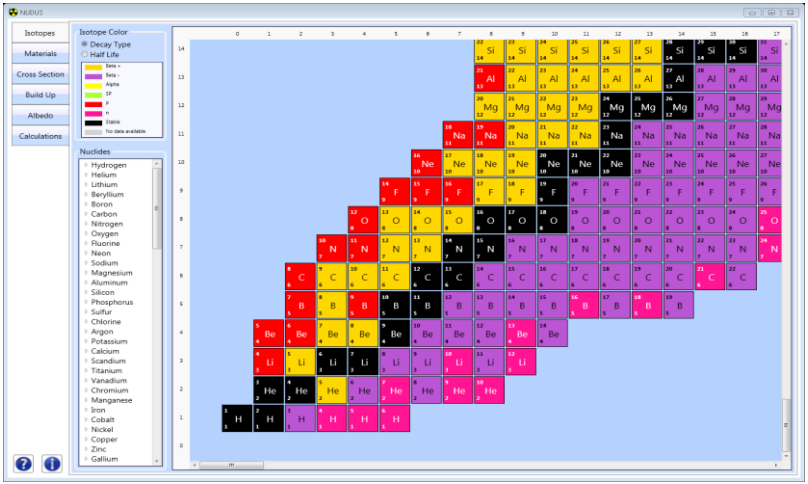
شرکت ساخت و راه‌اندازی نیروگاه‌های اتمی
مرکز محاسبات پیشرفته هسته‌ای

# نرم‌افزار نمایش داده‌های هسته‌ای و ابزارهای محاسبات تخمینی حفاظ و دز




## گزارش فنی NUDUS

بسته چهاردهم – ویرایش ۰ - مهر ۱۳۹۳

ANC-TEC-TES-SU-100

# فهرست مطالب

۱- چکیده ..... ۶
۲- کلیدواژه ..... ۸
۳- اختصارات ..... ۸
۴- مقدمه ..... ۱۰
۵- دامنه پروژه ..... ۱۰
۶- معرفی نرم افزار NUDUS ..... ۱۱

۷- رابط کاربری نمایش خواص عمومی عناصر و زنجیره واپاشی ایزوتوپ‌ها ..... ۱۲

۸- رابط کاربری نمایش ترکیبات متداول مورد استفاده در مباحث حفاظ سازی ..... ۱۹

۹- رابط کاربری نمایش اندرکنش‌های فوتون، نوترون، الکترون، پروتون، آلفا ..... ۲۳

۱۰- رابط کاربری نمایش ضریب انباشت (BuildUp Factor) ..... ۲۷

۱۱- رابط کاربری نمایش ضریب آلبدو (Albedo Factor) ..... ۳۴

۱۲- رابط کاربری محاسبات سریع مورد استفاده در طراحی حفاظ ..... ۴۰

۱۳- نتیجه‌گیری ..... ۶۰

۱۴- مراجع ..... ۶۰

# لیست جدول‌ها

جدول شماره ۱: محاسبه دز در اندام های مختلف بدن بوسیله پارامتر S ..... ۵۳
جدول شماره ۲: محاسبه دز در اجزای مختلف بدن بوسیله پارامتر ϕ ..... ۵۶

## ۱- چکیده

آگاهی از خواص فیزیکی عناصر، ترکیب ایزوتوپی آن و اطلاعات مختلف در مورد زنجیره واپاشی ایزوتوپ‌ها در بسیاری از فعالیت‌های آزمایشگاهی و محاسبات هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پروژه سعی بر آن شد تا با طراحی و پیاده‌سازی یک رابط گرافیکی مناسب اطلاعات لازم و ضروری عناصر و ایزوتوپ‌ها در اختیار کاربر قرار گیرد. اطلاعات عناصر شامل نماد عنصر، عدد اتمی، عدد جرمی، چگالی، حالت عنصر، دمای نقطه ذوب، دمای جوش و بحرانی ماده، میزان فراوانی در منظومه شمسی، سطح زمین و اقیانوس‌ها می‌باشد. اطلاعات ایزوتوپ‌ها شامل عدد اتمی، جرم اتمی، نیمه عمر واپاشی، درصد فراوانی ایزوتوپ مورد نظر از کل عنصر در طبیعت، مقادیر jp، sn و sp، ایزوتوپ‌های تشکیل دهنده عنصر مورد نظر همراه با درصد واپاشی و نوع واپاشی، ایزوتوپ‌های تشکیل شده در اثر واپاشی ایزوتوپ مورد نظر همراه با درصد واپاشی و نوع واپاشی به ایزوتوپ‌های مشخص شده، تعداد، درصد و انرژی ذرات آلفا، بتا، گاما و ایکس در اثر واپاشی می‌باشد.

لازمه انجام محاسبات هسته‌ای و شبیه‌سازی محیط ترابرد ذرات و همچنین بررسی روند این شبیه‌سازی، داشتن سطح مقاطع اندرکنش مواد و ایزوتوپ‌های تشکیل دهنده آن می‌باشد. در این پروژه سعی بر آن شد تا با طراحی و پیاده‌سازی یک رابط گرافیکی مناسب، ایزوتوپ‌های تشکیل دهنده ترکیبات پر استفاده در طراحی سیستم‌های هسته‌ای همراه با اطلاعات درصد تشکیل دهنده آنها در قالب هفت کتابخانه PNNL، MSL، MINNI، Rad toolbox، LANL، NIST و ASTM آورده شود. علاوه بر این قابلیت، امکان نمایش سطح مقاطع اندرکنش‌های نوترون، فوتون، الکترون، آلفا و پروتون و همچنین ضریب آلبدو و انباشت، که در محاسبات مربوط به فوتون و نوترون کاربرد دارد، نیز فراهم شده است.

برای کاربردهای عمومی، داشتن نرم‌افزاری جهت محاسبات سریع حفاظ و دز ناشی از انواع پرتوها بسیار مفید می‌باشد. در این پروژه سعی بر آن شد تا با طراحی و پیاده‌سازی یک رابط گرافیکی مناسب، محیطی جهت محاسبات دز و حفاظ در اختیار کاربر قرار گیرد. این رابط گرافیکی قابلیت محاسبه ایزوتوپ‌های تولید شده در اثر واپاشی ایزوتوپ مادر، محاسبه دز ناشی از چشمه ترکیبی از ایزوتوپ‌ها در فاصله معین بدون حفاظ و همراه با حفاظ، و محاسبه ضخامت مناسب حفاظ

چشمه مورد نظر را دارا می‌باشد. علاوه بر این، قابلیت محاسبه دز مربوط به بلعیدن و تنفس مواد رادیواکتیو در نرم‌افزار قرار داده شده است.

## ۲- کلیدواژه

رابط گرافیکی، خواص فیزیکی ایزوتوپ‌ها و عناصر، زنجیره واپاشی، ترکیبات متداول در کاربردهای هسته‌ای، سطح مقاطع اندرکنش‌ها، محاسبات ساده و سریع دز و حفاظ

## ۳- اختصارات

| عبارت | عبارت اختصاری | توضیح |
|---|---|---|
| Pacific Northwest National Laboratory | PNNL | |

| | | |
|---|---|---|
| | MSL | Material Specification Library |
| | LANL | Los Alamos National Laboratory |

## ۴- مقدمه

دسترسی به اطلاعات توصیف کننده مواد تشکیل دهنده سیستم از ضروریات محاسبات هسته‌ای بشمار می‌آید. اغلب این اطلاعات بصورت گسسته در محتوای اسناد، کتب، صفحات وب و نرم‌افزارهای هسته‌ای وجود دارد و تجمیع و آسان کردن استخراج آنها می‌تواند ابزار مفیدی را برای انجام محاسبات هسته‌ای فراهم آورد. در این فعالیت نرم‌افزاری با رابط گرافیکی مناسب برای در اختیار گذاشتن اطلاعات ایزوتوپ‌ها و عناصر و محاسبات ساده حفاظ سازی و دز سنجی به کاربران طراحی و پیاده سازی شده است.

