٨٧/١/٠٦٥٥٨
٨٧/١٢/٢١

١١٠٤٥١

۸۷/۱/۱۰۹۵۸۸
۸۷/۱۲/۲۱

دانشگاه ارومیه

بررسی پدیده رادیولیز آب (Water Radiolysis) با استفاده از تابش پرتو گاما و تاثیر آن بر سیستم خنک کننده رآکتور های آبی

عفت اردش

دانشکده علوم

گروه فیزیک

۱۳۸۷

شماره پایان نامه ۸٤٥ – ۲

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

اساتید راهنما :

پروفسور رسول خدابخش

پروفسور بهروز صالحپور

۱۳۸۷ /۱۲/۲۱

(حق طبع و نشر مطالب این پایان نامه برای دانشگاه ارومیه محفوظ است)

بهار ۸۷

۱۱۰۱۵۱

فرم شماره ۵

بسمه تعالی

شماره ۲-۸۴۵

تاریخ ۸۷/۳/۱۳

فرم ارزیابی دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

مدیر محترم گروه

باسلام بدینوسیله به اطلاع می رساند جلسه امتحان نهائی شامل دفاع از پایان نامه خانم آکائی

دانشجوی کارشناسی ارشد رشته به شماره دانشجوئی ۸۴۱۶۲۰۰ تحت عنوان :

با حضور اعضاء کمیته پایان نامه در ساعت ۱۲ مورخه ۸۷/۳/۱۳ در محل تشکیل و بر اساس محتوی و چگونگی ارائه پایان نامه و با احتساب مقالات مستخرجه از آن تحت عناوین :

عناوین مقالات	محل ارائه
۱-	
۲-	

با نمره ۱۸ و با درجه : عالی

☒ عالی (۲۰-۱۸) ☐ بسیار خوب (۱۸-۱۶) ☐ خوب (۱۶-۱۴)

☐ قابل قبول (۱۴-۱۲) ☐ غیر قابل قبول (کمتر از ۱۲)

مورد تصویب اعضاء کمیته قرار گرفت . خواهشمند است دستور فرمایند مراتب جهت اطلاع و اقدام به مدیرکل تحصیلات تکمیلی دانشگاه اعلام گردد .

محل امضاء اعضاء کمیته پایان نامه

۱- دکتر ... استاد راهنما و رئیس هیئت داوران

۲- دکتر ... داور خارجی

۳- دکتر ... داور داخلی

۴- دکتر ... نماینده تحصیلات تکمیلی

نام و امضاء استاد راهنمای پایان نامه

تاریخ ۸۷/۵/۱

تقدیم به...

همسر عزیزم ، مهندس سهراب نصیری که همواره یاور و پشتیبانم بود.

تقدیر و تشکر :

از اساتید محترم آقایان پروفسور رسول خدابخش و پروفسور بهروز صالحپور که مرا در تهیه این پایان نامه یاری نمودند و همچنین از تمامی کارکنان سازمان انرژی اتمی ایران ، واحد تابش گاما و آزمایشگاه جابر که در انجام آزمایشهای عملی نهایت همکاری را با اینجانب داشتند تقدیر و تشکر می کنم .

