

parvazin@cc.iut.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۱۲/۱۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۴/۲)



موجب بالارفتن آهنگ برهم کنش همجوشی D-T می شود.



متعاقب واکنش فوق، فشار ناشی از برهم کنش ها، باعث فروریزی ساچمه می شود. این موج فشار تقریباً با سرعت امواج مکانیکی (امواج صوتی) در محیط ساچمه منتشر می گردد. که این امر باعث محدود شدن زمان محصورسازی تا مرتبه نانو ثانیه می شود. در این مدت زمان تقریباً ۶۰-۳۰ درصد سوخت مصرف می شود [۱ و ۲].

یکی از روش های مطرح در همجوشی هسته ای، روش محصورسازی لختی است. در این روش، می توان با متراکم نمودن سوخت دوتریوم-تریٹیوم درون ساچمه ای به شعاع چند میلی متر توسط پرتوهای محرک موجب چگال شدن سوخت و افزایش دمای سوخت تا ۱۰ keV شد. در این دما اتم های سوخت به حالت پلازما درآمده اند. بر اثر تراکم، چگالی سوخت حدود ۱۰۰۰-۵۰۰ برابر سوخت جامد می شود، که

با تعریف کسر مصرف سوخت f به صورت زیر داریم:

$$f = \frac{n_i - n_f}{n_i}, \quad (4)$$

$$\tau = \frac{2}{\langle \sigma v \rangle_{DT}} \frac{m_i}{\rho} \left(\frac{f}{1-f} \right), \quad (5)$$

$$t_d = \frac{R}{v_d}, \quad v_d = \left[\frac{3KT_i}{m_i} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

ρ چگالی سوخت در زمان سوختن، m_i جرم یون، t_d زمان فروریزی ساچمه، v_d سرعت موج صوتی در ساچمه، K ثابت بولتزمن و T_i دمای یون است. چون زمان سوختن کمتر از زمان فروریزی ساچمه است بنابراین خواهیم داشت:

$$\rho R > \frac{2m_i v_d}{\langle \sigma v \rangle_{DT}} \left(\frac{f}{1-f} \right) \quad (7)$$

این نامساوی معرف معیار لاسون برای پلاسمای محصور شده به روش لختی است. به طور مثال برای سوخت D-T در دمای ۲۰ keV با تخمین کسر سوختن ۵۰ درصد، معیار فوق به صورت $\rho R > \frac{6g}{cm^2}$ به دست می‌آید. همچنین برای اشتعال سوخت D-T در دمای ۵ keV و کسر مصرف سوخت ۵۰ درصد $\rho R > 2-3 \frac{g}{cm^2}$ به دست می‌آید. بنابراین اگر بخواهیم جرم M از سوخت مشتعل شود باید سوخت را تا چگالی معادل رابطه زیر متراکم کنیم.

$$\rho_m = \left(\frac{2\pi \langle \rho R \rangle^2}{3M} \right)^{\frac{1}{2}} \approx 200-300 \left(\frac{mg}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{g}{cm^3} \right) \quad (8)$$

اشتعال سریع یکی از روش‌های همجوشی لختی است که در آن مراحل تراکم و اشتعال از یکدیگر جدا شده است. در این روش انرژی دهی در دو مرحله صورت می‌گیرد [۳]:

۱. فرآیند فشرده سازی سوخت ساچمه‌های D-T توسط لیزر ویا پرتوهای یونی (مرحله تراکم).
۲. ورود باریکه پرتوی لیزر پر انرژی از یک نقطه برای ایجاد اشتعال و جرقه احتراق به ساچمه، (مرحله اشتعال).

بعد از تراکم ساچمه در مرحله دوم، باریکه‌ای از لیزر با توان

مکانیزم اشتعال ساچمه در چهار مرحله پرتودهی، تراکم، اشتعال و انفجار انجام می‌شود. پرتودهی ساچمه سوخت، از اطراف می‌تواند به وسیله پرتوهای محرک لیزر، یون‌های سبک و یا سنگین انجام گردد. پرتوهای محرک انرژی خود را در لایه جذب کننده سوخت به جای می‌گذارند. که باعث گرم شدن و منبسط شدن این لایه می‌شود. از آن جایی که این عمل خیلی سریع انجام می‌شود نیروی عکس العمل ناشی از تبخیر لایه جذب کننده، ساچمه را به سمت درون متراکم می‌کند به طوری که ساچمه به چگالی ۱۰۰۰ برابر چگالی حالت جامد می‌رسد، که این مرحله تراکم ساچمه است. همزمان با انبساط لایه جذب کننده بر اثر برهم‌کنش پرتوی محرک با اتم‌ها و مولکول‌های این لایه، الکترون‌هایی با انرژی‌های بالا آزاد می‌شوند که به آنها الکترون‌های نسبیته گفته می‌شود. در مرحله اشتعال الکترون‌ها نیز به درون ساچمه انتشار می‌یابند که با به جا گذاشتن انرژی خود در ناحیه سوخت ساچمه باعث گرم شدن سوخت و رسیدن به دمای خود اشتعالی می‌شوند و واکنش‌های همجوشی در داخل ساچمه انجام می‌گیرد. این ساچمه تا زمانی که فشار خارجی ناشی از نیروهای لختی از فشار درونی ناشی از انجام همجوشی بیشتر باشد به سوختن ادامه می‌دهد، که این زمان از مرتبه نانو ثانیه است. بعد از آن ساچمه منفجر می‌شود و انرژی خود را آزاد می‌کند (مرحله انفجار).

