# اندازه‌گیری انرژی نوترون‌ها و دوترون‌های گسیل شده در دستگاه پلاسمای کانونی IR-MPF-100

**INC29-1137**

**امیر رئیس‌دانا[۱*]، اصغر صدیق‌زاده[۲]، چاپار رسولی[۱]، احسان الله نوری[۱]، داریوش رستمی‌فرد[۱]**

۱. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران

۲. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران

**چکیده:**

آزمایش‌هایی با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی IR-MPF-100 جهت آشکارسازی نوترون‌ها و دوترون‌های گسیل شده و اندازه‌گیری انرژی نوترون‌ها و دوترون‌ها طراحی و انجام شده‌اند. در این آزمایش‌ها، ولتاژ شارژ خازن‌ها kV14، گاز کاری دوتریوم و فشار اولیه گاز داخل محفظه mbar ۱,۵ است. در این آزمایش‌ها با قراردادن یک آشکارساز پلاستیک سنتیلاتور NE۱۰۲- در فاصله m 2.5 از ناحیه پینچ و اندازه‌گیری زمان پرواز نوترون‌ها، انرژی نوترون‌ها اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری‌های انجام شده زمان پرواز نوترون‌ها را در بازه ns94-128 و انرژی نوترون‌ها را در بازه MeV52/2-2 نشان می‌دهد. به منظور اندازه‌گیری انرژی دوترون‌ها به‌جای استفاده از فارادی کاپ، یک روش جدیدتر و ساده‌تر ابداع شده است بدین ترتیب که یک هدف در مقابل ناحیه پینچ قرار داده می‌شود. در اثر برخورد یون‌ها با هدف، سیگنال دوم پرتو ایکس آشکارسازی می‌شود. فاصله زمانی مابین سیگنال اول پرتو ایکس و سیگنال دوم پرتو ایکس، زمان پرواز یون‌ها را نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها انرژی دوترون‌ها در بازه keV56-426 اندازه‌گیری شده است.

**کلیدواژه‌ها:** پلاسمای کانونی، واکنش‌های گداخت D-D، انرژی نوترون‌ها، انرژی دوترون‌ها

# Measuring the Energy of Neutrons and Deuterons Emitted in the Plasma Focus Device

**Raeisdana[1], A. Sadighzadeh[2], C. Rasouli[1], E. Noori[1], D. Rostamifard[1]**

[1] Plasma physics and nuclear fusion research school, Nuclear science and technology research institute, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran

[2] Nuclear Fuel Cycle research school, Nuclear science and technology research institute, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran

**Abstract:**

Experiments have been designed and performed using the IR-MPF-100 plasma focus device. In these experiments, the charging voltage of the capacitors is 14 kV, the pressure of the deuterium working gas is 1.5 mbar. These experiments are designed to detect the emitted neutrons and deuterons and to measure the energy of neutrons and deuterons. By placing a plastic scintillator detector 2.5m away from the pinch area and measuring time of flight of neutrons, the neutron beam energy was measured in the range of 2– 2.52MeV. In order to measure the energy of the deuterons, an aluminum target is placed in front of the anode. When ions collide to the target, x-ray is emitted and the emitted x-ray is detected. Time interval between the anode X-ray (first signal) and the target X-ray (second signal) results deuterons time of flight (TOF). In this research, ions energy was measured in the range of 56–462 keV.

