

محاسبه سطح مقطع همجوشی – شکافت در واکنش های همجوشی سرد و داغ به منظور تولید هسته های سنگین و فوق سنگین

جواد محمدی^۱، عباس مبشری^۲

چکیده

در این مقاله قصد داریم واکنش های مختلف همجوشی سرد و داغی را انتخاب کنیم که منجر به تولید هسته فوق سنگین می شود. واکنش ها به گونه ای انتخاب شده اند که در صورت تشکیل یک هسته مرکب، هسته ای با ۱۱۶ پروتون و ۱۶۸ نوترون تولید شود. واکنش های انتخابی عبارتند از: $^{75}\text{As} + ^{209}\text{Bi}$ و $^{76}\text{Se} + ^{208}\text{Pb}$ ، $^{77}\text{Se} + ^{207}\text{Pb}$ ، $^{78}\text{Se} + ^{206}\text{Pb}$ ، برای واکنش های همجوشی سرد و واکنش های $^{42}\text{Ca} + ^{242}\text{Cm}$ و $^{46}\text{Ti} + ^{238}\text{Pu}$ ، $^{50}\text{Cr} + ^{234}\text{U}$ ، $^{54}\text{Fe} + ^{230}\text{Th}$ برای واکنش های همجوشی داغ. از طریق برنامه نویسی، سطح مقطع گیراندازی و سطح مقطع همجوشی و سپس سطح مقطع باقیمانده تبخیر و احتمال بقای کل را برای این واکنش ها محاسبه می کنیم. در نهایت با استفاده از سطح مقطع همجوشی و سطح مقطع بقای کل می توان سطح مقطع همجوشی - شکافت را به دست آورد و نتایج را با یکدیگر مقایسه نمود. نتایج حاصله نشان می دهد که در میان واکنش های انتخابی، واکنش های همجوشی داغ برای تولید هسته های سنگین (مورد مطالعه در این مقاله هسته مرکبی شامل ۱۱۶ پروتون و ۱۶۸ نوترون است) شرایط بهتری نسبت به واکنش های همجوشی سرد دارند. مطالعه تولید هسته های سنگین و فوق سنگین از این جهت اهمیت دارد که کاربردهای نظامی و غیر نظامی متعددی از جمله استفاده در ساخت گلوله های ضد زره دارند. **واژگان کلیدی:** همجوشی داغ، همجوشی سرد، سطح مقطع، همجوشی-شکافت

مقدمه

در حالت کلی هسته های سنگین و فوق سنگین در سه مرحله تولید می شوند: گیراندازی، همجوشی کامل (تشکیل هسته مرکب در رقابت با شبه شکافت) و در نهایت واپاشی هسته مرکب برانگیخته. مطالعه و بررسی هر یک از مراحل ذکر شده می تواند نقش تعیین کننده ای در درک و آنالیز تولید هسته های سنگین داشته باشد. از این رو مقالاتی در رابطه با دینامیک واکنش های تشکیل هسته های فوق سنگین و فروپاشی آن ها به چاپ رسیده است که می توان به مقالات (زاگربایف^۱ و همکاران، ۲۰۰۳ و نیشیو^۲، ۲۰۱۱) اشاره نمود. همچنین در برخی موارد (آریتیمو^۳، ۲۰۰۲) سطح مقطع های همجوشی-شکافت توسط روش هایی مانند روش محاسبه سه بعدی لانگوین^۴ تجزیه و تحلیل شده اند. بعد از تشکیل هسته مرکب امکان شکافت به دو پاره وجود دارد که به آن فرآیند همجوشی-شکافت گفته می شود. در این پژوهش سعی می کنیم سطح مقطع همجوشی-شکافت حاصل از واکنش های همجوشی سرد و داغ را برای یک هسته مرکب برانگیخته یکسان محاسبه و مقایسه کرده و نتایج حاصله را تفسیر نماییم. این سطح مقطع از طریق اختلاف سطح مقطع همجوشی و سطح مقطع بقای هسته مرکب و با استفاده از مدل سیستم دو هسته ای در چارچوب کانال جفت شدگی تجربی قابل محاسبه است. هسته های سنگین در ساخت تفنگ های ضد ذره استفاده می شود. تفنگ ضد زره یک تفنگ ضد ماده است که برای نفوذ به زره ماشین های جنگی زره پوش، معمولاً تانک، نفربر زرهی و خودروهای جنگی پیاده نظام طراحی شده است. اولین گلوله های ضد زره پس از جنگ جهانی اول در سال ۱۹۱۸ در آلمان توسعه یافتند و برد موثری در حدود پانصد متر داشتند و زمانی که از فاصله صد متری به صفحه زره پوش شلیک می شدند بیشتر از دو سانتی متر در آن نفوذ می کردند. اما اولین استفاده رزمی از تفنگ های ضد زره در زمان حمله به لهستان در سال ۱۹۳۹ صورت گرفت. در سال های بعدی کشورهایی از جمله فنلاند، ژاپن، لهستان، روسیه، سوئیس، انگلیس و آمریکا نیز به این فناوری دست یافتند. در ایران گونه ای از این تفنگ به نام شاهر در سال ۱۳۹۱ شمسی، تولید و توسط نیروی زمینی ارتش جمهوری اسلامی ایران نیز به کار گرفته شده است.

پیشینه تحقیق

برای محاسبات مربوط به سطح مقطع گیراندازی، همجوشی، باقیمانده تبخیر و احتمال بقا، با استفاده از مدل سیستم دو هسته ای^۵ DNS مقالاتی چاپ شده است که روابط و جزئیات مربوط به آن در منابع (زاگربایف، ۲۰۰۱ – کلاندروف^۶ و همکاران، ۲۰۱۰ – زاگربایف، ۲۰۰۲) بحث شده است، اما در این مقاله محاسبات مربوط به سطح مقطع های ذکر شده در چارچوب کانال جفت شدگی تجربی بررسی خواهد شد. همچنین برای چندین واکنش محدود سطح مقطع باقیمانده تبخیر هسته های فوق سنگین تولید شده از طریق همجوشی داغ و همجوشی سرد در مقاله (زاگربایف و همکاران، ۲۰۱۵) مقایسه ای صورت گرفته است. نتایج و محاسبات حاصل از سطح مقطع های همجوشی به روش همجوشی داغ با استفاده از پرتابه های سنگین تر از ^{48}Ca برای تولید هسته های فوق سنگین در تعدادی از مقالات (وانگ^۷ و همکاران، ۲۰۱۲ – لاولند^۸، ۲۰۱۳ – ژانگ^۹ و همکاران، ۲۰۱۳ و ژو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۴) به چاپ رسیده

¹ Zagrebaev

² Nishio

³ Aritomo

⁴ Langevin

⁵ Dinuclear System

⁶ Kalandrov

⁷ Wang

⁸ Loveland

⁹ Zhang

¹⁰ Zhu

است که در این مقالات از واکنش هایی مانند $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Bk}$ و $^{48}\text{Ca} + ^{252}\text{Es}$ استفاده شده است که به ترتیب منجر به تشکیل هسته های مرکب $^{300}119$ و $^{299}119$ می شوند.