$$\rho R$$

اگر شعاع سوخت متراکم شده R باشد و این شعاع در مدت زمان τ ثابت بماند، آهنگ مصرف یون‌ها برابر آهنگ برهم‌کنش‌های همجوشی است یعنی:

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{1}{2} n^2(t) \langle \sigma v \rangle_{DT}. \quad (2)$$

اگر n_i چگالی یون‌ها در زمان آغاز سوخت و n_f چگالی یونی در پایان مدت زمان سوخت باشد بنابراین با انتگرال‌گیری از رابطه (۲) داریم:

$$\tau = \frac{2}{\langle \sigma v \rangle_{DT}} \left[\frac{1}{n_f} - \frac{1}{n_i} \right], \quad (3)$$

جدول ۱. مقایسه پارامترهای همجوشی اشتعال سریع و مستقیم.

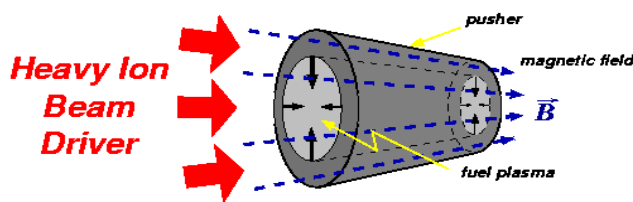
اشتعالم مستقیم	اشتعالم سریع	
۴	۱/۳۳	انرژی لیزر (مگاژول)
٪۹	٪۹	بازده لیزر
۱۰۰	۳۰۰	بهره ساچمه

سوخت دوتریوم - تریتیوم در روش اشتعال سریع است. به منظور بالا بردن بهره همجوشی از یک میدان مغناطیسی در حدود نیم تسلا در محل ساچمه سوخت استفاده می‌کنیم. با اعمال میدان مغناطیسی خارجی به ساچمه سوخت، می‌توان پلازما تولید شده در ساچمه را برای مدتی طولانی تر محصور کرد که این باعث افزایش آهنگ همجوشی در ساچمه می‌گردد. با این ایده که میدان مغناطیسی برای هدایت گرمایی و بهبود آهنگ انتقال انرژی الکترون‌های نسبی و پروتون‌های پر انرژی در ساچمه می‌باشد. از این رو این روش هم چنان زیر مجموعه همجوشی لختی می‌باشد. میدان اعمال شده نقش مؤثری در کاهش اتلاف رسانش گرمایی پلازما به عهده دارد. از میان پیکربندی‌های مغناطیسی متعددی که می‌توان برای ساچمه پلازما انتخاب کرد $z - pinch$ مورد توجه خاصی قرار گرفته است. جهت جریان در راستای محور استوانه جهت میدان مغناطیسی در $z - pinch$ حول محور استوانه‌ای پینچ است [۵،۴].

برای بررسی ترابرد الکترون‌ها، فوتون‌ها، نوترون‌ها و پروتون‌ها از کد محاسباتی MCNPX استفاده شده است [۶ و ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰]. همچنین از کد FLUKA برای ترابرد پروتون‌های پر انرژی استفاده شده است. FLUKA کد چند منظوره ترابرد ذرات مبتنی بر روش آماری مونت کارلو می‌باشد، که حاصل کار سازمان هوا و فضای آمریکا (NASA) و سازمان تحقیقات فیزیک هسته‌ای و ذرات اروپا و دانشگاه میلان می‌باشد. این کد اولین بار در سال ۱۹۶۲ در سرن برای ترابرد باریکه پروتون پر انرژی مورد استفاده قرار گرفت. آن چه که این کد را از دیگر کدهای ترابرد ذرات متمایز می‌کند توانایی ترابرد

پتاوات و با شدت $10^{19} - 10^{20} \text{ w/cm}^2$ را از طریق روزنه ایجاد شده در ساچمه به یک صفحه فلزی می‌تابانند. از آن جایی که نقطه اشتعال ساچمه دارای چگالی بیشتری از چگالی بحرانی عبور نور است. بنابر این لیزر نمی‌تواند درون ماده فوق جامد نفوذ کند. یک صفحه فلزی در داخل ساچمه قبل از ناحیه سوخت متراکم شده طوری قرار می‌گیرد که لیزر به صفحه فلزی برخورد کند و در اثر برهم‌کنش لیزر با فلز، الکترون‌های نسبی با انرژی چندین مگا الکترون ولت در داخل ساچمه تولید شوند. برای این منظور، جریان الکترون‌ها در حدود 10^{12} A/cm^2 است. سپس الکترون‌ها به سرعت، درون سوخت فوق چگال نفوذ می‌کنند و با جایگذاری انرژی خود در ناحیه کوچکی از ساچمه باعث گرم شدن آن تا دمای 10 keV می‌شود. الکترون‌ها باید بتوانند در حدود 100 میکرومتر درون ساچمه نفوذ کنند و خود را به ناحیه اشتعال برسانند، در این صورت این ناحیه کوچک سوخت، می‌تواند مشتعل شود. ذرات آلفا که توسط واکنش $D-T$ تولید می‌شوند، می‌توانند حرارت مورد نیاز اشتعال را تأمین کنند و با جایگذاری انرژی خود در ساچمه، موج اشتعال در ساچمه انتشار می‌یابد [۳]. آن چه که از نتایج تجربی و شبیه سازی به دست آمده، جدول ۱، گویای این مطلب است که بهره انرژی در اشتعال سریع نسبت به اشتعال مستقیم بیشتر است. برای اینکه اشتعال سریع انجام شود و به بهره‌های بالا دست یافت، ساچمه‌ها را در مدل‌های مختلفی می‌سازند. مدل‌هایی که تاکنون بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند مدل کروی و استوانه‌ای بوده‌اند [۳ و ۴].

