

## کوپلینگ تجزیه و تحلیل نوترونی و ترموهیدرولیکی مجتمع سوخت داغ رآکتور پیشرفته آلفرد با استفاده از کد MCNPX و نرم‌افزار فرترن

INC29-1033

کوروش رهبری<sup>(۱)\*</sup>، داریوش مستی<sup>(۱)</sup>، کامران سپانلو<sup>(۲،۳)</sup>، احسان ظریفی<sup>(۳،۲)</sup>

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

۲. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای

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

چکیده:

در این تحقیق به تلفیق کدهای نوترونی و مدل ترموهیدرولیکی در مجتمع سوخت داغ رآکتور آلفرد پرداخته شده است. اهمیت کوپل به این دلیل است که پارامترهای ترموهیدرولیکی نظیر دماهای سوخت، خنک کننده و چگالی سیال خنک کننده بر روی پارامترهای نوترونی مانند توزیع توان و شرایط بحرانی رآکتور تأثیر می‌گذارد. با تغییر هر یک از پارامترهای ترموهیدرولیکی، اصول حاکم بر واکنش‌های نوترونی نیز تغییر می‌کند. همچنین با تغییر پارامترهای نوترونی نیز این قضیه صادق است. برای راستی آزمایی، محاسبات نوترونیکی توزیع توان محوری نرمال شده برای مجتمع سوخت داغ را به دست آورده و پارامترهای ترموهیدرولیکی متناسب با آن رسم می‌شود. با تغییر در توزیع شار و توان، دمای خنک کننده، چگالی آن تغییر کرده و این فرایند به نوبه خود باعث تغییر در کندکنندگی سیال می‌شود.

کلیدواژه‌ها: رآکتور ALFRED، مدل ترموهیدرولیکی، پارامترهای نوترونی، کد MCNPX

### **Coupled Neutronics and Thermal-Hydraulics Analyses of the hot fuel assembly of the Advanced ALFRED Reactor using MCNPX code and Fortran Software**

Korosh Rahbari<sup>1\*</sup> – Darush Masti<sup>1</sup> – Kamran Sepanloo<sup>2,3</sup> – Ehsan Zarifi<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Department of Nuclear Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran.

<sup>2</sup> Reactor and nuclear safety school, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran

<sup>3</sup> Department of Nuclear Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

#### **Abstract:**

In this research, the integration of Neutron codes and the Thermal-hydraulics model in the Alfred Reactor hot fuel assembly has been discussed. The importance of the coupling is due to the fact that Thermal-hydraulics parameters such as fuel temperatures, cooling, and cooling fluid density affect Neutronic parameters such as power distribution and critical reactor conditions. By changing any of the Thermal-hydraulics parameters, the principles governing Neutronic reactions also change. This is also true by changing the Neutronic parameters, for verification, we obtain the Neutronic calculations of the normalized axial power distribution for the central fuel complex and plot the corresponding Thermal-hydraulic parameters. By changing the flux and power distribution, the cooling temperature and density change, and this process in turn cause a change in the deceleration of the fluid.