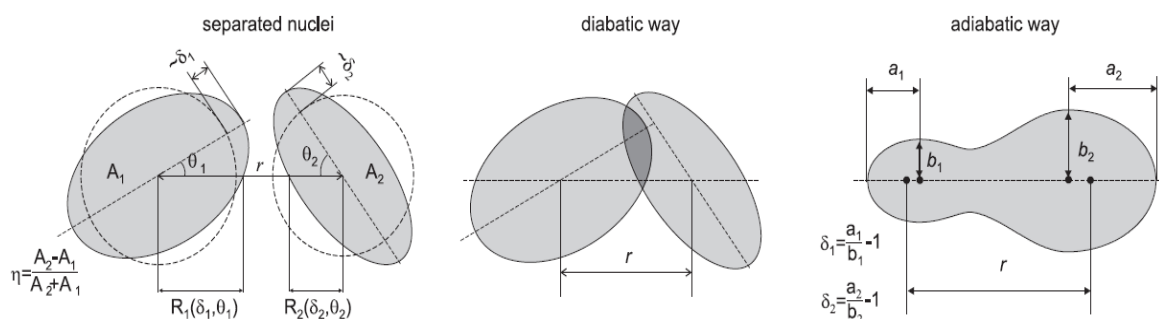
روش تحقیق

در ابتدا چند واکنش همجوشی سرد و چند واکنش همجوشی داغ را انتخاب می کنیم. واکنش های همجوشی کامل با توجه به نوع هسته هدف و محصولات واکنش به دو گروه واکنش های همجوشی داغ و واکنش های همجوشی سرد تقسیم بندی می شوند. در واکنش های همجوشی سرد از هسته های کروی سرب و بیسموت و ایزوتوپ هایشان به عنوان هسته هدف و از هسته های سنگین تر از آرگون به عنوان هسته پرتابه برای تولید هسته های فوق سنگین استفاده می شود. اما در واکنش های همجوشی داغ از اکتینید ها به ویژه اورانیوم به عنوان هسته هدف و از ایزوتوپ های کلسیم و یا هسته های سنگین تر به عنوان هسته پرتابه در نظر گرفته می شود که منجر به تولید هسته های فوق سنگین با نوترون بیشتر و نیم عمر نسبتاً طولانی می شود. در واکنش های انتخابی، پرتابه ها همگی هسته های پایدار هستند و همچنین هسته های هدف در واکنش های همجوشی سرد انتخابی همگی پایدار و هسته های هدف واکنش های همجوشی داغ انتخابی واپاشی آلفا دارند. واکنش ها به گونه ای انتخاب شده اند که در صورت تشکیل هسته مرکب، هسته ای با ۱۱۶ پروتون و ۱۶۸ نوترون داشته باشیم.

یافته های تحقیق

تغییرات انرژی پتانسیل و تشکیل هسته مرکب

جهت شروع تحقیق تغییرات انرژی پتانسیل را برحسب فاصله بین دو هسته ای برای واکنش های مورد نظر محاسبه کنیم. که نیازمند آن است که توضیح مختصری در رابطه با تقسیم بندی واکنش های هسته ای داشته باشیم. واکنش های هسته ای را می توان از دو دیدگاه استاتیکی و دینامیکی توصیف نمود. جهت توصیف برهمکنش سیستمی شامل هدف و پرتابه از دیدگاه استاتیکی از اثرات بعد زمان طی فرآیند همجوشی چشم پوشی می شود، طوری که چگالی های هسته های هدف و پرتابه طی برهمکنش ثابت در نظر گرفته می شوند. اما در دیدگاه دینامیکی، توزیع نوکلئون های هسته های پرتابه و هدف طی فرآیند همجوشی با گذشت زمان تغییر می کند. در مطالعات استاتیکی با توجه به اینکه سرعت نسبی هسته های هدف و پرتابه در طی فرآیند همجوشی چه مقداری باشد، ادامه سیستم برهمکنشی پس از عبور از سد همجوشی را می توان به وسیله دو دیدگاه متفاوت دیاباتیکی و آدیاباتیکی بررسی نمود. شکل ۱۰ طرح شماتیک دو هسته هدف و پرتابه قبل و بعد از شروع فرآیند همپوشانی از طریق این دو رویکرد را نشان می دهد (میسکو^۱، ۲۰۰۷ - جیانگ^۲ و همکاران، ۲۰۰۹)

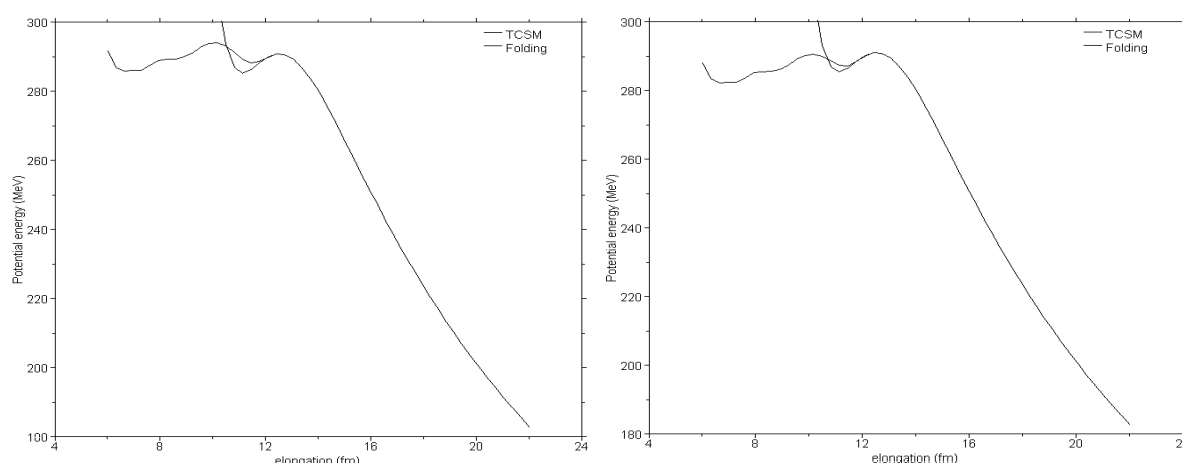


شکل ۱- نمایش طرح وار برهم کنش دو هسته جدا از هم از طریق دو دیدگاه دیاباتیکی و آدیاباتیکی.

