بررسي و تحليل جنبه‌هاي مختلف گسيل نوترون در دستگاه پلاسماي كانوني «دنا»

شروين گودرزي[۲و۱] - رضا امراللهي[٤و۳] - عليرضا بابازاده[۱] - علي نصيري[۱]

۱- سازمان انرژي اتمي ايران ۲- دانشگاه صنعتي اميركبير

۳- دانشگاه صنعتي خواجه نصير ٤- وزارت نيرو

چكيده

*از هنگام اختراع پلاسماي كانوني در دهه ۱۹٦۰ ميلادي اين دستگاه به عنوان يك چشمه نوترون پالسي قدرتمند و ايمن از نظر زيست محيطي كاربردهاي بسياري يافته است. ولي عليرغم تحقيقات گسترده انجام شده هنوز مكانيزم و عوامل مؤثر بر توليد نوترون در آن به طور كامل شناسايي نشده‌اند. در اين گزارش توليد نوترون در دستگاه پلاسماي كانوني (**۲۵KV** و **۹۰KJ**) نوع فيليپوف «دنا» در رژيم‌هاي مختلف كاري (فشارها، ولتاژهاي تخليه و تركيبات گازي مختلف) و با استفاده از دو **insert anode** (بخش قابل تعويض در مركز آند) تخت و مخروطي شكل مورد بررسي قرار گرفته و اثر عوامل مختلف بر توليد نوترون مشاهده و تحليل شده‌اند. ملاحظه شـــده كه بيشترين ميزان گسيل نوترون در استفاده از گاز **D_2+%1Kr** و با **insert anode** مخروطي شكل به دست مي‌آيد ساختار دو پالسي سيگنال نوترون در اين دستگاه مشاهده و تحليل شده و حدود بالايي و پائيني فشار و فشار بهينه براي توليد نوترون مشخص گرديده و نيز قانون تجربي مقياس‌بندي توليد نوترون $Y_n \propto I_p^a \propto E^{\frac{a}{2}}$ براي موارد استفاده از گازهاي **D_2** و **D_2+%1Kr** مورد بررسي قرار گرفته است، در مورد **D_2** مقدار α تقريبا برابر۳ و در مورد **D_2+%1Kr** حدود ۳/٦۲ به دست آمده است. از نتايج حاصل از آزمايشات مشخص شده كه هر دو مكانيزم گرما هسته‌اي و غيرگرما هسته‌اي همواره در توليد نوترون در اين دستگاه دخالت دارند ولي نقش هريك در توليد كل نوترون به شدت به شرايط آزمايش مانند فشار اوليه گاز و ولتاژ تخليه و تركيب گاز بستگي دارد با بررسي نتايج بدست آمده مقدار كل توليد نوترون و ناهمسانگردي در گسيل آن و مقادير اشعه ايكس نرم و سخت گسيل شده در فشارهاي مختلف در محدوده **torr** ۲-۰/۳ در ولتاژ تخليه **kv** ۱٦ و استفاده از گاز **D_2+%1Kr** نتيجه‌گيري شده كه در فشارهاي پائين (**torr** ۰/۵ >) مكانيزم برهم كنش اشعه - هدف نقش عمده‌اي در توليد نوترون بازي مي‌كند در فشارهاي حوالي اپتيمم (**torr** ۱-۰/۷) مكانيزم **GPM** از بيشترين اهميت در توليد نوترون برخوردار است و در فشارهاي بالاتر نقش اساسي به گداخت گرما هسته‌اي تعلق دارد.*

۱- مقدمه

پلاسماي كانوني به خانواده Z پينچ‌هاي ديناميك تعلق دارد و اساساً سيستمي پالسي است كه از دو الكترود هم محور تشكيل شده كه در پائين به وسيله يك لايه عايق از هم جدا مي‌شوند. الكترود داخلي نقش آند والكترود خارجي نقش كاتد را بازي مي‌كند. اين دستگاه در دهه ۱۹٦۰ ميلادي و به طور مستقل توسط فيليپوف در شوروي سابق و مدر در آمريكا اختراع گرديد [۱] و عليرغم سادگي سيستم آن قادر به توليد پلاسماي داغ (چند keV) و چگال (تا $۱۰^{۲۰}$ cm^{-3}) در زمان‌هاي كوتاه (ns ۱۰۰-۵۰) و گسيل مقادير قابل توجهي از پرتوهاي ايكس نرم و سخت، يوني، الكترو مغناطيسي و اگر گاز به كار رفته حاوي دوتريم با چگالي مناسبي باشد نوترون است [۵-۱] و پس از اختراع به مدت ۱۵ سال قوي‌ترين چشمه مولد نوترون در حوزه تحقيقات پلاسما و گداخت گرما هسته‌اي به شمار مي‌رفته است [۳]. سناريوي كلي كار اين دستگاه به شرح زير مي‌باشد. مطابق شكل ۱ با بسته شدن كليد S اختلاف پتانسيل زيادي بين دو الكترود ايجاد مي‌گردد كه موجب تخليه الكتريكي بين آن ها در گاز داخل محفظه روي سطح عايق جداكننده دو الكترود و شكل گيري يك لايه جريان مي‌شود [۵ و ٤ و ۲]. اين لايه جريان، ميدان مغناطيسي‌اي ايجاد مي‌كند كه نيروي لورنتس وارده از طرف آن بر لايه جريان سبب حركت آن به سمت بالا مي‌شود. لايه جريان در مسير خود گاز خنثايي را كه با آن برخورد مي‌كند جارو و يونيزه مي‌نمايد. وقتي كه لايه جريان به انتهاي الكترود مركزي رسيد بر اثر نيروي لورنتس به طرف محور دستگاه حركت مي‌كند و در نهايت ستوني از پلاسماي داغ و متراكم حول محور دستگاه و در مجاورت آند تشكيل مي‌گردد. طول مدت حركت لايه جريان از شروع تخليه تا لحظه بيشينه تراكم در حدود چند µs و زمان تراكم كمتر از ۱۰۰ ns است. سپس اين ستون پلاسماي متراكم به سرعت بر اثر ناپايداري‌هاي m=0 تخريب و منبسط مي‌گردد كه در آزمايشات با اين دستگاه از زمان تشكيل ستون پلاسماي متراكم تا انبساط پلاسما گسيل انواع پرتوهاي ايكس نرم و سخت، يوني، نوتروني و الكترومغناطيسي مشاهده شده است.