در این مقاله هدف اصلی بررسی بهره همجوشی ساچمه



شکل ۱. شمایی از ساچمه استوانه‌ای در میدان مغناطیسی.

در اندازه ۰/۲۵ و ۰/۵ تسلا را نیز در نظریه‌ی گیریم و آهنگ انتقال انرژی را حساب می‌کنیم. میدان مغناطیسی اعمال شده توسط کد FLUKA اعمال می‌شود.

ساچمه استوانه‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است. این ساچمه از یک لایه سوخت جامد دوتریوم و تریتیوم با نسبت مساوی و چگالی اولیه $\rho_{D-T} = 0/225 \frac{g}{cm^3}$ درست شده است. لایه جذب کننده (روی لایه سوخت قرار می‌گیرد) از جنس Be با چگالی اولیه $\rho_{Be} = 1/85 \frac{g}{cm^3}$ استفاده شده است. لایه نگه دارنده (طلا) با چگالی $\rho_{Au} = 19/5 \frac{g}{cm^3}$ است. از آلومینیوم با چگالی $\rho_{Al} = 2/7 \frac{g}{cm^3}$ برای تولید الکترون‌های نسبی و از مس با چگالی $\rho_{Cu} = 8/9 \frac{g}{cm^3}$ برای تولید پروتون‌های پر انرژی استفاده شده است. برای ساچمه استوانه‌ای با شرط زیر اشتعال انجام می‌شود.

$$KT = 5-7 \text{ keV},$$

$$\rho R \geq 0/2-0/3 \frac{g}{cm^2}, \quad (9)$$

که پارامتر ρR در ساچمه استوانه‌ای کوچکتر از ساچمه کروی بهینه سازی نسبت‌های شعاع به صورت زیر انجام می‌گیرد.

$$\frac{R_{D-T}}{R_{Be}} = 0/6, \quad \frac{R_{Au}}{R_{Be}} = 1/5. \quad (10)$$

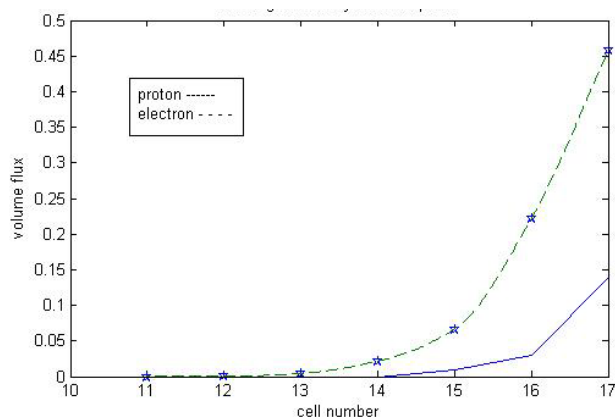
در ساچمه استوانه‌ای ابتدا ساچمه به حالت فشردگی کامل می‌رسد. اندازه ساچمه، چگالی لایه‌های مختلف و نوع مواد لایه‌های مختلف ساچمه در جدول ۲ آورده شده است.

ذرات باردار در میدان مغناطیسی یکنواخت است. این کد با ۴۷۰۰۰۰ خط برنامه نویسی فورترن نوشته شده است و در سیستم عامل لینوکس نصب می‌شود [۱۱ و ۱۲].

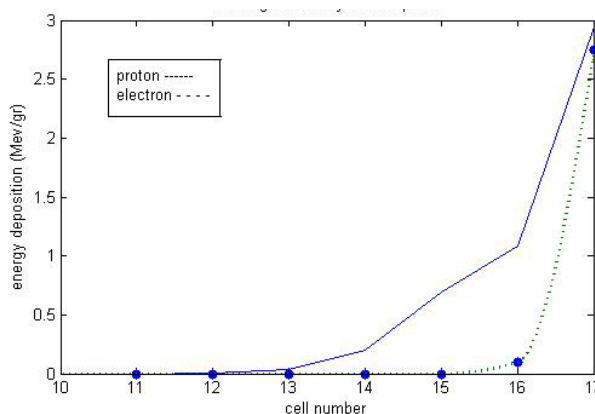
همان‌طور که در بخش ۴ اشاره شد هدف اصلی در این کار بررسی بهره همجوشی ساچمه‌های D-T با به کارگیری یک میدان مغناطیسی خارجی در محل پروتودی ساچمه است. در این قسمت به بررسی آهنگ انتقال انرژی الکترون‌های نسبی و پروتون‌های پر انرژی، به لایه‌های مختلف ساچمه استوانه‌ای در اشتعال سریع، در غیاب و با حضور میدان مغناطیسی می‌پردازیم. همچنین به محاسبه بهره همجوشی در حضور میدان‌های مغناطیسی ۰/۲۵ و ۰/۵ تسلا می‌پردازیم. ساچمه استوانه‌ای که در نظر می‌گیریم دارای پارامترهایی، به صورت R_{D-T} : شعاع سوخت (D-T)، R_{Be} : شعاع لایه برلیوم، R_{Au} : شعاع لایه طلا و H: ارتفاع ساچمه استوانه‌ای است. چگالی لایه‌ها با پارامترهای، چگالی سوخت D-T: ρ_{DT} : چگالی لایه طلا ρ_{Au} : چگالی لایه برلیوم و ρ_{Be} : چگالی لایه برلیوم تعریف می‌شود. ابتدا ساچمه را توسط کد MCNPX طراحی کردیم. پارامترهایی مانند شعاع، چگالی، نوع ماده و انرژی الکترون‌ها و پروتون‌ها را در برنامه تعریف کردیم. در داخل ساچمه برش کوچکی در امتداد محور ایجاد شده است. با تاباندن لیزر به صفحه فلزی از جنس آلومینیوم که در انتهای برش ساچمه استوانه‌ای قرار داده‌ایم الکترون‌های با انرژی ۱-۱۰ MeV تولید می‌شوند. چنانچه صفحه فلزی از جنس مس قرار دهیم پروتون‌های با انرژی ۵-۳۵ MeV تولید می‌شوند. ما آهنگ انتقال انرژی الکترون‌های نسبی و پروتون‌های پر انرژی در لایه‌های مختلف ساچمه استوانه‌ای را حساب کردیم. همچنین میدان‌های مغناطیسی محوری

