

## بررسی اثر حادثه SGTR بر روی پارامترهای ترموهیدرولیکی مدار اولیه نیروگاه VVER-1000

عباس زارع<sup>۱</sup>، محمدرضا نعمت الهی<sup>۲</sup>، کمال حداد، خسرو جعفر پور، مسعود امین مظفری

بخش مهندسی هسته‌ای دانشگاه شیراز

<sup>1</sup>kourosh.zare@gmail.com

<sup>2</sup>nema@shirazu.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق تغییرات پارامترهای مدار اولیه تحت شرایط حادثه SGTR (Steam Generator Tube Rupture) در نیروگاه VVER-1000 که با چهار لوب مدار اول خنک میشود، مورد بررسی قرار گرفته است و مدل کاملی از سیستم مدار اولیه توسط کد RELAP5/MOD3.2 استفاده شده است. در شبیه سازی این حادثه فرض شده است که پس از حاکم شدن شرایط پایدار در سیستم، یک شکستگی با قطر معادل 100 mm در لوله های مبدل حرارتی طرف کلکتور سرد مولد بخار حلقه دوم مدار اولیه، ایجاد شده است. بر اساس سناریوی این حادثه، تغذیه الکتریکی پمپهای اصلی مدار اول قطع شده و سیستم های تزریق ECCS (Emergency core cooling system) و تزریق بور (High pressure injection system) و تزریق بور (Boron Injection System) مربوط به حلقه های اول و دوم مدار اولیه نیز عمل نمی کنند. نتایج حاصل از کد با داده های پیش بینی شده در PSAR مربوطه نشان می دهد که با شروع حادثه، فشار سیال خنک کننده مدار اول افت نموده و در مدت زمان 130 s از آغاز حادثه فشار از 16 Mpa به 8 MPa تنزل می یابد. همچنین دمای سیال لوله آب گرم (hot leg) مدار اولیه از 598 K به 528 K در حلقه خنک کننده شماره 2 و 503 K در حلقه های 1 و 3 و 4 خنک کننده مدار اولیه کاهش می یابد. دبی جریان نشستی سیال خنک کننده از طرف اولیه به ثانویه نیز از مقدار 800 kg/sec در ابتدای شروع حادثه به مقداری کمتر از 50 kg/sec در حدود ثانیه 150 خواهد رسید. مقادیر بدست آمده از محاسبات با مقادیر مذکور در PSAR مربوطه با اختلافی کمتر از ۱۰ درصد مطابقت داشته که مؤید صحت مدل طراحی شده می باشد.

کلید واژه ها: راکتور VVER-1000، حادثه SGTR، کد RELAP5، مولد بخار

حادثه شکستگی لوله های مولد بخار (SGTR)<sup>۱</sup> در نیروگاههای قدرت هسته ای از نقطه نظر ایمنی به دلیل از بین رفتن مانع بین خنک کننده های اولیه و ثانویه و افزایش راکتیویته<sup>۲</sup> در قلب، ناشی از پدیده نشت از خنک کننده ثانویه به اولیه در اثر اختلاف فشار معکوس شده [1] بسیار حائز اهمیت است .

چنانچه هر کدام از tube های u شکل مولد بخار دچار شکاف گردند، خنک کننده فشار بالا به طرف مدار ثانویه نشت کرده و منجر به پخش در اتمسفر شده و در صورت بالا بودن میزان نشت، نیاز به خاموش شدن قلب می گردد. با توجه به اینکه فرکانس رخ دادن این گونه حادثه ( تقریباً هر ۲ سال یکبار) [1] بالا میباشد تعداد قابل توجهی از این نوع حادثه در راکتورهای هسته ای گزارش گردیده است که می توان به مواردی که در کشورهای بلژیک (۱ مورد)، ژاپن (۱ مورد) و امریکا (۹ مورد) اتفاق افتاده اند، اشاره نمود. که به عنوان نمونه می توان از حادثه SGTR در راکتور اتمی Ginna در سال ۱۹۸۲ نام برد [1] .

شکاف ایجاد شده در u-tube های مولد بخار ناشی از مکا نیزمهای مانند خوردگی و فرسایشی مکانیکی سبب پدیده ترک خوردگی به صورت تک موردی و یا چند موردی شده و پتانسیلی برای شکاف یا نشت می گردد. از جمله عوامل منجر به فرسایش مکانیکی می توان به مکانیزم های حفره، سایش، تورفتگی<sup>۳</sup> و... اشاره نمود.

