

# طیف‌نگاری تابش ایکس پالسی دستگاه پلاسمای کانونی با استفاده از فیلم رادیوگرافی همراه با فیلترهای تضعیفی و بکار بردن تکنیک شبکه عصبی

سید میلاد میرعماد<sup>۱\*</sup>، بابک شیرانی بیدآبادی<sup>۲</sup>

۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران، ایران.

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۶، اصفهان، ایران.

**چکیده:** دستگاه پلاسمای کانونی می‌تواند به عنوان یک مولد اشعه ایکس در کاربردهای رادیوگرافی استفاده شود. تابش ایکس سخت این دستگاه پس از چند ده نانو ثانیه نسبت به لحظه وقوع پینچ، در بازه‌ی زمانی ۱۵۰-۱۰۰ ns، گسیل می‌شود. پالسی بودن گسیل تابش ایکس در این دستگاه باعث می‌شود که روش‌های مرسوم آشکارسازی و طیف‌نگاری، جهت مشخصه‌یابی تابش ایکس چندان مفید نباشد. در این مقاله از روش طیف‌نگاری پسیو، با استفاده از فیلم رادیوگرافی به همراه فیلترهای تضعیفی آلومینیومی، برای طیف‌نگاری تابش ایکس پالسی دستگاه پلاسمای کانونی UIPF-1 استفاده شد. در این روش، از مقادیر دز ثبت شده بر روی فیلم‌ها برای تعیین طیف تابش ایکس استفاده شده است. برای رسیدن به این هدف، از تکنیک شبکه عصبی استفاده و آموزش شبکه مذکور توسط داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی با کد MCNPX انجام شد. نتایج نشان داد که طیف تابش ایکس پالسی گسیلی از دستگاه UIPF-1 در شرایطی که آند مرکزی دارای غلاف و تونپاده‌ی مسی است و هر شات در ولتاژ کاری ۲۱ kV و با تزریق گاز هوا تا فشار ۰/۹ mbar، انجام می‌شود، دارای بازه‌ی بین ۵۰-۶ keV است که تقریباً در ۸ keV دارای مقدار بیشینه می‌باشد. انرژی میانگین طیف نیز برابر ۱۷/۵ keV به دست آمد.

**کلیدواژه‌ها:** دستگاه پلاسمای کانونی، تابش ایکس پالسی، طیف‌نگاری پسیو، شبکه عصبی، MCNPX.

## Spectroscopy of pulsed X-ray emitted from plasma focus device using the radiographic film attached with attenuation filters and applying neural network technique

**Abstract:** The plasma focus device can be used as an X-ray generator in radiographic applications. A few tens of nanoseconds after the pinch moment, the hard X-ray of this device is emitted in a time interval of 100-150 ns. The pulsed form of X-ray emitted from this device makes the common method of detection and spectrometry not useful for characterizing them. In this article, the method of passive spectrometry, using radiographic film with Al attenuation filters, was used to determine the spectrum of pulsed X-ray emitted from the UIPF-1. In order to determine the spectrum according to the recorded doses, neural network technology was used. The neural network was trained by using MCNPX code simulation results. The results showed that the X-ray spectrum extends from 6 keV to 50 keV with a maximum value of 8 keV when the UIPF-1 device is operated with the copper anode, the copper insert, the working voltage of 21 kV, and 0.9 mbar air gas injection. The average energy of spectrum was also obtained as 17.5 keV.

**Keywords:** Plasma focus device, Pulsed X-ray, Passive spectrometry, Neural network, MCNPX.



شکل ۱. دسته بندی مکانیسم های عمده ی گسیل تابش ایکس در دستگاه پلاسمای کانونی [۱]

## ۱. مقدمه

مطالعات بر روی تابش های ایکس گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی از همان سال های ابتدایی اختراع این دستگاه، همواره مد نظر بسیاری از پژوهشگران بوده است. این مطالعات را می توان به سه بخش عمده ی مطالعات تئوری مبتنی بر دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی و گسیل تابش ایکس، مشخصه های ایکس تولیدی دستگاه و عوامل مؤثر بر آن و در نهایت کاربردهای تابش ایکس گسیلی از دستگاه تقسیم بندی کرد. لازم به ذکر است که بخش عمده ی مطالعات صورت گرفته توسط محققین مختلف، در بخش دوم قرار می گیرد، زیرا در مطالعات کاربردی تابش های ایکس نیز لازم است ابتدا مشخصه های طیف ایکس تولیدی بهینه سازی شده و سپس مورد استفاده قرار گیرند.

شکل ۱ مکانیسم های مؤثر برای تولید تابش های ایکس در دستگاه پلاسمای کانونی را نشان می دهد. تابش های ایکس گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی را می توان به دو دسته ی عمده ی تابش های گسیلی از پلازما و تابش ناشی از برخورد باریکه ی الکترون با آند تقسیم بندی کرد. در پلازما، عمدتاً گذار الکترون ها بین ترازهای انرژی و یا بازترکیب یک یون با یک الکترون می تواند منجر به تولید تابش ایکس شود. از این رو سه گذار الکترونی آزاد-آزاد، آزاد-مقید و مقید-مقید به عنوان تابش گرمایی پلازما در دستگاه پلاسمای کانونی مطرح شده اند. دو گذار اول دارای تابش های ایکس با طیف پیوسته و گذار مقید-مقید دارای تابش های خطی ایکس مشخصه می باشند. شدت نسبی طیف پیوسته و یا گسیل های خطی ایکس مشخصه به این بستگی دارد که پلازما چطور شکل گرفته است. مثلاً برای پلاسمایی که از موادی با عدد اتمی بالا شکل گرفته، گسیل طیفی غالب است در حالی که برای موادی با عدد اتمی کم، گسیل خطی می تواند شدیدتر باشد. علاوه بر این ها به دلیل وجود میدان مغناطیسی قوی در داخل پلازما که در شکل گیری پینچ بسیار اهمیت دارد، احتمال گسیل تابش های سینکروترونی هم در پلازما وجود دارد.

در این بین تابش های گسیلی از سه گذار الکترونی، به علت انرژی کمی که دارند (ایکس های نرم - SXR<sup>۱</sup>) می توانند به راحتی فیلتر شوند. تابش های سینکروترون و تابش های گسیلی در اثر برخورد باریکه ی الکترونی پر انرژی با سطح آند دارای محدوده های انرژی بالاتری هستند (HXR<sup>۲</sup>) و از آن ها می توان برای کاربردهای رادیوگرافی استفاده کرد. با توجه به جنس ماده ی آند، طیف تابش ترمزی و ایکس مشخصه ی گسیلی از آند متفاوت است. طیف انرژی الکترون برخوردی نیز در این رابطه از اهمیت بالایی برخوردار است. هر چه انرژی الکترون ها در لحظه ی پینچ بیشتر باشد، تابش های ایکس تولیدی دارای انرژی های بالاتری هستند [۱]. جزئیات عملکرد مکانیسم هایی که باعث گسیل ایکس در دستگاه پلاسمای کانونی می گردند همچنان دارای ابهاماتی است و نیاز به تحقیقات آزمایشگاهی بیشتری دارد. با توجه به سیگنال های ثبت شده توسط پیچهی روگوفسکی و سوسوزن پلاستیک می توان نتیجه گرفت که به طور میانگین، تابش های ایکس سخت به فاصله ی زمانی میانگین چند ده نانو ثانیه نسبت به لحظه ی پینچ گسیل می شوند. همچنین طول زمانی سیگنال های مربوط به سوسوزن پلاستیک که نماینده گسیل تابش ایکس است نشان می دهد که این زمان به طور میانگین در بازه ی ۱۵۰-۱۰۰ ns می باشد [۲]. آنچه در مشخصه یابی تابش های تولیدی در دستگاه پلاسمای کانونی واضح می باشد این است که این تابش ها در بازه ی زمانی کوتاهی گسیل می شوند و از این رو روش های معمول آشکارسازی و مشخصه یابی تابش های ایکس چندان مفید نمی باشند.

