مطالعه آهنگ چرخش ميون در همجوشي μdd وμdt
با در نظر گرفتن ربايش ميون ازμd و μt توسط ايزوتوپهاي هليم توليدي و مقايسه آن با جوابهاي تجربي در دسترس

محمدرضا اسكندري، روح اله قيصري و شهرام مصلي نژاد: دانشگاه شيراز

چكيده

اخيراً آهنگ انتقال ميون از دوتريم و تريتيم به ايزوتوپهاي هليم توليدي در همجوشي كاتاليزور ميوني تعيين شده است. به نظر مي‌رسيد يكي از دلايل مهم عدم تطابق مقادير نظري و آزمايشي ضريب چرخش ميوني در اين شيوه همجوشي، نادیده گرفتن همين انتقالات در تئوري‌هاي قبلي باشد. در اين كار تحقيقي آهنگ چرخش ميون با در نظر گرفتن انتقال ميون از دوتريم و تريتيم به ايزوتوپهاي هليم ($^4He,^3He$) در دو سيستم همجوشي D-D وD-T محاسبه شده است. نتايج نشان مي‌دهد كه با وجود بالا بودن آهنگ‌هاي انتقالات فوق، تغيير قابل ملاحظه‌اي در مقدار آهنگ چرخش ميون وجود ندارد و هنوز مقدار خطاي نتايج نظري با مقادير آزمايشي در دو سيستمD-D وD-T قابل ملاحظه است.

مقدمه

هنگامي كه ميون وارد محيط حاوي ايزوتوپهاي هيدروژن ميشود شروع به انجام واكنش‌هاي زنجيره‌اي زيرمي‌كند.

۱- كند وسپس جذب يونهاي دوتريم وتريتيم مي‌شود و اتمهاي ميوني μd و μt را با آهنگ λ_a تشكيل ميدهد.

$$\mu + d \xrightarrow{\lambda_a} \mu d \qquad (۱)$$

$$\mu + t \xrightarrow{\lambda_a} \mu t \qquad (۲)$$

۲- ميون منفي طبق فرآيند زيراز اتم دوتريم به اتم تريتيم كه مفيدتر است منتقل مي‌شود. آهنگ انتقال ميون از دوتريم به تريتيم λ_{dt} است. واكنش (۲) در محيط دوتريم خالص قبل از تشكيل تريتيم‌ها انجام نمي‌شود .

$$\mu d + t \xrightarrow{\lambda_{dt}} \mu t + d + 48.1eV \qquad (۳)$$

۳- دراين مرحله مولكولهاي ميوني تشكيل مي‌شود. تشكيل اين مولكولهاي ميوني با آهنگ $\lambda_{(\ )}$ به صورت زير است. درمحيط دوتريم خالص مرحله شروع كار فقط با تشكيل μdd است:

$$d\mu + D_2 \ [(dd\mu)dee]^* \xrightarrow{\lambda_{\mu dd}} \qquad (٤)$$

$$t\mu + D_2 \xrightarrow{\lambda_{\mu dt-d}} [(dt\mu)dee]^* \qquad (٥)$$

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]

$$t\mu + DT \xrightarrow{\lambda_{\mu dt-t}} [(dt\mu)tee]^* \quad (٦)$$

$$t\mu + T_2 \xrightarrow{\lambda_{\mu tt}} [(tt\mu)tee]^* \quad (٧)$$

که درآن داريم[١]:

$$\lambda_{\mu dt} = \lambda_{\mu dt\text{-}d} C_d + \lambda_{\mu dt\text{-}t} C_t \quad (٨)$$

در رابطه بالا C_d و C_t به ترتيب كسر غلظتهاي دوتريم وتريتيم است وداريم:

$$C_t + C_d = 1 \quad (٩)$$

براي دوتريم خالص در شروع كار سيستم، $C_t = 0$ است.

٤ - در مرحله بعدي وقوع انجام واكنش هسته‌اي مطابق فرآيندهاي زير است:

$$\xrightarrow{\lambda^f_{\mu dt}} d + t \quad {}^4He + n + 17.6\ MeV \quad (١٠)$$

$$\xrightarrow{0.58\lambda^f_{\mu dd}} d + d \quad {}^3He + n + 3.3\ MeV \quad (١١)$$

$$t + P + 4\ MeV \quad \xrightarrow{0.42\lambda^f_{\mu dd}} d + d \quad (١٢)$$

$${}^4He + 2n + 10\ MeV \quad \xrightarrow{\lambda^f_{\mu tt}} t + t \quad (١٣)$$

بعد از توليد هسته نظير h (^3He)، واكنش همجوشي زير اتفاق مي‌افتد.

$$\alpha + P + 18.3\ MeV \quad \xrightarrow{\lambda^f_{\mu dt}} d + h \quad (١٤)$$

براي محيط خالص d+d، شروع واكنش با (١١) و(١٢) است ولي سپس با توليد هليم٣ و تريتيم از واكنش‌هاي (١١) و(١٢)، واكنش‌هاي (١٠) و(١٤) و حتي واكنش (١٣) نيز در كل واكنش‌ها شركت خواهند كرد. در روابط بالا $\lambda^f_{(\ )}$ آهنگ همجوشي هسته‌ها در مولكولهاي ميوني µdt، µdd، µtt وµdh مي‌باشند.

٥- بعد از انجام همجوشي احتمال چسبيدن ميون به ذرات باردار حاصل از واكنش وجود دارد، به ويژه در واكنش‌هاي (١٠) و(١٣)، ميون به ^4He و در واكنش (١١) به^3He چسبيده و آلفاي ميون دارتشكيل مي‌دهد دراين حالت ميون مقيد به هسته‌هاي آلفا وابسته مي‌شود، بنابراين براي انجام واكنش‌هاي بعدي در دسترس نخواهد بود [٢]،[٣]،[٤]،[٥].

طرح پيشنهادي سيستم D-D وD-T

نمودار طرح‌دار سيستم همجوشيD-D وD-T كمي پيچيده‌ترامّا واقعي‌تر مي‌شود اگر درفرآيندهاي همجوشي، ربايش ميون از اتمهاي ميون دارµd وµt توسط ايزوتوپهاي ^3He و^4He را نيز وارد شبكه كنيم، در اين صورت معادله (٩) به شكل زير درمي‌آيد.

$$C_d + C_t + C_{He} = 1 \quad (١٥)$$

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]

كه در آن

$$C_{He} = C_h + C_\alpha \qquad (١٦)$$

و C_h وC_α به ترتيب كسر غلظتهاي ^3He و^4He است. در تحقيقات اخير آهنگ ربايش ميون از دوتريم و تريتيم توسط ايزوتوپهاي هليم اندازه گيري شده است[٢] و[٥].

