

توزیع ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت در واکنش هسته‌ای

 $^{234}\text{U}(n,f)$ سلیمان رسولی¹، روح‌اله رضوی‌نژاد^{2*}، عزیز نصرت بهکامی³¹ دانشکده فیزیک، دانشگاه پیام نور، مرکز تحصیلات تکمیلی تهران، صندوق پستی 19395-3697، تهران، ایران² گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران³ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

دریافت: 1397/07/30 ویرایش نهائی: 1398/01/17 پذیرش: 1398/02/16

چکیده

توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت (FFAD¹) در رابطه با فرآیند شکافت و نیز در مورد مکانیسم برهم‌کنش پرتابه با هسته هدف می‌تواند درک و بینش جدیدی به ما بدهد. در این پژوهش برای تجزیه و تحلیل توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت نوترون القایی ^{234}U یک چارچوب مدل آماری به‌کار رفته و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده در تجهیزات (n-TOF) واقع در CERN مقایسه شده و واریانس آماری K^2 به‌دست آمده‌اند. واریانس آماری ترازهای توزیع K - در هسته در حال گذار در انرژی‌های نوترون فرودی از آستانه شکافت تا 50 MeV تجزیه و تحلیل شده، و روشی که در آن مقادیر کمی K^2 به‌دست آمده‌اند، توضیح داده شده است. نتایج محاسبات، با ساختار دوره‌ای ناهمسانگردی مربوط به مجموعه واکنش‌های (n,nx) و در ادامه با محاسبه سطح مقطع واکنش مربوطه با کد تالیس² مقایسه شده‌اند. مقایسه بین واریانس K^2 و سطح مقطع، ارتباط قوی بین مقادیر واریانس K^2 و شروع یک شانس شکافت را نشان می‌دهد. نتایج نشان داده است که در هر جایی که احتمال واکنش $^{234}\text{U}(n,f)$ در یک کانال جدید -و در نتیجه سطح مقطع- افزایش یابد، واریانس K^2 کاهش پیدا می‌کند. نتیجه در توافق کامل با نتایج و محاسبات مشابه در واکنش‌های $^{232}\text{Th}(n,f)$ و $^{238}\text{U}(n,f)$ است.

کلیدواژگان: توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت، ناهمسانگردی، مدل آماری، سد شکافت، سطح مقطع و $^{234}\text{U}(n,f)$

مفیدی از ساختار سد شکافت و ترازهای گذار در

مقدمه اختیار قرار می‌دهند و می‌توانند به‌درک و بینش‌های

جدیدی در زمینه فرآیند شکافت و نیز مکانیسم

برهم‌کنش بین پرتابه و هسته هدف منجر گردند [2 و 3].

ترازهای گذار را می‌توان براساس نظریه توزیع زاویه‌ای

پاره‌های شکافت، با استفاده از روش‌های آماری

توصیف نمود. تحلیل داده‌ها از روی توزیع‌های زاویه‌ای

زاویه‌ای پاره‌ها تنها روشی است که طی آن اطلاعات

هر جایی که یک شکافت روی می‌دهد، دو یا سه

پاره با تعدادی نوترون خواهیم داشت. مطالعه توزیع

زاویه‌ای این پاره‌ها روشی برای شناخت شکافت است

[1]. دانشمندان همواره به‌داده‌های دقیق شکافت

هسته‌های سنگین هم در فیزیک هسته‌ای نظری و هم

کاربردی نیاز دارند [2]. توزیع زاویه‌ای پاره‌ها که در

شکافت یک هسته برانگیخته تولید می‌شوند، اطلاعات

* نویسنده مسئول: rrazavin@ihu.ac.ir

¹ Fission Fragment Angular Distribution² TALYS 1.8 code

می‌گذرد، توزیع به‌طور ساده با استفاده از مجذور تابع موج متقارن قله به‌شکل زیر داده می‌شود:

$$W(\theta) \propto |d_{M,K}^I(\theta)|^2 \quad 1$$

فرض می‌شود پاره‌های شکافت در امتداد محور تقارن از هسته جدا شوند و K (تصویر I روی محور تقارن هسته) یک عدد کوانتومی خوب در عبور هسته از حالت گذارش به‌ساختار پاره‌ها باشد. وابستگی سمتی پاره‌های شکافت در یک حالت انتقال، به‌طور منحصر به‌فردی با استفاده از اعداد کوانتومی K, I و M تعیین می‌شود. عدد کوانتومی I و M (تصویر I روی محور ثابت فضایی که معمولاً راستای ذرات فرودی در نظر گرفته می‌شود) در تمام فرآیند شکافت پایسته می‌مانند. در نقطه‌ی زینی یا حالت گذار، این فرض منطقی است که هسته متحمل تحرک و تغییر شکل شده و دستخوش توزیع دوباره‌ی انرژی و اندازه‌حرکت زاویه‌ای آن گردد. بنابراین لازم است فرض شود مقدار (یا مقادیر) K هسته گذار مستقل از مقادیر K ی اولیه هسته مرکب هستند. یعنی آنگاه که هسته تنها یک بار از تغییر شکل حالت گذار عبور می‌کند، K عدد کوانتومی بسیار مناسب در فرآیند شکافت است [4].

