

ПРОЦЕНА РИЗИКА НА ЗДРАВЉЕ ЉУДИ ПРИ АЕРОЗАГАЂЕЊУ ИЗ ТАЧКАСТИХ СТАЦИОНАРНИХ ИЗВОРА

Јелена Ламовец¹, Стево Јаћимовски², Дане Субошић³, Горан Јованов⁴

Резиме: Под загађењем ваздуха подразумевамо присуство одређене концентрације гасовитих и честичних загађивача у атмосфери. Стационарним и тачкастим извором загађења ваздуха називамо непокретан извор емисије загађивача, као што је, на пример, индустријско постројење. Брзина ширења загађења из тачкастог извора је одлучујући параметар када говоримо о утицају загађења на људско здравље. Коришћењем Гаусовог модела за дистрибуцију аерозагађења може се за одређене нивое концентрације и типове аерозагађивача одредити ризик по здравље људи у захваћеном простору. За процену ризика се користи тзв. пробит функција. Брза процена ризика омогућава адекватно реаговање надлежних органа како би се спречио негативан утицај аерозагађења на здравље људи.

Кључне речи: аерозагађење, Гаусов модел, ризик, пробит функција

HUMAN HEALTH RISK ASSESMENT DUE TO AIR POLLUTION FROM STATIONARY POINT SOURCES

Abstract: By air pollution we mean the presence of a certain concentration of gaseous and particulate pollutants in the atmosphere. Stationary and point source of air pollution is a stationary source of emissions of pollutants, such as, for example, an industrial plant. The speed of the spread of pollution from a point source is a decisive parameter when we talk about the impact of pollution on human health. Using the Gaussian model for the distribution of air pollution, the risk to human health in the affected area can be determined for certain levels of concentration and types of air pollutants. For risk assessment, the so-called probit function is used. Rapid risk assessment enables adequate response of the competent authorities in order to prevent the negative impact of air pollution on human health.

Key words: air pollution, Gaussian model, risk, probit function

1. УВОД

Процена токсиколошког ризика је прикупљање информација о токсичним ефектима опасних материја ради утврђивања могућих опасности повезаних са изложеношћу њима. Излагање одређеној опасној супстанци може да се деси на следеће начине: гутањем, контакт са кожом, очима и слузокожом, као и удисањем. Процес процене ризика састоји се из четири основне фазе: 1) идентификација опасности, 2) процена опасности или процена дозе - одговора, 3) процена изложености и 4) карактеризација ризика [1].

Изложеност значи контакт на граници између човјека и животне средине са одређеним загађивачем у одређеном временском периоду. За излагање токсичним супстанцама карактеришу три битне димензије: 1) рута, 2) трајање и 3) фреквенција. Процена изложености има две основне функције: 1) идентификација популације погођене деловањем штетне супстанце и 2) израчунавање количину, учесталост, дужину времена и пут излагања штетној супстанци [2].

Под опасним материјама се најчешће подразумевају материје (једињења) природног или вештачког порекла, способне да штетно утичу на здравље људи и природну средину. Ове супстанце могу имати не само хемијску, већ и биолошку природу.

¹ доцент др, Криминалистичко -полицијски универзитет Београд, Цара Душана 196 Земун, jelena.lamovec@kpu.edu.rs

² проф. др, Криминалистичко -полицијски универзитет Београд, Цара Душана 196 Земун, stevo.jacimovski@kpu.edu.rs

³ проф. др, Криминалистичко -полицијски универзитет Београд, Цара Душана 196 Земун, dane.subosic@kpu.edu.rs

⁴ проф др, Криминалистичко -полицијски универзитет Београд, Цара Душана 196 Земун, goran.jovanov@kpu.edu.rs

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференције напредне технологије у функцији развоја привреде, Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године

У случају хаварија на хемијски опасним објектима, људи су у највећем броју случајева повређени услед продирања опасних хемикалија у тело, углавном удисањем.

Тренутно је познато више од 54 хиљаде хемијских једињења која се могу класификовати као отрови због своје способности да изазову акутну и хроничну интоксикацију. Међутим, само мали део њих може проузроковати штету по здравље људима на нивоу прага токсодозе.

Прихваћено је да се као квантитативна мера токсичности опасних хемикалија користе вредности њихових концентрација и доза супстанце. Штавише, најчешће се користе такве карактеристике као што су гранична концентрација, граница толеранције, смртоносна концентрација, вредности токсичних доза које одговарају одређеном ефекту оштећења.

