



Short Paper

مقاله کوتاه

## گسیل غیرمتعارف پرتو ایکس از پرتابه‌ی $H_2^+$ : یک تجربه‌ی آزمایشگاهی

وحید کیوان<sup>۱</sup>، امیدرضا کاکویی<sup>۲\*</sup>، فرح شکوهی<sup>۲</sup>

۱. دانشکده اپتیک و لیزر مجتمع آموزش عالی بناب، کدپستی: ۵۵۵۱۷۶۱۱۶۷، بناب-ایران

۲. پژوهشکده علوم هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران-ایران

**چکیده:** در اثر برهم‌کنش باریکه‌ی پرتانرژی با ماده، فرایند برانگیزش و یونش اتم‌ها و به دنبال آن فلورسانسی پرتو ایکس مشخصه ایجاد می‌شود. در برهم‌کنش باریکه‌ی مولکولی پرتانرژی با ماده، پدیده‌های منحصر به فرد اثر همسایگی و انفجار کولنی مشاهده شده است. در این مقاله، برای مطالعه‌ی برهم‌کنش باریکه‌ی مولکولی با ماده، بهره‌ی پرتو ایکس مشخصه‌ی برهم‌کنش ناشی از باریکه‌ی مولکولی  $H_2^+$  با باریکه‌ی اتمی  $H^+$  مقایسه شده است. باریکه‌های اتمی و مولکولی، به ترتیب،  $H^+$  و  $H_2^+$  با انرژی‌های ۱ تا  $1.4 \text{ MeV/u}$  با هدف‌های  $\text{Cu}$ ،  $\text{Mn}$  و  $\text{Al}$  با اعداد اتمی متفاوت مورد استفاده قرار گرفته است. در مورد هدف‌های  $\text{Cu}$  و  $\text{Mn}$  بهره‌ی پرتوهای ایکس مشخصه‌ی اندازه‌گیری شده برای باریکه‌های فرودی اتمی و مولکولی تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای را نشان نمی‌دهند. اما برای هدف  $\text{Al}$ ، در بهره‌ی پرتو ایکس مشخصه‌ی ناشی از باریکه‌های اتمی و مولکولی اختلاف معنی‌داری اندازه‌گیری شده است.

**کلید واژه‌ها:** فلورسانسی پرتو ایکس مشخصه، اثر همسایگی، انفجار کولنی، باریکه‌ی هیدروژن مولکولی

## Anomaly in $H_2^+$ Induced X-Ray Emission: An Experimental approach

V. Keyvan<sup>1</sup>, O.R. Kakuee<sup>2\*</sup>, F. Shokouhi<sup>2</sup>

1. Department of Optic and Laser, Bonab Higher Education Complex, Postcode: 5551761167, Bonab - Iran

2. Nuclear Science Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran

**Abstract:** Interaction of energetic ion beam with matter results in atomic excitation and ionization of matter which consequently leads to occurrence of the characteristic X-rays fluorescence. In the interaction of energetic molecular beam with matter, the unique phenomena of "Vicinage effect" and "Coulomb explosion" have already been observed and reported. In this research work, the interaction of molecular ion beam with targets of different atomic numbers was investigated. For this purpose, the yields of characteristic X-rays due to interaction of  $H_2^+$  molecular ion beam with the selected targets were compared with those due to interaction of  $H^+$  atomic beam with the same targets. To accomplish this, atomic and molecular beams in the energy range of 1 to 1.4 MeV/u were used to irradiate targets of different atomic numbers, including Cu, Mn and Al. For Mn and Cu. The measured yields of the characteristic X-rays due to the irradiation by the atomic and molecular beams were found to be approximately the same. However, for the Al target, a significant difference was observed for the X-ray characteristic yields due to the irradiation by the atomic and molecular beams.

