# بررسی جامع اثر نشت پمپ مدار خنک کننده در حوادث شدید بر روی طراحی Core Catcher

**نویسندگان: هستی نصیری*، فرامرز یوسف پور، غلامرضا جهانفرنیا، کاوه کریمی**

**دانشگاه علوم و تحقیقات و فن آوری، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی هسته ای**

## چکیده

در ارزیابی طراحی سیستمها در نیروگاههای هسته ای، وخیم ترین شرایط ممکن (که موارد محدود کننده نامیده می شوند) برای بررسی طرحها باید لحاظ شود. در این مقاله به منظور بررسی بد ترین شرایط ممکن برای بررسی طرح Core Catcher، اثر نشت پمپ مدار خنک کننده مورد بررسی قرار گرفته است. حوادث شدید را می توان به دو دسته تقسیم کرد: حوادث LPME(Low Pressure Melt Ejection) و HPME(High Pressure Melt Ejection) که از منظر Core Catcher حوادث HPME شرایط وخیم تری را ایجاد می کنند. از جمله بدترین شرایط در فاز حوادث شدید می توان به شرایط ایجاد شده در اثر حوادث LOOP , SBO اشاره کرد. در این مقاله دو شاخه از درخت حادثه این حوادث با کد MELCOR مدل شده است که تفاوت آنها در نشت پمپ مدار خنک کننده می باشد و اثر آن بر روی Core Catcher مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحلیل نشان داد که حتی نشت جزیی از پمپ مدار خنک کننده سبب کاهش اثرات شرایط HPME در Core Catcher خواهد شد و حادثه LOOP می تواند شرایط وخیم تری برای Core Catcher بوجود بیاورد.

کلید واژه ها: حوادث شدید، HPME، Core Catcher ، LOOP، SBO، MELCOR

**Title**:

## Comparative study of reactor coolant pump leakage in severe accidents from core catcher design point of view

Authors: H. Nasiri[1*], F.Yousefpour[2, 3], G. Jahanfarnia[1], K.Karimi[4]
[1] Nuclear Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran –Iran
[2] MASNA Co., Tehran, Iran
[3] Nuclear Science & Technology Research Institute, Tehran, Iran
[4] Young Researchers and elite Club, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

# Abstract

In evaluation of system designs in nuclear power plants, severest conditions (which are called bounding conditions) should be considered for assessment of designs. In this paper, in order to assess Core Catcher design, the effect of reactor coolant pump leakage in severe accidents is investigated. Severe accidents can be categorized in two groups: LPME(Low Pressure Melt Ejection) and HPME(High Pressure Melt Ejection). From Core Catcher point of view, HPME accidents create severer conditions. Among HPME accidents, SBO and LOOP can be mentioned as severest conditions. In this paper, two branches of accident tree of these accidents are modeled by MELCOR code. The difference between these two branches is reactor coolant pump leakage. The effect of this leakage on Core Catcher is investigated. Results show that even a small leakage from reactor coolant pump leads to reduction of HPME effects on Core Catcher and LOOP accident can create severer conditions for Core Catcher.

For development and evaluation design of systems in nuclear power plant, the most severe postulated events (called bounding case) should be considered. In this article the most severe case for evaluation of core catcher design is discussed. Core catcher is the last most important boundary for mitigating severe accident effects.
Severe accidents are divided to two categories: Low Pressure (LP) and High Pressure (HP). From core catcher point of view, HP accidents are more severe because corium is evacuated to the core catcher in higher pressure and the possibility of failure is increased. Among the HP severe accidents the most severe cases belong to the Station Black Out (SBO) and Loss of Offsite Power (LOOP). After Fukushima Daiichi accident, most of the published researches illustrate that SBO is the bounding case in nuclear power plant severe accidents.

In this study for comparison the severity of SBO and LOOP for core catcher design, MELCOR code is used. The first step in this analysis is development and qualified the steady state MELCOR model of a typical 360 MWatt PWR power plant. Then SBO and LOOP accident in the severe phase are simulated by MELCOR. At least results are compared. Among the result, LOOP is more severe than the SBO from core catcher point of view.