## ۵- دامنه پروژه

این فعالیت شامل طراحی و پیاده‌سازی نرم‌افزار نمایش اطلاعات عناصر و ایزوتوپ‌های آن و محاسبات ساده دز و حفاظ می‌باشد.

## ۶- معرفی نرم افزار NUDUS

نرم‌افزار NUDUS نرم‌افزار گرافیکی برای نمایش اطلاعات مورد نیاز کاربر در استفاده از عناصر، ایزوتوپ‌ها و ترکیبات مواد می‌باشد. همچنین این نرم‌افزار به محاسبات سرانگشتی (سریع و تقریبی) حفاظ سازی و دزسنجی می‌پردازد. در این نرم‌افزار سعی بر آن است تا تمامی اطلاعات مورد نیاز کاربران حفاظ سازی در غالب پنجره‌های گرافیکی در اختیار آنها قرار داده شود. این نرم‌افزار از شش بخش اصلی تشکیل شده است.

۱. رابط کاربری نمایش خواص عمومی عناصر و زنجیره واپاشی ایزوتوپ‌ها
۲. رابط کاربری نمایش ترکیبات متداول مورد استفاده در مباحث حفاظ سازی
۳. رابط کاربری نمایش سطح مقاطع اندرکنش‌های فوتون، نوترون، الکترون، پروتون، آلفا
۴. رابط کاربری نمایش کتابخانه ضریب انباشت

۵. رابط کاربری نمایش کتابخانه آلبدو

۶. رابط کاربری محاسبات سریع مورد استفاده در طراحی حفاظ

در ادامه توضیحاتی راجع به هر بخش بیان می‌شود.

## ۷- رابط کاربری نمایش خواص عمومی عناصر و زنجیره واپاشی ایزوتوپ‌ها

این رابط گرافیکی از یک پنجره اصلی برای انتخاب عنصر (و یا ایزوتوپ) و از پنجره‌های فرعی برای نمایش خواص عنصر، ایزوتوپ و نمایش زنجیره واپاشی ایزوتوپ انتخابی تشکیل شده است.

### ۷-۱- پنجره فرعی نمایش خواص عناصر

برای عناصر اطلاعاتی از قبیل نماد عنصر، عدد اتمی، عدد جرمی، چگالی، حالت عنصر، دمای نقطه ذوب، جوش و بحرانی

ماده، میزان وجود در منظومه شمسی، سطح زمین و اقیانوس‌ها آورده شده است. همچنین اطلاعات ایزوتوپ‌های عنصر مورد نظر همراه با نیمه عمر و درصد تشکیل دهنده عنصر در طبیعت نمایش داده می‌شود. در آخر مراجع استخراج اطلاعات برای عنصر بیان شده است.

## ۷-۲- پنجره فرعی نمایش خواص ایزوتوپ‌ها

برای ایزوتوپ‌ها اطلاعات عدد اتمی، جرم اتمی، نیمه عمر واپاشی، درصد وجود ایزوتوپ مورد نظر از کل عنصر در طبیعت، مقادیر jp، sn و sp، ایزوتوپ‌های تشکیل دهنده ایزوتوپ مورد نظر همراه با درصد واپاشی و نوع واپاشی، ایزوتوپ‌های تشکیل شده در اثر واپاشی ایزوتوپ مورد نظر همراه با درصد واپاشی و نوع واپاشی به ایزوتوپ‌های مشخص شده، تعداد ذرات آلفا، بتا، گاما و ایکس در اثر واپاشی آورده شده است.

همچنین اطلاعات آلفاهای گسیل شده در اثر واپاشی ایزوتوپ مورد نظر بر حسب انرژی و درصد گسیل آن، اطلاعات ذرات

بتای گسیل شده در اثر واپاشی ایزوتوپ مورد نظر بر حسب انرژی و درصد گسیل و حالت گسیل آن، اطلاعات پرتوهای گاماهای گسیل شده در اثر واپاشی ایزوتوپ مورد نظر بر حسب انرژی و درصد گسیل و حالت گسیل آن، اطلاعات پرتوهای ایکس گسیل شده در اثر واپاشی ایزوتوپ مورد نظر بر حسب انرژی و درصد گسیل و حالت گمارش آن آورده شده است. در آخر مراجع استخراج اطلاعات برای ایزوتوپ آورده شده است.

## ۷-۳- پنجره فرعی نمایش زنجیره واپاشی ایزوتوپ‌ها

رابط گرافیکی نمایش زنجیره واپاشی شامل واپاشی‌های بتا منفی، بتا مثبت، آلفا، گیراندازی الکترون داخلی، واپاشی پروتون، واپاشی نوترون و واپاشی ایزومری می‌باشد.

۷-۳-۱- واکنش بتا منفی

واپاشی بتا منفی در ایزوتوپ‌هایی رخ می‌دهد که فزونی نوترون دارند. ذره بتا یک الکترون معمولی است که از هسته یک اتم ناپایدار بتازا گسیل می‌شود.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}X + \beta^{-} \qquad (۱-۷) $$

۷-۳-۲- واکنش آلفا

هنگامی که نسبت نوترون به پروتون در یک ایزوتوپ پرتوزا خیلی پایین باشد، از هسته آن ایزوتوپ یک هسته پر انرژی هلیم به نام ذره آلفا گسیل می‌شود. این ذره، ذره‌ای سنگین با بار الکتریکی مثبت است و از دو پروتون و دو نوترون تشکیل شده است. از آنجا که در تبدیل هسته‌ای اعداد اتمی و اعداد جرمی پایسته می‌ماند، در نتیجه گسیل آلفا، هسته دختری

تولید خواهد شد که عدد اتمی‌اش به اندازه ۲ واحد و عدد جرمی‌اش به اندازه ۴ واحد کمتر از اعداد مربوط به هسته مادر است. به عبارت دیگر

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X + {}^{4}_{2}He \qquad (۲-۷) $$

۷-۳-۳- واکنش بتا مثبت

در مواردی که نسبت نوترون به پروتون خیلی پایین و گسیل آلفا هم به لحاظ انرژی غیر ممکن باشد، احتمال دارد که هسته تحت شرایط خاصی با گسیل پوزیترون به پایداری برسد. پوزیترون یک ذره بتا است که بار الکتریکی مثبت دارد.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}X + \beta^{+} \qquad (۳-۷) $$

۷-۳-۴- گیراندازی الکترون مداری

اگر یک اتم کم نوترون نتواند از طریق واپاشی پوزیترون کمبود نوترون خود را بر طرف کند از طریق واکنشی بنام گیر اندازی الکترون یا گیراندازی k این کار را انجام می‌دهد. در این تبدیل پرتوزا هسته یک الکترون برون هسته را گیراندازی می‌کند و از ترکیب آن با یک پروتون درون هسته، یک نوترون تشکیل می‌شود:

$$ {}^{0}_{-1}e + {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}X \qquad (۴-۷) $$

۷-۳-۵- واپاشی نوترون

در این نوع واپاشی یک واحد از عدد جرمی کاهش می‌یابد.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-1}_{Z}X + {}^{1}_{0}n \qquad (۵-۷) $$

۷-۳-۶- واپاشی پروتون

در این نوع واپاشی یک واحد از عدد جرمی و یک واحد از عدد اتمی کاهش می‌یابد.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-1}_{Z-1}X + {}^{1}_{1}p \qquad (۶-۷) $$

۷-۳-۷- واپاشی ایزومری

ایزومرها هسته‌هایی با عدد اتمی و جرمی یکسان و خواص هسته متفاوت (از نظر نیمه عمر و ترازهای انرژی) می‌باشد. ایزومرها با انرژی بالاتر در یک حالت نیمه پایدار بوده و با گذاشتن m پس از عدد جرمی مشخص می‌شوند. مثلاً ${}^{99m}_{43}\mathrm{Tc}$ (با نیمه عمر ۶ ساعت) و ${}^{99}_{43}\mathrm{Tc}$ (با نیمه عمر $2.1\times10^{5}$ سال) ایزومر یکدیگرند.

$$ {}^{A\,m}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z}X \qquad (۷-۷) $$

## ۸- رابط کاربری نمایش ترکیبات متداول مورد استفاده در مباحث حفاظ سازی

این رابط گرافیکی از هفت کتابخانه مستقل به نام‌های PNNL، MSL، MINNI، Rad Toolbox، LANL، NIST و ASTM تشکیل شده است.