**Keywords:** Alfreald Reactor, Thermal-Hydraulics Model, Neutronic Parameters, MCNPX Code

## ۱. مقدمه:

با وجود اینکه چند سالی است از پیشنهاد طرح‌های مفهومی در زمینه رآکتورهای پیشرفته ALFRED می‌گذرد، اما تاکنون اسناد و مقالات بسیار کمی درباره محاسبات این نوع رآکتورها بخصوص محاسبات هم‌زمان نوتونیک و ترموهیدرولیک منتشر شده است. همچنین با توجه به جدید بودن طراحی و ساخت این نوع رآکتور پروژه مشابهی در داخل کشور انجام شده است. طرح استفاده از رآکتورهای سریع پیشرفته با خنک‌کننده سرب مذاب در قالب رآکتورهای نسل چهارم از سال ۲۰۰۰ مطرح گردید [۱]. در ۳۰ می سال ۲۰۱۰، در کنفرانس هسته‌ای اروپا در کشور اسپانیا برای اولین بار طرح توسعه و ساخت رآکتورهای سریع با خنک‌کننده سرب مذاب مطرح شد [۲]. در سال ۲۰۱۲، Gregorini [۳] و Mikityuk [۴] طی گزارش‌هایی به بررسی طراحی مفهومی رآکتور ALFRED بر اساس پروژه LEADER پرداختند. Alemberti و همکارانش [۵] طی مقاله‌ای در کنفرانس بین‌المللی رآکتورهای سریع و چرخه سوخت مربوط به آن، که در ۷-۴ می سال ۲۰۱۳ در کشور فرانسه در شهر پاریس برگزار شد، به معرفی رآکتور ALFRED و طرح ELFR پرداختند. همچنین Grasso و همکارانش [۶] و Bandini و همکارانش [۷] نیز طی مقاله‌هایی متفاوت در همین کنفرانس به بررسی ابعاد مختلف طرح رآکتور ALFRED و جنبه‌های ایمنی آن پرداختند. Damiani و همکارانش [۸] طی مقاله‌ای در ژورنال Nuclear Engineering and Design در سال ۲۰۱۴، طرح مفهومی مولدهای بخار دوار را برای رآکتور ALFRED مورد بررسی قرار دادند. Ponciroli و همکارانش [۹] نیز طی مقاله‌ای در ژورنال Progress in Nuclear Energy در سال ۲۰۱۴ به شبیه‌سازی و بررسی رفتار دینامیکی رآکتور ALFRED پرداختند.

## ۲. روش کار:

در این تحقیق، به بررسی و تجزیه و تحلیل رفتار نوترونی و ترموهیدرولیکی قلب رآکتور پیشرفته ALFRED با خنک‌کننده سرب و کوپل کد نوترونی و مدل ترموهیدرولیکی آن پرداخته می‌شود. هدف از انجام محاسبات نوترونی قلب یک رآکتور، محاسبه توزیع شار نوترون در قلب و محاسبه ضریب تکثیر مؤثر می‌باشد. با توجه به لزوم انجام محاسبات دقیق نوترونی، در ابتدا نیاز است هندسه واقعی قلب، ترکیب و غنای سوخت، گام شبکه، شعاع و ارتفاع میله‌های سوخت، ترکیب و مکان جاذب‌های سوختنی، انواع و مکان قرارگیری میله‌های کنترل، آرایش مجتمع‌های سوخت در قلب رآکتور، بازتابنده‌های شعاعی و محوری، تعیین و مشخص گردند. جهت انجام محاسبات نوترونی از کد MCNPX استفاده خواهد شد. در کد MCNPX با بهره‌گیری از روش آماری مونت کارلو این محاسبات صورت می‌پذیرد.

اما در محاسبات ترموهیدرولیکی با توجه به پیچیده بودن مکانیزم انتقال حرارت از طریق جابجایی بین سوخت و خنک‌کننده سرب اطراف آن عملاً تحلیل ریاضی و ارائه مدل ترموهیدرولیکی آن را مشکل می‌نماید. با توجه به اینکه در کدهای ترموهیدرولیک هسته‌ای در دسترس نظیر COBRA-EN و یا RELAP5 خواص ترموهیدرولیکی و ویژگی‌های فلز سرب به‌عنوان خنک‌کننده وجود ندارد، در این مرحله از پروژه یک برنامه ترموهیدرولیکی برای این کلاس از رآکتورها توسعه داده می‌شود. روند اجرای طرح بدین گونه می‌باشد، ابتدا مشخصات دقیق هندسه قلب، ساختارهای حرارتی، ویژگی‌های موادی، هندسه و نوع شبکه‌های نگهدارنده میله سوخت (Grid spacer) و در نهایت شرایط مرزی و خصوصیات جریان ورودی به قلب، مشخص و تعیین می‌گردد. سپس با توجه به الگوی جریان ورودی به قلب، با استفاده از کدهای مهندسی هسته‌ای و با نوشتن یک برنامه ترموهیدرولیکی به نام فرترن تحلیل رفتار خنک‌کننده در قلب رآکتور و در نهایت تعیین پارامترهای ترموهیدرولیکی آن پرداخته می‌شود.

