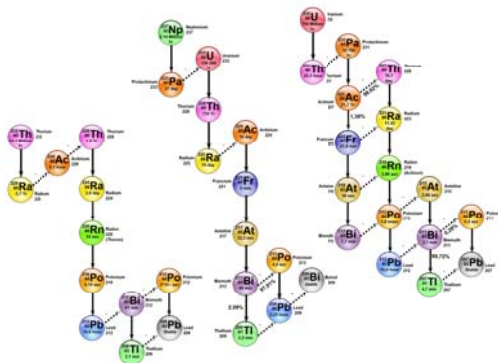


## کد محاسباتی مصرف یک گروهی



## گزارش فنی CALIC

بسته هفدهم - ویرایش ۰ - شهریور ۱۳۹۴

ANC-TEC-FMB-BC-100

## فهرست مطالب

- ۱- چکیده ..... ۱۰
- ۲- کلیدواژه ..... ۱۱
- ۳- اختصارات ..... ۱۲
- ۴- مقدمه ..... ۱۲
- ۵- دامنه گزارش ..... ۱۴
- ۶- محاسبات مصرف سوخت ..... ۱۵

- ۷- کدهای محاسبات مصرف سوخت [۲]..... ۲۳
- ۸- تشریح روش ریاضی حل معادلات بیت من برای عناصر با نیمه عمر طولانی مدت [۴]..... ۴۸
- ۹- تشریح روش ریاضی حل معادلات بیت من برای عناصر با نیمه عمر کوتاه مدت [۶]..... ۵۷
- ۱۰- ساختار برنامه..... ۹۰
- ۱۱- زمینهای مطالعات مصرف سوخت [۲۲-۱۵]..... ۱۰۹
- ۱۲- انجام محاسبات غلظت..... ۱۱۷
- ۱۳- انجام محاسبات رادیواکتیویته..... ۱۱۸

۱۴- انجام محاسبات نوترونی ..... ۱۲۱

۱۵- انجام محاسبات فوتونی ..... ۱۳۶

۱۶- راستی‌آزمایی محاسبات ..... ۱۴۰

۱۷- نتیجه‌گیری ..... ۲۶۳

۱۸- مراجع ..... ۲۶۴

## لیست شکل‌ها

- شکل ۱: زنجیره واپاشی  $^{244}\text{Cm}$  [۲]..... ۱۶
- شکل ۲: یک زنجیره واپاشی که منجر به یک پاره شکافت گشته است [۲]..... ۲۱
- شکل ۳: فلوجارت محاسباتی کد محاسبات مصرف سوخت..... ۱۰۷

## لیست جدول‌ها

- جدول شماره ۱: توصیف آرایه‌های موجود در ساختار برنامه ..... ۷۵
- جدول شماره ۲: ابعاد بردارهای مختلف برای نمونه‌های متفاوت در کد ORIGIN ..... ۷۷
- جدول شماره ۳: شاخصه‌های معرف واحدهای زمانی ..... ۸۲
- جدول شماره ۴: شاخصه‌ها و نوع عناصر شکافت‌پذیر در نظر گرفته شده ..... ۸۶
- جدول شماره ۵: گروه‌بندی انرژی فوتون ..... ۸۸
- جدول شماره ۶: ضرایب شاخصه‌های معرف واحدهای زمانی ..... ۹۲
- جدول شماره ۷: نمونه‌ای از ماتریس عناصر تشکیل شده ..... ۱۰۱
- جدول شماره ۸: نمونه‌ای از ماتریس ضرایب تشکیل شده متناظر با ماتریس عناصر تشکیل شده ..... ۱۰۲
- جدول شماره ۹: انواع مسائل جهانی طرح شده در زمینه مسائل مصرف سوخت ..... ۱۱۴

جدول شماره ۱۰: بهره نوترون به ازای هر شکافت.....۱۲۵

جدول شماره ۱۱: اندازه‌گیری تجربی بهره نوترون مواد دارای واکنش آلفا و نوترون بر حسب نوترون بر ثانیه- گرم اتم

.....۱۳۱

جدول شماره ۱۲: اندازه‌گیری تجربی بهره نوترون مواد دارای شکافت خودبخود به ازای یک شکافت.....۱۳۲

جدول شماره ۱۳: نتایج حاصل برای تخمین غلظت ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۱ بر حسب درصد اتمی ۱۴۳

جدول شماره ۱۴: نتایج حاصل برای تخمین غلظت ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۱ بر حسب درصد وزنی ۱۴۷

جدول شماره ۱۵: نتایج حاصل برای تخمین غلظت ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۱ بر حسب اتم- گرم .... ۱۵۱

جدول شماره ۱۶: نتایج حاصل برای تخمین غلظت ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۱ بر حسب کسر گرمی. ۱۵۵

جدول شماره ۱۷: نتایج حاصل برای تخمین غلظت ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۲ بر حسب درصد اتمی ۱۶۰

جدول شماره ۱۸: نتایج حاصل برای تخمین غلظت ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۲ بر حسب درصد وزنی ۱۶۸

- جدول شماره ۱۹: نتایج حاصل برای تخمین رادیواکتیویته ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۳ بر حسب کوری ۱۷۷
- جدول شماره ۲۰: نتایج حاصل برای تخمین رادیواکتیویته ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۳ در هوا..... ۱۸۵
- جدول شماره ۲۱: نتایج حاصل برای تخمین رادیواکتیویته ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۳ در آب..... ۱۹۳
- جدول شماره ۲۲: نتایج حاصل برای تخمین پرتوزایی آلفا ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۳ بر حسب کوری ۲۰۱
- جدول شماره ۲۳: نتایج حاصل برای تخمین قدرت حرارتی برای هر ایزوتوپ..... ۲۰۶
- جدول شماره ۲۴: نتایج حاصل برای تخمین جذب نوترون بر حسب نوترون بر ثانیه..... ۲۱۱
- جدول شماره ۲۵: نتایج حاصل برای تخمین نرخ شکافت و نوترون تولیدی به ازای هر واکنش شکافت بر حسب شکافت بر ثانیه..... ۲۱۶
- جدول شماره ۲۶: نتایج حاصل برای تخمین تولید نوترون در اثر واکنش آلفا و نوترون بر حسب نوترون بر ثانیه ۲۲۰
- جدول شماره ۲۷: نتایج حاصل برای تخمین تولید نوترون در اثر واکنش شکافت خودبخود بر حسب نوترون بر ثانیه ۲۲۱



- جدول شماره ۲۸: نتایج حاصل برای تخمین نرخ فوتون آزاد شده در دسته اکتینیدها بر حسب فوتون بر ثانیه .. ۲۲۲
- جدول شماره ۲۹: نتایج حاصل برای تخمین نرخ انرژی آزاد شده در دسته اکتینیدها بر حسب مگاالکترون ولت بر وات  
ثانیه ..... ۲۲۵
- جدول شماره ۳۰: نتایج حاصل برای شدت منبع فوتونی در هر گروه در دسته اکتینیدها بر حسب فوتون بر ثانیه ۲۲۷
- جدول شماره ۳۱: نتایج حاصل برای تخمین نرخ فوتون آزاد شده در دسته پاره‌های شکافت بر حسب فوتون بر ثانیه ۲۳۱
- جدول شماره ۳۲: نتایج حاصل برای تخمین نرخ انرژی آزاد شده در دسته پاره‌های شکافت بر حسب مگا الکترون ولت بر  
وات. ثانیه ..... ۲۳۳
- جدول شماره ۳۳: نتایج حاصل برای شدت منبع فوتونی در هر گروه در دسته پاره‌های شکافت بر حسب فوتون بر ثانیه  
..... ۲۳۵

## ۱- چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائل رایج در زمینه انرژی هسته‌ای حل معادلاتی است که شامل گذارهای هسته‌ای و واپاشی می‌باشد. امروزه گستره وسیعی از کدهای کامپیوتری که قادر به انجام محاسبات ترکیب ایزوتوپی سوخت راکتورهای هسته‌ای در طول مدت پرتودهی بوده، در دسترس می‌باشند. در این پروژه سعی بر آن بوده الگوریتمی جهت محاسبات مصرف عناصر در محیط‌های مختلف (همگن و غیر همگن) طراحی گردد.

پس از کوپل معادلات به یکدیگر، به الگوریتم طراحی شده جهت محاسبات مصرف عناصر قابلیت‌هایی از قبیل محاسبه غلظت‌های مختلف نظیر درصد اتمی، درصد وزنی، کسر اتمی، کسر گرمی و نیز محاسبات رادیواکتیویته عناصر، در هوا، در آب و پرتوزایی آلفا به صورت کل و کسری اضافه شده است. در ادامه، ویژگی‌های محاسبات نوترونی از قبیل قدرت حرارتی، نرخ جذب نوترون، نرخ شکافت، منبع تولید نوترون در اثر واکنش آلفا و نوترون و منبع تولید نوترون در اثر

واکنش شکافت خودبخود اضافه گردید. همچنین ویژگی‌های محاسبات فوتونی نظیر نرخ فوتون آزاد شده، انرژی آزاد شده در گروه، شدت منبع فوتونی در گروه انرژی برای هر ایزوتوپ اضافه گردید.

اعتبارسنجی الگوریتم طراحی شده از طریق مقایسه نتایج آن با نتایج محاسبات کد ORIGEN مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج اعتبارسنجی الگوریتم طراحی شده برای محاسبات از طریق مقایسه با نتایج محاسبات کد ORIGEN نشان از همخوانی جواب‌ها می‌باشد.

## ۲- کلیدواژه

محاسبات مصرف سوخت، معادلات بیت‌من، روش‌های عددی، ایزوتوپ‌های بلندمدت، ایزوتوپ‌های کوتاه مدت.

## ۳- اختصارات

عبارت	عبارت اختصاری	توضیح

## ۴- مقدمه

در محاسبات مصرف سوخت دو فرآیند اصلی در نظر گرفته می‌شود:

۱- واکنش‌های مختلف هسته‌ای از قبیل شکافت هسته‌ای، گیراندازی نوترون.

۲- واپاشی ایزوتوپ‌های پرتوزا.

تغییر این پارامترها در طول زمان تابعی است از آهنگ مصرف، و این تغییرات به نوبه خود سبب تغییر در پارامترهای دیگری نظیر شار و توان می‌شود. امروزه گستره وسیعی از کدهای کامپیوتری که قادر به انجام محاسبات ترکیب ایزوتوپی سوخت راکتورهای هسته‌ای در طول مدت پرتودهی بوده، در دسترس می‌باشند.

برای نیل به یک تقریب عالی، زنجیره معادلات هسته‌ها را می‌توان همزمان به صورت یک سیستم خطی همگن با معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول با ضرایب ثابت، با فرض ثابت بودن شار در طول بازه زمانی نمایش داد. در این پروژه با استفاده از معادلات مصرف سوخت (معادلات بیت‌من) با فرض ثابت بودن شار نوترون در طول بازه زمانی (شار متوسط‌گیری شده بر روی مکان و انرژی) و کتابخانه داده‌های هسته‌ای موجود که بسته به نوع راکتور متفاوت می‌باشند (در حال حاضر در کتابخانه کد ORIGEN داده‌هایی که برای ۱۳۰ اکتینید و ۸۵۰ پاره شکافت و ۷۲۰ محصول فعال‌ساز برای ۴ نوع راکتور PWR، BWR، LMFBR، MSR وجود دارد که از آنها در این پروژه به عنوان پایگاه داده‌ها جهت

حل معادلات بیت من استفاده می‌شود، با استفاده از الگوریتمی که بر روی شار و سطح مقطع‌های میکروسکوپی متوسط‌گیری شده بر روی مکان و انرژی غلظت عناصر برای بازه‌های زمانی دلخواه در یک سیستم همگن و غیر همگن محاسبه می‌شود.

## ۵- دامنه گزارش

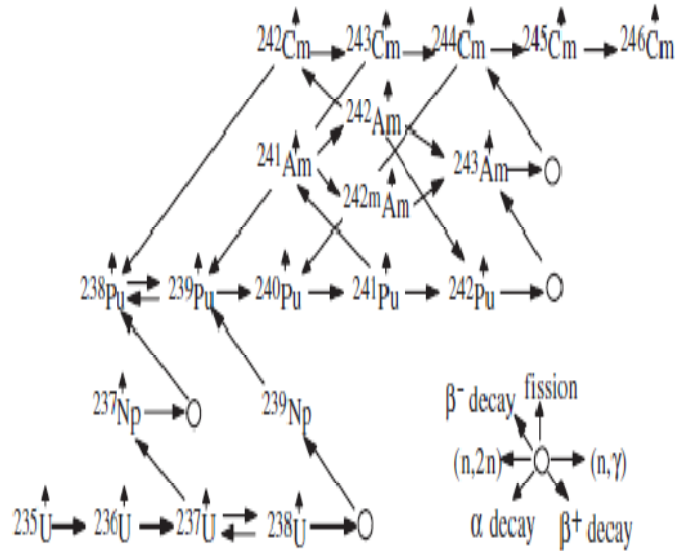
این الگوریتم توانایی محاسبات تغییرات غلظت ایزوتوپ‌های با نیمه عمر بلند و کوتاه در محیط همگن و غیر همگن را دارا می‌باشد. همچنین توانایی‌های مختلفی از قبیل محاسبات غلظت، رادیواکتیویته، نوترونی و فوتونی به الگوریتم طراحی شده، اضافه شده است.

## ۶- محاسبات مصرف سوخت

تغییر در غلظت یک عنصر در زمان T حاصل اختلاف در نرخ تولید عنصر در زمان T با نرخ مصرف عنصر در زمان T است. به طوری که نرخ تولید ناشی از عواملی نظیر شکافت، گیراندازی و یا واپاشی هسته مادر بوده و نرخ مصرف ناشی از عواملی نظیر شکافت (در صورتی که ماده شکافت پذیر باشد)، گیراندازی و یا واپاشی رادیواکتیویته است [۱].

برای درک صحیح مصرف عناصر، آنها را به دو دسته اکتینیدها و محصولات شکافت تقسیم بندی می کنیم و یک سری محاسبات ساده برای تعیین میزان مصرف اکتینیدها و پاره های شکافت صورت می دهیم [۲].

عناصر سنگین به یکی از روش های شکافت، واپاشی آلفا، واپاشی بتا، گیراندازی و یا تولید نوترون به عنصری دیگر تبدیل می شوند. در شکل ۱ مثالی از واپاشی اکتینیدها نشان داده شده است [۲].



شکل ۱: زنجیره واپاشی  $^{244}\text{Cm}$  [۲]



بنابراین معادله واپاشی اکتینیدها را می‌توان به گونه‌ای ساده توسط رابطه (۶-۱) بیان نمود [۲].

$$N_i(t) = N_{i0} \exp\{[-(\sigma_{\gamma,il} + \sigma_{f,i})\phi + \lambda_{id}]t\} + \sum_{j=1}^n \frac{\sigma_{\gamma,ji}}{\sigma_{\gamma,ji} + \sigma_{f,j}} (N_{j0} - N_j(t)) + \sum_{k=1}^m \frac{\lambda_{ki}}{(\sigma_{\gamma,kg} + \sigma_{f,k})\phi + \lambda_{ki}} (N_{k0} - N_k(t)) \quad (۶-۱)$$

همچنین تولید پاره‌های شکافت را می‌توان توسط رابطه (۶-۲) بیان نمود [۲].

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = \gamma_i \Sigma_{f,i} \phi - \sigma_{\gamma,il} N_i(t) \phi + \sigma_{\gamma,ji} N_j(t) \phi - \lambda_{id} N_i(t) \phi + \lambda_{ni} N_n(t) \quad (۶-۲)$$

که در روابط فوق:

$N_i(t)$ : چگالی اتمی هسته آم در لحظه  $t$ .

$N_{i0}$ : چگالی اتمی هسته آم در لحظه  $t=0$ .

$\sigma_{\gamma,il}$ : سطح مقطع گیراندازی یک گروهی هسته آم به هسته ام.

$\sigma_{f,i}$ : سطح مقطع شکافت یک گروهی هسته آم.

$\lambda_{id}$ : ثابت واپاشی هسته آم و تبدیل آن به هسته  $d$  از طریق واپاشی  $\beta^-$  و یا واپاشی  $\alpha$  و یا گذار یکسان.

$\phi$ : شار یک گروهی نوترون.

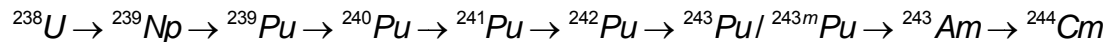
$\gamma_i \Sigma_{f,i}$ : مجموع تولید هسته آم از واکنش‌های شکافت اورانیوم ۲۳۵ و ۲۳۸، پلوتونیم ۲۳۹ و پلوتونیوم ۲۴۱.

$\gamma_{i,j}$ : بهره شکافت هسته آم و تولید هسته آم.

$m, n$ : تعداد هسته‌های شرکت کننده به ویژه در واکنش واپاشی و شکافت.

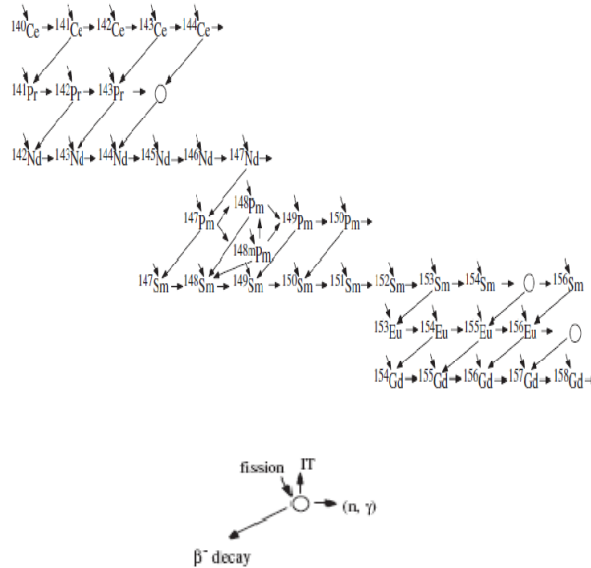
در رابطه فوق چگالی اتمی اورانیوم ۲۳۵ و ۲۳۸، پلوتونیوم ۲۳۹ و نپتونیم ۲۴۱ در جمله  $\gamma_i \Sigma_{f,i}$  معادله (۶-۲) ظاهر می‌شوند [۲].

اگر زنجیره تولید عنصری همانند کوریم ۲۴۴ را مطابق زیر در نظر بگیریم:



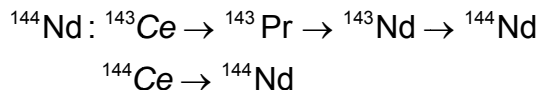
مقدار عنصر کوریم ۲۴۴ شدیداً وابسته به سطح مقطع شکافت و یا گیراندازی عناصر اورانیوم ۲۳۸ و پلوتونیم ۲۳۹ تا ۲۴۲ و همچنین آمرسیم ۲۴۳ است. در نتیجه رابطه (۶-۱) شامل سه ترم شکافت برای عناصر اورانیوم و پلوتونیم و یک ترم گیراندازی برای آمرسیم می‌باشد [۳].

اگر زنجیره شکافت که منجر به تولید یک عنصر پایدار گشته، همانند زنجیره‌های نمایش داده شده در شکل ۲ را در نظر بگیریم، این عناصر که در نتیجه شکافت عناصر سنگین حاصل شده‌اند، در اثر واکنش‌های مختلف به عنصری پایدار منتهی می‌شوند. مثال‌هایی در این زمینه در ادامه آمده است [۲].



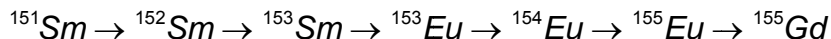
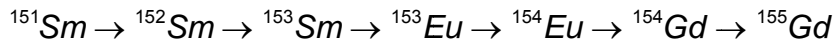
شکل ۲: یک زنجیره واپاشی که منجر به یک پاره شکافت گشته است [۲]

به عنوان مثال عنصر  $^{144}\text{Nd}$  توسط دو زنجیره واپاشی تولید می‌گردد.



در نتیجه در رابطه (۶-۲) هر یک شامل دو زنجیره تولید بوده که در رابطه باید در نظر گرفت.

اگر تولید  $^{154}\text{Eu}$ ،  $^{154}\text{Gd}$ ،  $^{155}\text{Eu}$ ،  $^{155}\text{Gd}$  را در نظر بگیریم همانطور که در شکل ۲ پیداست، مقادیر این ایزوتوپ‌ها بسیار حساس و وابسته به یکدیگرند که بستگی آنها به همدیگر توسط رابطه‌های زیر قابل نمایش است [۲].



معادلات بالا را می‌توان با روش‌های عددی همچون روش اویلر و یا رانج کوتاه<sup>۱</sup> حل کرد [۲]. در حالت کلی معادلات تغییر غلظت هر هسته توسط معادلات بیت‌من ارائه شده که در ادامه به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

## ۷- کدهای محاسبات مصرف سوخت [۲]

از آغاز عصر محاسبات عددی تاکنون کدهای مصرف سوخت بسیاری در صنایع هسته‌ای طراحی و به کار گرفته شده است. بعضی از این کدها معادلات پخش را به روش چند گروهی حل می‌کند که از این دسته می‌توان به CANDL،

DRACO و ... اشاره کرد. برخی از کدها نیز از تکنیک‌های دیگری مانند محاسبات نوترونی یک گروهی که بر روی ترکیب ایزوتوپی ماده تمرکز می‌کند، به جای حل معادلات ترابرد نوترون بهره می‌برند که از این نمونه می‌توان به کد ORIGEN و CINDER اشاره نمود.

### ۷-۱- کد ORIGEN<sup>۱</sup>

کد ORIGEN یک کد بی‌بعد، یک گروهی است که نمونه اولیه آن در سال ۱۹۷۳ در آزمایشگاه ملی اکریدج طراحی و پس از آن در سال‌های ۱۹۷۵ و نیز ۱۹۸۱ به روز رسانی شد. به طور کلی کد ORIGEN دارای قابلیت‌های بسیاری نظیر

---

۱ The ORNL Isotope GENeration and depletion code



محاسبه غلظت ایزوتوپی سوخت، پاره‌های شکافت و غلاف را در هر دو حالت همگن و غیر همگن در سوخت‌های راکتور می‌باشد [۳].

نسخه مورد مطالعه، کد ORIGEN2.1 است که در ابتدای دهه ۱۹۸۰ در آزمایشگاه ملی اکریدج طراحی شده است [۴]. به طور کلی کد ORIGEN2.1 برای مسائل فوق با ملزومات زیر طراحی شده است:

۱- اطلاعات کافی ترکیب ایزوتوپی مواد هسته‌ای باید فراهم گردد.

۲- خواص اصلی مواد هسته‌ای (به عنوان مثال: گرمای واپاشی هسته‌ای، گسیل نوترون و ...) باید اندازه‌گیری شود.

البته امروزه انواع دیگری از این کد طراحی شده که از جمله می‌توان به ORIGEN-S و ORIGEN2.2 و ORIGEN- و ARP و ... اشاره کرد [۵].

کاربرد اصلی کد ORIGEN محاسبات ترکیب ایزوتوپی رادیو هسته‌ها و خواص دیگر عناصر هسته‌ای است. خصوصیات از قبیل سوخت مصرفی، ضایعات هسته‌ای، گازهای منتشر شده و ... را می‌توان نام برد [۸-۳].

یکی از مهم‌ترین مسائل رایج در زمینه انرژی هسته‌ای حل معادلاتی است که شامل گذارهای هسته‌ای و واپاشی می‌باشند. برای نیل به یک تقریب عالی، زنجیره معادلات هسته‌ها را می‌توان همزمان به صورت یک سیستم خطی همگن با معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول با ضرایب ثابت نمایش داد. در بسیاری از نمونه‌ها، ماتریس گذار هسته‌ای، مثلثی است و سیستم معادلات با استفاده از معادلات بیت‌من<sup>۱</sup> که توسط بسیاری از کدها به کار برده می‌شود، حل می‌شود [۸-۳].

همچنین در کتابخانه داده‌های هسته‌ای که برای آن گردآوری شده است به طور کاملاً مناسب رفتارهای  $^{235}\text{U}$  و  $^{239}\text{Pu}$  در سوخت در هر دو حالت طیف سریع و حرارتی و شکافت  $^{233}\text{U}$  در طیف حرارتی بررسی شده است. به علاوه کتابخانه

کد شامل نرخ فوتون‌های چند گروهی آزاد شده برای پاره‌های شکافت و عناصر سنگین است که اجازه می‌دهد محاسبات طیف اشعه گاما را در سوخت مصرفی و بازیابی شده انجام داد [۳-۸].

یکی دیگر از ویژگی‌های این کد استفاده از روش ماتریس نمایی برای حل یک سیستم غیر همگن از معادلات است. این ویژگی کد را قادر می‌سازد که بتواند انباشتگی اکتیویته را در واحدهای تولیدی، در ضایعات کاری در دسترس و در محیط اطراف محاسبه کند [۳-۸].

#### ۷-۱-۱- کتابخانه داده‌های ORIGEN

یکی از بزرگ‌ترین و جامع‌ترین کتابخانه داده‌های هسته‌ای برای کد ORIGEN تشکیل شده است. کتابخانه شامل ۶ فایل اطلاعاتی است، سه فایل اطلاعاتی شامل اطلاعات واپاشی و سطح مقطع جذب نوترون برای ۸۱۳ ایزوتوپ حاضر در

کتابخانه است، و بقیه (سه فایل اطلاعاتی دیگر) شامل نرخ تولید فوتون چند گروهی است که از واپاشی رادیواکتیویته این هسته‌ها حاصل می‌شود [۳-۸].

اولین فایل داده‌ها شامل خواص هسته‌ای مربوط به غلاف و مواد ساختاری است. دومین فایل در بردارنده اطلاعات هسته-ای برای عناصر سنگین موجود در سوخت، و سومین فایل حاوی اطلاعات هسته‌ای پاره‌های شکافت است. همچنین فایل داده‌های ۴، ۵ و ۶ شامل بهره فوتون در هر تجزیه برای غلاف، سوخت و پاره‌های شکافت است [۳-۸].