عفت اردش

فهرست

فصل اول

۱-۱- مقدمه ۱

فصل دوم

۲-۱- تأثیرات کلی تابش یون ساز در ماده ٦

۲-۱-۱- آثار اولیه ۷

الف) اندرکنش ذرات باردار با ماده ۷

ب) اندرکنش فوتون با ماده ۸

۲-۱-۲- آثار ثانویه ۱۲

۲-۲- رادیولیز آب ۱۳

۲-۲-۱- مرحله فیزیکی ۱۳

۲-۲-۲- مرحله فیزیکی – شیمیایی ۱٤

۲-۲-۳- مرحله شیمیایی ۱۵

۲-۳-پدیده رادیولیز در سیستم خنک کننده رآکتورهای آبی ۱۷

۲-۳-۱- وجود اکسیژن در سیستم خنک کننده ۲۰

۲-۳-۱- وجود هوا در سیستم خنک کننده ۲۱

۲-۳-۳- وجود اسید بوریک در سیستم خنک کننده ۲۲

۲-۳-٤- وجود آهن در سیستم خنک کننده ۲۳

۲-٤- آزمایش های انجام شده جهت افزایش مقدار هیدروژن تولید شده از طریق رادیولیز ۲٤

فصل سوم

۳-۱-۱- تهیه نمونه ها ۲۷

۳-۱-۲- تحت تابش گاما قرار دادن نمونه ها ۲۸

۳-۱-۳- تحلیل نمونه های تابش دیده با استفاده از دستگاه GC..... ۳۰

۳-۱-٤- انجام آزمایش رادیولیز آب مقطر ۳۵

۳-۱-۵- بررسی نمونه های تابش دیده با استفاده از دستگاه تداخل سنج فرا صوتی ۳٦

فصل چهارم

٤-۱- نتایج به دست آمده از دستگاه GC..... ۳۷

٤-۲- نتایج به دست آمده از دستگاه تداخل سنج فرا صوتی..... ٤٤

٤-۳- نتیجه گیری ٤۵

٤-٤- پیشنهادات ٤۷

ضمیمه ٤۸

مراجع ۵۰

فهرست اشکال ، جداول و نمودارها :

شکل ۲-۱. اثر فوتوالکتریک ۸

شکل ۲-۲. اثر کامپتون ۹

شکل ۲-۳.تولید و نابودی زوج ۱۰

شکل ۲-٤. مسیر یک الکترون سریع در محیط مادی ۱۱

جدول ۲-۱. مقدار G برای محصولات اولیه رادیولیز آب ۱۷

شکل ۲-۵. لایه های آب که توسط لایه های فلزی ساندویچ شده اند ۲۵

شکل ۲-٦. بازده هیدروژن تولید شده بر حسب دوز پیش تابش نانوذرات ۲٦

شکل ۳-۱ . ظرف پلاستیکی که در برابر تابش گاما مقاوم نبود ۲۷

شکل ۳-۲. ظروف شیشه ای جهت پرتودهی آب . الف) قبل از پرتودهی . ب) بعد از پرتودهی ۲۸

شکل ۳-۳. دستگاه گاما سل ۲۲۰ ..... ۲۹

شکل ۳-٤. نمای شماتیک از دستگاه گاز کروماتوگرافی ۳۰

شکل ۳-۵ . الف) سرنگ ۱۰۰μL مخصوص GC جهت تزریق . ب) قسمت تزریق دستگاه GC ۳۱

شکل ۳-٦ . الف) ستون مویرگی. ب) ستون بسته ای ۳۳

شکل ۳-۷ . کوره دستگاه GC و ستون بسته ای در داخل آن ۳۳

شکل ۳-۸ دستگاه GC، Buck Scientific Model 910 ..... ۳۵

شکل ۳-۹. دستگاه تداخل سنج فرا صوتی ۳٦

نمودار ٤-۱. آنالیز نمونه تابش دیده با دوزتابشی ۲۰KGy توسط دستگاه GC ۳۸

نمودار ٤-۲. آنالیز نمونه تابش دیده با دوزتابشی ۳۰KGy توسط دستگاه GC ۳۹

نمودار ٤-٣. آنالیز نمونه تابش دیده با دوزتابشی ٨٥KGy توسط دستگاه GC ٤٠

نمودار ٤-٤. نمودار مرجع دستگاه GC ٤١

جدول ٤-١. نتایج به دست آمده از رادیولیز آب ٤٢

نمودار٤-٥. نمودار مقدار هیدروژن تولید شده از رادیولیز آب بر حسب دوز تابش گاما..... ٤٢

نمودار٤-٦. نمودار مقدار اکسیژن تولید شده از رادیولیز آب بر حسب دوز تابش گاما..... ٤٣

جدول ٤-٢. تغییرات سرعت فرا صوت در آب مقطر تابش دیده بر حسب دوز تابشی ٤٤

نمودار ٤-٧. نمودار تغییرات سرعت فرا صوت با فرکانس MHz ٣ در آب مقطر بر حسب دوز تابشی..... ٤٤

چکیده :

