

## طراحی مدل دینامیک از چشم و مطالعه اثرات آماری تغییر شکل عدسی در ضرایب تبدیل شار به دز الکترون

ابراهیمی خانکوک، عطیه\*

دانشگاه نیشابور، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

### چکیده:

بر اساس مطالعات صورت گرفته، سلول‌های حساس به پرتو در عدسی چشم، در قسمت استوایی عدسی واقع شده‌اند. در سال‌های اخیر، کمیته بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوها (ICRP)، ضرایب تبدیل شار به دز الکترون را برای بخش‌های حساس و غیرحساس عدسی با استفاده از مدل واقعی چشم ارائه کرده‌است. با این وجود، در محاسبه این داده‌ها، تغییر شکل عدسی در اثر تغییر نقطه دید (انطباق) لحاظ نشده‌است. این در حالی است که پدیده انطباق سبب تغییر تحلدب عدسی و تغییر موقعیت ناحیه حساس عدسی می‌شود. هدف این پژوهش، ساخت یک مدل وابسته به انطباق از چشم برای اهداف دزسنجی و بررسی اثر انطباق بر مقدار ضرایب تبدیل شار به دز الکترون می‌باشد.

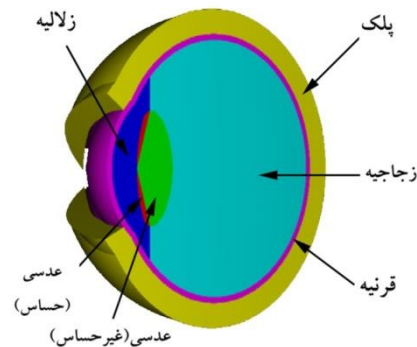
کلمات کلیدی: ضرایب تبدیل شار به دز الکترون، انطباق، مدل واقعی چشم، ناحیه حساس عدسی، کد MCNPX

### مقدمه :

عوامل مختلفی از جمله پرتوگیری‌های محیطی، شغلی و پزشکی سبب می‌شود بدن انسان در معرض پرتوهای یونیزان و غیر یونیزان قرار گیرد. در این میان، حساسیت برخی از اعضای بدن نسبت به پرتو بیشتر از سایر بخش‌ها می‌باشد. یکی از این اعضای حساس که توسط کمیته بین‌المللی حفاظت در برابر پرتو مورد توجه ویژه‌ای قرار دارد، چشم انسان است. حساسیت بالای بافت چشم نسبت به پرتو، کنترل میزان دز دریافتی توسط این عضو را بسیار حائز اهمیت می‌کند [۱].

یکی از شایع‌ترین اثرات پرتو بر روی چشم که منجر به کدورت عدسی و کاهش بینایی شخص می‌شود، آب مروارید نام دارد [۲]. مطالعات بیولوژیکی و زیست‌شناختی نشان می‌دهد که القای آب مروارید در اثر پرتوگیری بخش استوایی عدسی چشم است. با این وجود تا مدت‌ها به دلیل محدودیت آناتومی و عدم دقت مدل‌های موجود چشم، احتمال القای آب مروارید با تخمین دز دریافتی توسط کل عدسی برآورد می‌شد. در سال ۲۰۰۹ بهرنز و همکارانش مدل جدیدی از چشم ارائه کردند که جزئیات دقیق‌تری از آن را فراهم می‌کرد [۳]. در این مدل، بخش‌های مختلفی از چشم شامل پلک، عدسی، زجاجیه، اتاقک قدامی و قرنیه ارائه شده‌است. نکته حائز اهمیت در مدل بهرنز، تفکیک سلول‌های عدسی به دو بخش حساس به پرتو (ناحیه استوایی) و غیرحساس به پرتو می‌باشد که دقت مدل را بسیار بالا می‌برد. شکل ۱ نمای سه بعدی از مدل

بهرنز را نشان می‌دهد. بخش‌های حساس و غیرحساس عدسی در این شکل مشخص شده است [۳]. همچنین عناصر سازنده و چگالی بخش‌های مختلف آن در جدول ۱ آمده است.



شکل ۱ نمای سه بعدی مدل بهرنز [۳]

جدول ۱ درصد وزنی عناصر سازنده و مواد به کار رفته در بخش‌های مختلف مدل بهرنز [۳]

درصد وزنی (%)									چگالی	بخش
K	Cl	S	P	Na	O	N	C	H		
-	-	-	-	-	۸۸٫۸	-	-	۱۱٫۲	۱٫۰۰۸۹	زجاجیه
-	۰٫۰۶۵	۰٫۱۹۵	۰٫۰۰۶۵	۰٫۰۰۶۵	۷۳٫۱۴	۳٫۶۹	۱۲٫۶۲	۱۰٫۱۶	۱٫۰۷۶	قرنیه
-	-	-	-	-	۸۸٫۸	-	-	۱۱٫۲	۱٫۰۰۳	زلالیه
-	۰٫۱	۰٫۳	۰٫۱	۰٫۱	۶۴٫۶	۵٫۷	۱۹٫۵	۹٫۶	۱٫۰۶	عدسی
۰٫۱	۰٫۳	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۲	۶۴٫۵	۴٫۲	۲۰٫۴	۱۰٫۰	۱٫۰۹	پلک

