



ارزیابی مناسب پتانسیل نوکلئون - نوکلئون در انرژی های نزدیک سد همجوشی برای سیستم های شامل هسته ی پرتابه از نوع مقید ضعیف ${}^8\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ و ${}^9\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ با روش مونت کارلو

محمد، محمودی*؛ علی اکبر، رجبی

دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک، گروه هسته ای

چکیده

در این مقاله سطح مقطع همجوشی سیستم های شامل هسته ی پرتابه از نوع « مقید ضعیف ^۱ » ${}^8\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ ، ${}^9\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ در انرژی های نزدیک سد همجوشی مورد مطالعه قرار گرفته است. سطح مقطع همجوشی را با استفاده از پتانسیل نوکلئون - نوکلئون از نوع مغزی نرم از طریق شبیه سازی به روش مونت کارلو بررسی کرده ایم. نشان داده ایم با استفاده از یک پارامتر آزاد می توان محدودده عمق پتانسیل مغزی نرم را طوری تغییر داد، که سطح مقطع همجوشی حاصل از روش مونت کارلو برای سیستم های مورد مطالعه در توافق مناسبی با مقادیر تجربی باشد. همچنین برد و مغزی دافعه ی پتانسیل مغزی نرم بدست آمده از این تحلیل تقریباً یکسان و با برد و مغزی دافعه ی پتانسیل نوکلئون-نوکلئون از نوع M^{3Y} متناسب است.

کلید واژه

پتانسیل نوکلئون- نوکلئون از نوع مغزی نرم، روش مونت کارلو، سطح مقطع همجوشی

مقدمه

در سال های اخیر بررسی مکانیسم واکنش های شامل هسته های پرتابه از نوع « مقید ضعیف » و هسته های پرتابه از نوع « حلقوی ^۲ » مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است [۱-۳]. سوال اساسی در بسیاری از این بررسی ها تاثیر فرآیند های « شکست ^۳ »، « انتقال ^۴ » و گسترش شعاعی هسته به ویژه برای هسته های پرتابه از نوع حلقوی بر روی سطح مقطع همجوشی می باشد. این اثرات در مقایسه با هنگامی که هسته های پرتابه از نوع « مقید قوی ^۵ » می باشند، اهمیت بیشتری دارند. به هر حال در این بررسی ها، سعی می گردد محاسبات تحلیلی سطح مقطع همجوشی در توافق بهتری با مقادیر تجربی باشد. یکی از مدل های موجود جهت بررسی تحلیلی سطح مقطع همجوشی، مدل $SBPM$ ^۶ می باشد [۴]. در این مدل، سد همجوشی توسط پتانسیل کولنی و هسته ای

^۱ - weakly bound

^۲ - halo

^۳ - break up

^۴ - transfer

^۵ - tightly bound

^۶ - Single Barrier Penetration Model



بین سیستم پرتابه و هدف توصیف می گردد. در اکثر بررسی ها پتانسیل هسته ای به فرم « وود- سکسون^۷ » پیشنهاد می شود [۵]. همچنین تعدادی از محققین، پتانسیل هسته ای بین هسته های پرتابه و هدف را به طور مستقل از داده های آزمایشگاهی سطح مقطع همجوشی توسط روش DFM^۸ با استفاده از پتانسیل نوکلئون - نوکلئون از نوع $M3Y$ با لحاظ نمودن تصحیحات مربوط به انرژی و چگالی محاسبه نموده اند [۵]. در این محاسبات انتخاب پتانسیل نوکلئون - نوکلئون موثر نقش اساسی را بازی می کند. همچنین هنگامی که چگالی واقعی ماده ی هسته ای به کار گرفته شود، اثرات استاتیکی برای سیستم های شامل هسته ی پرتابه از نوع مقید ضعیف و هسته ی پرتابه از نوع حلقوی اهمیت ویژه ای دارد.