جدول ۲. مشخصات ساچمه استوانه‌ای در بیشینه تراکم.

جرم m_{tot} (g)	چگالی ρ_{max} (g/cm ³)	شعاع R_{tot} (cm)	
۹/۳۸۰۰	۲۰۰	۰/۱۲۸۷۲	ناحیه سوخت جامد
۴۷/۳	۱۸۰	۰/۳۴۵۵۰۲	لایه برلیوم
۱۰/۲	۱۰۰۰	۰/۴۸۱۵۹	لایه طلا
۰/۰۱۲۳۶	۲/۷۵۲	۰/۰۱۴۹	آلومینیوم



شکل ۳. مقایسه شار حجمی الکترون و پروتون در لایه‌های مختلف ساچمه استوانه‌ای در اشتعال مستقیم توسط کد MCNPX.



شکل ۴. مقایسه آهنگ انتقال انرژی الکترون و پروتون به لایه‌های مختلف ساچمه استوانه‌ای در اشتعال مستقیم توسط کد MCNPX.

پروتون در ساچمه برخورددار است. در عوض انتقال انرژی پروتون به ساچمه بیشتر است چرا که پروتون از طریق برهم‌کنش‌های هسته‌ای و الکترون از طریق برهم‌کنش‌های اتمی انرژی خود را در ساچمه به جا می‌گذارند. به علت چگال بودن ساچمه، ذرات نمی‌توانند انرژی خود را در ناحیه سوخت به جا بگذارند از این رو اشتعال در زمان دیرتری صورت می‌گیرد و باعث می‌شود که کسر کمتری از سوخت مشتعل شود و بهره همجوشی در روش اشتعال مستقیم کاهش یابد. در چنین حالتی اعمال یک میدان مغناطیسی کمکی در رفع این مشکل نمی‌کند. از این رو اعمال میدان در روش اشتعال سریع مطرح می‌شود. چرا که طبق شکل ۴ در این حالت ذرات می‌توانند در داخل ناحیه سوخت نفوذ کنند. بنابر این روش اشتعال سریع مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در روش اشتعال سریع برشی در ساچمه ایجاد می‌کنیم و در

در ابتدا برای آن که مقایسه‌ای بین روش اشتعال مستقیم و اشتعال سریع از دیدگاه آهنگ انتقال انرژی توسط ذرات به ساچمه داشته باشیم. ساچمه بدون برش استوانه‌ای توسط کد MCNPX طراحی می‌کنیم. در این حالت ساچمه به ۱۷ سلول به ترتیب از محور استوانه به طرف خارج تقسیم شده است. پنج سلول در ناحیه سوخت، ده سلول در ناحیه برلیوم و دوسلول در ناحیه طلا قرار دارند. در اثر برهم‌کنش لیزر با سطح خارجی ساچمه استوانه‌ای شاری از ذرات (الکترون یا پروتون) به طرف محور استوانه ترابرد می‌شوند.

نمودار آهنگ انتقال انرژی و شار در لایه‌های مختلف (پنج لایه اول سوخت جامد، ده لایه برلیوم و دو لایه طلا) در روش اشتعال مستقیم در شکل‌های ۲ و ۳ رسم شده است. در این حالت چشمه، سطح یک لایه استوانه‌ای همسانگرد است که ذرات به سمت محور استوانه ترابرد می‌کنند. همان‌گونه که در شکل ۲ مشهود است الکترون از قدرت نفوذ بیشتری نسبت به

برای محاسبه بهره انرژی همجوشی در ساچمه با استفاده از روابط تجربی مرجع [۱۹] محاسبات انجام گردید، انرژی لیزر اشتعال گر برای پروتون برابر است با:

$$E_{ig} = 140 \left(\frac{\rho}{100 \left(\frac{g}{cm^3} \right)} \right)^{-1/85} \text{ kJ}, \quad (11)$$

و انرژی لیزر اشتعال گر برای الکترون به صورت زیر است.