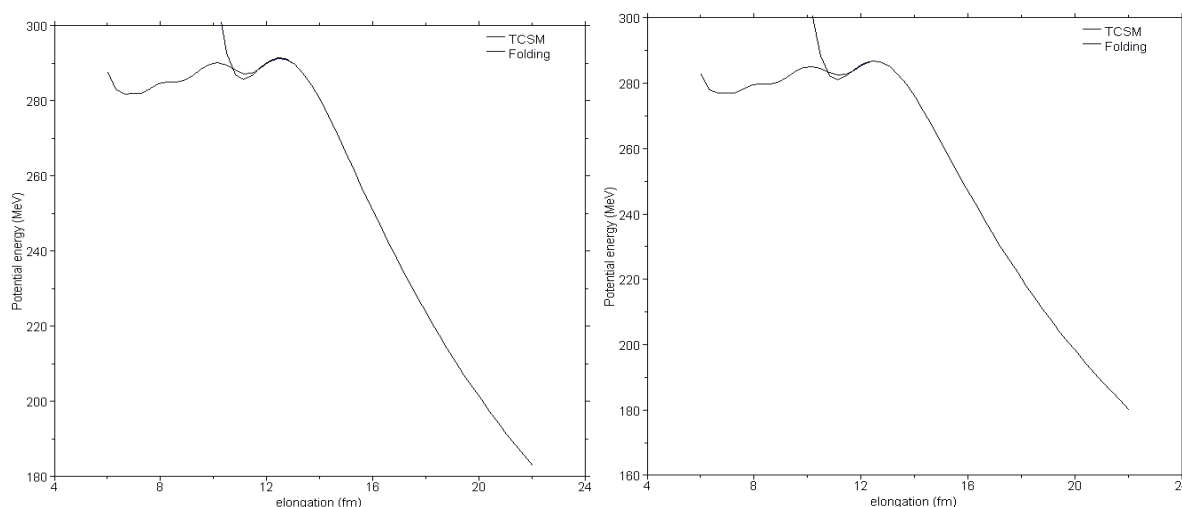
¹ Misicu

² Jiang

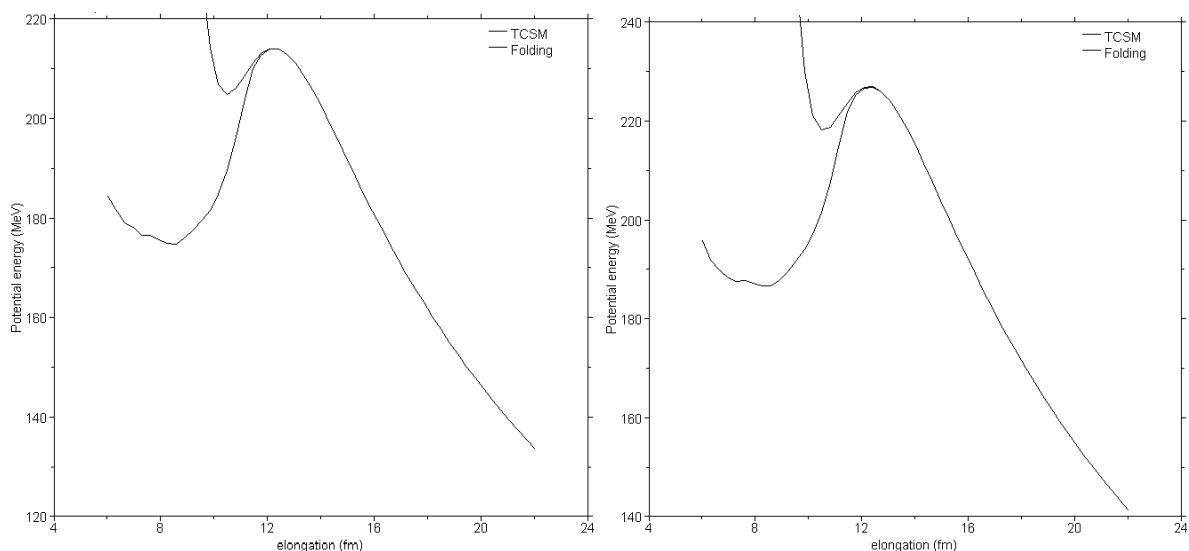
در رویکرد دیاباتیکی فرض بر این است که سرعت نزدیک شدن دو هسته برخوردی به حدی شدید است که نوکلئون های موجود در سیستم فرصت کافی برای سازماندهی دوباره خود را نخواهند داشت. پس از تماس، دو هسته برخورد کننده سعی می کنند که در یکدیگر نفوذ کنند. اما اگر برخورد بین دو هسته در نزدیکی سد کولنی با سرعت کم و به آرامی انجام شود، در این صورت سیستم فرصت کافی برای تغییر چیدمان پیکربندی خود را در طی فرآیند همپوشانی توزیع های چگالی هسته های برهمکنشی خواهد داشت. بنابراین با این شرایط انتظار می رود که چگالی هسته ای ناحیه همپوشانی دو هسته برخورد کننده مقداری ثابت داشته باشد و از حد اشباع خود فراتر نرود. چنین فرآیندی به عنوان رویکرد آدیاباتیکی یا بی دررو مطرح می شود (همان). در شکل های ۲ تا ۵ برای هشت واکنش مورد نظر انرژی پتانسیل واکنش ها برحسب فاصله R بین هسته ها از دیدگاه آدیاباتیکی (در قالب مدل TCSM) و دیاباتیکی (در قالب مدل دابل فولدینگ) با استفاده از کد مورد نظر محاسبه شده است. همانطور که در این شکل ها مشاهده می شود، فرآیندهای دیاباتیکی و آدیاباتیکی قبل از تماس دو هسته باید پتانسیل یکسانی داشته باشند، اما پس از تماس، این فرآیندها رفتار کاملاً متفاوتی دارند.



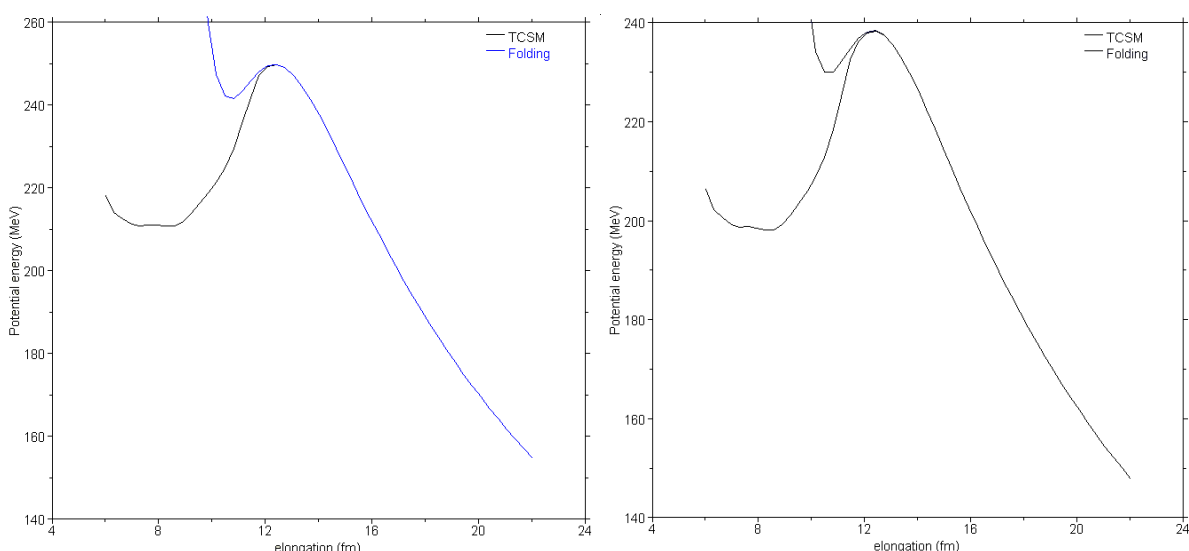
شکل ۲- انرژی پتانسیل واکنش $^{78}\text{Se} + ^{206}\text{Pb}$ (سمت راست) و واکنش $^{77}\text{Se} + ^{207}\text{Pb}$ (سمت چپ) برحسب فاصله R بین هسته ها از دیدگاه آدیاباتیکی (در قالب مدل TCSM) و دیاباتیکی (در قالب مدل دابل فولدینگ) محاسبه شده در این مقاله.



شکل ۳- انرژی پتانسیل واکنش $^{76}\text{Se} + ^{208}\text{Pb}$ (سمت راست) و واکنش $^{75}\text{As} + ^{209}\text{Bi}$ (سمت چپ) برحسب فاصله R بین هسته ها از دیدگاه آدیاباتیکی (در قالب مدل TCSM) و دیاباتیکی (در قالب مدل دابل فولدینگ) محاسبه شده در این مقاله.



شکل ۴- انرژی پتانسیل واکنش $^{42}\text{Ca} + ^{242}\text{Cm}$ (سمت راست) و $^{46}\text{Ti} + ^{238}\text{Pu}$ واکنش (سمت چپ) برحسب فاصله R بین هسته ها از دیدگاه آدیباتیک (در قالب مدل TCSM) و دیاباتیک (در قالب مدل دابل فولدینگ) محاسبه شده در این مقاله.



شکل ۵- انرژی پتانسیل واکنش $^{54}\text{Fe} + ^{230}\text{Th}$ (سمت راست) و واکنش $^{50}\text{Cr} + ^{234}\text{U}$ (سمت چپ) برحسب فاصله R بین هسته ها از دیدگاه آدیباتیک (در قالب مدل TCSM) و دیاباتیک (در قالب مدل دابل فولدینگ) محاسبه شده در این مقاله.

سطح مقطع گیراندازی و سطح مقطع همجوشی

برای واکنش های مورد نظر سطح مقطع گیراندازی کل را در چارچوب مدل کانال جفت شدگی از رابطه زیر به دست می آوریم (زاگربایف و همکاران، بی تا):

$$\sigma_{cap}(E) = \pi \lambda^2 \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T_l(E) \quad (1)$$

واکنش های همجوشی بسته به نوع کروی یا تغییر شکل یافته بودن هسته های هدف و پرتابه به سه دسته تقسیم بندی می شوند:

- ۱- جفت شدگی حالت های ارتعاشی: که برای همجوشی هسته هدف و پرتابه کروی تعریف می شود.
- ۲- جفت شدگی حالت های دورانی: که برای همجوشی هسته هدف و پرتابه تغییر شکل یافته تعریف می شود.