در این مقاله، محاسبه این پتانسیل از طریق شبیه سازی به روش مونت کارلو پیشنهاد شده است. ابتدا پتانسیل هسته ای بین دو نوکلئون از نوع $M3Y$ انتخاب شده است و اثرات استاتیکی مربوط به انتخاب چگالی واقعی مورد بررسی قرار گرفت. سپس پتانسیل هسته ای بین دو نوکلئون از نوع مغزی نرم انتخاب شده است. پارامتر های آن طوری تنظیم شده است، که محاسبات تحلیلی سطح مقطع همجوشی در توافق مناسب با مقادیر تجربی باشد.

روش کار

در مدل نیمه کلاسیکی $SBPM$ پتانسیل کل به صورت زیر تعریف می شود [۴].

$$V_l(r) = V_N(r) + V_C(r) + \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\mu r^2} = V_o(r) + \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\mu r^2} \quad (1)$$

V_C و V_N به ترتیب پتانسیل های هسته ای، کولنی و تکانه نسبی بین هسته های پرتابه و هدف می باشند، با استفاده از این پتانسیل سطح مقطع کل همجوشی بر حسب انرژی پرتابه در دستگاه مرکز جرم مطابق رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\sigma(E) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{\pi \hbar^2}{2\mu E} (2l+1) [1 + \exp(\int_{r_{l1}}^{r_{l2}} \sqrt{\frac{8\mu}{\hbar^2} (V_l(r) - E)} dr)]^{-1} \quad (2)$$

در این رابطه μ جرم کاهش یافته سیستم پرتابه و هدف و r_{l1} و r_{l2} نقاط بازگشت پاره موج l ام در انرژی E می باشند.

در این مقاله، جمله $V_o(r)$ در رابطه (۱) توسط روش مونت کارلو مطابق مرجع [۶] محاسبه شده است، بدین گونه که هسته های پرتابه و هدف به صورت توده ای از نوکلئون ها، با چگالی برابر با توزیع ماده هسته ای در فضای داخل هسته تولید شده اند. در روش مونت کارلو آرایش فضایی نوکلئونها به گونه ای است که با در نظر گرفتن پتانسیل $DDM3Y1_Paris$ [۷] و کولنی بین نوکلئون ها انرژی کل هسته در حالت پایه و هم چنین پارامتر R_{rms} با مقادیر حاصل از تجربه سازگار باشد. با انتخاب مناسبی از پارامترهای پتانسیل بین دو نوکلئون هسته های پرتابه و هدف مطابق رابطه (۵) که در آن V_o ، c و r_o به ترتیب عمق پتانسیل، شعاع مغزی دافعه و پارامتر برد

^۷ - Woods - Saxon

^۸ - Double Folding Model



نیروی بین دو نوکلئون می باشند [۸]، می توان پتانسیل هسته ای را بر حسب فاصله بین پرتابه و هدف و با جمع بندی بر روی تمامی پتانسیل های نوکلئون- نوکلئون طوری بدست آورد، که بتواند داده های آزمایشگاهی سطح مقطع همجوشی را توصیف نماید.

$$V_{ij}(r_{ij}) = -V_o(1 - c^n / r_{ij}^n) \exp(-r_{ij}^2 / r_o^2) \quad (۳)$$

جهت مطالعه پتانسیل هسته ای به صورت مستقل از داده های آزمایشگاهی سطح مقطع همجوشی به جای رابطه (۳) از برهم کنش BDM3Y1 نوع Paris مطابق مرجع [۷] استفاده کرده ایم.

نتایج

برای مطالعه پتانسیل هسته ای توسط روش مونت کارلو واکنش های ${}^9\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ و ${}^8\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ را انتخاب کرده ایم. هسته ی هدف شرکت کننده در این واکنش ها ${}^{208}\text{Pb}$ مازیک دوگانه بوده و اسپین کل آن برابر صفر است و در حالت پایه کروی شکل می باشد. این هسته نسبت به هسته های دیگر مقیدتر می باشد. هسته های پرتابه شرکت کننده در این واکنش ها از نوع مقید ضعیف می باشند، احتمال رخداد فرآیندهایی مانند، فرآیند شکست و انتقال برای آنها نسبت به هسته های مقید قوی بیشتر است. برای محاسبه پتانسیل هسته ای ابتدا از برهم کنش موثر نوکلئون-نوکلئون وابسته به چگالی و انرژی از نوع DDM3Y1_Paris استفاده نموده ایم، پارامترهای مورد نیاز از مرجع [۷] اقتباس شده است.

