

## شبیه‌سازی رانش جریان دورگه‌ی پایین در توکامک‌های NSST و DEMO

علی اصغر، مولوی چوبینی؛ احمد، نقی دخت\*

دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده فیزیک

چکیده:

موج دورگه‌ی پایین در بررسی و یافتن سناریوهای مختلف برای عملکرد حالت پایدار توکامک با محصورسازی اصلاح-شده مفید خواهد بود. با استفاده از کد LSC می‌توان توان نسبی موج تزریقی، ضریب پخش شبه خطی و نیز جریان موج تزریقی را برای توکامک‌های NSST و DEMO شبیه‌سازی نمود. در این مقاله فرکانس تزریقی ۴/۶ گیگاهرتز را برای این امواج به کار بردیم و نشان می‌دهیم که گرمایش پلاسما با استفاده از تزریق موج دورگه‌ی پایین در توکامک چنبره‌ای DEMO نسبت به توکامک کروی NSST کارایی بالاتری دارد و این یک مزیت برای توکامک‌های چنبره‌ای در مقایسه با توکامک‌های کروی در بحث رانش امواج از طریق موج دورگه‌ی پایین می‌باشد.

کلمات کلیدی: موج RF. کد LSC. موج LH. توکامک NSTX. توکامک DEMO.

مقدمه:

در سال‌های اخیر علاقه‌مندی زیادی به تولید جریان‌های حالت پایا در پلاسمای توکامک با تزریق موج دورگه‌ی پایین به وجود آمده و به دلیل مزیت سادگی و کارایی بالای آن، یک رانش جریان موج دورگه‌ی پایین (LHCD) در آزمایش‌های توکامکی به طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته است. رانش موج دورگه‌ی پایین ثابت شده که یکی از کاراترین روش‌ها برای تولید جریان‌های غیرالقایی در آزمایش‌های توکامکی است چرا که امواج دورگه‌ی پایین می‌توانند با الکترون‌های فوق گرمایی برهم‌کنش انجام دهند [۱]. پروژه‌ی DEMO در حال حاضر در مرحله‌ی طراحی مفهومی است و لذا هنوز هیچ ساختار ترجیحی برای آن وجود ندارد. این توکامک امکان تکنولوژیکی دستیابی به توان همجوشی را تایید خواهد کرد و همچنین قابلیت سوددهی و عملیاتی شدن اقتصادی را نشان خواهد داد. در واقع این توکامک نخستین وسیله‌ای خواهد بود که مقدار قابل توجهی از توان الکتریکی را از همجوشی هسته‌ای استخراج می‌نماید [۲]. در هر حال رسیدن به کارکرد جفت-شدگی خوب برای موج دورگه‌ی پایین هنوز یک چالش بزرگ است. رانش جریان موج دورگه‌ی پایین مرتبط با الکترون‌های با انرژی خیلی بالاست که الکترون‌های سریع نام دارند. زمانی که شرط تشدید  $\omega - k_{\parallel}v = 0$  برقرار باشد، موج دورگه‌ی پایین الکترون‌های سریع را تولید خواهد کرد که تکانه موازی بزرگی را حمل می‌کنند و جریان‌رانشی را تشکیل خواهند داد و در توزیع الکترونی غیرماکسولی به طور شدید رخ می‌دهد.

فهم ویژگی‌های ترابرد الکترون‌های سریع اهمیت اساسی در و تحقیقات توکامک‌های امروزی دارد، لذا دینامیک الکترون‌های سریع که حمل‌کننده‌ی جریان غیرالقایی‌اند برای آزمایش‌های کنترل پروفایل جریانی ضروری می‌باشد. هدف اصلی از تحقیق ترابرد الکترون‌های سریع امکان استفاده از رانش جریان دورگه‌ی پایین برای عملکرد حالت پایا و کنترل پروفایل جریان در توکامک‌های امروزی است.

