

چشمه‌های نوترون فوق‌سرد: آهنگ تولید نوترون فوق‌سرد در مبدل دوتریم

روح اله قیصری^۱ و حبیب محمدی^۳

۱. گروه فیزیک، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر
۲. مرکز پژوهشی انرژی هسته‌ای، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر
۳. گروه فیزیک، اداره آموزش و پرورش استان فارس، شیراز

پست الکترونیکی: gheisari@pgu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۶/۲؛ دریافت نسخه نهایی ۱۳۹۴/۸/۱۹)

چکیده

برای محاسبه مقدار بهینه آهنگ تولید نوترون فوق‌سرد چشمه فوق‌سرد، مدل جدیدی ارائه شده است. بخش اصلی چشمه فوق‌سرد، مبدل نوترون سرد می‌باشد. در این مقاله، ما چشمه‌ای را مطالعه می‌نماییم که دارای کند کننده آب سنگین (D_2O)، مبدل دوتریم جامد (sD_2)، باریکه پروتون 590 MeV و هدف تلاشی (ترکیبی از سرب، آب سنگین و زیرکونیوم) می‌باشد. به منظور تعیین کمیت‌ها، معادله انتقال نوترون در برنامه MATLAB نوشته شده و با کد شبیه‌سازی MCNPX ترکیب شده است. معادله انتقال نوترون در مختصات استوانه‌ای در سراسر مبدل sD_2 به کمک شار CN (حاصل از شبیه‌سازی) حل شده است. با بارگذاری یک پوسته استوانه‌ای با جنس‌های مختلف اطراف ظرف مبدل، مقادیر مختلفی برای چگالی و آهنگ تولید نوترون فوق‌سرد به دست آمده‌اند. نتایج حاصل از چگالی و میزان تولید نوترون فوق‌سرد و مقایسه آنان با نتایج قبلی، نشان می‌دهد که روش حاضر از قابلیت خوبی برای بهینه‌سازی پارامترهای چشمه برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: نوترون فوق‌سرد، طول مبدل، پوسته استوانه‌ای مبدل، معادله انتقال نوترون، کد شبیه‌سازی MCNPX

۱. مقدمه

عمر نوترون و کشف پدیده‌های کوانتوم مکانیکی استفاده می‌گردد [۱-۵]. دقت اندازه‌گیری کمیت‌های مذکور، به مقدار چگالی محیطی UCN بستگی دارد. در چشمه‌های UCN که دارای توان تولید بالا هستند، از ابرسیال هلیوم یا دوتریم جامد (sD_2) به عنوان مبدل نوترونی استفاده

در آزمایشگاه‌های پیشرفته فیزیک هسته‌ای، از نوترون فوق‌سرد^۱ (UCN) به عنوان یک ابزار بسیار قوی برای اندازه‌گیری دقیق گشتاور دو قطبی الکتریکی نوترون، نیمه

۱. Ultra-Cold Neutron

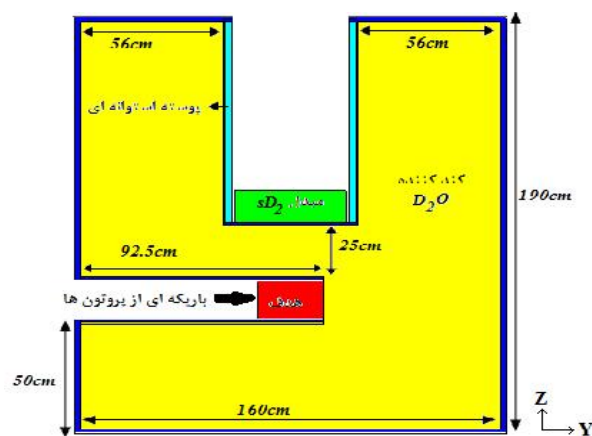
کار، برای جلوگیری از نشست نوترون‌های سرد، یک پوسته استوانه‌ای اطراف ظرف مبدل را در برگرفته است، که جنس آن اینجا تعیین می‌گردد. ظرف کندکننده، لایه‌ای از جنس آلومینیوم (Al) و ظرف مبدل به شکل دو لایه‌ای، زیرکونیوم (Zr) - فولاد (Steel)، می‌باشند. کندکننده و مبدل به ترتیب در دمای اتاق و ۸ کلون فرض می‌شوند. نوترون‌های سریع در اثر برخورد باریکه پروتون MeV ۵۹۰ با هدف تلاشی تولید می‌شوند. در کند کننده sD_4 ، کسر قابل ملاحظه‌ای از این نوترون‌ها، حرارتی می‌شوند.

