

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



عضویت در خبرنامه



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛ شبکه های توجه گرافی (Graph Attention Networks)



کارگاه آنلاین مقاله نویسی IEEE و ISI ویژه فنی و مهندسی



## تعیین ناپایداری‌های پلاسما با استفاده از روش مقدار تکینه

استادزاده، پروین؛ سعادت، شروین<sup>۲</sup>

**چکیده:** همجوشی هسته‌ای به روش محصورسازی پلاسما با میدان‌های مغناطیسی نخستین روش مورد توجه پژوهشگران فیزیک گداخت است. یکی از راکتورهای همجوشی جهت محصورسازی پلاسما توکامک نام دارد که پلاسما هنگام چرخش در محفظه داخلی آن در اثر فشار و عوامل دیگر دچار نوساناتی در جهت سمتی و قطبی می‌شود. این امر سبب تغییراتی در هندسه پلاسما و بروز مدهای پلاسما و همچنین عددهای مود در جهت قطبی ( $m$ ) و سمتی ( $n$ ) می‌شود. برای آنکه بتوانیم درک درستی از ساختار پلاسما در حالات مختلف داشته باشیم ابتدا باید عدد مود آن را بدانیم. سیستم مورد بررسی ما در اینجا توکامک IR-T1 می‌باشد. پس به دلیل وجود تقارن و پایداری در جهت سمتی، عدد  $n$  را برابر با یک منظور می‌کنیم. بنابراین اساس کار ما یافتن عدد مود قطبی یعنی پارامتر  $m$  می‌باشد. روش مقدار تکینه مرسوم به SVD با استفاده از تحلیل آماری و ماتریسی می‌تواند کل مدهای موجود در پلاسما و نیز سهم انرژی هر کدام را در بازه‌های زمانی دلخواه مشخص کند.

**واژه‌های کلیدی:** مود پلاسما، توکامک IR-T1، سیم‌پیچ میرنوف، مقدار تکینه

### ۱-مقدمه

هنگامی که پلاسما در دماهای خیلی بالا ایجاد می‌شود به منظور بهره‌گیری از انرژی آن، پلاسما را محصورسازی می‌کنند و از آنجایی که در چنین شرایطی محصورسازی توسط دیواره‌های مادی ممکن نیست، بنابراین از دستگاهی به نام توکامک استفاده

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک اتمی مولکولی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی  
parvin\_ostadzadeh@yahoo.com

۲- استادیار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز  
shervin ssadat@gmail.com



می‌شود. توکامک یکی از انواع رآکتورهای همجوشی هسته‌ای است که کاربرد آن برای دستیابی به تولید انرژی الکتریسیته از طریق روش گداخت می‌باشد و عمل محصورسازی را به خوبی انجام می‌دهد.

نام توکامک از سه واژه روسی به معنای محفظه مغناطیسی چنبره‌ای<sup>۳</sup> گرفته شده و سیستم آن حاوی پلاسمای دوتریوم - تریتیوم است که توسط دو سری میدان‌های مغناطیسی نگهداری می‌شود. شکل چنبره‌ای این دستگاه به جهت یکنواخت کردن میدان سراسر محصورساز است و این امر باعث پایداری پلاسمای می‌شود چون مهمترین و حیاتی‌ترین وظیفه یک ابزار همجوشی، پایدار نگه داشتن پلاسماست (Wesson, 2004). برای پایداری پلاسمای از ترکیب میدان‌های مغناطیسی چنبره‌ای (در امتداد چرخش پلاسمای) و میدان‌های مغناطیسی قطبی (در امتداد چرخش جریان) در چنبره استفاده می‌شود. میدان مغناطیسی اصلی در توکامک میدان چنبره‌ای است که توسط جریان پیچیده‌های خارجی ایجاد می‌شود اما به منظور برقراری تعادل بین فشار پلاسمای و نیروی مغناطیسی یک میدان مغناطیسی قطبی هم توسط جریان‌های خود پلاسمای ایجاد می‌شود. پلاسمای توسط مدل‌های گوناگون توصیف می‌شود. ساده‌ترین مدل، مدل مگنتو هیدرودینامیک (MHD) است چون پلاسمای به صورت یک سیال الکترومغناطیس در نظر گرفته شده و برای دستگاه توکامک هم از همین مدل استفاده می‌شود (K. Wiesemann, 2012).