**Keywords:** Characteristic X-Ray Fluorescence, Vicinage Effect, Coulomb Explosion,  $H_2^+$  Molecular Beam

\*email: okakuee@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۱۱/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۰/۵/۲۶



## ۱. مقدمه

وقتی ذره‌ی بارداری از ماده‌ای عبور می‌کند، در طول مسیر خود از طریق برهم‌کنش‌های متعدد با اتم‌های ماده‌ی هدف (انرژی از دست می‌دهد) سبب برانگیزش اتم‌ها به حالت‌های برانگیخته می‌شود [۱]. اطلاع از نحوه‌ی انباشت انرژی پرتابه در پژوهش‌های علم مواد همانند نفوذ ذرات در جامدات، برد ذره، کاشت اتم-آلاینده در جامدات، آسیب ناشی از تابش یا حفاظت در برابر پرتو اهمیت زیادی دارد [۲ و ۳].

پس از گزارش ابتدایی رادفورد در رابطه با برهم‌کنش ذره‌ی آلفا با ورق نازک طلا، مطالعات زیادی در این رابطه انجام شده است. در سال ۱۹۱۳ بوهر برای توصیف برهم‌کنش پرتابه با الکترون‌های ماده‌ی هدف یک مدل نظری کلاسیکی پیشنهاد کرد [۴]. سپس بته و بلوخ در سال ۱۹۳۳ از دیدگاه کوانتومی این مسئله را بررسی کرده و رابطه‌ی اساسی توان ایستاندگی برای ذره‌ی پرتابی در گاز الکترون را به دست آوردند [۴]. پس از آن در سال ۱۹۴۷ فرمی و تلمر این مسئله را مورد توجه قرار داده و فرمول‌بندی دی‌الکتربیک برای اختلال حاصل از پرتابه‌ی باردار در هدف را گزارش کردند [۴]. در نهایت در سال ۱۹۶۳ لیندهارت، شارف و شویت اولین نظریه‌ی وحدت یافته برای افت انرژی ذره‌ی باردار در ماده را ارائه نمودند. ولی همه‌ی این بررسی‌ها بر مبنای پاسخ خطی هدف به اختلال بار پرتابه است [۴]. در سال ۲۰۰۰ سگموند با در نظر گرفتن اثرات اضافی سعی نمود تا توان ایستاندگی پرتابه برای گستره‌ی وسیعی از انرژی ذره‌ی فرودی را تعیین کند [۴].

از طرف دیگر با توجه به یافته‌های جدید نشان داده شد که اختلافی بین افت انرژی اتم‌های همبسته‌ی یونی (باریکه‌ی مولکولی یونی) و همان اتم‌ها به صورت مستقل وجود دارد [۵ و ۶]. یکی از دلایل آن می‌تواند وجود اثر همسایگی<sup>(۱)</sup> باشد که برای اولین بار در سال ۱۹۷۴ توسط براندت در برهم‌کنش یون‌های پرتابه‌ی مولکولی با هدف معرفی و به صورت تجربی و نظری بررسی شده است [۷]. مطالعات انجام شده نشان داده است که برهم‌کنش بین پرتابه و هدف دو جسمی نبوده بلکه اتم‌های همسایه نیز در این برهم‌کنش‌ها تأثیر دارند [۸]. نکته‌ی دیگری که در رابطه با تفاوت برهم‌کنش ناشی از باریکه‌ی اتمی و باریکه‌ی مولکولی با ماده مطرح است آن است که در برهم‌کنش باریکه‌ی مولکولی با ماده، نیروی دفعه‌ی شبه‌کولنی میان اجزاء تشکیل‌دهنده مولکول، سبب فرایند شکست مولکول می‌شود. این پدیده را انفجار کولنی می‌نامند [۹]. طی چند سال گذشته در