**Keywords**: Severe accident, Core Catcher, LOOP, SBO, HPME, MELCOR

**مقدمه**

در نیروگاه های هسته ای، حوادث شدید ممکن است منجر به ذوب قلب راکتور و اجزای داخلی آن شود که از نتایج آن می تواند نشت مواد رادیواکتیو به میحط زیست باشد. به همین دلیل سیستمهای محدود کننده حوادث شدید هر روزه در حال گسترش و بررسی می باشند. بر اساس فلسفه دفاع در عمق، این بررسی ها در مراحل مختلف صورت می گیرند. در فاز طراحی بایستی طرح مربوط به تمامی سیستمهای ایمنی و محدود کننده حوادث شدید در وخیم ترین شرایط مورد ارزیابی قرار گیرند. لذا تشخیص وخیم ترین شرایط ممکن در فاز طراحی از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از استراتژی های مهار حوادث شدید استفاده از Core Catcher به منظور نگهداری طولانی مدت مواد مذاب یا همان corium و خنک سازی آن می باشد.

بعد از حادثه فوکوشیما بیشتر تحقیقات منتشر شده، حادثه SBO را به عنوان وخیم ترین شرایط حادثه در نظر گرفته اند.مطالعه مراجع [1] تا [4] همگی نشان دهنده اهمیت حادثه SBO در تحلیل های حوادث شدید می باشد. حال آنکه در این تحقیق نشان می دهیم که از نقطه نظر طراحی Core Catcher حادثه LOOP می تواند شرایط وخیم تری نسبت به حادثه SBO ایجاد نماید. بسته به سناریوی حادثه، خروج مواد مذاب از محفظه تحت فشار راکتور می تواند در فشار پایین و یا فشار بالا صورت گیرد. بسته به اینکه فشار مدار خنک کننده هنگام خروج مواد مذاب از محفظه

راکتور در چه محدوده ای باشد، حوادث شدید را به دو دسته تقسیم می کنند که عبارتند از: LPME که در این حوادث هنگام خروج مواد مذاب از محفظه تحت فشار راکتور، فشار مدار اول در حد فشار محفظه ایمنی کاهش می یابد حال آنکه در شرایط HPME هنگام خروج مواد مذاب، فشار مدار خنک کننده حداقل در محدوده فشار کاری PSV(Pressurizer Safety Valve) (یعنی در حدود ۱۷ مگا پاسکال ) می باشد. وقوع HPME می تواند منجر به خرابی محفظه ایمنی در اثر ضربه ناشی از خروج مواد مذاب در فشار بالا و یا گرم شدن مستقیم محفظه ایمنی (DCH: Direct Containment Heating) شود. در نتیجه تمام حوادثی مانند LOCA که منجر به کاهش فشار مدار خنک کننده قبل از خرابی محفظه تحت فشار می شوند را می توان از لیست وخیم ترین شرایط از نظر طراحی Core Catcher حذف نمود.

حوادث SBO و LOOP هر دو جزو حوادثی هستند که می توانند منجر به HPME شوند. در حادثه SBO برق کل نیروگاه از دست می رود در حالیکه در حادثه LOOP منبع برق خارجی قطع می شود. در حادثه SBO در اثر خاموشی کل نیروگاه بایستی برای تامین برق مورد نیاز نیروگاه از دیزل ژنراتورها استفاده شود که شروع به کار آنها زمان بر می باشد. لذا تاخیر بوجود آمده در شروع به کار مجدد بعضی از سیستمها مانند سیستم خنک کنندگی تجهیزات، منجر به آسیب رسیدن به بعضی از سیستمها از جمله آب بندی پمپهای مدار خنک کننده می شود. این آسیب می تواند منجر به نشت خنک کننده از محل آب بندی پمپها شود که بسته به مدت زمان تاخیر در شروع به کار سیستم خنک کننده تجهیزات این نشت می تواند از مقدار 21gpm(gallon per minute) تا 480 gpm تغییر یابد. در این تحلیل اثر کمترین میزان نشت (یعنی 21 gpm ) در نظر گرفته شده است.