۳- جفت شدگی حالت های ارتعاشی و دورانی: که برای همجوشی هسته های کروی و تغییر شکل یافته تعریف می شود.

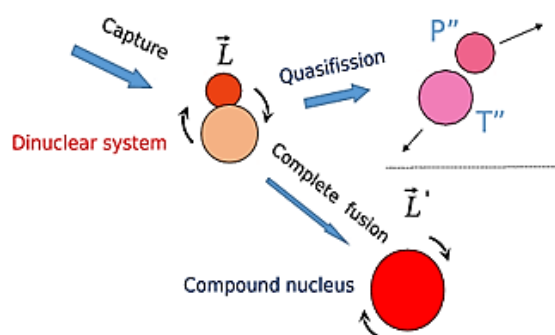
سطح مقطع همجوشی را می توان از رابطه زیر محاسبه نمود (مانجوناتا^۱، ۲۰۱۷ - لاولند، ۲۰۱۵):

$$\sigma_{fus}(E) = \frac{\pi \hbar^2}{2 \mu E} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T_l(E) P_{CN} \quad (2)$$

تفاوت رابطه (۱) و (۲) در یک ضریب P_{CN} است یعنی اگر هسته مرکب با احتمال صد در صد تشکیل شود مقدار این کمیت برابر با یک در نظر گرفته می شود. نمودارهای به دست آمده برای سطح مقطع گیراندازی و همجوشی در شکل های ۱۹ تا ۲۶ مشخص شده است.

فرآیند شبه شکافت

علاوه بر آن که سیستم دو هسته ای با انتقال یک یا چند نوکلئون از هسته پرتابه به هسته هدف در مختصات نامتقارن جرم به یک هسته مرکب تکامل تدریجی می یابد، از طریق یک فرآیند پخش دیگر در مختصه نسبی R بین هسته های برهم کنشی می تواند به دو پاره واپاشی کند که فرآیند شبه شکافت نامیده می شود و به عنوان رقیبی برای فرآیند همجوشی محسوب می شود (شکل ۶). رقابت میان این فرآیندها احتمال تشکیل هسته مرکب را تعیین می کند. تحقیقات نشان می دهد که وقوع فرآیند شبه شکافت محدود به سیستم های یون سنگین با تکانه زاویه ای بزرگ می باشد. چون در این تکانه ها، سرعت های دورانی بالاست و تشکیل یک سیستم مرکب امکانپذیر نمی باشد (کرین^۲، ۱۹۸۸). از مشخصه های فرآیند شبه شکافت، زمان واکنش می باشد. زمان این فرآیندها بسیار کوتاه تر از فرآیند هسته مرکب است.



شکل ۶- رقابت میان فرآیند شبه شکافت و تشکیل هسته مرکب (همجوشی).

طی تکامل سیستم دو هسته ای به هسته مرکب یک سد همجوشی داخلی در مختصه نامتقارن جرم η وجود دارد که موقعیت آن در نقطه بوزینارو - گالون^۳ (BG) با انرژی پتانسیل ماکزیمم قرارداد. زمانی که DNS از نقطه بوزینارو - گالون پایین می آید و به نقطه شکل گیری هسته مرکب می رسد، بیشترین برخوردها میان هسته های آن اتفاق می افتد و بیشتر انرژی پتانسیل سیستم به انرژی برانگیختگی هسته مرکب منتقل می شود که بایستی از سد همجوشی داخلی B_{fus}^* عبور کند. در غیر این صورت طی این تکامل تدریجی، شبه شکافت رخ می دهد (شیائو^۴، ۲۰۲۰).

¹ Manjunatha

² Kenneth

³ Businaro-Gallone point

⁴ Xiao Jun Bao

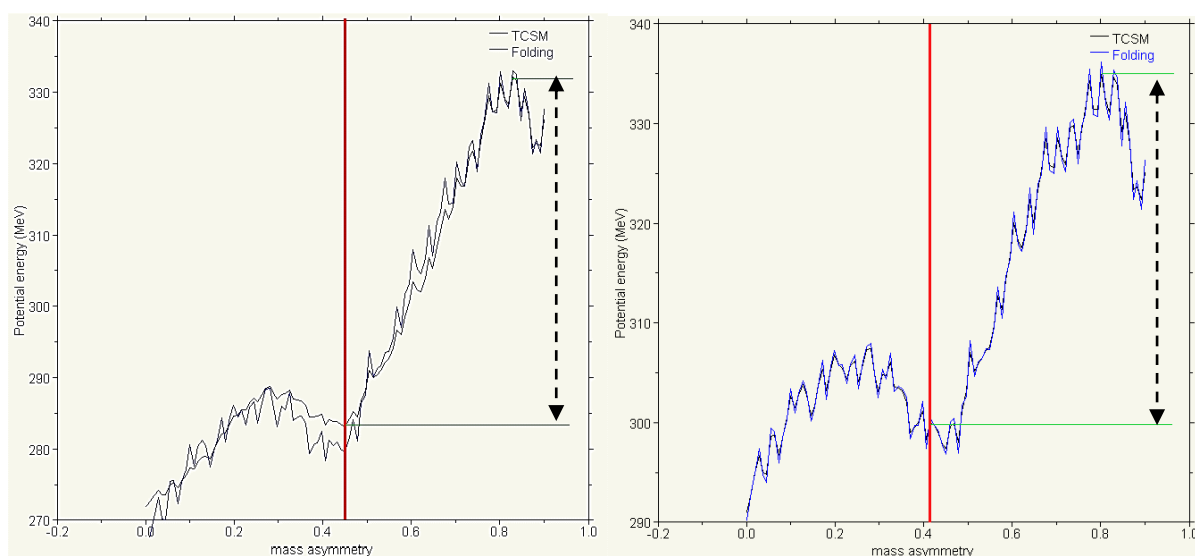
شکل های ۷ تا ۱۰ محاسبات مربوط به مقدار سد همجوشی داخلی B_{fus}^* را برای واکنش های مورد مطالعه نشان می دهند که مقادیر آن در جدول ۱ و ۲ مشخص شده است. ویژگی مهم تکامل DNS به CN وجود این سد همجوشی در مختصات عدم تقارن جرم است. مقدار سد همجوشی داخلی، مانعی از همجوشی کامل را تعیین می کند که برای تشکیل CN باید بر این مانع غلبه کند (کلاندروف و همکاران، ۲۰۱۰). با مقایسه شکل ها مشخص می شود که مقدار سد همجوشی داخلی برای واکنش $^{54}Fe + ^{230}Th$ کوچکتر از سایر واکنش های مورد مطالعه است. همچنین می توان گفت برای تشکیل هسته مرکب با استفاده از واکنش های انتخابی، مقدار سد همجوشی داخلی برای واکنش های همجوشی سرد بزرگتر از واکنش های همجوشی داغ می باشد. لذا این واکنش های همجوشی داغ انرژی کمتری نسبت به واکنش های همجوشی سرد انتخابی برای غلبه بر سد نیاز دارند.