توکامک IR-T1 در سال ۱۳۷۳ به منظور پیشبرد تحقیقات و مطالعه پیشرفته در زمینه فیزیک پلاسمای (پلاسمای داغ) و همجوشی هسته‌ای در مرکز تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی نصب و راه اندازی گردید. مطالعه رفتار و ساختار مگنتو هیدرودینامیک در توکامک اهمیت زیادی دارد که براساس آن اطلاعات زیادی در مورد فعالیت مگنتو هیدرودینامیک، عدد مود، میدان‌های مغناطیسی و ناپایداری‌های پلاسمای به دست می‌آید. برای بررسی موارد ذکر شده راه‌های تشخیصی متفاوتی وجود دارد که ساده‌ترین راه برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در یک نقطه، استفاده از سیم‌پیچ میرنوف است. با تغییر شار مغناطیسی گذرا از سطح سیم پیچ، اختلاف پتانسیل در سیم پیچ القا می‌شود. در توکامک IR-T1 این سیم‌پیچ‌ها به یک تقویت کننده متصل هستند. کار این تقویت کننده این است که اثر میدان‌های اهمیک و عمودی و چنبره‌ای را از خروجی فیلتر می‌کند (Ghoranneviss, 2013).

## ۲- مود پلاسمای

پلاسمای توکامک حالتی آشفته دارد و شماری از ناپایداری‌های ماکروسکوپی مرتباً در آن به چشم می‌خورند. در توکامک عمل محصورسازی به وسیله میدان‌های مغناطیسی صورت می‌گیرد علاوه بر آن، میدان مغناطیسی اصلی (چنبره‌ای) به ذرات پلاسمای شتاب می‌دهد تا جریان پلاسمای افزایش یابد و باعث بالا رفتن دما و دانسیته پلاسمای گردد. بنابراین افت جریان پلاسمای و از بین رفتن آن به ناپایداری‌های MHD مربوط می‌شود. هنگامی که ناپایداری در MHD رخ دهد، خطوط میدان مغناطیسی، حالت تقارن خود را از دست می‌دهند. خطوط میدان مغناطیسی در سطوح مغناطیسی شکسته شده و هنگامی که مجدد به هم متصل می‌شوند باعث ایجاد جزایر مغناطیسی در پلاسمای می‌شوند که باعث به هم خوردن تقارن در میدان مغناطیسی و سطح مغناطیسی می‌شوند. این جزایر مغناطیسی منجر به نوسانات میدان مغناطیسی در توکامک و ایجاد مودهای مختلف و همچنین به وجود آمدن عده‌های مود قطبی ( $m$ ) و سمتی ( $n$ ) در پلاسمای می‌شوند.

برای آنکه بتوانیم درک درستی از ساختار پلاسمای در حالات مختلف داشته باشیم ابتدا باید عدد مود آن را بدانیم. اعداد مود پلاسمای در توکامک شامل عدد مود چنبره‌ای در راستای سمتی یعنی  $n$  و عدد مود قطبی در راستای قطبی یعنی  $m$  می‌باشند.

21  
February  
2016

۲  
اسفند  
۱۳۹۴

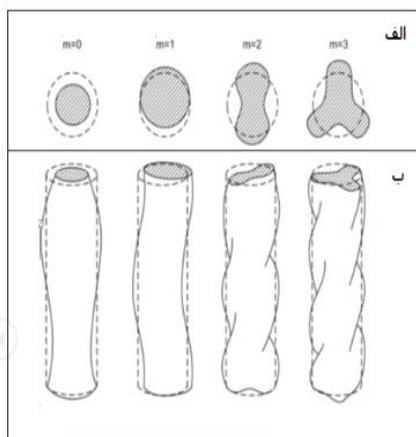
دومین کنفرانس بین المللی پژوهش در

مهندسی، علوم و تکنولوژی

2nd International Conference  
on Research in  
Engineering, Science and Technology



شکل (۱) نمونه‌ای از اعداد  $m$  را نشان می‌دهد که در قسمت الف سطح مقطع قطبی پلاسما و در قسمت ب سطح مقطع سمتی پلاسما می‌باشد. این اشکال از اهمیت بسیار بالایی برخوردارند زیرا تعیین کننده مود پلاسما و میزان پایداری آن هستند.