$$E_{ig} = 140 \left(\frac{\rho}{100 \left(\frac{g}{cm^3} \right)} \right)^{-1/93} \text{ kJ}, \quad (12)$$

$$E_{d-ig} = \frac{E_{ig}}{\eta_{ig}}. \quad (13)$$

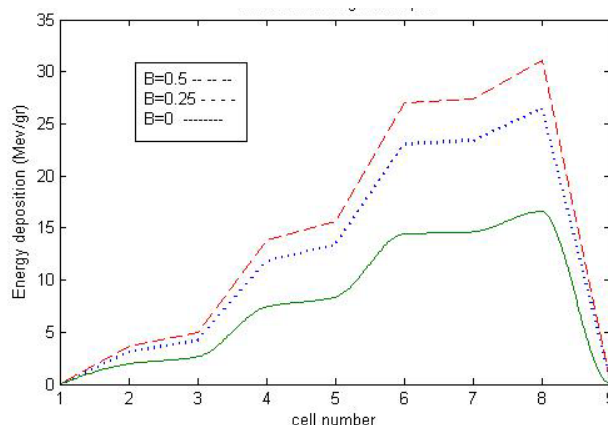
رابطه (۵) نسبت انرژی لیزر اشتعال گر به ضریب بهره تبدیل انرژی لیزر به فلز برای تولید الکترون یا پروتون می باشد و

$$E_{d-compression} = \frac{E_c}{\eta_c}, \quad (14)$$

که در آن $E_c = m_{DT} \alpha c_d \rho^{0.667}$ نسبت انرژی لازم برای تراکم ساچمه به ضریب بهره پرتو محرک برای فشردگی است. برای محاسبه بهره همجوشی از رابطه زیر استفاده می گردد،

$$G = f_B^d \frac{m_{DT} Q_{DT} f_b}{E_{d-compression} + a E_{d-ig} + E_M}. \quad (15)$$

بهره همجوشی نسبت انرژی آزاد شده ناشی از همجوشی در ساچمه به انرژی داده شده به ساچمه می باشد. که در آن $E_M = 0$ نشان دهنده میدان مغناطیسی صفر است. ضریب $a = 1$ در حالت تک مرکز داغ، $a = 2$ در حالت دو مرکز داغ و f_B^s ضریب بهره میدان مغناطیسی است. ضریب بهره میدان نسبت انرژی به جا گذاشته شده توسط الکترون یا پروتون در ناحیه سوخت با حضور میدان به حالت بدون میدان می باشد. همچنین این ضریب برای پروتون و الکترون متفاوت می باشد. E_M انرژی منتقل شده توسط میدان به سوخت می باشد که این انرژی با کسر سوختن وابستگی داشته و مقدار $f_b = 37\%$ برای پروتون با کسر سوخت $E_M = 12/472 \text{ MJ}$ می باشد و برای الکترون $E_M = 12/472 \text{ MJ}$ با $f_b = 40\%$ می باشد [۱۰ و ۱۱ و ۱۲]. در رابطه (۱۵)، $\alpha = \frac{1}{2}$ ، $Q_{DT} = 341 \frac{\text{MJ}}{\text{mg}}$ و $f_b = \frac{n_e - n(t)}{n_e}$ کسر سوختن و

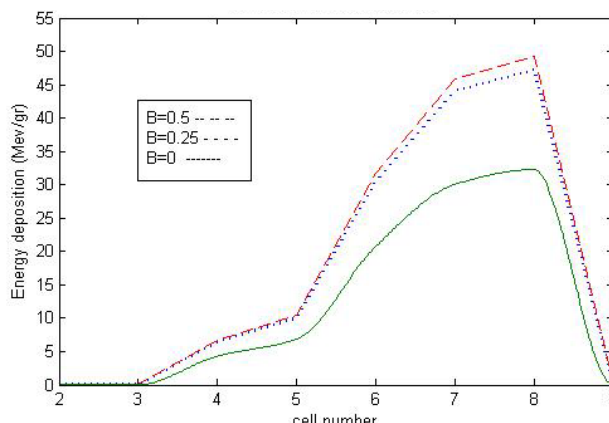
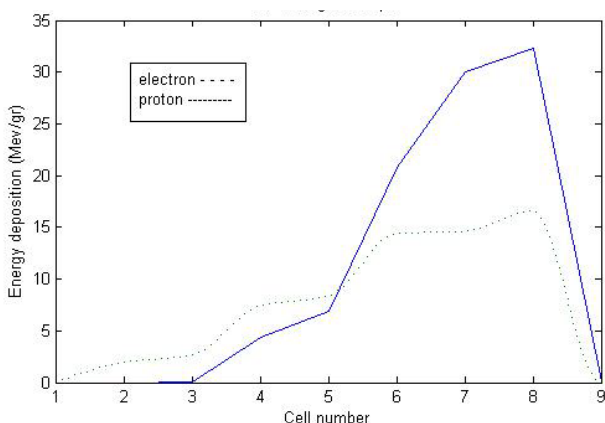


شکل ۴. مقایسه آهنگ انتقال انرژی الکترون های ۱۰-۱ MeV به لایه های مختلف ساچمه استوانه ای در اشتعال سریع در غیاب و حضور میدان های مغناطیسی ۰/۵ و ۰/۲۵ و ۰ تسلا