### ۸-۱- کتابخانه PNNL

این کتابخانه شامل فرمول شیمیایی ترکیب، وزن مولکولی، دانسیته جرمی و اتمی ترکیب، ایزوتوپ‌های تشکیل دهنده ترکیب همراه با کسر وزنی، اتمی و شناسه آنها برای محاسبات نوترونی و فوتونی در کد MCNP می‌باشد. این کتابخانه از مرجع ۵ [۵] استخراج گردیده است که شامل ۳۷۲ ماده می‌باشد.

### ۸-۲- کتابخانه MSL

این کتابخانه، کتابخانه مواد بکار رفته در کدهای MCBEND، MONK و RANKERN است که شامل ایزوتوپ‌های تشکیل دهنده ترکیب همراه با کسر وزنی آنها می‌باشد. این کتابخانه از دفترچه راهنمای کاربر این کدها [۱،۲و۴] استخراج گشته است و شامل ۹۲ ماده می‌باشد.

### ۸-۳- کتابخانه MINNI

این کتابخانه، کتابخانه مواد بکار رفته در کد RANKERN است که شامل ایزوتوپ‌های تشکیل دهنده ترکیب همراه با کسر وزنی آنها می‌باشد. این کتابخانه از دفترچه راهنمای کاربر این کد [۴] استخراج گشته است و شامل ۴۱ ماده می‌باشد.

### ۸-۴- کتابخانه Rad Toolbox

این کتابخانه، کتابخانه مواد بکار رفته در نرم افزار Rad Toolbox است که شامل ایزوتوپ‌های تشکیل دهنده ترکیب همراه با عدد اتمی و کسر وزنی آنها می‌باشد. این کتابخانه از کد Rad Toolbox [۲۰] استخراج گشته است و شامل ۱۹۶ ماده می‌باشد.

### ۸-۵- کتابخانه LANL

این کتابخانه، مواد بکار رفته در دفترچه راهنمای کاربری کد MCNP [۶] است که شامل ایزوتوپ‌های تشکیل دهنده ترکیب همراه با کسر وزنی و اتمی آنها است که شامل ۲۲ ماده می‌باشد.

### ۸-۶- کتابخانه NIST

این کتابخانه، کتابخانه مواد بکار رفته در کد GEANT است که شامل ایزوتوپ‌های تشکیل دهنده ترکیب همراه با کسر وزنی آنها می‌باشد. این کتابخانه از دفترچه راهنمای کاربر این کد [۱۰] استخراج گشته است و شامل ۱۸۱ ماده می‌باشد.

### ۸-۷- کتابخانه ASTM

این کتابخانه، کتابخانه مواد پر استفاده در صنعت هسته‌ای است که شامل ایزوتوپ‌های تشکیل دهنده ترکیب همراه با جرم ایزوتوپ‌ها، کسر اتمی و کسر وزنی آنها می‌باشد. این کتابخانه از مرجع ASTM استخراج گشته است و شامل ۳۵ ماده می‌باشد.

## ۹- رابط کاربری نمایش اندرکنش‌های فوتون، نوترون، الکترون، پروتون، آلفا

این رابط گرافیکی برای نمایش سطح مقاطع اندرکنش نوترون، فوتون، الکترون، پروتون و آلفا می‌باشد.

### ۹-۱- سطح مقاطع اندرکنش نوترون

برای نوترون سطح مقاطع پیوسته، سطح مقاطع گروهی و کرما[۱] جمع آوری شده است. سطح مقاطع پیوسته نوترون برای ایزوتوپ‌ها از دو کتابخانه کد MCNP[۲۲] و ENDF[۱۴] و کرما از نرم‌افزار Rad Toolbx[۲۰] و سطح مقاطع گروهی از کتابخانه IRANLIB در نرم‌افزار گنجانده شده است. برای نوترون سطح مقاطع کل (MT=1)، جذب (MT=27)، الاستیک (MT=2)، جذب پرتوزا (MT=102)، گرمای آزاد شده (MT=301)، کرما (MT=443) و تخریب (MT=444) در نرم‌افزار

[۱] Kerma

گنجانده شده است. در قسمت کرما، مقادیر کرما برای ایزوتوپ‌ها و مواد پرکاربرد در حفاظ‌سازی قرار گرفته است. در قسمت سطح مقاطع گروهی، سطح مقاطع ۱۳، ۲۵ و ۳۵ گروهی نوترون در نرم افزار قرار گرفته است.

## ۹-۲- سطح مقاطع اندرکنش فوتون

برای فوتون ضرایب تضعیف و کرما برای عناصر و ترکیبات متداول و سطح مقاطع گروهی جمع آوری شده است. سطح مقاطع فوتون برای عناصر و مواد از دو کتابخانه کد XCOM[۲۶] و NIST[۲۶] و کرما از نرم‌افزار Rad Toolbx[۲۰] و گروهی از کد RANKERN[۴] در نرم‌افزار گنجانده شده است. برای فوتون سطح مقاطع پراکندگی همدوس، غیر همدوس، جذب، تولید زوج، سطح مقاطع کل با در نظر گرفتن پراکندگی همدوس، سطح مقاطع کل بدون در نظر گرفتن پراکندگی همدوس، ضریب تضعیف جرمی و ضریب جذب انرژی جرمی در نرم‌افزار گنجانده شده است. در قسمت کرما، مقادیر کرما برای ایزوتوپ‌ها و ترکیبات پرکاربرد در حفاظ سازی قرار گرفته است.

## ۹-۳- پنجره الکترون

برای الکترون توان ایستانندگی، برد و بهره تولید پرتو ایکس برای عناصر و ترکیبات متداول جمع آوری شده است. توان ایستانندگی[۲]، برد و بهره تولید پرتو ایکس برای عناصر و مواد از کتابخانه کد ESTAR[۲۶] و سطح مقاطع دیفرانسیلی از مرجع ۲۴[۲۴] در نرم‌افزار گنجانده شده است. برای الکترون توان ایستانندگی ناشی از برخورد، توان ایستانندگی ناشی از تولید پرتو ایکس ترمزی، توان ایستانندگی کل، برد دقیق، بهره تولید اشعه و سطح مقاطع دیفرانسیلی در نرم‌افزار گنجانده شده است.

[۲] Stopping Power

## ۹-۴- پنجره پروتون

برای پروتون توان ایستانندگی و برد در عناصر و ترکیبات متداول جمع آوری شده است. توان ایستانندگی و برد در عناصر و مواد از کتابخانه کد PSTAR[۲۶] استخراج و در نرم‌افزار گنجانده شده است. برای پروتون توان ایستانندگی ناشی از برخورد با الکترون‌ها، توان ایستانندگی ناشی از برخورد با هسته‌ها، توان ایستانندگی کل و برد در نرم‌افزار گنجانده شده است.

## ۹-۵- پنجره آلفا

برای آلفا توان ایستانندگی و برد برای عناصر و ترکیبات متداول جمع آوری شده است. توان ایستانندگی و برد برای عناصر از کتابخانه کد ASTAR[۲۶] و Rad Toolbax[۲۰] و برای ترکیبات از کتابخانه کد ASTAR در نرم‌افزار گنجانده شده

است. برای آلفا توان ایستانندگی ناشی از برخورد با الکترون‌ها، توان ایستانندگی ناشی از برخورد با هسته‌ها، توان ایستانندگی کل و برد در نرم‌افزار گنجانده شده است.

## ۱۰- رابط کاربری نمایش ضریب انباشت (BuildUp Factor)

این رابط گرافیکی برای نمایش ضریب انباشت نوترون و فوتون می‌باشد.

### ۱۰-۱- ضریب انباشت گاما

ضریب انباشت گاما بر اساس کتابخانه تشکیل دهنده ضرایب، از هفت کتابخانه تشکیل یافته است. این کتابخانه‌ها عبارتند از ANS، RANKERN، OAK، NSWC، Rad Toolbox، BETTIS و WOOTEN.