پلاسماي كانوني به عنوان يك چشمه تابش‌هاي سخت از نظر زيست محيطي مزاياي بسياري بر چشمه‌هاي ديگري مانند چشمه‌هاي ايزوتوپي، راكتورهاي شكافت و شتاب دهنده‌ها دارد. چون پسمان راديواكتيو قابل ملاحظه‌اي ندارد و گسيل تابش از آن نيز رد زمان‌هاي بسيار كوتاهي (چند ده تا چند صد ns) رخ مي‌دهد [٦] اين دستگاه به خاطر سادگي و ارزاني كار با آن به عنوان يك چشمه نوترون كاربردهاي زيادي در زمينه‌هاي مختلفي مثل راديوگرافي، اكتشاف منابع زيرزميني، سيستم‌هاي هيبريد شكافت - گداخت، تست قطعات صنعتي و ... يافته است [۲ و ۳]. در راكتورهاي هيبريد شكافت - گداخت از يك چشمه نوترون‌هاي سريع از نوع Z پينچ به ويژه پلاسماي كانوني براي آغاز واكنش‌هاي شكافت هسته‌اي در يك پوشش احاطه كننده چشمه نوترون كه از سوخت CANDU (اورانيم طبيعي يا تخليه شده) تشكيل مي‌شود استفاده مي‌گردد. اين ساختار نيازي به سيستم‌هاي كنترل، فرمان و ايمني ندارد زيرا با توقف كار چشمه نوتروني گداخت، واكنش‌هاي شكافت هم متوقف مي‌شوند. اخيراً در يك طراحي مفهومي يك راكتور هيبريد از اين نوع با توان حرارتي Mw ۲۰۰ و چشمه نوتروني از نوع پلاسماي كانوني با قدرت پالس / نوترون $۱۰^{۱۸}$ × ۵ - ۰/۵ و فركانس پالس‌هاي نوتروني Hz ۱۰-۱ طراحي شده است [۷]. همچنين

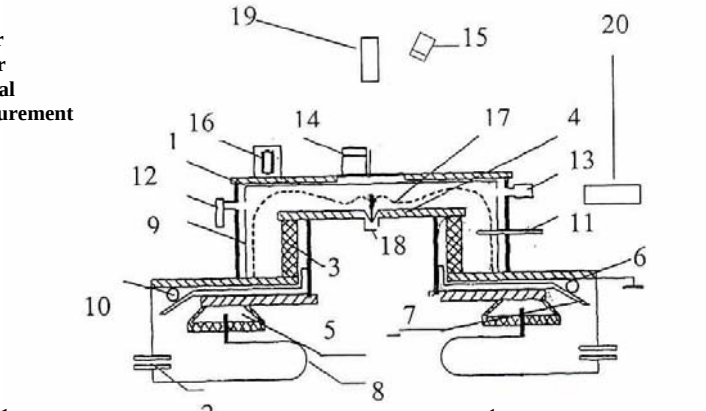
در سال‌هاي اخير انواع Z پينچ به ويژه پلاسماي كانوني مجدداً براي طراحي راكتورهاي آينده گداخت مورد توجه قرار گرفته‌اند [۸].

در دستگاه‌هاي پلاسماي كانوني اكثر نوترون‌هاي توليد شده حاصل از واكنش $^{2}_{1}D+^{2}_{1}D\rightarrow^{3}_{2}He+^{1}_{0}n$ هستند [۱۰ و ۳-۱] ولي عليرغم اهميت كاربردي بالاي پلاسماي كانوني به عنوان يك چشمه نوترون هنوز ساز و كار توليد نوترون و عوامل مؤثر بر توليد آن در اين دستگاه به طور دقيق شناسايي نشده است. عوامل مؤثر بر توليد نوترون متعددند كه از آن جمله مي‌توان انرژي اوليه ذخيره شده در بانك خازني، تركيب گاز به كار رفته، فشار اوليه گاز، شكل و جنس الكترودها، جنس و ابعاد عايق، شكل و جنس insert anode (بخش قابل تعويض در مركز آند) و هندسه دستگاه را نام برد كه در استفاده از پلاسماي كانوني به عنوان يك چشمه نوترون، شناسايي نقش اين عوامل و دست‌يابي به وضعيت بهينه توليد نوترون اهميت زيادي دارد. براي تشريح چگونگي وقوع واكنش‌هاي گداخت D-D در اين دستگاه كه منجر به توليد و گسيل نوترون مي‌شود دو مكانيزم گرما هسته‌اي و غيرگرما هسته‌اي پيشنهاد شده‌اند [۱۰ و ۹] گداخت گرما هسته‌اي بر اثر برخورد تصادفي دوترون‌ها با هم در درون ستون پلاسماي داغ و متراكم رخ مي‌دهد. مكانيزم غيرگرما هسته‌اي خود به دو نوع بر هم كنش ساده اشعه - هدف و بر هم كنش اشعه - هدف تعميم يافته يا مدل ذرات به دام افتاده در حال چرخش (GPM) تقسيم مي‌شود [۱۲ و ۱۱]. اولي بر اثر برخورد بين دوترون‌هاي شتاب يافته سريع و دوترون‌هاي حرارتي پلاسما و يا اتم‌هاي دوتريم گاز خنثي رخ مي‌دهد. در دومي دوترون‌هاي سريع كه در ميدان‌هاي مغناطيسي غيرعادي[1] در ناحيه پينچ به دام افتاده و در حال چرخش در داخل ساختارهاي پينچ مي‌باشند با برخورد با دوترون‌هاي گرمايي پلاسما و يا اتم‌هاي گاز خنثي باعث وقوع واكنش‌هاي گداخت D-D و توليد نوترون مي‌شوند [۱۲]. بررسي نتايج آزمايشات مختلف نشان مي‌دهند كه هر دو مكانيزم گرماهسته‌اي و غير گرماهسته اي به طور همزمان در توليد نوترون دخيلند ولي نقش هريك به شرايط آزمايش مانند فشار گاز، تركيب گاز، ولتاژ تخليه و ... بستگي دارد. دربارهٔ مكانيزم شتاب گيري دوترون‌ها و به طور كلي ذرات باردار نظرات مختلفي ارائه شده‌اند [۱۳]. يك توضيح مناسب براي آن چنين است. ناپايداري‌هاي m=0 مي‌توانند موجب گسيختگي در ستون پلاسما بشوند. بر اثر گسيختگي جريان براي چند نانوثانيه قطع شده و جداسازي مكاني بارها باعث پيدايش ميدان‌هاي الكتريكي قدرتمندي مي‌شود كه دوترون‌ها را در جهت محوري به انرژي‌هاي بالايي (تا چند MeV) شتاب مي‌دهند [۹ و ۱۰].

