## 1. TURINYS

AKR	ONIM	AI IR SANTRUMPOS	2				
TERI	MINAI	IR APIBRĖŽIMAI	3				
2.	ĮVAD	AS	4				
3.	BRA	NDUOLINIŲ AVARIJŲ ANALIZĖ	7				
4.	RADIOLOGINIU AVARIJU ANALIZĖ						
	4.1.	Lėktuvo smūgio mechaninio poveikio analizė	12				
	4.2.	Gaisro analizė	25				
		4.2.1. Pirmoji gaisro fazė: Lėktuvo kuro degimas	27				
		4.2.2. Antrasis gaisro etapas: Kietasis gaisras	35				
	4.3.	Radioaktyviųjų medžiagų išmetimo įvertinimas	42				
	4.4.	Radiologinių padarinių vertinimas	49				
		4.4.1. Ankstyvoji avarijos fazė	55				
		4.4.2. Vėlyvoji avarijos fazė	66				
5.	AVA	RIJOS RADIOLOGINIŲ PADARINIŲ VERTINIMO REZULTATAI	72				
	5.1.	Radiologinių pasekmių vertinimo scenarijų apibrėžimas	72				
	5.2.	Radionuklidų integrinio tūrinio aktyvumo ore bei iškritų tankio erdvinio pasiskirstymo vertinimo programa PC COSYMA 2 rezultatai	79				
	5.3.	Išorinės apšvitos dozių šalia liepsnos/dūmų stulpo vertinimo programa MicroShield 7 rezultatai	81				
	5.4.	Žmonių kritinių grupių vidinės apšvitos dėl įkvėptųjų ir prarytųjų radionuklidų bei išorinės apšvitos nuo iškritų dozių vertinimo programa PC COSYMA 2 rezultatai.	84				
	5.5.	Gyventojų vidinės apšvitos dozių dėl gruntinio vandens (šulinio) taršos scenarijaus vertinimo programa RESRAD-OFFSITE rezultatai	87				
	5.6.	Programos PC COSYMA 2 skaičiavimų verifikacija panaudojant AvarDose programą	91				
	5.7.	Radiologinių padarinių vertinimo rezultatų apibendrinimas ir išvados	92				
6.	IŠVA	DOS	95				
7.	NUO	RODOS	97				

## AKRONIMAI IR SANTRUMPOS

APSK	-	Atmosferos Paskvilio stabilumo klasė
GDĮ	_	Gaisro dinaminiai įrankiai
KRA	_	Kietosios RA
MRAS	_	Maišiagalos radioaktyviųjų atliekų saugykla
NRC	_	Nuclear Regulatory Commission (JAV Branduolinio reguliavimo komisija)
PUŠ	_	Panaudoti uždarieji šaltiniai
RA	_	Radioaktyviosios atliekos
SAZ	_	Sanitarinė apsaugos zona
SSC	_	Konstrukcijos, sistemos ir komponentai (angl. santrumpa)
TATENA	_	Tarptautinė atominės energetikos agentūra
VATESI	_	Valstybinė atominės energetikos saugos inspekcija

## TERMINAI IR APIBRĖŽIMAI

Analizė	-	Avarijų analizė
Avarijos	_	Branduolinės ir radiologinės avarijos
Baseinas	_	Teritorija, kurioje vyksta medžiagų degimas
Kesonas	_	Aplink rūsį įrengtas ir rūsį dengiantis uždaras lengvų konstrukcijų įrenginys
Kietasis gaisras	_	Degių kietųjų medžiagų degimas rūsyje
Resuspensija	_	Radioaktyviųjų medžiagų sulaikymas ir pavėlintas išmetimas
Rūsys	_	Atviras MRAS rūsys
Scenarijus	_	Avarijos plėtros scenarijus
Skystasis gaisras	_	Išsiliejusio į rūsį lėktuvo kuro degimas
Tiesioginis išmetimas	_	Radioaktyviųjų medžiagų išmetimas iškart po avarijos

### 2. ĮVADAS

Šio dokumento tikslas pateikti galimų branduolinių ir radiologinių avarijų Maišiagalos radioaktyviųjų atliekų saugykloje (toliau – MRAS) padarinių dėl didelio lėktuvo su pilnu kuro baku kritimo į atidengtą MRAS rūsį radioaktyviųjų atliekų išėmimo metu 2020 m. sausio 1 d.

Galimų branduolinių ir radiologinių avarijų MRAS padarinių analizės paslaugų pirkimo techninėje specifikacijoje [1] nurodyta, kad:

- Analizė turi būti atlikta MRAS įvykus postuluotam pradiniam įvykiui, lėktuvo sudužimui su po to kylančiu gaisru;
- Daroma prielaida, kad didžiausia lėktuvo kilimo masė yra 80 tonų, jame yra 27000 litrų aviacinio kuro, ir jis 120 m/s greičiu krenta į MRAS atidengtą rūsį, kurį uždengia kesonas, ir iš kurio dar nėra išimtos jokios radioaktyviosios atliekos. Dėl išsiliejusio aviacinio kuro rūsyje ir kesone įvyksta gaisras;
- Daroma prielaida, kad vykdant MRAS eksploatavimo nutraukimo darbus MRAS rūsys yra atidengtas, vyksta radioaktyviųjų atliekų išėmimo pradžia (kuomet visos radioaktyviosios atliekos dar yra neišimtos iš rūsio), aplink rūsį įrengtas ir rūsį dengia kesonas. Kesono viduje sumontuota radioaktyviųjų atliekų išėmimo iš rūsio įranga. Radioaktyviųjų atliekų cheminės ir fizinės savybės aptartos MRAS galutiniame eksploatavimo nutraukimo plane. MRAS rūsyje saugomas radioaktyviųjų atliekų kiekis ir saugyklos būsena turi atitikti 2020-01-01 prognozuojama būseną. Dėl išsiliejusio aviacinio kuro MRAS rūsyje ir kesone įvyksta gaisras. Kiti lėktuvo sudužimo poveikio vertinimui taikomi parametrai ir prielaidos (pvz., lėktuvo sudužimo vieta MRAS aikštelėje, kritimo kampas, MRAS rūsio pažeidimo mastas, gaisro charakteristikos) turi būti pagrįstai pasirinkti konservatyviai arba nustatyti analizės metu;
- Analizės apimtyje turi būti nustatyti avarijų metu išmetamų į aplinką radionuklidų kiekiai (aktyvumai) bei sudėtis (radionuklidų išmetimų charakteristikos);
- Atliekant analizę turi būti aprašyti avarijų vystymosi scenarijai bei metodika, pagal kurią bus nustatomas avarijų mastas, jų įvertinimo apimtys ir sąlygos;
- Kiekvienam nagrinėjamam scenarijui turi būti nustatytos tokios radionuklidų išmetimų charakteristikos:
  - radionuklidų kiekis (aktyvumai) ir sudėtis (fizinė-cheminė būsena);
  - išmetimo energija;
  - išmetimo aukštis;

- ✤ išmetimo laikas, trukmė ir (ar) sparta.
- Analizės apimtyje, atsižvelgiant j MRAS būseną eksploatavimo nutraukimo metu, turi būti atliktas avarijos metu j aplinką išmestų radionuklidų sklaidos vertinimas, nustatytos radiologinio užterštumo teritorijos ir įvertinta avarijų nulemta apšvita gyventojams, esantiems už MRAS sanitarinės apsaugos zonos (toliau - SAZ) ribų.
- Vertinant radionuklidų sklaidą aplinkoje, turi būti išnagrinėti du scenarijai:
  - konservatyvus, atitinkantis nepalankiausias meteorologines sąlygas. Šio scenarijaus tikslas įvertinti didžiausią galimą apšvitą gyventojams įvykus avarijai. Nepalankiausios meteorologinės sąlygos turi būti prisirinktos tokios, kad joms esant tam tikru atstumu gaunama blogiausia radiologinė situacija, t. y. įvyksta didžiausia sklaida pagal atstumą ir patiriama didžiausia gyventojų apšvita, dėl kurios gali prireikti taikyti apsaugomuosius veiksmus. Atliekant konservatyvųjį vertinimą, gali būti išnagrinėti keli sklaidos scenarijai;
  - realistinis, atitinkantis vidutines klimatines sąlygas. Šio scenarijaus tikslas įvertinti tikėtiną apšvitą gyventojams įvykus avarijai. Vidutinėmis klimatinėmis sąlygomis reikia laikyti vidutines daugiametes meteorologinių reiškinių ir rodiklių vertes, būdingas vietovei, atsižvelgiant į naujausius esamą situaciją atitinkančius duomenis apie klimatines sąlygas analizuojamoje vietovėje. Atliekant realistinį vertinimą, gali būti išnagrinėti keli sklaidos scenarijai.
- Nustatant radiologinio užterštumo teritorijas ir įvertinant avarijų nulemtą apšvitą gyventojams, turi būti parengti galimo radiologinio užteršimo žemėlapiai (paviršinio aktyvumo žemėlapiai) ir gyventojų apšvitos žemėlapiai (patiriama apšvita nuo debesies, žemės paviršiaus, įkvėpimo ir pan.). Šie žemėlapiai turi būti pagrįsti skaičiavimų lentelėmis su konkrečiomis reikšmėmis priklausomai nuo atstumo iki radionuklidų išmetimo vietos. Šie žemėlapiai ir lentelės turi būti parengti pakankamai detaliai tam, kad būtų galimybė įvertinti gyventojų apšvitą priklausomai nuo atstumo iki radionuklidų išmetimo vietos, dėl kurios gali prireikti taikyti apsaugomuosius veiksmus.

Galimų branduolinių ir radiologinių avarijų MRAS padarinių analizės paslaugų pirkimo techninėje specifikacijoje [1] reikalaujama, kad atliekant analizę privaloma vadovautis šių dokumentų [2-12] aktualiomis redakcijomis.

Dokumente [8] pateikiami nurodymai, kad

"62. Vertinant orlaivio sudužimą, paprastai įvertinami ir tokie dalykai:

62.1. bendra žala paveiktoms konstrukcijoms, įskaitant per dideles konstrukcijos deformacijas ar poslinkius, kurie nebeleidžia jai atlikti savo funkcijos, konstrukcijos suirimas ar sugriuvimas;

62.2. bendrieji skeveldrų padariniai, kurie daugiausia priklauso nuo smūgio taikinio (SSC) dinaminių ir kitokių charakteristikų ir todėl neapsiriboja vien smūgio vieta (pvz., vibracija, konstrukcijos poslinkiai);

62.3. SSC funkcinis suirimas dėl sukeltos vibracijos konstrukcijos elementuose ir su sauga susijusioje įrangoje (visuotiniai poveikiai), ypač kai su sauga susiję objektai yra netoli išorinio statinių perimetro;

62.4. vietinis konstrukcijų pažeidimas dėl skeveldrų smūgio, įskaitant įsiskverbimą, prakiurdymą ir nuskėlimą, dėl kurių konstrukcijos elementas arba su sauga susijusi įranga suardomi pirminiu ar antriniu skeveldrų poveikiu (vietiniai padariniai);

62.5. degalų sukelto gaisro ir galimo sprogimo ant SSC padariniai.

63. Tais atvejais, kai reikia apibrėžti pagrindinį smūgiuojantį objektą (orlaivį) ir antrinius objektus (variklius ir važiuoklę), turi būtinai būti nustatytos šios ir kitos jų charakteristikos:

63.1. nagrinėjamo orlaivio klasė, greitis ir smūgio kampai;

63.2. taikinio konstrukcijų ir orlaivio masė ir standumas (abu parametrai priklauso nuo orlaivio ilgio), konstrukcinių sistemų ar elementų bendrasis plastiškumas arba vietinės deformacijų ribos;

63.3. smūgio zonos dydis ir vieta;

63.4. pasekmės siejant su pavienio smūgio pasekmėmis, pvz., nuolaužos, antrinės skeveldros ar degalų išsipylimas".

### 3. BRANDUOLINIŲ AVARIJŲ ANALIZĖ

MRAS rūsyje patalpintos RA su daliaisiais radionuklidais U-238 ir Pu-239 [13]. Rūsį sudaro 6 atskiros sekcijos (žr. Pav. 1). Jose esančios RA buvo kartą ar du kartus per metus padengiamos betono sluoksniu. Saugyklą uždarant ant suvežtų atliekų užpiltas betono sluoksnis, o likęs tūris užpildytas smėliu [13]. Todėl didžioji RA atliekų dalis, kuri nėra atskiruose konteineriuose, yra tvirtai surišta į gabalus ir atskirta nuo atskirai stovinčių konteinerių. Šių įbetonuotų RA gabalų bei konteinerių su RA savybės branduolinių avarijų analizės požiūriu yra panašios į transportuoti parengtų RA pakuočių savybes. Todėl nagrinėjant branduolinės avarijos galimybę ir siekiant įvertinti, kokie dalieji radionuklidai sudaro daliąsias medžiagas, tikslinga naudoti TATENA reikalavimus radioaktyviųjų medžiagų saugiam vežimui [14].

Nors rūsyje yra RA su daliuoju radionuklidu U-238 (žr. Lentelę 1) [13], tačiau pagal [14] daliosios medžiagos sąvoka neapima neapšvitintų gamtinio urano arba nuskurdinto urano. Todėl laikoma, kad daliąsias medžiagas sudaro tik RA su Pu-239.

Eil. Nr.	Radionuklidas / medžiaga	Masė, kg	Aktyvumas, Bq	Talpa	Patalpinimo vieta rūsyje
1.	U-238 / urano oksidas	3 (4)	3,73E+07	Skardinis konteineris	1 sekcijoje
2.	U-234 <sup>(1)</sup> / pavyzdiniai gradavimo šaltiniai	~1 <sup>(2)</sup>	1,45E+03	Medinė dėžė su kitais pavyzdiniais šaltiniais Pu-239, Sr- 90, Co-60, TI-204 (iš viso 169 šaltiniai)	2 sekcijoje
3.	U-238 / uranilo acetatas	0,17 (4)	2,11E+06	Plastmasinis butelis	2 sekcijoje
4.	U-238 / cementuotos skystos RA	4 <sup>(3)</sup>	3,70E+06	Plastmasinis butelis	3 sekcijoje
5.	Du gama terapiniai Co-60 šaltiniai su nuskurdinto urano biologine apsauga				6 sekcijoje

Lentelė 1. Branduolinės medžiagos su U-238 MRAS rūsyje (aktyvumas 2020-01-01 datai)

<sup>(1)</sup> Tikėtina, kad pildant važtaraštį padaryta klaida. Turėtų būti U-238, o ne U-234.

<sup>(2)</sup> Pateikta pakuotės masė. U-238 medžiagos su 1,45E+03 Bq aktyvumu masė – 0,12 kg.

<sup>(3)</sup> Pateikta pakuotės masė. U-238 medžiagos su 3,70E+06 Bq aktyvumu masė – 0,3 kg.

<sup>(4)</sup> Masė išskaičiuota iš U-238 aktyvumo.

"MRAS rūsyje iš viso yra 398,43 g Pu-239" [13]. "Pu-239 masė yra sukaupta tokiuose objektuose:

- Pu-239/Be neutronų šaltiniuose yra 260,9 g Pu-239 (65,5% visos Pu-239 masės, esančios rūsyje);
- PUŠ su Pu-239 yra 137,4 g Pu-239 (34,5% visos Pu-239 masės, esančios rūsyje);
- KRA rūsio bendrame tūryje tarp atliekų yra 0,13 g Pu-239 (0,03% visos Pu-239 masės, esančios rūsyje).

#### Pu-239/Be neutronų šaltiniai

MRAS rūsyje iš viso yra 8 neutronų šaltiniai, penki jų yra talpose su PUŠ ir trys jų yra bendrame tūryje su kitomis atliekomis. Specialiose talpose:

- 2 sekcijoje esančioje talpoje su PUŠ (10 L) yra patalpintas vienas neutronų šaltinis, kuriame Pu-239 masė yra 0,7 g;
- 3 sekcijoje esančioje talpoje su PUŠ (15 L) yra patalpinti keturi neutronų šaltiniai, kurių bendra Pu-239 masė yra 15,4 g.

Rūsio 3-5 sekcijų bendrame tūryje su kitomis atliekomis yra patalpinti trys neutronų šaltiniai, kuriuose bendra Pu-239 masė yra 244,8 g. Atskiruose neutronų šaltiniuose Pu-239 masė yra atitinkamai 32,9, 0,8 ir 211,1 g<sup>"</sup> [13].

#### "PUŠ su Pu-239

PUŠ su Pu-239 yra patalpinti bendrame tūryje su kitomis atliekomis, tai:

- 378 dūmų detektoriai, bendra Pu-239 masė yra 3,2 g;
- 244 etaloniniuose šaltiniai, bendra Pu-239 masė yra 0,4 g;
- 1714 elektrostatinio krūvio neutralizatorių plokštelių, esančių 62 (tikėtina neišardytuose) neutralizatoriuose. Bendra Pu-239 masė yra 133,8 g<sup>e</sup> [13].

#### KRA rūsio bendrame tūryje tarp atliekų

Vienoje nenustatytoje iš 3-5 sekcijų yra vienas 40 kg masės subetonuotų skystų RA luitas su įvairiais radionuklidais. Pu-239 masė šiame luite yra 0,13 g [13].

Galima išskirti du radioaktyviųjų medžiagų su Pu-239 rūsyje tipus: medžiagos, kuriose santykinai daugiau daliųjų radionuklidų ir jie yra labiau sukoncentruoti (PUŠ, kurie yra savo pakuotėse arba specialiose talpose), ir daliosios medžiagos sumaišytos su kitomis RA.



Pav. 1. MRAS rūsio ir kaupo planas (vaizdas iš šono) [13]

Branduolinės avarijos galimybė analizuojama konservatyviai vertinant galimybę susikoncentruoti daliosioms medžiagoms į nedidelį tūrį ir pasiekti mažiausią galimą Pu-239 kritinę masę. Mažiausia Pu-239 grynos medžiagos kritinė masė, kai nėra kokių nors ypatingų sąlygų jos aplinkoje, o medžiaga yra branduolinei dalijimosi reakcijai vykti palankiausios formos (rutulio formos) yra lygi maždaug 11 kg [15]. Naudojant tinkamus trigerius, neutronų reflektorius, sprogdinant aplinkoje kitą medžiagą, kad šiuo ar kitu būdu Pu-239 būtų sutankintas, galima sumažinti Pu-239 kritinę masę kelis kartus. Pavyzdžiui, Nagasakyje panaudotoje atominėje bomboje buvo 6,4 kg Pu-239 [16]. JAV Energijos departamentas (DOE) laiko, kad minimali Pu-239 kritinė masė yra 4 kg [17]. Kadangi MRAS rūsyje iš viso yra 398,43 g Pu-239 [13], tai lėktuvo kritimo į MRAS rūsį atveju branduolinė dalijimosi reakcija nevyks.

## 4. RADIOLOGINIŲ AVARIJŲ ANALIZĖ

Bendrosios lėktuvo avarijos radiologinio poveikio vertinimo gairės grindžiamos JAV Energijos departamento vadovu DOE-STD-3014-2006 [18]. Šiame vadove pateikiamos taip pat rekomendacijos, kaip įvertinti poveikį, kurį sukelia lėktuvo kritimas į kitokį negu atominė elektrinė pavojingą įrenginį.

Atliekant lėktuvo smūgio į MRAS mechaninio poveikio analizę ir MRAS gaisro analizę, buvo atsižvelgta į VATESI branduolinės saugos reikalavimus [6, 8].

Radiologinių padarinių analizė atlikta vadovaujantis deterministiniu požiūriu į avarijos plėtrą. Tuo tikslu avarijos analizėje išskiriami trys atskirai nagrinėjami etapai:

- Lėktuvo smūgio į rūsį mechaninio poveikio analizė;
- Lėktuvo kuro ir rūsio medžiagų gaisro analizė;
- Avarijos radiologinių padarinių darbuotojams ir gyventojams analizė.

Lėktuvo smūgio į MRAS rūsį mechaninio poveikio analizės tikslas yra nustatyti:

- Ar lėktuvas gali įsiskverbti į rūsį tuo sudarydamas sąlygas išsiliejusiam kurui kontaktuoti su KRA;
- Kokia po lėktuvo smūgio susidaro įduba;
- Kiek lėktuvo kuro gali išsilieti į susidariusią įdubą.

Lėktuvo smūgio į MRAS rūsį mechaninis poveikis priklauso nuo stačiai krentančio lėktuvo sparnų orientacijos atžvilgiu rūsio, rūsio medžiagų ir grunto po rūsiu mechaninių savybių. Siekiant atsižvelgti į krentančio lėktuvo sparnų orientacijos atžvilgiu rūsio poveikį nagrinėjami du kraštutiniai tokios orientacijos atvejai. Dėl duomenų trūkumo rūsio medžiagų mechaninės charakteristikos pasirenkamos konservatyviai. Dėl didelės grunto po rūsiu mechaninių charakteristikų neapibrėžties atliekama jautrumo analizė, kurios tikslas nustatyti kaip grunto mechaninės savybės įtakoja po lėktuvo smūgio susidariusios įdubos gylį.

Tolimesnei analizei pasirenkami du variantai: didžiausias ir suvidurkintas pagal grunto mechanines charakteristikas įdubos gylis. Atsižvelgiant į galimus krentančio lėktuvo sparnų orientacijos atžvilgiu rūsio du variantus ir du įdubos gylio variantus sudaromi keturi išsiliejusio lėktuvo kuro gaisro baseino modeliai.

Lėktuvo kuro ir rūsio medžiagų gaisro analizės tikslas yra nustatyti:

- Šilumos išsiskyrimo galią;
- Liepsnos aukštį;
- Gaisro trukmę.

Gaisre išskiriami du vienas po kito einantys etapai: lėktuvo kuro degimas ir KRA gaisras. Išnagrinėjus keturis išsiliejusio lėktuvo kuro gaisro baseino modelius konservatyviai pasirenkamas tas, kuriame yra mažiausias liepsnos aukštis ir mažiausia gaisro trukmė. Lėktuvo kuro gaisro metu reikšmingų radiologinių išmetimų nesitikima, ir todėl jie nenagrinėjami.

Nežinoma tiksli KRA medžiagų procentinė sudėtis. Todėl nagrinėjamas:

- Konservatyvus KRA gaisro variantas, kuriame degios KRA sudaro 30 % visų KRA ir laikoma, kad visų degių medžiagų yra vienodi kiekiai;
- Artimesnis tikrovei KRA gaisro variantas, kuriame laikoma, kad dega tik mediena, kuri sudaro 10 % viso KRA ir betono mišinio tūrio.

Kadangi nežinomas tikslus KRA išsidėstymas bei dėl lėktuvo smūgio galimas KRA postūmis rūsyje, tai siekiant nustatyti KRA išsidėstymo ir degančių KRA kiekio įtaką nagrinėjami trys gaisro išplitimo MRAS rūsyje variantai:

- Ypatingai konservatyvus variantas, kai dega visos degios KRA, liepsna apima visas KRA visose rūsio sekcijose;
- Šiek tiek mažiau konservatyvus modelis, kai dega visos degios KRA ir liepsna apima visas KRA 1-5 rūsio sekcijose;
- Mažiausiai konservatyvus variantas, kai dega tik 70 % degių KRA ir liepsna apima tik KRA 1-5 rūsio sekcijų paviršiuje (neapima konteinerių rūsio dugne).

Dauguma KRA buvo užlietos cemento skiediniu. Todėl dalis degių KRA sudaro mišinį su betonu. Nežinoma sucementuotų degių KRA dalis. Siekiant įvertinti cementavimo įtaką nagrinėjami du kraštutiniai variantai:

- Gaisrui plisti palankiausias variantas, kai degios KRA sudaro vienalytę plokštę rūsio paviršiuje;
- Gaisrui plisti nepalankiausias variantas, kai degios KRA sumaišytos su betonu sudaro vienalytę plokštę rūsio paviršiuje.

Atsižvelgus į KRA medžiagų procentinės sudėties dviejų variantų, trijų gaisro išplitimo MRAS rūsyje variantų, dviejų KRA ir betono sukibimo variantų kombinacijas gaunama dvylika KRA

gaisro rūsyje modelių. Išnagrinėjus šiuos modelius nustatomas konservatyviausias gaisro modelis (turintis mažiausią liepsnos aukštį). Be to, siekiant gauti tikroviškesnį rezultatą sudaromas modelis, kurio gaisrą apibūdinantys parametrai yra visų dvylikos modelių geometrinis vidurkis. Siekiant parodyti įvairių gaisro sąlygų (gaisro išplitimo rūsyje masto, degių medžiagų savybių) įtaką papildomai sudaromi šeši modeliai, kurie gaunami geometriškai suvidurkinant gaisro parametrus kiekviename iš trijų gaisro išplitimo MRAS rūsyje modelyje nagrinėjamus medžiagų sudėties plokštėje variantus. Pavyzdžiui, apskaičiuojamas ypatingai konservatyvaus modelio, kai dega visų galimų degių medžiagų mišinys plokštėje, ir ypatingai konservatyvaus modelio, kai šios medžiagos dega plokštėje kartu su betonu, gaisro parametrų geometrinis vidurkis.

Analizuojant avarijos radiologinius padarinius darbuotojams ir gyventojams sudaromi modeliai, kuriuose atsižvelgiama į radionuklidų sklaidą ore įtakojančias meteorologines sąlygas. Nagrinėjama kaip vyksta radionuklidų sklaida konservatyviausiame gaisro modelyje, tikroviškiausiame gaisro modelyje ir papildomuose gaisro modeliuose, kai atmosferos stabilumo klasė yra F arba D, kai lyja arba yra giedra.

#### 4.1. Lėktuvo smūgio mechaninio poveikio analizė

Naudojant analitinius metodus atlikta konservatyvi supaprastinta lėktuvo smūgio į MRAS rūsį padarinių mechaninė analizė skirta įvertinti rūsio pažeidimo laipsnį ir iš lėktuvo išsiliejusio skystojo kuro tūrį, kuris yra naudojamas gaisro analizės skaičiavimuose, bei kuro pasiskirstymą rūsio viduje po lėktuvo smūgio. Nagrinėjimo metu konservatyviai laikoma, kad kesono nėra, nes pralauždamas lengvų konstrukcijų įrenginį lėktuvas praras nedidelį judesio kiekį, o pats kesonas skils į dalis.

Sudarant lėktuvo smūgio į MRAS rūsį padarinių mechaninės analizės modelį naudojamos tokios prielaidos apie MRAS rūsio konstrukciją:

- Kadangi RA yra sudarytos iš įvairių medžiagų, turinčių skirtingas mechanines savybes, kurios nevienalytiškai pasiskirsčiusios MRAS rūsyje, tai neįmanoma sudaryti modelį, kuris tiksliai atitiktų RA mechanines savybes (stiprį, tankį). Konservatyviai vertinant, laikoma, kad yra KRA, pagal būseną atitinkančios C8/10 klasės betonui pagal LST EN 206-1:2013, kurio tankis mažas (2300 kg / m<sup>3</sup>) ir mažas stipris (*f*<sub>c</sub> = 10 MPa);
- Kaupas ir perdengimo plokštės yra nuimti;
- Sienos laikomos betono masės, kuri yra MRAS rūsyje, dalimi (*f*<sub>c</sub> = 10 MPa).

