نشریه تابش و فناوری هسته ای،دوره ۳، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵

مطالعه دینامیک شکافت هسته های برانگیخته سنتز شده طی فرآیند همجوشی $^{192}Os + ^{18}O$ در چارچوب معادلات لانژوین

هادی اسلامی زاده[1*]، فروزان باقری رونیز سفلا[2]، فاطمه عارف زاده[2]

[1] دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه خلیج فارس بوشهر، بوشهر، ایران
[2] دانشجوی کارشناس ارشد فیزیک، گروه فیزیک، دانشگاه خلیج فارس بوشهر، بوشهر، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹٤/۱۰/۲۵ - تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۹)

چکیده

در چارچوب مدل دینامیکی و در نظر گیری معادلات لانژوین، تحول هسته های برانگیخته سنتز شده طی فرآیند همجوشی $^{192}Os + ^{18}O$ مورد مطالعه قرار گرفت و با در نظر گیری پارامتر چسبندگی ماده هسته ای به عنوان یک پارامتر آزاد طی انتقال به نقطه زینی و نقطه قطع و آنالیز داده های تجربی تعداد متوسط نوترون های خروجی قبل از فرآیند شکافت و احتمال شکافت وابسته به انرژی برانگیختگی، اطلاعاتی پیرامون نحوه تغییر پارامتر چسبندگی ماده هسته ای هسته های سنتز شده طی فرآیند همجوشی $^{192}Os + ^{18}O$ استخراج گردیده شد و نشان داده شد که برای باز تولید داده های تجربی تعداد متوسط نوترون های خروجی قبل از فرآیند شکافت و احتمال شکافت، لازم می باشد که پارامتر چسبندگی ماده هسته ای با افزایش انرژی برانگیختگی هسته افزایش یابد. همچنین نحوه تغییر پارامتر چسبندگی وابسته به انرژی برانگیختگی برای هسته های سنتز شده طی واکنش $^{192}Os + ^{18}O$ طی انتقال به نقطه زینی و نقطه قطع تعیین گردیده شد.

واژه های کلیدی: شکافت، احتمال شکافت، کثرت نوترون های خروجی قبل از فرآیند شکافت

* بوشهر، دانشگاه خلیج فارس بوشهر، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، کد پستی: ۷۵۱۶۹۱۳۸۱۷

پست الکترونیکی: m_eslamizadeh@yahoo.com

۱. مقدمه

یکی از مواردی که دانشمندان فیزیک هسته ای علاقه زیادی به بررسی آن دارند، مطالعه و بررسی دینامیک شکافت هسته های سنگین برانگیخته خلق شده طی فرآیند های همجوشی یون ها با هسته های سنگین می باشد. پارامتری که نقش اساسی در تحول هسته و همچنین طی انتقال هسته به نقطه زینی و نقطه قطع بازی می نماید، پارامتر چسبندگی ماده هسته ای می باشد. در سال های اخیر تلاش های فراوانی در جهت استخراج اطلاعات پیرامون پارامتر چسبندگی ماده هسته ای صورت پذیرفته، که اساس آن ها بر پایه مفاهیم تئوری و همچنین مطالعه نحوه واپاشی هسته های سنگین و آنالیز توزیع جرم و انرژی پاره های شکافت اندازه گیری شده در کار های تجربی بوده است. تاکنون مدل های تئوری مختلفی برای پارامتر چسبندگی ماده هسته ای ارائه گردیده شده، که متاسفانه پیشگویی های برخی از مدل ها در رابطه با چسبندگی ماده هسته ای گاها متفات با یک دیگر می باشند. به طور مثال مدل پاسخ خطی [۱] یک ارتباط خطی با دمای هسته را برای پارامتر چسبندگی ماده هسته ای پیشگویی می نماید، درحالی که مدل دو جسمی [۲] یک وابستگی به شکل عکس مجذور دمایی را پیش بینی می نماید. از طرفی شواهدی وجود دارد که پارامتر چسبندگی ماده هسته ای وابسته به میزان تغییر شکل هسته می باشد [۳]. از طرفی برخی از مولفین جهت باز تولید داده های تجربی و شبیه سازی تحول شکافت هسته های سنگین برانگیخته یک وابستگی به انرژی برانگیختگی را برای پارامتر چسبندگی ماده هسته ای پیشنهاد نموده اند [٤،٥].