از نتايج آزمايشات انجام شده با دستگاه‌هاي مختلف رابطه تجربي $Y_n \propto I_p^a \propto E^{\frac{a}{2}}$ بين تعداد نوترون‌هاي توليد شده در هر تخليه دستگاه پلاسماي كانوني (Y_n) جريان پينچ (I_p) و انرژي ذخيره شده در بانك خازني (E) به دست آمده كه در گزارشات مختلف $3\le\alpha\le5$ آمده است [۱٤و ۳و ۱]. بر مبناي فرض‌هاي مكانيزم گداخت گرماهسته‌اي بايد $\alpha=4$ و بر مبناي مكانيزم اشعه - هدف بايد $\alpha=2$ مي‌بود [۱۰]. گسيل نوترون در هر دستگاه پلاسماي كانوني فقط در محدوده معيني از فشارهاي اوليه گاز دوتريم مشاهده مي‌شود و در خارج از اين محدوده ميزان گسيل

1- anomalous

نوترون به شدت افت مي‌كند وجود حد بالايي فشار بر حسب توانايي لايه جريان در يونيزه كردن گاز خنثي جارو شده در طي مرحله فشرده سازي تشريح مي‌شود و حد پاييني فشار نيز نتيجه خواص لايه جريان به عنوان يك موج ضربه قوي غيرآديباتيك است [١٤]. در آزمايشات مختلف در تعداد و انرژي نوترون‌هاي گسيل شده در جهات مختلف ناهمسانگردي قابل توجهي مشاهده شده است عموماً وقوع اين ناهمسانگردي به اشعه محوري دوترون‌ها نسبت داده مي‌شود كه با مكانيزم گرما هسته‌اي سازگار نمي‌باشد [٤ و ٥و ١٠و ١١ و ١٣]. ضريب ناهمسانگردي A به صورت $A = \frac{\varphi_n(0)}{\varphi_n(90)}$ تعريف مي‌شود كه $\varphi_n(0)$ ميزان گسيل نوترون در امتداد محور دستگاه و $\varphi_n(90)$ ميزان گسيل نوترون در امتداد جانبي (عمود بر محور دستگاه) مي‌باشد. با بررسي تغييرات ضريب ناهمسانگردي و ميزان توليد نوترون و اشعه ايكس نرم و سخت در شرايط مختلف مي‌توان در مورد مكانيزم توليد نوترون اظهارنظر نمود. در اين مقاله به بررسي مشخصه‌هاي گسيل نوترون در رژيم‌هاي كاري مختلف (فشارها و ولتاژهاي مختلف) در دستگاه پلاسماي كانوني فيليپوف (٢٥ kV و ٩٠ kJ) «دنا» مي‌پردازيم گازهاي مورد استفاده D_2 و D_2+%1Kr هستند و براساس نتايج به دست آمده درباره مكانيزم گسيل نوترون در اين دستگاه و تأثير عوامل مختلف بر ميزان توليد نوترون بحث مي‌كنيم.



شكل ١ - دستگاه پلاسماي كانوني دنا و ادوات تشخيصي (دياگنوستيك‌هاي) آن

٢- تجهيزات به كار رفته و نحوه انجام آزمايشات

آزمايشات ما بر روي دستگاه پلاسماي كانوني نوع فيليوف (٢٨٨ μF و ٢٥ kV و ٩٠ kJ) «دنا» انجام مي‌شود كه طرحي از آن در شكل ١ نشان داده شده است. منبع تغذيه يك بانك خازني ٢٨٨μF است كه پيك جريان آن ٢/٨ MA با زمان صعود (rise-time) حدود ٤ μs مي‌باشد. يك

Spark Gap نقش كليد قطع و وصل را بازي مي‌كند. اندوكتانس كل سيستم nH ۲۳ است. آند دستگاه يك ديسك مسي به قطر cm ٤٨ و طول 15/0cm مي‌باشد. در مركز آند يك قطعه قابل تعويض (insert anode) كه از آلياژ مس - تنگستن ساخته شده قرار دارد در اين دستگاه دو insert anode مخروطي شكل و تخت در اختيار داريم كه از هر دو استفاده و نتايج حاصل با هم مقايسه شده است. بدنه محفظه خلاء كه از جنس فولاد زنگ نزن ساخته شده نقش كاتد را بازي مي‌كند و در آن ١٤ دريچه براي ديا‌گنوستيك‌ها تعبيه شده است. قطر داخلي كاتد cm ٧١/٥ بوده و به وسيله يك عايق استوانه‌اي از جنس چيني به طول cm ١٢ و قطر خارجي cm ٤٨ از آند جدا مي‌شود. پوشش بالايي كاتد يك ديسك دور آلومينيوم به قطر cm ٧٥ مي‌باشد.

