



پدیده‌ی چند شکلی در ایزوتوپ‌های پولونیوم با $A=190$ تا $A=200$

شوهانی، سارا* - کاردان، اعظم

دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای

چکیده:

در این مقاله به بررسی پدیده‌ی چند شکلی ادر هسته‌ی Po و ایزوتوپ‌های آن و علت ایجاد این پدیده در هسته‌ها می‌پردازیم. با استفاده از روش نیلسون-استروتینسکی کرنک شده^۲ و پتانسیل اصلاح شده نیلسون^۳، هامیلتونی هسته‌ی Po و ایزوتوپ‌های آن را بررسی می‌کنیم. ترازهای انرژی تک-ذره^۴ پروتونی و نوترونی و سطوح انرژی پتانسیل^۵ هسته‌ی Po و ایزوتوپ‌های آن را محاسبه خواهیم کرد. مشاهده‌ی چند کمینه انرژی هم زمان، نشان‌دهنده‌ی پدیده‌ی چند شکلی در این هسته است. علت این رخداد وابسته به پر شدن نوکلئون‌ها در ترازهای هسته‌ای است.

کلمات کلیدی: پدیده چند شکلی، مدل نیلسون-استروتینسکی کرنک شده، سطوح انرژی پتانسیل

Shoohani, Sarah; Kardan, Azam

School of Physics, Damghan University, Damghan, Iran

Abstract:

in this paper we intend to study the shape-coexistence phenomenon in Polonium and its isotopes. We investigate the Po and its isotopes Hamiltonian using Cranked Nilsson Strutinsky model and Nilsson modified potential. We draw the proton and neutron single-particle energies and potential energy surfaces for Po nucleus. The observation of several minimum energies, simultaneously, will show the shape-coexistence phenomenon in this nucleus. The reason is dependent to how filling nuclear orbitals.

Keywords: shape-coexistence phenomenon, Cranked Nilsson Strutinsky model, potential energy surfaces

مقدمه

یکی از ویژگی‌های قابل ملاحظه هسته‌ها توانایی به حداقل رساندن انرژی خود با پذیرفتن شکل‌های مختلف می‌باشد. در برخی مشاهدات چهار کمینه انرژی مختلف، متناظر با شکل‌های مختلف، در سطوح انرژی پتانسیل هسته دیده شده است [1]. تبهگنی تابع موج حالت پایه که ترکیبی از حالت‌های مختلف است منجر به شکل‌های مختلف هسته می‌شود و

¹ Shape-coexistence

² Cranked Nilsson Strutinsky (CNS)

³ Nilsson

⁴ Single-particle energies

⁵ Potential Energy Surface (PES)



چگونگی ایجاد این تبهگنی تابع موج هم‌چنان یکی از سوال‌های مهم در فیزیک هسته‌ای است [2]. احتمال حضور چند شکل به طور هم‌زمان و در یک انرژی یکی از ویژگی‌های جالب هسته می‌باشد که به آن پدیده چند شکلی گفته می‌شود [3]. پدیده چند شکلی برای اولین بار در هسته ^{16}O در مقاله موریناگا به ثبت رسید و اولین استدلال این پدیده در هسته ^{40}Ca در مقاله بایر بررسی شد [4]. هسته‌ی مورد مطالعه در این مقاله Po و ایزوتوپ‌های آن با عدد اتمی ۸۴ است. محدوده‌ی مورد مطالعه ما در ایزوتوپ‌های هسته‌ی Po، از ^{194}Po تا ^{202}Po می‌باشد.

روش کار:

برای محاسبه‌ی هامیلتونی هسته‌ی Po با استفاده از روش نیلسون-استروتینسکی کرنک شده (CNS)، از پتانسیل اصلاح شده‌ی نیلسون استفاده می‌کنیم [5]:

$$V_{nil} = \frac{1}{2}m(\omega_x^2 x^2 + \omega_y^2 y^2 + \omega_z^2 z^2) - 2\kappa\hbar\omega_0(\ell \cdot S) - \kappa\mu\omega_0\hbar(\ell^2 - \langle \ell^2 \rangle_N)$$