از آنجا که حفظ ایمنی نیروگاه و جلوگیری از تخریب احتمالی اجزاء مختلف نیروگاه به ویژه مولد بخار به هنگام وقوع حوادث گوناگون از اهمیت زیادی برخوردار است، در تحقیق حاضر نحوه تغییر پارامترهای مدار اولیه یک راکتور VVER-1000 به هنگام وقوع یک حادثه SGTR در مولد بخار، مورد بررسی قرار گرفته است. این کار توسط شبیه سازی مدار اولیه نیروگاه در کد RELAP5/Mod3.2 به اجرا درآمد و نتایج حاصل با نتایج مذکور در PSAR مقایسه گردید.

پاره ای از تحقیقات انجام گرفته در این زمینه عبارتند از:

بررسی حادثه SGTR در مورد SG های افقی (VVER) و عمودی (western PWR) به صورت تجربی با

استفاده از لوپ های تجربی ARTIST, TEST تحت شرایط مرزی مختلف انجام شده است. [2]

بررسی حادثه medium break loss of coolant accident با حادثه SGTR و غیر همراه با آن با استفاده لوپ تجربی ARTIST پرداخته و نتایج با کد MELCOR مقایسه گردیده است در این تحقیق مشخص گردید که دمای ابتدایی مدار اولیه نقش قابل توجهی در مدت زمان حادثه داشته و دمای بیشتر منجر به کوتاه تر شدن زمان حادثه میگردد. [3]

بررسی پدیده ترموهیدرولیکی SGTR به صورت تجربی در انستیتو تحقیقاتی انرژی هسته ای (INER) بوسیله لوپ تجربی (TEST) تحت شرایط پارگی لوله ها به صورت تک موردی و چند موردی و همچنین با استفاده از کد RELAP 5 انجام گردیده است [4]

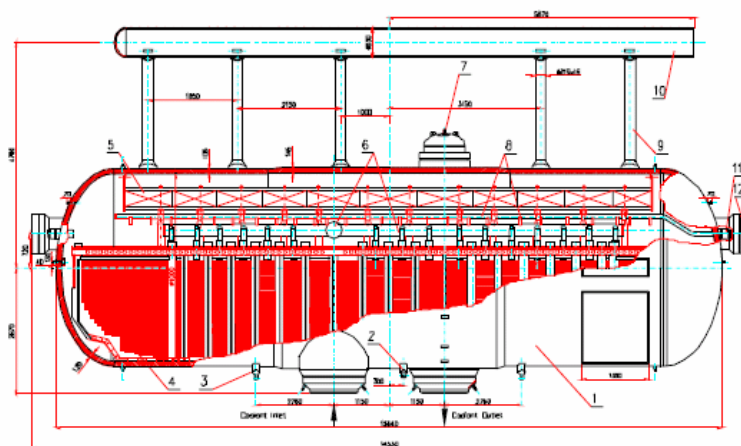
مولد بخار:

1 - steam generator tube rupture  
2- reactivity  
3 - pitting , fretting , denting , ...

مولد های بخار بکار رفته در راکتورهای VVER – 1000 از نوع افقی میباشند و در چهار حلقه گردش بسته همراه با سایر اجزای مدار اول قرار دارند و وظیفه تولید بخار اشباع با دبی ( Ton/ hour ) 1500 و با فشار 6.4 Mpa را بر عهده دارند. رطوبت بخار نباید بیش از 0.2 % باشد .

اجزای اصلی مولد بخار عبارتند از :

- پوسته مولد بخار
- کلکتور گرم و کلکتور سرد مدار اول
- سطوح دهنده حرارت به آب مدار دوم. تعداد 11000 عدد لوله در هر مولد بخار تعبیه شده است که از کلکتور گرم شروع شده و به کلکتور سرد ختم میشوند. در درون این لوله آب مدار اول جاری است که حرارت آنها از سطح خارجی لوله ها بوسیله آب مدار دوم برداشت شده و در نهایت باعث تبدیل آب مدار دوم به بخار می شوند. بخار تولیدی در مولد بخار بوسیله کلکتور بخار جمع آوری شده و بوسیله لوله های بخار به طرف توربین هدایت میشود. [5]