به دلیل اهمیت هیدروژن به عنوان منبع انرژی پاک ، مطالعات زیادی به تولید آن از الکترولیز ، ترمولیز و غیره تحت شرایط اقتصادی سودآور اختصاص یافته است . با پیدایش و توسعه انرژی هسته ای ، مطالعات زیادی در زمینه تولید هیدروژن از طریق رادیولیز آب تحت تأثیر اشعه γ ، ذرات یونیزه منتشره از هسته های رادیواکتیوی مختلف و یا نوترون ها آغاز شد . رادیولیز آب مایع در موقعیت های مختلفی که یونیزاسیون وجود دارد نقش مرکزی ایفا می کند ، به عنوان مثال : در رآکتورهای هسته ای که آب به عنوان خنک کننده استفاده می شود و در محل جمع آوری پسماندهای هسته ای . مقدار بالای تشعشع در رادیولیز آب رادیکال ها را تولید می کند که در قسمت های مجاور آب منجر به افزایش اثر خوردگی می شوند . کارهای اولیه در مورد رادیولیز آب نشان می دهند که هیدروژن و پروکسید هیدروژن محصولات تجزیه می باشند . با افزایش زمان پرتودهی اکسیژن نیز به عنوان محصول ثانویه از تجزیه پروکسید هیدروژن تشکیل می شود .

در کار تجربی که انجام گرفته شده است ، چند نمونه آب مقطر تحت تابش گاما با سه دوز متفاوت KGy ۲۰، ۳۰ و ۸۵ قرار می گیرند و سپس با استفاده از دستگاه گاز کروماتوگرافی مقدار کمی هیدروژن و اکسیژن تولید شده در آب به دست می آید . ملاحظه می شود که مقدار هیدروژن و اکسیژن تولید شده در آب با افزایش دوز تابشی افزایش می یابد .

کلمات کلیدی : پدیده فوتوالکتریک ، پدیده کامپتون ، تولید جفت یون ، رادیولیز آب ، رادیکال ، الکترون هیدرات ، بازده محصولات تجزیه G ، انتقال خطی انرژی LET ، دستگاه گاماسل ۲۲۰ ، دستگاه گازکروماتوگرافی GC .

فصل اول

۱-۱- مقدمه:

با شروع قرن بیست و یکم ، زندگی انسان ها توسط دو موضوع تهدید می شود : اول ، بی نظمی اقتصادی و انگیزه جنگ به علت کمبود منابع انرژی و توزیع نامناسب سوخت فسیلی به خصوص نفت و دوم ، تغییرات آب و هوا و راه اندازی سیستم های انرژی پخش کننده دی اکسید کربن می باشد. دی اکسید کربن حاصل از مصرف سوخت فسیلی، همچنین متان و دیگر گازها در اتمسفر به صورت گلخانه ای عمل می کنند . این گازها باعث می شوند که تابش خورشیدی سطح زمین را گرم کند و از برگشت برخی تابش های مضر به فضا جلوگیری می کنند . برای حذف انتشار دی اکسید کربن ما به منابع انرژی بدون کربن نیاز داریم . منابع نیروی محرکه آب ، نور خورشید ، باد ، شکافت و همجوشی هسته ای از آن جمله می باشند . دو منبع غیر کربنی که با هم می توانند تمام انرژی مورد نیاز بشریت را تأمین کنند ، الکتریسیته و هیدروژن می باشند .

هیدروژن با عدد جرمی ۱/۰۰۷۹۷ سبک ترین ماده شناخته شده است . ۱۲ تا ۱۵ بیلیون سال پیش ، از چرخش گاز هیدروژن که تحت نیروی گرانشی متراکم شده اند ، ستاره ها و کهکشان ها به وجود آمدند . هیدروژن در اتمسفر زمین به شکل ترکیبی یافت می شود چنان چه ۱۱/۱۹ درصد آب ، جزء اصلی اسیدها ، هیدروکربن ها و بدن حیوانات و گیاهان ، هیدروژن می باشد . [۱]

انرژی زغال سنگ ، اورانیوم ، انرژی خورشیدی ، انرژی باد و انرژی آب پشت سدهای مولد برق به صورت انرژی الکتریکی از نیروگاه به مصرف کننده انتقال می یابد . بنابراین استفاده از الکتریسیته از خود منابع انرژی آسان تر است . هیدروژن نیز مانند الکتریسیته حامل انرژی می باشد با این تفاوت که :

- الکتریسیته می تواند در انتقال داده ها و ذخیره اطلاعات به کار رود ولی هیدروژن نمی تواند .
- هیدروژن می تواند در مقادیر بزرگ ذخیره شود ولی الکتریسیته نمی تواند .