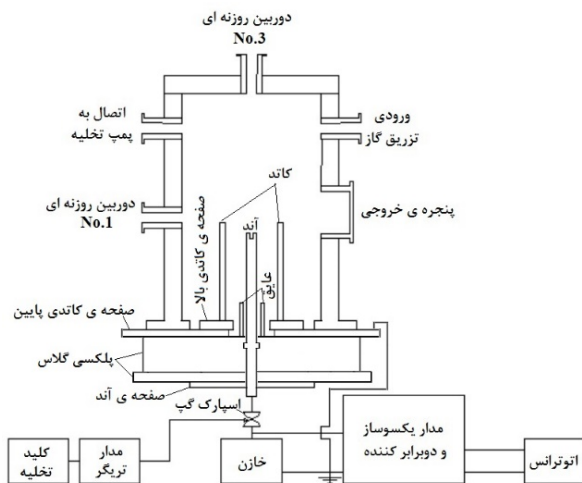
حسین و همکاران در سال ۲۰۰۴ آنالیز طیفی ساده ای را با استفاده از آشکارسازهای PIN<sup>۳</sup> و فیلترهای راس، (چیدمانی از Cu، Co، Ag و Pb به ترتیب با ضخامت های ۳۲، ۴۰، ۵۰ و ۵۵ میکرومتر) انجام دادند. آن ها برای تخمین توزیع ایکس نرم در محدوده ی انرژی ۹-۵ keV، از تفاوت بین شدت سیگنال ها (سطح زیر منحنی) آشکارساز PIN و فیلتر راس<sup>۴</sup> شامل Cu و

<sup>۳</sup> PIN photodiode

<sup>۴</sup> Ross filters

<sup>۱</sup> Soft X-ray

<sup>۲</sup> Hard X-ray



شکل ۲. شماتیکی از دستگاه پلاسمای کانونی UIPF-1 [۱]

بخش اول شامل یک ترانس ولتاژ بالا (۲۰ kV) است که با اتصال به برق شهری، ولتاژ مورد نیاز برای یک مدار یکسو کننده- دو برابر کننده ولتاژ بالا را تأمین می‌کند. خروجی مدار یکسو کننده- دو برابر کننده به یک خازن  $11/4 \mu F$  متصل شده است. ولتاژهای اعمالی به این دستگاه، برای تشکیل پینچ و گسیل تابش ایکس، می‌تواند در بازه‌ی ۱۹-۲۳ kV انتخاب شود. بخش دوم، تجهیزات مربوط به تخلیه است. این تجهیزات شامل مدار تریگر، کلید اسپارک گپ و کلید تخلیه است. مدار تریگر با تغذیه از برق شهری، توسط مدار داخلی خود و یک تایپو ترانز که در این مدار قرار گرفته، ولتاژ DC حدود ۱ kV الی ۲ kV را در خروجی خود ایجاد می‌کند. خروجی تریگر به کلید اسپارک گپ<sup>۳</sup> وصل می‌شود. با زدن کلید تخلیه، ولتاژ خروجی تریگر در صفحه‌ی بالایی اسپارک گپ ایجاد حرقه می‌کند. این حرقه موجب یونیزه کردن هوای بین دو صفحه‌ی اسپارک گپ می‌شود و مسیر تخلیه‌ی خازن به وجود می‌آید و خازن انرژی ذخیره شده در خود را بر روی الکترودهای دستگاه تخلیه می‌کند. به مجموعه‌ی این مراحل در اصطلاح یک شات گفته می‌شود. بخش سوم دستگاه از محفظه‌ی تخلیه، سیستم خلأ و تزریق گاز، آند و تونپادهای آندی، کاتدها، عایق، صفحات کاتدی بالا و پایین، صفحات پلکسی گلاس و صفحه‌ی آندی تشکیل شده است. محفظه‌ی تخلیه که مجموعه آند، کاتدها و عایق را در بر می‌گیرد یک استوانه از جنس استیل ضد زنگ به ضخامت ۳ mm می‌باشد. این محفظه دارای یک پنجره خروجی از جنس پلکسی گلاس به ضخامت ۱۰ mm و شعاع ۱۰۸ mm است که ناظر بر نوک آند می‌باشد. سه ورودی برای پمپ خلأ، تزریق گاز و اتصال فشارسنج روی محفظه تعبیه شده‌اند. آند دستگاه از سه بخش میله‌ی مسی اصلی، غلاف و تونپاده تشکیل شده است. میله‌ی اصلی آند به کار رفته در دستگاه

Ag استفاده کردند. همچنین اختلاف بین شدت سیگنال آشکارساز PIN با فیلترهای Cu و Co تابش ایکس در رنج ۷/۷-۹ keV و اختلاف سطح زیر منحنی آشکارسازهای PIN با دو فیلتر Ag و Pb ایکس‌هایی با انرژی ۱۳-۲۵ keV را تعیین می‌کند [۳]. راسپا و همکاران در سال ۲۰۰۹، برای پی بردن به پیوستار طیف ایکس سخت یک دستگاه پلاسمای کانونی ۴/۷ kJ از روش رادیوگرافی استفاده کردند. آن‌ها از نمونه‌های مس، نیکل، تیتانیوم و نقره با ضخامت‌هایی در گستره ۱۰ - ۰/۱ mm به عنوان فیلترهای جذبی دیفرانسیلی استفاده نمودند. تابش ایکس با استفاده از سیستم استاندارد رادیوگرافی با فیلم، آشکارسازی شد. نتایج نشان‌دهنده وجود قله غالب در نزدیکی ۷۵ keV به همراه اجزاء طیفی مهم در گستره‌ی ۴۰-۲۰۰ keV است [۴]. میرعماد و همکاران در سال ۲۰۱۷ انرژی مؤثر تابش‌های ایکس گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی با انرژی ۲-۳ kJ را به روش پسیو اندازه گرفتند. نتایج نشان داد که بسته به شرایط کاری دستگاه پلاسمای کانونی این انرژی می‌تواند بین ۱۷/۳-۱۰/۹ تغییر کند [۵].

