

(دریافت مقاله: ۹۱/۴/۳۱؛ پذیرش: ۹۱/۱۱/۷)

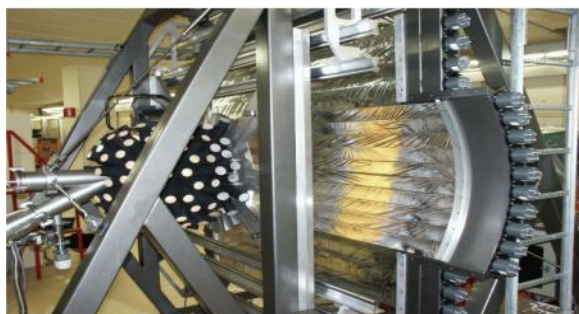
به آشکارساز بر مبنای اندازه‌گیری انرژی پایه گذاری شده است، ذرات فقط در صورتی که انرژی کافی در آشکارساز به جا بگذارند شمارش می‌شوند. در مواردی ذرات حتی با داشتن انرژی کافی به دلیل انجام برهم‌کنش‌های هادرونی تمام انرژی خود را در آشکارساز به جا نمی‌گذارند و این عامل باعث می‌شود که این گونه ذرات با احتمال زیاد به عنوان شمارش زمینه به حساب آیند که در محاسبات حذف می‌گردند. در این صورت حذف این گونه داده‌ها باعث تولید خطایی در محاسبات مربوط به شمارش خواهد شد. به عبارت دیگر در چنین حالتی سطح مقطع کمتر از تعداد واقعی آن اندازه‌گیری خواهد شد. به منظور تصحیح خطای حاصل از این عدم شمارش، پیدا کردن تعداد دقیق ذراتی که برای آنها در

آزمایش‌های پراکندگی در فیزیک زیر اتمی برای بررسی خواص هسته‌ها و تعیین ویژگی‌های هسته‌های مختلف انجام می‌شوند. برای مطالعه برهم‌کنش نوکلئون - نوکلئون در پیکربندی‌های مختلف، می‌توان آزمایش‌هایی را که در آنها باریکه‌ای از نوکلئون‌های فرودی توسط هدفی شامل نوکلئون یا نوکلئون‌ها پراکنده می‌شوند، را بررسی کرد [۱].

یکی از مهمترین مشاهدات پذیرهای مورد علاقه در آزمایش‌های پراکندگی، کمیت سطح مقطع است. اندازه‌گیری دقیق آهنگ ذراتی که در آشکارساز به ثبت می‌رسند جهت دستیابی به کمیت مذکور با دقت بالا مورد نیاز است. از آنجایی که در آشکارسازهای سوسوزن اندازه‌گیری تعداد ذرات رسیده

جدول ۱. ثابت‌های فیزیکی سوسوزن‌های پلاستیکی BICRON [۳].

Type	Decay(ns)	$\lambda_{\max}$ (nm)	$L_t$ (cm)	H/C <sub>ratio</sub>	$(g/cm^3)\rho$	$n_c$	Application
۴۰۸ BC-	۲٫۱	۴۲۵	۳۸۰	۱٫۱۰۴	۱٫۰۳۲	۱٫۵۸	TOF, Proton, Electron
۴۴۴ BC-	۱۸۰	۴۲۸	۱۸۰	۱٫۱۰۹	۱٫۰۳۲	۱٫۵۸	Phoswich detector



شکل ۱. نمای کلی از دستگاه BINA. در این شکل بخشی از آشکارسازهای دیوار جلویی، توپ پشتی نشان داده شده است [۲ و ۳].

آشکارسازی ذرات پراکنده شده فراهم می‌کنند. شکل ۱ نمای از این مجموعه را نشان می‌دهد.

دیواره جلویی شامل یک اتاقک چند سیمی تناسبی<sup>۳</sup> (MWPC) برای اندازه‌گیری زاویه پراکندگی ذراتی که به سمت جلو پراکنده می‌شوند، یک آرایه<sup>۱۰</sup> تایی از سوسوزن‌های پلاستیکی با ضخامت ۱۲۰ mm (آشکارسازهای E) و یک آرایه<sup>۱۲</sup> تایی از سوسوزن‌های پلاستیکی با ضخامت ۱ mm (آشکارسازهای  $\Delta E$ ) می‌باشد. مشخصات این دو نوع سوسوزن از نوع BICRON در جدول ۱ داده شده است [۳].