## شبیه‌سازی

توکامک‌ها بر اساس پارامترهای به‌کار رفته در طراحی آن‌ها به دو نوع کروی و چنبره‌ای تقسیم می‌شوند. این پارامترها برای توکامک‌های NSST و DEMO (نوع D) در جدول (۱) آورده شده [۳ و ۴] و در برنامه شبیه‌سازی امواج دوگانه‌ی پایین (LSC) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. LSC یک مدل محاسباتی سوق جریان امواج LH برپایه‌ی زبان برنامه‌نویسی فورترن است که در حضور میدان الکتریکی سوق داده می‌شوند، و در آن گرمایش الکترون‌ها، یون‌ها، جزئیات هندسی و پروفایل پلاسما مورد بررسی قرار می‌گیرد. در کد LSC اثرات فضای فاز دو بعدی در یک معادله‌ی یک بعدی فاکر-پلانک مورد تقریب قرار می‌گیرد. برنامه LSC شامل تعدادی از فایل‌ها به زبان برنامه‌نویسی فورترن است که هر کدام از این فایل‌ها برای اهداف خاصی طراحی و خروجی هر کدام پارامترهای خاصی را محاسبه می‌کنند که مختصراً به توضیح آن‌ها می‌پردازیم:

۱. پارامترهای توکامک و محیط پلاسمای آن که از طریق فایل equilibrium-file انجام می‌پذیرد.
۲. پارامترهای LH (فرکانس، طیف و ...) که از طریق فایل input.lhh انجام می‌گیرد.
۳. پارامترهای محاسباتی (اندازه و تعداد گام پرتو تزریق شده) که تحت نام inpexprt انجام می‌گیرد.

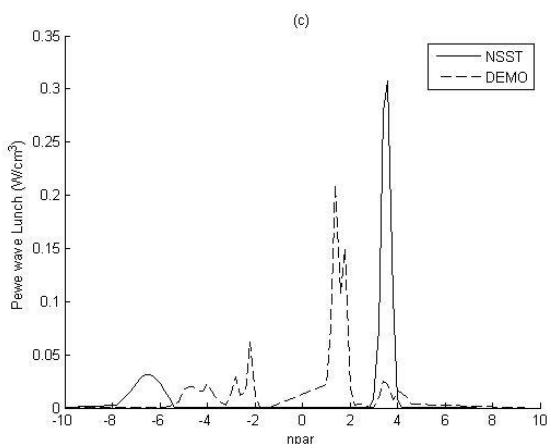
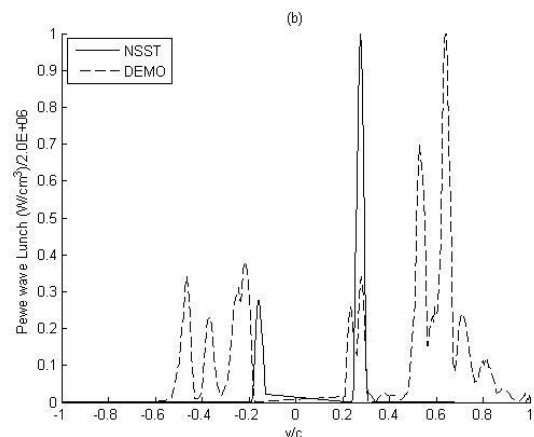
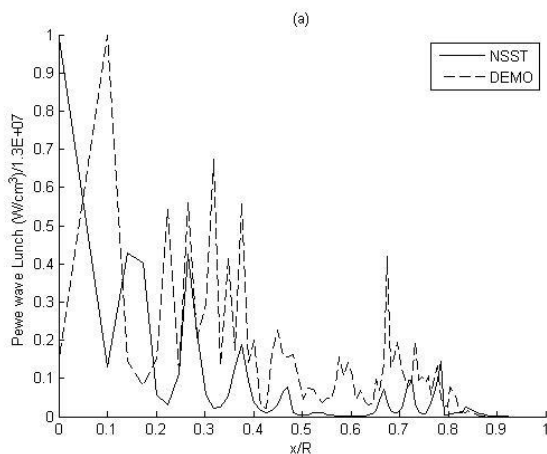
جدول ۱. پارامترهای اصلی برای توکامک‌های NSST و DEMO (نوع D) [۳ و ۴].