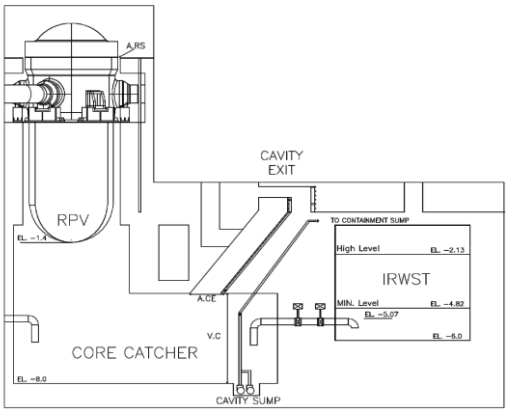
این تحقیق به منظور ارتقای طراحی Core Catcher یک نیروگاه ۳۶۰ مگاوات از نوع وستینگهاوس صورت گرفته است. به این منظور ابتدا این نیروگاه در شرایط ثابت توسط کد MELCOR شبیه سازی گردید[5,6,7,8]. سپس با افزودن قابلیتهای مدلسازی حوادث شدید در این کد، دو حادثه SBO و LOOP برای این نیروگاه شبیه سازی شد و در نهایت نتایج حاصل مورد بررسی قرار گرفت[9,10,11].

## نیروگاه ۳۶۰ مگاوات و تعریف Core Catcher

این نیروگاه شامل یک راکتور تحت فشار با آب سبک از نوع Westinghouse می باشد که دارای دو مدار خنک کننده است. قدرت حرارتی این نیروگاه 1130 MWatt می باشد که این حرارت از طریق مبدل های عمودی برداشت می شوند. این نیروگاه شامل یک محفظه تحت فشار، دو مبدل حرارتی، دو پمپ مدار خنک کننده و یک محفظه تنظیم کننده فشار می باشد.

سطح چهارم فلسفه دفاع در عمق با هدف محدود کردن حوادث شدید پایه‌ریزی شده است. طبق این سطح نهایتاً قلب ذوب شده باید در داخل محفظه ایمنی نیروگاه متوقف شود و این الزام منجر به جلوگیری از آسیب رسیدن به پایه‌های محفظه ایمنی توسط قلب ذوب شده یا Corium می‌گردد.

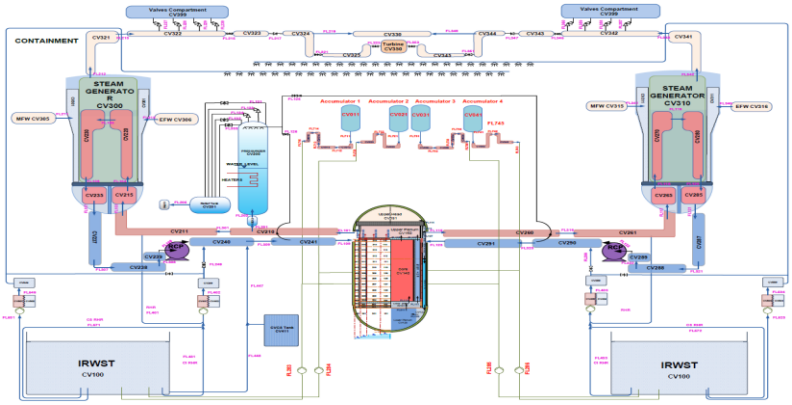
بر این اساس امروزه طراحی ها به سمت خنک کردن مواد مذاب در داخل محفظه ایمنی و نگهداری آن در داخل Core Catcher پیش رفته است. نقش اصلی Core Catcher افزایش نسبت سطح به حجم مواد مذاب پس از خروج آن از محفظه تحت فشار راکتور و ورود آن به محفظه ایمنی می باشد. این امر سبب خنک شدن موثر مواد مذاب گردیده و میزان برهمکنش مواد مذاب با بدنه محفظه ایمنی و خوردگی آن را کاهش می دهد. شکل ۱ نمای کلی Core Catcher در یک راکتور ۳۶۰مگاواتی نوعی را نشان می دهد.




