# ارزیابی ایمنی پرتویی نصب تانک‌های حاوی آب دیستیلات مدار اول نیروگاه اتمی بوشهر در خارج از ناحیه تحت کنترل

**سید حامد حسینی*(۱)، وحید جمشیدی(۱)، زهرا تبادار(۱)**

(۱) سازمان انرژی اتمی، شرکت مهندسین مشاور افق هسته‌ای

## چکیده

*در این مقاله طرح نصب دوتانک سیستم انبار و تصفیه خنک‌کننده مدار اول (TD) در خارج از ناحیه تحت کنترل نیروگاه اتمی بوشهر به منظور کاهش مدت زمان فرآیند افزایش توان راکتور، از نقطه نظر ایمنی پرتوی مورد ارزیابی قرار گرفته است. این تانک‌ها حاوی آب دیستیلات مدار اول می‌باشند که شامل رادیوایزوتوپ $^{3}H$ و همچنین رادیوایزوتوپهای گامازای محدودی که در فرآیند دیستیلات آب مدار اول از منابع رادیو اکتیو سیستم TD وارد تانک‌ها می‌شوند، می‌باشند. به منظور ارزیابی از نقطه نظر ایمنی پرتویی، نرخ دز تانکها با استفاده از کد MCNPX محاسبه شده است، همچنین ارزیابی های رادیولوژیکی در صورت رخداد حادثه نشت از تانکها به محیط با احتساب شرایط محافظه کارانه با استفاده از نرم افزار برآورد پخش آلاینده‌های جوی (HotSpot (Version 3.03، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج ارزیابی‌ها بیانگر آن است که طرح نصب تانکهای سیستم TD در خارج از ناحیه تحت کنترل از نقطه نظر حفاظت در برابر اشعه بلامانع می باشد.*

*کلمات کلیدی: MCNPX، ایمنی پرتویی، HotSpot ، سیستم TD، BNPP-1*

# Radiation safety evaluation of BNPP-1 tanks including distillated primary circuit water installation outside controlled area

***Seyed Hamed Hosseini*(1) ,Vahid Jamshidi(1), Zahra Tabadar(1)***

*(1) Ofogh Consulting Engineers (OCE) company*

***Abstract***

*In this article, the installation of the TD System (primary circuit coolant distillation and storage) tanks outside the controlled area of the Bushehr nuclear power plant has been evaluated from the radiation safety point of view. These tanks contain primary circuit distillated water, which includes radioisotope $^{3}H$, as well as limited gamma emitter radioisotopes that enter the tanks in the distillation process from the radioactive sources of the TD system. In order to assess the design from the point of view of radiation safety, the dose rate of the tanks is calculated using the MCNPX code. radiological assessments in the event of an incident of leakage from tanks to the environment, taking into account conservative conditions has been evaluated using the HotSpot (Version 3.03 ) (atmospheric pollutants modeling program). The results of the evaluations indicate that the installation of tanks of the TD system outside the controlled area from the point of view of radiation protection is acceptable.*

Key Words: MCNPX, Radiation Safety, HotSpot, TD System, BNPP-1

**۱- مقدمه**

هدف اصلی از ایمنی و حفاظت در برابر اشعه، ارزیابی موثر و بکارگیری روش‌های حفاظتی فنی به منظور حفاظت کارکنان، مردم و محیط زیست در برابر پرتوگیری رادیولوژیکی می‌باشد. تاسیسات هسته‌ای به دلیل وجود مواد رادیواکتیو در آنها، به طور کلی پتانسیل و احتمال ایجاد خطر پرتوگیری و نشت مواد پرتوزا را تحت شرایط عادی و یا شرایط اضطراری دارا بوده و می‌توانند سبب پرتوگیری کارکنان واحد و یا مردم گردند. مطابق پیشنهاد سازمان بهره‌بردار نیروگاه اتمی بوشهر، به منظور تسریع در راه‌اندازی راکتور پس از خاموشی و با هدف افزایش توان راکتور بدون توقف، طرح نصب دوتانک جبرانی حاوی آب دیستیلات مدار اول مرتبط با سیستم TD در خارج از ناحیه تحت کنترل نیروگاه در نظر گرفته شد. هدف از این بررسی ارزیابی رادیولوژیکی نصب دوتانک حاوی آب دیستیلات مدار اول شامل رادیوایزوتوپ $^{3}H$ و همچنین رادیوایزوتوپهای گامازا در خارج از ساختمان(خارج ناحیه تحت کنترل) می‌باشد. در این بررسی از کد ترابرد پرتو MCNPX نسخه ۲,۷[۱] جهت محاسبه نرخ دز تانکها استفاده شده است. به منظور اعتبار سنجی ، نمونه مساله ارائه شده در فصل ۱۲، FSAR [۲] مورد استفاده قرار گرفته است، همچنین از برنامه ( Version 3.03) HotSpot جهت برآورد پراکندگی آلاینده های جوی و نرخ دز جمعیت ساکن اطراف نیروگاه اتمی بوشهر در حالت حادثه استفاده شده است.