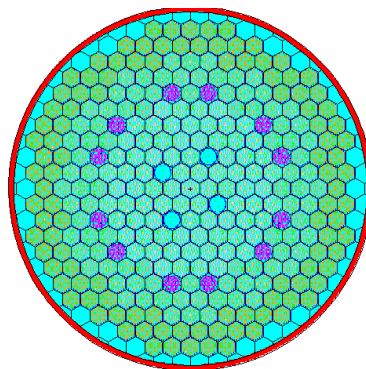
پس از انجام جمع‌آوری اطلاعات و در نظر گرفتن اکثریت جوانب، با استفاده از کد MCNPX پارامترهای نوترونی نظیر ضریب تکثیر مؤثر، توزیع شار نوترون‌های سریع و حرارتی و با استفاده از روش‌های حل عددی معادلات بقا و نوشتن یک برنامه تغییرات پارامترهای ترموهیدرولیکی قلب رآکتور نظیر فشار، آنتالپی و کیفیت جرمی خنک‌کننده در رآکتور پیشرفته ALFRED در طی شرایط کاری پایا محاسبه می‌گردد و نتایج به دست آمده با نتایج ارائه شده در گزارش‌ها و مقالات مقایسه و تجزیه و تحلیلی از رفتار قلب رآکتور ارائه و سپس جهت راست آزمایی تلفیق کد نوترونی و مدل ترموهیدرولیکی برای یک مجتمع سوخت داغ انجام می‌گردد.

## ۲-۱ الگوریتم کوپل کدهای نوترونی و مدل ترموهیدرولیکی

برای تلفیق کدهای نوترونی با مدل ترموهیدرولیکی نوشته شده، در ابتدا هر یک از مجتمع‌های سوخت موجود در قلب رآکتور، توسط کد MCNPX مدل می‌شوند. در این پروژه، هر مجتمع سوخت را در راستای محوری به ۱۰ بخش تقسیم کردیم، پس از محاسبات نوترونیکی در کد MCNPX مقادیر توزیع توان شعاعی و محوری را در بخش‌های مختلفی از هر مجتمع سوخت خواهیم داشت. همچنین، مقدار ضریب تکثیر مؤثر قلب نیز در این مرحله تعیین می‌شود. این خروجی‌ها باید شامل توان میانگین مجتمع سوخت و توزیع توان محوری باشد. پس از به دست آمدن مقادیر توان در هر بخش از قلب رآکتور، این مقادیر را به‌عنوان ورودی کد ترموهیدرولیک قرار داده و به محاسبه دماهای سوخت، خنک کننده، غلاف و همچنین چگالی سیال خنک کننده در سطح قلب رآکتور می‌پردازیم. در این مرحله دماهای اولیه ورودی حدس زده شده را با دماهای محاسبه شده در این قسمت مقایسه می‌کنیم که برای این قیاس، دمای سوخت را به‌عنوان معیار قرار می‌دهیم و در صورتی که اختلاف دمای سوخت مرحله قبل و این مرحله، از مقدار معینی بزرگ‌تر باشد، مجدداً مراحل فوق را با دماها و چگالی جدید تکرار می‌نماییم. این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که میزان اختلاف دماهای سوخت از مقدار معیار کمتر شود. باید دقت شود که در هر مرحله محاسبات ترموهیدرولیکی فقط برای یک مجتمع سوخت انجام می‌شود. بنابراین باید فایل‌های توزیع توان محوری جداگانه برای تمامی مجتمع‌ها توسط ماژول نوترونیکی ساخته شود.