در این مقاله تلاش شد تا به روش پسیو با استفاده از فیلم رادیوگرافی به همراه فیلترهای تضعیفی، طیف تابش ایکس پالسی گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی UIPF-1<sup>۱</sup> تخمین زده شود. برای محاسبه‌ی طیف از شبکه‌ی عصبی آموزش دیده توسط داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی با کد MCNPX<sup>۲</sup> استفاده شد. این تکنیک قبلاً توسط سهرابی و همکاران در سال ۲۰۲۱ برای محاسبه طیف باریکه الکترون گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی مورد استفاده قرار گرفت [۶]. لازم به ذکر است که برای اندازه‌گیری دز تابش‌های ایکس دستگاه پلاسمای کانونی به جای فیلم رادیوگرافی می‌توان از آشکارسازهای ترمولومینسانس نیز استفاده کرد [۷].

## ۲. مواد و تجهیزات

### ۱.۲. دستگاه پلاسمای کانونی UIPF-1

دستگاه پلاسمای کانونی UIPF-1 از سه بخش کلی که شامل بخش تأمین انرژی، بخش تخلیه و بخش محفظه و ساختارهای تشکیل پلاسمای می‌باشند، تشکیل شده است (شکل ۲).

<sup>3</sup> Spark gap

<sup>1</sup> University of Isfahan plasma focus device no.1

<sup>2</sup> Monte Carlo N-Particle code version X (2.6)

ثبوت، شستشوی پایانی و در نهایت خشک کردن می‌باشد [۹]. از آنجایی که امولسیون فیلم‌های رادیوگرافی به نور نیز حساس می‌باشند، تمام مراحل پردازش فیلم‌ها باید در تاریکخانه انجام شود. محلول‌های ظهور و ثبوت انتخابی ساخت شرکت طیف پرداز بودند که همراه تاریکخانه، دماسنج پایش کننده‌ی دمای محلول‌ها، ساعت برای کنترل زمان پردازش فیلم و گیره‌ی فلزی مورد استفاده برای حرکت یکنواخت و مداوم فیلم رادیوگرافی در محلول‌های ظهور و ثبوت در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴. تاریکخانه به همراه محلول‌های ظهور و ثبوت (شرکت طیف پرداز) و سایر تجهیزات پردازش فیلم

فیلم رادیوگرافی پرتو ایکس یک تثبیت کننده‌ی منفی است بدان معنی که افزایش تابش باعث تیره‌تر شدن فیلم می‌شود. درجه تیرگی<sup>۱</sup> فیلم با چگالی اپتیکی که با چگالی سنج اندازه‌گیری می‌شود برآورد می‌گردد. به منظور بررسی درجه‌ی تیرگی فیلم‌های رادیوگرافی دندان، از چگالی سنج نشان داده شده در شکل ۵ استفاده شد. خطای این دستگاه برای اندازه‌گیری چگالی نوری، کمتر از ۰/۳ درصد است.

از جنس مس و به شکل استوانه‌ای با طول مؤثر ۱۳cm و شعاع ۱/۳ cm است. تعداد کاتدها شش عدد است که به شکل میله‌ی استوانه‌ای تو پر با طول ۱۵ cm و قطر ۱ cm و از جنس مس ساخته شده‌اند. فاصله‌ی محور آند تا محور کاتدها برابر ۴ cm می‌باشد. عایق دستگاه از جنس کوارتز با طول مؤثر ۶ cm، قطر داخلی ۳ cm و ضخامت ۲ mm می‌باشد. برای تشکیل پینچ و گسیل تابش ایکس، گاز مورد نظر تا فشار مشخصی به دستگاه تزریق می‌شود.

## ۲.۲. فیلم رادیوگرافی، تجهیزات ظهور و ثبوت و چگالی سنج نوری

یکی از انواع فیلم‌های رادیوگرافی، فیلم‌های داخل دهانی هستند. در بین فیلم‌های موجود در بازار ایران، فیلم کداک از کیفیت مناسبی برخوردار است که مدل‌های دندانی سرعت E و Insight [۸] راحت تر در دسترس هستند. در آزمایش‌های این مقاله، از مدل سرعت E فیلم کداک استفاده شد. شکل ۳ نمونه‌ی باز شده‌ی فیلم داخل دهانی کداک سرعت E را نشان می‌دهد. این فیلم از بخش‌های مختلفی مانند پاکت، کاغذ، فیلم و صفحه‌ی سربی تشکیل شده است. پوشش کاغذی سطح فیلم را به طور کامل در بر می‌گیرد تا اثرات نور شدید را کاهش دهد و مانع از مه آلودگی بیش از حد شود. فیلم، به رنگ سبز است که از دو لایه امولسیون در پشت و روی پایه‌ی پلی استری ساخته شده است. ورقه نازک سربی معمولاً پشت فیلم و بعد از پوشش کاغذی سیاه‌رنگ قرار می‌گیرد. این لایه مانع از رسیدن تابش پراکنده به فیلم و ایجاد تصویر مه‌آلود می‌شود.



شکل ۳. بخش‌های مختلف فیلم رادیوگرافی دندان کداک

در اثر پرتو دهی فیلم رادیوگرافی توسط تابش‌های ایکس، یک تصویر پنهان بر اساس دز جذبی در فیلم، تشکیل خواهد شد. اطلاعات ثبت شده در فیلم باید تحت یک فرایند شیمیایی (ظهور و ثبوت) تبدیل به یک تصویر قابل رؤیت و دائمی شود. مراحل پردازش فیلم به ترتیب شامل مرحله‌ی ظهور، شستشوی کم،

<sup>1</sup> Blackening

به این دلیل که ساختار کاتد، به صورت ۶ میلیه‌ی قفس سنجایی متقارن است، نمی‌توان از تمامی پنجره‌های قاب استفاده نمود زیرا تصویر میلیه‌های کاتد بر روی فیلم‌ها می‌افتد؛ بنابراین در هر قاب تنها یک فیلم به همراه فیلترش قرار گرفت به گونه‌ای که کاملاً در راستای سطح آند قرار گیرد و فیلم بین خطوط واصل مرکز آند و کاتدها باشد. در هر قاب پنجره‌ای، علاوه بر فیلم فیلتر دار، یک فیلم مرجع بدون فیلتر نیز قرار داده شد.