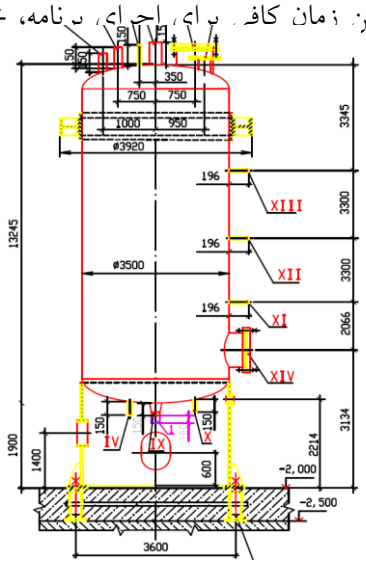
**۱- روش کار**

در این مقاله به منظور ارزیابی نصب تانکهای دیستیلات در خارج ساختمان از نقطه نظر حفاظت در برابر اشعه و اثرات رادیولوژیکی آن در صورت رخداد حادثه، ارزیابی‌ها شامل ۱) اعتبارسنجی سنجی شبیه سازی با کد MCNPX، ۲) محاسبه نرخ دز تانک TD با احتساب ایزوتوپهای گامازا در تانک(باتوجه به اینکه رادیوایزوتوپهایی بغیر از تریتیم در نمونه‌های اندازه‌گیری شده از تانک‌های دیستیلات گزارش شده است) و ۳) ارزیابی اثرات رادیولوژیکی حادثه نشت از تانک‌های آب دیستیلات حاوی رادیوایزوتوپ تریتیم به محیط، انجام گردید.

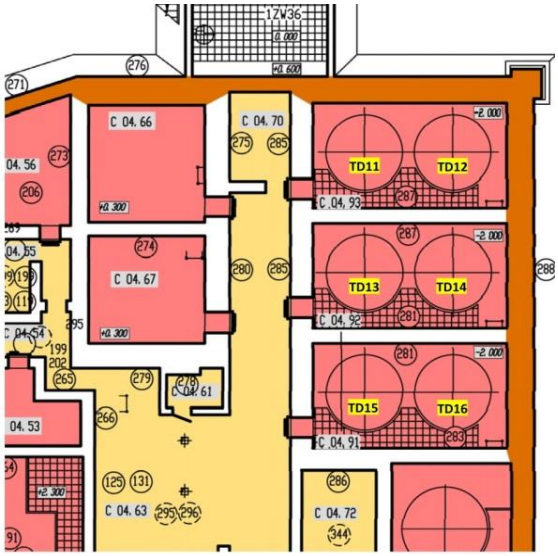
**۲-۱- شبیه سازی با کد MCNPX**

در این بررسی جهت اعتبار سنجی شبیه سازی از نمونه مساله مشابه آن که در فصل ۱۲ مدرک FSAR [۲] و جدول ۱۲,۳,۲ ارائه گردیده، استفاده شده است. بدین منظور مقدار نرخ دز دتکتور شماره 287 در اتاق C 04. 93 شامل تانک آب بوردار در ساختمان ZC (ساختمان تجهیزات کمکی)با استفاده از کد MCNPX محاسبه شد و با مقدار ارائه شده در جدول ۱۲,۳,۲ مدرک FSAR مقایسه گردید[۲]. با استفاده از مشخصات تانک (ارتفاع ۱۲/۹۳متر، شعاع ۱/۷۵ متر، ضخامت ۱ سانتی متر)[۳] در کد MCNPX، تانک سیستم TD با

