

## پیش‌یونش در توکاماک الوند IIC

مارکوس آواکیان، حبیب... مینو، ساکو آواکیان، جهانگیر بهروزی نبا  
 بخش فیزیک پلاسما و گذاخت  
 مرکز تحقیقات هسته‌ای  
 سازمان انرژی اتمی ایران

### چکیده

پیش‌یونش در توکاماک الوند IIC مورد مطالعه قرار گرفت. روش‌های گوناگونی برای ایجاد یونش به مرحله آزمایش درآمد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که پیش‌یونش نقشی مهم در تشکیل و تعادل پلاسمای توکاماک دارد و سهل‌انگاری در ایجاد آن موجب عدم تشکیل پلاسما یا تشکیل بی‌موقع آن و اتلاف مقدار قابل ملاحظه‌ای از انرژی اولیه می‌شود. روش القای سامدهای بالاگرچه در انرژی‌های زیاد با ایجاد پیش‌یونش مناسب همراه است، ولی در دستگاههای کنترل و اندازه‌گیری توکاماک ایجاد نوفه کرده و کار آنها را مختلف می‌کند. روش تزریق الکترون به داخل محفظه، اگر راستای شار الکترون‌های مناسب توکاماک ایجاد نوافرود کند. در این روش، در  $Z_{eff}$  (عدد اتمی مؤثر) بالا به خوبی عمل می‌کند ولی در  $Z_{eff}$  پایین و در انرژی‌های عادی کارساز نیست. روش تخلیه الکتریکی بین دو الکترود، چنانچه به طور صحیح اعمال شود، هیچ‌یک از این اشکالات را در بر نخواهد داشت و به خوبی عمل خواهد کرد. در این روش، به منظور اعمال پتانسیل به الکترودهای درون محفظه، از یک مبدل تپی<sup>۱</sup> استفاده شد که نوفه را به مقدار زیاد پایین آورد و در انرژی‌های پایین به خوبی عمل کرد.

تاییده می‌شود و چون مقدار این تابش مناسب با  $\Sigma(n_i Z_i^2)$  است، اتلاف شدیداً بالا خواهد بود. بنابراین لازم است گازهای با عدد اتمی بزرگ از محفظه بیرون برده شود که این عمل به وسیله تخلیه محفظه خلاء، با درجه خلاء فوق العاده بالا<sup>۲</sup>، پخت<sup>۳</sup> محفظه (در حدود ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) و

### مقدمه

در توکاماک الوند IIC [۱] و اصولاً در توکاماك‌ها برای آن که گاز هیدروژن داخل محفظه خلاء تحت تاثیر میدان‌های مغناطیسی توکاماك قرار گیرد لازم است که قبل از ایجاد میدان‌های توکاماك، گاز هیدروژن تا اندازه‌ای بونیده شود. در  $Z_{eff}$  بالا، یعنی وقتی که محفظه خلاء هنوز کاملاً تمیز نشده است و اتم‌هایی با عدد اتمی بزرگ در آن وجود دارد، به علت پایین بودن انرژی یونش اتم‌های سنگین، این عمل به سادگی صورت می‌گیرد. ولی بعد از تشکیل پلاسما، انرژی به صورت تابش ترمیزی<sup>۴</sup> به بیرون

۱ - Pulstransformer

۲ - bremsstrahlung

۳ - ultra high vacuum

۴ - bake out

$$f_g = \frac{e\beta}{2\pi m c} \approx 10^{10} H_Z$$

کسب انرژی از این نوسان‌ها برای الکترون‌ها به خوبی می‌سر نبود. دوم آن‌که به علت بالا بودن بسامد این نوسان‌ها نسبت به بسامد تخلیه‌های خود توکاماک نوفره بسیار شدیدی در تمام دستگاههای کنترل و اندازه‌گیری توکاماک ایجاد و کار آنها را مختل می‌کرد.

مطالعات بعدی نشان داد که می‌توان با فرستادن مقداری الکترون به داخل محفظه خلاء، عمل پیش‌بونش را نجام داد [۴]. به این ترتیب، از یکی از دریچه‌های محفظه خلاء، یک چشمۀ الکترون به داخل آن فرستاده شد. کافی بودن عمل پیش‌بونش با تشکیل به موقع پلاسمای برآورد گردید. نتیجه چنین بود که پیش‌بونش به اندازه حالت قبل ولی ناکافی انجام می‌گرفت. این سیستم نسبت به سیستم قبلی ارجاعت داشت، زیرا تمام نوفره‌های موجود بر طرف شده بود. ناکافی بودن پیش‌بونش از آنجا برآورد شد که پلاسمای هیچ وقت در ربع اول تپ (پالس) میدان توروپیدال تشکیل نمی‌شد (شکل ۱).