هسته های شرکت کننده در این واکنش ها از نظر تعداد نوترون غنی می باشند. نسبت نوترون به پروتون در سطح هسته به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد، طوری که چگالی نوترون های موجود در سطح هسته از رابطه $\rho_n(r) = \frac{N}{Z} \rho_p(r)$ پیروی نمی کند، شکل (۱). جهت بررسی این اثر ابتدا مشابه محاسبات مبتنی بر مدل DFM برای تولید هسته های پرتابه و هدف، چگالی نوترون ها را متناسب با چگالی بار هسته ای در نظر گرفته ایم، یعنی: $\rho_n(r) = \frac{N}{Z} \rho_p(r)$. که Z و N به ترتیب تعداد پروتون و نوترون می باشند. سپس با توجه به این نگرش که نسبت چگالی نوترون به پروتون در سطح این هسته ها اختلاف قابل ملاحظه ای با $\frac{N}{Z}$ دارد، برای تولید هسته های پرتابه و هدف، چگالی پروتون ها و نوترون ها را با استفاده از توزیع مدل ${}^9\text{HFB}$ [۹] محاسبه کرده ایم. مطابق این محاسبات پارامترهای توزیع دو پارامتری فرمی (۲PF) برای هسته های شرکت کننده در واکنش ها مطابق جدول (۱) محاسبه شده اند. پتانسیل کل سد موج S و سطح مقطع همجوشی متناظر با آن با استفاده از مدل SBPM برای دو حالت در نظر گرفته شده برای چگالی، به ترتیب در شکل های (۳ و ۲) نشان داده شده است. در نگرش دیگر برای برقراری توافق مناسب بین محاسبات تحلیلی سطح مقطع همجوشی با مقادیر تجربی، در محاسبه پتانسیل هسته ای بین سیستم پرتابه و هدف، پتانسیل نوکلئون- نوکلئون از نوع مغزی نرم مطابق رابطه (۳) انتخاب شده است. برای توزیع چگالی از محاسبات مدل HFB استفاده کرده ایم، جدول (۱). با توجه به این دیدگاه چنانچه مقادیر اسپین کل حداقل یکی از هسته های شرکت کننده در واکنش برابر صفر باشد، می توان از جملات وابسته به اسپین در محاسبه پتانسیل هسته ای صرف نظر کرد [۷]، از اثرات وابسته به اسپین در محاسبه

^۱ - Hartree -Fock-Bogolubov



پتانسیل هسته ای چشم پوشی کرده ایم. برای لحاظ نمودن اثرات وابسته به ایزواسپین، پتانسیل هسته ای بین پروتون - نوترون را نسبت به پروتون - پروتون و نوترون - نوترون ۲۵ درصد شدیدتر در نظر گرفته ایم. در این تحلیل پارامترهای مشخص کننده پتانسیل مغزی نرم را به گونه ای تنظیم نموده ایم، که محاسبات تحلیلی سطح مقطع همجوشی در توافق مناسب با مقادیر تجربی باشد. در این محاسبات مقادیر پارامترهای n ، c و r_0 ثابت می باشد. این مقادیر از نتایج حاصل از آزمایش پراکندگی نوکلئون - نوکلئون بدست می آیند [۷]. یک انتخاب مناسب از این پارامترها به صورت $n=1$ ، $c=0.53 fm$ و $r_0=0.49 fm$ می باشد. با توجه به تاثیر پارامتر v_0 بر روی عمق پتانسیل شکل (۴)، این پارامتر را به صورت پارامتر آزاد در نظر گرفته ایم. پتانسیل هسته - هسته را با تنظیم این پارامتر و استفاده از روش مونت کارلو به گونه ای محاسبه کرده ایم که مقادیر حاصل برای سطح مقطع همجوشی در توافق مناسب با داده های تجربی باشند. نتایج حاصل از این بررسی در جدول (۲) و شکل های (۴) و (۵) ارائه شده است. مقادیر تجربی سطح مقطع همجوشی از مراجع [۱۰-۱۱] استخراج شده اند.