نسخه قابل دسترس از کد ORIGEN2.1 شامل اطلاعات ۱۷۰۰ هسته در سه بخش که متشکل از ۱۳۰ اکتینید و ۸۵۰ پاره شکافت و ۷۲۰ محصول فعال‌ساز است، می‌باشد. برای هر سه بخش، سه کتابخانه مختلف شامل فایل اطلاعات واپاشی هسته‌ای، سطح مقطع و بهره پاره شکافت، و فوتون خوانده شده و ممکن است اجرا گردد [۳-۸].

در فایل واپاشی، اطلاعاتی از قبیل لیست هسته‌هایی که باید در نظر گرفته شود، نیمه عمر و کسر شاخه‌ای واپاشی برای واپاشی بتا به حالت پایه و حالت برانگیخته، واپاشی گیراندازی بتامثبت به حالت‌های پایه و برانگیخته، گذارهای داخلی، واپاشی آلفا، واپاشی شکافت خودبخود و واپاشی نوترون‌های تأخیری، گرمای قابل حصول در هر واپاشی برای هر رادیواکتیو مادر، ترکیب ایزوتوپی طبیعی رخ داده در مورد هر عنصر، بیشینه غلظت مجاز رادیوهسته در آب یا هوا در واحدهای کوری بر مترمکعب آب یا هوا موجود می‌باشد [۳-۸].

در فایل سطح مقطع و داده‌های بهره شکافت، اطلاعاتی نظیر سطح مقطع یک گروهی عناصر مورد استفاده در کد قرار گرفته است. محاسبات سطح مقطع، فرآیند بسیار پیچیده‌ای است که در آن باید نوع راکتور در نظر گرفته شود که این قسمت توسط یک کد فیزیک راکتوری صورت گرفته و به آن اضافه می‌گردد. در بخش مربوط به بهره‌های شکافت از اطلاعات ENDF/B-IV استفاده شده است [۳-۱۲].

در فایل مربوط به داده‌های فوتون، تعداد فوتون در هر واپاشی در یک ساختار ۱۸ گروهی ذخیره شده که بر حسب درخواست در خروجی چاپ می‌کند [۳-۸].

در مجموع ۵۰ نوع کتابخانه برای کد در دسترس بوده که شامل یک کتابخانه واپاشی- دو کتابخانه برای فوتون و مابقی شامل اطلاعات مربوط به سطح مقطع میکروسکوپی یک گروهی عناصر موجود است که بر روی طیف انواع راکتورها از قبیل BWR ، PWR و .... متوسط‌گیری شده است، می‌باشد [۳-۸].

۷-۱-۲- ویژگی‌های کد ORIGIN [۳-۸، ۱۳]

خروجی‌های کد شامل ۲۸ جدول مختلف بوده که به ترتیب دربردارنده اطلاعات مربوط به ترکیب ایزوتوپی هر المان (بر حسب کسر اتمی و کسر وزنی)، ترکیب ایزوتوپی مواد (بر حسب گرم- اتم، کسر اتمی، گرم، کسر وزنی)، رادیواکتیویته کل (بر حسب کوری، کسر)، توان حرارتی (بر حسب وات و کسر)، رادیواکتیویته کل (بر حسب بکرل و کسر)، خطر استنشاق

ماده رادیواکتیو (بر حسب مترمکعب هوا و کسر)، خطر بلع ماده رادیواکتیو (بر حسب مترمکعب هوا و کسر)، خطر بلع ماده شیمیایی (بر حسب مترمکعب هوا و کسر)، نرخ جذب نوترون (بر حسب نوترون بر ثانیه و کسر)، نرخ نوترون القایی بر اثر شکافت (بر حسب شکافت بر ثانیه و کسر)، رادیواکتیویته آلفا (بر حسب کوری، کسر)، تولید نوترون (بر حسب نوترون بر ثانیه)، تولید نوترون‌های شکافت خودبخود (بر حسب نوترون بر ثانیه)، نرخ فوتون‌های گسیلی (بر حسب فوتون بر ثانیه)، تنظیم آزمایش پارامتر ERR مورد استفاده قرار می‌گیرند.

از دیگر ویژگی‌های کد می‌توان به استفاده از هر دو حالت توان و یا شار ثابت در طول دوره پرتودهی و همچنین تعیین آهنگ برداشت و یا افزایش مواد در طول دوره پرتودهی اشاره کرد.

۷-۲- معادلات بیت من<sup>۱</sup> [۱۴]

سیر زمانی تغییر غلظت پیاپی هسته‌ها یا زنجیره خطی واپاشی به وسیله یک مجموعه از معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول که به معادلات بیت من مشهورند نشان داده می‌شوند. جزئیات حل معادلات بیت من برای یک نمونه واپاشی رادیواکتیو در یک زنجیره خطی به وسیله بیت من در سال ۱۹۱۰ ارائه شده است.

معادلات بیت من برای غلظت هسته‌ها و واپاشی رادیواکتیویته n امین هسته در یک زنجیره خطی به صورت زیر بیان می‌شود.



$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

(۱-۷)

$$\frac{dN_i}{dt} = \lambda_{i-1} N_{i-1} - \lambda_i N_i \quad , i = 2, \dots, n$$

که در آن  $\lambda_i$  ثابت واپاشی هسته  $i$ ام است. با فرض غلظت صفر برای همه دختر هسته‌ها در زمان صفر و برای

$$N_1(0) \neq 0, \quad N_i(0) = 0$$

 $i > 1$ 

غلظت هسته  $n$ ام بعد از زمان  $t$  به وسیله معادلات بیت‌من به صورت معادله (۲-۷) بیان می‌شود.

$$N_n(t) = \frac{N_i(0)}{\lambda_n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \alpha_i \exp(-\lambda_i t) \quad , \alpha_i = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{\lambda_j}{(\lambda_j - \lambda_i)} \quad (2-7)$$

اگرچه در بیشتر نمونه‌های واپاشی معادلات فوق کافی است، اما آنچه از معادلات فوق مشهود است، آن است که ثابت  $\alpha$  فقط در هنگامی که تمامی ثابت‌های واپاشی متفاوت باشند، می‌تواند محاسبه گردد. به عبارت دیگر یک ابهام در معادله تعیین  $\alpha$  رخ می‌دهد. البته این ابهام به معنای غلظت بی‌نهایت در نمونه‌ها نیست، بلکه بدان معناست که یک واگرایی در جواب‌ها رخ می‌دهد. همچنین در نمونه‌هایی که ثوابت واپاشی متفاوت ولی خیلی به هم نزدیکند خطاهای محاسبه شده شدیداً متمایل به نتایج روش‌های عددی هستند.

معادلات بیت‌من برای سیستم‌های تبدیل هسته‌ای بسیار پیچیده‌تر از نمونه‌های واپاشی رادیواکتیویته هستند که دلالت بر آن دارد که ابهام اتفاق می‌افتد. برای برداشتن این ابهام دو راه حل موجود است. اولین روش بدین گونه است که به

طور مصنوعی ثوابتی که برابرند جابجا شده و یک راه حل تقریبی برای آنها به دست آید. دومین روش بر پایه مشتق کردن راه حل نمونه کلی است که شباهت میان ثوابت را متمایز می‌سازد.

### ۳-۷- تئوری حل معادلات بیت‌من در شار ثابت [۱۴]

در حالت کلی معادله بیت‌من برای غلظت  $N_i$  ایزوتوپ آم در یک ماده با شار ثابت توسط رابطه (۳-۷) داده می‌شود:

$$\frac{dN_i}{dt} = -\sum_{j \neq i} [\lambda_{ji}^d + \int \varphi(E, t) \sigma_{ji}^{tr}(E) dE] N_i + \sum_{j \neq i} [\lambda_{ij}^d + \int \varphi(E, t) \sigma_{ij}^{tr}(E) dE] N_j \quad (3-7)$$

که در آن  $\lambda^d$  ثوابت واپاشی،

$\varphi(E, t)$ : بزرگی شار ذره با انرژی  $E$ .

$\sigma_{ij}^{tr}(E)$ : سطح مقطع القایی ذره برای گذار از ایزوتوپ  $j$  به ایزوتوپ  $i$  است.

مجموع آن بر روی تمامی هسته‌های حاضر در ماده می‌باشد. از آنجایی که شار ذره به ترکیب ایزوتوپی مواد بستگی دارد، در ابتدا باید معادله بیت‌من را در کل بازه زمانی برای یک پیش‌گویی صحیح مصرف در راکتور حل کنیم. تحت شرایط مشخص (جریان کم، سطح مقاطع گذار کوچک)، به نظر می‌رسد که می‌توان شار را در بازه زمانی ثابت در نظر گرفت. سطح مقطع و طیف میانگین‌گیری شده گذار برای بازه زمانی توسط رابطه (۴-۷) نمایش داده می‌شود.

$$\overline{\sigma_{ij}^{tr}} \equiv \frac{1}{\overline{\varphi}} \int \varphi(E) \sigma_{ij}^{tr}(E) dE \quad , \quad \overline{\varphi} = \int \varphi(E) dE \quad (۴-۷)$$

Particle induced cross section for transmutation from isotope  $j$  to  $i$

و رابطه (۳-۷) به صورت رابطه (۵-۷) کاهش می‌یابد.

$$\frac{dN_i}{dt} = -\sum_{j \neq i} [\lambda_{ij}^d + \overline{\sigma_{ij}^{tr}(E)\varphi}] N_i + \sum_{j \neq i} [\lambda_{ij}^d + \overline{\sigma_{ij}^{tr}(E)\varphi}] N_j \quad (۵-۷)$$

اگر دستگاه معادلات را در حالت برداری توسط رابطه (۶-۷) بنویسیم:

$$\frac{dN_i}{dt} = \Lambda N, \quad \Lambda_{ij} \equiv \lambda_{ij}^d + \overline{\sigma_{ij}^{tr}\varphi} \quad (۶-۷)$$

راه حل عمومی آن به شکل رابطه (۷-۷) خواهد بود.

$$N(t) = e^{\Lambda t} N(0) \quad (۷-۷)$$

همانطور که می‌دانیم بسط تیلور ماتریس نمایشی برای زمان کوتاه  $t$  به صورت رابطه (۸-۷) می‌باشد.

$$e^{\Lambda t} \equiv 1 + \Lambda t + \frac{1}{2} \Lambda^2 t \quad (8-7)$$

راه حل فوق به روش ماتریس نمایی مشهور بوده و به طور گسترده در کدهایی از قبیل ORIGEN به کار می‌رود. معادلات برای حالتی که تغییر در غلظت‌ها برای زیرمجموعه‌ای از ایزوتوپ‌ها که  $\sigma_{ij} N_j = 0$  به هنگامی که  $Z$  در زیرمجموعه نیست نیز معتبر است. بهتر است که به جای معادلات فوق یک مجموعه کوچک از معادلات کوپل شده به صورت مستقیم با روش اختلاف محدود حل شود.

## ۷-۴- تشریح روش محاسباتی در کد ORIGIN2.1 [۸-۳، ۱۳]

کد ORIGIN2.1 از روش ماتریس نمایی برای حل یک سیستم بزرگ، کوپل شده، خطی، از معادلات دیفرانسیلی معمولی مرتبه اول استفاده می‌کند. در حالت کلی تشکیل و ناپدید شدن یک هسته در یک زنجیره واپاشی توسط یک معادله دیفرانسیلی مرتبه اول غیر همگن به صورت رابطه (۷-۹) بیان می‌شود.

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^N I_{ij} \lambda_j X_j + \varphi \sum_{k=1}^N f_{ik} \sigma_k X_k - (\lambda_i + \varphi \sigma_i + r_i) X_i + F_i \quad (i = 1, \dots, N) \quad (9-7)$$

$X_i$ : چگالی اتمی هسته  $i$ ام،  $\lambda_i$  ثابت واپاشی هسته  $i$ ام.

$\sigma_i$ : سطح مقطع جذب متوسط‌گیری شده هسته  $i$ ام بر روی طیف نوترون.

$f_{ik}$  و  $f_{ij}$ : به ترتیب کسر ثابت واپاشی و جذب نوترون به وسیله هسته‌های دیگر که منجر به تولید هسته آم می‌شود.

$\bar{\rho}$ : شار متوسط‌گیری شده بر روی مکان و انرژی که در طول بازه زمانی ثابت فرض می‌شود.

$F_i$ : نرخ تغذیه پیوسته هسته آم.

$r_i$ : نرخ برداشت پیوسته هسته آم از سیستم.

شار نوترون میانگین، در طول یک بازه زمانی با جمع بر روی بازه زمانی و تقسیم بر زمان  $t$  به وسیله رابطه زیر داده می‌شود:



$$\bar{\phi} = \phi(0) \left[ 1 - \frac{t \dot{\Sigma}(0)}{2 \Sigma(0)} + \frac{t^2}{6} \left( \frac{2 \dot{\Sigma}(0)^2 - \Sigma(0) \ddot{\Sigma}(0)}{\Sigma(0)^2} \right) + \dots \right] \quad (10-7)$$

که در رابطه فوق:

$\Sigma(0)$ : سطح مقطع ماکروسکوپیک شکافت در ابتدای بازه زمانی.

$\dot{\Sigma}(0)$  و  $\ddot{\Sigma}(0)$ : مشتق اول و دوم سطح مقطع ماکروسکوپیک شکافت در ابتدای بازه زمانی بوده که می‌توان آنها را از رابطه (۷-۱۱) و (۷-۱۲) استخراج نمود.

$$\dot{X}(0) = AX(0) \quad (11-7)$$

$$\ddot{X}(0) = A \dot{X}(0) = A^2 X(0) \quad (12-7)$$

جمله شامل مشتق مرتبه دوم تنها در بازه زمانی اول برای بعضی از ایزوتوپها که  $\dot{X}(0)$  صفر بوده ولی  $\ddot{X}(0)$  مخالف صفر است. مقدار توان متوسط تولید شده از مقدار ماده اولیه توسط رابطه زیر نمایش داده می شود:

$$P = 3.20 \times 10^{-17} \phi \Sigma(0) \left[ 1 + \dot{\Sigma}(0) \frac{t}{2} + \ddot{\Sigma}(0) \frac{t^2}{6} + \dots \right] \quad (13-7)$$

بر مبنای روابط بالا جهت تخمین شار یا توان متوسط به طور صحیح، تغییرات در شار نوترون در طول بازه زمانی باید بسیار کم باشد.

در سیستم‌های غیرخطی شار نوترون با تغییر در ترکیب ایزوتوپی سوخت تغییر می‌کند. اگر تغییرات در طول زمان کم باشد (بازه زمانی به اندازه کافی کوچک انتخاب شود) می‌توان شار نوترون را در آن بازه زمانی ثابت در نظر گرفت در نتیجه معادله به یک مجموعه همگن معادلات دیفرانسیل مرتبه اول با ضرایب ثابت تغییر پیدا می‌کند. که اگر بتوان این تابع را از ماتریس گذار به درستی استخراج کرد، آنگاه حل معادلات زنجیره هسته‌ها به آسانی در دسترس خواهد بود.

اگر در معادله (۷-۹) تعداد  $N$  هسته در نظر گرفته شود، بایستی تعداد  $N$  معادله به فرم کلی یکسان در نظر گرفته شود، که حل آن توسط کد ORIGEN2.1 مقادیر آنها را در انتهای بازه زمانی بدست می‌دهد. در رابطه (۷-۹) به طور تئوری می‌توان در نظر گرفت که هر عنصر از  $N-1$  عنصر دیگر که در سیستم در نظر گرفته شده‌اند، به وجود می‌آید. اگرچه در واقعیت تعداد هسته‌های مادر کمتر از ۱۲ عدد می‌باشد. بنابراین در یک مجموعه ۱۷۰۰ هسته‌ای، تعداد (۱۶۸۸=۱۲-

۱۷۰۰) ثابت  $X_j$  در سمت راست رابطه (۷-۷) و به طور مشابه برای دیگر هسته‌ها صفر در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه ماتریس  $1700 \times 1700$  بسیار کوچک می‌شود.

پس از معین شدن ماتریس گذار و جمله‌های وابسته به آن با وارد کردن ترکیب ایزوتوپی و توان و یا شار مورد دلخواه و طول مدت پرتودهی (یا واپاشی) کد می‌تواند محاسبات واپاشی و پرتودهی را انجام دهد. ترکیب ایزوتوپی در پایان مرحله پرتودهی در سه مرحله کلی محاسبه می‌گردد.

۱- پارامترهای ماتریس گذار که وابسته به مرحله زمانی هستند، معین می‌گردند.

۲- شار نوترون از توان (و یا بر عکس) محاسبه شده و بر طبق آن ماتریس گذار تنظیم می‌گردد.

۳- ترکیب ایزوتوپی در پایان مرحله زمانی با استفاده از یک مجموعه روابط تکمیلی ریاضی محاسبه می‌گردد.

در حالت کلی پارامترهای ماتریس گذار (شامل بهره‌های پاره شکافت) بر روی همه مراحل زمانی ثابت فرض می‌شوند، مگر اینکه تمامی ماتریس گذار باز تولید شود. اگرچه، در طی فازهای ابتدایی فرآیندهای به روز رسانی (ماتریس گذار) که در کد ORIGEN2.1 صورت می‌پذیرد، این نکته که سطح مقطع‌ها در کدهای پیشرفته فیزیک راکتوری در طول زمان به علت تغییرات در غلظت هسته‌ها یا طیف انرژی نوترون تغییر می‌یابند، یادآوری شده است. این تغییر سطح مقطع‌ها به ویژه برای اکتینیدهای اصلی حاضر در عناصر هسته‌ای مورد توجه می‌باشد. در نتیجه، سطح مقطع‌های هسته‌های اصلی در ORIGEN2.1 به عنوان تابعی از مصرف در نظر گرفته می‌شود. در ابتدای هر بازه زمانی، ORIGEN2.1 مقدار میانگین مصرف را برای مرحله زمانی تخمین زده، سطح مقطع مناسب اکتینیدها را از طریق درونیابی، به دست می‌آورد و پس از آن این مقادیر را در ماتریس گذار جایگزین می‌کند.

در این مرحله، ثوابت ماتریس گذار به طور کامل درست شده‌اند و در مرحله بعدی توان یا شار محاسبه می‌شود. برای وضوح بیشتر، فرض می‌شود که توان مشخص شده و شار باید محاسبه گردد. اولین تقریب برای این محاسبات به صورت رابطه (۷-۱۴) می‌باشد.

$$\phi = \frac{6.242 \times 10^{18} \cdot P}{\sum_{i=1}^N X_i^f \sigma_i^f R_i} \quad (۷-۱۴)$$

که در آن

$\phi$ : شار نوترون لحظه‌ای بر حسب نوترون بر سانتیمتر مربع در ثانیه.

P: توان بر حسب مگاوات.

$X_i^f$ : مقدار هسته شکافتنی  $i$  در سلول بر حسب گرم اتم.

$\sigma_i^f$ : سطح مقطع میکروسکوپی شکافت برای هسته  $i$  بر حسب بارن.

$R_i$ : انرژی قابل بازیافت در هر شکافت برای هسته  $i$  بر حسب میلیون الکترون ولت بر شکافت.

مشکل اساسی در معادله فوق این بوده که غلظت هسته شکافتنی  $i$  تنها در ابتدای بازه زمانی شناخته شده است، در نتیجه در معادله (۷-۹) شار نوترون در ابتدای بازه زمانی به جای شار میانگین نوترون که پارامتر مورد انتظار است، در نظر گرفته می‌شود. این روش در کد ORIGEN2.1 با بسط دادن سری تیلور رابطه (۷-۱۴) در ترم‌های مرتبه دوم به واسطه تغییر زمانی ترکیب ایزوتوپی هسته شکافتنی به عنوان پارامتر وابسته به زمان به دست می‌آید. شار متوسط با جمع این بسط بر روی طول بازه‌های زمانی و تقسیم بر طول بازه زمانی نتیجه‌گیری می‌شود. شار میانگین برای بازه زمانی فعلی به طور پیوسته با تقسیم شار میانگین بر بازه زمانی قبل به دست می‌آید ( این نسبت برابر با ۱ برای بازه

زمانی اول است). نسبت حاصل جهت ضرب در تمامی آهنگ انتقال وابسته به شار در ماتریس گذار مورد استفاده قرار می‌گیرد، بدین گونه تنظیم آنها (پارامترهای وابسته به شار) به شار صحیح در زمان حال صورت می‌پذیرد. در نهایت مرحله نهایی در فرآیند محاسبات حل همزمان معادلات دیفرانسیلی به وجود آمده به وسیله ثوابت در ماتریس گذار می‌باشد. که قسمت اصلی آن توسط روش ماتریس نمایی برای حل معادلات دیفرانسیلی صورت می‌پذیرد.

#### ۸- تشریح روش ریاضی حل معادلات بیت‌من برای عناصر با نیمه عمر طولانی مدت [۴]

همانگونه که قبلاً ذکر شد، دو مشکل عمده در حل معادلات مصرف سوخت به روش ماتریس نمایی وجود دارد:

۱- مقدار زیاد حافظه جهت ذخیره‌سازی ماتریس گذار و تابع ماتریس نمایی نیاز است.

۲- مشکلات محاسباتی در حل معادلات با مقادیر ویژه گسترده به روش ماتریس نمایی وجود دارد.



تولید و ذخیره تابع ماتریس نمایی با گسترش روش بازگشتی بدون نیاز به ذخیره تمامی آرایه‌های ماتریس تسهیل شده است. بنابراین، این امکان وجود دارد که برای یک هسته رابطه‌ای نظیر معادله زیر را از معادلات مصرف سوخت جدا کرد:

$$X_i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_i^n \quad (1-8)$$

که  $C_i^n$  به وسیله رابطه بازگشتی زیر تولید می‌شود:

$$C_i^0 = X_i(0) \quad (2-8)$$

$$C_i^{n+1} = \frac{t}{n+1} \sum_{j=1}^N a_{ij} C_j^n \quad (3-8)$$

که در روابط فوق،  $a_{ij}$  آرایه ماتریس گذار که ثابت یک بعدی برای تشکیل گونه  $i$  از گونه  $j$  می‌باشد. این الگوریتم تنها نیاز به ذخیره یک بردار  $C^n$  جهت حل معادلات نیاز دارد.

به هنگام استفاده از رابطه (۸-۱) ضروری است که از دقت جواب‌ها به هنگام اضافه یا کم کردن تعداد زیادی از تساوی-های برابر اطمینان حاصل کرد. در گذشته، این عمل به وسیله میزان بازه‌های زمانی با تقسیم بر ۲ کردن آنها تا نرم ماتریس کمتر از بعضی از مقادیر کوچک‌تر شود، جهت محاسبه ماتریس نمایی برای بازه‌های زمانی کوچک، و مربع کردن نتایج ماتریس جهت مشخص کردن بازه زمانی مطلوب به طور متناوب صورت می‌پذیرفت. چنین روشی غیر کاربردی برای محاسبات شامل تعداد زیادی از هسته‌ها (بسیاری از آنها نیمه عمر کوتاه دارند). متشابه به نرم زیادی از ماتریس  $At$  می‌باشد. اگرچه، این محاسبات برای دسته‌ای از ایزوتوپ‌های با نیمه عمر کوتاه که شرایط تعادل و گذار آنها شناخته شده

هستند، می‌باشد. بنابراین در کد ORIGEN تنها ترکیب ایزوتوپی هسته‌هایی که عناصر ماتریس قطری آنها کمتر از مقادیر قبلاً محاسبه شده به وسیله روش ماتریس نمایی است، محاسبه می‌گردد.

لپیدوس<sup>۱</sup> و لوس<sup>۲</sup> نشان دادند که دقت تابع ماتریس نمایی محاسبه شده می‌تواند در هر مقدار مطلوب به وسیله کنترل بازه‌های زمانی از قبیل نرم ماتریس  $At$  کمتر از یک مقدار تعیین شده از طول کلمه کامپیوترهای دیجیتالی استفاده شده در محاسبات، باقی بماند. آنها یک نرم برای ماتریس  $A$  که با  $[A]$  نمایش داده می‌شد، تعیین کردند که به وسیله مینیمم مقدار جمع سطر ماکزیمم و مقدار جمع ستون ماکزیمم داده می‌شود.

---

Lapidus<sup>۱</sup>

Luus<sup>۲</sup>



$$[A] = \min \left\{ \max_j \sum_i |a_{ij}|, \max_i \sum_j |a_{ij}| \right\} \quad (4-8)$$

که  $|a_{ij}|$  مقدار مطلق عنصر  $a_{ij}$  می‌باشد. آنها نشان دادند که ماکزیمم جمله در جمع هر عنصر در تابع ماتریس نمایی نمی‌تواند از  $\frac{n^n}{n!}$  بیشتر گردد، که  $n$  بزرگ‌ترین عدد صحیح است که از  $[A]t$  بزرگ‌تر گردد. در کد ORIGIN نرم ماتریس گذار محدود شده که کمتر از  $[A] \leq -2 \ln 0.001 = 13.8155$  باشد، پس ماکزیمم جمله که محاسبه خواهد شد تقریباً  $49000$  خواهد بود. بنابراین مقادیر کمتر از  $\exp(-13.8155) = 10^{-6}$  با دقت ۵ رقم اعشار نیز محاسبه خواهد شد. یک مقدار کافی از جملات که به مجموع بی‌نهایت (رابطه (۸-۱)) بایستی اضافه گردد تا سری همگرا شود. جمله  $m$  در سری‌ها برای  $e^{[A]}$  برابر است با  $\frac{[A]^m}{m!}$  که برای مقادیر بزرگ  $m$  می‌توان تقریباً  $(2m\pi)^{-1/2}$   $\left(\frac{[A]e}{m}\right)^m$  با استفاده از

تقریب استیرلینگ<sup>۱</sup> قرار داد. مقدار نرم  $[A]$  به وسیله کد محاسبه می‌شود و  $m$  برابر با بزرگ‌ترین عدد صحیح در رابطه  $5[A] + \frac{7}{2}$  می‌باشد که به عنوان یک "قاعده سرانگشتی"<sup>۲</sup> برای تعداد جملاتی که لازم است به خطای  $0.1\%$  محدود گردند، معین می‌شود. بنابراین برای  $[A]$  برابر با  $13.8155$  تعداد  $53$  جمله در مجموع نیاز است. مقدار مطلق آخرین جمله اضافه شده به مجموع در این نمونه کمتر از  $6.4 \times 10^{-10}$  بوده که در مقایسه با  $10^{-6}$  بسیار ناچیز است. مشاهده می‌شود که نرم معمولاً کمتر از ماکزیمم مقدار و در بیشتر موارد  $30$  جمله یا کمتر از آن جهت بسط سری نیاز است.

