کنترل پلاسمای توکامک و محاسبه بهره انرژی برای سوخت D^3He با روش گام به عقب

زارعی، محمدعلی*(۱)–حسینی مطلق، سیده نسرین (۲)– قرائتی، عبدالرسول(۱)

[1]دانشگاه پیام نور، دانشکده علوم ، گروه فیزیک

[2]دانشگاه آزاد اسلامی شیراز، دانشکده علوم ، گروه فیزیک

چکیده:

کنترل چگالی های ذرات پلا سما، یکی از م شکلات ا سا سی در رآکتورهای همجو شی ا ست. در زمانی که راکتور در حال کار است، چگالی ذرات سوختی دوتریوم-هلیوم۳ و آلفا تولید شده توسط واکنشهای همجوشی، و انرژی حاصل شده باید دقیقا کنترل شود. در این مقاله از روشهای کنترل مرزی پسگام برای ایجاد تعادلی پایدار در سوختن پلاسما و محا سبه بهره انرژی برای سوخت بدون نوترون دوتریم-هلیوم۳ ا ستفاده شده ا ست. همچنین تقریب یک بعدی معادله انتقال برای انرژی و چگالی یونهای سوختی دوتریوم-هلیوم۳ و ذرات آلفا در مختصات استوانه ای توسط یک سیستم معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی بررسی شده است. برای کنترل یونهای سوختی وچگالی انرژی، سیستم معادلات دیفرانسیل با استفاده از روش تفاضل محدود در فضا گسسته شده و برای به دست آوردن یک تغییر و تحول گسسته ازسیستم اصلی به طورمجانبی، طراحی پسگام اعمال شده وسیستم هدف به ثبات می رسد. نتایج شبیه سازی عددی و قانون کنترل مرزی نشـان میدهد که چگالی ذرات و انرژی را میتوان با موفقیت به کمک فقط یک گام از روش پسـگام کنترل کرد.

کلمات کلیدی: *روش گام به عقب، بهره انرژی، سوخت D^3He .*

Control of Tokamak Plasma and Calculation of Energy Gain for D^3He Fuel with Back-stepping Method

M. A. Zarei[1*], S. N. Hosseinimotlagh[2], A. Gharaati[1]

[1]Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran

[2]Department of Physics, Islamic Azad University, Shiraz

Abstract:

Control of plasma particles densities is one of the fundamental problems in fusion reactors. When the reactor is in operation, the densities of the deuterium-helium 3 and alpha fuel particles produced by the fusion reactions and the produced energy must be controlled precisely. In this paper, back-stepping boundary control methods have been used to create a stable equilibrium in plasma burning and to calculate the energy gain for aneutronic deuterium-helium3 fuel. Also, the one-dimensional approximation of the transfer equation for energy and density of deuterium-helium3 ions and alpha particles in cylindrical coordinates is investigated by a partial differential equation system. In order to control the fuel ions and energy density, the system of differential equations is discretized in space using a finite difference method. To achieve a discrete transformation from the main system asymptotically, back-stepping method is applied and the target system is stabilized. The results of numerical simulation and boundary control law show that the particle and energy densities can be controlled successfully by just one step of back-stepping method.

Keyword: Back-stepping method, Gain energy, D^3He fuel.

مقدمه:

در رأس تلاش های صورت گرفته برای تحقق بخشیدن به انرژی گداخت می توان از پروژه ITER نام برد، این پروژه عبارتست از یک همکاری بین المللی برای ساخت بزرگترین راکتور همجوشی جهان که در این نوع راکتور از سوخت DT استفاده می شود و ما در این مقاله به جای آن از سوختD^3He که سوخت بدون نوترون است استفاده می کنیم[۲و۱]. هدف اصلی این مقاله بررسی شرایط پایدار برای سوختن پلاسما و محاسبه بهره انرژی می باشد که به همین منظور در بخش های بعدی ابتدا مدل سوختن پلاسما بررسی شده و بعد از آن به طراحی کنترل کننده و روش گام به عقب برای سیستم معادلات حاکم و رسیدن به شرایط پایدار می پردازیم.