هسته درحال گذار از شکافت، با استفاده از اعداد کوانتومی K, I و M به‌طور کامل توصیف می‌گردد. اگر فرض گردد که پاره‌های شکافت در امتداد محور تقارن هسته‌ای از هم جدا می‌شوند، توزیع زاویه‌ای به‌شیوه‌ای منحصر به‌فرد با اعداد کوانتومی فوق مشخص می‌گردد [7]. بنابراین در انرژی‌های برانگیختگی بالاتر از آستانه شکافت، انتظار می‌رود فرآیند شکافت از طریق کانال‌هایی روی دهند که توسط مقادیر K تعریف شده و در یک توزیع گاوسی که حول $K = 0$ تمرکز یافته‌اند، توزیع گردند. لذا هسته زوج-زوج ^{234}U برای این پژوهش انتخاب شده

کمی از مجموعه کانال‌ها در نقطه‌ی زینی شکافت به‌دست می‌آید. نتایج آزمایشگاهی قابل‌ملاحظه‌ای نشان داده‌اند [6]، که مدل آماری حالت گذار (TSM)¹ یکی از مدل‌هایی است که توزیع‌های زاویه‌ای آزمایشگاهی پاره‌ها در حالت گذار را به‌خوبی نمایش می‌دهد [4]. برای انرژی‌های نوترون فرودی اندکی بالاتر از آستانه شکافت، کانال‌های شکافت به‌طور کامل باز می‌گردند، در نتیجه مقادیر K زیادی در هسته هدف زوج-زوج ایجاد می‌گردند. چون در انرژی‌هایی بالاتر از $1/15\text{MeV}$ جفت نوترون‌هایی امکان جدا شدن از هسته را پیدا می‌کنند، پیچیدگی طیف حالت گذار به‌سرعت افزایش می‌یابد [5]. لذا می‌توان اطلاعاتی در مورد شرکت ترازهای نیلسون در انرژی‌های مختلف به‌دست آورد. داده‌های توزیع زاویه‌ای شکافت به‌طور آشکار برای گرفتن اطلاعات از واریانس K^2 بسیار مهم هستند. اخیراً داده‌های ناهمسانگردی با تفکیک بالا در تجهیزات آزمایشگاهی $n\text{-TOF}^2$ در مرکز پژوهش‌های هسته‌ای اروپا³ اندازه‌گیری شده‌اند. داده‌های مذکور در واکنش $^{234}\text{U}(n,f)$ جزو دقیق‌ترین و جدیدترین آنها است که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه نظریه، محاسبات و نتایج مربوط به این واکنش ارائه شده است.

نظریه

بور فرض کرد که محور تقارن هسته در کل فرآیند شکافت ثابت می‌ماند و پاره‌های شکافت در امتداد محور تقارن هسته گسیل می‌شوند، پس توزیع جهت‌های محور تقارن به‌وسیله‌ی توزیع زاویه‌ای پاره‌ها معین می‌شوند. برای یک حالت مرکب از اندازه‌حرکت زاویه‌ای I ، و مؤلفه Z (در امتداد پرتو فرودی) M ، که در یک حالت تحریکی غیر اندرکنشی با مؤلفه K اندازه‌حرکت زاویه‌ای که در امتداد محور تقارن از سد

³ CERN

¹ Statistical Transition State Model

² neutron- Time Of Flight

که در آن $K_o^2 = (T/\hbar^2)[(1/\mathfrak{I}_{\parallel}) - (1/\mathfrak{I}_{\perp})]$ است. اگر کمیت $[(1/\mathfrak{I}_{\parallel}) - (1/\mathfrak{I}_{\perp})]$ با عبارت $(1/\mathfrak{I}_{\text{eff}})$ جایگزین شود، آنگاه:

$$K_o^2 = T \mathfrak{I}_{\text{eff}} / \hbar^2 \quad 7$$

برای یک توزیع K گاوسی، یک عبارت دقیق را می‌توان برای توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت از معادله 4 با توزین مناسب M ، J و K نتیجه گرفت.

اما برای پرتابه نوترون‌ها و ذرات باردار، وقتی اندازه حرکت‌های زاویه‌ای مداری نسبت به اسپین‌های هدف و پرتابه بسیار بزرگتر هستند، می‌توان عبارت ساده‌تری نوشت؛ چون مؤلفه‌های اندازه حرکت‌های زاویه‌ای مداری کل روی محور ثابت فضایی Z (یعنی M) نسبت به اندازه حرکت‌های زاویه‌ای کل (یعنی J) بسیار کوچک هستند. در حالت حد وقتی اسپین‌های هدف و پرتابه صفر هستند و قبل از شکافت، هیچ گسیل ذره‌ای از هسته مرکب اولیه روی ندهد، به عبارت دیگر وقتی $M = 0$ باشد، توزیع زاویه‌ای برای یک J ویژه با فرض یک توزیع K -گاوسی برابر می‌شود با [1]:

$$W_{M=0}^J(\theta) \propto \sum_{K=J}^J \frac{(2J+1) |d_{M=0,K}^J(\theta)|^2 \exp(-K^2/2K_o^2)}{\sum_{K=J}^J \exp(-K^2/2K_o^2)} \quad 8$$

که در آن مقادیر J متعدد هسته مرکب شرکت کرده و ضرایب انتقال T_1 معلوم هستند. توزیع زاویه‌ای کل برای $M = 0$ چنین می‌شود [1]:

$$W(\theta) \propto \sum_{J=0}^{\infty} (2J+1) T_1 \sum_{K=J}^J \frac{(2J+1) |d_{M=0,K}^J(\theta)|^2 \exp(-K^2/2K_o^2)}{\sum_{K=J}^J \exp(-K^2/2K_o^2)} \quad 9$$

که در آن وقتی $M = 0$ باشد، ضرایب انتقال به صورت T_1 و از $l = J$ نوشته می‌شوند [8].