Kadangi nėra pakankamai duomenų apie grunto savybes, tai atliktas jautrumo tyrimas siekiant kiekybiškai įvertinti grunto nusėdimą po smūgio. Grunto elastingumo modulis keičiamas nuo 10 MPa iki 100 MPa.

Kadangi nėra duomenų apie krentančių lėktuvų "Airbus 310-200" ir "Boeing 737-800" smūgio į Žemę jėgos priklausomybę nuo laiko, tai nagrinėjama lėktuvo "Boeing 737-800" avarija, kurios modeliavimui reikalinga smūgio į Žemę jėgos priklausomybė nuo laiko konservatyviai įvertinta pasiremiant panašaus lėktuvo "Boeing 707-320" smūgio į Žemę jėgos priklausomybe nuo laiko [19, 20] padarinius. Lentelėje 2 pateikiami pagrindiniai analizei svarbūs lėktuvų Airbus 310-200, Boeing 737-800 ir Boeing 707-320 duomenys [21-23].

Lentelė 2. Lėktuvų "Airbus 310-200", "Boeing 737-800" ir "Boeing 707-320" parametrai

Lėktuvas	Airbus 310-200	Boeing 737-800	Boeing 707-320
Visas ilgis (m)	37,57	39,47	46,61
Sparnų ilgis (m)	34,10	34,12	44,42
Sparnų plotas (m²)	122,6	124,6	283,0
Uodegos aukštis (m)	11,76	12,67	12,85
Fiuzeliažo plotis (m)	3,95	3,76	3,75
Masė be kuro (kg)	62500	62732	86300
Didžiausia nusileidimo masė (kg)	66000	66361	94000
Didžiausia pakilimo masė (kg)	78000	79016	141700
Kuro kiekis (L)	29659	26022	90160

Lėktuvo "Boeing 737-800" smūgio į Žemę jėga ir trukmė gali būti apskaičiuoti panaudojus dokumente [18] pateikiamus proporcingumo daugiklius smūgio jėgai ( $S_f$ ) ir smūgio trukmei ( $A_1$ ) skaičiuoti pagal kito lėktuvo (mūsų atveju "Boeing 707-320") žinomus duomenis.

$$S_f = \frac{w_1 V_1^2 P_1}{w V^2 P},$$

(1)

Čia:

 $V_1$  – lėktuvo "Boeing 737-800" smūgio į Žemę greitis, 120 m/s [1];

V – lėktuvo "Boeing 707-320" smūgio į Žemę greitis, 103 m/s [18];

- $P_1$  lėktuvo "Boeing 737-800" fiuzeliažo sudužimo jėga;
- P lėktuvo "Boeing 707-320" fiuzeliažo sudužimo jėga;
- $w_1$  lėktuvo "Boeing 737-800" krentančio lėktuvo masės ir ilgio santykis;
- w lėktuvo "Boeing 707-320" krentančio lėktuvo masės ir ilgio santykis,.

$$A_1 = \frac{A(W_1 V_1)}{WV},$$
 (2)

Čia:

- $A_1$  visas per smūgio į Žemę trukmę lėktuvo "Boeing 737-800" perduotas Žemei judesio kiekis;
- A visas per smūgio į Žemę trukmę lėktuvo "Boeing 707-320" perduotas Žemei judesio kiekis,
   2,085 N s [20];
- $V_1$  lėktuvo "Boeing 737-800" smūgio į Žemę greitis;
- V lėktuvo "Boeing 707-320" smūgio į Žemę greitis;
- W<sub>1</sub> lėktuvo "Boeing 737-800" krentančio lėktuvo masė, 80000 kg [1];
- W lėktuvo "Boeing 707-320" krentančio lėktuvo masė, 90718,58 kg [20].

Lėktuvų Boeing 707-320 ir Boeing 737-800 fiuzeliažai yra panašūs. Jų skersmuo beveik vienodas: 3,75 m ir 3,76 m [23, 22]. Jie pagaminti iš to paties storio aliuminio lydinio. Todėl laikoma, kad abiejų lyginamų lėktuvų fiuzeliažo sudužimo jėga yra vienoda.

Atsižvelgiant, kad lėktuvo Boeing 707-320 fiuzeliažo ilgis yra 44,35 m [23], o lėktuvo Boeing 737-800 fiuzeliažo ilgis yra 38,02 m [22], panaudoję formules (1) ir (2) gauname, kad lėktuvo Boeing 737-800 smūgio į žemę jėga  $S_f \approx 1,4$ , o smūgio trukmė  $A_1 \approx 2,1$  s, atitinkamai. Lėktuvo Boeing 737-800 smūgio trukmė skiriasi maždaug 3 % nuo gautos darbe [18] lėktuvo Boeing 707-320 smūgio trukmės, todėl analizuojant šio lėktuvo smūgį į šį skirtumą galima neatsižvelgti. Darbe [18] pateikiamos smūgio jėgos priklausomybės nuo laiko smūgio jėgos absoliutines vertes, pavaizduotas Pav. 2, lėktuvo Boeing 737-800 atveju reikia dauginti iš 1,4.



# Pav. 2. Lėktuvo Boeing 707-320 smūgio jėgos priklausomybė nuo laiko prie įvairių smūgio į žemę kampų [20]

(Force – jėga; Time – laikas; Normal Impact – smūgis stačiu kampu; Normal Force, Impact at 30° – smūgio 30° kampu į žemę jėgos vertikalioji projekcija; Tang. Force, Impact at 30° – smūgio 30° kampu į žemę jėgos horizontalioji projekcija)

Nagrinėjamas lėktuvo kritimas žemės atžvilgiu 90° kampu. Kuo didesnis kritimo kampas, tuo giliau lėktuvas gali įsiskverbti į rūsį, o lėktuvo kuras įgauna mažesnį judesio kiekį horizontaliąja kryptimi, ir tuo mažiau degalų yra ištaškoma už rūsio ribų.

MRAS rūsio paviršius yra stačiakampio formos. Laikoma, kad lėktuvo fiuzeliažo priekis smogia į šio stačiakampio centrą. Nagrinėjami du lėktuvo sparnų orientacijos atžvilgu MRAS rūsio paviršiaus atvejai:

- Lėktuvo sparnai yra lygiagretūs trumpajai stačiakampio kraštinei, kurios ilgis yra 5 m [13];
- Lėktuvo sparnai yra lygiagretūs ilgajai stačiakampio kraštinei, kurios ilgis yra 15 m [13].

Analizei supaprastinti lėktuvo smūgio jėga išskaidoma į dvi skirtingas jėgas: fiuzeliažo smūgio jėgą ir sparnų smūgio jėgą. Kaip ir darbuose [19, 20] laikoma, kad sparnai yra stačiakampio formos, o fiuzeliažo paviršius yra apskritimo formos. Skaičiuojant laikoma, kad lėktuvo Boeing 737-800 sparnų stačiakampio ilgesnioji kraštinė lygi 21 m, o trumpesnioji – 1,7 m. Gauta lėktuvo Boeing 737-800 smūgio jėgos priklausomybė nuo laiko pavaizduota Pav. 3.



## Pav. 3. Lėktuvo Boeing 737-800 smūgio jėgos priklausomybė nuo laiko (Ordinačių ašyje atidėta jėga, MN; abscisių ašyje atidėtas laikas, s; Force – bendra fiuzeliažo ir sparnų smūgio jėga; Fuselage – fiuzeliažo smūgio jėga; Wing – sparnų smūgio jėga)

Sudarytame MRAS rūsio su KRA mechaninis modelyje rūsys su KRA atvaizduojamas rūsio matmenų stačiakampio gretasienio betono bloku, kurio aukštis yra lygūs MRAS rūsio gyliui, 3 m [13]. Vertinant lėktuvo smūgio į tokį betono bloką poveikį išnagrinėti du atvejai:

- Smūgio metu susidariusioji smūgio zona (smūgio paveiktas MRAS rūsio užpildas) analizuojamas neatsižvelgiant į gruntą po rūsiu;
- Dinaminė sistema, kurią sudaro MRAS rūsys ir gruntas, analizuojama naudojant paprastą diskretinių parametrų modelį.

#### Lėktuvo įsiskverbimas į rūsį

Bendru atveju smūgio zona, kai neatsižvelgiama į požeminį gruntą, turi pavidalą schematiškai pavaizduotą Pav. 4.



Pav. 4. Smūgio zonos schema, kai neatsižvelgiama į gruntą po rūsiu

Smūgio zonos schemos esant skirtingai lėktuvo sparnų orientacijai MRAS rūsio atžvilgiu parodytos Pav. 5.



Pav. 5. Smūgio zonos schemos esant skirtingai lėktuvo sparnų orientacijai MRAS rūsio atžvilgiu: a) lėktuvo sparnai yra lygiagretūs trumpajai rūsio kraštinei; b) lėktuvo sparnai yra lygiagretūs ilgajai rūsio kraštinei Ribinė jėga, kuriai esant įsiskverbiama į MRAS rūsio vidų, (pramušimo jėga) apskaičiuojama padauginus smūgio zonos medžiagos tempiamąjį stiprį iš smūgio zonos paviršiaus ploto. Atsižvelgus, kad MRAS rūsyje yra betono, smėlio ir KRA mišinys bei dalis rūsio yra neužpildyta, vertinama, kad smūgio zonos tempiamasis stipris  $f_{ct}$  neviršija 1 MPa [24].

Kai lėktuvo sparnai yra lygiagretūs trumpajai rūsio kraštinei, smūgio zonos (stačiakampio pagrindo nupjautinės piramidės, kurios šoninės sienos schema parodyta Pav. 6) viršutinė ilgoji kraštinė yra lygi 5 m (rūsio plotis), viršutinė trumpoji kraštinė a - 1,7 m (sparnų plotis), aukštis h - 3 m (rūsio gylis), apatinė trumpoji kraštinė (rūsio plotis) – 5 m, apatinė ilgoji kraštinė b - 7,7 m ( $b = a + 2h \cdot tan(\alpha), \alpha = 45^{\circ}$ ). Tokiu atveju pramušimo jėga lygi 30,0 MN (30 m<sup>2</sup>·1 MPa).



### Pav. 6. Smūgio zonos šoninio paviršiaus, kurio pagrindo kraštinė liečia rūsio apatinę ilgąją kraštinę, geometrinė schema

Didžiausia smūgio jėga, apskaičiuota pritaikius mastelio daugiklį  $S_f$  = 1.4 (žr. formulę (1)) darbe [20] pateiktiems rezultatams, yra lygi 39,06 MN, kai lėktuvo sparnai yra lygiagretūs trumpajai kraštinei.

Kai lėktuvo sparnai yra lygiagretūs ilgajai rūsio kraštinei, smūgio zona, apskaičiuota atsižvelgus tik į stačiakampio pagrindo nupjautinės piramidės viršutinės ilgosios kraštinės, kurios ilgis yra 15 m (rūsio ilgis) projekciją rūsio dugno kryptimi, išeina už rūsio ribų, todėl modeliuojama mažesnė, pilnai telpanti rūsio tūryje smūgio zona, kurios viršutinė trumpoji kraštinė a - 1,7 m (sparnų plotis), apatinė trumpoji kraštinė - 5 m (rūsio plotis), apatinė ilgoji kraštinė - 15 m (rūsio ilgis), o aukštis  $h = (5 \text{ m} - a)/(2 \cdot \tan(\alpha)) = 1,65$  m. Tokiu atveju pramušimo jėga lygi 49,5 MN (49,5 m<sup>2</sup>·1 MPa).

Didžiausia smūgio jėga, apskaičiuota pritaikius mastelio daugiklį  $S_f = 1.4$  darbe [20] pateiktiems rezultatams, yra 67,38 MN, kai lėktuvo sparnai yra lygiagretūs ilgajai rūsio kraštinei.

Kadangi didžiausia lėktuvo smūgio jėga abiem atvejais viršija pamušimo jėgą, tai lėktuvas nepriklausomai nuo jo sparnų orientacijos atžvilgiu rūsio centro įsiskverbs į MRAS rūsį ir išsiliejęs kuras kontaktuos su rūsio degiomis medžiagomis, ir todėl kils ne tik lėktuvo kuro gaisras, bet ir MRAS rūsyje esančių degių KRA gaisras.

#### Įdubos susidarymas dėl grunto poslinkio

Dinaminė sistema, kurią sudaro MRAS rūsys ir gruntas, modeliuojama kaip dviejų laisvės laipsnių sistema. Ją sudaro smūgio zonos masės  $m_1$  spyruoklė, kurios standumas  $k_1$  ir dėl smūgio virpantis po rūsiu esantis grunto sluoksnis, kuris atvaizduojamas  $m_2$  masės  $k_2$  standumo spyruokle ir amortizatoriumi, kurio impedansas  $c_2$ . Dinaminės sistemos schema parodyta Pav. 7.



Pav. 7. MRAS rūsio ir grunto dinaminės sistemos modelis

Grunto svyravimui atvaizduoti naudojamas Wolf ir Song kūgio modelis [25], kurio schema parodyta Pav. 8.



#### Pav. 8. Wolf ir Song kūgio dinaminės sistemos svyravimo modelis [25]

Šiame modelyje spyruoklės standumas  $K(k_1 \text{ Pav. 7})$  ir impedansas  $C(c_2 \text{ Pav. 7})$  skaičiuojami taip:

Galimų branduolinių ir radiologinių avarijų Maišiagalos radioaktyviųjų atliekų saugykloje padarinių analizė

$$K = \rho V^2 \frac{A_0}{z_0} \,, \tag{3}$$

$$C = \rho V A_0, \tag{4}$$

Čia:

 $\rho$  – grunto tankis;

• 
$$V = 2V_s$$
 (skersinės bangos greitis), kai  $1/3 \le v \le \frac{1}{2}$ . (6)

A<sub>0</sub> – smūgio zonos pagrindo plotas;

zo – kūgio viršūnės nuotolis nuo smūgio zonos pagrindo (rūsio dugno);

ro – kūgio ir smūgio zonos pagrindo (rūsio dugno) sankirtos skritulio spindulys;

Svyruojančio grunto masė  $\Delta M (m_2 \text{ Pav. 7})$ :

$$\Delta M = 0, \text{ kai } v \le 1/3;$$
(7)

• 
$$\Delta M = 2,4(v - 1/3) \rho A_0 r_0$$
, kai  $1/3 \le v \le \frac{1}{2}$ . (8)

Kadangi nėra patikimų duomenų apie grunto savybes, tai atlikta jautrumo analizė grunto vertikaliam poslinkiui (susmukimo gyliui) nustatyti priklausomai nuo Jungo modulio kitimo, kai jis lygus 10 MPa, 50 MPa 100 MPa, bei Puasono modulio kitimo, kai jis lygus 0,3, 0,4 ir 0,5. Gauti rezultatai pateikti Pav. 9 -14.



## Pav. 9. Grunto vertikalus poslinkis, kai lėktuvo sparnai yra lygiagretūs trumpajai rūsio kraštinei ir Puasono modulis lygus 0,3

(Vertical displacement - vertikalus poslinkis; Time - laikas)



Pav. 10. Grunto vertikalus poslinkis, kai lėktuvo sparnai yra lygiagretūs trumpajai rūsio kraštinei ir Puasono modulis lygus 0,4

(Vertical displacement - vertikalus poslinkis; Time - laikas)





(Vertical displacement - vertikalus poslinkis; Time - laikas)



## Pav. 12. Grunto vertikalus poslinkis, kai lėktuvo sparnai yra lygiagretūs ilgajai rūsio kraštinei ir Puasono modulis lygus 0,3

(Vertical displacement – vertikalus poslinkis; Time – laikas)





(Vertical displacement - vertikalus poslinkis; Time - laikas)



## Pav. 14. Grunto vertikalus poslinkis, kai lėktuvo sparnai yra lygiagretūs ilgajai rūsio kraštinei ir Puasono modulis lygus 0,5

(Vertical displacement – vertikalus poslinkis; Time – laikas)

Kaip rodo rezultatai pateikti Pav. 9-14, grunto poslinkis žemyn vidutiniškai siekia apie 0,15 m, tačiau kai gruntas labai minkštas, jo poslinkis žemyn gali siekti maždaug 0,6 m.

Dėl grunto poslinkio žemyn *d* nusėda MRAS rūsio centrinė dalis ir atsiranda įduba (baseinas) rūsio paviršiuje. Tai schematiškai pavaizduota Pav. 15.



## Pav. 15. Įduba (baseinas) rūsio paviršiuje dėl grunto nusėdimo

(Basin volume - baseino tūris; soil settlement - grunto nusėdimas)

Atsižvelgus į Pav. 15 pavaizduotos įdubos formą, kai krentančio lėktuvo sparnai yra lygiagretūs trumpajai rūsio kraštinei ir yra mažas grunto nusėdimas (0,15 m), tai susidariusio baseino tūris yra 6,26 m<sup>3</sup>, o esant dideliam grunto nusėdimui (0,6 m) – 25,05 m<sup>3</sup>. Kai krentančio lėktuvo sparnai yra lygiagretūs ilgajai rūsio kraštinei ir yra mažas grunto nusėdimas (0,15 m), tai susidariusio baseino tūris yra 7,54 m<sup>3</sup>, o esant dideliam grunto nusėdimu (0,6 m) – 30,15 m<sup>3</sup>.

#### Išsiliejusio į baseiną skystojo kuro tūris

Lėktuve Boeing 737-800 yra keli kuro bakai. Dalis kuro yra fiuzeliažo bakuose, kita dalis yra sparnų bakuose. Kadangi nėra tikslių duomenų apie kuro kiekį lėktuvo Boeing 737-800 įvairiuose bakuose, tai analizei pasitelkiama informacija apie kuro išsidėstymą panašiame lėktuve Airbus 320-200. Kuro bakų išsidėstymo schema lėktuve Airbus 320-200 ir kuro kiekis juose parodyti Pav. 16.



USABLE FUEL							
OUTER TANKS INNER TANKS CENTER TANK TOTAL							
VOLUME	(liters)	880 x 2	6924 x 2	8250	23858		
VOLUVIE	(US gallons)	232 x 2	1829 x 2	2180	6302		
	(KG)	691 x 2	5435 x 2	6476	18728		
WEIGHT	(LB)	1520 x 2	11982 x 2	14281	41285		

\* Fuel density : 0.785 kg/l or 6.551 lb/US Gal.

#### Pav. 16. Kuro bakų išsidėstymo schema lėktuve Airbus 320-200 ir kuro kiekis juose [21]

(Center tank – centrinis bakas fiuzeliaže; Inner tank –artimesnis fiuzeliažui bakas sparne, Outer tank – tolimesnis fiuzeliažui bakas sparne, Vent tank – tuščias ventiliacijos bakas, Volume – tūris, liters – litrai, Total – visas kuras)

Kadangi nagrinėjamame lėktuve turi būti 27 000 L kuro, o bendras kiekis visuose kuro bakuose parodytas Pav. 16 yra 23 858 L, tai modeliuojant kuro išsidėstymą lėktuvo Boeing 737-800 kuro bakuose Pav. 16 pateikti duomenys atitinkamai padauginami iš 1,17. Gaunama, kad lėktuvo Boeing 737-800 kuro centriniame bake yra 9 450 L, o sparnų bakuose viso yra 17 550 L.

Lėktuvo kritimo abiejų scenarijų atvejais, kai lėktuvo sparnai yra lygiagretūs trumpajai rūsio kraštinei ir kai lėktuvo sparnai yra lygiagretūs ilgajai rūsio kraštinei, išsiliejusio į MRAS rūsį kuro kiekis apskaičiuojamas projektuojant kuro bakų išsidėstymą į rūsį kaip tai yra parodyta Pav. 17.



## Pav. 17. Kuro bakų projekcija, kai lėktuvo sparnai yra lygiagretūs ilgajai rūsio kraštinei (kairėje) ir kai lėktuvo sparnai yra lygiagretūs trumpajai rūsio kraštinei (dešinėje)

Atsižvelgus į MRAS rūsio įdubos matmenis ir lėktuvo Boeing 737-800 matmenis (žr. Lentelė 2) gaunama, kad, kai krentančio lėktuvo sparnai yra lygiagretūs trumpajai rūsio kraštinei ir yra didelis grunto nusėdimas (0,6 m) į rūsį išsilieja 10 507,5 L kuro (šis scenarijus toliau vadinamas **Modelis** 1), o esant mažam grunto nusėdimui (0,15 m) – 6 260 L (toliau – **Modelis 2**). Kai krentančio lėktuvo sparnai yra lygiagretūs ilgajai rūsio kraštinei ir yra didelis grunto nusėdimas (0,6 m) į rūsį išsilieja 20 646,90 L kuro (toliau – **Modelis 3**), o esant mažam grunto nusėdimui (0,15 m) – 7 450 L (toliau – **Modelis 4**).

#### 4.2. Gaisro analizė

Lėktuvo smūgio sukelto gaisro deterministinės analizės tikslas yra įvertinti liepsnos aukštį, t. y. radioaktyviųjų medžiagų išmetimo aukštį, šilumos išsiskyrimo galią ir gaisro trukmę, nes tai yra pradiniai duomenys radiologinių padarinių analizei.

Nagrinėjant konservatyvų scenarijų, laikoma, kad po lėktuvo kritimo kilęs gaisras nėra gesinamas. Realistinio scenarijaus atveju daroma prielaida, kad ugniagesių komanda pradeda gesinti gaisrą po 1 val. nuo lėktuvo kritimo ir gaisrą užgesina per 1 val. nuo gesinimo pradžios.

Konservatyviai nagrinėjant maksimali šilumos išsiskyrimo galios vertė ir liepsnos aukštis bei gaisro trukmė yra susiejami su šilumos išsiskyrimo galia žemiau pateikiamu būdu.

Deterministinė gaisro analizė atliekama dviem etapais. Pirmajame etape nagrinėjamas gaisras kilęs dėl lėktuvo kuro degimo. Antrasis etapas susijęs su gaisru, atsirandančiu iš rūsyje esančių degių KRA. Šios dvi fazės yra traktuojamos kaip du nepriklausomi gaisrai, vykstantys nuosekliai. Abiejų gaisrų bendra trukmė yra laikoma viso gaisro trukme.

Didžiausia RA, patalpintų MRAS, dalis buvo radioaktyviosios medžiagos naudotos ligoninėse, pramonės įmonėse ir mokslo įstaigose. Tai daugiausiai nedegūs kalibravimo instrumentai, skysčiai, turintys radionuklidų, krūvio neutralizatoriai, didelio aktyvumo gama šaltiniai, dūmų detektoriai [26].

Apie 37 % viso aktyvumo yra sukaupta panaudotuose uždaruose šaltiniuose, likusieji 63 % aktyvumo yra pasiskirstę kitose RA [13].

MRAS sekcijos buvo pildomos RA viena po kito, bet kiekviena sekcija buvo pildoma chaotiškai [26]. RA padėjimo saugoti procedūra priklausė nuo RA formos [26]:

- RA su biologine apsauga buvo pilamos iš transportavimo priemonės į rūsį per atidarytą angą;
- Uždari šaltiniai be biologinės apsaugos buvo metami plieniniais vamzdžiais į plieninius konteinerius, įcementuotus antrosios ir trečiosios sekcijos dugne (žr. Pav. 1);
- Naudoti drabužiai, filtrai, plastikinės medžiagos buvo dedami į plastiko maišus ir tada sukraunami per atidarytą angą. Skirtingų rūšių neutralizatoriai (turintys Pu-239) ir plokštelės su tričiu buvo taip pat dedami per atidarytą angą.

MRAS eksploatavimo metu patalpintos RA buvo pilnai padengiamos betono sluoksniais vieną-du kartus per metus [26].

Uždarant MRAS, visos RA sekcijose buvo padengtos betonu, kurio paskutinis sluoksnis buvo išlygintas rankiniu būdu. Po to visas tuščias tūris buvo užpildytas iki viršaus smėliu, rūsys buvo uždarytas betono plokštėmis ir jungtys tarp plokščių buvo užpildytos cementiniu skiediniu [26].

Ekspertiniu vertinimu MRAS rūsyje degios medžiagos (medis, popierius, plastikinės medžiagos), įskaitant rūsio medines pertvaras (neatsižvelgiant į jų sudūlėjimą) sudaro ne daugiau kaip 10 % visų RA.

Atliekant degių medžiagų gaisro modeliavimą yra nagrinėjami du atvejai, kai, laikoma, kad MRAS rūsyje visos degios medžiagos sudaro 30 % visų KRA ir, neatsižvelgiant į procentinę degių medžiagų dalį MRAS rūsyje, imamas visų atskirų degių medžiagų (tos pačios medžiagos su skirtingais parametrais laikomos skirtingomis medžiagomis) suskaičiuotų gaisro parametrų vidurkis, ir kitas atvejis, kai laikoma, kad dega mediena, kurios tūris sudaro 10 % viso KRA ir betono mišinio tūrio (KRA ir betonas užima 60 % rūsio tūrio [26]). Pirmasis atvejis vadinamas vidutinės medžiagų sudėties scenarijumi, antrasis – 10 % medienos scenarijumi.

Analizuojami trys gaisro scenarijai, siekiant pateikti pakankamai duomenų radiologinių padarinių analizės skaičiavimų jautrumui įvertinti. Šių trijų scenarijų prielaidos:

1) Laikoma, kad degios KRA yra vienalytės ir glaudžiai paskirstytos visose rūsio sekcijose. Dega visos degios kietosios medžiagos, taigi visi rūsio sekcijose patalpinti konteineriai (talpos, kuriose patalpinti panaudoti uždarieji šaltiniai, Cs ir Co panaudoti šaltiniai su savo biologine apsauga) yra apimti ugnies (toliau – **Scenarijus 1**).

 Laikoma, kad degios kietosios medžiagos yra glaudžiai ir vienalytiškai paskirstytos 1–5 sekcijose. Dega visos degios kietosios medžiagos, taigi 2-je ir 3-je sekcijose esantys konteineriai yra apimami ugnies (žr. Pav. 1, toliau – Scenarijus 2).

3) Degios kietosios medžiagos laikomos glaudžiai ir vienalytiškai paskirstytos 1–5 sekcijose ir yra sumaišytos su betonu, kuris yra nedegi, ugniai atspari medžiaga. Atsižvelgiant į betoną, konservatyviai daroma prielaida, kad dega tik 70% kietųjų medžiagų esančių MRAS rūsio viršuje. Taigi nė vienas konteineris nėra užlietas ugnies, nes jie yra MRAS rūsio apačioje (žr. Pav. 1, toliau – **Scenarijus 3**).

Degios kietosios medžiagos iš tikrųjų nevienalytiškai pasiskirsto 1–5 MRAS rūsio sekcijose. Todėl toks šių trijų scenarijų nagrinėjimas yra konservatyvaus pobūdžio, nes degios medžiagos yra daug labiau suglaudintos nei yra iš tikrųjų.

Gaisro analizei atlikti naudojami gaisro dinaminiai įrankiai (GDĮ), pateikti JAV branduolinio reguliavimo komisijos (NRC) standarte NUREG-1805 [27]. Dauguma šių įrankių yra analitinės priemonės gaisrams branduolinės jėgainės patalpose apibūdinti. Tačiau šiame standarte taip pat pateikiamos gairės apibūdinti gaisrus atvirose vietose. GDĮ yra realizuojami "Microsoft Excel ®" skaičiuoklėse, kurias sukūrė, prižiūri bei patvirtina NRC.

