



اندازه‌گیری فلئور کل در ترکیبات زیان‌آور PFAS با استفاده از روش PIGE

علیرضا جوکار*، حسین رفیع‌خیری

پژوهشکده‌ی فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران-ایران

چکیده:

در این کار پژوهشی ما اندازه‌گیری سیستماتیک فلئور کل در ترکیبات PFAS را با استفاده از روش گسیل پرتو گامای پروتون-القایی (PIGE) بررسی کردیم. در قدم اول ۶ نمونه شامل ۴ نمونه کاغذی (مقوای بسته‌بندی پیتزا، کاغذ ساندویچ، لیوان کاغذی و کاغذ شاهد) و ۲ نمونه پارچه (بافت پوشک نوزاد و پارچه شاهد) جمع‌آوری و غلظت فلئور در آنها با استفاده از واکنش هسته‌ای $^{19}\text{F}(p,p\gamma)^{19}\text{F}(E_\gamma=197\text{ keV})$ با پروتون‌های 2500 keV اندازه‌گیری شد. نتایج به طور واضح وجود فلئور در نمونه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهند و اشاره می‌کنند که ممکن است نمونه‌ها شامل تعدادی از ترکیبات زیان‌آور PFAS باشند. عدم قطعیت سیستماتیک برای مقادیر اندازه‌گیری شده بهتر از ۹ درصد تخمین زده شد. مزیت مهم روش PIGE نسبت به دیگر روش‌های متداول این است که در تعیین مقدار فلئور کل به روش PIGE نیازی به فرایند استخراج فلئور از بستر نمی‌باشد. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از شتابگر الکترواستاتیک 3 MV و اندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انجام شدند.

کلیدواژه‌ها: گسیل پرتو گامای پروتون-القایی (PIGE)، ترکیبات PFAS، فلئور کل

Total Fluorine Measurement in hazardous PFAS Compounds Using PIGE Method

Alireza Jokar*, Hossin Rafi-kheiri

Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box:11365-3486, Tehran-Iran

Abstract:

In this work, we investigated the systematic measurement of total fluorine in per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) using proton-induced gamma-ray emission (PIGE) method. In the first step, 6 samples including 4 paper samples (contact paperboard box for pizza, sandwich wrapper, paper cup and blank paper) and 2 textile samples including (baby diaper and blank textile) were collected. The concentration of fluorine within samples was measured using the $^{19}\text{F}(p,p\gamma)^{19}\text{F}(E_\gamma=197\text{ keV})$ nuclear reaction at $E_p=2500\text{ keV}$. The results clearly show the presence of fluorine in the studied samples and indicate that the samples may contain some hazardous PFAS compounds. The overall systematic uncertainty of the measured data was estimated to be better than 9%. The important advantage of using the PIGE method in comparison to the common methods is that total fluorine analysis by PIGE does not require extraction of fluorine from matrix. These experiments were carried out using the 3 MV Van de Graaff electrostatic accelerator of Nuclear Science and Technology Research Institute.

Keywords: Proton-Induced Gamma-ray Emission (PIGE), PFAS Compounds, Total Fluorine

* Email: ajowkar@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

ترکیبات^۱ PFAS یک گروه عمده از آلاینده‌ها هستند که تقریباً شامل ۵۰۰۰ ترکیب شیمیایی ساخته‌شده توسط انسان می‌باشند. ترکیبات PFAS از دهه ۱۹۵۰ به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد آنها مانند آب‌گریزی و چربی‌گریزی، فعالیت سطحی بالا و مقاومت حرارتی بالا در تهیه بعضی از محصولات مصرفی مثل ظروف نجسب، کاغذ بسته‌بندی غذا، پارچه ضد آب و چربی، کف ضد حریق، کف پوش و پارکت، پارچه مبلمان و فرش ماشینی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگرچه همان خواص شیمیایی که باعث بهره‌بندی این ویژگی سطحی قابل توجه می‌شوند، عامل افزایش دوام و تجمع زیستی ترکیبات PFAS می‌باشند. نتیجه فراگیر بودن استفاده این ترکیبات و نیز پایداری و دوام محیطی بالا موجب مشاهده گسترده آنها در محیط زیست و حتی در بدن انسان شده است [۱].