توابع موج چرخشی در رابطه 9 از رابطه زیر به دست می‌آیند:

است. بنابراین در نظرگیری یک توزیع آماری از کانال‌ها در انرژی‌های متعادل مناسب است. انتظار داریم واریانس توزیع K_o^2 نیز نسبت به انرژی تغییر کند. از این رو وقتی انرژی بالا می‌رود، کانال‌های بسیار بیشتری در دسترس خواهند بود و در نتیجه با افزایش انرژی مقادیر واریانس K_o^2 نیز تغییر خواهند کرد. چگالی ترازها در هسته گذار با اسپین J و مؤلفه آن روی محور تقارن هسته برابر K با استفاده از رابطه تقریبی زیر داده می‌شود [1]:

$$\rho(J, K) \propto \exp[(E - E_{\text{rot}}^{J,K})/T] \quad 2$$

که در آن E انرژی کل، $E_{\text{rot}}^{J,K}$ انرژی مقید به چرخش برای حالت (J, K) ، و T دمای ترمودینامیکی هسته است. برای به دست آوردن معادله 2 لازم است T برای تغییرات کوچک در انرژی تحریکی حول E ثابت بماند. مقدار انرژی ترمودینامیکی دسترس پذیر برای هسته برابر $(E - E_{\text{rot}}^{J,K})$ است. اما انرژی چرخشی تغییر شکل در نقطه زینی برابر است با:

$$E_{\text{rot}}^{J,K} = (\hbar^2/2\mathfrak{I}_{\perp})(J^2 - K^2) + (\hbar^2/2\mathfrak{I}_{\parallel})K^2 \quad 3$$

که در آن \mathfrak{I}_{\parallel} و \mathfrak{I}_{\perp} به ترتیب گشتاورهای اینرسی هسته‌ای حول محورهای عمود و موازی با محور تقارن هستند. با جای گذاری معادله 3 در معادله 2 نتیجه می‌شود [1]:

$$\rho(J, K) \propto \exp\{(E/t) - (\hbar^2 J^2/2\mathfrak{I}_{\perp} T) - (\hbar^2 K^2/2T)[(1/\mathfrak{I}_{\parallel}) - (1/\mathfrak{I}_{\perp})]\} \quad 4$$

برای مقادیر ثابت E و J تعداد ترازهای گذار $\rho(J, K)$ به دو کمیت $(\hbar^2 J^2/2\mathfrak{I}_{\perp} T)$ و

$$(\hbar^2 K^2/2T)[(1/\mathfrak{I}_{\parallel}) - (1/\mathfrak{I}_{\perp})]$$

J نیز ثابت باشد، آنگاه توزیع در K چنین می‌شود:

$$\rho(J, K) \propto \exp\{-(\hbar^2 K^2/2T)[(1/\mathfrak{I}_{\parallel}) - (1/\mathfrak{I}_{\perp})]\} \quad 5$$

این معادله در حکم یک توزیع K گاوسی است.

$$\rho(J, K) \propto \exp(-K^2/2K_o^2), \quad K \leq J \quad 6$$

$$= 0 \quad K > J$$

پژوهش‌های هسته‌ای اروپا اندازه‌گیری شده‌اند، استفاده می‌کنیم [6]. در آغاز داده‌ها استخراج شده و سپس طبق رابطه تقریبی 9 و جهت محاسبه نظری آنها، یک کدنویسی رایانه‌ای انجام می‌دهیم. این کدنویسی رایانه‌ای را در پژوهش حاضر برای به‌دست آوردن رابطه محاسباتی سنگین نظری واریانس آماری K^2 توسعه داده‌ایم. در تمام این محاسبات ضرایب انتقال نوترون پری- بک¹ (با برهم‌کنش اسپین-مداری) به‌کار رفته و بدیهی است که در این برنامه رایانه‌ای مقادیر ضرایب انتقال مدل اپتیکی نیز جایگذاری شده‌اند [10,11]. در نهایت دو مقدار از مقادیر ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت یکی به‌روش تجربی و در آزمایشگاه [2] و دیگری به‌روش نظری و طبق محاسبات صورت پذیرفته در برنامه کدنویسی رایانه‌ای را در اختیار داریم. برای ایجاد ارتباط منطقی بین این نتایج، مقدار ناهمسانگردی نظری به‌ازای مقادیر مختلف K^2 را محاسبه کرده [8]، سپس نمودار ناهمسانگردی زاویه‌ای $(W(0^\circ)/W(90^\circ))$ برای واکنش هسته‌ای $^{234}\text{U}(n,f)$ را برحسب مقادیر K^2 رسم می‌کنیم. حال نمودار مقدار ناهمسانگردی آزمایشگاهی را نیز - که مقداری ثابت است [2]- برحسب همان K^2 ها رسم می‌کنیم. در این مرحله به‌ازای مقادیر مختلف K^2 ناهمسانگردی‌های نظری و آزمایشگاهی با هم برآزش می‌گردند تا یکدیگر را به‌ازای یک واریانس مشخص قطع نمایند.