### ۳. روش کار

#### ۱.۳. تعیین منحنی چگالی نوری بر حسب دز فیلم

##### رادیوگرافی

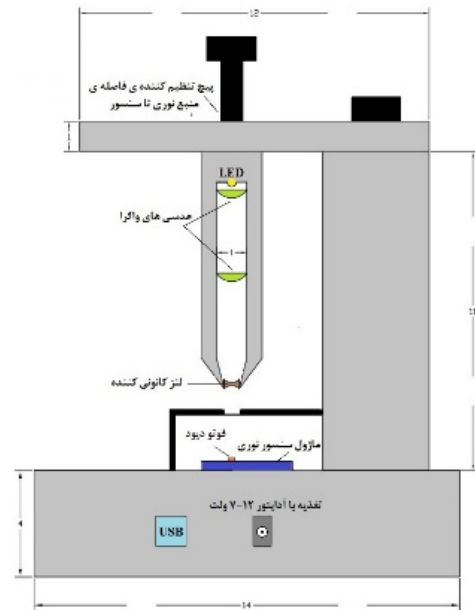
در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه البرز، فیلم‌های رادیوگرافی دندان کدک با دزهایی با خطای کمتر از ۰.۱٪ پرتودهی شدند. محدوده‌ی دز بین  $0.1 \mu\text{Sv}$  تا  $50 \text{ mSv}$  انتخاب شد. متناسب با دز مد نظر، سه عدد فیلم رادیوگرافی دندان کدک سرعت E برای مدت زمانی مشخص، در برابر چشمه و در فاصله ی معین از آن قرار داده شد. برای هر مقدار دز معین، آزمایش ۲ بار تکرار شد. ۲۴ ساعت پس از پرتودهی فیلم‌ها، عملیات ظهور و ثبوت، بر اساس پارامترهای بهینه، در تاریکخانه انجام شد. سپس هر یک از فیلم‌ها توسط دستگاه چگالی سنج خوانده شد و منحنی چگالی نوری بر حسب دز رسم شد.

#### ۲.۳. تنظیم دستگاه UIPF-1 و شرایط انجام آزمایش

در هر آزمایش ابتدا محفظه‌ی دستگاه پلاسمای کانونی تا فشار  $0.4 \text{ mbar}$  خلأ شد و گاز هوا تا فشار بهینه‌ی  $0.9 \text{ mbar}$  به محفظه تزریق شد. ولتاژ کاری  $21 \text{ kV}$  در نظر گرفته شد. غلاف و تونپاده از جنس مس انتخاب شدند. بعد از ۳ شات پینچ دار، چیدمان دز سنجی از محفظه خارج شد و فیلم‌ها ظاهر شدند. هر فیلم توسط دستگاه چگالی سنج خوانده شد و برای هر ضخامت مقدار چگالی نوری اندازه‌گیری شد.

#### ۳.۳. طیف‌نگاری پسیو با استفاده از فیلترهای تضعیفی

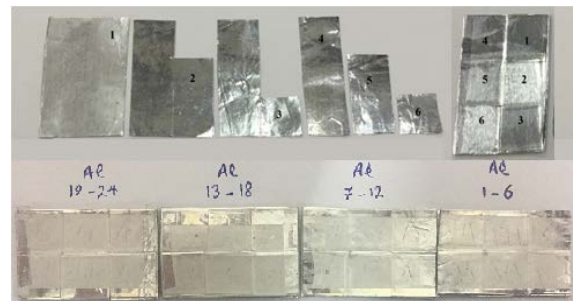
فرض کنید در هر شات فوتون‌های ایکس با طیف انرژی مجهول  $S(E)$  از دستگاه پلاسمای کانونی گسیل شوند. این طیف دارای بازه‌ی انرژی بین  $a$  و  $b$  است که  $a$  حد پایین و  $b$  انرژی بیشینه‌ی طیف ایکس می‌باشند. این چشمه را می‌توان به  $N$  بازه‌ی انرژی تقسیم کرد به گونه‌ای که انرژی میانگین در هر بازه دارای فراوانی مجهول  $X_1, X_2, \dots, X_N$  باشد. در طیف‌نگاری پسیو  $M$  فیلتر تضعیف کننده از مواد با جنس‌ها و ضخامت‌های مختلف می‌تواند استفاده شود. مطابق شکل ۸، زمانی که یک فیلتر تضعیفی همراه آشکارساز انتخابی (فیلم) در برابر چشمه‌ی مجهول ایکس قرار داده می‌شود، مقدار دز مشخصی در آشکارساز ثبت می‌شود؛ در



شکل ۵. شماتیکی از اجزای تشکیل دهنده‌ی چگالی نوری سنج

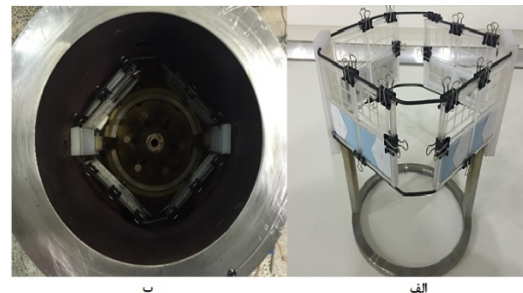
#### ۳.۲. فیلترهای تضعیفی و آرایش دز سنجی

فیلترهای استفاده شده در این مقاله، از جنس فویل آلومینیوم، با ضخامت اولیه‌ی  $0.064 \pm 0.001 \text{ mm}$  می‌باشند که با روی هم قرار دادن تعداد مختلفی از این فویل‌ها با هندسه‌های مشخص، فیلترهای با ضخامت‌های مختلف آماده شد (شکل ۶). هر فیلتر دارای شکل مربعی با سطح  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  است.



شکل ۶. شش برش لازم از فویل آلومینیوم برای ساخت فیلتر با لایه‌های ۱-۶ (تصویر بالا) و فیلترهای ۱ تا ۲۴ لایه (تصویر پایین)

فیلترها به همراه فیلم رادیوگرافی در قاب ساخته شده از جنس پلکسی گلاس ثابت شدند و طی ساختاری که در شکل ۷ نشان داده شده است در داخل محفظه‌ی دستگاه PF قرار گرفتند.



شکل ۷. الف) نگه‌دارنده‌ی قاب‌ها (ب) قرارگیری در داخل محفظه‌ی دستگاه پلاسمای کانونی

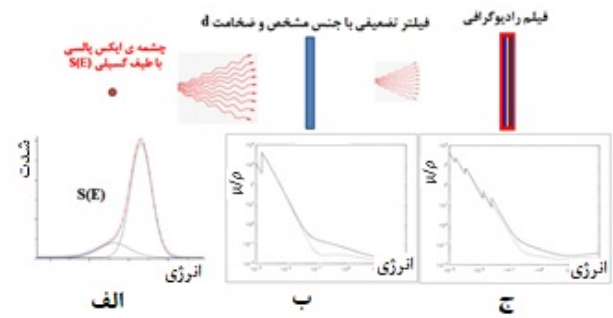


هر چه مقدار وضعیت ماتریس  $A^2$  کوچکتر و به ۱ نزدیکتر باشد، دستگاه معادلات خوش وضعیت‌تر است و جواب با دقت بالاتری از روش معکوس به دست می‌آید. طبق تعریف، عدد وضعیت ماتریس ضرایب در این دستگاه معادلات، برابر نسبت خطای نسبی در  $X$  به خطای نسبی  $D$  می‌باشد که از رابطه‌ی (۴) به دست می‌آید.