حجم ۱۲۰ متر مکعب شبیه سازی گردید. در شکل شماره ۲ موقعیت اتاقهای (C 04.91, 92, 93) شامل تانکهای TD نشان داده شده‌اند. ماده داخل تانک در شبیه سازی، آب در نظر گرفته شد و استیل نوع Stainless 316 [۳] در ورودی برنامه تعریف گردید. نرخ دز با استفاده از تالی F5 (دتکتور نقطه‌ای) و ضرایب شار به دز(ANSI/ANS-6.1.1-1977) در فواصل مختلف از تانک محاسبه گردید. اکتیویته و چشمه‌های موجود در تانک بوردار با استفاده از داده های جدول11.2.4.1-3 مدرک FSAR [۴] جهت ورودی کد MCNPX استخراج گردید. انرژی و فراوانی هر یک از ایزوتوپها از نرم افزارjanis [۵] محاسبه در نظر گرفته زمان کافی برای اجرای برنامه، خطای نسبی




(۱)




(۲)

**شکل شماره ۱- نمایی از ابعاد یک تانک TD [۳]، شکل شماره ۲- موقعیت اتاقهای شامل تانکهای بوردار سیستم TD ,C 04.91 (92, 93) در ساختمان ZC [۲]**

## ۲-۲- شبیه سازی تانکهای سیستم TD حاوی ایزوتوپهای گامازا

جهت ارزیابی نرخ دز تانک‌های دیستیلات سیستم TD باتوجه به مقادیر اکتیویته گزارش شده در روزهای اندازه گیری، یک تانک TD با استفاده از کد MCNPX مطابق توضیحات ارائه شده، شبیه سازی گردید. در جدول شماره ۱ مقادیر اندازه گیری گزارش شده، ارائه گردیده است. اکتیویته هر ایزوتوپ در ورودی برنامه تعریف گردید و مقادیر نرخ دز تجمعی در روزهای گزارش شده، محاسبه گردید. با توجه به حد تعیین شده در استاندارد NRB-96 [۶]مقدار نرخ دز در سطح تجهیزات در فاصله ۱۰سانتیمتر لازم است کمتر از ۱µSv/h باشد.

## ۲-۳- ارزیابی اثرات رادیولوژیکی در صورت رخداد حادثه

تریتیم به علت تابش بتای کم انرژی (به طور میانگین 5.7 keV) و جذب آن در داخل و بدنه تانک نقشی در نرخ دز خارج تانک ندارد اما در صورت رخداد حادثه و انتشار آن در محیط با توجه به نیمه عمر 12.32±0.02 سال می تواند سبب پرتوگیری پرسنل و جمعیت ساکن اطراف نیروگاه گردد. مسیر مهم پرتوگیری در صورت رخداد نشت آب دیستیلات تانک‌های سیستم TD حاوی تریتیم، تنفس بخار آب تریتیم دار توسط پرسنل و جمعیت ساکن می‌باشد. در این بررسی بیشترین مقدار اکتیویته تریتیم با استفاده از مقادیر اکتیویته اندازه‌گیری شده محاسبه گردید و جهت ارزیابی اثرات رادیولوژیکی تریتیم مورد استفاده قرار گرفته شده است. با استفاده از نرخ محاسبه شده تولید تریتیم در سال با احتساب واپاشی در طول مدت بهره برداری ۳۰ سال، مقدار تریتیم در سال سی ام بهره برداری (عمر کاری نیروگاه) 3.91E+07 Bq/Lit محاسبه گردید.

**جدول شماره ۱- اکتیویته حجمی اندازه گیری شده رادیوایزوتوپها در آب دیستیلات و نرخ دز (µSv/h) در فاصله ۱۰ سانتیمتر از سطح تانک دیستیلات سیستم TD**

| AKZ | Xe-135 (Bq/Lit) | F-18 (Bq/Lit) | Xe-133 (Bq/Lit) | Sb-124 (Bq/Lit) | Mo-99 (Bq/Lit) | Cs-137 (Bq/Lit) | Sb-122 (Bq/Lit) | Se-75 (Bq/Lit) | As-76 (Bq/Lit) | **Dose Rate (µSv/h)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TD14B001 | | | | 1.48E+01 | 5.52E+01 | 1.35E+00 | | | | **1.17E-03** |
| TD14B001 | | | | 1.78E+01 | 2.47E+01 | | | | | **9.53E-04** |
| TD16B001 | | | | 1.56E+01 | | | 2.91E+00 | | | **9.52E-04** |
| TD16B001 | | | | 1.95E+00 | 1.56E+01 | 3.88E+00 | | | | **1.17E-03** |
| TD16B001 | | | | 3.36E+00 | 2.97E+00 | | | | | **9.53E-04** |
| TD16B001 | 3.06E+01 | 1.23E+02 | | | | | | | | **1.90E-03** |
| TD16B001 | | | | 3.20E+00 | | | | | | **7.87E-04** |
| TD16B001 | 1.02E+01 | | | | | | | | 1.29E+01 | **6.68E-04** |
| TD16B001 | 7.27E+00 | | 1.11E+01 | | | 3.17E+00 | | 2.53E+01 | 1.61E+01 | **1.29E-03** |
| TD16B006 | 7.28E+00 | | | 6.84E+00 | | | | | | **8.90E-04** |