- |                              |                                   |
|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Vessel                    | 7. Gas removal nozzle             |
| 2. Drainage nozzle           | 8. Emergency feedwater spray unit |
| 3. Blow down nozzle          | 9. Steam nozzle                   |
| 4. Heat-exchange tubes       | 10. Steam header                  |
| 5. Separation units          | 11. Emergency feedwater nozzle    |
| 6. Main feedwater spray unit | 12. Access airlock                |

شکل ۱: مولد بخار VVER-1000 [6]

## ۲- روش کار

### ۲-۱ مدلسازی با استفاده از کد محاسباتی RELAP5/MOD3.2 [7]

کد محاسباتی RELAP5/MOD3.2 در تحلیل رفتار حرارتی - هیدرولیکی سیستم‌های آب سبک بکار می‌رود، و به منظور تحلیل رفتار ترموهیدرولیکی حوادث LOCA اعم از SBLOCA های فرضی یا LBLOCA های فرضی در راکتورهای PWR طراحی شده بود.

### ۲-۳ گره‌بندی<sup>۱</sup> اجزای مولد بخار

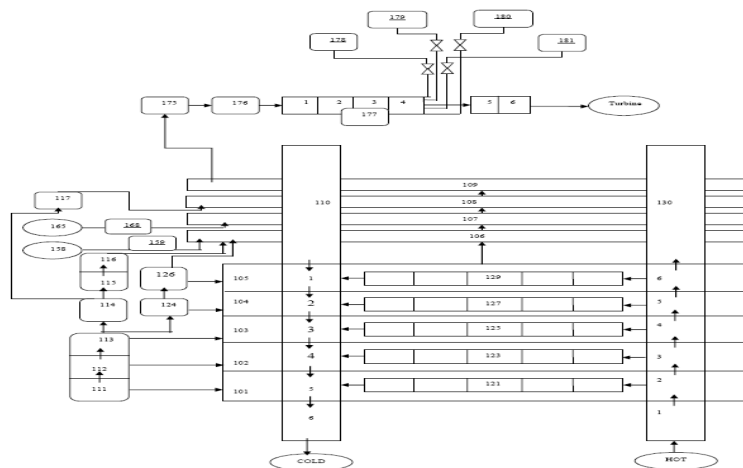
برای شبیه‌سازی یک سیستم لازم است که در ابتدا مدل گره‌بندی آن سیستم استخراج شود. منظور از گره‌بندی، فرآیند ایجاد حجمهای کنترل و ارتباط آنها به یکدیگر توسط قطعات اتصال است. در این کد قطعه‌های مختلفی برای ایجاد گره‌بندی تعریف شده است که با استفاده از آنها، مدل گره‌بندی لازم برای اعمال به کد برای مدار اولیه تولید گردید. قسمتی از این گره‌بندی در شکل ۲ نشان داده شده است.

در فرآیند گره‌بندی بایستی قوانین خاصی لحاظ گردد، از جمله اینکه تعداد قطعه‌ها تا حد امکان حداقل باشد تا زمان کمتری برای اجرای آن در کد صرف شود. لذا می‌توان حجمهایی با ابعاد بزرگتر در نظر گرفت. از طرف دیگر محدودیت Courant Limit لازم می‌دارد که گام زمانی از حاصل تقسیم طول یک حجم به سرعت ماکزیم سیال در آن حجم بیشتر نشود. لذا ابعاد یک حجم نمی‌تواند از حد خاصی فراتر رود. در نتیجه فرآیند انتخاب ابعاد برای قسمت‌های مختلف هیدرودینامیکی سیستم، مرحله‌ای پیچیده و در عین حال مهم در ادامه تحلیل مسئله می‌باشد.

### ۲-۴ اجرای محاسبات توسط کد RELAP5/MOD3.2

پس از گره‌بندی اجزاء مدار اولیه، فایل ورودی لازم جهت اجرا در کد نوشته شد. این فایل با استفاده از دستورات تعریف شده در راهنمای کاربران کد و با بهره‌گیری از انبوهی از داده‌های هندسی و فیزیکی سیستم و نیز با توجه به شرایط ترموهیدرولیکی سیال در هر قسمت از سیستم راکتور به صورت یک فایل متن ایجاد گردید. این بخش از کار مهمترین مرحله در شبیه‌سازی راکتور تلقی می‌شود، زیرا برای ایجاد آن بایستی شرایط کاری سیال در همه قسمت‌های سیستم مشخص باشد تا مدل‌های فرآیندی مرتبط با هر قسمت در فایل ورودی اعمال گردد.