**Keywords:** Plasma Focus Device , D-D Fusion Reactions , Neutron Beam Energy , Deuterium Beam Energy

## مقدمه

دستگاه پلاسمای کانونی چشمه گسیل پرتو ایکس نرم، ایکس سخت، پرتو الکترونی، پرتو یونی و نوترون‌ها است. در دستگاه پلاسمای کانونی در اثر رانش محوری و شعاعی، ستون پلاسمای داغ و چگال در ناحیه مقابل آند شکل می‌گیرد که ناحیه پینچ نامیده می‌شود. عمر پلاسمای پینچ در محدوده ۱۰۰ns است که منجر به گسیل پالسی پرتو ایکس، پرتو یونی، پرتو الکترونی و نوترون‌ها می‌شود. پرتوهای پالسی تولید شده دارای کاربردهای مختلفی در پزشکی و صنعت هستند. در صورت استفاده از گاز دوتریوم به عنوان گاز کاری، واکنش‌های گداخت دوتریوم-دوتریوم ( $D + D \rightarrow {}^{3}He + n$ ) منجر به تولید نوترون‌هایی با انرژی ۲/۴۵MeV می‌شود. تاکنون آزمایش‌های مختلفی در خصوص گسیل نوترون توسط تیم‌های تحقیقاتی در نقاط مختلف جهان انجام شده است [۴-۱]. طبق پژوهش‌های انجام شده گسیل نوترون حاصل از واکنش‌های گداخت D-D در دستگاه‌های پلاسمای کانونی در اثر دو پدیده گداخت گرماهسته‌ای[1] و گداخت پرتو-هدف[2] انجام می‌شود. تولید و گسیل نوترون‌ها در مرحله پینچ در اثر واکنش‌های گداخت گرماهسته‌ای انجام می-پذیرد. ستون پلاسمای پینچ در اثر ناپایداری‌های مختلف به‌سرعت دچار فروپاشی می‌شود و در مرحله فروپاشی واکنش‌های گداخت پرتو-هدف موجب تولید و گسیل نوترون‌ها می‌شوند[۵]. به عنوان مثال گریبکوف[3][۴] و همکارانش انرژی نوترون‌های گداخت D-D تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی را برابر ۲/۷MeV اندازه‌گیری کردند. کاستیلو[4] [۲] و همکارانش انرژی نوترون‌های گسیل شده در دستگاه پلاسمای کانونی FN-II را اندازه‌گیری کردند. این آزمایش‌ها بازه گسترده‌ای را برای انرژی نوترون‌ها از ۳/۲MeV- ۱/۷ نتیجه داد.

همان‌طوری که در بالا اشاره شد ستون پلاسمای پینچ در اثر ناپایداری‌های مختلف به‌سرعت دچار فروپاشی می‌شود. پس از فروپاشی پینچ، الکترون‌ها به سمت آند دستگاه شتاب می‌گیرند و یون‌ها در خلاف جهت در راستای محور دستگاه به سمت بیرون شتاب می‌گیرند. متداول‌ترین روش برای آشکارسازی یون‌های گسیل شده استفاده از سامانه فارادی کاپ است [۷,۶]. در پژوهش‌های مشابه، بویان[5] و همکارانش با استفاده از فارادی کاپ و اندازه‌گیری زمان پرواز، انرژی یون‌های هیدروژن و کربن را اندازه‌گیری کردند. این آزمایش‌ها برای $H^{+}$ مقدار ۲۰۰-۴۰۰KeV، برای $C^{+4}$ مقدار ۴۰۰-۶۰۰keV و برای $C^{+5}$ مقدار ۹۰۰-۱۱۰۰keV را نشان می‌دهد. کرومفولز[6] و همکارانش انرژی یون‌های دوتریوم را برای زوایای صفر درجه و ۲۰ درجه اندازه‌گیری کردند. این آزمایش‌ها انرژی دوترون‌ها را برای زاویه صفر درجه ۱۱۲±۲۲ keV و برای زاویه ۲۰ درجه نسبت به محور دستگاه ۱۲۵±۲۵ keV نتیجه داده است. هیروآکی[7] و همکارانش انرژی پروتون‌های گسیل شده را در بازه ۱۰۰keV تا ۱/۴MeV با پهنای پالس ۶۰ns اندازه‌گیری کردند. در این پژوهش روش جدیدی برای آشکارسازی یون‌های گسیل شده و اندازه‌گیری انرژی یون‌ها معرفی شده است. این روش نسبت به سامانه فارادی کاپ بسیار ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر بوده و پیچیدگی‌های فارادی کاپ را ندارد.