#### 4.2.1. Pirmoji gaisro fazė: Lėktuvo kuro degimas

Mechaninė lėktuvo smūgio analizė rodo, kad tikėtina, jog dėl smūgio MRAS rūsyje susidarys įtrūkimai ir plyšiai, o gruntas po rūsiu nusės. Dėl šio nusėdimo viršutinė rūsio dalis turės baseino formą (žr. Pav. 15).

Remiantis NUREG-1805 [27] 3-čio skyriaus gairėmis, skystojo kuro gaisras modeliuojamas kaip skysčių baseino gaisras. Šiame scenarijuje skystasis kuras tolygiai dega uždaroje vietoje. NUREG-1805 [27] pateiktų formulių pagalba galima įvertinti maksimalią šilumos išsiskyrimo galią, vidutinį liepsnos aukštį ir kuro baseino gaisro trukmę.

Tačiau tiek šilumos išsiskyrimo galia, tiek liepsnos aukštis labai priklauso nuo skysčių baseino paviršiaus ploto. Laikui bėgant dalis kuro sudega, ir baseino paviršius mažėja. Todėl mažėja ir šilumos išsiskyrimo galia, ir liepsnos aukštis (žr. Pav. 18).





Pav. 18. Liepsnos aukščio sumažėjimas išdegus daliai kuro

#### Kuro baseino geometrinis modelis

Siekiant atsižvelgti į baseino pavidalo pokytį išdegant kurui, kuro baseino modelis yra diskretizuojamas. Kuro baseinas suskaidomas į 10 mažesnių vienodo aukščio stačiakampio pagrindo nupjautinės piramidės pavidalo sluoksnius. Kiekvienas sluoksnis analizuojamas naudojant baseino gaisro modelį.

Baseino *i*-tojo sluoksnio (sluoksniai numeruojami nuo viršaus į apačią) tūris  $V_i$  ir  $S_i$  plotas skaičiuojami pagal formules:

$$V_i = \frac{a_i + b_i}{2} \cdot h \cdot l, \tag{9}$$

$$S_i = \frac{a_i + b_i}{2} \cdot l. \tag{10}$$

Čia:

*a<sub>i</sub>* – *i-tojo* sluoksnio stačiakampio pagrindo nupjautinės piramidės šoninio paviršiaus (trapecijos pavidalo) didesniosios horizontalios kraštinės ilgis;

 $b_i$  – *i-tojo* sluoksnio stačiakampio pagrindo nupjautinės piramidės šoninio paviršiaus mažesniosios horizontalios kraštinės ilgis;

h – sluoksnio aukštis;

 I – ilgesniosios arba trumpesniosios rūsio kraštinės ilgis (priklauso nuo to, ar lėktuvo smūgis sparnai orientuoti išilgai ar skersai rūsio).

$$b_i = a - 2 \cdot \left( \tan \alpha \cdot \frac{i \cdot h}{10} \right). \tag{11}$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{h}{\sqrt{h^2 + \left(\frac{a}{2} - \frac{b}{2}\right)^2}}\right).$$
(12)

Formulėse (1) ir (12) *a*, *b* ir *h* yra viso baseino matmenys.

Kai kuriais atvejais (Modelis 1 ir Modelis 3) rūsio įdubimo nulemtas baseino tūris yra didesnis negu išsipylusio kuro tūris. Tokiais atvejais susidaro mažesnis lėktuvo kuro baseinas ir, atitinkamai, perskaičiuojamas viso baseino aukštis atsižvelgus į sąryšį tarp baseino tūrio ir aukščio.

Pav. 19 pateikta baseino tūrio ir aukščio priklausomybė Modeliui 1, iš kurios gaunama, kad baseino aukštis yra lygus 0,37 m.



Pav. 19. Baseino tūrio (Vol) ir aukščio priklausomybė Modeliui 1.

Pav. 20 pateikta baseino tūrio ir aukščio priklausomybė Modeliui 3, iš kurios gaunama, kad baseino aukštis yra lygus 0,46 m.



Pav. 20. Baseino tūrio (Vol) ir aukščio priklausomybė Modeliui 3.

#### Kuro baseino šilumos išsiskyrimo galia ir liepsnos aukštis

Gaisro plėtra paprastai apibūdinama atsižvelgiant į šilumos išsiskyrimo galią ir laiką. Šilumos išsiskyrimo galios (*Q*) priklausomybė nuo laiko tam tikru atveju yra vadinama to atvejo projektine gaisro kreive. Paprastos konstrukcijos projektinė gaisro kreivė parodyta Pav. 21.



Pav. 21. Paprastos konstrukcijos projektinė gaisro kreivė.

Norint įvertinti  $\dot{Q}$ , atsižvelgiant į skystojo kuro masės nuostolių procentą, reikia žinoti efektyviąją kuro degimo šilumą.  $\dot{Q}$  apskaičiuojamas naudojant lygtį (3) [28]:

$$\dot{Q} = \dot{m} \Delta H_{c,e_{ff}}.$$
(13)

Čia:

 $\dot{Q}$  – šilumos išsiskyrimo galia (kW);

m – deginimo arba masės praradimo greitis (kg/s);

 $\Delta H_{c,e_{ff}}$  – efektyvioji degimo šiluma (kJ/kg).

Vidutinis daugelio gaminių ir medžiagų degimo greitis buvo eksperimentiškai nustatytas atliekant laisvojo degimo bandymus. Jei yra žinomas degimo plotas ir faktinė degimo šiluma, aukščiau pateikta lygtis (13) tampa lygtimi (14):

$$\dot{Q} = \dot{m}^{\prime\prime} \Delta H_{c,e_{ff}} A_f (1 - e^{-k\beta D}).$$
<sup>(14)</sup>

Čia:

*m*<sup>''</sup>- degimo arba masės nuostolių koeficientas horizontalaus ploto vienetui per laiko vienetą (kg/m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>);

 $A_f$  – horizontalus kuro degimo plotas (m<sup>2</sup>);

 $k\beta$  – empirinė konstanta (m<sup>-1</sup>);

D – degimo ploto skersmuo (m).

Skystojo kuro gaisro atveju yra žinomas kuro uždengtas plotas, todėl pastaroji formulė taikoma apskaičiuojant maksimalų *Q*. Apskaičiavus pagal formulę (10) konkretaus geometrinio modelio visų baseino sluoksnių plotus ir pagal juos ekvivalentinių skritulių, turinčių tokius pat plotus, skersmenis galima nustatyti skystojo kuro gaisro šilumos išsiskyrimo galią šiame geometriniame modelyje.

Lentelėje 3 pateikiama šilumos išsiskyrimo galia (kW) visuose 4 geometrinių modelių sluoksniuose laikant, kad lėktuvo Boeing 737-800 bakai yra užpildyti aviaciniu kuru JP-5, kurio  $\dot{m}^{\prime\prime} = 0,054 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}, \Delta H_{c,e_{ff}} = 43 000 \text{ kJ/kg}, k\beta = 1,6 \text{ m}^{-1}$  [27]. Didžiausia šilumos išsiskyrimo galia kiekviename sluoksnyje pažymėtos pariebintu šriftu.

Sluoksnio Nr.	Modelis 1	Modelis 2	Modelis 3	Modelis 4
1	113777,63	174149,97	147888,10	174149,97
2	104373,32	158708,65	139041,24	162656,06
3	94968,88	143267,30	130171,14	151162,13
4	85564,21	127825,91	121301,02	139668,18
5	76159,14	112384,41	112430,85	128174,21
6	66753,33	96942,67	103560,60	116680,18
7	57346,13	81500,36	94690,23	105186,04
8	47936,19	66056,56	85819,65	93691,72
9	38520,57	50608,55	76948,72	82197,02
10	29092,48	35147,08	68081,82	70701,57

Lentelė 3. Šilumos išsiskyrimo galia (kW) 4 geometrinių modelių sluoksniuose

Mažesnio tūrio baseinai (Modelis 2 ir Modelis 4) turi didesnį paviršiaus plotą, todėl šiais atvejais yra didesnė šilumos išsiskyrimo galia. Didžiausia šilumos išsiskyrimo galia yra, kai krentančio lėktuvo sparnai yra lygiagretūs ilgajai rūsio kraštinei ir yra mažas grunto nusėdimas (Modelis 4).

NUREG-1805 [27] pateikia dvi formules, kaip apskaičiuoti vidutinį liepsnos aukštį (H<sub>f</sub> Pav. 22): Heskestado ir Thomaso koreliacijas. Skystojo kuro skaičiavimams yra naudojama pirmoji, nes ji buvo specialiai apskaičiuota gaisrams baseinuose [29]. Be to, naudojant Heskestado koreliaciją gaunamas didesnis liepsnos aukštis nei Thomaso koreliacijos atveju. Į vėjo įtaką neatsižvelgiama.



Pav. 22. Dinaminės baseino gaisro savybės

(Free Burning - Savaiminis degimas; Air Entrainment - Oro pritekėjimas)

Lygtis (15) vaizduoja Heskestado koreliaciją [27]:

$$H_f = 0,235\dot{Q}^{2/5} - 1,02D.$$

Čia:

H<sub>f</sub>-liepsnos aukštis (m);

*Q*– šilumos išsiskyrimo galia gaisro scenarijuje (kW);

D – gaisro skersmuo (m).

Gaisro skersmuo nustatomas atsižvelgiant į rūsio matmenis ir lėktuvo smūgio analizės rezultatus. Kadangi nagrinėjama teritorija nėra apskritimas, tai apskaičiuojamas efektyvusis skersmuo pagal formulę:

$$D = \sqrt{\frac{4A_f}{\pi}}.$$
(16)

Čia:

 $A_f$ – neapskrito baseino paviršiaus plotas.

Lentelėje 4 pateikiamas liepsnos aukštis virš žemės paviršiaus 4 geometrinių modelių sluoksniuose. Mažiausias liepsnos aukštis kiekviename sluoksnyje pažymėtos pariebintu šriftu. Kuo mažesnis liepsnos aukštis, tuo mažiau yra išsklaidomos radioaktyviosios medžiagos ir tuo pavojingesnės gali būti radiologinės pasekmės.

v.2

(15)

Sluoksnio Nr.	Modelis 1	Modelis 2	Modelis 3	Modelis 4
1	16,455	19,37	18,163	19,37
2	15,919	18,735	17,727	18,905
3	15,352	18,06	17,270	18,41
4	14,746	17,345	16,794	17,885
5	14,099	16,56	16,298	17,34
6	13,403	15,695	15,771	16,765
7	12,636	14,74	15,225	16,14
8	11,790	13,665	14,649	15,475
9	10,833	12,40	14,033	14,76
10	9,697	10,855	13,366	13,975

Lentelė 4. Liepsnos aukštis (m) 4 geometrinių modelių sluoksniuose

Mažiausias liepsnos aukštis yra, kai krentančio lėktuvo sparnai yra lygiagretūs trumpajai rūsio kraštinei ir yra didelis grunto nusėdimas (Modelis 1).

Apibrėžtos masės ar tūrio degaus skysčio degimo trukmė ( $t_b$ ) gali būti įvertinta panaudojus NUREG-1805 [27] 3-me skyriuje pateikiamą formulę:

$$t_b = \frac{4V}{\pi D^2 v}.$$

Čia:

V – skysčio tūris (m<sup>3</sup>);

D - baseino skersmuo (m);

v - regresijos greitis (m/s), medžiagos tūrio sumažėjimas ploto vienetui per laiko vienetą.

Regresijos greitis skaičiuojamas pagal formulę:

$$v = \frac{m''}{\rho}.$$
(18)

Čia:

m''- masinis kuro degimo greitis ploto vienetui (kg/m<sup>2</sup>·s);

 $\rho$  – skystojo kuro tankis (kg/m<sup>3</sup>).

Aviacinio kuro JP-5 tankis yra 810 kg/m<sup>3</sup> [27].

Lentelėje 5 pateikiama lėktuvo kuro gaisro trukmė minutėmis 4 geometrinių modelių sluoksniuose. Ilgesnė skystojo kuro trukmė didina gaisro išplitimo visame MRAS rūsyje tikimybę.

Sluoksnio Nr.	Modelis 1	Modelis 2	Modelis 3	Modelis 4
1	8,78	3,60	11,23	3,63
2	8,73	3,58	11,19	3,60
3	8,68	3,57	11,19	3,61
4	8,62	3,54	11,15	3,62
5	8,54	3,51	11,10	3,58
6	8,52	3,47	11,10	3,58
7	8,40	3,42	11,03	3,53
8	8,23	3,34	10,96	3,53
9	7,98	3,21	10,94	3,46
10	7,57	2,97	10,83	3,45
Visas baseinas	84,05	34,21	110,72	35,59

Lentelė 5. Lėktuvo kuro gaisro trukmė (minutės) 4 geometrinių modelių sluoksniuose

Ilgiausiai skystojo kuro gaisras trunka, kai krentančio lėktuvo sparnai yra lygiagretūs trumpajai rūsio kraštinei ir yra didelis grunto nusėdimas (Modelis 1).

Tolimesniam nagrinėjimui pasirenkamas radiologinių pasekmių požiūriu pavojingiausias scenarijus, kai krentančio lėktuvo sparnai yra lygiagretūs trumpajai rūsio kraštinei ir yra didelis grunto nusėdimas (Modelis 1), nes šiuo atveju yra mažiausias liepsnos aukštis ir mažiausia gaisro trukmė.

#### 4.2.2.Antrasis gaisro etapas: Kietasis gaisras

Laikoma, kad degių KRA gaisras prasideda tuo metu, kai visiškai baigiasi degios skystosios medžiagos gaisras. Tai, kad degios kietosios medžiagos, kurios yra padengtos skystojo kuro baseinu, nepradeda degti, kol neišdega visas lėktuvo kuras, gali būti pagrįsta tuo, kad kol yra skysčio, tol nėra deguonies ir degių kietųjų medžiagų kontakto. Scenarijus, kuriame kietoji medžiaga dega vienu metu su skystąja medžiaga, nėra nagrinėjamas taip pat todėl, kad jis yra mažiau konservatyvus negu scenarijus, kuriame kietoji ir skystoji medžiaga dega atskirai. Kai kietoji ir skystoji medžiaga dega kartu, gaisro šiluminė galia yra didesnė. Kuo didesnė gaisro šiluminė galia, tuo aukščiau pakyla liepsna. Kuo aukščiau pakyla liepsna, tuo didesnis radioaktyviųjų medžiagų išmetimo aukštis. Kuo didesnis radioaktyviųjų medžiagų išmetimo aukštis. Kuo didesnė jų koncentracija konkrečioje vietoje, ir todėl jos sukelia mažiau pavojingus radiologinius padarinius.

Į tai, kad radioaktyviosios medžiagos gali pasklisti didesnėje teritorijoje atsižvelgiama, kai dviejuose pasirinktuose KRA gaisro scenarijuose daroma konservatyvi prielaida, kad sudega visos degios KRA, kas lemia didesnę KRA temperatūrą ir didesnį liepsnos aukštį.

Kietųjų medžiagų degimas modeliuojamas kaip ir skystųjų medžiagų atveju naudojant gaisro baseino modelį, t. y. laikoma, kad degios kietosios medžiagos dega tūryje, kurį apriboja rūsio išorinės sienos. Šio modelio pagalba apskaičiuojamas vidutinis liepsnos aukštis, maksimali išsiskiriančios šilumos galia ir degimo trukmė.

MRAS rūsyje yra įvairūs kiekiai skirtingų degių medžiagų (mediena, popierius, rūbai, plastikiniai maišai) [26]. Tokiam atvejui negalima tiesiogiai pritaikyti GDĮ [27], nes šiuo metodu vienu metu galima modeliuoti tik vieną medžiagą. Todėl yra naudojami du artutiniai vertinimai:

- Kai nagrinėjamame scenarijuje laikoma, kad yra žinoma procentinė įvairių degių kietujų medžiagų sudėtis rūsyje, gaisro analizei reikalingi reprezentatyvūs parametrai yra gaunami apskaičiuojant svorinius vidurkius;
- Kai nagrinėjamame scenarijuje laikoma, kad yra nežinoma procentinė įvairių degių kietujų medžiagų sudėtis rūsyje, gaisro analizei reikalingi didžiausias liepsnos aukštis, *Q* ir gaisro trukmė yra įvertinami kiekvienos medžiagos atveju pakeičiant visas degias kietąsias medžiagas rūsyje šia medžiaga.

Nagrinėjami du degių medžiagų išsidėstymo atvejai. Pirmuoju atveju laikoma, kad degios medžiagos rūsio paviršiuje sudaro vientisą kietąją plokštę (toliau – kietos plokštės, **KP modelis**). Kadangi šis modelis yra ypatingai konservatyvus, tai papildomai nagrinėjamas antrasis atvejis, kai laikoma, kad degios medžiagos visame rūsyje yra vienalytiškai sumaišytos su betonu (toliau – mišinio su betonu plokštė, **MB modelis**).

#### Šilumos išsiskyrimo galia ir liepsnos aukštis kietajame gaisre

Panašiai kaip ir gaisro kuro baseine atveju lygtis (13) yra naudojama įvertinti  $\dot{Q}$  kietųjų medžiagų gaisre. Šiuo atveju yra naudojama prielaida, kad visos kietosios medžiagos dega tūryje, kurį apriboja rūsio išorinės sienos (gaisro baseinas yra plokštės pavidalo), ir jų kiekis mažėja panašiai kaip degant skysčiui. Tikrovėje degios kietosios medžiagos yra pasiskirsčiusios 3 metrų aukščio rūsyje. Todėl tokiu būdu apskaičiuotas  $\dot{Q}$  ir liepsnos aukštis bus didesni negu galima būtų stebėti realybėje.

Thomaso koreliacija pasirinkta įvertinti vidutinį liepsnos aukštį degant kietosioms medžiagoms, nes ji yra specialiai pritaikyta kietosioms medžiagoms [29].

$$H_f = 42D \left(\frac{m''}{\rho_a \sqrt{gD}}\right)^{0.61}.$$
(19)

Čia:

D – degančio paviršiaus skersmuo, m;

 $\dot{m}''$  – masinis kuro degimo greitis ploto vienetui (kg/m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>);
$\rho_a$  – oro tankis (kg/m<sup>3</sup>);

g – laisvojo kritimo pagreitis (m/s<sup>2</sup>).

Skaičiuojant *Q*, laikoma, kad visos kietosios medžiagos pilnai užpildo plokštę ir vyksta degimas panašus į skysčio degimą baseine ir todėl galima naudoti formules (13) ir (14).

#### Kietojo gaisro trukmė

Pirmu artutiniu vertinimu degimo trukmė ( $t_{solid}$ ) gali būti apskaičiuota panaudojus NUREG-1805 [27] 8-me skyriuje pateikiamą formulę:

$$t_{solid} = \frac{E}{\dot{Q}} = \frac{m_{comb}\Delta H_c}{\dot{Q}'' A_{comb}}.$$
 (20)

Čia:

E – visa kuro energija (kJ);

 $m_{comb}$  – degančios masės kiekis (kg);

 $\Delta H_{c,e_{ff}}$  – efektyvioji degimo šiluma (kJ/kg);

*Q*<sup>''</sup> – šilumos išsiskyrimo galia pagrindo paviršiaus vienetui (kW/m<sup>2</sup>);

 $A_{comb}$  – degančio paviršiaus plotas (m<sup>2</sup>).

Kadangi formulė (7) netinka nevienalyčiams medžiagų mišiniams tai, ją panaudojus gali būti nustatyta tik degių kietųjų medžiagų gaisro MRAS tikros trukmės apatinė riba (trumpiausias laikas).

#### Kietojo gaisro modelio pradiniai duomenys

Sudarant kietojo gaisro modelį laikoma, kad KRA ir betonas užima 60 % viso MRAS rūsio tūrio [26], o degimo metu popieriaus savybes reprezentuoja kartonas, popieriaus ir plastmasės atliekų mišinio – poliuretanas, plastmasės – polietilenas arba polipropilenas.

Gaisro modeliavimui reikalingi parametrai yra imami iš NUREG-1805 [27], kad jie derėtų su naudojama metodika. Jeigu reikalingų modeliuoti kietajam gaisrui duomenų nėra [27], tai trūkstami parametrai yra imami iš NUREG/CR-6850 [30].

Degių medžiagų masinio degimo greičių, efektyviosios degimo šilumos, tankio ir empirinės konstantos vertės pateikiamos Lentelėje 6.

Medžiaga	<i>ṁ</i> ″ <b>(kg/m²⋅s⁻¹)</b>	$\Delta H_{c,e_{ff}}$ (kJ/kg)	ρ <b>(kg/m³)</b>	kβ <b>(m⁻¹)</b>	Šaltinis
Medis	0,055	13000-15000	420-640	100	[27]
Kartonas	0,014	18000	689	100	[30]
Poliuretanas	0,025	23000-28000	1040	100	[30]
Polietilenas	0,026	43400	970	100	[30]
Polipropilenas	0,018	43200	905	100	[27]

Lentelė 6. Medžiagų masinis degimo greitis  $\dot{m}''$ , efektyvioji degimo šiluma  $\Delta H_{c,e_{ff}}$ , tankis  $\rho$ , empirinė konstanta  $k\beta$ .

Skaičiavimuose yra naudojami keli kai kurių medžiagų parametrai, kai medžiagos parametrai kinta plačiose ribose. Laikoma, kad yra du medienos tipai: Medis\_1, kurio efektyvioji degimo šiluma lygi 13000 kJ/kg, o tankis – 420 kg/m<sup>3</sup> ir Medis\_2, kurio efektyvioji degimo šiluma lygi 15000 kJ/kg, o tankis – 640 kg/m<sup>3</sup>. Taip pat išskiriami du poliuretano tipai: Poliuretanas\_1, kurio efektyvioji degimo šiluma lygi 23000 kJ/kg, ir Poliuretanas\_2, kurio efektyvioji degimo šiluma lygi 28000 kJ/kg.

Kadangi MRAS viso rūsio užpildomas tūris lygus 200 m<sup>3</sup>, o KRA ir betono mišinys jame sudaro 60 %, tai scenarijuose, kuriuose laikoma, kad visos degios medžiagos sudaro 30 % visų KRA, degančių medžiagų tūris yra 36 m<sup>3</sup>. Atsižvelgus, kad rūsio aukštis yra lygus 3 m, degių medžiagų ir betono plokštės paviršius tokiuose scenarijuose yra 66,67 m<sup>2</sup>.

Scenarijuose, kuriuose daroma prielaida, kad visos KRA yra 1-5 sekcijoje, laikoma, kad šių sekcijų tūris yra 166,7 m<sup>3</sup>, ir todėl degių medžiagų ir betono plokštės paviršius yra 55,56 m<sup>2</sup>.

Scenarijuose, kuriuose laikoma, kad dega tik 70% visų 1-5 sekcijoje esančių KRA, degančių medžiagų tūris yra 25,2 m<sup>3</sup>.

MB modelyje naudojamos suvidurkintos degios medžiagos ir betono charakteristikos. Laikoma, kad betono tankis yra 2300 kg/m<sup>3</sup>, o masinis degimo greitis ir efektyvioji degimo šiluma lygi nuliui.

Lentelėje 7 pateikiamos Scenarijaus 1 MB modelyje naudojamos suvidurkintos degių medžiagų ir betono masinio degimo greičių, efektyviosios degimo šilumos, tankio, tankio ir empirinės konstantos vertės.

Lentelė 7. Medžiagų masinis degimo greitis $\dot{m}''$ , efektyvioji degimo šiluma $\Delta H_{c,e_{ff}}$ , ta	nkis
ho, empirinė konstanta $keta$ Scenarijaus 1 MB modelyje.	

Medžiaga	<i>ṁ</i> ′′ <b>(kg/m²⋅s⁻¹)</b>	$\Delta H_{c,e_{ff}}$ (kJ/kg)	ho (kg/m³)	kβ <b>(m⁻¹)</b>
Medis	0,0099	2340-2700	2040-2080	100
Kartonas	0,0025	3240	2090	100
Poliuretanas	0,0045	4140-5040	2150	100
Polietilenas	0,00468	7812	2140	100
Polipropilenas	0,00324	7776	2130	100

Atsižvelgus į skirtingus medienos tipus MB modelyje ir suvidurkinus jų savybes su betono savybėmis gauname, kad medienos tipui Medis\_1 efektyvioji degimo šiluma lygi maždaug 2340 kJ/kg, o tankis – maždaug 2040 kg/m<sup>3</sup>, medienos tipui Medis\_2, efektyvioji degimo šiluma lygi maždaug 2700 kJ/kg, o tankis – maždaug 2080 kg/m<sup>3</sup>. Atsižvelgus į skirtingus poliuretano tipus MB modelyje ir suvidurkinus jų savybes su betono savybėmis gauname, kad poliuretano tipui Poliuretanas\_1 efektyvioji degimo šiluma lygi maždaug 5040 kJ/kg.

Lentelėje 8 pateikiamos Scenarijaus 2 MB modelyje naudojamos suvidurkintos degių medžiagų ir betono masinio degimo greičių, efektyviosios degimo šilumos, tankio, tankio ir empirinės konstantos vertės

Lentelė 8. Medžiagų masinis degimo greitis  $\dot{m}''$ , efektyvioji degimo šiluma  $\Delta H_{c,e_{ff}}$ , tankis  $\rho$ , empirinė konstanta  $k\beta$  Scenarijaus 2 MB modelyje.

Medžiaga	<i>ṁ</i> ′′ <b>(kg/m²⋅s⁻¹)</b>	$\Delta H_{c,e_{ff}}$ (kJ/kg)	ho (kg/m³)	kβ <b>(m⁻¹)</b>
Medis	0,01188	2808-3240	1970-2010	100
Kartonas	0,003024	3888	2030	100
Poliuretanas	0,0054	4968-6048	2106	100
Polietilenas	0,005616	9374	2091	100
Polipropilenas	0,00389	9331	2077	100

Atsižvelgus į skirtingus medienos tipus MB modelyje ir suvidurkinus jų savybes su betono savybėmis gauname, kad medienos tipui Medis\_1 efektyvioji degimo šiluma lygi maždaug 2808 kJ/kg, o tankis – maždaug 1970 kg/m<sup>3</sup>, medienos tipui Medis\_2, efektyvioji degimo šiluma lygi maždaug 3240 kJ/kg, o tankis – maždaug 2010 kg/m<sup>3</sup>. Atsižvelgus į skirtingus poliuretano tipus MB modelyje ir suvidurkinus jų savybes su betono savybėmis gauname, kad poliuretano tipui Poliuretanas\_1 efektyvioji degimo šiluma lygi maždaug 4968 kJ/kg, poliuretano tipui Poliuretanas\_2, efektyvioji degimo šiluma lygi maždaug 6048 kJ/kg.

Lentelėje 9 pateikiamos Scenarijaus 3 MB modelyje naudojamos suvidurkintos degių medžiagų ir betono masinio degimo greičių, efektyviosios degimo šilumos, tankio, tankio ir empirinės konstantos vertės

Lentelė 9. Medžiagų masinis degimo greitis $\dot{m}''$ , efektyvioji degimo šiluma $\Delta H_{c,e_{ff}}$ , tan	kis
ho, empirinė konstanta $keta$ Scenarijaus 3 MB modelyje.	

