ارزیابی مخاطرات ناشی از ریزش های اتمی بر پایه حوادث ورای مبنای طراحی کارخانه تولید سوخت اصفهان

حیدری آذر امیر*، شهشهانی مرتضی ، روشن ضمیر منوچهر، صبوحی راینا‌ک
شرکت تولید سوخت اتمی راکتورهای ایران

چکیده

در این تحقیق میزان دز جذبی و تبعات ناشی از ریزشهای اتمی در اثر وقوع حوادث ورای مبنای طراحی (BDBAs[1]) اعم از انفجار کوره سینترینگ، آتش سوزی خط تولید[2]، زلزله و بحرانیت در کارخانه تولید سوخت اصفهان بر آورد شده است. محاسبات تخمین دز دریافتی، نحوه گسترش ابر اتمی[3] و زنجیره های واپاشی با استفاده از کد کامپیوتری PC COSYMA انجام گردیده است. محاسبات بر اساس مقدار ماده پرتوزای رها شده به جو، شرایط آب و هوایی، ارتفاع انتشار، اقدامات انجام شده[4] برای کاهش میزان دز جذبی، مشخصات فیزیولوژیکی بدن انسان و توزیع منطقه ای جمعیت می باشد. نتایج احتمالاتی نشان می دهند که دز جذبی موثر فردی بیشینه ۱ و ۵۰ ساله در فاصله ۳۰۰ متری کارخانه در حدود ۰/۳۸۵ حد مجاز است و میزان بیشینه مرگ ومیر ناشی از انواع سرطان ۵/۹۶ در هر ۱۰۰۰ سال می باشد.

کلید واژه: *PC COSYM – دز جذبی موثر فردی و جمعی- ارزیابی محاسباتی و احتمالاتی- حوادث هسته‌ای*

مقدمه

کد کامپیوتری PC COSYMA یک برنامه کامپیوتری برای ارزیابی اثرات رها شدن مواد پرتوزا به جو برای شرایط حادثه در اطراف تاسیسات هسته ای می باشد. این کد برای ارزیابی دز به صورت رویکرد محاسباتی[5] و یا رویکرد احتمالاتی[6] استفاده می شود. ارزیابی محاسباتی، نتایج را برای یک مجموعه از شرایط جوی مشخص و پایدار حساب می نماید و ارزیابی احتمالاتی برای محاسبه نتایج بر حسب شرایط جوی متغیر با دوره های بازگشت معین می باشد[۱,۲].

[1] . *Beyond Design Basis Accidents*
[2] . *Processing Area*
[3] . *Plume*
[4] . *Countermeasures*
[5] . *Deterministic Approach*
[6] . *Probabilistic Approach*

روش کار

در این بخش نحوه مدل سازی به کار گرفته شده در این کد به اختصار توضیح داده می شود، سپس خلاصه ای از نحوه محاسبه دز توسط کد بیان می گردد و در نهایت ورودی های لازم برای اجرای کد آورده شده است.

۱- مدل نیمه تجربی گاوسی

مدل پخش به کار گرفته شده برای توزیع ابر اتمی، یک مدل نیمه تجربی می باشد. شکل تابع ریاضی به کار گرفته شده برای محاسبات در کد PC COSYMA تابع گاوسی می باشد. غلظت ماده رادیواکتیو بر حسب بکرل بر متر مکعب در

هر نقطه(x,y,z) به صورت معادله (۱) می باشد.

$$C(x,y,z)=\frac{Q}{2\pi\, u\sigma_y\sigma_z}\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\left\{\exp\left(-\frac{(z-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right)+\exp\left(-\frac{(z+H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right\} \qquad (1)$$

که در آن؛ Q (Bq/s) آهنگ پرتوزایی می باشد.

σ_x، σ_y و σ_z توابع پخش بر حسب متر می باشند که انحراف معیار استاندارد توزیع ابر اتمی در جهت های x، y و z را نشان می دهند و تابعی از پایداری وضعیت هوا و فاصله در جهت باد می باشند. شکل ریاضی این توابع به صورت معادله (۲) می باشد.

$$\sigma = p.X^q \qquad (2)$$

مقادیر p و q بسته به نگارشهای مختلف کد PC COSYMA متغیر می باشند.

u سرعت متوسط باد(m/s) منطقه در راستای x ، z ارتفاع از سطح زمین، x فاصله (m) در جهت باد و y فاصله (m) در جهت عمود بر باد می باشد.