همانگونه که قبلاً ذکر شد، در کاربردهای قبلی روش ماتریس نمایی، محدودیت اندازه نرم ماتریس گذار در بررسی عملکرد هسته‌ها با مقدار ویژه بزرگ به وسیله تقسیم ماتریس بر  $2$  تسهیل می‌گردید و مقدار نهایی تابع ماتریس نمایی

---

1 Stirling's approximation

2 rule of thumb

با تکرار مربع کردن نتایج تابع ماتریس نمایی میانی به دست می‌آید. در کاربردهای حاضر، پیشنهاد بال<sup>۱</sup> و آدامز<sup>۲</sup> که گذارهای شامل ایزوتوپ‌ها با ثوابت واپاشی بزرگ به طور لحظه‌ای تطابق دارد، که اگر  $A \rightarrow B \rightarrow C$  و اگر ثابت واپاشی برای هسته B بزرگ باشد، ماتریس به صورت تولید C از A به طور مستقیم دوباره بازنویسی می‌شود و غلظت هسته B به وسیله روش‌های دیگر مشخص می‌گردد. به طور مشابه، اگر ثابت زمانی برای هسته A بسیار بزرگ باشد، ماتریس گذار به صورت اینکه مقدار اولیه ایزوتوپ B در لحظه آغاز برابر با مقدار A+B بوده و تنها گذار  $B \rightarrow C$  با روش ماتریس نمایی مشخص می‌گردد. این کاهش ماتریس گذار و تولید حل معادلات با روش ماتریس نمایی صورت می‌پذیرد.

Ball ۱

Adams ۲



## ۸-۱- محاسبات مصرف سوخت عناصر با نیمه عمر بلند مدت در محیط غیر همگن [۶-۹]

در بعضی مسائل که شامل انباشت رادیواکتیویته عناصر با آهنگ ثابت بوده، مهندسين علاقمند به حل غير همگن معادلات ديفرانسیل مرتبه اول (معادلات بیت‌من) می‌باشند. بدین منظور با اضافه کردن ثابت  $B$  به ماتریس معادلات همگن، معادله (۵-۸) تولید می‌شود.

$$\dot{X} = AX + B \quad (۵-۸)$$

معادله (۵-۸) دارای یک راه حل عمومی به صورت معادله (۶-۸) می‌باشد.

$$X(t) = [\exp(At) - I]A^{-1}B \quad (۶-۸)$$

که در صورت وجود  $A^{-1}$ ، سری نامتناهی به صورت تابع ماتریس نمایی معادله (۷-۸) نمایش داده می‌شود.

$$X(t) = [I + \frac{At}{2!} + \frac{(At)^2}{3!} + \dots]Bt = \left( \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(At)^m}{(m+1)!} \right)Bt \quad (7-8)$$

راه حل عمومی معادله (۷-۸) می‌تواند به صورت جمع یک سری نامتناهی به فرم معادله (۸-۸) ارائه گردد.

$$x_i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} D_i^n \quad (8-8)$$

که اجزا آن توسط یک رابطه بازگشتی به فرم معادلات (۹-۸) و (۱۰-۸) بیان می‌گردد.

$$D_i^1 = b_i t \quad (9-8)$$



$$D_i^{n+1} = \frac{t}{n+1} \sum_{j=1}^N a_{ij} D_j^n \quad (۸-۱۰)$$

که در روابط فوق،  $a_{ij}$  آرایه ماتریس گذار، ثابت یک بعدی برای تشکیل گونه  $i$  از گونه  $j$  می‌باشد. این الگوریتم تنها نیاز به ذخیره یک بردار  $D^n$  جهت حل معادلات دارد. به هنگام استفاده از رابطه (۸-۸) ضروری است که از دقت جواب‌ها به هنگام اضافه یا کم کردن تعداد زیادی از تساوی‌های برابر اطمینان حاصل کرد.

### ۹- تشریح روش ریاضی حل معادلات بیت‌من برای عناصر با نیمه عمر کوتاه مدت [۶]

همانگونه که در گزارشات پیشین بدان اشاره شد، جهت حل معادلات بیت‌من برای عناصر با نیمه عمر بلند مدت از روش بازگشتی استفاده می‌شود. روش‌های عددی ذکر شده در گزارش‌های قبلی تنها برای به دست آوردن غلظت ایزوتوپ‌های بلند مدتی که نرم ماتریس گذار آنها کمتر از  $2 \times (\ln 1000)$  بوده قابل استفاده می‌باشد. به هنگام استفاده از روش

بازگشتی ضروری است که از دقت جواب‌ها به هنگام اضافه یا کم کردن تعداد زیادی از تساوی‌های متشابه اطمینان حاصل کرد. در گذشته، این عمل با تقسیم بر ۲ کردن بازه‌های زمانی جهت کمتر کردن نرم ماتریس آنها برای محاسبه ماتریس نمایی در بازه‌های زمانی کوچک، و مربع کردن نتایج ماتریس جهت مشخص کردن بازه زمانی مطلوب صورت می‌پذیرفت. چنین روشی برای محاسبات شامل تعداد زیادی از هسته‌ها (عناصر با نیمه عمر کوتاه مدت) غیر کاربردی می‌باشد. اگرچه این محاسبات برای دسته‌ای از ایزوتوپ‌ها با نیمه عمر کوتاه مدت با شرایط تعادل و گذار مشخص، قابل استفاده می‌باشد.

ایزوتوپ‌های کوتاه مدت با استفاده از ترکیب‌های خطی همگن و راه حل‌های مخصوص معادلات زنجیره نوکلئید که با استفاده از روش‌های جایگزین محاسبه می‌شوند، به دست می‌آیند. مقدار یک ایزوتوپ کوتاه مدت (که در ابتدای بازه زمانی موجود باشد) در انتهای بازه زمانی با استفاده از شکل کلی معادله بیت‌من که با زنجیره‌های مشخص رو به جلو سر

و کار دارد، به دست می‌آید. رفتار کلی با جستجو در ماتریس گذار و تشکیل یک زنجیره از تمامی پیشینه‌های کوتاه مدت یک ایزوتوپ به دست می‌آید. زنجیره به هنگامی که هیچ‌گونه پیشینه کوتاه مدتی از ایزوتوپ باقی نمانده باشد، پایان می‌یابد. الگوریتم همچنین شرایط بررسی رفتار دو ایزوتوپ با مقادیر یکسان ثابت واپاشی و نیز رفتار چرخشی زنجیره را نیز دارا می‌باشد.

حل معادله بیت‌من برای آمین عضو یک زنجیره در زمان  $t$  به صورت زیر می‌باشد (در این قسمت از تقریب نمایی جهت حل معادلات بهره نبرده و با استفاده از جواب ماتریس نمایی به حل معادلات پرداخته‌ایم).

$$N_i(t) = N_i(0)e^{-d_i t} + \sum_{k=1}^{i-1} N_k(0) \left[ \sum_{j=k}^{i-1} \frac{\exp(-d_j t) - \exp(-d_i t)}{(d_i - d_j)} a_{j+1,j} \prod_{\substack{n=k \\ n \neq j}}^{i-1} \frac{a_{n+1,n}}{d_n - d_j} \right] \quad (1-9)$$

که  $N_j(0)$  مقدار اولیه ایزوتوپ زام و اعضای زنجیره‌ای است که برای ساده‌سازی شمارش شده‌اند. راه حل این روش با استفاده از همبسته کردن مقدار  $\prod_{n=k}^{i-1} a_{n+1,n}$  با حاصل ضرب  $a_{k+1,k}, a_{k+2,k+1} \dots a_{i,i-1}$  و حاصل ضرب واحد برابر با حاصل ضرب تهی ( $k \geq i$ ) به دست می‌آید. نماد  $a_{i,j}$  برای ثابت واپاشی مرتبه اول همانند نماد به کار رفته در محاسبات ایزوتوپ-های بلند مدت بوده و  $d_i = -a_{i,i}$  می‌باشد. در کاربرد حاضر (تخمین غلظت ایزوتوپ‌های با نیمه عمر کوتاه) معادله (۹-۱) با ضرب و تقسیم بر  $\prod_{n=k}^{i-1} d_n$  به صورت معادله (۹-۲) نوشته می‌شود.

$$N_i(t) = N_i(0)e^{-d_i t} + \sum_{k=1}^{i-1} N_k(0) \prod_{n=k}^{i-1} \frac{a_{n+1,n}}{d_n} \left[ \sum_{j=k}^{i-1} \frac{\exp(-d_j t) - \exp(-d_i t)}{(d_i - d_j)} a_{j+1,j} \prod_{\substack{n=k \\ n \neq j}}^{i-1} \frac{d_n}{d_n - d_j} \right] \quad (2-9)$$

قسمت اول معادله (۲-۹) با اهمیت بوده زیرا بیانگر کسر اتم‌های ایزوتوپ  $K$  که یک دنباله واپاشی و جذب را دنبال می‌کند، می‌باشد. اگر این مقدار کمتر از  $10^{-6}$  باشد، سهم نوکلئید  $K$  و پیشینیان آن در غلظت ایزوتوپ  $A$  در نظر گرفته نمی‌شود. جمع داخلی در معادله (۲-۷) با استفاده از اعداد صحیح با دقت مضاعف جهت نگه داشتن دقت محاسبات انجام می‌شود. این فرآیند (انجام جمع با دقت مضاعف) برای تکمیل جمع بیرونی به علت مثبت بودن تمامی بخش‌ها لازم نمی‌باشد. مشکلات توصیف شده توسط Vondy در کاربرد روش تحلیلی حل معادلات بیت‌من برای تمامی مقادیر کوچک  $d_i t$  در کاربرد حاضر تاکنون گزارش نشده است. هنگامی که این شرایط اتفاق می‌افتد، روش ماتریس نمایی به کار می‌رود. روش ماتریس نمایی و روش تحلیلی حل معادلات بیت‌من یکدیگر را کامل می‌کنند، برای معادلاتی که مقادیر مشخصه معادلات کوچک باشد روش ماتریس نمایی جواب بسیار دقیقی دارد در صورتی که روش تحلیلی حل معادلات بیت‌من در این مواقع خطای زیادی دارد. به عنوان مثال در جایی که دو ایزوتوپ مقادیر ثابت برداشتی یکسان ( $d_i = d_j$ ) دارند، جمع دوم در معادله (۲-۹) به صورت زیر تغییر می‌کند.

$$\sum_{j=k}^{i-1} d_j t e^{-d_j t} \prod_{\substack{n=k \\ n \neq j}}^{i-1} \frac{d_n}{d_n - d_j} \quad (3-9)$$

یک بیان مشابه برای حالتی که  $d_n = d_j$  است، نیز قابل استخراج می‌باشد. این شکل‌ها از معادلات بیت‌من برای هنگامی که دو ایزوتوپ در یک زنجیره دارای عناصر قطری مشابه باشد و یا با یک زنجیره چرخشی که در آن یک ایزوتوپ به عنوان پیشینه خود به شمار می‌آید، نیز به کار می‌رود.

در مواقعی که یک ایزوتوپ کوتاه مدت یک پیشینه بلند مدت دارد، یک روش دوم جایگزین مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش فرض می‌شود، دختر هسته کوتاه مدت با مادر خود در انتهای هر بازه زمانی در تعادل باشد. سپس غلظت مادر هسته از روابط حاکم بر محاسبه غلظت عناصر بلند مدت به دست می‌آید و غلظت عنصر کوتاه مدت با مساوی صفر قرار دادن رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\dot{\mathbf{x}}_i = 0 = \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j \quad (4-9)$$

معادله (۴-۹) یک سری از معادلات جبری خطی برای غلظت عناصر کوتاه مدت بوده که با استفاده از روش گوس-سایدل حل می‌شوند. ضرایب معادله (۴-۹) دارای خاصیت منفی بودن تمامی عناصر قطری و مثبت بودن عناصر غیرقطری می‌باشد. الگوریتم حل شامل معکوس‌سازی معادلات (۴-۹) و استفاده از مقادیر فرضی یا قبلاً محاسبه شده برای غلظت‌های نامشخص جهت به دست آوری مقادیر بهبود یافته (معلوم) به شرح معادله زیر می‌باشد.

$$x_i^{k+1} = -\frac{1}{a_{ii}} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N a_{ij} x_j^k \quad (5-9)$$

روش مبتنی بر تکرار سریعاً همگرا می‌شود، با توجه به اینکه برای این ایزوتوپ‌های کوتاه مدت، معمولاً زنجیره چرخشی اتفاق نمی‌افتد، فرآیند محاسبه به یک حل خطی کاهش می‌یابد.

### ۹-۱- محاسبات مصرف سوخت عناصر با نیمه عمر کوتاه مدت در محیط غیر همگن [۹-۶]

در بعضی مسائل که شامل انباشت رادیواکتیویته عناصر با آهنگ ثابت بوده، مهندسين علاقمند به حل غیر همگن معادلات دیفرانسیل مرتبه اول (معادلات بیت‌من) می‌باشند. بدین منظور با اضافه کردن ثابت  $B$  به ماتریس معادلات همگن، معادله (۹-۶) تولید می‌شود.

$$\dot{X} = AX + B \quad (۹-۶)$$

معادله (۹-۶) دارای یک راه حل عمومی به صورت معادله (۹-۷) می‌باشد.



$$X(t) = [\exp(At) - I]A^{-1}B \quad (7-9)$$

که در صورت وجود  $A^{-1}$ ، سری نامتناهی به صورت تابع ماتریس نمایی معادله (۸-۹) نمایش داده می‌شود.

$$X(t) = [I + \frac{At}{2!} + \frac{(At)^2}{3!} + \dots]Bt = (\sum_{m=0}^{\infty} \frac{(At)^m}{(m+1)!})Bt \quad (8-9)$$

معادله فوق را می‌توان با استفاده از روش بازگشتی برای مقادیر مختلف به دست آورد.

۹-۱-۱- تشریح روش بازگشتی [۶]

دو مشکل عمده در حل معادلات مصرف سوخت به روش ماتریس نمایی وجود دارد:

۱- مقدار زیاد حافظه جهت ذخیره‌سازی ماتریس گذار و تابع ماتریس نمایی نیاز است.

۲- مشکلات محاسباتی در حل معادلات با مقادیر ویژه گسترده به روش ماتریس نمایی وجود دارد.

با گسترش روش بازگشتی بدون نیاز به ذخیره تمامی آرایه‌های ماتریس، تولید و ذخیره تابع ماتریس نمایی تسهیل گردیده است. بنابراین، این امکان وجود دارد که برای یک هسته رابطه‌ای نظیر معادله زیر را از معادلات مصرف سوخت جدا کرد:

$$X_i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_i^n \quad (9-9)$$

که  $c_i^n$  به وسیله رابطه بازگشتی زیر تولید می‌شود:

$$c_i^0 = X_i(0) \quad (10-9)$$

$$c_i^{n+1} = \frac{t}{n+1} \sum_{j=1}^N a_{ij} c_j^n \quad (11-9)$$

که در روابط فوق،  $a_{ij}$  آرایه ماتریس گذار، ثابت یک بعدی برای تشکیل گونه  $i$  از گونه  $j$  می‌باشد. این الگوریتم تنها نیاز به ذخیره یک بردار  $c^n$  جهت حل معادلات دارد. به هنگام استفاده از رابطه (9-9) به علت مشکلات محاسباتی در حل معادلات با مقادیر ویژه گسترده ضروری است که از دقت جواب‌ها به هنگام اضافه یا کم کردن تعداد زیادی از تساوی‌های برابر اطمینان حاصل کرد.

## ۹-۲- ساختار ماتریس گذار [۴]

کتابخانه بسیار گسترده‌ای از خواص هسته‌ای ایزوتوپ‌های رادیواکتیویته برای استفاده در کد ORIGEN در دسترس بوده که در این پژوهش به عنوان پایگاه داده‌های هسته‌ای از آن استفاده می‌شود. داده‌ها به صورت نیمه عمرهای واپاشی، کسرهای گذار جهت تولید یک ذره هسته‌ای دلخواه، سطح مقاطع، و کسرهای جذب که منجر به تولید هسته‌های خاص می‌گردد، وجود دارند. این داده‌ها توسط برنامه از کتابخانه جهت استفاده در روابط ریاضی توسط برنامه خوانده می‌شود.

این امکان جهت محاسبه غلظت نزدیک به ۸۰۰ هسته با کد حاضر وجود دارد. اگرچه، به طور مستقیم ساختار کلی ماتریس گذار نیاز به ذخیره آرایه  $800 \times 800$  دارد که این نیز به نوبه خود نیازمند به حافظه بزرگ کامپیوتری جهت انجام محاسبات دارد. به عبارتی دیگر، ماتریس گذار به طور عادی بسیار کم پشت بوده و حافظه مورد نیاز جهت ذخیره‌سازی با

ثبت تنها عناصر غیر صفر ماتریس و دو رابطه کوچک برداری جهت استفاده برای مکان یابی عناصر کاهش صورت پذیرد. در نتیجه زیر روالی جهت تولید ماتریس گذار فشرده شده و دو بردار ذخیره نیاز است.

زیرروال فوق داده‌های کتابخانه با خواندن یک عدد شش رقمی معرف هسته که اطلاعاتی نظیر نیمه عمر و کسر هر واپاشی که توسط فرآیندهای رقابتی صورت می‌پذیرد، سطح مقطع‌های جذب برای واکنش‌هایی نظیر  $(n,\gamma), (n,\alpha), (n,p), (n,2n), (n,3n), (n,fission)$  برای یکی از چهار طیف راکتور موجود، انجام می‌دهد. عدد شش رقمی مشخصه عنصر به صورت  $Z \times 10000 + W \times 10 + IS$  بوده که در آن  $Z$  عدد اتمی،  $W$  وزن اتمی (در واحد جرم اتمی کامل)، و  $IS$  به صورت ۰ یا ۱ که به ترتیب معرف حالت پایه یا حالت شبه پایدار می‌باشد. این اطلاعات به صورت زیر در داخل ماتریس گذار فشرده جایگذاری می‌گردد.

در ابتدا، از نیمه عمر جهت محاسبه ثابت واپاشی رادیو اکتیویته  $\lambda$  استفاده می‌شود. آهنگ ثوابت یک بعدی برای فرآیندهای رقابتی واپاشی با ضرب  $\lambda$  در کسر گذار به حالت نهایی محاسبه می‌گردد. هسته‌های تولیدی از گذارهای هسته‌ای با جمع یک ثابت مناسب به عدد شش رقمی مشخصه هسته برای هسته مادر مشخص می‌گردند. (بطور مثال: برای واپاشی  $\beta^-$ ،  $10000$  به عدد مشخصه مادر اضافه می‌گردد، برای گیراندازی نوترون  $10$  واحد یا برای گذارهای مشابه مقدار  $1$  - اضافه می‌گردد). دو آرایه تولید می‌گردد، آرایه اول شامل تمام محصولات که به طور مستقیم از هسته نوعی بوسیله گذارهای در نظر گرفته شده در کتابخانه تولید می‌شود، و آرایه دوم شامل آهنگ ثوابت یک بعدی برای گذارهای مشابه.

هنگامی که این آرایه‌ها ساخته شدند، یک جستجو در آرایه عناصر تولیدی تمامی مادر هسته‌های یک عنصر خاص را مشخص می‌کند. هنگامی که یک مادر هسته عنصر موقعیتیابی شد، مقدار ضریب متشابه  $a_{ij}$  در ماتریس گذار برابر با

آهنگ ثابت یک بعدی برای گذارهای مشابه می‌شود. این فرآیند به وسیله افزایش یک شاخص  $N$  که معرف ثابت مخصوص بازه زمانی است، صورت می‌پذیرد. ثوابت به صورت پشت سر هم در یک آرایه یک بعدی ذخیره می‌شوند و تمامی تعداد ثوابت برای تولید هسته نوعی در آرایه سوم ذخیره می‌گردد. هنگامی که تمامی ثوابت برای هر هسته ذخیره گردید، آرایه سوم جهت مشخص کردن تعداد جمعی ثوابت ماتریسی به میزان تمامی ایزوتوپ‌ها و شامل هسته نوعی تبدیل می‌گردد. پس از انجام این فرآیند، آرایه سوم یک لیست افزایشی یکنواخت اعداد صحیح است که مقدار نهایی تعداد غیر صفر، عناصر غیر قطری در ماتریس گذار می‌باشد. این مقدار نهایی به طور جداگانه به عنوان یک متغیر نوعی نگهداری می‌شود. برای تسهیل محاسباتی مقدار عناصر ماتریس قطری در بردار جداگانه‌ای ذخیره می‌گردد. برای انجام

تکثیر ماتریس گذار به وسیله یک بردار  $(\dot{x}_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j)$  نیازمند به اجرای الگوریتم تشریحی در بخش قبلی می‌باشد.

دو دسته از داده‌ها در کتابخانه هسته‌ای جدا از روش توصیف شده در نظر گرفته می‌شود. در نمونه واکنش‌های نوترون القایی، قبل از نرخ ثوابت یک بعدی به عنوان محصولات شار و سطح مقطع‌ها نیاز به محاسبه شار می‌باشد. در زمانی که ماتریس تولید شده است، شار نوترون نامشخص است. همچنین برای انجام محاسبات مصرف سوخت، باید از تغییرات شار در گذر زمان جلوگیری شود. بنابراین هنگامی که عناصر ماتریس غیر صفر غیر قطری برای عنصر نوعی ذخیره می‌گردد، در ابتدا تمامی آنها برای تشکیل به وسیله واپاشی رادیواکتیویته گروه‌بندی و سپس به وسیله آنهایی که برای تشکیل عنصر نوعی بوسیله گیراندازی نوترونی، پیگیری گردد. بردار دیگری تولید و به روش مشابه به صورت بردار سوم استفاده می‌شود. آن در ابتدا تعداد مادر هسته یک ایزوتوپ نوعی است و تفاوت بردار سوم با این بردار تعداد ثوابت برای تشکیل عنصر نوعی بر اثر گیراندازی نوترون را نشان می‌دهد.



دسته دوم که جدا از روش استاندارد برای تولید ماتریس گذار مورد بررسی قرار می‌گیرد، شامل ضرایب متشابه برای بهره پاره‌های شکافت می‌باشد. کتابخانه داده‌های هسته‌ای شامل بهره‌های شکافت برای تشکیل ایزوتوپ‌های پاره‌های شکافت از تعدادی هسته‌های شکافتنی می‌باشد. هنگامی که این بهره‌ها ضرب در سطح مقطع شکافت برای هسته شکافا و شار نوترون می‌گردد، نتایج به صورت یک آهنگ ثابت یک بعدی برای تولید ایزوتوپ پاره شکافت A به وسیله شکافت هسته L می‌گردد. در اینجا، برای این داده‌ها تولید آرایه اول و آرایه دوم و عملیات جستجو در آن لازم نیست. این ثوابت به صورت مستقیم در بردار A قرار داده می‌شوند و مقدار مشابه L که هسته‌های شکافته شده را مشخص می‌کند.

۹-۲-۱- مفهوم بردار در ساختار برنامه [۴]

قبل از توصیف هر گونه عملی یا ساختاری در کد ضروری است که با مفهوم بردار در ساختار کد آشنا شویم. یک بردار یک آرایه یک بعدی است که مقدار هر هسته را در خروجی نمایش می‌دهد. برای مثال در نمونه اول در جدول شماره ۲ که شامل آکتینیدها، محصولات فعال ساز و پاره‌های شکافت می‌باشد، یک بردار مقادیر تمامی نوکلئیدها را برای یک مجتمع سوخت مصرفی PWR پس از ۱۵۰ روز بعد از زمان پرتودهی نمایش می‌دهد. در نمونه فوق مقادیر ۱۶۷۶ هسته توسط بردار نشان داده می‌شود.

