

مطالعه آهنگ چرخش میون در همجوشی μdt و μdd با در نظر گرفتن ربایش میون از μd و μt توسط ایزوتوپهای هلیوم تولیدی و مقایسه آن با جوابهای تجربی در دسترس

محمد رضا اسکندری، روح اله قیصری و شهرام مصلی نژاد: دانشگاه شیراز

چکیده

اخیراً آهنگ انتقال میون از دوتریم و تریتیم به ایزوتوپهای هلیوم تولیدی در همجوشی کاتالیزور میونی تعیین شده است. به نظر می‌رسد یکی از دلایل مهم عدم تطابق مقادیر نظری و آزمایشی ضریب چرخش میونی در این شیوه همجوشی، نادیده گرفتن همین انتقالات در تئوری‌های قبلی باشد. در این کار تحقیقی آهنگ چرخش میون با در نظر گرفتن انتقال میون از دوتریم و تریتیم به ایزوتوپهای هلیوم (^4He , ^3He) در دو سیستم همجوشی D-T و D-D محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با وجود بالا بودن آهنگ‌های انتقالات فوق، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقدار آهنگ چرخش میون وجود ندارد و هنوز مقدار خطای نتایج نظری با مقادیر آزمایشی در دو سیستم D-T و D-D قابل ملاحظه است.

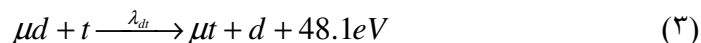
مقدمه

هنگامی که میون وارد محیط حاوی ایزوتوپهای هیدروژن میشود شروع به انجام واکنش‌های زنجیره‌ای زیرمی‌کند.

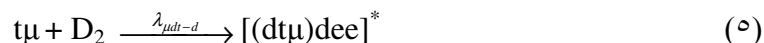
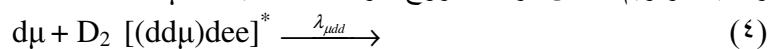
۱- کند و سپس جذب یونهای دوتریم و تریتیم می‌شود و اتمهای میونی μd و μt را با آهنگ λ_a تشکیل میدهد.

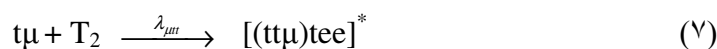


۲- میون منفی طبق فرآیند زیر از اتم دوتریم به اتم تریتیم که مفیدتر است منتقل می‌شود. آهنگ انتقال میون از دوتریم به تریتیم λ_{dt} است. واکنش (۲) در محیط دوتریم خالص قبل از تشکیل تریتیم‌ها انجام نمی‌شود.



۳- در این مرحله مولکولهای میونی تشکیل می‌شود. تشکیل این مولکولهای میونی با آهنگ λ_c به صورت زیر است. در محیط دوتریم خالص مرحله شروع کار فقط با تشکیل μdd است:





که در آن داریم [۱]:

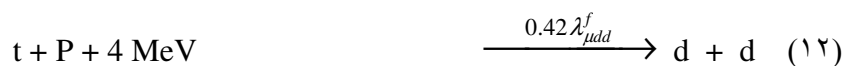
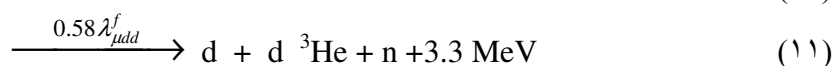
$$\lambda_{\mu dt} = \lambda_{\mu dt-d}C_d + \lambda_{\mu dt-t}C_t \quad (8)$$

در رابطه بالا C_d و C_t به ترتیب کسر غلظتهای دوتریم و تریتم است و داریم:

$$C_t + C_d = 1 \quad (9)$$

برای دوتریم خالص در شروع کار سیستم، $C_t = 0$ است.

۴ - در مرحله بعدی وقوع انجام واکنش هسته‌های مطابق فرآیندهای زیر است:



بعد از تولید هسته نظیر h (${}^3\text{He}$)، واکنش همجوشی زیر اتفاق می‌افتد.



برای محیط خالص $d+d$ ، شروع واکنش با (۱۱) و (۱۲) است ولی سپس با تولید هلیم ۳ و تریتم از واکنش‌های (۱۱) و (۱۲)، واکنش‌های (۱۰) و (۱۴) و حتی واکنش (۱۳) نیز در کل واکنش‌ها شرکت خواهند کرد. در روابط بالا $\lambda_{(\)}^f$ آهنگ همجوشی هسته‌ها در مولکولهای میونی μdt ، μdd ، μtt و μdh می‌باشند.

۵ - بعد از انجام همجوشی احتمال چسبیدن میون به ذرات باردار حاصل از واکنش وجود دارد، به ویژه در واکنش‌های (۱۰) و (۱۳)، میون به ${}^4\text{He}$ و در واکنش (۱۱) به ${}^3\text{He}$ چسبیده و آلفای میون دار تشکیل می‌دهد در این حالت میون مقید به هسته‌های آلفا وابسته می‌شود، بنابراین برای انجام واکنش‌های بعدی در دسترس نخواهد بود [۲]، [۳]، [۴]، [۵].

طرح پیشنهادی سیستم D-T و D-D

نمودار طرح‌دار سیستم همجوشی D-D و D-T کمی پیچیده‌تر اما واقعی‌تر می‌شود اگر در فرآیندهای همجوشی، ربایش میون از اتمهای میون دار μd و μt توسط ایزوتوپهای ${}^3\text{He}$ و ${}^4\text{He}$ را نیز وارد شبکه کنیم، در این صورت معادله (۹) به شکل زیر درمی‌آید.

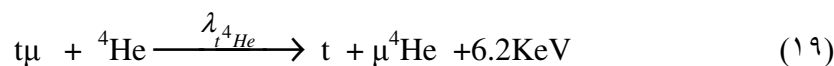
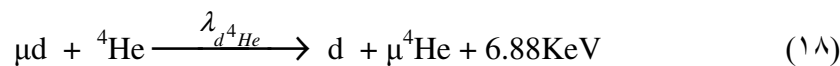
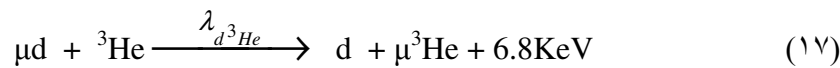
$$C_d + C_t + C_{\text{He}} = 1 \quad (15)$$

که در آن

$$C_{He} = C_h + C_a \quad (16)$$

و C_h و C_a به ترتیب کسر غلظتهای 3He و 4He است. در تحقیقات اخیر آهنگ ربایش میون از دوتریم و تریتیم توسط ایزوتوپهای هلیوم اندازه گیری شده است [۲] و [۵].