علی‌رغم دقت آناتومی مدل بهرنز، این مدل یک مدل استاتیک است و تغییرات ناشی از کانونی شدن و همگرایی عدسی در آن در نظر گرفته نشده است. به بیان ساده‌تر، هنگامی که فرد به شیء‌ای نگاه می‌کند، با توجه به فاصله جسم از چشم، طی فرآیندی موسوم به تقارب عدسی یا انطباق، تحدب عدسی تغییر می‌کند تا تصویر واضحی از شیء در شبکیه شکل بگیرد [۴]. با توجه به تغییر شکل و تحدب عدسی در فرآیند انطباق، این رویداد می‌تواند سبب تغییر موقعیت سلول‌های حساس عدسی شده و در مقدار ضرایب تبدیل شار به دز بدست آمده برای بخش‌های حساس و غیرحساس عدسی موثر باشد. به خصوص در مواقعی که ذره قدرت نفوذ کمی دارد، موقعیت بافت و فاصله آن از سطح بدن می‌تواند اثر قابل توجهی در مقدار ضرایب تبدیل شار به دز بافت داشته باشد. از آنجایی که در پرتوگیری‌های شغلی این امکان وجود دارد که بارها و بارها نقطه دید افراد تغییر کند، از این‌رو تعیین عدم قطعیت ناشی از انطباق می‌تواند اعتبار داده‌های کتابخانه‌ای ضرایب تبدیل شار به دز را رد یا تضمین نماید.

تاکنون مدل‌های ریاضی و هندسی متفاوتی برای توصیف انطباق به منظور محاسبه ضریب شکست نوری ارائه شده است [۵-۸]. در این مدل‌ها برای توصیف تغییرات تحذب عدسی، معادلات سطوح مختلف سازنده عدسی در وضعیت‌های مختلف انطباق ارائه شده است. با این وجود هیچکدام از آن‌ها برای اهداف دزسنجی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. هدف از این پژوهش، طراحی مدل دینامیک چشم بر پایه تغییرات شکل عدسی و بر اساس طرح اولیه مدل بهرنز برای اهداف دزسنجی می‌باشد. همچنین تاثیر انطباق بر عدم قطعیت ضرایب تبدیل شار به دز الکترون محاسبه شده است.

## روش کار:

یکی از کامل‌ترین، ساده‌ترین و خوش تعریف‌ترین مدل‌های انطباق در سال ۱۹۸۵ توسط ناوارو و همکارانش ارائه شد [۵]. از این‌رو در مطالعه پیش‌رو، از مدل ریاضی ناوارو برای اعمال انطباق بر مدل چشم بهرنز استفاده شده است. این مدل با معادله ریاضی زیر توصیف می‌شود:

$$(1+Q)(x-x_0)^2 + y^2 + z^2 - 2R(x-x_0) = 0 \quad (1)$$

که در این رابطه  $R$  شعاع انحنا و  $Q$  پارامتر انحنای سطوح جلویی و پشتی عدسی،  $x$ ،  $y$  و  $z$  مختصات فضایی و محور  $x$ ، محور نوری چشم می‌باشند. مقادیر  $R$  و  $Q$  طوری تعیین شده‌اند که در حالت انطباق صفر، این معادله مطابقت نسبی خوبی بر عدسی مدل بهرنز داشته باشد.

بر طبق مدل ناوارو، شعاع و پارامتر انحنای عدسی و زلایه چشم در حین پدیده انطباق تغییر می‌کند. در حالت کلی وابستگی زمانی می‌توان این عوامل را با تابع زیر تعریف کرد:

$$P(A) = P_0 + C \times \ln(A+1) \quad (2)$$

در این رابطه  $P$  نمایانگر عامل موردنظر و  $A$  عدد انطباق است که بر حسب دیوپتر بیان می‌شود. همچنین  $P_0$  نشان دهنده مقدار پارامتر در وضعیت اولیه (بدون انطباق) است. ثابت  $C$  بسته به نوع پارامتر متفاوت است. در جدول ۲ پارامترهای متغیر در حین انطباق مشخص شده‌اند. همچنین ثابت  $C$  و مقدار اولیه به ازای هر کدام از آن‌ها در این جدول قابل مشاهده است [۵]. با توجه به رابطه ۲ و مقادیر ارائه شده در جدول ۲، عدسی چشم برای شش مقدار متفاوت  $A$  که بیانگر وضعیت بدون انطباق ( $A=0$ )، انطباق کامل ( $A=10$ ) و چهار حالت میانی ( $A=2, 4, 6, 8$ ) شبیه سازی شد. در این پژوهش برای شبیه‌سازی هندسی مدل و انجام محاسبات دزسنجی از کد محاسباتی MCNPX 2.6.0 استفاده شده است [۹].