H_e ارتفاع موثر آزاد سازی ابر اتمی است که از رابطه (۳) به دست می آید.

$$H_e = h+(\frac{v}{\mu})^{\frac{1}{4}}(1+\frac{\Delta t}{T}) \qquad (3)$$

که در آن h ارتفاع فیزیکی دودکش، d قطر مجرای خروجی دودکش، v سرعت خروج مواد، μ سرعت میانگین باد منطقه، Δt اختلاف دمای مواد خروجی و هوا و T دمای هوای محیط می باشد[۳].

۲- نحوه محاسبه دز

به فاصله اندکی پس از وقوع حادثه، مواد پرتوزا به داخل جو رها می شوند و ساکنین اطراف کارخانه نیز مانند کارکنان کارخانه در معرض تشعشع موجود در جو و سپس در معرض تشعشعات ناشی از نشست مواد پرتوزا بر روی زمین یا سطوح مختلف قرار می گیرند. مسیرهای جذب دز به قرار زیرند:

۱- تشعشع خارجی ناشی از ماده پرتوزای موجود در ابر اتمی تشکیل شده به صورت معادله(۴) می باشد .

$$DCL(o) = SF(CL)\sum_{k}(AC(k).DRCFCL(o,k)) \qquad (۴)$$

که در آن $DCL(o)$ مقدار دز بر حسب سیورت، $SF(CL)$ فاکتور حفاظت میانگین برای ابر پرتوزا و k اندیس هسته پرتوزا می باشد. $AC(k) = AA(k).PCF$ انتگرال زمانی موثر غلظت(Bqs/m^3) در معادله(۱) می باشد که $AA(k)$ انتگرال زمانی غلظت در نزدیکی سطح زمین $(z \approx 0)$ و PCF فاکتور تصحیح ابر اتمی در یک نقطه معین می باشد. $DRCFCL(o,k)$ فاکتور تبدیل نرخ دز، بر حسب $(Sv\times m^3)/(Bq\times s)$ می باشد.

۲- تشعشع خارجی ناشی از نشست مواد پرتوزا بر روی زمین به صورت معادله(۵) می باشد.

$$DGR(o,t) = SF(GR)\sum_{k}(AG(k).DCFGR(o,k,t)) \qquad (۵)$$

که در آن $DGR(o,t)$ مقدار دز بر حسب سیورت، $SF(GR)$ فاکتور حفاظت میانگین برای ابر پرتوزا و k اندیس هسته پرتوزا می باشد. $AG(k)$ حاصلضرب غلظت (Bqs/m^3) در معادله(۱) و سرعت نشست ذرات پرتوزا می باشد. همین طور $DCFGR(o,k,t)$ فاکتور تبدیل دز، بر حسب $(Sv\times m^2/Bq)$ می باشد که در پریود زمانی t بر روی آن انتگرال گیری شده است، می باشد.

۳- تشعشع خارجی ناشی از نشست مواد پرتوزا بر روی پوست و لباس.

۴- استنشاق[۷] مواد پرتوزای موجود در ابر اتمی.

۵- بلعیدن[۸] مواد پرتوزا (از طریق مواد غذایی) و مواد باز معلق شده[۹] در هوا.

برای سایر مسیرهای جذب دز (موارد ۳، ۴، ۵) نیز روابط مشابهی با ضرایب و فاکتورهای مربوطه می توان نوشت. کلیه فاکتورهای تصحیح و ضرایب تبدیل در داده های کتابخانه ای کد موجود می باشند.

لازم به ذکر است کد، کلیه فاکتورهای تبدیل دز و فاکتورهای تبدیل نرخ دز را برای اثرات کوتاه مدت و بلند مدت با توجه به تعداد جهت های جغرافیایی در نظر گرفته شده، فرکانس تغییر جهت باد و دسته های پخش محاسبه نموده و از آنها استفاده می نماید.