Medžiaga	<i>ṁ</i> ″ <b>(kg/m²⋅s⁻¹)</b>	$\Delta H_{c,e_{ff}}$ (kJ/kg)	ho (kg/m³)	kβ <b>(m-¹)</b>
Medis	0,08316	1966-2268	2100-2130	100
Kartonas	0,00212	2722	2141	100
Poliuretanas	0,00378	3477-4233	2194	100
Polietilenas	0,0039	6562	2184	100
Polipropilenas	0,0027	6532	2174	100

Atsižvelgus į skirtingus medienos tipus MB modelyje ir suvidurkinus jų savybes su betono savybėmis gauname, kad medienos tipui Medis\_1 efektyvioji degimo šiluma lygi maždaug 1966 kJ/kg, o tankis – maždaug 2100 kg/m<sup>3</sup>, medienos tipui Medis\_2, efektyvioji degimo šiluma lygi maždaug 2268 kJ/kg, o tankis – maždaug 2130 kg/m<sup>3</sup>. Atsižvelgus į skirtingus poliuretano tipus MB modelyje ir suvidurkinus jų savybes su betono savybėmis gauname, kad poliuretano tipui Poliuretanas\_1 efektyvioji degimo šiluma lygi maždaug 3477 kJ/kg, poliuretano tipui Poliuretanas\_2, efektyvioji degimo šiluma lygi maždaug 4233 kJ/kg.

#### Kietojo gaisro modeliavimo rezultatai

Lentelėje 10 pateikiamos Scenarijaus 1 KP ir MB modeliuose apskaičiuotos šilumos išsiskyrimo galios, liepsnos aukščio ir gaisro trukmės vertės.

Lentelė 10. Scenarijaus 1 KP ir MB modeliuose apskaičiuotos šilumos išsiskyrimo galios  $\dot{Q}$ , liepsnos aukščio *H* ir gaisro trukmės *t* vertės.

	KP modelis				MB modelis	i
Medžiaga	<b>į (kW)</b>	<i>H</i> (m)	t (min)	<b>į (kW)</b>	<i>H</i> (m)	t <b>(min)</b>
Medis_1	47669,05	15,06	68,72	1544,48	5,29	10320,7
Medis_2	55002,75	15,06	104,72	1782,09	5,29	10520,7
Kartonas	16800,84	6,54	442,91	540,03	2,29	41838,31
Poliuretanas_1	38335,25	9,31	374,38	1242,06	3,27	23945,47
Poliuretanas_2	46669	9,31	374,38	1512,08	3,27	23945,47
Polietilenas	75230,43	9,54	335,75	2437,47	3,35	22889,98
Polipropilenas	51842,59	7,62	452,48	1679,7	2,68	32888,15

Lentelėje 11 pateikiamos Scenarijaus 2 KP ir MB modeliuose apskaičiuotos šilumos išsiskyrimo galios, liepsnos aukščio ir gaisro trukmės vertės.

Lentelė 11. Scenarijaus 2 KP ir MB modeliuose apskaičiuotos šilumos išsiskyrimo galio
$\dot{Q}$ , liepsnos aukščio $H$ ir gaisro trukmės $t$ vertės.

	KP modelis				MB modelis	
Medžiaga	<b>į (kW)</b>	<i>H</i> (m)	t (min)	<b>į (kW)</b>	<i>H</i> (m)	t <b>(min)</b>
Medis_1	39725,4	14,14	82,47	1853,43	5,55	8300,27
Medis_2	45837	14,14	125,67	2138,57	5,55	8500,77
Kartonas	14001,12	6,14	531,47	648,05	2,4	33838,37
Poliuretanas_1	31947	8,74	449,24	1490,52	3,43	19501,2
Poliuretanas_2	38892	8,74	449,24	1814,55	3,43	19500,57
Polietilenas	62693,9	8,95	402,89	2925,05	3,51	18615,21
Polipropilenas	43203,46	7,15	542,96	2015,7	2,81	27401,68

Lentelėje 12 pateikiamos Scenarijaus 3 KP ir MB modeliuose apskaičiuotos šilumos išsiskyrimo galios, liepsnos aukščio ir gaisro trukmės vertės.

	KP modelis				MB modelis	
Medžiaga	<b>Q</b> (kW)	<i>H</i> (m)	t (min)	<b>Q</b> (kW)	<i>H</i> (m)	t (min)
Medis_1	39725,4	14,14	57,73	908,18	4,47	12629,2
Medis_2	45837	14,14	87,96	1047,9	4,47	12829,71
Kartonas	14001,12	6,14	372,03	317,55	1,93	50983,41
Poliuretanas_1	31947	8,74	314,47	730,35	2,76	29025,01
Poliuretanas_2	38892	8,74	314,47	889,13	2,76	29029,75
Polietilenas	62693,9	8,95	282,02	1433,2	2,83	27774,82
Polipropilenas	43203,46	7,15	380,07	987,84	2,26	39929,92

Lentelė 12. Scenarijaus 3 KP ir MB modeliuose apskaičiuotos šilumos išsiskyrimo galio
$\dot{Q}$ , liepsnos aukščio $H$ ir gaisro trukmės $t$ vertės.

Lentelėje 13 pateikiamos Scenarijuose 1-3 KP ir MB modeliuose apskaičiuotos šilumos išsiskyrimo galios, liepsnos aukščio ir gaisro trukmės vertės, kai laikoma, kad dega mediena, kurios tūris sudaro 10 % viso KRA ir betono mišinio tūrio. Skaičiavimuose naudotos didžiausios Lentelėje 6 pateikiamos masinio degimo greičio ir tankio vertės.

Lentelė 13. Scenarijuose 1-3 KP ir MB modeliuose apskaičiuotos šilumos išsiskyrimo galios  $\dot{Q}$ , liepsnos aukščio H ir gaisro trukmės t vertės, kai laikoma, kad dega mediena, kurios tūris sudaro 10 % viso KRA ir betono mišinio tūrio.

	KP modelis				MB modelis	i
Scenarijus	<b>į (kW)</b>	<i>H</i> (m)	t (min)	<b>ḋ (kW)</b>	<i>H</i> (m)	t (min)
Scenarijus 1	55002,75	15,06	34,91	198,01	2,71	34761,9
Scenarijus 2	45837	14,14	41,89	237,62	2,84	28679,85
Scenarijus 3	45837	14,14	29,32	117,61	2,3	41208,37

Lentelėse 10-13 radiologiniu pasekmių požiūriu pavojingiausios liepsnos aukščio ir gaisro trukmės vertės išskirtos pariebintu šriftu. Matome, kad Scenarijuose 1-3 mažiausias liepsnos aukštis ir didžiausia gaisro trukmė yra gaunama kartono degimui MB modelyje. Kai laikoma, kad dega mediena, kurios tūris sudaro 10 % viso KRA ir betono mišinio tūrio, tai mažiausias liepsnos aukštis ir didžiausia gaisro trukmė yra gaunama Scenarijuje 3 MB modelio atveju.

Vertinant gautus gaisro trukmės rezultatus, reikia pažymėti, kad MB modelio atveju gautos labai ilgos gaisro trukmės vertės negali teisingai atvaizduoti lauke vykstančio gaisro trukmės. Priešingai, KP modelio atveju nustatytos gaisro trukmės laikytinos per trumpomis, jei galioja prielaida, kad dega visos kietosios degiosios medžiagos. Šios kietosios medžiagos yra išsisklaidžiusios visame MRAS rūsyje, todėl ugnis jas sudegina per ilgesnį laiko, nei jei jos būtų sukoncentruotos vienoje plokštėje. Tačiau KP modelio atveju nustatytos gaisro trukmės laikytinos artimesnės tikrovei ir labiau tinkamos naudoti vertinant gaisro radiologines pasekmes.

KP modelio atveju mažiausias liepsnos aukštis gaunamas degant kartonui Scenarijuje 3 (žr. Lentelė 12).

#### 4.3. Radioaktyviųjų medžiagų išmetimo įvertinimas

Avarijos sukurto apšvitos šaltinio nustatymui, kad būtų galima įvertinti kiekvieno radionuklido išsiskyrimo dalį kiekvienoje būsenoje, atsižvelgiant į atliekų saugyklos pažaidos mastą, yra naudojamas JAV Energijos departamento vadovas DOE-HDBK-3010-94 [18]. Šiame dokumente apskaičiuojant radioaktyviųjų medžiagų išmetimą taikomas konservatyvus deterministinis metodas.

Bendras apšvitos šaltinis ( $S_T$ ) susideda iš tiesioginio radioaktyviųjų medžiagų išmetimo apšvitos šaltinio ( $S_D$ ) ir radioaktyviųjų medžiagų resuspensijos nulemto apšvitos šaltinio ( $S_R$ ).

$$S_T = S_D + S_R \,, \tag{21}$$

kur

$$S_{\rm D} = MAR \times DR \times ARF \times RF \times LPR \; ; \tag{22}$$

$$S_R = MAR \times DR \times ARR \times RFR \times LPR \times t .$$
<sup>(23)</sup>

Čia:

MAR – radioaktyviosios medžiagos aktyvumas MRAS;

DR – avarijos paveiktos radioaktyviosios medžiagos dalis;

- ARF į orą dujų ir aerozolių pavidalu išmestos avarijos paveiktos radioaktyviosios medžiagos dalis;
- RF galimų įkvėpti dujų ir aerozolių dalis;
- LPR dujų ir aerozolių pernašos įvertinimo koeficientas;
- ARR į orą dujų ir aerozolių pavidalu išmestos avarijos paveiktos radioaktyviosios medžiagos suspenduota dalis;
- RFR galimų įkvėpti dujų ir aerozolių suspenduotos dalies išsiskyrimo greitis;
- t suspendavimo trukmė.

Visuose nagrinėtuose kietojo kuro gaisro scenarijuose daroma konservatyvi prielaida, kad visos radioaktyviosios medžiagos, esančios tose MRAS rūsio sekcijose, į kurias išplinta konkrečiame scenarijuje gaisras, yra apimtos ugnies.

Kiekvienu atveju konservatyviai įvertinama į orą dujų ir aerozolių pavidalu išmestos avarijos paveiktos radioaktyviosios medžiagos dalis (ARF) remiantis dokumente [18] skyriuje 5.2.1.2 pateikta informacija.

Atskirai įvertinamas radionuklidų C-14, Kr-85 ir H-3 išmetimas. Konservatyviai laikoma, kad šiais atvejais ARF = 1. Visas rūsyje esantis kietosiose medžiagose C-14 kiekis dėl degimo turėtų virsti dujiniu CO2. Konservatyviai laikoma, kad ugnis sunaikina visus barjerus trukdančius Kr-85 dujoms patekti į orą. Dokumento [18] skyriuje 4.3.1.2 nurodyta, kad visas H-3 esantis betono vandenyje išsiskiria, kai betono temperatūra pakankamai ilgai yra tarp 200 °C ir 600 °C.

Laikoma, kad visų panaudotų šaltinių konteineriai yra pažeisti.

Lentelėje 14 pateikti MRAS rūsyje esančių RA pagrindiniai radionuklidai ir jų aktyvumai 2020-01-01 datai.

Radionuklidas	T <sub>1/2</sub> , metai	Aktyvumas, Bq	Aktyvumas, % nuo viso
H-3	12,3	4,8E+13	63%
Cs-137	30,0	2,7E+13	35%
Pu-239/Be	2,41E+04	6,0E+11	0,8%
Pu-239	2,41E+04	3,2E+11	0,4%
Sr-90	29,1	3,0E+11	0,4%
C-14	5,73E+03	1,7E+11	0,2%
Co-60	5,27	1,2E+11	0,2%
Ra-226	1,60E+03	1,0E+11	0,1%
Ni-63	96,0	3,3E+10	0,04%
Eu-152	13,537	1,1E+10	0,01%
CI-36	3,01E+05	1,2E+09	0,002%
Kr-85	10,7	3,6E+08	< 0,001%
U-238	4,47E+09	4,1E+07	< 0,001%
TI-204	3,78	7,4E+06	< 0,001%
Pm-147	2,6234	3,1E+06	< 0,001%
Ba-133	10,5	5,3E+05	< 0,001%
Bi-207	38,0	3,4E+05	< 0,001%
Sb-125	2,77	2,6E+05	< 0,001%
Fe-55	2,70	7,3E+04	< 0,001%
Na-22	2,60	3,5E+04	< 0,001%
U-234	2,46E+05	1,4E+03	< 0,001%
Cs-134	2,06	89	< 0,001%
Cd-109	1,27	10	< 0,001%
Ru-106	1,01	0,018	< 0,001%
Ce-144	0,78	0,002	< 0,001%
lš viso:		7,7E+13	

Lentelė 14. Pagrindinių radionuklidų aktyvumas MRAS rūsyje 2020-01-01 datai [13].

Lentelėje 15 pateikti MRAS rūsyje panaudotuose uždaruosiuose šaltiniuose (PUŠ) esantys pagrindiniai radionuklidai ir jų aktyvumai 2020-01-01 datai.

Tipas <sup>(1)</sup>	Radionuklidas <sup>(2)</sup>	T1/2, metai	Aktyvumas, Bq	PUŠ kiekis, vnt.
IA	Pu-239/Be	2,41E+04	6,0E+11	8
	Pu-239	2,41E+04	3,2E+11	2324
	Ni-63	96,0	6,2E+08	1
	Ra-226	1,60E+03	2,7E+07	6
	U-234	2,46E+05	1,4E+03	33
ТА	Cs-137	30,0	2,7E+13	366
	Sr-90	29,1	3,0E+11	1449
	Co-60	5,27	1,2E+11	2167
	Eu-152	13,5	1,1E+10	4
	Kr-85	10,7	2,5E+08	3
	TI-204	3,78	6,9E+06	106
	Pm-147	2,62	3,1E+06	206
	Ba-133	10,5	5,3E+05	2
	Sb-125	2,77	1,4E+05	18
	Fe-55	2,70	4,9E+04	4
	Cs-134	2,06	8,9E+01	2
	Cd-109	1,27	6,7E-02	6
lš viso IA:			9,1E+11	2372
lš viso TA:			2,8E+13	7500
lš viso:			2,9E+13	9872

Lentelė 15. Pagrindinių radionuklidų aktyvumas MRAS rūsio PUŠ 2020-01-01 datai [13].

<sup>(1)</sup> IA - ilgaamžiai radionuklidai, TA - trumpaamžiai radionuklidai

<sup>(2)</sup> Radionuklidai, kurių bendras aktyvumas didesnis už 0,001 Bq

Scenarijaus 1 atveju taikytini redukcijos koeficientai apšvitos šaltinio aktyvumui pateikti Lentelėje 16.

Redukcijos koeficientas	Vertė	Pagrindimas
DR	1	Visos KRA yra apimtos liepsnos, PUŠ praranda sandarumą
ARF	1; 1,00E-02 ir 5,00E-04	5.2.1.2 psl. 5-13; 5.2.1.1 psl. 5-10 ir 4.3.1.2 psl. 4-48 [18]
RF	1	5.2.1.2 psl. 5-13 ir 5.2.1.1 psl. 5-10 [18]
LPF	1	Laikoma, kad visi radionuklidai patenka į aplinką

Lentelė 16. Redukci	jos koeficientai a	pšvitos šaltinio ak	tyvumui Scenarijuje 1.

Panaudojus Lentelėse 14-15 pateiktas aktyvumo vertes ir Lentelėje 16 pateiktus aktyvumo redukcijos koeficientus, išmestų į aplinką radionuklidų aktyvumai Scenarijaus 1 atveju parodyti Pav. 23, o visas apšvitos šaltinio aktyvumas yra lygus 4,8E+13 Bq.

			Direct release			
Radioisotope	Activity (Bq)	DR	ARF	RF	LPF	Released activity (Bq)
<sup>3</sup> H	4.8E+13	1	1.00E+00	1	1	4.8E+13
<sup>14</sup> C	1.7E+11	1	1.00E+00	1	1	1.7E+11
<sup>22</sup> Na	3.5E+04	1	1.00E-02	1	1	3.5E+02
<sup>36</sup> CI	1.2E+09	1	1.00E-02	1	1	1.2E+07
<sup>55</sup> Fe	7.3E+04	1	1.00E-02	1	1	7.3E+02
<sup>60</sup> Co	9.2E+09	1	1.00E-02	1	1	9.2E+07
<sup>63</sup> Ni	3.3E+10	1	1.00E-02	1	1	3.3E+08
<sup>85</sup> Kr	3.0E+08	1	1.00E+00	1	1	3.0E+08
<sup>90</sup> Sr	3.0E+11	1	1.00E-02	1	1	3.0E+09
<sup>106</sup> Ru	1.8E-02	1	1.00E-02	1	1	1.8E-04
<sup>109</sup> Cd	1.0E+01	1	1.00E-02	1	1	1.0E-01
<sup>125</sup> Sb	2.6E+05	1	1.00E-02	1	1	2.6E+03
<sup>133</sup> Ba	5.3E+05	1	1.00E-02	1	1	5.3E+03
<sup>134</sup> Cs	8.9E+01	1	1.00E-02	1	1	8.9E-01
137Cs	5.2E+12	1	1.00E-02	1	1	5.2E+10
<sup>144</sup> Ce	2.0E-03	1	1.00E-02	1	1	2.0E-05
<sup>147</sup> Pm	3.1E+06	1	1.00E-02	1	1	3.1E+04
<sup>152</sup> Eu	1.1E+10	1	1.00E-02	1	1	1.1E+08
<sup>204</sup> TI	7.4E+06	1	1.00E-02	1	1	7.4E+04
<sup>207</sup> Bi	3.4E+05	1	1.00E-02	1	1	3.4E+03
<sup>226</sup> Ra	1.0E+11	1	1.00E-02	1	1	1.0E+09
<sup>234</sup> U	1.4E+03	1	1.00E-02	1	1	1.4E+01
<sup>238</sup> U	4.1E+07	1	1.00E-02	1	1	4.1E+05
<sup>239</sup> Pu	9.2E+11	1	1.00E-02	1	1	9.2E+09
Total activity	5.5E+13					4.8E+13

		Direct release					
Radioisotope	Activity (Bq)	DR	ARF	RF	LPF	Released activity (Bq)	
<sup>60</sup> Co	1.2E+11	1	5.00E-04	1	1	5.8E+07	
90Sr	5.8E+08	1	5.00E-04	1	1	2.9E+05	
137Cs	2.2E+13	1	5.00E-04	1	1	1.1E+10	
Total activity	2.2E+13					1.1E+10	

Total

4.8E+13

### Pav. 23. Scenarijuje 1 išmetamų į orą radionuklidų aktyvumai (viršutinėje dalyje – iš sumaišytų KRA rūsio sekcijose, apatinėje dalyje – iš konteinerių su PUŠ)

(Direct release – tiesioginis išmetimas; Radioisotope – radionuklidas; Activity – aktyvumas; Released activity – Išmetimo aktyvumas; Total activity – bendras aktyvumas)

Scenarijaus 2 atveju taikytini redukcijos koeficientai apšvitos šaltinio aktyvumui pateikti Lentelėje 17.

Redukcijos koeficientas	Vertė	Pagrindimas
DR	1	Visos KRA yra apimtos liepsnos, PUŠ praranda sandarumą
ARF	1; 1,00E-02 ir 5,00E-04	5.2.1.2 psl. 5-13; 5.2.1.1 psl. 5-10 ir 4.3.1.2 psl. 4-48 [18]
RF	1	5.2.1.2 psl. 5-13 ir 5.2.1.1 psl. 5-10 [18]
LPF	1	Laikoma, kad visi radionuklidai patenka į aplinką

Lentelė 17. Redukcijos koeficientai apšvitos šaltinio aktyvumui Scenarijuje 2.

Panaudojus Lentelėse 14-15 pateiktas aktyvumo vertes ir Lentelėje 17 pateiktus aktyvumo redukcijos koeficientus, išmestų į aplinką radionuklidų aktyvumai Scenarijaus 2 atveju parodyti Pav. 24, o visas apšvitos šaltinio aktyvumas yra lygus 4,8E+13 Bq.

		Direct release				
Radioisotope	Activity (Bq)	DR	ARF	RF	LPF	Released activity (Bg)
<sup>3</sup> Н	4.8E+13	1	1.00E+00	1	1	4.8E+13
<sup>14</sup> C	1.7E+11	1	1.00E+00	1	1	1.7E+11
<sup>22</sup> Na	3.5E+04	1	1.00E-02	1	1	3.5E+02
<sup>36</sup> Cl	1.2E+09	1	1.00E-02	1	1	1.2E+07
<sup>55</sup> Fe	7.3E+04	1	1.00E-02	1	1	7.3E+02
<sup>60</sup> Co	9.2E+09	1	1.00E-02	1	1	9.2E+07
<sup>63</sup> Ni	3.3E+10	1	1.00E-02	1	1	3.3E+08
<sup>85</sup> Kr	3.0E+08	1	1.00E+00	1	1	3.0E+08
<sup>90</sup> Sr	3.0E+11	1	1.00E-02	1	1	3.0E+09
<sup>106</sup> Ru	1.8E-02	1	1.00E-02	1	1	1.8E-04
<sup>109</sup> Cd	1.0E+01	1	1.00E-02	1	1	1.0E-01
<sup>125</sup> Sb	2.6E+05	1	1.00E-02	1	1	2.6E+03
<sup>133</sup> Ba	5.3E+05	1	1.00E-02	1	1	5.3E+03
<sup>134</sup> Cs	8.9E+01	1	1.00E-02	1	1	8.9E-01
<sup>137</sup> Cs	5.2E+12	1	1.00E-02	1	1	5.2E+10
<sup>144</sup> Ce	2.0E-03	1	1.00E-02	1	1	2.0E-05
<sup>147</sup> Pm	3.1E+06	1	1.00E-02	1	1	3.1E+04
<sup>152</sup> Eu	1.1E+10	1	1.00E-02	1	1	1.1E+08
<sup>204</sup> TI	7.4E+06	1	1.00E-02	1	1	7.4E+04
<sup>207</sup> Bi	3.4E+05	1	1.00E-02	1	1	3.4E+03
<sup>226</sup> Ra	1.0E+11	1	1.00E-02	1	1	1.0E+09
<sup>234</sup> U	1.4E+03	1	1.00E-02	1	1	1.4E+01
238 <sub>U</sub>	4.1E+07	1	1.00E-02	1	1	4.1E+05
<sup>239</sup> Pu	9.2E+11	1	1.00E-02	1	1	9.2E+09
Total Activity	5.5E+13					4.8E+13

		Direct release					
Radioisotope	Activity (Bq)	DR	ARF	RF	LPF	Released activity (Bg)	
<sup>60</sup> Co	5.6E+08	1	5.00E-04	1	1	2.8E+05	
<sup>90</sup> Sr	5.8E+08	1	5.00E-04	1	1	2.9E+05	
<sup>137</sup> Cs	4.1E+11	1	5.00E-04	1	1	2.1E+08	
Total Activity	4.1E+11					2.1E+08	

#### Pav. 24. Scenarijuje 2 išmetamų į orą radionuklidų aktyvumai (viršutinėje dalyje – iš sumaišytų KRA rūsio sekcijose, apatinėje dalyje – iš konteinerių su PUŠ)

(Direct release – tiesioginis išmetimas; Radioisotope – radionuklidas; Activity – aktyvumas; Released activity – Išmetimo aktyvumas; Total activity – bendras aktyvumas)

Scenarijų 1 ir 2 radiologinės pasekmės labai panašios, nes pagrindinis skirtumas tarp jų yra, tai, Scenarijuje 2 liepsna neapima MRAS rūsio 6-je sekcijoje esančio konteinerio su Cs-137

Scenarijaus 3 atveju taikytini redukcijos koeficientai apšvitos šaltinio aktyvumui pateikti Lentelėje 18.

Redukcijos koeficientas	Vertė	Pagrindimas
DR	0,7	Dega tik 70% KRA, konteineriai su PUŠ nepraranda sandarumo
ARF	1; 1,00E-02 ir 5,00E-04	5.2.1.2 psl. 5-13; 5.2.1.1 psl. 5-10 ir 4.3.1.2 psl. 4-48 [18]
RF	1	5.2.1.2 psl. 5-13 ir 5.2.1.1 psl. 5-10 [18]
LPF	1	Laikoma, kad visi radionuklidai patenka į aplinką

|--|

Panaudojus Lentelėse 14-15 pateiktas aktyvumo vertes ir Lentelėje 18 pateiktus aktyvumo redukcijos koeficientus, išmestų į aplinką radionuklidų aktyvumai Scenarijaus 3 atveju parodyti Pav. 25, o visas apšvitos šaltinio aktyvumas yra lygus 3,4E+13 Bq.

			Direct release			
Radioisotope	Activity (Bq)	DR	ARF	BF	LPF	Released activity (Bq)
°н	3.4E+13	1	1.00E+00	1	1	3.4E+13
<sup>14</sup> C	1.2E+11	1	1.00E+00	1	1	1.2E+11
<sup>22</sup> Na	2.5E+04	1	1.00E-02	1	1	2.5E+02
3°CI	8.4E+08	1	1.00E-02	1	1	8.4E+06
<sup>ss</sup> Fe	5.1E+04	1	1.00E-02	1	1	5.1E+02
<sup>60</sup> Co	6.4E+09	1	1.00E-02	1	1	6.4E+07
**Ni	2.3E+10	1	1.00E-02	1	1	2.3E+08
85 Kr	2.1E+08	1	1.00E+00	1	1	2.1E+08
<sup>90</sup> Sr	2.1E+11	1	1.00E-02	1	1	2.1E+09
108Ru	1.3E-02	1	1.00E-02	1	1	1.3E-04
109Cd	7.3E+00	1	1.00E-02	1	1	7.3E-02
125Sb	1.8E+05	1	1.00E-02	1	1	1.8E+03
155 Ba	3.7E+05	1	1.00E-02	1	1	3.7E+03
154Cs	6.3E+01	1	1.00E-02	1	1	6.3E-01
137Cs	3.6E+12	1	1.00E-02	1	1	3.6E+10
<sup>144</sup> Ce	1.4E-03	1	1.00E-02	1	1	1.4E-05
147 Pm	2.2E+06	1	1.00E-02	1	1	2.2E+04
<sup>152</sup> Eu	7.7E+09	1	1.00E-02	1	1	7.7E+07
204TI	5.2E+06	1	1.00E-02	1	1	5.2E+04
<sup>207</sup> Bi	2.4E+05	1	1.00E-02	1	1	2.4E+03
<sup>226</sup> Ra	7.0E+10	1	1.00E-02	1	1	7.0E+08
234U	1.0E+03	1	1.00E-02	1	1	1.0E+01
238U	2.9E+07	1	1.00E-02	1	1	2.9E+05
239Pu	6.4E+11	1	1.00E-02	1	1	6.4E+09
Total Activity	3.8E+13					3.4E+13
	Activita		Direct release			
Radioisotope	(Bq)	DR	ARF	BF	LPF	Released activity (Bg)
<sup>60</sup> Co	0.0E+00	1	5.00E-04	1	1	0.0E+00
<sup>90</sup> Sr	0.0E+00	1	5.00E-04	1	1	0.0E+00
137Cs	0.0E+00	1	5.00E-04	1	1	0.0E+00
Total Activity	0.0E+00					0.0E+00

### Pav. 25. Scenarijuje 3 išmetamų į orą radionuklidų aktyvumai (viršutinėje dalyje – iš sumaišytų KRA rūsio sekcijose, apatinėje dalyje – iš konteinerių su PUŠ)

(Direct release - tiesioginis išmetimas; Radioisotope - radionuklidas; Activity - aktyvumas;

Released activity – Išmetimo aktyvumas; Total activity – bendras aktyvumas)

#### 4.4. Radiologinių padarinių vertinimas

Jeigu lėktuvas nukristų ir sudužtų ant MRAS rūsio, dėl smūgio ir gaisro į atmosferą galėtų būti pakelta ir aplinkoje pasklistų avarijos Scenarijaus 1 (toliau – Sc\_1) arba Scenarijaus 2 (toliau – Sc\_2) (neapimti 6 sekcijos PUŠ), arba Scenarijaus 3 (toliau – Sc\_3) analizės metu nustatyta MRAS rūsyje esančių radioaktyviųjų medžiagų dalis. MRAS rūsyje esantys radiologiškai reikšmingi radionuklidai (žr. Lentelę 14) [13] (kurių bendras aktyvumas 2020.01.01 datai yra 7,73E+13 Bq) su MRAS rūsio nuolaužomis gali būti išbarstyti teritorijoje aplink saugyklą bei dulkių (aerozolių) ir/ar dujų pavidalu su dūmų šleifu gali būti pernešti ir nusėsti teritorijose už saugyklos ribų.