Токсична доза (токсодоза) се изражава као количина супстанце која изазива одређени токсични ефекат. Приликом анализе и оцењивања хемијске ситуације која настаје при дистрибуцији опасних хемикалија у животној средини, уобичајено је да се вредност токсодозе одређује као производ просечне концентрације опасних хемикалија у ваздуху током боравка у контаминираној атмосфери – у случају код инхалационих оштећења ткива (лезија) или као маса течних или чврстих опасних хемикалија, нанесених на кожу особе - за случај кожно - ресорптивних лезија.

Под прагом се подразумева минимална концентрација при којој се јавља опипљиви физиолошки ефекат и примећују се први знаци нарушења здравља.

Граница толеранције је концентрација коју особа може да издржи одређено време, а да не доживи трајно нарушење здравља. Аналогија за границу толеранције је максимално дозвољена концентрација.

Треба напоменути да су, према степену утицаја на људско тело, опасне материје су подељене у неколико класа опасности: 1 - изузетно опасне; 2 - веома опасне; 3 - умерено опасне; 4 - слабо-опасне.

Опште је прихваћено да у најопасније (екстремно и високо токсичне) хемикалије спадају:

- нека једињења метала (органиски и неорганиски деривати арсена, живе, кадмијума, олова, талијума, цинка и др.);
- карбонили метала (никл тетракарбонил, гвожђе пентакарбонил);
- супстанце које садрже цијано групу (цијановодонична киселина и њене соли, бензалдехид цијанохидрин, нитрили, органиски изоцијанати);
- једињења фосфора (органофосфорна једињења, фосфор хлорид, фосфор оксихлорид, фосфин, фосфидин);
- органофлуорна једињења (флуоросирћетна киселина и њени естри, флуороетанол и др.);
- хлорохидрини (етилен хлорохидрин, епихлорохидрин);
- халогени (хлор, бром);
- друга једињења (етилен оксид, алил алкохол, метил бромид, фосген).

Високо токсичне хемикалије укључују:

- минералне и органске киселине (сумпорна, азотна, фосфорна, сирћетна и др.);
- алкалије (амонијак, сода креч, каустична поташа итд.);
- једињења сумпора (диметилсулфат, растворљиви сулфиди, сумпор-угљеник, растворљиви тиоцијанати, сумпор хлорид и флуорид);
- деривати угљоводоника супституисани хлором и бромом (метилхлорид и бромид);
- неки алкохоли и алдехиди киселина;
- органска и неорганиска нитро- и аминок једињења (хидроксиламин, хидразин, анилин, толуидин, амил нитрит, нитробензол, нитротолуен, динитрофенол);
- феноли, крезол и њихови деривати;
- хетероциклична једињења.

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференција напредне технологије у функцији развоја привреде, Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године

Значајан део горе наведених супстанци може изазвати тешке повреде људи у случају хаварија у објектима у којима се складиште и користе у техничким процесима.

Деловање отрова условљено је његовом концентрацијом и дужином трајања дејства. Прецизније, деловање токсичних опасних материја на живе организме у највећој мери зависи од следећих променљивих [3]:

- физичко-хемијске и токсиколошке особине,
- величина (димензије) честица,
- концентрација,
- експозиција иначин уласка у организам.

2. АЕРОДИСТИБУЦИЈА ОПАСНИХ ХЕМИЈСКИХ МАТЕРИЈА (ОХМ)

Под дисперзијом подразумевамо транспорт полутаната у атмосфери, који настаје услед природних процеса, као што су хемијске реакције, ресуспензија (подизање тла након таложења), таложење (суво и влажно), адвекција и дифузија. Осим претходно поменутих процеса, на дисперзију аерополутаната утичу степен стабилности атмосфере као и њена турбулентна структура. Извор настанка турбуленције у атмосфери јесте интеракција ветра са површином земље и постојање вертикалних струјања ваздуха, условљених разликом температура ваздуха и температуре загрејане површине земље или мора.

Обично у атмосфери постоје турбуленције (вртлози) различитих облика и димензија, који се крећу хаотично интерагујући међу собом и са неправилностима земљине површине, при чему се распадају на мање или образују крупније турбулентне структуре.

У теорији атмосферске дифузије (турбулентна и конвективна) основни проблем је у налажењу законитости расејања примеса у околну средину и налажењу локалне концентрације полутаната, у зависности од растојања од извора емитовања. Модели дисперзије ваздуха се користе за процену концентрације загађујућих материја, које се емитују низ ветар из различитих извора загађења. Један од најчешће коришћених модела за процену дистрибуције опасних материја је Гаусов модел.

