



## شبیه‌سازی نوترونی قلب راکتور موج‌رونده (TWR) در سیکل اول و دوم با استفاده از کد MCNPX2.7

امان‌الهی درچه لیدا - خردمند سعیدی محسن\* - جهان‌فریا غلامرضا

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

### چکیده:

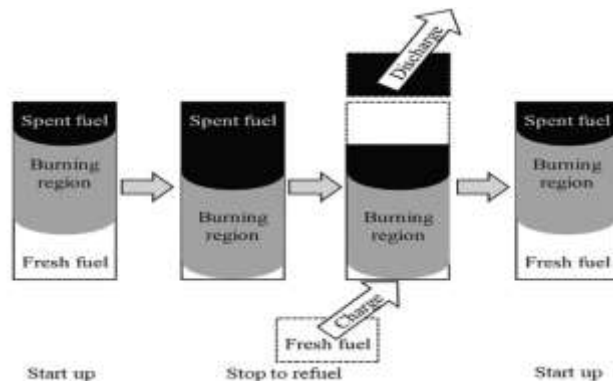
این تحقیق به بررسی امکان شکل‌گیری پدیده‌ای بنام موج شکافان در سیکل اول و دوم راکتورهای موج‌رونده TWR که اخیراً در طراحی راکتورهای هسته‌ای مورد توجه قرار گرفته است، می‌پردازد. این موج که با استفاده از یک چاشنی نوترونی و با برقراری شرایط لازم و کافی ایجاد شده است، قادر خواهد بود تا بدون سوخت‌گذاری مجدد انرژی تولید کند. سوخت مورد نیاز این راکتور می‌تواند اورانیوم طبیعی و یا تهی شده باشد. پسماند این نوع راکتور نسبت به راکتورهای امروزی به مراتب کمتر و دارای بار کمتری از آکتینیدها مانند پلوتونیوم ۲۳۹ می‌باشد. بررسی این موج با حل معادلات مصرف سوخت و با در نظر گرفتن سیکل سوخت  $U^{15}N$  و در قلب شش‌وجهی صورت گرفته است. روش حل این سیستم با استفاده از کد MCNPX2.7 است. هدف اصلی از انجام این کار عبارتست از شبیه‌سازی نوترونی قلب راکتور با استفاده از کد MCNPX2.7 و مقایسه نتایج سیکل اول با نتایج کد MOBC که پیش از این در برخی مراجع صورت پذیرفته است. علاوه بر این سوخت‌گذاری سیکل دوم و نحوه کارکرد راکتور در این سیکل نیز بررسی شده است.

کلمات کلیدی: CANDLE - Traveling Wave Reactor - MCNPx2.7 - Monte Carlo - Depleted Uranium

### معرفی:

امروزه پدیده‌ای بنام موج شکافان هسته‌ای شناخته شده است که آینده‌ی بدون بازفرآوری و بسیار ایمن را برای ما در پی خواهد داشت [۱۰]. تحقیقات نشان می‌دهد که سوخت مورد نیاز می‌تواند اورانیوم طبیعی یا تهی شده باشد [۱۰] که به فرآیند هزینه‌بر غنی‌سازی نیاز ندارد [۶ و ۵ و ۲]. برای کنترل سطح قدرت به میله‌های کنترل نیاز نیست [۳]. در راکتورهای موج شکافان علی‌رغم مصرف سوخت اولیه و پسماند کمتر، بازده افزایش می‌یابد. این ویژگی جالب به همراه چندین خصوصیت منحصر بفرد دیگر موجب شد تا برای اولین بار پیشنهاد راکتورهایی که بتوانند سوخت خود را تامین کنند در سال ۱۹۵۸ توسط Saveli Feinberg بیان شد، که در آن راکتور از حالت بحرانی خارج نمی‌شود. تولید توان قطع نمی‌شود و راکتور حالت زاینده و سوزنده داشته است [۹]. از اورانیوم طبیعی یا اورانیوم تهی شده بعنوان سوخت استفاده شده است. همین امر مفهوم اولیه راکتورهای موج‌رونده (Traveling Wave Reactor) بود [۹]. در سال ۱۹۹۶ Teller و

همکارانش پیشنهاد راکتورهای خودسوخ‌را بیان کردند [۹]. در سال ۲۰۰۱ Sekimoto یک روش ابداعی مصرف سوخت ارائه داد که این روش را CANDLE نامید [۹].