جدول ۲- مقدار سد همجوشی داخلی واکنشهای همجوشی گرم

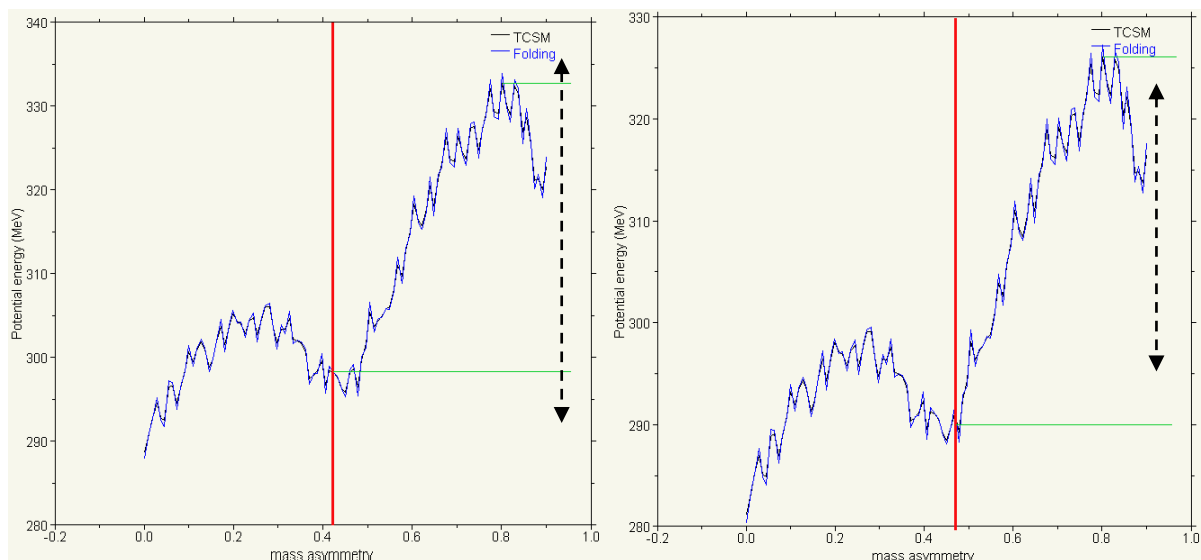
واکنش	مقدار سد (Mev)
$^{42}Ca + ^{242}Cm$	17
$^{46}Ti + ^{238}Pu$	14
$^{54}Fe + ^{230}Th$	13
$^{50}Cr + ^{234}U$	23

جدول ۱- مقدار سد همجوشی داخلی واکنشهای همجوشی سرد

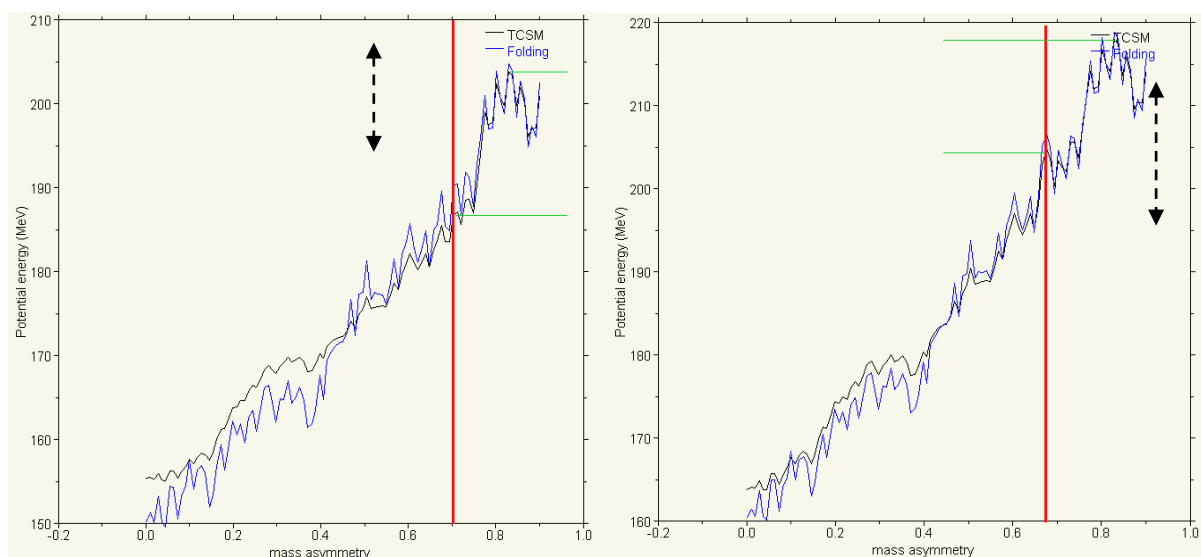
واکنش	مقدار سد (Mev)
$^{78}Se + ^{206}Pb$	48
$^{77}Se + ^{207}Pb$	35
$^{76}Se + ^{208}Pb$	35
$^{75}As + ^{209}Bi$	37



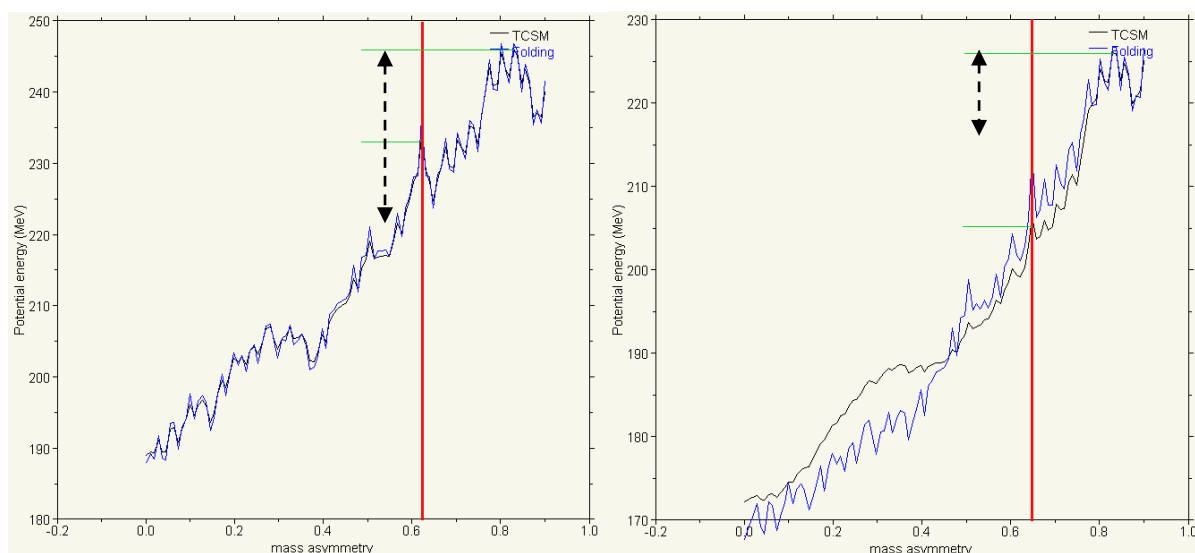
شکل ۷- انرژی پتانسیل بر حسب پارامتر نامتقارن جرم (در چارچوب TCSM و فولدینگ) برای سیستم دو هسته ای که منجر به هسته مرکب $^{284}116$ از طریق واکنش $^{78}Se + ^{206}Pb$ (سمت راست) و واکنش $^{77}Se + ^{207}Pb$ (سمت چپ) می شود. مقدار B_{fus}^* با فلش نشان داده شده است.



شکل ۸- انرژی پتانسیل بر حسب پارامتر نامتقارن جرم (در چارچوب TCSM و فولدینگ) برای سیستم دو هسته ای که منجر به هسته مرکب $^{284}116$ از طریق واکنش $^{76}\text{Se} + ^{208}\text{Pb}$ (سمت راست) و واکنش $^{75}\text{As} + ^{209}\text{Bi}$ (سمت چپ) می شود. مقدار B_{fus}^* با فلش نشان داده شده است.



شکل ۹- انرژی پتانسیل بر حسب پارامتر نامتقارن جرم (در چارچوب TCSM و فولدینگ) برای سیستم دو هسته ای که منجر به هسته مرکب $^{284}116$ از طریق واکنش $^{42}\text{Ca} + ^{242}\text{Cm}$ (سمت راست) و واکنش $^{46}\text{Ti} + ^{238}\text{Pu}$ (سمت چپ) می شود. مقدار B_{fus}^* با فلش نشان داده شده است.