جدول ۱. مشخصات اصلی رآکتور ALFRED [۳]

| Parameter                   | Unit             | Values |
|-----------------------------|------------------|--------|
| Thermal power               | MW               | 300    |
| Active height               | cm               | 60     |
| Pellet hollow diameter      | mm               | 2      |
| Pellet radius               | mm               | 4.5    |
| Gap thickness               | mm               | 0.15   |
| Clad thickness              | mm               | 0.6    |
| Pin diameter                | mm               | 10.5   |
| Wrapper thickness           | mm               | 4      |
| Distance between 2 wrappers | mm               | 5      |
| Coolant velocity            | ms <sup>-1</sup> | ~1.4   |
| Lattice pitch (hexagonal)   | mm               | 13.86  |
| Pins per FA                 | -                | 127    |
| Inner vessel radius         | Cm               | 165    |



شکل ۱. نمای از قلب رآکتور ALFRED [۳]

برخی از پارامترهای هندسی رآکتور ALFRED در جدول ۱ آورده شده است. قلب این رآکتور دارای یک شبکه شش ضلعی شامل ۱۷۱ بسته سوخت (FA) به رنگ سبز روشن، ۱۲ میله کنترل (CR) به رنگ بنفش، ۴ میله ایمنی (SR) و ۱۰۸ میله خالی به عنوان بازتابنده با رنگ بی سبز فسفری از جنس  $(ZrO_2 (95\%) - Y_2O_3 (5\%))$  می‌باشد. نمایی از قلب این رآکتور در شکل ۱ نشان داده شده است.

## ۲-۲ ورودی‌های کمیت‌های ترموهیدرولیکی و مشخصات مجتمع سوخت رآکتور آلفرد

جدول ۲. ورودی کمیت‌های ترموهیدرولیکی و مشخصات مجتمع سوخت رآکتور ALFRED

| Input Parameters | واحد    | کمیت ورودی                      |
|------------------|---------|---------------------------------|
| 400.0            | (°C)    | دمای ورودی                      |
| 1.4              | (m/sec) | سرعت خنک کننده                  |
| 0.1              | (MPa)   | فشار ورودی خنک کننده            |
| 171              | (#)     | تعداد مجتمع‌های سوخت در قلب     |
| 127              | (#)     | تعداد میله‌های سوخت در هر مجتمع |
| 0                | (#)     | تعداد تیوب‌ها در هر مجتمع       |
| 10               | (#)     | تعداد مش‌های محوری              |
| 10               | (#)     | تعداد مش شعاعی در میله سوخت     |
| 13.86            | (mm)    | گام میله‌های سوخت               |
| 0.6              | (m)     | ارتفاع قلب                      |
| 10.5             | (mm)    | شعاع خارجی غلاف                 |
| 9.3              | (mm)    | شعاع داخلی غلاف                 |
| 9.0              | (mm)    | قطر میله سوخت                   |
| 2.0              | (mm)    | قطر حفره وسط قرص سوخت           |
| 300.0            | (MWth)  | توان حرارتی کل رآکتور           |

## ۳-۲ کمیت‌های خروجی (دمای خنک کننده و دمای خروجی و ورودی غلاف سوخت و دمای سوخت و تغییرات چگالی و تغییرات فشار جزئی) در رآکتور آلفرد