آرایه سوسوزن ضخیم قادر به اندازه‌گیری انرژی، زمان پرواز و ترکیب دو آرایه<sup>۱۰</sup> E و  $\Delta E$  قادر به تعیین نوع ذرات آشکار شده هستند. توپ عقبی شامل ۱۴۹ سوسوزن فوزویچ است که توانایی آشکارسازی ذراتی را که به زاویه‌های بین ۴۰ تا ۱۶۰ پراکنده می‌شوند را دارند. این سوسوزن‌ها علاوه بر اندازه‌گیری انرژی قادر به تعیین نوع ذره آشکار شده هم هستند و به دلیل ساختار هندسی خاص خود قادر به تعیین زاویه پراکندگی ذرات هم هستند. البته قدرت تفکیک زاویه‌ای در دیواره جلویی نسبت به توپ عقبی به مراتب بهتر است. توپ عقبی علاوه بر وظیفه

آشکارساز پدیده برهم‌کنش هادرونی اتفاق می‌افتد، از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا روشی حتی الامکان ساده و مطمئن که میزان برهم‌کنش‌های مذکور را اندازه‌گیری کند مورد نیاز است تا بتوان با اطلاعات حاصل از پراکندگی، سطح مقطع دیفرانسیلی را با حداقل خطا اندازه‌گیری کرد.

اندازه‌گیری میزان برهم‌کنش‌های هادرونی به دو شیوه کلی شبیه‌سازی مونت کارلو و استفاده مستقیم از داده‌های آزمایشگاهی امکان پذیر است. روش شبیه‌سازی نسبت به روش استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ساده‌تر است. ولی واضح است که روش استفاده از داده‌های آزمایشگاهی قابلیت اطمینان بیشتری دارد. مقایسه بین نتایج به دست آمده از این دو روش می‌تواند روشی مناسب برای انجام محاسبات را تعیین کند. روش‌های مذکور همراه با معرفی مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده و همچنین نتایج به دست آمده در روش‌های مختلف و مقایسه آنها در ادامه ارائه می‌گردد.

مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده به نام BINA<sup>۱</sup> یک مجموعه منحصر به فرد است که به منظور اندازه‌گیری مشاهده پذیرهای پراکندگی در سیستم‌های سه و چهار نوکلئونی، خصوصاً مشاهده پذیرهای اسپینی طراحی شده است [۲ و ۳].

مجموعه آزمایشگاهی با همکاری انستیتو تحقیقات فیزیک هسته‌ای هلند<sup>۲</sup> (KVI) و دانشگاه آزاد آمستردام طراحی و در انستیتوی مذکور نصب و مورد استفاده قرار گرفته است. این مجموعه شامل دو بخش دیواره جلویی و توپ عقبی است که در کنار یکدیگر یک پوشش زاویه‌ای تقریباً کامل  $4\pi$  را برای

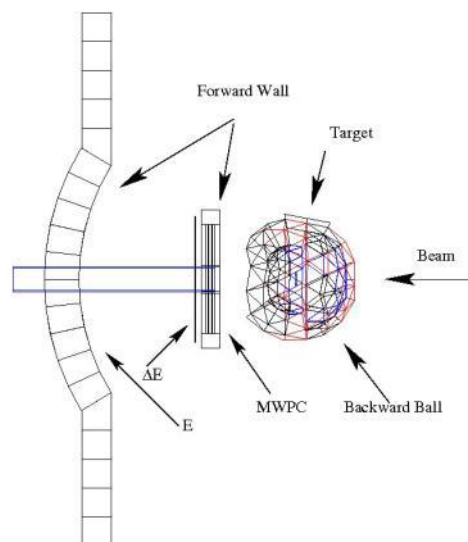
۱. Big Instrument for Nuclear-polarization Analysis(BINA)

۲. Kernfysisch Versneller Instituut (KVI)

۳. Multi Wire Proportional Chamber

شبیه‌سازی کامپیوتری یکی از روش‌های مرسوم در فیزیک هسته‌ای است که قبل از انجام آزمایش می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی را در خصوص طراحی و شیوه انجام آزمایش در اختیار قرار دهد. همچنین بعد از انجام آزمایش، شبیه‌سازی می‌تواند به تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی کمک کند. به دست آوردن اطلاعات مربوط به آزمایش از روش شبیه‌سازی، مزایای بسیار زیادی دارد که از مهمترین آنها کاهش هزینه‌های هنگفت آزمایش‌های فیزیک هسته‌ای در زمینه پراکندگی نوکلئون-نوکلئون است. به هر حال در مواردی نیاز است که از صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی مطمئن شد که مقایسه با مقادیر حاصل از داده‌های آزمایشگاهی بهترین راه ممکن است.