مدل یک بعدی سوختن پلاسما:

مدل یک بعدی سوختن پلاسما شامل چگالی ذرات آلفا، سوخت دوتریوم-هلیوم۳، وهمچنین مشخصات فضایی انرژی در این سیستم می باشد ومدل مورد استفاده در این کار از معادلات یک بعدی استاندارد انتقال حاصل شده است. این مدل با فرض ثابت بودن ثابت پخش برای ذرات سوختی، ذرات آلفا و انرژی نوشته شده است[٤-۳]. معادلات برای چگالی ذرات و انرژی پلاسما عبارتند از:

$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} r\left(D\frac{\partial n_\alpha}{\partial r}\right) + \left(\frac{n_{D^3He}}{2}\right)^2\langle\sigma v\rangle \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial n_{D^3He}}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} r\left(D\frac{\partial n_{D^3He}}{\partial r}\right) - 2\left(\frac{n_{D^3He}}{2}\right)^2\langle\sigma v\rangle + S_{D^3He} \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} r\left(D\frac{\partial E}{\partial r}\right) + Q_\alpha\left(\frac{n_{D^3He}}{2}\right)^2\langle\sigma v\rangle - P_{rad} + P_{aux} \qquad (۳)$$

کهn_α وn_{D^3He} چگالی ذرات آلفا و دوتریم-هلیوم۳ و E هم چگالی انرژی حاصل شده از همجوشی است. ورودی های کنترلی شامل نرخ سوخت رسانی دوتریم-هلیوم۳S_{D^3He}و همچنین توان کمکی P_{aux} است. Q_α=3.67 MeV انرژی ذرات آلفا می باشد. واکنش پذیری ($\langle\sigma v\rangle$) به شدت غیرخطی، مثبت و تابعی مقید از دمای پلاسما T است که با رابطه:$\langle\sigma v\rangle = \exp(\frac{a_1}{T^r} + a_2 + a_3T + a_4T^2 + a_5T^3 + a_6T^4)$ محاسبه می گردد و پارامترهای a_i و r از مرجع [٥] مشخص می شود. در این کار تابش اتلافی P_{rad} به طور تقریبی به صورت $P_{rad} = P_{brem} = A_bZ_{eff}n_e^2\sqrt{T}$ نوشته می شود که $A_b = 5.5\times10^{-37}Wm^3/\sqrt{KeV}$ ضریب تابش ترمزی، $Z_{eff} = \sum_i\frac{n_iZ_i^2}{n_e} = \frac{n_{D^3He}+4n_\alpha}{n_e}$ عدد اتمی موثر، $n_e = n_{D^3He} + 2n_\alpha$ چگالی الکترونی، چگالی پلاسما $n = 2n_{D^3He} + 3n_\alpha$ و دمای پلاسما $T = \frac{2}{3}\frac{E}{n}$ می باشد. در این کار شرایط مرزی استفاده شده به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial r}\Big|_{r=0} = \frac{\partial n_{D^3He}}{\partial r}\Big|_{r=0} = \frac{\partial E}{\partial r}\Big|_{r=0} = 0 \qquad (٤)$$

$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial r}\Big|_{r=a} = -k_\alpha n_\alpha(a), \frac{\partial n_{D^3He}}{\partial r}\Big|_{r=a} = -k_{D^3He}n_{D^3He}(a), \frac{\partial E}{\partial r}\Big|_{r=a} = -k_E E(a) \qquad (٥)$$

در این معادلات k_α، k_{D^3He} و k_E مثبت بوده و a شعاع پلاسما می باشد.

کنترل سیستم و روش گام به عقب:

در حالت تعادل چگالی های انرژی، ذرات آلفا و سوخت دوتریم-هلیوم۳ با صفر قرار دادن طرف چپ معادلات غیرخطی ۳-۱ بر حسب مختصات مکانی به صورت زیر بیان می شود:

$$0 = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} r\left(D\frac{\partial \bar{n}_\alpha}{\partial r}\right) + \bar{S}_\alpha \qquad (٦)$$

$$0 = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} r\left(D\frac{\partial \bar{n}_{D^3He}}{\partial r}\right) - 2\bar{S}_\alpha + \bar{S}_{D^3He} \qquad (٧)$$

$$0 = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} r\left(D\frac{\partial \bar{E}}{\partial r}\right) + Q_\alpha \bar{S}_\alpha - \bar{P}_{rad} + \bar{P}_{aux} \qquad (٨)$$

در اینجا $S_\alpha = (\frac{n_{D^3He}}{2})^2\langle\sigma v\rangle$ نرخ تولید ذره آلفا می باشد و مقادیر تعادلی با به تعادل رساندن نرخ سوخت رسانی و گرمای کمکی کنترل می شود.