بحث و نتیجه گیری

در این مقاله نشان داده ایم که روش به کار گرفته شده برای محاسبه پتانسیل بین سیستم پرتابه و هدف بر اساس شبیه سازی به روش مونت کارلو از قابلیت های لازم برای محاسبه پتانسیل مورد نیاز در محاسبه سطح مقطع همجوشی برخوردار می باشد. در محاسبات مونت کارلو نوکلئون های موجود در سطح هسته بیشترین سهم را در محاسبه سطح مقطع همجوشی دارند. با لحاظ کردن چگالی نوکلئون ها بر اساس محاسبات مدل HFB ارتفاع سد همجوشی برای واکنش های ${}^9\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ و ${}^8\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ به ترتیب حدود 0.55 MeV و 0.58 MeV افزایش یافته است. موقعیت سد همجوشی نیز به ترتیب به اندازه $0.25 fm$ و $0.24 fm$ کاهش یافته است، شکل (۲). در اثر این تغییر در پتانسیل به دست آمده، محاسبات تحلیلی سطح مقطع همجوشی توافق بهتری را با داده های آزمایشگاهی نشان می دهد، اما از توافق مناسب برخوردار نمی باشد، شکل (۳). همچنین نشان داده ایم با استفاده از روش مونت کارلو، می توان پارامترهای مشخص کننده پتانسیل مغزی نرم را به گونه ای تنظیم نمود، که محاسبات تحلیلی سطح مقطع همجوشی در توافق مناسب با مقادیر تجربی باشد. نشان داده ایم با استفاده از یک پارامتر آزاد می توان محدوده عمق پتانسیل مغزی نرم را طوری تغییر داد، که سطح مقطع همجوشی حاصل از روش مونت کارلو برای دو سیستم مختلف شامل هسته های پرتابه از نوع مقید ضعیف در توافق مناسبی با مقادیر تجربی باشد. از نتایج دیگر این مطالعه این است، برد و مغزی دافعه ی پتانسیل مغزی نرم بدست آمده تقریباً یکسان و با برد و مغزی دافعه ی پتانسیل نوکلئون-نوکلئون از نوع M^3Y متناسب است، شکل (۴). نیز عمق پتانسیل مغزی نرم با افزایش انرژی نوکلئون فرودی به ویژه برای هسته ی پرتابه ${}^9\text{Li}$ کاهش می یابد، شکل (۵).