تاکنون ربایش میون از اتمهای میونی μd و μt توسط ایزوتوپهای هلیوم تولیدی به دلیل در دسترس نبودن داده‌های مورد لزوم در محاسبات نظری منظور نمی‌شد [۴]. در کار تحقیقاتی حاضر ربایش میون از اتمهای میونی μd و μt توسط ایزوتوپهای هلیوم را در شبکه عمومی همجوشی ارائه شده در شکل‌های (۱) و (۲) برای D- و T و D-D است و تأثیر آن را بر روی ضریب تکثیر میونی مطالعه کرده‌ایم. این انتقال ایزوتوپی توسط واکنش‌های زیر انجام می‌شود [۵] و [۶].



در روابط بالا $\lambda_{()}$ آهنگهای تعویضی مربوطه خواهند بود. در محیط D-T، میون می‌تواند مطابق واکنش‌های (۱) و (۲) جذب شود. بعد از تشکیل μt با برخورد با دوتریم و تریتیم‌های محیط، مولکول‌های μdt و μtt مطابق (۵)، (۶) و (۷) تشکیل خواهند شد. سپس اینها می‌توانند همجوشی کنند. حاصل همجوشی هر مولکول دو کانال با ضرایب چسبندگی ω_d و ω_t خواهد بود. آلفای میون‌دار، $\mu\alpha$ ، به ترتیب در شاخه‌های μdt و μtt پدید خواهد آمد و با احتمالات $1-\omega_d$ و $1-\omega_t$ هسته آلفا به ترتیب از شاخه‌های μdt و μtt تشکیل خواهد شد. هسته آلفا پس از تشکیل می‌تواند میون را از محیط جذب کند. این جذب به طور مستقیم یا غیرمستقیم خواهد بود. که جذب غیرمستقیم آن توسط واکنش‌های (۱۷) تا (۱۹) توصیف می‌شود و جذب مستقیم، گیراندازی میون‌های آزاد است (شکل ۱). در محیط D-D، بعد از تشکیل μd مطابق واکنش (۱)، این اتم میونی می‌تواند با دوتریم زیاد محیط برخورد کند و μdd مطابق واکنش (۴) تشکیل خواهد شد. در هر حال مولکول تشکیل شده با ثابت همجوشی $\lambda_{\mu dd}^f$ ، همجوشی می‌کند. این واکنش در روی شبکه (شکل ۲) با عدد (۱) نشان داده شده است. حاصل همجوشی μdd چهار کانال است: با احتمال $(1-\omega_{s1})P_1$ میون از طریق کانال (۳) آزاد خواهد شد. P_1 احتمال تولید ذره پروتون و ω_{s1} احتمال چسبیدن میون به تریتیم‌های تولیدی است. با احتمال $(1-\omega_{s2})(1-P_1)$ ، میون می‌تواند از کانال (۲) آزاد و چرخه را دوباره تکرار کند. یعنی می‌تواند از طریق کانال (۶) همان مراحل بالا را انجام دهد. اتمهای میون‌دار μt ، μh بعد از همجوشی μdd به ترتیب با احتمالات $P_1\omega_{s1}$ و $(1-P_1)\omega_{s2}$ ، تولید می‌شوند. μt می‌تواند با دوتریم خیلی زیاد محیط برخورد مؤثر انجام دهد و به صورت μdt درآید. این

مولکول با ثابت $\lambda_{\mu dt}^f$ می‌تواند به طور جداگانه دو کانال را با احتمالات ω_{s3} و $(1-\omega_{s3})$ طی کند. امکان دارد میون از طریق کانال شماره (۵) آزاد شود و وارد چرخه شود. ω_{s3} احتمال چسبیدن میون به هسته تولیدی α می‌باشد. با آهنگ $\lambda_{\mu dh}$ و احتمالات مربوطه، اتم μh با دوتریم تشکیل μdh خواهد داد. μdh با ثابت همجوشی $\lambda_{\mu dh}^f$ ، با احتمالات ω_{s4} و $1-\omega_{s4}$ به ترتیب کانالهای تولید $\mu\alpha$ و آزاد شدن میون را باز خواهد کرد. پس میون با احتمال $1-\omega_{s4}$ از این شاخه هم می‌تواند دوباره وارد چرخه شود. در کل شبکه λ_0 آهنگ نابودی میون می‌باشد. میون دارای عمر متوسط حدود $2/2 \times 10^{-1}$ ثانیه است و بعد از گذشت این مدت زمان از بین خواهد رفت. کانال‌های (۷) و (۸) مربوط به انتقالات تعویضی ذره میون برطبق واکنش‌های (۱۷) و (۱۸) می‌باشند.

معادلات حاکم بر سیستم D-T و D-D و محاسبات عددي

مانند معادلات دینا میکی حاکم بر حرکت یک سیستم مکانیکی، معادلات حاکم بر سیستم همجوشی، تعدد تمام هسته‌ها، اتم‌های میون‌دار و مولکول‌های میون‌دار را کنترل می‌کند. معادلات سینتیک نقطه‌ای بر اساس شبکه‌های جامع، شکل‌های (۱) و (۲)، جفت شده غیر خطی تابع زمان است. معادلات حاکم بر سیستم D-T را می‌توان چنین نوشت:

$$dN_{\mu}(t)/dt = +S_{\mu} - \lambda_0 N_{\mu} - \Phi \lambda_a C_d N_{\mu} - \Phi \lambda_a C_t N_{\mu} + \lambda_{\mu dt}^f N_{\mu dt} (1 - \omega_d) + \lambda_{\mu tt}^f N_{\mu tt} (1 - \omega_t) - \Phi \lambda'_a C_a N_{\mu} \quad (20)$$

$$dN_{\mu d}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu d} + \Phi \lambda_a C_d N_{\mu} - \Phi \lambda_{d\alpha} C_{\alpha} N_{\mu d} - \Phi \lambda_{dt} C_t N_{\mu d} \quad (21)$$

$$dN_{\mu t}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu t} - \Phi \lambda_{\mu dt} C_d N_{\mu t} + \Phi \lambda_a C_t N_{\mu} - \Phi \lambda_{t\alpha} C_{\alpha} N_{\mu t} + \Phi \lambda_{dt} C_t N_{\mu d} - \Phi \lambda_{\mu tt} C_t N_{\mu t} \quad (22)$$

$$dN_{\mu\alpha}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu\alpha} + \lambda_{\mu tt}^f N_{\mu tt} \omega_t + \lambda_{\mu dt}^f N_{\mu dt} \omega_d + \Phi \lambda_{d\alpha} C_{\alpha} N_{\mu d} + \Phi \lambda_{t\alpha} C_{\alpha} N_{\mu t} + \Phi \lambda'_a C_a N_{\mu} \quad (23)$$

$$dN_{\mu dt}(t)/dt = -\lambda_{\mu dt}^f N_{\mu dt} - \lambda_0 N_{\mu dt} + \Phi \lambda_{\mu dt} C_d N_{\mu t} \quad (24)$$

$$dN_{\mu tt}(t)/dt = -\lambda_{\mu tt}^f N_{\mu tt} - \lambda_0 N_{\mu tt} + \Phi \lambda_{\mu tt} C_t N_{\mu t} \quad (25)$$

$$dN_d(t)/dt = -\lambda_a C_d \Phi N_{\mu} + \lambda_{dt} C_t \Phi N_{\mu d} + \lambda_{d\alpha} C_{\alpha} \Phi N_{\mu d} + \lambda_0 N_{\mu d} - \lambda_{\mu dt} C_d \Phi N_{\mu t} \quad (26)$$

$$dN_t(t)/dt = -\lambda_a C_t \Phi N_{\mu} + \lambda_0 N_{\mu t} - \lambda_{dt} C_t \Phi N_{\mu d} - \lambda_{\mu tt} N_{\mu t} C_t \Phi + \lambda_{t\alpha} C_{\alpha} \Phi N_{\mu t} \quad (27)$$