از آنجا که در واپاشی مواد پرتوزا، یک زنجیره واپاشی می بایست در نظر گرفته شود و آهنگ پرتوزایی هسته های مادر و دختر به صورت روابط نمایی کاهش پیدا می کنند، لذا Q در رابطه (۱) تابع زمان می باشد.

ابر حاوی مواد پرتوزا از طریق اندرکنش با باران و برف تهی می شود، لذا در شرایط جوی مذبور به جای آهنگ پرتوزایی Q از مضرب $Q\times F_w$ استفاده می شود که در آن F_w از رابطه (۶) به دست می آید.

[7] .*Inhalation*
[8] . *Ingestion*
[9] . *Resuspension*

$$F_W = \exp(-\Lambda \frac{x}{u}) \qquad (۶)$$

که $\Lambda\,(s^{-1})$، ضریب شستشو[10] بوده و به صورت رابطه (۷) در نظر گرفته می شود.

$$\Lambda = \alpha I \qquad (۷)$$

که در آن $I(mm/hr)$ نرخ ریزش باران و α ضریب تناسبی است که به خواص مواد هوابرد نظیر قطر آیرودینامیکی ذرات و قابلیت انحلال گاز در آب، بستگی دارد.

در اثر نیروی جاذبه، ذرات هوا برد بر روی سطح زمین نشست می کنند. نرخ نشست مواد بستگی به خواص مواد هوابرد، نظیر قطر آیرودینامیکی ذرات و همچنین عوارض زمین بستگی دارد که با مفهوم سرعت نشست قابل ارزیابی است. سرعت نشست به صورت نسبت مقدار مواد نشسته بر روی سطح زمین در واحد زمان به غلظت مواد در هوا و در نزدیکی سطح زمین بیان می شود. در این مورد غلظت در هوا را می توان با جایگذاری $Q\times F_D$ به جای Q در معادله (۱) به دست آورد [۳,۴,۵,۶].

۳- داده های ورودی

اطراف کارخانه در جهت شعاعی به ۹ قسمت به شعاع های ۱/۶، ۳/۲، ۴/۸، ۶/۴، ۸، ۱۶، ۳۲، ۴۸، ۶۴ و ۸۰ کیلومتر و در جهت سمتی به ۱۶ قسمت تقسیم بندی شده است. بر طبق این تقسیم بندی و بر اساس اطلاعات مرکز آمار ایران[۷] از جمعیت شهرها و روستاهای منطقه و در نظر گرفتن نرخ رشد جمعیت ۳٪، تخمین توزیع جمعیت تا سال ۱۳۹۰ اعمال شده است. ضرایب تبدیل دز موثر و دز معادل موثر به ترتیب از ICRP60 و ICRP26 استخراج شده است[۸, ۹]. بازه زمانی دز برای ارزیابی کوتاه مدت ۱ سال و برای ارزیابی بلند مدت ۵۰ سال در نظر گرفته شده و ارتفاع موثر تشکیل ابر اتمی نیز با استفاده از رابطه (۳) ۳۲ متر در نظر گرفته شده است. در این راستا از غلظت های کمتر از 10^{-20} $Bq.S/m^{-3}$ صرف نظر شده است. پارامترهای σ نیز مطابق مقادیر پیش گزیده کد انتخاب گردیده است.

برای ارزیابی حوادث، دو نوع وضعیت هواشناسی جداگانه به کار برده شده است.در اجرای محاسباتی، پارامترهای جوی در کلاس پایداری F فرض شده است و بدان معنی است که جهت باد، سرعت باد و میزان بارندگی ثابت می ماند. سرعت باد در کمترین مقدار خود یعنی m/s ۱و مقدار بارندگی mm/hr ۱ لحاظ شده است. جهت باد نیز نسبت به راستای شمال $^{\circ}$۲۹۲منظور گردیده است.

[10] . *Washing Coefficient*

برای ارزیابی احتمالاتی طول ۱ سال به ۱۴۴ قسمت ۶۱ ساعتی تقسیم شد، که هر قسمت دارای شرایط آب و هوایی خاص خود(مطابق با موارد پیش گزیده کد) است، همچنین فرض شده است که سرعت و جهت باد در هر ساعت تغییر می نماید.