parameters	DEMO	NSST
R(cm)	۹۰۰	۱۵۱
a(cm)	۲۲۰	۹۴
B, toroidal field(T)	۷,۲	۲,۶
$I_p$ (MA)	۱۶,۴۴	۱۰,۱
P (MW)	۲۵	۱۲
$T_e$ (keV)	۲۰	۵,۵
$n_e$ ( $cm^{-3}$ )	$۸,۸ \times 10^{13}$	$۲,۱ \times 10^{13}$

خروجی‌های برنامه LSC را با استفاده از نرم‌افزار MATLAB ترسیم می‌نماییم که تعدادی از آن‌ها در اینجا ارائه می‌شوند.

نتایج: الف) توان نسبی طیف موج تزریقی

جفت‌شدگی امواج دورگه‌ی پایین با ذرات پلاسما وابسته به فاکتورهای مختلفی همچون فاصله از مرکز پلاسما، شاخص شکست موازی و سرعت الکترونی است، لذا توان نسبی را برای موج تزریقی بهنجارشده در فرکانس  $4/6$  گیگاهرتز نسبت به این سه پارامتر برای دو توکامک مطرح شده در شکل (۱) رسم کرده‌ایم. با توجه به این شکل‌ها در می‌یابیم که در توکامک DEMO طیف موج تزریقی می‌تواند در مرکز پلاسما نفوذ کرده و در نتیجه برخورد با یون‌ها باعث گرمایش پلاسما شود، اما قله‌های طیف برای توکامک کروی NSST اغلب کوچک‌تر از DEMO بوده و موج تزریق شده معمولاً در لبه‌های پلاسما قرار دارد و انرژی موج در لبه‌های پلاسما از دست می‌رود، لذا گرمایش پلاسما از طریق تزریق موج دورگه‌ی پایین کارایی بالاتری در توکامک چنبره‌ای DEMO خواهد داشت.



شکل ۱. توان موج تزریقی دورگه‌ی پایین در فرکانس  $4/6$  گیگاهرتز برای توکامک‌های NSST و DEMO (نوع D) در برابر الف) فاصله از مرکز پلاسما (ب) سرعت بهنجارشده و ج) شاخص شکست موازی