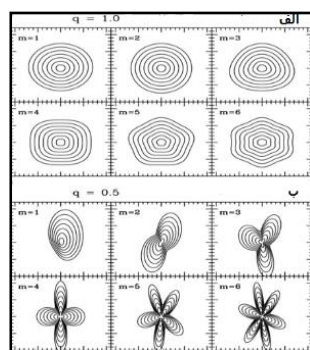


شکل ۱: تشکیل مودهای مختلف در ستون پلاسما

شرط اصلی تعادل پلاسما صفر شدن جمع برداری نیروهاست. به عبارتی دیگر باید نیروی مغناطیسی با نیروی حاصل از فشار پلاسما در تعادل باشد (Bittencourt, 1986). آشکار است که سطوح مغناطیسی سطوحی با فشار ثابت هستند و خطوط جریان نیز بر روی سطوح مغناطیسی قرار دارند. حالت پایدار تنها توسط میدان‌هایی که در سیستم چنبره‌ای دارای خطوط نیرویی بدون برخورد با دیواره هستند ایجاد می‌شود. پس شرط تعادل نیروها در پلاسما اولین گام در محصورسازی پلاسماست. یکی از عواملی که نقش بسیار مهمی در تعادل توکامک برعهده دارد، کمیت  $q$  یا همان ضریب پایداری می‌باشد.

$$q = \frac{m}{n} \quad (1)$$

هرچه ضریب پایداری بیشتر باشد پلاسما تعادل بیشتری خواهد داشت. شکل (۲) تعدادی مود با عددهای مختلف را نشان می‌دهد که در قسمت الف مقدار ضریب پایداری برابر با یک است. در قسمت ب همان مودها هستند اما به دلیل اینکه ضریب پایداری کم‌تری دارند پس نسبت به قسمت الف پایداری کمتری نیز دارند.



شکل ۲: مودهای قطبی با  $q$  های مختلف



لازم به ذکر است در بررسی پلاسمای حبس شده در توکامک‌های کوچک با سطح مقطع دایره به علت تقارن چنبره توکامک، معمولاً عدد  $n$  را برابر با یک در نظر می‌گیریم از این رو هدف اصلی ما محاسبه  $m$  یعنی تعداد گلبه‌های شکل پلاسمای در راستای قطبی می‌باشد.

### ۳- روش تجزیه مقدار تکینه (SVD) <sup>۴</sup>

روش موسوم به SVD با استفاده از تحلیل آماری و ماتریسی می‌تواند کل مدهای موجود در پلاسمای و نیز سهم انرژی هر کدام را مشخص کند. در این روش حتی مدهای جفت شده نیز تفکیک می‌شوند. روش SVD از سایر روش‌ها دقیق‌تر بوده و اطلاعات بیشتری از مدهای موجود در پلاسمای و نیز سهم انرژی هر کدام را مشخص کند. البته این روش نسبتاً جدیدتر بوده و در بعضی از توکامک‌ها استفاده شده است.

به‌طور کلی روش SVD با استفاده از جبر خطی و نظریه ماتریسی قابل توصیف می‌باشد. فرض کنید یک سری زمانی با  $m$  بعد به شکل زیر داریم.

$$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)] \quad (2)$$

که در آن مقدار  $x_i$  یک کمیت فیزیکی در مکان‌های (کانال) متفاوت است. سری زمانی هر  $t_s$  ثانیه نمونه‌برداری می‌کند و یک مجموعه  $N$  تایی  $\{x_1(t_s), x_2(t_s), \dots, x_m((N-1)t_s)\}$  تشکیل می‌دهد. براساس این تعریف می‌توانیم یک ماتریس  $N \times M$  بسازیم.

$$X = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} x(0) \\ x(t_s) \\ \dots \\ x((N-1)t_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(0) & \dots & x_m(0) \\ \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ x_1((N-1)t_s) & \dots & x_m((N-1)t_s) \end{bmatrix}$$

(۳)

$$x_{ij} = \frac{1}{N} x_j((i-1)t_s)$$

که در آن سطرها مربوط به زمان و ستون‌ها مربوط به مکان (کانال) است. ماتریس SVD به شکل زیر بیان می‌شود.

$$X = VSU^+ \quad (4)$$

S یک ماتریس  $M \times M$  است.

$$S_{ij} = \delta_{ij} s_i \quad (5)$$

که در آن  $s_i \geq 0$  و مقدار تکینه نامیده می‌شود.  $V$  یک ماتریس  $N \times M$  است که ستون‌های آن متعامد هستند.

$$v^{(j)} v^{(k)} = \delta_{jk} \quad (6)$$

$v^{(j)}$  ستون  $j$ ام ماتریس  $V$  است. واضح است که  $U$  هم یک ماتریس  $M \times M$  است. این تبدیل قادر است که ماتریس را قطری کند. مقادیر تکینه معرف ویژه مقادیر هستند زیرا ما در حال قطری کردن یک ماتریس هستیم. با توجه به معادله ویژه مقادیر

زیر،

$$A[u] = a[u] \quad (7)$$



اعضاء ستونی ماتریس  $U$  یعنی  $u^{(j)}$  ها، معرف ویژه بردارها هستند.

$$x_{ij} = V_{ik} S_k U_{jk} = v_i^{(k)} S_k u_j^{(k)} \quad (8)$$

$S_k$  ها باعث قطری شدن ترکیب می شوند.