Према Гаусовом моделу концентрација хемијски опасних материја се може одредити на следећи начин [4]:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{\left(\frac{8}{3}\pi R^3 + (2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z\right)} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left\{ \exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \quad (1)$$

Овде је Q снага извора дата, тј. маса емитоване опасне хемијске материје у форми гаса изражена у kg , R - полупречник првобитног облака емитованог гаса, u - брзина ветра, t - време ширења гаса опасних материја, h - висина на којој се налази извор емисије опасних материја, а σ_x , σ_y , σ_z коефицијенти дисперзије који карактеришу стабилност атмосфере.

Најважнија карактеристика је максимална доза концентрације на оси перјанице гасног облака дуж правца у коме дува ветар

$$C_{\max}\left(x, 0, 0, \frac{x}{u}\right) = \frac{2Q}{\left(\frac{8}{3}\pi R^3 + (2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z\right)} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (2)$$

Максимална доза токсичних материја коју неко апсорбује у тачки са координатама $M(x, 0, 0)$ за време док је изложен њима (време експозиције) се израчунава као:

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференције напредне технологије у функцији развоја привреде,
Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године

$$D_{\max}(x, 0, 0) = \frac{2Q(2\pi)^{1/2}}{u \left(\frac{8}{3} \pi R^3 + (2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z \right)} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad [\text{kg} \times \text{s}/\text{m}^3] \quad (3)$$

На дистрибуцију опасне хемијске материје кроз атмосферу највише утицаја има ветар, стабилност атмосфере и особине терена преко кога се шире аерозагађивачи у смислу његове рељефности. Стабилност атмосфере се дефинише Пасквиловим класама стабилности од А-Ф [], а рељефност утиче на брзину ветра и турбуленцију [5].

$$\sigma_x = \frac{C_3 x}{\sqrt{1+0,0001x}}; \quad \sigma_y = \sigma_x \frac{220,6 + \frac{x}{u}}{220,6 + 600}; \quad \sigma_z = \ln[C_1 x^{D_1} (1 + C_2 x^{D_2})] \frac{A_1 x^{B_1}}{1 + A_2 x^{B_2}} \quad (4)$$

Коефицијент σ_z се одређује на овај начин ако је одступање рељефа од равни Земље $z_0 \geq 0, 1 \text{ m}$ $z_0 \geq 0 \text{ m}$

Ако је атмосфера изотермна онда су емпиријски коефицијенти у коефицијентима дисперзије следећи

Табела 1 - Вредност емпиријских коефицијената за одређивање коефицијената дисперзије у зависности од класа стабилности атмосфере

Класа стабилности	A_1	A_2	B_1	B_2	C_3
Изотермна	0,098	0,000135	0,889	0,688	0,08

Табела 2 - Вредност емпиријских коефицијената за одређивање коефицијената дисперзије у зависности од рељефности терена

$Z_0, \text{ cm}$	C_1	C_2	D_1	D_2
1	1,56	0,000625	0,048	0,045

Ради добијања ваљаних резултата и ради верификације модела морамо, осим метеоролошких услова, узети у обзир сценарио настанка хаварије услед које је дошло до дистрибуције опасне хемијске материје у атмосферу, као и механизме истицања ОХМ.

3. ИЛУСТРАТИВНИ ПРИМЕР

Суд садржи хлор масе 1 тоне у облику гаса (Cl_2) на температури 6°C и притиску од 1 atm. Суд се налази на равном терену, чија је рељефност 0,001 m, долази до експлозије суда у којој се тренутно ослобађа сав хлор. Брзина ветра је 8,5 m/s, и све се дешава у току дана.

Одредити концентрацију хлора у атмосфери, дужину зоне контаминације у којо људи могу смртно страдати на отвореном простору.

$$\begin{aligned} Q &= 1 \text{ t} = 1000 \text{ kg}; \\ t &= 6^\circ\text{C} = 279,15^\circ\text{K} \\ \mu &= 70,19 \text{ g/mol} \quad (\text{Cl}_2) \\ p &= 105623 \text{ Pa} \\ \Delta z &= 0,001 \text{ m} \\ u &= 8,5 \text{ m/s} \\ R_0 &= 8,31 \text{ J/mol K} \end{aligned} \quad (5)$$

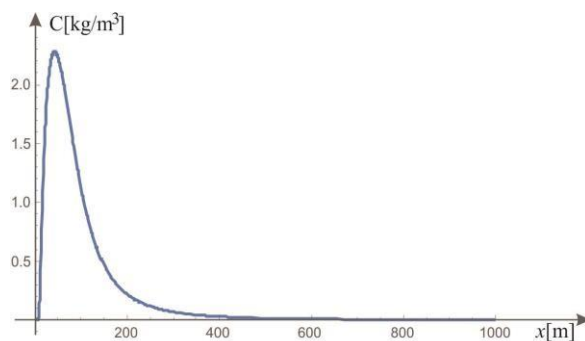
Према подацима и одговарајућим релацијама добијамо следеће резултате:

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференција напредне технологије у функцији развоја привреде, Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године

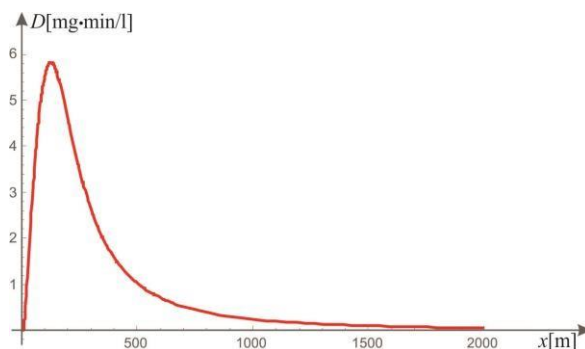
$$\rho = \frac{Q}{V} = \frac{\mu}{R_0 T + 273,15} \frac{Vp}{R} = 312,9 \text{ m}^3; \quad R = \sqrt[3]{\frac{3 Q}{4\pi \rho}} = 4,21 \text{ m} \quad (6)$$

Коришћењем података из табеле 1 и табеле 2, налазимо према формули (2) расподелу концентрације хлора чији графички приказ је дат на слици 1:



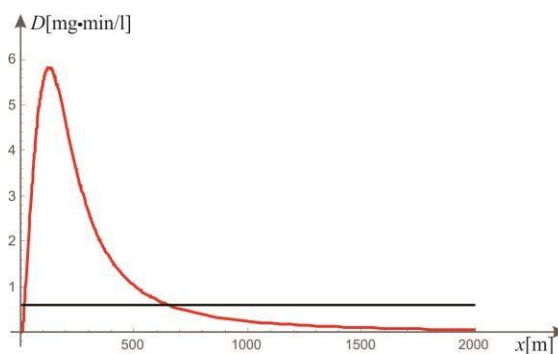
Слика 1 – Дистрибуција максималне концентрације ОХМ

Расподелу токсичне дозе добијамо из формуле (3) и њен графички приказ је дат на слици 2.



Слика 2 - Дистрибуција максималне токсичне дозе ОХМ

Праг токсичне дозе за хлор износи 0,6 mg min/l. Са слике 3 одређујемо зону угрожености дуж правца по коме дува ветар [6]:



Слика 3 - Одређивање зоне прага токсидозе

Зона у којој су људи изложени прагу токсичне дозе је од $x_1 = 19 \text{ m}$ до $x_2 = 652 \text{ m}$.

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференције напредне технологије у функцији развоја привреде,
Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године

Смртоносна токсична доза за хлор је 6 mg min/l и он се протеже до 136 m. Обе зоне су дуж правца по коме дува ветар.

4. ПРОЦЕНА УГРОЖЕНОСТИ СТАНОВНИШТВА

Обично су у специјализованој медицинској литератури за карактеристике акутног инхалационог дејства гасовитих токсичних супстанци, дате вредности концентрације, које изазивају 50% оштећења код људи када су изложени неко време „t“ (LCT50). Ова карактеристика у суштини одређује интегралну меру токсиканата, која када се прими може да изазове смртни исход код 50% испитаника у групи.

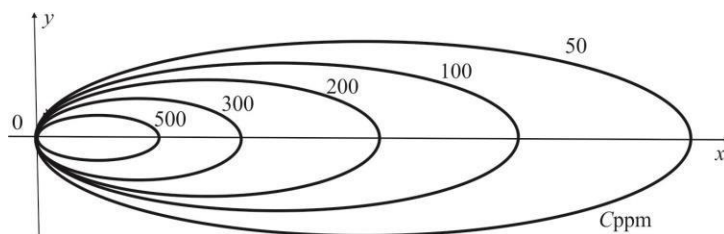
Познавање пробит функције у тачки $Pr(x,y)$ нам омогућава да одредимо вероватноћу (степен) оштећења у датој тачки преко Гаусовог интеграла [7].

$$P(\%) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr} e^{-\frac{(t-s)^2}{2}} dt \quad (7)$$

За хлор пробит функција је облика, где је концентрација одређена у јединцама C_{ppm} .

$$\begin{aligned} Pr &= a + b \ln(C^n \tau) \\ a &= -8,29 \quad b = 0,92 \quad n = 2 \\ C_{ppm} &= 62630 \frac{C_{mg}}{1} \frac{(273,15 + t)}{\mu p} \end{aligned} \quad (8)$$

Зоне угрожености су дате као на слици 4.