Vertinant radiologinius avarijos padarinius atsižvelgiama tik į radiologiškai svarbiausius radionuklidus, pateiktus Lentelėje 14, kadangi kiekvieno kito radionuklido (kurių pilną sąrašą galima rasti MRAS Galutinio eksploatacijos nutraukimo plano B priede [13]) aktyvumas MRAS rūsyje nesiekia 0,001 Bq, o indėlis į numatomas apšvitos dozes, atsižvelgiant į radionuklido radiotoksiškumą bei spinduliuotės tipą, yra daug mažesnis negu 0,001 %.

Avarijos atveju didelės apšvitos dozės potencialiai gali būti patirtos jau per pirmąsias kelias valandas po avarijos, todėl labai svarbu iš anksto joms pasiruošti ir įvertinti galimus lėktuvo kritimo avarijos radiologinius padarinius, įvertinti numatomas taršos teritorijas nagrinėjant įvairius galimus avarijos masto ir vystymosi scenarijus. Kad apsaugomųjų ir avarijos padarinių šalinimo veiksmų taikymas būtų kuo efektyvesnis, yra išskiriamos kelios radiologinės avarijos fazės [31]:

- ankstyvoji tai laikotarpis nuo radionuklidų išmetimo į aplinką pradžios iki pabaigos ir radioaktyviojo pėdsako susidarymo. Šios fazės trukmė – nuo kelių valandų iki keliolikos parų;
- vėlyvoji tai laikotarpis po avarijos, kuris tęsiasi tol, kol atsisakoma apsaugomųjų veiksmų ir neribojama gyventojų ūkinė bei kitokia veikla. Trukmė – savaitės, mėnesiai, keleri ir daugiau metų. Tai priklauso nuo avarijos masto.

Modeliavimo metodais įvertinta ar į radioaktyvųjį debesį patekę arba netoliese esantys žmonės (avarijos liudininkai, MRAS darbuotojai, ugniagesiai, gelbėtojai, gyventojai) bei gyventojai, pastoviai gyvenantys užterštose teritorijose, galėtų gauti apšvitos dozes, dėl kurių reikėtų taikyti skubius apsaugomuosius veiksmus.

Nagrinėti kritinių žmonių grupių išorinės ir vidinės apšvitos keliai bei radiologiniu požiūriu svarbiausieji žmonių grupių lokacijos, trukmės, elgsenos ir mitybos parametrai yra prateikti Lentelėje 19. Atliekant vertinimą buvo vadovaujamasi proporcingumo požiūriu ir pirmoje eilėje buvo vertinama patirta efektinė apšvitos dozė, kuri turėtų parodyti ar yra tikslinga atlikti detalesnę žmonių apšvitos dozių analizę. Dozių vertinimo metodika, skaičiavimo formulės ir taikytos svarbiausiųjų parametrų vertės yra detalizuotos žemiau pateiktuose skyriuose.

		Kritinė žmonių grupė							
Apšvitos kelias / parametras	Ugniagesys	MRAS darbuotojas	Gelbėtojas	Gyventojas - avarijos liudininkas	Gyventojas už MRAS SAZ ribos				
Išorinė apšvita nuo liepsnos/dūmų stulpo	+ Atstumas nuo liepsnos/dūmų stulpo - 50 m, trukmė - 1 val.	+ Atstumas nuo liepsnos/dūmų stulpo - 100 m, trukmė - 1 val.	+ Atstumas nuo liepsnos/dūmų stulpo - 20 m, trukmė - 1 val.	+ Atstumas nuo liepsnos/dūmų stulpo - 200 m, trukmė- 1 val.	-				
Išorinė apšvita dėl panirimo į radionuklidais prisotintą dūmų debesį (šleifą)	+ Atstumas nuo gaisro židinio - 100 m; trukmė- 1 val.	+ Atstumas nuo gaisro židinio -100 m; trukmė - 5 min.	+ Atstumas nuo gaisro židinio - 100 m; trukmė - 1 val.	+ Atstumas nuo gaisro židinio - 200 m; trukmė- 1 val.	+ Atstumas nuo gaisro židinio – 2,7 km ir 3,2 km (artimiausios pastovios gyvenvietės yra už 2,7 km: Antakalniai į pietus ir Maskviškės į pietvakarius nuo MRAS [44], už 3,2 km yra Draučių gyvenvietė šiaurės- vakarų kryptimi); trukmė - debesies slinkimo trukmė.				
Vidinė apšvita dėl įkvėptųjų radionuklidų iš dūmų debesies (šleifo)	+ Atstumas nuo gaisro židinio - 100 m; trukmė- 1 val.	+ Atstumas nuo gaisro židinio - 100 m; trukmė - 5 min.	+ Atstumas nuo gaisro židinio - 100 m; trukmė - 1 val.	+ Atstumas nuo gaisro židinio - 200 m; trukmė - 1 val.	+ Atstumas nuo gaisro židinio – 2,700 m ir 3200 m; debesies slinkimo trukmė				
Išorinė apšvita nuo radioaktyviųjų iškritų	-	-	+ Atstumas nuo gaisro židinio - 200 m; trukmė- 10 val.	+ Atstumas nuo gaisro židinio - 200 m; trukmė- 1 val.	+ Atstumas nuo gaisro židinio - 2700 m ir 3200 m; trukmė - 10 val., 7 paros, 1 metai, 50 metų.				

Lentelė 19. Numatomi kritinių žmonių grupių apšvitos keliai ir žmonių lokacijos, trukmės, elgsenos ir mitybos svarbiausieji parametrai.

Vidinė apšvita dėl prarytųjų radionuklidų su geriamuoju vandeniu iš šulinio ir dėl žemės ūkio naudmenų laistymo užterštu šulinio vandeniu	-	-	-	-	+ Atstumas nuo gaisro židinio gruntinio vandens tekėjimo kryptimi (šiaurės-vakarų) – 3,2 km (artimiausia gyvenvietė ŠV kryptimi - Draučiai už 3,2 km nuo MRAS [44]); trukmė - 50 metų.
Vidinė apšvita dėl prarytųjų radionuklidų (iškritų kilmės) su vietinės kilmės maisto produktais	-	-	-	-	+ Atstumas nuo gaisro židinio – 2,7 km ir 3,2 km; trukmė - 50 metų.
Vidinė apšvita dėl įkvėptųjų radionuklidų (iškritų kilmės) resuspenduotų nuo užteršto paviršiaus	-	-	-	-	+ Atstumas nuo gaisro židinio - 2700 m ir 3200 m; trukmė - 50 metų.
Metų dalis, kurią gyventojas praleidžia namuose					0,5 [35] (apšvitos nuo iškritų lauke gaunama dalis 0,14 [34]; apsaugos nuo lauko dulkių efektyvumas- 0,55 [34])
Kvėpavimo sparta [33]	2,66E-4 m <sup>3</sup> /s				
Metų dalis, kurią gyventojas praleidžia dirbdamas vietiniame ūkyje atvirame lauke					0,5 [35] (nėra ekranavimo)
Metų dalis, kurią gyventojas yra išvykęs					0 [35]
Vandens iš šulinio suvartojimas					600 l/metus [33]
Vietinės kilmės užteršto pieno suvartojimas					250 l/metus [33]

Vietinės kilmės užterštos mėsos suvartojimas		100 kg/metus [33] Jautienos – 50 kg/metus
		Kiaulienos – 50 kg/metus
Vietinės kilmės lapinių daržovių suvartojimas		45 kg /metus [34]
Vietinės kilmės šakniavaisių suvartojimas		15 kg /metus [34]
Vietinės kilmės bulvių suvartojimas		70 kg /metus [34]
Vietinės kilmės grūdų suvartojimas		95 kg /metus [34
Žuvies iš vietinio ežero (už 5 km nuo MRAS) suvartojimas		5,4 kg /metus [34]
Galvijų pašarų struktūra		Mėsiniai [35]: vandens - 50 l/d, žolės/siloso – 14 kg/d, grūdų – 54 kg/d, dirvožemio – 0,5 kg/d. Pieniniai [35]: vandens - 160 l/d, žolės/siloso – 44 kg/d, grūdų – 11 kg/d, dirvožemio – 0,5 kg/d.

Sprendimai dėl apsaugomųjų veiksmų taikymo įvykus radiologinei ar branduolinei avarijai priimami atsižvelgus į numatomus avarijos padarinius, siekiant [31]:

- apsaugoti gyventojus nuo avarinės apšvitos sukeliamų nulemtųjų jonizuojančiosios spinduliuotės reiškinių, taikant skubius apsaugomuosius ir avarijos padarinių šalinimo veiksmus iki arba iš karto po radioaktyviųjų medžiagų išmetimo į aplinką ar jonizuojančiosios spinduliuotės padidėjimo;
- sumažinti atsitiktinių jonizuojančiosios spinduliuotės sukeltų reiškinių atsiradimo riziką (vėžio ir sunkių paveldėjimo reiškinių), taikant skubius, ankstyvuosius apsaugomuosius ir avarijos padarinių šalinimo veiksmus.

Priklausomai nuo avarijos radiologinių padarinių, numatomos avarinės taršos zonavimas ir apsaugomųjų veiksmų taikymas yra rekomenduojamas tarptautiniuose dokumentuose [2, 32] ir yra apibrėžtas Lietuvos higienos normoje HN 99:2011 [31].

Remiantis [31] bendrieji apsaugomosios veiklos taikymo lygiai (BAVTL) taikomi bet kokiomis aplinkybėmis, siekiant išvengti arba sumažinti nulemtuosius jonizuojančiosios spinduliuotės sukeltus reiškinius, kurie pateikti Priedo 1 lentelėje P1. O BAVTL ir ankstyvieji apsaugomieji bei avarijos padarinių šalinimo veiksmai, kurie būtų taikomi siekiant sumažinti atsitiktinius jonizuojančiosios spinduliuotės sukeltus reiškinius avarinės apšvitos atveju, nurodyti Priedo 1 lentelėje P2. Taip pat operatyvieji apsaugomosios veiklos taikymo lygiai (OAVTL) pateikti Priedo 1 lentelėje P3 [31].

Techninėje specifikacijoje [1] suformuluoti uždaviniai: nustatyti radiologinio užterštumo teritorijas (parengti taršos žemėlapius) ir įvertinti avarijos nulemtų gyventojų apšvitos dozių priklausomybę nuo atstumo iki radionuklidų išmetimo vietos, pagal kurias galima būtų planuoti gyventojų apsaugomųjų veiksmų taikymą. Tuo tikslu, konservatyviems ir realistiškiems hipotetinės avarijos vystymosi scenarijams buvo įvertinti:

- MRAS esančių radiologiškai svarbiausiojo radionuklido <sup>137</sup>Cs iškritų tankio pasiskirstymas (2D) teritorijoje 100 m –50 km nuo saugyklos iš karto po avarijos, Bq/m<sup>2</sup>;
- Išorinės apšvitos dozės galios pasiskirstymas (2D) 1 m aukštyje nuo paviršiaus teritorijoje 100 m – 50 km nuo saugyklos dėl iškritų iš karto po avarijos, mSv/h. Prognozuojama išorinės apšvitos dozės galia (mSv/h) dėl ant žemės paviršiaus tuojau po iškritimo nusėdusių radionuklidų. Pateikiama suminė svarbių radionuklidų spinduliuočių dozės galia;
- Išorinės apšvitos dozės nuo debesies priklausomybė nuo atstumo (1D) pavėjui 100 m –50 km, mSv išorinės apšvitos dozė žmogui dėl panirimo į praslenkantį radionuklidais praturtintą debesį. Apytikslę vidutinę išorinės apšvitos dozės galią (mSv/h) galima apskaičiuoti, padalinus dozės vertę (mSv) iš debesies slinkimo trukmės (h);
- Išorinės apšvitos dozės per pirmąsias 10 valandų, 7 paras, 1 metus ir 50 metų priklausomybė nuo atstumo (1D) pavėjui 100 m – 50 km, mSv –išorinės apšvitos dozė dėl iškritų;

- Dėl radioaktyviųjų iškritų patiriamos žmogaus išorinės ir vidinės apšvitos efektinės dozės per 50 metu priklausomybė nuo atstumo (1D pavėjui 100 m 50 km), mSv. Tai dozių suma (mSv): išorinės apšvitos nuo iškritų ir efektinės vidinės apšvitos dozės dėl su maistu į suaugusio žmogaus organizmą patekusių radionuklidų per 50 metų po avarijos bei antrinio radionuklidų pakėlimo procesų lemtų įkvėptųjų radionuklidų vidinės apšvitos efektinės dozės. Daroma prielaida, kad gyventojas gyvena kaimo tipo gyvenvietėje, o jo mityba atitinka Lietuvos suaugusiems gyventojams būdingą maisto vartojimą ir nebuvo taikytos jokios apsaugomosios priemonės.
- Dėl užteršto gruntinio vandens naudojimo (šulinio taršos) gyventojo patiriama maksimali metinė efektinė dozė ir radiologiškai reikšmingiausiųjų radionuklidų didžiausi savitieji aktyvumai piene, mėsoje, geriamajame vandenyje, pašaruose ir daržovėse artimiausioje gyvenvietėje gruntinio vandens tekėjimo kryptimi už MRAS sanitarinės apsaugos zonos ribų (3,2 km), Bq/kg;
- Išorinės apšvitos dozės galia avarijos liudininkui ar ugniagesiui (gelbėtojui) nuo radioaktyviųjų dūmų šleifo, esančiam už 5-200 m (suskaičiuota diskretiems atstumams iš šio intervalo, kad duomenis dominančiam atstumui būtų galima gauti interpoliacijos būdu) nuo degančios saugyklos po lėktuvo avarijos, mSv/h. Išorinės apšvitos dozę mSv avarijos liudininkams ar gelbėtojams gaunama dozės galios vertę padauginus iš numatomos misijos trukmės.

Visos dozės yra vertinamos suaugusiems Lietuvos gyventojams, išskyrus vidinės apšvitos atvejus, kai pažymima, kad tai vaisiaus (žmogaus embriono) dozė, gauta per visą tipinį nėštumo periodą. Laikyta, kad išorinės apšvitos dozės suaugusiajam ir vaisiui yra vienodos.

Taikyta apšvitos dozių vertinimo metodika, atitinka TATENA publikacijoje pateiktas rekomendacijas [33]. Išorinės apšvitos nuo panirimo į debesį ir nuo iškritų bei vidinės apšvitos dozių skaičiavimai dėl įkvėptųjų iš debesies ir prarytųjų su maistu radionuklidų atlikti su PC COSYMA 2 programos kodu. PC COSYMA 2 yra verifikuota ir validuota programa, laikoma standartine rekomenduojama radiologinių padarinių vertinimo programa Europos Sąjungos šalims [34]. Geriamojo vandens iš šulinio taršos scenarijus gyventojams už Maišiagalos saugyklos SAZ ribų įvertintas RESRAD-OFFSITE 3.2 programa [35], taikant prielaidą, kad po lėktuvo avarijos MRAS rūsys visiškai prarado sandarumą (suiro visi inžineriniai barjerai). RESRAD-OFFSITE skaičiavimuose naudoti tokie patys geologinę aplinką apibūdinantys įvesties duomenys, kaip ir buvo taikyti periodiniame saugyklos saugos analizės atnaujintame dokumente [36]. Išorinės apšvitos dozės galia žmonėms, esantiems netoliese radionuklidais praturtinto dūmų šleifo, įvertinta su MicroShield 7 programa.

Radionuklidų sklaidos atmosferoje vertinime konservatyviems scenarijams taikomos prielaidos ir parametrai, kuriems esant tam tikru atstumu gaunama blogiausia radiologinė situacija. Nepalankiausiai sklaida galėtų vykti scenarijuje Sc\_1 išmestai radionuklidų daliai dviem atvejais: esant F atmosferos stabilumo klasei gautume didžiausios koncentracijos, bet labai siaurą taršos arealą (toliau šis scenarijus vadinamas KON\_F), arba D klasės atveju didelės koncentracijos platesnį arealą (toliau šis scenarijus vadinamas KON\_D).

Išnagrinėti abu konservatyvūs KONS\_F ir KONS\_D radionuklidų sklaidos scenarijai su jiems būdingais parametrais laikant, kad žmonės būtų pavėjinėje MRAS pusėje be apsaugos priemonių.

Radionuklidų sklaidos atmosferoje labiausiai tikėtinam scenarijui (toliau šis scenarijus vadinamas TIK\_D) sudarytas naudojant galimų scenarijų spektro parametrų geometrinius vidurkius ir duomenis iš Ignalinos AE meteorologinių matavimų stoties. Papildomai skaičiavimai atlikti ir keliems realistiniams scenarijams REAL\_D ir MED\_D, kurie atspindi galimą skirtingą MRAS rūsio pažeidimo mastą (REAL\_D) su įvairių degiųjų medžiagų rinkiniu (plastmasėmis ir mediena) arba buvusio MRAS darbuotojo ekspertinio vertinimo atvejį MED\_D, kad 10% MRAS rūsio tūrinio sudaro mediena, kuri yra dominuojanti degi medžiaga rūsyje.

Žemiau pateikiama metodika, prielaidos ir parametrai, kurie buvo taikyti vertinimuose.

#### 4.4.1.Ankstyvoji avarijos fazė

Ankstyvojoje avarijos fazėje yra skaičiuojamos šie apšvitos dozių sandai dėl į atmosferą išmestų Maišiagalos radioaktyviųjų atliekų saugykloje esančių radionuklidų:

- Išorinės apšvitos dozės galia avarijos liudininkams ar ugniagesiams (gelbėtojams) nuo ugnies stulpo ir radioaktyviųjų dūmų šleifo (*R<sub>gaisr</sub>*), mSv/h;
- (2) Išorinės apšvitos dozė dėl žmogaus panirimo į radionuklidais prisotintą dūmų šleifą (air submersion) (*H*<sub>debes\_i</sub>), mSv;
- (3) Kaupiamoji efektinė dozė dėl iš debesies įkvėptųjų radionuklidų (*H*<sub>ikv,50i</sub>), mSv;
- (4) Kaupiamoji efektinė dozė dėl įkvėptųjų resuspenduotų radionuklidų (*H<sub>ikv\_res,50i</sub>*) (dėl antrinio nusėdusių radionuklidų pakėlimo), mSv;
- (5) Išorinės apšvitos dozė nuo ant žemės paviršiaus nusėdusių radionuklidų (*D*<sub>iskrit\_i</sub>), mSv.

# Išorinės apšvitos dozės galios avarijos liudininkui, MRAS darbuotojui, ugniagesiui ar gelbėtojui nuo radioaktyviųjų dūmų šleifo vertinimas

Netrukus po lėktuvo kritimo ant MRAS galimai kiltų lėktuvo kuro gaisras, o jam sudegus ir pradėjus degti MRAS rūsyje esančioms degioms radioaktyviosioms medžiagoms galima tikėtis, kad su ugnies bei dūmų stulpu į atmosferą pakiltų rūsyje esantys radionuklidai. Tokiam avarijos gaisro scenarijui įvertinta išorinės apšvitos dozės galią *R*<sub>gaisr</sub> (mSv/h) avarijos liudininkui, MRAS darbuotojui, ugniagesiui ar gelbėtojui nuo ugnies stulpo ir radioaktyviųjų dūmų šleifo, esančiam už 5-500 m nuo degančios saugyklos rūsio krašto. Išorinės apšvitos dozė mSv avarijos liudininkams ar gelbėjimo tarnybų darbuotojams apskaičiuojama šią dozės galios vertę padauginant iš numatomos buvimo šalia gaisravietės (misijos) trukmės.

Dozės galios vertinimai atlikti MicroShield® 7 (Grove Software, Inc.) kompiuterine programa [38]. MicroShield® programą galima panaudoti modeliuoti gama spindulių ekranavimo efektus ir apskaičiuoti apšvitos dozes 16-os dažniausiai sutinkamų geometrinių tipų konfigūracijoms. Norint atlikti skaičiavimus,

visų pirma reikia aprašyti gama spindulių šaltinio, ekranuojančios aplinkos ir detektoriaus padėties geometriją (išdėstymą erdvėje ir nuotolį tarp gama šaltinio ir detektoriaus, šaltinio matmenis ir tarp šaltinio ir detektoriaus esančių ekranuojančių medžiagų matmenis, orientaciją ir padėtį. Lėktuvo kritimo atveju laikyta, kad šaltinis (ugnies stulpas ir dūmų šleifas) būtų tūrinio stačiakampio formos, užpildyto radionuklidais praturtintu oru. Dūmų šleifo tūrinio stačiakampio pagrindo matmenys atitinka MRAS rūsio vidinius matmenis 4,6 m x 14,6 m. Remiantis formule (25) dėl karštų dūmų plūdrumo įvertintas vidutinis dūmų šleifo pakėlimo aukštis yra 169 m. Žmogaus išorinės apšvitos dozės galia buvo vertinta skirtingu atstumu nutolusiuose pažemės taškuose šalia oru su radionuklidais užpildyto 4,6 x 14,6 x 169 m tūrinio stačiakampio (žr Pav. 26).

Laikoma, kad visų kritinių grupių žmonės, išskyrus gyventojus už MRAS SAZ ribos, patirtų išorinę apšvitą būdami netoliese radionuklidais praturtinto liepsnos/dūmų stulpo. Manoma, kad ši apšvita truktų 1 val. Reikia išskirti skirtingų kritinių grupių žmonėms tikėtiną vidutinį atstumą nuo MRAS rūsio krašto, kur jie išbūtų tą valandą.

Ugniagesiams, gesinant radioaktyviųjų atliekų degimo gaisrą, galėtų tekti prie ugnies židinio (MRAS rūsio) priartėti ir labai arti (iki kelių metrų), tačiau labai tikėtina, kad tokie epizodai truktų trumpai, o didžiąją dalį laiko jie galėtų darbuotis pasitraukę į saugų atstumą. Laikoma, kad, vidutinis atstumas nuo dūmų stulpo krašto, kuris sutampa su MRAS rūsio kraštu, per tą valandą ugniagesiams būtų 50 metrų. Tuo tarpu gelbėtojams gali tekti ilgalaikius gelbėjimo darbus vykdyti ir gana arti ugnies židinio. Todėl, vertinant gelbėtojų apšvitos dozes šalia dūmų/liepsnos stulpo taikytas vidutinis 20 m atstumas. Budinčio MRAS darbuotojo postas (administracinis pastatas) yra maždaug už 340 metrų, o artimiausias dezaktyvavimo pastatas už 90 m. MRAS darbuotojas nėra motyvuotas būti labai arti gaisravietės ir, greičiausiai, jis atliktų pagalbinius darbus gesinant gaisrą ar dorojantis su avarijos padariniais, todėl jam skaičiavimuose taikytas 100 m. vidutinis atstumas nuo liepsnos/dūmų stulpo. Eilinis gyventojas avarijos metu atsitiktinai galėtų būti netoliese MRAS rūsio (rinkti miško gėrybes, dirbti, tiesiog poilsiauti miške) arba susidomėjęs įvykiu prieiti arčiau saugyklos. Teoriškai jis galėtų prieiti iki pat tvoros (jeigu ji išliktų po avarijos), esančios už 10 m nuo saugyklos rūsio krašto. Tačiau, turint omenyje numatomą didelę gaisro kaitrą ir dūmingumą bei gelbėjimo tarnybų teritorijos kontrolę, manytina, kad vidutiniškai toks gyventojas valandos bėgyje galėtų būti už 200 m nuo degančio MRAS rūsio dūmų šleifo.

Skaičiuojant laikyta, kad Scenarijais 1, 2 ar 3 įvertinti radionuklidų kiekiai  $A_i$  (aktyvumas) tolygiai išmetami į atmosferą per visą gaisro trukmę pilnai susimaišę iš viso saugyklos rūsio paviršiaus  $S_s$  (vidiniai matmenys 4,6 m x 14,6 m,  $S_s$ =67,16 m<sup>2</sup>). Vidutinis *i*-ojo radionuklido tūrinis aktyvumas  $C_i$  (Bq/m<sup>3</sup>) dūmų šleife lygus:

$$C_i = \frac{A_i}{t_s v_u \cdot s_s} \cdot$$
(24)

Čia:

Ci	Vidutinis <i>i</i> -ojo radionuklido tūrinis aktyvumas dūmų šleife, Bq/m <sup>3</sup> ;
Ai	Scenarijui įvertintas bendras į atmosferą išmetamų radionuklidų kiekis A <sub>i</sub> , Bq;
ts	Scenarijui įvertinta bendra radionuklidų išmetimo (KRA gaisro) trukmė, s;
Vu	Scenarijui įvertintas pažemėje (z=1) vidutinis dūmų vertikalaus kilimo aukštyn greitis, m/s;
Ss	MRAS rūsio paviršiaus (vidinio) plotas, m <sup>2</sup>

Dūmų vertikalaus kilimo aukštyn greitis  $v_u$  apskaičiuotas panaudojant empirinę formulę [37]:

$$v_u = 1.94 \left[ \frac{g}{c_p \cdot T_a \cdot \rho_{oro}} \right]^{1/3} Q^{1/3} \cdot z^{-1/3}.$$
 (25)

Čia:

<b>g</b> i	Laisvojo kritimo pagreitis, 9,8 m/s <sup>2;</sup>
Cp	Oro savitoji šiluminė talpa, 1 kJ/(K*kg) [37];
T <sub>a</sub>	Aplinkos oro temperatūra, 293 K;
ρ <sub>oro</sub>	Oro tankis, 1,2 kg/m³[37];
Ζ	Vertinimo taško aukštis virš degimo paviršiaus, 1 m.