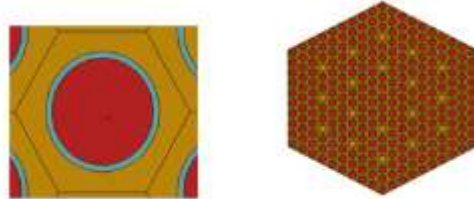


شکل (۱) استراتژی TWR [۱۱]

شکل (۱) استراتژی TWR را نشان می‌دهد اگرچه شکل تولید قدرت و شارنوترون همواره ثابت است ولی ناحیه‌ی تولید قدرت به سمت جلو در جهت محور راکتور حرکت کرده و سوخت مصرف می‌شود [۱۱ و ۷]. در سال ۲۰۰۶، Terra Power طرح راکتورهای موج‌رونده را ارائه داد که در مجله Technology Review بعنوان ۱۰ طرح برتر معرفی شد [۳ و ۹]. دکتر محسن خردمندسعدی در سال ۲۰۱۲ شبیه‌سازی نوترونی سوختن راکتورهای TWR را بوسیله کد MOBC انجام داده‌اند [۹]. Terra Power قصد دارد تا نیروگاه ۶۰۰ مگاواتی به نام TWR-P را طی سال‌های ۲۰۱۸ - ۲۰۲۲ بسازد [۸ و ۹]. هدف اصلی در این مقاله عبارتست از شبیه‌سازی نوترونی قلب راکتور TWR در سیکل اول و دوم با استفاده از کد MCNPx2.7 و میزان سوخت مورد نیاز برای ادامه کار در سیکل دوم است.

### روش کار :

در جدول (۱) پارامترهای راکتور مرجع آورده شده است. شکل (۲) سمت راست یک مجتمع سوخت را نشان می‌دهد. هر جایگاه سوخت در مجتمع با آرایش مثلثی در کنارهم بگونه‌ای قرار گرفته‌اند که فاصله مرکز تا مرکز هر دو جایگاه cm ۱/۲۸ است. از این تعداد ۲۵۳ جایگاه میله‌های سوخت و ۱۸ جایگاه خالی است که محل قرار گرفتن سموم سوخت و ابزارهای اندازه‌گیری و محل قرار گرفتن میله‌های جاذب است. شکل (۲) سمت چپ نمایی از بالای یک میله سوخت است که این نواحی را بخوبی نشان می‌دهد.



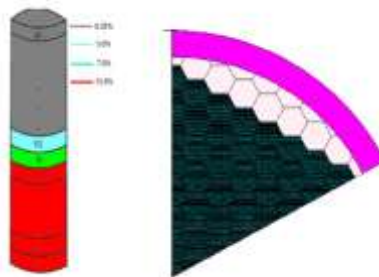
شکل (۲) مجتمع سوخت و نمای بالایی میله سوخت  
جدول (۱) پارامترهای هندسی راکتور TWR [۹]

<b>Thermal Power MWt</b>	۲۴۰۰
<b>Core characteristics(cm)</b>	
Core Height(cm)	۴۸۰
Core diameter(cm)	۳۳۵
Radial reflector thickness(cm)	۲۰
Number of fuel assemblies	۱۶۹
<b>FA</b>	
Geometry	Hexagonal
Apothem(cm)	۱۱/۱۶
Side	۱۲/۸۹
Number of rods	۲۷۱
<b>Fuel Rod</b>	
Fuel pellet outer radius(cm)	۰/۴۲۵۶
Cladding inner radius(cm)	۰/۴۲۵۸
Cladding outer radius(cm)	۰/۴۷۸۵
Apothem(cm)	۰/۶۴
Slide(cm)	۰/۷۴
<b>Material</b>	
Fuel	U <sup>15</sup> N
Cladding	ODS



Coolant	He
---------	----

شکل (۳) سمت راست  $\frac{1}{6}$  قلب را نشان می‌دهد که برای سهولت کار و کاهش زمان اجرای برنامه و بدلیل وجود تقارن، تمام محاسبات برنامه برای این حجم از قلب انجام شده‌است. برای اینکه در خروجی برنامه خطایی رخ ندهد در مرزها از یک بازتابنده استفاده شده‌است. سوختن سوخت در راکتور TWR بصورت محوری و از مرکز سوخت آغاز می‌شود. در سیکل آغاز به کار راکتور نیاز به مواد شکافان خواهد بود که تنها از طریق استفاده از اورانیوم غنی شده امکان تولید آنها می‌باشد.