ترکیبات PFAS دسته متنوعی از مواد شیمیایی با ترکیبات هیدروکربنی غیرآروماتیک هستند که در آنها اتم‌های هیدروژن به طور کامل در مواد پرفلوئورالکیل^۲ یا تا حدی در مواد پلی فلوئوروالکیل^۳ با فلئور جایگزین شده که باعث پایداری بیولوژیکی و شیمیایی این ترکیبات در محیط می‌شوند. در سالیان گذشته تلاش‌هایی برای مطالعات چگونگی تأثیر شرایط محیطی، تنوع ساختار و خصوصیات شیمیایی ترکیبات PFAS بر نحوه توزیع، سرنوشت و تحول زیستی آنها انجام شده است. وجود همه‌جانبه این ترکیبات در بسترهای مختلف پیرامون انسان، ماندگاری زیاد و تهدیدهای بالقوه آنها برای سلامت انسان و محیط زیست، باعث افزایش تلاش‌ها برای فهم بهتر نحوه توزیع آنها شده است.

مسیرهای مستقیم تماس انسان با ترکیبات PFAS موجود در محصولات خانگی شامل استنشاق مواد فرار و یا بلع گرد و غبار آلوده می‌باشند. با نشت ترکیبات PFAS از بسته‌بندهای مواد غذایی حاوی PFAS مانند ظروف مقوایی و کاغذی فست‌فودها و کیسه‌های ذرت بوداده به طور غیرمستقیم انسان در معرض آلودگی با این ترکیبات خطرناک قرار دارد. در مطالعات انجام شده در مورد بسته‌بندی فست‌فودها مانند کاغذها، مقواها و همچنین لیوان‌های کاغذی، طیف گسترده‌ای از ترکیبات PFAS شامل ترکیبات PFOA^۴، PFOS^۵، FTOH^۶ و PAP^۷ یافت شده است. میزان نشت ترکیبات PFAS از مواد بسته‌بندی به غذا به مقدار، نوع و طول زنجیره PFAS، نوع و دمای غذا و زمان تماس بستگی دارد. با وجود زمان تماس کوتاه بین مواد بسته‌بندی و فست‌فود، دمای بالا و استفاده از چربی‌های نامحلول می‌تواند میزان نشت ترکیبات PFAS را به مواد غذایی به میزان قابل توجهی افزایش دهد [۲].

یک مطالعه جامع بر روی ۶۹۰۰۰ نفر از ساکنین ناحیه دره اوهایو آمریکا که در معرض آب آلوده با PFOA قرار داشتند، ارتباط بین PFOA و شش نوع بیماری سرطان بیضه، سرطان کلیه، بیماری‌های تیروئیدی، کلسترول بالا، کولیت دستگاه گوارش و مشکلات بارداری همچون فشار خون بالا و مسمومیت بارداری را نشان می‌دهد [۳]. در ارتباط با احتمال آلودگی با تماس پوستی تاکنون تنها دو مطالعه منحصراً روی انتقال پوستی ترکیب PFOA انجام شده است [۴].

بخاطر نیمه‌عمر بیولوژیکی بلند این ترکیبات در بدن انسان و نگرانی‌هایی که در مورد اثرات مضر سلامتی آنها وجود دارد، تولیدکنندگان عمده آمریکایی، داوطلبانه تولید PFOA، PFOS و برخی دیگر از ترکیبات PFAS با زنجیره بلند را برای اکثر مواد مصرفی به تدریج متوقف کرده‌اند. در بین کشورهای اروپایی کشورهای نروژ و دانمارک نیز استفاده از ترکیبات PFAS با زنجیره بلند را در بسته‌بندی مواد غذایی ممنوع کرده‌اند. با این حال ترکیبات PFAS با زنجیره بلند هنوز در دیگر نقاط جهان تولید می‌شوند. ترکیبات جایگزین معمول شامل ترکیبات PFAS با زنجیره کوتاه هستند که نیمه عمر بیولوژیکی کوتاه‌تر و تجمع زیستی کمتری دارند. اگرچه ترکیبات PFAS

Per- and polyfluoroalkyl substances¹
Perfluoroalkyl substances^۲
polyfluoroalkyl substances^۳
perfluorooctanoic acid^۴
perfluorooctanesulfonic acid^۵
fluorotelomer alcohols^۶
polyfluoroalkyl phosphate^۷

جایگزین نیز در محیط پایدار هستند و یا به دیگر مولکول‌های پایدار تجزیه می‌شوند. باین حال نتایج حاصل از مطالعات مقدماتی در مورد این ترکیبات نیز باعث ایجاد نگرانی در مورد قرار گرفتن در معرض PFAS زنجیره کوتاه شده و تلاش برای حمایت از توسعه و استفاده از گزینه‌های غیر فلئوئوردار را در پی داشته است.