۱۰-۱-۱- کتابخانه ANS

کتابخانه ANS[۸] شامل ضریب انباشت فوتون بر حسب انرژی و میانگین پویش آزاد در چهار دسته Exposure، Energy Absorption، GP Exposure و GP Energy Absorption می‌باشد. ضرایب انباشت برای Exposure و Energy Absorption بر حسب انرژی در جداول تعبیه شده در نرم‌افزار آوزده شده‌اند و برای GP Exposure و GP Energy Absorption از رابطه (۱۰-۱) استفاده می‌شود که پارامترهای آن در جداول گردآوری شده‌اند.

$$B(E,x) = 1 + (b-1)(K^{x}-1)/(K-1) \quad \text{for } K \neq 1$$
$$B(E,x) = 1 + (b-1)x \quad \text{for } K = 1$$
$$K(x) = cx^{a} + d[\tanh(x/Xk-2) - \tanh(-2)]/[1-\tanh(-2)] \qquad (۱-۱۰)$$

که در آن x ضخامت حفاظ و a، b، c، d و Xk ضرایبی هستند که در جداول تعبیه شده در نرم‌افزار آورده شده‌اند.

### ۱۰-۱-۲- کتابخانه RANKERN

کتابخانه RANKERN[۴] شامل ضریب انباشت فوتون بر حسب انرژی و میانگین پویش آزاد در چهار دسته Exposure، Energy Absorption، Cubic Polynomial و Oblique Dose می‌باشد. ضرایب انباشت برای Exposure و Energy Absorption بر حسب انرژی در جداول آورده شده است. برای Cubic Polynomial و Oblique Dose به ترتیب از روابط (۱۰-۲) و (۱۰-۳) استفاده می‌شود.

$$B(\tau, E) = A_0 + A_1\tau + A_2\tau^2 + A_3\tau^3 \qquad (۱۰-۲)$$

$$B(M, E_0, \theta_0, \tau_0) = B(M, E_0, 0, \tau\cos\theta_0)e^{(-\tau\cos\theta_0 \sec(\beta\theta_0))} \qquad (۱۰-۳)$$

که در آن M نوع ماده، $E_0$ انرژی اولیه پرتو، $\theta_0$ زاویه ورود بر سطح، $\tau_0$ تعداد طول پرواز آزاد و $\beta$، $A_0$، $A_1$، $A_2$ و $A_3$ ضرایبی هستند که در جداول تعبیه شده در نرم‌افزار آورده شده‌اند.

۱۰-۱-۳- کتابخانه OAK

کتابخانه OAK[۷] شامل ضریب انباشت فوتون بر حسب ضرایب فرمول، محدوده تعداد طول پویش آزاد و چشمه نقطه‌ای یا صفحه‌ای محاسبات ضریب انباشت در نه دسته Dose (Po.S. ،En. Absorption ،Taylor Energy ،Taylor Dose 0-7 mfp)، En. Ab. (Po.S. 0-7 mfp)، Dose (Po.S. 0-20 mfp)، En. Ab. (Po.S. 0-20 mfp)، Dose (Pl.S. 0-7 mfp) و En. Ab. (Pl.S. 0-20 mfp) می‌باشد. در نام‌گذاری بالا En. Ab. مخفف Energy Absorption و Po.S. مخفف چشمه نقطه‌ای و Pl.S. مخفف چشمه صفحه‌ای می‌باشند.

برای Taylor Dose، Taylor Energy و En. Absorption از رابطه (۱۰-۴) استفاده می شود. همچنین برای Dose (Po.S. 0-7 mfp)، En. Ab. (Po.S. 0-7 mfp)، Dose (Po.S. 0-20 mfp)، En. Ab. (Po.S. 0-20 mfp)، Dose (Pl.S. 0-7 mfp) و En. Ab. (Pl.S. 0-20 mfp) از رابطه (۱۰-۵) استفاده می‌گردد.

$$B(\tau, E) = Ae^{(-\alpha_1\tau)} + (1-A)e^{(-\alpha_2\tau)} \qquad (۴-۱۰)$$

$$\text{BergerForm} \quad ==> B(\tau, E) = 1 + C\ \tau\ e^{(D\tau)}$$

$$\text{Linearformula} \quad ==> B(\tau, E) = 1 + A_1\tau \qquad (۵-۱۰)$$

$$\text{Quadraticformula} ==> B(\tau, E) = 1 + A_2\tau + B\tau^2$$

که در آن $\tau$ تعداد طول پرواز آزاد و C، D، $A_1$، $A_2$، $\alpha_1$ و $\alpha_2$ ضرایبی هستند که در جداول تعبیه شده در نرم‌افزار آورده شده‌اند.

### ۱۰-۱-۴- کتابخانه Rad Toolbox

کتابخانه Rad Toolbox[۲۰] شامل ضریب انباشت فوتون بر حسب انرژی و تعداد طول پویش آزاد برای ترکیبات متداول و پرکاربرد می‌باشد.

۱۰-۱-۵- کتابخانه NSWC

کتابخانه NSWC[۲۳] شامل ضریب انباشت فوتون بر حسب انرژی و تعداد طول پویش آزاد ناشی از یک پراکندگی و کل پراکندگی‌ها می‌باشد.

۱۰-۱-۶- کتابخانه BETTIS

کتابخانه BETTIS[۱۷] شامل ضریب انباشت فوتون بر حسب ضرایب فرمول، انرژی و تعداد طول پویش آزاد در دو دسته Dose و Energy Absorption می‌باشد. ضرایب انباشت در این کتابخانه بصورت جداولی از ضرایب بر حسب متوسط پویش آزاد و انرژی و همچنین از دو رابطه (۱۰-۶) و (۱۰-۷) بدست می آیند.

$$B(\tau, E) = Ae^{(-\alpha_1\tau)} + (1-A)e^{(-\alpha_2\tau)} \qquad (۱۰-۶)$$

$$B(\tau, E) = 1 + A\tau + \alpha_1\tau^2 + \alpha_2\tau^3 \qquad (۷-۱۰)$$

که در آن $\tau$ تعداد طول پرواز آزاد و A، $\alpha_1$ و $\alpha_2$ ضرایبی هستند که در جداول تعبیه شده در نرم‌افزار آورده شده‌اند.

۱۰-۱-۷- کتابخانه WOOTEN

کتابخانه WOOTEN[۱۲] شامل ضریب انباشت فوتون بر حسب انرژی و تعداد طول پویش آزاد برای زوایای گسسته در دو دسته Air Exposure و Ambient Dose Equivalent می‌باشد.

## ۱۰-۲- ضریب انباشت نوترون

ضریب انباشت نوترون از کتابخانه NSWC می‌باشد.

۱۰-۲-۱- کتابخانه NSWC

کتابخانه NSWC[۲۳] شامل ضریب انباشت نوترون بر حسب انرژی و تعداد طول پویش آزاد ناشی از یک پراکندگی و کل پراکندگی‌ها می‌باشد.

## ۱۱- رابط کاربری نمایش ضریب آلبدو (Albedo Factor)

این رابط گرافیکی برای نمایش ضریب آلبدو نوترون و فوتون می‌باشد.

### ۱۱-۱- ضریب آلبدو فوتون

ضریب آلبدو فوتون بر اساس کتابخانه تشکیل دهنده ضرایب، از دو کتابخانه تشکیل یافته است. این کتابخانه‌ها عبارت از RANKERN و Brockhoff-Shultis.

### ۱۱-۱-۱- کتابخانه RANKERN

کتابخانه RANKERN[۴] شامل ضریب فرمول محاسبه آلبدو برای فوتون می‌باشد. ضریب آلبدو در این کتابخانه از رابطه (۱-۱۱) بدست می‌آید.

$$
\begin{aligned}
\text{Albedo} &= [C\times B\times 1e^{26} + C']/[1 + (\cos\theta_o / \cos\theta)] \\
B &= .5\times r_e^{2}\times p^2\times[1 + p^2 - p\times(1 - (\cos\theta_s)^2)] \\
P &= 1/[1 + (E_o/m_e\times c^2)\times(1 - \cos\theta_s) \\
r_e^{2} &= 7.941\times 10^{-26} \\
m_e c^2 &= 0.511\ \text{MeV} \\
\text{Cos}\theta_s &= \sin\theta_o\times\sin\theta\times\cos\theta - \cos\theta_o\times\cos\theta
\end{aligned}
\qquad (۱-۱۱)
$$

که در آن $\theta_0$ زاویه ورودی بر سطح، $\theta$ زاویه خروجی از سطح، C و C´ ضرایبی هستند که در جداول تعبیه شده در نرم‌افزار آورده شده‌اند.