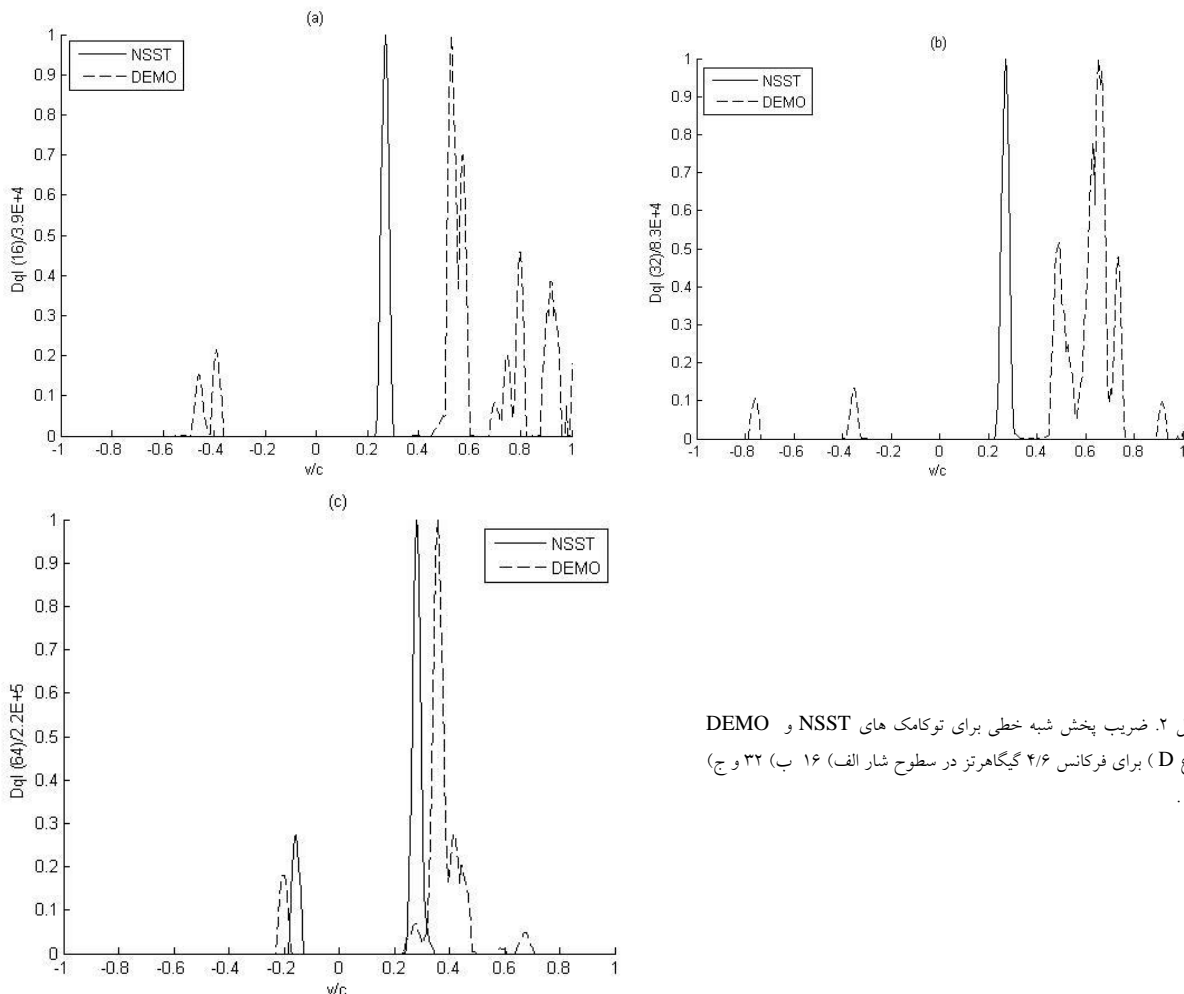


## ب) ضریب پخش شبه خطی

آهنگ رشد ضریب پخش جمله‌ی شبه خطی  $D_{ql}$  با سرعت  $v_{\parallel}$  در یک میدان موجی و با عدد موج  $k_{\parallel}$  با رابطه زیر داده می‌شود:

$$D_{ql}(v_{\parallel}) = \sum_s \frac{\pi}{v} \left( \frac{e}{m_e} \right)^2 E_{\parallel}^2 \delta(\omega - k_{\parallel} v_{\parallel}) \quad (1)$$

که  $E_{\parallel}$  دامنه میدان الکتریکی موج موازی با میدان مغناطیسی است [۵]. ما ضریب پخش شبه خطی را در مقابل سرعت بهنجار رسم کرده‌ایم. این کار برای فرکانس موج تزریقی ۴/۶ گیگاهرتز صورت گرفته است و سطوح شار ۱۶، ۳۲ و ۶۴ مدنظر قرار گرفته‌اند. در شکل‌های ۲ الف و ۲ ب با تزریق موج دورگه‌ی پایین سرعت‌های فازی مثبت خالص برای NSST داریم و همین‌طور تا حد زیادی پخش روی سرعت‌های فازی مثبت برای توکامک DEMO رخ داده است. وضعیت در شکل ۲ ج نیز شبیه ۲ الف و ۲ ب می‌باشد، با این تفاوت که سرعت‌های فازی منفی برای هر دو توکامک وجود دارد.