در این کار محرک ها فقط در لبه های پلاسما در نظر گرفته می شوند و نرخ های سوخت رسانی و گرمای کمکی فقط برای پروفایل های تعادلی تعریف می شوند. با تعریف انحرافات از مقادیر تعادلی داریم:

$$\tilde{n}_\alpha(r,t) = n_\alpha(r,t) - \bar{n}_\alpha(r), \tilde{n}_{D^3He}(r,t) = n_{D^3He}(r,t) - \bar{n}_{D^3He}(r)$$
$$\tilde{E}(r,t) = E(r,t) - \bar{E}(r), \tilde{S}_\alpha(r,t) = S_\alpha(r,t) - \bar{S}_\alpha(r), S_{D^3He}(r,t) = S_{D^3He}(r)$$
$$P_{aux}(r,t) = \bar{P}_{aux}(r), \tilde{P}_{rad}(r,t) = P_{rad}(r,t) - \bar{P}_{rad}(r)$$

و معادلات دینامیکی برای این اختلالات به کمک معادلات ۸-٦ برای شرایط پایدار به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial \tilde{n}_\alpha}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} r\left(D\frac{\partial \tilde{n}_\alpha}{\partial r}\right) + \tilde{S}_\alpha \qquad (٩)$$

$$\frac{\partial \tilde{n}_{D^3He}}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} r\left(D\frac{\partial \tilde{n}_{D^3He}}{\partial r}\right) - 2\tilde{S}_\alpha \qquad (١٠)$$

$$\frac{\partial \tilde{E}}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} r\left(D\frac{\partial \tilde{E}}{\partial r}\right) + Q_\alpha \tilde{S}_\alpha - \tilde{P}_{rad} \qquad (١١)$$

شرایط مرزی تعریف شده به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial \tilde{n}_\alpha}{\partial r}\Big|_{r=0} = \frac{\partial \tilde{n}_{D^3He}}{\partial r}\Big|_{r=0} = \frac{\partial \tilde{E}}{\partial r}\Big|_{r=0} = 0 \qquad (١٢)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{n}_\alpha}{\partial r}\Big|_{r=a} = -k_\alpha \tilde{n}_\alpha(a) + \Delta(\tilde{n}_\alpha)_r \\ \frac{\partial \tilde{n}_{D^3He}}{\partial r}\Big|_{r=a} = -k_{D^3He}\tilde{n}_{D^3He}(a) + \Delta(\tilde{n}_{D^3He})_r \\ \frac{\partial \tilde{E}}{\partial r}\Big|_{r=a} = -k_E \tilde{E}(a) + \Delta(\tilde{E})_r \end{cases} \qquad (١٣)$$

برای کنترل سیستم باید مقادیر $\tilde{n}_\alpha(r,t), \tilde{n}_{D^3He}(r,t), \tilde{E}(r,t)$ به صفر برسد تا سیستم به تعادل پایدار نزدیک شود و این کار با استفاده از $\Delta(\tilde{n}_\alpha)_r$ ، $\Delta(\tilde{n}_{D^3He})_r$ و $\Delta(\tilde{E})_r$ به عنوان محرک در لبه های پلاسما انجام می شود.به کمک روش گام به عقب سیستم اصلی معادلات را به سیستم هدف که به صورت مجانبی پایدار است انتقال می دهیم[٦]. با جداسازی معادلات ۱۱-۹، این معادلات به صورت زیر نوشته می شود:

$$\dot{\tilde{n}}_\alpha^i = D\frac{\tilde{n}_\alpha^{i+1} - 2\tilde{n}_\alpha^i + \tilde{n}_\alpha^{i-1}}{h^2} + \frac{D}{ih}\frac{\tilde{n}_\alpha^{i+1} - \tilde{n}_\alpha^i}{h} + \tilde{S}_\alpha^i \qquad (١٤)$$