۱۱-۱-۲- کتابخانه Brockhoff-Shultis

کتابخانه Brockhoff-Shultis[۲۱] شامل ضریب فرمول محاسبه آلبدو برای فوتون در چهار دسته F.A. Ambient Dose Eq.، S.A. Ambient Dose Eq.، S.A. Exposure و S.A. AP Geometry می‌باشد. ضریب آلبدو در این کتابخانه برای F.A. Ambient Dose Eq. از رابطه (۱۱-۱) و برای S.A. Ambient Dose Eq.، S.A. Exposure و S.A. AP Geometry از رابطه (۱۱-۲) بدست می‌آید.

$$\text{Albedo} = F\times[C\times B\times 1e^{26} + C']/[1 + (\cos\theta_o / \cos\theta)\times(1+2E_o(1-\cos\theta))^{\frac{1}{2}}]$$

$$B = .5\times re^2\times p^2\times[1 + p^2 - p\times(1 - (\cos\theta_s)^2)]$$

$$P = 1/[1 + (E_o/m_e\times c^2)\times(1 - \cos\theta_s)]$$

$$r_e = 2.8179\times 10^{-13}\ \text{cm}$$

$$m_e c^2 = 0.511\ \text{MeV} \qquad (۲-۱۱)$$

$$\text{Cos}\theta_s = \sin\theta_o\times\sin\theta\times\cos\psi - \cos\theta_o\times\cos\theta$$

$$F = A_1 + A_2(1-\cos\theta_o)^2 + A_3(1-\cos\theta)^2 + A_4(1-\cos\theta_o)^2(1-\cos\theta)^2 + A_5(1-\cos\theta_o)(1-\cos\theta)(1-\cos\psi)$$

که در آن $\theta_0$ زاویه ورودی بر سطح، $\theta$ زاویه خروجی از سطح، $C$، $C'$، $A_1$، $A_2$، $A_3$، $A_4$ و $A_5$ ضرایبی هستند که در جداول تعبیه شده در نرم‌افزارآورده شده‌اند.

## ۱۱-۲- پنجره نوترون

ضریب آلبدو نوترون از کتابخانه Brockhoff-Shultis است.

### ۱۱-۲-۱- کتابخانه Brockhoff-Shultis

کتابخانه Brockhoff-Shultis[۲۱] شامل ضریب فرمول محاسبه آلبدو برای نوترون در سه دسته Ambient Dose Eq.، AP Geometry و Henderson می‌باشد. ضرایب آلبدو برای این سه دسته از رابطه (۱۱-۳) بدست می آید.

$$\text{Albedo} = \frac{[H(k_1, \text{Cos}\theta_o) \times H(k_2, \text{Cos}\theta)]}{[1 + K1(E_0, \theta_o, \theta) / \text{Cos}\theta]} \times \sum_{i=0}^{N} B_i \times P_i(\text{Cos}\theta_s)$$

$$K_1(E_o, \theta_o, \theta) = \sum_{i=0}^{2} (\text{Cos}\theta)^i \sum_{j=0}^{2} A_{ij} \times (\text{Cos}\theta_o)^j$$

$$H(k, \mu) = [A + Bk + C\mu + D\mu^2 + E\mu^3] / [1 + Fk + Gk^2 + Hk^3 + I\mu]$$

(۳-۱۱)

| | | |
|---|---|---|
| A=0.075272288 | B=-0.063133359 | C=0.021092012 |
| D=-0.026070382 | E=0.009381680 | F=-3.179279300 |
| G=3.485739800 | H=-1.294988700 | I=-0.005750418 |

که در آن ضرایب $B_i$ ها، $A_{i,j}$ ها، $K_1$ و $K_2$ ضرایبی هستند که در جداول تعبیه شده در نرم افزار آورده شده‌اند.

## ۱۲- رابط کاربری محاسبات سریع مورد استفاده در طراحی حفاظ

این رابط گرافیکی از ۶ پنجره مستقل برای محاسبات دز تشکیل شده است.

### ۱۲-۱- پنجره واپاشی و تولید ایزوتوپ‌ها

این پنجره از دو قسمت تشکیل یافته است. در قسمت اول این پنجره محاسبات ساده واپاشی ایزوتوپ مورد نظر انجام می‌گیرد. با انتخاب ایزوتوپ مورد نظر و اکتیویته اولیه آن، اکتیویته نهایی بعد از گذر زمان انتخاب شده محاسبه و نمایش داده می‌شود. همچنین با انتخاب اکتیویته نهایی می‌توان زمان لازم برای رسیدن به این اکتیویته را مشاهده نمود. در این قسمت از رابطه $I=I_0e^{-(Ln2)\times t/T}$ استفاده شده است که در آن t زمان سپری شده و T نیمه عمر ایزوتوپ مورد نظر می‌باشد. به عنوان مثال ایزوتوپ AC-223 با نیمه عمر ۲.۲ دقیقه را در نظر بگیرید. اکتیویته آن بعد از ۲.۲ دقیقه برابر با نصف

اکتیویته اولیه آن خواهد بود و یا زمان لازم برای رسیدن به نصف اکتیویته اولیه برابر با یک نیمه عمر آن می‌باشد که این را نرم‌افزار طراحی شده بخوبی نشان می‌دهد.

در قسمت دوم این پنجره محاسبات مربوط به اکتیویته و ترکیب نهایی یک چشمه بعد از گذر زمان انتخاب شده انجام می‌شود. با انتخاب ایزوتوپ‌های مورد نظر ایزوتوپ‌های حاصل از واپاشی آنها و همچنین واپاشی دختران آنها بعد از گذر زمان انتخاب شده نمایش داده می‌شود. در این قسمت از رابطه (۱۲-۱) برای محاسبات استفاده شده است. نتایج بدست آمده در این قسمت با نتایج بدست آمده در نرم افزار Rad Toolbox یکی می‌باشد.

$$N_n(t) = \prod_{j=1}^{j=n-1} \lambda_{j,j+1} \sum_{j=i}^{j=n} \frac{N_i(0)e^{-\lambda_j t}}{\prod_{\substack{p=i \\ p\neq j}}^{n} (\lambda_p - \lambda_j)} \qquad (۱۲-۱)$$

اطلاعات ایزوتوپ‌ها از دو کتابخانه ICRP 38[۲۰] و JAERI[۲۰] می‌باشد.

## ۱۲-۲- پنجره محاسبات ساده دز

این پنجره از دو قسمت تشکیل شده است. در قسمت اول این پنجره محاسبات ساده دز ناشی از ترکیبی از ایزوتوپ‌های پرتوزا در فاصله معین بدون در نظر گرفتن حفاظ انجام می‌گیرد. این پنجره قابلیت محاسبه نرخ دز و همچنین دز انباشتی را برحسب واحدهای مختلف دارا می‌باشد. در این قسمت از داده‌های مربوط به ثابت ویژه چشمه نقطه‌ای گاما استفاده شده است. معمولاً دز موثر محاسبه شده از یک چشمه نقطه‌ای با اکتیویته 1 MBq در فاصله ۱ متری برای محاسبه دز در فواصل دیگر به شرطی که هیچ گونه حفاظی بر سر راه وجود نداشته باشد بر حسب سیورت بر ساعت بکار می‌رود (در گذشته بر حسب رونتگن بر ساعت به ازای یک چشمه 1 Ci در فاصله یک متر بدست می‌آمد). این دز محاسبه شده ثابت ویژه اشعه گاما نامیده می‌شود. برای فواصل کمتر از یک متر این محاسبات با خطا روبرو شده و برای فواصل کمتر از نیم متر خطا بسیار زیاد خواهد شد. ثابت ویژه اشعه گاما از رابطه (۱۲-۲) بدست می‌آید.

$$\Gamma = \frac{\frac{1\times10^{6}\,t/s}{1MBq}\times f_i(\frac{\gamma}{t})\times E\,\frac{MeV}{photon}\times1.6\times10^{-13}\,\frac{J}{MeV}\times\frac{\mu_i\,1/m}{1.293\,kg/m^3}\times3600\,\frac{s}{h}}{4\pi(1)^2\ m^2} \qquad (۲-۱۲)$$

$$\Gamma = 3.54\times10^{-5}\sum_i f_i\times E_i\times\mu_i \quad (\frac{\text{Sv-m}^2}{\text{MBq-h}}) \qquad (۳-۱۲)$$

که در آن $f_i$ کسر احتمال نشر گاما با انرژی $E_i$ در هر واپاشی و $\mu_i$ ضریب تضعیف گاما با انرژی $E_i$ است.