جدول شماره ۱: توصیف آرایه‌های موجود در ساختار برنامه

Alphabetic character string	Description
AAAA	Number of output vectors
BBBB	Maximum number of nuclide
CCCC	Maximum number of non-zero cross-section and decay reactions per nuclide
DDDD	Total number of non-zero matrix elements
EEEE	Number of non--zero fission product yields
FFFF	Maximum number of fission products
GGGG	Maximum number of actinides + 1

HHHH	13- LC (See C above)
IIII	Maximum number of non-zero elements for long-lived nuclides (Array AP)
JJJJ	Number of storage vectors
KKKK	Number of non-zero natural abundances
LLLL	Number of non-zero photon yields
MMMM	Maximum number of light nuclides
NNNN	Maximum number of variable multipliers in RXULV
OOOO	Number of actinides with both direct fission product yields and a variable fission cross section(usually 3; can= 4 for plutonium-enriched thorium fuels)

جدول شماره ۲: ابعاد بردارهای مختلف برای نمونه‌های متفاوت در کد ORIGEN

Parameter	Case															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Segments considered <sup>1</sup>	AP+A+ FP	AP+A+ FP	AP+A+ FP	A+ FP	A+ FP	A+ FP	AP +A	A	AP	AP+A+ FP	A	AP	FP	A+F P Or A+ AP	AP+A+ FP	AP+A+ FP
Type of Calculation <sup>2</sup>	Any	Any	Any	Any	Any	Any	Any	Any	Any	Decay	Decay	Decay	Decay	Any	Any	Any
Number of actinides with direct fission product yields	4	6	8	4	6	8	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4
	Alphabetic array dimensions <sup>3</sup>															
AAAA	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
BBBB	1676	1676	1676	100	100	100	820	13	70	1676	132	700	800	100	1676	1676
CCCC	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
DDDD <sup>4</sup>	6400	7900	9600	500	660	820	100	40	15	1700	200	600	100	500	8000	9996

				0	0	0	0	0	00				0	0		
EEEE <sup>4</sup>	3300	5000	6600	330	500	660	4	4	4	4	4	4	4	330	5000	6600
FFFF <sup>4</sup>	800	800	800	800	800	800	4	4	4	800	4	4	800	800	800	800
GGGG <sup>4</sup>	132	132	132	132	132	132	132	13	2	4	132	132	4	4	132	132
HHHH	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
III <sup>4,5</sup>	3500	4200	5000	250	310	300	170	50	13		600	500	250	250	4500	4500
JJJJ	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
KKKK <sup>4</sup>	450	450	450	160	160	160	300	12	30		450	12	300	160	300	450
LLLL <sup>4</sup>	8000	8000	8000	470	470	470	470	15	33		8000	150	330	330	470	8000
MMMM <sup>4</sup>	700	700	700	4	4	4	700	4	70		700	4	700	4	700	700
NNNN <sup>4</sup>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
OOOO <sup>5</sup>	3	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	4	6
Approximate amount of core required for execution (by tes) <sup>7</sup>	546	560	576	396	412	420	332	18	29		494	182	206	324	196	560k
				k	k	k	k	2k	0k			k	k	k	k	

1- AP=activation products; A= actinides and daughters; FP= fission products



2- Any= either irradiation( Flux or Power) or decay can be used. Decay= no irradiation; decay only.

3- See Table 1

4- Array dimension should be evenly divisible by 4 to ensure word boundary alignments.

5- Larger dimensions may be required for small irradiation or decay time step. in limit of zero time, IIII=DDDD

6- Depends on reactor being considered.

7- can vary, depending on the number of input/output units and buffer sizes

### ۹-۳- کتابخانه داده‌ها [۴ و ۷]

همانطور که در گزارش پیشین اشاره شد، کد ORIGIN، جهت انجام محاسبات از یک پایگاه داده متنی استفاده می‌کند که داده‌های آن در هر یک از کتابخانه‌ها به ترتیب در دسته‌های محصول فعال ساز، اکتینیدها و پاره‌های شکافت قرار گرفته‌اند.

هسته‌ها در سه گروه کلی دسته‌بندی می‌شوند:

۱- محصول فعال‌ساز: این دسته تقریباً شامل همه هسته‌های طبیعی، محصولات جذب نوترونی و دختر هسته‌های این محصولات می‌باشد. این بخش به طور کلی برای مواد ساختاری (نظیر Zircaloy) و ناخالصی‌های سوخت استفاده می‌شود.

۲- اکتینیدها: شامل ایزوتوپ‌های عناصر توریم (عدد اتمی ۹۰) الی اینیشتینیم (عدد اتمی ۹۹) که به طور قابل ملاحظه‌ای در سوخت‌های مصرفی راکتور به علاوه دختر هسته‌های واپاشی آن وجود دارد.

۳- پاره‌های شکافت: شامل هسته‌های تولیدی به وسیله شکافت اکتینیدها به علاوه محصولات واپاشی و گیراندازی آنها است.



۹-۳-۱- فایل واپاشی [۴ و ۷]

اطلاعات ذخیره شده در فایل مذکور شامل دو دسته داده برای هر عنصر می باشد. دسته اول شامل:

۱- شماره کتابخانه: شماره کتابخانه جهت محاسبات واپاشی.

۲- شماره عنصر: یک شماره شش رقمی که معرف شماره عنصر می باشد.

۳- واحد زمانی که معرف واپاشی عنصر در واحد زمانی می باشد. که به صورت جدول زیر شاخص گذاری شده اند:

جدول شماره ۳: شاخصه‌های معرف واحدهای زمانی

Number	Description
1	seconds
2	minutes
3	hours
4	days
5	years
6	stable
7	$10^3$ years(KY)
8	$10^6$ years(MY)
9	$10^9$ years(GY)

۴- ثابت واپاشی: که توسط واحد زمانی ستون قبل (شماره ۳) به مقدار واقعی در واحد زمان محاسبه می‌شود.

۵- کسر شاخه‌ای واپاشی برای واپاشی بتا در دختر هسته‌ها به حالت برانگیخته طولانی مدت.

۶- کسر شاخه‌ای واپاشی‌های منتج شده از گسیل پوزیترون یا گیراندازی الکترون.

۷- کسر شاخه‌ای واپاشی برای واپاشی گسیل پوزیترون یا گیراندازی الکترون در دختر هسته‌ها به حالت برانگیخته طولانی مدت.

۸- کسر شاخه‌ای واپاشی برای واپاشی آلفا.

۹- کسر شاخه‌ای واپاشی حالت برانگیخته به حالت پایه.

در دسته دوم اطلاعاتی شامل:

۱- کسر شاخه‌ای واپاشی برای شکافت خودبخود.

۲- کسر شاخه‌ای واپاشی برای واپاشی (بتا + نوترون).

۳- میانگین، کل گرمای قابل حصول در هر واپاشی در واحد MeV (به غیر از نوترینو).

۴- ترکیب ایزوتوپی طبیعی رخ داده در مورد هر عنصر در واحد درصد اتمی.

۵ و ۶- بیشینه غلظت مجاز رادیوهسته در آب یا هوا در واحدهای کوری برترمکعب آب یا هوا موجود.

۹-۳-۲- فایل سطح مقطع و داده‌های بهره شکافت [۴ و ۷]

این فایل شامل دو دسته داده بوده که در دسته اول:

۱- شماره کتابخانه: شماره کتابخانه جهت محاسبات واپاشی.

۲- شماره عنصر: یک شماره شش رقمی که معرف شماره عنصر می‌باشد.

- ۳- سطح مقطع یک گروهی واکنش  $(n, \gamma)$  به حالت پایه.
- ۴- سطح مقطع یک گروهی واکنش  $(n, 2n)$  به حالت پایه.
- ۵- سطح مقطع یک گروهی واکنش  $(n, 3n)$  به حالت پایه (بخش اکتینیدها).
- ۶- سطح مقطع یک گروهی واکنش  $(n, \alpha)$  به حالت پایه (بخش محصولات فعال ساز و پاره‌های شکافت).
- ۷- سطح مقطع یک گروهی واکنش  $(n, \text{fission})$  به حالت پایه (بخش اکتینیدها).
- ۸- سطح مقطع یک گروهی واکنش  $(n, p)$  به حالت پایه (بخش محصولات فعال ساز و پاره‌های شکافت).
- ۹- سطح مقطع یک گروهی واکنش  $(n, \gamma)$  به حالت برانگیخته.

۱۰- سطح مقطع یک گروهی واکنش  $(n,2n)$  به حالت برانگیخته.

۱۱- شاخصی که نمایانگر آن است که بهره شکافت برای هر عنصر در ادامه وجود دارد یا خیر.

دسته دوم که فقط در بخش پاره‌های شکافت موجود است شامل اطلاعاتی نظیر:

۱- بهره شکافت از عناصر شکافت‌پذیر در گروه‌های زیر برای هر عنصر به ترتیب جدول زیر:

جدول شماره ۴: شاخصه‌ها و نوع عناصر شکافت‌پذیر در نظر گرفته شده

I	Fissile species
1	Th-232
2	U-233
3	U-235
4	U-238

5	Pu-239
6	Pu-241
7	Cm-245
8	Cf-249

۹-۳-۳- فایل مربوط به داده‌های فوتون [۴ و ۷]

در این فایل داده‌ها برای ساختار ۱۸ گروهی به ترتیب زیر ذخیره شده‌اند:

۱- شماره کتابخانه: شماره کتابخانه جهت محاسبات واپاشی.

۲- شماره عنصر: یک شماره شش رقمی که معرف شماره عنصر می‌باشد.

۳- تعداد گروه‌های انرژی فوتون به ترتیب جدول زیر:

جدول شماره ۵: گروه‌بندی انرژی فوتون

Group	Group energy(MeV)		
	Lower boundary	Upper boundary	Average
1	0.0	2.0000E-02	1.0000E-02
2	2.0000E-02	3.0000E-02	2.5000E-02
3	3.0000E-02	4.5000E-02	3.7500E-02
4	4.5000E-02	7.0000E-02	5.7500E-02
5	7.0000E-02	1.0000E-01	8.7500E-02
6	1.0000E-01	1.5000E-01	1.2500E-01
7	1.5000E-01	3.0000E-01	2.2500E-01
8	3.0000E-01	4.5000E-01	3.7500E-01
9	4.5000E-01	7.0000E-01	5.7500E-01
10	7.0000E-01	1.0000E+00	8.5000E-01
11	1.0000E+00	1.5000E+00	1.2500E+00
12	1.5000E+00	2.0000E+00	1.7500E+00



13	2.0000E+00	2.5000E+00	2.2500E+00
14	2.5000E+00	3.0000E+00	2.7500E+00
15	3.0000E+00	4.0000E+00	3.5000E+00
16	4.0000E+00	6.0000E+00	5.0000E+00
17	6.0000E+00	8.0000E+00	7.0000E+00
18	8.0000E+00	1.1000E+01	9.5000E+00

۴- شدت فوتون در هر گروه.

پس از استخراج داده‌های مورد نیاز و آشنایی با ساختار آنها، الگوریتمی جهت محاسبه غلظت عناصر با نیمه عمر بلند مدت طراحی گردید که در ادامه به تفصیل معرفی می‌گردد.

## ۱۰- ساختار برنامه

مشابه با ساختار کد ORIGIN، در ابتدا داده‌های مورد نیاز برای اجرای برنامه خوانده و در حافظه ذخیره گشته و در ادامه برای اجرای برنامه فراخوانی می‌گردد. این داده‌ها عبارتند از: فایل‌های کتابخانه عناصر شامل داده‌های واپاشی و اطلاعات سطح مقطع یک گروهی عناصر موجود در کتابخانه و نیز اطلاعات مربوط به کتابخانه فوتون، زمان مورد نظر برای انجام محاسبات، شار یا توان مربوط به سیستم و نیز تعداد بازه‌های مورد نیاز برای انجام واپاشی.

## ۱۰-۱- الگوریتم طراحی شده

در ابتدا پس از گرفتن داده‌های مورد نیاز برای انجام محاسبات از ورودی برنامه، داده‌های مورد استفاده در روند محاسبات را از کتابخانه خوانده و سپس بر مبنای ترکیب ایزوتوپی اولیه ورودی داده شده توسط کاربر به محاسبه شار

پرداخته، سپس از روی شار تخمینی آهنگ واکنش‌های یک گروهی را به دست آورده و پس از آن به انجام محاسبات می‌پردازد.

ساختار برنامه به شرح زیر می‌باشد:

- استفاده از اطلاعات کتابخانه واپاشی هسته‌ای به قرار زیر:

با استفاده از نیمه عمر واپاشی عنصر مورد نظر، آهنگ واپاشی عنصر را برای واکنش‌های در نظر گرفته شده در کتابخانه مورد محاسبه قرار می‌دهیم.

پس از خواندن اطلاعات مربوط به هر عنصر، در ابتدا ثابت واپاشی عنصر مربوطه بر مبنای واحد  $S^{-1}$  (معکوس ثانیه) محاسبه می‌شود:

اگر واحد زمانی که معرف واپاشی عنصر در واحد زمانی بوده به ترتیب مطابق با جدول زیر باشند، اعداد ستون دوم به عنوان ضریب در معادله محاسبه ثابت واپاشی ضرب می‌شوند:

جدول شماره ۶: ضرایب شاخصه‌های معرف واحدهای زمانی

Time Unit	Coefficient
1	1
2	60
3	3600
4	86400
5	3.15576E7
6	---
7	3.15576E10
8	3.15576E13
9	3.15576E16

و با توجه به ثابت واپاشی خوانده شده در ورودی به مقدار واقعی در واحد زمان محاسبه شده و بر مبنای آن زنجیره واپاشی و ثابت واپاشی عنصری به عنصر دیگر توسط روابط زیر استخراج می‌شود.

۱- واپاشی بتا به حالت برانگیخته.

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} X^*$$

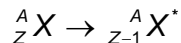
در این حالت به عدد اتمی یک واحد افزوده و به حالت برانگیخته عنصری دیگر تبدیل می‌گردد.

۲- واپاشی‌های منتج شده از گسیل پوزیترون یا گیراندازی الکترون.

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} X$$

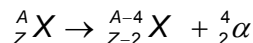
در این حالت از عدد اتمی یک واحد کم می‌شود.

۳- واپاشی گسیل پوزیترون یا گیراندازی الکترون در دختر هسته‌ها به حالت برانگیخته طولانی مدت.



در این حالت از عدد اتمی یک واحد کم و به حالت برانگیخته عنصری دیگر تبدیل می‌گردد.

۴- واپاشی آلفا



در این حالت از عدد جرمی چهار واحد و از عدد اتمی دو واحد کم می‌شود. همچنین عنصر آلفا نیز به عنوان محصول واپاشی نیز به زنجیره اضافه می‌گردد.

۵- واپاشی حالت برانگیخته به حالت پایه

$${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X$$

در این حالت عنصر بدون هیچ گونه تغییری باقی می ماند.

۶- واپاشی برای شکافت خودبخود

در این بخش یک عنصر مجازی با عدد 162500 در بخش اکتینیدها به عنوان محصول در نظر گرفته شده است.

۷- واپاشی برای واپاشی (بتا + نوترون)

$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-1}_{Z+1} X$$

در این حالت یک واحد از عدد جرمی کم و یک واحد به عدد اتمی اضافه می گردد.

۸- واپاشی بتا به حالت پایه.

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} X$$

در این حالت به عدد اتمی یک واحد افزوده می‌گردد.

- استفاده از اطلاعات کتابخانه سطح مقطع هسته‌ای به قرار زیر:

در این بخش با استفاده از اطلاعات ذخیره شده برای هر عنصر، آهنگ تولید عنصری بر اساس واکنش‌های صورت گرفته از عنصری خاص بر مبنای روابط زیر به دست می‌آید.

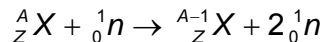
۱- واکنش  $(n, \gamma)$  به حالت پایه.

$${}^A_Z X + {}^1_0 n \rightarrow {}^{A+1}_Z X + {}^0_0 \gamma$$



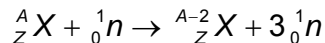
در این حالت به عدد جرمی یک واحد اضافه می‌شود.

۲- واکنش  $(n, 2n)$  به حالت پایه.



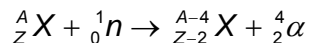
در این حالت از عدد جرمی یک واحد کم می‌شود.

۳- واکنش  $(n, 3n)$  به حالت پایه (بخش اکتینیدها).



در این حالت از عدد جرمی دو واحد کم می‌شود.

۴- واکنش  $(n, \alpha)$  به حالت پایه (بخش محصولات فعال‌ساز و پاره‌های شکافت).

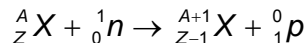


در این حالت از عدد جرمی چهار واحد و از عدد اتمی دو واحد کم می‌شود.

۵- واکنش (n,fission) به حالت پایه (بخش اکتینیدها).

در این بخش یک عنصر مجازی با عدد 162500 در بخش اکتینیدها در نظر گرفته شده است.

۶- واکنش (n,p) به حالت پایه (بخش محصولات فعال ساز و پاره‌های شکافت).



در این حالت از عدد اتمی یک واحد کم و به عدد جرمی یک واحد افزوده می‌شود.

۷- واکنش (n, γ) به حالت برانگیخته.

$${}^A_ZX + {}^1_0n \rightarrow {}^{A+1}_ZX^* + {}^0_0\gamma$$

در این حالت به عدد جرمی یک واحد افزوده و به حالت برانگیخته عنصری دیگر تبدیل می‌گردد.

۸- واکنش  $(n,2n)$  به حالت برانگیخته.

$${}^A_ZX + {}^1_0n \rightarrow {}^{A-1}_ZX^* + 2{}^1_0n$$

در این حالت از عدد جرمی یک واحد کم و به حالت برانگیخته عنصری دیگر تبدیل می‌گردد.

- استفاده از اطلاعات کتابخانه فوتون:

نرخ تولید فوتون در ۱۸ گروه متفاوت.

پس از تولید زنجیره واپاشی برای هر عنصر و مقدار تولید یا واپاشی عنصری به عنصر دیگر بر اساس اطلاعات ذخیره شده در کتابخانه واپاشی و سطح مقطع یک گروهی، ماتریس ضرایب غیر صفر برای هر عنصر تولید شده تا به وسیله آن به محاسبات پرداخته شود.

در حین انجام عملیات فوق ماتریس زنجیره واپاشی هر عنصر بر اساس اطلاعات کتابخانه واپاشی و سطح مقطع یک گروهی یکپارچه می‌گردد.

جدول شماره ۷: نمونه‌ای از ماتریس عناصر تشکیل شده

<b>10010</b>	<b>10020</b>	<b>10030</b>	<b>10040</b>	<b>20030</b>		<b>20060</b>	<b>30060</b>	<b>30070</b>	<b>30080</b>
10020	10030	20030	20040	20040	---	30060	30070	30080	40080
0	0	10040	0	10030	---	0	10030	0	0
0	0	0	0	0	---	0	0	0	0
0	0	0	0	0	---	0	0	0	0
0	0	0	0	0	---	0	0	0	0
0	0	0	0	0	---	0	0	0	0

همانطور که از جدول بالا پیداست، به طور نمونه از عنصر  $(H-1)10010$ ، عنصر  $(H-2)10020$  تولید می‌شود و یا از عنصر  $(H-3)10030$ ، عنصر  $(He-3)20030$  و عنصر  $(H-4)10040$  تولید می‌گردد. متناظر با ماتریس فوق، ماتریس ضرایب نیز تشکیل شده که مقدار تولید هر یک از عناصر فوق در آن ذخیره می‌گردد.

جدول شماره ۸: نمونه‌ای از ماتریس ضرایب تشکیل شده متناظر با ماتریس عناصر تشکیل شده

10010	10020	10030	10040	20030		20060	30060	30070	30080
0.332	0.00053	1.78E-09	693.1472	6.00E-05		0.857749	0.028	0.037	0.823215
0	0	6.00E-06	0	5327	---	0	940	0	0
0	0	0	0	0	---	0	0	0	0
0	0	0	0	0	---	0	0	0	0
0	0	0	0	0	---	0	0	0	0
0	0	0	0	0	---	0	0	0	0

همانگونه که شرح آن رفت متناظر با ماتریس عناصر، ماتریس ضرایب نیز تشکیل می‌شود. به طور مثال از عنصر  ${}^{10010}(\text{H-1})$ ، عنصر  ${}^{10020}(\text{H-2})$  با نرخ  $0.332$  تولید می‌شود و یا از عنصر  ${}^{10030}(\text{H-3})$ ، عنصر  ${}^{20030}(\text{He-3})$  با نرخ  $1.78 \times 10^{-9}$  و عنصر  ${}^{10040}(\text{H-4})$  با نرخ  $6.00 \times 10^{-6}$  تولید می‌گردد.

لازم به ذکر است که ماتریس فوق بر اساس اطلاعات دسته‌بندی شده در کتابخانه کد متشکل از سه بخش محصولات فعال‌ساز، اکتینیدها و پاره‌های شکافت می‌باشد. ابتدا اطلاعات موجود در کتابخانه مربوط به واپاشی عناصر ذخیره شده و سپس اطلاعات مربوط به کتابخانه سطح مقطع یک گروهی بدان اضافه می‌گردد.

در ادامه جهت تولید ماتریس ضرایب غیر صفر و کاهش آن، جستجو بر روی ماتریس فوق صورت می‌پذیرد، اساس کار بدین صورت بوده که در هر یک از سه بخش (محصولات فعال‌ساز، اکتینیدها و پاره‌های شکافت)، به ترتیب تعداد رویداد تولید عنصری شمارش شده و ضریب متناظر با آن در ماتریس ضرایب در یک آرایه یک بعدی ذخیره می‌گردد. در انتها مجموع رویدادهای تولید هر عنصر در هر بخش نیز در یک آرایه یک بعدی متناظر ذخیره می‌شود. در ادامه جهت انجام محاسبات عدد مذکور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پس از انجام عملیات بالا، محاسبات مربوط به تخمین شار در بازه زمانی مورد نظر به قرار زیر صورت می‌پذیرد:

ابتدا انرژی آزاد شده به هنگام شکافت هسته‌ای با استفاده از رابطه ریاضی (۱-۱۰) [۴]

$$Q_i = 1.29972 \times 10^{-3} \times (Z_i^2 \times \sqrt{A_i}) + 33.12 \quad (1-10)$$

که در رابطه فوق  $Z$  عدد اتمی و  $A$  عدد جرمی عنصر آم می‌باشد. سپس با استفاده از ترکیب ایزوتوپی ورودی توسط کاربر برحسب اتم-گرم و نیز سطح مقطع یک گروهی شکافت عناصر موجود در ترکیب اولیه به محاسبه شار می‌پردازیم. مقدار شار بر روی بازه زمانی مورد نظر به طور ثابت در نظر گرفته می‌شود.

پس از تخمین شار نوترون در بازه مورد نظر جهت انجام، و با توجه به اطلاعات ذخیره شده در حافظه از کتابخانه سطح مقطع یک گروهی، آهنگ اندرکنش‌های یک گروهی محاسبه می‌شود.



پس از تولید تمامی ثوابت مورد نیاز برای انجام محاسبات، در مرحله بعد که انجام محاسبات می‌باشد در ابتدا مقدار اولیه عناصر موجود به عنوان یک ثابت در نظر گرفته می‌شود. سپس از ماتریس گذار کلی، ماتریس گذار عناصر بلند مدت استخراج شده و عناصر غیر صفر آن در ماتریس جدید ذخیره می‌گردد (اثرات آهنگ اندرکنش‌های یک گروهی در نظر گرفته می‌شود). همچنین با جستجو در زنجیره واپاشی عناصر بلند مدت، اگر عنصر کوتاه مابین آنها تولید شود عنصر مذکور را از معادله حذف می‌کند و در ماتریس غیر صفر کلی (تصحیح ماتریس گذار) اثر آن را حذف می‌کند. سپس در ادامه نرم ماتریس بر اساس رابطه لوس و لپیدوس، جهت پیدا کردن مینیمم، ماکزیمم جمع سطر و ستون‌ها محاسبه و بر مبنای آن تعداد رابطه بازگشتی مورد نیاز جهت انجام محاسبات بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید.

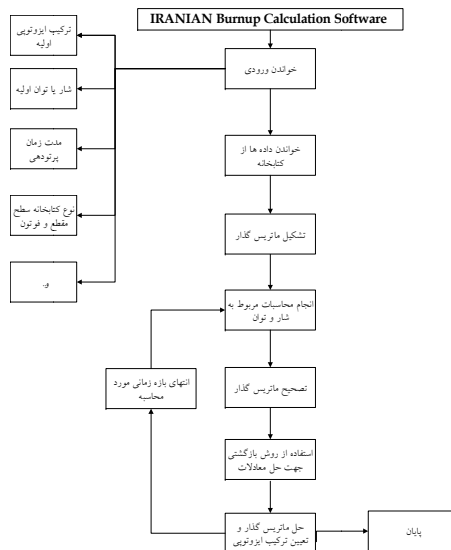
$$NLARGE=3.5 \times ASUM + 6.0$$

(۲-۱۰)

که در رابطه فوق NLARGE معرف نرم ماتریس (تعداد رابطه بازگشتی مورد نیاز) و ASUM مینیمم، ماکزیمم تعداد جمع سطر و ستون‌ها می‌باشد.

در ادامه با استفاده از آنها به محاسبه ترکیب ایزوتوپی جدید پرداخته می‌شود. در انتها اگر مقدار به دست آمده از مقدار  $10^{-25}$  کمتر باشد مقدار محاسبه شده در انجام محاسبات در نظر گرفته نشده و مقدار صفر برای عنصر مذکور در نظر گرفته می‌شود. در عناصر بلند مدت به دلیل تولید کم آنها در خلال محاسبات مقدار صفر برای آنها در نظر گرفته می‌شود.

در انتها اگر تعداد بازه زمانی مورد نظر (در صورت انجام بهینه‌سازی بر روی زمان) به اتمام رسید، پایان محاسبات صورت می‌پذیرد و مقدار ترکیب ایزوتوپی عناصر در خروجی چاپ می‌شود. در شکل ۴ فلوجارت محاسباتی کد مذکور نمایش داده شده است.



شکل ۳: فلوجارت محاسباتی کد محاسبات مصرف سوخت

به طور کلی در خلال انجام محاسبات نکات زیر مورد توجه قرار می‌گیرد.

۱- بهینه‌سازی بر روی بازه زمانی به صورت یک تنظیم دلخواه توسط کاربر می‌باشد. از مزایای این روش این بوده که مقادیر داده‌ها در خلال انجام محاسبات به روز رسانی شده و در آینده در صورت به روز رسانی کتابخانه داده‌های هسته‌ای توسط یک کد پردازش داده‌های هسته‌ای می‌توان جواب‌هایی با دقت بهتری بدست آورد. مزیت روش فوق در مقایسه با کد ORIGEN در این بوده که می‌توان در خلال بازه زمانی ثابت در نظر گرفته شده، اثرات تغییر شار به درستی نمایان شود.

۲- محاسبات در حال حاضر به صورت یک گروهی انجام می‌پذیرد.

۳- در حال حاضر محاسبات بر مبنای محاسبه شار به صورت نقطه‌ای انجام می‌پذیرد.