نتایج مطالعات بعدی آن بود که به علت قرار گرفتن چشمۀ الکترون در سایه محدود کننده<sup>۷</sup> پلاسمای توکاماک و همچنین تابش بیشتر الکترون‌ها در راستای گرادیان میدان توروپیدال، نیروی  $\nabla B \times B$  اکثر الکترون‌ها را به طرف دیواره محفظه خلاء و دیواره محدود کننده می‌راند و از رسیدن الکترون‌ها به داخل محفظه و انجام بونش ثانویه جلوگیری می‌کند. بنابراین، برای انتخاب راستای مناسب

تمیز کردن آن به وسیله تخلیه الکتریکی<sup>۸</sup> انجام می‌گیرد. در هر حال، بعد از تمیز شدن محفظه عمل پیش‌بونش<sup>۹</sup> به سختی صورت می‌گیرد و لازم است دستگاهی قوی‌تر و دقیق‌تر به کار گرفته شود. در این مقاله به شرح دستگاههای مختلف پیش‌بونش که در توکاماک الوند IIC به کار رفته است خواهیم پرداخت.

### شرح آزمایش

در توکاماک‌ها معمولاً "برای پیش‌بونش گاز داخل محفظه، از القای بسامدهای رادیویی به مولکولهای گاز استفاده می‌شود [۲]. الکترون‌ها که نیز با بسامدهای رادیویی، به دور میدان مغناطیسی می‌چرخدند از این امواج بونیده می‌کنند. در اوایل کار توکاماک الوند IIC، نیز از این روش برای پیش‌بونش استفاده می‌شد، به این ترتیب که خازنی با ظرفیت کم (۵/۰ میکروفاراد) و ولتاژ شارژ زیاد (۲۰ کیلوولت) بعد از ایجاد میدان توروپیدال و قبل از ایجاد میدان پولوپیدال، در سیم پیچ‌های مربوط به میدان پولوپیدال تخلیه می‌شد. این سیستم اختلاف پتانسیل  $V_p = V_{oH} \frac{n_p}{n_{oH}} \approx 200 V$  در طول محیط محفظه خلاء ایجاد می‌کرد و الکترون‌های موجود در محفظه در این میدان الکتریکی کسب انرژی کرده و در برخوردهای ثانویه گاز داخل محفظه را بونیده می‌کردند [۳]. این سیستم دو اشکال اساسی داشت: اول آن‌که به علت پایین بودن بسامد نوسان‌های ایجاد شده، یعنی:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx 3 \times 10^4 H_Z$$

در مقایسه با بسامد سیکلوترونی الکترون‌ها:

۵- discharge cleaning

۱- preionization

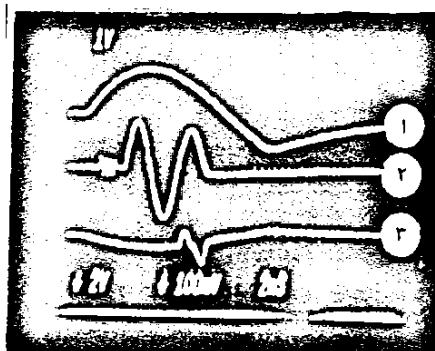
۷- Limiter

ناکافی شد. ناکافی بودن آن، از تشکیل نشدن پلاسما در بد و شروع میدان پولوییدال برآورد گردید (شکل ۳). برای تقویت این سیستم از یک چشمکه الکترون دیگر نیز استفاده شد ولی نتیجه مطلوب حاصل نشد. به این جهت، تصمیم گرفتیم از تخلیه قوس الکتریکی برای انجام پیش‌یونش استفاده کنیم. این کار با تخلیه الکتریکی یک خازن ۸۰ میکروفارادی (که تحت ولتاژ  $1/5$  کیلوولت شارژ می‌شود) در سیم پیچ اولیه، یک مبدل تپی با هسته فریت (که بین سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه آن تا ۵ کیلوولت عایق‌بندی شده است) عملی شد. ثانویه این مبدل به دو الکترود از جنس تنگستن، که در داخل محفظه به فاصله ۷ میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند متصل می‌شود. تخلیه الکتریکی بین این دو الکترود، تعداد زیادی از الکترون‌های پرانرژی را به داخل محفظه روانه می‌کند و در نتیجه، عمل یونش به خوبی انجام می‌گیرد (شکل ۴). نقش مبدل تپی در اینجا اساسی است. زیرا انرژی لازم برای پیش‌یونش رادر ولتاژ نسبتاً پایین تامین می‌کند.