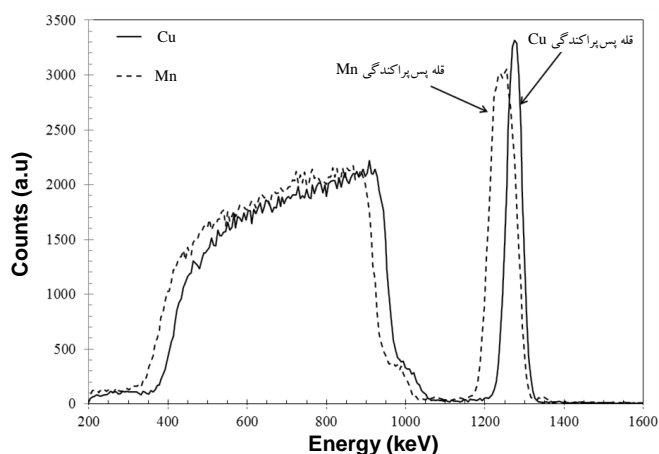
رابطه با پرتابه‌های مولکولی پرتابی مقاله‌های پژوهشی متعددی که عمدتاً حاصل مطالعات نظری بوده، توسط گروه‌های مختلفی منتشر شده است، و در حال حاضر نیز گروه‌های مختلفی در این رابطه فعال هستند [۱۰، ۱۱ و ۱۲].

از سوی دیگر هنگامی که هدف به وسیله‌ی پرتون‌ها یا یون‌های سنگین پرتابی بمباران می‌شود، الکترون‌ها از لایه‌های اتمی اتم‌های هدف کنده می‌شوند. چنانچه این الکترون‌ها از لایه‌های داخلی اتم هدف کنده شوند، پرشدن جای خالی الکترون کنده شده (حفره‌ی الکترونی) منجر به تولید پرتو X مشخصه‌ی اتم هدف می‌شود [۱۳]. این پدیده در آزمایشگاه‌های تجزیه در تکنیکی تحت عنوان «پیکسی» (گسیل پرتو ایکس ذره-القایی<sup>(۲)</sup>) برای تعیین نوع و مقدار عناصر به کار می‌رود [۱۳]. روش تجزیه با باریکه‌ی یونی پرتابی یک روش غیرمخرب، بس‌عنصری و برخوردار از حساسیت بالا است و از همه مهم‌تر این که برای تجزیه‌ی کمی نمونه به استاندارد خاصی نیاز ندارد. اما بهره‌ی تولید پرتو ایکس به دنبال برهم‌کنش پرتابه با اتم‌های ماده‌ی هدف از داده‌های ضروری و موردنیاز پیکسی است که تابعی از سطح مقطع مؤثر برهم‌کنش یون فرودی با لایه‌های الکترونی ماده‌ی هدف می‌باشد [۱۳].

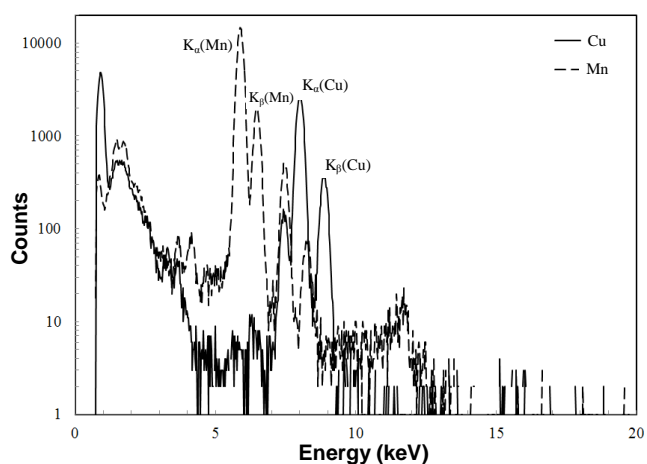
با توجه به این که برهم‌کنش باریکه‌ی مولکولی پرتابی با ماده، برهم‌کنش دو جسمی نبوده بلکه اتم‌های همسایه نیز در این برهم‌کنش تأثیر دارند، یک نگاه به این مسئله آن است که میزان این تأثیر در برهم‌کنش باریکه‌ی مولکولی با ماده به چه اندازه است؟ آیا در بهره‌ی تولید پرتو ایکس مشخصه‌ی ناشی از یک باریکه‌ی اتمی با یک باریکه‌ی مولکولی با انرژی یکسان تفاوتی مشاهده می‌شود؟ این مسئله‌ای است که در این مقاله، با به کارگیری باریکه اتمی و مولکولی هیدروژن و هدف‌های با عددهای اتمی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲. روش کار