برخی از نوترون‌های حرارتی درون مبدل sD_4 ، سرد می‌شوند. با توجه به این که ممکن است هر جایی در sD_4 ، CN به UCN تبدیل می‌شود، فرض می‌کنیم CNها یک چشمه سرد می‌سازند که در طول مبدل توزیع شده است. همچنین این طول را به نسبت ابعاد مبدل در کار قبلی [۱۳] بزرگ‌تر انتخاب می‌کنیم. برای انجام محاسبات ابتدا، با استفاده از روش مونت - کارلو به شبیه‌سازی شارهای نوترون سریع، حرارتی و CN می‌پردازیم. سپس، به کمک معادله مستقل از زمان انتقال نوترون به محاسبه چگالی UCN خواهیم پرداخت. معادله مورد نظر، در مختصات استوانه‌ای (r, θ, z) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\int \Sigma_s(E' \rightarrow E) n(E', \dots, z) v' dE' \cong [\Sigma_{tot}(E)] n(E, \dots, z) v + y v \frac{\partial n(E, \dots, z)}{\partial z} + \sim v \frac{\partial n(E, \dots, z)}{\partial \dots}, \quad (1)$$

که در آن (\dots, z) مختصات CN (UCN) را در sD_4 نشان می‌دهد. $n(E, \dots, z)$ چگالی عددی نوترون (با انرژی جنبشی E) در مختصات (\dots, z) می‌باشد. $\Sigma_{tot}(E)$ سطح مقطع کل ماکروسکوپی نوترون، $\Sigma_s = N_s \dagger_s$ سطح مقطع پراکندگی ماکروسکوپی، $\Sigma_a = N_a \dagger_a$ سطح مقطع جذب ماکروسکوپی، \dagger_s سطح مقطع پراکندگی میکروسکوپی و \dagger_a سطح مقطع جذب میکروسکوپی هستند. y متوسط کسینوس زاویه پراکندگی نوترون نسبت به محور z در دستگاه آزمایشگاه است،

به طوری که $\frac{1}{2} = (1-y^2)^{\frac{1}{2}}$. E' انرژی جنبشی اولیه نوترون، E انرژی جنبشی نهایی نوترون، v' سرعت اولیه نوترون و v سرعت نهایی نوترون می‌باشند. N_0 چگالی عددی دوتریم



شکل ۱. هندسه شبیه‌سازی شده چشمه UCN در برش YZ. باریکه‌ای از پروتون‌ها به هدف تلاشی برخورد می‌کنند. نوترون‌های سریع تولیدی در کندکننده آب سنگین، با کاهش انرژی مواجه می‌شوند. کسر قابل توجهی از آنها به مبدل sD_4 نفوذ می‌کنند، سرد می‌شوند و به UCN تبدیل می‌گردند. یک پوسته استوانه‌ای، ظرف مبدل را احاطه کرده است.

می‌شود [۶-۹]. به منظور تولید UCN، این مبدل‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای نوترون سرد (CN) را پراکنده می‌کنند، سرعت آن را کاهش می‌دهند و در نهایت به UCN تبدیل می‌نمایند [۱۰ و ۱۱]. پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهند sD_4 از کارایی نسبی بسیار بالایی برخوردار است (مرجع [۱۲] و سایر مراجع درون آن را ببینید). در اینجا، یک چشمه UCN مجهز به باریکه پروتون، هدف تلاشی و دارای مبدل نوترونی sD_4 مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با بارگذاری یک پوسته استوانه‌ای با جنس‌های مختلف اطراف ظرف مبدل و انتگرال‌گیری روی چشمه CN توزیع شده در طول آن، به بهینه‌سازی شار UCN می‌پردازیم. در بخش دوم مواد و روش کار، در بخش سوم نتایج و بحث و در بخش چهارم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری بیان می‌شوند.