$$cond(A) = \|A\| \cdot \|A^{-1}\| \quad (۳)$$

که  $\|A\|$  نرم ۳ و  $A^{-1}$  معکوس ماتریس  $A$  می‌باشند. ماتریس ضرایب  $A$  می‌تواند توسط کد مونت کارلویی MCNPX به دست آید. برای شرایط مختلفی که در آن‌ها انرژی و فیلترهای متفاوتی انتخاب شده بودند، ماتریس‌های ضرایب  $A$  به دست آمده از شبیه‌سازی، دارای عدد وضعیت بالایی بودند. در نتیجه نمی‌توان از معادله‌ی خطی  $X=A^{-1}D$  برای تعیین طیف تابش ایکس استفاده کرد. لازم به ذکر است که برای تعیین دقیق‌تر طیف انرژی تابش‌های ایکس باید تعداد انرژی‌های بیشتری انتخاب شود. افزایش تعداد انرژی‌های انتخابی موجب افزایش ابعاد ماتریس می‌شود. از این رو برای محاسبه‌ی دقیق طیف تابش ایکس گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی از روش شبکه عصبی استفاده شد. در شکل ۹ ساختار یک نرون طبیعی بیولوژیکی و مدل ماشینی آن نشان داده شده است. اطلاعات از طریق سیناپس (ارتباط‌های الکترومغناطیسی) که به دندریت متصل هستند وارد نرون می‌شوند، همان ورودی‌ها در مدل ماشینی با مقادیر  $(x_1, \dots, x_m)$  قابل مشاهده هستند. شبکه عصبی به هر ورودی وزن  $(w_1, \dots, w_m)$  اختصاص می‌دهد. اهمیت هر ویژگی ورودی در واقع از ضرب داخلی مقدار ورودی‌ها با هم جمع ( $\sum$ ) شده و به صورت می‌آید. سپس تمامی ورودی‌ها با هم جمع ( $\sum$ ) شده و به صورت یک‌لایه به آکسون وارد می‌شوند. در مرحله بعد تابع فعال‌سازی<sup>۴</sup> بر روی داده‌ها اعمال می‌شود. تابع فعال‌سازی در واقع نسبت به نیاز مسئله و نوع شبکه عصبی تعریف می‌شود. این تابع شامل یک فرمول ریاضی برای به‌روزرسانی وزن‌ها در شبکه است.

واقع به ازای  $M$  فیلتر تضعیفی دزهای  $D_1, D_2, \dots, D_M$  به ثبت خواهند شد.



شکل ۸. شماتیکی برای توضیح طیف‌نگاری بسپو (الف) چشمه گسیلنده تابش ایکس مجهول با طیف  $S(E)$  (ب) فیلترهای تضعیفی با منحنی تضعیف مشخص بر گرفته از NIST (ج) فیلم رادیوگرافی با امولسیون رادیوگرافی با منحنی جذب معلوم بر گرفته از NIST [۱۰] مقدار دز بر جای مانده در آشکارساز به ازای هر فیلتر تضعیفی، برابر مجموع دزهایی است که هر انرژی به‌طور جداگانه و متناسب با شدتش در آن برجای می‌گذارد. از این رو می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} D_1 = A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + \dots + A_{1N}X_N \\ D_2 = A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + \dots + A_{2N}X_N \\ \dots \\ D_M = A_{M1}X_1 + A_{M2}X_2 + \dots + A_{MN}X_N \end{cases} \quad (۱)$$

مقادیر  $A_{ij}$  برابر دز فیلم به ازای فیلتر  $i$  -ام می‌باشد که توسط  $z$ -امین بازه‌ی انرژی (با فراوانی ۱) ایجاد شده است. اندیس  $i$  از ۱ تا  $M$  و اندیس  $j$  از ۱ تا  $N$  می‌تواند تغییر کنند. می‌توان معادلات (۱) را به فرم ماتریسی (۲) نوشت:

$$D = AX \quad (۲)$$

که در آن  $D$  ماتریس ستونی دز  $(M \times 1)$ ،  $A$  ماتریس ضرایب  $(M \times N)$  و  $X$  ماتریس ستونی فراوانی طیف ایکس مجهول در هر انرژی انتخابی  $(N \times 1)$  است. دستگاه معادلات (۲) دارای  $M$  معادله و  $N$  مجهول است. اگر  $M=N$  باشد دستگاه را همواره معین<sup>۱</sup> می‌نامند که در آن اگر دترمینان ماتریس  $A$  مخالف صفر باشد دستگاه معادلات سازگار بوده و یک جواب منحصر به فرد دارد. علاوه بر این وضعیت ماتریس  $A$  در حل دستگاه معادلات بسیار مهم است زیرا برخی از دستگاه‌های معادلات نسبت به خطاهای کوچک محاسباتی و گرد کردن اعداد بسیار حساس می‌باشند و تغییرات بسیار کوچک در بردار  $D$  که باید به صورت تجربی به دست آید و حتماً همراه خطا است، به شدت می‌تواند بر مقادیر  $X$  خروجی ناشی از حل معادله خطی تأثیرگذار باشد.

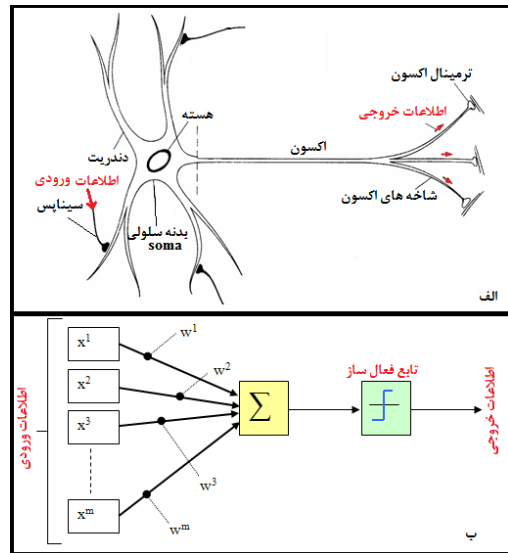
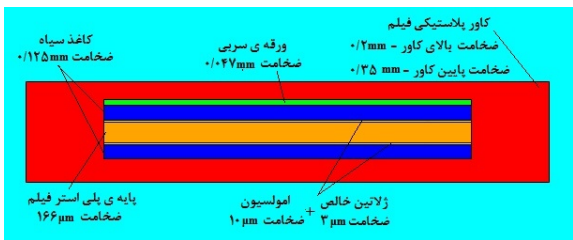
<sup>3</sup> Norm  
<sup>4</sup> Activation Function

<sup>1</sup> Ever determined  
<sup>2</sup> Matrix condition number

الکترون‌های گسیلی زیر ۲۰۰ keV متمرکز شده‌اند و گسیل ناچیزی با انرژی بالای ۳۵۰ keV نیز در آن وجود دارد. با توجه نتایج تحقیقات صورت گرفته بر روی الکترون‌های گسیلی از دستگاه‌های پلاسمای کانونی در محدوده‌ی ۳ kJ، به منظور در نظر گرفتن تمامی طیف‌های احتمالی برای باریکه‌های الکترونی دستگاه پلاسمای کانونی، می‌توان از تابع ماکسول-بولتزمن با انرژی میانگین در محدوده‌ی ۲۰-۳۰۰ keV استفاده کرد. این تابع با انرژی میانگین ۲۶۲ keV همخوانی بسیار خوبی با نتایج شمشیان و همکارانش داشت [۱۱]. بر این اساس برنامه‌ای در متلب نوشته شد که می‌تواند هر تعداد دلخواه طیف الکترون را با توجه به مقادیر میانگین تابع ماکسول-بولتزمن تولید کند. پارامترهایی همچون نوع گاز تزریقی، فشار گاز، ولتاژ عملکردی و ... می‌تواند بر طیف الکترونی تأثیرگذار باشد.