در این پژوهش، از باریکه‌ی مولکولی  $H_2^+$  با فاصله‌ی بین اتمی حدود یک آنگستروم و باریکه‌ی اتمی  $H^+$  با انرژی‌های  $1\text{ MeV/u}$  تا  $1.4\text{ MeV/u}$  تولید شده در شتاب‌دهنده‌ی واندوگراف  $3\text{ MV}$  پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای استفاده شده است. هدف‌های نازکی به ضخامت  $7.5\text{ }\mu\text{m}$  از جنس  $Mn$ ،  $Al$  و  $Cu$  از طریق تبخیر در خلأ بر روی زیر لایه‌ای از جنس کپتون با فرمول شیمیایی  $C_{22}H_{11}N_2O_5$  تهیه شده است.



شکل ۱. طیف‌های پس پراکندگی پرتو ایکس مشخصه‌ی هدف‌های Mn و Cu برای انرژی فرودی ۱۴۰۰ keV.



شکل ۲. طیف‌های پرتوهای ایکس مشخصه‌ی Mn و Cu.

### ۳. نتایج و بحث

برای تعیین سطح مقطع نظری برهم کنش پرتوهای فرودی با الکترون‌های لایه‌ی K از جدول داده‌های نرم‌افزار Gupix استفاده شده است که مجموعه داده‌های ECPSSR-DHS<sup>(۳)</sup> را به کار می‌گیرد [۲۰].

در شکل ۳ نتایج اندازه‌گیری‌های بهره‌ی تولید پرتو ایکس مشخصه‌ی هدف‌های Al، Mn و Cu با اعداد اتمی، به ترتیب، برابر با ۱۳، ۲۵ و ۲۹ برای باریکه اتمی و مولکولی هیدروژن نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳-ا) مشاهده می‌شود، مقادیر نظری و تجربی بهره‌ی تولید خط طیفی  $K_{\alpha}$  مس برای باریکه‌های اتمی و مولکولی هم‌خوانی کامل دارند. برای خط طیفی  $K_{\alpha}$  منگنز (Mn) تا انرژی  $1/4 \text{ MeV/u}$  وضعیت مشابهی مشاهده می‌شود. اما مطابق شکل (۳-ب) در مورد Al اگرچه

برای انجام آزمایش‌ها از ابزارهای متداول پیکسی استفاده شده است [۱۴]. در محفظه‌ی برهم کنش برای اندازه‌گیری میزان پرتو ایکس تولید شده از آشکارساز Si(Li) که با محور باریکه زاویه‌ی ۱۳۵ درجه تشکیل می‌داد، و برای اندازه‌گیری پرتوهای پس‌پراکنده شده، از آشکارساز سد سطحی تحت زاویه‌ی ۱۶۵ درجه نسبت به محور باریکه استفاده شده است.

بهره‌ی تولید پرتو ایکس در هدف نازک به ضخامت

$N_T(\text{atoms cm}^{-2})$  از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۱۳]