اندازه‌گیری کمی ترکیبات PFAS در نمونه‌های محیطی و محصولات مصرفی بخاطر چالش‌های اندازه‌گیری مانند مراحل سنگین آماده‌سازی نمونه‌ها، از دست دادن مقداری از ترکیب در حین نمونه‌سازی و نیاز به تجهیزات اختصاصی برای اندازه‌گیری هر گروه مشخص از ترکیبات PFAS، با محدودیت همراه است. معمولاً ترکیبات یونی PFAS به روش کروماتوگرافی مایع-طیف‌سنج جرمی دوگانه (LC-MS/MS) اندازه‌گیری می‌شوند. در صورتی که ترکیبات فرار PFAS به روش کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی^۸ (GC-MS) تعیین می‌شوند. در هر دو روش باید از تکنیک‌های استخراج برای جمع‌آوری PFAS از بستر نمونه استفاده شود. صرفه‌نظر از رویکرد جداسازی، روش‌های LC-MS/MS و GC-MS بسیار زمان‌بر و پرهزینه می‌باشند. برای اینکه مشخص شود آیا مقادیر مجزای PFAS اندازه‌گیری شده توسط هر یک از روش‌های LC-MS/MS و GC-MS چه کسر از PFAS موجود در بستر هستند، سنجش مقدار کل فلئوئور همراه ترکیبات PFAS بسیار مهم می‌باشد.

در سال ۲۰۱۷ Ritter و همکارانش برای اولین بار از روش گسیل پرتو گاما پروتون-القایی^۹ (PIGE) برای تعیین مقدار کل فلئوئور در بستر پارچه و کاغذ استفاده نمودند. آنها از روش PIGE با باریکه پروتون ۳۴۰۰ keV برای اندازه‌گیری غلظت فلئوئور در ۱۰۰ نمونه کاغذ و پارچه به روش مقایسه با استاندارد استفاده نمودند [۵]. آنچه که این روش را نسبت به دیگر روش‌های متداول آنالیز فلئوئور کل متمایز می‌کند این است که در روش PIGE نیازی به استخراج فلئوئور از بستر نیست و مقدار غلظت فلئوئور کل مستقل از نوع ترکیب یا ترکیبات PFAS بکار رفته در سطح نمونه است. بنابراین مقدار $F \text{ nmol/cm}^2$ تعیین شده توسط PIGE نشان‌دهنده مقدار واقعی فلئوئور کل است. در روش PIGE با برهم‌کنش پروتون با انرژی ۱-۱۰ MeV با هسته‌های نزدیک به سطح هدف و آشکارسازی پرتوهای گامای آنی تولید شده می‌توان غلظت ایزوتوپ مورد نظر را در هدف‌های جامد تعیین نمود. از مزیت‌های مهم روش PIGE می‌توان به غیرمخرب بودن، سرعت بالا، حساسیت ایزوتوپی، امکان اندازه‌گیری همزمان چند ایزوتوپ، تابش زمینه کم، حد آشکارسازی بسیار خوب برای عناصر سبک اشاره نمود [۶].

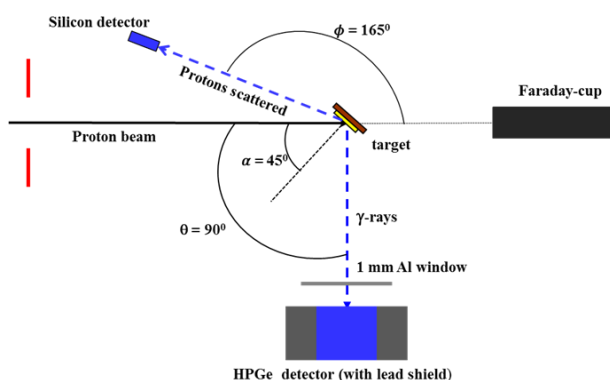
هدف از این کار پژوهشی بررسی امکان اندازه‌گیری مطلق غلظت فلئوئور کل همراه ترکیبات PFAS در نمونه‌های کاغذ و پارچه با استفاده از واکنش هسته‌ای $^{19}\text{F}(p,p\gamma)^{19}\text{F}(E_\gamma=197 \text{ keV})$ می‌باشد.