نرم افزار شبیه‌سازی GEANT یکی از مهمترین نرم افزارهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی آزمایش‌های محدوده فیزیک هسته‌ای است [۶]. به کمک این نرم افزار می‌توان تمام مؤلفه‌های مجموعه آزمایشگاهی مانند انواع آشکارسازها، هدف و غیره را شبیه‌سازی نموده و به کمک چشمه‌های متنوع قابل دسترس در نرم افزار آزمایش‌های پراکندگی دلخواه را شبیه‌سازی کرد. مجموعه آزمایشگاهی BINA به کمک نرم افزار GEANT3 شبیه‌سازی گردیده و همان گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است مؤلفه‌های دیواره جلویی و توپ عقبی محل هدف و راستای باریکه فرودی در آن در نظر گرفته شده‌اند. دیواره جلویی شامل سه بخش اصلی MWPC، سوسوزن‌های  $\Delta E$  و سوسوزن‌های E است. توپ عقبی شامل ۱۴۹ آشکارساز فزویچ در یک ساختار کروی است که هدف در مرکز آن تعبیه شده است. برای انجام فرآیند شبیه‌سازی از یک چشمه با توزیع همگن استفاده شده و با انتخاب هدف مناسب پراکندگی‌های پروتون-دوترون و دوترون-دوترون شبیه‌سازی شده‌اند. پاسخ آشکارسازهای E نسبت به دوترون‌های پراکنده شده از پراکندگی کشسان و همچنین نسبت به پروتون‌ها و دوترون‌های پراکنده شده در کانال تجزیه سه جسمی در پراکندگی دوترون-دوترون مورد بررسی قرار گرفته‌اند.



شکل ۲. نمای الگو وار از دستگاه BINA، که به کمک شبیه‌سازی توسط نرم افزار GEANT3 رسم شده است [۲].

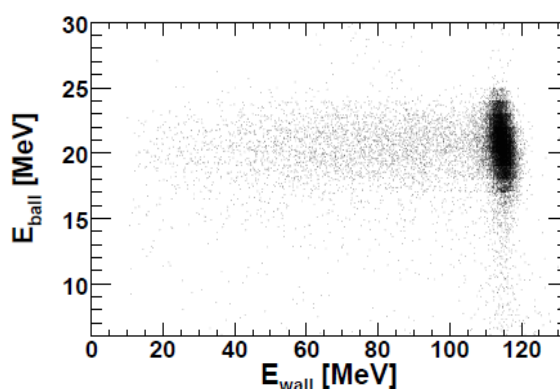
آشکارسازی به عنوان محفظه پراکندگی هم ایفای نقش می‌کند. هدف که می‌تواند از نوع جامد یا مایع باشد، در مرکز این توپ تعبیه شده است. باریکه مورد نیاز برای انجام آزمایش توسط یک شتاب دهنده سیکلوترونی تأمین می‌گردد.

چشمه یونی پلاریزه موجود در KVI که POLIS<sup>۱</sup> [۴] نام دارد قادر به تولید باریکه‌های متفاوت از یون‌های سبک تا سنگین است. ذرات تولید شده توسط چشمه یونی پس از عبور از میدان‌های مغناطیسی مناسب قطبیده می‌گردند و سپس به شتاب دهنده تزریق می‌شوند. در آزمایش‌های پراکندگی انجام گرفته از باریکه‌های پروتون با انرژی ۱۳۵ MeV و دوترون با انرژی ۶۵ MeV/nucleon استفاده شده است. هدف مورد استفاده در آزمایش‌های پروتون-دوترون و همچنین دوترون-دوترون از نوع دوتریوم مایع بوده است [۵]. به کارگیری این نوع هدف باعث کاهش قابل ملاحظه پرتوهای زمینه‌ای خواهد شد. ذرات پراکنده شده توسط آشکارسازهای ذکر شده ثبت می‌شوند. هدف اصلی این مقاله تعیین میزان ذراتی است که در آشکارسازهای E دیواره جلویی دچار برهم‌کنش هادرونی می‌گردند.

۱. POLarized Ion Source

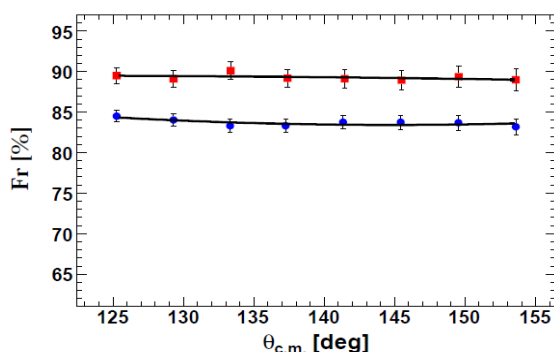
مربوط به کانال‌های مختلف در پراکندگی را انتخاب کرد، کانال‌های کشسان و تجزیه سه جسمی می‌توانند اطلاعات لازم را برای انجام محاسبات فراهم نمایند. در این مقاله بخشی از فضای فاز دو کانال مذکور مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در بررسی پراکندگی الاستیک علاوه بر اینکه باید زاویه پراکندگی ذرات به دیواره جلویی محدود شود، زاویه ذرات پراکنده شده به توپ عقبی را نیز براساس اصل بقای تکانه و انرژی باید محدود کرد. این شرایط سهم تابش‌های زمینه را تا حد بسیار زیادی حذف خواهد کرد. از نظر اصول بقای انرژی و تکانه خطی انتظار می‌رود در پراکندگی الاستیک متناظر با ذره پراکنده شده به جلو، ذره دیگری به سمت عقب پراکنده شود. در این صورت با بررسی رابطه انرژی ذرات پراکنده شده به زاویه محدود دیواره جلویی و ذرات پراکنده شده به زاویه محدود توپ عقبی، همچنین اعمال شرط آشکارسازی همزمان دو ذره، با احتمال بسیار زیاد فقط داده‌هایی انتخاب می‌شوند که از کانال کشسان منشأ گرفته‌اند و داده‌های مربوط به کانال‌های دیگر و یا تابش‌های زمینه‌ای به حداقل خواهند رسید. شکل ۳ از نتایج آزمایشگاهی پراکندگی کشسان پروتون-دوترون در انرژی  $135 \text{ MeV}$  به دست آمده است. در شکل ارتباط بین انرژی دوترون‌هایی که در یکی از سوسوزن‌های دیواره جلویی در زاویه  $15^\circ$  آشکارسازی شده‌اند ( $E_{\text{wall}}$ ) و انرژی پروتون‌هایی که در یکی از آشکارسازهای قسمت عقبی BINA در زاویه  $125^\circ$  آشکارسازی شده‌اند ( $E_{\text{ball}}$ )، نشان داده شده است. این دو زاویه پراکندگی در معادلات اصل بقای تکانه و انرژی صدق می‌کنند.