تاكنون ربايش ميون ازاتمهاي ميوني µd وµt توسط ايزوتوپهاي هليم توليدي به دليل دردسترس نبودن دادههاي مورد لزوم در محاسبات نظري منظور نميشد[٤]. در كار تحقيقاتي حاضر ربايش ميون از اتمهاي ميوني µd وµt توسط ايزوتوپهاي هليم را در شبكه عمومي همجوشي ارائه شده در شكلهاي (١) و(٢) براي D-T وD-D وارد شده است وتأثير آن را بر روي ضريب تكثير ميوني مطالعه كردهايم. اين انتقال ايزوتوپي توسط واكنشهاي زير انجام ميشود[٥] و[٦].

$$\mu d + {}^3He \xrightarrow{\lambda_{d^3He}} d + \mu^3He + 6.8KeV \qquad (١٧)$$

$$\mu d + {}^4He \xrightarrow{\lambda_{d^4He}} d + \mu^4He + 6.88KeV \qquad (١٨)$$

$$t\mu + {}^4He \xrightarrow{\lambda_{t^4He}} t + \mu^4He + 6.2KeV \qquad (١٩)$$

در روابط بالا $\lambda_{(\ )}$ آهنگهاي تعويضي مربوطه خواهند بود. در محيطD-T، ميون ميتواند مطابق واكنشهاي (١) و (٢) جذب شود. بعد از تشكيل µt با برخورد با دوتريم و تريتيمهاي محيط، مولكولهاي µdt وµtt مطابق (٥)، (٦) و(٧) تشكيل خواهند شد. سپس اينها ميتوانند همجوشي كنند. حاصل همجوشي هر مولكول دو كانال با ضرايب چسبندگي ω_d و ω_t خواهد بود. آلفاي ميوندار، µα، به ترتيب در شاخه هاي µdt وµtt پديد خواهد آمد و با احتمالات $1-\omega_d$ و $1-\omega_t$ هسته آلفا به ترتيب از شاخههاي µdt وµtt تشكيل خواهد شد. هسته آلفا پس از تشكيل ميتواند ميون را از محيط جذب كند. اين جذب به طور مستقيم يا غيرمستقيم خواهد بود. كه جذب غيرمستقيم آن توسط واكنشهاي (١٧) تا (١٩) توصيف ميشود و جذب مستقيم، گيراندازي ميونهاي آزاد است(شكل١). در محيط D-D، بعد از تشكيل µd مطابق واكنش (١)، اين اتم ميوني ميتواند با دوتريم زياد محيط برخورد كند و µdd مطابق واكنش (٤) تشكيل خواهد شد. در هر حال مولكول تشكيل شده با ثابت همجوشي $\lambda^f_{\mu dd}$ ، همجوشي ميكند. اين واكنش در روي شبكه (شكل٢) با عدد (1) نشان داده شده است. حاصل همجوشي µdd چهار كانال است: با احتمال$P_1(1-\omega_{s1})$ ميون از طريق كا نال (٣) آزاد خواهد شد. P_1 احتمال توليد ذره پروتون و ω_{s1} احتمال چسبيدن ميون به تريتيمهاي توليدي است. با احتمال $(1-P_1)(1-\omega_{s2})$، ميون ميتواند از كانال (٢) آزاد و چرخه را دوباره تكرار كند. يعني ميتواند از طريق كا نال (٦) همان مراحل بالا را انجام دهد. اتمهاي ميوندار µt، µh بعد از همجوشي µdd به ترتيب با احتمالات $P_1\omega_{s1}$ و $(1-P_1)\omega_{s2}$، توليد ميشوند. µt ميتواند با دوتريم خيلي زياد محيط برخورد مؤثر انجام دهد و به صورت µdt درآيد. اين

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]

مولكول با ثابت $\lambda^{f}_{\mu dt}$ مي‌تواند به طور جداگانه دو كانال را با احتمالات ω_{s3} و$(1-\omega_{s3})$ طي كند. امكان دارد ميون از طريق كانال شماره (٥) آزاد شود و وارد چرخه شود. ω_{s3} احتمال چسبيدن ميون به هسته توليدي α مي‌باشد. با آهنگ $\lambda_{\mu dh}$ و احتمالات مربوطه، اتم μh با دوتريم تشكيل μdh خواهد داد. μdh با ثابت همجوشي$\lambda^{f}_{\mu dh}$، با احتمالات ω_{s4} و ١-ω_{s4} به ترتيب كا نالهاي توليد $\mu\alpha$ و آزاد شدن ميون را باز خواهد كرد. پس ميون با احتمال ١ - ω_{s4} از اين شاخه هم مي‌تواند دوباره وارد چرخه شود. در كل شبكه λ_0 آهنگ نابودي ميون مي‌باشد. ميون داراي عمر متوسط حدود $٢/٢\times١٠^{-٦}$ ثا نيه است و بعد از گذشت اين مدت زمان از بين خواهد رفت. كانال‌هاي (٧) و(٨) مربوط به انتقالات تعويضي ذره ميون برطبق واكنش‌هاي (١٧) و(١٨) مي‌با شند.

معادلات حاكم بر سيستم D-T وD-D و محاسبات عددي

مانند معادلات د ينا ميكي حاكم بر حركت يك سيستم مكانيكي، معادلات حاكم بر سيستم همجوشي، تعدد تمام هسته‌ها، اتم‌هاي ميون‌دار و مولكولهاي ميون‌دار را كنترل مي كند.

معادلات سينتيك نقطه‌اي بر اساس شبكه‌هاي جامع، شكلهاي (١) و (٢)، جفت شده غير خطي تابع زمان است. معادلا ت حاكم بر سيستم D-T را مي‌توان چنين نوشت:

$$dN_{\mu}(t)/dt=+S_{\mu}-\lambda_0 N_{\mu}-\Phi\lambda_a C_d N_{\mu}-\Phi\lambda_a C_t N_{\mu}+\lambda^{f}_{\mu dt}N_{\mu dt}(1-\omega_d)+\lambda^{f}_{\mu tt}N_{\mu tt}(1-\omega_t)-\Phi\lambda'_a C_\alpha N_{\mu} \quad (٢٠)$$

$$dN_{\mu d}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu d}+\Phi\lambda_a C_d N_{\mu}-\Phi\lambda_{d\alpha}C_\alpha N_{\mu d}-\Phi\lambda_{dt}C_t N_{\mu d} \quad (٢١)$$

$$dN_{\mu t}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu t}-\Phi\lambda_{\mu dt}C_d N_{\mu t}+\Phi\lambda_a C_t N_{\mu}-\Phi\lambda_{t\alpha}C_\alpha N_{\mu t}+\Phi\lambda_{dt}C_t N_{\mu d}-\Phi\lambda_{\mu tt}C_t N_{\mu t} \quad (٢٢)$$

$$dN_{\mu\alpha}(t)/dt=-\lambda_0 N_{\mu\alpha}+\lambda^{f}_{\mu tt}N_{\mu tt}\omega_t+\lambda^{f}_{\mu dt}N_{\mu dt}\omega_d+\Phi\lambda_{d\alpha}C_\alpha N_{\mu d}+\Phi\lambda_{t\alpha}C_\alpha N_{\mu t}+\Phi\lambda'_a C_\alpha N_{\mu} \quad (٢٣)$$