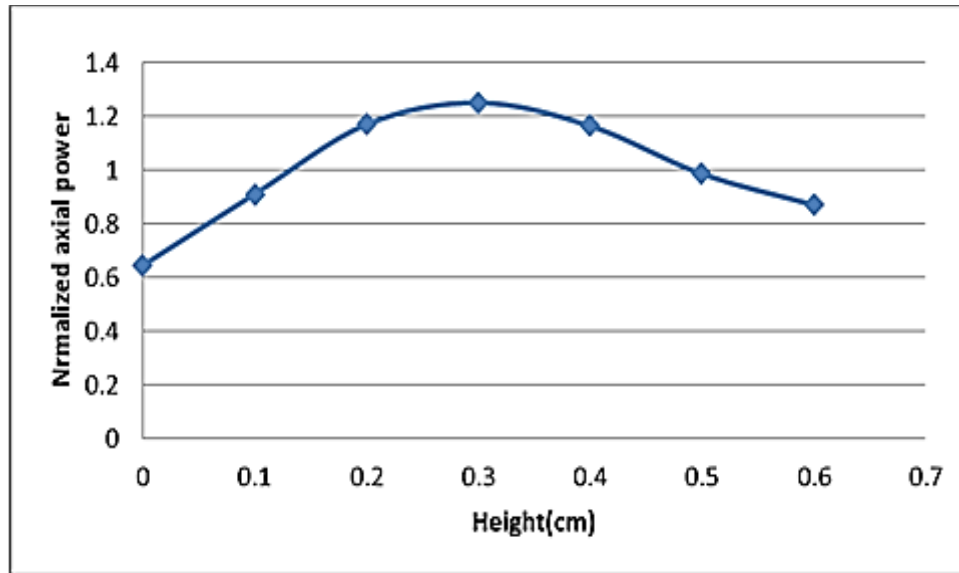
جدول ۳. کمیت‌های خروجی (دمای خنک کننده و دمای خروجی و ورودی غلاف سوخت و دمای سوخت و تغییرات چگالی و تغییرات

فشار جزئی) در رآکتور ALFRED

| Height (cm) | Tcoolant (c) | Tcladout(c) | Tcladin(c) | Tfuel(c)  | Density(kg/m3) | Pressure(Bar) |
|-------------|--------------|-------------|------------|-----------|----------------|---------------|
| 3.0000      | 400.8829     | 406.1623    | 411.4306   | 895.2603  | 10562.9900     | .9936         |
| 9.0000      | 404.3425     | 419.7218    | 434.9121   | 1265.2420 | 10560.8800     | .9809         |
| 15.0000     | 410.9801     | 435.1266    | 458.7454   | 1540.4500 | 10554.7200     | .9681         |
| 21.0000     | 420.2535     | 451.0885    | 480.9974   | 1727.4650 | 10545.0300     | .9553         |
| 27.0000     | 431.4017     | 466.2949    | 499.9226   | 1837.9220 | 10532.5700     | .9425         |
| 33.0000     | 443.5038     | 479.5105    | 514.0712   | 1877.3380 | 10518.3900     | .9298         |
| 39.0000     | 455.5526     | 489.6701    | 522.3708   | 1847.0620 | 10503.6600     | .9172         |
| 45.0000     | 466.5377     | 495.9536    | 524.1838   | 1744.5420 | 10489.6100     | .9047         |
| 51.0000     | 475.5308     | 497.8464    | 519.3445   | 1562.6420 | 10447.4200     | .8923         |
| 57.0000     | 481.7673     | 495.1785    | 501.1775   | 1286.9310 | 10468.1300     | .8801         |