و به طور مشابه معادلات حاکم بر D-D را مطابق روابط زیر می‌نویسیم:

$$dN_{\mu}(t)/dt = +S_{\mu} - \lambda_0 N_{\mu} - \Phi \lambda_a C_d N_{\mu} - \Phi \lambda'_a C_h N_{\mu} + P_1 [\lambda_{\mu dd}^f N_{\mu dd} (1 - \omega_{s1})] + (1 - P_1) [\lambda_{\mu dd}^f N_{\mu dd} (1 - \omega_{s2})] + \lambda_{\mu dt}^f N_{\mu dt} (1 - \omega_{s3}) + \lambda_{\mu dh}^f N_{\mu dh} (1 - \omega_{s4}) - \Phi \lambda''_a C_a N_{\mu} \quad (28)$$

$$dN_{\mu d}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu d} - \Phi \lambda_{\mu dd} C_d N_{\mu d} + \Phi \lambda_a C_d N_{\mu} - \Phi \lambda_{d\alpha} C_{\alpha} N_{\mu d} - \Phi \lambda_{dh} C_h N_{\mu d} \quad (29)$$

$$dN_{\mu t}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu t} - \Phi \lambda_{\mu dt} C_d N_{\mu t} + P_1 \lambda_{\mu dd}^f N_{\mu dd} \omega_{s1} \quad (30)$$

$$dN_{\mu\alpha}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu\alpha} + \lambda_{\mu dh}^f N_{\mu dh} \omega_{s4} + \lambda_{\mu dt}^f N_{\mu dt} \omega_{s3} + \Phi \lambda_{d\alpha} C_{\alpha} N_{\mu d} + \Phi \lambda_{\alpha}'' C_{\alpha} N_{\mu} \quad (31)$$

$$dN_{\mu h}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu h} + (1-P_1)[\lambda_{\mu dd}^f N_{\mu dd} \omega_{s2}] - \Phi \lambda_{\mu dh} C_d N_{\mu h} + \Phi \lambda_{dh} C_h N_{\mu d} + \Phi \lambda_{\alpha}' C_h N_{\mu} \quad (32)$$

$$dN_{\mu dd}(t)/dt = -\lambda_{\mu dd}^f N_{\mu dd} - \lambda_0 N_{\mu dd} + \Phi \lambda_{\mu dd} C_d N_{\mu d} \quad (33)$$

$$dN_{\mu dt}(t)/dt = -\lambda_{\mu dt}^f N_{\mu dt} - \lambda_0 N_{\mu dt} + \Phi \lambda_{\mu dt} C_d N_{\mu t} \quad (34)$$

$$dN_{\mu dh}(t)/dt = -\lambda_{\mu dh}^f N_{\mu dh} - \lambda_0 N_{\mu dh} + \Phi \lambda_{\mu dh} C_d N_{\mu h} \quad (35)$$

$$dN_d(t)/dt = -\lambda_{\alpha} C_d \Phi N_{\mu} - \lambda_{\mu dd} C_d \Phi N_{\mu d} + \lambda_{dh} C_h \Phi N_{\mu d} + \lambda_{d\alpha} C_{\alpha} \Phi N_{\mu d} - \lambda_{\mu dh} C_d \Phi N_{\mu h} + \lambda_0 N_{\mu d} - \lambda_{\mu dt} C_d \Phi N_{\mu t} \quad (36)$$

$$dN_h(t)/dt = -\lambda_{\alpha}' C_h \Phi N_{\mu} + \lambda_0 N_{\mu h} - \lambda_{dh} C_h \Phi N_{\mu d} + (1-P_1) \lambda_{\mu dd}^f N_{\mu dd} (1-\omega_{s2}) \quad (37)$$

$$dN_{\alpha}(t)/dt = -\lambda_{\alpha}'' C_{\alpha} \Phi N_{\mu} + \lambda_0 N_{\mu\alpha} - \lambda_{d\alpha} C_{\alpha} \Phi N_{\mu d} + \lambda_{\mu dh}^f N_{\mu dh} (1-\omega_{s4}) + \lambda_{\mu dt}^f N_{\mu dt} (1-\omega_{s3}) \quad (38)$$

برای دو سیستم D-D و D-T تعداد هسته‌های موجود در محیط، را می‌توان بر حسب غلظت‌های ذکر شده نوشت.

$$N_d(t) = C_d(t) \Phi N_0 \quad (39)$$

$$N_h(t) = C_h(t) \Phi N_0 \quad (40)$$

$$N_{\alpha}(t) = C_{\alpha}(t) \Phi N_0 \quad (41)$$

$$N_t(t) = C_t(t) \Phi N_0 \quad (42)$$

در معادلات بالا، N_0 چگالی عددی هیدروژن مایع است. $C_d(t)$ ، $C_h(t)$ ، $C_{\alpha}(t)$ و $C_t(t)$ به ترتیب غلظت‌های نسبی تابع زمانی دوتریم، هلیم^۳، ترتیم و هلیم^۴ است. Φ چگالی یونی محیط است که نسبت به LHD (چگالی عددی هیدروژن مایع) نوشته می‌شود. مقادیر بالا با زمان تغییر می‌کنند. آهنگ‌های تشکیل و همجوشی معرفی شده اند. λ_0 آهنگ واپاشی میون است.