۲. مواد و روش کار

هندسه چشمه UCN (حاصل از شبیه‌سازی) در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات باریکه پروتون، هدف تلاشی، چشمه نوترون و مواد تشکیل دهنده آنها در مرجع [۱۳] داده شده است. در این

۱. Cold Neutron

محوری z_i می‌باشند. $n^{i,j,k}$ و $n^{i,g,k}$ به ترتیب چگالی‌های عددی نوترون‌های UCN و CN با انرژی‌های جنبشی E_j و E_k را نشان می‌دهند. h_z و $h_{...}$ به ترتیب گام‌های محوری و شعاعی را نشان می‌دهند. در اینجا، از روش چند گروهی [۱۵] استفاده می‌شود. هر گروه (z یا g) دارای یک انرژی ثابت می‌باشد. تفاوت انرژی هر گروه با گروه کناری یک مقدار ثابت است. سطح مقطع‌ها به ازای انرژی‌های مختلف از مراجع [۱۳، ۱۰، ۱۵] استخراج شده‌اند. پارامترهای A_g ، a_g ، b_g ، c_g ، m_j ، p_j ، q_j ، x_g ثابت‌هایی هستند که به صورت زیر معرفی می‌شوند:

$$a_g = \frac{v_g}{\tau}, \quad v_g = 1.38 \times 10^6 \sqrt{E_g \text{ (eV)}} \text{ cm/s}, \quad (6)$$

$$b_g = [\sum_a(E) + \sum_s(E)] v_g, \quad (7)$$

$$c_{g',g'+1} = \bar{\Sigma}_s \int_{E_{g'}}^{E_{g'+1}} \frac{v'(E')}{E'(1-\tau)} dE', \quad (8)$$

$$\bar{\Sigma}_s = \sum_s \left(\frac{E_{g'} + E_{g'+1}}{\tau} \right),$$

$$p_j = \frac{v_j}{\tau}, \quad v_k = 1.38 \times 10^6 \sqrt{E_j \text{ (eV)}} \text{ cm/s}, \quad (9)$$

$$q_j = [\sum_a(E) + \sum_s(E)] v_j, \quad (10)$$

$$A_g = 0.72 N_0 \tau_s^{\text{ucn}} \bar{v}_{g,g+1}, \quad (11)$$

$$\bar{v}_{g,g+1} = \frac{v_g + v_{g+1}}{\tau},$$

$$x_g = \frac{\sqrt{\lambda v_g}}{\tau}, \quad (12)$$

$$m_j = \frac{\sqrt{\lambda v_j}}{\tau}. \quad (13)$$

۳. بحث و نتایج

چشمه UCN مجهز به باریکه پروتون و هدف تلاشی (ترکیبی از Zr، Pb و D₂O)، کندکننده نوترون D₂O و مبدل نوترون sD₂ مورد مطالعه قرار گرفته است. در کندکننده، نوترون‌های سریع (نوترون‌های تلاشی) به ناحیه حرارتی کند می‌شوند. کسری از آنها قبل از ورود به مبدل و برخی در مبدل سرد می‌شوند. با استفاده از کد MCNPX ۲٫۴، چشمه UCN به ازای جنس‌های مختلف پوسته استوانه‌ای شبیه‌سازی شده است. شار CN برای جنس‌های مختلف پوسته مزبور در شکل ۲ داده شده‌اند.

جامد، $\tau = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2$ پارامتر برخورد و A عدد جرمی دوترون است. کرنل پراکندگی UCN

$$\sum_s(E' \rightarrow E) = N_0 \tau_s^{\text{ucn}}(E'), \quad (2)$$

$$0.72 \text{ meV} < E' < 24 \text{ meV}, E = E_{\text{UCN}}$$

برای توصیف پراکندگی CN که به طور مستقیم به UCN تبدیل می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. کرنل پراکندگی