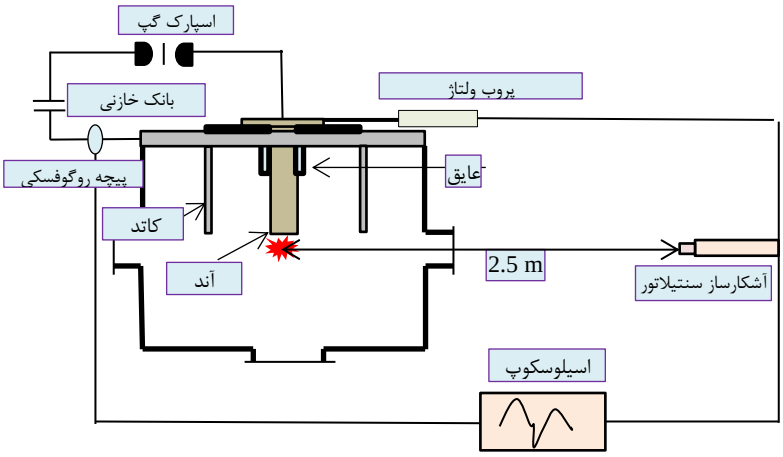
## چیدمان آزمایشگاهی

دستگاه پلاسمای کانونی IR-MPF-100 مطابق شکل ۱، دستگاهی است با آند و کاتد رو به پایین. آند، کاتد، محفظه خلأ و سیستم‌های تشخیصی شامل پروب ولتاژ بالا، پیچه روگوفسکی و آشکارساز پلاستیک سنتیلاتور NE-102 در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. دستگاه شامل ۲۴ خازن ۶ میکروفارادی است که در مجموع ظرفیت بانک خازنی به ۱۴۴ میکروفاراد می‌رسد. در حالت شارژ بیشینه خازن‌ها تا ولتاژ 40 kV، انرژی ذخیره شده در بانک خازنی به ۱۱۵kJ می‌رسد. به علت فرسودگی خازن‌ها، تریگر و اسپارک گپ، بیشتر آزمایش‌ها در ولتاژ شارژ ۱۲-۱۸kV طراحی و انجام می‌شوند تا موجب وارد شدن صدمه به دستگاه نشود. در آزمایش‌های انجام شده جهت بررسی گسیل نوترون‌ها و گسیل یون‌های دوتریوم (دوترون‌ها)، خازن‌ها تا ۱۴kV شارژ شده‌اند که انرژی ۱۴/۱kJ را نتیجه می‌دهد. در جدول ۱، مشخصات مکانیکی و الکتریکی دستگاه پلاسمای کانونی IR-MPF-100 لیست شده‌اند. آشکارساز در فاصله ۲/۵m از پلاسمای پینچ قرار داده

---

[1] Thermonuclear
[2] Beam-Target
[3] V. A. Gribkov
[4] F. Castillo
[5] H. Buyan
[6] H. Krompholz
[7] Hiroaki

شده است تا بتوان زمان پرواز نوترون‌ها را اندازه‌گیری کرد (شکل ۱). دریچه‌ای که نوترون‌ها از آن عبور کرده و به آشکارساز می‌رسند شیشه‌ای به ضخامت 1 cm است. در شکل (۳) نمونه‌ای از سیگنال‌های جریان، مشتق جریان، ایکس و نوترون ملاحظه می‌شود.

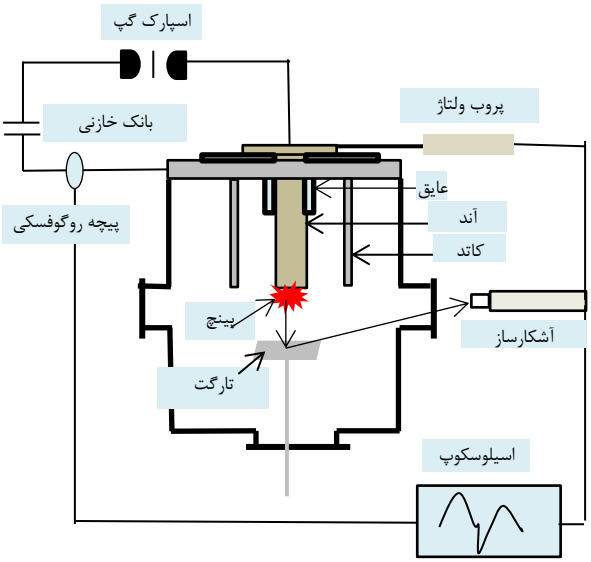



شکل ۱ : شماتیکی از دستگاه پلاسمای کانونی IR-MPF-100. در شکل محفظه خلأ، آند، کاتد و سیستم‌های تشخیصی نشان داده شده‌اند. با قرار دادن آشکارساز سوسوزن NE-102 در فاصله ۲/۵ متری ناحیه پینچ، زمان پرواز نوترون‌ها قابل اندازه‌گیری است.