مراجع

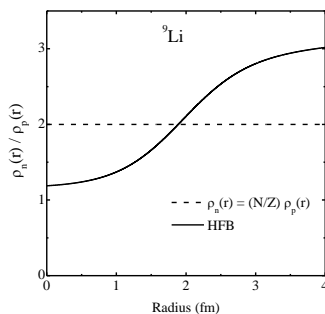
- [۱] P.R.S. Gomes, L.F. Canto, et al. , Fusion-Break up of weakly bond nuclei , *Nucl. & part. Phys. Journal*, ۶ , ۱۰-۱۵ (۲۰۱۳).
- [۲] P.R.S. Gomes, et al. , Fusion of two-neutron halo nuclei, *Phys. Lett. B*, ۶۹۵ , ۳۲۰-۳۲۳ (۲۰۱۱).
- [۳] C. Beck , N. Rowley, et al. , Reaction mechanisms for weakly-bound and halo nuclei, *Nucl. Phys. A* , ۸۳۴ , ۴۴۰c-۴۴۵c , (۲۰۱۰).
- [۴] M.Beckerman, Sub-barrier Fusion, *Rep. Prog. Phys.* , ۵۱ , ۱۰۴۷-۱۱۰۳ (۱۹۸۸).
- [۵] W.Seif, Folding analysis for fusion reactions, *J. Phys. G*, ۳۰ , ۱۲۳۱-۱۲۴۲ (۲۰۰۴).
- [۶] O.N. Ghodsi, M. Mahmoodi, and J. Ariai, Calculation of complete fusion cross sections by Monte Carlo method , *Phys. Rev. C*, ۷۵ , ۰۳۴۶۰۵ (۲۰۰۷).
- [۷] M.E. Brandan, G.R.Satchler, Interaction between light heavy-ions, *Phys. Rep.* , ۲۸۵ , ۱۴۳-۲۴۳ (۱۹۹۷).
- [۸] H.Kohler Y.Waghmare , Soft Core in Nuclear matter , *Nucl. Phys.* , ۶۶ , ۲۶۱-۲۶۶ (۱۹۶۵).
- [۹] H. Nakada, Hartree-Fock approach to nuclear matter, *Phys. Rev. C* , ۶۸ , ۰۱۴۳۱۶ (۲۰۰۳).
- [۱۰] A. M. Vinodkumar , et al. , Fusion of ^7Li with ^{208}Pb , *Phys. Rev. C*, ۸۰ , ۰۵۴۶۰۹ (۲۰۰۹).
- [۱۱] E. F. Aguilera , E. Martinez-Quiroz , et al. , Hindrance of complete fusion $^7\text{Li}+^{208}\text{Pb}$, *Phys. Rev. C*, ۸۰ , ۰۴۴۶۰۵ (۲۰۰۹).

جدول (۱): پارامترهای توزیع چگالی دو پارامتری فرمی (۲PF) مبتنی بر محاسبات مدل HFB .

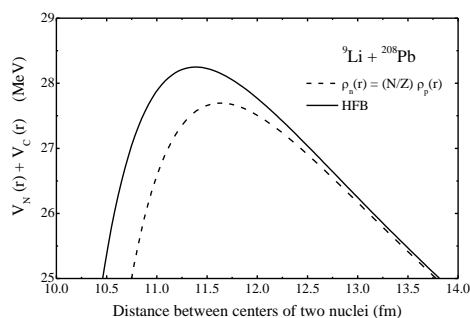
هسته	ρ_{op}	c_p	a_p	ρ_{on}	c_n	a_n
^9Li	۰/۱۰۹۳	۱/۴۹۰۴	۰/۴۶۷۵	۰/۱۲۶۹	۱/۹۱۷۵	۰/۴۷۲۷
^8Li	۰/۱۱۱۵	۱/۴۹۰۴	۰/۴۶۷۵	۰/۱۳۱۶	۱/۷۵۷۸	۰/۴۷۲۳
^{208}Pb	۰/۰۶۲۴	۶/۶۸۹۲	۰/۴۷۰۱	۰/۰۹۲۹	۶/۷۱۶۲	۰/۵۶۰۶

جدول (۲): تغییرات پارامتر v_0 برای واکنش $^8\text{Li}+^{208}\text{Pb}$ در انرژی های مختلف. ستون های سوم تا آخر به ترتیب مقادیر سطح مقطع همجوشی آزمایشگاهی، حاصل از محاسبات تحلیلی، درصد خطای بین محاسبه تحلیلی و تجربی هستند؛ داده های آزمایشگاهی سطح مقطع همجوشی از مرجع [۱۱].