$$dN_{\mu dt}(t)/dt=-\lambda^{f}_{\mu dt}N_{\mu dt}-\lambda_0 N_{\mu dt}+\Phi\lambda_{\mu dt}C_d N_{\mu t} \quad (٢٤)$$

$$dN_{\mu tt}(t)/dt=-\lambda^{f}_{\mu tt}N_{\mu tt}-\lambda_0 N_{\mu tt}+\Phi\lambda_{\mu tt}C_t N_{\mu t} \quad (٢٥)$$

$$dN_{d}(t)/dt=-\lambda_a C_d\Phi N_{\mu}+\lambda_{dt}C_t\Phi N_{\mu d}+\lambda_{d\alpha}C_\alpha\Phi N_{\mu d}+\lambda_0 N_{\mu d}-\lambda_{\mu dt}C_d\Phi N_{\mu t} \quad (٢٦)$$

$$dN_{t}(t)/dt=-\lambda_a C_t\Phi N_{\mu}+\lambda_0 N_{\mu t}-\lambda_{dt}C_t\Phi N_{\mu d}-\lambda_{\mu tt}N_{\mu t}C_t\Phi+\lambda_{t\alpha}C_\alpha\Phi N_{\mu t} \quad (٢٧)$$

و به طور مشابه معادلات حاكم برD-D را مطابق روابط زيرمي‌نويسيم:

$$dN_{\mu}(t)/dt=+S_{\mu}-\lambda_0 N_{\mu}-\Phi\lambda_a C_d N_{\mu}-\Phi\lambda'_a C_h N_{\mu}+P_1[\lambda^{f}_{\mu dd}N_{\mu dd}(1-\omega_{s1})]+(1-P_1)[\lambda^{f}_{\mu dd}N_{\mu dd}(1-\omega_{s2})]+\lambda^{f}_{\mu dt}N_{\mu dt}(1-\omega_{s3})+\lambda^{f}_{\mu dh}N_{\mu dh}(1-\omega_{s4})-\Phi\lambda''_a C_\alpha N_{\mu} \quad (٢٨)$$

$$dN_{\mu d}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu d}-\Phi\lambda_{\mu dd}C_d N_{\mu d}+\Phi\lambda_a C_d N_{\mu}-\Phi\lambda_{d\alpha}C_\alpha N_{\mu d}-\Phi\lambda_{dh}C_h N_{\mu d} \quad (٢٩)$$

$$dN_{\mu t}(t)/dt = -\lambda_0 N_{\mu t}-\Phi\lambda_{\mu dt}C_d N_{\mu t}+P_1\lambda^{f}_{\mu dd}N_{\mu dd}\omega_{s1} \quad (٣٠)$$

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]

$$dN_{\mu\alpha}(t)/dt=-\lambda_0 N_{\mu\alpha}+ \lambda^{f}_{\mu dh}N_{\mu dh}\omega_{s4} + \lambda^{f}_{\mu dt}N_{\mu dt}\omega_{s3} +\Phi\lambda_{d\alpha}C_{\alpha}N_{\mu d} + \Phi\lambda''_{a}C_{\alpha}N_{\mu} \quad (٣١)$$

$$dN_{\mu h}(t)/dt= -\lambda_0 N_{\mu h}+ (1-P_1)[\lambda^{f}_{\mu dd}N_{\mu dd}\omega_{s2}] - \Phi\lambda_{\mu dh}C_d N_{\mu h}+ \Phi\lambda_{dh}C_h N_{\mu d} +\Phi\lambda'_{a}C_h N_{\mu} \quad (٣٢)$$

$$dN_{\mu dd}(t)/dt=-\lambda^{f}_{\mu dd}N_{\mu dd}-\lambda_0 N_{\mu dd}+\Phi\lambda_{\mu dd}C_d N_{\mu d} \quad (٣٣)$$

$$dN_{\mu dt}(t)/dt=-\lambda^{f}_{\mu dt}N_{\mu dt}-\lambda_0 N_{\mu dt}+\Phi\lambda_{\mu dt}C_d N_{\mu t} \quad (٣٤)$$

$$dN_{\mu dh}(t)/dt= -\lambda^{f}_{\mu dh}N_{\mu dh} - \lambda_0 N_{\mu dh} + \Phi\lambda_{\mu dh}C_d N_{\mu h} \quad (٣٥)$$

$$dN_d(t)/dt= - \lambda_a C_d\Phi N_{\mu} - \lambda_{\mu dd}C_d\Phi N_{\mu d} + \lambda_{dh}C_h\Phi N_{\mu d} + \lambda_{d\alpha}C_{\alpha}\Phi N_{\mu d}- \lambda_{\mu dh}C_d\Phi N_{\mu h} +\lambda_0 N_{\mu d} - \lambda_{\mu dt}C_d\Phi N_{\mu t} \quad (٣٦)$$

$$dN_h(t)/dt=-\lambda'_{a}C_h\Phi N_{\mu} + \lambda_0 N_{\mu h} - \lambda_{dh}C_h\Phi N_{\mu d} +(1-P_1)\lambda^{f}_{\mu dd}N_{\mu dd}(1-\omega_{s2}) \quad (٣٧)$$

$$dN_{\alpha}(t)/dt=-\lambda''_{a}C_{\alpha}\Phi N_{\mu}+\lambda_0 N_{\mu\alpha}-\lambda_{d\alpha}C_{\alpha}\Phi N_{\mu d}+\lambda^{f}_{\mu dh}N_{\mu dh}(1-\omega_{s4})+\lambda^{f}_{\mu dt}N_{\mu dt}(1-\omega_{s3}) \quad (٣٨)$$

براي دو سيستم D-T و D-D تعداد هسته‌هاي موجود در محيط، را مي‌توان بر حسب غلظت‌هاي ذكر شده نوشت.

$$N_d(t)=C_d(t)\Phi N_0 \quad (٣٩)$$

$$N_h(t)=C_h(t)\Phi N_0 \quad (٤٠)$$

$$N_{\alpha}(t)=C_{\alpha}(t)\Phi N_0 \quad (٤١)$$

$$N_t(t)=C_t(t)\Phi N_0 \quad (٤٢)$$

در معادلات بالا، N_0 چگالي عددي هيدروژن مايع است. $C_d(t)$، $C_h(t)$، $C_t(t)$ و$C_{\alpha}(t)$ به ترتيب غلظت‌هاي نسبي تابع زماني دوتريم، هليم٣، تريتيم وهليم ٤ است. Φ چگالي يوني محيط است كه نسبت به LHD (چگالي عددي هيدروژن مايع) نوشته مي‌شود. مقادير بالا با زمان تغيير مي‌كنند. آهنگ‌هاي تشكيل و همجوشي معرفي شده اند. λ_0 آهنگ واپاشي ميون است.