#### ۴- آنالیز سری زمانی به روش SVD

فرض کنید یک موج سینوسی وابسته به زمان به شکل زیر داریم.

$$X(y, t) = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} y - 2\pi vt\right) \quad (9)$$

با استفاده از رابطه (۹) مقادیر فیزیکی  $X$  را در مکان  $M$  ام،  $y = R\alpha = \frac{2\pi R}{M}((j-1))$  (RAJU et al., 2000)

باتوجه به رابطه (۳) عناصر ماتریسی SVD را به شکل زیر می نویسیم،

$$X_{ij} = \frac{1}{\sqrt{N}} \cos\left(\frac{2\pi n}{M}(j-1) - 2\pi vt_s(i-1)\right) \quad (10)$$

ازطرفی مقدار میانگین زمانی برای دو کانال عبارت است از حاصل ضرب دو سیگنال در مکان های متفاوت که به شکل زیر داده می شود،

$$\mu_{ij} = \langle x_i(t)x_j(t) \rangle = (X^T X)_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_i(kt_s)x_j(kt_s) \quad (11)$$

بافرض  $Nt_s \gg \frac{1}{v}$  مقدار میانگین زمانی به شکل زیر است،

$$\mu_{ij} = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi n}{M}(i-j)\right) \quad (12)$$

قطری کردن ماتریس بالا معادل پیدا کردن ضرایب بسط فوریه در مکان و زمان است. یک جفت از جوابها به شکل سینوسی و کسینوسی با مقادیر صحیح  $m$  هستند.

$$\begin{aligned} u_i^{(1)} &= \sqrt{\frac{2}{M}} \cos\left(\frac{2\pi m}{M}(i-1)\right) \\ u_i^{(2)} &= \sqrt{\frac{2}{M}} \sin\left(\frac{2\pi m}{M}(i-1)\right) \end{aligned} \quad (13)$$

برای ماتریس  $V$  نیز همین ساختار وجود دارد.

$$\begin{aligned} v_i^{(1)} &= \sqrt{\frac{2}{N}} \cos(2\pi vt_s(i-1)) \\ v_i^{(2)} &= \sqrt{\frac{2}{N}} \sin(2\pi vt_s(i-1)) \end{aligned} \quad (14)$$

دومین کنفرانس بین المللی پژوهش در  
مهندسی، علوم و تکنولوژی

21 February 2016  
۲ اسفند ۱۳۹۴

2nd International Conference  
on Research in  
Engineering, Science and Technology



به عبارتی دو ستون اول ماتریس  $U$  و  $V$  را داریم. جواب کلی این مودها که هم سینوسی و هم کسینوسی را در ساختار خود داشته باشند با  $m_l$  ها و  $a_l$  های مختلف به وجود می آیند.

$$X_{ij} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_l a_l \cos\left(\frac{2\pi m_l}{M} (j-1) - 2\pi v_l t_s (i-1)\right) \quad (15)$$

از طرفی داریم،

$$U^T \mu U = U^T X^T X U = U^T U S V^T V S U^T U = s^2 \quad (16)$$

بر اساس روابط (۱۱)، (۱۵) و (۱۶) داریم،

$$s_j = \sqrt{M} \frac{a_1}{2}$$

$$s_j^2 = M \frac{a_1^2}{4} \quad (17)$$

$s_i^2$  که ویژه مقادیر  $SVD$  و معرف سهم انرژی حمل شده در هر مود است. به طور کلی برای یک موج ناشی از برهم نهی چند مود می توان سری زمانی زیر را در نظر گرفت،

$$X_{ij} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_l a_l \cos\left(\frac{2\pi m_l}{M} (j-1) - 2\pi v_l t_s (i-1) + \phi_l\right) + \eta \delta_{ij} \quad (18)$$

که در آن  $m_l$  عدد مود،  $v_l$  فرکانس چرخش،  $a_l$  دامنه مود و  $\delta_{ij}$  نویز با دامنه  $\eta$  فرض می شود. بنابراین تحلیل  $SVD$  و پیدا کردن پارامترهای رابطه (۱۸) می تواند مودهای موجود در پلاسما را مشخص کند (Nardonet, 1992).