۲. روش کار

تمام اندازه‌گیری‌ها با استفاده از شتابگر ۳ MV و اندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انجام شد. کالیبراسیون انرژی شتابگر با استفاده از انرژی آستانه ۱۸۸۰ keV واکنش $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ و انرژی تشدید ۹۹۲ keV پروتون واکنش $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ صورت گرفت. بعد از کالیبراسیون خطا در انرژی شتاب‌دهنده از مرتبه ۰/۱ درصد تعیین شد. باریکه پروتون پس از عبور از دو شکاف موازی ساز به قطر ۳ mm که به ترتیب در فاصله‌های ۸۷ cm و ۲۵۰ cm از مرکز محفظه قرار دارند به هدف برخورد می‌کنند. قطر باریکه فرودی در تمامی مراحل آزمایش در حد ۳/۵ mm ثابت نگه داشته شد. خلاء مسیر عبور باریکه و محفظه برهم‌کنش در تمامی مراحل آزمایش با استفاده همزمان از دو جفت پمپ خلاء روتاری و توربو به کمتر از ۱۰-۵ mbar رسانده شد. پرتوهای گاما توسط یک آشکارساز ژرمانیوم فوق خالص از نوع p با اندازه بلور ۶/۵۸ cm × ۶/۵۸ cm و حجم فعال 213 cm^3 که در زاویه ۹۰° نسبت به راستای باریکه و به فاصله ۵/۱۹ cm از مرکز هدف نصب شده آشکارسازی می‌شوند. زاویه فضایی آشکارساز به کمک اندازه‌گیری هندسی ۷۷/۷ msr بدست آمد. بهره نسبی و قدرت تفکیک انرژی آشکارساز در انرژی ۱/۳۳ MeV به ترتیب ۵۰٪ و ۱/۹۵ keV است. طیف‌های پروتون‌های پس‌پراکنده شده از هدف نیز

Gas chromatography mass spectrometry^۸
Proton Induced Gamma-ray Emission^۹

توسط یک آشکارساز سدسطحی سیلیکونی به مساحت 25 mm^2 و ضخامت $300 \mu\text{m}$ که در فاصله 183 mm از مرکز هدف قرار دارد ثبت شدند. این آشکارساز با قدرت تفکیک 13 keV در زاویه 165° نسبت به راستای باریکه نصب شده و زاویه فضای 75 msr را پوشش می‌دهد. شکل ۱ چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. در این آزمایش انرژی باریکه پروتون 2500 keV و جریان باریکه کمتر از 5 nA و زمان هر اندازه‌گیری حدود 1000 ثانیه انتخاب شد.



شکل ۱. چیدمان آزمایش

۳. نتایج

غلظت ایزوتوپ مورد نظر، f_m را می‌توان به روش مطلق با اندازه‌گیری بهره پرتو گاما^{۱۰}، به شرط داشتن مقادیر دقیق و قابل اعتماد داده‌های سطح مقطع واکنش با استفاده از رابطه زیر تعیین نمود [۷]:

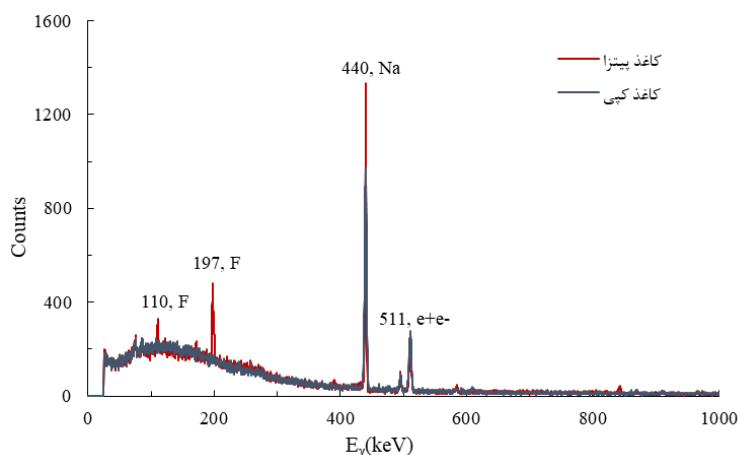
$$Y_0(E_0, \theta) = 4\pi \cdot \epsilon_{\text{abs}}(E_\gamma) \cdot N_p \cdot f_i \cdot f_m \cdot N_A \cdot A^{-1} \cdot \int_{E_0 - \Delta E}^{E_0} \frac{d\sigma/d\Omega}{S(E_0)} dE \quad (1)$$