$$\sum_s(E' \rightarrow E) = N_0 \tau_s(E') / E'(1-\tau), \quad (3)$$

$$E = E_{\text{CN}} < E' < E_{\text{CN}} / \tau$$

برای توصیف نوترون‌های سرد که در همان ناحیه سرد کند می‌شوند، به کار می‌رود. در اینجا، τ_s^{ucn} سطح مقطع تولید UCN می‌باشد. E_{CN} انرژی جنبشی CN و E_{UCN} انرژی جنبشی UCN را نشان می‌دهند. معادله (۱) به ازای شار CN شبیه‌سازی شده در مختصات‌های مختلف درون مبدل، حل می‌شود. شار UCN با انتگرال‌گیری روی چشمه‌های صفحه‌ای CN واقع در مختصات‌های مختلف، به دست می‌آید. محاسبات مونت - کارلو بر مبنای سطح مقطع نوترونی Be، AlMg، D₂O، Pb، Zr، Al و Steel در دمای ۳۰۰ کلوین و sD₂ در دمای ۸ کلوین می‌باشند. این سطح مقطع‌ها را با استفاده از کد NJOY محاسبه نموده‌ایم [۱۴]. مشتقات فضایی را به وسیله تقریب دیفرانسیلی پسرو مرتبه اول در مختصات (z_i, \dots) در معادله (۱) جایگزین می‌کنیم. با گسسته‌سازی انرژی و فضا، معادله (۱) به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$g = 1, 2, \dots, 120, \quad g'_{\text{max}} = 10g - 1, \quad (g \leq 12)$$

$$g'_{\text{max}} = 120 \quad (g > 12)$$

$$\left(\frac{a_g}{h_z} + \frac{x_g}{h_{...}} \right) n^{i+1,g,k} - \left(-b_g + \frac{x_g}{h_{...}} \right) n^{i,g,k} \quad (4)$$

$$- \frac{a_g}{h_z} n^{i,g,k-1} - \sum_{g'=g}^{g'_{\text{max}}} C_{g',g'+1} n^{i,g',k} = 0,$$

$$i = 1, 2, \dots, 375, \quad k = 2, 3, \dots, 125,$$

$$\left(\frac{p_j}{h_z} + \frac{m_j}{h_{...}} \right) n^{i+1,j,k} - \left(-q_j + \frac{m_j}{h_{...}} \right) n^{i,j,k}$$

$$- \frac{p_j}{h_z} n^{i,j,k-1} - \sum_{g=1}^{120} A_g n^{i,g,k} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, 210, \quad (5)$$

که در آنها، k و i به ترتیب نشان‌گر مختصات شعاعی k و ... و

جدول ۱. نتایج حاصل از شبیه‌سازی شار نوترون سرد در عمق‌های مختلف دوتریم جامد.

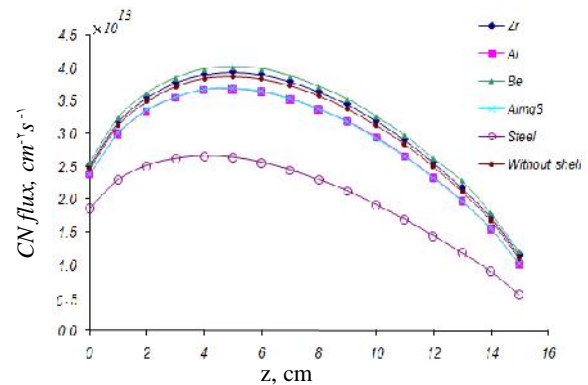
عمق (cm)	شار نوترون سرد ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
۱	$3,746 \times 10^{13}$
۲	$3,785 \times 10^{13}$
۳	$4,09 \times 10^{13}$
۴	$4,21 \times 10^{13}$
۵	$4,25 \times 10^{13}$
۶	$4,2 \times 10^{13}$
۷	$4,09 \times 10^{13}$
۸	$3,92 \times 10^{13}$

دیگر، انتگرال‌گیری روی همه چشمه‌های صفحه‌ای CN). در محاسبات چند گروهی حاضر، 330 گروه انرژی نوترون را در نظر گرفته‌ایم: CN ها در sd_p یک توزیع انرژی در محدوده انرژی $E_{CN} = 0.2 - 24 \text{ meV}$ دارند و UCN ها در محدوده $250 - 40 \text{ meV}$ هستند. شار محوری UCN (متوسط‌گیری شده روی ...) در شکل ۳ نشان داده شده است. متوسط آهنگ تولید UCN بر حسب z ، در شکل ۴ نشان داده شده است.

در جدول ۲ نتایج عددی حاصل از متوسط شار، آهنگ تولید و چگالی UCN (برای اندازه‌های مختلف sd_p) داده شده‌اند. در جدول ۳، میزان بهینه آهنگ تولید UCN، ارائه و با نتایج قبلی مقایسه شده است.