شکل ۲. ضریب پخش شبه خطی برای توکامک‌های NSST و DEMO (نوع D) برای فرکانس ۴/۶ گیگاهرتز در سطوح شار الف) ۱۶ ب) ۳۲ و ج) ۶۴.

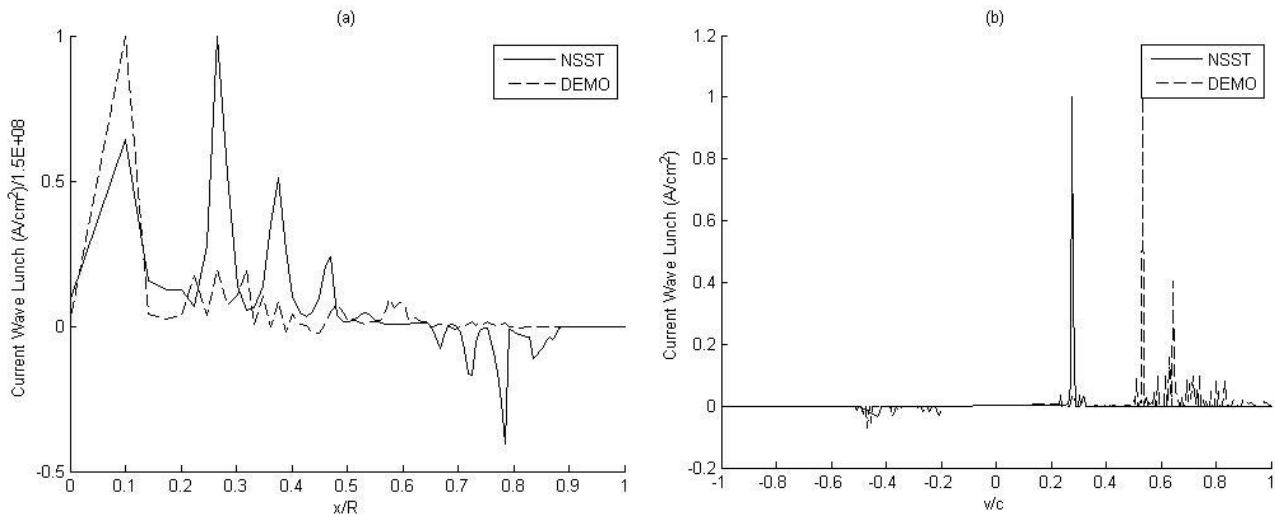


## ج) رانش جریان

رانش جریان الکترونی در هر سطح شار متناظر با رابطه‌ی زیر است:

$$J_{rf} = \frac{-ene}{\Gamma} \int dv_{\parallel} D_{ql}(v_{\parallel}) \frac{\partial f_e(v_{\parallel})}{\partial v_{\parallel}} \frac{v_{\parallel}}{v_{\parallel}^2} \left[ \mu - \frac{1+z/2+\mu^2/2}{v_{\parallel}^2} \right] \quad (2)$$

که  $\mu = +1$  و  $\mu = -1$  رانش جریان مثبت و منفی را به ترتیب می‌دهند. همین‌طور  $\Gamma = \ln \Lambda \frac{ne^2}{4\pi\epsilon_0 m_e^2}$  و ضریب بهنجارش  $\beta_z$  طوری انتخاب می‌شود که در غیاب موج رادیوفرکانسی مقدار صحیح را برای رسانندگی گرمایی به دست آوریم. به طور تقریبی می‌توان گفت که  $\beta_z = \frac{1+z}{5}$  که در آن  $Z$  بار یونی موثر می‌باشد [۵]. با تحقیق در این معادله درمی‌یابیم که رانش جریان وابسته به پارامترهای مختلفی همچون بار موثر و سرعت ذره است که دارای مقادیر متفاوتی در پلاسما می‌باشند و لذا جریان‌های متفاوتی را ایجاد خواهند کرد. رانش جریان برای توکامک‌های NSST و DEMO (نوع D) در شکل ۳ در برابر فاصله بهنجارشده و سرعت موازی بهنجارشده به ترتیب رسم شده است. برای توکامک DEMO رانش جریان نزدیک به مرکز پلاسما بوده و بیشترین کارایی را نشان می‌دهد.