انتهای آن فلزی از جنس آلومینیوم یا مس قرار می دهیم. پرتو لیزر از طریق برش در داخل ساچمه نفوذ می کند، در اثر برهم کنش لیزر با فلز تعبیه شده تولید الکترون های نسبی یا پروتون های پرنرژی می شود. ذرات انرژی خود را در ناحیه سوخت به جا می گذارند. در اولین نقطه ای از سوخت که شرایط اشتعال فراهم شود. اولین واکنش همجوشی انجام می شود و موج اشتعال از این ناحیه در سراسر سوخت منتشر می گردد و باعث اشتعال در کل سوخت می شود. به این ناحیه مرکز داغ (Hot spot) گفته می شود. این ناحیه به انتهای برش در ساچمه یعنی همان محل چشمه الکترون یا پروتون نزدیک است. در طراحی نوع دیگری از این ساچمه ها، برای روش اشتعال سریع دوبرش متقابل در ساچمه استوانه ای تعبیه می شود به صورتی که دو پالس لیزر اشتعال گر همزمان وارد برش ها در ساچمه شوند و سوخت جامد از دو ناحیه مشتعل شود این روش باعث می شود کسر بیشتری از سوخت در زمان محصورسازی مشتعل شود و بهره همجوشی افزایش یابد. در ضمن این روش باعث افزایش تقارن در پرتو دهی در روش اشتعال سریع می شود. در این حالت دو نقطه اشتعال در سوخت وجود دارد که به این حالت، (Dual hot spot) و به حالت قبل (Single hot spot) گفته می شود. در ادامه نتایج اعمال میدان را بر دو حالت بررسی می کنیم.

جدول ۳. محاسبه بهره همجوشی الکترون‌های ۱-۱۰ MeV و پروتون‌های ۳۵-۵ MeV در غیاب و حضور میدان مغناطیسی در حالت تک نقطه داغ.

میدان مغناطیسی B(T)	بهره همجوشی توسط الکترون (%)	بهره همجوشی توسط پروتون (%)	ضریب بهره میدان برای الکترون f_B^e	ضریب بهره میدان برای پروتون f_B^p	کسر سوختن برای الکترون f_b	کسر سوختن برای پروتون f_b
۰	۳۸/۵۸۹۶	۳۴/۷۳۰۲	۱	۱	۰/۳۰	۰/۲۷
۰/۲۵	۵۴/۱۳۰۱	۴۵/۸۳۵۸	۱/۵۷۹۷	۱/۴۴۶۱	۰/۴۰	۰/۳۷
۰/۵	۶۳/۳۷۱۷	۴۷/۸۰۷۳	۱/۸۴۹۴	۱/۵۰۸۳	۰/۴۰	۰/۳۷



شکل ۵. مقایسه آهنگ انتقال انرژی پروتون‌های ۳۵-۵ MeV به لایه‌های مختلف ساچمه استوانه‌ای در اشتعال سریع در غیاب و حضور میدان‌های مغناطیسی ۰/۲۵ و ۰/۵ تسلا.

شکل ۶. مقایسه آهنگ انتقال انرژی الکترون و پروتون در غیاب میدان مغناطیسی.

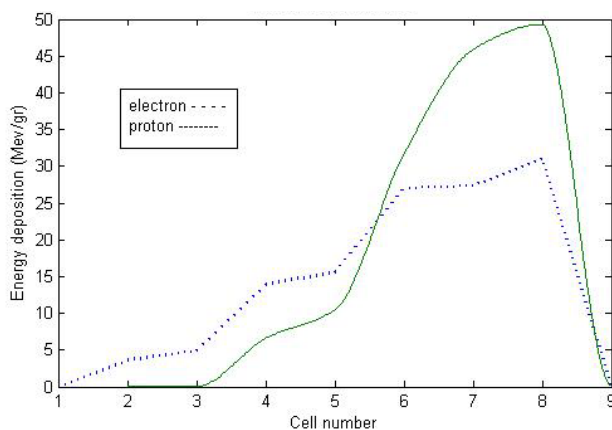
بهره همجوشی در حالت یک نقطه داغ با حضور میدان و بدون میدان در جدول ۳ محاسبه شده است.

آهنگ انتقال انرژی پروتون با اعمال میدان افزایش می‌یابد ولی همان‌گونه که در شکل ۵ مشا هده می‌شود نمودارها برای میدان‌های ۰/۲۵ و ۰/۵ تسلا نسبت به یکدیگر چندان تغییر چشمگیری نکرده‌اند. از این رو در مقایسه با شکل ۴ مشخص می‌گردد که تغییرات میدان مغناطیسی بر آهنگ انتقال انرژی الکترون مؤثرتر می‌باشد.

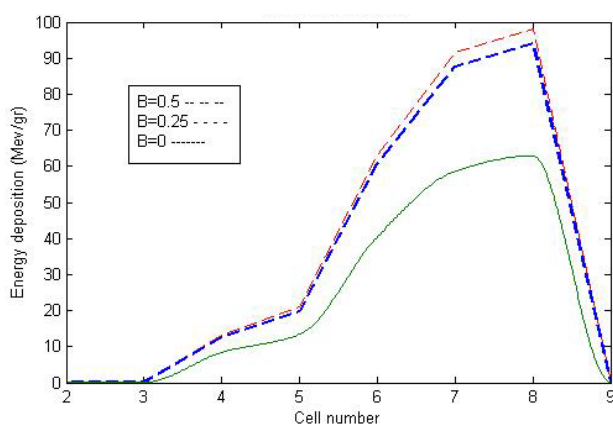
در شکل ۶ مقایسه‌ای بین آهنگ انتقال انرژی الکترون و پروتون در غیاب میدان مغناطیسی صورت گرفته است. مشاهده می‌شود الکترون انرژی بیشتری در مقایسه با پروتون در ناحیه سوخت (پنج لایه اول) به جای می‌گذارد. بنا بر این در این حالت نیز الکترون نقش عمده‌ای در تامین انرژی مورد نیاز

پارامتر ساچمه، $c_d = 0.21 \left[\left(\frac{\text{KJ}}{\text{mg}} \right) \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)^{-0.6667} \right]$ ، جرم m_{DT} سوخت و ρ چگالی سوخت است. انرژی که صرف تراکم ساچمه می‌گردد مستقل از تولید الکترون یا پروتون می‌باشد و برابر $24/8609 \text{ MJ}$ است [۱۷ و ۱۸ و ۱۹].