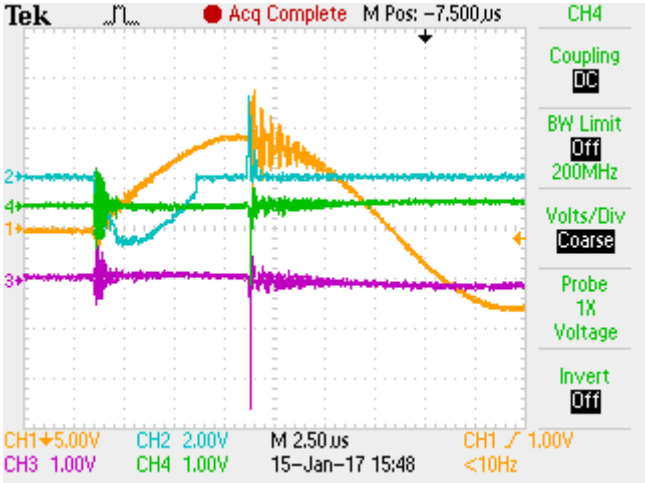
جدول ۱. مشخصات دستگاه پلاسمای کانونی IR-MPF-100

| پارامتر | مقدار | واحد |
|---|---|---|
| بیشینه انرژی بانک خازنی | ۱۱۵ | kJ |
| اندوکتانس کل | ۱۵۰ | nH |
| ظرفیت بانک خازنی | ۱۴۴ | μF |
| بیشینه ولتاژ | ۴۰ | kV |
| بیشینه جریان | ۱,۱ | MA |
| دوره تناوب تخلیه | ۲۷ | μs |
| مقاومت الکتریکی | ۶ | mΩ |
| طول آند | ۲۲ | cm |
| شعاع آند | ۶,۲۵ | cm |
| طول کاتد | ۲۲ | cm |
| شعاع کاتد | ۲۲,۷ | cm |
| طول عایق | ۵ | cm |

برای محاسبه انرژی دوترون‌ها از یک روش جدید و غیرمستقیم استفاده شده است. یک صفحه فلزی از جنس آلومینیوم به ابعاد $۵\times۵cm^۲$ در فاصله ۲۰cm از سر آند قرار داده شده است(شکل ۲). ماندگاری پلاسمای داغ و چگال در مرحله پینچ در محدوده ۱۰۰ns است و پس از آن ستون پلاسما در اثر ناپایداری‌ها دچار فروپاشی می‌شود. در مرحله فروپاشی، الکترون‌ها به سمت آند و یون‌ها در خلاف جهت به سمت هدف شتاب می‌گیرند. برخورد الکترون‌های پرسرعت نسبیتی با سر آند به علت مسافت بسیار کم، آنی بوده و این برخورد سیگنال اول ایکس را در آشکارساز نشان می‌دهد. یون‌های دوتریوم $D^+$ به علت جرم بالاتر با سرعت به مراتب کمتری فاصله ۲۰cm تا هدف را طی می‌کنند و پس از برخورد با هدف، پرتو ایکس در تمام زاویه فضایی گسیل می‌شود. مطابق شکل ۲، پرتو ایکس گسیل شده از تارگت به آشکارساز پلاستیک سنتیلاتور رسیده و سیگنال دوم ایکس را نشان می‌دهد. فاصله زمانی بین پالس اول ایکس و پالس دوم ایکس، زمان پرواز یون‌های دوتریوم را برای فاصله ۲۰cm نتیجه می‌دهد. با داشتن مسافت طی شده و زمان، انرژی دوترون‌ها قابل محاسبه است.




شکل ۲ : چیدمان آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری انرژی یون‌ها. قرار دادن هدف از جنس آلومینیوم در فاصله 20 سانتیمتری ناحیه پینچ، برخورد یون‌های دوتریوم و تولید پرتو ایکس. آشکارساز سوسوزن NE-102 در فاصله 2.5 متری ناحیه پینچ قرار دارد.