- در روی زمین ، هیدروژن برای انتقال انرژی در فواصل زیاد بهترین است . در حالیکه در فضا ، تابش الکترومغناطیس به عنوان صورتی از الکتریسیته ، اهمیت دارد . [۲]

البته نکات مشترکی نیز بین الکتریسیته و هیدروژن وجود دارد .

- هر دوی آن ها از منابع انرژی متنوع تولید می شوند . همه ما منابع انرژی مختلفی که الکتریسیته را تولید می کنند می شناسیم مانند انرژی آب ، باد ، انرژی خورشیدی و غیره . هیدروژن نیز به صورت گاز یا مایع توسط چندین روش تولید می شود .

- روش آزمایشگاهی : الکترولیز آب یک روش ساده برای تولید هیدروژن است ، یک جریان با ولتاژ کم از درون آب عبور داده می شود و گاز اکسیژن در آند و گاز هیدروژن در کاتد جمع می شود . بازده این کار در حدود ٪ ۹٤ – ۸۰ می باشد .

$$2H_2O(aq) \xrightarrow{\text{الکترولیز}} 2H_2(g) + O_2(g) \qquad (1\text{-}1)$$

بلونا[1] در سال ۲۰۰۷ کشف کرد که اگر آلیاژ آلومینیم و گالیم به شکل قرص به آب اضافه شود می تواند هیدروژن تولید کند . در این فرایند گالیم از تشکیل لایه اکسید بر روی قرص جلوگیری می کند . [۲]

- روش صنعتی : در صنعت بیشترین مقدار هیدروژن از طریق واکنش بخار آب اصلاح شده با گاز طبیعی به دست می آید . در دماهای بالا (^{o}C ۱۱۰۰ – ۷۰۰) طی یک واکنش گرماگیر، بخار آب با متان واکنش می دهد و نتیجه مونوکسید کربن و هیدروژن است .

$$CH_4 + H_2O \longrightarrow CO + 3H_2 \qquad (2\text{-}1)$$

1. Bellona

روش مهم دیگر برای تولید هیدروژن ، اکسیداسیون جزئی می باشد . در این روش طی یک واکنش گرمازا ، هیدروکربن ها (مانند گاز طبیعی ، بنزین سنگین ، نفت خام یا زغال سنگ) با اکسیژن واکنش می دهند و در نتیجه هیدروژن و مونوکسید کربن تولید می شود . [۳]

$$CH_4 + 1/2\ O_2 \longrightarrow CO + 2H_2 \qquad (3\text{-}1)$$

- هر دوی انرژی الکتریکی و هیدروژن می توانند از هم دیگر تولید شوند . به عنوان مثال در الکترولیز آب ، الکتریسیته به هیدروژن تبدیل می شود و در سلول های سوخت هیدروژنی[۲]، هیدروژن به الکتریسیته تبدیل می شود .
- هر دو انرژی مزبور تجدید شدنی هستند . الکتریسیته با جداسازی بارهای الکتریکی از اتم ها تولید می شود و بعد از اینکه الکتریسیته مصرف شد ، با ادغام یون ها و بارهای آزاد ، اتم های خنثی به وجود می آید . به طور مشابه ، از تجزیه آب به مؤلفه هایش ، هیدروژن و اکسیژن تولید می شود و هنگام مصرف ، هیدروژن می تواند با اکسیژن ترکیب شده و دوباره آب به وجود آید .