عبارت چشمه[11] در ورودی این کد به صورت مجموع ریزش های ناشی از کلیه حوادث ماورای طراحی(انفجار کوره سینترینگ، آتش سوزی، زلزله و بحرانیت) می باشد که چشمه بحرانیت معادل رادیونوکلیدهای ناشی از 10^{19} شکافت و ۲۰ گرم U(۲۳۵) در نظر گرفته شده است[۱۰]. مقادیر مربوط به اورانیوم در جدول (۱) آورده شده است.

جدول۱: اورانیوم رها شده به جودر تمامی حوادث ماورای مبنای طراحی.

U(۲۳۸)	U(۲۳۵)	U(۲۳۴)
۲۸.۷۷۱.۷۲۸ Bq	۱۱.۴۹۱.۳۱۲ Bq	۳۰۴.۹۵۹.۳۹۴Bq

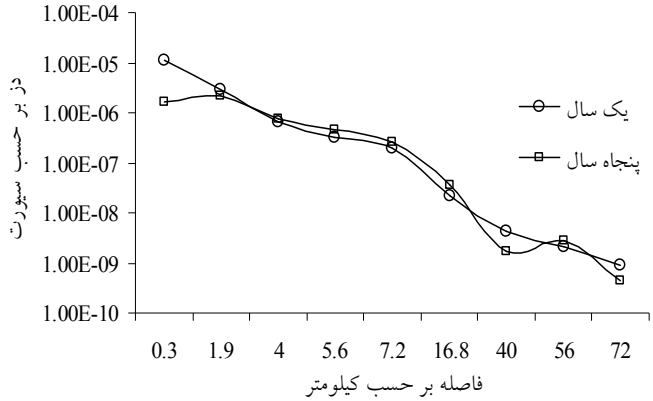
نتایج

۱- رویکرد محاسباتی

برای شرایط با وضعیت جوی ثابت، دز موثر فردی متوسط[12] (بر حسب سیورت) برای۱ و ۵۰ سال برای فواصل مختلف، در شکل(۱) آورده شده است. عمل متوسط گیری بر روی جهت های مختلف ۱۶ گانه در یک شعاع معین انجام شده است.

طبق تعریف دز معادل جمعی عبارتست از میانگین دز معادل دریافتی توسط یک جمعیت در تعداد آنها و دز موثر جمعی عبارت است از حاصلضرب دز معادل جمعی در فاکتور توزین پرتو که یکای آن فرد- سیورت می باشد[۱۰]. مقادیر دز موثر جمعی[13] در فواصل مختلف (بر حسب فرد- سیورت) در جدول(۲) نشان داده شده است. سهم مسیرهای مختلف در دز موثر جمعی کل[14] در ۵۰ سال به ترتیب، مسیر استنشاق ۱۸٪، مسیر ابر حاوی مواد پرتوزا ۴۸٪، مسیر تابش از سطح زمین۳۳٪ و مسیر استنشاق مواد معلق شده از سطح زمین ۱٪ می باشد.

[11] . *Source Term*
[12] . *Mean Individual Effective Dose*
[13] . *Collective Effective Dose*
[14] . *Total Collective Effective Dose*



شکل(۱): دز موثر فردی متوسط بر حسب فاصله در۱ و ۵۰ سال

جدول(۲): دز جمعی موثر(بر حسب فرد- سیورت) در ۵۰ سال بر حسب فاصله(کیلومتر)

فاصله	۰/۳	۱/۹	۴	۵/۶	۷/۲	۱۶/۸	۴۰	۵۶	۷۲
دز	$۴/۶۴\times۱۰^{-۲}$	$۲/۳۷\times۱۰^{-۳}$	$۵/۰۱\times۱۰^{-۳}$	$۵/۷۰\times۱۰^{-۳}$	$۳/۷۵\times۱۰^{-۳}$	$۱/۴۲\times۱۰^{-۳}$	$۳/۵۴\times۱۰^{-۴}$	$۳/۴۸\times۱۰^{-۴}$	$۴/۴۷\times۱۰^{-۴}$