با توجه به شکل، نقاط متراکم مربوط به ذراتی است که با تمام انرژی شان توسط آشکارساز ثبت شده‌اند و دنباله سمت چپ نقاط متراکم مربوط به دوترون‌هایی است که در آشکارساز متحمل برهم‌کنش هادرونی شده و بخشی از انرژی شان را از دست داده‌اند. دنباله عمودی متناظر است با پروتون‌هایی که در آشکارساز برهم‌کنش هادرونی انجام داده‌اند و بخشی از انرژی شان را از دست داده‌اند. اگر طیف نشان داده شده در شکل ۳ را بر محور افقی تصویر کنیم. نمودار نشان داده شده در پنجره



شکل ۳. نتایج آزمایشگاهی پراکندگی کشسان پروتون-دوترون در انرژی  $135 \text{ MeV}$  که در آن انرژی پروتون‌هایی که در توپ عقب یافت شده‌اند ( $E_{\text{ball}}$ ) را برحسب انرژی دوترون‌هایی که در دیواره جلویی یافت شده‌اند ( $E_{\text{wall}}$ ) نشان می‌دهد.

استفاده از انرژی به جا گذاشته شده توسط پروتون‌ها و دوترون‌ها در آشکارساز برای به دست آوردن میزان برهم‌کنش هادرونی در پراکندگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتی که یک دسته پروتون یا دوترون هم انرژی به آشکارساز وارد شوند انتظار می‌رود که پاسخ آشکارساز شامل قله‌ای متناظر با این ذرات هم انرژی باشد. در صورت وجود زمینه که در آزمایش‌های پراکندگی گریز ناپذیر هستند، پاسخ آشکارساز نسبت به ذرات مذکور در حضور زمینه شامل یک قله سوار بر یک تابع زمینه خواهد بود. در صورتی که پروتون‌ها یا دوترون‌های وارد شده به آشکارساز برهم‌کنش هادرونی انجام دهند، بخشی از انرژی خود را از دست داده و در بخش زمینه کم انرژی طیف انرژی ظاهر خواهند شد. بنابراین برای تعیین میزان انجام برهم‌کنش‌های هادرونی باید تابش‌های زمینه حذف گردند تا آنچه از پاسخ آشکارساز باقی می‌ماند فقط شامل ذرات دلخواه وارد شده یعنی پروتون یا دوترون باشد. به عبارت دیگر برای محاسبه میزان برهم‌کنش‌های هادرونی باید تا حد امکان داده‌های خالص از یک کانال را انتخاب نمود و داده‌های مربوط به دیگر کانال‌ها را حذف کرد. بنابراین شرط نسبتاً سخت‌گیرانه‌ای برای انتخاب داده‌ها اعمال می‌شود. در محاسبات انجام شده به کمک داده‌های تجربی می‌توان داده‌های

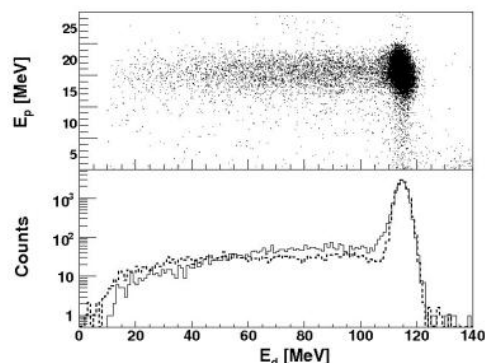


شکل ۵. کسری از پروتون‌ها و دوترون‌هایی که با تمام انرژی شان در آشکارسازهای مجموعه آزمایشگاهی BINA یافت شده‌اند، برحسب زاویه مرکز جرم. داده‌ها مربوط به کانال کشسان در پراکندگی پروتون-دوترون در انرژی ۱۳۵ MeV است.