$N_{()}(t)$ ها چگالی ذره‌های اتم‌های میون‌دار، مولکول‌های میون‌دار و هسته‌ها است. جمله‌های طرف راست معادلات با علامت مثبت به معنی اضافه شدن به تعداد هسته‌ها، اتم‌های میون‌دار و یا مولکول‌ها با توجه به طرف چپ معادله مربوطه‌اند. جملات با علامت منفی به معنی نابود شدن آنها در لحظه t از سیستم هستند. در جدول (۱) پارامترهای لازم مربوط به هر دو شبکه جامع پیشنهادی D-D و D-T از مراجع در دمای $300K$ ارائه شده است. این معادلات غیر خطی تابع زمان را به طور جداگانه برای دو سیستم مورد نظربه روش محاسبات عددی حل کرده‌ایم و نتایج حاصل در جدول (۲) در شرایط بهینه سیستم D-T ($C_d=C_t=0.5$) و در جدول (۳) برای سیستم D به ازا $\Phi=0.1LHD$ ، ... و $\Phi=1LHD$ در دمای $300K$ ارائه شده است. در جدول (۲) پارامترهای محاسبه شده $\chi_{\mu dt}$ و $\chi_{\mu tt}$ به ترتیب آهنگ چرخش میون در شاخه های μdt و μtt در سیستم D-T است و χ_{tot} آهنگ چرخش کل است. در سیستم D-D، $X_{\mu dd}$ ، $X_{\mu dt}$ و $X_{\mu dh}$ به ترتیب تعداد همجوشی مولکول‌های میون‌دار

μdt ، μdd و μdh است. χ_{tot} آهنگ چرخش کل در محیط D-D است. مقدار درصد تأثیر هلیم‌های تولیدی بر شاخه‌های سیستم D-T و D-D در جدول (۴) ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که پدیده انتقال میون از اتم‌های μd و μt به ایزوتوپ‌های هلیم تولیدی آنچنان قابل توجه نیست. این نتیجه را می‌توان این چنین توجیه کرد: با توجه به شبکه‌های جامع ارائه شده بعد از هربار همجوشی کردن مولکول‌هایی از نوع μdt و μtt در شبکه D-T حداکثر یک عدد هسته آلفا پدید می‌آید. حتی مطابق جدول (۲) اگر میون $87/43$ بار عمل کاتالیز را انجام دهد حداکثر $87/43$ عدد هسته آلفا پدید خواهد آمد. مطابق معادلات ارائه شده، تعدد این نوع هسته آنچنان نیست که بتواند تأثیری روی آهنگ چرخش میون داشته باشد. در مورد سیستم D-D با توجه به جدول (۳) می‌توان گفت که چون حداکثر تعداد هسته‌های از نوع h و α زیر عدد ۵ است این دو نوع هسته هم در آهنگ چرخش میون تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارند.

از مقایسه نتایج حاصل از تئوری شبکه‌های جامع پیشنهادی در محیط‌های D-T و D-D با نتایج در دسترس آزمایشی در جداول (۵) و (۶)، نشان داده شده است که در شرایط یکسان هنوز بین جواب‌های تئوری و مقادیر تجربی در دو محیط D-T و D-D اختلاف قابل ملاحظه‌ای وجود دارد. مقایسه محاسبات تئوری حاصل از حل معادلات مربوط به D-T و D-D با مقادیر تجربی به ترتیب در جداول (۵) و (۶) ارائه شده است. در جدول (۵) آهنگ چرخش میون محاسبه شده در سیستم D-T با مقادیر تجربی مقایسه شده است. در جدول (۶) به علت در دسترس نبودن مقادیر آزمایشی آهنگ چرخش میون مربوط به سیستم D-D، تعداد نوترون‌های محاسبه شده از تئوری با مقادیر آزمایشی در سه دمای $25/5 K$ ، $70 K$ و $150 K$ مقایسه شده است. در جدول (۶) نتایج محاسبات نشان می‌دهد که هر چه دمای محیط بالاتر رفته است میزان خطای محاسبات تئوری با جواب‌های تجربی کمتر می‌شود.

جدول ۱: پارامترها و اطلاعات مربوط به شبکه جامع D-D و D-T.

Parameter (dimension)	Value [Ref.]	Parameter (dimension)	Value [Ref.]
ω_{s1}	0.0027 [6]	$\lambda_{\mu dt-d} (s^{-1})$	$14.7 \cdot 10^7$ [1]
ω_{s2}	0.13 [7]	$\lambda_{\mu dt-t} (s^{-1})$	$8.6 \cdot 10^7$ [1]
$\omega_{s3} = \omega_d$	0.0045 [7]	$\lambda_{\mu dh} (s^{-1})$	10^8 [5]
ω_{s4}	0.0045 [7]	$\lambda_{\mu tt} (s^{-1})$	$1.7 \cdot 10^6$ [2]
P_1	0.4 [8]	$\lambda_{\mu dd}^f (s^{-1})$	$4 \cdot 10^8$ [8]
$\lambda_a (s^{-1})$	$4 \cdot 10^{12}$ [9]	$\lambda_{\mu dt}^f (s^{-1})$	$1.1 \cdot 10^{12}$ [11]
$\lambda'_a = \lambda''_a (s^{-1})$	10^6 [5]	$\lambda_{\mu dh}^f (s^{-1})$	10^2 [12,13]

نظر گرفتن ربایش میون از μd و μt توسط ایزوتوپ‌های هلیم تولیدی و مقایسه آن با جواب‌های تجربی در دسترس

محمدرضا اسکندری، روح اله قیصری و شهرام مصلی نژاد: دانشگاه شیراز

چکیده

اخیراً آهنگ انتقال میون از دوتریم و تریتم به ایزوتوپهای هلیم تولیدی در همجوشی کاتالیزور میونی تعیین شده است. به نظر می‌رسد یکی از دلایل مهم عدم تطابق مقادیر نظری و آزمایشی ضریب چرخش میونی در این شیوه همجوشی، نادیده گرفتن همین انتقالات در تئوری‌های قبلی باشد. در این کار تحقیقی آهنگ چرخش میون با در نظر گرفتن انتقال میون از دوتریم و تریتم به ایزوتوپهای هلیم (^4He , ^3He) در دو سیستم همجوشی D-T و D-D محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با وجود بالا بودن آهنگ‌های انتقالات فوق، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقدار آهنگ چرخش میون وجود ندارد و هنوز مقدار خطای نتایج نظری با مقادیر آزمایشی در دو سیستم D-T و D-D قابل ملاحظه است.

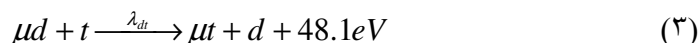
مقدمه

هنگامی که میون وارد محیط حاوی ایزوتوپهای هیدروژن میشود شروع به انجام واکنش‌های زنجیره‌ای زیر می‌کند.

۱- کند و سپس جذب یونهای دوتریم و تریتم می‌شود و اتمهای میونی μd و μt را با آهنگ λ_a تشکیل میدهد.

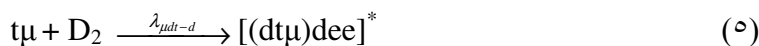
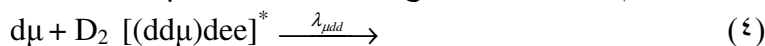


۲- میون منفی طبق فرآیند زیر از اتم دوتریم به اتم تریتم که مفیدتر است منتقل می‌شود. آهنگ انتقال میون از دوتریم به تریتم λ_{dt} است. واکنش (۲) در محیط دوتریم خالص قبل از تشکیل تریتم‌ها انجام نمی‌شود.