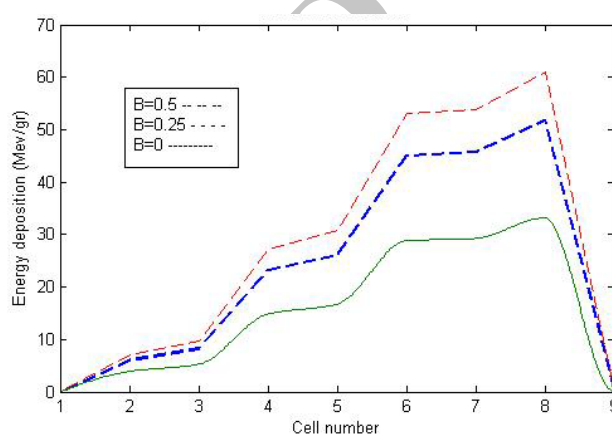
در حالتی که ساچمه با یک مرکز داغ و با حضور میدان مغناطیسی بررسی می‌شود آهنگ انتقال انرژی تغییر می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود با اعمال میدان مغناطیسی آهنگ انتقال انرژی الکترون‌های نسبی به ناحیه سوخت افزایش می‌یابد و این باعث افزایش بهره همجوشی می‌شود.



شکل ۷. مقایسه آهنگ انتقال انرژی الکترون و پروتون در میدان مغناطیسی ۰/۵ تسلا.



شکل ۹. مقایسه آهنگ انتقال انرژی پروتون‌های ۳۵-۵ MeV به لایه-های مختلف ساچمه استوانه‌ای در اشتعال سریع در غیاب و حضور میدان‌های مغناطیسی ۰/۲۵ و ۰/۵ تسلا در حالت دو نقطه داغ.



شکل ۸. مقایسه آهنگ انتقال انرژی الکترون‌های ۱۰-۱ MeV به لایه‌های مختلف ساچمه استوانه‌ای در اشتعال سریع در غیاب و حضور میدان‌های مغناطیسی ۰/۲۵ و ۰/۵ تسلا در حالت دو نقطه داغ.

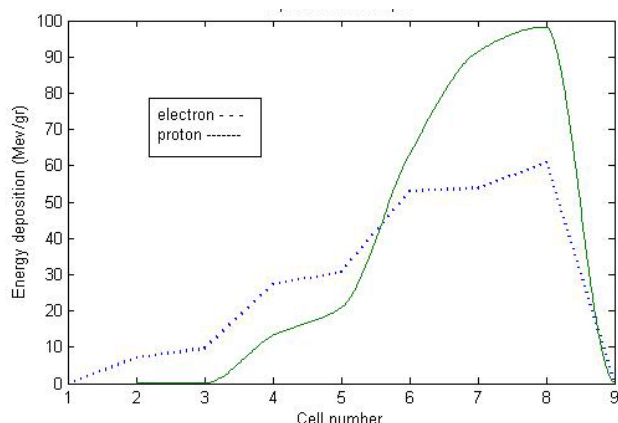
می‌شود. برتری الکترون نسبت به پروتون در حالت دو مرکز داغ نیز در شکل‌های ۸ و ۹ مشهود می‌باشد. حتی اگر بستگی E_M و f_B در نظر گرفته نشود و تنها تفاوت در ضریب بهره میدان باشد. باز بهره همجوشی الکترون از پروتون بیشتر است. در این حالت نیز الکترون نقش عمده‌ای در تأمین انرژی مورد نیاز ناحیه سوخت بر عهده دارد. از این رو در حضور میدان در حالت دو مرکز داغ نیز الکترون گزینه مناسب‌تری برای اشتعال می‌باشد. نتایج محاسبات در جدول ۴ برای مقایسه و نتیجه‌گیری ارائه شده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقایسه آهنگ انتقال انرژی الکترون و پروتون بدون میدان مغناطیسی و با میدان صورت گرفته است. از مقایسه نتایج شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌بینیم که استفاده از دو نقطه داغ و اعمال میدان مغناطیسی

ناحیه سوخت بر عهده دارد. این مقایسه در شکل ۷ با وجود میدان مغناطیسی نیز انجام شده است که برتری آهنگ انتقال انرژی الکترون مشهود می‌باشد. حتی اگر بستگی E_M و f_B در نظر گرفته نشود و تنها تفاوت در ضریب بهره میدان باشد، باز بهره همجوشی الکترون از پروتون بیشتر است. از این رو در حضور میدان مغناطیسی الکترون گزینه مناسب‌تری برای اشتعال می‌باشد.

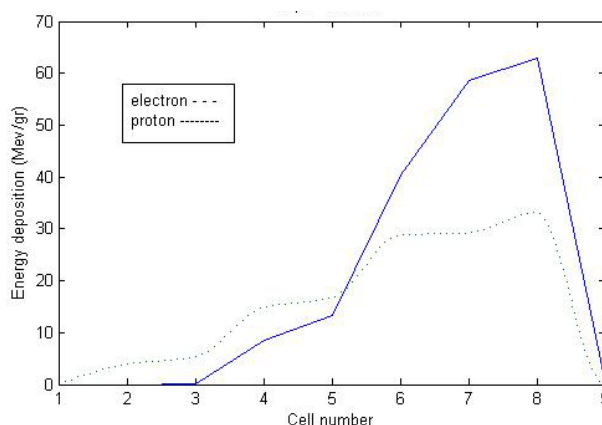
با در نظر گرفتن دو نقطه داغ و تکرار محاسبات برای ساچمه استوانه‌ای در دو حالت بدون میدان و با میدان مغناطیسی از آن جایی که ساچمه از دو نقطه مشتعل می‌شود انرژی انتقال یافته به سوخت افزایش می‌یابد و کسر بیشتری از سوخت نیز مصرف

جدول ۴. محاسبه بهره همجوشی الکترون‌های ۱-۱۰ MeV و پروتون‌های ۳۵-۵ MeV در غیاب و حضور میدان مغناطیسی در حالت دو نقطه داغ.