۴. نتیجه‌گیری

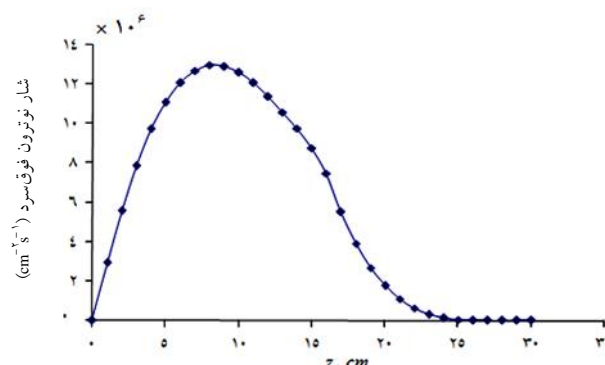
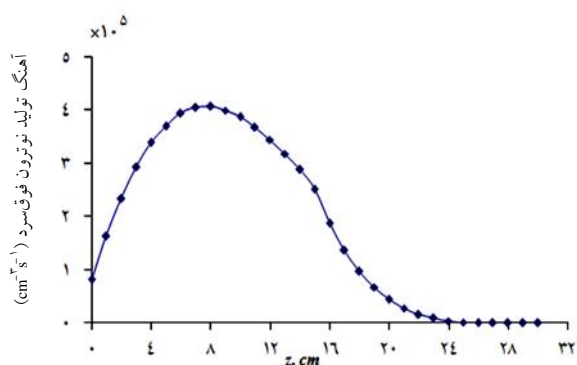
با استفاده از کد MCNPX ۲/۴، شار سریع روی هدف تلاشی، شار حرارتی در کندکننده (نزدیک لبه ظرف مبدل) و مقادیر شار CN در عمق‌های مختلف مبدل شبیه‌سازی شده‌اند. در جدول ۱، مقادیر شار CN با خطای آماری کمتر از ۲/۶٪، محاسبه شدند. در عمق‌های مختلف مبدل، نوترون‌های حرارتی به CNها تبدیل می‌شوند. به منظور جلوگیری از نشت نوترون‌های CN، یک پوسته استوانه‌ای (به ضخامت ۱ سانتی‌متر) اطراف ظرف مبدل در نظر گرفته شده است. با توجه به این که مقادیر شار CN به ازای هر دو جنس



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شار سرد حاصل از شبیه‌سازی برای پوسته استوانه‌ای (به ضخامت یک سانتی‌متر) با جنس‌های متفاوت بر حسب z . شامل AlMg 3 ، ^{27}Al ۹۶/۶ درصد، ^{24}Mg ۳ درصد و ^{56}Fe ، ۰/۴ درصد می‌باشد.

این نتایج نشان می‌دهند مقدار بیشینه شار CN مربوط به پوسته با جنس Be می‌باشد. البته مقادیر شار CN برای جنس‌های Zr و Be تقریباً با هم برابرند. متوسط شار سریع روی هدف، متوسط شار حرارتی در D_2O (نزدیک لبه ظرف sd_p) و مقادیر شار بهینه CN در عمق‌های مختلف سریع محاسبه و در جدول ۱ داده شده‌اند. شار نوترون سریع روی هدف تلاشی حدود $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ است. شار نوترون سریع و شار حرارتی در آب سنگین نزدیک لبه ظرف مبدل به ترتیب برابر $2.12 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ و $3.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ می‌باشند.

جدول ۱ نشان می‌دهد نوترون‌های حرارتی تولید شده، در sd_p نفوذ می‌کنند و کسر زیادی از آنها در عمق حدود ۵ سانتی‌متر سرد می‌شوند. معادله (۱) به کمک مدل چند گروهی به معادلات (۴) و (۵) گسسته شده‌اند. سپس، با استفاده از روش ضمنی پسرودر MATLAB حل شده‌اند. گام محوری و شعاعی h_z و h_r به ترتیب برابر با 0.4 cm و 0.2 cm تعیین شده‌اند. مقادیر شبیه‌سازی شار CN (شرایط مرزی) در این معادلات وارد شده‌اند. مقادیر مختلف شار UCN به ازای مقادیر n ، g و هر مقداری از k (برای لبه sd_p و عمق‌های مختلف ۱ تا ۱۵ سانتی‌متر) به دست آمده‌اند. از حاصل ضرب شار CN (مربوط به هر عمق) در سطح مقطع انتقال UCN، آهنگ تولید جزیی محاسبه می‌شود و سپس با انتگرال‌گیری روی عمق‌های صفر تا ۱۵ سانتی‌متر، آهنگ تولید کل UCN به دست آمده است (به بیان



شکل ۳. شمار نوترون فوق سرد بر حسب Z . مقدار شمار در $Z = ۸,۲۵$ cm، بیشینه شده است.