امروزه حدود ۷/۸ تن هیدروژن در ایالات متحده امریکا تولید می شود که برای مصرف ۳۰-۲۰ میلیون ماشین و ۸-۵ میلیون خانه کافی است . بیشترین مقدار هیدروژن ، در پتروشیمی و صنایع شیمیایی مورد نیاز است . مهم ترین کاربرد هیدروژن ، فرایند بهبود سوخت های فسیلی و تولید آمونیاک می باشد . هیدروژن در صنایع به عنوان ماده خام شیمیایی در تولید کود ، ساختن رنگ ، دارو و پلاستیک استفاده می شود . همچنین به صورت عامل هیدروژنیزاسیون ، به ویژه افزایش سطح اشباع روغن ها و چربی های اشباع نشده ، در تولید متانول و اسید هیدروکلریک و به عنوان عامل احیاکننده سنگ های معدنی فلزی به کار می رود . هیدروژن کاربرد گسترده ای در فیزیک و مهندسی دارد ، به عنوان گاز استحفاظی در روش های جوشکاری مانند جوشکاری هیدروژن اتمی و همچنین به عنوان خنک کننده چرخان در مولدهای الکتریکی در ایستگاه های نیرو به خاطر هدایت گرمایی بالا آن استفاده می شود . هیدروژن مایع در

---

2. Hydrogen Fuel Cell.

بررسی های برودتی و مطالعات ابررسانایی به کار می رود . اداره کل هوا و فضانوردی بین المللی[3] (NASA) استفاده کننده اصلی هیدروژن به عنوان منبع سوخت می باشد . هیدروژن مایع با ترکیب اکسیژن مایع ، سوخت بسیار قوی برای موشک فضایی ودیگر راکتها می باشد . چون هیدروژن از هوا سبک تر است ، $\frac{1}{15}$ چگالی هوا ، به طور گسترده برای بلند کردن بالن ها استفاده می شود . همچنین در بعضی مکان ها مانند بیمارستان ها و بیابان هایی که امکان سیم کشی برق نیست ، به عنوان مولد نیروی برق اضطراری کاربرد دارد . در اتومبیل ها و اتوبوس های جدید از باتری هیدروژنی برای تأمین الکتریسیته موتور استفاده می شود .

ایزوتوپ های کم یاب هیدروژن نیز هر کدام کاربرد خاصی دارند . هیدروژن و دوتریم D ، در رآکتورهای شکافت هسته ای به عنوان کند کننده نوترون و همچنین در هم جوشی هسته ای به عنوان سوخت به کار می روند . ترکیبات دوتریم در شیمی و زیست شناسی در مطالعه تأثیرات ایزوتوپ کاربرد دارد . تریتیم T ، که در رآکتورهای هسته ای تولید می شود ، در تولید بمب هیدروژنی و به عنوان منبع تشعشع در رنگ های درخشان استفاده می شود . [٤]

در حال حاضر ۸۰ در صد انرژی جهان از زغال سنگ ، مواد نفتی و گاز طبیعی تأمین می شود و هیدروکربن ها اصلی ترین منبع برای تولید صنعتی هیدروژن می باشد . منبع دیگر برای تولید هیدروژن آب می باشد . آب یک منبع در دسترس ، فراوان و نامحدود برای تولید هیدروژن است . ولی با توجه به این که انرژی لازم برای تولید هیدروژن با استفاده از هیدروکربن ها بسیار کمتر از روش الکترولیز آب است ، بنابراین سهم عمده هیدروژن برای استفاده در صنعت از گاز طبیعی ، نفت یا زغال سنگ تولید می شود و در صد خیلی کمی توسط الکترولیز آب تهیه می شود . با استفاده از منابع و روش های دیگری نیز می توان به هیدروژن دست یافت . یکی از این روش ها استفاده از انرژی خورشیدی می باشد که در حال توسعه است .

---

3. National Aeronautics and Space Administration (NASA).

روش که ما جهت تولید هیدروژن بررسی می کنیم ، رادیولیز[4] آب می باشد . این روش نوعی الکترولیز آب به حساب می آید با این تفاوت که در آن به جای استفاده از الکتریسیته برای تجزیه آب ، از تشعشعاتی نظیر اشعه γ ، ذرات α و یا نوترون استفاده می شود . این تشعشعات در رآکتورهای هسته ای و پسماندهای هسته ای همواره وجود دارند و اگر استفاده بهینه ای از آنها نشود ، می توان گفت که به هدر می روند . از تأثیر این تشعشعات بر روی آب موجود در رآکتورهای آبی که به عنوان خنک کننده و کند کننده از آن استفاده می شود یا استخرهای آب که جهت نگهداری پسماندهای هسته ای ساخته می شوند و یا دستگاه های پرتودهی تحقیقاتی می توان اسفاده کرد و بدون مصرف کردن دیگر منابع انرژی ، به هیدروژن به عنوان یک منبع انرژی پاک دست یافت .