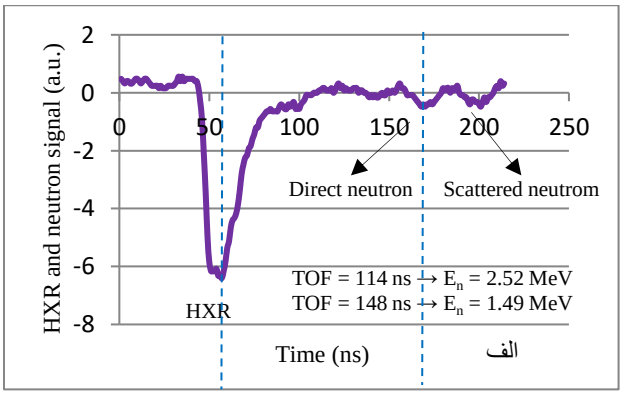


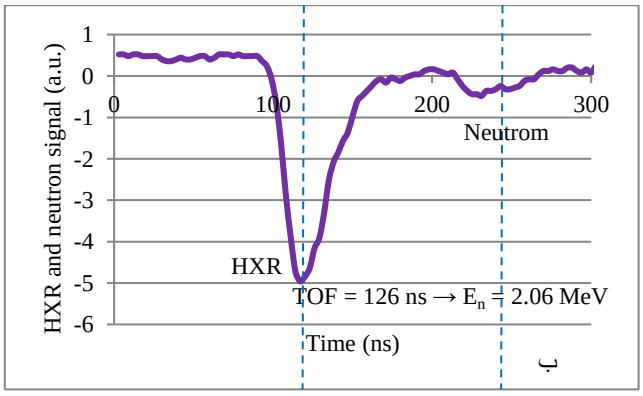

شکل ۳ : نمونه سیگنال ثبت شده مربوط به شات گاز دوتریوم. کانال ۱: جریان، کانال ۲ : مشتق جریان، کانال ۳ : آشکارساز پلاستیک سنتیلاتور NE-102 و کانال ۴ : آشکارساز پلاستیک سنتیلاتور Stilbene

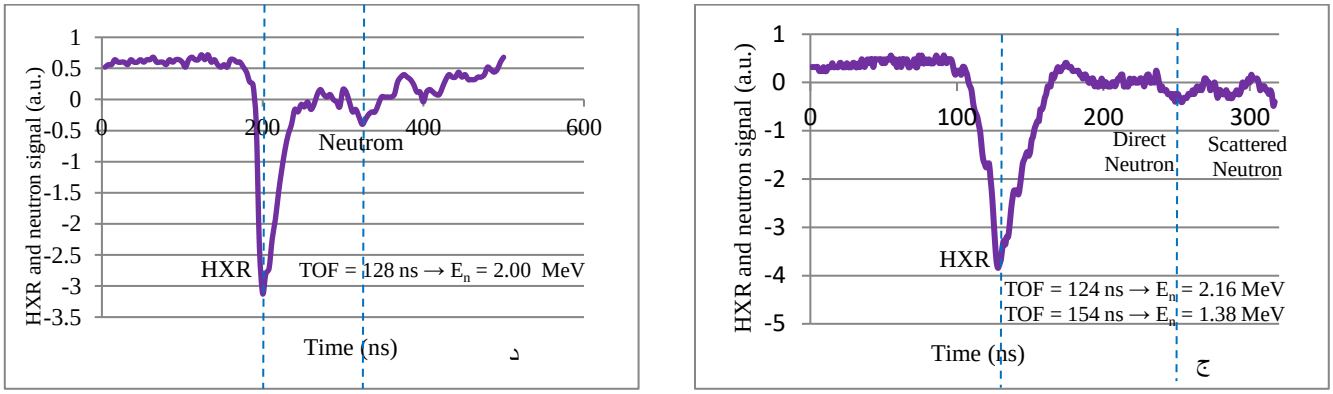
## نتایج

با توجه به شکل ۱، آشکارساز در فاصله ۲/۵m از ناحیه پینچ قرار دارد و با توجه به اینکه پرتو ایکس با سرعت نور و نوترون‌ها با سرعتی به مراتب کمتر از سرعت نور حرکت می‌کنند سیگنال‌های اول پرتو ایکس و سیگنال دوم نوترون هستند. اختلاف زمانی سیگنال دوم با سیگنال اول، زمان پرواز نوترون‌ها را نتیجه می‌دهد. با داشتن زمان و مسافت طی شده (۲/۵m) می‌توان سرعت حرکت نوترون‌ها را محاسبه کرد. با توجه به اینکه نوترون‌ها غیر نسبیتی هستند می‌توان از رابطه کلاسیکی $E=1/2mv^2$ انرژی نوترون‌ها را به دست آورد. شکل‌های ۴-الف تا ۴-د نتایج حاصل از شات گاز دوتریوم در فشار ۱/۵mbar و ولتاژ شارژ خازن‌ها برابر ۱۴kV را نشان می‌دهد. شکل ۴-الف زمان پرواز نوترون‌ها را ۱۱۴ns نشان می‌دهد که با استفاده از رابطه کلاسیکی انرژی جنبشی، انرژی نوترون‌ها برابر ۲/۵۲MeV محاسبه می‌گردد. به همین روش برای شکل‌های ۴-ب تا ۴-د زمان پرواز نوترون‌ها به ترتیب برابر ۱۲۶ns، ۱۲۴ns و ۱۲۸ns به دست آمده است که انرژی نوترون‌ها را برابر ۲/۰۶MeV، ۲/۱۶MeV و ۲/۰۰MeV نتیجه می‌دهد.