ادوات تشخيص‌گر (ديا‌گنوستيك) به كار رفته به شرح زيرند: يك سيستم ثبت اطلاعات[1] كامپيوتري ٤ كاناله شامل دو اسيلوسكوپ GPIB با قدرت تفكيك زماني حداكثر ns ٥٠ و دو اسيلوسكوپ سريع حافظه دار (MHz ٥٠٠) تكترونيكس TDS3052 (دو كاناله) و TDS3054 (چهار كاناله)، سيم پيچ‌هاي روگوفسكي براي اندازه‌گيري جريان تخليه و مشتق آن، يك پروب مغناطيسي با سطح مقطع cm2 ٠/١ براي بررسي ساختار لايه جريان، شمارش نوترون‌هاي گسيل شده با استفاده از سه آشكارساز گايگر - مولر انجام مي‌شود. يكي از آشكارسازها كه با يك ورقه ايندي‌م به ضخامت mm ٠/٢٣ پوشانده شده و در داخل يك كند كننده پلي اتيلني قرار گرفته و مطابق شكل روي دستگاه دنا در زاويه ٤٥ درجه نسبت به محور دستگاه قرار دارد براي اندازه‌گيري تعداد كل نوترون‌هاي گسيل شده به كار مي‌رود. دو آشكارساز گايگر - مولر ديگر كه هر كدام با يك ورقه نقره به ضخامت mm ٠/٣ پوشانده شده و در داخل كند. كننده‌هاي پلي اتيلني جاي دارند و در امتدادهاي محوري و جانبي با فاصله يكسان (حدود cm ٩٠) از مركز آند قرار گرفته‌اند براي اندازه‌گيري ضريب ناهمسانگردي در گسيل نوترون به كار مي‌روند. شمارنده‌هاي گايگر - مولر قبل از آزمايش به وسيله چشمه نوترون dc استاندارد ^{252}Cf با شار ثانيه / نوترون $٥/٦\times١٠^{٦}$ كاليبره شده‌اند. سيگنال زماني اشعه ايكس نرم به وسيله يك PIN ديود (از نوع SPPD11-02) با يك فيلتر بريليم به ضخامت μm ١٠ اندازه گيري مي‌شود. اندازه گيري مقدار كل گسيل اشعه ايكس سخت به وسيله يك سينتيلاتور NaI كوپله شده با يك فتو المنت هم محور كه روي دستگاه قرار گرفته است انجام مي‌گيرد. براي اندازه گيري مقدار كل گسيل اشعه ايكس نرم و بررسي شكل پينچ از دوربين عكاسي روزنه سوزني[2] استفاده مي‌شود و براي اندازه‌گيري سيگنال زماني اشعه ايكس سخت و نوترون يك آشكارساز مركب از يك سينتيلاتور پلاستيكي استوانه‌اي (٥٠×٥٠ mm^2) NE-102 با قدرت تفكيك زماني nS ٥ كوپله شده با يك فتومالتي پلاير (PM-53) كه با يك پوشش سربي به ضخامت cm ٢ محافظت مي‌شود به كار مي‌رود.

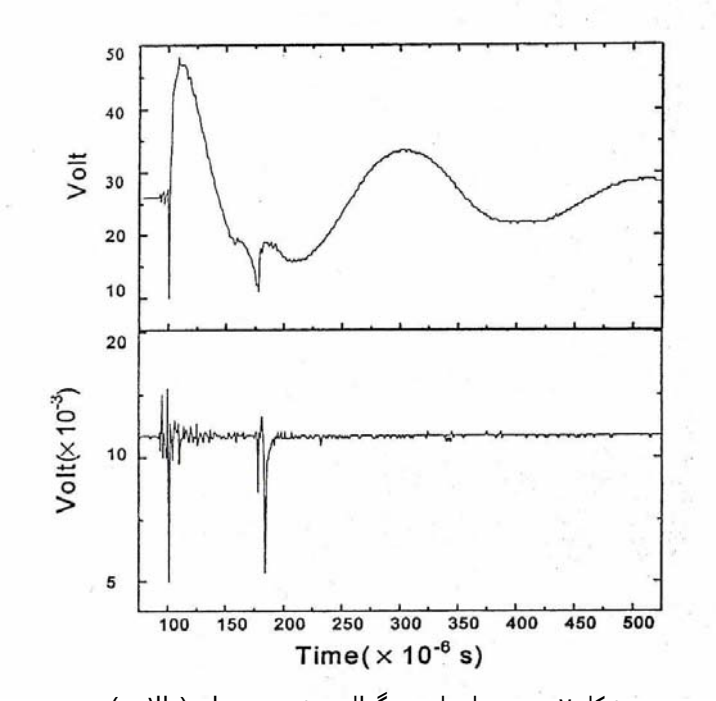
1- Data acquisition
2- Pin-hole camera

۳- شرح و تحلیل نتایج آزمایشات

در شکل ۲ نمونه‌اي از سیگنال‌هاي مشتق جریان $\left(\frac{dI}{dt}\right)$ و سیگنال زماني نوترون و اشعه ایکس سخت مشاهده مي‌شوند. درلحظه وقوع پینچ (که با t=0 نشان داده شده است) یك اسپایك منفي تیز با پهناي حدود ۱۰۰ ns در سیگنال $\left(\frac{dI}{dt}\right)$ داریم. هرچه این اسپایك تیزتر و دامنه آن بیشتر باشد نشانه وقوع پینچ بهتري است. پهناي این اسپایك منفي از یك تخلیه دستگاه به دستگاه به تخلیه دیگر تفاوت مي‌کند و میزان تغییرات آن در آزمایشات ما حدود ۱۳% است.

در این آزمایش گازهاي عمده به کار رفته عبارتند از D_2 و D_2+%1Kr براي کاهش اثر ناخالصي‌هاي وارد شده به گاز پس از هر ۱۲-۱۰ تخلیه، دمش گاز جدید به محفظه انجام مي‌گیرد. از آن جا که در پلاسماي کانوني حتي در شرایط یکسان نتایج هر تخلیه با تخلیه دیگر مي‌تواند بسیار متفاوت باشد براي هر نقطه کار معین (ولتاژ و فشار ثابت) ۸ تا ۱۰ اندازه‌گیري انجام داده و در تحلیل‌هاي خود از متوسط مقادیر حاصل استفاده مي‌نمائیم. محدوده ولتاژهاي تخلیه به کارر فته از ۱۰ تا ۱۸ kV است ولي بررسي عمده در ۱٦ kV انجام شده است.