از سال ۱۹۸۷ افراد زیادی به طور تجربی و تئوری نتایج جالبی در مورد رادیولیز به دست آوردند . [۵] رانگ[5] و دیگران مشاهده کردند که در تجزیه آب توسط تابش رادیوم ، مخلوطی از گازهای هیدروژن و اکسیژن بدست می آید .

برای بررسی بیشتر پدیده رادیولیز آب ، در ابتدا نگاهی به تأثیرات کلی تشعشعات بر روی مواد به ویژه آب خواهیم داشت و سپس به بررسی تأثیرات رادیولیز بر آب خنک کننده رآکتورهای آبی خواهیم پرداخت .

---

4. Radiolysis.
5. Runge.

فصل دوم

۲-۱- تأثیرات کلی تابش یون ساز در ماده :

آثار یونشی حاصل از یک ذره باردار متحرک را که جرم آن در مقایسه با الکترون بزرگ است در نظر می گیریم . احتمال اینکه چنین ذره ای با یک هسته در داخل ماده رویارویی نزدیک یا برخورد کند ، بسیار کم است . همان طوری که در آزمایش پراکندگی رادرفورد ، مبنی بر پراکندگی ذرات α هنگام عبور از داخل ورق طلا نشان داده شد ، اکثر ذرات با انحراف اندکی از مسیر اصلی خود ، از ماده عبور می کنند . از طرف دیگر چند ذره ای که تا برخورد رودررو فاصله چندانی ندارند ، تحت زاویه های بزرگی منحرف می شوند و ذرات نادری که برخورد رودررو می کنند به اندازه ۱۸۰ درجه از مسیر اولیه خود منحرف می شوند . به طور کلی انرژی ذره یون ساز تقریباً به طور کامل صرف واکنش با الکترون های اتم می شود . در این حالت وقتی با الکترون ها روبه رو می شود ، با آن ها برخورد می کند و مقداری انرژی به آن ها انتقال می دهد . [٦] در چنین اندرکنش هایی دو حالت رخ می دهد ، در حالت اول ممکن است یک الکترون از اتم ماده کنده شود ، در نتیجه اتم بار مثبت می گیرد . فرایندی که یک اتم یا مولکول خنثی باردار می شود ، یونیزاسیون نامیده می شود . یون تشکیل یافته از طریق گرفتن یا از دست دادن الکترون ، شامل یک الکترون جفت نشده است و ماهیت رادیکال آزاد را دارد و با نقطه در بالای آن نمایش داده می شود.

$$M \longrightarrow {}^{\cdot}M + e^{-} \qquad (1\text{-}1\text{-}2)$$

رادیکال آزاد اتم یا مولکول با بار الکتریکی خنثی است ولی یک الکترون آزاد (تزویج نشده) برای شرکت در پیوند شیمیایی دارد . به علت تمایل شدید این الکترون تزویج نشده به شرکت در واکنش های شیمیایی و تولید پیکر بندی تزویجی پایدار ، رادیکال های آزاد بسیار فعال هستند . الکترون کنده شده ، به نوبه خود اتم ها و مولکول های دیگری را یونیزه می کند.

در حالت دوم ، ذرات باردار پرانرژی در عبور از میان اتم ها ، بدون اینکه الکترون ها را از اتم جدا کنند ، انرژیشان را به اتم می دهند . در این حالت الکترون به یک مدار با انرژی بالاتر می رود ، این فرایند برانگیزش نامیده می شود . اتم برانگیخته را با ستاره نشان می دهند.