شکل ۳. جریان موج تزریقی برای توکامک‌های NSST و DEMO (نوع D) در برابر الف) فاصله بهنجارشده و ب) سرعت بهنجارشده.



## بحث و نتیجه‌گیری

از آنجایی که امواج دورگه‌ی پایین می‌توانند با الکترون‌های فوق گرمایی برهم‌کنش انجام دهند، لذا این امر از طریق آزمایش‌های متعدد مورد بررسی قرار گرفته و ثابت شده است که رانش جریان از طریق تزریق موج دورگه‌ی پایین یکی از روش‌های موثر برای تولید جریان‌های غیرالقایی در توکامک است و در شبیه‌سازی انجام شده نیز این امر مشخص گردید. در تمامی محاسبات انجام گرفته در این مقاله دریافتیم که گرمایش پلاسما از طریق تزریق موج دورگه‌ی پایین تقریباً کارایی بالاتری در توکامک DEMO نسبت به توکامک کروی NSST دارد. پرتوهای موج دورگه‌ی پایین در توکامک DEMO در مقایسه با توکامک NSST خیلی راحت‌تر می‌توانند به چگالی‌های مرکزی پلاسما نفوذ کرده و سبب گرمایش محیط مرکزی پلاسما شوند که باعث می‌شود شرط تحقق واکنش همجوشی خودنگهدار - معیار لاوسون - بهتر صورت بگیرد و امکان همجوشی هسته‌ای با توان و کارایی بالاتری را فراهم نماید. به‌علاوه این امر ممکن است به دلیل این‌که در توکامک چنبره‌ای جریان در چگالی پایین‌تری رانده می‌شود، نیز باشد. بنابراین رانش جریان پرتوهای موج دورگه‌ی پایین می‌تواند در توکامک چنبره‌ای کارایی بالاتری نسبت به توکامک کروی داشته باشد و سبب استفاده این امواج در تزریق به پلاسما توکامک برای گرمایش محیط گردد.

## مراجع:

- [۱] N. J. Fisch, Theory of current drive in plasmas, Rev. of Modern Phys. ۵۹, ۱۷۵, ۱۹۸۷.
- [۲] R.Zagorski, R.I.Ivanova-Stanik, R. Stankiewicz, Simulations with the COREDIV code of DEMO discharges, Nucl. Fusion. ۵۳, ۰۷۳۰۳۰, ۲۰۱۳.
- [۳] J.Garcia, G.Giruzzi, J.F.Artaud, V.Basiuk, J.Decker, F.Imbeaux, Y.Peysson, M.Schneider, Analysis of DEMO scenarios with the CRONOS suite of codes, Nucl. Fusion. ۴۸, ۰۷۵۰۰۷, ۲۰۰۸.
- [۴] C. Neumeyer, P. Heitzenroeder, C. Kessel, M. Ono, M. Peng, J. Schmidt, R. Woolley, I. Zatz, Next Step Spherical Torus design studies, Fusion Engineering and Design. ۶۶-۶۸, ۱۳۹-۱۴۵, ۲۰۰۳.
- [۵] D.W.Ignant, A.J.Redd, Lower Hybrid Simulation Code Manual, Plasma Physics Laboratory, Princeton University, Princeton, NJ, ۲۰۰۰.