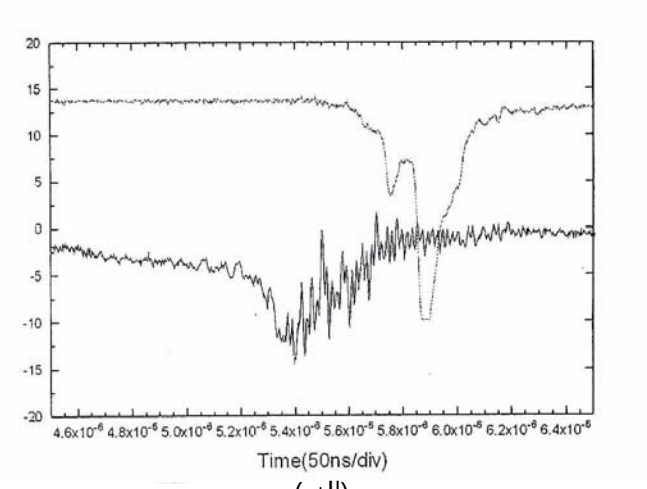
یکي از نکات بسیار مهم که باید براي هر دستگاه پلاسماي کانوني با آزمایش تعیین شود حدود بالایي و پائیني فشار است. از آزمایشات انجام شده بر روي دستگاه «دنا» با گاز دوتریم و insert anode مخروطي شکل حد بالایي فشار تقریبا ۲/۳ torr و حد پائین فشار تقریبا برابر ۰/۲۱ torr به دست آمده است. همچنین مشاهده شده است که نوع insert anode و همین طور نوع و میزان ناخالصي اثر قابل ملاحظه‌اي بر میزان تولید نوترون و فشار اپتیمم براي تولید نوترون دارد. از نتایج آزمایشات مختلف انجام شده با «دنا» حداکثر مقدار تولید نوترون مشاهده شده برابر ۳×۱۰^{۹} با استفاده از گاز D_2+%1Kr در ولتاژ ۱۸ kV و استفاده از insert anode مخروطي شکل بود. همچنین مشاهده شده که در موردي که گاز به کار رفته دوتریم خالص باشد میزان تولید نوترون در صورت استفاده از insert anode مخروطي شکل ۵ تا ٦ برابر مورد استفاده از insert anode تخت خواهد بود و در صورت افزودن یك تا دو درصد کریپتون به دوتریم حداکثر میزان تولید نوترون در مورد insert anode مخروطي شکل حدود ۲/۵ -۲ برابر و در مورد insert anode تخت حدود ۳/۵ برابر خواهد شد.



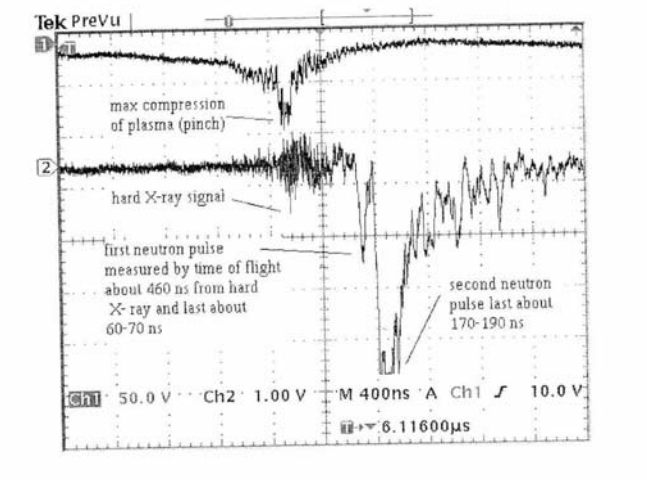
شكل ۲- نمونه‌اي از سيگنال مشتق جريان (بالايي)
و سيگنال زماني نوترون و اشعه ايكس (پاييني)

با استفاده از آشكارساز مركب از سينتيلاتور پلاستيكي سريع + فتومالتي پلابر و اسيلوسكوپ‌هاي سريع (۵۰۰ MHz) حافظه‌دار تكترونيكس براي اولين بار ساختار دوپالسي سيگنال نوترون در اين دستگاه مشاهده شده است (شكل‌هاي ۳ الف و ب) كه پالس دوم نوترون بسيار قوي‌تر از اولي مي‌باشد گسيل اولين پالس متناظر با لحظه بيشينه تراكم پينچ و دومي متناظر با زمان ناپايداري‌هاي m=0 مي‌باشد [۱۳ و ۱۲ و ۹] در بعضي از تخليه‌هاي دستگاه تعداد بيشتري پالس نوترون مشاهده شده‌اند كه فاصله اين پالس‌هاي اضافي با دو پالس اولي در حدود ۱ µs و بيشتر است. درچنان تخليه‌هايي در سيگنال مشتق جريان نيز بيش از يك اسپايك منفي مشاهده مي‌شود كه بدين معني است كه گسيل اين پالس‌ها مي‌تواند به خاطر رخ دادن تراكم مجددي در ستون پلاسما باشد (پديده مالتي پينچ) مكانيزم اين فرآيند كاملاً روشن نيست و در آزمايشگاه‌هاي مختلف به منظور شناخت ساز و كار وقوع آن مورد بررسي مي‌باشد.

مكانيزم توليد نوترون در پلاسماي كانوني مي‌تواند گرما هسته‌اي يا غيرگرما هسته‌اي باشد.



(الف)

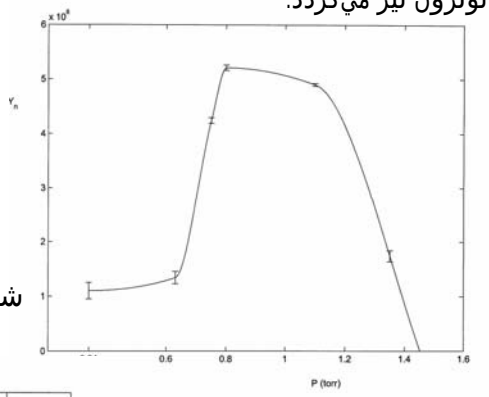


(ب)

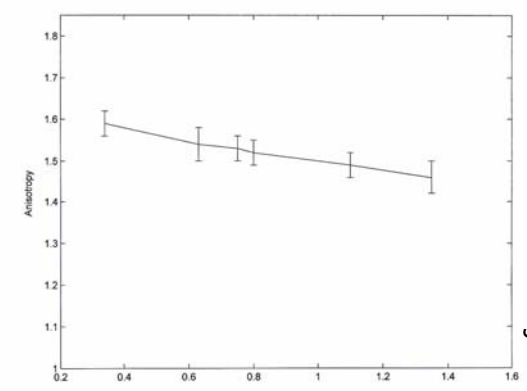
شکل ۳ - نمونه‌اي از ساختار دو پالسي سيگنال نوترون (الف) در تخليه انجام شده با استفاده از گاز D_2 (ب) در تخليه انجام شده با استفاده از گاز D_2+%1Kr

معمولا گسيل اشعه ايکس نرم که عمدتا مربوط به گسيل تابش ترمزي (Bremsstrahlung) از الکترون‌هاي پلاسماي داغ مي‌باشد به مکانيزم گرماهسته‌اي نسبت داده مـي‌شـود و گـسيل اشـعه ايکس سخت که بر اثر بمباران سطح آند بـا اشـعه الکتـرون‌هـاي سـريع توليـد شـده در نقـاط داغ (hot spots) رخ مي دهد مربوط به مکانيزم هاي غير گرما هسته‌اي مي باشد [۹] و بنابراين با