$N_{(\ )}(t)$ ها چگالي ذره‌اي اتم‌هاي ميون‌دار ،مولكول‌هاي ميون‌دار و هسته‌ها است. جمله‌هاي طرف راست معادلات با علامت مثبت به معني اضافه شدن به تعداد هسته‌ها، اتم‌هاي ميون‌دار و يا مولكول‌ها با توجه به طرف چپ معادله مربوطه‌اند. جملات با علامت منفي به معني نابود شدن آنها در لحظه t از سيستم هستند. در جدول(١) پارامترهاي لازم مربوط به هر دو شبكه جامع پيشنهادي D-D وD-T ازمراجع دردماي ٣٠٠K ارائه شده است. اين معادلات غير خطي تابع زمان را به طور جداگانه براي دو سيستم مورد نظربه روش محاسبات عددي حل كرده‌ايم و نتايج حاصل درجدول (٢) در شرايط بهينه سيستمD-T ($C_d=C_t=0.5$) و درجدول(٣) براي سيستم-D D به ازاءΦ=0.1LHD،Φ=1LHD،... در دماي 300K ارائه شده است.در جدول(٢) پارامترهاي محاسبه شده $\chi_{\mu dt}$ و $\chi_{\mu tt}$ به ترتيب آهنگ چرخش ميون در شاخه هاي µdt وµtt در سيستم D-T است و χ_{tot} آهنگ چرخش كل است. در سيستمD-D، $X_{\mu dd}$ ، $X_{\mu dt}$ و $X_{\mu dh}$ به ترتيب تعداد همجوشي مولكول‌هاي ميون‌دار

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]

µdd، µdt و µdh است.χ_{tot} آهنگ چرخش كل در محيط D-D است. مقدار درصد تأثير هليمهاي توليدي بر شاخههاي سيستم D-T وD-D در جدول (٤) ارائه شده است. اين نتايج نشان ميدهد كه پديده انتقال ميون از اتمهاي µd و µt به ايزوتوپهاي هليم توليدي آنچنان قابل توجه نيست.اين نتيجه را ميتوان اين چنين توجيه كرد: با توجه به شبكههاي جامع ارائه شده بعد از هربارهمجوشي كردن مولكولهايي از نوع µdt وµtt در شبكه D-T حداكثر يك عدد هسته آلفا پديد ميآيد. حتي مطابق جدول(٢) اگر ميون ٨٧/٤٣ بار عمل كاتاليز را انجام دهد حداكثر ٨٧/٤٣ عدد هسته آلفا پديد خواهد آمد مطابق معادلات ارائه شده، تعدد اين نوع هسته آنچنان نيست كه بتواند تأثيري روي آهنگ چرخش ميون داشته باشد. در مورد سيستم D-D با توجه به جدول (٣) ميتوان گفت كه چون حداكثرتعداد هستههاي از نوع h وα زير عدد ٥ است اين دو نوع هسته هم در آهنگ چرخش ميون تأ ثير قابل ملاحظهاي ندارند.

ازمقايسه نتايج حاصل از تئوري شبكههاي جامع پيشنهادي درمحيطهاي D-T وD-D با نتايج در دسترس آزمايشي در جداول (٥) و(٦)، نشان داده شده است كه در شرايط يكسان هنوز بين جوابهاي تئوري و مقادير تجربي در دو محيط D-T وD-D اختلاف قابل ملاحظه اي وجود دارد. مقايسة محاسبات تئوري حاصل از حل معادلات مربوط به D-T وD-D با مقادير تجربي به ترتيب در جداول(٥) و(٦) ارائه شده است. درجدول (٥) آهنگ چرخش ميون محاسبه شده در سيستم D-T با مقادير تجربي مقايسه شده است. درجدول (٦) به علت در دسترس نبودن مقادير آزمايشي آهنگ چرخش ميون مربوط به سيستم D-D، تعداد نوترونهاي محاسبه شده از تئوري با مقادير آزمايشي در سه دماي K ٢٥/٥، ٧٠K و ١٥٠Kمقايسه شده است. در جدول (٦) نتايج محاسبات نشان ميدهد كه هر چه دماي محيط بالاتر رفته است ميزان خطاي محاسبات تئوري با جوابهاي تجربي كمتر ميشود.

جدول١: پارامترها واطلاعات مربوط به شبكه جامعD-D وD-T.

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

نظر گرفتن ربايش ميون ازµd و µt توسط ايزوتوپهاي هليم توليدي و مقايسه آن با جوابهاي تجربي در دسترس

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]

محمدرضا اسکندري، روح اله قيصري و شهرام مصلي نژاد: دانشگاه شيراز

چکيده

اخيراً آهنگ انتقال ميون از دوتريم و تريتيم به ايزوتوپهاي هليم توليدي در همجوشي کاتاليزور ميوني تعيين شده است. به نظر مي‌رسيد يکي از دلايل مهم عدم تطابق مقادير نظري و آزمايشي ضريب چرخش ميوني در اين شيوه همجوشي، نادیده گرفتن همين انتقالات در تئوري‌هاي قبلي باشد. در اين کار تحقيقي آهنگ چرخش ميون با در نظر گرفتن انتقال ميون از دوتريم و تريتيم به ايزوتوپهاي هليم ($^4He,^3He$) در دو سيستم همجوشي D-D وD-T محاسبه شده است. نتايج نشان مي‌دهد که با وجود بالا بودن آهنگ‌هاي انتقالات فوق، تغيير قابل ملاحظه‌اي در مقدار آهنگ چرخش ميون وجود ندارد و هنوز مقدار خطاي نتايج نظري با مقادير آزمايشي در دو سيستمD-D وD-T قابل ملاحظه است.

مقدمه

هنگامي که ميون وارد محيط حاوي ايزوتوپهاي هيدروژن ميشود شروع به انجام واکنش‌هاي زنجيره‌اي زيرمي‌کند.

۱- کند وسپس جذب يونهاي دوتريم وتريتيم مي‌شود و اتمهاي ميوني µd و µt را با آهنگ λ_a تشکيل ميدهد.

$$\mu + d \xrightarrow{\lambda_a} \mu d \qquad (۱)$$

$$\mu + t \xrightarrow{\lambda_a} \mu t \qquad (۲)$$

۲- ميون منفي طبق فرآيند زيراز اتم دوتريم به اتم تريتيم که مفيدتر است منتقل مي‌شود. آهنگ انتقال ميون از دوتريم به تريتيم λ_{dt} است. واکنش (۲) در محيط دوتريم خالص قبل از تشکيل تريتيم‌ها انجام نمي‌شود .

$$\mu d + t \xrightarrow{\lambda_{dt}} \mu t + d + 48.1eV \qquad (۳)$$

۳- دراين مرحله مولکولهاي ميوني تشکيل مي‌شود. تشکيل اين مولکولهاي ميوني با آهنگ $\lambda_{(\ )}$ به صورت زير است. درمحيط دوتريم خالص مرحله شروع کار فقط با تشکيل µdd است:

$$d\mu + D_2\ [(dd\mu)dee]^* \xrightarrow{\lambda_{\mu dd}} \qquad (٤)$$

$$t\mu + D_2 \xrightarrow{\lambda_{\mu dt-d}} [(dt\mu)dee]^* \qquad (٥)$$

$$t\mu + DT \xrightarrow{\lambda_{\mu dt-t}} [(dt\mu)tee]^* \qquad (٦)$$

$$t\mu + T_2 \xrightarrow{\lambda_{\mu tt}} [(tt\mu)tee]^* \qquad (٧)$$

که درآن داريم[۱]:

$$\lambda_{\mu dt} = \lambda_{\mu dt\text{-}d} C_d + \lambda_{\mu dt\text{-}t} C_t \qquad (٨)$$

در رابطه بالا C_d و C_t به ترتيب کسر غلظتهاي دوتريم وتريتيم است وداريم:

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]

$$C_t + C_d = 1 \qquad (۹)$$

براي دوتريم خالص در شروع کار سيستم، $C_t = 0$ است.