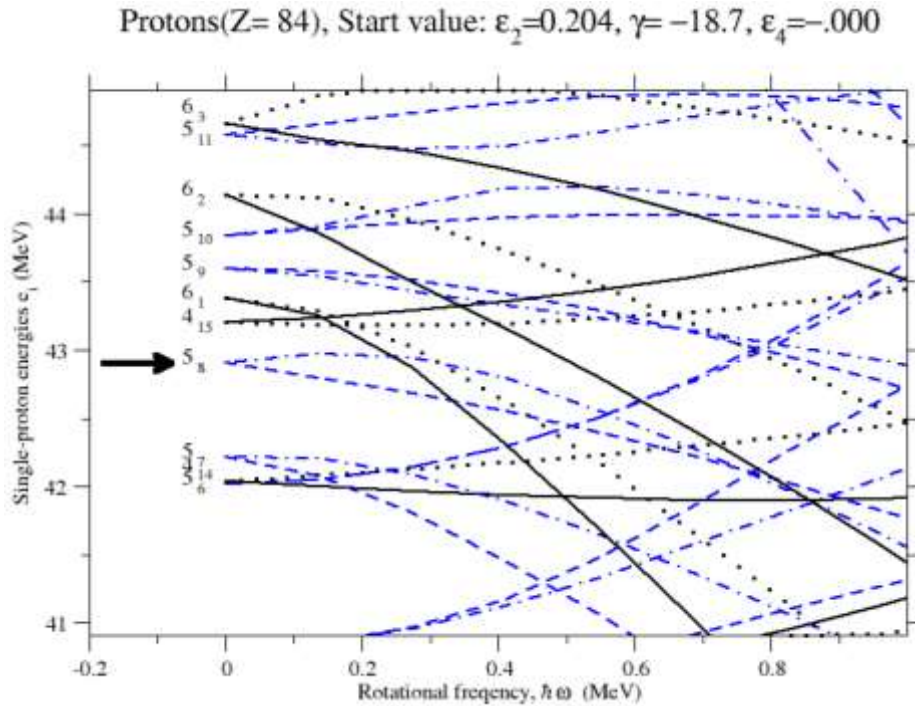
در مدل نیلسون انرژی هر تراز جداگانه محاسبه می‌شود در حالی که استروتینسکی با در نظر گرفتن پهنا برای ترازهای انرژی و عدم قطعیت آن‌ها، انرژی کل را محاسبه می‌کند:

$$E_{tot} = E_{macro} + E_{shell}$$

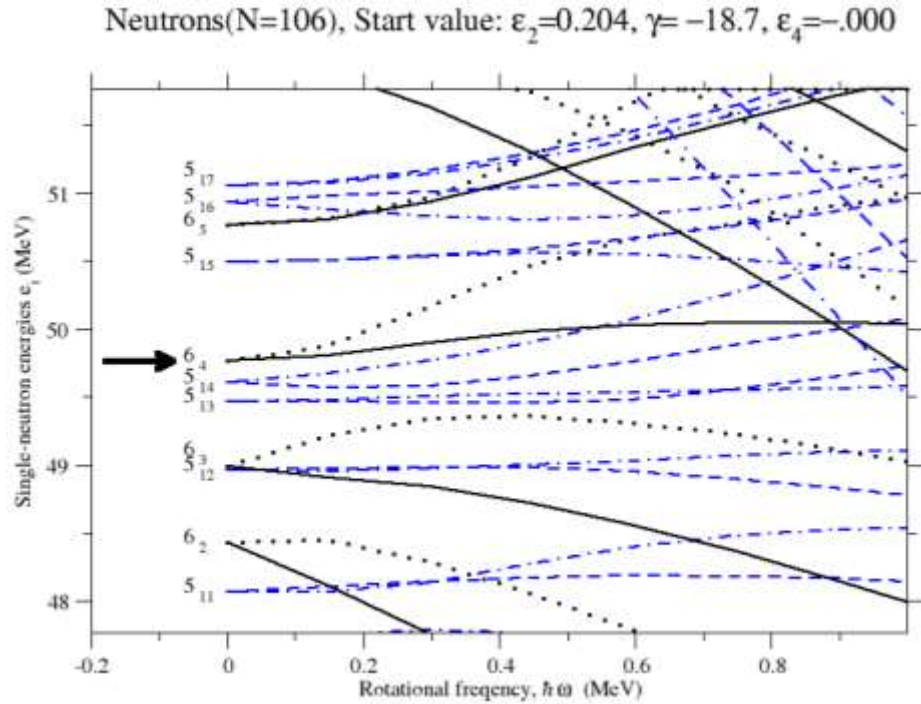
همچنین با لحاظ کردن حرکت دورانی هسته‌های تغییرشکل یافته، رفتار تجمعی هسته با کرنک کردن مدل نیز توجیه می‌شود و هامیلتونی به این صورت خواهد شد [6]:

$$H = h_{H0}(\varepsilon_2 \cdot \gamma) - \kappa\hbar\omega_0[2\ell \cdot S + \mu(\ell^2 - \langle \ell^2 \rangle_N)] + V_4(\varepsilon_4 \cdot \gamma) - \omega j_x$$

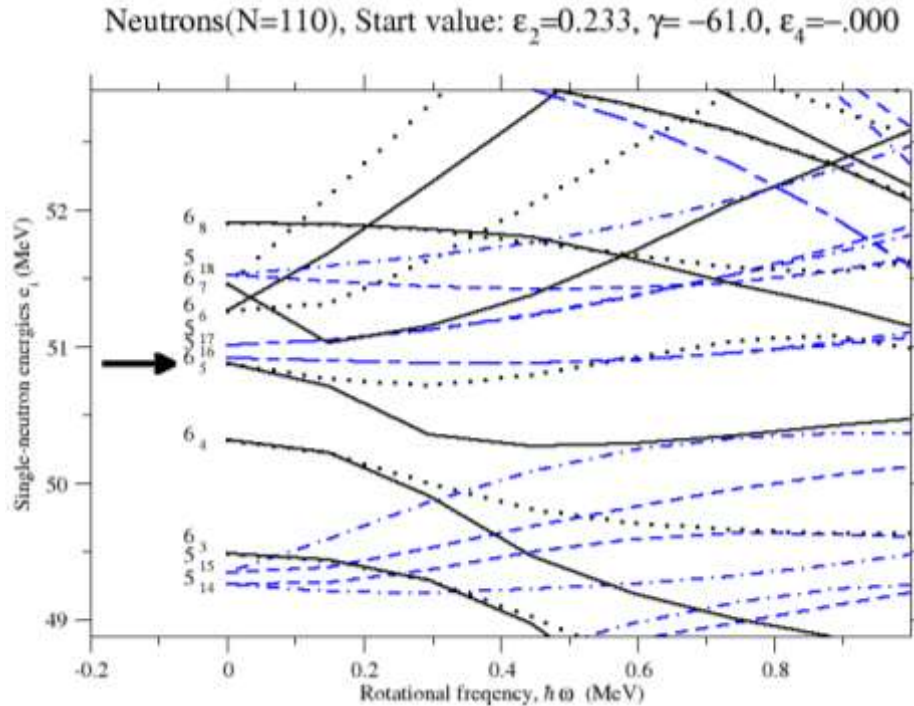
پارامترهای ε_2 و ε_4 و γ ، پارامترهای تغییرشکل هستند که کشیدگی هسته از حالت محوری را تعیین می‌کنند و معرف شکل هسته هستند. پس از محاسبه‌ی هامیلتونی، نمودار ترازهای انرژی تک-ذره پروتونی و نوترونی و سطوح انرژی پتانسیل هسته ^{190}Po را رسم نموده و رخداد پدیده‌ی چند شکلی را در آن بررسی می‌کنیم. در شکل ۱ نمودار تراز انرژی تک-ذره پروتونی نشان داده شده است. آخرین پروتون این هسته در تراز $1h_{9/2}$ یا طبق شکل در سطح فرمی $5h_6$ یعنی هشتمین تراز پوسته‌ی پنجم، قرار گرفته است. در فرکانس صفر یعنی حالت پایه که در آن هسته ساکن است تبهگنی دو گانه داریم و در هر تراز دو نوکلئون قرار گرفته است.