بررسي نتايج گسيل اشعه‌هاي ايكس نرم و سخت و نيز مقدار كل توليد نـوترون و ناهمـسانگردي در گسيل آن مي‌توان درباره مكانيزم توليد نوترون در يك دستگاه پلاسـماي كـانوني اظهـار نظـر نمود. در شكل‌هاي ٤ الي ٧ چگونگي تغييرات مقدار كل توليد نوترون و ضـريب ناهمـسانگردي در گـسيل آن بـا فـشار در ولتـاژ تخليـه ثابـت ١٦ kV بـراي گازهـاي D_2 و D_2+%1Kr نـشان داده شده‌اند. مشاهده مي‌شود كه ضريب ناهمسانگردي بـا افـزايش فـشار افـت مـي‌كنـد. ميـزان توليـد نوترون نيز با افزايش فشار از مقادير كم شروع به افزايش مي‌كند تا به يك مـاكزيمم مـي‌رسـد و پس از آن با افزايش فشار مجددا كاهش مي‌يابد. اين ماكزيمم براي D_2 در فشار حدود ٠/٨ torr و براي D_2+%1Kr در فشار ٠/٨٦ torr رخ مي‌دهد، از نتايج بدست آمده در ايـن شـكل‌هـا مـشاهده مي‌گردد كه ميزان تغييرات ناهمسانگردي و توليد كل نوترون با فشار در مورد گاز D_2 بـه مراتـب كمتر از گاز D_2+%1Kr ضريب ناهمسانگردي از ١/٧٢ تـا ١/٣٠ تغييـر مـي‌كنـد و حـداكثر توليـد نوترون حدود ٦/٨ برابر مقدار حداقل آن مي‌باشد. ناهمسانگردي بيشتر نشانه نقش داشتن بيـشتر مكانيزم برهم كنش اشعه - هدف در توليد نوترون اسـت. بـه نظـر مـي رسـد كـه افـزودن Kr بـه دوتريم نه تنها بر ميزان توليد نوترون اثـر دارد بلكـه باعـث تغييـرات عمـده‌اي در مكـانيزم توليـد نوترون نيز مي‌گردد.



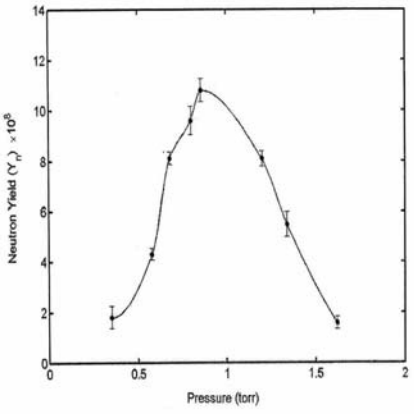
شكل ٤ - تغييرات توليد كل نوترون با فشار
(گاز: D_2 ، ولتاژ تخليه: ١٦ kV)



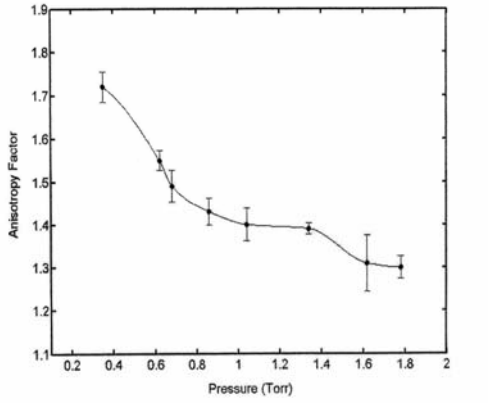
شكل ٥ - تغييرات ضريب ناهمسانگردي
در گسيل نوترون با فشار
(گاز: D_2 ، ولتاژ تخليه: ١٦ kV)

باتوجه به اینکه بهینه وضعیت از نظر میزان گسیل نوترون و نیز گسترده‌ترین تغییرات را در مورد استفاده از گاز D_2+%1Kr و با استفاده از insert anode مخروطي شكل داريم به تحليل اين مورد مي پردازيم در شكل‌هاي ٦ و ٧ نتايج بدست آمده از انجام چند صد تخليه در فشارهاي مختلف گاز D_2+%1Kr در محدوده ٢-٠/٣ torr و ولتاژ تخليه ١٦ kV نشان داده شده است. ملاحظه مي‌شود كه حداكثر توليد نوترون در فشار ٠/٨٦ torr رخ مي‌دهد و در حدود ^{9}١٠ × ١/١ است كه ٢/١ برابر مقدار حداكثر در استفاده از گاز D_2 است، در خارج از محدوده فشار ذكر شده توليد نوترون به شدت افت مي‌كند.