انرژی نوترون‌ها در بازه ۲/۲-۵۲MeV اندازه‌گیری شده است. انرژی‌های کمتر از ۲/۴۵MeV به علت کندشدگی نوترون‌ها در اثر عبور از دریچه محفظه خلأ است که موجب می‌شود تعدادی از نوترون‌ها در اثر برخوردهای کشسان و ناکشسان با هسته‌ها مقداری از انرژی خود را از دست بدهند. در بعضی از سیگنال‌های ثبت شده پالس دوم نوترون نیز مشاهده می‌شود که می‌تواند به علت نوترون‌های پراکنده شده از محفظه خلأ و یا به دلیل کند شدن نوترون‌های مستقیم در عبور از محفظه دستگاه باشد.

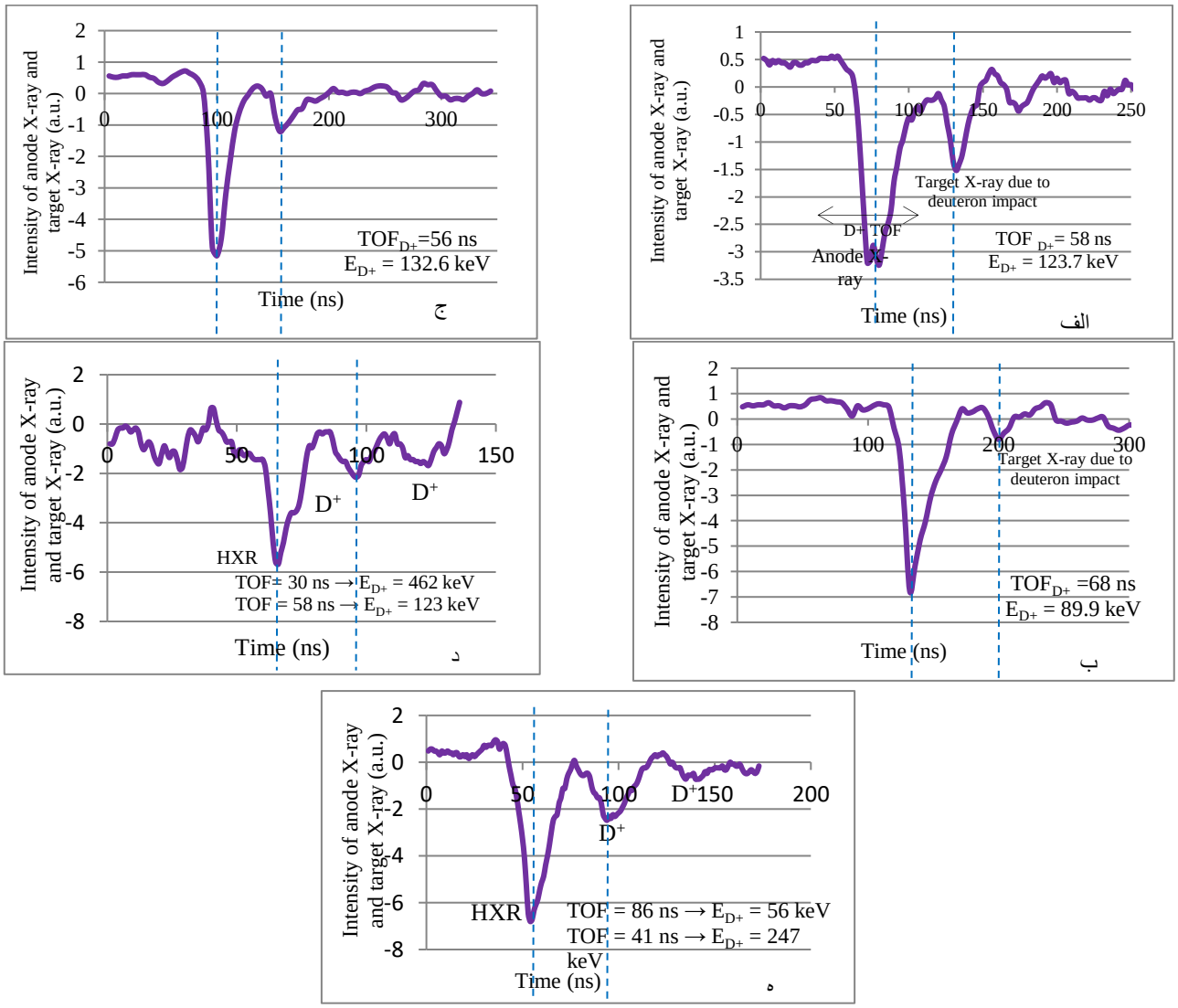





شکل (۴) : اندازه‌گیری زمان پرواز نوترون‌ها و محاسبه انرژی نوترون‌ها

برای اندازه‌گیری انرژی یون‌های دوتریوم گسیل شده، یک هدف آلومینیومی در مقابل ناحیه پینچ و در فاصله ۲۰ سانتیمتری نوک آند قرار داده شده است. در اثر برخورد یون‌های دوتریوم با هدف، پرتو ایکس گسیل می‌شود. ایکس گسیل شده از هدف ایکس ثانویه است و نسبت به ایکس گسیل شده از آند در اثر برخورد الکترون‌ها، تأخیر زمانی دارد.




شکل (۵) : اندازه‌گیری زمان پرواز یون‌ها و محاسبه انرژی یون‌های دوتریوم