۳- در این مرحله مولکولهای میونی تشکیل می‌شود. تشکیل این مولکولهای میونی با آهنگ λ_c به صورت زیر

است. در محیط دوتریم خالص شروع کار فقط با تشکیل μdd است:



که در آن داریم [۱]:

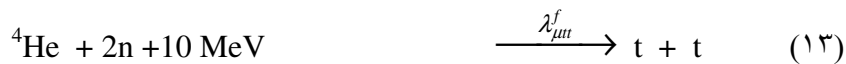
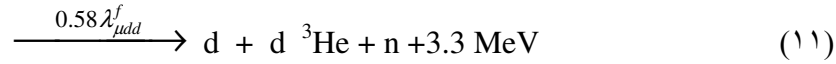
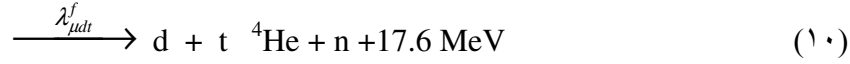
$$\lambda_{\mu dt} = \lambda_{\mu dt-d}C_d + \lambda_{\mu dt-t}C_t \quad (8)$$

در رابطه بالا C_d و C_t به ترتیب کسر غلظتهای دوتریم و تریتم است و داریم:

$$C_t + C_d = 1 \quad (9)$$

برای دوتریم خالص در شروع کار سیستم، $C_t = 0$ است.

۴ - در مرحله بعدی وقوع انجام واکنش هسته‌ای مطابق فرآیندهای زیر است:



بعد از تولید هسته نظیر h (${}^3\text{He}$)، واکنش همجوشی زیر اتفاق می‌افتد.



برای محیط خالص $d+d$ ، شروع واکنش با (۱۱) و (۱۲) است ولی سپس با تولید هلیم ۳ و تریتم از واکنش‌های (۱۱) و (۱۲)، واکنش‌های (۱۰) و (۱۴) و حتی واکنش (۱۳) نیز در کل واکنش‌ها شرکت خواهند کرد. در روابط بالا $\lambda_{()}^f$ آهنگ همجوشی هسته‌ها در مولکولهای میونی μdt ، μdd ، μtt و μdh می‌باشند.

۵ - بعد از انجام همجوشی احتمال چسبیدن میون به ذرات باردار حاصل از واکنش وجود دارد، به ویژه در واکنش‌های (۱۰) و (۱۳)، میون به ${}^4\text{He}$ و در واکنش (۱۱) به ${}^3\text{He}$ چسبیده و آلفای میون دار تشکیل می‌دهد در این حالت میون مقید به هسته‌های آلفا وابسته می‌شود، بنابراین برای انجام واکنش‌های بعدی در دسترس نخواهد بود [۲]، [۳]، [۴]، [۵].

طرح پیشنهادی سیستم D-T و D-D

نمودار طرح‌دار سیستم همجوشی D-D و D-T کمی پیچیده‌تر اما واقعی‌تر می‌شود اگر در فرآیندهای همجوشی، ربایش میون از اتمهای میون دار μd و μt توسط ایزوتوپهای ${}^3\text{He}$ و ${}^4\text{He}$ را نیز وارد شبکه کنیم، در این صورت معادله (۹) به شکل زیر درمی‌آید.

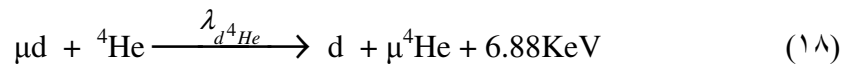
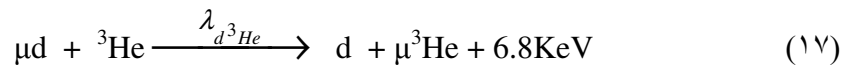
$$C_d + C_t + C_{\text{He}} = 1 \quad (15)$$

که در آن

$$C_{\text{He}} = C_h + C_\alpha \quad (16)$$

و C_h و C_α به ترتیب کسر غلظتهای ${}^3\text{He}$ و ${}^4\text{He}$ است. در تحقیقات اخیر آهنگ ربایش میون از دوتریم و تریتم توسط ایزوتوپهای هلیم اندازه‌گیری شده است [۲] و [۵].

تاکنون ربایش میون از اتم‌های میونی μd و μt توسط ایزوتوپ‌های هلیم تولیدی به دلیل در دسترس نبودن داده‌های مورد لزوم در محاسبات نظری منظور نمی‌شد [۴]. در کار تحقیقاتی حاضر ربایش میون از اتم‌های میونی μd و μt توسط ایزوتوپ‌های هلیم را در شبکه عمومی همجوشی ارائه شده در شکل‌های (۱) و (۲) برای D-T و D-D وارد شده است و تأثیر آن را بر روی ضریب تکثیر میونی مطالعه کرده‌ایم. این انتقال ایزوتوپی توسط واکنش‌های زیر انجام می‌شود [۵] و [۶].



در روابط بالا $\lambda_{(i)}$ آهنگ‌های تعویضی مربوطه خواهند بود. در محیط D-T، میون می‌تواند مطابق واکنش‌های (۱) و (۲) جذب شود. بعد از تشکیل μt با برخورد با دوتریم و ترتیم‌های محیط، مولکول‌های μdt و μtt مطابق (۵)، (۶) و (۷) تشکیل خواهند شد. سپس اینها می‌توانند همجوشی کنند. حاصل همجوشی هر مولکول دو کانال با ضرایب چسبندگی ω_t و ω_d خواهد بود. آلفای میون‌دار، $\mu\alpha$ ، به ترتیب در شاخه‌های μdt و μtt پدید خواهد آمد و با احتمالات $1-\omega_t$ و $1-\omega_d$ هسته آلفا به ترتیب از شاخه‌های μdt و μtt تشکیل خواهد شد. هسته آلفا پس از تشکیل می‌تواند میون را از محیط جذب کند. این جذب به طور مستقیم یا غیرمستقیم خواهد بود. که جذب غیرمستقیم آن توسط واکنش‌های (۱۷) تا (۱۹) توصیف می‌شود و جذب مستقیم، گیراندازی میون‌های آزاد است (شکل ۱). در محیط D-D، بعد از تشکیل μd مطابق واکنش (۱)، این اتم میونی می‌تواند با دوتریم زیاد محیط برخورد کند و μdd مطابق واکنش (۴) تشکیل خواهد شد. در هر حال مولکول تشکیل شده با ثابت همجوشی $\lambda_{\mu dd}^f$ ، همجوشی می‌کند. این واکنش در روی شبکه (شکل ۲) با عدد (1) نشان داده شده است. حاصل همجوشی μdd چهار کانال است: با احتمال $(1-\omega_{s1})P_1$ میون از طریق کانال (۳) آزاد خواهد شد. P_1 احتمال تولید ذره پروتون و ω_{s1} احتمال چسبیدن میون به ترتیم‌های تولیدی است. با احتمال $(1-\omega_{s2})(1-P_1)$ ، میون می‌تواند از کانال (۲) آزاد و چرخه را دوباره تکرار کند. یعنی می‌تواند از طریق کانال (۶) همان مراحل بالا را انجام دهد. اتم‌های میون‌دار μt ، μh بعد از همجوشی μdd به ترتیب با احتمالات $P_1\omega_{s1}$ و $(1-P_1)\omega_{s2}$ ، تولید می‌شوند. μt می‌تواند با دوتریم خیلی زیاد محیط برخورد مؤثر انجام دهد و به صورت μdt درآید. این مولکول با ثابت $\lambda_{\mu dt}^f$ می‌تواند به طور جداگانه دو کانال را با احتمالات ω_{s3} و $(1-\omega_{s3})$ طی کند. امکان دارد میون از طریق کانال شماره (۵) آزاد شود و وارد چرخه شود. ω_{s3} احتمال چسبیدن میون به هسته تولیدی α می‌باشد. با آهنگ $\lambda_{\mu dh}$ و احتمالات مربوطه، اتم μh با دوتریم تشکیل μdh خواهد داد. μdh با ثابت همجوشی $\lambda_{\mu dh}^f$ ، با احتمالات ω_{s4} و $1-\omega_{s4}$ به ترتیب کانال‌های تولید $\mu\alpha$ و آزاد شدن میون را باز خواهد کرد.