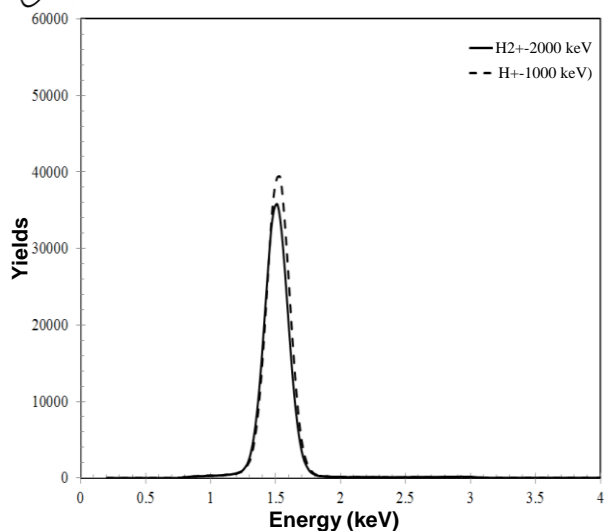
$$N_x = N_T Q \sigma_x(E) \times 10^{-24} / e \quad (۱)$$

که در آن  $\sigma_x$  سطح مقطع برهم کنش برای تولید پرتو ایکس، Q بار کل باریکه بر حسب کولن و e بار الکترون است. برای این که امکان مقایسه‌ی بهره‌ی تولید پرتو ایکس در گستره‌ی انرژی موردنظر برای هر عنصر ممکن باشد با توجه به رابطه‌ی (۱)، تجزیه‌های مختلف باید نسبت به  $N_T$  و Q بهنجار شوند. با توجه به حساسیت طیف پس پراکندگی رادرفورد به حاصل ضرب  $QN_T$  و عدم دقت کافی در اندازه‌گیری مستقیم بار الکتریکی برای تعیین تعداد یون‌های برخوردکننده به هدف، اندازه‌گیری‌های انجام شده برای هر عنصر نسبت به سطح زیر قله‌ی طیف پس پراکندگی رادرفورد نظیر، بهنجار شده است [۱۵]. در شکل ۱ طیف‌های پس پراکندگی نمونه‌های Mn و Cu برای انرژی فرودی ۱۴۰۰ keV به عنوان نمونه نشان داده شده است. برای بررسی این موضوع که آیا ساختار اتمی یا مولکولی باریکه تأثیری بر بهره‌ی تولید پرتو ایکس مشخصه‌ی عناصر هدف دارد، آزمایش‌هایی با انرژی فرودی ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ keV و با گام ۱۰۰ keV برای باریکه‌های اتمی و با انرژی‌های فرودی ۲۰۰۰ تا ۲۸۰۰ keV با گام ۱۰۰ keV برای باریکه‌های مولکولی انجام شده است.

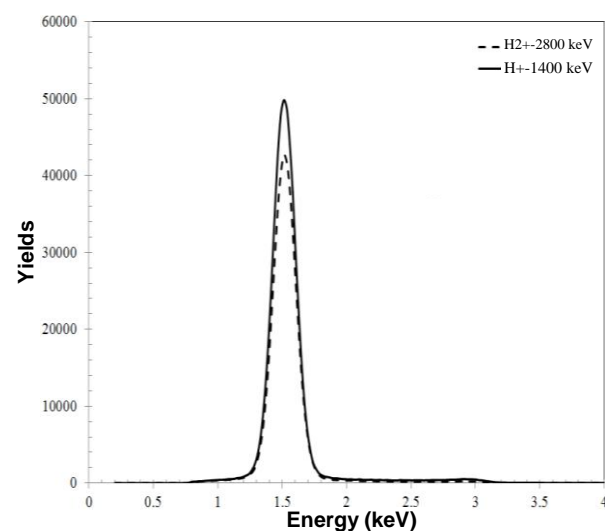
نمونه‌ای از طیف‌های پرتوهای ایکس مشخصه‌ی Mn و Cu

در شکل ۲ نشان داده شده است.

سطح زیر قله‌ی خط طیفی  $K_{\alpha}$  هر یک از عناصر در بازه انرژی موردنظر توسط نرم‌افزار WINQXAS [۱۶] تعیین شده است. به این ترتیب بهره‌ی تولید پرتو ایکس باریکه‌ی پراانرژی اتمی  $H^+$  و  $H_2^+$  برای انرژی‌های ۱ تا  $1/4 \text{ MeV/u}$  تعیین و با مقادیر داده شده در منابع مقایسه شده است [۱۷، ۱۸، ۱۹].