### ۲-۳-۱- سناریو حادثه و شبیه سازی

به منظور ارزیابی رادیولوژیکی انتشار بخار آب تریتیوم دار، سناریویی محافظه کارانه در نظر گرفته شد. در این سناریو فرض گردید که کل آب دیستیلات تانک‌ها(۲۴۰مترمکعب) وارد محوطه سایت نیروگاه شود. جهت محاسبه دز دریافتی پرسنل در صورت رخداد نشت آب تانکهای سیستم TD، فرض گردید فرد از تجمع بخار آب تریتیم دار در فضای سطح آب رها شده با ارتفاع ۱/۵ متر تنفس(با نرخ ۲۰ لیتر در دقیقه [9]) نماید. ارتفاع تنفس ۱/۵ متر مطابق با ارتفاع تنفس انسان مرجع[9] در نظر گرفته شده است. در این سناریو از بیشترین نرخ تبخیر روزانه $9.7\frac{Kg}{m^2.Day}$ [10] در سالهای اخیر منطقه استفاده شده است. با احتساب فاکتور واحد اکتیویته به دز $1.8\times10^{-11}\frac{Sv}{Bq}$ (ICRP 60) برای بخار آب تریتیم دار از مسیر تنفس، دز دریافتی پرسنل از مسیر تنفس بخار آب تریتیم دار در مدت ۱ ساعت محاسبه گردید. جهت ارزیابی دز دریافتی جمعیت ساکن اطراف نیروگاه بوشهر از نرم افزار HotSpot (Version 3.03) استفاده گردید. در مقاله‌ای که در سال ۲۰۱۴ ارائه شده است [۶]، مقادیر دز دریافتی مردم در شرایط نرمال و حادثه برای نیروگاه بوشهر با استفاده از این نرم‌افزار محاسبه شد و نتایج بیانگر توافق بسیار خوب با مقادیر ارائه

شده در مدارک FSAR نسبت به سایر نرم افزارهای ارزیابی پخش می باشد. در این سناریو فرض شده است کل اکتیویته تریتیم بصورت بخار آب تریتیم دار در مدت ۲۴ ساعت وارد جو و هوای نیروگاه گردد. چشمه فرضی بصورت سطحی با ابعاد 155 m×155 m و عمق 0.01 m لحاظ گردید. سرعت باد باتوجه به کلاس پایداری اتمسفر توصیه شده (Class D) جهت ارزیابی حوادث مطابق دستورالعمل IAEA و مقدار در نظر گرفته شده در بخش ۱۵،۳،۸،۲ مدرک FSAR جهت ارزیابی رادیولوژیکی در حوادث BDBA، 1.8 m/s در نظر گرفته شد. جهت باد به سمت نزدیکترین جمعیت ساکن اطراف نیروگاه(روستای هلیله درفاصله ۴۰۰ متری از مکان چشمه) فرض شده است. با تعریف ورودیها در برنامه HotSpot، مقدار دز موثر کلی (Total Effective Dose) مردم در فواصل مختلف از محل حادثه(با استفاده از ضرایب تبدیل ICRP 60 در برنامه) محاسبه گردید و همچنین بصورت کانتور بر روی نقشه منطقه اطراف نیروگاه بدست آمد.