جدول ۲ تغییرات شعاع و پارامتر انحنای سطوح سازنده عدسی و زلایه به صورت تابعی از وضعیت انطباق

عامل وابسته	$P_0$	$C$
شعاع سطح قدامی عدسی	۱/۱۶ cm	-۱/۷۵
شعاع سطح خلفی عدسی	-۰/۷۷ cm	۰/۲۲۹
عمق زلایه	۰/۲۷۵ cm	-۰/۰۵

۰٫۱	۰٫۴ cm	ضخامت عدسی
-۰٫۳۴	۳/۲	انحنای سطح قدامی عدسی
-۰٫۱۲۵	-۱	انحنای سطح خلفی عدسی

به منظور محاسبه مقدار ضرایب تبدیل شار به دز الکترون برای پرتودهی از مقابل و تحت زوایای ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه، الکترون‌ها و فوتون‌های ثانویه ترابرد شده‌اند. با روشن بودن مد فوتون و الکترون، مقادیر دز جذبی در بخش‌های مختلف چشم، با استفاده از تالی F6+ محاسبه شده و با استفاده از کارت FM به ضرایب تبدیل شار به دز تبدیل گردید.

پس از انجام محاسبات برای شش حالت مختلف انطباق، بین مقادیر بدست آمده میانگین‌گیری صورت گرفته و پراکندگی آن‌ها از مقدار میانگین، با استفاده از ضریب تغییرات (CV) محاسبه شد:

$$CV(\%) = \frac{SD}{(D/\phi)_m} \times 100 \quad (3)$$

در این رابطه  $(D/\phi)_m$  مقدار میانگین ضرایب تبدیل و SD انحراف معیار ضرایب را نشان می‌دهد. محاسبات برای ۱۲ چشمه تک انرژی الکترون در محدوده ۰٫۲ تا ۱۲ MeV انجام شد. خطای نسبی مقادیر دز به دست آمده در تمامی انرژی‌ها کمتر از ۲٪ می‌باشد.

## نتایج :

جدول ۳ نتایج مقدار میانگین و ضریب تغییرات (CV) را برای ضرایب تبدیل شار به دز الکترون ناحیه حساس عدسی، در زوایای مختلف پرتودهی نمایش می‌دهد.

جدول ۳ مقدار میانگین و CV ضرایب تبدیل شار الکترون به دز برای ناحیه حساس عدسی برحسب  $pGy.cm^2$

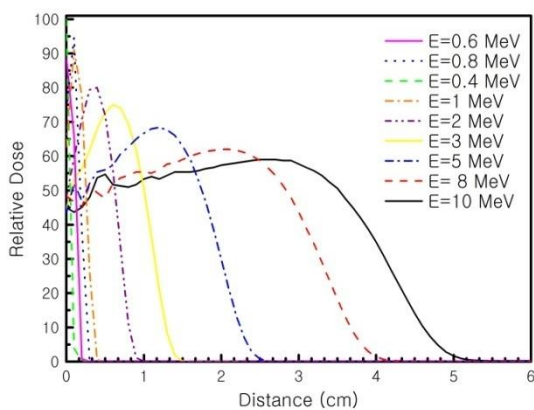
درجه ۴۵		درجه ۳۰		درجه ۱۵		درجه ۰		انرژی (MeV)
CV (%)	دز میانگین	CV (%)	دز میانگین	CV (%)	دز میانگین	CV (%)	دز میانگین	
۲	۰٫۰۰۴	۱	۰٫۰۰۵	۲	۰٫۰۱۶	۰٫۹	۰٫۰۱۳	۰٫۴
۲	۰٫۰۰۶	۲	۰٫۰۰۸	۲	۰٫۰۲۴	۰٫۳	۰٫۰۲۰	۰٫۵
۴۳	۰٫۰۲۴	۴۸	۰٫۰۵۳	۴۷	۰٫۱۸۸	۴۱	۰٫۱۶۶	۰٫۶
۲۳	۱٫۳۱	۲۲	۲٫۸۷	۲۱	۱۰	۲۰	۸٫۸۵	۰٫۷
۷	۹	۷	۱۸	۷	۶۴	۷	۵۴	۰٫۸
۱	۵۱	۰٫۷	۸۸	۰٫۷	۳۱۵	۰٫۷	۲۹۶	۱
۰٫۳	۱۵۷	۰٫۲	۱۸۱	۰٫۲	۵۲۴	۰٫۱	۴۱۲	۲
۰٫۲	۱۶۹	۰٫۴	۱۶۴	۰٫۲	۴۴۱	۰٫۲	۳۴۰	۳
۰٫۲	۱۶۰	۰٫۲	۱۵۱	۰٫۰۹	۴۱۱	۰٫۲	۳۱۷	۴
۰٫۲	۱۴۶	۰٫۲	۱۴۱	۰٫۰۷	۳۹۲	۰٫۱	۳۰۴	۶
۰٫۳	۱۴۳	۰٫۱	۱۳۹	۰٫۰۴	۳۸۶	۰٫۲	۳۰۰	۸