بحث و نتایج

داده‌های توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت در گستره‌های انرژی محدود توسط گروه‌های مختلف گردآوری و اندازه‌گیری شده‌اند. برای واکنش $^{234}\text{U}(n,f)$ داده‌های ناهمسانگردی بسیار ناچیزی حداکثر تا 15MeV در دسترس قرار داشتند،

$$d_{M,K}^I(\theta) = \frac{10}{[(I+M)!(I-M)!(I+K)!(I-K)!]^{1/2}} \sum_X \frac{(-1)^X (\text{Sin}(\theta/2))^{K-M+2X} (\text{Cos}(\theta/2))^{2I-K+M-2X}}{(I-K-X)!(I+M-X)!(X+K-M)!X!}$$

جمع در اینجا روی X است و تا وقتی که هیچ یک از مقادیر داخل پرانتزها منفی نشود، ادامه می‌یابد. وقتی اسپین‌های هر دوی هدف و پرتابه صفر باشند، معادله 9 یک عبارت نظری دقیق برای محاسبه توزیع‌های زاویه‌ای پاره‌های شکافت به‌شمار می‌آید [8].

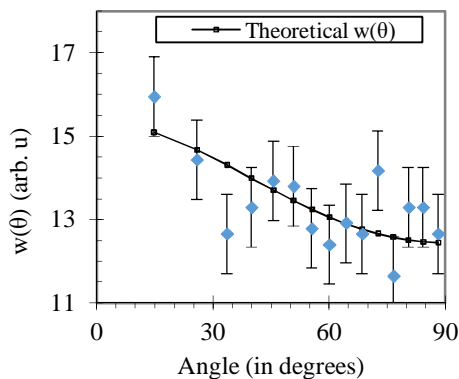
روش کار

در مدل حالت گذار (TSM) فرض می‌شود که توزیع آماری K در ساختار نقطه زینی برقرار شده و در طول مدت نزول از نقطه زینی تا انقطاع بدون تغییر باقی می‌ماند. مطالعات شکافت مربوط به ویژگی‌های هسته تغییرشکل‌یافته نوترون‌القایی در بررسی توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت در گسیل چندگانه نوترون نیز می‌تواند آشکار شوند [9]. این واکنش‌ها نه تنها به‌خاطر کانال ورودی نوترون فرودی برای تشکیل هسته مرکب، قابل توجه هستند، بلکه به‌دلیل جنبه‌های دیگر ترکیب میانگین مانند تعادل‌های آن در انرژی، جرم، اندازه حرکت زاویه‌ای و شکل درجات آزادی حائز اهمیت هستند.

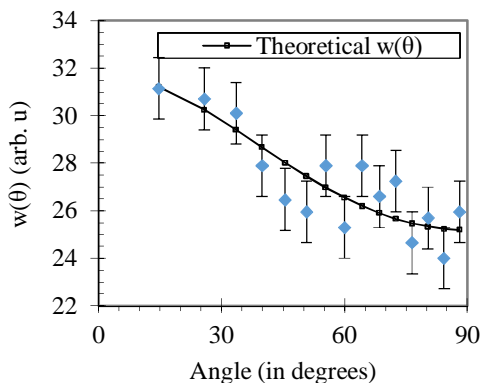
در مطالعات فیزیک هسته‌ای همواره داده‌های تجربی جدید و دقیق توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت برای مقایسه و برآزش مقادیر ناهمسانگردی نظری و آزمایشگاهی لازم است. در این راستا ابتدا مقادیر آزمایشگاهی توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت و ناهمسانگردی زاویه‌ای که گروه‌هایی از محققین برای واکنش‌ها در زوایای خاص به‌دست آورده‌اند [7]، را استخراج کرده، سپس در محاسبات به‌کار می‌بریم [8]. برای دقت بیشتر، داده‌هایی که اخیراً و با وضوح زیاد از تجهیزات آزمایشگاهی n-TOF در مرکز

¹ Perey- Buck

انرژی نوترون فرودی $E_n = 5,63 \text{ MeV}$ ،
 $E_n = 11,91 \text{ MeV}$ و $E_n = 28,37 \text{ MeV}$
 به ترتیب در شکل‌های 2 تا 4 نشان داده شده‌اند.