۳- نتایج

در بخش اعتبار سنجی شبیه سازی، مقدار نرخ دز از سطح دو تانک آب بوردار سیستم TD با استفاده از کد MCNPX و نمونه مساله ارائه شده در فصل ۱۲ مدرک FSAR ، ۰/۲۵ µSv/h محاسبه گردید. مقدار نرخ دز دتکتور شماره 287 گزارش شده در جدول۱۲،۳،۲ مدرک FSAR، ۰/۲۹ µSv/h می‌باشد. مقایسه این مقادیر بیانگر توافق قابل قبول بین نتایج می‌باشد. لازم بذکر است در محاسبه مقدار گزارش شده در FSAR، کد دوبعدی قطعی (Deterministic) DOT مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج محاسبه نرخ دز تانکهای آب دیستیلات سیستم TD باتوجه به مقادیر اکتیویته گزارش شده در روزهای اندازه‌گیری مطابق توضیحات ارائه شده در بخش ۲-۲ و ۲-۱ در جدول ۱ ارائه شده‌اند. با توجه به اندازه‌گیری‌ها در زمان‌های مختلف (سه ماه)، بیشترین نرخ دز در فاصله ۱۰ سانتیمتر از سطح تانک ۰/۰۰۱۹ µSv/h می باشد. با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش ۲-۳ در خصوص محاسبه دز دریافتی پرسنل در صورت رخداد نشت آب تانک‌های سیستم TD و فرضیات محافظه کارانه، مقدار پرتوگیری پس از یک ساعت تنفس در بدترین شرایط ممکن ۰/۱ mSv در محوطه سایت می باشد. مقادیر دز موثر(Total Effective Dose) جمعیت ساکن اطراف نیروگاه محاسبه شده با برنامه HotSpot (Version 3.03) در جدول ۲ در فواصل مختلف از محل حادثه ارائه گردیده است. در شکل شماره ۳ کانتور نرخ دز دریافتی جمعیت ساکن اطراف سایت نشان داده شده است.

## ۴-بحث و نتیجه گیری

نتایج محاسبات نرخ دز تانک حاوی آب دیستیلات سیستم TD با استفاده از مقادیر رادیوایزوتوپ‌های گامازا و اکتیویته گزارش شده در نمونه‌گیری از این تانکها (جدول۱) بیانگر آن است که مقدار نرخ دز محاسبه شده بسیار کمتر از حد تعیین شده نرخ دز تجهیزات در خارج از ناحیه تحت کنترل می باشد. مطابق استاندارد

INRA [۸] حد دز سالانه پرسنل mSv ۲۰ می‌باشد. با توجه به مقدار دز دریافتی محاسبه شده فرد در حادثه نشت از تانک‌های TD با احتساب شرایط محافظه کارانه، مقدار دز محاسبه شده کمتر از حد تعیین شده می‌باشد. در حادثه وارد شدن آب تریتیوم دار به محوطه سایت، ارزیابی اثرات رادیولوژیکی بر مردم از مسیر هوا نشان می دهد که دز موثر جمعیت ساکن اطراف نیروگاه با احتساب شرایط محافظه کارانه، ۰/۰۱۷ درصد حد مجاز سالانه جمعیت عادی مطابق استاندارد INRA می باشد که بطور قابل توجهی کمتر ازحد تعیین شده است. لازم بذکر است مقادیر دز دریافتی با فرض بدترین شرایط محاسبه گردیده است و در حالت رخداد حادثه، مقادیر دز دریافتی پرسنل و جمعیت ساکن اطراف نیروگاه همواره کمتر از مقادیر محاسبه شده خواهند بود. نتایج ارزیابی های صورت گرفته بیانگر این است که نصب تانکهای حاوی آب دیستیلات سیستم TD در خارج از ساختمان و ناحیه تحت کنترل از نقطه نظر حفاظت در برابر اشعه بلامانع می باشد.

**جدول شماره ۲- دز موثر کل (Total Effective Dose) جمعیت بحرانی اطراف نیروگاه بوشهر**

| Distance Km | T E D Total Effective Dose (Sv) | Respirable Time-Integrated Air Concentration (Bq-sec)/m³ | Arrival Time (hour:min) |
|---|---|---|---|
| 0.400 | 1.7E-06 | 1.5E+08 | 00:05 |
| 0.500 | 1.5E-06 | 1.3E+08 | 00:06 |
| 0.600 | 1.3E-06 | 1.2E+08 | 00:07 |
| 0.700 | 1.2E-06 | 1.1E+08 | 00:08 |
| 0.800 | 1.1E-06 | 9.6E+07 | 00:09 |
| 0.900 | 1.0E-06 | 8.8E+07 | 00:11 |
| 1.000 | 9.3E-07 | 8.1E+07 | 00:12 |
| 2.000 | 5.2E-07 | 4.5E+07 | 00:24 |
| 4.000 | 2.6E-07 | 2.2E+07 | 00:49 |
| 6.000 | 1.7E-07 | 1.4E+07 | 01:14 |
| 8.000 | 1.2E-07 | 1.0E+07 | 01:39 |
| 10.000 | 9.4E-08 | 8.2E+06 | 02:04 |