و با توجه به اینکه $1C/kg = 34Gy = 34Sv$ داریم

$$\Gamma = 10.43\times10^{-7}\sum_i f_i\times E_i\times\mu_i \quad (\frac{C/kg\text{-m}^2}{\text{MBq-h}}) \qquad (۴-۱۲)$$

و برای محاسبه دز موثر در نقاط دیگر از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$E_{point} = \frac{A \times CF_{point} \times t}{r^2} \qquad (۵-۱۲)$$

$E_{point}$ دز موثر بر حسب Sv

A قدرت چشمه بر حسب MBq

$CF_{point}$ ثابت ویژه اشعه گاما بر حسب $[(Sv \cdot m^2)/(MBq \cdot h)]$

r فاصله بر حسب متر

t زمان در طول پرتوگیری بر حسب ساعت

به عنوان مثال ثابت ویژه چشمه گاما برای Ac-223 از کتابخانه ICRP-38 برابر با 1.8756E-8 (Sv.m$^2$)/(MBq.h) می‌باشد. در نتیجه دز در فاصله ۲ متری برای یک ساعت پرتوگیری از یک چشمه 1 MBq از این چشمه برابر است با:

$$\dot{E}_{point} = \frac{1 \times 1.8756E-8}{2^2} = 4.689E-9 \quad (Sv/h) = 1.3791E\text{-}10 \ (C/Kg/h)$$

و یا

$$E_{point} = \frac{1 \times 1.8756E-8 \times 2}{2^2} = 9.378E-9 \quad (Sv) = 2.7582E\text{-}10 \ (C/Kg)$$

باید توجه داشت که دز محاسبه شده با ضرب مدت زمان t در رابطه (۱۲-۵) صرفا مربوط به محاسباتی می‌شود که چشمه ثابت بوده و با گذر زمان کاهش نمی‌یابد و نتیجه ناشی از انتگرال گیری روی زمان (دز انباشی مربوط به ایزوتوپی که با

گذر زمان در حال نابودی است) نمی‌باشد. قابل بیان است در مواردی که چشمه با گذر زمان دچار دگرگونی و نابودی نمی‌شود، دز تجمعی برای مدت زمان t از ضرب این زمان در آهنگ دز بدست می‌آید.

نتایج بدست آمده بصورت تحلیلی با نتایج بدست آمده توسط نرم افزار یکی می باشد. لازم به ذکر است که نرم افزار از سه کتابخانه ICRP-38، JAERI و Rad Decay پشتیبانی می‌کند، که ثابت ویژه گامای آنها برای ایزوتوپ‌های مختلف با هم فرق می‌کند. به عنوان مثال ثابت ویژه ایزوتوپ Ac-223 از این کتابخانه‌ها به ترتیب 1.8756E-8، 1.2996E-8 و 1.2625E-8 می‌باشد.

هنگامی که در سر راه پرتوها حفاظ قرار داشته باشد علاوه بر عامل فاصله، نوع ماده استفاده شده برای حفاظ و نحوه اندرکنش پرتو با آن ماده در کاهش میزان پرتو تاثیر خواهند داشت. در قسمت دوم این پنجره محاسبات ساده دز ناشی از ترکیبی از ایزوتوپ‌های پرتوزا در فاصله معین با در نظر گرفتن حفاظ انجام می‌گیرد. در این محاسبات برای تصحیح مربوط

به کسر پرتوهای جانبی رسیده به هدف از ضرایب انباشت[۳] استفاده می‌شود. کاربر می‌تواند کسر تضعیف شده با سطح مقطع کل، کسر تضعیف شده با سطح مقطع کل و تقویت شده با ضریب انباشت و همچنین کسر تضعیف شده با سطح مقطع جذب که در مدارک ۲۷[۲۷] آن را با حالت دوم تقریباً یکی می‌دانند مشاهده نماید. با انتخاب ایزوتوپ‌های مورد نظر نرخ دز ناشی از آنها و همچنین دز انباشتی آنها بعد از گذر زمان انتخاب شده در هدف با وجود حفاظ نمایش داده می‌شود. برای محاسبه نرخ پرتوگیری از رابطه (۱۲-۶) و برای محاسبه پرتوگیری تجمعی از رابطه (۱۲-۷) استفاده شده است. همچنین برای محاسبه نرخ دز از رابطه (۱۲-۸) و دز انباشتی از رابطه (۱۲-۹) استفاده می‌شود.

[۳] Build Up factor

$$\dot{X} = \sum_{Isotops} \sum_{\gamma \text{ in isotop i}} B[e^{-\mu_{mi} \times \rho \times x}] \frac{S(\frac{t}{s}) \times f_i(\frac{\gamma}{t}) \times E(\frac{MeV}{photon}) \times 1.6 \times 10^{-13} (\frac{J}{MeV}) \times \mu_{mi} (\frac{m^2}{Kg}) \times 3600(\frac{s}{h})}{4\pi r^2 \ (m^2) \ \times \ 34 \ (\frac{J/Kg}{C/Kg})}$$

(۶-۱۲)

$$X = \sum_{Isotops} \sum_{\gamma \text{ in isotop i}} B[e^{-\mu_{mi} \times \rho \times x}] \frac{S(\frac{t}{s}) \times f_i(\frac{\gamma}{t}) \times E(\frac{MeV}{photon}) \times 1.6 \times 10^{-13} (\frac{J}{MeV}) \times \mu_{mi} (\frac{m^2}{Kg}) \times 3600(\frac{s}{h})}{4\pi r^2 \ (m^2) \ \times \ 34 \ (\frac{J/Kg}{C/Kg})} [\frac{T_{1/2}(h)}{Ln2}(1-e^{-\frac{Ln2 \times t}{T_{1/2}}})]$$

(۷-۱۲)

$$\dot{D} = \sum_{Isotops} \sum_{\gamma \text{ in isotop i}} B[e^{-\mu_{mi} \times \rho \times x}] \frac{S(\frac{t}{s}) \times f_i(\frac{\gamma}{t})}{4\pi r^2 \ (cm^2)} \times \text{Dose_Conversion} \ (\frac{Sv/h}{\gamma/cm^2.s})$$

(۸-۱۲)

$$D = \sum_{Isotops} \sum_{\gamma \text{ in isotop i}} B[e^{-\mu_{mi} \times \rho \times x}] \frac{S(\frac{t}{s}) \times f_i(\frac{\gamma}{t})}{4\pi r^2 \ (cm^2)} \times [\frac{T_{1/2}(h)}{Ln2}(1-e^{-\frac{Ln2 \times t}{T_{1/2}}})] \times \text{Dose_Conversion} \ (\frac{Sv/h}{\gamma/cm^2.s})$$

(۹-۱۲)

که در آن S قدرت چشمه، r فاصله چشمه تا آشکارساز، $T_{1/2}$ نیمه عمر واپاشی ایزوتوپ، $f_i$ کسر احتمال نشر گاما با انرژی $E_i$ در هر واپاشی و $\mu_i$ ضریب تضعیف گاما با انرژی $E_i$ و Dose_Conversion ضریب تبدیل شار به دز از کتابخانه ICRP 21 است. اطلاعات ایزوتوپ‌ها از سه کتابخانه ICRP 38[۲۰] و JAERI[۲۰] و Rad Decay[۱۹] می‌باشد.