است، این به این معنی است که کسری از دوترون‌هایی که با تمام انرژی شان در آشکارساز یافت شده‌اند حدود ۸۴٪ است. فرآیند مذکور برای دوترون‌هایی که با زاویه‌های مختلف به دیواره جلویی پراکنده می‌شوند، به کار گرفته شده تا میزان برهم‌کنش هادرونی برای دوترون‌های پراکنده شده به این زاویه‌ها که متناظر با انرژی متفاوت دوترون است، محاسبه شوند. همچنین فرآیند مذکور برای پروتون‌های آشکارشده نیز تکرار شده است.

شکل ۵ نتایج اندازه‌گیری این کسر را برای پروتون‌ها و دوترون‌هایی که در پراکندگی کشسان p-d با تمام انرژی در آشکارسازهای BINA ثبت شده‌اند، بر حسب زاویه پراکندگی در چارچوب مرکز جرم نشان می‌دهد. بر اساس زاویه‌های انتخاب شده برای ذرات پراکنده شده در کانال کشسان، انرژی دوترون‌ها بین ۹۵ MeV و ۱۱۵ MeV و انرژی پروتون‌ها بین ۱۰۹ MeV و ۱۳۰ MeV بوده است. در شکل نقاط روی خط پایین متناظر با دوترون و نقاط روی خط بالا متناظر با پروتون می‌باشند. اختلاف بین این کسر برای دوترون‌ها و پروتون‌ها را می‌توان به دلیل سنگین‌تر بودن دوترون نسبت به پروتون بیان کرد.

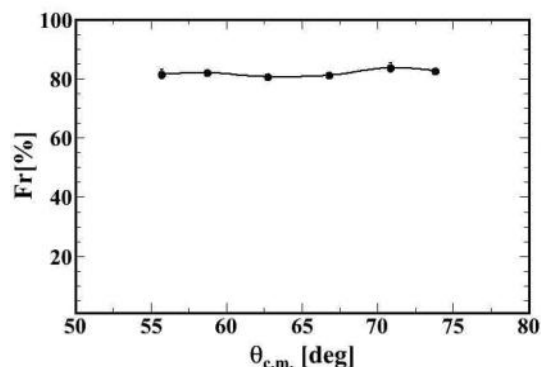
با توجه به مطالب بیان شده در پراکندگی کشسان p-d نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو سازگاری خوبی با هم دارند و در واقع با توجه به این همخوانی می‌توان به نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش



شکل ۴. این شکل تصویر طیف انرژی دوترون بر حسب پروتون در پراکندگی کشسان پروتون-دوترون بر محور  $E_d$  را نشان می‌دهد که دنباله آن متناظر است با دوترون‌هایی که در آشکارساز متحمل برهم‌کنش هادرونی شده‌اند. در شکل پایین، منحنی پر متناظر است با نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و منحنی نقطه چین متناظر است با نتایج شبیه‌سازی برای ساختار انتخابی مونت کارلو با استفاده از نرم افزار GEANT3.

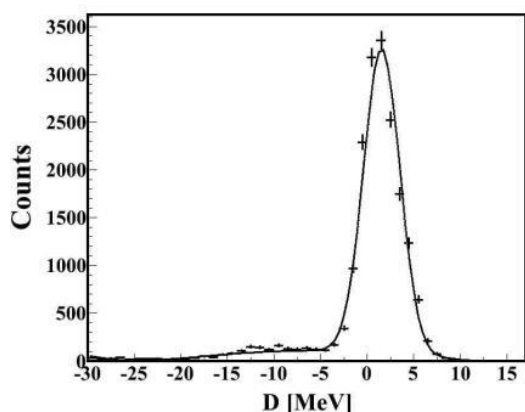
پایین در شکل ۴ حاصل می‌شود که در آن دنباله سمت چپ قله متناظر است با دوترون‌هایی که در آشکارساز برهم‌کنش هادرونی انجام داده‌اند. در شکل ۴ خط پر متناظر است با نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و خط نقطه چین متناظر است با نتایج شبیه‌سازی شده به روش مونت کارلو با استفاده از نرم افزار GEANT3 می‌باشد. نکته قابل توجه در نمودار نشان داده شده در پنجره پایینی شکل ۴ این است که گرچه تابع توزیع اندازه‌گیری شده از داده‌های تجربی و شبیه‌سازی کاملاً با یکدیگر مشابه نیستند ولی نسبت داده‌های موجود در زیر قله به تعداد کل داده‌ها در هر دو روش با یکدیگر همخوانی خیلی خوبی دارند. داده‌های موجود در دنباله کم انرژی سهم دوترون‌هایی را نشان می‌دهد که متحمل برهم‌کنش هادرونی شده‌اند. برای محاسبه میزان برهم‌کنش‌های هادرونی می‌توان به سادگی از این نمودار یک بعدی که شامل قله و دنباله کم انرژی است، استفاده کرد. مساحت زیر منحنی قله به مساحت کل، معرف کسری از ذرات فرودی است که در آشکارساز دچار برهم‌کنش هادرونی نشده‌اند. در نتیجه با کم کردن این نسبت از یک می‌توان کسری از ذرات را که دچار برهم‌کنش شده‌اند را به دست آورد که برای دوترون‌های مشاهده شده حدود ۱۶٪