٤ - در مرحله بعدي وقوع انجام واکنش هستهاي مطابق فرآيندهاي زير است:

$$\xrightarrow{\lambda^f_{\mu dt}} d + t \; {}^4He + n + 17.6\ MeV \qquad (۱۰)$$

$$\xrightarrow{0.58\lambda^f_{\mu dd}} d + d \; {}^3He + n + 3.3\ MeV \qquad (۱۱)$$

$$t + P + 4\ MeV \xrightarrow{0.42\lambda^f_{\mu dd}} d + d \qquad (۱۲)$$

$${}^4He + 2n + 10\ MeV \xrightarrow{\lambda^f_{\mu tt}} t + t \qquad (۱۳)$$

بعد از توليد هسته نظير h (^3He)، واکنش همجوشي زير اتفاق ميافتد.

$$\alpha + P + 18.3\ MeV \xrightarrow{\lambda^f_{\mu dt}} d + h \qquad (۱٤)$$

براي محيط خالص d+d، شروع واکنش با (۱۱) و(۱۲) است ولي سپس با توليد هليم۳ و تريتيم از واکنشهاي (۱۱) و(۱۲)، واکنشهاي (۱۰) و(۱٤) و حتي واکنش (۱۳) نيز در کل واکنشها شرکت خواهند کرد. در روابط بالا $\lambda^f_{(\ )}$ آهنگ همجوشي هستهها در مولکولهاي ميوني µdt، µdd، µtt و µdh ميباشند.

٥- بعد از انجام همجوشي احتمال چسبيدن ميون به ذرات باردار حاصل از واکنش وجود دارد، به ويژه در واکنشهاي (۱۰) و(۱۳)، ميون به ^4He و در واکنش (۱۱) به ^3He چسبيده و آلفاي ميون دارتشکيل ميدهد دراين حالت ميون مقيد به هستههاي آلفا وابسته ميشود، بنابراين براي انجام واکنشهاي بعدي در دسترس نخواهد بود [۲]،[۳]،[٤]،[٥].

طرح پيشنهادي سيستم D-D و D-T

نمودار طرحدار سيستم همجوشيD-D و D-T کمي پيچيدهترامّا واقعيتر ميشود اگر درفرآيندهاي همجوشي، ربايش ميون از اتمهاي ميون دارµd و µt توسط ايزوتوپهاي ^3He و ^4He را نيز وارد شبکه کنيم، در اين صورت معادله (۹) به شکل زير درميآيد.

$$C_d + C_t + C_{He} = 1 \qquad (۱٥)$$

که در آن

$$C_{He} = C_h + C_\alpha \qquad (۱٦)$$

و C_h و C_α به ترتيب کسر غلظتهاي ^3He و ^4He است. در تحقيقات اخير آهنگ ربايش ميون از دوتريم و تريتيم توسط ايزوتوپهاي هليم اندازه گيري شده است[۲] و[٥].

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]

تاکنون ربایش میون ازاتمهاي میوني μd وμt توسط ایزوتوپهاي هلیم تولیدي به دلیل دردسترس نبودن دادههاي مورد لزوم در محاسبات نظري منظور نميشد[٤]. در کار تحقیقاتي حاضر ربایش میون از اتمهاي میوني μd وμt توسط ایزوتوپهاي هلیم را در شبکه عمومي همجوشي ارائه شده در شکلهاي (١) و(٢) براي D-T وD-D وارد شده است وتأثیر آن را بر روي ضریب تکثیر میوني مطالعه کردهایم. این انتقال ایزوتوپي توسط واکنشهاي زیر انجام ميشود[٥] و[٦].

$$\mu d + {}^3He \xrightarrow{\lambda_{d^3He}} d + \mu^3He + 6.8KeV \qquad (١٧)$$

$$\mu d + {}^4He \xrightarrow{\lambda_{d^4He}} d + \mu^4He + 6.88KeV \qquad (١٨)$$

$$t\mu + {}^4He \xrightarrow{\lambda_{t^4He}} t + \mu^4He + 6.2KeV \qquad (١٩)$$

در روابط بالا $\lambda_{(\ )}$ آهنگهاي تعویضي مربوطه خواهند بود. در محیطD-T، میون ميتواند مطابق واکنشهاي (١) و (٢) جذب شود. بعد از تشکیل μt با برخورد با دوتریم و تریتیمهاي محیط، مولکولهاي μdt وμtt مطابق (٥)، (٦) و(٧) تشکیل خواهند شد. سپس اینها ميتوانند همجوشي کنند. حاصل همجوشي هر مولکول دو کانال با ضرایب چسبندگي ω_d و ω_t خواهد بود. آلفاي میوندار، μα، به ترتیب در شاخه هاي μdt وμtt پدید خواهد آمد و با احتمالات $1-\omega_d$ و $1-\omega_t$ هسته آلفا به ترتیب از شاخههاي μdt وμtt تشکیل خواهد شد. هسته آلفا پس از تشکیل ميتواند میون را از محیط جذب کند. این جذب به طور مستقیم یا غیرمستقیم خواهد بود. که جذب غیرمستقیم آن توسط واکنشهاي (١٧) تا (١٩) توصیف ميشود و جذب مستقیم، گیراندازي میونهاي آزاد است(شکل١). در محیط D-D، بعد از تشکیل μd مطابق واکنش (١)، این اتم میوني ميتواند با دوتریم زیاد محیط برخورد کند و μdd مطابق واکنش (٤) تشکیل خواهد شد. در هر حال مولکول تشکیل شده با ثابت همجوشي $\lambda^f_{\mu dd}$ ، همجوشي ميکند. این واکنش در روي شبکه (شکل٢) با عدد (1) نشان داده شده است. حاصل همجوشي μdd چهار کانال است: با احتمال$P_1(1-\omega_{s1})$ میون از طریق کا نال (٣) آزاد خواهد شد. P_1 احتمال تولید ذره پروتون و ω_{s1} احتمال چسبیدن میون به تریتیمهاي تولیدي است. با احتمال $(1-P_1)(1-\omega_{s2})$، میون ميتواند از کانال (٢) آزاد و چرخه را دوباره تکرار کند. یعني ميتواند از طریق کا نال (٦) همان مراحل بالا را انجام دهد. اتمهاي میوندار μt، μh بعد از همجوشي μdd به ترتیب با احتمالات $P_1\omega_{s1}$ و $(1-P_1)\omega_{s2}$، تولید ميشوند. μt ميتواند با دوتریم خیلي زیاد محیط برخورد مؤثر انجام دهد و به صورت μdt درآید. این

مولکول با ثابت $\lambda^f_{\mu dt}$ ميتواند به طور جداگانه دو کانال را با احتمالات ω_{s3} و$(1-\omega_{s3})$ طي کند. امکان دارد میون از طریق کانال شماره (٥) آزاد شود و وارد چرخه شود. ω_{s3} احتمال چسبیدن میون به هسته تولیدي α ميباشد. با آهنگ $\lambda_{\mu dh}$ و احتمالات مربوطه، اتم μh با دوتریم تشکیل μdh خواهد داد. μdh با ثابت همجوشي$\lambda^f_{\mu dh}$، با احتمالات ω_{s4} و ١-ω_{s4} به ترتیب کا نالهاي تولید μα و آزاد شدن میون را باز خواهد کرد.