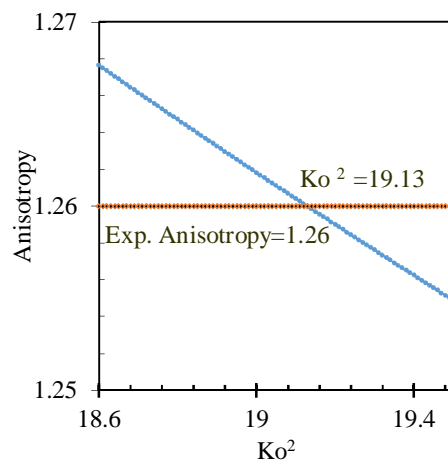
شکل 2. نمودار توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت نظری و آزمایشگاهی $W(\theta)$ برای شکافت $^{234}\text{U}(n,f)$ نوترون القایی در انرژی $E_n = 5,63 \text{ MeV}$ برحسب زاویه (درجه) [2]. منحنی مربوط به نتایج محاسبات نظری ناهمسانگردی با واریانس $K_o^2 = 10,63$ است.



شکل 3. نمودار توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت نظری و آزمایشگاهی $W(\theta)$ برای شکافت $^{234}\text{U}(n,f)$ نوترون القایی در انرژی $E_n = 11,91 \text{ MeV}$ برحسب زاویه (درجه) [2]. منحنی مربوط به نتایج محاسبات نظری ناهمسانگردی با واریانس $K_o^2 = 19,13$ است.

اما اخیراً توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت نوترون القایی در تجهیزات n_TOF واقع در مرکز پژوهش‌های هسته‌ای اروپا اندازه‌گیری شده‌اند. در این اندازه‌گیری، گستره وسیعی از انرژی با یک تفکیک انرژی نوترونی بالا پوشش داده شده است [2].

در شکل 1 نمونه‌ای از محاسبه واریانس آماری K_o^2 برای واکنش هسته‌ای $^{234}\text{U}(n,f)$ در انرژی نوترون فرودی $E_n = 11,91 \text{ MeV}$ نشان داده شده است.



شکل 1. نمودار تغییرات $W(0^\circ)/W(90^\circ)$ ناهمسانگردی زاویه‌ای نظری محاسبه شده از رابطه 9 و تجربی برگرفته از (n-TOF) [2]، برحسب K_o^2 در واکنش $^{234}\text{U}(n,f)$ در انرژی $E_n = 11,91 \text{ MeV}$.

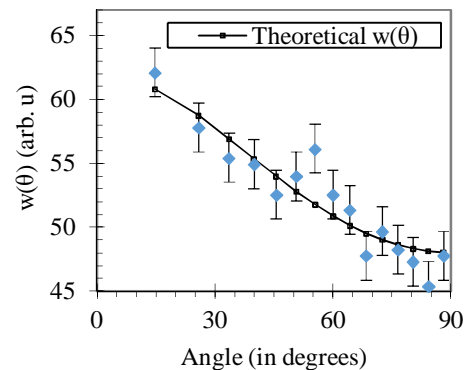
همانگونه که مشاهده می‌گردد، به‌ازای مقادیر گوناگونی از K_o^2 ناهمسانگردی‌های نظری و آزمایشگاهی با هم برازش شده و یکدیگر را در یک واریانس مشخص قطع می‌نمایند و بدین شیوه مقدار واریانس K_o^2 از معادله 9 محاسبه می‌شود. با توجه به شکل 1 می‌توان دریافت که به‌ازای ناهمسانگردی‌های نظری کوچکتر، پارامتر واریانس K_o^2 بزرگتر خواهد شد. در ادامه معادله 9 برای محاسبه واریانس K_o^2 در انرژی‌های نوترون فرودی مختلف در واکنش هسته‌ای $^{234}\text{U}(n,f)$ به‌کار رفته‌اند. توزیع زاویه‌ای کامل² برای واکنش هسته‌ای $^{234}\text{U}(n,f)$ در سه مقدار مختلف

² The full angular distributions

محاسبات مشابه برای داده‌های آزمایشگاهی در سایر انرژی‌ها تا نزدیکی 60 MeV صورت پذیرفته و نتایج همراه با ناهمسانگردی‌های آزمایشگاهی پاره‌ها برای واکنش $^{234}\text{U}(n,f)$ در جدول 1 فهرست شده‌اند. جدول 1 شامل مقادیر K_0^2 حاصل از برازش و نیز ناهمسانگردی‌های زاویه‌ای آزمایشگاهی پاره‌های شکافت برای این واکنش در انرژی‌های مختلف است. آنچه در این محاسبات می‌تواند مورد توجه باشد، نحوه تغییرات واریانس، به‌ویژه در انرژی‌هایی است که در آنها کانال جدیدی برای شکافت باز می‌شود. اهمیت محاسبات در آن است که برای اولین بار در انرژی‌های بالای 15 MeV این محاسبات و اندازه‌گیری‌ها برای واکنش $^{234}\text{U}(n,f)$ صورت پذیرفته است. در ادامه با استفاده از کد تالیس 1.8 سطح مقطع شکافت هسته ^{234}U محاسبه شده است [12]. در این محاسبات پارامترها و مدل‌های پیش فرض تالیس برای محاسبه سطح مقطع شکافت به‌کاررفته‌اند [12-14]، و سطح مقطع کل شکافت و نیز سطح مقطع کانال‌های شکافت برای واکنش $^{234}\text{U}(n,f)$ به‌دست آمده‌اند.