شکل ۱۰- انرژی پتانسیل بر حسب پارامتر نامتقارن جرم (در چارچوب TCSM و فولدینگ) برای سیستم دو هسته ای که منجر به هسته مرکب $^{284}116$ از طریق واکنش $^{54}Fe + ^{230}Th$ (سمت راست) و واکنش $^{50}Cr + ^{234}U$ (سمت چپ) می شود. مقدار B_{fus}^* با فلش نشان داده شده است.

سطح مقطع باقیمانده تبخیر و سطح مقطع بقای کل

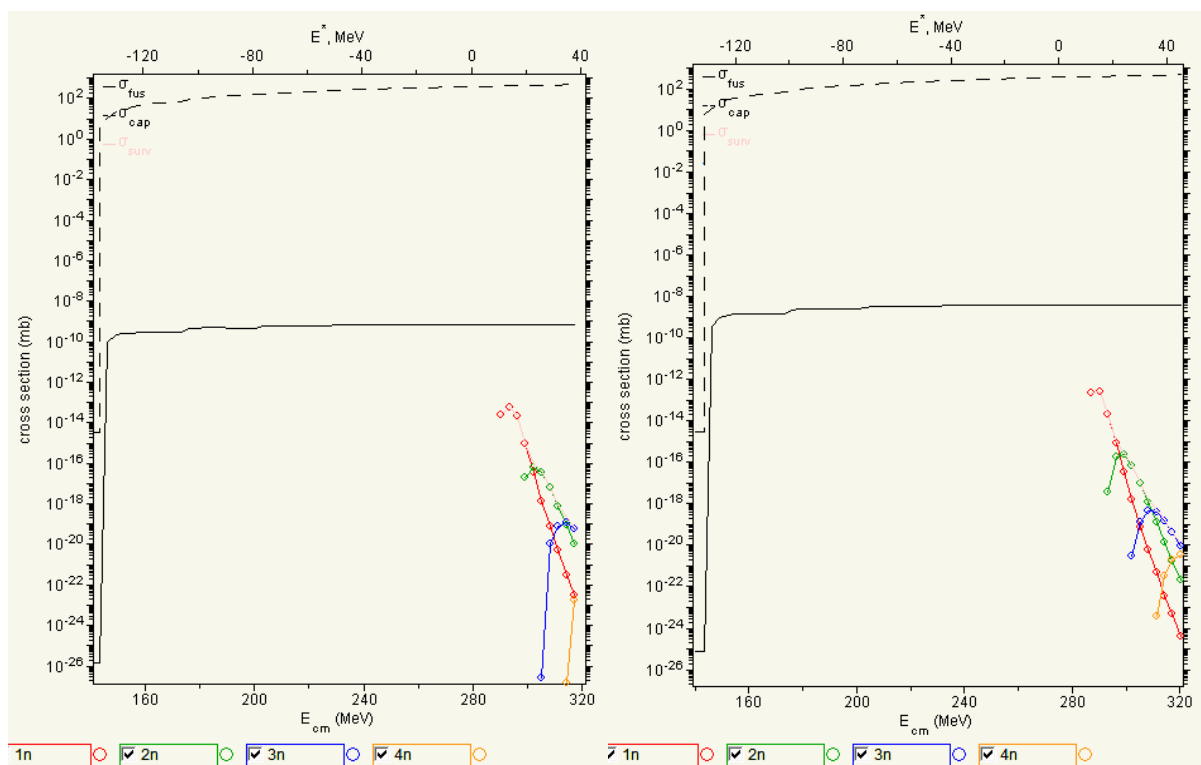
همانطور که گفته شد پس از گیراندازی و تشکیل هسته مرکب، مرحله سوم تولید هسته های سنگین واپاشی هسته مرکب برانگیخته است که از طریق کانال های مختلف از جمله گسیل نوترون یا نوترون ها صورت بگیرد. بنابراین در این قسمت به محاسبه بقای هسته مرکب می پردازیم. با توجه به توضیحاتی که در قسمت مروری بر منابع ذکر شد، سطح مقطع تشکیل باقیمانده تبخیر در کانال $xn.yp.z\alpha$ در برخورد هسته های سنگین را می توان به شرح زیر محاسبه کرد (زاگربایف، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲- زاگربایف و همکاران ۲۰۱۵):

$$\sigma_{EvR}^{xn.yp.z\alpha} = \frac{\pi \hbar^2}{2 \mu E} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T_l(E) \cdot P_{CN} \cdot P_{xn.yp.z\alpha}(E, l) \quad (3)$$

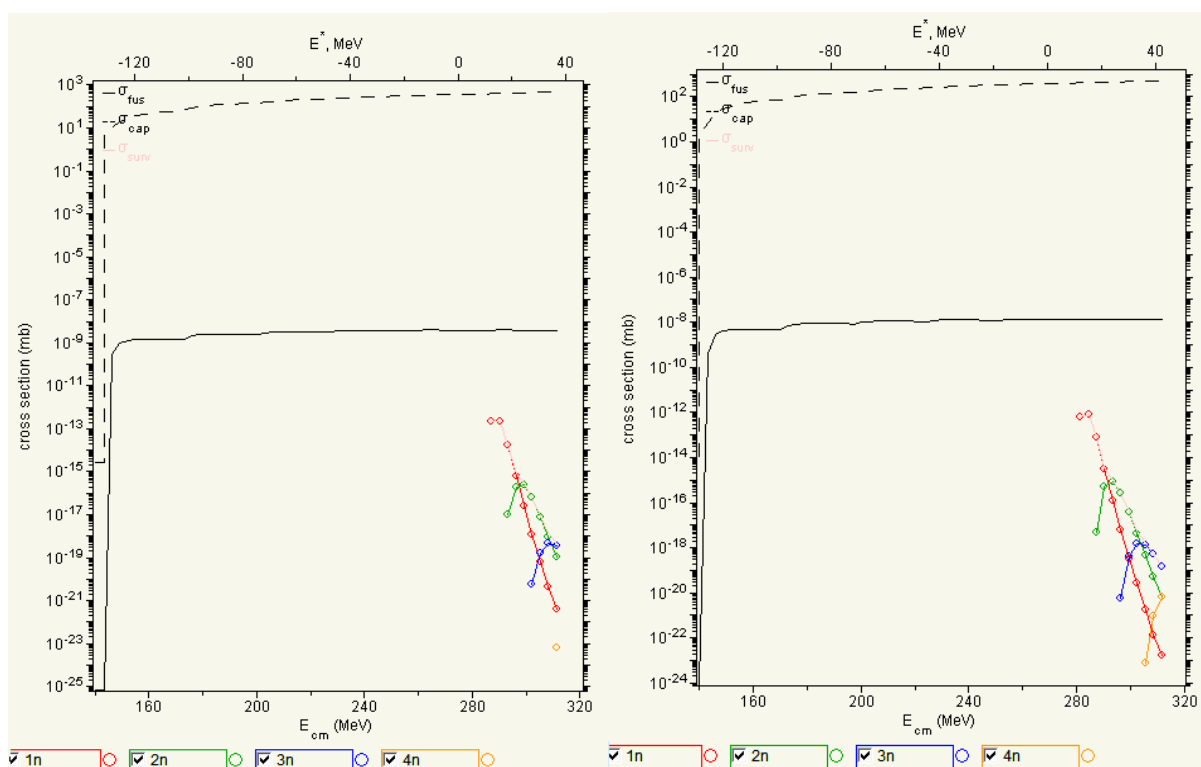
مجموع سطح مقطع باقیمانده تبخیر برای همه کانال های ممکن، سطح مقطع کل بقای هسته مرکب را نتیجه می دهد. بنابراین:

$$\sigma_{surv} = \frac{\pi \hbar^2}{2 \mu E} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) T_l(E) \cdot P_{CN} \cdot \sum_{x,y,z} P_{xn.yp.z\alpha}(E, l) \quad (4)$$