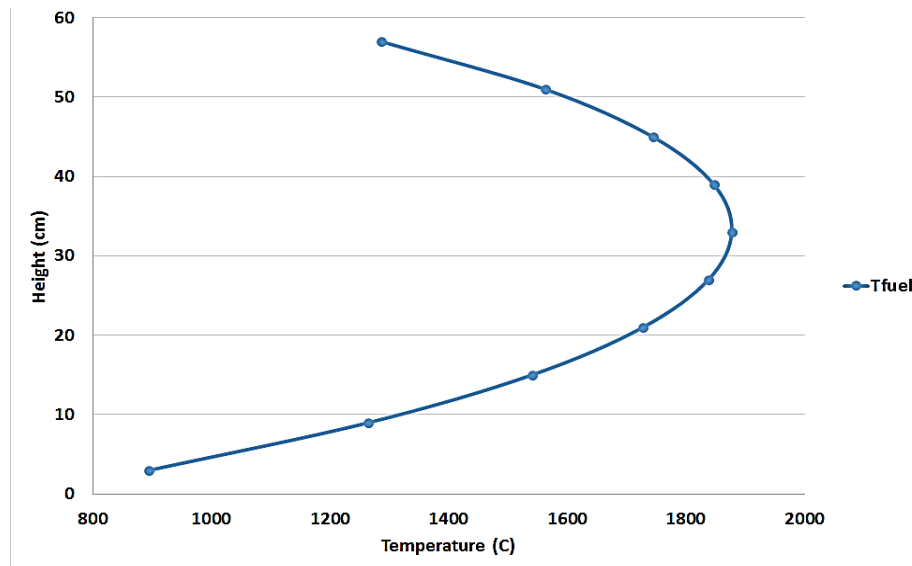
### ۳. نتایج :

بنابراین با محاسبه پارامترهای نوترونی باتوجه به مشخصات قلب رآکتور آلفرد در جدول ۱ و محاسبات کمیته‌ای خروجی جدول ۳ با توجه به ورودی کمیته‌ای ترموهیدرولیکی و مشخصات مجتمع سوخت رآکتور در جدول ۲ می توان به‌عنوان نمونه کوپلینگ را برای مجتمع سوخت داغ به دست آورد. در شکل زیر محاسبات نوترونیک توزیع توان محوری نرمال شده برای مجتمع سوختی که در مرکز قلب رآکتور آلفرد قرار دارد، به صورت زیر به دست آمده است.

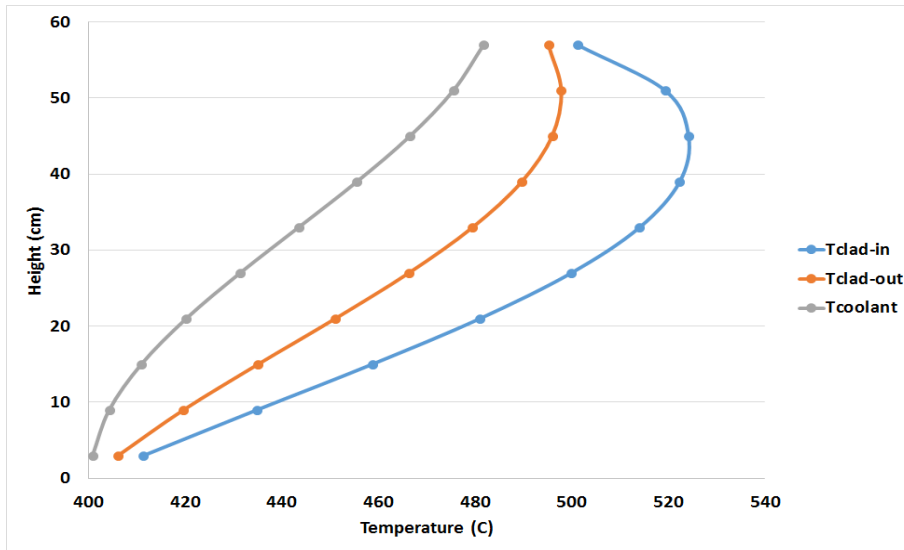


شکل ۲. توزیع توان محوری نرمال شده مجتمع سوخت داغ با کد MCNPX

که نتایج خروجی کد ترموهیدرولیک از جمله دمای سوخت، غلاف و خنک‌کننده برای این مجتمع سوخت داغ بصورت زیر می‌باشد.