$$\dot{\tilde{n}}^{i}_{D^3He} = D\frac{\tilde{n}^{i+1}_{D^3He}-2\tilde{n}^{i}_{D^3He}+\tilde{n}^{i-1}_{D^3He}}{h^2} + \frac{D}{ih}\frac{\tilde{n}^{i+1}_{D^3He}-\tilde{n}^{i}_{D^3He}}{h} - 2\tilde{S}^{i}_{\alpha} \quad (۱۵)$$

$$\dot{\tilde{E}}^{i} = D\frac{\tilde{E}^{i+1}-2\tilde{E}^{i}+\tilde{E}^{i-1}}{h^2} + \frac{D}{ih}\frac{\tilde{E}^{i+1}-\tilde{E}^{i}}{h} + Q_{\alpha}\tilde{S}^{i}_{\alpha} - \tilde{P}^{i}_{rad} \quad (۱۶)$$

شرایط مرزی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\tilde{n}^{1}_{\alpha}-\tilde{n}^{0}_{\alpha}}{h} = \frac{\tilde{n}^{1}_{D^3He}-\tilde{n}^{0}_{D^3He}}{h} = \frac{\tilde{E}^{1}-\tilde{E}^{0}}{h} = 0 \quad (۱۷)$$

$$\begin{cases} \frac{\tilde{n}^{N}_{\alpha}-\tilde{n}^{N-1}_{\alpha}}{h} = -k_{\alpha}\tilde{n}^{N}_{\alpha} + \Delta(\tilde{n}_{\alpha})_r \\ \frac{\tilde{n}^{N}_{D^3He}-\tilde{n}^{N-1}_{D^3He}}{h} = -k_{D^3He}\tilde{n}^{N}_{D^3He} + \Delta(\tilde{n}_{D^3He})_r \\ \frac{\tilde{E}^{N}-\tilde{E}^{N_1}}{h} = -k_{E}\tilde{E}^{N} + \Delta(\tilde{E})_r \end{cases} \quad (۱۸)$$

سیستم هدف که به صورت مجانبی پایدار می باشد را به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$\frac{\partial\tilde{w}}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}r\left(D\frac{\partial\tilde{w}}{\partial r}\right) - C_w\tilde{w} \quad (۱۹)$$

$$\frac{\partial\tilde{m}}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}r\left(D\frac{\partial\tilde{m}}{\partial r}\right) - C_m\tilde{m} \quad (۲۰)$$

$$\frac{\partial\tilde{F}}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}r\left(D\frac{\partial\tilde{F}}{\partial r}\right) - C_F\tilde{F} \quad (۲۱)$$

در معادلات بالا $C_w, C_m, C_F > 0$ و شرایط مرزی به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial\tilde{w}}{\partial r}\Big|_{r=0} = \frac{\partial\tilde{m}}{\partial r}\Big|_{r=0} = \frac{\partial\tilde{F}}{\partial r}\Big|_{r=0} = 0 \quad (۲۲)$$

$$\frac{\partial\tilde{w}}{\partial r}\Big|_{r=a} = -G\tilde{w}(a), \frac{\partial\tilde{m}}{\partial r}\Big|_{r=a} = -G\tilde{m}(a), \frac{\partial\tilde{F}}{\partial r}\Big|_{r=a} = -G\tilde{F}(a) \quad (۲۳)$$

G بزرگتر از صفر می باشد. معادلات سیستم هدف با این شرط که مراتب بالای مشتقات در معادلات دیفرانسیل نگهداشته شده و سیستم با حذف ترم های مشکل ساده تر شود تعریف شده است. معادلات سیستم هدف بعد از جداسازی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\dot{\tilde{w}}^{i} = D\frac{\tilde{w}^{i+1}-2\tilde{w}^{i}+\tilde{w}^{i-1}}{h^2} + \frac{D}{ih}\frac{\tilde{w}^{i+1}-\tilde{w}^{i}}{h} - C_w\tilde{w} \quad (۲٤)$$

$$\dot{\tilde{m}}^{i} = D\frac{\tilde{m}^{i+1}-2\tilde{m}^{i}+\tilde{m}^{i-1}}{h^2} + \frac{D}{ih}\frac{\tilde{m}^{i+1}-\tilde{m}^{i}}{h} - C_m\tilde{m} \quad (۲۵)$$

$$\dot{\tilde{F}}^{i} = D\frac{\tilde{F}^{i+1}-2\tilde{F}^{i}+\tilde{F}^{i-1}}{h^2} + \frac{D}{ih}\frac{\tilde{F}^{i+1}-\tilde{F}^{i}}{h} - C_F\tilde{F} \quad (۲٦)$$