شکل ۴. آهنگ تولید UCN به صورت تابعی از Z . مقدار بیشینه تابع در $۸\text{ cm} \gg Z$ حاصل شده است. انرژی نوترون‌های فوق سرد در محدوده ۲۵۰-۴۰ meV است.

جدول ۲. مقادیر متوسط شمار، چگالی و آهنگ تولید UCN در ۲ sD .

طول (cm)	حجم (لیتر)	متوسط شمار UCN ($\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$)	متوسط آهنگ تولید UCN ($\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$)	متوسط چگالی UCN (cm^{-3})
۱	۱,۳۸۴	$۱,۴۸ \times 10^6$	$۱,۲۲ \times 10^5$	۲۶۴۶
۲	۲,۷۶۹	$۲,۸۵ \times 10^6$	$۱,۵۹ \times 10^5$	۳۴۵۸
۳	۴,۱۵۴	$۴,۱۱ \times 10^6$	$۱,۹۳ \times 10^5$	۴۱۸۴
۴	۵,۵۳۸	$۵,۲۳ \times 10^6$	$۲,۲۲ \times 10^5$	۴۸۱۹
۵	۶,۹۲۳	$۶,۲۲ \times 10^6$	$۲,۴۷ \times 10^5$	۵۳۶۲
۶	۸,۳۰۸	$۷,۰۶ \times 10^6$	$۲,۶۸ \times 10^5$	۵۸۱۷
۷	۹,۶۹۳	$۷,۷۷ \times 10^6$	$۲,۸۵ \times 10^5$	۶۱۶۹
۸	۱۱,۰۷۷	$۸,۳۴ \times 10^6$	$۲,۹۸ \times 10^5$	۶۴۸۳
۹	۱۲,۴۶۲	$۱,۰۸۴ \times 10^7$	$۳,۳ \times 10^5$	۷۱۶۱
۱۰	۱۳,۸۴۷	$۱,۰۸۷ \times 10^7$	$۳,۲۸ \times 10^5$	۷۱۱۷
۱۱	۱۵,۲۳۲	$۱,۰۶۹ \times 10^7$	$۳,۲۵ \times 10^5$	۷۰۵۲
۱۲	۱۶,۶۱۶	$۱,۰۵۶ \times 10^7$	$۳,۲۱ \times 10^5$	۶۹۶۵
۱۳	۱۸,۰۰۱	$۱,۰۴۱ \times 10^7$	$۳,۱۷ \times 10^5$	۶۸۷۸
۱۴	۱۹,۳۸۶	$۱,۰۲۴ \times 10^7$	$۳,۱۲ \times 10^5$	۶۷۷۰
۱۵	۲۰,۷۷۱	$۱,۰۰۵ \times 10^7$	$۳,۰۷ \times 10^5$	۶۶۶۱

جدول ۳. آهنگ تولید نوترون فوق سرد در این کار و مقایسه آن با نتایج قبلی.

چشمه فوق سرد	طول (cm)	قطر (cm)	آهنگ تولید UCN ($\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$)
چشمه PSI [۱۶]	۱۵	۵۰	$۲,۹۰ \times 10^5$
کار حاضر	۱۵	۴۲	$۳,۰۷ \times 10^5$
کار نظری قبلی [۱۳]	۵	۵۰	$۲,۲۲ \times 10^5$
کار حاضر	۵	۴۲	$۲,۴۷ \times 10^5$

صفحه‌ای CN (انتگرال از لبه sD_p تا عمق مورد نظر) به دست آمده است. در مقایسه با کار قبلی [۱۳]، نتایج بهتری حاصل شده است، بطوری که این نتایج به گزارش مرجع [۱۶] نزدیک‌ترند. این محاسبات می‌تواند در تجزیه و تحلیل اولیه و تخمین اندازه مبدل‌های مختلف دوتریمی به دست‌اندرکاران تولید نوترون فوق سرد کمک کند. مهم‌ترین دلایل اختلاف این کار با مرجع [۱۶] به شرح زیر هستند:

(۱) پارامتر γ می‌تواند متغیر باشد، ولی ما مقدار متوسط آن را در محاسبات حاضر در نظر گرفتیم.