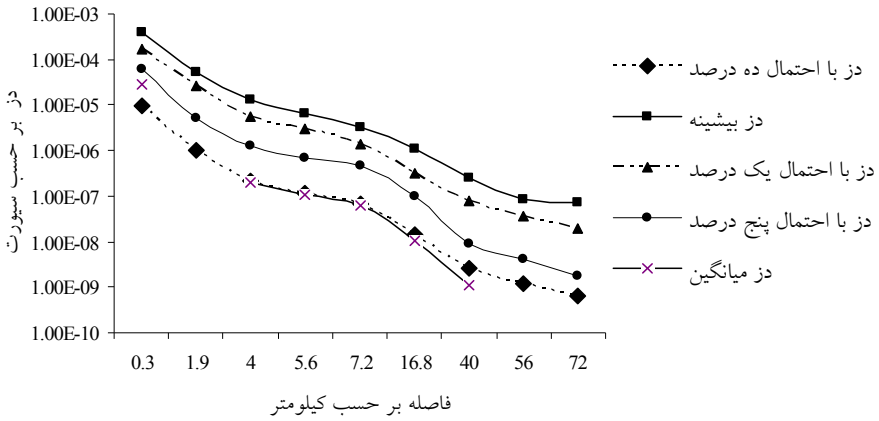
برای همه مسیرهای جذب دز، سهم رادیونوکلییدها در فاصله ۳۰۰ متری به ترتیب U(۲۳۵)، ۷۴/۶۷٪، U(۲۳۴)، ۲۳/۴۸٪ و U(۲۳۸)، ۱/۸۵٪ می باشد.

تعداد افرادی که در ۱۰۰۰ سال مبتلا به سرطان کشنده می شوند برابر است با ۰/۱۳ نفر و تعداد افرادی که مبتلا به سرطان غیر کشنده شدند، برابر با ۰/۳۳ نفرمی باشد.

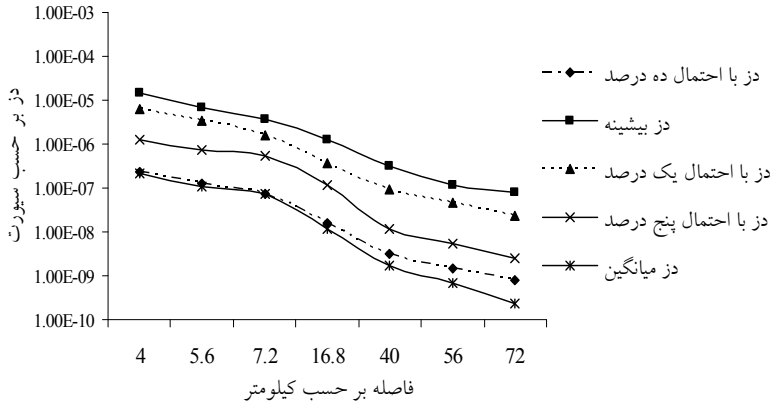
۲- رویکرد احتمالاتی

برای شرایط با وضعیت جوی متغیر، میانگین و بیشینه دز موثر فردی (در جهت های مختلف) و هم چنین دزهای جذبی موثر فردی با احتمالات۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ برای۱ سال و ۵۰ سال در شکل های (۲) و (۳) آورده شده است. سهم مسیرهای مختلف در دز موثر جمعی کل در ۵۰ سال به ترتیب، مسیر استنشاق۴۰٪، مسیر ابر حاوی مواد پرتوزا ۳۷٪، مسیر تابش از سطح زمین۲۳٪ و مسیر استنشاق مواد معلق شده از سطح زمین ۱٪ می باشد.

میانگین و بیشینه دز موثر جمعی ۵۰ ساله (در جهت های مختلف) و همین طور دزهای جذبی موثر جمعی با احتمالات۱٪، ۵٪ و ۱۰٪ برای ۵۰ سال در جدول (۳) آورده شده است.



شکل۲: دز موثر فردی میانگین، دز موثر فردی بیشینه و دز موثر فردی با احتمال معین در طول ۱ سال برای فواصل مختلف



شکل۳: دز موثر فردی میانگین، دز موثر فردی بیشینه و دز موثر فردی با احتمال معین در طول۵۰ سال برای فواصل مختلف

بیشینه و متوسط تعداد افرادی که در ۱۰۰۰ سال مبتلا به سرطان کشنده می شوند به ترتیب برابر است با۵/۹۶ و ۰/۱۹۲ نفر همین طور بیشینه و متوسط تعداد افرادی که در همین مدت مبتلا به سرطان غیر کشنده می شوند به ترتیب برابر با۱۴/۴۲ و ۰/۵۶۶ نفر می باشد.