### جمع‌بندی و نتیجه

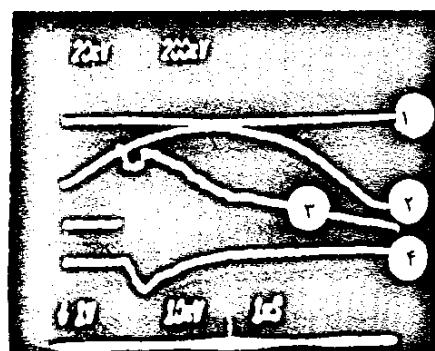
- نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مربوط به پیش‌یونش در توکاماك الوند HIC را به شرح زیر خلاصه می‌کنیم:
- برای تولید پلاسما در توکاماك لازم است که گاز داخل محفظه تا اندازه‌ای یونیده شود.
- پیش‌یونش به وسیله امواج رادیویی یا ریزموجها (میکروویو)، به علت ایجاد نوفه زیاد، نتیجه جالبی به دست نمی‌دهد.
- در  $Z_{eff}$  بالا، برای پیش‌یونش، تزریق الکترون با انرژی حرارتی متعارف به داخل محفظه توکاماك الوند کافیست.
- در تزریق الکترون به داخل محفظه باید دقت کرد که

حرکت الکترونها محل چشمکه الکترون عوض شد و بدین ترتیب، اشکال موردنظر بر طرف گردید (شکل ۲).



۱- میدان نوروییدال ۲- جریان پولوییدال (OH) ۳- جریان پلاسما

شکل ۱- با وجود پالس‌های پیش‌یونش و پالس‌های پولوییدال در ربع اول سیکل میدان نوروییدال، پلاسما تشکیل نشده است و فقط در ربع دوم سیکل پلاسما تشکیل می‌شود.



۱- میدان قائم ۲- میدان نوروییدال

۳- ولتاژ اعمالی پولوییدال (OH) ۴- جریان پلاسما

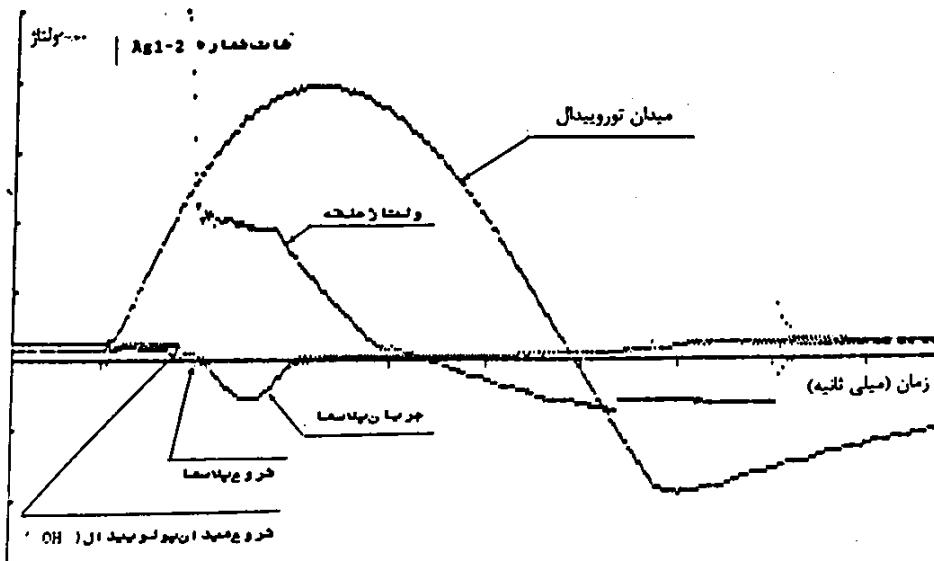
شکل ۲- بعد از اصلاح سیستم پیش‌یونش، پلاسما در ربع اول میدان نوروییدال تشکیل می‌شود.