*شکل ۱: نمای کلی از Core Catcher*

## روش کار

در این تحقیق برای تعیین وخیم ترین شرایط به منظور ارزیابی طراحی Core Catcher از کد MELCOR استفاده شده است [12]. ابتدا کل مدار اول و دوم و سیستمهای ایمنی و همچنین محفظه ایمنی نیروگاه در حالت پایه با این کد مدل گردید و پس از حصول اطمینان از صحت این مدل شرایط حادثه با این کد برای نیروگاه شبیه سازی شد. شکل ۲ نودبندی نیروگاه را در کد MELCOR نشان می دهد.



*شکل ۲: نودبندی نیروگاه برای کد MELCOR*

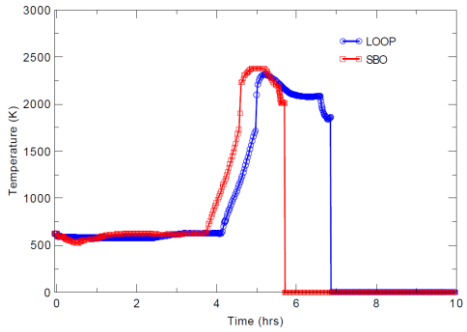
## سناریوهای تحلیل شده در این تحقیق

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل های PSA، دو حادثه که دارای فرکانس وقوع نسبتا بالاهستند و از نظر طراحی Core Catcher می توانند شرایط HPME را ایجاد نماید انتخاب شدند. این دو حادثه عبارتند از: LOOP و SBO . در حادثه LOOP با از دست رفتن منبع برق AC پمپهای مدار خنک کننده و منبع تغذیه اصلی مولد بخار خاموش می شوند. همچنین شیرهای توربین بسته شده و راکتور خاموش می شود. در سناریوی مورد نظر در این حادثه منبع تغذیه کمکی مولد بخار نیز در دسترس نمی باشد و برداشت حرارت از راکتور متوقف می شود. با از دست رفتن برق AC ، دیزل ژنراتورها سریعا شروع به کار می کنند و برق مورد نیاز برای شروع بکار سیستمهای خنک کننده تجهیزات تامین می شود. با کار این سیستم، آب بندی پمپها بخصوص پمپهای مدار خنک کننده حفظ می شوند و نشتی از آنها صورت نمی گیرد. در حادثه SBO ، تمام منابع برق AC که شامل دیزل ژنراتورها نیز می شود از دست می رود. راکتور خاموش می شود و هیچ برداشت حرارتی در سناریوی مورد نظر از این حادثه صورت نمی گیرد. همچنین هیچ سیستم تامین کننده برق جانبی در دسترس نمی باشد. لذا آب بندی پمپها بخصوص پمپهای مدار خنک کننده دچار نقصان می شوند و خنک کننده از محل این پمپها به محظه ایمنی نشت می کند. در این تحقیق مقدار 21 gpm نشت (حداقل میزان نشت) از پمپها در فشار 15.5 MPa در نظر گرفته شده است. در واقع تفاوت در سناریوهای در نظر گرفته شده درحوادث LOOP , SBO در نشت پمپهای مدار خنک کننده می باشد. این نشت بسته به مقدار آن می تواند فشار مدار خنک کننده را کاهش دهد که این امر سبب کاهش اثرات HPME در لحظه خرابی محفظه تحت فشار و خروج مواد مذاب از آن می شود.