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]

پس ميون با احتمال ω_{s4} -۱ از اين شاخه هم مي‌تواند دوباره وارد چرخه شود. در كل شبكه λ_0 آهنگ نابودي ميون مي‌باشد. ميون داراي عمر متوسط حدود $۲/۲\times۱۰^{-۶}$ ثا نيه است و بعد از گذشت اين مدت زمان از بين خواهد رفت. كانال‌هاي (۷) و(۸) مربوط به انتقالات تعويضي ذره ميون برطبق واكنش‌هاي (۱۷) و(۱۸) مي‌با شند.

معادلات حاكم بر سيستم D-T وD-D و محاسبات عددي

مانند معادلات د ينا ميكي حاكم بر حركت يك سيستم مكانيكي، معادلات حاكم بر سيستم همجوشي، تعدد تمام هسته‌ها، اتم‌هاي ميون‌دار و مولكولهاي ميون‌دار را كنترل مي كند.

معادلات سينتيك نقطه‌اي بر اساس شبكه‌هاي جامع، شكلهاي (۱) و (۲)، جفت شده غير خطي تابع زمان است.

معادلا ت حاكم بر سيستم D-T را مي‌توان چنين نوشت:

$$dN_{\mu}(t)/dt=+S_{\mu}-\lambda_0N_{\mu}-\Phi\lambda_aC_dN_{\mu}-\Phi\lambda_aC_tN_{\mu}+\lambda^f_{\mu dt}N_{\mu dt}(1-\omega_d)+\lambda^f_{\mu tt}N_{\mu tt}(1-\omega_t)-\Phi\lambda'_aC_{\alpha}N_{\mu} \quad (۲۰)$$

$$dN_{\mu d}(t)/dt=-\lambda_0N_{\mu d}+\Phi\lambda_aC_dN_{\mu}-\Phi\lambda_{d\alpha}C_{\alpha}N_{\mu d}-\Phi\lambda_{dt}C_tN_{\mu d} \quad (۲۱)$$

$$dN_{\mu t}(t)/dt=-\lambda_0N_{\mu t}-\Phi\lambda_{\mu dt}C_dN_{\mu t}+\Phi\lambda_aC_tN_{\mu}-\Phi\lambda_{t\alpha}C_{\alpha}N_{\mu t}+\Phi\lambda_{dt}C_tN_{\mu d}-\Phi\lambda_{\mu tt}C_tN_{\mu t} \quad (۲۲)$$

$$dN_{\mu\alpha}(t)/dt=-\lambda_0N_{\mu\alpha}+\lambda^f_{\mu tt}N_{\mu tt}\omega_t+\lambda^f_{\mu dt}N_{\mu dt}\omega_d+\Phi\lambda_{d\alpha}C_{\alpha}N_{\mu d}+\Phi\lambda_{t\alpha}C_{\alpha}N_{\mu t}+\Phi\lambda'_aC_{\alpha}N_{\mu} \quad (۲۳)$$

$$dN_{\mu dt}(t)/dt=-\lambda^f_{\mu dt}N_{\mu dt}-\lambda_0N_{\mu dt}+\Phi\lambda_{\mu dt}C_dN_{\mu t} \quad (۲۴)$$

$$dN_{\mu tt}(t)/dt=-\lambda^f_{\mu tt}N_{\mu tt}-\lambda_0N_{\mu tt}+\Phi\lambda_{\mu tt}C_tN_{\mu t} \quad (۲۵)$$

$$dN_d(t)/dt=-\lambda_aC_d\Phi N_{\mu}+\lambda_{dt}C_t\Phi N_{\mu d}+\lambda_{d\alpha}C_{\alpha}\Phi N_{\mu d}+\lambda_0N_{\mu d}-\lambda_{\mu dt}C_d\Phi N_{\mu t} \quad (۲۶)$$

$$dN_t(t)/dt=-\lambda_aC_t\Phi N_{\mu}+\lambda_0N_{\mu t}-\lambda_{dt}C_t\Phi N_{\mu d}-\lambda_{\mu tt}N_{\mu t}C_t\Phi+\lambda_{t\alpha}C_{\alpha}\Phi N_{\mu t} \quad (۲۷)$$

و به طور مشابه معادلات حاكم برD-D را مطابق روابط زيرمي‌نويسيم:

$$dN_{\mu}(t)/dt=+S_{\mu}-\lambda_0N_{\mu}-\Phi\lambda_aC_dN_{\mu}-\Phi\lambda'_aC_hN_{\mu}+P_1[\lambda^f_{\mu dd}N_{\mu dd}(1-\omega_{s1})]+(1-P_1)[\lambda^f_{\mu dd}N_{\mu dd}(1-\omega_{s2})]+\lambda^f_{\mu dt}N_{\mu dt}(1-\omega_{s3})+\lambda^f_{\mu dh}N_{\mu dh}(1-\omega_{s4})-\Phi\lambda''_aC_{\alpha}N_{\mu} \quad (۲۸)$$

$$dN_{\mu d}(t)/dt=-\lambda_0N_{\mu d}-\Phi\lambda_{\mu dd}C_dN_{\mu d}+\Phi\lambda_aC_dN_{\mu}-\Phi\lambda_{d\alpha}C_{\alpha}N_{\mu d}-\Phi\lambda_{dh}C_hN_{\mu d} \quad (۲۹)$$

$$dN_{\mu t}(t)/dt=-\lambda_0N_{\mu t}-\Phi\lambda_{\mu dt}C_dN_{\mu t}+P_1\lambda^f_{\mu dd}N_{\mu dd}\omega_{s1} \quad (۳۰)$$

$$dN_{\mu\alpha}(t)/dt=-\lambda_0N_{\mu\alpha}+\lambda^f_{\mu dh}N_{\mu dh}\omega_{s4}+\lambda^f_{\mu dt}N_{\mu dt}\omega_{s3}+\Phi\lambda_{d\alpha}C_{\alpha}N_{\mu d}+\Phi\lambda''_aC_{\alpha}N_{\mu} \quad (۳۱)$$

$$dN_{\mu h}(t)/dt=-\lambda_0N_{\mu h}+(1-P_1)[\lambda^f_{\mu dd}N_{\mu dd}\omega_{s2}]-\Phi\lambda_{\mu dh}C_dN_{\mu h}+\Phi\lambda_{dh}C_hN_{\mu d}+\Phi\lambda'_aC_hN_{\mu} \quad (۳۲)$$

$$dN_{\mu dd}(t)/dt=-\lambda^f_{\mu dd}N_{\mu dd}-\lambda_0N_{\mu dd}+\Phi\lambda_{\mu dd}C_dN_{\mu d} \quad (۳۳)$$

$$dN_{\mu dt}(t)/dt=-\lambda^f_{\mu dt}N_{\mu dt}-\lambda_0N_{\mu dt}+\Phi\lambda_{\mu dt}C_dN_{\mu t} \quad (۳۴)$$