## ۱۱- زمینه‌های مطالعات مصرف سوخت [۲۲-۱۵]

داده‌ها و کدهای محاسباتی مرسوم مورد استفاده برای محاسبات فیزیکی راکتور می‌توانند برای ارزیابی کردن حالت بحرانی سوخت راکتور مصرف شده مورد استفاده قرار گیرند. اگرچه، این کدها شامل مدل‌های پیچیده و الگوریتم‌های بزرگ بوده و نیازمند به داده‌های کافی می‌باشند.

در موارد کاربردی راکتور، این جزئیات آزمایش برای عملکرد مناسب راکتور معین شده، مورد نیاز می‌باشد. دیدگاه موجود در زمینه کاربرد راکتور بر این اصل استوار است که یک طراحی کلی برای یک گستره وسیع از انواع سوخت صورت گیرد، که البته مستلزم آن است که سوخت‌ها به گونه‌ای طراحی گردند که بیشترین تأثیر یا به عبارت صحیح‌تر بیشترین مصرف را در مدت زمان پرتودهی به جای گذارند.

به طور سنتی، کدهای نظیر APOLLO، WIMS، KENO، MCNP که برای کاربردهایی از قبیل طراحی به کار برده می‌شوند. در این نوع آزمایش‌ها، معمولاً فرض می‌شود سوخت همواره به صورت تازه (غنا یا اولیه) در دسترس بوده که این امر منتهی به بیشینه حاشیه ایمنی در آزمایش‌های ایمنی بحرانی می‌شود.

امروزه انگیزه‌های زیادی در جهت پیگیری مسائل مصرف سوخت، در حرکت به سوی سوخت‌های جدید وجود دارد. که دستاوردهای آنها می‌تواند به محدودیت در غنا برای طراحی‌های موجود گسترش یابد. همچنین کاربردهای بالقوه‌ای در زمینه ایمنی بحرانی نظیر بازپایی به هنگام، مجدد سوخت را می‌توان ذکر کرد.

این اعتبارسنجی‌ها امروزه در زمینه‌های زیر مورد بحث و بررسی دقیق قرار می‌گیرند:

۱- پیشگویی دقیق و فهم کامل تغییر غلظت نوکلئیدها در طی کارکرد راکتور.

۲- ذخیره و خنک‌کنندگی سوخت مصرفی در راکتورهای در حال کار.

۳- زمینه‌های مربوط به حوادث راکتور در حال کار از قبیل نشت آب و...

۴- ایمن‌سازی تجهیزات در معرض پرتو.

سازمان همکاری برای توسعه اقتصادی / آژانس انرژی اتمی<sup>۱</sup> به مدت بیش از یک دهه از گروه‌هایی که در زمینه حل مسائل بحرانی و ایمنی فعالیت دارند، حمایت می‌کند. سرآغاز این حمایت‌ها از سال ۱۹۹۱ بوده که با گروه‌های مختلفی برای پیگیری و مطالعه در زمینه مسائل اعتبارسنجی مصرف سوخت همکاری می‌کرد. همچنین مسائل معتبری را در

زمینه مصرف سوخت طرح کرده تا به وسیله آن بتوان نتایج به دست آمده توسط کدهای مختلف کامپیوتری را با نتایج عملی مقایسه و یا در مقایسه با کدهای دیگر اعتبارسنجی کرد.

مسائل مطرح شده روشی مطمئن جهت مقایسه و قابلیت کدها و کتابخانه سطح مقطعها در انجام مسائل مختلف می-باشد.

جهت اعتبارسنجی کدهای محاسبات مصرف سوخت دو نوع طرح پایه ریزی شده است.

۱- محاسبات بحرانیت: که در آن ترکیب ایزوتوپی سوخت به عنوان ورودی داده می شود و پارامترهایی نظیر ضریب تکثیر و چگالی شکافت محاسبه و با مقادیر مرجع مقایسه می شوند.



۲- محاسبات مصرف سوخت: این مسائل کمک به مقایسه مقادیر محاسبه شده برای ترکیب ایزوتوپی سوخت مصرفی می‌کند.

بر پایه این فرضیات تا به امروزه ۵ فاز عمده در زمینه اعتبارسنجی محاسبات مصرف سوخت پی‌ریزی شده است که هر یک در ادامه به دسته‌بندی‌های دیگری در راستای هدف مربوطه، تقسیم می‌شوند. البته در فازهای ابتدایی بیشتر بررسی‌ها بر روی راکتورهای PWR صورت گرفته بود ولی امروزه این بررسی‌ها به راکتورهای BWR و یا حتی راکتورهای زیربحرانی تعمیم یافته است.

دسته‌بندی مربوطه در جدول شماره ۹ که به ترتیب بیانگر نوع فاز، دیدگاه مورد نظر فاز مربوطه و وضعیت آن است به تفصیل ارائه شده است.

جدول شماره ۹: انواع مسائل جهانی طرح شده در زمینه مسائل مصرف سوخت

وضعیت	توضیحات	مسائل آزمون	
انجام شده در ۱۳ نمونه	<p>آزمایش تأثیرات ۷ اکتینید اصلی و ۱۵ پاره شکافت اصلی بر روی یک آرایش نامحدود از میله سوخت PWR. (ترکیب ایزوتوپی مشخص شده، 3.5% Wt اورانیوم ۲۳۵ با مصارف سوخت 0,30,40 GWd/MTU و زمان واپاشی ۱ و ۵ سال.</p>	فاز I-A	فاز I
انجام شده در ۳ نمونه	<p>مقایسه غلظت نوکلیدهای محاسبه شده برای مصرف یک مجتمع سوخت PWR، در مقایسه با اندازه‌گیری‌های عملی در ۳ مصرف متفاوت (27.34 GWd/MTU ، 37.12 و 44.34). مقایسه‌ها برای ۱۲ اکتینید مهم و ۱۵ پاره شکافت اصلی برای هر نمونه مصرف.</p>	فاز I-B	

<p>انجام شده در ۲۶ نمونه</p>	<p>آزمایش تأثیر محوری توزیع مصرف سوخت در یک آرایش مجتمع PWR تحت یک سری شرایط، غنای اولیه، مصرف سوخت و زمان واپاشی. تأثیر پاره‌های شکافت به طور مستقل آزمایش شده است. ترکیب ایزوتوپی مشخص شده است.</p>	<p>فاز II-A</p>	<p>فاز II<sup>۱</sup></p>
<p>انجام شده در ۵ نمونه</p>	<p>تکرار مطالعات صورت گرفته در فاز II-A در سه بعد به نمایندگی از مفهوم اعتبارسنجی مصرف سوخت در حامل‌ها. ترکیب ایزوتوپی مشخص شده است.</p>	<p>فاز II-B</p>	
<p>نتایج ابتدایی برای ۲۲ نمونه</p>	<p>وارسی کردن تأثیرات توزیع خلا کند کننده به علاوه منحنی مصرف سوخت برای یک آرایش BWR. ترکیب ایزوتوپی مشخص شده است.</p>	<p>فاز III-A</p>	<p>فاز III</p>

۱. البته امروزه مسائل دیگری در این حوزه طرح ریزی و انجام شده که از آنها می‌توان فاز II-C، فاز II-D و فاز II-E را نام برد که نمونه‌های واقعی‌تر از مسائل فاز II-A می‌باشند.

پیش‌نویس تهیه شده است.	مقایسه غلظت نوکلئیدهای محاسبه شده برای مصرف در مدل مجتمع سوخت BWR.	فاز III-B
پیشنهاد شده است.	وارسی کردن اعتبارسنجی مصرف سوخت برای سوخت مصرفی MOX.	فاز IV
پیش‌نویس تهیه شده است.	وارسی کردن اعتبارسنجی مصرف سوخت در سیستم‌های زیر بحرانی.	فاز V

فازهای I و II بر روی راکتورهای PWR و فاز III بر روی راکتورهای BWR و فاز IV بر روی سوخت‌های MOX و فاز V بر روی راکتورهای زیربحرانی متمرکز شده‌اند.

## ۱۲- انجام محاسبات غلظت

پس از انجام محاسبات برای هر دو دسته عناصر کوتاه مدت و بلند مدت در محیط‌های همگن و غیر همگن، در این پروژه با کوپل معادلات به یکدیگر، غلظت تمامی ۱۶۹۶ عنصر و ایزوتوپ حاضر در کتابخانه کد ORIGIN را می‌توان در محاسبات در نظر گرفت. این محاسبات شامل، محاسبات مربوط به ترکیب ایزوتوپی هر المان (بر حسب کسر اتمی و کسر وزنی) و ترکیب ایزوتوپی مواد (بر حسب گرم- اتم، کسر اتمی، گرم، کسر وزنی) بوده که به الگوریتم طراحی شده اضافه شده است.

در محاسبات مربوط به ترکیب ایزوتوپی هر المان بر حسب کسر اتمی، غلظت‌های تمامی ایزوتوپ‌های یک عنصر شمرده و سپس هر المان به مقدار کل نرمالیزه می‌شود.

در محاسبات مربوط به ترکیب ایزوتوپی هر المان بر حسب کسر وزنی، غلظت‌های تمامی ایزوتوپ‌ها ضرب در تعداد عدد اتمی آنها شمرده شده و سپس به مقدار کل نرمالیزه و در انتها ضرب در عدد جرمی هر ایزوتوپ می‌گردد.

جهت محاسبات ترکیب ایزوتوپی مواد بر حسب گرم- اتم، کسر اتمی، گرم، کسر وزنی به صورت زیر عمل شده است. ترکیب ایزوتوپی مواد بر حسب گرم- اتم و کسر اتمی، مقدار ماده بر حسب یک اتم و بر حسب کسری از مقدار کل مواد تشکیل دهنده می‌باشد. ترکیب ایزوتوپی مواد بر حسب گرم و کسر وزنی، به ترتیب بر حسب گرم- اتم ضرب در تعداد عدد جرمی و بر حسب کسری از مقدار کل مواد تشکیل دهنده بر حسب گرم محاسبه و در خروجی نشان داده می‌شود.

### ۱۳- انجام محاسبات رادیواکتیویته

یکی دیگر از ویژگی‌های افزوده شده به الگوریتم توسعه یافته، توانایی انجام محاسبات رادیواکتیویته برای تمامی ایزوتوپ- های حاضر (۱۶۹۶ عنصر و ایزوتوپ حاضر) در کتابخانه کد است. رادیواکتیویته کل (بر حسب کوری و به صورت

کسری)، خطر استنشاق ماده رادیواکتیو (بر حسب مترمکعب هوا و به صورت کسری) و خطر بلع ماده رادیواکتیو (بر حسب مترمکعب هوا و به صورت کسری) با توجه به اطلاعات ذخیره شده در کتابخانه و نیز محاسبات صورت گرفته، انجام پذیرفته است.

### ۱۳-۱- پرتوزایی در هوا و آب

در فایل واپاشی، اطلاعاتی از قبیل بیشینه غلظت مجاز رادیوهسته در آب یا هوا در واحدهای کوری بر مترمکعب آب یا هوا موجود می‌باشد. با استفاده از اطلاعات ذکر شده و نیز غلظت عناصر محاسبه شده، خطر استنشاق ماده رادیواکتیو (بر حسب مترمکعب هوا و به صورت کسری) و خطر بلع ماده رادیواکتیو (بر حسب مترمکعب هوا و به صورت کسری) محاسبه شده است.

خطر استنشاق و بلع بر اساس مدارک منتشر شده توسط آژانس انرژی آمریکا تحت عنوان بیستم the Code of Federal Regulations استخراج و در کتابخانه کد ORIGEN ذخیره گشته است.

راديواکتیویته بر اساس تعداد واپاشی بر ثانیه و به صورت حاصل ضرب تعداد اتم‌های موجود عنصر تولیدی و یا مصرفی در انتهای بازه زمانی در ثابت واپاشی مربوطه بیان می‌گردد. راديواکتیویته عنصر به صورت کسری بر حسب اکتیویته عنصر به کل اکتیویته‌های موجود بیان و خطر استنشاق و بلع با استفاده از اکتیویته به دست آمده ضرب در ثوابت استنشاق و بلع موجود در کتابخانه کد بیان می‌گردد.



## ۱۳-۲- پرتوزایی آلفا

با توجه به اطلاعات مربوط به واکنش نوترون و آلفا در فایل سطح مقطع کتابخانه و بر اساس اکتیویته عنصر به دست آمده، رادیواکتیویته آلفا برای عناصر موجود برحسب کوری و به صورت کسری از مقدار کل رادیوکتیویته آلفا به الگوریتم طراحی شده، اضافه شده است.

## ۱۴- انجام محاسبات نوترونی

یکی دیگر از ویژگی‌های افزوده شده به الگوریتم توسعه یافته، توانایی انجام محاسبات نوترونی برای تمامی ایزوتوپ‌های حاضر (۱۶۹۶ عنصر و ایزوتوپ حاضر) در کتابخانه کد است. قدرت حرارتی (بر حسب وات و به صورت کسری)، نرخ جذب نوترون (بر حسب نوترون بر ثانیه و به صورت کسری)، نرخ شکافت (بر حسب شکافت بر ثانیه و به صورت کسری)،

منبع نوترون در اثر واکنش آلفا و نوترون (بر حسب نوترون بر ثانیه و به صورت کسری) و منبع نوترون در اثر واکنش شکافت خودبخود (بر حسب نوترون بر ثانیه و به صورت کسری) با توجه به اطلاعات ذخیره شده در کتابخانه و نیز محاسبات صورت گرفته، انجام پذیرفته است.

#### ۱۴-۱- قدرت حرارتی

قدرت حرارتی (گرمای واپاشی رادیواکتیو) برای هر ایزوتوپ با استفاده از اطلاعات موجود در کتابخانه واپاشی و نیز محاسبات صورت گرفته جهت تخمین غلظت آن بر حسب وات و به صورت کسری به نرم‌افزار توسعه یافته، اضافه شد. قدرت حرارتی بر حسب رابطه زیر بدست می‌آید.

$$Q (Watt) = [Q_{rec} (MeV) \times \lambda (1/s) \times 9.652e10] \times N(g - atom) \quad (1-14)$$

که در رابطه بالا  $Q_{rec}$ ، میانگین گرمای آزاد شده به ازای هر واپاشی که در کتابخانه واپاشی کد ORIGEN برای هر عنصر ذکر شده است.  $\lambda$  ثابت واپاشی و  $N$  غلظت عنصر بر حسب گرم-اتم و نیز ثابت  $9.652e10$  جهت تبدیل مگا الکترون ولت به ژول می‌باشد.

#### ۱۴-۲- نرخ تولید نوترون

نرخ تولید نوترون به صورت سطح مقطع کل ضرب در غلظت عنصر بر حسب اتم گرم در عدد آووگادرو تعریف می‌شود. با استفاده از اطلاعات موجود در کتابخانه سطح مقطع یک گروهی کد ORIGEN، سطح مقطع کل محاسبه و سپس با استفاده از محاسبات انجام شده جهت تعیین غلظت، نرخ تولید نوترون برای هر ایزوتوپ به صورت نوترون بر ثانیه و به صورت کسری محاسبه می‌شود.

## ۱۴-۳- نرخ شکافت و نوترون تولیدی به ازای هر واکنش شکافت

نرخ شکافت، یکی دیگر از پارامترهایی است که می‌توان با استفاده از اطلاعات موجود در کتابخانه کد ORIGEN محاسبه نمود. این پارامتر برای عناصری که دارای سطح مقطع شکافت بوده (آکتینیدها) قابل محاسبه می‌باشد. همچنین با استفاده از اطلاعات مربوط به نرخ تولید نوترون به ازای هر واکنش شکافت که در داخل کد ORIGEN برنامه‌نویسی شده است، می‌توان جهت محاسبه نرخ تولید نوترون به ازای هر واکنش شکافت و یا محاسبه ضریب تکثیر سیستم در نظر گرفت. اطلاعات مربوط به نرخ بهره تولید نوترون در دو گروه حرارتی و سریع که به ترتیب با استفاده از طیف یک راکتور حرارتی PWR و یک راکتور سریع LMFBR استخراج شده است. اطلاعات مندرج به شرح جدول زیر است.

جدول شماره ۱۰: بهره نوترون به ازای هر شکافت

Mat.	Neutron yields per neutron induced fission	
	Thermal	Fast
BI209	0.00	0.00
RA223	0.00	0.00
RA226	0.00	0.00
RA228	0.00	0.00
AC227	0.00	0.00
TH227	0.00	0.00
TH228	0.00	0.00
TH229	2.049	2.049
TH230	0.00	0.00
TH232	2.418	2.396
TH233	0.00	0.00

TH234	0.00	0.00
PA231	0.00	0.00
PA232	0.00	0.00
PA233	2.663	2.631
PA234M	0.00	0.00
PA234	0.00	0.00
U230	0.00	0.00
U231	0.00	0.00
U232	0.00	0.00
U233	2.499	2.52
U234	2.631	2.555
U235	2.421	2.468
U236	2.734	2.614
U237	0.00	0.00

U238	2.801	2.776
U239	0.00	0.00
U240	0.00	0.00
NP236	0.00	0.00
NP237	3.005	2.NP5
NP238	0.00	0.00
NP239	0.00	0.00
PU236	2.87	2.946
PU237	0.00	0.00
PU238	2.833	3.009
PU239	2.875	2.946
PU240	3.135	3.024
PU241	2.934	2.978
PU242	3.28	3.075

PU243	0.00	0.00
AM241	3.277	3.402
AM242M	3.162	3.311
AM242	3.36	3.361
AM243	3.732	3.653
AM244M	0.00	0.00
AM244	0.00	0.00
CM242	3.746	3.868
CM243	3.434	3.496
CM244	3.725	3.743
CM245	3.832	3.898
CM246	3.858	3.87
CM247	3.592	3.68
CM248	3.796	3.866



CM249	0.00	0.00
BK249	3.76	3.671
CF249	4.062	4.13
CF250	3.97	3.813
CF251	4.14	4.227
CF252	4.126	4.364
CF253	4.15	4.151
CF254	0.00	0.00
ES253	0.00	0.00
ES254M	0.00	0.00
ES254	0.00	0.00

## ۱۴-۴- نوترون تولیدی بر اثر واکنش آلفا و نوترون

با توجه به سطح مقطع واکنش بعضی از عناصر با ذرات باردار، از آنها به عنوان منبعی جهت تولید نوترون استفاده می-شود. این عناصر با واکنش با ذرات بارداری نظیر آلفا، پاره‌های شکافت به همراه نوترون گسیل می‌نمایند. با توجه به اطلاعات مربوط به واکنش نوترون و آلفا در کد ORIGEN و بر اساس غلظت عنصر به دست آمده، نوترون تولیدی در اثر واکنش آلفا و نوترون بر حسب نوترون بر ثانیه برای آکتینیدهای موجود به الگوریتم طراحی شده، اضافه شده است. در جدول زیر مقادیر تجربی بهره نوترون به ازای واکنش آلفا و نوترون برای آکتینیدها استفاده شده در کد ORIGEN بر حسب نوترون بر ثانیه- گرم اتم نمایش داده شده است.

جدول شماره ۱۱: اندازه‌گیری تجربی بهره نوترون مواد دارای واکنش آلفا و نوترون بر حسب نوترون بر ثانیه- گرم اتم

Mat.	Neutron yield
PU238	4.76E+06
PU239	10755
PU240	40800
PU242	653
AM241	9.64E+05
CM242	6.46E+09
CM244	1.40E+08

## ۱۴-۵- نوترون تولیدی بر اثر شکافت خودبخود

با توجه به اطلاعات مربوط به شکافت خودبخود در کد ORIGEN و بر اساس غلظت عنصر به دست آمده، نوترون تولیدی در اثر شکافت خودبخود بر حسب نوترون بر ثانیه برای آکتینیدهای موجود به الگوریتم طراحی شده، اضافه شده است. در جدول زیر مقادیر تجربی بهره نوترون به ازای شکافت خودبخود برای آکتینیدها استفاده شده در کد ORIGEN نمایش داده شده است.

جدول شماره ۱۲: اندازه‌گیری تجربی بهره نوترون مواد دارای شکافت خودبخود به ازای یک شکافت

Mat.	Neutron yield
U235	1.695
U236	1.65
U237	1.872

U238	2
U239	2.048
NP236M	1.79
NP236	1.783
NP237	1.873
NP238	1.963
NP239	2.053
PU236	2.22
PU237	1.886
PU238	2.28
PU239	2.24
PU240	2.16
PU241	2.25
PU242	2.15

PU243	2.43
PU244	2.3
AM240	2.29
AM241	2.383
AM242	2.475
AM242M	2.59
AM243	2.52
AM244	2.657
AM244M	2.665
CM241	2.5
CM242	2.59
CM243	2.687
CM244	2.76
CM245	2.872

CM246	3
CM248	3.32
CM250	3.56
BK249	3.72
CF249	3.44
CF250	3.56
CF252	3.725
CF254	3.9
ES253	3.92
ES254	4.04
ES255	4.16

## ۱۵- انجام محاسبات فوتونی

یکی دیگر از ویژگی‌های افزوده شده به الگوریتم توسعه یافته، توانایی انجام محاسبات فوتونی برای تمامی اطلاعات ایزوتوپ‌های موجود در کتابخانه فوتونی کد است. طیف فوتونی در هر سه دسته عناصر به صورت نرخ فوتون آزاد شده بر حسب فوتون بر ثانیه، نرخ انرژی آزاد شده در هر گروه بر حسب مگاالکترون ولت بر وات ثانیه، شدت منبع فوتونی در هر گروه انرژی (۱۸ گروه) برای هر ایزوتوپ در صورت وجود بر حسب فوتون بر ثانیه با توجه به اطلاعات ذخیره شده در کتابخانه و نیز محاسبات صورت گرفته، انجام پذیرفته است.



## ۱۵-۱- نرخ فوتون آزاد شده

در این بخش با اضافه کردن محاسبات نرخ فوتون آزاد شده بر مبنای اطلاعات هر دسته از مواد در گروه‌های مختلف انرژی فوتون بر حسب فوتون بر ثانیه استخراج گردید. در ابتدا اطلاعات مربوط به مواد ایزوتوپی مختلف در گروه‌های مختلف بر مبنای شدت فوتون در گروه انرژی و غلظت ایزوتوپ محاسبه شده بر مبنای اتم گرم و ثابت واپاشی عنصر مربوطه استخراج شده و سپس با جمع بر روی عناصر مختلف در گروه‌های مختلف انرژی مورد محاسبه قرار گرفته است.

$$Gsum(j) = \sum_{i=1}^k N_i \times \lambda_i \times I(i, j) \times 6.023 \times 10^{23} \quad (1-15)$$

که در رابطه بالا  $G_{sum}$  نرخ فوتون آزاد شده در هر دسته از عناصر در گروه‌های مختلف انرژی،  $N$  غلظت عنصر بر حسب اتم گرم،  $I$  شدت فوتون گسیلی بر مبنای اطلاعات کتابخانه و  $\lambda$  ثابت واپاشی عنصر مربوطه می‌باشد. این محاسبات در هر سه دسته عناصر مشخص در کتابخانه کد ORIGEN تکرار گردیده و نتایج خروجی برای آنها مطابق با کد ORIGEN استخراج شده است.

### ۱۵-۲- نرخ انرژی آزاد شده در هر گروه

در این قسمت، با استفاده از اطلاعات استخراج شده از کتابخانه کد و بر مبنای گروه‌های انرژی و با استفاده از توان سیستم، نرخ انرژی آزاد شده در هر گروه بر حسب مگا الکترون ولت بر وات ثانیه مطابق رابطه (۱۵-۲) مورد محاسبه قرار گرفت.

$$E(i) = \sum_{n=1}^k G(n, i) \times Egroup(i) \times Const. \quad (2-15)$$

که در رابطه بالا، E نرخ فوتون آزاد شده در هر گروه انرژی، G فوتون آزاد شده از عنصر nام در گروه‌های مختلف انرژی، Egroup مقدار متوسط انرژی در هر گروه مطابق با جدول شماره ۱ و ثابت Const جهت تبدیل به مقدار الکترون ولت بر وات بر مبنای اطلاعات ورودی سیستم می‌باشد.

### ۱۵-۳- شدت منبع فوتونی در هر گروه انرژی

یکی دیگر از پارامترهایی که با استفاده از محاسبات انجام شده و اطلاعات کتابخانه قابل استخراج بوده، شدت منبع فوتونی در هر گروه انرژی به ازای هر عنصر می‌باشد. در این بخش محاسبات بر مبنای غلظت محاسبه شده در مراحل

قبل، اطلاعات مربوط به شدت فوتون در هر گروه انرژی به ازای هر عنصر و ثابت واپاشی با استفاده از رابطه (۳-۱۵) انجام پذیرفته است.

$$P(i) = N_i \times \lambda_i \times I(i, j) \times 6.023 \times 10^{23} \quad (۳-۱۵)$$

## ۱۶- راستی آزمایی محاسبات

جهت اعتبارسنجی الگوریتم‌های به کار رفته در ساختار برنامه و بر مبنای مسائل و نیز تکنولوژی سوخت‌های به کار رفته، نتایج محاسبات برای چند دسته از عناصر موجود مورد آزمایش قرار گرفته است. همچنین در انجام این اعتبارسنجی‌ها مواردی دیگر از قبیل: کتابخانه سطح مقطع یک گروهی مواد به کار رفته جهت انجام محاسبات، نیز در نظر گرفته شده است.

جهت اعتبارسنجی معمولاً به دو شیوه عمل می‌شود:

۱. طرح مسائل نوعی و مقایسه نتایج به دست آمده توسط کد توسعه یافته با نتایج کدهای محاسباتی مرسوم مورد اطمینان.

۲. حل مسائل طراحی شده توسط سازمان همکاری برای توسعه اقتصادی آرژانس انرژی اتمی<sup>۱</sup> [۲۳] و مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج آن.