اجرای محاسبات در RELAP5 در دو مرحله صورت گرفت. در مرحله اول گره‌بندی ایجاد شده برای حالت پایدار اجرا گردید که در نهایت مطابقت لازم با مقادیر شرایط پایدار مورد نظر در PSAR بدست آمد. در گام بعد، همین مقادیر به عنوان مقادیر اولیه و شرایط مرزی برای قسمت‌های مختلف سیستم تعریف شد و پس از تعریف و اعمال حادثه SBLOCA ی مورد نظر در فایل ورودی، مسأله این بار برای حالت گذرا اجرا گردید.



شکل ۲- نقشه گره بندی مولد بخار

<sup>1</sup> - Nodalization

### ۳- نتایج

#### ۳-۱ بررسی حالت پایدار (حالت دائمی)

در این مرحله اجرای کد در حالت پایدار انجام گردید. نتایج بدست آمده در این مرحله جهت مقایسه با مقادیر PSAR در جدول ۱ آورده شده است. چنانچه مشاهده می گردد تطابق خوبی بین این مقادیر برقرار بوده و نشان‌دهنده صحت مدل شبیه سازی شده در حالت دائمی است. لذا می توان این مدل را در حالت گذرا نیز بکار برد.

جدول ۱- داده‌های حالت پایدار در PSAR و محاسبه شده در کد

محاسبه شده در کد	PSAR	قسمت
16	16	فشار در قسمت بالایی قلب (MPa)
597.5	598	دمای خنک کننده در خروجی حلقه های مدار اولیه (°K)
4150	4150	دبی جریان خنک کننده در ورودی از حلقه های مدار اولیه (kg/sec)

#### ۳-۲ بررسی حالت گذرا (Transient)

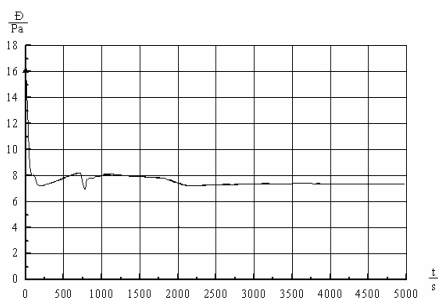
پس از اینکه حل حالت دائمی به اتمام رسید و سیستم در شرایط پایدار قرار گرفت. حادثه SGTR به فایل ورودی اضافه گردید. با توجه به شرایط بیان شده در PSAR مربوطه، حادثه در حالت بشدت محافظه کارانه بافرض شکستگی با قطر معادل 100 mm در ناحیه ای که ردیف پایین لوله های مبدل حرارتی در طرف کلکتور سرد مولد بخار قرار گرفته اند، بررسی شده است. لذا در شبیه سازی انجام گرفته پس از حاکم شدن شرایط پایدار در سیستم، در ثانیه 500 یک شکستگی در پایین ترین ردیف از لوله های مولد بخار حلقه دوم مدار اولیه، با قراردادن یک شیر بین حجم شماره 5 کلوله 121 و حجم 101 (شکل 2)، تحت شرایط فوق مدل سازی شده است. همزمان با این حادثه، تغذیه الکتریکی پمپهای اصلی مدار اول قطع شده و دیزل ژنراتورهای حلقه های اول و دوم مدار اولیه نیز از کار خواهند افتاد. در نتیجه سیستم های ECCS، HPIS و تزریق بور مربوط به حلقه های اول و دوم مدار اولیه نیز عمل نمی کنند.

با اعمال این شرایط در فایل ورودی و اجرای آن در کد، نتایج تحلیل حالت گذرا بدست آمده که در شکل های ۳، ۴، ۵ و ۶ نحوه تغییرات پارامترهای مختلف مدار اولیه به همراه داده های موجود در PSAR مربوطه نشان داده شده است. لازم به یادآوری است، در کلیه نمودارهای ارائه شده توسط کد Relap 5، شرایط گذرا در ثانیه 500 اعمال گردیده است.