انتخاب داده‌های مربوط به کانال تجزیه سه جسمی در پراکندگی دوترون-دوترون نسبت به پراکندگی الاستیک دارای پیچیدگی‌های بیشتری است. در حالی که در پراکندگی الاستیک با آشکارسازی یکی از ذرات در حالت نهایی به همراه معادلات اصل بقای تکانه و اصل بقای انرژی سینماتیک برهم‌کنش به صورت کامل شناخته شده است، در کانال تجزیه سه جسمی باید حداقل دو ذره از سه ذره موجود در حالت نهایی شناسایی شوند. از طرفی به دلیل آنکه سه ذره موجود در حالت نهایی برهم‌کنش مذکور متفاوت هستند، انتخاب داده‌ها بدون انجام فرآیند شناسایی نوع ذره<sup>۱</sup> (PID) امکان‌پذیر نیست. فرآیند PID در تجزیه و تحلیل داده‌های این آزمایش با استفاده از کمیت‌های زمان پرواز، انرژی و زاویه‌های قطبی و سمتی انجام پذیرفته است [۲]. البته لازم به ذکر است که به دلیل پایین بودن بهره آشکارسازهای سوسوزن برای نوترون، تجزیه و تحلیل داده‌ها مبتنی بر بررسی دو ذره پروتون و دوترون بوده است. به منظور انتخاب داده‌های کانال تجزیه سه جسمی پس از شناسایی پروتون‌ها و دوترون‌ها، نمودار بستگی انرژی آنها برای حالتی که هر ذره به زاویه پراکندگی قطبی خاصی رفته و اختلاف بین زاویه‌های سمتی آنها نیز مقدار معین باشد، ترسیم می‌شود. همبستگی انرژی براساس اصل بقای تکانه و انرژی به صورت یک منحنی است که آن را منحنی S می‌نامند. شکل ۷ نشان دهنده رابطه بین انرژی دوترون‌ها و پروتون‌هایی که با زاویه  $\theta_p = \theta_d = 25^\circ$  پراکنده شده و برای آنها  $\varphi_p = \varphi_d = 180^\circ$  است را نشان می‌دهد.  $\theta$  و  $\varphi$  به ترتیب زاویه‌ای قطبی و سمتی ذرات پراکنده شده هستند که توسط MWPC اندازه‌گیری شده‌اند. منحنی نشان داده شده منحنی S برای پیکربندی انتخابی است. محور D عمود بر منحنی S در هر نقطه می‌باشد. برای انتخاب داده‌ها در کانال تجزیه محدوده‌ای از منحنی S انتخاب شده و داده‌های موجود در آن محدوده را روی محور D که عمود بر منحنی S در آن محدوده است تصویر می‌شود. در شکل ۷ نمونه‌ای از محدوده انتخابی و محور D نشان داده شده است.



شکل ۶. کسری از دوترون‌هایی که با تمام انرژی شان در آشکارسازهای مجموعه آزمایشگاهی BINA یافت شده‌اند، برحسب زاویه مرکز جرم نشان داده شده است. داده‌های مربوط به کانال کشسان در پراکندگی دوترون-دوترون در انرژی ۶۵ MeV/nucleon است.

شبیه سازی مونت کارلو در پراکندگی p-d اطمینان حاصل کرد. ولی آیا روش شبیه سازی برای پراکندگی‌های دیگر و کانال‌های مختلف دیگر نیز روشی مورد اعتماد می‌باشد یا خیر؟ به همین منظور پراکندگی دوترون-دوترون را مورد بررسی قرار می‌دهیم. این پراکندگی در انرژی‌های متوسط منجر به پنج حالت نهایی می‌شود. کانال کشسان، کانال‌های انتقال پروتون و نوترون و کانال‌های تجزیه سه و چهار جسمی، کانال‌های مختلف در پراکندگی d-d می‌باشند. برای پاسخ به سؤال مطرح شده می‌توان دو کانال از این پنج کانال را مورد بررسی قرار داده و در صورتی که نتایج حاصل از داده‌های تجربی با نتایج روش شبیه سازی مطابقت و همخوانی داشته باشند می‌توان به روش شبیه سازی برای کانال‌های دیگر هم اعتماد کرد. ابتدا میزان برهم‌کنش‌های هادرونی را برای کانال کشسان دوترون-دوترون با استفاده از انرژی به جا گذاشته شده در آشکارساز مشابه با روندی که در پراکندگی کشسان p-d انجام شد به دست می‌آوریم. شکل ۶ کسری از دوترون‌هایی که از کانال الاستیک در پراکندگی دوترون-دوترون در انرژی ۶۵ MeV/nucleon نشأت گرفته و با تمام انرژی شان در آشکارسازهای مجموعه آزمایشگاهی BINA یافت شده‌اند، را برحسب زاویه مرکز جرم نشان داده است. نتایج به دست آمده از این کانال با آنچه در پراکندگی کشسان پروتون-دوترون به دست آمده بود قابل قیاس است.