Слика 4 - Зоне са различитим концентрацијама ОХМ

За сваку од зона се израчунава концентрација хлора у јединицама $C_{mg/l}$ за време експозиције од 30 min, пробит функција и вероватноћа угрожености становништва у датој зони.

Резултати су дати у табели 3.

Табела 3 - Преглед процене угрожености становништва изложеног ОХМ у зависности од концентрације ОХМ

Концентрација C_{ppm}	Концентрација $C_{mg/l}$	Вероватноћа страдања %
50	0,71	0,15
100	1,42	4,50
200	2,84	34,02
300	4,26	63,08
400	5,68	80,60
500	7,61	89,87

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференција напредне технологије у функцији развоја привреде, Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године

5. ЗАКЉУЧАК

Хемијски акциденти су вероватно најопаснији од свих акцидената. Не могу се унапред предвидети, а могу да буду са веома тешким последицама. Зато је неопходно анализирати сва места у технолошком процесу производње, транспорту и технолошком процесу експлоатације и на основу анализа радити на превенцији. Превенција може да смањи последице, али ризик од настанка удеса увек постоји.

Методе математичког моделовања дају могућност обједињавања узрока и последица загађења атмосфере, тј. емисије полутаната у атмосферу и нивоа њене загађености. Моделовање загађености атмосфере има улогу повратне везе између мониторинга квалитета атмосферског ваздуха и броја и распореда извора загађења.

Дисперزيونи модели користе се за проучавање ефеката различитих извора на квалитет ваздуха, као и за могућу прогнозу концентрација загађивача. Потешкоће у моделовању дисперзије загађивача су нарочито изражене због непознавања сложених турбулентних процеса код аерозагађења. Међутим, коришћењем одређених претпоставки и апроксимација, добијена решења одговарају посматраним појавама. На основу њих се може наћи дистрибуција концентрације ОХМ као и дистрибуција токсичне дозе. Ако знамо граничне вредности концентрације за одговарајућу ОХМ, и дистрибуцију токсичне дозе за одговарајуће време може се одредити зона угрожености становништва.

Процена величине ризика за здравље људи у области захваћеној ОХМ се може извршити помоћу тзв. пробит функције. Облик ове функције је емпиријски одређен за различите врсте ОХМ и на основу времена експозиције становништва дејству ОХМ, помоћу Гаусовог интеграла се може једноставно одредити вероватноћа угрожености здравља становништва у посматраној области.

У раду је учињен покушај примене математичког моделовања ширења ОХМ услед акцидента, као и предикција величине захваћених зона и вероватноће да ће становништво изложено дејству ОХМ бити животно угрожено. Јасно је да се ови модели могу користити уколико су познати параметри који утичу на дистрибуцију ОХМ. Када до акцидента већ дође, потребно је веома брзо реаговати. Брзина је кључни фактор у евакуацији, мониторингу и санацији. У том смислу је неопходно интегрисати метеоролошке податке, податке које даје географско-информациони систем (ГИС) и софтверски пакет за моделовање дистрибуције ОХМ. Ово би био могући правац даљих истраживања у овој области.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Макајић Николић, Д.: *Управљање ризиком*, ауторизована презентација. Факултет организационих наука, Лабораторија за операциона истраживања „Јован Петрић“, Београд, 2018, доступно на <http://pa.fon.bg.ac.rs/wp-content/uploads/2018/02/Upravljanjerizikom20171.pdf> 08.05.2022.
- [2] Introduction to Risk Assessment, <https://www.atsdr.cdc.gov/training/toxmanual/pdf/powerpoint-module-3.pdf> 08.05.2022.
- [3] Гроздановић, Д.; Стојиљковић, Е.: *Методe проценe ризика*, Факултет заштите на раду. Ниш, 2013.
- [4] Едигаров, А. С.: Метод расчета зоны поражения при аварийных выбросах токсичного газа. - *Российский химический журнал*, 1995, т.39, №2, с.94-100.
- [5] Бызова, Н. Л.; Гаргер, Е. К.; Иванов, В. Н.: *Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси* - Л.: Гидрометеиздат, 1991, 278 с.
- [6] Тимофеева, С. С.: *Методы и технологии оценки аварийных рисков*, Издательство Иркутского государственного технического университета, 2015.
- [7] Шаптала, В. Г.; Радоуцкий, В. Ю.; Шаптала, В. В.: *Основы моделирования чрезвычайных ситуаций*, ФАО, Белгород, 2010.