شکل ۳. تغییرات محوری دمای سوخت در مجتمع سوخت داغ



شکل ۴. تغییرات محوری دمای غلاف و خنک‌کننده در مجتمع سوخت داغ

#### ۴. نتیجه‌گیری :

در این تحقیق به تلفیق کدهای نوترونی و مدل ترموهیدرولیکی در مجتمع سوخت داغ رآکتور آلفرد پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای ترموهیدرولیکی نظیر دماهای سوخت، خنک‌کننده و چگالی سیال خنک‌کننده بر روی پارامترهای نوترونی مانند توزیع توان و شرایط بحرانی رآکتور تأثیر می‌گذارد. با تغییر هر یک از پارامترهای ترموهیدرولیکی، اصول حاکم بر واکنش‌های نوترونی نیز دستخوش تغییرات می‌شود. عکس این قضیه نیز صادق می‌باشد یعنی با تغییر هر یک از پارامترهای نوترونیکی، پارامترهای ترموهیدرولیکی نیز تغییر پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال با تغییر دمای خنک‌کننده، چگالی آن نیز تغییر کرده و این فرایند به نوبه خود باعث تغییر در کندکنندگی سیال شده و به این ترتیب توزیع شار و توان را در قلب رآکتور دچار تغییر می‌کند. برای آستی آزمایشی، محاسبات نوترونی توزیع توان محوری نرمال شده برای مجتمع سوخت داغ را به دست آورده و پارامترهای ترموهیدرولیک از جمله دمای سوخت، غلاف و خنک‌کننده برای این مجتمع سوخت داغ متناسب با آن رسم شده است. با تغییر در توزیع توان محوری، دمای خنک‌کننده، چگالی آن تغییر کرده و این فرایند به نوبه خود باعث تغییر در کندکنندگی سیال می‌شود.

#### ۵. مراجع:

- [1] US DOE (2002). Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, a Technology Roadmap for the Generation IV Nuclear Energy System.
- [2] Alemberti, A., Carlsson, J., Malambu, E., Orden, A., Cinotti, L., Struwe, D., Agostini, P., Monti, S. (2010). From ELSY to LEADER - European LFR Activities. Transactions of the American Nuclear Society, European Nuclear Conference 2010, Barcelona, Spain, May 30 - June 2.
- [3] Gregorini, M. (2012). Conceptual design of the DHR system of the ETDR (ALFRED), LEADER project Task No. 3.5.
- [4] Mikityuk, K. (2012). Identification of representative DBC and DEC accident initiators for the ETDR (ALFRED), LEADER project Task No. 5.3.
- [5] Alemberti, A., Frogheri, M., Mansani, L. (2013). The Lead fast reactor Demonstrator (ALFRED) and ELFR design. Proceedings of the International Conference on Fast Reactors and related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios, Paris, France, March 4-7.
- [6] Grasso, G., Petrovich, C., Mikityuk, K., Mattioli, D., Manni, F., Gugiu, D. (2013). Demonstrating the effectiveness of the European LFR concept: the ALFRED core design. Proceedings of the International Conference on Fast Reactors and related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR 13), Paris, France, March 4-7.

- [7] Bandini G., Bubelis E., Schikorr M., Stempnievicz M., Tucek K., Lázaro A., Kudinov P., Köö K., Jeltsov M., Mansani L. (2013). Safety Analysis Results of Representative DEC Accidental Transients for the ALFRED Reactor, Proceedings of the International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles (FR13), Paper: CN-199/260, Paris.
- [8] Damiani, L., Montecucco, M., Pini Prato, A. (2013). Conceptual design of a bayonet-tube steam generator for the ALFRED lead-cooled reactor, Nuclear Engineering and Design, Volume 265, Pages 154-163.
- [9] Ponciroli, R., Bigoni, A., Cammi, A., Lorenzi, S., Luzzi, L. (2014). Object-oriented modelling and simulation for the ALFRED dynamics, Progress in Nuclear Energy, Volume 71, Pages 15-29.
- [10] Ponciroli, R., Cammi, A., Lorenzi, S., Luzzi, L. (2014). A preliminary approach to the ALFRED reactor control strategy, Progress in Nuclear Energy, Volume 73, 12014. Nuclear Engineering and Design, Volume 277, Pages 173-187.