میدان مغناطیسی B(T)	بهره همجوشی توسط الکترون (%)	بهره همجوشی توسط پروتون (%)	ضریب بهره میدان برای الکترون f_B^e	ضریب بهره میدان برای پروتون f_B^p	کسر سوختن برای الکترون f_b	کسر سوختن برای پروتون f_b
۰	۸۲/۳۰۷۰	۶۳/۱۳۸۲	۱	۱	۰/۵۹	۰/۵۰
۰/۲۵	۸۶/۶۸۳۷	۶۹/۴۵۲۱	۱/۵۸۱۳	۱/۴۷۴۳	۰/۶۴	۰/۵۵
۰/۵	۸۹/۷۸۶۴	۷۲/۵۸۰۱	۱/۶۷۳۹	۱/۵۴۰۷	۰/۶۴	۰/۵۵



شکل ۱۱. مقایسه آهنگ انتقال انرژی الکترون و پروتون در میدان مغناطیسی ۰/۵ تسلا در حالت دو نقطه داغ.



شکل ۱۰. مقایسه آهنگ انتقال انرژی الکترون و پروتون در غیاب میدان مغناطیسی در حالت دو نقطه داغ.

حضور میدان افزایش یافته و زمان تشکیل مرکز داغ نیز کاهش می‌یابد که همه این عوامل باعث افزایش بهره همجوشی الکترون‌ها تا ۲۴ درصد و پروتون‌ها تا ۱۳ درصد می‌شود. از آن جایی که تغییرات آهنگ انرژی انتقالی در حضور میدان چشمگیرتر می‌باشد و برای ایجاد الکترون به انرژی کمتری نسبت به تولید پروتون نیاز داریم استفاده از الکترون مقرون به صرفه‌تر می‌باشد. از طرفی تمام محاسبات برای دو مرکز داغ نیز انجام شده است. در این حالت علاوه بر مزایای اعمال میدان مغناطیسی، اشتعال در ساچمه از دو نقطه می‌باشد و کسر بیشتری از سوخت مشتعل می‌شود که این نیز به نوبه خود باعث افزایش بهره همجوشی می‌گردد.

آهنگ انتقال انرژی تا بیش از دو برابر حالت با یک نقطه داغ افزایش می‌یابد.

در این مقاله ساچمه سوخت استوانه‌ای در روش اشتعال سریع برای چشمه الکترون و پروتون در غیاب و با حضور میدان مغناطیسی و برای دو حالت تک و دو مرکز داغ مورد بررسی قرار گرفت. از آن جایی که میدان مغناطیسی باعث عایق‌بندی ساچمه استوانه‌ای می‌شود به ρR کوچکتری نسبت به حالت بدون میدان نیاز دارد و این امر باعث کاهش انرژی درخواستی اولیه مورد نیاز برای تراکم ساچمه می‌گردد. از طرفی آهنگ انتقال انرژی الکترون‌های نسبی و پروتون‌های پر انرژی نیز در

11. FLUKA, High Energy Transport Code System, *European Organization For Nuclear Research*, (2007).
12. F Salvat, PENELOPE. A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport, *Nuclear Energy Agency* (2001).
13. A J Kemp, et al., *Nuclear Fusion*, **43** (2001) 16.
14. M M Basko. et al., *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **45** (2003) A125.
15. A J Kemp, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **464** (2001) 192.
16. S Atzeni, M Temporal, J J Honrubia, *Nuclear Fusion*, **42** (2002) L1.
17. A J Kemp, M Basko, J Meyer-Ter-Vehn., *Nuclear Fusion*, **40**, 1 (2005) 59.
18. A J Kemp. M M Basko, J Meyer-ter-Vehn., *Nuclear Fusion*, **40**, 2 (2007) 235.
19. M Roth, T E Cown, *American Physical Society*, **75** (2001).
1. J D Lindl, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **45** (2003) A215.
2. A Parvazian and J Jafari, *Iranian Journal of Physics Research*, **3**, 2 (2002).
3. M Roth, *Physical Review Letters*, **86**, 3 (2001).
4. R Ramis, and J Ramirez, *Nuclear Fusion*, **44** (2004) 720.
5. J Andresa, "Magnetized Cylindrical Implosion Driven by Heavy Ion Beams", Los Alamos National Laboratory, Report (2001).
6. A Parvazian and A Okhovat, *Iranian Journal of Physics Research*, **5** (2006) 4.
7. C Ren, et al., *Physical Rev. Lett.*, **93**, 18 (2004).
8. J Meyer – Ter – Vehn, *Control Fusion*, **43** (2001) A113.
9. A Parvazian and R Hoseini Dalasam, *Esteghlal*, **27**, 1 (2008).
10. MCNPX Monte Carlo N-Particle Transport Code System, Los Alamos National Laboratory, April (2000).

Archive of SID