با بررسي شكل‌هاي ٦ و ٧ سه رژيم فشار را در دستگاه «دنا» ملاحظه مي‌كنيم در اولين رژيم (٠/٧-٠/٣ torr) ضريب ناهمسانگردي با افزايش فشار به سرعت افت مي‌كند (از ١/٧٢ به ١/٤٩)، دامنه سيگنال ثبت شده اشعه ايكس نرم نيز به طور قابل ملاحظه‌اي افزايش يافته و به يك ماكزيمم مي‌رسد (از ٠/٤ V به ٥/٢ V) و دامنه سيگنال اشعه ايكس سخت به آرامي افزايش مي‌يابد (از ٠/٦ V به ١ V) و ميزان گسيل نوترون نيز با افزايش فشار زياد مي‌شود. باتوجه به اين نكات مي‌توان نتيجه گرفت كه با افزايش فشار نقش مكانيزم اشعه - هدف در حال كاهش است در حالي كه بر نقش مكانيزم گرما هسته‌اي افزوده مي‌شود. در فشارهاي پائين (حدود ٠/٣ torr) ضريب ناهمسانگردي بالا (١/٧٢) و مقدار كم توليد نوترون نشانه اهميت مكانيزم اشعه - هدف است هرچند كه غلبه كامل با اين مكانيزم نيست زيرا در آن صورت بايد مقدار ضريب ناهمسانگردي بيش از ٢ مي‌بود [٥]. در دومين رژيم فشار (١-٠/٧ torr) مقدار توليد نوترون قابل توجهي مشاهده مي‌شود (فشار بهينه توليد نوترون ٠/٨٦ torr است) و سرعت افت ضريب ناهمسانگردي كمتر از رژيم قبل است (از ١/٤٩ به ١/٤١). سيگنال اشعه ايكس نرم از ماكزيمم خود عبور كرده و شروع به كاهش مي‌كند (از ٥/٢ V به ٤ V) و شدت اشعه ايكس سخت نشانه اهميت مكانيزم‌هاي غيرگرما هسته‌اي مي‌باشد. از طرفي مقدار بالاي نوترون‌هاي توليد شده و مقدار متوسط ضريب ناهمسانگردي دلايلي بر عدم وجود نقش قابل توجهي براي مكانيزم اشعه - هدف مي‌باشد. بنابراين نتيجه‌گيري مي‌شود كه مكانيزم GPM نقش عمده‌اي را در اين رژيم فشار بازي مي‌كند. در سومين رژيم فشار (١ torr>) ملاحظه شده كه ضريب ناهمسانگردي در گسيل نوترون به كندي (از ١/٤١ به ١/٣) كاهش مي‌يابد و مقادير گسيل نوترون و اشعه ايكس نرم و سخت نيز در حال كاهش‌اند ولي سرعت كاهش اشعه ايكس سخت بسيار بيش از اشعه ايكس نرم است كه اين نكته نشان دهنده كاهش اهميت مكانيزم‌هاي غيرگرما هسته‌اي در برابر گداخت گرما هسته‌اي مي‌باشد. باتوجه به اين نكته و نيز مقدار كم ضريب ناهمسانگردي مي‌توان نتيجه گرفت كه مكانيزم گرما هسته‌اي در اين رژيم نقش غالب را دارد و با افزايش فشار بر اهميت آن افزوده مي‌شود.



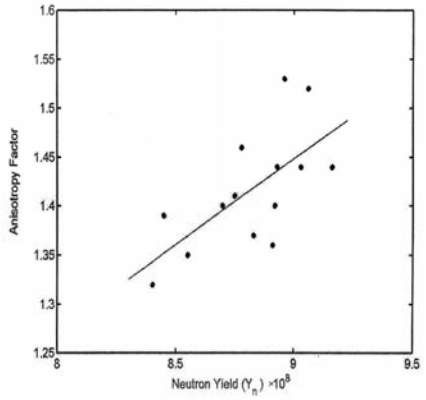
شکل ٦ - تغییرات تولید کل نوترون با فشار (گاز: D_2+%1Kr ، ولتاژ تخلیه: ١٦ kV)



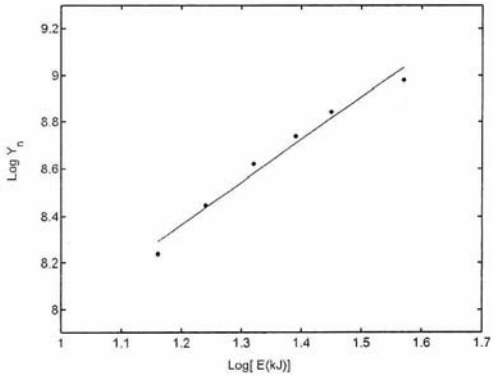
شکل ۷ - تغییرات ضریب ناهمسانگردي در گسیل نوترون با فشار (گاز: D_2+%1Kr ، ولتاژ تخلیه: ١٦ kV)

همچنین با بررسي نتایج تخلیه‌هاي مختلف در یك نقطه کار در نزدیکي اپتیمم (ولتاژ ١٦ kV و فشار ٠/٨٤ torr) ارتباط ضریب ناهمسانگردي و مقدار کل تولید نوترون در شرایط کار ثابت را بررسي نموده‌ایم (شکل ٨) از شکل مشاهده مي‌شود که نتایج از تخلیه‌اي بر تخلیه دیگر تغییر قابل ملاحظه‌اي مي‌کنند و به طور کلي ضریب ناهمسانگردي با افزایش تولید نوترون بالا مي رود که این امر نشان دهنده نقش مکانیزم اشعه - هدف مي‌باشد. در شکل‌هاي ٩ و ١٠ به ترتیب تغییرات مقدار کل تولید نوترون و ضریب ناهمسانگردي در گسیل آن برحسب انرژي تخلیه در فشار ثابت ٠/٨٤ torr رسم شده است. همان گونه که انتظار مي‌رود تولید نوترون با انرژي بانك خازني افزایش مي‌یابد و از روي شکل ٩ مقدار α در قانون مقیاس بندي براي تولید نوترون $Y_n \propto I_p^{\alpha} \propto E^{\frac{\alpha}{2}}$ در مورد استفاده از گاز D_2+%1Kr حدود ٣/٦٢ به دست مي‌آید. در آزمایش مشابهي که در آن از گاز D_2 خالص استفاده نموده‌ایم مقدار α براي فشارهاي حوالي اپتیمم حدود ٣ به دست آمده است [١٥]. در شکل ١٠ مشاهده مي‌شود که ضریب ناهمسانگردي با افزایش انرژي بانك خازني کاهش مي‌یابد. در انرژي‌هاي پائین (<٢٠ kJ) مقدار ضریب ناهمسانگردي بالاست و با افزایش انرژي به سرعت افت مي‌کند و در انرژي‌هاي بالاتر (تا ٣٧ kJ)

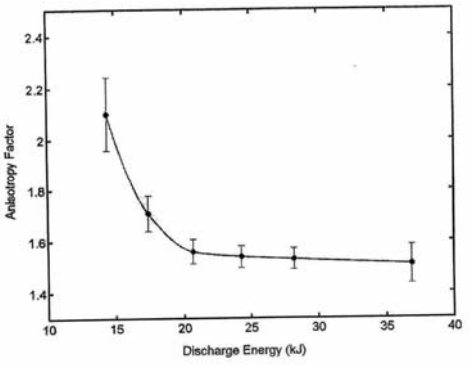
بسیار کند کاهش مي‌یابد. از مجموع نتایج حاصل مي‌توان نتیجه‌گیري کرد که در انرژي‌هاي کم بانك خازني مکانیزم بر هم کنش اشعه - هدف نقش عمده را در تولید نوترون بازي مي‌کند (به خاطر ضریب ناهمسانگردي بالا) و با افزایش انرژي بانك خازني اهمیت این مکانیزم کاهش مي‌یابد. البته باید خاطر نشان ساخت که مشاهده گسیل مقادیر قابل توجه اشعه ایکس نرم و سخت در همه رژیم‌هاي کاري بررسي شده نشانه آن است که هر دو مکانیزم گرما هسته‌اي و غیر گرما هسته‌اي همواره در فرآیند تولید نوترون در این دستگاه دخیل مي‌باشند ولي مطابق تحلیل‌هاي ذکر شده با تغییر شرایط کار میزان تأثیر نقش هریك در این امر تغییر خواهد نمود.