در تحقیق حاضر قصد داریم، در چارچوب مدل دینامیکی و استفاده ازمعادلات لانژوین[۱] فرآیند شکافت هسته های برانگیخته سنتز شده طی فرآیند همجوشی $^{18}O + {}^{192}Os$ را شبیه سازی نماییم و با در نظر گیری پارامتر چسبندگی هسته به عنوان یک پارمتر آزاد، داده های تجربی مربوط به تعداد متوسط نوترون های خروجی قبل از فرآیند شکافت و احتمال شکافت وابسته به انرژی برانگیختگی را باز تولید نماییم و بر اساس برآزش داده های محاسباتی با داده های تجربی اصلاحاتی پیرامون نحوه تغییر پارامتر چسبندگی بر حسب انرژی برانگیختگی را ارائه نمائیم.

۲. روش تحقیق و تحلیل داده های تجربی

تحول شکافت هسته های برانگیخته سنتز شده در فرآیند های همجوشی یون ها با هسته ها ی سنگین را می توان در چارچوب مدل دینامیکی و استفاده از معادله فوکر پلانک[۲] یا معادلات لانژوین شبیه سازی نمود. که با توجه به ساده تر بودن بکار گیری معادلات لانژوین در کار های محاسباتی، مناسبتر می باشد که از این معادلات استفاده گردد. معادلات لانژوین را می توان به شکل زیر در نظر گرفت:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{p}{m(r)} = \frac{1}{2}\left(\frac{p}{m(r)}\right)^2 \frac{dm(r)}{dr} - \frac{dV}{dr} - \beta . p + R(t) \quad (۱)$$

که در رابطه r فوق مختصه جمعی (فاصله بین دو پاره طی انتقال به نقطه قطع)، p تکانه خطی، $m(r)$ پارامتر اینرسی وابسته به تغییر شکل، V انرژی پتانسیل، β چسبندگی ماده هسته ای و $R(t)$ نیروی اتفاقی می باشد که به گونه ای تعریف می‌گردد که دارای فرم گوسی بوده و همچنین $\langle R(t) \rangle = 0$ باشد. اینرسی وابسته به تغییر شکل هسته را می توان برحسب تقریب ویرنیر ویلر [٦] برآورد نمود. انرژی پتانسیل وابسته به تغییر شکل هسته را نیز می توان برحسب رابطه زیر محاسبه نمود [۷]

[۱] Langevin Equation

[۲] Fokker-Planck Equation

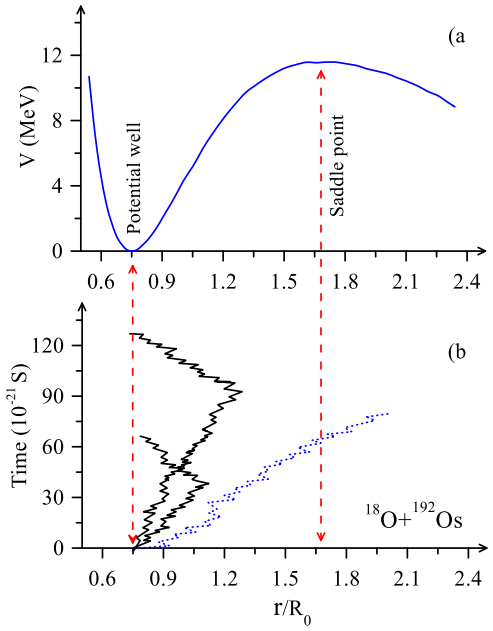
$$V(r) = B_s(r)E_s^0(Z,A) + B_c(r)E_c^0(Z,A) + E_{rot} \qquad (۲)$$