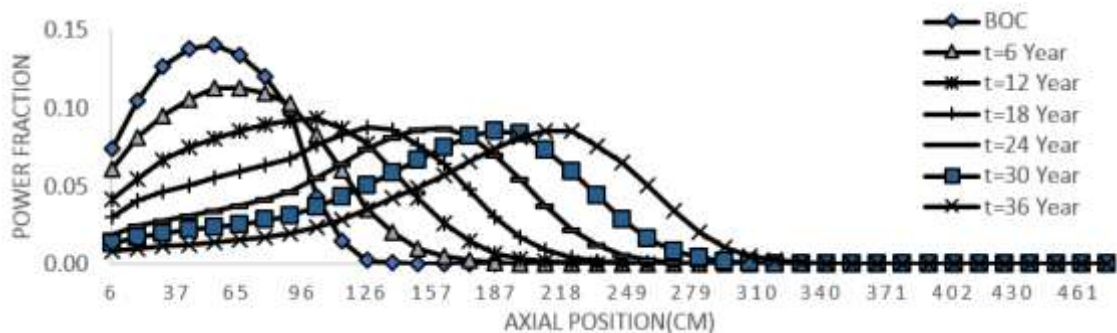
شکل (۳) نمایی از  $\frac{1}{6}$  قلب راکتور TWR و چیدمان قلب راکتور [۹]

به همین خاطر ۱۲cm از کف میله‌های سوخت را اورانیوم با غنای ۱۳٪ و ۱۲cm دارای غنای ۷٪ و ۱۲cm بعدی دارای غنای ۳٪ و مابقی دارای غنای ۲۵٪ می‌باشد. هر میله سوخت به ۴۰ قسمت تقسیم بندی و هر ناحیه بصورت یک سلول فعال مجزا تعریف شد. بعد محاسبات در برنامه MCNPX2.7 برای سیکل اول و دوم انجام شد. در طول سیکل برای کنترل راکتیویته اضافی باید از جاذب‌های سوختی استفاده شود. شکل (۳) سمت چپ نمایی از تقسیم بندی قلب راکتور و طریقه قرار گرفتن سوخت با غنای متفاوت را نشان می‌دهد. برای اطمینان از روش انتخاب شده برای شبیه سازی کارکرد راکتور با موج‌رونده برنامه MCNPX2.7 برای قلب راکتور TWR نوشته‌شد. اما هدف اینست که این راکتور برای مدت طولانی‌تری با تعویض آنلایین سوخت و بدون نیاز به سوخت غنی شده بتواند کار کند. برای این منظور باید مقدار سوخت اولیه و سوخت تازه برای بارگذاری مجدد مشخص شود. بطوریکه شکل توزیع توان و شار نوترون در حالت تعادل باقی بماند. بعد از ۳۶ سال کارکرد با سوخت اولیه باید چند قسمت از سوخت مصرفی از پایین میله های سوخت خارج شود و از بالا سوخت تازه وارد شود تا ضریب تکثیر حدود یک باقی بماند و کاهش پیدا نکرده و راکتور خاموش نشود.