(a)



(b)

**شکل ۴:** نتایج اندازه‌گیری‌های بهره‌ی تولید پرتو ایکس مشخصه‌ی Al برای باریکه‌های اتمی و مولکولی هیدروژن با انرژی‌های انرژی (a)  $1\text{ MeV/u}$  و (b)  $1.4\text{ MeV/u}$ .

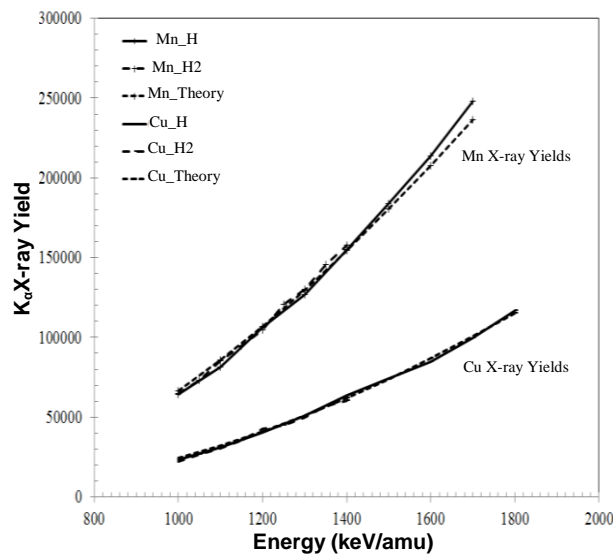
تفاوت در بهره‌ی تولید پرتو ایکس مشخصه‌ی آلومینیم القا شده با باریکه‌های یونی اتمی و مولکولی کاملاً محسوس است. این تفاوت با افزایش انرژی باریکه محسوس‌تر می‌شود. لازم به ذکر است که در داده‌های تجربی، حاصل ضرب تعداد ذرات فرودی در تعداد اتم‌های هدف به عنوان عامل بهنجارسازی در نظر گرفته شده است.

عدم قطعیت کلی در اندازه‌گیری بهره‌ی فلورسانسی در این آزمایش‌ها ۵٪ بوده و ناشی از منابع زیر است:

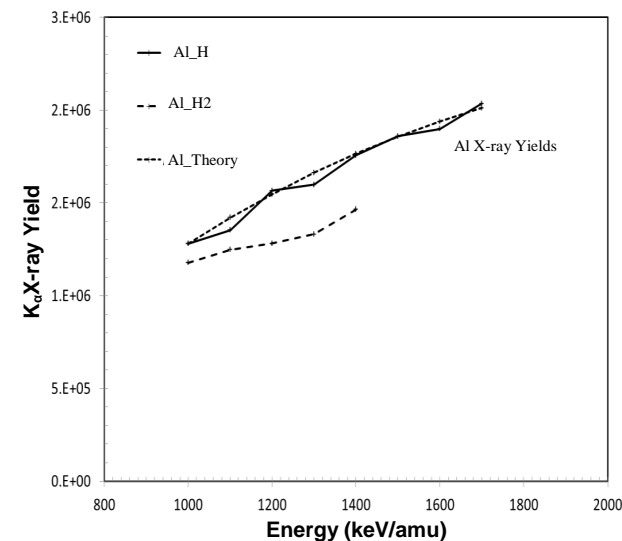
- عدم قطعیت در شمارش پرتو ایکس و برازش طیف آن (۴٪)،
- عدم قطعیت ناشی از شمارش ذرات پس‌پراکنده و برازش طیف RBS (۳٪)،

مقادیر نظری و اندازه‌گیری شده‌ی بهره‌ی تولید خط طیفی  $K_{\alpha}$  برای باریکه‌ی اتمی هم‌خوانی دارند، در عین حال اختلاف قابل ملاحظه‌ای در بهره‌ی خط طیفی  $K_{\alpha}$  وابسته به باریکه‌ی اتمی و مولکولی مشاهده می‌شود.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های بهره‌ی تولید پرتو ایکس مشخصه‌ی Al برای باریکه‌های اتمی و مولکولی با انرژی‌های ۱ و  $1.4\text{ MeV/u}$  در شکل ۴ نشان داده شده است.