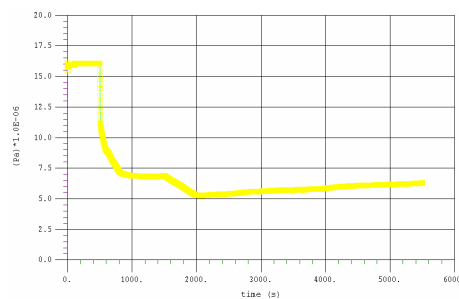
#### ۴- بحث و نتیجه گیری

در طی این حادثه در اثر نشت خنک کننده مدار اولیه به مدار ثانویه<sup>۱</sup>، با کاهش فشار مدار اولیه، سیستم تزریق محلول بور به سیستم کنترل فشار (Pressurizer) فعال میگردد. همچنین شیر ایمنی BRU-A مولد های بخار سالم، در راستای افزایش نرخ خنک کنندگی مدار اولیه، راه اندازی می شوند تا با حفظ فشار از باز شدن شیر ایمنی<sup>۱</sup> مولد بخار صدمه دیده جلوگیری شود.

<sup>1</sup> - Safety valve

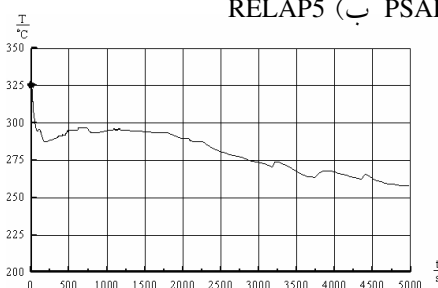


الف

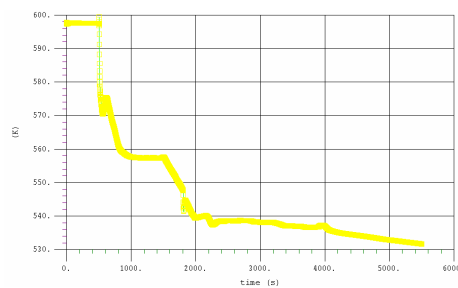


ب

شکل ۳- فشار در خروجی قلب راکتور الف (PSAR ب) RELAP5

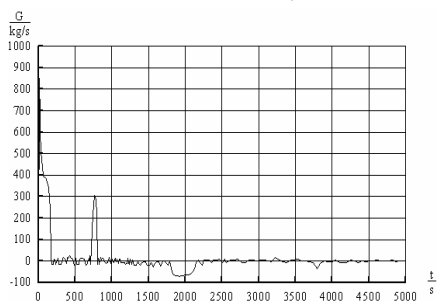


الف

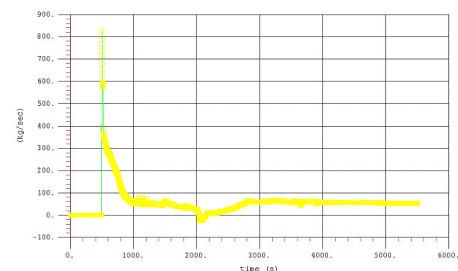


ب

شکل ۴- دما در خروجی حلقه دوم مدار اولیه الف (PSAR ب) RELAP5

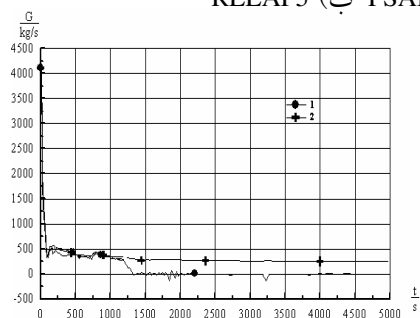


الف

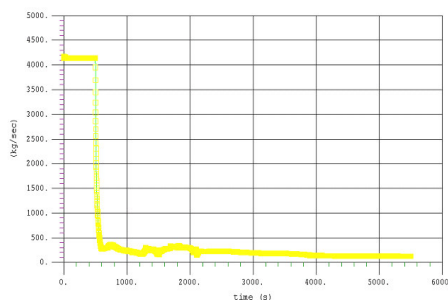


ب

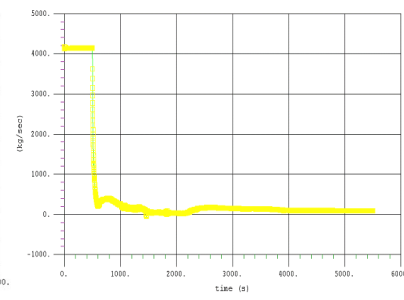
شکل ۵- نرخ دبی جریان ناشی خنک کننده از طرف اولیه به ثانویه الف (PSAR ب) RELAP5



الف



ب



ج

شکل ۶- دبی جریان خنک کننده در ورودی حلقه های ۲ و ۳ مدار اولیه الف (PSAR ، ب و ج) RELAP5

بررسی نتایج به دست آمده نشان می دهد که با شروع حادثه، فشار سیال خنک کننده مدار اول (شکل ۳) افت نموده و در مدت زمان 130 ثانیه از آغاز حادثه، فشار از 16 MPa به 8 MPa تنزل می یابد. این پدیده منجر به جوشش سیال خنک کننده در RCC<sup>۱</sup> شده و در نتیجه آهسته تر شدن نرخ کاهش فشار مدار اولیه می گردد. همچنین در اثر تزریق سیستم اضطراری آب بوردار به مدار اولیه در ثانیه 140 حادثه، در نهایت فشار مدار اول در سطح 7.1 MPa تثبیت میگردد.