شکل ۱: ترازهای انرژی تک-ذره پروتونی هسته ^{190}Po در پارامترهای تغییر شکل $(\epsilon_2, \gamma, \epsilon_4) \sim (0.2, -18.7, 0)$ در شکل ۲ نمودار انرژی تک-ذره نوترونی بر حسب فرکانس دوران نشان داده شده است. برای ایزوتوپ ^{190}Po با ۱۰۶ نوترون، آخرین نوترون در تراز $1i_{13/2}$ قرار می‌گیرد. این ترازهای انرژی برای شکل کشیده در این ایزوتوپ رسم شده است و تراز فعال در این ساختار طبق شکل ۲ در سطح فرمی 6_4 ، یعنی چهارمین تراز پوسته‌ی ششم است.



شکل ۲: ترازهای انرژی تک-ذره نوترونی هسته ^{190}Po در پارامترهای تغییر شکل $(\varepsilon_2, \gamma, \varepsilon_4) \sim (0.2, -18.7, 0)$ در شکل ۳ ترازهای انرژی تک-ذره نوترونی برای شکل پخت در ایزوتوپ ^{194}Po رسم شده است. آخرین نوترون در تراز $1i_{13/2}$ قرار دارد. تراز فعال در این ساختار طبق شکل ۳ در سطح فرمی ۶، یعنی پنجمین تراز پوسته‌ی ششم است.



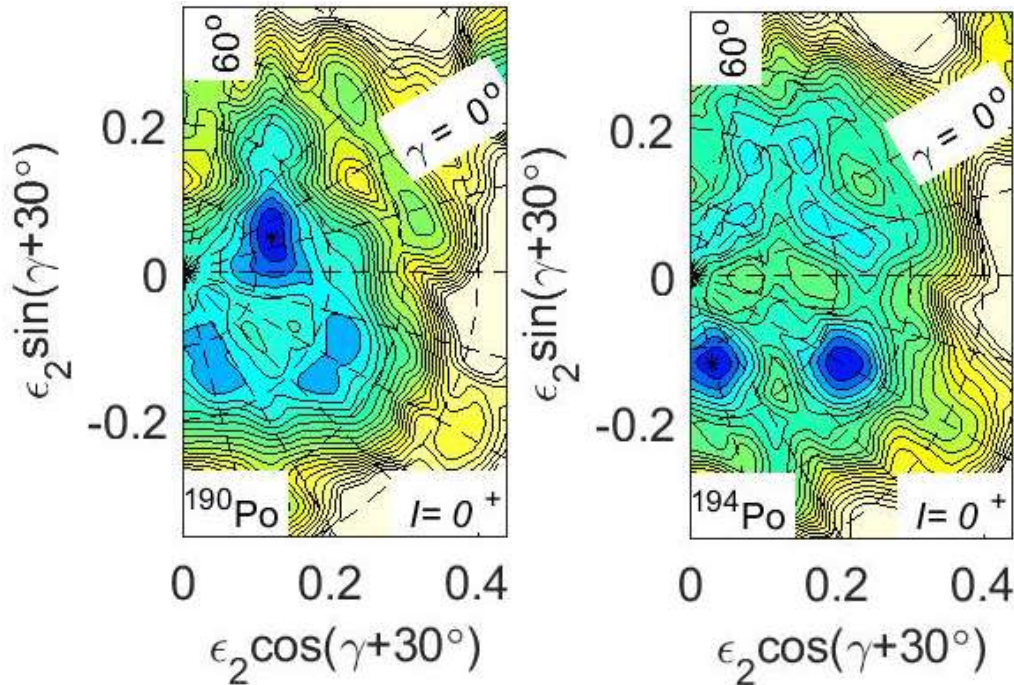
شکل ۳: ترازهای انرژی تک-ذره نوترونی هسته ^{194}Po در پارامترهای تغییرشکل $(\varepsilon_2, \gamma, \varepsilon_4) \sim (0.23, -61^\circ, 0)$ برای درک بهتر علت‌های رخ دادن پدیده چند شکلی در هسته‌ها به توضیح اوربیتال‌های داخل‌شونده^۷ و خارج‌شونده^۸ می‌پردازیم. در نمودارهای انرژی تک-ذره، ترازهایی داریم که با یک شیب منفی به پایین کشیده شده‌اند و بزرگترین J هر پوسته را شامل می‌شوند، به این ترازها، ترازهایی با J -بالا^۹ گفته می‌شود که معمولاً در انرژی بسیار پایین هستند. این ترازها که در ω های مختلف با یک شیب منفی داخل شده‌اند، اوربیتال‌های داخل‌شونده و ترازهایی که با شیب مثبت به سمت بالا کشیده می‌شوند (خارج می‌شوند)، اوربیتال‌های خارج‌شونده نامیده می‌شوند [7]. این ترازها در به وجود آمدن پدیده چند شکلی موثرند.