(a)



(b)

**شکل ۳:** نتایج نظری و اندازه‌گیری شده‌ی بهره‌ی تولید پرتو ایکس مشخصه‌ی هدف‌های (a) Mn و Cu و (b) Al با باریکه‌های اتمی و مولکولی هیدروژن.



### پی‌نوشت‌ها:

۱. Vicinage Effect
۲. PIXE: Particle Induced X-Ray Emission
۳. ECPSSR-DHS: Energy-Loss Coulomb Deflection  
Perturbed-Stationary-State Relativistic Dirac-Hartree-Slater

### References:

1. J.F. Ziegler, "Handbook of stopping cross-sections for energetic ions in all elements," Pergamon Press (1980).
2. J.F. Ziegler, "Ion implantation technology," Ion Implantation Technology Co (1996).
3. J. Turner, "Atoms, radiation and radiation protection," 1995 2 Edition (Wiley, New York).
4. P. Sigmund, "Stopping of heavy ions, a theoretical approach," Springer (2004).
5. R. Garcia-Molin, C.D. Denton, F.J. Perez-Perez, I. Abril, N.R. Arista, "Electronic stopping power of amorphous carbon for  $H_2^+$  and  $H_3^+$  beams," Phys. Stat. Sol. 219, 23 (2000).
6. F. Javier Perez-Perez, Isabel Abril, Rafael Garcia-Molina, N.R. Arista, "Collective effects in the energy loss of large hydrogen clusters," Physical Review A, 54, 4145-4152 (1996).
7. W. Brandt, R.H. Ritchie, "Penetration of swift ion clusters through solids," Nuclear Instruments and Methods 132, 43 (1976).
8. M.D. Barriga-Carrasco and R. Garcia-Molina, "Vicinage forces between molecular and atomic fragments dissociated from small hydrogen clusters and their effects on energy distributions," Physical Review A 68, 62902 (2003).
9. C.D. Denton, "Effect of the neutral charge fraction in the Coulomb explosion of  $H_2^+$  ions through aluminum foils," Nucl. Instrum and Meth B 193, 198-203 (2002).
10. A.V. Phelps, "Energetic ion, atom, and molecule reactions and excitation in low-current  $H_2$  discharges: Model," Phys. Rev. E 79, 066401 (2009).
11. E.A. Figueroa, N.R. Arista, J.C. Eckardt, G.H. Lantschner, "Determination of the difference between the mean and the most probable energy loss of low-energy proton beams traversing thin solid," Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 256, 126-130 (2007).

با توجه به این که برای همه‌ی هدف‌ها خط طیفی  $K_{\alpha}$  مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار گرفته است، لذا از عدم قطعیت مربوط به بازدهی و هندسه‌ی آشکارساز صرف‌نظر شده است. در حال حاضر برای توجیه نتایج اندازه‌گیری استدلال مشخصی وجود ندارد، اما پدیده‌های مرتبط با برهم‌کنش باریکه‌های مولکولی با ماده توسط گروه‌های مختلفی در حال بررسی است. آنچه در حال حاضر مشخص است این است که کاهش بهره‌ی تولید پرتو ایکس می‌تواند به سبب احتمال افزایش فرایندهای رقیب فلئوئورسانی هم‌چون کاستر-کرونینگ و تولید الکترون اوژه باشد. از طرف دیگر نشان داده شده است که برهم‌کنش باریکه‌ی مولکولی سبب ایجاد پدیده‌ای شبیه به اثر همسایگی می‌شود که در آن برهم‌کنش بین پرتابه و هدف، دو جسمی نبوده بلکه اتم‌های همسایه نیز در این برهم‌کنش سهم دارند. در این صورت این مسئله می‌تواند سبب کاهش احتمال یونش و در نتیجه سبب کاهش بهره‌ی تولید پرتو ایکس مشخصه شود. برای توصیف کامل پدیده کاهش بهره‌ی تولید پرتو ایکس القایی باریکه‌های مولکولی، پژوهش تکمیلی در حال انجام است.