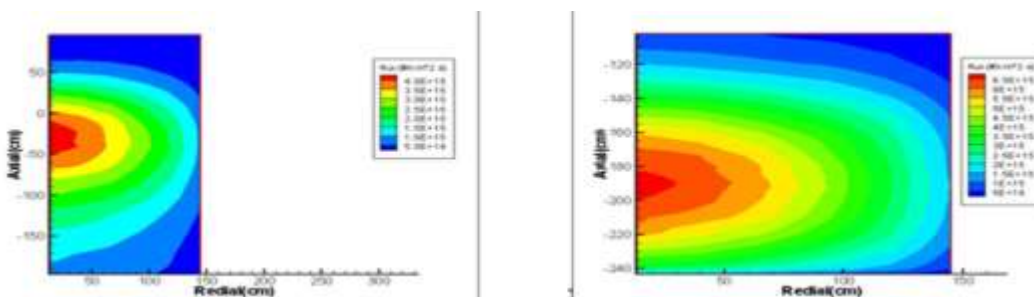
نتایج :

### مدلسازی سیکل اول :

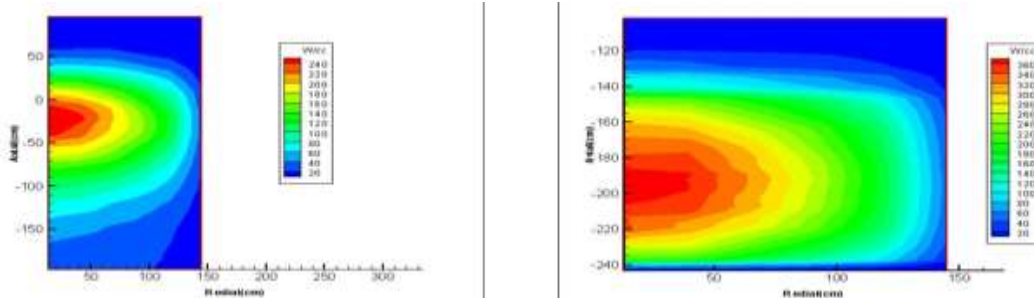
در این پژوهش آنالیز نوترونی قلب راکتور خود سوخت مولد مرجع با استفاده از کد MCNPx2.7 انجام شد. در سیکل اول کارکرد راکتور با انتخاب میزان غنای سوخت تازه و نحوه چیدمان جاذب<sup>۳</sup>های نوترونی، تغییرات شکل شار نوترون و چگالی توان بدست آمد. سوختن سوخت در راکتور TWR بصورت محوری و از انتهای میله سوخت که شامل سوخت غنای ۱۳٪ می باشد، آغاز می شود. برای اعتبارسنجی کار انجام شده نتایج بدست آمده از محاسبات سیکل اول توسط کد MCNPx2.7 با نتایج پژوهش مرجع [۹] با کد MOBC مقایسه شد. شکل (۴) تغییرات چگالی قدرت در طول سیکل اول کارکرد راکتور را نشان می دهد و در ابتدای سیکل اول بدلیل استفاده از سوخت غنی شده ، این تغییرات بسیار شدید است ولی بعد از اتمام سوخت غنی شده راکتور به تعادل می رسد. همانگونه که مشاهده می شود تغییرات توزیع در راستای محوری بسیار ناچیز است. شکل (۵) نشان می دهد که تغییرات توزیع شار نوترون را در انتهای سیکل اول در راستای محوری از ۲۴۰- به سمت ۲۴۰+ در حال حرکت است .



شکل (۴) تغییرات چگالی قدرت در سیکل اول



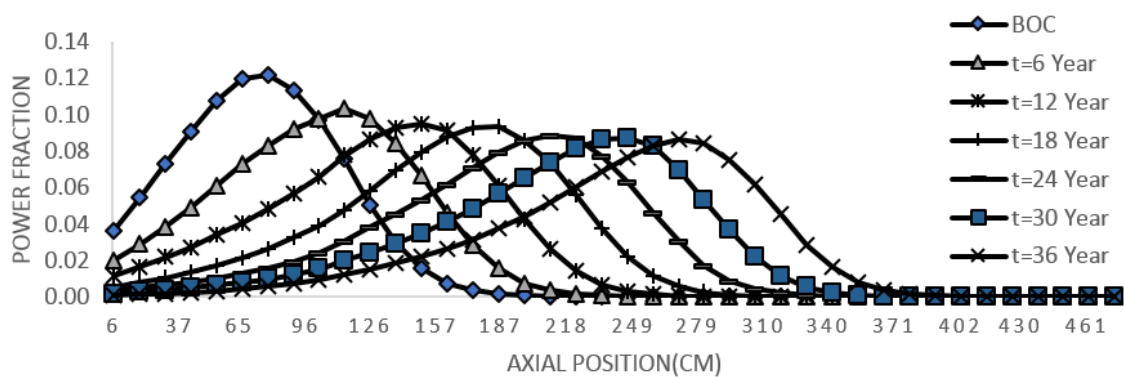
شکل(۵) توزیع شار نوترون در ابتدا و انتهای سیکل اول