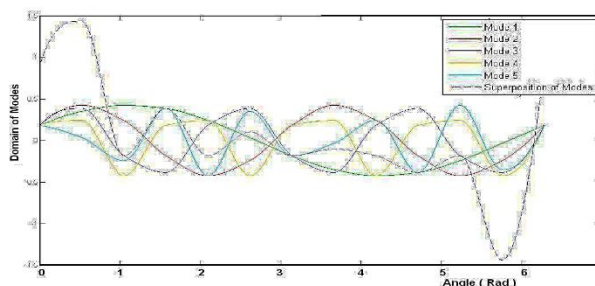
#### ۵۴- تعیین عدد مود با روش SVD

آنالیز  $SVD$  قادر است علاوه بر نشان دادن عدد مود، درصد انرژی هر مود را تعیین کند. با این روش تعیین عدد صحیح مود بسیار ساده خواهد بود. به عبارتی می توان عدد صحیح مود را با قطعیت تمام مشخص کرد و نویزهای سیستم را تشخیص داد. برای بررسی این روش چهار بازه زمانی مورد را در نظر می گیریم و نتایج به دست آمده را با هم مقایسه خواهیم کرد. جدول (۱) نشان دهنده درصد انرژی مود پلاسماست.

(جدول ۱): درصد انرژی مودها برای بازه اول

درصد انرژی (%)	عدد مود
۸۹	۲
۳/۴	۳
۱/۲	۴
۱/۱	۵
~۱	۶

در نمودار شکل (۱) نمودار تک تک مودها به طور جداگانه و نیز برهم نهی آنها رسم شده است.



(نمودار ۱): آنالیز مود برای بازه اول

نمودار مشخص کننده مود ۶ است اما مود ۳ عدد مود صحیح است و مودهای بالاتر با توجه به سهم بسیار اندک خود بیشتر، نویزها یا میکرو نوسانات هستند. در بازه دوم که پلاسما به یک پایداری نسبی می‌رسد مود ۳ و افزایش اثر مود ۲ به وضوح دیده می‌شود. در بازه سوم نوسانات میرنوف افزایش شدیدی دارند و این امر به معنای فعالیت پلاسما و افزایش نسبی ناپایداری و عدد مود پلاسماست.

در بازه چهارم کاهش جریان پلاسما را شاهد هستیم. در این بازه عدد مود به ۴ افزایش می‌یابد. شباهت نمودارها قابل توجه است. مود ۵ انرژی کمتری را در بر دارد که آن را به عنوان نویز می‌شناسیم (Saadat, 2011).

## ۶- نتیجه

روش SVD قابلیت تفکیک مودها را دارد و می‌تواند برهم‌نهی آنها را نشان دهد. این توانایی به ما کمک می‌کند تا عدد مود پلاسمای توکامک را با دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها به دست آوریم. از دیگر قابلیت‌های این روش به دست آوردن درصد انرژی‌های مود است. این توانایی به ما کمک می‌کند تا بتوانیم مودهای غالب و نیز مودهای ضعیف‌تر را در پلاسما مشخص نماییم. علاوه بر این، نویزها نیز رویت شده و از محاسبه ما حذف می‌گردند.

آنچه هدف نهایی ما در این تحقیق بوده گامی بسیار مهم و پرکاربرد است. پیش‌بینی عدد مود یکی از اهداف اساسی و مهم در طراحی و کنترل توکامک است. اگر سیستمی بتواند عدد مود پلاسما را پیش‌بینی کند کنترل پلاسمای توکامک بسیار ساده خواهد بود. با این راهکار می‌توان هر اختلالی در مود پلاسما را قبل از وقوع پیش‌بینی و کنترل لازم را اعمال کرد. چنین سیستمی از لحاظ تئوری، قابلیت پایداری نامحدود را خواهد داشت و این هدف هر سازنده توکامک است.

-۷

مراجع

[1] Wesson, J. Tokamak, Clarendon Press, (2004).

[2] K. Wiesemann. AEPT, Ruhr-Universität Bochum. Germany (2012).





[3] M. Ghoranneviss, A. Salar Elahi, G. van Oost, R. Arvin, S. Mohammadi, ISSN 1562-6016. BATH. (2013). Nol (83).

[4] Bittencourt, J. A. Fundamental of Plasma Physics, Pergamon Press (1986).

[5] D RAJU. R JHA, P K KAW, S K MATTOO, Y C SAXENA and ADITYA TEAM Institute for Plasma Research, Bhat, Gandhinagar 382-428, India (2000).

[6] Nardonet, C Plasma. Phys. Control. Fusion 34 (1992).

[7] Shervin Saadat. Mohammad K. Salem J Fusion Energy (2011) 30: 342-346.

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



عضویت در خبرنامه



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛ شبکه های توجه گرافی (Graph Attention Networks)



کارگاه آنلاین مقاله نویسی IEEE و ISI ویژه فنی و مهندسی