با افزایش فرکانس دوران، ساختار هسته تغییر می‌کند، ترازها بازآرایی می‌شوند تا جایی که تبهگنی دوگانه از بین می‌رود و در هر تراز فقط یک نوکلئون قرار می‌گیرد. در شکل ۴ سطوح انرژی پتانسیل برای هسته‌های ^{190}Po و ^{194}Po در حالت پایه رسم شده است. سطوح انرژی پتانسیل را به کمک مدل CNS، با در نظر گرفتن یک شبکه‌بندی سه بعدی بر حسب پارامترهای تغییرشکل رسم می‌کنیم.

⁷ Intruder

⁸ Extruder

⁹ High-j

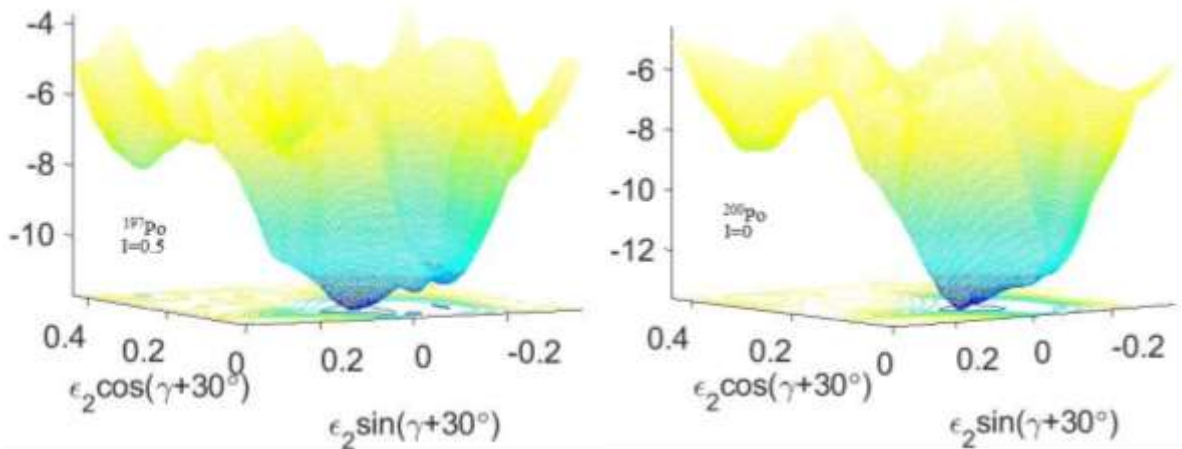


شکل ۴: سطوح انرژی پتانسیل ایزوتوپ‌های هسته‌ی Po در حالت پایه

رنگ آبی تیره بیانگر کمینه‌های انرژی است. اگر این کمینه‌ها در زاویه‌های $\gamma=60^\circ, -60^\circ$ قرار بگیرند شکل هسته (طبق قرارداد لوند) پخت خواهد بود و کمینه‌های انرژی در زاویه‌های $\gamma=0^\circ, -120^\circ$ نشان‌دهنده‌ی شکل کشیده برای هسته هستند. اختلاف زاویه‌های γ به اندازه 15° است. خطوط مرزی بین رنگ‌های تیره و روشن در تصویر بیانگر انرژی هسته است و بین خطوط اختلاف انرژی به اندازه 0.25 MeV می‌باشد. خط چین‌های نیم‌دایره از 0.2 تا -0.2 پارامتر ϵ_2 و تغییر شکل هسته را نشان می‌دهد. اگر کمینه در نقطه صفر تصویر ظاهر شود شکل هسته کروی خواهد بود. اگر کمینه‌ها بین زاویه‌های تعیین شده برای $\gamma (0^\circ, 60^\circ, -60^\circ, -120^\circ)$ قرار بگیرند شکل هسته (طبق قرارداد لوند) به صورت سه محوری خواهد بود. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در هسته‌ی ^{190}Po سه کمینه در شکل‌های $(0, \gamma) \sim (\epsilon_2, \gamma) \sim (0, 60^\circ)$ (پخت) و $(0, \gamma) \sim (\epsilon_2, \gamma) \sim (0, 120^\circ)$ (نزدیک به کشیده) و $(0, \gamma) \sim (\epsilon_2, \gamma) \sim (0, 160^\circ)$ (کشیده) وجود دارد که نشان‌دهنده‌ی پدیده‌ی چندشکلی در این ایزوتوپ است. در هسته‌ی ^{194}Po دو کمینه در $(0, \gamma) \sim (\epsilon_2, \gamma) \sim (0, 110^\circ)$ (نزدیک به کشیده) و $(0, \gamma) \sim (\epsilon_2, \gamma) \sim (0, 230^\circ)$ (پخت) مشاهده می‌شود که متناظر با یک شکل پخت است. برای مشاهده و درک بهتر سطوح انرژی پتانسیل، برای