پس میون با احتمال $1 - \omega_{s4}$ از این شاخه هم می‌تواند دوباره وارد چرخه شود. در کل شبکه λ_0 آهنگ نابودی میون می‌باشد. میون دارای عمر متوسط حدود $2/2 \times 10^{-6}$ ثانیه است و بعد از گذشت این مدت زمان از بین خواهد رفت. کانال‌های (۷) و (۸) مربوط به انتقالات تعویضی ذره میون برطبق واکنش‌های (۱۷) و (۱۸) می‌باشند.

معادلات حاکم بر سیستم D-T و D-D و محاسبات عددي

مانند معادلات دینا میکی حاکم بر حرکت یک سیستم مکانیکی، معادلات حاکم بر سیستم همجوشی، تعدد تمام هسته‌ها، اتم‌های میون‌دار و مولکول‌های میون‌دار را کنترل می‌کند. معادلات سینتیک نقطه‌ای بر اساس شبکه‌های جامع، شکل‌های (۱) و (۲)، جفت شده غیر خطی تابع زمان است. معادلات حاکم بر سیستم D-T را می‌توان چنین نوشت:

$$dN_{\mu}(t)/dt = +S_{\mu} - \lambda_0 N_{\mu} - \Phi \lambda_a C_d N_{\mu} - \Phi \lambda_a C_t N_{\mu} + \lambda_{\mu dt}^f N_{\mu dt} (1 - \omega_d) + \lambda_{\mu tt}^f N_{\mu tt} (1 - \omega_t) - \Phi \lambda'_a C_{\alpha} N_{\mu} \quad (20)$$

$$dN_{\mu d}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu d} + \Phi \lambda_a C_d N_{\mu} - \Phi \lambda_{d\alpha} C_{\alpha} N_{\mu d} - \Phi \lambda_{dt} C_t N_{\mu d} \quad (21)$$

$$dN_{\mu t}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu t} - \Phi \lambda_{\mu dt} C_d N_{\mu t} + \Phi \lambda_a C_t N_{\mu} - \Phi \lambda_{t\alpha} C_{\alpha} N_{\mu t} + \Phi \lambda_{dt} C_t N_{\mu d} - \Phi \lambda_{\mu tt} C_t N_{\mu t} \quad (22)$$

$$dN_{\mu\alpha}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu\alpha} + \lambda_{\mu tt}^f N_{\mu tt} \omega_t + \lambda_{\mu dt}^f N_{\mu dt} \omega_d + \Phi \lambda_{d\alpha} C_{\alpha} N_{\mu d} + \Phi \lambda_{t\alpha} C_{\alpha} N_{\mu t} + \Phi \lambda'_a C_{\alpha} N_{\mu} \quad (23)$$

$$dN_{\mu dt}(t)/dt = -\lambda_{\mu dt}^f N_{\mu dt} - \lambda_0 N_{\mu dt} + \Phi \lambda_{\mu dt} C_d N_{\mu t} \quad (24)$$

$$dN_{\mu tt}(t)/dt = -\lambda_{\mu tt}^f N_{\mu tt} - \lambda_0 N_{\mu tt} + \Phi \lambda_{\mu tt} C_t N_{\mu t} \quad (25)$$

$$dN_d(t)/dt = -\lambda_a C_d \Phi N_{\mu} + \lambda_{dt} C_t \Phi N_{\mu d} + \lambda_{d\alpha} C_{\alpha} \Phi N_{\mu d} + \lambda_0 N_{\mu d} - \lambda_{\mu dt} C_d \Phi N_{\mu t} \quad (26)$$

$$dN_t(t)/dt = -\lambda_a C_t \Phi N_{\mu} + \lambda_0 N_{\mu t} - \lambda_{dt} C_t \Phi N_{\mu d} - \lambda_{\mu tt} N_{\mu t} C_t \Phi + \lambda_{t\alpha} C_{\alpha} \Phi N_{\mu t} \quad (27)$$

و به طور مشابه معادلات حاکم بر D-D را مطابق روابط زیر می‌نویسیم:

$$dN_{\mu}(t)/dt = +S_{\mu} - \lambda_0 N_{\mu} - \Phi \lambda_a C_d N_{\mu} - \Phi \lambda'_a C_h N_{\mu} + P_1 [\lambda_{\mu dd}^f N_{\mu dd} (1 - \omega_{s1})] + (1 - P_1) [\lambda_{\mu dd}^f N_{\mu dd} (1 - \omega_{s2})] + \lambda_{\mu dt}^f N_{\mu dt} (1 - \omega_{s3}) + \lambda_{\mu dh}^f N_{\mu dh} (1 - \omega_{s4}) - \Phi \lambda''_a C_{\alpha} N_{\mu} \quad (28)$$

$$dN_{\mu d}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu d} - \Phi \lambda_{\mu dd} C_d N_{\mu d} + \Phi \lambda_a C_d N_{\mu} - \Phi \lambda_{d\alpha} C_{\alpha} N_{\mu d} - \Phi \lambda_{dh} C_h N_{\mu d} \quad (29)$$