## ۱۲-۳- پنجره محاسبه ضخامت مناسب حفاظ

این پنجره از دو قسمت تشکیل شده است. در قسمت اول محاسبات ساده پیدا کردن ضخامت مناسب حفاظ جهت کاهش دز ناشی از ایزوتوپ‌ها در کنار حفاظ انتخاب شده به دز مورد نظر انجام می‌گیرد. برای تصحیح مربوط به کسر پرتوهای جانبی رسیده به هدف از ضرایب انباشت استفاده می‌شود. کاربر می‌تواند حفاظ لازم را با در نظر گرفتن کسر تضعیف شده با سطح مقطع کل، کسر تضعیف شده با سطح مقطع کل و تقویت شده با ضریب انباشت و همچنین کسر تضعیف شده با سطح مقطع جذب مشاهده نماید. با انتخاب ایزوتوپ‌های مورد نظر و نسبت نهایی دز مورد نظر با حفاظ به حالت بدون

حفاظ می‌توان ضخامت مناسب از حفاظ مورد نظر را مشاهده نمود. ضخامت حفاظ در ابتدا صفر در نظر گرفته می‌شود و سپس با اضافه کردن ضخامت به اندازه‌ای که از کاربر گرفته می‌شود به محاسبه مجدد دز پرداخته می‌شود و نسبت دز بدست آمده به حالت بدون حفاظ محاسبه می‌شود. اگر این نسبت از نسبت دو دز ورودی کمتر شود، ضخامت بدست آمده به عنوان ضخامت مناسب در نظر گرفته می‌شود در غیر اینصورت مجددا به ضخامت حفاظ اضافه کرده و به محاسبه پرداخته می‌شود. این عمل تا زمانی که ضخامت مناسب بدست آورده شود ادامه می‌یابد. اطلاعات ایزوتوپ‌ها از سه کتابخانه ICRP 38[۲۰] و JAERI[۲۰] و Rad Decay[۱۹] می‌باشد. در قسمت دوم این پنجره ضخامت مناسب حفاظ مورد نظر با دانستن انرژی مربوط به پرتو گاما بدست می‌آید.

## ۱۲-۴- پنجره محاسبه دز در اجزای مختلف بدن ناشی از انباشت ایزوتوپ‌ها

این پنجره از دو قسمت تشکیل شده است. در قسمت اول این پنجره محاسبات دز در اجزای مختلف بدن ناشی از انباشت ایزوتوپ‌های مورد نظر در قسمت‌های مختلف بدن انجام می‌گیرد. با انتخاب ایزوتوپ‌های مورد نظر و مکان انباشت آنها و همچنین نیمه عمر بیولوژیکی(نیمه عمر دفع شدن از اندام) آن در مکان مورد نظر، دز در۲۰ قسمت مختلف بدن نمایش داده می‌شود. در این قسمت برای محاسبه نرخ دز و دز متوسط دریافتی(که معمولا با انتگرال گیری روی بازه پنجاه ساله بدست می‌آید) از رابطه (۱۲-۱۰) استفاده می‌شود.

$$\dot{D} = A\,(\mu Ci) \times S\,(\frac{rad}{\mu Ci \times h}) \quad , \quad D = 1.443 \times T_{eff}\,(h) \times A\,(\mu Ci) \times S\,(\frac{rad}{\mu Ci \times h})$$

$$S = \sum \Phi_i \times \Delta_i \quad , \ \Phi\text{: Specific Absorbed Fraction}$$

$$\Delta_i = 1.6 \times 10^{-13}\,(\frac{j}{MeV}) \times E_i\,(MeV) \times n_i\,(\frac{part}{t}) \qquad (۱۰-۱۲)$$

که در آن A اکتیویته چشمه، Teff نیمه عمر موثر و S ضریب تبدیل اکتیویته به دز بوده که مقادیر آن از کتابخانه MIRD11[۳] می‌باشد.

برای مثال فرض نمایید چشمه Be-7 با نیمه عمر فیزیکی ۵۳.۳ روز با اکتیویته 1 uci درون Liver با نیمه عمر بیولوژیکی ۱۰۰ ساعت قرار دارد. می خواهیم نرخ دز و دز متوسط دریافتی اجزای مختلف بدن را محاسبه کنیم.

برای محاسبه نیمه عمر موثر داریم:

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{ph}} + \frac{1}{T_{bi}} \rightarrow T_{eff} = \frac{100 \times (53.3 \times 24)}{100 + (53.3 \times 24)} = 92.7494 \text{ h}$$

با استفاده از روابط (۱۲-۱۰) و مقادیر S مربوط به چشمه Be-7 درون Liver خواهیم داشت:

جدول شماره ۱: محاسبه دز در اندام های مختلف بدن بوسیله پارامتر S

| اندام‌های هدف | مقادیر S | نرخ دز (rad/h) | دز متوسط دریافتی(rad) |
|---|---|---|---|
| Adrenals | 1.8E-6 | 1.8E-6 | 2.40E-04 |
| Bladder wall | 1.2E-7 | 1.2E-7 | 1.60E-05 |
| Bone | 2.7E-7 | 2.7E-7 | 3.61E-05 |
| GI (Stom Wall) | 6.9E-7 | 6.9E-7 | 9.22E-05 |
| GI (SI) | 5.8E-7 | 5.8E-7 | 7.75E-05 |
| GI (ULI Wall) | 9.3E-7 | 9.3E-7 | 1.24E-04 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| GI (LLI Wall) | 1.2E-7 | 1.2E-7 | 1.60E-05 |
| Kidneys | 1.4E-6 | 1.4E-6 | 1.87E-04 |
| Liver | 9.3E-6 | 9.3E-6 | 1.24E-03 |
| Lungs | 8.7E-7 | 8.7E-7 | 1.16E-04 |
| Marrow | 4.0E-7 | 4.0E-7 | 5.34E-05 |
| Muscle | 4.0E-7 | 4.0E-7 | 5.34E-05 |
| Ovaries | 7.7E-8 | 7.7E-8 | 1.03E-05 |
| Pancreas | 1.7E-6 | 1.7E-6 | 2.27E-04 |
| Skin | 2.2E-7 | 2.2E-7 | 2.94E-05 |
| Spleen | 3.6E-7 | 3.6E-7 | 4.81E-05 |
| Testes | 4.0E-8 | 4.0E-8 | 5.34E-06 |
| Thyroid | 6.8E-8 | 6.8E-8 | 9.08E-06 |
| Uterus | 1.6E-7 | 1.6E-7 | 2.14E-05 |
| Total Body | 6.2E-7 | 6.2E-7 | 8.28E-05 |

مقادیر بدست آمده با مقادیر محاسبه شده توسط برنامه یکی می‌باشند.

در قسمت دوم این پنجره محاسبات دز در اجزای مختلف بدن ناشی از گاماهای گسیلی از قسمت‌های مختلف بدن انجام می‌گیرد. با وارد کردن اطلاعات انرژی گاماهای گسیلی و همچنین مکان گسیل آنها دز در ۲۰ قسمت مختلف بدن نمایش داده می‌شود. در این قسمت برای محاسبه نرخ دز و دز متوسط دریافتی(که معمولا با انتگرال گیری روی بازه پنجاه ساله بدست می‌آید) از رابطه (۱۲-۱۱) استفاده می‌شود.

$$\dot{D} = A \times \sum \Phi_i \times \Delta_i \quad , \quad D = 1.443 \times T_{eff} \times A \times \sum \Phi_i \times \Delta_i$$

Φ: Specific Absorbed Fraction

$$\Delta_i = 1.6\times10^{-13} \left(\frac{j}{MeV}\right) \times E_i \text{ (MeV)} \times n_i \left(\frac{part}{t}\right) \qquad (۱۲-۱۱)$$

که در آن A اکتیویته چشمه، $T_{eff}$ نیمه عمر موثر و $\phi$ کسر انرژی جذب شده در واحد جرم هدف می‌باشد که مقادیر آن از کتابخانه MIRD 5 [۹] استفاده شده است.