فاصله زمانی بین دو پالس ایکس، زمان پرواز یون‌ها را نتیجه می‌دهد. با داشتن زمان و مسافت، سرعت یون‌ها و درنتیجه انرژی یون‌ها قابل محاسبه است. نتایج شات گاز دوتریوم در فشار ۱/۵mbar و ولتاژ شارژ خازن‌ها برابر ۱۴kV در شکل‌های ۵-الف تا ۵-ه نشان داده شده است. در نمودارهای شکل ۵ پالس اول پرتو ایکس سخت در اثر برخورد الکترون‌ها با آند و پالس دوم پرتو ایکس سخت در اثر برخورد یون‌ها با هدف است که به اختصار سیگنال الکترون و سیگنال یون نام‌گذاری شده است. با توجه به‌سرعت نسبیتی الکترون‌ها و برخورد آنی الکترون‌ها با سر آند (شکل ۲)، فاصله زمانی بین دو پالس عبارت است از زمان پرواز یون‌ها. مطابق شکل ۵-الف زمان پرواز دوترون‌ها برای فاصله ۲۰cm برابر ۵۸ns است بنابراین با استفاده از رابطه کلاسیکی انرژی جنبشی، انرژی دوترون‌ها برابر ۱۲۳ keV محاسبه می‌شود. به همین ترتیب برای شکل‌های ۵-ب و ۵-ج نیز زمان پرواز دوترون‌ها اندازه‌گیری شده‌اند که به ترتیب زمان پرواز ۶۸ns و ۵۶ns و انرژی ۹۰keV و ۱۳۲keV را نشان می‌دهد. شکل‌های ۵-د و ۵-ه دو سیگنال دوترون را نشان می‌دهند که انرژی دوترون‌ها برابر ۱۲۳keV، ۴۶۲keV، ۵۶keV و ۲۴۷keV به دست آمده است. از نتایج به دست آمده می‌توان بازه انرژی دوترون‌ها را برابر ۵۶keV تا ۴۶۲keV بیان کرد.