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]

$$dN_{\mu dh}(t)/dt= -\lambda^{f}_{\mu dh}N_{\mu dh} - \lambda_0 N_{\mu dh} + \Phi\lambda_{\mu dh}C_d N_{\mu h} \quad (٣٥)$$

$$dN_d(t)/dt= - \lambda_a C_d \Phi N_\mu - \lambda_{\mu dd}C_d\Phi N_{\mu d} + \lambda_{dh}C_h\Phi N_{\mu d} + \lambda_{d\alpha}C_\alpha\Phi N_{\mu d} - \lambda_{\mu dh}C_d\Phi N_{\mu h} + \lambda_0 N_{\mu d} - \lambda_{\mu dt}C_d\Phi N_{\mu t} \quad (٣٦)$$

$$dN_h(t)/dt=-\lambda'_a C_h\Phi N_\mu + \lambda_0 N_{\mu h} - \lambda_{dh}C_h\Phi N_{\mu d} + (1-P_1)\lambda^{f}_{\mu dd}N_{\mu dd}(1-\omega_{s2}) \quad (٣٧)$$

$$dN_\alpha(t)/dt=-\lambda''_a C_\alpha\Phi N_\mu + \lambda_0 N_{\mu\alpha} - \lambda_{d\alpha}C_\alpha\Phi N_{\mu d} + \lambda^{f}_{\mu dh}N_{\mu dh}(1-\omega_{s4}) + \lambda^{f}_{\mu dt}N_{\mu dt}(1-\omega_{s3}) \quad (٣٨)$$

براي دو سيستم D-T و D-D تعداد هسته‌هاي موجود در محيط، را مي‌توان بر حسب غلظت‌هاي ذكر شده نوشت.

$$N_d(t)=C_d(t)\Phi N_0 \quad (٣٩)$$

$$N_h(t)=C_h(t)\Phi N_0 \quad (٤٠)$$

$$N_\alpha(t)=C_\alpha(t)\Phi N_0 \quad (٤١)$$

$$N_t(t)=C_t(t)\Phi N_0 \quad (٤٢)$$

در معادلات بالا، N_0 چگالي عددي هيدروژن مايع است. $C_d(t)$، $C_h(t)$، $C_t(t)$ و$C_\alpha(t)$ به ترتيب غلظت‌هاي نسبي تابع زماني دوتريم، هليم٣، تريتيم وهليم ٤ است. Φ چگالي يوني محيط است كه نسبت به LHD (چگالي عددي هيدروژن مايع) نوشته مي‌شود. مقادير بالا با زمان تغيير مي‌كنند. آهنگ‌هاي تشكيل و همجوشي معرفي شده اند. λ_0 آهنگ واپاشي ميون است.

$N_{(\ )}(t)$ ها چگالي ذره‌اي اتم‌هاي ميون‌دار ،مولكول‌هاي ميون‌دار و هسته‌ها است. جمله‌هاي طرف راست معادلات با علامت مثبت به معني اضافه شدن به تعداد هسته‌ها، اتم‌هاي ميون‌دار و يا مولكول‌ها با توجه به طرف چپ معادله مربوطه‌اند. جملات با علامت منفي به معني نابود شدن آنها در لحظه t از سيستم هستند. در جدول(١) پارامترهاي لازم مربوط به هر دو شبكه جامع پيشنهادي D-D وD-T ازمراجع دردماي ٣٠٠K ارائه شده است. اين معادلات غير خطي تابع زمان را به طور جداگانه براي دو سيستم مورد نظربه روش محاسبات عددي حل كرده‌ايم و نتايج حاصل درجدول (٢) در شرايط بهينه سيستمD-T ($C_d=C_t=0.5$) و درجدول(٣) براي سيستم-D D به ازاءΦ=0.1LHD،Φ=1LHD،... در دماي 300K ارائه شده است.در جدول(٢) پارامترهاي محاسبه شده $\chi_{\mu dt}$ و $\chi_{\mu tt}$ به ترتيب آهنگ چرخش ميون در شاخه هاي µdt وµtt در سيستم D-T است و χ_{tot} آهنگ چرخش كل است. در سيستمD-D، $X_{\mu dd}$ ، $X_{\mu dt}$ و $X_{\mu dh}$ به ترتيب تعداد همجوشي مولكول‌هاي ميون‌دار µdd، µdt و µdh است.χ_{tot} آهنگ چرخش كل در محيط D-D است. مقدار درصد تأثير هليم‌هاي توليدي بر شاخه‌هاي سيستم D-T وD-D در جدول (٤) ارائه شده است. اين نتايج نشان مي‌دهد كه پديده انتقال ميون از اتم‌هاي µd و µt به ايزوتوپهاي هليم توليدي آنچنان قابل توجه نيست.اين نتيجه را مي‌توان اين چنين توجيه كرد: با توجه به شبكه‌هاي جامع ارائه شده بعد از هربارهمجوشي كردن مولكول‌هايي از نوع µdt وµtt در شبكه

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]

D-T حداكثر يك عدد هسته آلفا پديد مي‌آيد. حتي مطابق جدول(٢) اگر ميون ٨٧/٤٣ بار عمل كاتاليز را انجام دهد حداكثر ٨٧/٤٣ عدد هسته آلفا پديد خواهد آمد مطابق معادلات ارائه شده، تعدد اين نوع هسته آنچنان نيست كه بتواند تأثيري روي آهنگ چرخش ميون داشته باشد. در مورد سيستم D-D با توجه به جدول (٣) مي‌توان گفت كه چون حداكثرتعداد هسته‌هاي از نوع h وα زير عدد ٥ است اين دو نوع هسته هم در آهنگ چرخش ميون تأ ثير قابل ملاحظه‌اي ندارند.

ازمقايسه نتايج حاصل از تئوري شبكه‌هاي جامع پيشنهادي درمحيطهاي D-T وD-D با نتايج در دسترس آزمايشي در جداول (٥) و(٦)، نشان داده شده است كه در شرايط يكسان هنوز بين جوابهاي تئوري و مقادير تجربي در دو محيط D-T وD-D اختلاف قابل ملاحظه اي وجود دارد. مقايسة محاسبات تئوري حاصل از حل معادلات مربوط به D-T وD-D با مقادير تجربي به ترتيب در جداول(٥) و(٦) ارائه شده است. درجدول (٥) آهنگ چرخش ميون محاسبه شده در سيستم D-T با مقادير تجربي مقايسه شده است. درجدول (٦) به علت در دسترس نبودن مقادير آزمايشي آهنگ چرخش ميون مربوط به سيستم D-D، تعداد نوترونهاي محاسبه شده از تئوري با مقادير آزمايشي در سه دماي K ٧٠K،٢٥/٥ و ١٥٠K مقايسه شده است. در جدول (٦) نتايج محاسبات نشان مي‌دهد كه هر چه دماي محيط بالاتر رفته است ميزان خطاي محاسبات تئوري با جوابهاي تجربي كمتر مي‌شود.