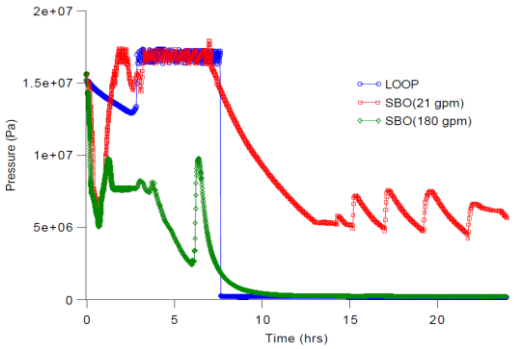
## بحث و بررسی نتایج

با شروع حوادث SBO,LOOP ، در نبود سیستمهای ایمنی، دمای میله های سوخت تا نقطه ذوب بالا می رود. در سناریوی حادثه SBO در نبود سیستم خنک کننده تجهیزات، آب بندی پمپ خنک کننده از دست رفته و نشت آن آغاز می شود.از دست رفتن خنک کننده سبب افزایش سریعتر دمای میله های سوخت و ذوب آنها می شود. در نتیجه SBO حادثه سریعتری نسبت به LOOP می باشد. در شکل ۳ ماکزیمم دمای غلاف میله های سوخت نشان داده شده است.هر دو حادثه LOOP , SBO جزو دستهHPME در حوادث شدید قرار می گیرند. شکل ۴ تغییرات فشار مدار خنک کننده را در این دو حادثه نشان می دهد. در حادثه SBO بدلیل نشت پمپ مدار خنک کننده، فشار این مدار به آرامی کاهش می یابد هر چه میزان نشت بیشتر باشد میزان افت فشار مدار خنک کننده نیز بیشتر خواهد بود که این امر می تواند اثر ضربه ناشی از خروج مواد مذاب در فشار بالا از محفظه تحت فشار به Core Catcher را کاهش دهد. این در صورتی است که در حادثه LOOP با خرابی محفظه تحت فشار تخلیه ناگهانی فشار به Core Catcher را داریم و این امر سبب افزایش ضربه وارد شده به بدنهCore Catcher می شود. جرم مواد مذاب وارد شده به Core Catcher در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود جرم مواد مذاب در حادثه

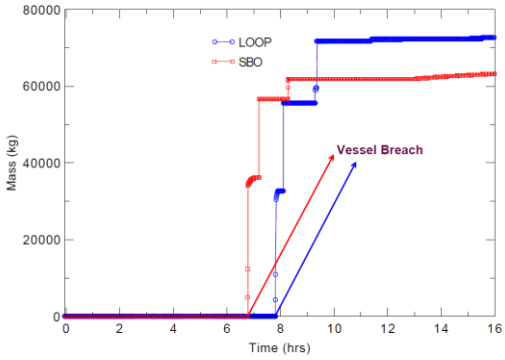
LOOP بیشتر می باشد. هر چه جرم این مواد بیشتر باشد، خنک کنندگی آنها دشوارتر بوده و در نتیجه میزان واکنش مواد مذاب با بتن کف محفظه ایمنی افزایش می یابد. هر چه این واکنشها بیشتر باشند خوردگی بتن کف محفظه ایمنی افزایش می یابد(شکل ۶) و تجمع گازهای قابل احتراق در Core Catcher افزایش می یابد. شکل ۷ میزان هیدروژن تولیدی ناشی از واکنش مواد مذاب با بتن را نشان می دهد.