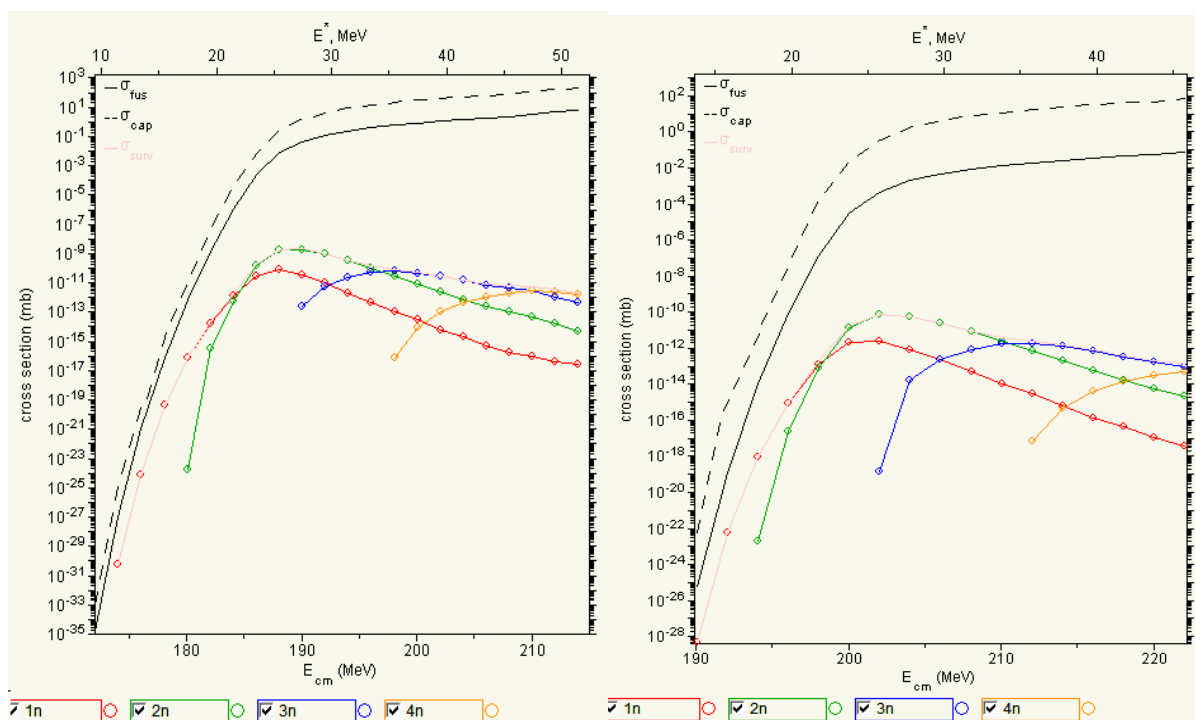
در شکل های ۱۱ تا ۱۴ با استفاده از رابطه های ۳ و ۴ سطح مقطع باقیمانده تبخیر برای کانال های ۱ تا ۴ نوترون و سطح مقطع بقای هسته مرکب برانگیخته برای واکنش های مورد مطالعه محاسبه شده است. برای مقایسه سطح مقطع گیراندازی و همجوشی نیز آورده شده است.



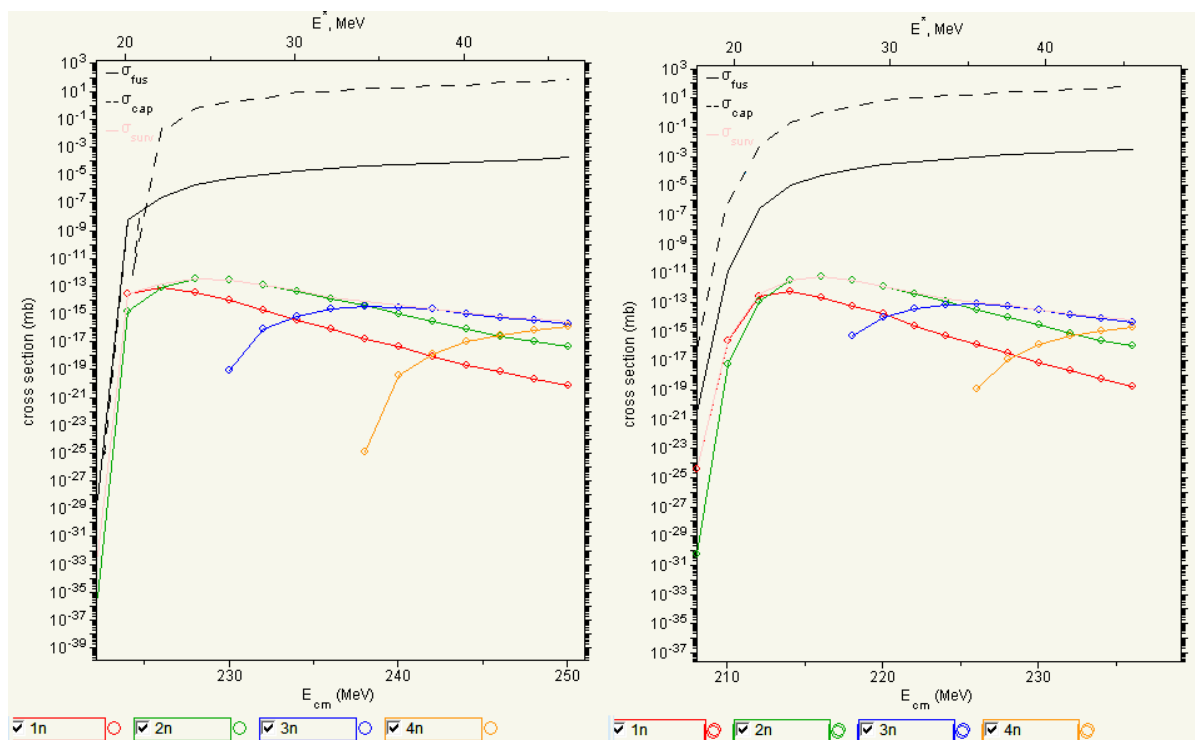
شکل ۱۱- سطح مقطع گیر اندازی، سطح مقطع همجوشی، سطح مقطع بقای هسته مرکب و سطح مقطع باقیمانده تبخیر برای کانال های یک تا ۴ نوترون محاسبه شده برای واکنش $^{78}\text{Se} + ^{206}\text{Pb}$ (سمت راست) و واکنش $^{77}\text{Se} + ^{207}\text{Pb}$ (سمت چپ).



شکل ۱۲- سطح مقطع گیر اندازی، سطح مقطع همجوشی، سطح مقطع بقای هسته مرکب و سطح مقطع باقیمانده تبخیر برای کانال های یک تا ۴ نوترون محاسبه شده برای واکنش $^{76}\text{Se} + ^{208}\text{Pb}$ (سمت راست) و واکنش $^{75}\text{As} + ^{209}\text{Bi}$ (سمت چپ).



شکل ۱۳- سطح مقطع گیر اندازی، سطح مقطع همجوشی، سطح مقطع بقای هسته مرکب و سطح مقطع باقیمانده تبخیر برای کانال های یک تا ۴ نوترون محاسبه شده برای واکنش $^{42}\text{Ca} + ^{242}\text{Cm}$ (سمت راست) و واکنش $^{46}\text{Ti} + ^{238}\text{Pu}$ (سمت چپ).