شکل ۸- رابطه میان ضریب ناهمسانگردي و تولید کل نوترون (گاز: D_2+%1Kr ، ولتاژ تخلیه: ۱٦ kV، فشار: ۰/۸٤ torr)



شکل ۹ - تغییرات تولید کل نوترون با انرژي تخلیه
(گاز: D_2+%1Kr ، فشار: ۰/۸٤ torr)



شکل ۱۰ - تغییرات ضریب ناهمسانگردي در گسیل نوترون با انرژي تخلیه
(گاز: D_2+%1Kr ، فشار: ۰/۸٤ torr)

٤- خلاصه

در اين مقاله مشخصه‌هاي گسيل نوترون مانند حدود بالايي و پائيني فشار، فشار بهينه براي توليد نوترون، ناهمسانگردي در گسيل نوترون، مقدار كل نوترون توليد شده در هر تخليه و ... تأثير عواملي چون فشار و تركيب گاز، ولتاژ تخليه و نوع insert anode بر آن‌ها در دستگاه پلاسماي كانوني (٢٥ kV ، ٩٠ kJ) نوع فيليپوف «دنا» مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنين با استفاده از اسيلوسكوپ‌هاي سريع حافظه‌دار ساختار دوپالسي سيگنال نوترون در اين دستگاه مشاهده و بررسي شد. با جمع‌بندي و تحليل نتايج آزمايشات مشخص گرديد كه تغييردادن insert anode و تركيب گاز تأثير قابل ملاحظه‌اي در اين دستگاه دارد كه در كاربرد آن به عنوان يك چشمه نوترون بايد مورد توجه قرار گيرد. بهترين نتايج گسيل نوترون براي insert anode مخروطي شكل و گاز D_2+%1Kr به دست آمده است. از نتايج حاصل مقدار پارامتر α را در رابطه تجربي $Y_n \propto I_p^{\alpha} \propto E^{\frac{\alpha}{2}}$ براي موردي كه از گاز D_2 استفاده كنيم تقريبا برابر ٣ و در موردي كه از گاز D_2+%1Kr استفاده كنيم برابر ٣/٦٢ به دست مي آوريم (در هر دو مورد insert anode مخروطي شكل است) اين نتيجه دليل واضحي بر تأثير داشتن تركيب گاز بر مقدار و مكانيزم توليد نوترون مي باشد. همچنين مشخص شده كه مكانيزم گسيل نوترون به شدت وابسته به فشار مي‌باشد. البته هر دو مكانيزم گرماهسته‌اي و غير گرماهسته‌اي همواره در توليد نوترون در اين دستگاه شركت دارند ولي به نظر مي‌رسد كه در فشارهاي پائين (torr ٠/٥ >) و نيز در ولتاژهاي تخليه پائين (١١-١٠ kV) نقش مكانيزم اشعه - هدف در توليد نوترون قابل توجه است. در فشارهاي حوالي اپتيمم (١-٠/٧ torr) مكانيزم GPM و در فشارهاي بالاتر گداخت گرما هسته‌اي نقش عمده را در تولي نوترون بازي مي‌كنند.

٥- منابع

1- A. bernard et al, "The Dense Plasma Focus- A High Intensity Neutron Source.", Nuc Inst & Meth, 145, PP. 191-218 (1977)

2- P. Cloth, H. Conrads, "Neutroncs of a Dense Plasma Focus - An Investigation of a Fusion Plasma", Nuc Sci & Eng, 62, PP 591-600 (1977)

3- H. Conrads, "Dense Plasma Focus as a neutron Source for Fusion Research", Nuc Sci & Eng, 106, PP 299-307 (1990)

4- F. Castillo et al., "Neutron Anisotropy and X-ray Production of the FN-II Dense Plasma Focus Device", Brazilian Journal of Physics, Vol. 32, No. 1, PP 3-12 (2002)

5- J.P. Rager, "The Plasma Focus", International School of Fusion Reactor Technology, Erice (March 1981).

6- V. A. Gribkov, "Applications And Plasma Technologies", Workshop on Plasma Diagnostics and Industrial Applications of Plasmas, ICTP, Trieste, (11-13 March 2002)

7- V. Zoita, S. Lunga, "A fusion-fission hybrid reactor driven by high - density pinch plasmas", Nukleonica, 46 (suppl) PP S81-S84 (2001)

8- V. V. Vikhrev, "Reconsideration of thermonuclear possibilities of Z-pinches", Nukleonica, 46 (suppl) PP S9-S12 (2001)
9- F. Castillo et al, "Evidence of thermal and non-thermal mechanisms coexisting in dense plasma focus D-D nuclear reactions", J. Phys. D: Appl. Phys, 33, PP 141-147 (2000)
10- V. V. Vujgrev, "Mechanism for neutron production in Z-pinches", Sov. J. plasma. Phys, 12, 4, pp. 262-270 (1986)
11- M. Zakaullah et al, "Imaging of fusion reaction zone in plasma focus", PHYSICS OF PLASMAS, Vol 6, No. 8, PP 3188-3193 (1999)
12- U. Jager, H. Herold, "Fast Ion Kinetics and Fusion Reaction Mechanism in the Plasma Focus", Nuc Fusion, Vol. 27, No. 3, PP 407-423 (1987)
13- R. Aliaga-Rossel, Peter Choi, "Experimental observations of the Spatial Anisotropy of the Neutron Emission in a Medium Energy plasma Focus", IEEE Trans on plasma Sci, Vol. 26, No. 4, PP 1138-1145 (1998)
14- J. Pouzo et al, "Limits of Deuterium Pressure Range with Neutron Production in Plasma Focus devices", Spring College on Plasma Physics, ICTP, Trieste (1987)
15- A. R. Babazadeh et al, "The effect of insert anode shape on the characteristics of neutron emission in a Filippov-type plasma focus", 29th EPS on Plasma Physics and Controlled Fusion, Montreuxe, 17-21 June, ECA 26B (2002)