## Pav. 26. Žmogaus, esančio šalia radionuklidais praturtinto dūmų šleifo, išorinės apšvitos vertinimo schema.

Šiam scenarijui šaltinio ekranavimas yra mažai tikėtinas, todėl į jį neatsižvelgiama. Šaltinio sukuriamos išorinės apšvitos dozės galios skaičiavimai atlikti pasirinktuose taškuos, nutolusiuose diskrečiais atstumais nuo ugnies stulpo krašto: 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400 ir 500 m. Bet kokią norimą vertę dominančiam atstumui iš šio intervalo galima gauti interpoliuojant duomenis. Su MicroShield 7

programa įvertinti dozės galios koeficientai esant 1 Bq/cm<sup>3</sup> aktualių radionuklidų (gama spinduolių) tūriniam aktyvumui pateikti Lentelėje 20.

Lentelė 20. MicroShield 7 programa įvertinta gama spinduliuotės dozės galia mSv/h šalia radionuklidais praturtinto dūmų šleifo, esant 1 Bq/cm<sup>3</sup> reikšmingiausių radionuklidų tūriniam aktyvumui.

Atstumas nuo dūmų	Dozės galia esant 1 Bq/cm <sup>3</sup> radionuklido tūriniam aktyvumui, mSv/h								
stulpo krašto, m	Co-60	Cs-137	Cs-134	Kr-85	Ra-226	Eu-152	Pu-239		
5	4,1E-03	1,1E-03	2,9E-03	4,4E-06	1,8E-05	2,1E-03	1,3E-06		
7	3,3E-03	8,5E-04	2,3E-03	3,4E-06	1,3E-05	1,6E-03	7,2E-07		
10	2,5E-03	6,4E-04	1,7E-03	2,6E-06	9,7E-06	1,2E-03	3,0E-07		
15	1,7E-03	4,4E-04	1,2E-03	1,8E-06	6,7E-06	8,6E-04	8,4E-08		
20	1,3E-03	3,3E-04	9,0E-04	1,4E-06	5,1E-06	6,5E-04	2,7E-08		
30	8,2E-04	2,1E-04	5,8E-04	8,9E-07	3,5E-06	4,2E-04	5,3E-09		
40	5,9E-04	1,5E-04	4,2E-04	6,4E-07	2,6E-06	3,0E-04	2,6E-09		
50	4,5E-04	1,2E-04	3,2E-04	4,9E-07	2,0E-06	2,2E-04	1,9E-09		
75	2,5E-04	6,6E-05	1,8E-04	2,8E-07	1,2E-06	1,3E-04	1,1E-09		
100	1,6E-04	4,2E-05	1,2E-04	1,8E-07	7,3E-07	8,0E-05	6,7E-10		
150	7,8E-05	2,0E-05	5,4E-05	8,3E-08	3,2E-07	3,7E-05	2,8E-10		
200	4,2E-05	1,0E-05	2,8E-05	4,2E-08	1,5E-07	1,9E-05	1,2E-10		
250	2,4E-05	5,6E-06	1,5E-05	2,3E-08	7,0E-08	1,1E-05	5,1E-11		
300	1,4E-05	3,1E-06	8,7E-06	1,2E-08	3,4E-08	6,1E-06	2,2E-11		
400	5,5E-06	1,1E-06	3,0E-06	4,0E-09	7,8E-09	2,2E-06	4,2E-12		
500	2,3E-06	3,7E-07	1,1E-06	1,3E-09	1,8E-09	8,7E-07	8,0E-13		

Dozės galios skaičiavimų rezultatai būtų informatyvūs planuojant galimą apsaugomųjų veiksmų taikymą ugniagesiams ir gelbėtojams, nes juos tiesiogiai galima palyginti su operatyviaisiais apsaugomosios veiklos taikymo lygiais, apibrėžtais [31].

#### Išorinės apšvitos radioaktyviajame debesyje ir įkvėptųjų radionuklidų lemtų dozių vertinimas

Išorinės apšvitos dozė dėl žmogaus panirimo į radionuklidais prisotintą dūmų šleifą  $H_{debes_i}$  įvertinta panaudojant PC COSYMA 2 programą remiantis šia formule:

$$H_{debes_{i}}(x, y) = IntC_{oro_{i}}(x, y, z) \cdot DKF_{oro_{i}}$$
<sup>(26)</sup>

Kaupiamoji efektinė dozė dėl iš debesies įkvėptųjų radionuklidų  $H_{ikv,50i}$  įvertinama šia formule:

$$H_{ikv,50i}(x,y) = IntC_{oro\ i}(x,y,z) \cdot e(g)_{i\ ik} \cdot i_{i\ ik}$$
<sup>(27)</sup>

Kaupiamoji efektinė dozė dėl įkvėptųjų resuspenduotų radionuklidų ( $H_{ikv\_res,50i}$ ) įvertinama remiantis šiuo sąryšiu:

$$H_{ikv res, 50i}(x, y) = IntC_{oro, i}(x, y, z) \cdot v_{d, i} \cdot F_{res, i} \cdot e(g)_{i, ik} \cdot i_{i, ik} \cdot (28)$$

Išorinės apšvitos dozė  $D_{iskrit_i}(x,y)$  per mus dominantį laikotarpį  $\Delta T$  priklauso nuo ant žemės paviršiaus nusėdusių radionuklidų tankio  $DepD_i(x,y)$  Bq/m<sup>2</sup>. Iškritų tankis įvertinamas integrinį oro aktyvumą padauginant iš radionuklidų nusėdimo greičio (sausojo ir drėgnojo). Nustatytas iškritų tankis reikšmingiausiam radionuklidui Cs-137 apskaičiuotas su PC COSYMA 2 paketu ir pateiktas 2D polinėse koordinatėse bei pavaizduotas 2D žemėlapyje 100 m - 50 km apie MRAS.  $D_{iskrit_i}(x,y)$  dozė suskaičiuojama iškritų tankį DepD(x,y) Bq/m<sup>2</sup> padauginant iš išorinės apšvitos dozės koeficiento ir atsižvelgiama į radionuklido suskilimą per  $\Delta T$  laikotarpį:

$$D_{iskrit_{i}}(x, y) = IntC_{oro_{i}}(x, y, z) \cdot v_{d_{i}} \cdot DKF_{dirv_{i}} \cdot \frac{\left(1 - \exp(-\lambda_{r_{i}} \cdot \Delta T)\right)}{\lambda_{r_{i}}} = DepD_{i}(x, y) \cdot DKF_{dirv_{i}} \cdot \frac{\left(1 - \exp(-\lambda_{r_{i}} \cdot \Delta T)\right)}{\lambda_{r_{i}}}$$

$$(29)$$

Čia:

- $D_{iskrit_i}$  Išorinės apšvitos dozė, gauta per mus dominantį laikotarpį  $\Delta T$  nuo ant žemės paviršiaus nusėdusių radionuklidų *i*, mSv;
- IntC<sub>oro\_i</sub>(x,y,z) Integrinis tūrinis *i*-ojo radionuklido aktyvumas ore mus dominančiame taške, Bq·h/m<sup>3</sup>. Gauso sklaidos modeliu yra įvertintas iš MRAS dėl lėktuvo avarijos išmestų radionuklidų tūrinis aktyvumas teritorijoje 100 m 50 km aplink saugyklą ir suintegruotas jo aktyvumas kiekviename taške prie žemės paviršiaus. Šis dydis priklauso nuo avarijos scenarijaus ir nuo skaičiavimuose taikytų meteorologinių sąlygų. Jis įvertinamas remiantis formule (30);
   DKF<sub>oro\_i</sub>
- e(g)<sub>i,ik</sub> Nustatyti kaupiamosios efektinės dozės koeficientai radionuklido *i* įterpiui, įkvėpus radionuklidą, (mSv/Bq). Šie dozes koeficientai parenkami kiekvienam radionuklidui iš ICRP 119 publikacijos [40], o vaisiui nėštumo periodui dar ir pritaikius [41] rekomenduojamus sąryšių tarp suaugusiųjų ir vaisiaus dozių koeficientus;

radionuklidu, Sv m<sup>3</sup>/(Bq·h), [39];

- *i*<sub>j,ik</sub>
   Per buvimo radionuklidais užterštame ore arba gyvenimo užterštoje teritorijoje laiko tarpą
   įkvėpuotas oro kiekis, m<sup>3</sup>. Laikomas, kad suaugusieji įkvėpia 0,93 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>;
- $v_{d_i}$  Nusėdimo iš debesies ant žemės paviršiaus greitis *i*-ajam radionuklidui, m/s. Sausojo nusėdimo tipinė vertė daugeliui radionuklidų yra 0,3 m/s. Jeigu pagal pasirinktą taršos scenarijų lyja lietus, pridedamas drėgnojo nusėdimo greitis  $v_{wet}$ , kuris priklauso nuo

radionuklidų išplovimo su lietumi intensyvumo  $\Lambda$  (s<sup>-1</sup>):  $v_{wet} = \sqrt{\pi/2} \cdot \Lambda \cdot \sigma_z \cdot \exp\left(\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right)$ 

;

čia:  $\Lambda = a \cdot I_0^{\ b}$ ;  $I_0$ - lietaus intensyvumas (mm·h-1); išplovimo koeficientai aerozoliams: a $= 8, 0 \cdot 10^{-5}$  (s-1), b = 0, 8; H ir  $\sigma_z$  kintamųjų paaiškinimą žr. po formule (30). $F_{res}$ Resuspensijos faktorius vidutinio klimato dirvožemiui,  $F_{res} = 1E-6$  m-1 [42]. $DKF_{dirv_i}$ Išorinės apšvitos dozės koeficientas *i*-ojo radionuklido iškritų ant žemės paviršiaus, Sv·m²/(Bq·h), [39].

 $\lambda_{r_i}$  *i*-ojo radionuklido radioaktyvaus skilimo konstanta, h<sup>-1</sup>.

PC COSYMA 2 integrinis tūrinis *i*-ojo radionuklido aktyvumas ore mus dominančiame taške, Bq·h/m<sup>3</sup> skaičiuojamas Gauso sklaidos modeliu [33] (žr. Pav. 27), papildomai įskaitant debesies nuskurdinimą dėl pakeliui nusėdančių radionuklidų:

$$Int\mathcal{C}_{oro_i}(x, y, z) = \frac{Q_i}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \cdot F_{\nu}(x) \cdot \Delta T_{deb}$$
(30)

Čia:

Q<sub>i</sub> Vidutinis *i*-ojo radionuklido išmetimo į atmosferą greitis vykstantis avarijai, Bq/h. Šis dydis nustatytas nagrinėjant įvairius lėktuvo sudužimo scenarijus;

*u* Vėjo greitis debesies ašies aukštyje, m/h;

- σ<sub>y</sub>, σ<sub>z</sub>
   Gauso skirstinio vidutiniai standartiniai nuokrypiai (arba dispersijos koeficientai)
   atitinkamai horizontaliąja ir vertikaliąja kryptimis, m. Jie įvertinami skirtingoms Paskvilio
   atmosferos stabilumo klasėms remiantis žemiau pateiktomis formulėmis (31) ir
   parametrais;
- H Efektyvus maksimalus pradinis šleifo ašies pakėlimo aukštis, m. Jis įvertinamas kaip suma pradinio fizinio šaltinio aukščio virš žemės paviršiaus (mūsų atveju laikomas 0 m lygis) ir šleifo ašies pakėlimo dėl karštų dujų plūdrumo, vykstant gaisrui. Papildomas pakėlimas dėl plūdrumo įvertinamas pagal žemiau pateiktas Brigso formules (32).
- $F_{\nu}(x)$  Debesies nuskurdinimo faktorius, dėl pakeliui nusėdančių radionuklidų praradimo. Jis apskaičiuojamas remiantis (33) formule;
- $\Delta T_{deb}$  Laiko tarpas, kurį tiriamajame taške slenka debesis, h. Mūsų atveju su laikas sutampa su radionuklidų avarinio išmetimo arba gaisro saugykloje trukme;
- z Aukštis virš žemės paviršiaus, kuriame vertinama apšvitos dozė z = 1 m.



Pav. 27. Radionuklidų sklaidos atmosferoje Gauso modelio taikymas [33].

Vėjo greitis priklauso nuo aukščio ir gali būtų įvertintas remiantis šiuo sąryšiu:

$$u = \overline{u} \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^{p_{rel}}.$$
(31)

Čia:

Vidutinis vėjo greitis standartiniame 10 m aukštyje (aneometrinis), būdingas kiekvienai atmosferos stabilumo klasei arba paimamas iš meteorologinių matavimų duomenų.

*P<sub>rel</sub>* Vėjo priklausomybės nuo aukščio laipsnio rodiklis, būdingas kiekvienai stabilumo klasei s (žr. Lentelę 21).

Gauso skirstinio vidutiniai standartiniai nuokrypiai yra funkcijos nuo atstumo iki šaltinio (pavėjine *x* kryptimi) ir apskaičiuojami pagal šias formules, su empiriniais koeficientais  $p_y(s)$ ,  $q_y(s)$ ,  $p_z(s)$  ir  $q_z(s)$ , būdingais kiekvienai atmosferos stabilumo klasei (*s*):

$$\sigma_{y}(x,s) = p_{y}(s) \cdot (x)^{q_{y}(s)}$$
  

$$\sigma_{z}(x,s) = p_{z}(s) \cdot (x)^{q_{z}(s)}$$
(32)

Jeigu  $\sigma_z$  viršija esamai atmosferos stabilumo klasei būdingą inversijos sluoksnio aukštį *L* (žr. Lentelė 22), tuomet laikoma, kad *z* ašimi šleifas daugiau nebesiskiedžia.

Lentelėje 21 pateikiamos empirinių koeficientų  $p_y$ ,  $q_y$ ,  $p_z$  *ir*  $q_z$  vertės, naudojamos  $\sigma_y$  ir  $\sigma_z$  skaičiuoti skirtinguose aukščiuose skirtingoms atmosferos Paskvilio stabilumo klasėms (APSK).

Lentelė 21. Empirinių koeficientų  $p_y$ ,  $q_y$ ,  $p_z$  *ir*  $q_z$  vertės, naudojamos  $\sigma_y$  ir  $\sigma_z$  skaičiuoti skirtinguose aukščiuose skirtingoms atmosferos stabilumo klasėms.

APSK	Aukštis virš žemės, m											
		50				100			180			
	$p_y$	$q_y$	pz	qz	<b>p</b> y	$q_y$	pz	qz	<b>p</b> y	$q_y$	pz	qz
А	1,503	0,833	0,151	1,219	0,17	1,296	0,051	1,317	0,671	0,903	0,025	1,5
В	0,876	0,823	0,127	1,108	0,324	1,025	0,07	1,151	0,415	0,903	0,033	1,32
С	0,659	0,807	0,165	0,996	0,466	0,866	0,137	0,985	0,232	0,903	0,104	0,997
D	0,64	0,784	0,215	0,885	0,504	0,818	0,265	0,818	0,208	0,903	0,307	0,734
E	0,801	0,754	0,264	0,774	0,411	0,882	0,487	0,652	0,345	0,903	0,546	0,557
F	1,294	0,718	0,241	0,662	0,253	1,057	0,717	0,486	0,671	0,903	0,485	0,5

Lėktuvo sudužimo avarija įvyktų 0 m aukštyje (*h*) MRAS rūsio viršaus atžvilgiu. Konservatyviausias įvertinimas atliekamas laikant, kad radionuklidų išmetimo aukštis yra 0 m. Tik scenarijuose TIK\_D, REAL\_D ir MED\_D dėl lėktuvo smūgio ir pasėkoje kilusio gaisro radionuklidai pakeliami į tam tikrą aukštį (*∆h*, žr. Pav. 28).



#### Pav. 28. Papildomas dūmų šleifo pakėlimas dėl karštų dujų plūdrumo [33].

Radionuklidų šleifo papildomas pirminis pakėlimas dėl karštų dūmų plūdrumo gali būti įvertintas šiomis Brigso formulėmis [43]:

Jeigu šaltinis yra ne taškinis o turi tam tikrą efektinį spindulį *R* (mūsų atveju vidinis saugyklos plotis yra 4,6 m, todėl R=2,3 m), tikrasis pakėlimo aukštis H dėl plūdrumo apskaičiuojamas šiuo sąryšiu:

$$H = (H^3 + (R/\gamma)^3)^{1/3} - R/\gamma$$

Čia:  $\gamma$  – aplinkinio oro įtraukimo koeficientas dėl plūdrumo kylančiame dūmų sraute ( $\gamma$ =0,6)

Radionuklidų išsekimo debesyje faktorius  $F_{v}(x)$  apskaičiuojamas pagal Čemberleno sąryšį:

$F_{V}(x) = \exp\left(-v_{d_{-i}} \frac{f_{D}(x)}{\overline{u}_{rel}}\right),$	(34)
$\check{\text{Cia}}  f_D(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x \frac{1}{\sigma_z} \left\{ \exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} dx$	

APSK	<b>p</b> <sub>rel</sub>	<i>L,</i> m	<i>ū</i> [34], <i>m</i> ⋅s⁻¹
Α	0,07	1600	4,3
В	0,13	1200	4,7
С	0,21	800	5,6
D	0,34	560	12,1
E	0,44	320	10,9
F	0,44	200	4,9

Lentelė 22. Įvairioms atmosferos stabilumo klasėms būdingi vėjo greičio priklausomybės nuo aukščio rodikliai ( $p_{rel}$ ); inversijos sluoksnio aukštis (*L*); vidutinis vėjo greitis  $\overline{u}$  10 m aukštyje.

Žemiau pateiktose Lentelėse 23 ir 24 yra ribiniai atmosferiniai duomenys Paskvilio stabilumo klasėms nustatyti. Modeliuojant buvo taikomi konservatyvus ir realistiniai meteorologiniai scenarijai. Konservatyviam scenarijui laikyta, kad radionuklidų išmetimo aukštis yra prie žemės paviršiaus be papildomo pakėlimo su atmosferos stabilumo klasėms F ir D būdingais meteorologiniais parametrais bei 5 mm/h lietaus iškritomis. Tikėtiniausiems ir iliustraciniams realistiniams scenarijams naudojami duomenys apie išmetamų radionuklidų kiekį ir aukštį, gauti detalesnės lėktuvo sudužimo avarijos analizės metu (anksčiau aprašytos) ir panaudojant vidutinius vietovei būdingus meteorologinius duomenis [44]. Laikoma, kad MRAS aplinkoje dažniausiai pasikartojanti atmosferos stabilumo klasė būtų – D (žr. Pav. 29), o tikėtiniausias vėjo greitis (mediana) – 3,3 m/s (žr. Pav. 30), nustatytais remiantis prieinamais Ignalinos AE meteorologinės stoties 2004-2017 metų stebėjimo duomenimis.

Lentelė 23. Paskvilio stabilumo klasių sąryšis su ribinėmis vėjo krypties standartinio nuokrypio ir oro temperatūros gradiento vertėmis [34].

APSK	Horizontalus vėjo krypties vidutinis kvadratinis nuokrypis σ <sub>θ</sub> , (°)	ΔΤ/ΔΖ, (°C/100m)
А	22,5 < σ <sub>θ</sub>	ΔT/ΔZ < -1,9
В	17,5 < σ <sub>θ</sub> ≤ 22,5	-1,9 ≤ ΔT/ΔZ < -1,7
С	12,5 < σ <sub>θ</sub> ≤ 17,5	-1,7 ≤ ΔT/ΔZ < -1,5
D	7,5 < σ <sub>θ</sub> ≤ 12,5	-1,5 ≤ ΔT/ΔΖ < 0,5
Е	3,75 < σ <sub>θ</sub> ≤ 7,5	0,5 ≤ ΔT/ΔZ < 1,5
F	2,0 < σ <sub>θ</sub> ≤ 3,75	$1,5 \le \Delta T/\Delta Z < 4,0$
G	σ <sub>θ</sub> ≤ 2,0	$\Delta T/\Delta Z \ge 4,0$

Vàia	Die	nos metu ap	šviestuma	s (W/m²)	Valanda prieš	Deb nak	Debesų kiekis nakties metu		
greitis (m/s)	Stiprus (> 600)	Vidutinis (300-600)	Silpnas (< 300)	Apsiniaukę	saulėlydį arba valanda po saulėtekio	0-3	4-7	> 8	
≤ 2,0	A	A-B	В	С	D	F ar G	E	D	
2,0-3,0	A-B	В	С	С	D	F	Е	D	
3,0-5,0	В	B-C	С	С	D	Е	D	D	
5,0-6,0	С	C-D	D	D	D	D	D	D	
> 6,0	С	D	D	D	D	D	D	D	

Lentelė 24. Ribinės sąlygos Paskvilio stabilumo klasėms nustatyti [34].



Pav. 29. Ignalinos AE meteorologinių stebėjimų stotyje 2004-2017 m. fiksuotas atmosferos stabilumo klasių pasiskirstymas.



## Pav. 30. Ignalinos AE meteorologinių stebėjimų stotyje 2004-2017 m. fiksuotas vėjo greičių pasiskirstymas.

#### 4.4.2.Vėlyvoji avarijos fazė

Vėlyvojoje avarijos fazėje yra suskaičiuojamos šie dozių sandai dėl susidariusio radioaktyviųjų medžiagų iškritų lauko apie MRAS:

- Kaupiamoji efektinė dozė dėl įkvėptųjų resuspenduotų radionuklidų (*H*<sub>ikv\_res,50i</sub>) (dėl antrinio nusėdusių radionuklidų pakėlimo), mSv;
- (2) Išorinės apšvitos dozė nuo ant žemės paviršiaus nusėdusių radionuklidų (*D*<sub>iskrit\_i</sub>), mSv;
- (3) Vidinės apšvitos kaupiamoji efektinė dozė dėl su maisto produktais į žmogaus organizmą patekusių radionuklidų, mSv;
- (4) Vidinės apšvitos kaupiamoji efektinė dozė dėl su užterštu geriamuoju vandeniu iš šulinio į žmogaus organizmą patekusių radionuklidų, mSv.

# Išorinės apšvitos nuo iškritų bei vidinės apšvitos dėl įkvėptųjų resuspenduotų radionuklidų ir su maisto produktais bei vandeniu prarytųjų radionuklidų lemtų dozių vertinimas

Vėlyvuoju avarijos laikotarpiu (po keleto valandų po avarijos) išorinės apšvitos dozė per mus dominantį laikotarpį  $\Delta T$  dėl ant žemės paviršiaus nusėdusių radionuklidų  $D_{iskrit_i}$ , vertinama taip pat kaip ir per

ankstyvąją avarijos fazę (formulė 29), tik papildomai įskaitomas radionuklidų skilimas ir sklaida į gilesnius dirvožemio sluoksnius.

Vertinant kaupiamąją efektinę dozę dėl įkvėptųjų resuspenduotų radionuklidų ( $H_{ikv\_res,50i}$ ) naudojama ta pati (formulė 28) tik papildomai įskaitomas radionuklidų skilimas ir sklaida į gilesnius dirvožemio sluoksnius. Konservatyviai taikoma tokia pati resuspensijos faktoriaus vertė  $R_s$ =1E-6 m<sup>-1</sup>, nes tai viršutinė galimos vertės riba senoms iškritoms. Tai gana konservatyvi prielaida, nes po Černobylio AE avarijos iškritoms nustatytos  $R_s$  vertės sumažėdavo maždaug 10 kartų per 3 metus. Vertinant atsižvelgiama ir į antrinius radionuklidų skilimo produktus, nes saugykloje yra nemaži Ra-226 ir Pu-239 kiekiai.

#### Maisto produktų ir šulinio vandens taršos vertinimas

Vertinat lėktuvo kritimo ant MRAS avarijos lemtus nuo atstumo priklausančius maksimalius pagrindinių vietinės kilmės maisto produktų bei šulinio vandens aktyvumus naudojama RESRAD-OFFSITE 3.2 programa [35].

REDRAD-OFFSITE programa buvo sukurta JAV Energetikos departamento U.S. Department of Energy) ir JAV Branduolinės kontrolės komisijos (U.S. Nuclear Regulatory Commission) užsakymu Nacionalinėje Argono laboratorijoje. Ją galima panaudoti įvertinti radionuklidų sklaidą iš pasirenkamų matmenų paviršinio atliekyno ar saugyklos artimojoje ir tolimojoje radioaktyviosios taršos sklaidos zonose. Ja galima patogiai apskaičiuoti saugyklos poveikio zonoje gyvenančių gyventojų metines apšvitos dozes bei pagrindinių maisto produktų ir geriamojo vandens taršą plačiu spektru radionuklidų. Programa vertinamos šios radionuklidų sklaidos ir poveikio trasos:

- (1) Sklaida per avarijos paveiktus (suardytus) saugyklos inžinerinius barjerus;
- (2) Sklaida vandeniu neprisotintame ir vandeningame grunto sluoksniuose link šulinio;
- (3) Radionuklidų migracija biosferoje maisto grandinėlėmis;
- (4) Gyventojų apšvita dėl:
  - a. Žmogaus apšvitos iš išorės dozė nuo radionuklidais prisodrinto oro;
  - b. Žmogaus apšvitos iš išorės dozė nuo ant paviršiaus iškritusių radionuklidų;
  - c. Vidinė žmogaus apšvitos dozė dėl įkvėptųjų radionuklidų;
  - d. Vidinė žmogaus apšvitos dozė dėl su maistu į organizmą patenkančių radionuklidų (geriamo vandens vartojimą iš užteršto šulinio; žuvies iš užteršto vandens telkinio vartojimą; Radono produktų įkvėpimą dėl daržų laistymo užterštu vandeniu; maistinių augalų užaugintų dirvoje laistomoje užterštu vandeniu vartojimą; galvijų, girdytų užterštu vandeniu ir šertų užterštais pašarais, mėsos vartojimą; galvijų, girdytų užterštu vandeniu ir šertų užterštais pašarais, pieno vartojimą).

RESRAD-OFFSITE programa buvo naudota atliekant panašius skaičiavimus Maišiagalos radioaktyviųjų atliekų saugyklos saugos analizei [35]. Lėktuvo kritimo avarijos atveju buvo naudojamos analogiškos modelio parametrų vertės, tik pritaikytos šios avarijos scenarijams, atsižvelgiant į inžinerinių barjerų

suardymą. Laikyta, kad MRAS rūsys yra be viršutinio apsauginio kaupo, o po lėktuvo avarijos ir gaisro visi rūsio inžineriniai barjerai (betonas) praranda izoliuojančias savybes ir tampa panašūs į šalia esantį vandeniui laidų gruntą. Lygsvarinis pasiskirstymo tarp skystosios ir kietosios fazės koeficientas  $K_d$  proporcingas radionuklido užlaikymui sluoksnyje (retardacijai), todėl radionuklidų sorbcinės savybės degradavusiame betone pasirinktos konservatyviai, t. y. betonui taikyta mažesnė  $K_d$  vertė lyginant betoną ir gruntą. Per saugyklos radioaktyviąją zoną natūraliai filtruojasi 690 mm/metus lietaus vandens (būdingas kritulių kiekis vietovei pagal didėjančią daugiametę tendenciją [44]), iš kurio 0,44 dalis išgaruoja, bet niekas nenubėga į šalis. Laikoma, kad po avarijos saugykloje lieka visas radionuklidų aktyvumas, kuris atitinka 2020-01-01 saugyklos inventorių. Per saugyklos užterštą zoną persifiltravęs ir radionuklidais prisotintas lietaus vanduo toliau sparčiai (2740 m/metus) infiltruojasi per vandeniu neprisotintą grunto sluoksnį ir pasiekia vandeniu prisotintą sluoksnį. Vyraujanti gruntinio vandens kryptis yra šiaurės-vakarų, todėl mobiliais radionuklidais užterštas vanduo ilgainiui gali pasiekti artimiausią šulinį Draučių gyvenvietėje už 3,2 km bei Spėros ežerą už 5,99 km. Šis vanduo būtų naudojamas daržams ir sodui laistyti ir užterštų vietinės kilmės maisto produktus bei maistui būtų vartojama ir ežere sugauta žuvis. RESRAD-OFFSITE šulinio scenarijaus skaičiavimuose naudoti MRAS vietovės hidrometeorologiniai duomenys pateikti Lentelėje 25.