که در رابطه بالا E_s^0 و E_c^0 انرژی های کشش سطحی و کولمبی هسته در حالت کروی و E_{rot} انرژی دورانی هسته می باشد $B_s(r)$ و $B_c(r)$ ضرایب وابسته به تغییر شکل هسته می باشند[۷] که برحسب آن ها و انرژی های وابسته به کشش سطحی و کولمبی هسته در حالت کروی می توان انرژی های کشش سطحی و کولمبی وابسته به تغییر شکل هسته را برآورد نمود. در چارچوب مدل دینامیکی، جهت برآورد انرژی برانگیختگی قابل دسترس سیستم در هر مرحله از محاسبات می توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$E_{int} = E^* - \frac{p^2}{2m} - V(r,I) - E_{rot}(I) \qquad (۳)$$

که E^* انرژی برانگیختگی کل، p تکانه خطی سیستم، V انرژی پتانسیل وابسته به تغییر شکل و اسپین هسته و E_{rot} انرژی چرخشی هسته می باشد.

برای شبیه سازی فرآیند تحول هسته های برانگیخته براساس معادلات لانژوین لازم می باشد که در هر بازه کوچک زمانی مانند Δt احتمال خروج ذرات سبک نظیر γ, α, p, n محاسبه گردد؛ همچنین مشخص گردد که طی بازه زمانی Δt امکان خروج ذره از هسته وجود دارد یا خیر. برای این منظور می توان در بازه کوچک زمانی Δt پهنای خروج نوترون، Γ_n، پهنای خروج پروتون، Γ_p، پهنای خروج آلفا، Γ_α، پهنای تابش گاما، Γ_γ، و همچنین پهنای کل را $\Gamma_{total} = \Gamma_n + \Gamma_p + \Gamma_\alpha + \Gamma_\gamma$ تعیین نمود و سپس بر اساس پهنای کل، زمان مجاز واپاشی یعنی $\tau = \frac{h}{\Gamma_{total}}$ را تعیین نمود. سپس از کامپیوتر خواسته شود که یک عدد اتفاقی بین ۰ و ۱ را انتخاب نماید، حال اگر عدد انتخابی کوچکتر از $\frac{\tau}{\Delta t}$ باشد می توان فرض نمود که احتمال خروج ذره وجود دارد و در غیر این صورت خیر. در حالتی که خروج ذره مجاز باشد بایستی نوع ذره نیز مشخص گردد که این کار را می توان بر اساس روش مونت کارلو با در نظر گیری وزن نسبت $\frac{\Gamma_V}{\Gamma_{total}}$ انجام داد. باید توجه داشت که بعد از خروج ذره انرژی سیستم بایستی برآورد گردد و مجددا محاسبات از ابتدا تکرار گردد تا زمانی که انرژی قابل دسترس سیستم به اتمام رسیده و سیستم در چاه پتانسیل سرد گردد (به عبارت دیگر مسیر لانژوین در چاه پتانسیل خاتمه یابد) و یا مسیر لانژوین به نقطه قطع رسیده و هسته شکافته شود. در شکل(۱) تعدادی از مسیرهای لانژوین حاصله از فرآیند شبیه سازی فرآیند تحول هسته های برانگیخته خلق شده طی واکنش $^{18}O + ^{192}Os$ نشان داده شده اند.



شکل ۱.a) انرژی پتانسیل وابسته به تغییر شکل هسته ^{210}Po خلق شده طی واکنش $^{18}O + ^{192}Os$.

b) تعدادی از مسیرهای لانژوین شبیه سازی شده طی فرآیند تحول هسته های برانگیخته ^{210}Po .

خطوط پر نازک مربوط به حالت هایی است که هسته بعد از خروج ذره در چاه پتانسیل سرد گردیده و خط نقطه چین مربوط به حالتی است که هسته طی تغییر شکل و عبور از نقطه زینی به نقطه قطع رسیده و شکافته شده است.