در این قسمت با طرح موضوعاتی که بتواند تمامی مسائل درگیر با محاسبات مصرف را پوشش دهد به اعتبارسنجی محاسبات پرداخته شده است. در کد ORIGEN برای راکتورهای مختلف تصحیح داخلی برای سطح مقطع‌ها انجام

می‌شود که در این الگوریتم و کد ORIGEN تصحیح مذکور استفاده نشده و فقط نتایج روش‌های عددی با هم مقایسه شده است.

عناصر بلند مدت و کوتاه مدت با استفاده از روابط به کار رفته در کد ORIGEN به صورت زیر تعریف می‌شوند. اگر نرخ کلی برداشت عنصر ضرب در زمان محاسبه کمتر از  $6.90775$  باشد، عنصر با نیمه عمر بلند مدت در غیر این صورت عنصر با نیمه عمر کوتاه مدت در نظر گرفته می‌شود.

#### ۱۶-۱- مسئله شماره ۱

در این مسئله یک کیلوگرم اورانیوم  $235$  و  $238$  به مدت یک روز با قدرت  $1$  کیلووات تحت تابش‌دهی در نظر گرفته شده است. جهت بررسی مسئله، کتابخانه یک گروهی حرارتی کد ORIGEN مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل برای تخمین غلظت برخی از ایزوتوپ‌های تولیدی در جدول زیر آمده است.

جدول شماره ۱۳: نتایج حاصل برای تخمین غلظت ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۱ بر حسب درصد اتمی

No.	Isotope	ORIGEN	This Work
1	HE4	1.00E+00	1.00E+00
2	FR223	1.00E+00	1.00E+00
3	AC227	1.00E+00	1.00E+00
4	TH227	1.31E-13	1.31E-13
5	TH228	3.21E-14	3.21E-14
6	TH230	6.46E-12	6.46E-12
7	TH231	8.27E-01	8.27E-01
8	TH232	2.99E-06	2.99E-06

9	TH233	8.78E-16	8.78E-16
10	TH234	1.73E-01	1.73E-01
11	PA231	1.00E+00	1.00E+00
12	PA232	1.16E-07	1.16E-07
13	PA233	1.05E-13	1.05E-13
14	PA234M	1.95E-05	1.95E-05
15	PA234	5.50E-06	5.50E-06
16	U232	5.84E-21	5.84E-21
17	U234	3.00E-15	3.00E-15
18	U235	5.03E-01	5.03E-01



19	U236	8.89E-08	8.89E-08
20	U237	4.01E-16	4.01E-16
21	U238	4.97E-01	4.97E-01
22	U239	5.67E-11	5.67E-11
23	U240	1.31E-18	1.31E-18
24	U241	3.93E-32	3.93E-32
25	NP237	6.64E-09	6.64E-09
26	NP238	4.71E-16	4.71E-16
27	NP239	1.00E+00	1.00E+00
28	NP240M	4.17E-10	4.17E-10

29	NP240	1.63E-09	1.63E-09
30	NP241	1.81E-20	1.81E-20
31	PU238	2.19E-16	2.19E-16
32	PU239	1.00E+00	1.00E+00
33	PU240	4.35E-07	4.35E-07
34	PU241	6.96E-14	6.96E-14

جدول شماره ۱۴: نتایج حاصل برای تخمین غلظت ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۱ بر حسب درصد وزنی

No.	Isotope	ORIGEN	This Work
1	HE4	1.00E+00	1.00E+00
2	FR223	1.00E+00	1.00E+00
3	AC227	1.00E+00	1.00E+00
4	TH227	1.29E-13	1.29E-13
5	TH228	3.16E-14	3.16E-14
6	TH230	6.42E-12	6.42E-12
7	TH231	8.26E-01	8.26E-01
8	TH232	3.00E-06	3.00E-06

9	TH233	8.84E-16	8.84E-16
10	TH234	1.75E-01	1.75E-01
11	PA231	1.00E+00	1.00E+00
12	PA232	1.16E-07	1.16E-07
13	PA233	1.06E-13	1.06E-13
14	PA234M	1.97E-05	1.97E-05
15	PA234	5.57E-06	5.57E-06
16	U232	5.72E-21	5.72E-21
17	U234	2.97E-15	2.97E-15
18	U235	5.00E-01	5.00E-01

19	U236	8.87E-08	8.87E-08
20	U237	4.01E-16	4.01E-16
21	U238	5.00E-01	5.00E-01
22	U239	5.73E-11	5.73E-11
23	U240	1.33E-18	1.33E-18
24	U241	4.00E-32	4.00E-32
25	NP237	6.58E-09	6.58E-09
26	NP238	4.69E-16	4.69E-16
27	NP239	1.00E+00	1.00E+00
28	NP240M	4.19E-10	4.19E-10

29	NP240	1.64E-09	1.64E-09
30	NP241	1.83E-20	1.83E-20
31	PU238	2.18E-16	2.18E-16
32	PU239	1.00E+00	1.00E+00
33	PU240	4.37E-07	4.37E-07
34	PU241	7.02E-14	7.02E-14

جدول شماره ۱۵: نتایج حاصل برای تخمین غلظت ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۱ بر حسب اتم- گرم

No.	Isotope	ORIGEN	This Work
1	HE4	1.33E-11	1.33E-11
2	FR223	1.62E-27	1.62E-27
3	AC227	6.18E-20	6.18E-20
4	TH227	1.34E-24	1.34E-24
5	TH228	3.27E-25	3.27E-25
6	TH230	6.58E-23	6.58E-23
7	TH231	8.43E-12	8.43E-12
8	TH232	3.05E-17	3.05E-17

9	TH233	8.95E-27	8.95E-27
10	TH234	1.76E-12	1.76E-12
11	PA231	3.04E-12	3.04E-12
12	PA232	3.52E-19	3.52E-19
13	PA233	3.20E-25	3.20E-25
14	PA234M	5.93E-17	5.93E-17
15	PA234	1.68E-17	1.68E-17
16	U232	4.93E-20	4.93E-20
17	U234	2.54E-14	2.54E-14
18	U235	4.26E+00	4.26E+00



19	U236	7.52E-07	7.52E-07
20	U237	3.39E-15	3.39E-15
21	U238	4.20E+00	4.20E+00
22	U239	4.79E-10	4.79E-10
23	U240	1.11E-17	1.11E-17
24	U241	3.32E-31	3.32E-31
25	NP237	1.17E-16	1.17E-16
26	NP238	8.30E-24	8.30E-24
27	NP239	1.76E-08	1.76E-08
28	NP240M	7.35E-18	7.35E-18

29	NP240	2.88E-17	2.88E-17
30	NP241	3.19E-28	3.19E-28
31	PU238	5.95E-25	5.95E-25
32	PU239	2.72E-09	2.72E-09
33	PU240	1.18E-15	1.18E-15
34	PU241	1.89E-22	1.89E-22

جدول شماره ۱۶: نتایج حاصل برای تخمین غلظت ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۱ بر حسب کسر گرمی

No.	Isotope	ORIGEN	This Work
1	HE4	2.65E-14	2.65E-14
2	FR223	1.81E-28	1.81E-28
3	AC227	7.02E-21	7.02E-21
4	TH227	1.52E-25	1.52E-25
5	TH228	3.73E-26	3.73E-26
6	TH230	7.57E-24	7.57E-24
7	TH231	9.74E-13	9.74E-13
8	TH232	3.54E-18	3.54E-18

9	TH233	1.04E-27	1.04E-27
10	TH234	2.06E-13	2.06E-13
11	PA231	3.52E-13	3.52E-13
12	PA232	4.09E-20	4.09E-20
13	PA233	3.73E-26	3.73E-26
14	PA234M	6.94E-18	6.94E-18
15	PA234	1.96E-18	1.96E-18
16	U232	5.72E-21	5.72E-21
17	U234	2.97E-15	2.97E-15
18	U235	5.00E-01	5.00E-01

19	U236	8.87E-08	8.87E-08
20	U237	4.01E-16	4.01E-16
21	U238	5.00E-01	5.00E-01
22	U239	5.73E-11	5.73E-11
23	U240	1.33E-18	1.33E-18
24	U241	4.00E-32	4.00E-32
25	NP237	1.39E-17	1.39E-17
26	NP238	9.88E-25	9.88E-25
27	NP239	2.11E-09	2.11E-09
28	NP240M	8.82E-19	8.82E-19

29	NP240	3.45E-18	3.45E-18
30	NP241	3.84E-29	3.84E-29
31	PU238	7.08E-26	7.08E-26
32	PU239	3.25E-10	3.25E-10
33	PU240	1.42E-16	1.42E-16
34	PU241	2.28E-23	2.28E-23

## ۱۶-۲- مسئله شماره ۲

در این مسئله یک کیلوگرم اورانیوم ۲۳۵ و ۲۳۸ به مدت یک ماه با قدرت ۱ مگاوات با آهنگ ثابت افزایش بر حسب ثانیه تحت تابش‌دهی در نظر گرفته شده است. جهت بررسی مسئله، کتابخانه یک گروهی حرارتی کد ORIGEN مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل برای تخمین غلظت برخی از ایزوتوپ‌های تولیدی در جدول زیر آمده است.

جدول شماره ۱۷: نتایج حاصل برای تخمین غلظت ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۲ بر حسب درصد اتمی

No.	Isotope	ORIGEN	This Work
1	HE4	1.00E+00	1.00E+00
2	TL207	3.65E-02	3.65E-02
3	TL208	9.64E-01	9.64E-01
4	TL209	3.53E-07	3.53E-07
5	PB207	7.86E-03	7.86E-03
6	PB208	9.06E-01	9.06E-01
7	PB209	2.27E-07	2.27E-07
8	PB211	4.27E-05	4.27E-05



9	PB212	8.60E-02	8.60E-02
10	BI209	6.85E-04	6.85E-04
11	BI211	3.09E-04	3.09E-04
12	BI212	9.99E-01	9.99E-01
13	BI213	6.41E-06	6.41E-06
14	PO211	9.18E-05	9.18E-05
15	PO212	1.28E-06	1.28E-06
16	PO213	2.33E-10	2.33E-10
17	PO215	1.04E-04	1.04E-04
18	PO216	1.00E+00	1.00E+00

19	RN219	6.25E-04	6.25E-04
20	RN220	9.99E-01	9.99E-01
21	FR221	1.59E-03	1.59E-03
22	FR223	9.98E-01	9.98E-01
23	RA223	2.67E-02	2.67E-02
24	RA224	9.73E-01	9.73E-01
25	RA225	1.14E-04	1.14E-04
26	RA226	2.16E-07	2.16E-07
27	RA228	2.43E-05	2.43E-05
28	AC225	1.25E-07	1.25E-07

29	AC227	1.00E+00	1.00E+00
30	AC228	3.46E-04	3.46E-04
31	TH227	2.30E-09	2.30E-09
32	TH228	5.65E-06	5.65E-06
33	TH229	9.55E-09	9.55E-09
34	TH230	1.85E-08	1.85E-08
35	TH231	2.11E-01	2.11E-01
36	TH232	3.43E-01	3.43E-01
37	TH233	1.03E-07	1.03E-07
38	TH234	4.46E-01	4.46E-01

39	PA231	9.99E-01	9.99E-01
40	PA232	7.20E-04	7.20E-04
41	PA233	5.63E-05	5.63E-05
42	PA234M	3.79E-06	3.79E-06
43	PA234	1.69E-06	1.69E-06
44	U232	2.07E-13	2.07E-13
45	U233	6.96E-16	6.96E-16
46	U234	2.19E-12	2.19E-12
47	U235	4.93E-01	4.93E-01
48	U236	2.71E-03	2.71E-03

49	U237	1.73E-07	1.73E-07
50	U238	5.05E-01	5.05E-01
51	U239	5.86E-08	5.86E-08
52	U240	2.00E-12	2.00E-12
53	U241	6.08E-23	6.08E-23
54	NP237	2.46E-02	2.46E-02
55	NP238	2.29E-05	2.29E-05
56	NP239	9.75E-01	9.75E-01
57	NP240M	4.11E-07	4.11E-07
58	NP240	1.62E-06	1.62E-06

59	NP241	6.74E-15	6.74E-15
60	PU236	0.00E+00	0.00E+00
61	PU237	0.00E+00	0.00E+00
62	PU238	7.55E-06	7.55E-06
63	PU239	9.92E-01	9.92E-01
64	PU240	7.61E-03	7.61E-03
65	PU241	4.04E-05	4.04E-05
66	PU242	2.09E-07	2.09E-07
67	PU243	2.10E-12	2.10E-12
68	PU244	1.41E-15	1.41E-15

69	PU245	2.79E-21	2.79E-21
70	AM241	9.97E-01	9.97E-01
71	AM242M	8.65E-04	8.65E-04
72	AM242	1.31E-03	1.31E-03
73	AM243	1.06E-03	1.06E-03
74	AM244M	3.80E-09	3.80E-09
75	AM244	4.82E-09	4.82E-09
76	AM245	1.34E-14	1.34E-14
77	CM242	1.00E+00	1.00E+00
78	CM243	1.49E-04	1.49E-04

79	CM244	1.20E-04	1.20E-04
80	CM245	1.32E-08	1.32E-08
81	CM246	3.23E-11	3.23E-11

جدول شماره ۱۸: نتایج حاصل برای تخمین غلظت ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۲ بر حسب درصد وزنی

No.	Isotope	ORIGEN	This Work
1	HE4	1.00E+00	1.00E+00
2	TL207	3.63E-02	3.63E-02
3	TL208	9.64E-01	9.64E-01



4	TL209	3.55E-07	3.55E-07
5	PB207	7.81E-03	7.81E-03
6	PB208	9.05E-01	9.05E-01
7	PB209	2.28E-07	2.28E-07
8	PB211	4.33E-05	4.33E-05
9	PB212	8.75E-02	8.75E-02
10	BI209	6.76E-04	6.76E-04
11	BI211	3.07E-04	3.07E-04
12	BI212	9.99E-01	9.99E-01
13	BI213	6.44E-06	6.44E-06

14	PO211	8.97E-05	8.97E-05
15	PO212	1.26E-06	1.26E-06
16	PO213	2.30E-10	2.30E-10
17	PO215	1.04E-04	1.04E-04
18	PO216	1.00E+00	1.00E+00
19	RN219	6.23E-04	6.23E-04
20	RN220	9.99E-01	9.99E-01
21	FR221	1.57E-03	1.57E-03
22	FR223	9.98E-01	9.98E-01
23	RA223	2.66E-02	2.66E-02

24	RA224	9.73E-01	9.73E-01
25	RA225	1.15E-04	1.15E-04
26	RA226	2.18E-07	2.18E-07
27	RA228	2.48E-05	2.48E-05
28	AC225	1.24E-07	1.24E-07
29	AC227	1.00E+00	1.00E+00
30	AC228	3.48E-04	3.48E-04
31	TH227	2.24E-09	2.24E-09
32	TH228	5.53E-06	5.53E-06
33	TH229	9.40E-09	9.40E-09

34	TH230	1.83E-08	1.83E-08
35	TH231	2.10E-01	2.10E-01
36	TH232	3.42E-01	3.42E-01
37	TH233	1.03E-07	1.03E-07
38	TH234	4.48E-01	4.48E-01
39	PA231	9.99E-01	9.99E-01
40	PA232	7.23E-04	7.23E-04
41	PA233	5.67E-05	5.67E-05
42	PA234M	3.84E-06	3.84E-06
43	PA234	1.71E-06	1.71E-06

44	U232	2.03E-13	2.03E-13
45	U233	6.86E-16	6.86E-16
46	U234	2.16E-12	2.16E-12
47	U235	4.89E-01	4.89E-01
48	U236	2.70E-03	2.70E-03
49	U237	1.73E-07	1.73E-07
50	U238	5.08E-01	5.08E-01
51	U239	5.93E-08	5.93E-08
52	U240	2.03E-12	2.03E-12
53	U241	6.20E-23	6.20E-23

54	NP237	2.44E-02	2.44E-02
55	NP238	2.28E-05	2.28E-05
56	NP239	9.76E-01	9.76E-01
57	NP240M	4.13E-07	4.13E-07
58	NP240	1.63E-06	1.63E-06
59	NP241	6.80E-15	6.80E-15
60	PU236	0.00E+00	0.00E+00
61	PU237	0.00E+00	0.00E+00
62	PU238	7.51E-06	7.51E-06
63	PU239	9.92E-01	9.92E-01

64	PU240	7.65E-03	7.65E-03
65	PU241	4.07E-05	4.07E-05
66	PU242	2.11E-07	2.11E-07
67	PU243	2.13E-12	2.13E-12
68	PU244	1.44E-15	1.44E-15
69	PU245	2.86E-21	2.86E-21
70	AM241	9.97E-01	9.97E-01
71	AM242M	8.69E-04	8.69E-04
72	AM242	1.31E-03	1.31E-03
73	AM243	1.07E-03	1.07E-03

74	AM244M	3.85E-09	3.85E-09
75	AM244	4.88E-09	4.88E-09
76	AM245	1.36E-14	1.36E-14
77	CM242	1.00E+00	1.00E+00
78	CM243	1.49E-04	1.49E-04
79	CM244	1.21E-04	1.21E-04
80	CM245	1.33E-08	1.33E-08
81	CM246	3.28E-11	3.28E-11



## ۱۶-۳- مسئله شماره ۳

در این مسئله دز ناشی از یک کیلوگرم پلوتونیم ۲۳۹ را که به مدت ۱ یک ماه با قدرت ۱ مگاوات تحت تابش‌دهی در نظر گرفته شده، به ترتیب در آب، هوا و پرتوزایی آلفا آن بررسی شده است. جهت بررسی مسئله، کتابخانه یک گروهی PWRU کد ORIGEN مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل در جدول زیر آمده است.

جدول شماره ۱۹: نتایج حاصل برای تخمین رادیواکتیویته ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۳ بر حسب کوری

No.	Isotope	ORIGEN	This Work
1	TL208	1.11E-16	1.11E-16
2	PB209	7.46E-25	7.46E-25
3	PB212	3.09E-16	3.09E-16

4	BI212	3.09E-16	3.09E-16
5	PO212	1.98E-16	1.98E-16
6	PO216	3.09E-16	3.09E-16
7	RN220	3.09E-16	3.09E-16
8	FR223	4.86E-20	4.86E-20
9	RA224	3.09E-16	3.09E-16
10	RA226	1.45E-21	1.45E-21
11	AC227	3.52E-18	3.52E-18
12	AC228	1.88E-17	1.88E-17
13	TH227	9.91E-19	9.91E-19

14	TH228	5.53E-16	5.53E-16
15	TH229	4.99E-20	4.99E-20
16	TH230	1.60E-16	1.60E-16
17	TH231	4.87E-09	4.87E-09
18	TH232	6.65E-21	6.65E-21
19	TH233	1.47E-12	1.47E-12
20	TH234	1.60E-17	1.60E-17
21	PA231	4.03E-15	4.03E-15
22	PA232	4.59E-11	4.59E-11
23	PA233	1.17E-11	1.17E-11

24	PA234M	5.51E-14	5.51E-14
25	PA234	5.51E-14	5.51E-14
26	PA235	1.39E-20	1.39E-20
27	U231	5.49E-17	5.49E-17
28	U232	7.46E-14	7.46E-14
29	U233	1.82E-14	1.82E-14
30	U234	6.45E-10	6.45E-10
31	U235	4.87E-09	4.87E-09
32	U236	4.89E-09	4.89E-09
33	U237	2.82E-03	2.82E-03

34	U238	5.47E-17	5.47E-17
35	U239	1.14E-09	1.14E-09
36	U240	2.63E-15	2.63E-15
37	U241	1.19E-20	1.19E-20
38	NP235	3.40E-14	3.40E-14
39	NP236M	5.35E-10	5.35E-10
40	NP236	2.62E-17	2.62E-17
41	NP237	6.14E-11	6.14E-11
42	NP238	2.17E-05	2.17E-05
43	NP239	4.66E-07	4.66E-07

44	NP240M	4.42E-11	4.42E-11
45	NP240	1.76E-10	1.76E-10
46	NP241	1.19E-20	1.19E-20
47	PU236	2.28E-10	2.28E-10
48	PU237	2.22E-03	2.22E-03
49	PU238	5.45E-03	5.45E-03
50	PU239	5.92E+01	5.92E+01
51	PU240	3.79E+00	3.79E+00
52	PU241	2.62E+01	2.62E+01
53	PU242	3.73E-06	3.73E-06

54	PU243	2.36E-01	2.36E-01
55	PU244	1.66E-15	1.66E-15
56	PU245	8.45E-10	8.45E-10
57	PU246	2.61E-14	2.61E-14
58	AM239	3.94E-09	3.94E-09
59	AM240	8.44E-07	8.44E-07
60	AM241	1.15E-03	1.15E-03
61	AM242M	3.07E-06	3.07E-06
62	AM242	2.72E-01	2.72E-01
63	AM243	4.54E-07	4.54E-07

64	AM244M	8.17E-04	8.17E-04
65	AM244	4.29E-05	4.29E-05
66	AM245	8.45E-10	8.45E-10
67	AM246	2.61E-14	2.61E-14
68	CM241	8.84E-11	8.84E-11
69	CM242	6.81E-03	6.81E-03
70	CM243	3.66E-08	3.66E-08
71	CM244	5.41E-07	5.41E-07
72	CM245	7.78E-13	7.78E-13
73	CM246	1.72E-15	1.72E-15



74	CM247	5.56E-23	5.56E-23
75	CM248	1.41E-24	1.41E-24
76	CM249	1.56E-20	1.56E-20

جدول شماره ۲۰: نتایج حاصل برای تخمین رادیواکتیویته ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۳ در هوا

No.	Isotope	ORIGEN	This Work
1	TL208	1.11E-10	1.11E-10
2	PB209	3.73E-18	3.73E-18
3	PB212	5.14E-07	5.14E-07

4	BI212	1.03E-07	1.03E-07
5	PO212	1.98E-18	1.98E-18
6	PO216	1.54E-12	1.54E-12
7	RN220	3.09E-08	3.09E-08
8	FR223	1.22E-12	1.22E-12
9	RA224	1.54E-05	1.54E-05
10	RA226	7.23E-10	7.23E-10
11	AC227	4.41E-05	4.41E-05
12	AC228	3.13E-08	3.13E-08
13	TH227	9.91E-08	9.91E-08

14	TH228	2.76E-03	2.76E-03
15	TH229	2.50E-06	2.50E-06
16	TH230	2.00E-03	2.00E-03
17	TH231	1.22E-01	1.22E-01
18	TH232	6.65E-09	6.65E-09
19	TH233	2.95E-06	2.95E-06
20	TH234	1.60E-08	1.60E-08
21	PA231	1.01E-01	1.01E-01
22	PA232	6.55E-03	6.55E-03
23	PA233	1.95E-03	1.95E-03

24	PA234M	1.38E-08	1.38E-08
25	PA234	1.84E-06	1.84E-06
26	PA235	4.65E-13	4.65E-13
27	U231	2.75E-03	2.75E-03
28	U232	8.29E-02	8.29E-02
29	U233	4.56E-03	4.56E-03
30	U234	1.61E+02	1.61E+02
31	U235	1.22E+03	1.22E+03
32	U236	1.22E+03	1.22E+03
33	U237	9.41E+04	9.41E+04

34	U238	1.82E-05	1.82E-05
35	U239	2.27E-03	2.27E-03
36	U240	4.39E-07	4.39E-07
37	U241	3.97E-13	3.97E-13
38	NP235	1.70E+00	1.70E+00
39	NP236M	5.35E+00	5.35E+00
40	NP236	1.31E-08	1.31E-08
41	NP237	6.14E+02	6.14E+02
42	NP238	1.09E+04	1.09E+04
43	NP239	2.33E+01	2.33E+01

44	NP240M	5.53E-05	5.53E-05
45	NP240	3.52E-04	3.52E-04
46	NP241	3.97E-13	3.97E-13
47	PU236	3.80E+02	3.80E+02
48	PU237	1.11E+11	1.11E+11
49	PU238	7.79E+10	7.79E+10
50	PU239	9.87E+14	9.87E+14
51	PU240	6.32E+13	6.32E+13
52	PU241	8.74E+12	8.74E+12
53	PU242	6.22E+07	6.22E+07

54	PU243	3.94E+06	3.94E+06
55	PU244	2.76E-02	2.76E-02
56	PU245	8.45E-02	8.45E-02
57	PU246	2.61E-04	2.61E-04
58	AM239	1.97E+05	1.97E+05
59	AM240	4.22E+07	4.22E+07
60	AM241	5.77E+09	5.77E+09
61	AM242M	1.54E+07	1.54E+07
62	AM242	2.72E+08	2.72E+08
63	AM243	2.27E+06	2.27E+06

64	AM244M	2.72E+04	2.72E+04
65	AM244	4.29E+02	4.29E+02
66	AM245	2.82E-03	2.82E-03
67	AM246	8.69E-07	8.69E-07
68	CM241	4.42E+03	4.42E+03
69	CM242	1.70E+09	1.70E+09
70	CM243	1.83E+05	1.83E+05
71	CM244	1.80E+06	1.80E+06
72	CM245	3.89E+00	3.89E+00
73	CM246	8.57E-03	8.57E-03



74	CM247	2.78E-10	2.78E-10
75	CM248	7.06E-11	7.06E-11
76	CM249	3.90E-14	3.90E-14

جدول شماره ۲۱: نتایج حاصل برای تخمین رادیواکتیویته ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۳ در آب

No.	Isotope	ORIGEN	This Work
1	TL208	2.22E-14	2.22E-14
2	PB209	2.49E-22	2.49E-22
3	PB212	1.54E-11	1.54E-11
4	BI212	7.72E-13	7.72E-13

5	PO212	4.94E-23	4.94E-23
6	PO216	4.41E-17	4.41E-17
7	RN220	3.09E-16	3.09E-16
8	FR223	1.62E-16	1.62E-16
9	RA224	1.54E-10	1.54E-10
10	RA226	4.82E-14	4.82E-14
11	AC227	1.76E-12	1.76E-12
12	AC228	2.09E-13	2.09E-13
13	TH227	4.96E-14	4.96E-14
14	TH228	7.90E-11	7.90E-11