این سیستم تا موقعی که محفظه در اثر تخلیه‌های الکتریکی پاک‌کننده آن و تخلیه‌های متوالی توکاماك کاملاً تمیز نشده بود، کار خود را به خوبی انجام می‌داد ولی با تمیز شدن محفظه، این سیستم نیز برای انجام پیش‌یونش

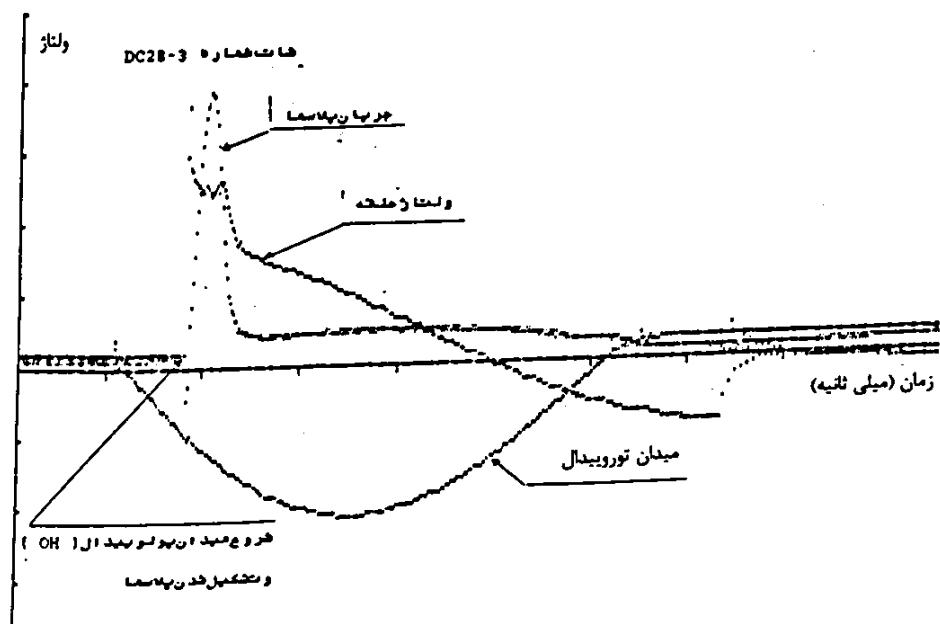
۶- قوس الکتریکی با انرژی حدود ۱۰۰ ژول برای این منظور کافیست و اگر انرژی آن زیادتر باشد به علت بالا بودن سامد و دامنه امواج تولید شده، در دستگاههای کنترل نوافرایجاد می‌شود.

نیروهای وارد بر آن از طرف میدان‌های توکامک بیشتر به طرف مرکز محفظه باشد.

۵- در  $Z_{\text{eff}}$  پایین برای تولید پیش‌یونش در گاز داخل محفظه باید از تخلیه قوس الکتریکی استفاده کرد.



شکل ۳- ضعیف بودن پیش‌یونش باعث تأخیر در تشکیل پلاسمما و اتلاف انرژی اولیه می‌شود.



شکل ۴- تشکیل پلاسمما با پیش‌یونش مناسب

## References

1. M. Avakian et al., construction of Alvand IIC tokamak, in Proc. International conference on plasma physics, Nogoya, Japan, 7p-11-13, (1980).
2. Proceeding of the small toroidal plasma devices users meeting, Monterey, California, page 5, (1978).
3. M. Avakian et al., The Iranian tokamak Alvand IIC, proceeding of the IAEA technical committee meeting on research using small tokamas, Budapest, (1985).
4. Robert J. Goldston and Paul H. Rutherford, plasma physics, IOP publishing Ltd, page 148, (1995).

## PREIONIZATION IN ALVAND IIC TOKAMAK

*M. Avakian, H. Minoo, S. Avakian, J. Behroozinia  
Plasma Physics and Fusion Dept.  
Nuclear Research Center  
Atomic Energy Organization of Iran*

### Abstract

The preionization is discussed in Alvand IIC tokamak. Various preionazation methods have been examined. It was found that the preionization has a strong influence on the formation and equilibrium of Alvand IIC tokamak plasma. Carelessly handling of it leads to either not formation or delayed formation of plasma and causes a great deal of preliminary energy loss. Although a high frequency induced electric field makes a suitable preionization at high energies but creates noises in controlling and diagnostic systems and spoils their operation. Electron beam injection by means of an electron gun, makes sufficient preionization in high  $Z_{eff}$ , if the beam flow direction is chosen correctly, but in low  $Z_{eff}$  it fails in not so low beam energies. However, it has found that an arc discharge between two electrodes installed in limiter shadow, creates a suitable prcionization if it is arranged correctly.

We have used the secondary of a pulse transformer with a very low turns' ratio of secondary to primary to feed the electrodes.