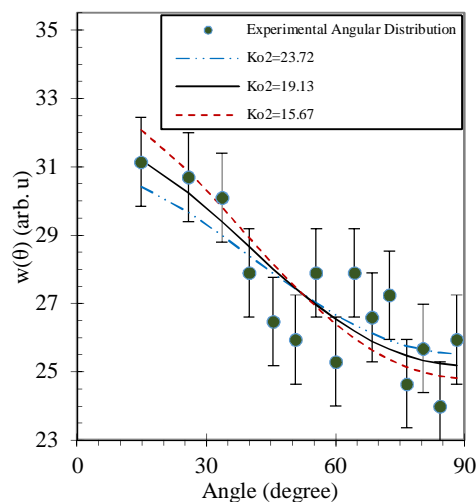
جدول 1. مقادیر ناهمسانگردی آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده برای شکافت نوترون القایی ^{234}U [2] همراه با مقادیر محاسبه شده واریانس آماری K_0^2 در انرژی‌های مختلف.

انرژی نوترون (MeV)	واریانس آماری K_0^2	ناهمسانگردی آزمایشگاهی $W(0)/W(90)$
0.13	1.91	1.31
0.21	11.91	1.05
0.29	3.43	1.17
0.33	6.36	1.09
0.62	18.73	1.03
0.65	3.33	1.17
0.69	1.61	1.37
0.73	1.01	1.59
0.77	0.76	1.80
0.82	0.62	1.96



شکل 4. نمودار توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت نظری و آزمایشگاهی $W(0)$ برای شکافت $^{234}\text{U}(n,f)$ نوترون القایی در انرژی $E_n = 28/37$ MeV برحسب زاویه (درجه) [2]. منحنی مربوط به نتایج محاسبات نظری ناهمسانگردی با واریانس $K_0^2 = 33/35$ است.

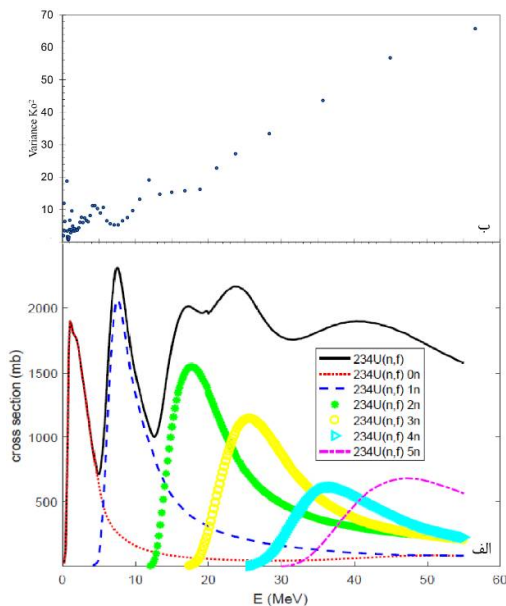
در ادامه به همین روش مقادیر مختلف توزیع زاویه‌ای که در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده‌اند، را با مقادیر نظری که محاسبه کردیم، برازش داده و این دو کمیت به‌ازای مقادیر مختلف K_0^2 مقایسه شده‌اند. در شکل 5 نمونه‌ای از توزیع‌های زاویه‌ای آزمایشگاهی برای انرژی نوترون فرودی $E_n = 11/91$ MeV به‌ازای چند مقدار مختلف واریانس با مقدار واریانس پایه $K_0^2 = 19/13$ مقایسه شده‌اند.



شکل 5. توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت نظری و آزمایشگاهی $W(0)$ برای شکافت نوترون القایی ^{234}U در انرژی $E_n = 11/91$ MeV برحسب زاویه (درجه) [2]. منحنی‌های متفاوت مربوط به نتایج محاسبات نظری با مقادیر مختلف واریانس K_0^2 است.

نوترون (MeV)	K_0^2	$W(0)/W(90)$	انرژی نوترون (MeV)	واریانس آماري K_0^2	ناهمسانگردی آزمایشگاهی $W(0)/W(90)$
18.87	16.23	1.45	0.87	0.8	1.77
21.17	22.74	1.34	0.92	1.46	1.43
23.76	27.22	1.31	0.97	3.82	1.16
28.37	33.35	1.29	1.04	6.7	1.09
35.72	43.63	1.26	1.13	2.81	1.22
44.97	56.73	1.24	1.22	3.82	1.16
56.61	65.75	1.22	1.31	9.57	1.09
			1.42	4.89	1.18
			1.53	3.32	1.27
			1.65	4.09	1.24
			1.78	3.42	1.29
			1.93	3.94	1.25
			2.08	3.66	1.28
			2.24	4.38	1.24
			2.42	6.02	1.21
			2.61	7.59	1.17
			2.82	5.97	1.23
			3.05	7.36	1.20
			3.29	6.55	1.23
			3.55	6.23	1.25
			3.84	8.09	1.22
			4.14	11.16	1.18
			4.47	11.21	1.19
			4.83	10.31	1.22
			5.21	8.93	1.26
			5.63	10.68	1.24
			6.08	6.53	1.42
			6.56	5.64	1.52
			7.09	5.21	1.60
			7.65	5.23	1.64
			8.26	6.51	1.57
			8.92	7.48	1.53
			9.63	9.66	1.44
			10.61	13.16	1.34
			11.91	19.13	1.26
			13.36	14.67	1.37
			14.99	15.28	1.39
			16.82	15.74	1.42
				واریانس	ناهمسانگردی
				آماري	آزمایشگاهی

شکل 6الف و 6ب به ترتیب سطح مقطع (برحسب میلی بارن (mb) و واریانس K_0^2 را برحسب انرژی نوترون فرودی En (برحسب مگاالکترون ولت (MeV) نشان می‌دهند. اینجا سازگاری منطقی بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های محاسبه شده سطح مقطع با تالیس وجود دارند [15].