برای شرایط مرزی هم داریم:

$$\frac{\tilde{w}^{1}-\tilde{w}^{0}}{h} = \frac{\tilde{m}^{1}-\tilde{m}^{0}}{h} = \frac{\tilde{F}^{1}-\tilde{F}^{0}}{h} = 0 \quad (۲۷)$$

$$\frac{\tilde{w}^{N}-\tilde{w}^{N-1}}{h} = -G\tilde{w}^{N}, \frac{\tilde{m}^{N}-\tilde{m}^{N-1}}{h} = -G\tilde{m}^{N}, \frac{\tilde{F}^{N}-\tilde{F}^{N-1}}{h} = -G\tilde{F}^{N} \quad (۲۸)$$

بر اساس روش گام به عقب برای معادلات تبدیل داریم:

$$\tilde{w}^{i} = \tilde{n}^{i}_{\alpha} - \omega^{i-1}(\tilde{E}^{0}, \dots, \tilde{E}^{i-1}, \tilde{n}^{0}_{D^3He}, \dots, \tilde{n}^{i-1}_{D^3He}, \tilde{n}^{0}_{\alpha}, \dots, \tilde{n}^{i-1}_{\alpha}) \quad (۲۹)$$

$$\tilde{m}^{i} = \tilde{n}^{i}_{D^3He} - \beta^{i-1}(\tilde{E}^{0}, \dots, \tilde{E}^{i-1}, \tilde{n}^{0}_{D^3He}, \dots, \tilde{n}^{i-1}_{D^3He}, \tilde{n}^{0}_{\alpha}, \dots, \tilde{n}^{i-1}_{\alpha}) \quad (۳۰)$$

$$\tilde{F}^i = \tilde{E}^i - \alpha^{i-1}(\tilde{E}^0, \dots, \tilde{E}^{i-1}, \tilde{n}^0_{D^3He}, \dots, \tilde{n}^{i-1}_{D^3He}, \tilde{n}^0_\alpha, \dots, \tilde{n}^{i-1}_\alpha) \quad (۳۱)$$

با جایگذاری معادلات ۱۶-۱٤ و ۲٦-۲٤ در معادلات ۳۱-۲۹ داریم:

$$\omega^i = \frac{1}{D+D/i}\left[\left(2D + \frac{D}{i} + C_w h^2\right)\omega^{i-1} - D\omega^{i-2} - h^2 C_w \tilde{n}^i_\alpha + h^2\dot{\omega}^{i-1} - h^2\tilde{S}^i_\alpha\right] \quad (۳۲)$$

$$\beta^i = \frac{1}{D+D/i}\left[\left(2D + \frac{D}{i} + C_m h^2\right)\beta^{i-1} - D\beta^{i-2} - h^2 C_m \tilde{n}^i_{D^3He} + h^2\dot{\beta}^{i-1} + 2h^2\tilde{S}^i_\alpha\right] \quad (۳۳)$$

$$\alpha^i = \frac{1}{D+D/i}\left[\left(2D + \frac{D}{i} + C_F h^2\right)\alpha^{i-1} - D\alpha^{i-2} - h^2 C_F \tilde{E}^i + h^2\dot{\alpha}^{i-1} - h^2 Q_\alpha \tilde{S}^i_\alpha + h^2\tilde{P}^i_{rad}\right] \quad (۳٤)$$

با کم کردن معادلات ۱۸ از ۲۸ و جایگذاری از معادلات تبدیل، عبارت های کنترلی $\Delta(\tilde{n}_\alpha)_r, \Delta(\tilde{n}_{D^3He})_r, \Delta(\tilde{E})_r$ به صورت زیر تعریف می شوند:

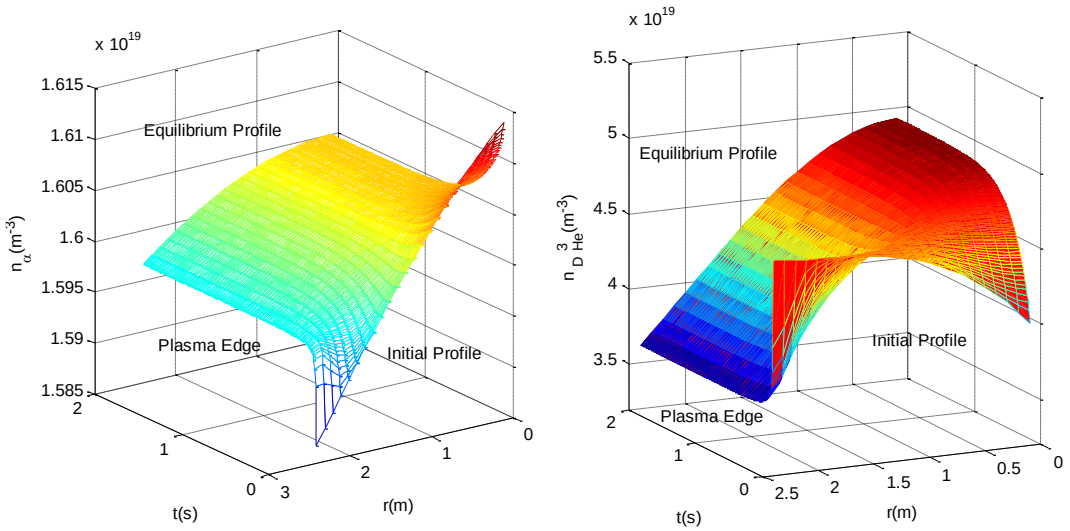
$$\Delta(\tilde{n}_\alpha)_r = \frac{\omega^{N-1} - \omega^{N-2}}{h} + k_\alpha \tilde{n}^N_\alpha - G(\tilde{n}^N_\alpha - \omega^{N-1}) \quad (۳٥)$$

$$\Delta(\tilde{n}_{D^3He})_r = \frac{\beta^{N-1} - \beta^{N-2}}{h} + k_{D^3He}\tilde{n}^N_{DT} - G(\tilde{n}^N_{D^3He} - \beta^{N-1}) \quad (۳٦)$$

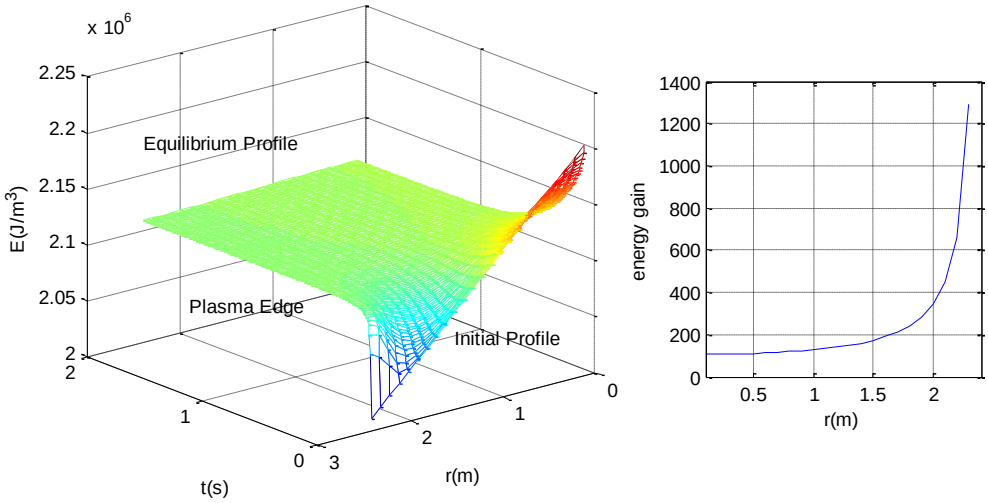
$$\Delta(\tilde{E})_r = \frac{\alpha^{N-1} - \alpha^{N-2}}{h} + k_E \tilde{E}^N - G(\tilde{E}^N - \alpha^{N-1}) \quad (۳۷)$$

نتیجه گیری:

معادلات جداسازی شده برای پلاسمای در حال سوختن با استفاده از یک روش تفاضل محدود ضمنی شبیه سازی شده است. نتایج نشان داده شده برای تعادل که در جدول ۱شرح داده شده شامل میانگین فضایی، پخش و شرایط مرزی هستند و با استفاده از یک مجموعه ای خاص از پروفایل های سوخت رسانی و گرمایش بدست آمده است. همانگونه که در شکل های ۲و۱ مشاهده می شود، تغییرات زمانی و مکانی مربوط به پروفایل چگالی های ذرات آلفا، ذرات سوختی، انرژی و همچنین ضریب بهره انرژی نشان داده شده است و مشاهده می شود که این پارامترها با گذشت زمان به پروفایل تعادل نزدیک شده و بنابراین سیستم به تعادل پایدار می رسد.



شکل ۱: تغییرات چگالی ذرات آلفا و ذرات سوختی دوتریم-هلیوم۳



شکل ۲: تغییرات چگالی انرژی و ضریب بهره انرژی بر حسب فاصله از مرکز پلاسما

جدول ۱: پارامترهای شبیه سازی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$\langle \bar{n}_\alpha \rangle$	$1.6050 \times 10^{19} m^{-3}$	k_α	.085
$\langle \bar{E} \rangle$	$21.132 \times 10^{50}\ J/m^3$	k_E	.287
$\langle \bar{n}_{D^3He} \rangle$	$4.93 \times 10^{19} m^{-3}$	k_{D^3He}	.210
D	.8		

بحث و بررسی

کنترل بازخورد غیر خطی بر اساس روش گام به عقب برای رسیدن به ثبات مجانبی برای چگالی ذرات سوختی و انرژی در پلاسمای در حال سوختن طراحی شده است. کنترل با استفاده از محرک ها در لبه پلاسما برای ذرات سوخت و انرژی باعث ایجاد ثبات در پروفایل های مربوطه می شود. مدل اصلی PDE و شبیه سازی در این کار نشان می دهد که در روش کنترلی استفاده شده تنها یک مرحله از گام به عقب و یا فقط یک اندازه گیری از داخل پلاسما با موفقیت باعث کنترل پارامترهای پلاسما می گردد. در این مقاله امکان کنترل پروفایل جنبشی در پلاسمای در حال سوختن با استفاده از تکنیک های کنترل مرزی نشان داده شده است. با این حال، مطالعه بیشتربرای پیدا کردن روش های فیزیکی به منظور مدولاسیون متغیرهای جنبشی در لبه پلاسما لازم خواهد بود، به عنوان مثال دستیابی به مقادیر مطلوب $\Delta(\tilde{\mathbf{n}}_\alpha)_\mathbf{r}$ ، $\Delta(\tilde{\mathbf{n}}_{\mathbf{D^3He}})_\mathbf{r}$ و $\Delta(\tilde{\mathbf{E}})_\mathbf{r}$ که از طریق مدولاسیون خواص فیزیکی مانند پمپ کردن گاز و یا تزریق ناخالصی انجام می پذیرد.

مرجع ها

[۱] E. Schuster, M. Krstic and G. Tynan, “Burn Control in Fusion Reactors via Nonlinear Stabilization Techniques”, Fusion Science and Tech, **43**, no. 1, pp. 18-37, (2003).

[۲] M. D. Boyer and E. Schuster, “Zero-dimensional Nonlinear Burn Control Using Isotopic Fuel Tailoring for Thermal Excursions”, Proc. of the 2011 IEEE Multi-conf. on Systems and Control, Denver, CO,USA, (2011).

[۳] E. Schuster, M. Krstic, “Control of a Non-linear PDE System Arising from Non-burning Tokamak Plasma Transport Dynamics”, Int J of Control, **76**, no. 11, pp. 1116-2224, (2003).
[۴]E. Schuster, M. Krstic and G. Tynan, “Burn Control in Fusion Reactors via Nonlinear Stabilization Techniques”, Fusion Science and Tech, **43**, no. 1, pp.18-37, (2003).
[۵] L. Hively; “Special Topic Convenient Computational Forms for Maxwellian Reactivities”, Nuclear Fusion. (1977).
[۶]D. Boskovic and M. Krstic, “Backstepping Control of a Chemical Tubular Reactor”, Computers and Chemical Engineering, **26**, no. 7-8, pp. 1077-1085, (2002).