Lentelė	25.	RESRAD-OFFSITE	šulinio	scenarijaus	skaičiavimuose	naudoti	MRAS	vietovės
hidrometeorologiniai duomenys								

Parametrai	Vertė	Pastabos
Metinis kritulių kiekis, mm/metus	690	Vidutinis paskutiniųjų metų vidurkis
Drėgmės išgaravimo koeficientas	0,44	Standartinė vertė Lietuvos klimatui
Kritulių nutekėjimo koeficientas	0	Konservatyvi vertė
Žemės ūkio naudmenų laistymo būdas	lš viršaus	Naudojamas šulinio vanduo
Atstumas iki šulinio, km	3,2	Artimiausia gyvenvietė - Draučiai gruntinio vandens tekėjimo kryptimi (šiaurės-vakarų)
Atstumas iki šalia esančio Spėros ežero, km	4,99	Žuvys iš šio ežero naudojamos maistui
Spėros ežero plotas, km²	0,839	
Spėros ežero tūris, m <sup>3</sup>	1,55E+6	
Vandens apykaita Spėros ežere, metų	0,038	

RESRAD-OFFSITE šulinio scenarijaus skaičiavimuose naudoti suardyto MRAS rūsio bei aplinkos sandų geologiniai duomenys pateikti Lentelėje 26.

Lentelė 26. RESRAD-OFFSITE šulinio scenarijaus skaičiavimuose naudoti MRAS geologiniai duomenys

Parametrai	Saugyklos danga	KRA zona	Dugno betono barjeras	Vandeniu neprisotinto grunto sluoksnis	Vandeniu prisotinto grunto sluoksnis	Pastabos
Tankis, g/cm <sup>3</sup>	-	1,5	2,5	1,8	1,8	Standartinės vertės
Storis, m	0	3	0,1	5	2	Nepažeisto saugyklos rūsio be dangos
Bendras poringumas	-	0,3	0,2	0,31	0,31	
Efektyvus poringumas	-	-	0,15	0,26	0,26	
Minimalus vandens kiekis nevandeningame sluoksnyje	-	0,05	0,07	0,05	0,05	Minimalus vandens kiekis nevandeningame sluoksnyje
Hidraulinis, laidumas m/metus		2740	2740	2740	2740	Laikoma, kad betonas pilnai suiręs ir laidus vandeniui kaip gruntas
<i>b</i> parametras	-	4,05	5	4,05	4,05	nevandeningo sluoksnio vandens kiekio taisyklė
lšilginis dispersiškumas, m	-	0,32	0,022	0,12	31,26 42,72	lki šulinio Iki ežero
Hidraulinis gradientas, m/m		-	-	-	0,001	

Šulinio taršos scenarijaus skaičiavimuose RESRAD-OFFSITE programa naudotas radionuklidų savitojo aktyvumo 2020-01-01 saugykloje (visas MRAS rūsio inventorius tolygiai paskirstytas 225 m<sup>3</sup> tūryje, jo tankis – 1,5 g/cm<sup>3</sup>), o pasiskirstymo tarp kietosios ir skystosios fazių koeficiento  $K_d$  vertės rūsio sluoksniams bei geologinės aplinkos sandams pateiktos Lentelėje 27.

## Lentelė 27. RESRAD-OFFSITE skaičiavimuose naudotos radionuklidų savitojo aktyvumo 2020 01 01 saugykloje ir pasiskirstymo tarp kietosios ir skystosios fazių koeficiento $K_d$ vertės

Radionuklidas	Savitasis aktyvumas MRAS rūsyje, Bq/g	Sorbcija betone, cm <sup>3</sup> /g	Sorbcija geosferoje, cm³/g	Pastabos
H-3	160000	0	0	
C-14	567	5	5	
CI-36	4	0	0,03	Konservatyvi K <sub>d</sub> vertė betonui
Co-60	431	10	15	Konservatyvi K <sub>d</sub> vertė betonui
Ni-63	110	100	400	Konservatyvi K <sub>d</sub> vertė betonui
Sr-90	1000	1	15	Konservatyvi K <sub>d</sub> vertė betonui
Cs-137	90700	1	270	Konservatyvi K <sub>d</sub> vertė betonui
Eu-152	36	240	240	
Ra-226	333	50	500	Konservatyvi K <sub>d</sub> vertė betonui
U-238	0,137	15	15	
Pu-239	3070	340	340	

Radionuklidų sklaidos skaičiavimai programa RESRAD-OFFSITE iš avarijos pažeistos saugyklos rūsio atlikti ilgalaikiam periodui iki 10 000 metų.

#### Ilgalaikės apšvitos vertinimas

Gyventojų ilgalaikės (per 50 metų) vidinės apšvitos dozės dėl maisto produktų vartojimo ir gyvenimo užterštoje teritorijoje už MRAS sanitarinės apsaugos zonos ribų įvertintos panaudojant kompiuterinę programą PC COSYMA 2 [34]. Tai tikimybinė branduolinių avarijų padarinių vertinimo kompiuterinė programa. Ši programa sukurta NRPB (angl. National Radiological Protection Board) ir KfK (vok. Kernforschungszentrum Karlsruhe) organizacijų, kaip dalis Europos komisijos projekto MARIA. Ji turi didelę biblioteką numatytųjų parametrų, kurie naudojami skaičiavimuose. Programa suteikia galimybę detalizuoti modeliuojamos radionuklidų išmetimo į atmosferą avarijos parametrus (išmestų radionuklidų kiekius ir aukštį, meteorologinius duomenis ir kt.) bei gyventojų maisto vartojimo ir gyvensenos ypatumų ir kt.

duomenis. Aprašytiems avarijų scenarijams programa pateikia skaičiavimo rezultatus apie radionuklidų koncentraciją ore ir jų iškritų tankį, dozes žmogaus organams, apsaugomųjų priemonių (pvz., evakuacijos) taikymą mažinant avarijos neigiamus padarinius, taip pat individualią ir kolektyvinę ankstyvųjų ir vėlyvųjų padarinių sveikatai riziką. Rezultatai programoje pateikiami lentelių ir grafikų pavidalais. Taip pat sistema sukuria atskirą rezultatų bylą, kuri vėliau gali būti naudojama tolimesniems skaičiavimams arba grafiniam pavaizdavimui [34]. Modeliuojant atmosferinę pernašą PC COSYMA 2 naudoja anksčiau aprašytą teršalų Gausinio pasiskirstymo šleife modelį. Programa yra validuota ir vertina visas pagrindines žmogaus apšvitos trasas, todėl ji buvo pasirinkta kaip pagrindinė programa trumpalaikių ir ilgalaikių dozių vertinimui.

#### 5. AVARIJOS RADIOLOGINIŲ PADARINIŲ VERTINIMO REZULTATAI

#### 5.1. Radiologinių pasekmių vertinimo scenarijų apibrėžimas

Lėktuvo kritimo avarijos metu į orą pakeltų radionuklidų sklaida, jų nusėdimas ant žemės paviršiaus apie MRAS bei apšvitos dozės įvertintos panaudojant kompiuterinę programą PC COSYMA 2. Avarijos padariniai įvertinti dviem konservatyviausiems (nepalankiausiems) scenarijams (KONS\_F\_0 ir KONS\_F\_5), dviem mažiau konservatyviems scenarijams su platesniu sklaidos arealu (KONS\_D\_0 ir KONS\_D\_5) bei dviem labiausiai tikėtiniems scenarijams (TIK\_D\_0 ir TIK\_D\_5).

Konservatyviausi avarijos scenarijai parinkti taip, kad didžiausios taršos koncentracijos ir didžiausios apšvitos dozės būtų gana siaurame areale pavėjinėje pusėje nuo MRAS: scenarijaus KONS\_F\_0 atveju laikoma, kad nėra kritulių, o konservatyviausio scenarijaus KONS\_F\_5 atveju papildomai postuluojamas stiprus 5 mm/h intensyvumo lietus. Abiem atvejais laikoma, kad sklaida ore vyksta esant stabiliai atmosferos klasei – F (mažiausia sklaida); vėjo greitis – 2 m/s, t. y. F klasei minimaliam būdingam vėjo greičiui; išmetimas vyksta iš 4,6 m pločio šaltinio (MRAS rūsio vidinės sienos ilgis) vegetacijos periodu 0 m aukštyje nuo žemės be papildomo šiluminio pakėlimo, t. y. maksimali koncentracija prie žemės paviršiaus pasiekiama arčiausiai šaltinio (nors apskaičiuota, kad realus išmetimų šleifo pakėlimo aukštis turėtų viršyti 200 metrų, tačiau toks pakėlimo aukštis šiuose scenarijuose priimtas siekiant didesnio konservatyvumo aplinkos taršos koncentracijos atžvilgiu); visos MRAS rūsio sekcijos yra apimtos liepsnos, sudega visos degiosios atliekos ir į atmosferą patenka didžiausias įmanomas, t. y. Scenarijumi 1 (Sc\_1) apibrėžtas išmetamų radionuklidų kiekis (žr. Lentelė 28). Scenarijai KONS\_D\_0 ir KONS\_D\_5 skiriasi tik tuo, kad imama atmosferos stabilumo klasė D, todėl gaunamas platesnis sklaidos pėdsakas, bet su mažesne koncentracija nei F klasės atveju. Šiems scenarijams radionuklidų išmetimo trukmė nėra svarbi vertinant integrinj oro aktyvumą bei iškritų tankį, nes tai yra suintegruoti laike dydžiai. Tačiau konservatyviam vertinimui išmetimo trukmė turėtų būti pakankamai trumpa, kad jos metu nesikeistų meteorologinės sąlygos bei per numatomą skubių apsaugomujų priemonių taikymo laikotarpį (10 val.) nagrinėjamoje teritorijoje (50 km nuo MRAS) spėtų susiformuoti iškritų laukas ir būtų pagrindas įtraukti visas vidinės ir išorinės apšvitos trasas: vidinę apšvitą dėl įkvėptųjų radionuklidų ir išorinę apšvitą nuo debesies bei iškritų. Siekiant įvertinti galimą didžiausią poveikį ugniagesiams gelbėtojams ir kitiems žmonėms, esantiems šalia gaisravietės gaisro metu, konservatyviems scenarijams KONS\_F\_0, KONS\_F\_5, KONS\_D\_0 ir KONS\_D\_5 pasirinkta mažesnė negu galima realiomis sąlygomis išmetimo trukmė – 1 val. Ši prielaida atitiktų tokią hipotetinę įvykių eigą: per pirmąją valandą po lėktuvo sudužimo sudega lėktuvo kuras (kuro gaisro skaičiavimais įvertinta galima trukmė 48 - 155 min), tačiau radionuklidai į atmosferą dar neišmetami; o per antrąją valandą (rūsio radioaktyvaus turinio gaisro skaičiavimais įvertinta galima trukmė 35 - 50983 min.) prie MRAS jau būna susirinkę ugniagesiai, gelbėtojai, darbuotojai bei atsitiktiniai gyventojai (grybautojai, avarijos liudininkai ar pan.) ir per tą valandą į atmosferą pažeme būtų išmestas visas scenarijuje Sc\_1 numatytas radionuklidų
kiekis. Laikoma, kad visi radionuklidai keliauja kaip aerozolio dalelės su būdingu 0,3 cm/s sausojo nusėdimo greičiu, išskyrus <sup>85</sup>Kr, <sup>3</sup>H ir <sup>14</sup>C radionuklidus, kurių nusėdimo greitis yra 0 m/s [33].

Lentelė	28.	Į	aplinką	išmetamų	radionuklidų	aktyvumas	scenarijuose	Sc_1,	Sc_2,	Sc_3	ir
tikėtinia	usiaı	me	scenarij	uje Sc_TIK	(Sc_TIK atitink	a Sc_1, Sc_2	2 ir Sc_3 geom	etrinį vi	durkį)		

Radionuklidas	Išmetamas	s bendras radionukl	ido aktyvumas A <sub>i</sub> sco	enarijui, Bq
	Sc_1	Sc_2	Sc_3	Sc_TIK
3H	4,8E+13	4,8E+13	3,4E+13	4,3E+13
14C	1,7E+11	1,7E+11	1,2E+11	1,5E+11
22Na	3,5E+02	3,5E+02	2,5E+02	3,1E+02
36Cl	1,2E+07	1,2E+07	8,4E+06	1,1E+07
55Fe	7,3E+02	7,3E+02	5,1E+02	6,5E+02
60Co	1,5E+08	9,2E+07	6,4E+07	9,6E+07
63Ni	3,3E+08	3,3E+08	2,3E+08	2,9E+08
85Kr	3,0E+08	3,0E+08	2,1E+08	2,7E+08
90Sr	3,0E+09	3,0E+09	2,1E+09	2,7E+09
106Ru	1,8E-04	1,8E-04	1,3E-04	1,6E-04
109Cd	1,0E-01	1,0E-01	7,3E-02	9,0E-02
125Sb	2,6E+03	2,6E+03	1,8E+03	2,3E+03
133Ba	5,3E+03	5,3E+03	3,7E+03	4,7E+03
134Cs	8,9E-01	8,9E-01	6,3E-01	7,9E-01
137Cs	6,3E+10	5,2E+10	3,6E+10	4,9E+10
144Ce	2,0E-05	2,0E-05	1,4E-05	1,8E-05
147Pm	3,1E+04	3,1E+04	2,2E+04	2,8E+04
152Eu	1,1E+08	1,1E+08	7,7E+07	9,8E+07
204TI	7,4E+04	7,4E+04	5,2E+04	6,6E+04
207Bi	3,4E+03	3,4E+03	2,4E+03	3,0E+03
226Ra	1,0E+09	1,0E+09	7,0E+08	8,9E+08
234U	1,4E+01	1,4E+01	1,0E+01	1,3E+01
238U	4,1E+05	4,1E+05	2,9E+05	3,7E+05
239Pu	9,2E+09	9,2E+09	6,4E+09	8,2E+09
Suma	4,8E+13	4,8E+13	3,8E+11	4,3E+13

Tikėtiniausių realistinių scenarijų TIK\_D\_0 ir TIK\_D\_5 atvejais atitinkamai laikoma, kad iškrenta 0 mm/h arba 5 mm/h kritulių. Sklaida vyksta esant tikėtiniausioms (būdingomis vietovei) sąlygoms. Remiantis turimais netoliese (už 125 km) esančios Ignalinos atominės elektrinės meteorologinių matavimų stoties duomenimis (2004-2017 metų laikotarpio duomenys kas 3 valandas) labiausiai tikėtina atmosferos stabilumo klasė yra - D (žr. atmosferos stabilumo klasių pasiskirstymo histogramą Pav. 29), o D klasei būdinga vėjo greičio vertė (mediana) yra 3,3 m/s (žr. Pav. 30). Į atmosferą išmetamų radionuklidų kiekis ir išmetimo parametrai (pradinis pakėlimo aukštis, išmetimo trukmė ir dalis) yra gauti kaip geometrinis vidurkis, suvidurkinant visą spektrą galimų degimo scenarijų (t. y. degimo scenarijų Sc\_1, Sc\_2 bei Sc\_3 Kietos Plokštės (KP) ir Mišinio su Betonu (MB) scenarijus (žr. Lentelę 29) bei 10% medienos (žr. Lentelę 30) scenarijus). KP plokštės scenarijus yra

kraštutinis atvejis, laikant, kad visos MRAS rūsvie esančios degiosios medžiagos vra atviros ir sudaro plokšte. Tuo tarpu kitame kraštutiniame MB scenarijuje laikoma kad, MRAS rūsyje yra degiųjų atliekų ir betono idealus mišinys. Tikrovėje MRAS rūsyje yra sluoksniuota degiųjų medžiagų ir betono struktūra, todėl realią situaciją po avarijos geriausiai atitinka scenarijų KP ir MB vidurkis, kuris atspindėtų suaižėjusi rūsio užpildą ir dalinai atsidengusius atliekų sluoksnius. Gauti rūsyje esančių medžiagų išskiriamos šiluminės galios bei trukmės geometriniai vidurkiai pateikti Lentelėje 29. Neturime tikslios informacijos apie degiųjų medžiagų sudėtį ir kiekius, todėl skaičiuojant vidurkį laikoma, kad rūsyje yra tipinių medžiagų mišinys (Mediena 01, Mediena 02, kartonas, poliuretanas 01, poliuretanas 02, polietilenas, polipropilenas). Tokia standartinių medžiagų kompozicija ir tai, kad papildomai įtraukiamas 10% medienos scenarijus, didesnį svorį suteikia medienai, o tai dera su MRAS darbuotojo liudijimu, kad MRAS rūsvje didele degiuju medžiagu dali sudaro būtent mediena. Medžiagų liepsnos aukštis geometriškai suvidurkinant pagal visus scenarijus yra 6 m, o išskiriamos šiluminės galios geometrinis vidurkis yra 6272 kW. Įvertinus šiluminį pakelimą pagal formulę (33) gauname labiausiai tikėtiną 6+212 m=218 m pradinį dūmų šleifo ašies pakėlimo virš žemės paviršiaus aukštį scenarijuose TIK\_D. Jvertintas kietųjų atliekų gaisro trukmės geometrinis vidurkis yra 2115 min (35,25 val.). Labai tikėtina, kad gaisras būtų užgesintas daug ankščiau negu tokiu būdų pilnai sudegtų visos degiosios atliekos ir į aplinką patektų visas scenarijuose Sc\_1, Sc\_2 ar Sc\_3 numatytas radionuklidų aktyvumas. Pagal galiojančius normatyvus ugniagesių atvykimo į gaisro vietą trukmė vertinama kaip 1 min vienam kilometrui atstumo. Tikėtina, kad MRAS gaisrui gesinti būtų pasitelktos ugniagesių pajėgos iš Vilniaus miesto ugniagesių stoties, esančios maždaug už 35 km. Realistiškai vertinama, kad atvykimui ugniagesiai sugaištų apie 30 min bei dar 30 min gaisro gesinimo pasiruošimui. Paties gaisro gesinimo trukme įvertinti sudėtinga, bet daroma prielaida, kad gesinimas truktų 1 val. Nagrinėjant lėktuvo kuro degimo trukmės scenarijus esant vidutiniam grunto spūdumui po MRAS (34 min Modeliui 2, jei lėktuvas nukristų skersai rūsio, ir 36 min Modeliui 4, jeigu nukristų išilgai rūsio) gaunamas 35 min. kuro degimo trukmės geometrinis vidurkis. Po šio laikotarpio prasidėtų radioaktyviųjų medžiagų degimas ir tolygus radionuklidų išmetimas į aplinką, kuris truktų 2115 min. Taigi, tikėtina, kad radionuklidų išmetimas į atmosferą vyktų tik 120 - 35 min = 85 min., o po to gaisras būtų pilnai užgesintas. Scenarijams TIK D j aplinką numatomą išmesti radionuklidų aktyvumą gauname kiekvieno radionuklido aktyvumą pagal scenarijų Sc TIK (žr. Lentelę 29) papildomai padauginę iš ARF2=85 min/2115 min =0,04 koeficiento (išmestos dalies faktorius del apribotos degimo trukmes ARF2=4%).

Skaičiavimuose, atliktų programa PC COSYMA 2, naudotų pagrindinių šaltinio parametrų vertės skirtingiems scenarijams pateiktos Lentelėje 29.

Be pagrindinių konservatyvių scenarijų KONS\_F ir KONS\_D bei labiausiai tikėtinų scenarijų TIK\_D papildomai atlikti iliustraciniai skaičiavimai ir keletui realistinių scenarijų atvejų: REAL1\_D\_0, REAL2\_D\_0, REAL3\_D\_0, MED1\_D\_0, MED2\_D\_0, MED3\_D\_0 (žr. Lentelę 29). REAL\_D tipo scenarijų pagrindą sudaro radioaktyviųjų atliekų degimo scenarijams Sc\_1, Sc\_2 ir Sc\_3 (scenarijai skiriasi gaisro išplitimo MRAS rūsyje mastu)) būdingų parametrų geometriniai vidurkiai, suvidurkinti atskirai tik tam scenarijui. Panašiai MED\_D tipo scenarijai sudaryti remiantis 10 % medienos rūsyje degimo scenarijumi, jį išskaidant į atskirus, atsižvelgiant į galimus skirtingus scenarijais Sc\_1, Sc\_2 ir Sc\_3 nustatytus radionuklidų išmetimo kiekius. Nuo scenarijų

TIK\_D REAL\_D ir MED\_D tipo scenarijai skiriasi dar ir tuo, kad numatoma išmetimo trukmė REAL\_D ir MED\_D - 62 min., o ne 85 min kaip scenarijui TIK\_D. Ji gauta, laikant, kad radionuklidų išmetimas prasideda nuo 58 minutės po avarijos pradžios (geometrinis Modelių 1 (84 min), 2 (34 min), 3 (111 min) ir 4 (36 min ) vidurkis, kuomet sudega lėktuvo kuras), o gaisras pilnai užgesinamas 120 minutę po avarijos (120 – 58 min = 62 min). REAL\_D scenarijams išmestos dalies faktorius dėl apribotos degimo trukmės ARF2=0,027, o MED\_D tipo scenarijams ARF2=0,06. Šių scenarijų skaičiavimuose su programa PC COSYMA 2 naudotų parametrų vertės pateiktos Lentelėje 29.

	Sc_1 sc	Sc_1 scenarijus (gaisro apimta visa saugykla)					Sc_2 scenarijus (gaisro neapimti 6 sekcijos PUŠ)					Sc_3 scenarijus (gaisro neapimti jokie PUŠ)						
Medžiagos	KF	KP modelis		MB modelis		KP	KP modelis		MB modelis		KP modelis			MB modelis				
· ·	DŠG,	Н,	Т,	DŠG,	Н,	Т,	DŠG,	Н,	Т,	DŠG,	Н,	Т,	DŠG,	Н,	Т,		Н,	Т,
	kW	m	min	kW	m	min	kW	m	min	kW	m	min	kW	m	min	DSG, kW	m	, min
Mediena_01	47669	15	69	1544	5	10321	39725	14	82	1853	6	8300	39725	14	58	908	4	12629
Mediena_02	55003	15	105	1782	5	10521	45837	14	126	2139	6	8501	45837	14	88	1048	4	12830
Kartonas	16801	7	443	540	2	41838	14001	6	531	648	2	33838	14001	6	372	318	2	50983
Poliuretanas_01	38335	9	374	1242	3	23945	31947	9	449	1491	3	19501	31947	9	314	730	3	29025
Poliuretanas_02	46669	9	374	1512	3	23945	38892	9	449	1815	3	19501	38892	9	314	889	3	29030
Polietilenas	75230	10	336	2437	3	22890	62694	9	403	2925	4	18615	62694	9	282	1433	3	27775
Polipropilenas	51843	8	452	1680	3	32888	43203	7	543	2016	3	27402	43203	7	380	988	2	39930
Aritmetinis vidurkis	24449	7	12036				20656	7	9874				20187	6	14572			
Geometrinis vidurkis	7873	6	2323				7873	6	2295				5511	5	2348			

Lentelė 29. MRAS degių radioaktyviųjų medžiagų gaisro scenarijų (Sc\_1, Sc\_2 ir Sc\_3) parametrai: degimo šiluminė galia (DŠG), liepsnos aukštis (*H*) ir degimo trukmė (*T*), kietos plokštės (KP) ir mišinio su betonu (MB) degimo modeliams

Lentelė 30. MRAS degių radioaktyviųjų medžiagų gaisro 10 % medienos scenarijui parametrai: degimo šiluminė galia, liepsnos aukštis ir degimo trukmė, kietos plokštės (KP) ir mišinio su betonu (MB) degimo modeliams

	10% medienos scenarijus										
Scenarijai	1	<b>KP modelis</b>		MB modelis							
	Degimo šiluminė galia, kW	Liepsnos aukštis, m	Degimo trukmė, min	Degimo šiluminė galia, kW	Liepsnos aukštis, m	Degimo trukmė, min					
Sc_1	55003	15	35	198	3	34762					
Sc_2	45837	14	42	238	3	28680					
Sc_3	45837	14	29	118	2	41208					
Vidurkis	24538	9	17459								
Geometrinis vidurkis	2935	6	1099								

Lentelė 31. MRAS degių radioaktyviųjų medžiagų labiausia tikėtino (visų scenarijų geometrinio vidurkio) gaisro scenarijaus parametrai: degimo šiluminė galia, liepsnos aukštis ir degimo trukmė

	Apibend	rintas scenarijus S	c_TIK
	Degimo šiluminė galia, kW	Liepsnos aukštis, m	Degimo trukmė, min
Visų scenarijų vidurkis	22111	7	12823
Visų scenarijų geometrinis vidurkis	6272	6	2115

	<b>B</b>	V 14 V		× .				
Lentele 32	Pagrindiniai a	ansvitos sa	altını aı	orasantv	s duomen\	is ivair	illose scenarii	liose
	i ugimamua i	apo 1100 0	and in the second	Judanty	o aaoinonj	, C į t a	naooo ooonang	4000

Scenarijus	Apšvitos šaltinio aktyvumo scenarijus	Išmetimo į atmosferą trukmė, min	Negesinamo KRA gaisro trukmė, min	Atmosferos stabilumo klase	ARF2 <sup>1</sup>	Degimo šiluminė galia, kW	KRA gaisro liepsnos aukštis, m	H², m	Vėjo greitis, m/s	Pradinis šleifo plotis, m	Vegetacijos periodas	Radionuklidų sausojo nusėdimo greitis, m/s	Kritulių kiekis, mm
KONS_F_0	Sc_1	60	60	F	1	0	0	0	2				0
KONS_F_5	Sc_1	60	60	F	1	0	0	0	2				5
KONS_D_0	Sc_1	60	60	D	1	0	0	0	3,3			3H, 14C, 85Kr – 0 Kitiems - 0,003	0
KONS_D_5	Sc_1	60	60	D	1	0	0	0	3,3				5
TIK_D_0	Sc_TIK	85	2115	D	0,04	6272	6	218	3,3		Vasara		0
TIK_D_5	Sc_TIK	85	2115	D	0,04	6272	6	218	3,3	4.6			5
REAL1_D_0	Sc_1	62	2323	D	0,027	7873	6	250	3,3	-,0			0
REAL2_D_0	Sc_2	62	2295	D	0,027	7873	6	250	3,3				0
REAL3_D_0	Sc_3	62	2347	D	0,026	5511	5	200	3,3				0
MED1_D_0	Sc_1	62	1102	D	0,06	3300	6	138	3,3	3			0
MED2_D_0	Sc_2	62	1096	D	0,06	3300	6	138	3,3	1			0
MED3_D_0	Sc_3	62	1099	D	0,06	2322	6	106	3,3				0

<sup>1</sup>Dėl degimo trukmės išmestų radionuklidų. dalį ribojantis faktorius; <sup>2</sup>Pradinis bendras šleifo ašies pakėlimo aukštis

# 5.2. Radionuklidų integrinio tūrinio aktyvumo ore bei iškritų tankio erdvinio pasiskirstymo vertinimo programa PC COSYMA 2 rezultatai

Kompiuterine programa PC COSYMA 2 prognozuota radionuklidų sklaida po trumpalaikio (pasirinkta 1 val. trukmės viena išmetimo fazė) išmetimo šaltinio aplinkoje polinėse koordinatėse  $\Delta \theta = 5^{\circ}$  kampinio pločio sektoriuose (viso  $360^{\circ}/5^{\circ} = 72$  sektoriai) 15-ai taškų nuo šaltinio: r = 0,1; 0,15; 0,3; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,7; 3,2; 5; 10; 15; 30 ir 50 km. Labai mažai tikėtina, kad koks nors gyventojas ar darbuotojas išbūtų karštame dūmų debesyje visą numatomą apie 1 val. trukmės laikotarpį arčiau negu 100 m atstumu nuo MRAS, todėl apšvita dėl įkvėptųjų radionuklidų, panirimo į radioaktyvųjį debesį ir iškritų prognozuojama intervalams nuo MRAS nutolusiems nuo 100 m iki 50 km. Tačiau labai tikėtina, kad žmogus gali būti gana ilgą laiką šalia dūmų debesies, todėl tokiems atvejams išorinės apšvitos dozės galia yra įvertinta programa MicroShield 5-500 m atstumu nuo dūmų stulpo.