که $d\sigma/d\Omega$ سطح مقطع دیفرانسیلی واکنش، $Y_0(E_0, \theta)$ بهره پرتوی گاما در انرژی فرودی E_0 و زاویه آشکارسازی θ ، $\epsilon_{\text{abs}}(E_\gamma)$ بازده مطلق آشکارساز معادل با انرژی E_γ ، N_p تعداد ذرات باریکه فرودی، f_i فراوانی ایزوتوپی هدف، N_A عدد آووگادرو، A عدد جرمی عنصر، ΔE افت انرژی پرتابه در عبور از هدف و $S(E)$ توان توقف پرتابه در هدف می‌باشد.

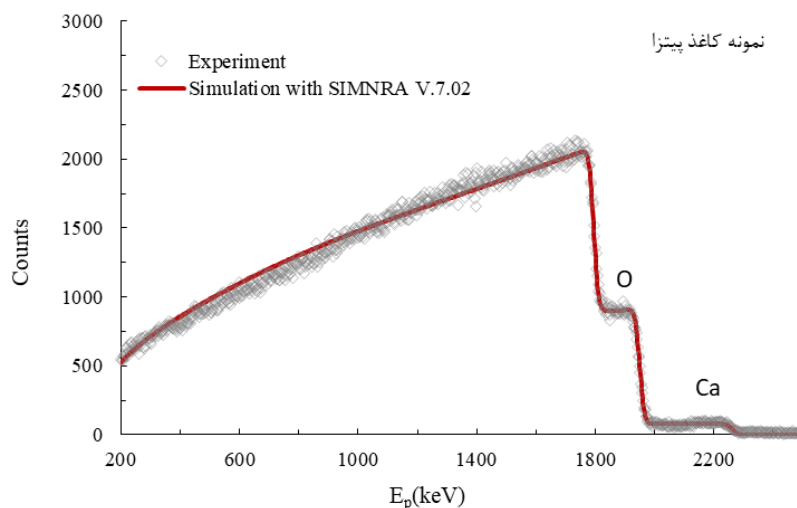
در رابطه ۱ برای اندازه‌گیری غلظت فلئور از واکنش هسته‌ای $^{19}\text{F}(p, p\gamma_2)^{19}\text{F}(E_\gamma=197 \text{ keV})$ استفاده شد. سطح مقطع‌های این واکنش در بازه $824-2709 \text{ keV}$ و زاویه آشکارسازی 90° اندازه‌گیری و منتشر شده است [۸]. برای اندازه‌گیری بازده آشکارساز HPGe در انرژی 197 keV ، نمودار کالیبراسیون بازده مطلق آشکارساز با استفاده از چشمه‌های استاندارد ^{152}Eu ، ^{133}Ba ، ^{60}Co ، ^{137}Cs و ^{241}Am در همان نقطه برخورد باریکه با هدف تعیین شد. با درون‌یابی نمودار کالیبراسیون بدست آمده، مقدار بازده آشکارساز HPGe در انرژی 197 keV ، $3/6$ درصد بدست آمد. توان توقف پروتون‌ها در نمونه‌های مختلف با کمک کد SRIM2013 تعیین شد. بهره پرتو گاما (سطح زیر قله پرتو گاما 197 keV) و بار باریکه فرودی به ترتیب از ثبت همزمان طیف‌های پرتوی گاما و پس‌پراکندگی پروتون‌ها بدست آمدند. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب طیف‌های همزمان گاما و پس‌پراکندگی پروتون‌ها حاصل از بمباران نمونه کاعذ پیتزا با باریکه پروتون 2500 keV را نشان می‌دهند.