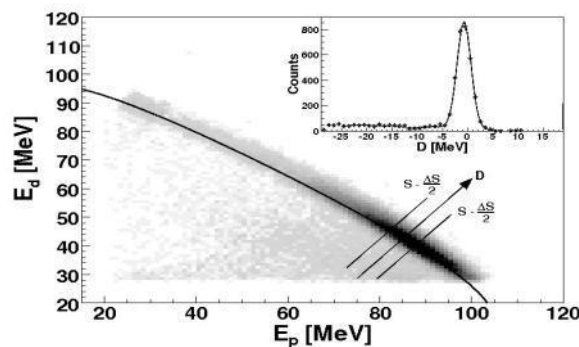


شکل ۸. تصویر داده‌های موجود در  $S=180\text{ MeV}$  روی محور  $D$  نشان داده شده است. قله نمودار نشان دهنده ذراتی است که تمام انرژی خود را در آشکارساز به جا گذاشته‌اند و دنباله قله نشان دهنده ذراتی است که در آشکارساز متحمل برهم‌کنش هادرونی شده‌اند.

با پروتون‌ها و دوترون‌هایی دارند که در همان محدوده  $S$  قرار دارند ولی برای آنها اندرکنش هادرونی رخ نداده است. بنابراین می‌توان از این شباهت استفاده کرده و با انتخاب ذراتی که در محدوده  $S$  قرار دارند و زمان پرواز مشابه هم دارند استفاده نمود و بخشی از ذرات که انرژی خود را به صورت کامل در آشکارساز به جا گذاشته‌اند به دست آوریم.

در این مقاله با اضافه کردن شرط زمان پرواز تنها ذراتی را انتخاب کرده‌ایم که مربوط به حالتی هستند که ذره اول دوترون و ذره دوم پروتون ( $p-d$ ) است. پس تقریباً تمام پس زمینه‌های تصادفی و همچنین رویدادهای غیر دلخواه را حذف کرده‌ایم.

شکل ۸، تصویر داده‌های موجود در  $S=180\text{ MeV}$  بر روی محور  $D$  را نشان می‌دهد که در آن داده‌های زمینه‌ای تقریباً به صورت کامل حذف شده‌اند. قله نمودار نشان دهنده ذراتی است که تمام انرژی خود را در آشکارساز به جا گذاشته‌اند و برهم‌کنش هادرونی شده‌اند. با انتگرال‌گیری از این نمودار و همچنین به دست آوردن مساحت زیر قله (نمودار زنگوله‌ای) به هدف خود که اندازه‌گیری میزان برهم‌کنش‌های هادرونی در آشکارساز سوسوزن می‌باشد خواهیم رسید.

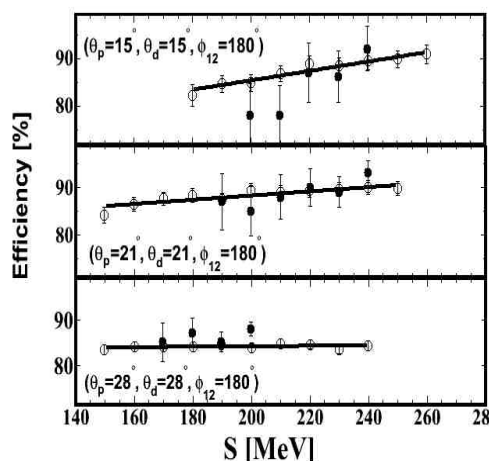


شکل ۷. سینماتیک کانال تجزیه سه جسمی برای واکنش پراکندگی دوترون-دوترون با استفاده از دو متغیر  $S$  و  $D$  [۷].

در واقع ذراتی که روی منحنی  $S$  قرار دارند داده‌های مربوط به کانال تجزیه سه جسمی هستند و ذراتی که روی منحنی قرار ندارند ممکن است مربوط به کانال‌های دیگر باشد، و یا ذراتی که در اثر برهم‌کنش هادرونی بخشی از انرژی خود را از دست داده‌اند. در صورتی که کل انرژی ذره در آشکارساز به جا گذاشته شود (البته در اینجا در صورتی که هر دو ذره کل انرژی خود را در آشکارساز به جا بگذارند) داده روی منحنی نظری  $S$  قرار خواهد گرفت. در صورتی که حتی یکی از ذرات (پروتون یا دوترون) دستخوش برهم‌کنش هادرونی گردد، داده مذکور دیگر در روی منحنی  $S$  قرار نگرفته و طبیعتاً زیر منحنی  $S$  جای خواهد گرفت. در این صورت یا در همان محدوده  $S$  انتخاب شده و زیر منحنی  $S$  دیده خواهد شد و یا اینکه ممکن است حتی خارج از محدوده  $S$  انتخاب شده و در یک محدوده  $S$  دیگر دیده شود. بنابراین اگر صرفاً انرژی به عنوان ملاک تشخیص قرار گرفته باشد به دلیل احتمال ورود داده‌های یک  $S$  به  $S$  دیگر، پیدا کردن میزان برهم‌کنش هادرونی با استفاده از داده‌های موجود در دنباله طیف انرژی کاری آسان نخواهد بود. این بدان معناست که در دنباله طیف انرژی مشاهده شده برای یک  $S$  امکان وجود داده‌هایی از  $S$  دیگر نیز وجود دارد. راه حل فرار از این مشکل استفاده از زمان پرواز خواهد بود. پروتون‌ها و دوترون‌هایی که برهم‌کنش هادرونی انجام می‌دهند گرچه نسبت به داده‌هایی که این اتفاق برای آنها رخ نداده است انرژی کمتری در آشکارساز به جا می‌گذارند، ولی زمان پرواز یکسانی