ایزوتوپ‌های پرنوترون هسته‌ی پولونیوم، سطوح انرژی پتانسیل را در شکل ۵ به صورت سه‌بعدی رسم کرده‌ایم. در این شکل که مربوط به حالت پایه است، مشاهده می‌کنیم که با افزایش نوترون پدیده‌ی چندشکلی کاهش یافته و تمایل هسته به تک شکل بودن افزایش می‌یابد. بررسی ایزوتوپ‌های هسته‌ی



پولونیوم (محدوده‌ی ایزوتوپی و ایزوتونی) با استفاده از روش برهم‌کنش بوزونی، نتایجی در مطابقت با نتایج ما با استفاده از مدل (CNS) داشته است [8,9,10].



شکل ۵: سطوح انرژی پتانسیل ایزوتوپ‌های پرنوترون هسته‌ی Po به صورت سه‌بعدی

بحث و نتیجه‌گیری:

محدوده‌ی مورد بررسی ما از ایزوتوپ ^{190}Po تا ^{200}Po بوده است. در هسته‌ی ^{190}Po شاهد سه کمینه انرژی مختلف هستیم که گویای وجود پدیده‌ی چندشکلی است. در هسته‌ی ^{194}Po نیز با وجود دو کمینه‌ی اصلی پدیده‌ی چندشکلی ظاهر شده است. یعنی در حالت پایه، هسته دارای چند کمینه انرژی با احتمال‌های مساوی است و تمایل به پذیرفتن چند شکل به طور هم‌زمان دارد. یعنی در هسته‌ی پولونیوم از $N=106$ تا $N=112$ ما شاهد پدیده‌ی چند شکلی هستیم. با افزایش نوترون پدیده‌ی چند شکلی کم‌کم ناپدید می‌شود. چیدمان نوترون‌ها در ترازهای هسته‌ای تاثیر بسزایی در به وجود آمدن و ناپدید شدن پدیده‌ی چند شکلی دارند. هسته‌ی Po با ۸۴ پروتون، تنها دو ذره بیشتر از پوسته‌ی بسته‌ی ۸۲ دارد. یعنی دو ظرفیت پروتونی از تراز $1h_{9/2}$ اشغال می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پوسته‌ی پروتونی در به وجود آمدن پدیده‌ی چند شکلی نقش چندانی نخواهد داشت و چون به گپ پوسته‌ای پروتونی ۸۲ نزدیک است هسته را متمایل به داشتن شکل کروی می‌کند. از طرفی ایزوتوپ ^{190}Po با داشتن ۱۰۶ نوترون به حد کافی از گپ پوسته‌ای نوترونی زیرین ۸۲ و گپ بالای ۱۲۶ فاصله دارد. قدرت پوسته‌ی نوترونی در ایجاد پدیده‌ی چند شکلی غالب است. با پر شدن تراز $1i_{13/2}$ همچنان نمود این پدیده را شاهد هستیم تا جایی که نصف ظرفیت نوترونی این تراز اشغال شود یعنی ایزوتوپ ^{196}Po ، که با تغییرات بسیار نرم پدیده‌ی چند شکلی در حال از بین رفتن است و در ایزوتوپ ^{197}Po (شکل ۵) کاملاً