### ۴. نتیجه‌گیری

در برهم‌کنش باریکه‌های مولکولی چون  $H_2^+$  با ماده پدیده‌های منحصر به فرد اثر همسایگی و انفجار کولنی مشاهده شده است [۱۳]. از آن‌جا که در اثر برهم‌کنش باریکه‌ی پرتابی با ماده، پدیده‌ی برانگیزش و یونش اتم‌ها و به دنبال آن فلئوئورسانی پرتو ایکس مشخصه اتفاق می‌افتد، در این پژوهش سعی شد از این امر برای مطالعه‌ی برهم‌کنش باریکه‌ی مولکولی  $H_2^+$  با ماده استفاده شود. برای این منظور، بهره‌ی تولید پرتوهای ایکس مشخصه‌ی القا شده به وسیله‌ی باریکه‌ی مولکولی  $H_2^+$  و باریکه‌ی اتمی  $H^+$  با انرژی‌های ۱ تا  $1/4 MeV/u$  در هدف‌های Al، Mn و Cu اندازه‌گیری و گزارش شده است. تحلیل نظری اختلاف قابل ملاحظه‌ای که در بهره‌ی تولید پرتوهای ایکس مشخصه‌ی آلومینیم القا شده به وسیله‌ی باریکه‌های اتمی و مولکولی هیدروژن مشاهده شد مستلزم کار پژوهشی بیش‌تر است.

### تشکر و قدردانی

از همکاری صمیمانه‌ی استاد گرامی جناب آقای دکتر محمد لامعی رشتی به خاطر فراهم آوردن امکان استفاده از تجهیزات آزمایشگاه و اندوگراف برای انجام این کار پژوهشی بسیار سپاسگزاریم.



- 12.S. Heredia-Avalos, R. Garcia-Molina, "Projectile polarization effects in the energy loss of swift ions in solids," Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B193, 15-19 (2002).
- 13.J.R. Bird, "Ion beam for materials analysis," Academic Press (1989).
- 14.M. Hajivaliei, et al., "Application of PIXE to study ancient Iranian silver coins," Nucl. Instr. and Meth. in Phys Res 266, 1578-1582 (2008).
- 15.M. Goudarzi, F. Shokouhi, M. Lamehi-Rachti, P. Oliayi, L-subshell, total M-shell X-ray production cross sections of Ta, W, Pt, Au, Pb and Bi by 0.7–2.4 MeV protons," Nucl. Instr. and Meth. in Phys Res B 247, 217-222 (2006).
- 16.<http://www.iaea.or.at/programmes/ripc/physics/faznic/winxas.htm>.
- 17.S.J. Cipolla, "The united atom approximation option in the ISICS program to calculate K-, L- and M-shell cross sections from PWBA and ECPSSR theory," Nucl. Inst. and Meth.in Phys. Res. B261, 142-144 (2007).
- 18.I. Han, M. Sahin. L. Demir, Y. Sahin, "Measurement of K X-ray fluorescence cross-sections, fluorescence yields and intensity ratios for some elements in the atomic range  $22 \leq Z \leq 68$ ", Applied Radiation and Isotopes 65, 669-675 (2007).
- 19.S. SEVEN, "Measurement of Photon-Induced K X-Rays Production Cross Section for Elements with  $62 \leq Z \leq 74$ ," Turk. J. Phys. 26, 483–489 (2002).
- 20."The GUPIXWIN Manual and User-guide," Version 2.1 (2007).