(۲) از حرکات کاتوره‌ای مولکول‌های دوتریم صرف نظر کردیم. بر این اساس، فرض شد که نوترون CN با چگالی احتمال

$$\frac{1}{E_{CN}(1-\beta)}$$

(۳) هدف تلاشی در مرجع [۱۶] ناهمگن است. در حالی که، ساختار هدف تلاشی در کار حاضر، ترکیب همگنی از مواد در نظر گرفته شد.

(۴) در کار حاضر، جهت بهینه‌سازی شار CN یک پوسته استوانه‌ای نیز بارگذاری شد و به تبع آن شعاع مبدل نسبت به کارهای قبلی، ۴ سانتی‌متر کوچک‌تر انتخاب گردید.

(۵) احتمال تولید UCN، مستقل از انرژی UCN در نظر گرفته شد، رابطه (۲) را ببینید. پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آینده، این موارد مورد مطالعه قرار گیرند.

Be و Zr تقریباً با هم برابر بوده و بیش از شار مربوط به بقیه مواد هستند، و از طرفی بهای اقتصادی فلز Zr از Be ارزان‌تر است، جنس پوسته استوانه‌ای، Zr انتخاب می‌شود، (شکل ۲). با در نظر گرفتن مقادیر بهینه شار CN حاصل از شبیه‌سازی به عنوان شرایط مرزی (به عنوان ورودی معادله)، معادله انتقال نوترون حل شد. در واقع فرض کردیم نوترون‌های CN، حاصل یک چشمه سرد هستند که در مبدل توزیع شده است؛ به طوری که با کند شدن نوترون‌های این چشمه، نوترون‌های UCN در طول مبدل تولید می‌گردند. با انتگرال‌گیری روی ابعاد چشمه سرد، آهنگ تولید کل UCN، محاسبه شده است. با توجه به این که ورودی معادله از شبیه‌سازی به دست می‌آید، عملاً نقش نوترون‌های حرارتی بطور مستتر در نظر گرفته شده‌اند. در شکل‌های ۳ و ۴، به ترتیب شار محوری UCN و همچنین آهنگ تولید UCN (به صورت تابعی از z)، داده شده‌اند. نتایج حاصل از متوسط شار، آهنگ تولید و چگالی UCN در جدول ۲ ارائه شده‌اند. در جدول ۲ طول بهینه‌ای برای مبدل چشمه UCN به دست آمده است. این طول بهینه، حدود ۹ سانتی‌متر است به طوری که به ازای آن متوسط چگالی UCN به یک مقدار بیشینه می‌رسد. در جدول ۳، آهنگ تولید UCN حاصل از محاسبات حاضر با کار نظری قبلی [۱۳] و آهنگ تولید چشمه آزمایشگاه PSI [۱۶] مقایسه شده است. در محاسبات حاضر، میزان تولید UCN از انتگرال‌گیری روی همه چشمه‌های

مراجع

1. V K Igantovich, "The Physics of Ultracold Neutrons", Clarendon Press, Oxford (1990).
2. R Golub, D J Richardson, and S K Lamoreaux, "Ultracold Neutrons", Higer, Bristol (1991).
3. A Steyerl et al, Phys. Lett. A **116** (1986) 347.
4. V V Nesvizhevsky et al., Nature **415** (2002) 297.
5. T Jenke, P Geltenbort, H Lemmel, and H Abele, Nature Phys. **7** (2011) 468.
6. R Golub and J M Pendlebury, Phys. Lett. A **62** (1977) 337.
7. C R Brome, et al., Phys. Rev. C **63** (2001) 055502.
8. Y Masuda, et al., Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 284801.
9. O Zimmer, et al., Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 104801.
10. A P Serebrov, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **440** (2000) 653.
11. A Saunders et al., Phys. Lett. B **593** (2004) 55.
12. F Atchison, B Blau, K Bodek, B van den Brandt, T Brys, and P Fierlinger, Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 262502.
13. R Gheisari, M M Firoozabadi, H Mohammadi, American Institute of Physics Advances **4** (2014) 017105.
14. R E MacFarlane, D W Muir, "The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 91", Los Alamos National Laboratory report LA-12740-M, Los Alamos (1994).
15. H Sekimoto, "Nuclear Reactor Theory", Tokyo Institute of Technology Press, Tokyo (2007).
16. PSI UCN, <http://ucn.web.psi.ch>.