شکل 6. الف: محاسبات سطح مقطع شکافت با استفاده از کد تالیس [12] برحسب انرژی نوترون فرودی En (MeV) برای واکنش $^{238}\text{U}(n,f)xn$ ب: نمودار مقادیر واریانس K_0^2 برای واکنش هسته‌ای $^{238}\text{U}(n,f)$ برحسب انرژی نوترون فرودی En (MeV).

همان‌گونه که در شکل 6الف مشاهده می‌گردد، سطح مقطع شکافت $^{238}\text{U}(n,f)$ در انرژی $En = 1/22$ MeV

شدیداً و در یک بازه کوچک انرژی تا چندین برابر مقدار خود کاهش می‌یابد و یک کانال جدید باز می‌شود این کاهش چشمگیر در سطح مقطع واکنش، با افزایش قابل ملاحظه (حدود دو و نیم برابری) واریانس از مقدار $3/82$ تا $9/57$ در این بازه انرژی توأم خواهد شد. این امر نشان دهنده ارتباط بین احتمال واکنش و واریانس K_0^2 است. به عبارتی هر جا یک مینیمم در نمودار واریانس K_0^2 برحسب انرژی دیده می‌شود، در آن انرژی، بیشینه سطح مقطع شکافت را داریم و یک کانال جدید برای شکافت باز می‌شود. درستی این پدیده در دو واکنش دیگر و برای شکافت نوترون القایی هسته‌های ^{238}U و ^{232}Th نیز اثبات شده است [16].

شکل 6 الف کانال‌های مختلف شکافت، همچنین سطح مقطع شکافت را نشان می‌دهد، در شکل 6 ب می‌توان تشخیص داد که واریانس K_0^2 با افزایش انرژی نوترون افزایش می‌یابد. این رفتار روشن می‌کند که با افزایش انرژی تحریک، تعداد بسیار بیشتری از ترازهای تک‌ذره‌ای نیلسون مشارکت کرده و جمعیت حالت‌های K بزرگتر خواهد شد که به نوبه خود می‌تواند منجر به یک افزایش در واریانس توزیع گردد. همچنین، مقادیر اندازه حرکت زاویه‌ای حالت‌های تک‌ذره، در مجاورت تراز فرمی می‌تواند نقش مهمی در مقادیر K_0^2 داشته باشد.

طبق شکل 6 در واکنش $^{234}\text{U}(n,f)$ اولین شانس شکافت بعد از آستانه در محدوده انرژی MeV قرار دارد. دومین شانس شکافت در انرژی زیر 10MeV به دست آمده است. در دومین شانس، انرژی برانگیختگی هسته مرکب از بیشینه سد شکافت به علاوه انرژی بستگی هسته بیشتر است، لذا این امکان وجود دارد که قبل از آنکه هسته مرکب دستخوش شکافت گردد، یک نوترون، از آن گسیل شود. در این ناحیه، ناهمسانگردی‌های مشاهده شده روی توزیع‌های

زاویه‌ای، و اینکه کوچک‌تر از شانس اول هستند، معنی دارند. داده‌های حاضر اطلاعاتی از واریانس را در واکنش $^{234}\text{U}(n,f)$ برای اولین بار در انرژی‌های بالاتر از 15MeV مهیا کرده، همچنین یک بازتولید کامل ساختار ناهمسانگردی را اطراف دومین شانس فراهم آورده است. در سومین شانس شکافت، یعنی زیر 20MeV انرژی نوترون فرودی به اندازه‌ای کافی است که می‌تواند دو نوترون را از هسته مرکب گسیل کند، قبل از آنکه هسته شکافته شود. برای اولین بار اطلاعاتی در مورد سومین شانس، از روی داده‌های مذکور در دسترس قرار گرفته است و هیچ داده آزمایشگاهی دیگری در تحقیقات گذشته وجود نداشته است. همچنین این محاسبات به‌ویژه برای تخمین سطح مقطع کانال‌های شکافت در جاهایی که داده‌های آزمایشگاهی وجود نداشته یا خیلی نادر هستند، مفید و کاربردی است [15].

نتایج محاسبات واکنش $^{234}\text{U}(n,f)$ در توافق کامل با نتایج دو واکنش $^{238}\text{U}(n,f)$ و $^{232}\text{Th}(n,f)$ می‌باشند [16]. فراتر از این ساختار دوره‌ای، یک افزایش ملایم واریانس‌ها در انرژی‌های بالاتر مشاهده می‌شود. این افزایش ملایم K_0^2 برحسب انرژی، ناشی از افزایش تعداد آرایش‌های مربوط به مشارکت ترازهای تک‌ذره‌ای نزدیک به هم نیلسون در انرژی‌های بالاتر می‌باشد [16] و به این دلیل است که یک کاهش ملایم ناهمسانگردی‌های پاره‌ها در انرژی‌های نوترون بالاتر مشاهده می‌شود.