**شکل شماره۳- کانتور دز موثرکل (Total Effective Dose)دریافتی جمعیت اطراف**

## مراجع:

[1] MCNPX User's Manual, Version 2.6.0, LA-CP-07-1473 2008.
[2] Atomic Energy Organization of Iran (AEOI),"Nuclear Power Plant Division, NPP Bushehr, Unit 1, Final Safety Analysis Report", Chapter 12, Rev1, May 2008.
[3] 14. BU. 1 ZC. 0. TM. OK. RDR002-5, DRAWING, NUCLEAR POWER PLANT "BUSHEHR" UNIT 1.
[4] Atomic Energy Organization of Iran (AEOI),"Nuclear Power Plant Division, NPP Bushehr, Unit 1, Final Safety Analysis Report", Chapter11, Rev1, May 2008.
[5] JANIS 3.2 User's guide, 7th, June 2010.
[6] Regulation of the Russian Federation, , "2.6.1 Ionizing Radiation, Radiation Safety", Norms Of Radiation Safety (NRB-96), Moscow, 1966.
[7] Assessment of Radionuclide Dispersion From Bushehr Nuclear Power Plant Stack During Normal and Accident Conditions And Its Effect on Population, Ahmad Pirouzmand, Peyman Dehghani, Kamal Hadad,. Conference on Nuclear Resources, Antalya, TURKEY, 26-29. 2014.
[8] Radiation protection for Bushehr nuclear power plant (BNPP-1), 1999.

[9] W. S. Synder, M. J. Cook, E. S. Nasset, L. R. Karhausen, G. Parry Howells, I. H. Tipton, "Report of the Task Group on Reference Man ICRP PUBLICATION 23", 1974, Page 346.
[10] 12.BU2.0120.0.0.ES.DD0017, Technical report, BUSHEHR-2 NPP UNITS 2, 3

**توضیحات:**

باتشکر از نقطه نظرات ارائه شده موارد زیر جهت توضیحات در این خصوص ارائه می گردند.

این طرح شامل طراحی اصلی نیروگاه نمی باشد لذا ارزیابی های رویداد و حوادث مرتبط با آن از سوی پیمانکار روس انجام نشده است. در بخش مقدمه افزوده گردید که این طرح پیشنهاد *سازمان بهره‌بردار نیروگاه اتمی بوشهر* بوده است.

۱- بازنگری در نسخه دوم مقاله از نقطه نظر قواعد نگارشی انجام گردید.

۲- باتوجه به اینکه اغلب منابع مورد استفاده در مقاله، مدارک نیروگاه می باشند مقادیر و فرضیات در متن به این منابع ارجاع داده شده است.

۳- محاسبات برای دو حالت پرتوگیری پرسنل و جمعیت ساکن ( گروه بحرانی) انجام شده است. در محاسبات و ورودی برنامه ارتفاع تنفس و حجم هوای تنفس شده مطابق استاندارد ICRP 23 برای انسان مرجع اعمال شده است. برای سرعت باد و کلاس پایداری جوی مطابق توصیه آژانس و فرضیات ارزیابی رادیولوژیکی در حوادث BDBA از مدرک FSAR استفاده گردیده است. در بخش ۲-۳-۱ اطلاعات از جمله مدت زمان بخار شدن تریتیم ( معادل زمان نشت آلودگی)، سرعت باد، ارتفاع چشمه فرضی، استاندارد جهت ضریب تبدیل دز ، نرخ تنفس و فاصله نزدیکترین جمعیت به چشمه اضافه گردیده است. همچنین *تعریف سیستم TD در بخش چکیده و* مراجع شماره ۹ و ۱۰ به مقاله اضافه گردید.

۴- انتشار تریتیوم یک از مدلهای(گوسین) پیش فرض برنامه HotSpot می باشد که در آن می توان چشمه سطحی تعریف نمود. در این برنامه چشمه سطحی با ابعاد $155\ m \times 155\ m$ و عمق $0{,}01m$در نظر گرفته شده است و در واقع شکل شماره ۳ خروجی برنامه می باشد. نمایش چشمه سطحی بر روی کانتور به علت مقیاس بندی نقشه هوایی، درنظر گرفته نشده است.

۵- در نسخه جدید عنوان بخش ۲-۳-۱ به سناریو حادثه و شبیه سازی تغییر داده شد. در این بخش مفروضات تکمیلی در ویرایش جدید ارائه گردیده است. با توجه به حجم کار و محدودیت ارائه مطالب درمقاله، در برخی موارد مقادیر و مفروضات تا حد ممکن مرجع دهی شده است.