شبیه سازی مقدار موجک میدان مغناطیسی چنبره ای توسط فرمولاسیون جدیدی در توکامکهایی با نسبت منظر بزرگ

فاطمه دینی*

پژوهشکده پلاسما وتحقیقات گداخت هسته ای

چکیده

تعداد محدود سیم پیچهای میدان چنبره ای تقارن محوری کامل سیستم را بر هم می زند. سیم پیچها موجکهایی با طول موج کوتاه درطول چنبره در مقدار شدت میدان مغناطیسی پدید می آورند، که این خود درتغییر ویژگیهای مربوط به ترابرد و محصور سازی پلاسمای توکامک از اهمیت خاصی برخوردار است. در نتیجه ، محاسبه سریع و دقیق موجک مورد توجه قرار می گیرد. در اینجا نشان می دهیم که فرمولاسیون تحلیلی ارایه شده توسط گروه پژوهشی توکامک TFTR در مورد توکامک دماوند با نسبت منظر بزرگ قابل استفاده نیست، و با تغییرات مناسب می توان به تابع دلخواه با دقت کافی دست یافت.

کلمات کلیدی:

توکامک، میدان مغناطیسی چنبره ای، موجک، چاه موجکی، ترابرد، ذرات به دام افتاده، نسبت منظر بزرگ.

مقدمه

در اثرفواصل میان سیم پیچهای میدان مغناطیسی چنبره ای در راستای چنبره غیر یکنواختی در شدت این میدان پدید می آید که عامل پیدایش نوسانات موجکی در ساختار آن است. مقدار کمی موجک میدان با پارامتر $\delta = \Delta B_t / B_t$ شناخته می شود که درآن ΔB_t تغییرات پیک تو پیک میدان مغناطیسی B_t در راستای چنبره ای است. در شرایط خاص سطح مقطع قطبی پلاسما به دو ناحیه تقسیم می شود، که تحت عنوان ناحیه چاه موجکی و غیر آن خوانده می شود. در ناحیه چاه موجکی مهمترین اثر مربوط به ذراتی است که در چاههای چنبره ای موضعی به دام افتاده اند. آزمایشهای توکامک بیانگر تلفات گرمایی و ذره ناشی از به دام افتادگی ذرات در این چاههای موجکی است. به طوری که در یک راکتور گداخت دامنه موجک میدان مغناطیسی چنبره ای δ در لبه پلاسما نباید از ۲ درصد بیشتر باشد تا به این ترتیب از تلفات انرژی و ذره کنترل گردد.با توجه به این ملاحظات تعداد سیم پیچ های میدان مغناطیسی چنبره ای در توکامکها از ۱۶ تا ۲۴ انتخاب می شود[۲و۱].

در بررسی دامنه موجک توکامک دماوند با نسبت منظر بزرگ با استفاده از عبارت تحلیلی گروه آزمایشگاه پرینستون(PPPL) [۴و۳] ، به مشکلاتی برخوردیم. در اینجا فرمولاسیون مناسبی برای محاسبه موجک در این سیستم ارائه می دهیم و توسط یک روش محاسباتی پارامترهای لازم را در عبارت مورد نظر پیدا کرده و مقایسه می نماییم.

*fdini@aeoi.org.ir

مدلسازی و نتایج

در مدل ارائه شده توسط(PPPL)) [۲] برای دامنه موجک داریم

$$\delta(r,z) = \delta_0 \exp[\sqrt{[r - R_0(z)]^2 + b_r z^2} / w_r] \qquad (۱)$$

که در آن δ_0 مینیمم مقدار موجک، b_r و w_r ثابتهای محاسبه شده هستند و $R_0(z) = a + bz^2$ شعاعی است که در آن مقدار مینیمم موجک با داشتن z روی می دهد، به همین صورت a و b ثابتهایی هستند که باید محاسبه شوند.

در توکامک دماوند با نسبت منظر بزرگ(A=37cm/7cm=5.1, B_T=1.2 T, k=1.2, I_p=40 kA) ، محاسبات نشان می دهد که وابستگی تابع $R_0(z)$ در سطح مقطع پلاسما به مختصه z چندان محسوس نیست. بنابراین می توان با تقریب بسیار خوبی آن را ثابت در نظر بگیریم، یعنی: $R_0(z) \equiv a$. در نتیجه در صفحه $r = a$ با توجه به رابطه (۱) داریم

$$\delta(r,z) = \delta_0 \exp(\sqrt{b_r}|z|/w_r)$$

این عبارت یک پروفیل V شکل را پیش بینی می کند و روشن است که در نزدیکی محور پلاسما یعنی $(r,z) = (a,0)$ غیر تحلیلی می باشد. در اینجا ما تابع مناسب U شکلی را بدست آورده ایم، بنابراین تقریب (۱) برای توکامک ما درست نمی باشد.