همان گونه که در بالا اشاره شد جهت تعیین احتمال خروج ذرات سبک از هسته مانند نوترون، پروتون، آلفا و گاما در هر بازه کوچک زمانی Δt احتیاج به محاسبه پهناهای خروج نوترون، پروتون، آلفا و گاما می باشد. که برای این منظور ابتدا بایستی چگالی حالت های هسته تعیین گردد که می توان از فرمول اگنیتوک [۸] که اثر دوران و ارتعاش هسته را در برآورد چگالی حالت های هسته در نظر می گیرد استفاده نمود:

$$\rho(E^*, I) = K_{rot} K_{vib} \rho_{int}(E^*, I) \qquad (٤)$$

$$\rho_{int} = \frac{2I+1}{24\sqrt{2}\sigma_{eff}^3 (a(A, E^* - E_c)(E^* - E_c)^5)^{1/4}} \times exp\left\{2\sqrt{a(A, E^* - E_c) \times (E^* - E_c)} - \frac{(I+1/2)^2}{2\sigma_{eff}^2}\right\} \qquad (٥)$$

که در روابط (٤) و (٥) کمیت های σ_{eff}^2، K_{rot} و K_{vib} را می توان بر حسب روابط ذیل برآورد نمود [۸]

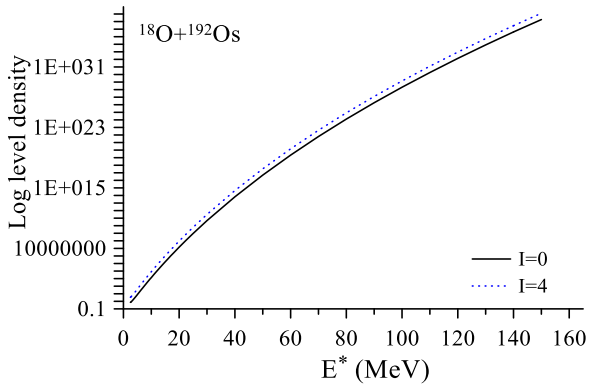
$$\sigma_{eff}^2 = \begin{cases} I_{\perp}^{2/3} I_{\parallel}^{1/3} \sqrt{(E^* - E_c)/A} & for\ axial\ deformed\ \ nuclei \\ I_{\parallel} \sqrt{(E^* - E_c)/A} & for\ spherical\ \ nuclei \end{cases} \qquad (٦)$$

$$K_{rot} = \begin{cases} I_{\perp} \sqrt{(E^* - E_c)/A} & for\ axial\ deformed\ \ nuclei \\ 1 & for\ spherical\ nuclei \end{cases} \qquad (٧)$$

$$K_{vib} = exp\left[0.055 A^{2/3} (E^* - E_c)^{4/3} / a^{4/3}\right] \qquad (٨)$$

در روابط (۸-٤) ، E^* انرژی برانگیختگی هسته، I اسپین هسته، a پارامتر چگالی تراز، K_{rot} و K_{vib} به ترتیب ضرایب تصحیح در نظر گیری اثرات چرخشی و ارتعاشی هسته، A عدد جرمی هسته، $I_{\perp}$ و $I_{\parallel}$ به ترتیب گشتاور لختی عمود و به موازات محور تقارن هسته و E_c انرژی چگالش می باشد که انرژی حالت پایه فرمی گاز را به اندازه ۱-۳ MeV بابت اثر جفت شدگی نوکلئون ها کاهش می دهد.

در شکل(۲) چگالی حالت های هسته برانگیخته ^{210}Po خلق شده طی واکنش $^{18}O + ^{192}Os$ وابسته به انرژی برانگیختگی هسته و برای اسپین های $0\hbar$ و $4\hbar$ ارائه گردیده شده است. در شکل(۲) کاملا مشهود می باشد که با افزایش انرژی برانگیختگی و اسپین، چگالی حالت های هسته افزایش می یابد.