## نتیجه‌گیری

تزریق گاز دوتریوم در دستگاه پلاسمای کانونی IR-MPF-100 و شات دستگاه در انرژی ۱۴/۱kJ، وقوع واکنش‌های گداخت هسته‌ای D-D را نشان می‌دهد. واکنش‌های گداخت D-D در دو مسیر با احتمال برابر اتفاق می‌افتند:

$$D + D \rightarrow {}^{3}He + n \qquad (۱)$$

$$D + D \rightarrow T + p \qquad (۲)$$

آشکارسازی نوترون در محدوده انرژی ۲/۴۵MeV نشان‌دهنده وقوع واکنش گداخت D-D است. واکنش‌های گداخت D-D در مرحله تشکیل پینچ در اثر فرایند گداخت گرماهسته‌ای و مرحله فروپاشی پینچ در اثر فرایند گداخت پرتو-هدف صورت می‌پذیرد و طبق پژوهش‌های انجام شده بیشترین نرخ واکنش‌های گداخت در دستگاه‌های پلاسمای کانونی در اثر گداخت پرتو-هدف به دست می‌آید.
در این پژوهش با قرار دادن آشکارساز پلاستیک سنتیلاتور در فاصله ۲/۵متری محل تشکیل پینچ، سیگنال نوترون از سیگنال ایکس جدا شده و قابل تشخیص می‌گردد. با اندازه‌گیری زمان پرواز نوترون‌ها و با داشتن فاصله، سرعت و درنتیجه انرژی نوترون‌ها اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد انرژی نوترون گسیل شده در محدوده ۲/۵۲MeV-۲ قرار دارد و نوترون‌های پراکنده شده نیز با انرژی‌های کمتر آشکارسازی شده‌اند.
مطابق رابطه ۱ و ۲، محصولات گداخت عبارتند از نوترون، هلیوم۳، تریتیوم و پروتون. اما بایستی در نظر داشت که کسر بسیار کوچکی از دوتریوم‌ها موفق به غلبه بر دافعه کولنی و انجام واکنش‌های گداخت می‌شوند و مابقی سوخت دوتریوم، به‌صورت مصرف نشده در فاز فروپاشی پینچ، در راستای محور دستگاه به سمت بیرون شتاب می‌گیرد. در این پژوهش، با ابداع یک روش جدید و ساده، یون‌های دوتریوم گسیل شده، آشکارسازی شده‌اند و انرژی دوترون‌ها اندازه‌گیری شده است. مزیت‌های این روش نسبت به روش فارادی کاپ عبارت است از: سادگی و کم‌هزینه بودن به علت حذف فنجان فارادی، منبع تغذیه و اتصالات و کابل‌های رابط. در این پژوهش، انرژی دوترون‌های گسیل شده در بازه ۵۶-۴۶۲keV اندازه‌گیری شده است.

References

[1] V. Damideh, "PMT-scintillator system set up for D-D neutron TOF measurements in INTI plasma focus device," in *AIP Conference Proceedings, March 2017, DOI: 10.1063/1.4978846*, 2017.

[2] F. Castillo, "Neutron emission characterisation at the FN-II Dense Plasma Focus," in *Journal of Physics: Conference Series*, doi:10.1088/1742-6596/511/1/012021, 2014.

[3] T. K. Borthakur and A. Shyam, "Analysis of axial neutron emission pulse from a plasma focus device," *Indian Journal of Pure & Applied Physics* , vol. 48, pp. 100 - 103, 2010.

[4] V. Gribkov, "A dense plasma focus-based neutron source for a single-shot detection of illicit materials and explosives by a nanosecond neutron pulse," *Physica Scripta*, vol. 81, no. 3, 2010.

[5] A. Talaei and S. M. S. K. a. S. Adlparvar, "Pinched Plasma Study in a Filippov-Type Plasma Focus “Dena”," *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE* , vol. 36, no. 3, 2008.

[6] V. Damideh, "Fast Faraday cup for fast ion beam TOF measurements in deuterium filled plasma focus device and correlation with Lee model," *PHYSICS OF PLASMAS*, vol. 24, no. doi: 10.1063/1.4985309, 2017.

[7] L.-K. Lim, "Time-resolved characteristics of deuteron-beam generated by plasma focus discharge," *PLoS ONE*, vol. 13, no. 1, 2018.

[8] M. Abdollahzadeh, S. M. S. kiai and A. R. Babazadeh, "Measurement of the time dependent neutron energy spectrum in the ‘DENA’ plasma focus device," *PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED FUSION*, vol. 50, no. 10, 2008.

[9] B. L. Freeman, "Neutron emission characteristics of a high-current plasma focus: Initial studies," in *2002 14th International Conference on High-Power Particle Beams (BEAMS)*, Albuquerque, NM, USA, 2002.