$$dN_{\mu t}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu t} - \Phi \lambda_{\mu dt} C_d N_{\mu t} + P_1 \lambda_{\mu dd}^f N_{\mu dd} \omega_{s1} \quad (30)$$

$$dN_{\mu\alpha}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu\alpha} + \lambda_{\mu dh}^f N_{\mu dh} \omega_{s4} + \lambda_{\mu dt}^f N_{\mu dt} \omega_{s3} + \Phi \lambda_{d\alpha} C_{\alpha} N_{\mu d} + \Phi \lambda''_a C_{\alpha} N_{\mu} \quad (31)$$

$$dN_{\mu h}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu h} + (1 - P_1) [\lambda_{\mu dd}^f N_{\mu dd} \omega_{s2}] - \Phi \lambda_{\mu dh} C_d N_{\mu h} + \Phi \lambda_{dh} C_h N_{\mu d} + \Phi \lambda'_a C_h N_{\mu} \quad (32)$$

$$dN_{\mu dd}(t)/dt = -\lambda_{\mu dd}^f N_{\mu dd} - \lambda_0 N_{\mu dd} + \Phi \lambda_{\mu dd} C_d N_{\mu d} \quad (33)$$

$$dN_{\mu dt}(t)/dt = -\lambda_{\mu dt}^f N_{\mu dt} - \lambda_0 N_{\mu dt} + \Phi \lambda_{\mu dt} C_d N_{\mu t} \quad (34)$$

$$dN_{\mu dh}(t)/dt = -\lambda_{\mu dh}^f N_{\mu dh} - \lambda_0 N_{\mu dh} + \Phi \lambda_{\mu dh} C_d N_{\mu h} \quad (35)$$

$$dN_d(t)/dt = -\lambda_a C_d \Phi N_{\mu} - \lambda_{\mu dd} C_d \Phi N_{\mu d} + \lambda_{dh} C_h \Phi N_{\mu d} + \lambda_{d\alpha} C_{\alpha} \Phi N_{\mu d} - \lambda_{\mu dh} C_d \Phi N_{\mu h} + \lambda_0 N_{\mu d} - \lambda_{\mu dt} C_d \Phi N_{\mu t} \quad (36)$$

$$dN_h(t)/dt = -\lambda_a' C_h \Phi N_{\mu} + \lambda_0 N_{\mu h} - \lambda_{dh} C_h \Phi N_{\mu d} + (1-P_1) \lambda_{\mu dd}^f N_{\mu dd} (1-\omega_{s2}) \quad (37)$$

$$dN_{\alpha}(t)/dt = -\lambda_a'' C_{\alpha} \Phi N_{\mu} + \lambda_0 N_{\mu \alpha} - \lambda_{d\alpha} C_{\alpha} \Phi N_{\mu d} + \lambda_{\mu dh}^f N_{\mu dh} (1-\omega_{s4}) + \lambda_{\mu dt}^f N_{\mu dt} (1-\omega_{s3}) \quad (38)$$

برای دو سیستم D-D و D-T تعداد هسته‌های موجود در محیط، را می‌توان بر حسب غلظت‌های ذکر شده نوشت.

$$N_d(t) = C_d(t) \Phi N_0 \quad (39)$$

$$N_h(t) = C_h(t) \Phi N_0 \quad (40)$$

$$N_{\alpha}(t) = C_{\alpha}(t) \Phi N_0 \quad (41)$$

$$N_t(t) = C_t(t) \Phi N_0 \quad (42)$$

در معادلات بالا، N_0 چگالی عددی هیدروژن مایع است. $C_d(t)$ ، $C_h(t)$ ، $C_{\alpha}(t)$ و $C_t(t)$ به ترتیب غلظت‌های نسبی تابع زمانی دوتریم، هلیم^۳، تریتم و هلیم^۴ است. Φ چگالی یونی محیط است که نسبت به LHD (چگالی عددی هیدروژن مایع) نوشته می‌شود. مقادیر بالا با زمان تغییر می‌کنند. آهنگ‌های تشکیل و همجوشی معرفی شده اند. λ_0 آهنگ واپاشی میون است.

$N_{(i)}(t)$ ها چگالی ذره‌های اتم‌های میون‌دار، مولکول‌های میون‌دار و هسته‌ها است. جمله‌های طرف راست معادلات با علامت مثبت به معنی اضافه شدن به تعداد هسته‌ها، اتم‌های میون‌دار و یا مولکول‌ها با توجه به طرف چپ معادله مربوطه‌اند. جملات با علامت منفی به معنی نابود شدن آنها در لحظه t از سیستم هستند. در جدول (۱) پارامترهای لازم مربوط به هر دو شبکه جامع پیشنهادی D-D و D-T از مراجع در دمای $300K$ ارائه شده است. این معادلات غیر خطی تابع زمان را به طور جداگانه برای دو سیستم مورد نظریه روش محاسبات عددی حل کرده‌ایم و نتایج حاصل در جدول (۲) در شرایط بهینه سیستم D-T ($C_d=C_t=0.5$) و در جدول (۳) برای سیستم D-D به ازاء $\Phi=0.1LHD$ ، ... و $\Phi=1LHD$ در دمای $300K$ ارائه شده است. در جدول (۲) پارامترهای محاسبه شده $\chi_{\mu dt}$ و $\chi_{\mu tt}$ به ترتیب آهنگ چرخش میون در شاخه‌های μdt و μtt در سیستم D-T است و χ_{tot} آهنگ چرخش کل است. در سیستم D-D، $X_{\mu dd}$ ، $X_{\mu dt}$ و $X_{\mu dh}$ به ترتیب تعداد همجوشی مولکول‌های میون‌دار

μdd ، μdt و μdh است. χ_{tot} آهنگ چرخش کل در محیط D-D است. مقدار درصد تأثیر هلیم‌های تولیدی بر شاخه‌های سیستم D-T و D-D در جدول (۴) ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که پدیده انتقال میون از اتم‌های μd و μt به ایزوتوپ‌های هلیم تولیدی آنچنان قابل توجه نیست. این نتیجه را می‌توان این چنین توجیه کرد: با توجه به شبکه‌های جامع ارائه شده بعد از هر بار همجوشی کردن مولکول‌هایی از نوع μdt و μtt در شبکه

$\lambda_{dt} \text{ (s}^{-1}\text{)}$
--

خخ

D-T تالیزور میونی در هر يك از شاخه هاي شبکه D-T
($C_d=C_t=0.5$)

D-T تالیزور میونی در هر يك از شاخه هاي شبکه D-T
($C_d=C_t=0.5$)

به ازاء Φ هاي مختلف در دماي 300K.