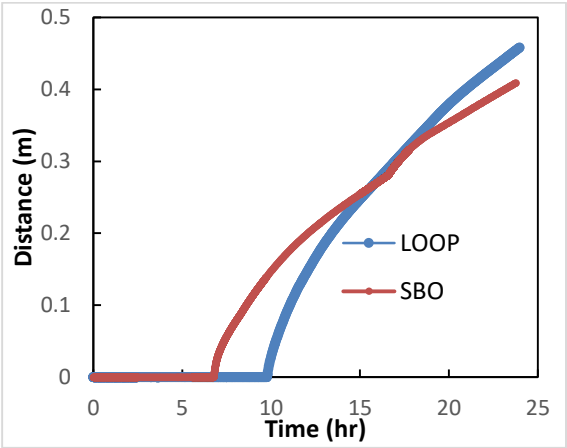

*شکل ۳: ماکزیمم دمای غلاف سوخت*



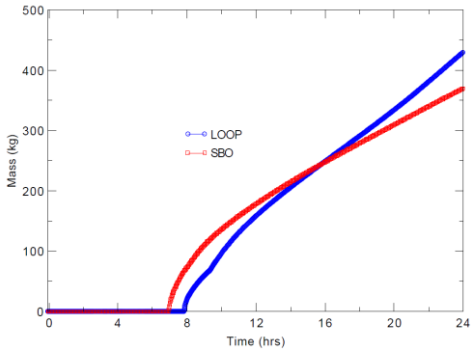

*شکل ۴: فشار مدار خنک کننده*




*شکل ۵: جرم مواد مذاب خارج شده از محل نقص محفظه تحت فشار*




شکل ۶: میزان خوردگی کف Core Catcher




شکل۷: هیدروژن تولیدی ناشی از واکنش مواد مذاب با بتن کف Core Catcher

## نتیجه گیری

طرح هر سیستمی در مرحله طراحی باید در بدترین شرایط مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین انتخاب بدترین شرایط از میان حوادث قابل وقوع، برای ارزیابی طرح هر سیستمی از اهمیت ویژه ای در طراحی نیروگاه های هسته ای برخوردار است. از منظر طراحی Core Catcher، با توجه به محدود بودن مساحت آن در محفظه ایمنی، جرم مواد مذاب و در نتیجه ضخامت آن در Core Catcher بر روی خنک کنندگی آن موثر است. هر چه خنک کنندگی مواد مذاب بهتر صورت گیرد خوردگی بتن کف Core Catcher کاهش یافته و احتمال نشت مواد رادیواکتیو از این طریق به محیط زیست کاهش می یابد. با توجه به پارامترهای بررسی شده در قسمت قبل، علی رغم دیدگاههای اخیر در مورد حوادث شدید که در آن SBO به عنوان مورد محدود کننده (Bounding Case) شناخته شده است، از منظر Core Catcher حادثه LOOP دارای شرایط وخیم تری می باشد و می توان آن را به عنوان حادثه محدود کننده در طراحی Core Catcher انتخاب نمود.

## مراجع

[1] Longze Li et al., 2013. Severe accident analysis for a typical PWR using the MELCOR code. Progress in Nuclear Energy. 71, 30e38 DOI: 10.1016/j.pnucene.2013.10.014

[2] Jun Heo et al., 2013. Development of MELCOR Modeling Input for SBO Analysis of APR1400 NPP. Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Gwangju, Korea, 30-31

[3] Analia Bonelli et al., 2012.Station Black-Out Analysis with MELCOR 1.8.6 Code for Atucha 2 Nuclear Power Plant. Science and Technology of Nuclear Installations. DOI: 10.1155/2012/620298

[4] Petr Vokáč, 2010. Recent VVER-440 severe accident analyses with MELCOR 1.8.6.2nd EMUG meeting Praha SÚJB

[5] M.A. Polo-Labarrios, G. Espinosa-Paredes, 2015. Comparative study of the hydrogen generation during short term station blackout (STSBO) in a BWR. Annals of Nuclear Energy 83 (2015) 274–282. http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2015.04.027

[6] Carbajo, J.J., 1994. MELCOR sensitivity studies for a low-pressure, short-term station blackout at the Peach Bottom plant. Nucl. Eng. Des. 152, 287–317. Chanin, D., Young, M.L., 1998. DOI: 10.1016/0029-5493(94)90093-0

[7] Haste, T., Birchley, J., Cazzoli, E., Vitazkova, J., 2006. MELCOR/MACCS simulation of the TMI-2 severe accident and initial recovery phases, off-site fission product release and consequences. Nucl. Eng. Des. 236 (10), 1099–1112. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2005.11.012

[8] Ahn, K.I., Park, S.Y., Cho, S.W., 2006. MELCOR 1.8.4 sensitivity analysis of the severe accident evolution during the APR 1400 LOCA. Ann. Nucl. Energy 33 (1), 71–83. DOI: 10.1016/j.anucene.2005.09.003

[9] Martín-Fuertes, F., Barbero, R., Martín-Valdepeñas, J.M., Jiménez, M.A., 2007. Analysis of source term aspects in the experiment Phebus FPT1 with the MELCOR and CFX codes. Nucl. Eng. Des. 237 (5), 509–523. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2006.07.006

[10] IAEA-Safety Report Series-No.023, 2002. Accident Analysis for Nuclear Power Plant.

[11] Dino Alfonso Araneo, 2008. PhD Thesis, University of PISA, Realization of a Methodology for the assessment of “Best Estimate” codes for the analysis of nuclear systems and application to Cathare2 V2.5 code.

[12] R. O. Gauntt, et al., “MELCOR Computer Code Manuals, Vol. 1: Primer and Users’ Guide, Version 1.8.6 September 2005,” Sandia National Laboratories Albuquerque, NM 87185-0739, NUREG/CR-6119, Rev. 3, SAND 2005-5713.