۲-۱-۱- آثار اولیه :

الف) اندرکنش ذرات باردار با ماده :

اندر کنش ذرات باردار با الکترون های اتم ها و مولکول های واقع در مسیر در داخل ماده جاذب ، آن ها را به حالت برانگیزش می برد . اگر این حالت بالای انرژی یونیزاسیون اتم ها و مولکول ها باشد ، یون تشکیل می شود و بار منفی در قسمتی از مولکول ها توزیع می شود و یا در یک اتم یا گروهی از اتم ها متمرکز می شود . اگر حالت تحریکی پایین تر از انرژی یونیزاسیون باشد ، اتم یا مولکول برانگیخته به وجود می آید . [۷] چون ذره باردار در برانگیختن و از جا کندن الکترون ها کار انجام می دهد ، انرژی آن کاهش می یابد و حرکت آن کند می شود ، ولی جهت حرکت این ذره در اثر برخورد ها به طور محسوس تغییر نمی کند زیرا جرم آن به مراتب از جرم الکترون بیشتر است . وقتی این ذره باردار در امتداد یک خط تقریباً مستقیم به حرکت خود ادامه می دهد ، ردی از اتم های یونیده و الکترون های آزاد شده در این مسیر بر جای می گذارد . سرانجام وقتی تمام انرژی جنبشی این ذره به اتم های ماده انتقال یافت ، به حالت سکون در می آید . تعداد زوج یون های تولید شده (یک یون به اضافه یک الکترون جدا از آن یک زوج یون را تشکیل می دهند) توسط ذره باردار در نزدیکی انتهای مسیر به شدت افزایش می یابد . به این علت که ذره یون ساز در آن قسمت از مسیر به آهستگی حرکت می کند و مدت زمانی که در مجاورت هر اتم و الکترون های چسبیده به آن می ماند ، افزایش می یابد . [٦]

ب) اندرکنش فوتون با ماده :

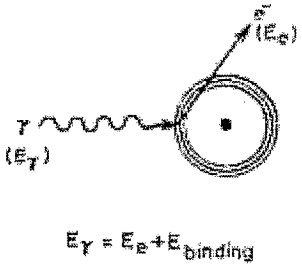
فرایند هایی که در اندرکنش اشعه گاما و اشعه X با ماده رخ می دهند عبارتند از : اثر فوتوالکتریک ، اثر کامپتون و تولید زوج .

- اثر فوتوالکتریک : وقتی تابش الکترومغناطیسی بر ماده ای می تابد ممکن است به یک الکترون انرژی برابر یا بیشتر از انرژی پیوندی آن به اتم بدهد و باعث جدا شدن الکترون (فوتوالکترون) شود (شکل ۱).

الکترون های آزاد نمی توانند انرژی فوتون را جذب کنند و پس زده شوند ، چون در این حالت انرژی و تکانه پایسته نخواهد بود . در این حالت یک تک فوتون می تواند با یک تک الکترون بر هم کنش کند . چون فوتون ها با سرعت نور حرکت می کنند ، بر اساس نظریه نسبیت ، باید دارای جرم سکون صفر و انرژی تماماً جنبشی باشند . از این رو وقتی فوتونی با یک الکترون مقید برخورد می کند تمام انرژی hν خود را به الکترون می دهد .

$$h\nu = \frac{1}{2} m_e v_{max}^2 + \Phi \qquad (2\text{-}1\text{-}2)$$

طرف چپ معادله انرژی یک فوتون یا انرژی داده شده به یک الکترون مقید می باشد . طرف راست ، انرژی جنبشی که الکترون از فوتون کسب می کند به علاوه انرژی بستگی آن به اتم است . در بر هم کنش تابش الکترومغناطیسی با اتم ها به شرط این که $h\nu > \Phi$ باشد ، یک الکترون می تواند جدا شود . در غیر این صورت ، الکترون تحریک شده و به تراز بالاتر می رود و در برگشت پرتوهای X مشخصه اتم تابش می کند .