Φ	$\chi_{\mu dt}$	$\chi_{\mu dt}$	χ_{tot}
0.05	0.04	6.36	6.40
0.15	0.11	18.44	18.55
0.25	0.18	29.46	29.64
0.35	0.24	39.50	39.74
0.45	0.30	48.68	48.98
0.55	0.35	57.07	57.42
0.65	0.40	64.74	65.11
0.75	0.43	71.77	71.12
0.85	0.47	78.21	78.69
0.95	0.51	84.12	84.63
1.00	0.53	86.90	87.43

جدول ۳: تعداد همجوشی هر مولکول و آهنگ چرخش کل در هر يك از شاخه هاي شبکه D-D به ازاء Φ هاي مختلف در دماي 300K .

Φ	$X_{\mu dd}$	$X_{\mu dt}$	$X_{\mu dh}$	χ_{tot}
0.10	0.45	0.00	0.02	0.45
0.20	0.96	0.00	0.06	0.90
0.30	1.36	0.00	0.10	1.36
0.40	1.81	0.00	0.13	1.81
0.50	2.27	0.00	0.17	2.27
0.60	2.72	0.00	0.21	2.72
0.70	3.17	0.00	0.24	3.17
0.80	3.62	0.00	0.28	3.62

0.90	4.07	0.00	0.31	4.07
1.00	4.52	0.00	0.35	4.52

جدول ۴: مقادیر مربوط به درصد تأثیر هسته های α (${}^4\text{He}$) تولیدی در سیستم D-T و هسته های α و h (${}^3\text{He}$) تولیدی بر آهنگ چرخش میون مربوط به هر شاخه در دمای 300K.

سیستم همجوشی	شماره شاخه	% تغییر $\chi_{(\alpha)}$ در اثر α های تولیدی	در اثر $\chi_{(h)}$ تغییر % های تولیدی h
D-T	1	$(1.5-1.7) \cdot 10^{-4}$	-
	2	$(2.0-2.4) \cdot 10^{-4}$	-
D-D	2	$(1.4-1.7) \cdot 10^{-4}$	$(0.6-5.9) \cdot 10^{-4}$
	3	$(1.4-1.7) \cdot 10^{-4}$	$(0.6-5.9) \cdot 10^{-4}$
	4	$(0.06-0.47) \cdot 10^{-4}$	$(0.06-0.47) \cdot 10^{-4}$
	5	$(1.7-7.3) \cdot 10^{-7}$	$(1.0-6.6) \cdot 10^{-7}$

جدول ۵: مقادیر عددی بازده کاتالیزور میونی در هر یک از شاخه های شبکه همجوشی D-T ($\Phi=0.787$ و $C_d=0.67$) و مقایسه آنها با مقادیر آزمایشی (χ_{exp}) [14] در دمای 300K.

$\chi_{\mu dt}$	$\chi_{\mu dt}$	χ_{tot}	χ_{exp}	Error %
0.209	70.023	70.232	78.745	12.12

جدول ۶: مقایسه تعداد نوترونهای محاسبه شده (n_c) سیستم پیشنهادی D-D، با تعداد نوترونهای اندازه گیری شده (n_{ex}) از آزمایش [8] در سه دمای مختلف.

Φ	T(K)	$N_{\mu} (\times 10^8)$	$n_c (\times 10^6)$	$n_{ex} (\times 10^6)$	Error(%)
0.0221	25.5	4.622	1.958	2.241	14.45
0.0221	70	4.582	1.945	2.201	13.16
0.0211	150	1.314	0.624	0.599	4.00

نتیجه گیری

در این مقاله آهنگ چرخش میون با در نظر گرفتن انتقال میون از دوتریم و تریتم به ایزوتوپهای هلیوم در دوسیستم ناپایای D-D و D-T در دمای 300 K محاسبه شد. با توجه به جداول (۵) و (۶) می توان گفت

شبکه های مطرح شده، سیستم های همجوشی مربوطه را توجیه می کنند. به عنوان نمونه شبکه D-D بررسی شده، تعدد نوترونی سیستم همجوشی یاد شده را به ازاء نابودی میلیون ها میون در زمان عمر متوسط s^{-1} $10 \times 2/2$ توجیه می کند.

بر طبق جدول (۴)، محاسبات نشان می دهد که درصد تأثیرات انتقالات تعویضی میونی مورد نظر بر روی شاخه های شبکه D-T و D-D اصلاً قابل ملاحظه نیست. به یقین می توان گفت یکی از دلایل مهم چنین نتیجه ای می تواند به خاطر تولید نسبی کم هلیوم در سیستم باشد.

در مقایسه دوسیستم D-T و D-D در شرایط یکسان دمایی و محیطی، مقدار آهنگ چرخش میون در شرایط بهینه سیستم $D-T (C_d=C_t=0.5)$ تقریباً ۱۷ برابر مقدار آن در محیط D-D (دوتریم خالص) است. می توان سیستم D-T را به علت بزرگ بودن مقدار آهنگ چرخش میون به عنوان سیستم همجوشی برتر انتخاب کرد. اما با انجام مطالعات مؤثر هنوز به احتمال زیاد می توان به شرایطی رسید که سیستم های حاوی دوتریم خالص به صورت تشدید و اقماری با سیستم های شامل هلیوم ۳ بتواند با وجود فراوانی دوتریم، به سیستم های با بهره قابل قبول برسد. علاوه بر این می توان یک راکتور بزرگ $d+d$ تشدید را به عنوان هسته مرکزی در نظر گرفت که به طور همزمان سوخت شکافت پذیر و همجوشی پذیر برای توزیع در راکتورهای مختلف شکافت و همجوشی اقماری تولید کند تا این سیستم هم هنوز برای سیستم های همجوشی اقماری به عنوان یک کاندیدای مهم مورد توجه باشد.

منابع

1. S. Jones et al., Phy. Rev. Lett., Vol.51, No.19 (1983).
2. V.R. Bom et al., Hyp.Int., No.118, 103-109 (1999).
3. M.R. Eskandari, "Principle of Nuclear Fusion", Shiraz University Press (1995).
4. M.R. Eskandari, IJS and T, Trans.A, Vol.24, No.1, 2 (2000).
5. B. Gartner et al., Hyp. Int., 1-4, 271 (1998).
6. C. Petitjean, Nuclear Physics A, 543 (1992) 79C.
7. James S.Cohen, Phy. Rev. Lett., Vol. 58, No.14 (1987).
8. J. Zemeskal et al, Phy. Rev.A, Vol.42, No.1 (1990).

9. E.A.G. Armour, Can.J. Phys., Vol. 74, 401(1996).
10. D.V. Ballin et.al., Phy.Lett., Vol.141B, No.3, 4 (1984).
11. S. Eliezer and Z. Henis, Fusion Technology, Vol. 26, 46 (1994).
12. W. Czaplinski et al., Z.Phys. D27 (1996) 4169.

13. L.N. Bogdanaova etal., Priprint PSI-PR-97-33, PSI (1997).
14. T. Kammash, "Principles and Technology", Ann Arbor Science Publishers INC.Third Edition, (1997) MICH. 4816.