۰٫۳	۱۴۰	۰٫۳	۱۳۹	۰٫۰۸	۳۸۴	۰٫۲	۲۹۹	۱۰
-----	-----	-----	-----	------	-----	-----	-----	----

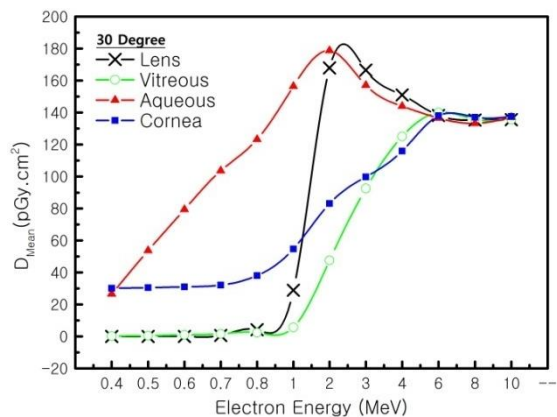
نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در بازه انرژی ۶۰۰ تا ۸۰۰ keV مقدار ضرایب تبدیل در اثر پدیده انطباق دچار تغییرات قابل توجهی می‌شوند، به گونه‌ای که بیش از ۴۰٪ پراکندگی برای این بازه از انرژی قابل مشاهده است. با این وجود، برای سایر انرژی‌ها مقدار CV بسیار کوچک و اغلب کمتر از ۱٪ می‌باشد. همچنین شکل ۲-الف تغییرات مقدار دز میانگین نواحی مختلف چشم را بر حسب انرژی الکترون تحت تابش موازی با زاویه ۳۰ درجه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در انرژی‌های کم الکترون، دز اتاقک قدامی و قرنیه در مقایسه با بخش‌های خلفی‌تر چشم نظیر عدسی و زجاجیه مقدار بیشتری دارد. با افزایش انرژی، مقدار دز عدسی افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند و در انرژی بالای ۶ MeV تقریباً مقدار دز در همه بخش‌ها به یک مقدار همگرا می‌شود.

### بحث و نتیجه گیری :

همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است، برای هر سه زاویه، پراکندگی داده‌ها در محدوده انرژی ۶۰۰ تا keV ۸۰۰ قابل توجه است. این در حالی است که برای سایر انرژی‌ها، این پراکندگی قابل صرف نظر کردن است. بر این اساس می‌توان گفت که رویداد انطباق تنها در محدوده انرژی مذکور می‌تواند اثر قابل توجهی بر ضرایب تبدیل بخش‌های مختلف عدسی داشته باشد. از این نظر این پراکندگی می‌تواند از اهمیت بسزایی برخوردار باشد. قدرت نفوذ الکترون در انرژی‌های کم بسیار کوچک است. از طرفی عدسی چشم در حین انطباق محدب‌تر می‌شود و تغییر شکل عدسی می‌تواند سبب شود که موقعیت نواحی حساس و غیرحساس عدسی نسبت به سطح چشم تغییر کند. شکل ۲-ب توزیع نسبی انرژی الکترون را در بافت به ازای انرژی‌های مختلف الکترون نشان می‌دهد. به ازای انرژی‌های بین ۶۰۰ keV تا ۸۰۰ keV بخش‌های حساس و غیر حساس عدسی در محدوده قله توزیع انرژی الکترون قرار دارد. در نتیجه تغییر اندکی در موقعیت نواحی حساس و غیرحساس می‌تواند مقدار دز را به طور قابل توجهی تغییر دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۲ (الف) تغییرات دز برای بخش‌های مختلف چشم به ازای انرژی الکترون (ب) توزیع نسبی انرژی الکترون در عمق‌های مختلف بافت نرم

شکل ۲-الف تغییرات دز را برای سایر بخش‌های چشم به ازای انرژی‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است مقدار دز قسمت‌های خلفی چشم مثل زجاجیه و عدسی برای انرژی‌های کم الکترون کوچک است. اما بخش‌هایی مثل اتاقک قدامی و قرنیه که در سطح چشم قرار دارند دز بیشتری دریافت می‌کنند. با افزایش انرژی، قدرت نفوذ الکترون افزایش می‌یابد و به ازای انرژی حدود  $3 \text{ MeV}$ ، عدسی چشم در محل قله توزیع انرژی الکترون قرار می‌گیرد. به همین دلیل در این انرژی دز عدسی افزایش ناگهانی پیدا کرده و پس از آن مجدداً افت می‌کند. مطابق شکل ۲-ب برای انرژی‌های بالاتر توزیع دز الکترون در اعماق مختلف تقریباً یکنواخت است و در نتیجه دز تمام بخش‌ها به یک مقدار همگرا می‌شود. بر این اساس می‌توان گفت در کتابخانه‌های دزسنجی که برای ضرایب تبدیل شار به دز الکترون فراهم شده اند، مقدار عدم قطعیت داده‌ها به ازای انرژی‌هایی در محدوده  $600$  تا  $800 \text{ keV}$  بسیار اهمیت دارد. با این وجود به ازای سایر انرژی‌ها، انطباق نمی‌تواند تاثیر قابل توجهی بر ضرایب تبدیل شار به دز داشته باشد.