می‌باشند. با توجه به شکل نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل که با استفاده از روش زمان پرواز انجام داده‌ایم، با نقاط پر نشان داده شده‌اند. همان طور که در شکل دیده می‌شود نتایج حاصل از روش زمان پرواز با نتایج به دست آمده از شبیه سازی به روش مونت کارلو تا حد زیادی همخوانی دارد.

بنابراین با توجه به سازگاری نتایج حاصل از دو روش می‌توان گفت که روش شبیه سازی به روش مونت کارلو همانند آنچه که در واکنش کشسانی داشتیم قابل اعتماد است. پس با توجه به اینکه شبیه سازی روشی ساده‌تر از روش دیگر، یعنی استفاده مستقیم از داده‌های تجربی همچنین سریع‌تر از روش دیگر به جواب می‌رسد بنابراین روش شبیه سازی به روش مونت کارلو روشی مناسب برای محاسبه میزان برهم‌کنش هادرونی در آشکارسازهای سوسوزن است و برای پیکربندی‌های مختلف و پراکندگی‌های دیگر مناسب و سهل الوصول است. به عبارت دیگر از آنجایی که هم در برهم‌کنش کشسانی و هم در برهم‌کنش تجزیه سه جسمی نتایج تجربی و نتایج شبیه سازی با یکدیگر همخوانی قابل قبولی دارند، می‌توان از روش شبیه سازی برای محاسبات بعدی استفاده نمود. روش شبیه سازی نسبت به روش استفاده از داده‌های تجربی مزیت دیگری نیز دارد. در روش شبیه سازی می‌توان به دلخواه تعداد داده‌ها را افزایش داده و تا حد ممکن خطای آماری را کاهش داد. در حالی که در مورد استفاده از داده‌های تجربی افزایش داده‌ها محدودیت دارد.



شکل ۹. مقایسه نتایج به دست آمده از داده‌های تجربی و نتایج حاصل از شبیه سازی به روش مونت کارلو. نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل با استفاده از داده‌های تجربی با نقاط پر و نتایج حاصل از روش شبیه سازی با نقاط خالی نشان داده شده است.

روش توضیح داده شده برای چندین پیکربندی مختلف به انجام رسیده و نتایج آن به دست آمده‌اند. محاسبات مشابه به کمک شبیه سازی کامپیوتری نیز به انجام رسیده است. تجزیه و تحلیل را برای واکنش تجزیه سه جسمی دوترون-دوترون که در حالت نهایی ذره اول دوترون و ذره دوم پروتون می‌باشد، برای سه پیکربندی مختلف  $(28^\circ, 28^\circ, 180^\circ)$ ،  $(21^\circ, 21^\circ, 180^\circ)$ ، و  $(15^\circ, 15^\circ, 180^\circ)$  مختلف انجام داده‌ایم و نتایج به دست آمده را با نتایج حاصل از شبیه سازی به روش مونت کارلو مقایسه کرده‌ایم که در شکل ۹ نشان داده شده است. زاویه‌های داخل پراکنش متناظر با  $(\theta_p, \theta_d, \phi_{12})$

4. H R Kremers and A G Drentje, *AIP Conf. Proc. in Polarized Gas Targets and Polarized Beams*, **421** (1997) 507.
5. N Kalantar-Nayestanaki, J Mulder, and J Zijlstra, *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A* **417** (1998) 215.
6. GEANT3 manual, Detector Description and Simulation Tool, CERN (1993).
7. A Ramazani-Moghaddam-Arani *et al.*, *phys. Rev. C* **83** (2011) 024002.

1. H Frauenfelder and E M Henley, “*Subatomic Physics*”, World Scientific Publishing co. pte. ltd., (2007).
2. A Ramazani-Moghaddam-Arani *et al.*, *Phys. Rev. C* **78** (2008) 014006.
3. H Mardanpour-Mollalar, “*Investigation of Nuclear Forces in d+p Elastic and p+d Break-up Reaction at Intermediate Energies*”, University of Groningen (2008).