جدول۳: دز موثرجمعی میانگین کل، دز موثرجمعی بیشینه کل و دز موثرجمعی کل با احتمال معین در طول ۵۰ سال بر حسب (فرد سیورت)

میانگین	بیشینه	٪۱	٪۵	٪۱۰	٪۵۰
$۱/۷۴\times۱۰^{-۱}$	۵/۲۳	۴/۷۹	$۵/۶۲\times۱۰^{-۱}$	$۱/۵۱\times۱۰^{-۱}$	$۲/۵۱\times۱۰^{-۲}$

بحث و نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از روشهای به کار گرفته شده نشان می دهد که مقدار دز در فاصله ۳۰۰ متری دارای بیشترین مقدار می باشد، که این نتیجه با توجه به رفتار تابع گاوسی مورد انتظار می باشد. همین طور در کلیه شعاع ها میزان دز جذبی در جهت ۲۹۲° نسبت به شمال که جهت وزش باد نیز می باشد، بیشترین می باشد و این نتیجه با توجه به آن که باد سهم مهمی در جابجایی ابر اتمی دارد قابل توجیه می باشد. در محاسبات قطعی مسیرهای ابر حاوی مواد پرتوزا، تابش از سطح زمین و استنشاق و در محاسبات احتمالی استنشاق، ابر حاوی مواد پرتوزا وتابش از سطح زمین به ترتیب بیشترین سهم را در دز جذبی دارند.

دز موثر جذبی مجاز برای هر فرد برابر با ۱ میلی سیورت در سال می باشد[۱۱] و کلیه مقادیر محاسبه شده برای دز موثرفردی کمتر از این مقدار می باشد، همین طور تعداد افرادی که در بلند مدت به سرطان کشنده یا غیر کشنده مبتلا می شوند، عدد نسبتاً کوچکی(۱۴/۴۲نفر در هر ۱۰۰۰ سال) می باشد.

مراجع

[1]. J. Z. Cao, M. R. Yenug, S.K. Wong, J. Ehrhardt, K.N. Yu, Adaptation of COSYMA and assessment of accident consequences for Daya Bay nuclear power plant in china, Journal of Environmental Radioactivity , Vol. 48, 265-277, 2000.

[۲]. ایستگاه هواشناسی اصفهان- استان اصفهان-سازمان هواشناسی اصفهان- ۱۳۷۵.

[3]. J.A. Jones, P. A. Mansfield, and S. M. Haywood, European Commission, Radiation Protection - PC Cosyma (version2): An accident consequence assessment package for use on a PC, EUR 16239EN, 1996.

[4]. PC COSYMA, Version2.0, User Guide, National Radiological Protection Board, EUR 16240, NRPB-SR280, November 1995.

[5]. J. J. N. Wilson, A.J.H. Goddard and H.M. Apsimon, COSYMA User Guide, Commission of the European Communities, DG XIII-D-3 Radiation Protection Research Programme, DG XI-A-1 Radiation Protection, February 1991.

[۶]. فتاحی علی، پایان نامه کارشناسی ارشد، ارزیابی دز دریافت شده توسط ساکنین اطراف کارخانه سوخت هسته ای در حالت حادثه و بهره برداری عادی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۲.

[۷]. سر شماری عمومی و نفوس مسکن- شناسنامه آبادیهای کشور- استان اصفهان- مرکز آمار ایران- ۱۳۷۵.

[8]. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Recommendations of the ICRP Publication, No. 26, Vol. 1 No. 3, 1977.

[9].INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Recommendations of the ICRP Publication No. 60, Vol. 21 No. 1-3, 1991.

[10]. Regulatory guide (3.34), U.S. Nuclear Regulatory Guide, Revision1, July 1979.

[۱۱]. غیاثی نژاد مهدی، کاتوزی مهران، حفاظت در برابر اشعه، انتشارات دربید، ۱۳۸۲.