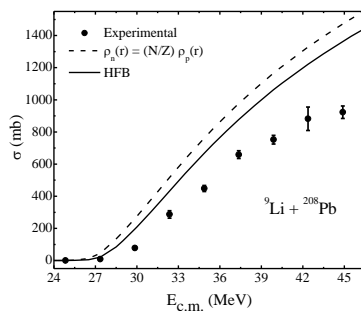
$E_{CM}(MeV)$	$v_0(mev)$	$\sigma_{Ex}(mb)$	$\sigma_{The.}(mb)$	$(\Delta\sigma/\sigma_{Ex})\%$
۳۲/۱	۲۶۰۷	۲۵۱ ± ۹	۲۵۲/۵۶	۰/۶۲
۳۳	۲۲۴۲	۳۰۹ ± ۹	۳۰۶/۵۷	۰/۷۸
۳۳/۹	۲۴۶۰	۴۰۳ ± ۱۳	۳۹۹/۳۸	۰/۸۹
۳۴/۸	۲۰۵۵	۴۵۰ ± ۱۲	۴۴۹/۶۳	۰/۰۸
۳۵/۷	۲۰۵۰	۵۲۶ ± ۱۳	۵۲۶/۹۲	۰/۱۷
۳۶/۶	۱۸۹۳	۵۹۰ ± ۱۳	۵۸۹/۷۹	۰/۰۳
۳۷/۵	۱۵۹۸	۶۳۸ ± ۱۳	۶۳۳/۹۴	۰/۶۳



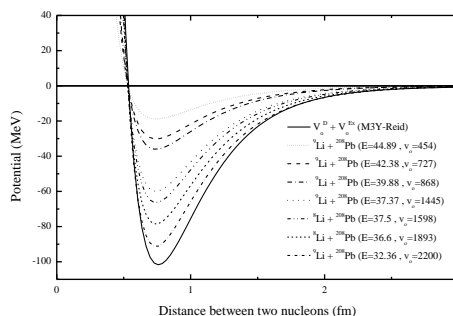
شکل (۱): نسبت چگالی نوترون به پروتون برحسب شعاع برای هسته ${}^9\text{Li}$. منحنی خط چین، چگالی نوترون ها مطابق رابطه $\rho_n(r) = \frac{N}{Z} \rho_p(r)$ ، منحنی توپر، چگالی مورد استفاده مبتنی بر محاسبات مدل HFB.



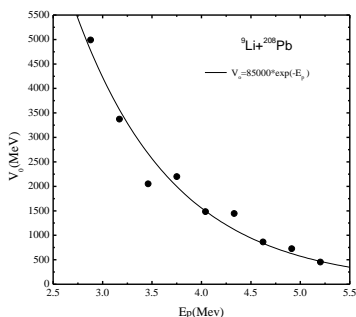
شکل (۲): پتانسیل کل موج S برای واکنش همجوشی ${}^9\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ در انرژی $24/84 \text{ MeV}$. منحنی خط چین، $E_{c.m.}$ منحنی خط چین، چگالی نوترون ها مطابق رابطه $\rho_n(r) = \frac{N}{Z} \rho_p(r)$ ، منحنی توپر، چگالی مورد استفاده مبتنی بر محاسبات مدل HFB.



شکل (۳): مقایسه بین محاسبات تحلیلی سطح مقطع همجوشی حاصل از روش مونت کارلو با داده های آزمایشگاهی برای واکنش همجوشی ${}^9\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$. منحنی خط چین، چگالی نوترون ها مطابق رابطه $\rho_n(r) = \frac{N}{Z} \rho_p(r)$ ، منحنی توپر، چگالی مورد استفاده مبتنی بر محاسبات مدل HFB. ، داده های آزمایشگاهی سطح مقطع همجوشی از مرجع [۱۰].



شکل (۴): پتانسیل نوکلئون - نوکلئون محاسبه شده از نوع مغزی نرم برای واکنش های همجوشی ${}^8\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ و ${}^9\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ در انرژی های مختلف و مقایسه محدوده ی برد و مغزی دافعه ی آن با محدوده ی برد و مغزی دافعه ی پتانسیل نوکلئون - نوکلئون از نوع $M3Y$.



شکل (۵): پارامتر عمق پتانسیل نوکلئون - نوکلئون محاسبه شده از نوع مغزی نرم بر حسب انرژی نوکلئون فرودی در سیستم آزمایشگاه برای واکنش ${}^9\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ در انرژی های متفاوت؛ منحنی توپر برازش مناسبی از پارامتر عمق پتانسیل را بر حسب انرژی نوکلئون فرودی نشان می دهد.