## مراجع :

1. Bolch WE, Dietze G, Petoussi-Hens N, Zankl M. Dosimetric models of the eye and lens of the eye and their use in assessing dose coefficients for ocular exposures. *Ann. ICRP* 44. 91-111 (2015).
2. Lipman RM, Tripathi BJ, Tripathi RC. Cataracts induced by microwave and ionizing radiation. *Surv. Ophthalmol.* 33(3): 200-210 (1988).
3. Behrens R, Dietze G, Zankl M. Dose conversion coefficients for electron exposure of the human eye lens. *Phys. Med. Biol.* 54(13): 4069-4087 (2009).
4. Kasthurirangan S, Markwell EL, Atchison DA, Pope JM. In vivo study of changes in refractive index distribution in the human crystalline lens with age and accommodation. *Invest. Ophthalm. Vis. Sci.* 49(6): 2531-2540 (2008).
5. Navarro R, Santamaría J, Bescós J. Accommodation-dependent model of the human eye with aspherics. *JOSA A.* 2(8): 1273-1280 (1985).
6. Dubbelman M, Van der Heijde GL, Weeber HA, Vrensen GFJM. Changes in the internal structure of the human crystalline lens with age and accommodation. *Vision Res.* 43(22): 2363-2375 (2003).
7. Wiemer NG, Dubbelman M, Hermans EA, Ringens PJ, Polak BC. Changes in the internal structure of the human crystalline lens with diabetes mellitus type 1 and type 2. *Ophthalmology.* 115(11): 2017-2023 (2008).
8. Charman WN, Heron G. Fluctuations in accommodation: a review. *Ophthalmic and Physiol. Opt.* 8(2): 153-164 (1988).
9. Pelowitz D. MCNPX User's Manual, Version 2.6.0. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA (2005).

## تحلیل نوترونیکی - ترموهیدرولیک نانوسیال آب - نقره به عنوان جایگزین آب - اسید بوریک

### در بهره برداری نرمال راکتور VVER-1000

سعادت، حسن\*<sup>(۱)</sup> - حداد، کمال<sup>(۱)</sup> - ربیعی، عطااله<sup>(۱)</sup> - کوثر، زهرا

<sup>(۱)</sup> دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی هسته‌ای

#### چکیده:

در این پژوهش به کارگیری نانوسیال به منظور بهبود انتقال حرارت و کنترل کننده راکتیویته اضافی در راکتور VVER-1000 مورد بررسی قرار گرفته است. مدل کاملی از قلب راکتور VVER-1000 با بهره‌گیری از کوپل کدهای نوترونیکی و ترموهیدرولیکی به دست آمده و مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که ۸۷٪ درصد نانو ذره نقره برای بحرانی شدن در شرایط کارکرد راکتور با توان حرارتی ۳۰۰۰ مگا وات نیاز می باشد. نانوسیال آب- نقره ضمن بهبود انتقال حرارت و افزایش دمای خروجی از قلب، با داشتن ضریب راکتیویته ی دمایی منفی شرایط و محدوده‌های ایمنی این نوع راکتور را رعایت نموده و کارکرد راکتور با این نانوسیال به طور ذاتی ایمن می گردد.

کلمات کلیدی: نانوسیال، MCNP، FLUENT، VVER-1000، Spacer

#### مقدمه :

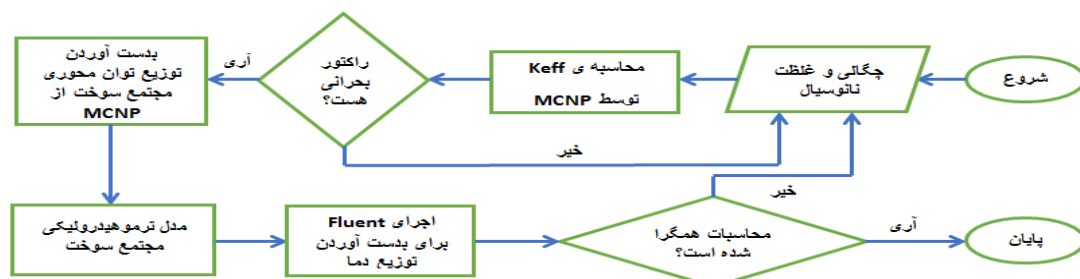
بررسی‌های بسیاری در زمینهٔ بالا بردن ضریب انتقال حرارت آب که به عنوان خنک‌کننده در بسیاری از راکتورها مورد استفاده می‌باشد انجام شده است. یکی از راه‌های افزایش ضریب انتقال حرارت خنک‌کننده، استفاده از نانوسیال‌ها به عنوان جایگزین است. افزودن نانوذرات به سیال پایه باعث افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت سیال پایه می‌شود. علاوه بر برداشت بیشتر حرارت، از دیگر تأثیرات افزودن نانوذره به سیال پایه به بهبود شار حرارتی بحرانی (CHF)، نسبت انحراف از جوش هسته‌ای (DNBR) و همچنین افزایش ایمنی در حادثه‌ی از دست رفتن خنک‌کننده [1]، می‌توان اشاره نمود. همچنین تحقیقات بسیاری در زمینهٔ ویژگی‌های نوترونیکی نانوسیال‌ها انجام گرفته است. حداد و همکاران مطالعه ای بر روی تاثیر کاربرد نانوسیال‌ها از دیدگاه نوترونیکی در راکتور VVER-1000 انجام داده اند [2] که در این بررسی، بهینه سازی نوع و کسر حجمی نانوذرات مورد توجه قرار گرفته است. هم چنین تغییر راکتیویته و اثر ته نشینی نانوذرات روی غلاف سوخت مورد بررسی قرار گرفته است که برای این تحقیق از پنج نانوذره ی آلومینا، آلومینیوم، زیرکونیا، مس و اکسید مس استفاده شده است. آنالیز دیگری توسط ظریفی و همکاران انجام شده است [3] که در آن توسط کدهای WIMS و CITATION به شبیه سازی نوترونیکی نانوسیال‌هایی با سیال پایه ی آب