¹⁰Gamma-ray yield

این آزمایش برای چهار نمونه کاغذی شامل کاغذ پیتزا، کاغذ ساندویچ، لیوان کاغذی و کاغذ شاهد و دو نمونه بافت پوشک نوزاد و پارچه شاهد که به طور تصادفی تهیه شده‌اند انجام شد. زمان مورد نیاز برای هر اندازه‌گیری کمتر از ۱۰۰۰ ثانیه انتخاب شد. هر یک از نمونه‌ها در نگهدارنده‌ی از جنس آلومینیوم با شعاع حفره ۱/۵ cm در زاویه ۴۵ درجه نسبت به راستای باریکه فرودی داخل محفظه واکنش PIGE نصب شدند. نمونه‌ها نسبت به برد پروتون‌های ۲۵۰۰ keV که حدود ۱۵۰ μm می‌باشد ضخیم می‌باشند. با توجه به اینکه معمولاً تنها یک طرف سطح نمونه‌ها از ترکیبات PFAS استفاده می‌شود هر دو طرف نمونه‌ها بمباران شدند. هر طرف نمونه با مقدار بیشتر فلوتور اندازه‌گیری شده، سطح احتمالی حاوی ترکیبات PFAS در نظر گرفته شد. با توجه به کاربرد نمونه‌های مورد مطالعه، به‌طور معمول از ترکیبات PFAS برای عملیات مقاوم‌سازی سطوح این نمونه‌ها در مقابل نفوذ آب و چربی استفاده می‌شود. از این رو وجود فلوتور در این نمونه‌ها و عدم مشاهده آن در نمونه‌های شاهد (پارچه نخی و کاغذ معمولی) را می‌توان به احتمال زیاد به وجود ترکیبات PFAS نسبت داد. آنالیزهای تکمیلی ترکیبات یونی و فرار PFAS به ترتیب با روش‌های LC-MS/MS و GC-MS، نوع ترکیبات PFAS بکارفته و مقدار فلوتور جزئی را تعیین می‌کنند. در صورت کامل بودن فرایند استخراج، مجموع مقادیر فلوتور جزئی بدست آمده با این دو روش با مقدار فلوتور کل اندازه‌گیری شده به روش PIGE یکسان خواهد بود. لازم به توضیح اینکه بخاطر دوام و تجمع زیستی بالای ترکیبات PFAS در محیط‌های مختلف، حد مجازی برای فلوتور تعریف نشده است.



شکل ۲. طیف‌های گاما حاصل از بمباران نمونه کاغذ پیتزا و نمونه شاهد کاغذ کپی با باریکه پروتون ۲۵۰۰ keV



شکل ۳. طیف پروتون‌های پس‌پراکنده حاصل از بمباران کاغذ پیتزا با باریکه پروتون ۲۵۰۰ keV

غلظت فلئور کل در رابطه ۱ برای نمونه‌های مختلف با استفاده از کد ERYA [۹] تعیین شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. مزیت مهم روش استفاده شده در این پژوهش نسبت به روش Ritter و همکارانش، اندازه‌گیری غلظت فلئور به روش مطلق و بدون نیاز نمونه استاندارد می‌باشد. میزان خطای سیستماتیک کل در تعیین غلظت فلئور با استفاده از معادله انتشار خطاها، حدود ۹ درصد تخمین زده شد. منابع این خطاها شامل سطح مقطع‌های واکنش (۵ درصد)، بازده مطلق آشکارساز گاما (۵ درصد)، توان توقف پروتون‌ها (۴ درصد)، تعیین سطح زیر قله ۱۹۷ keV (۲ درصد) و بار باریکه فرودی (۳ درصد) می‌باشند. همچنین خطاهای آماری مربوط به شمارش زیر قله ۱۹۷ keV در بازه ۲-۴ درصد می‌باشد.