به منظور دستیابی به نتیجه درست و مناسب، ابتدا فرمولاسیون دقیق میدان مغناطیسی چنبره ای تولید شده توسط یعنی

$$\mathbf{B(r)} = \mathbf{B}(r,z,\varphi) = \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{B}_n(\mathbf{r})$$

که در آن $\mathbf{B}_n(\mathbf{r})$ میدان مغناطیسی سیم پیچ n ام است. بنابراین می توان نوشت

$$\mathbf{B(r)} = \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{R}^n \mathbf{B}_m(\mathbf{r}) \equiv \sum_{n=0}^{N-1} [\mathbf{R}]^n \mathbf{B}_m([\mathbf{R}^{-1}]\mathbf{r})$$

که در آن R اپراتور چرخش به دور محور z یعنی $2\pi/N$ و $[\mathbf{R}]$ شکل ماتریسی آن می باشد، پیچه های میدان مغناطیسی چنبره ای با اندیس m نمایش داده شده اند.

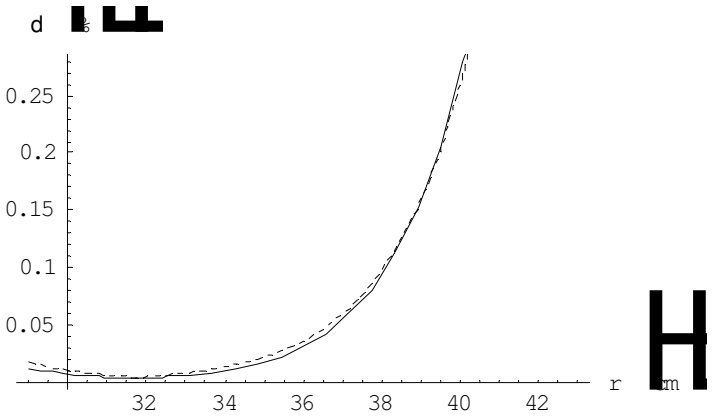
پس از انجام عملیات لازم و تصحیح عبارت تحلیلی (۱) و مقایسه با مقدار دقیق به دست آمده برای توکامک دماوند خواهیم داشت

$$\delta(r,z) = \delta_0 \exp[\frac{|r - R_0| + b_r z^2}{w_r}] \qquad (۲)$$

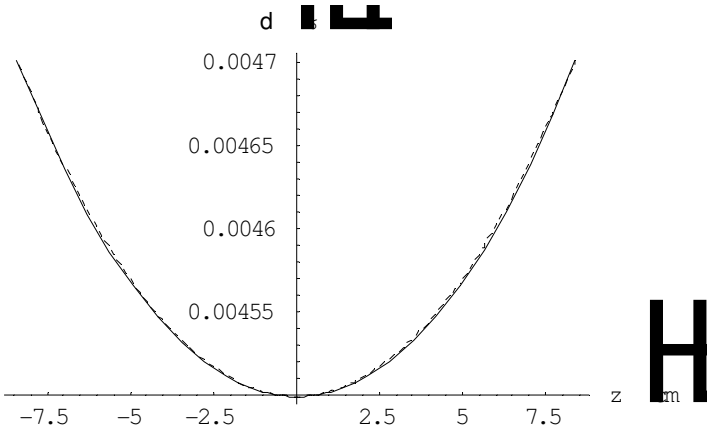
که ثابتهای آن از طریق محاسبه و شبیه سازی به دست آمده اند و عبارتند از:

$$\delta_0 = 4.48982\times10^{-5}, R_0 31.65cm, w_r = 2.07401\times10^{-2}\,cm \text{ and } b_r = 12.8047\times10^{-2}\,cm^{-1}$$

در اینجا پروفیلهای موجک محاسبه شده از رابطه (۲) در توکامک دماوند رسم شده اند. شکل (۱) و(۲) پروفیلهای تابع موجک را بر حسب مختصه های عرضی پلاسمای توکامک دماوند برای دو حالت محاسبه شده نشان می دهد.



شکل(۱) پروفیل تابع موجک توکامک دماوند محاسبه شده به شکل دقیق(منحنی پیوسته) و از طریق تابع شبیه سازی شده(منحنی خط چین) برحسب r(z=0).



شکل(۱) پروفیل تابع موجک توکامک دماوند محاسبه شده به شکل دقیق(منحنی پیوسته) و از طریق تابع شبیه سازی شده(منحنی خط چین) برحسب z(r=a).

نتیجه گیری

در اینجا ما به تابع مناسبی برای پیش بینی و شبیه سازی مقدار موجک توکامکهایی با نسبت منظر بزرگ دست یافته ایم و نشان دادیم که مدل PPPL در این خصوص مناسب نیست. شکل تحلیلی به دست آمده در مقایسه با حل دقیق یعنی انتگرالگیری از دیفرانسیلهای میدان مغناطیسی با توجه به شکلهای رسم شده، نه تنها از دقت بسیار خوبی برخوردار است بلکه در بسیاری از نواحی حل انطباق نشان می دهد.

مراجع

[1] P.N.Yushmanov,"Diffusion Processes in Tokamaks Caused by Ripples, Ripples Amplitude Evaluation for High Aspec Ratio Tokamaks", Questions of Plasma Theory, Moscow ,No.16,P.102-208, 1987.

[2] J. Wesson , "Tokamaks" , Clarendon Press-Oxford , 2004.

[3] R.B. White and H. E. Mynick, " Alpha particle confinement in Tokamaks" , Phys. Fluids B 1,**5**, 1989.

[4] M. H . Redi et. al, . "Simulations of Alpha particle ripple Loss from the International thermonuclear Experimental Reactor" , Phys. Plasmas, **3**, 3037,1996.