۲- تخمین طیف تابش ایکس (ترمزی و مشخصه) تولیدی در اثر برخورد طیف الکترون به آند مرکزی دستگاه توسط شبیه‌سازی MCNPX. در این شبیه‌سازی‌ها طیف انرژی تابش‌های ایکس تولیدی در اثر برخورد الکترون با انرژی‌های میانگین ۶، ۸، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلو الکترون‌ولت با آند مسی، به طور مجزا، در همان محلی که در آزمایش‌های تجربی فیلم رادیوگرافی قرار داده می‌شد، به دست آمد.

۳- محاسبه‌ی دز ثبتي در فیلم رادیوگرافی، پشت لایه‌های ۱ تا ۲۴ آلومینیوم توسط شبیه‌سازی با کد MCNPX و به ازای طیف‌های مختلف تابش ایکس. فیلم رادیوگرافی دندان کداک از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است. شکل ۱۰ هندسه‌ی فیلم به همراه فیلترهای تضعیفی Al با ضخامت‌های مختلف، مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی‌ها، فاصله‌ی بین فیلم و چشمه با هوا در فشار ۰/۹ mbar پر شد. دز ثبت شده در هر بخش از امولسیون فیلم رادیوگرافی که پشت ضخامت خاصی از فیلتر نوعی قرار داشت، توسط تالی F8\* در هر دو سلول امولسیون موجود در بالا و پایین پایه‌ی پلی‌استری فیلم به دست آمد.



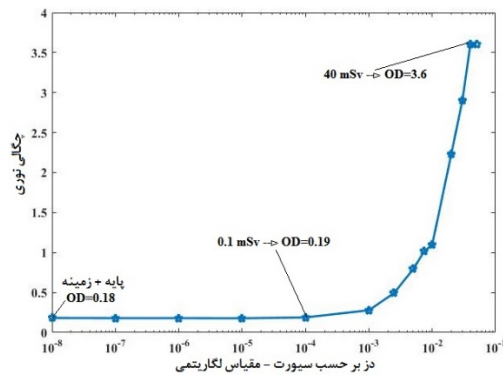
شکل ۹. اجزای تشکیل دهنده‌ی یک نورون (ب) مدل ریاضی یک شبکه عصبی

پس از انجام محاسبات در این مرحله، اطلاعات از طریق سیناپس‌های خروجی وارد نرون دیگر می‌شوند و این مرحله تا جایی ادامه پیدا می‌کند که شبکه به اندازه کافی آموزش ببیند. مزیت استفاده از شبکه عصبی آن است که در این شبکه‌ها اگر یک سلول آسیب ببیند بقیه‌ی سلول‌ها می‌توانند نبود آن را جبران کرده و در بازسازی آن سهیم باشند. فرآیند تعیین طیف انرژی تابش ایکس دستگاه پلاسمای کانونی با استفاده از شبکه عصبی شامل ۶ مرحله است که عبارتند از:

۱- مدل‌سازی انواع مختلفی از طیف‌های الکترون دستگاه پلاسمای کانونی، استخراج شده از اندازه‌گیری‌های تجربی. شمشیان و همکاران در سال ۲۰۱۷ با اندازه‌گیری طیف الکترونی دستگاه پلاسمای کانونی UIPF-1 به روش غیر مستقیم، زمانی که از گاز تزریقی آرگون با فشار ۰/۶ mbar و ولتاژ کاری ۲۲ kV استفاده شده بود، در ۴ بازه‌ی انرژی مجزا تا نهایتاً ۵۰۰ keV نتیجه گرفتند که اکثر الکترون‌های ساطع شده در محدوده‌ی انرژی ۱۲۵-۳۷۵ keV هستند و دامنه‌ی طیف برای انرژی‌های بالاتر از ۳۷۵ keV قابل چشم پوشی است [۱۱]. به علاوه در تحقیقات مربوط به طیف‌نگاری الکترون‌های گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی با انرژی نزدیک به دستگاه UIPF1 که از گاز سبک‌تری استفاده کرده باشند می‌توان به مقاله‌ی پاتران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۵ اشاره کرد [۱۲]. آن‌ها از دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر ۳ kJ که با گاز نئون کار می‌کرد، استفاده کردند. همچنین از یک آنالیزور مغناطیسی انرژی الکترون<sup>۲</sup> که در محدوده‌ی ۶۶۰-۳۰ keV کار می‌کرد برای بررسی انرژی الکترون‌ها استفاده کردند. پاتران و همکارانش نتیجه گرفتند که در طیف انرژی الکترون اکثر

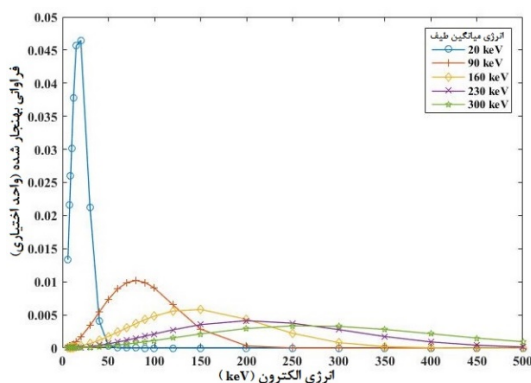
<sup>2</sup> Magnetic electron energy analyser

<sup>1</sup> Patran



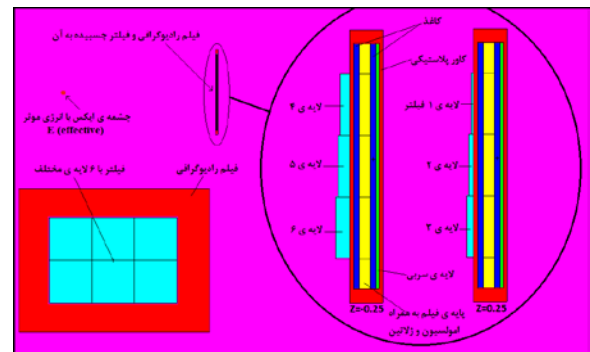
شکل ۱۱. منحنی کالیبراسیون چگالی نوری بر حسب دز استاندارد برای فیلم دندان کداک سرعت E [۱]

در شکل ۱۲ نمونه‌هایی از چند طیف فرضی که می‌تواند به عنوان طیف باریکه الکترونی دستگاه پلاسمای کانونی UIPF-1 انتخاب شوند، نشان داده شده است. این طیف‌ها با استفاده از توزیع ماکسول-بولتزمن و با انرژی‌های میانگین در محدوده ۲۰ keV تا ۳۰۰ keV ساخته شده‌اند.