شکل (۶) تغییرات چگالی توان در ابتدا و انتهای سیکل اول

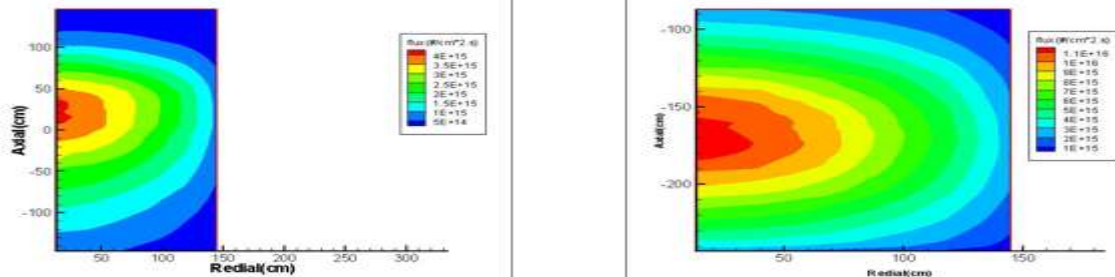
### مدلسازی سیکل دوم :

در این مرحله تعدادی از سوخت‌های مصرفی از انتهای قلب خارج و بجای آنها سوخت تازه قرار داده شد. بطوریکه ضریب تکثیر کاهش پیدا نکند و راکتور از حالت تعادل خارج نشود. شکل (۷) نشان می‌دهد که تغییرات چگالی قدرت در ابتدای سیکل دوم کارکرد راکتور به شدت سیکل اول که سوخت غنی شده داشتیم نبود. این تغییرات در راستای محوری در حال است و بعد از مصرف سوخت تازه در حالت تعادل باقی می‌ماند. شکل (۸) تغییرات شار نوترون است که نشان می‌دهد شار نیز در راستای محوری در حال حرکت است بدون اینکه شکل آن تغییر کند. شکل (۹) تغییرات چگالی توان را در ابتدا و انتهای سیکل دوم را نشان می‌دهد. تغییرات چگالی توان در سیکل دوم نیز در راستای محوری است.