جدول١: پارامترها واطلاعات مربوط به شبكه جامعD-D وD-T.

Value [Ref.]	Parameter (dimension)	Value [Ref.]	Parameter (dimension)
$14.7*10^7$ [1]	$\lambda_{\mu dt-d}(s^{-1})$	0.0027 [6]	ω_{s1}
$8.6*10^7$ [1]	$\lambda_{\mu dt-t}(s^{-1})$	0.13 [7]	ω_{s2}
10^8 [5]	$\lambda_{\mu dh}(s^{-1})$	0.0045 [7]	$\omega_{s3}=\omega_d$
$1.7*10^6$ [2]	$\lambda_{\mu tt}(s^{-1})$	0.0045 [7]	ω_{s4}
$4*10^8$ [8]	$\lambda^f_{\mu dd}(s^{-1})$	0.4 [8]	P_1
$1.1*10^{12}$ [11]	$\lambda^f_{\mu dt}(s^{-1})$	$4*10^{12}$ [9]	λ_a (s^{-1})
10^2 [12,13]	$\lambda^f_{\mu dh}(s^{-1})$	10^6 [5]	$\lambda'_a=\lambda''_a(s^{-1})$
λ_{dt} (s^{-1})	□ $3*10^8$ □Â□ЈЬ□ □ ¿□ □ □□□□ □ □□ □ □□□□ □ □□ □ □ □□ □□□□ □ ЈЬ□ □□□□ □ □λ_{dt} (s^{-1}) □ λ_{dt} (s^{-1})		

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]

	λ_{dt} (s^{-1})

خ

تاليزور ميوني در هر يك از شاخه هاي شبكهD-T
$(C_d=C_t=0.5)$
تاليزور ميوني در هر يك از شاخه هاي شبكهD-T
$(C_d=C_t=0.5)$
به ازاء Φ هاي مختلف در دماي 300K.

Φ	$\chi_{\mu tt}$	$\chi_{\mu dt}$	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

جدول۳:تعداد همجوشي هر مولكول وآهنگ چرخش كل در هر يك از شاخه هاي شبكهD-D به ازاء Φ هاي مختلف در دماي300K .

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

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]

0.90	4.07	0.00	0.31	4.07
1.00	4.52	0.00	0.35	4.52

جدول٤: مقادير مربوط به درصد تأثير هسته هاي α (^{4}He) توليدي در سيستم D-T و هسته هاي α وh (^{3}He) توليدي بر آهنگ چرخش ميون مربوط به هر شاخه در دماي300K .

سيستم همجوشي	شمارة شاخه	% تغيير $\chi_{(\ )}$در اثر αهاي توليدي	در اثر $\chi_{(\ )}$%تغيير هاي توليدي h
D-T	1	$(1.5\text{-}1.7)*10^{-4}$	-
	2	$(2.0\text{-}2.4)*10^{-4}$	-
D-D	2	$(1.4\text{-}1.7)*10^{-4}$	$(0.6\text{-}5.9)*10^{-4}$
	3	$(1.4\text{-}1.7)*10^{-4}$	$(0.6\text{-}5.9)*10^{-4}$
	4	$(0.06\text{-}0.47)*10^{-4}$	$(0.06\text{-}0.47)*10^{-4}$
	5	$(1.7\text{-}7.3)*10^{-7}$	$(1.0\text{-}6.6)*10^{-7}$

جدول٥:مقادير عددي بازده كاتاليزور ميوني در هر يك از شاخه هاي شبكة همجوشي D-T (C_d=0.67 وΦ=0.787) و مقايسه آنها با مقادير آزمايشي (χ_{exp})[14]در دماي300K.

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

جدول ٦: مقايسه تعداد نوترونهاي محاسبه شده(n_c) سيستم پيشنهادي D-D ، با تعداد نوترونهاي اندازه گيري شده (n_{ex}) از آزمايش[8] در سه دماي مختلف.

Φ	T(K)	N_μ($\times10^8$)	n_c($\times10^6$)	n_{ex}($\times10^6$)	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

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]

نتيجه گيري

در اين مقاله آهنگ چرخش ميون با در نظر گرفتن انتقال ميون از دوتريم وتريتيم به ايزوتوپهاي هليم در دوسيستم ناپاياي D-D و D-T در دماي ۳۰۰K محاسبه شد. با توجه به جداول (٥) و(٦) مي‌توان گفت

شبكه‌هاي مطرح شده، سيستم‌هاي همجوشي مربوطه را توجيه مي‌كنند. به عنوان نمونه شبكه D-D بررسي شده، تعدد نوتروني سيستم همجوشي ياد شده را به ازاء نابودي ميليون‌ها ميون درزمان عمر متوسط s^{-6} ۲/۲×۱۰توجيه مي‌كند.

برطبق جدول(٤)، محاسبات نشان مي‌دهد كه درصد تأثيرات انتقالات تعويضي ميوني مورد نظر بر روي شاخه‌هاي شبكه D-T و D-D اصلاً قابل ملاحظه نيست. به يقين مي‌توان گفت يكي از دلايل مهم چنين نتيجه‌اي مي‌تواند به خاطر توليد نسبي كم هليم درسيستم باشد.

در مقايسه دوسيستم D-T و D-D در شرايط يكسان دمايي ومحيطي، مقدارآهنگ چرخش ميون در شرايط بهينه سيستمD-T($C_d=C_t=0.5$) تقريباً ۱۷ برابر مقدار آن در محيطD-D(دوتريم خالص) است. مي‌توان سيستم D-T را به علت بزرگ بودن مقدار آهنگ چرخش ميون به عنوان سيستم همجوشي برتر انتخاب كرد. اما با انجام مطالعات مؤثر هنوزبه احتمال زيادمي‌توان به شرايطي رسيد كه سيستم‌هاي حاوي دوتريم خالص به صورت تشديدي و اقماري با سيستم‌هاي شامل هليم۳ بتواند با وجود فراواني دوتريم، به سيستم‌هاي با بهره قابل قبول برسد. علاوه براين مي‌توان يك راكتور بزرگ d+d تشديدي را به عنوان هسته مركزي در نظر گرفت كه به‌طور همزمان سوخت شكافت پذير وهمجوشي پذير براي توزيع در راكتورهاي مختلف شكافت و همجوشي اقماري توليد كند تا اين سيستم هم هنوز براي سيستم‌هاي همجوشي اقماري به عنوان يك كانديداي 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).

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]

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.

[Downloaded from jsci.khu.ac.ir on 2026-10-31]