و نانوذرات مختلف با درصد‌های حجمی متفاوت پرداخته اند. در این تحقیق بهینه سازی نوع و کسر حجمی نانوذرات، مورد توجه قرار گرفته است. نعمت الهی و همکاران، امکان پذیری استفاده از نانوسیال‌ها به عنوان جاذب نوترون در سیستم خنک کننده اضطراری قلب راکتور را بررسی نمودند [4] که هدف آن‌ها معرفی نانوسیال مناسب به عنوان خنک کننده، در سیستم خنک کننده اضطراری قلب جهت کاهش دمای قلب داغ و محافظت از قلب در برابر ذوب شدن بود. حداد و کوثر طی پژوهشی به منظور معرفی نانوذره بهینه و مناسب، به بررسی کاربرد نانوسیال‌های مختلف در راکتور VVER-1000 پرداختند [5]. همچنین انصاری فر و ابراهیمیان طراحی و بررسی نوترونیک کاربرد نانوسیال در راکتور هسته ای VVER-1000 با سوخت حلقوی با خنک کننده در دو طرف را مورد تحقیق قرار دادند [6]. در این تحقیق بهینه سازی نوع و کسر حجمی نانوذرات در آب که بر افزایش ایمنی پارامترهای اصلی قلب تاثیر گذار می باشد، در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر، کوپل نوترونیک- ترموهیدرولیکی رفتار نانوسیال به عنوان خنک کننده با کارکرد دوگانه بهبود انتقال حرارت و کنترل کننده راکتیویته اضافی مورد بررسی قرار گرفته است. در شبیه سازی نوترونیک، نانوسیال جایگزین آب- اسید بوریک شده و مقدار نانو ذره لازم جهت بحرانی شدن قلب راکتور محاسبه گردیده است. برای بررسی بهبود انتقال حرارت، یک کانال متوسط از قلب راکتور به همراه spacer مدل شده و بررسی‌ها با وجود نانوذره و استفاده از نتایج تحلیل نوترونیک انجام شده است و تحلیل نوترونیک و ترموهیدرولیکی تا همگرایی توزیع شار و توزیع دما تکرار شده است.

## روش کار :

با توجه به تنوع نانوسیال‌ها و با توجه به در نظر گرفتن ویژگی‌هایی از جمله سطح مقطع جذب نوترون حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابجایی، ظرفیت گرمایی، ویسکوزیته و ... نانوسیال آب- نقره برای دستیابی به اهداف تحقیق انتخاب شده است. در انجام این تحقیق ابتدا قلب راکتور توسط کد MCNP5 برای انجام محاسبات نوترونیک مدل شده و سپس تحلیل ترموهیدرولیکی با مدل سازی یک کانال به عنوان نمادی از یک مجتمع سوخت در نرم افزار FLUENT صورت گرفته است. فلوجارت زیر نشان دهنده روند کوپل نوترونیک- ترموهیدرولیکی می باشد.



شکل (۱) فلوجارت فرایند کوپل شدن کدهای نوترونیک و ترموهیدرولیکی



## شبیه‌سازی قلب راکتور:

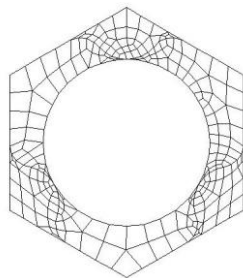
در سیکل کاری اول، قلب راکتور شامل ۱۶۳ مجتمع سوخت می‌باشد که در یک شبکه شش ضلعی آرایش پیدا کرده‌اند و این مجتمع‌ها با سوخت‌هایی با غنای بین ۱/۶ تا ۴/۰۲ درصد پر شده است که تعداد میله‌های سوختی در هر مجتمع ۳۱۱ عدد می‌باشد. با توجه به یکسان نبودن دما در قلب راکتور، قلب را به ۱۸ قسمت مساوی تقسیم نموده‌ایم. تغییرات چگالی نانوسیال با تغییر دما از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\rho_{nf}(t) = (1-\phi) \rho_{bf}(t) + \phi \rho_{np}(t) \quad (1)$$

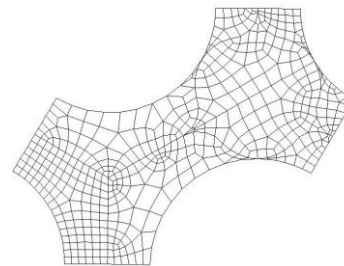
$\rho_{nf}(t)$ ،  $\rho_{bf}(t)$  و  $\rho_{np}(t)$  به ترتیب چگالی نانوسیال، آب و ذره نانو هستند که به دما نیز وابسته می‌باشند و  $\phi$  بیانگر کسر حجمی ذره نانو در نانوسیال است.

## شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی:

برای شبیه‌سازی عددی گردش سیال در قلب راکتور و با در نظر گرفتن شرایط تقارن در قلب استفاده از یک مدل کانال جریان سیال مناسب می‌باشد. از این رو برای دستیابی به یک الگو مناسب از این کانال، الگوهای مختلفی مطالعه و بررسی گردید که در شکل (۲) آورده شده است. قطر خارجی میله‌های سوختی ۹/۱ mm و فاصله بین دو مرکز میله سوخت ۱۲/۷۵ mm می‌باشد که با آرایش مثلثی در کنار هم قرار گرفته‌اند. ارتفاعی از میله سوخت که از آن شار حرارتی به جریان سیال منتقل می‌شود، ۳/۵۵ m می‌باشد. میله‌های سوختی به کمک spacerهایی در کنار یکدیگر آرایش پیدا کرده‌اند. شکل ۱-۳ نشان‌دهنده‌ی مشخصات و ابعاد spacer می‌باشد و در شکل ۲-۳ فاصله spacerها از یکدیگر در راستای محوری نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی‌ها spacer برای ساده‌سازی هندسه با ضخامت صفر مدل‌سازی شده است. همچنین جریان سیال در درون قلب راکتور از نوع جریان آشفته می‌باشد.



الگو شماره ۲



الگو شماره ۱

شکل (۲) الگوهای مختلف کانال جریان برای شبیه‌سازی جریان سیال داخل قلب راکتور

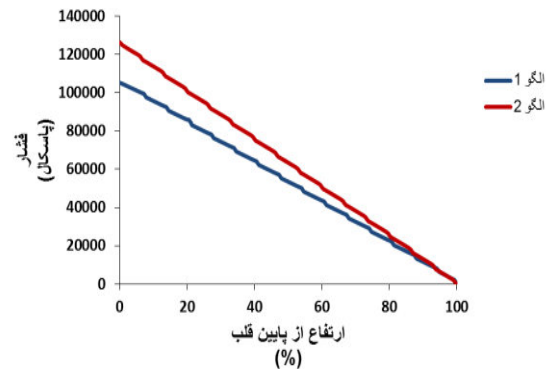
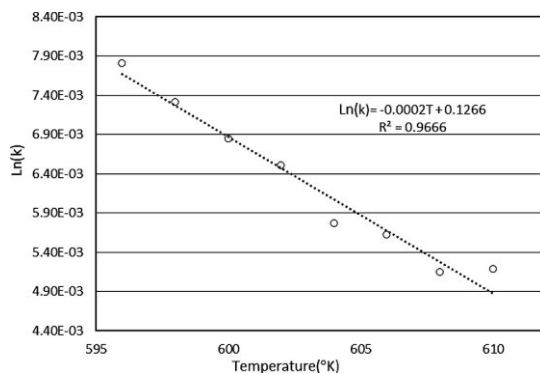
برای بررسی رفتار ترموهیدرولیکی نانوسیال از مدل تک فاز استفاده شده است که در این مدل نانوسیال به صورت همگن در نظر گرفته می‌شود. معادلات حاکم بر جریان در مدل تک فاز به صورت زیر می‌باشد:



افت فشار در یک مجتمع سوخت با خنک‌کننده آب- اسید بوریک برابر  $144 \text{ KPa}$  می‌باشد و لذا بررسی ترموهیدرولیک الگوهای شکل ۲ نشان دهنده هم‌خوانی بیشتر الگو ۲ با یک مجتمع سوخت می‌باشد. بنابراین این الگو از کانال جریان برای انجام تحلیل ترموهیدرولیکی انتخاب گردیده است. اختلاف بین افت فشار بدست آمده از محاسبات با افت فشار در یک مجتمع سوخت ناشی از عدم مدل‌سازی اجزایی نظیر *cotter*, *Lower plate*, *Head* و ... به دلیل جلوگیری از پیچیده شدن بیش از حد مدل می‌باشد. نمودار افت فشار برای الگوهای مختلف کانال جریان در جهت محوری در شکل ۴ آورده شده است.

• ضریب دمایی راکتیویته کند کننده:

شکل ۵ بیانگر نحوه تغییرات ضریب تکثیر در اثر تغییر دمای نانوسیال می‌باشد. شیب این نمودار همان ضریب دمایی راکتیویته کند کننده می‌باشد و این ضریب برای مقایسه با آب- اسیدبوریک در جدول ۱ آورده شده است.