شکل۲. چگالی حالتهای هسته ^{210}Po وابسته به انرژی برانگیختگی و برای اسپین های $0\hbar$ و $4\hbar$.

در فرآیند شبیه سازی تحول هسته های برانگیخته ^{210}Po احتیاج به برآورد پهنا های خروج ذرات و پهنای تابش گاما می باشد. پهنای خروج ذرات را می توان بر حسب رابطه زیر برآورد نمود [۹]:

$$\Gamma_v = (2s_v + 1) \frac{m_v}{\pi^2 \hbar^2 \rho_c(E_{int.})} \times \int_0^{E_{int.} - B_v} d\varepsilon_v \rho_R(E_{int} - B_v - \varepsilon_v) \varepsilon_v \sigma_{inv}(\varepsilon_v) \qquad (٩)$$

که s_v اسپین ذره خروجی، m_v جرم ذره خروجی، B_v انرژی بستگی ذره خروجی، ρ_c و ρ_R به ترتیب چگالی حالت های هسته مرکب و هسته باقی مانده بعد از خروج ذره می باشند. در

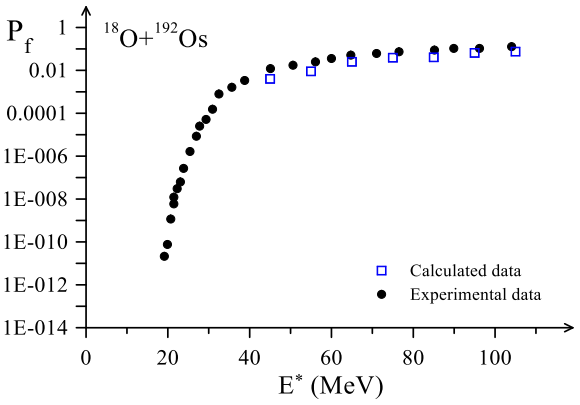
محاسبات سطح مقطع معکوس، σ_{inv}، را می توان بر حسب رابطه ارائه شده در مرجع [۹] تعیین نمود. برای محاسبه پهنای تابش گاما نیز می توان از رابطه زیر استفاده نمود [۱۰]

$$\Gamma_\gamma \approx \frac{3}{\rho_c(E_{int})}\int_0^{E_{int}} d\varepsilon \rho_c(E_{int}-\varepsilon) f(\varepsilon) \qquad (۱۰)$$

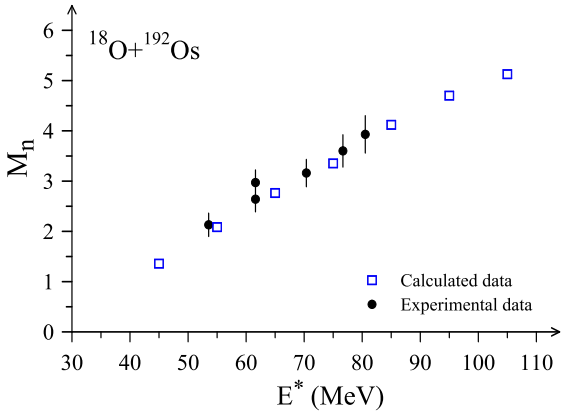
که ε انرژی تابش گامای خروجی و تابع $f(\varepsilon)$ را نیز می توان بر حسب رابطه زیر برآورد نمود [۱۰]

$$f(\varepsilon) = \frac{4}{3\pi}\frac{e^2}{\hbar c}\frac{1+k}{mc^2}\frac{NZ}{A}\frac{\Gamma_G \varepsilon^4}{(\Gamma_G\varepsilon)^2 + (\varepsilon^2 - E_G^2)^2} \qquad (۱۱)$$

که $\Gamma_G = 5\ MeV,\ E_G = 80A^{-1/3}$ و $k = 0.75$ می باشند [۱۱]. در شکل(۳) و (٤) نتایج استخراج گردیده شده، برای احتمال شکافت و تعداد متوسط نوترون های خروجی قبل از فرآیند شکافت هسته های ^{210}Po وابسته به انرژی برانگیختگی با داده های تجربی مقایسه گردیده شده اند.