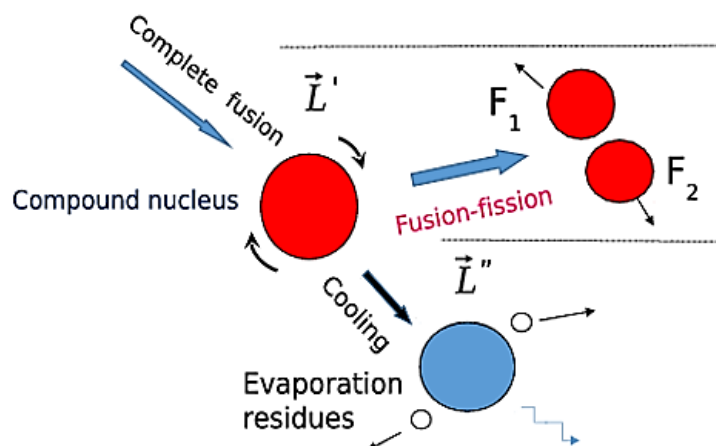


شکل ۱۴- سطح مقطع گیر اندازی، سطح مقطع همجوشی، سطح مقطع بقای هسته مرکب و سطح مقطع باقیمانده تبخیر برای کانال های یک تا ۴ نوترون محاسبه شده برای واکنش $^{54}\text{Fe} + ^{230}\text{Th}$ (سمت راست) و واکنش $^{50}\text{Cr} + ^{234}\text{U}$ (سمت چپ).

سطح مقطع همجوشی-شکافت:

مطابق با شکل 15 اگر هسته مرکب در کانال های باقیمانده تبخیر قرار نگیرد منجر به فرآیند همجوشی - شکافت می گردد. سطح مقطع همجوشی-شکافت به صورت زیر تعریف می شود:

$$\sigma_{fiss} = \sigma_{fus} - \sigma_{surv} \quad (۵)$$



شکل ۱۵- هسته مرکب برانگیخته شکل یافته یا با گسیل یک یا چند نوترون به حالت پایه می رود و یا از طریق فرآیند همجوشی-شکافت به دو پاره تبدیل می شود.

در نمودارهای 1۱ تا 14 منحنی مربوط به سطح مقطع همجوشی-شکافت به علت مقدار بسیار کوچک سطح مقطع بقای هسته مرکب، مماس بر منحنی سطح مقطع همجوشی خواهد شد.

جدول ۳- بیشینه مقادیر سطح مقطع بقای هسته مرکب و سطح مقطع همجوشی-شکافت برای واکنش های انتخابی.

واکنش	ماکزیمم مقدار سطح مقطع بقای هسته مرکب	ماکزیمم مقدار سطح مقطع همجوشی-شکافت
$^{78}\text{Se} + ^{206}\text{Pb}$	$5.69259\text{E}-14\text{mb}$ (^{293}Mev)	$6.96498\text{E}-10\text{mb}$ (^{290}Mev)
$^{77}\text{Se} + ^{207}\text{Pb}$	$2.23229\text{E}-13\text{mb}$ (^{290}Mev)	$3.71957\text{E}-9\text{mb}$ (^{290}Mev)
$^{76}\text{Se} + ^{208}\text{Pb}$	$1.98418\text{E}-13\text{mb}$ (^{290}Mev)	$3.71329\text{E}-9\text{mb}$ (^{290}Mev)
$^{75}\text{As} + ^{209}\text{Bi}$	$7.57523\text{E}-13\text{mb}$ (^{284}Mev)	$1.25484\text{E}-8\text{mb}$ (^{287}Mev)
$^{42}\text{Ca} + ^{242}\text{Cm}$	$1.83605\text{E}-9\text{mb}$ (^{190}Mev)	5.34449mb (^{214}Mev)
$^{46}\text{Ti} + ^{238}\text{Pu}$	$6.78213\text{E}-11\text{mb}$ (^{202}Mev)	$5.41154\text{E}-2\text{bm}$ (^{220}Mev)
$^{54}\text{Fe} + ^{230}\text{Th}$	$3.10545\text{E}-13\text{mb}$ (^{228}Mev)	$1.61698\text{E}-4\text{mb}$ (^{250}Mev)
$^{50}\text{Cr} + ^{234}\text{U}$	$5.26750\text{E}-12\text{mb}$ (^{216}Mev)	$1.83559\text{E}-3\text{mb}$ (^{232}Mev)

با توجه به نمودارها و محاسبات انجام شده، بیشینه مقادیر سطح مقطع بقای هسته مرکب و سطح مقطع همجوشی-شکافت برای واکنش های مورد نظر در جدول فوق نشان داده شده است که این مقادیر برای واکنش $^{42}\text{Ca} + ^{242}\text{Cm}$

بیشتر از واکنش های دیگر می باشد. همچنین این مقادیر برای واکنش های همجوشی داغ بیشتر از واکنش های همجوشی سرد می باشد.

نتیجه گیری

با استفاده از محاسبات و داده های به دست آمده می توان گفت که مقدار سد همجوشی داخلی که مانعی برای همجوشی کامل و تشکیل هسته مرکب به شمار می رود؛ برای واکنش های همجوشی سرد بزرگتر از واکنش های همجوشی داغ می باشد. به عبارتی واکنش های همجوشی داغ انتخابی نسبت به واکنش های همجوشی سرد انتخابی انرژی کمتری برای غلبه بر سد نیاز دارند، که مقدار سد همجوشی داخلی برای واکنش $^{54}\text{Fe} + ^{230}\text{Th}$ کمتر از واکنش های دیگر است. همچنین نتایج حاصله نشان می دهد که مقادیر سطح مقطع همجوشی و به تبع آن سطح مقطع بقای هسته مرکب برای واکنش های همجوشی داغ بیشتر از واکنش های همجوشی سرد می باشد. به ویژه این مقادیر برای واکنش $^{42}\text{Ca} + ^{242}\text{Cm}$ بیشتر از واکنش های دیگر می باشد. از طرفی مقدار سد همجوشی داخلی برای واکنش های همجوشی سرد بزرگتر از واکنش های همجوشی داغ می باشد. لذا در میان واکنش های انتخابی، واکنش های همجوشی داغ در جهت تولید هسته های سنگین شرایط بهتری خواهند داشت.

منابع و مآخذ

- Aritomo, Y., Exotic Nuclei, pp. 106-117 (2002).
- Jiang, C. L., Rehm, K. E., Back, B. B. and Janssens, R.V. F., Phys. Rev. C 79, 044601 (2009).
- Kalandrov, Sh. A., Adamian, G.G, Antonenko, N.V and Scheid, W., Emission of charged particles from excited compound nuclei., Phys. Rev. C 82, 044603 (2010).
- Krane, K. S., Introductory nuclear physics, John Wiley and Sons, 1988, (ISBN 964-01-8120-X).
- Loveland, W., J. Phys. Ser. 420 (2013) 012004.
- Loveland, W., Eur. Phys. J. A 51 (2015) 120.
- Manjunatha, H.C. and Sridhar, K.N., Eur. Phys. J. A 53 (2017) 196.
- Misicu, S., Esbensen, H., Phys. Rev. C 75, 034606 (2007).
- Nishio, K., J. Phys.: Conf. Ser. 282 012011 (2011).
- Wang, N., Zhao, E.G., Scheid, W. and Zhou, S.G., Phys. Rev. C 85 (2012) 041601(R).
- Xiao Jun Bao, Front. Phys, Sec. Nuclear Physics., 28 February 2020, <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00014>
- Zagrebaev, V., Phys. Rev. C 64, 034606 (2001).
- Zagrebaev, V. and et al., Phys. Rev. C 65, 014607 (2002).
- Zagrebaev, V. and et al., Physics of Atomic Nuclei, Vol. 66, No. 6, 2003, pp. 1033–1041.
- Zagrebaev, V. and et al., Synthesis of superheavy nuclei: Obstacles and opportunities, EPJ Web of Conferences 86, 00066 (2015).
- Zagrebaev, V., Denikin, A.S., Karpov, A.V., Alekseev, A.P., Naumenko, M.A., Rachkov, V.A., Samarin, V.V., Saiko. V.V., NRV web knowledge base on low-energy nuclear physics, <http://nrw.jinr.ru/>.
- Zhang, J., Wang, C. and Ren, Z., Nucl. Phys. A 909 (2013) 36.
- Zhu, L., Feng, Z.Q., Li, C. and Zhang, F.S., Phys. Rev. C 90 (2014) 014612.