نتیجه گیری

در این مقاله بستگی انرژی ناهمسانگردی‌های زاویه‌ای پاره‌های شکافت برای واکنش $^{234}\text{U}(n,f)$ در چارچوب مدل آماری محاسبه شده و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی جدیدی مقایسه شده‌اند که در تجهیزات n-TOF در مرکز پژوهش‌های هسته‌ای اروپا

- [3] E. Leal-Cidoncha. et al., *EPJ Web of Conf.* **111** (2016) 10002.
- [4] S. Rasouli, A.N. Behkami, Shell Effect In Nuclear Fission, Islamic Azad University of Mahabad, M. Sc. Thesis (2007).
- [5] R. El-Hajje, A Simultaneous Measurement of The Angular Distribution Mass and Kinetic Energy, New South Wales University, Ph.D. Thesis (2000) iii. 69.
- [6] F. Gunsing et al., *14th Int. Conf. Nucl. Reaction Mech.*, Varenna, Italy, Villa Monastero (2015) p.323.
- [7] F.M. Rahimi, O.N. Ghodsi, A.N. Behkami, *Nuclear Technology & Radiation Protection* **18** (2003) 31.
- [8] J.R. Huizenga, A.N. Behkami, L.G. Moretto. Note on Interpretation of Fission-Fragment Angular Distribution at Moderate Excitation Energies, *Physical Review* **177** (1969) 1827.
- [9] I.V. Ryzhov, et. al., Influence of multichance fission on fragment angular anisotropy in the $^{232}\text{Th}(n, f)$ and $^{238}\text{U}(n, f)$ reactions at intermediate energies, *Nuclear Physics A* **760**, (2005).
- [10] T. Datta, S.P. Dange, H. Naikand, S.B. Manohar, *Physical Review C* **48** (1993) 221.
- [11] E.H. Auerbach, F.G.J. Perey, BNL Report 765. Brookhaven Nat. Lab. Upton, New York (1962).
- [12] A.J. Koning, S. Hilairey, M. Duijvestijn. "User's Manual of TALYS 1.4 Codes: a nuclear reaction program." *Nuclear Research and Consultancy Group (NRG), Netherlands* (2011) 1-456.
- [13] R. Razavi et al., *Zeitschrift für Naturforschung A* **71** (2016) 157-160.
- [14] R. Razavi, A. Rahmatinejad, T. Kakavand, A. Khooy, Pairing phase transition of nucleons in ^{89}Y and ^{208}Pb , *Journal of Research on Many-body Systems*, **13** (2017) 79-85.

اندازه‌گیری شده‌اند. به عبارتی به‌ازای مقادیر مختلف K_0^2 ناهمسانگردی‌های نظری و آزمایشگاهی با هم برازش شدند تا یکدیگر را به‌ازای یک واریانس مشخص قطع نمایند. پس بدین شیوه مقدار واریانس آماری K_0^2 محاسبه شده است.

در ادامه با استفاده از کد تالیس 1.8 سطح مقطع شکافت نوترون القایی در ساختار دوره‌ای (n,nx) نیز برحسب انرژی از 1 MeV تا 60 MeV محاسبه شده‌اند. مقایسه بین واریانس و سطح مقطع به‌وضوح ارتباط قوی بین مقادیر واریانس K_0^2 و باز شدن یک کانال شکافت را نشان می‌دهد. هر شکافت چندکاناله³ مربوط به گسیل نوترون‌ها است و هر نوترون گسیل شده معادل مقداری انرژی تحریک است، بنابراین دمای هسته‌ای T با هر گسیل نوترون کاهش یافته، و K_0 باریک می‌گردد. این توضیح می‌دهد که چرا واریانس به‌طور ناگهانی در مدخل هر شانس شکافت کاهش می‌یابد. این پدیده برای اغلب شانس‌های شکافت و در آستانه شکافت برای واکنش $^{234}\text{U}(n, f)$ به‌وضوح قابل مشاهده بوده، در توافق کامل با نتایج محاسبات واکنش شکافت نوترون القایی هسته‌های ^{238}U و ^{232}Th است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همکاری آقای سیدمحمدرضا بیاتی در بخش محاسبات کد تالیس تشکر می‌نمایند.

مرجع‌ها

- [1] R. Vandenbosh, J. Huizenga, *Nuclear Fission*, Academic Press, New York, (1973).
- [2] E. Leal-Cidoncha, Neutron-induced fission fragment angular distribution and cross section of uranium targets at CERN n-TOF, PhD thesis, Universidade de Santiago de Compostela. (2017) i,7.

³ multiple-chance

[15] L. Sai Leong, Fission fragment angular distribution and fission cross section validation. Ph. D. Thesis. Université Paris Sud - Paris XI, (2013) 112.

[16] S. Rasouli, A.N. Behkami, R. Razavi, A.A. Sabouri Dodaran and M.R. Bayati, Investigation on Neutron-Induced Fission Fragment Angular Distribution of ^{232}Th and ^{238}U . *Zeitschrift für Naturforschung A* **73**(11) (2018) 1075–1081.