شکل ۱۲. چند طیف انرژی احتمالی باریکه‌ی الکترون گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی

شکل ۱۳ طیف‌های تابش ایکس متناظر با طیف‌های الکترونی را نشان می‌دهد. این طیف‌ها توسط کد MCNP و با اعمال طیف‌های الکترون شکل ۱۲ در هندسه دستگاه پلاسمای کانونی محاسبه شده‌اند. مشاهده می‌شود که انرژی میانگین طیف‌های ایکس تولیدی به ازای طیف‌های ماکسولین-بولتزمن انتخابی، تقریباً در محدوده‌ی ۱۱ keV تا ۱۱۶ keV قرار دارد.



شکل ۱۰. شماتیکی از هندسه‌ی فیلم دندان کداک و فیلترهای AI با ضخامت‌های مختلف مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های MCNPX

۴- آموزش شبکه عصبی با داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها.

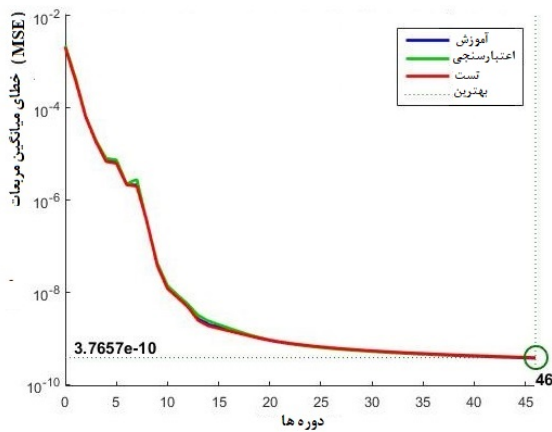
۵- اعتبار سنجی شبکه‌ی آموزشی دیده، بدین منظور یک ماتریس تصادفی برای ایجاد خطای ۵-۱۰٪ در مقادیر دز ناشی از طیف ایکس معلوم (مشابه آنچه در شکل ۱۳ نشان داده شده است)، به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها، استفاده شد و سپس طیف ایکس به ازای مقادیر دز جدید با استفاده از شبکه‌ی عصبی به دست آمد. طیف محاسباتی با طیف ایکس معلوم انتخابی مقایسه شد.

۶- تعیین طیف تابش ایکس گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی بر اساس مقادیر دز تجربی به دست آمده

#### ۴. نتایج

عمق نفوذ تابش‌های ایکس نرم در مواد بسیار کمتر است. یک لایه آلومینیوم با ضخامت ۰/۰۶۴ cm که در این مقاله به عنوان کمترین ضخامت فیلتر استفاده شده است می‌تواند شدت تابش‌های ایکس با انرژی ۵/۸ keV را تا حدود ۹۰ درصد کاهش دهد. از این رو در این مقاله انرژی ۶ keV، به عنوان حد پایین انرژی قابل آشکارسازی در نظر گرفته شد. منحنی چگالی نوری بر حسب دز فیلم دندان کداک سرعت E در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این منحنی با پرتودهی فیلم‌ها تحت دزهای مشخص در آزمایشگاه استاندارد ثانویه و قرائت چگالی نوری (OD) توسط دستگاه چگالی سنج نوری بدست آمده است.

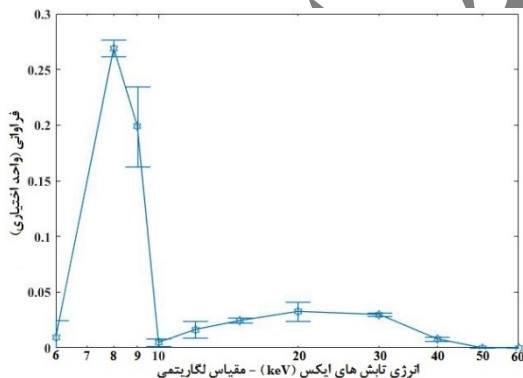




شکل ۱۵. منحنی عملکرد آموزش شبکه عصبی بهینه

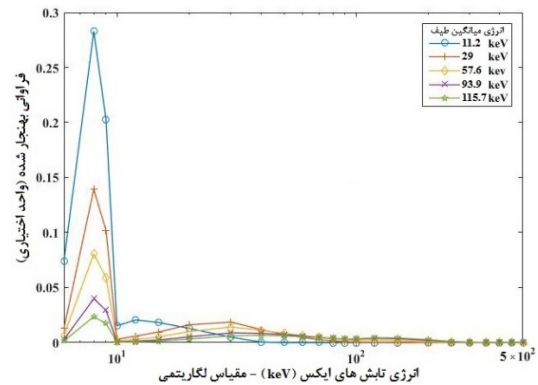
بررسی‌های اعتبارسنجی نشان داد که تنها اختلاف اندکی (کمتر از ۸ درصد) بین طیف‌های خروجی شبکه به ازای ماتریس‌های دز با خطای تصادفی ۱۰-۵٪ وجود دارد. از این رو بهتر است برای دستیابی به جواب با دقت بالاتر، از چندین نتیجه‌ی برنامه، میانگین‌گیری شود. در واقع این اختلاف با افزایش تعداد نمونه‌ها برای آموزش شبکه و میانگین‌گیری از تعداد بیشتری از خروجی‌ها کاهش می‌یابد.

پس از آموزش کامل شبکه عصبی و اعتبارسنجی آن، مقادیر دز اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه پلاسمای کانونی برای تعیین طیف انرژی تابش‌های ایکس به شبکه اعمال شد. نتیجه در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این طیف دارای انرژی میانگین  $17/5 \text{ keV}$  است.



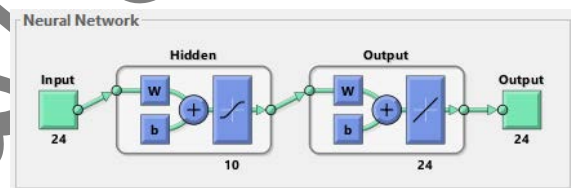
شکل ۱۶. طیف تابش ایکس گسیلی از UIPF-1

مشخصه‌های اصلی طیف بدست آمده در شکل ۱۶ شامل وجود یک قله در این طیف، محدوده انرژی اندازه‌گیری شده و همچنین انرژی میانگین طیف است. قله طیف در انرژی  $8 \text{ keV}$  متناظر با ایکس مشخصه  $K_{\alpha}$  فلز مس (جنس آند دستگاه) می‌باشد. یک ناحیه بیشینه یا قله نیز در محدوده  $20-30 \text{ keV}$  مشاهده می‌شود که قله تابش ترمزی ناشی از طیف الکترونی است. این محدوده انرژی توسط شکل طیف باریکه الکترونی دستگاه تعیین می‌شود.