جدول ۱. مقدار غلظت فلئور کل برای ۴ نمونه در دو سری اندازه‌گیری به روش PIGE

سری اول	بهره گاما	غلظت	سری دوم	بهره گاما	غلظت	درصد انحراف معیار نسبی غلظت‌ها
	counts/ μ C	nmol F/cm ²		counts/ μ C	nmol F/cm ²	
کاغذ پیتزا	۱۷۵	۴۱.۳±۷	کاغذ پیتزا	۱۷۰/۲	۳۹/۳±۴/۶	۲/۸
کاغذ ساندویچ	۱۹/۷	۴/۰±۵/۵	کاغذ ساندویچ	۱۸/۶	۴/۰±۳/۵	۳/۲
کاغذ لیوان	۸۴/۶	۱۹/۱±۲/۸	کاغذ لیوان	۷۵/۱	۱۷/۱±۶/۶	۶/۱
پوشک نوزاد	۱۱۵	۲۶/۲±۷/۴	پوشک نوزاد	۱۰۷/۷	۲۵/۲±۲/۲	۴/۱

برای بررسی تکرارپذیری آزمایش و اطمینان از صحت روش تعیین بار، اندازه‌گیری‌ها در دو سری، سری اول بدون پوشش نقره و سری دوم با پوشش نقره بر سطح نمونه‌ها انجام شد. مقایسه نتایج اندازه‌گیری بار حاصل از پس‌پراکنده پروتون‌ها از اتم‌های اکسیژن و اتم‌های نقره در طیف پروتون آزمایش سری دوم نشان می‌دهد که استفاده از هر کدام از این دو روش به نتایج یکسان منجر شده است. ستون آخر جدول ۱ نشان می‌دهد که درصد انحراف معیار نسبی غلظت‌ها هر نمونه کمتر از خطای سیستماتیک کل آزمایش (۹ درصد) است که نشان دهنده تکرارپذیری آزمایش است.

۴. نتیجه‌گیری:

غلظت فلئور در ۴ چهار نمونه کاغذی شامل کاغذ بسته‌بندی پیتزا، کاغذ ساندویچ، لیوان کاغذی و کاغذ شاهد و ۲ نمونه بافت پوشک نوزاد و پارچه شاهد با استفاده از روش PIGE و از طریق واکنش هسته‌ای $^{19}\text{F}(p,p\gamma)^{19}\text{F}(E_\gamma=197\text{ keV})$ با پروتون‌های 250 keV انجام شد. نتایج وجود قطعی فلئور و امکان آلودگی نمونه‌های مورد مطالعه با ترکیبات سمی و سرطان زا PFAS را نشان می‌دهند. مزیت مهم روش دنبال شده در این پژوهش این است که برخلاف کارهای Ritter و همکارانش که مقادیر فلئور کل با مقایسه با نمونه استاندارد بدست آمده، نتایج ما به روش مطلق و با عدم قطعیت بهتر اندازه‌گیری شدند. هدف این کار پژوهشی بررسی امکان اندازه‌گیری فلئور با روش PIGE در آزمایشگاه واندوگراف و توسعه روش برای یک اندازه‌گیری جامع و سیستماتیک با نمونه‌های بیشتر در جهت ارتقاء سلامت جامعه است.

مراجع

۱. J.S.C. Liou et al. *Investigating the biodegradability of perfluorooctanoic acid*, Chemosphere **80** 176 (2010).
۲. G. Yuan et al. *Ubiquitous occurrence of fluorotelomer alcohols in eco-friendly paper-made food-contact materials and their implication for human exposure*, Environ. Sci. Technol. 2016 **50** 2016 (2016).
۳. S.J. Frisbee et al. *The C8 health project: design, methods, and participants*, Environ. Health Perspect. **117** 1873 (2009).
۴. A.E. Robel et al. *Closing the mass balance of fluorine for per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) on papers and textiles*, Environ. Sci. Technol **51** 9022 (2017).
۵. E.E. Ritter et al. *PIGE as a screening tool for Per- and polyfluorinated substances in papers and textiles*. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B **407** 47 (2017).
۶. A. Jokar, et al. *Measurement of deuteron induced gamma-ray emission cross sections on nitrogen for analytical applications*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B **431** 25 (2018).
۷. Development of a Reference Database for Particle Induced Gamma Ray Emission (PIGE) Spectroscopy, International Atomic Energy Agency, IAEA/TECDOC-1822, Vienna (2017)
۸. A.P. Jesus et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **161-163** 186 (2000).
۹. R. MATEUS, R., A.P. JESUS and J.P. RIBEIRO, *A code for quantitative analysis of light elements in thick samples by PIGE*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **229** 302 (2005).