شکل ۳. احتمال شکافت هسته های خلق شده در واکنش $^{18}O+^{192}Os$ وابسته به انرژی برانگیختگی. داده های تجربی از مرجع [۱۲] اخذ گردیده شده است.

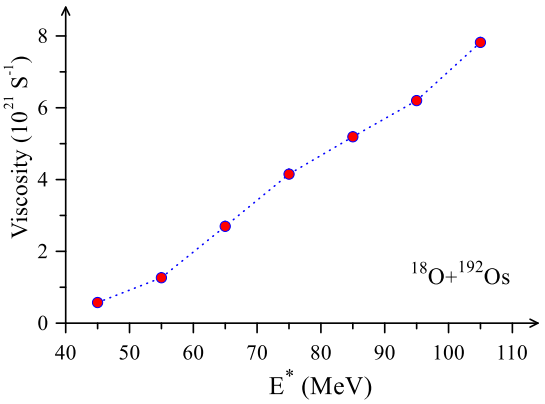


شکل ٤. تعداد متوسط نوترون های خروجی از هسته های خلق شده در واکنش $^{18}O+^{192}Os$ وابسته به انرژی برانگیختگی. داده های تجربی از مرجع [۱۳] اخذ گردیده شده است.

شایان ذکر می باشد که در محاسبات، پارامتر چسبندگی ماده هسته ای به عنوان یک پارامتر آزاد در نظر گرفته شد و با تغییر مقدار پارامتر چسبندگی سعی به باز تولید داده های تجربی مربوط به احتمال شکافت و تعداد نوترون های خروجی قبل از فرآیند شکافت هسته های برانگیخته خلق شده طی واکنش $^{18}O+^{192}Os$ گردیده شده است.

در شکل(۵) نتایج استخراج شده برای پارامتر چسبندگی وابسته به انرژی برانگیختگی هسته ^{210}Po که از بازتولید داده های تجربی احتمال شکافت و تعداد متوسط نوترون های خروجی قبل از فرآیند شکافت برآورد گردیده ارائه شده است.

در شکل(۵) کاملا مشهود می باشد که پارامتر چسبندگی ماده هسته ای ^{210}Po تابعی از انرژی برانگیختگی هسته می باشد؛ به طوری که با افزایش انرژی برانگیختگی چسبندگی ماده هسته ای افزایش می یابد.



شکل ۵. چسبندگی ماده هسته ای ^{210}Po وابسته به انرژی برانگیختگی.

۳. نتیجه گیری

در چارچوب مدل دینامیکی و در نظر گیری معادلات لانژوین تحول هسته های برانگیخته خلق شده طی واکنش $^{18}O+^{192}Os$ شبیه سازی گردیده شد و با در نظر گیری پارامتر چسبندگی ماده هسته به عنوان یک پارامتر آزاد سعی به باز تولید هم زمان داده های تجربی احتمال شکافت و تعداد متوسط نوترون های خروجی قبل از فرآیند شکافت گردیده شد و نشان داده شد که برای باز تولید داده های تجربی احتمال شکافت و تعداد متوسط نوترون های خروجی قبل از فرآیند شکافت لازم می باشد که یک وابستگی به انرژی برانگیختگی را برای پارامتر چسبندگی ماده هسته ای هسته ^{210}Po در نظر گرفت. همچنین نحوه تغییر این پارامتر بر حسب مقدار انرژی برانگیختگی برای هسته ^{210}Po تعیین گردیده شد.

مراجع

[1] S. Yamaji, H. Hofmann and R. Samhmmer, Self-consistent transport coefficients for average collective motion at moderately high temperatures, *Nucl. Phys.* A 475, 487-518, 1988.