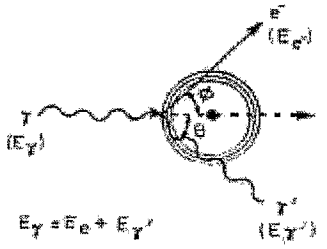


شکل ۲-۱. اثر فوتوالکتریک

سطح مقطع اثر فوتوالکتریک (P.E.) برای فوتون های کم انرژی (<100 KeV) بارزتر است ، و مقدار آن به سرعت با افزایش عدد اتمی Z اتم های جذب کننده افزایش و با افزایش انرژی فوتون به سرعت کاهش می یابد . این وابستگی ها را به صورت سطح مقطع $\sigma_{P.E.}$ می توان چنین نوشت . [۸]

$$\sigma_{P.E.} \propto Z^{5} E_{\gamma}^{-7/2} \qquad (3\text{-}1\text{-}2)$$

- **اثر کامپتون** : در این فرایند فوتون ها به صورت الاستیک از الکترون پراکنده می شوند . بخشی از انرژی فوتون تابشی به الکترون اتم داده شده و بخش دیگر آن به صورت فوتونی با انرژی کمتر(طول موج بزرگتر) ظاهر می شود (شکل ۲) . البته فوتون فرودی ناپدید شده و فوتون خروجی جدیدی تولید می شود . در این اثر، پراکندگی فوتون از یک الکترون آزاد است و حضور هسته یا اتم برای حفظ قوانین بقا ضروری نیست. برای این منظور الکترون های سست لایه های بیرونی اتمی را به عنوان الکترون های آزاد تلقی می شوند .



شکل ۲-۲. اثر کامپتون .

افزایش طول موج فوتون از رابطه زیر به دست می آید.

$$\Delta\lambda = h/m_e c \ (1 - \cos\theta) \qquad (4\text{-}1\text{-}2)$$

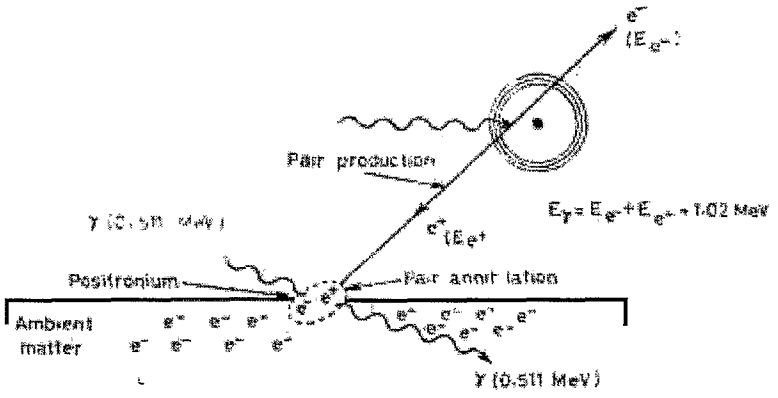
انرژی فوتون پراکنده شده نیز از رابطه زیر به دست می آید.

$$h\nu' = h\nu \ [\ 1 + h\nu/m_e c^2 \ (1 - \cos\theta)]^{-1} \qquad (5\text{-}1\text{-}2)$$

محدوده انرژی برای پراکندگی کامپتون (0.1 – 10 MeV) می باشد و سطح مقطع آن (C.E.) با افزایش عدد اتمی Z افزایش و با افزایش انرژی فوتون ، کاهش می یابد . [۸]

$$\sigma_{C.E.} \propto Z / E_{\gamma} \qquad (6\text{-}1\text{-}2)$$

- **تولید زوج** : اگر فوتونی از مجاورت میدان الکتریکی هسته عبور کند ، طبق اصل بقای جرم – انرژی ، فوتون به صورت جرم ظاهر می شود و تولید زوج e^{-}- e^{+} می کند . بقای بار الکتریکی ایجاب می کند که الزاماً جفت یون e^{-}- e^{+} با هم تولید شوند . برای بقای تکانه حضور ذره سنگین یا هسته ضروری است و به دلیل جرم نسبتاً زیاد هسته ، انرژی اخذ شده توسط آن اندک بوده و می توان از آن چشم پوشی کرد (شکل ۳).



شکل ۲-۳. تولید و نابودی زوج

کمترین انرژی لازم برای تولید یک زوج الکترون – پوزیترون ، با در نظر گرفتن بقای جرم- انرژی ، به صورت زیر است.

$$h\nu_{min} = 2\, m_e c^2 \qquad (7\text{-}1\text{-}2)$$