15	TH229	1.25E-13	1.25E-13
16	TH230	7.98E-11	7.98E-11
17	TH231	2.44E-05	2.44E-05
18	TH232	3.33E-15	3.33E-15
19	TH233	7.36E-10	7.36E-10
20	TH234	8.00E-13	8.00E-13
21	PA231	4.48E-09	4.48E-09
22	PA232	7.64E-07	7.64E-07
23	PA233	1.17E-07	1.17E-07
24	PA234M	2.76E-12	2.76E-12

25	PA234	5.51E-10	5.51E-10
26	PA235	1.39E-20	1.39E-20
27	U231	1.83E-09	1.83E-09
28	U232	2.49E-09	2.49E-09
29	U233	6.08E-10	6.08E-10
30	U234	2.15E-05	2.15E-05
31	U235	1.62E-04	1.62E-04
32	U236	1.63E-04	1.63E-04
33	U237	2.82E+01	2.82E+01
34	U238	1.37E-12	1.37E-12

35	U239	5.69E-07	5.69E-07
36	U240	8.78E-11	8.78E-11
37	U241	1.19E-20	1.19E-20
38	NP235	1.13E-06	1.13E-06
39	NP236M	1.78E-04	1.78E-04
40	NP236	5.23E-13	5.23E-13
41	NP237	2.05E-05	2.05E-05
42	NP238	4.34E-01	4.34E-01
43	NP239	4.66E-03	4.66E-03
44	NP240M	1.11E-08	1.11E-08

45	NP240	8.80E-08	8.80E-08
46	NP241	1.19E-20	1.19E-20
47	PU236	7.60E-06	7.60E-06
48	PU237	7.41E+04	7.41E+04
49	PU238	1.09E+03	1.09E+03
50	PU239	1.19E+07	1.19E+07
51	PU240	7.58E+05	7.58E+05
52	PU241	1.31E+05	1.31E+05
53	PU242	7.46E-01	7.46E-01
54	PU243	7.88E+02	7.88E+02

55	PU244	4.14E-10	4.14E-10
56	PU245	1.41E-05	1.41E-05
57	PU246	8.69E-09	8.69E-09
58	AM239	1.31E-01	1.31E-01
59	AM240	2.82E+01	2.82E+01
60	AM241	2.88E+02	2.88E+02
61	AM242M	7.68E-01	7.68E-01
62	AM242	2.72E+03	2.72E+03
63	AM243	1.13E-01	1.13E-01
64	AM244M	8.17E-04	8.17E-04

65	AM244	8.59E-03	8.59E-03
66	AM245	8.45E-07	8.45E-07
67	AM246	2.61E-14	2.61E-14
68	CM241	2.95E-03	2.95E-03
69	CM242	3.41E+02	3.41E+02
70	CM243	7.33E-03	7.33E-03
71	CM244	7.73E-02	7.73E-02
72	CM245	1.95E-07	1.95E-07
73	CM246	4.29E-10	4.29E-10
74	CM247	1.39E-17	1.39E-17



75	CM248	3.53E-18	3.53E-18
76	CM249	7.81E-18	7.81E-18

جدول شماره ۲۲: نتایج حاصل برای تخمین پرتوزایی آلفا ایزوتوپ‌های تولیدی مسئله شماره ۳ بر حسب کوری

No.	Isotope	ORIGEN	This Work
1	BI212	1.11E-16	1.11E-16
2	PO212	1.98E-16	1.98E-16
3	PO216	3.09E-16	3.09E-16
4	RN220	3.09E-16	3.09E-16

5	FR223	2.92E-24	2.92E-24
6	RA224	3.09E-16	3.09E-16
7	RA226	1.45E-21	1.45E-21
8	AC227	4.86E-20	4.86E-20
9	TH227	9.91E-19	9.91E-19
10	TH228	5.53E-16	5.53E-16
11	TH229	4.99E-20	4.99E-20
12	TH230	1.60E-16	1.60E-16
13	TH232	6.65E-21	6.65E-21
14	PA231	4.03E-15	4.03E-15

15	U231	3.02E-21	3.02E-21
16	U232	7.46E-14	7.46E-14
17	U233	1.82E-14	1.82E-14
18	U234	6.45E-10	6.45E-10
19	U235	4.87E-09	4.87E-09
20	U236	4.89E-09	4.89E-09
21	U238	5.47E-17	5.47E-17
22	NP235	4.76E-19	4.76E-19
23	NP237	6.14E-11	6.14E-11
24	PU236	2.28E-10	2.28E-10

25	PU237	7.34E-08	7.34E-08
26	PU238	5.45E-03	5.45E-03
27	PU239	5.92E+01	5.92E+01
28	PU240	3.79E+00	3.79E+00
29	PU241	6.42E-04	6.42E-04
30	PU242	3.73E-06	3.73E-06
31	PU244	1.66E-15	1.66E-15
32	AM239	3.94E-13	3.94E-13
33	AM240	1.60E-12	1.60E-12
34	AM241	1.15E-03	1.15E-03

35	AM242M	1.54E-08	1.54E-08
36	AM243	4.54E-07	4.54E-07
37	CM241	8.84E-13	8.84E-13
38	CM242	6.81E-03	6.81E-03
39	CM243	3.65E-08	3.65E-08
40	CM244	5.41E-07	5.41E-07
41	CM245	7.78E-13	7.78E-13
42	CM246	1.71E-15	1.71E-15
43	CM247	5.56E-23	5.56E-23
44	CM248	1.30E-24	1.30E-24

## ۱۶-۴ - مسئله شماره ۴

در این مسئله، قدرت حرارتی، جذب و شکافت نوترون ناشی از یک مجتمع سوخت بوشهر با سوخت غنای ۱.۶ درصد پس از یک سال با قدرت اسمی راکتور محاسبه شده است. جهت بررسی مسئله، کتابخانه یک گروهی PWRU کد ORIGEN مورد استفاده قرار گرفته که نتایج حاصل در جدول زیر آمده است.

جدول شماره ۲۳: نتایج حاصل برای تخمین قدرت حرارتی برای هر ایزوتوپ

No.	Isotope	ORIGEN	This Work
1	TH231	7.40E-09	7.40E-09
2	TH232	1.21E-18	1.21E-18
3	TH233	4.85E-10	4.85E-10

4	TH234	2.60E-08	2.60E-08
5	PA231	6.32E-13	6.32E-13
6	PA232	2.59E-08	2.59E-08
7	PA233	3.57E-09	3.57E-09
8	PA234M	3.17E-07	3.17E-07
9	PA234	2.94E-09	2.94E-09
10	PA235	7.84E-13	7.84E-13
11	U230	1.21E-15	1.21E-15
12	U231	2.22E-14	2.22E-14
13	U232	7.38E-11	7.38E-11

14	U233	9.58E-12	9.58E-12
15	U234	1.62E-08	1.62E-08
16	U235	3.39E-07	3.39E-07
17	U236	6.38E-07	6.38E-07
18	U237	8.93E-01	8.93E-01
19	U238	2.81E-06	2.81E-06
20	U239	1.07E+02	1.07E+02
21	U240	4.86E-04	4.86E-04
22	U241	1.11E-07	1.11E-07
23	NP235	3.32E-12	3.32E-12



24	NP236M	7.99E-07	7.99E-07
25	NP236	9.61E-14	9.61E-14
26	NP237	2.05E-07	2.05E-07
27	NP238	1.79E-01	1.79E-01
28	NP239	9.54E+01	9.54E+01
29	NP240M	3.79E-01	3.79E-01
30	NP240	2.73E+00	2.73E+00
31	NP241	1.29E-07	1.29E-07
32	PU236	1.11E-07	1.11E-07
33	PU237	7.39E-10	7.39E-10

34	PU238	2.54E-04	2.54E-04
35	PU239	4.02E-08	4.02E-08
36	PU240	1.22E-05	1.22E-05
37	PU241	1.23E-06	1.23E-06
38	PU242	3.04E-09	3.04E-09
39	PU243	1.30E-04	1.30E-04
40	AM239	2.37E-13	2.37E-13
41	AM240	1.38E-10	1.38E-10
42	AM241	5.51E-08	5.51E-08
43	AM242M	2.05E-11	2.05E-11

44	AM242	7.44E-06	7.44E-06
45	AM243	3.79E-12	3.79E-12
46	AM244M	1.11E-08	1.11E-08
47	AM244	9.89E-10	9.89E-10

جدول شماره ۲۴: نتایج حاصل برای تخمین جذب نوترون بر حسب نوترون بر ثانیه

No.	Isotope	ORIGEN	This Work
1	TH232	3.65E-12	3.65E-12
2	TH233	1.80E-15	1.80E-15

3	TH234	1.19E-12	1.19E-12
4	PA231	7.84E-11	7.84E-11
5	PA232	3.21E-12	3.21E-12
6	PA233	4.86E-12	4.86E-12
7	PA234M	1.64E-14	1.64E-14
8	PA234	1.21E-13	1.21E-13
9	U230	7.49E-21	7.49E-21
10	U231	1.91E-17	1.91E-17
11	U232	7.81E-12	7.81E-12
12	U233	6.15E-09	6.15E-09

13	U234	4.57E-06	4.57E-06
14	U235	8.78E-01	8.78E-01
15	U236	7.19E-03	7.19E-03
16	U237	6.53E-04	6.53E-04
17	U238	8.40E-01	8.40E-01
18	U239	1.58E-05	1.58E-05
19	U240	1.01E-09	1.01E-09
20	NP235	1.71E-11	1.71E-11
21	NP236	2.13E-09	2.13E-09
22	NP237	7.90E-04	7.90E-04

23	NP238	7.14E-05	7.14E-05
24	NP239	6.27E-03	6.27E-03
25	PU236	6.26E-10	6.26E-10
26	PU237	1.86E-10	1.86E-10
27	PU238	4.20E-05	4.20E-05
28	PU239	8.71E-06	8.71E-06
29	PU240	4.53E-04	4.53E-04
30	PU241	1.50E-04	1.50E-04
31	PU242	2.16E-06	2.16E-06
32	PU243	4.46E-09	4.46E-09

33	AM241	1.45E-07	1.45E-07
34	AM242M	7.49E-09	7.49E-09
35	AM242	4.15E-09	4.15E-09
36	AM243	7.34E-11	7.34E-11
37	AM244M	4.49E-14	4.49E-14
38	AM244	7.75E-14	7.75E-14

جدول شماره ۲۵: نتایج حاصل برای تخمین نرخ شکافت و نوترون تولیدی به ازای هر واکنش شکافت بر حسب شکافت بر ثانیه

No.	Isotope	ORIGEN	This Work
1	TH232	2.63E-14	2.63E-14
2	TH233	1.87E-17	1.87E-17
3	TH234	6.55E-15	6.55E-15
4	PA231	4.26E-13	4.26E-13
5	PA232	1.54E-12	1.54E-12
6	PA233	2.85E-14	2.85E-14
7	PA234M	1.11E-14	1.11E-14



8	PA234	1.21E-13	1.21E-13
9	U230	7.49E-21	7.49E-21
10	U231	1.91E-17	1.91E-17
11	U232	4.66E-12	4.66E-12
12	U233	5.48E-09	5.48E-09
13	U234	1.04E-07	1.04E-07
14	U235	7.17E-01	7.17E-01
15	U236	1.83E-04	1.83E-04
16	U237	3.40E-06	3.40E-06
17	U238	8.36E-02	8.36E-02

18	U239	4.61E-06	4.61E-06
19	U240	1.17E-10	1.17E-10
20	NP236	2.13E-09	2.13E-09
21	NP237	1.27E-05	1.27E-05
22	NP238	6.49E-05	6.49E-05
23	NP239	1.83E-04	1.83E-04
24	PU236	3.15E-10	3.15E-10
25	PU237	9.30E-11	9.30E-11
26	PU238	2.79E-06	2.79E-06
27	PU239	5.61E-06	5.61E-06

28	PU240	2.53E-06	2.53E-06
29	PU241	1.13E-04	1.13E-04
30	PU242	2.78E-08	2.78E-08
31	PU243	3.00E-09	3.00E-09
32	AM241	1.36E-09	1.36E-09
33	AM242M	6.19E-09	6.19E-09
34	AM242	3.73E-09	3.73E-09
35	AM243	5.79E-13	5.79E-13
36	AM244M	4.49E-14	4.49E-14
37	AM244	7.75E-14	7.75E-14

## ۱۶-۵- مسئله شماره ۵

در این مسئله، تولید نوترون در اثر واکنش آلفا و نوترون از ده کیلوگرم پلوتونیم ۲۳۹ که به مدت ۱ یک ماه با قدرت ۱۰ مگاوات تحت تابش‌دهی قرار داده شده بررسی شده است. جهت بررسی مسئله، کتابخانه یک گروهی حرارتی کد ORIGEN مورد استفاده قرار گرفته که نتایج حاصل در جدول زیر آمده است.

جدول شماره ۲۶: نتایج حاصل برای تخمین تولید نوترون در اثر واکنش آلفا و نوترون بر حسب نوترون بر ثانیه

No.	Isotope	ORIGEN	This Work
1	PU239	4.34E+05	4.34E+05
2	PU240	1.90E+04	1.90E+04

## ۱۶-۶- مسئله شماره ۶

در این مسئله تولید نوترون ناشی از شکافت خود بخودی از یک کیلوگرم پلوتونیوم ۲۳۹ و یک کیلوگرم کالیفرنیوم ۲۵۲ که به مدت ۱ یک سال با قدرت ۱ مگاوات تحت تابش دهی قرار داده شده است بررسی شده است. جهت بررسی مسئله، کتابخانه یک گروهی PWRU کد ORIGEN مورد استفاده قرار گرفته که نتایج حاصل در جدول زیر آمده است.

جدول شماره ۲۷: نتایج حاصل برای تخمین تولید نوترون در اثر واکنش شکافت خودبخود بر حسب نوترون بر ثانیه

No.	Isotope	ORIGEN	This Work
1	CF252	1.70E+15	1.70E+15
2	CF254	2.99E+13	2.99E+13

## ۱۶-۷- مسئله شماره ۷

در این مسئله، محاسبات فوتونی ناشی از یک مجتمع سوخت بوشهر با سوخت غنای ۱.۶ درصد پس از یک سال با قدرت اسمی راکتور محاسبه شده است. جهت بررسی مسئله، کتابخانه یک گروهی PWRU و کتابخانه فوتونی GXUO2BRM کد ORIGEN مورد استفاده قرار گرفته که نتایج حاصل در جدول زیر آمده است.

- دسته اکتینیدها

جدول شماره ۲۸: نتایج حاصل برای تخمین نرخ فوتون آزاد شده در دسته اکتینیدها بر حسب فوتون بر ثانیه

Energy Mean(EMEAN)	Origen	This Work
1.00E-02	2.24E+15	2.24E+15

2.50E-02	9.88E+13	9.88E+13
3.75E-02	1.48E+14	1.48E+14
5.75E-02	1.10E+14	1.10E+14
8.50E-02	1.02E+15	1.02E+15
1.25E-01	8.03E+14	8.03E+14
2.25E-01	5.68E+14	5.68E+14
3.75E-01	6.19E+13	6.19E+13
5.75E-01	9.80E+12	9.80E+12
8.50E-01	1.42E+13	1.42E+13
1.25E+00	1.68E+11	1.68E+11

1.75E+00	3.37E+07	3.37E+07
2.25E+00	1.16E+03	1.16E+03
2.75E+00	6.67E+02	6.67E+02
3.50E+00	5.97E+02	5.97E+02
5.00E+00	2.56E+02	2.56E+02
7.00E+00	2.95E+01	2.95E+01
9.50E+00	3.39E+00	3.39E+00



جدول شماره ۲۹: نتایج حاصل برای تخمین نرخ انرژی آزاد شده در دسته اکتینیدها بر حسب مگاالکترون ولت بر وات ثانیه

Energy Mean(EMEAN	Origen	This Work
1.00E-02	2.24E+07	2.24E+07
2.50E-02	2.47E+06	2.47E+06
3.75E-02	5.54E+06	5.54E+06
5.75E-02	6.33E+06	6.33E+06
8.50E-02	8.70E+07	8.70E+07
1.25E-01	1.00E+08	1.00E+08
2.25E-01	1.28E+08	1.28E+08
3.75E-01	2.32E+07	2.32E+07
5.75E-01	5.64E+06	5.64E+06

8.50E-01	1.21E+07	1.21E+07
1.25E+00	2.10E+05	2.10E+05
1.75E+00	5.89E+01	5.89E+01
2.25E+00	2.61E-03	2.61E-03
2.75E+00	1.84E-03	1.84E-03
3.50E+00	2.09E-03	2.09E-03
5.00E+00	1.28E-03	1.28E-03
7.00E+00	2.07E-04	2.07E-04
9.50E+00	3.22E-05	3.22E-05

جدول شماره ۳۰: نتایج حاصل برای شدت منبع فوتونی در هر گروه در دسته اکتینیدها بر حسب فوتون بر ثانیه

Isotope	Origen	This Work	Relative error(%)
<b>GROUP 1</b>			
U235	2.55E+08	2.55E+08	0
U238	4.72E+08	4.71E+08	0
U239	7.30E+14	7.30E+14	0
NP239	1.50E+15	1.50E+15	0
<b>GROUP 2</b>			
U239	7.88E+13	7.89E+13	0
NP239	1.96E+13	1.96E+13	0
<b>GROUP 3</b>			
U235	3.90E+05	3.90E+05	0
U239	1.35E+14	1.35E+14	0
NP239	1.33E+13	1.33E+13	0
<b>GROUP 4</b>			

U235	7.60E+04	7.60E+04	0
U237	3.72E+12	3.72E+12	0
U238	2.49E+06	2.49E+06	0
U239	7.04E+13	7.04E+13	0
NP239	3.60E+13	3.60E+13	0
<b>GROUP 5</b>			
U235	3.33E+07	3.33E+07	0
U239	7.54E+14	7.55E+14	0
NP239	2.68E+14	2.68E+14	0
<b>GROUP 6</b>			
U235	6.57E+07	6.57E+07	0
U239	2.74E+13	2.74E+13	0
NP239	7.72E+14	7.72E+14	0
<b>GROUP7</b>			
U235	2.33E+08	2.33E+08	0
U239	3.00E+13	3.00E+13	0

NP239	5.35E+14	5.35E+14	0
<b>GROUP 8</b>			
U235	5.80E+05	5.80E+05	0
U239	1.02E+13	1.02E+13	0
NP239	5.16E+13	5.16E+13	0
<b>GROUP 9</b>			
U235	2.86E+04	2.86E+04	0
U239	9.57E+12	9.57E+12	0
NP239	2.22E+11	2.22E+11	0
<b>GROUP 10</b>			
U235	3.89E+03	3.89E-01	0
U238	8.69E+03	8.69E+03	0
U239	1.42E+13	1.42E+13	0
<b>GROUP 11</b>			
U238	4.04E+03	4.04E+03	0
U239	1.67E+11	1.67E+11	0

<b>GROUP 12</b>			
PA234M	2.12E+06	2.12E+06	0
U238	1.98E+03	1.98E+03	0
NP240M	3.13E+07	3.14E+07	0
<b>GROUP 13</b>			
U238	1.15E+03	1.15E+03	0
<b>GROUP 14</b>			
U238	6.66E+02	6.66E+02	0
<b>GROUP 15</b>			
U238	5.96E+02	5.96E+02	0
<b>GROUP 16</b>			
U238	2.56E+02	2.56E+02	0
<b>GROUP 17</b>			
U238	2.95E+01	2.95E+01	0
<b>GROUP 18</b>			
U238	3.39E+00	3.39E+00	0

- دسته پاره‌های شکافت

جدول شماره ۳۱: نتایج حاصل برای تخمین نرخ فوتون آزاد شده در دسته پاره‌های شکافت بر حسب فوتون بر ثانیه

EMEAN	Origen	This Work
1.00E-02	3.16E+15	3.16E+15
2.50E-02	7.98E+14	7.98E+14
3.75E-02	6.51E+14	6.51E+14
5.75E-02	6.85E+14	6.85E+14
8.50E-02	5.04E+14	5.04E+14
1.25E-01	5.04E+14	5.04E+14

2.25E-01	1.27E+15	1.27E+15
3.75E-01	7.68E+14	7.68E+14
5.75E-01	1.27E+15	1.27E+15
8.50E-01	1.33E+15	1.33E+15
1.25E+00	8.81E+14	8.81E+14
1.75E+00	2.99E+14	2.99E+14
2.25E+00	1.74E+14	1.74E+14
2.75E+00	7.44E+13	7.44E+13
3.50E+00	4.47E+13	4.47E+13
5.00E+00	2.38E+13	2.38E+13



7.00E+00	1.95E+11	1.95E+11
9.50E+00	4.06E+07	4.06E+07

جدول شماره ۳۲: نتایج حاصل برای تخمین نرخ انرژی آزاد شده در دسته پاره‌های شکافت بر حسب مگا الکترون ولت بر وات. ثانیه

EMEAN	Origen	This Work
1.00E-02	3.164E+07	3.164E+07
2.50E-02	1.996E+07	1.996E+07
3.75E-02	2.441E+07	2.441E+07
5.75E-02	3.941E+07	3.941E+07

8.50E-02	4.282E+07	4.282E+07
1.25E-01	6.305E+07	6.305E+07
2.25E-01	2.863E+08	2.863E+08
3.75E-01	2.879E+08	2.879E+08
5.75E-01	7.325E+08	7.325E+08
8.50E-01	1.130E+09	1.130E+09
1.25E+00	1.101E+09	1.101E+09
1.75E+00	5.240E+08	5.240E+08
2.25E+00	3.919E+08	3.919E+08
2.75E+00	2.045E+08	2.045E+08

3.50E+00	1.563E+08	1.563E+08
5.00E+00	1.188E+08	1.188E+08
7.00E+00	1.368E+06	1.368E+06
9.50E+00	3.856E+02	3.856E+02

جدول شماره ۳۳: نتایج حاصل برای شدت منبع فوتونی در هر گروه در دسته پاره‌های شکافت بر حسب فوتون بر ثانیه

Isotope	Origen	This Work	Relative error(%)
<b>GROUP 1</b>			
BR 88	5.19E+13	5.19E+13	0.0
RB 88	6.51E+13	6.51E+13	0.0
KR 89	5.57E+13	5.57E+13	0.0
RB 89	4.28E+13	4.28E+13	0.0

KR 90	5.76E+13	5.76E+13	0.0
RB 90	7.54E+13	7.54E+13	0.0
SR 91	3.38E+13	3.38E+13	0.0
KR 92	3.38E+13	3.38E+13	0.0
RB 92	1.40E+14	1.40E+14	0.0
Y 92	7.71E+13	7.71E+13	0.0
Y 93	6.83E+13	6.83E+13	0.0
RB 94	6.12E+13	6.12E+13	0.0
Y 94	9.26E+13	9.26E+13	0.0
Y 96	1.46E+14	1.46E+14	0.0
ZR 97	3.72E+13	3.72E+13	0.0
NB 98	1.04E+14	1.04E+14	0.0
NB 99	8.32E+13	8.32E+13	0.0
ZR101	9.13E+13	9.13E+13	0.0
MO101	1.43E+14	1.43E+14	0.0
TC102	6.41E+13	6.41E+13	0.0

TC104	3.51E+13	3.51E+13	0.0
I134	4.31E+13	4.31E+13	0.0
TE135	7.48E+13	7.48E+13	0.0
I136	6.02E+13	6.02E+13	0.0
I136M	3.70E+13	3.70E+13	0.0
XE137	9.59E+13	9.59E+13	0.0
I138	5.16E+13	5.16E+13	0.0
XE138	4.02E+13	4.02E+13	0.0
CS138	7.26E+13	7.26E+13	0.0
XE139	8.00E+13	8.00E+13	0.0
CS139	9.69E+13	9.69E+13	0.0
BA139	5.24E+13	5.24E+13	0.0
BA141	4.68E+13	4.68E+13	0.0
LA141	5.04E+13	5.04E+13	0.0
LA142	4.47E+13	4.47E+13	0.0
<b>GROUP 2</b>			

BR 88	1.17E+13	1.17E+13	0.0
RB 88	1.46E+13	1.46E+13	0.0
KR 89	1.21E+13	1.21E+13	0.0
RB 89	9.31E+12	9.31E+12	0.0
KR 90	1.14E+13	1.14E+13	0.0
RB 90	1.68E+13	1.68E+13	0.0
RB 92	3.19E+13	3.19E+13	0.0
Y 92	1.70E+13	1.70E+13	0.0
Y 93	1.48E+13	1.48E+13	0.0
RB 94	1.40E+13	1.40E+13	0.0
Y 94	2.06E+13	2.06E+13	0.0
Y 96	3.28E+13	3.28E+13	0.0
NB 98	2.30E+13	2.30E+13	0.0
NB 99	1.83E+13	1.83E+13	0.0
ZR101	2.06E+13	2.06E+13	0.0
TC102	1.42E+13	1.42E+13	0.0

SN130	9.10E+12	9.10E+12	0.0
TE131	8.63E+12	8.63E+12	0.0
SB132M	8.21E+12	8.21E+12	0.0
TE132	4.41E+13	4.41E+13	0.0
TE134	3.20E+13	3.20E+13	0.0
I134	1.03E+13	1.03E+13	0.0
TE135	1.68E+13	1.68E+13	0.0
I136	1.34E+13	1.34E+13	0.0
I136M	1.06E+13	1.06E+13	0.0
XE137	2.12E+13	2.12E+13	0.0
I138	1.18E+13	1.18E+13	0.0
CS138	1.58E+13	1.58E+13	0.0
XE139	1.77E+13	1.77E+13	0.0
CS139	2.15E+13	2.15E+13	0.0
BA139	1.11E+13	1.11E+13	0.0
BA140	1.55E+13	1.55E+13	0.0

