber

² Reactor Pressure Chamber



شکل (۴): الف) ماکزیمم دمای غلاف سوخت. ب) ماکزیمم دمای قرص سوخت. ج) نرخ هیدروژن تولیدی (د) مقدار کل هیدروژن تولیدی در قلب راکتور

نتیجه گیری:

در این تحقیق با مدلسازی اجزاء مدار اول و دوم راکتور VVER-1000/446 بوسیله کد RELAP5/SCDAP به بررسی رفتار قلب راکتور در طی حادثه SBO در شرایط عدم دخالت اپراتور پرداخته شد. با وجود اینکه قبل از وقوع گرمایش قلب نتایج با داده های FSAR نیروگاه تطابق نزدیکی داشتند با این وجود به علت وقوع پدیده اکسیداسیون و گرمای ناشی از آن گرمایش قلب سریع تر روی می دهد. نتایج این تحقیق اطلاعات مهمی از جمله در مورد زمانبندی دنباله حوادث بمنظور دخالت اپراتور و همچنین میزان هیدروژن تولیدی از اکسیداسیون که اهمیت بالایی در تدوین روش های مهار هیدروژن دارد در اختیار قرار می دهد. با توجه با آنالیز صورت گرفته زمان شروع اکسیداسیون غلاف، اولین پارگی غلاف سوخت و شروع نشت محصولات شکافت از سوخت به ترتیب در ۶۵۲۰، ۸۴۴۴ و ۷۹۴۲ ثانیه بعد از شروع حادثه روی می دهد.

مراجع:

- [1]: Vienna: International Atomic Energy Agency, "Design provisions for withstanding station blackout at nuclear power plants", (2015).
- [2]: B.P. Atanasova, A.E. Stefanova and P.P. Groudev "VVER 1000 SBO calculations with pressurizer relief valve stuck open with ASTEC computer code", Annals of Nuclear Energy, 46, pp. 121-127. (2012).
- [3]: R. Gencheva, A. Stefanova, P. Groudev, B. Chatterjee and D. Mukhopadhyay, "Study of in-vessel melt retention for VVER-1000/v320 reactor" Nuclear Engineering and Design, 298, pp. 208-217. (2016).
- [۴] قاسمی ع، پیروزمند ا "آنالیز پدیده های ذوب قلب و رفتار محفظه پایین راکتور VVER1000/V446 در شرایط حادثه سخت ناشی از LBLOCA" بیست و سومین کنفرانس هسته ای ایران (۱۳۹۵)
- [5]: Atomic Energy Organization of Iran (AEOI), "Final Safety Analysis Report (FSAR) for BNPP Accident Analysis", (2007).