شکل ۱۷. چند طیف تابش ایکس متناظر با طیف‌های الکترونی احتمالی در اثر برخورد با آند مسی نتیجه شده از شبیه‌سازی با کد MCNPX

دز ثابتی در فیلم پشت هر لایه فیلتر تضعیفی آلومینیوم در اثر طیف‌های مختلف تابش ایکس با استفاده از شبیه‌سازی به دست آمد. یک شبکه‌ی عصبی با دو لایه‌ی اصلی که لایه‌ی اول آن دارای ۱۰ لایه‌ی مخفی و لایه‌ی دوم دارای ۲۴ نورون است مشابه شکل ۱۴ در نظر گرفته شد.



شکل ۱۴. شبکه عصبی مورد استفاده برای محاسبه‌ی طیف انرژی تابش ایکس دستگاه پلاسمای کانونی

هر طیف تابش ایکس با مقادیر انرژی معلوم در بازه‌ی  $500 \text{ keV}$  - ۶ به عنوان ورودی و ماتریس ضرایب (ضرایب تبدیل مولفه‌های طیف/ایکس به مقادیر دز) متناظر با آن طیف به عنوان هدف برای شبکه عصبی تعریف شد. در بررسی‌های اولیه، از آنجایی که تقسیم‌بندی داده‌ها برای آموزش، اعتبارسنجی و تست شبکه عصبی به ترتیب با نسبت‌های ۸۰، ۱۰ و ۱۰ درصد تعریف شده بودند و شبکه به صورت تصادفی داده‌های هر بخش را انتخاب می‌کرد، پاسخ شبکه در هر بار اجرای برنامه متفاوت بود. با تغییر این پارامترها شبکه بهینه به دست آمد. عملکرد آموزش شبکه بهینه شده در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

گاز هوا با فشار ۰/۹ mbar، انجام می‌شود، دارای بازه‌ای بین keV ۵۰-۶ است که تقریباً در ۸ keV دارای مقدار بیشینه می‌باشد. انرژی میانگین طیف نیز برابر keV ۱۷/۵ به دست آمد. از جمله معایب شبکه‌های عصبی این است که در مورد مسائل مدل‌سازی، نمی‌توان صرفاً با استفاده از شبکه عصبی به فیزیک مسئله پی برد؛ همچنین دقت نتایج بستگی زیادی به میزان آموزش دارد و پیش‌بینی عملکرد آینده شبکه (عمومیت یافتن) آن به سادگی امکان‌پذیر نیست.

### مراجع

- [۱] س. م. میرعماد، رساله دکتری، دانشگاه اصفهان، ۱۳۹۶.
- [2] S. Auluck et al, *Update on the Scientific Status of the Plasma Focus*, Plasma 4, 450, (2021).
- [3] S. Hussain et al, *Low energy plasma focus as an intense X-ray source for radiography*, Plasma Science and Technology 6 (3), 2296, (2004).
- [4] V. Raspa and C. Moreno, *Radiographic method for measuring the continuum hard X-ray output spectrum of a Plasma Focus device*, Physics Letters A 373, 3659-3662, (2009).
- [5] S. M. Miremad and B. Shirani Bidabadi, *Measurement of the effective energy of pulsed X-rays emitted from a Mather-type plasma focus device*, Applied Radiation and Isotopes 125, 169-175, (2017).
- [6] M. Sohrabi et al, *Development of a neural network method for measuring the energy spectrum of a pulsed electron beam, based on Bremsstrahlung X-Ray*, Nuclear Engineering and Technology 53, 266-272, (2021).
- [7] P. Knoblauch et al, *Hard X-ray dosimetry of a plasma focus suitable for industrial radiography*, Radiation Physics and Chemistry 145, 39-42, (2018).
- [8] K. H. Thunthy and R. Weinberg, *Sensitometric comparison of dental films of Groups D and E*, Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology 54 (2), 250-252, (1982).
- [9] T. L. Fauber, *Radiographic imaging and exposure*. Elsevier Health Sciences, (2016).
- [10] [https://www.nist.gov/pml/x-ray - mass - attenuation coefficients](https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients).
- [11] N. Shamsian, S. B. Shirani, and H. Pirjamadi, *Development of a radiographic method for measuring the discrete spectrum of the electron beam from a plasma focus device*, Plasma Science and Technology 19 (7), 075101, (2017).
- [12] A. Patran et al, *Spectral study of the electron beam emitted from a 3 kJ plasma focus*, Plasma Sources Science and Technology 14 (3), 549, (2005).

انرژی میانگین طیف نیز برابر keV ۱۷/۵ است که با انرژی ۱۴/۶ بدست آمده توسط روش فیلترهای تضعیفی [۵] در همین دستگاه، حدود ۱۶٪ اختلاف دارد.

### ۵. بحث و نتیجه‌گیری

دستگاه پلاسمای کانونی می‌تواند به عنوان یک مولد اشعه ایکس در کاربردهای رادیوگرافی استفاده شود. این تابش‌ها در بازه‌ی زمانی کوتاهی (چند صد ns) گسیل می‌شوند و از این رو طیف‌نگاری آن‌ها به روش‌های معمول با چالش همراه است. در این مقاله طیف‌نگاری پسیو با بهره‌گیری از فیلم رادیوگرافی به همراه فیلتر تضعیفی، جهت تعیین طیف تابش ایکس گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی UIPF-1 مورد بررسی قرار گرفت. تعداد بازه بندی انرژی چشمه‌ی ایکس و همچنین نوع و ضخامت فیلترهای انتخابی، بر وضعیت ماتریس A تأثیرگذار خواهد بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش ابعاد ماتریس، وضعیت ماتریس بدتری را نتیجه می‌دهد. در این شرایط به ازای یک خطای اندک در تخمین دز، فراوانی تابش‌های ایکس در هر بازه انرژی به شدت تغییر خواهد کرد و نتایج چندان قابل اعتماد نخواهند بود. مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از شبکه عصبی در این موارد می‌تواند مفید باشد. برتری روش شبکه عصبی بر روش حل معادله‌ی ماتریسی و یا سایر روش‌های تحلیلی، از این جنبه است که با داشتن شناخت کلی از شکل واقعی هدف، می‌توان مجموعه داده‌های آموزش را تا حد ممکن شبیه هدف واقعی انتخاب کرد و به همین دلیل امکان تعیین طیف با دقت بالاتری فراهم می‌شود. شبکه عصبی باید توانایی تنظیم پارامترهای شبکه (اوزان سیناپتیکی)، طی زمانی که محیط شبکه تغییر می‌کند و وارد شرایط جدیدی می‌شود را داشته باشد. هدف از این کار این است که اگر شبکه برای یک وضعیت خاص آموزش دید و تغییر کوچکی در شرایط محیطی شبکه رخ داد، شبکه بتواند با آموزش مختصر، برای شرایط جدید نیز کارآمد باشد. بررسی‌های نشان داد که طیف تابش ایکس پالسی گسیلی از دستگاه UIPF-1 در شرایطی که آند مرکزی دارای غلاف و تونپاده‌ی مسی است و هر شات در ولتاژ کاری ۲۱ kV و تزریق