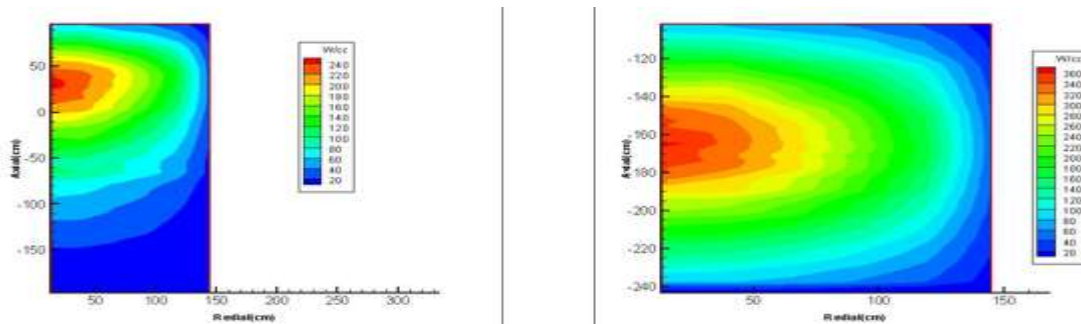


شکل (۷) تغییرات چگالی قدرت در راستای محوری در سیکل دوم





شکل (۸) توزیع شارنوترون در ابتدا و انتهای سیکل دوم



شکل (۹) تغییرات چگالی توان در ابتدا و انتهای سیکل دوم کارکرد راکتور

### بحث و نتیجه گیری :

هدف از این تحقیق شبیه سازی نوترونی قلب راکتور TWR و میزان سوخت اولیه و همچنین سوخت مورد نیاز برای بارگذاری مجدد با استفاده از کد MCNPX2.7 است. نتایج بدست آمده از شبیه سازی نوترونیک سیکل اول با نتایج کد MOBC در مرجع [۹] تطابق داشت. بدین ترتیب اعتبارسنجی سیکل اول انجام شد. همین امر نشان می دهد که راکتور TWR قادر است برای مدت ۳۶ سال بدون اینکه از حالت بحرانی خارج شود به کار خود ادامه دهد. شارنوترون و چگالی قدرت نیز در جهت محوری حرکت می کند. نتایج نشان داد که برای اینکه راکتور در سیکل دوم نیز بتواند بعد از سوخت گذاری به کار خود ادامه دهد باید ۱۲ قسمت از سوخت مصرفی را خارج و بجای آن سوخت تازه وارد کنیم تا تعادل راکتور حفظ شود. بدین ترتیب راکتور قادر خواهد بود برای دو سیکل متوالی بدون اینکه تغییری در شارنوترون و چگالی توان ایجاد شود به کار خود ادامه دهد. این امری مهم در پیشرفت تکنولوژی هسته ای محسوب می شود.

### مراجع :

[1] E. TELLER, M. Ishikawa, L. Wood, "Completely Automated Nuclear Power Reactors for Long-Term Operation," Proc Of the Frontiers in Physics Symposium, American Physical Society and the American Association of Physics Teachers Texas Meeting, Lubbock, Texas, United States, 1995.



- [2] Hiroshi Sekimoto, Seiichi Miyashita, "Startup of "Candle" burnup in fast reactor from enriched uranium core", Energy Conversion and Management 47, 2772–2780 (2006)
- [3] Hiroshi Sekimoto, Sinsuke Nakayama, "Power level control of CANDLE reactor without control rods", Annals of nuclear Energy 63, 427-431 (2014)
- [4] Hiroshi Sekimoto, Mingyu Yan, "Design study on small CANDLE reactor", Energy conversion and management 49, 1868-1872 (2008)
- [5] Julia Abdul Karim, Jun Nishiyama, Toru Obara , "Effects of cooling interval time in melt and refining process for CANDLE Burning " , Annals of nuclear Energy 105, 144-149 (2017)
- [6] John Gilleland, Robert Petroski, Kevan Weaver, " The Traveling Wave Reactor: Design and Development", Engineering 2, 88-96 (2016)
- [7] Khanh Hoang, Jun Nishiyama , Toru Obara, "Design concepts of small CANDLE reactor with melt-refining process " , Progress in Nuclear Energy Volume 108, Pages 233-242, September 2018
- [8] Pavel Hejzlar, Robert Petroski, Jesse Cheatham, Nick Touran, Michael Cohen, Bao Truong, Ryan Latta, Mark Werner, Tom Burke, Jay Tandy, Mike Garrett, Brian Johnson, Tyler Ellis, Jon Mcwhirter, Ash Odedra, Pat Schweiger, Doug Adkisson, John Gilleland "TERRAPOWER, LLC TRAVELING WAVE REACTOR DEVELOPMENT PROGRAM OVERVIEW" Nuclear Engineering and Technology Volume 45, Issue 6, Pages 731-744, November 2013
- [9] M. Kheradmand Saadi, A. Abbaspour, A. Pazirandeh" Startup of "CANDLE" burnup in a Gas-cooled Fast Reactor using Monte Carlo method", Annals of nuclear Energy 50, 44-49 (2012)
- [10] Meiyin Zheng, Wenxi Tian, Xiao Chu, Dalin Zhang, Yingwei Wu, Suizheng Qiu, Guanghui Su , "Study of traveling wave reactor (TWR) and CANDLE strategy: A review Work", progress in nuclear Energy 71, 195-205 (2014)
- [11] Van Khanh Hoang, Jun Nishiyama, Toru Obara "Effects of compensating for fuel losses during the melt-refining process for a small CANDLE reactor" Annals of Nuclear Energy 135, 106969 (2020)