برای مثال فرض نمایید چشمه‌ای با اکتیویته ۱ Ci درون Liver با نیمه عمر موثر ۱۰ ساعت قرار دارد. این چشمه در هر واپاشی ۳ پرتو گاما با انرژی 1 MeV گسیل می‌نماید. می‌خواهیم نرخ دز و دز متوسط دریافتی اجزای مختلف بدن را محاسبه کنیم.

با استفاده از روابط (۱۲-۱۱) و مقادیر $\phi$ مربوط به چشمه گاما با انرژی 1 MeV درون Liver خواهیم داشت:

جدول شماره ۲: محاسبه دز در اجزای مختلف بدن بوسیله پارامتر $\phi$

| اندام‌های هدف | مقادیر $\phi$ برای 1 MeV | نرخ دز (rad/h) | دز متوسط دریافتی (rad) |
|---|---|---|---|
| Adrenals | 1.56E-5 | 9.97E+01 | 1.44E+03 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Bladder wall | 5.80E-7 | 3.71E+00 | 5.34E+01 |
| Bone | 2.30E-6 | 1.47E+01 | 2.12E+02 |
| GI (Stom Wall) | 6.44E-6 | 4.12E+01 | 5.93E+02 |
| GI (SI) | 5.16E-6 | 3.30E+01 | 4.75E+02 |
| GI (ULI Wall) | 7.71E-6 | 4.93E+01 | 7.10E+02 |
| GI (LLI Wall) | 8.88E-7 | 5.68E+00 | 8.18E+01 |
| Kidneys | 1.18E-5 | 7.54E+01 | 1.09E+03 |
| Liver | 8.07E-5 | 5.16E+02 | 7.43E+03 |
| Lungs | 7.90E-6 | 5.05E+01 | 7.27E+02 |
| Marrow | 3.21E-6 | 2.05E+01 | 2.96E+02 |
| Muscle | 3.69E-6 | 2.36E+01 | 3.40E+02 |
| Ovaries | 2.49E-6 | 1.59E+01 | 2.29E+02 |
| Pancreas | 1.36E-5 | 8.70E+01 | 1.25E+03 |
| Skin | 2.08E-6 | 1.33E+01 | 1.92E+02 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Spleen | 3.81E-6 | 2.44E+01 | 3.51E+02 |
| Testes | 8.76E-7 | 5.60E+00 | 8.07E+01 |
| Thyroid | 6.81E-7 | 4.35E+00 | 6.27E+01 |
| Uterus | 1.28E-6 | 8.18E+00 | 1.18E+02 |
| Total Body | 5.49E-6 | 3.51E+01 | 5.05E+02 |

## ۱۲-۵- پنجره محاسبه دز ناشی از استنشاق مواد پرتوزا

در این پنجره محاسبات دز در اجزای مختلف بدن ناشی از استنشاق مواد پرتوزا انجام می‌گیرد. میزان دز محاسبه شده به قطر ذره ورودی و نحوه جذب آن در خون، حرفه (بعنوان فردی که با مواد پرتوزا به عنوان یک حرفه در تماس است و یا یک فرد عادی) و سن فرد که در معرض مواد پرتوزا است، بستگی دارد و با مشخص شدن این مقادیر دز در ۲۶ قسمت

مختلف بدن و همچنین دز موثر محاسبه و نمایش داده می‌شود. اطلاعات عناصر از دو کتابخانه ICRP 68[۱۳] و ICRP 72[۱۳] می‌باشد.

## ۱۲-۶- پنجره محاسبه دز ناشی از بلعیدن مواد پرتوزا

در این پنجره محاسبات دز در اجزای مختلف بدن ناشی از بلعیدن مواد انجام می‌گیرد. با انتخاب کردن وضعیت حرفه‌ای فرد مورد نظر (بعنوان فردی که با مواد پرتوزا به عنوان یک حرفه در تماس است و یا یک فرد عادی) و همچنین سن فرد مورد نظر، دز در ۲۶ قسمت مختلف بدن و همچنین دز موثر نمایش داده می‌شود. اطلاعات عناصر از دو کتابخانه ICRP 68[۱۳] و ICRP 72[۱۳] می‌باشد.

## ۱۳- نتیجه‌گیری

در این گزارش سعی شده تا با طراحی یک نرم افزار گرافیکی اطلاعات لازم و ضروری ایزوتوپ‌ها و عناصر در اختیار کاربر جهت کار درست و اصولی قرار داده شود. همچنین یک نرم افزار ساده جهت محاسبات ساده حفاظ و محاسبات دز ناشی از انواع آلودگی در اجزاء مختلف بدن طراحی شده است.

## ۱۴- مراجع

1. "A Monte Carlo Program for General Radiation Transport Solutions", User Guide for Version 10, ANSWERS/MCBEND/REPORT/005

2. "A Monte Carlo Program for Nuclear Criticality Safety and Reactor Physics Analyses", User Guide for Version 9, ANSWERS/MONK/REPORT/004

3. W. S. Snyder, M. R. Ford, G. G. Warner, S. B. Watson, "S Absorbed dose per unit cumulated activity for selected radionuclides and organs", nm/mird pamphlet No. 11

4. "A Point Kernel Program for Gamma Ray Transport Solutions", User Guide for Version 15, ANSWERS/RANKERN/PEPORT/005

5. RJ McConn Jr , CJ Gesh ,RT Pagh ,RA Rucker ,RG Williams III , "Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling", PNNL-15870 Rev. 1

6. Charles D. Harmon, Robert D. Busch, Judith F. Briesmeister, R. Arthur Forster,"Criticality Calculation with MCNP:A Primer ,Contractors with Los Alamos National Laboratoy, August 1994.

7. D. K. Trubey, "A Survey Of Empirical Functions Used to Fit Gamma-Ray Buildup Factors", Oak Ridge National Laboratory, February 1966

8. D. K. Trubey, "New Gamma-Ray Buildup Factor Data For Point Kernel Calculations" ,Ans-6.4.3 Standard Reference Data, September 1988

9. W. S. Snyder, M. R. Ford, G. G. Warner,"Estimates of Spesific Absorbed Fractions for Photon Sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom", nm/mird pamphlet No. 5

10. "Geant4 User's Guide for Application Developers" ,Version: geant4 10.0 , Publication date 6 December 2013

11. D.R. Lide, "Handbook of Chemistry and Physics", 75th Edition, CRC Press, Boca Raton, FL, ISBN 0-849-30596-9, 1995.

12. H. O. Wooten, "Time-Dependent Neutron and Photon Dose-Field Analysis", In Partial Fulfillment Of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in Nuclear and Radiological Engineering, August 2005

13. ICRP Database of dose coefficients: workers and members of the public, Version 3.0, copyright 1998-2011

14. Janis Code V. 3.4, May 2012

15. Kaye, G.W.C & Laby, T.H. "Tables of Physical and Chemical Constants", 14th. Edition, Longman Press, ISBN 0-582-46326-2, 1973.

16. K. F. Eckerman, A. L. Sjoreen, "Radiological Toolbox User's Manual", Oak Ridge National Laboratory, August 31, 2006

17. O. J. Wallace, "Gamma-Ray Dose And Energy Absorption Build-UpFactor Data For Use in Reactor Shield Calculation", Bettis Atomic Power Laboratory, June 1974

19. Radiation Decay V4 Program

20. Radiological Toolbox, Version 2.0.0, 2006

21. R.C. Brockhoff , J.K. Shultis, "Data For The Calculation Of Albedos From Concrete, Iron, Lead And Water For Photons And Neutrons", March 2006

22. www.Atom.Kaeri.Re.Kr

23. W. L. Dunn, A. M. Yacout, And F. O'foghludha, "Boltzmann Transport EquationAlgorithms For Infinite-Slab Buildup And Albedo Factors", Naval Surface Warfare Center, 30 September 1990

24. www.Loffe.Rssi.Ru/Es/E/Astic

25. www.nndc.bnl.gov/

26. www.Physics.Nist.Gov

27. James T.(Tom) Voss, NRRPT, CHP, “Los Alamos Radiation Monitoring Notebook” , June 2000 (feb. 2001 Update)