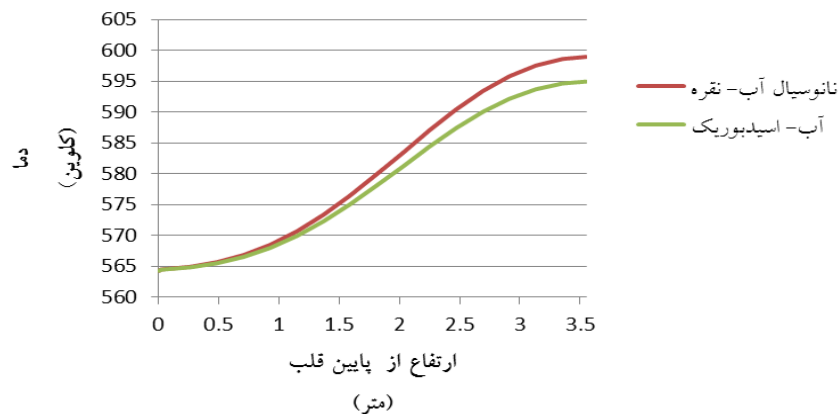
شکل (۴) افت فشار محوری الگوهای مختلف کانال جریان      شکل (۵) تغییرات ضریب تکثیر با تغییرات دمای نانوسیال

جدول شماره (۱)- ضریب دمایی راکتیویته کند کننده های مختلف

ضریب دمایی راکتیویته کند کننده	کند کننده/خنک کننده
$-1/1 \times 10^{-4}$	آب- اسید بوریک
$-2 \times 10^{-4}$	نانوسیال آب- نقره

• توزیع دمایی محوری در کانال جریان:

توزیع دمایی خنک‌کننده در راستای محوری در داخل کانال جریان در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۵) توزیع دمای محوری در کانال جریان

## بحث و نتیجه گیری :

تحلیل کاربرد نانوسیال به عنوان خنک کننده در قلب راکتور VVER-1000 با استفاده از کوپل نوتونیک- ترموهیدرولیک در راستای عملکرد نانوسیال در جایگزینی اسید بوریک به عنوان سم محلول یا کند کننده نوترون مورد بررسی قرار گرفت. مدل سازی نوترونیک نشان دهنده ی نیاز به درصد کم نانوذره برای کارکرد راکتور در شرایط بحرانی در توان حرارتی ۳۰۰۰ مگا وات می باشد. راکتورهای هسته ای آب سبک به دلیل ضریب راکتیویته ی دمایی منفی به طور ذاتی ایمن می باشند و تحلیل نوترونیک نشان می دهد که نانوسیال آب- نقره دارای ضریب راکتیویته ی دمایی  $^{-۴} ۱۰ \times ۲$  می باشد. لذا راکتور با استفاده از نانوسیال آب- نقره در شرایط ایمن می تواند کار کند. تحلیل ترموهیدرولیک استفاده از نانوسیال بیانگر افزایش انتقال حرارت از سوخت به خنک کننده بوده و در نتیجه افزایش دمای خروجی آن ۵ درجه سانتی گراد بیشتر از آب- اسید بوریک می باشد. نتایج نوترونیک و ترموهیدرولیک نشان می دهد که نانوسیال آب- نقره می تواند جایگزین مناسبی برای آب- اسیدبوریک در قلب راکتور باشد.

## مراجع :

- [1] J. Buongiorno, L.W. Hu, G. Apostolakis, R. Hannink, T. Lucas, A. Chupin, A feasibility assessment of the use of nanofluids to enhance the in-vessel retention capability in light-water reactors, Nuclear Engineering and Design, 5, 239, pp. 941-948, 2009.
- [2] K. Hadad, A. Hajizadeh, K. Jafarpour, B. D. Ganapol. , "Neutronic study of nanofluids application to VVER-1000", Annals of Nuclear Energy, 37, No. 11, pp. 1447-1455, 2010.
- [3] E. Zarifi , Gh. Jahanfarnia , F. Veysi, " Neutronic simulation of water-based nanofluids as a coolant in VVER-1000 reactor", Annals of Progress in Nuclear Energy , 65, pp. 32-41, 2013.
- [4] M.R. Nematollahi , B. Behzadinejad , A. Golestani, "Feasibility study of using nanofluids as a neutron absorber in reactor emergency core cooling system", International Journal of Hydrogen Energy , 40, pp. 15192-15197, 2015.

- [5] K. Hadad, Z. Kowsar, "Twofold application of nanofluids as the primary coolant and reactivity controller in a PWR reactor: Case study VVER-1000 in normal operation", *Annals of Nuclear Energy*, 97, pp. 179-182, 2016.
- [6] G.R. Ansarifard, M. Ebrahimi, "Design and neutronic investigation of the Nano fluids application to VVER-1000 nuclear reactor with dual cooled annular fuel", *Annals of Nuclear Energy*, 87, pp. 39-47, 2016.