ناپدید می‌شود. در نتیجه نقش اصلی ایجاد این رخداد را پوسته‌ی نوترونی بر عهده دارد. استفاده از روش نیلسون- استروتنسکی کرنک شده نسبت به سایر روش‌های استفاده شده برای این بررسی‌ها به محاسبات ما سرعت و سهولت بخشید. اهمیت این مطالعات در بررسی شکل هسته به عنوان یک ویژگی مهم در هسته‌ها، محاسبه‌ی هامیلتونی و در نهایت انرژی هسته‌ای است. حل هامیلتونی برای هسته‌های تغییرشکل یافته و رسم سطوح انرژی پتانسیل که ما به وسیله روش (CNS) انجام دادیم قبلاً به روش‌های برهمکنش بوزونی، میدان میانگین و روش سطوح دورانی کلی^{۱۱} محاسبه شده است و نتایج به دست آمده یکسان می‌باشند [11]. این نتایج را می‌توان به ناحیه وسیع‌تری از هسته‌های سنگین و فوق سنگین^{۱۲} تعمیم داد. نتایج حاصل با سطوح انرژی پتانسیل هسته‌های فوق سنگین مطابقت دارد [12]. روش سطوح دورانی کلی با توجه به فرکانس دوران هسته‌ها، ظهور پدیده‌ی چندشکلی را با دوران آن‌ها در اسپین‌های بالا تایید می‌کند و مطابقت خوبی با اطلاعات تجربی دارد [13].

References

- [1] Wood, J. L. Heyde, K. (2016). " A focus on shape coexistence in nuclei." *J. Phys G.*,43
- [2] Wadsworth, R. Ragnarsson, I. (2011). " Evidence for shape coexistence at medium spin in 76Rb." *Phys. Let. B.*,701
- [3] Wood, J. L. Heyde, K. (2011). " Shape coexistence in atomic nuclei." *Rev. mod. phys.*, 83
- [4] Wood, J. L. Heyde, K. (2016). " A focus on shape coexistence in nuclei." *J. Phys G.*,43
- [5] Ragnarsson, Ingemar., Nilsson, Sven Gvsta. (2005). "Shapes and shells in nuclear structure." *Cambridge university press.*
- [6] Kardan, A. Ragnarsson, I. (2012). " Interpretation of the Large-deformation high-spin bands in select A=158-168 nuclei." *Phys. Rev. C.*,86
- [7] Podolyak, z. (2012). " Prolate-oblate shape transition in heavy neutron-rich nuclei." *Journal of Physics.*,381
- [8] Kesteloot, N., et al. (2015). " Deformation and mixing of coexisting shapes in neutron-deficient polonium isotopes." *Phys. Rev. C.*,92
- [9] Garcia-Ramos, J. E. Heyde, K. (2014). " Nuclear shape coexistence: A study of the even-even Hg isotopes using the interacting boson model with configuration mixing." *Phys. Rev. C.*,89
- [10] Garcia-Ramos, J. E. Heyde, K. (2015). " Nuclear shape coexistence in Po isotopes: An interacting boson model study." *Phys. Rev. C.*,92
- [11] Frank, A. Isacker, P. V. Vargas, C. E. (2004). " Evolving shape coexistence in the lead isotopes: The geometry of configuration mixing in nuclei." *Phys. Rev. C.*,69

Total Routhian Surface(TRS)

Super heavy



بیست و پنجمین کنفرانس هسته‌ای ایران



۲۰۱ اسفندماه ۱۳۹۷- دانشگاه آزاد اسلامی (واحد بوشهر)

- [12] Pomorski, K. Nerlo-Pomorska, B. (2018). "Potential-energy surfaces of heavy and super-heavy nuclei." *Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement.*,11
- [13] Chai, Q. Z. Zhao, W. J., et al. (2018). " Possible observation of shape-coexisting configurations in even–even midshell isotones with $N = 104$: a systematic total Routhian surface calculation." *Nucl. Sci. tech.*,29:38