BA141	9.96E+12	9.96E+12	0.0
LA141	1.08E+13	1.08E+13	0.0
LA142	9.59E+12	9.59E+12	0.0
<b>GROUP 3</b>			
BR 88	7.988E+12	7.988E+12	0.0
RB 88	9.924E+12	9.924E+12	0.0
KR 89	8.108E+12	8.108E+12	0.0
KR 90	7.631E+12	7.631E+12	0.0
RB 90	1.145E+13	1.145E+13	0.0
RB 92	2.187E+13	2.187E+13	0.0
Y 92	1.136E+13	1.136E+13	0.0
Y 93	9.886E+12	9.886E+12	0.0
RB 94	9.639E+12	9.639E+12	0.0
Y 94	1.389E+13	1.389E+13	0.0
Y 96	2.243E+13	2.243E+13	0.0
NB 98	1.557E+13	1.557E+13	0.0



NB 99	1.237E+13	1.237E+13	0.0
ZR101	1.409E+13	1.409E+13	0.0
TC102	9.537E+12	9.537E+12	0.0
TE132	7.667E+12	7.667E+12	0.0
XE133	3.878E+13	3.878E+13	0.0
TE134	6.924E+12	6.924E+12	0.0
TE135	1.141E+13	1.141E+13	0.0
I136	9.125E+12	9.125E+12	0.0
XE137	1.462E+13	1.462E+13	0.0
I138	8.030E+12	8.030E+12	0.0
XE138	8.030E+12	8.030E+12	0.0
CS138	1.060E+13	1.060E+13	0.0
XE139	1.196E+13	1.196E+13	0.0
CS139	1.447E+13	1.447E+13	0.0
BA139	1.120E+13	1.120E+13	0.0
BA141	1.182E+13	1.182E+13	0.0

LA141	7.179E+12	7.179E+12	0.0
CE141	7.394E+12	7.394E+12	0.0
BA142	1.843E+13	1.843E+13	0.0
LA142	6.552E+12	6.552E+12	0.0
CE143	5.651E+13	5.651E+13	0.0
CE145	3.384E+13	3.384E+13	0.0
ND147	1.475E+13	1.475E+13	0.0
ND149	6.636E+12	6.636E+12	0.0
<b>GROUP 4</b>			
BR 88	1.22E+13	1.22E+13	0.0
RB 88	1.51E+13	1.51E+13	0.0
KR 89	1.22E+13	1.22E+13	0.0
RB 89	9.17E+12	9.17E+12	0.0
KR 90	1.14E+13	1.14E+13	0.0
RB 90	1.74E+13	1.74E+13	0.0
KR 92	7.89E+12	7.89E+12	0.0

RB 92	3.38E+13	3.38E+13	0.0
Y 92	1.71E+13	1.71E+13	0.0
Y 93	1.47E+13	1.47E+13	0.0
RB 94	1.50E+13	1.50E+13	0.0
Y 94	2.09E+13	2.09E+13	0.0
Y 96	3.44E+13	3.44E+13	0.0
ZR 97	7.44E+12	7.44E+12	0.0
NB 98	2.36E+13	2.36E+13	0.0
NB 99	1.85E+13	1.85E+13	0.0
ZR101	2.16E+13	2.16E+13	0.0
TC102	1.43E+13	1.43E+13	0.0
TC104	7.76E+12	7.76E+12	0.0
SN130	7.91E+12	7.91E+12	0.0
TE132	8.54E+12	8.54E+12	0.0
I134	8.49E+12	8.49E+12	0.0
TE135	1.75E+13	1.75E+13	0.0

I136	1.38E+13	1.38E+13	0.0
I136M	8.56E+12	8.56E+12	0.0
XE137	2.17E+13	2.17E+13	0.0
I138	1.24E+13	1.24E+13	0.0
XE138	7.54E+12	7.54E+12	0.0
CS138	1.57E+13	1.57E+13	0.0
XE139	1.81E+13	1.81E+13	0.0
CS139	2.19E+13	2.19E+13	0.0
BA139	1.08E+13	1.08E+13	0.0
BA141	9.60E+12	9.60E+12	0.0
LA141	1.05E+13	1.05E+13	0.0
LA142	9.32E+12	9.32E+12	0.0
CE143	1.42E+13	1.42E+13	0.0
CE145	1.32E+13	1.32E+13	0.0
<b>GROUP 5</b>			
BR 88	8.10E+12	8.10E+12	0.0

RB 88	9.87E+12	9.87E+12	0.0
KR 89	7.84E+12	7.84E+12	0.0
RB 89	5.80E+12	5.80E+12	0.0
KR 90	7.22E+12	7.22E+12	0.0
RB 90	1.14E+13	1.14E+13	0.0
KR 92	5.19E+12	5.19E+12	0.0
RB 92	2.27E+13	2.27E+13	0.0
Y 92	1.10E+13	1.10E+13	0.0
Y 93	9.32E+12	9.32E+12	0.0
RB 94	1.01E+13	1.01E+13	0.0
Y 94	1.35E+13	1.35E+13	0.0
Y 96	2.28E+13	2.28E+13	0.0
NB 98	1.54E+13	1.54E+13	0.0
NB 99	1.19E+13	1.19E+13	0.0
ZR101	1.43E+13	1.43E+13	0.0
MO101	5.85E+12	5.85E+12	0.0

TC102	9.19E+12	9.19E+12	0.0
SN132	6.05E+12	6.05E+12	0.0
TE133M	5.95E+12	5.95E+12	0.0
XE133	3.47E+13	3.47E+13	0.0
TE134	2.18E+13	2.18E+13	0.0
I134	5.12E+12	5.12E+12	0.0
TE135	1.15E+13	1.15E+13	0.0
I136	9.08E+12	9.08E+12	0.0
I136M	5.60E+12	5.60E+12	0.0
XE137	1.41E+13	1.41E+13	0.0
I138	8.28E+12	8.28E+12	0.0
CS138	9.93E+12	9.93E+12	0.0
XE139	1.19E+13	1.19E+13	0.0
CS139	1.42E+13	1.42E+13	0.0
BA139	6.69E+12	6.69E+12	0.0
BA141	5.97E+12	5.97E+12	0.0

LA141	6.57E+12	6.57E+12	0.0
BA142	1.20E+13	1.20E+13	0.0
LA142	5.81E+12	5.81E+12	0.0
ND147	9.34E+12	9.34E+12	0.0
<b>GROUP 6</b>			
BR 88	5.82E+12	5.82E+12	0.0
RB 88	7.00E+12	7.00E+12	0.0
KR 89	5.41E+12	5.41E+12	0.0
KR 90	2.89E+13	2.89E+13	0.0
RB 90	8.03E+12	8.03E+12	0.0
KR 92	1.32E+13	1.32E+13	0.0
RB 92	1.63E+13	1.63E+13	0.0
Y 92	7.59E+12	7.59E+12	0.0
Y 93	6.35E+12	6.35E+12	0.0
RB 94	7.30E+12	7.30E+12	0.0
Y 94	9.45E+12	9.45E+12	0.0

Y 96	1.62E+13	1.62E+13	0.0
NB 98	1.08E+13	1.08E+13	0.0
NB 99	8.25E+12	8.25E+12	0.0
MO 99	6.51E+12	6.51E+12	0.0
TC 99M	8.09E+13	8.09E+13	0.0
ZR101	1.02E+13	1.02E+13	0.0
TC102	6.39E+12	6.39E+12	0.0
TE131	3.57E+13	3.57E+13	0.0
SB132	5.49E+12	5.49E+12	0.0
SB132M	6.07E+12	6.07E+12	0.0
I134	8.95E+12	8.95E+12	0.0
TE135	8.12E+12	8.12E+12	0.0
I136	6.36E+12	6.36E+12	0.0
XE137	9.78E+12	9.78E+12	0.0
I138	5.95E+12	5.95E+12	0.0
CS138	8.57E+12	8.57E+12	0.0



XE139	8.70E+12	8.70E+12	0.0
CS139	9.81E+12	9.81E+12	0.0
CE141	2.34E+13	2.34E+13	0.0
CE146	5.22E+12	5.22E+12	0.0
<b>GROUP7</b>			
KR 88	1.46E+13	1.46E+13	0.0
KR 89	2.34E+13	2.34E+13	0.0
KR 90	1.75E+13	1.75E+13	0.0
RB 92	2.65E+13	2.65E+13	0.0
Y 93	1.71E+13	1.71E+13	0.0
Y 94	1.45E+13	1.45E+13	0.0
Y 96	2.60E+13	2.60E+13	0.0
NB 98	1.67E+13	1.67E+13	0.0
ZR101	9.07E+13	9.07E+13	0.0
MO101	1.77E+13	1.77E+13	0.0
SN130	1.44E+13	1.44E+13	0.0

TE132	6.01E+13	6.01E+13	0.0
TE133M	1.56E+13	1.56E+13	0.0
TE134	7.48E+13	7.48E+13	0.0
TE135	2.05E+13	2.05E+13	0.0
XE135	9.90E+13	9.90E+13	0.0
I136M	2.42E+13	2.42E+13	0.0
XE137	1.52E+13	1.52E+13	0.0
XE138	4.64E+13	4.64E+13	0.0
XE139	9.78E+13	9.78E+13	0.0
CS139	1.52E+13	1.52E+13	0.0
BA139	2.22E+13	2.22E+13	0.0
BA141	6.65E+13	6.65E+13	0.0
BA142	3.72E+13	3.72E+13	0.0
CE143	5.36E+13	5.36E+13	0.0
<b>GROUP 8</b>			
KR 87	2.25E+13	2.25E+13	0.0

KR 89	1.23E+13	1.23E+13	0.0
RB 92	1.59E+13	1.59E+13	0.0
Y 92	8.42E+12	8.42E+12	0.0
Y 94	9.82E+12	9.82E+12	0.0
Y 96	1.50E+13	1.50E+13	0.0
NB 98	9.21E+12	9.21E+12	0.0
ZR101	1.85E+13	1.85E+13	0.0
TC101	5.89E+13	5.89E+13	0.0
TC104	3.35E+13	3.35E+13	0.0
I131	3.35E+13	3.35E+13	0.0
TE133	5.92E+13	5.92E+13	0.0
TE133M	8.63E+12	8.63E+12	0.0
TE134	2.29E+13	2.29E+13	0.0
I134	1.84E+13	1.84E+13	0.0
I136M	3.73E+13	3.73E+13	0.0
XE137	8.21E+12	8.21E+12	0.0

XE138	3.32E+13	3.32E+13	0.0
CS138	1.13E+13	1.13E+13	0.0
XE139	1.32E+13	1.32E+13	0.0
CS139	8.24E+12	8.24E+12	0.0
LA140	1.56E+13	1.56E+13	0.0
BA141	3.44E+13	3.44E+13	0.0
BA142	1.61E+13	1.61E+13	0.0
CE145	1.30E+13	1.30E+13	0.0
CE146	1.24E+13	1.24E+13	0.0
PR148	2.17E+13	2.17E+13	0.0
<b>GROUP 9</b>			
KR 89	2.62E+13	2.62E+13	0.0
KR 90	2.85E+13	2.85E+13	0.0
SR 91	1.40E+13	1.40E+13	0.0
Y 91M	4.64E+13	4.64E+13	0.0
NB 97	1.02E+14	1.02E+14	0.0

MO101	3.68E+13	3.68E+13	0.0
TC102	5.04E+13	5.04E+13	0.0
RU103	1.84E+13	1.84E+13	0.0
TC104	1.54E+13	1.54E+13	0.0
SB131	1.77E+13	1.77E+13	0.0
SB132	3.42E+13	3.42E+13	0.0
SB132M	2.27E+13	2.27E+13	0.0
I132	1.14E+14	1.14E+14	0.0
TE133M	1.95E+13	1.95E+13	0.0
I133	8.58E+13	8.58E+13	0.0
TE134	3.68E+13	3.68E+13	0.0
I134	5.77E+13	5.77E+13	0.0
TE135	5.05E+13	5.05E+13	0.0
XE135M	1.29E+13	1.29E+13	0.0
XE137	2.72E+13	2.72E+13	0.0
I138	4.26E+13	4.26E+13	0.0

CS138	3.91E+13	3.91E+13	0.0
XE139	1.44E+13	1.44E+13	0.0
BA140	1.41E+13	1.41E+13	0.0
LA140	2.79E+13	2.79E+13	0.0
BA141	2.47E+13	2.47E+13	0.0
LA142	5.50E+13	5.50E+13	0.0
<b>GROUP 10</b>			
BR 88	3.59E+13	3.59E+13	0.0
KR 89	1.94E+13	1.94E+13	0.0
RB 90	2.58E+13	2.58E+13	0.0
RB 90M	1.46E+13	1.46E+13	0.0
SR 91	2.25E+13	2.25E+13	0.0
Y 92	1.70E+13	1.70E+13	0.0
RB 94	3.07E+13	3.07E+13	0.0
Y 94	7.81E+13	7.81E+13	0.0
ZR 95	2.34E+13	2.34E+13	0.0

NB 97M	7.28E+13	7.28E+13	0.0
MO 99	1.37E+13	1.37E+13	0.0
SB128M	1.41E+13	1.41E+13	0.0
SB130M	4.38E+13	4.38E+13	0.0
SB131	3.64E+13	3.64E+13	0.0
SB132	4.20E+13	4.20E+13	0.0
SB132M	2.04E+13	2.04E+13	0.0
I132	7.38E+13	7.38E+13	0.0
TE133M	7.22E+13	7.22E+13	0.0
TE134	4.91E+13	4.91E+13	0.0
I134	2.19E+14	2.19E+14	0.0
LA140	3.14E+13	3.14E+13	0.0
BA142	2.61E+13	2.61E+13	0.0
CE145	3.83E+13	3.83E+13	0.0
<b>GROUP 11</b>			
KR 89	1.69E+13	1.69E+13	0.0

RB 89	6.50E+13	6.50E+13	0.0
KR 90	2.78E+13	2.78E+13	0.0
SR 91	2.61E+13	2.61E+13	0.0
KR 92	1.08E+13	1.08E+13	0.0
SR 92	9.11E+13	9.11E+13	0.0
Y 94	1.39E+13	1.39E+13	0.0
MO101	2.93E+13	2.93E+13	0.0
SB130M	1.04E+13	1.04E+13	0.0
SB131	1.09E+13	1.09E+13	0.0
I132	1.58E+13	1.58E+13	0.0
TE133	1.43E+13	1.43E+13	0.0
I134	3.72E+13	3.72E+13	0.0
I135	7.13E+13	7.13E+13	0.0
I136	4.98E+13	4.98E+13	0.0
I136M	3.10E+13	3.10E+13	0.0
CS138	1.19E+14	1.19E+14	0.0



XE139	9.47E+12	9.47E+12	0.0
CS139	1.10E+13	1.10E+13	0.0
BA141	1.25E+13	1.25E+13	0.0
BA142	4.12E+13	4.12E+13	0.0
LA142	1.61E+13	1.61E+13	0.0
<b>GROUP 12</b>			
BR 84	3.22E+12	3.22E+12	0.0
BR 88	4.29E+12	4.29E+12	0.0
KR 88	6.99E+12	6.99E+12	0.0
RB 88	1.30E+13	1.30E+13	0.0
KR 89	1.40E+13	1.40E+13	0.0
KR 90	1.32E+13	1.32E+13	0.0
RB 92	3.42E+12	3.42E+12	0.0
Y 94	6.35E+12	6.35E+12	0.0
MO101	1.06E+13	1.06E+13	0.0
TC104	9.77E+12	9.77E+12	0.0

SB131	7.18E+12	7.18E+12	0.0
SB132	3.47E+12	3.47E+12	0.0
TE133	3.83E+12	3.83E+12	0.0
TE133M	4.72E+12	4.72E+12	0.0
I134	1.68E+13	1.68E+13	0.0
I135	2.32E+13	2.32E+13	0.0
XE138	1.89E+13	1.89E+13	0.0
XE139	6.16E+12	6.16E+12	0.0
CS139	3.22E+12	3.22E+12	0.0
LA140	6.59E+13	6.59E+13	0.0
BA141	4.34E+12	4.34E+12	0.0
LA142	1.95E+13	1.95E+13	0.0
<b>GROUP 13</b>			
BR 88	1.78E+12	1.78E+12	0.0
KR 88	3.32E+13	3.32E+13	0.0
KR 89	4.01E+12	4.01E+12	0.0

RB 89	1.11E+13	1.11E+13	0.0
KR 90	2.00E+12	2.00E+12	0.0
RB 90	2.41E+12	2.41E+12	0.0
Y 94	2.31E+12	2.31E+12	0.0
MO101	7.12E+12	7.12E+12	0.0
TC104	2.59E+12	2.59E+12	0.0
SB131	3.46E+12	3.46E+12	0.0
TE133M	2.82E+12	2.82E+12	0.0
I135	2.52E+12	2.52E+12	0.0
I136	9.37E+12	9.37E+12	0.0
XE138	1.96E+13	1.96E+13	0.0
CS138	1.60E+13	1.60E+13	0.0
XE139	4.06E+12	4.06E+12	0.0
CS139	2.41E+12	2.41E+12	0.0
LA142	3.15E+13	3.15E+13	0.0
<b>GROUP 14</b>			

KR 87	4.83E+12	4.83E+12	0.0
BR 88	2.86E+12	2.86E+12	0.0
RB 88	1.27E+12	1.27E+12	0.0
KR 89	3.83E+12	3.83E+12	0.0
RB 89	7.97E+12	7.97E+12	0.0
KR 90	1.02E+12	1.02E+12	0.0
RB 90M	2.33E+12	2.33E+12	0.0
RB 92	1.28E+12	1.28E+12	0.0
Y 94	1.25E+12	1.25E+12	0.0
TC104	2.31E+12	2.31E+12	0.0
I136	5.77E+12	5.77E+12	0.0
CS138	7.99E+12	7.99E+12	0.0
XE139	2.29E+12	2.29E+12	0.0
CS139	1.19E+12	1.19E+12	0.0
LA140	2.51E+12	2.51E+12	0.0
LA142	1.90E+13	1.90E+13	0.0

<b>GROUP 15</b>			
BR 84	2.28E+12	2.28E+12	0.0
BR 88	4.55E+12	4.55E+12	0.0
KR 89	6.55E+12	6.55E+12	0.0
RB 89	9.95E+11	9.95E+11	0.0
RB 90	1.24E+13	1.24E+13	0.0
RB 90M	3.37E+12	3.37E+12	0.0
RB 92	9.72E+11	9.72E+11	0.0
RB 94	5.78E+11	5.78E+11	0.0
TC104	1.24E+12	1.24E+12	0.0
I136	1.01E+12	1.01E+12	0.0
CS138	5.30E+11	5.30E+11	0.0
XE139	4.96E+11	4.96E+11	0.0
CS139	6.47E+11	6.47E+11	0.0
LA142	6.86E+12	6.86E+12	0.0
<b>GROUP 16</b>			

BR 88	5.60E+12	5.60E+12	0.0
KR 89	4.83E+11	4.83E+11	0.0
RB 90	1.44E+13	1.44E+13	0.0
RB 90M	5.36E+11	5.36E+11	0.0
RB 92	2.33E+12	2.33E+12	0.0
<b>GROUP 17</b>			
RB 92	1.84E+11	1.84E+11	0.0
RB 94	1.13E+10	1.13E+10	0.0
<b>GROUP 18</b>			
RB 94	4.06E+07	4.06E+07	0.0

## ۱۷- نتیجه گیری

هدف از انجام این پروژه، طراحی نرم‌افزاری جهت محاسبات مصرف سوخت به صورت یک گروهی نظیر کد ORIGEN بوده است. در این پروژه الگوریتمی جهت محاسبه عناصر بلند مدت و کوتاه مدت در محیط همگن و غیر همگن با شار ثابت طراحی گردید. در ادامه ویژگی‌هایی نظیر محاسبات غلظت بر حسب درصد اتمی و وزنی، رادیواکتیویته عناصر در آب و هوا و پرتوزایی آلفای آنها به نرم‌افزار محاسبات مصرف سوخت تهیه شده، افزوده شد.

همچنین محاسبات نوترونی نظیر محاسبات قدرت حرارتی بر حسب وات، نرخ جذب نوترون بر حسب نوترون بر ثانیه، نرخ شکافت بر حسب شکافت بر ثانیه، منبع نوترون در اثر واکنش آلفا و نوترون و منبع نوترون در اثر واکنش شکافت خودبخود بر حسب نوترون بر ثانیه و محاسبات فوتونی در هر سه دسته عناصر نظیر نرخ فوتون آزاد شده بر حسب فوتون بر ثانیه، نرخ انرژی آزاد شده در هر گروه بر حسب مگاالکترون ولت بر وات. ثانیه، شدت منبع فوتونی در هر گروه انرژی

(۱۸ گروه) برای هر ایزوتوپ بر حسب فوتون بر ثانیه به نرم افزار محاسبات مصرف سوخت اضافه و با نتایج محاسبات کد ORIGEN مقایسه گردید.

نتایج حاصل نشان می دهد که روابط ریاضی به کار رفته در اکثر موارد از دقت کافی جهت انجام محاسبات مصرف عناصر برخوردار می باشد. بررسی های صورت گرفته نشان از همخوانی نتایج محاسبات با کد ORIGEN دارد.

## ۱۸- مراجع

1. Parma, E. J. "BURNCAL: A Nuclear Reactor Burnup Code Using MCNP Tallies", Advanced Nuclear Concepts Sandia National Laboratories P.O. Box 5800 Albuquerque, NM 87185-1141(2,4).
2. Sasahara, A. Matsumura, T. Nicolaou, G. Kiyanaqil, Y. "Isotopic Analysis of Actinides and Fission Products in LWR High-Burnup UO2 Spent Fuels and its Comparison with Nuclide Composition Calculated Using JENDL, ENDF/B, JEF and JEFF", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 45, No. 4, p. 313–327 (2008).



3. [http://www.nea.fr/abs/html/psr-0365.html\(mocup\)](http://www.nea.fr/abs/html/psr-0365.html(mocup))
4. Ludwig, S. "ORIGEN2, Version 2.1 (8-1-91) Released Notes," revised May 1999.
5. Tamamoto, T. Kanayama, Y. "Lattice Physics Analysis of Burnups and Isotope Inventories of U, Pu, and Nd of Irradiated BWR 9\_9-9 UO2 Fuel Assemblies", Japan Nuclear Energy Safety Organization, TOKYU REIT Toranomom Bldg(3)
6. Olson, A. P. "Status of REBUS Fuel Management Software Development for RERTR Applications". Argonne National Laboratory, 9700 South Cass Avenue, Argonne, Illinois 60439-4841 USA
7. Croff, A. G. "A User's Manual For The ORIGEN2 Computer Code," ORNL/TM-7175 (CCC-371), Oak Ridge National Laboratory, July 1980.
8. Croff, A. G. "ORIGEN2: A Versatile Computer Code For Calculating The Nuclide Compositions And Characteristics of Nuclear Materials," Nuclear Technology, 62, 335-352, September 1983.
9. Ewbank, W. B. Schmorak, M. R. Bertrand, F. E. Feliciano, M. Horen, D. J. "Nuclear Structure Data File: A Manual For Preparation of Data Sets," ORNL-5054, Oak Ridge National Laboratory, 1975.
10. Holden, N. E. "Isotopic Composition of the Elements And Their Variation In Nature: A Preliminary Report," BNL-NCS-50605, Brookhaven National Laboratory, 1977.

11. Croff, G. Haese, R. L. Gove, N. B. "Updated Decay And Photon Libraries For The ORIGEN Code," ORNL/TM-6055, Oak Ridge National Laboratory, 1979.
12. "Decay Heat Power In Light Water Reactors," ANS Standard 5.1, American Nuclear Society, 1978.
13. Cetnar, J. "General Solution of Bateman Equations for Nuclear Transmutations", annals nuclear energy, Faculty of Physics and Applied Computer Sciences, AGH-University of Science and Technology.
14. [www-neutron-kth-se\\_courses\\_transmutation\\_Bateman\\_Bateman.html](http://www-neutron-kth-se_courses_transmutation_Bateman_Bateman.html).
15. TAKANO, M. "OECD/NEA BURNUP CREDIT CRITICALITY BENCHMARK- RESULT OF PHASE-1A" .JAERI, January 1994
16. TAKANO, M. OKUNO, H. "OECD/NEA BURNUP CREDIT CRITICALITY BENCHMARK Result of Phase-IIA". Japan Atomic Energy Research Institute.
17. Nouri, A. "OECD/NEA Burnup Credit Calculational Criticality Benchmark. Analysis of Phase II-B Results". NEA/NSC/DOC(98)1
18. RABY, J. LAVARENNE, C. BARREAU, A. BIOUX, Ph. DOUCET, M. GUILLOU, E. LEKA, G. RIFFARD, C. ROQUE, B. TOUBON, H. "Current Studies Related to the Use of Burnup Credit in France". Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), BP 17, 92262 Fontenay aux Roses, France.

19. Brady, M. C. Takano, M. DeHart, M. D. Okuno, H. Nouri, A. Sartori, E. "FINDINGS OF THE OECD/NEA STUDY ON BURNUP CREDIT". DE & S Hanford Inc. Richland, Washington, USA
20. Parks, C. V. Wagner, J. C. "U.S. Regulatory Recommendations for Actinide-Only Burnup Credit in Transport and Storage Casks". Oak Ridge National Laboratory. PO Box 2008. Oak Ridge, Tennessee 37831-6170, USA
21. [www.nea-fr\\_html\\_science\\_wpncs\\_Publications\\_General\\_criticality.html](http://www.nea-fr_html_science_wpncs_Publications_General_criticality.html)
22. Parks, C. V. Broadhead, B. L. DeHart, M. D. Gauld, I. C. "Validation Issues for Depletion and Criticality Analysis in Burnup Credit", Nuclear Engineering Applications Section, Oak Ridge National Laboratory.
23. [www.oecd-nea.org/science/wpncs/buc](http://www.oecd-nea.org/science/wpncs/buc).