[2] D. Hilscher and H. Rossner, Dynamics of nuclear fission, *Ann. Phys*. 17, paris, 471-479, 1992.

[3] I. I. Gontchar and P. Froebrich, Proc. Int. School-Seminar on Heavy-Ion Phys. (Dubna), 344, 1993.

[4] W. Ye and N. Wang, Robustness of the excitation energy at scission as a novel probe of nuclear dissipation at high energy, *Phys. Rev. C,* 86, 034605-034616, 2012.

[5] J. P. Lestone and S. G. McCalla, Statistical model of heavy-ion fusion-fission reactions, *Phys. Rev. C* 79, 044611-044634, 2009.

[6] K. T. R. Davies, A. J. Sierk and J. R. Nix, Effect of viscosity on the dynamics of fission, *Phys. Rev. C* 13, 2385-2403, 1976.

[7] J. P. Lestone, Fast method for obtaining finite range corrected potential energy surfaces, *Phys. Rev. C* 51, 580-585, 1995.

[8] A. V. Ignatyuk, M. G. Itkis, V. N. Okolovich, G. N. Smirenkin, A. S. Tishin, Fission of pre-actinide nuclei. Excitation functions of the level density parameter, *Yad. Fiz*. 21, 1185-1205, 1975.

[9] M. Blann, Decay of deformed and supper deformed nuclei formed in heavy ion reactions, *Phys. Rev. C* 21, 1770-1782, 1980.

[10] E. Lynn, The theory of neutron resonance reactions, Clarendon, Oxford, p. 325, 1968.

[11] V. G. Nedoresov, Yu. N. Ranyuk, Fotodelenie yader zagigantskim rezonansom, Kiev, Naukova Dumka, 1989 (in Russian).

[12] L. G. Moretto, S. G. Thompson, J. Routti and R. C. Gatti, Influence of shells and pairing on the fission probabilities of nuclei below radium, *Phys. Lett. B* 38, 471- 474, 1972.

[13] D. J. Hinde, R. J. Charity, G. S. Foote, J. R. Leigh, J. O. Newton, S. Ogaza and A. chattejee, Neutron multiplicities in heavy ion induced fission: time scale of fusion fission, *Nucl. Phys. A* 452, 550-572, 1986.

Journal of Radiation and Nuclear Technology

JRNT
Journal of Radiation and Nuclear Technology

Journal of Radiation and Nuclear Technology / Vol. 3 / No. 1 / Spring

Study of the fission dynamics of the excited nuclei synthesized in the reaction $^{18}O+^{192}Os$ in the framework of the Langevin equations

H. Eslamizadeh[1*], F. Bagheri[2], F. Arefzadeh[2]

[1]*Associated Professor, Department of Physics, Persian Gulf University, Bushehr, Iran*
[2]*M. Sc. student, Department of Physics, Persian Gulf University, Bushehr, Iran*

**Corresponding author's E-mail: m_eslamizadeh@yahoo.com*

(Received: 2016/01/15- Accepted: 2016/04/17)

ABSTRACT

In the framework of dynamical model and considering Langevin equations have been studied the evolution of the excited nuclei produced in fusion reaction $^{18}O+^{192}Os$. The average multiplicity of pre-scission neutrons and fission probability have been calculated for the nuclei produced in the reaction $^{18}O+^{192}Os$ with considering viscosity of the nuclear matter as a free parameter. According to reproduction of experimental data on the pre-scission neutron multiplicity and fission probability has been extracted information about the magnitude of viscosity during transition to the saddle point and scission point. It was shown that for reproducing of the experimental data on the pre-scission neutron multiplicity and fission probability, it is necessary the magnitude of viscosity of nuclear matter increases with increasing excitation energy of the compound nuclei. Furthermore, the variation of viscosity as a function of excitation energy was determined for the nuclei produced in the reaction $^{18}O+^{192}Os$ during transition to the saddle point and scission point.

Keywords: *Fission, Fission probability, Pre-scission neutron multiplicity*