از سوی دیگر دمای سیال خنک کننده لوله آب داغ (Hot leg) مدار اول (شکل ۴) از 598 K<sup>۰</sup> به 528 K<sup>۰</sup> در حلقه دوم مدار اولیه تنزل یافته و همچنین به مقدار 503 K<sup>۰</sup> در حلقه های 1 و 3 و 4 مدار اولیه، کاهش می یابد. چنانچه مشاهده می گردد همراه با کاهش فشار مدار اول در شکل شماره ۳، در اثر توقف راکتور و کاهش مقادیر پارامترهای مدار اول (قدرت و فشار) ناشی از عملکرد سیستم های حفاظت اضطراری، دمای خنک کننده نیز روند نزولی خواهد داشت. دلیل اصلی افت بیشتر دما در حلقه های 1 و 3 و 4 مدار اولیه، کاهش بیشتر فشار در مدار ثانویه مولدهای بخار سالم و همراه شدن این پدیده با مکانیزم جوشش در RCC است در نتیجه برداشت حرارت از مدار اولیه این حلقه ها بیشتر شده و شاهد کاهش دمای بیشتر خواهیم بود. [5]

از طرف دیگر در اثر بسته شدن شیر اصلی ایزولاسیون بخار (MSIV)<sup>۲</sup>، مولد بخار سانحه دیده (مولد بخار حلقه دوم مدار اول) از سایر سیستمهای بخار مجزا و در نتیجه این عمل، بخار در کلکتور اصلی بخار و لوله های بخار قبل از توربین حبس شده و باعث افزایش فشار مدار ثانویه این مولد بخار تا سطح فشار اولیه میگردد. لذا دبی جریان نشتی سیال خنک کننده از طرف اولیه به ثانویه (شکل ۵) نیز از مقدار 800 kg/sec در ابتدای شروع حادثه به مقداری کمتر از 50 kg/sec در حدود ثانیه 150 خواهد رسید. مقادیر بدست آمده از محاسبات با مقادیر مذکور در PSAR مربوطه با اختلافی کمتر از ۱۰ درصد مطابقت داشته که مؤید صحت مدل طراحی شده می باشد.

## مراجع

- [1] Ji Hwan Jeonga\*, Young Chul Kweonb., 2002, "the effect of tube rupture location on the consequences of multiple steam generator tube rupture event", Annuals of nuclear energy 29 (2002) 1809-1826  
<http://www.elsevier.com>
- [2] A. Auvinena, J.K. Jokiniemia, ..., 2004, " steam generator tube rupture (SGTR) scenarios ", nuclear energy and design 235 (2005) 457-472  
<http://www.sciencedirect.com>
- [3] Juri Marn \*Marjan Delic , Leopold skerget " Experimental models of medium break loss of coolant accident with and without steam generator tube rupture ", international journal of pressure vessels and piping 80 (2003) 737-744  
<http://www.sciencedirect.com>
- [4] Liu T.J ,Lee C.H ,...,(1997) , " Experimental study on tube rupture in INER Integral system test facility " , nuclear science jurnal ,p90-101  
<http://www.steamvillage.com>
- ۵- داورزنی. احمد، فیزیک کاربردی راکتورهای هسته ای، سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی، تهران، ۱۳۸۳، ص ۳۱۸.
- [6] Ivanov, Boyan & Ivanov, Kostadin et al. "VVER-1000 Coolant Transient Benchmark: PHASE 1 (V1000CT-1) Vol. I: Main Coolant Pump (MCP) Switching On . Final Specifications ". 2002
- [7] The RELAP5 Code Development Team. "RELAP5/MOD3.3 Code Manual" Volume I & II. Idaho, Idaho National Engineering Laboratory, 2001

<sup>1</sup> - Reactor Collection Chamber  
<sup>2</sup> - Main Steam Isolation Valve