Analizės metu nustatyta, kad apšvitai nuo iškritų reikšmingiausias radionuklidas yra <sup>137</sup>Cs, todėl šiam radionuklidui iškritų tankio pasiskirstymo 2D duomenys skirtingiems avarijos scenarijams pateikti Priede 2 lentelėse. Didžiausia vidinės apšvitos dozė dėl įkvėptųjų radionuklidų yra nuo <sup>239</sup>Pu. <sup>239</sup>Pu integrinio oro aktyvumo pasiskirstymo 2D duomenys pateikti lentelėse Priede 2.

Didžiausias <sup>137</sup>Cs iškritų tankis gautas scenarijui KONS\_F\_5 su 5 mm lietaus netoli MRAS (už 100 m) siektų 5,8E+05 Bq/m<sup>2</sup>, kuris yra 3 kartus didesnis, negu scenarijui KONS\_F\_0, kai laikoma, kad nėra kritulių. Tuo tarpu didžiausias <sup>239</sup>Pu integrinis tūrinis aktyvumas gautas KONS\_F\_0 scenarijui ir siektų 9,2E+06 Bq·s/m<sup>3</sup>.

Scenarijaus TIK\_D\_0 atveju taršos maksimumas gaunamas maždaug už 3 km nuo MRAS, nes dėl šiluminio plūdrumo pakeltas dūmų šleifas (218 m) žemės paviršių pasiekia toliau nuo šaltinio gerokai prasiskiedęs: <sup>137</sup>Cs didžiausias iškritų tankis – 2 Bq/m<sup>2</sup>, o <sup>239</sup>Pu didžiausias integrinis tūrinis aktyvumas – 110 Bq·s/m<sup>3</sup>.

Scenarijaus TIK\_D\_5 atveju dėl intensyvaus <sup>137</sup>Cs išplovimo iš debesies su krituliais, iškritų maksimumas gaunamas jau už 0,5 km – 420 Bq/m<sup>2</sup>, o <sup>239</sup>Pu integrinis tūrinis aktyvumas yra – 100 Bq·s/m<sup>3</sup> (kiek mažesnis nei TIK\_D\_0 atveju).

Scenarijuose REAL\_D\_1 ir REAL\_D\_2 taršos maksimumas gaunamas maždaug už 3,2 km nuo MRAS, nes dėl šiluminio plūdrumo dūmų šleifo ašis yra pakelta 250 m. Scenarijaus REAL\_D\_1 atveju maksimalus <sup>137</sup>Cs iškritų tankis tik – 1,3 Bq/m², o <sup>239</sup>Pu integrinis tūrinis aktyvumas – 63 Bq·s/m³. Scenarijuje REAL\_D\_2 maksimalus <sup>137</sup>Cs iškritų tankis – 1,1 Bq/m², o <sup>239</sup>Pu integrinis tūrinis aktyvumas – 63 Bq·s/m³. Scenarijaus REAL\_D\_2 maksimalus <sup>137</sup>Cs iškritų tankis – 1,1 Bq/m², o <sup>239</sup>Pu integrinis tūrinis aktyvumas – 63 Bq·s/m³. Scenarijaus REAL\_D\_3 atveju dūmų šleifo ašies pakėlimas 200 m, iškritų maksimumas gaunamas maždaug už 2,7 km; didžiausias <sup>137</sup>Cs iškritų tankis – 1,1 Bq/m², o <sup>239</sup>Pu integrinis tūrinis aktyvumas – 68 Bq·s/m³.

Scenarijuose MED\_D\_1,2 pradinis šleifo ašies pakėlimas – 138 m, o iškritų maksimumas gaunamas už 1,5 km. Didžiausias <sup>137</sup>Cs iškritų tankis gaunamas – 12 Bq/m<sup>2</sup> ir 9,6 Bq/m<sup>2</sup> scenarijuose MED\_D\_1 ir MED\_D\_2, atitinkamai, o <sup>239</sup>Pu integrinis tūrinis aktyvumas abiem atvejais – 560 Bq·s/m<sup>3</sup>. Scenarijuje MED\_D\_3 pradinis šleifo ašies pakėlimas – 106 m. Iškritų maksimumas gaunamas už 1 km. Didžiausias <sup>137</sup>Cs iškritų tankis –

13 Bq/m<sup>2</sup>, o <sup>239</sup>Pu integrinis tūrinis aktyvumas abiem atvejais – 750 Bq·s/m<sup>3</sup>. Iškritų pėdsako kampinis plotis polinėse koordinatėse maždaug 60°.

Ant dirvožemio iškritęs <sup>137</sup>Cs gali būti pasisavintas augmenijos ar grybų ir patekti į žmogaus maisto racioną. Augalinės ir gyvulinės kilmės maisto produktų taršai radionuklidais tiksliai prognozuoti reikėtų panaudoti dinaminį modelį ir turėti daug vietovei būdingų ir nuo iškritų įvykio laiko priklausomų parametrų, kurie savo ruoštu pasižymi dideliu kintamumu. Todėl panaudotas paprastesnis patikimas pagrindinių maisto produktų taršos lygių trumpuoju periodu po avarijos įvertinimas, pasinaudojant agreguotus pernašos faktorius, apibrėžiančius vietinės kilmės maisto produktų ir pašarų savitojo aktyvumo lygius esant vienetinėms radionuklido iškritoms toje teritorijoje (Bq/kg per Bq/m<sup>2</sup>). Po Černobylio AE avarijos empiriškai įvertintos šių agreguotų faktorių vertės, būdingos užterštoms Baltarusijos, Rusijos ir Ukrainos teritorijoms, pateiktos Lentelėje 33 [45].

		Droduktwumac	Agroquotas porpašos
		Produktyvullas	Agreguotas pernasos
Ekosistema	Produktas	(tonos ha⁻²)	koeficientas (x10-3 m <sup>2</sup> /kg)
Ariama žemė	Grudai	3,5	0,1
	Bulvės	20	0,05
Nekultivuojama ganykla	Šienas	1	6,4
	Pienas	0,83	0,64
	Jautiena	0,06	2,6
Kultivuojama ganykla	Šienas	3	2,2
	Pienas	2,5	0,22
	Jautiena	0,18	0,88
Nusausintas durpynas	Šienas	4	23
	Pienas	3,3	2,3
	Jautiena	0,24	9,2
Miškas	Grybai	0,0064	30
	Uogos	0,006	10
	Žvėriena	0,005	3

Lentelė 33. Po Černobylio AE avarijos empiriškai įvertintos agreguotų <sup>137</sup>Cs pernašos faktorių vertės į svarbiausiuosius maisto produktus ir pašarus [45]

Apie MRAS yra nustatyta 1 km SAZ, todėl čia jokia ūkinė veikla nevykdoma. Nepalankiausiu nusausinto durpyno ir scenarijaus KONS\_F\_5 atveju pieno tūrinis aktyvumas už 1 km nuo MRAS galėtų siekti 145 Bq/L, jautienos savitasis aktyvumas 580 Bq/kg. Tai yra mažesni aktyvumai nei HN 99:2011 [31] apibrėžta OAVTL6 - 2000 Bq/kg vertė <sup>137</sup>Cs. Tuo tarpu grybaujama ir uogaujama gali būti ir 100 m atstumu nuo MRAS, kur grybų savitasis aktyvumas gali viršyti 1,73E+4 Bq/kg, uogų – 5,76+3 Bq/kg ir būtų būtina apriboti tokių grybų vartojimą (žr. Priedą 3 ir Excel rinkmeną).

### 5.3. Išorinės apšvitos dozių šalia liepsnos/dūmų stulpo vertinimo programa MicroShield 7 rezultatai

Išorinės apšvitos dozės galia įvairiais atstumais nuo vertikaliai kylančio radionuklidais praturtinto hipotetinio dūmų šleifo įvertinta panaudojant programą MicroShield 7.

Apšvitos dozių vertinimui taikytų prielaidų suvestinė pateikta Lentelėje 34.

Lentelė 34. Žmonių išorinės apšvitos dėl būvimo šalia radionuklidais praturtinto dūmų šleifo radiologinių padarinių vertinimui taikytų prielaidų suvestinė

Parametras	Scenarijus											
-	KONS	TIK	REAL1 D	REAL2 D	REAL3 D	MED1 D	MED2 D	MED3 0				
Išmetamų	Sc_1	TIK		Sc_2	Sc_3	 Sc_1	Sc_2	Sc_3				
radionuklidų			_	_	_			_				
aktyvumas												
Vertikalus greitis, m/s	2	10,9	11,7	11,7	10,4	8,8	8,8	7,8				
Maksimali išmetimo	60	2115	2323	2295	2347	1102	1096	1099				
(gaisro) trukmė, min	l											
Atstumas nuo MRAS				Dozės galia šalia (	dūmų šleifo, Sv/h	1						
rūsio krašto, m						. <u> </u>		<u>.</u>				
1	2,90E-07	1,20E-09	1,50E-09	1,00E-09	8,10E-10	3,60E-09	3,00E-09	2,30E-09				
2	2,30E-07	9,30E-10	1,20E-09	8,30E-10	6,40E-10	2,80E-09	2,30E-09	1,80E-09				
3	1,90E-07	7,70E-10	9,90E-10	6,90E-10	5,30E-10	2,30E-09	2,00E-09	1,50E-09				
4	1,60E-07	6,60E-10	8,40E-10	5,90E-10	4,50E-10	2,00E-09	1,70E-09	1,30E-09				
5	1,40E-07	5,80E-10	7,40E-10	5,20E-10	4,00E-10	1,70E-09	1,50E-09	1,10E-09				
7	1,10E-07	4,50E-10	5,80E-10	4,10E-10	3,10E-10	1,40E-09	1,10E-09	8,90E-10				
10	8,40E-08	3,40E-10	4,40E-10	3,10E-10	2,40E-10	1,00E-09	8,60E-10	6,70E-10				
15	5,80E-08	2,40E-10	3,00E-10	2,10E-10	1,60E-10	7,20E-10	6,00E-10	4,60E-10				
20	4,40E-08	1,80E-10	2,30E-10	1,60E-10	1,20E-10	5,40E-10	4,50E-10	3,50E-10				
30	2,80E-08	1,20E-10	1,50E-10	1,00E-10	7,90E-11	3,50E-10	2,90E-10	2,30E-10				
40	2,00E-08	8,20E-11	1,10E-10	7,40E-11	5,70E-11	2,50E-10	2,10E-10	1,60E-10				
50	1,50E-08	6,20E-11	8,00E-11	5,60E-11	4,30E-11	1,90E-10	1,60E-10	1,20E-10				
75	8,80E-09	3,60E-11	4,60E-11	3,20E-11	2,50E-11	1,10E-10	9,00E-11	7,00E-11				
100	5,60E-09	2,30E-11	2,90E-11	2,00E-11	1,60E-11	6,90E-11	5,70E-11	4,50E-11				
150	2,60E-09	1,10E-11	1,40E-11	9,50E-12	7,30E-12	3,20E-11	2,70E-11	2,10E-11				
200	1,30E-09	5,50E-12	7,00E-12	4,90E-12	3,80E-12	1,70E-11	1,40E-11	1,10E-11				
250	7,40E-10	3,00E-12	3,80E-12	2,70E-12	2,10E-12	9,10E-12	7,60E-12	5,90E-12				
300	4,10E-10	1,70E-12	2,20E-12	1,50E-12	1,20E-12	5,10E-12	4,30E-12	3,30E-12				
400	1,40E-10	5,70E-13	7,20E-13	5,10E-13	3,90E-13	1,70E-12	1,40E-12	1,10E-12				
500	4,90E-11	2,00E-13	2,60E-13	1,80E-13	1,40E-13	6,10E-13	5,10E-13	3,90E-13				

Skirtingoms žmonių kritinėms grupėms numatomos išorinės apšvitos dozės esant šalia dūmų šleifo pateiktos Lentelėje 35 skirtingiems hipotetiniams avarijos scenarijams.

Lentelė 35. Programa MicroShield 7 įvertintos išorinės apšvitos dozės skirtingų kritinių grupių žmonėms dėl būvimo šalia radionuklidais praturtinto dūmų šleifo

	Apšvitos		Kritinė grupė										
Scenarijus	trukmė, val.	Ugniagesys		MRAS darbuotojas		Gelbé	etojas	Gyventojas - avarijos liudininkas					
		Atstumas, m	Dozė, mSv	Atstumas, m	Dozė, mSv	Atstumas, m	Dozė, mSv	Atstumas, m	Dozė, mSv				
KONS	1	50	1,5E-05	100	5,6E-06	20	4,4E-05	200	1,3E-06				
тік	1	50	6,2E-08	100	2,3E-08	20	1,8E-07	200	5,5E-09				
REAL1_D	1	50	8,0E-08	100	2,9E-08	20	2,3E-07	200	7,0E-09				
REAL2_D	1	50	5,6E-08	100	2,0E-08	20	1,6E-07	200	4,9E-09				
REAL3_D	1	50	4,3E-08	100	1,6E-08	20	1,2E-07	200	3,8E-09				
MED1_D	1	50	1,9E-07	100	6,9E-08	20	5,4E-07	200	1,7E-08				
MED2_D	1	50	1,6E-07	100	5,7E-08	20	4,5E-07	200	1,4E-08				
MED3_0	1	50	1,2E-07	100	4,5E-08	20	3,5E-07	200	1,1E-08				

Numatome, kad didžiausią išorinės apšvitos dozę nuo dūmų stulpo gautų gelbėjimo tarnybų darbuotojai. Ši efektinė dozė konservatyvaus scenarijaus atveju galėtų siekti 4,4E-05 mSv. Tuo tarpu tikėtiniausia dozė gelbėtojui būtų daug mažesnė – 1,8E-07 mSv. Kitų kritinių grupių žmonės scenarijaus KONS atveju gautų: 1,5E-05 mSv, 5,6E-06 mSv ir 1,3E-06 mSv attinkamai ugniagesys, MRAS darbuotojas ir gyventojas - avarijos liudininkas. Scenarijaus TIK atveju ugniagesys, MRAS darbuotojas ir gyventojas - avarijos liudininkas gautų apšvitos dozes 6,2E-08 mSv, 2,3E-08 mSv ir 5,5E-09 mSv, atitinkamai. Kitų scenarijų atvejų išorinės apšvitos dozės būnant šalia debesies būtų taip pat labai mažos (žr. Lentelę 35). Modeliuojant darytos prielaidos, kad žmonės šalia dūmų šleifo praleidžia 1 val. ir yra nemažu atstumu nuo MRAS rūsio, tačiau, turint omenyje, kad ugniagesiai ir gelbėjimo tarnybų darbuotojai greičiausiai turėtų mobilius dozimetrus, šiuo apšvitos būdu gautą dozę galima būtų lengvai kontroliuoti ir ji neturėtų būti reikšminga.

# 5.4. Žmonių kritinių grupių vidinės apšvitos dėl įkvėptųjų ir prarytųjų radionuklidų bei išorinės apšvitos nuo iškritų dozių vertinimo programa PC COSYMA 2 rezultatai

Išorinės apšvitos dozės galios nuo dėl iškritų aplink MRAS 2D pasiskirstymas buvo įvertintas programa PC COSYMA 2 visiems 12-ai avarijos scenarijams. Detalūs vertinimo rezultatai pateikti Excel rinkmenoje, o apšvitos dozės galios verčių priklausomybė nuo atstumo ant ašies pavėjine kryptimi pateikta Priede 3. Didžiausios vertės gautos konservatyviam scenarijui KONS\_F\_5 su krituliais ir maksimali vertė arčiausiai šaltinio (už 100 nuo MRAS) siektų 1,05E-6 Sv/h (žr. Lentelę 3.2 Priede 3) ir mažėtų didėjant atstumui. HN 99:2011 apibrėžta ribinė OAVTL3 vertė 1E-6 Sv/h, todėl pagal šį kriterijų skubių ankstyvųjų apsaugomųjų ir avarijos padarinių šalinimo veiksmų taikyti nereikėtų.

Tuo tarpu scenarijų TIK, REAL ir MED atveju dėl pradinio dūmų šleifo pakėlimo, kaip ir iškritų tankio atveju, gaunama toliau nuo MRAS. Apie 95% išorinės apšvitos dozės galios nuo iškritų yra lemta <sup>137</sup>Cs, apie 4 % <sup>226</sup>Ra ir apie 1 % <sup>60</sup>Co radionuklido.

Žmonių apšvitos efektinių dozių sandų (vidinės nuo įkvėptųjų ir prarytųjų radionuklidų bei išorinės nuo panirimo į debesį ir iškritų) 2D erdvinis pasiskirstymas per pirmąsias 10 val., 1 parą, 7 paras, 1 metus ir 50 metų taip pat buvo įvertintas panaudojant programą PC COSYMA 2 12-kai avarijos plėtros scenarijų. Detalūs vertinimo rezultatai pateikti Excel rinkmenoje, o apšvitos efektinių dozių sandų verčių priklausomybė nuo atstumo ant ašies pavėjine kryptimi apibendrinti Priede 3.

Per pirmąją parą apie 97% apšvitos dozės žmogus gauna dėl įkvėptųjų radionuklidų iš debesies, 2% – nuo iškritų ir apie 1% – dėl panirimo į radioaktyvųjį debesį. Apie 89% įkvėptosios dozės yra dėl <sup>239</sup>Pu, apie 10% dėl <sup>226</sup>Ra bei mažiau nei 1% dėl <sup>137</sup>Cs.

Vertinant apšvitos dozes per 1 metus didėja išorinės apšvitos nuo <sup>137</sup>Cs iškritų indėlis (žr. Priedą 3). Programa PC COSYMA skaičiuodama pirmųjų metų apšvitos dozes neįskaito maisto grandinių indėlį, nes laikoma, kad per pirmuosius metus šis apšvitos būdas būtų kontroliuojamas. Dozėms per 50 metų labai reikšmingas pasidaro apšvitos dėl prarytųjų radionuklidų kelias, kuris scenarijams be lietaus gali siekti virš 40%, o su lietumi apie 80% visos efektinės dozės (žr. Priedą 3). Apie 95% prarytųjų radionuklidų lemtos dozės sudaro <sup>137</sup>Cs, likusios 5% maždaug lygiomis dalimis <sup>90</sup>Sr ir <sup>226</sup>Ra (žr. Excel rinkmeną).

Įvertintos įvairioms gyventojų kritinėms grupėms būdingos apšvitos dozės po avarijos skirtingiems scenarijams pateiktos Lentelėje 36.

### Lentelė 36. Programa PC COSYMA 2 įvertintos įvairioms gyventojų kritinėms grupėms būdingos suminės apšvitos efektinės dozės skirtingiems avarijos scenarijams

Sumavimo laikotarpis			1 paro	s		1 m	netų	50 metų					
Kritinė grupė	Ugniagesys	MRAS darbuotojas	Gelbėtojas	Gyventojas - avarijos liudininkas	Pastovus gyventojas už 2,7 km nuo MRAS	Pastovus gyventojas už 3,2 km nuo MRAS	Pastovus gyventojas už 2,7 km nuo MRAS	Pastovus gyventojas už 3,2 km nuo MRAS	Pastovus gyventojas už 2,7 km nuo MRAS	Pastovus gyventojas už 3,2 km nuo MRAS			
Scenarijus		Suminė apšvitos efektinė dozė, Sv											
KONS_F_0	4,10E-04	3,42E-05	4,11E-04	2,27E-04	5,59E-06	4,31E-06	2,56E-04	1,97E-04	1,32E-03	1,02E-03			
KONS_F_5	4,04E-04	3,37E-05	4,10E-04	2,22E-04	4,23E-06	3,07E-06	2,98E-04	2,25E-04	6,06E-03	4,81E-03			
KONS_D_0	1,34E-04	1,12E-05	1,35E-04	5,56E-05	1,20E-06	9,27E-07	5,49E-05	4,24E-05	2,84E-04	2,19E-04			
KONS_D_5	1,33E-04	1,11E-05	1,35E-04	5,49E-05	1,13E-06	8,56E-07	9,54E-05	7,55E-05	2,37E-03	1,96E-03			
TIK_D_0	6,20E-11	2,30E-11	1,80E-10	5,50E-12	4,97E-09	4,93E-09	2,26E-07	2,24E-07	1,10E-06	1,10E-06			
TIK_D_5	6,20E-11	2,30E-11	1,80E-10	5,50E-12	7,09E-09	6,63E-09	9,17E-07	8,12E-07	3,03E-05	2,62E-05			
REAL1_D_0	8,00E-11	2,90E-11	2,30E-10	7,00E-12	2,64E-09	2,84E-09	1,20E-07	1,29E-07	6,23E-07	6,68E-07			
REAL2_D_0	5,60E-11	2,00E-11	1,60E-10	4,90E-12	2,63E-09	2,82E-09	1,19E-07	1,28E-07	5,67E-07	6,09E-07			
REAL3_D_0	4,30E-11	1,60E-11	1,20E-10	3,80E-12	3,05E-09	2,91E-09	1,38E-07	1,32E-07	6,55E-07	6,25E-07			
MED1_D_0	1,90E-10	6,90E-11	5,40E-10	1,70E-11	1,91E-08	1,64E-08	8,75E-07	7,48E-07	4,53E-06	3,87E-06			
MED2_D_0	1,60E-10	5,70E-11	4,50E-10	1,40E-11	1,91E-08	1,63E-08	8,65E-07	7,39E-07	4,12E-06	3,52E-06			
MED3_D_0	1,20E-10	4,50E-11	3,50E-10	1,04E-10	1,76E-08	1,44E-08	7,96E-07	6,53E-07	3,77E-06	3,10E-06			

Konservatyviems scenarijams (KONS\_F ir KONS\_D) ir gyventojams už SAZ ribos visiems scenarijams reikšmingiausia yra apšvita dėl įkvėptųjų radionuklidų (virš 95% visos dozės), nes žmonės patenka į radionuklidais praturtintą debesį. Antakalnių gyventojas galėtų patirti maksimalią 2,98E-04 Sv dozę per metus.

Didžiausia paros apšvitos efektinė dozės gali siekti 4,11E-04 Sv gelbėtojui. Tuo tarpu MRAS SAZ ribose esantiems gelbėjimo tarnybų ir MRAS darbuotojų dozės scenarijuose TIK, REAL ir MED yra ženkliai mažesnės (maksimali gelbėtojui – 2,3E-10 Sv per parą), nes dūmų šleifas yra pakilęs 100 m virš žemės paviršiaus ir patiriama tik išorinės apšvitos dozė esant šalia dūmų stulpo 20-200 m atstumu priklausomai nuo kritinės grupės (žr. Lentelę 19).

Taip pat įvertintos apšvitos suminės efektinės dozės per 1 metus ir 50 metų gyventojams už SAZ ribų artimiausiose pastoviai gyvenamose Antakalnių (už 2,7 km) ir Draučių (už 3,2 km) gyvenvietėse. Jos gali siekti 2,98E-04 Sv per 1 metus ir 6,06E-03 Sv per 50 metų (KONS\_F\_5 scenarijus).

Apibendrinant nagrinėtuosius scenarijus galima teigti, kad ženklių apšvitos dozių, dėl kurių reikėtų taikyti skubius apsaugomuosius veiksmus gyventojams, nenumatoma, tačiau gali tekti apriboti maždaug iki 1 km nuo MRAS surinktų grybų vartojimą po avarijos.

# 5.5. Gyventojų vidinės apšvitos dozių dėl gruntinio vandens (šulinio) taršos scenarijaus vertinimo programa RESRAD-OFFSITE rezultatai

Artimiausios gyvenvietės (Draučių), esančios gruntinio vandens tekėjimo kryptimi už 3,2 km nuo MRAS, pastovaus gyventojo vidinės ir išorinės apšvitos dozės (dėl užteršto gruntinio vandens iš šulinio ir žuvies iš Spėros ežero vartojimo) buvo įvertintos su kompiuterine programa RESRAD-OFFSITE 3.2. Skaičiavimuose konservatyviai laikyta, kad po lėktuvo kritimo avarijos visi saugyklos inžineriniai barjerai praranda sandarumą bei betonui būdingas sorbcines savybes ir visas MRAS rūsio radionuklidų inventorius gali infiltruotis su 690 mm/metus kritulių į gruntinius vandenis. Tik judriausieji ir ilgaamžiai <sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>36</sup>Cl, <sup>226</sup>Ra, <sup>238</sup>U ir <sup>239</sup>Pu radionuklidai pasieks šulinio ir ežero vandenį dar visiškai nesuskilę (žr. Pav. 31). Ankščiausiai šulinio vandenį pasieks <sup>3</sup>H, kurio didžiausia 0,036 Bq/L koncentraciją būtų galima užfiksuoti po 235 metų nuo avarijos. <sup>3</sup>H lemta didžiausia metinė 1,5E-07 mSv gyventojo efektinė apšvitos dozė. Didžiausia <sup>36</sup>Cl koncentracija šulinio vandenyje 4,6 Bq/L būtų po 356 metų nuo avarijos ir lemtų 0,01 mSv/metus didžiausią efektinę apšvitos dozę. Didžiausia radiologines pasekmes sukeltų <sup>14</sup>C radionuklidas po 8962 metų. Koncentracija šulinio vandenyje pasiektų 0,39 Bq/L, o daržovėse 1880 Bq/kg, kuri neviršija HN 99:2011 apibrėžtos <sup>14</sup>C OAVTL6 – 1e+4 Bq/L vertės [31]. Didžiausia efektinė apšvitos dozė – 0,197 mSv/metus. Didžiausią indėlį į apšvitos dozes duoda augalinės kilmės produktų vartojimas (žr. <sup>3</sup>H bei <sup>14</sup>C Pav. 32 ir <sup>239</sup>Pu Pav. 33). Kitų radionuklidų poveikis pasireikštų daug vėliau bei būtų daug mažesnis (žr. Lentelę 37).



Pav. 31. Šulinio vandens vartojimo scenarijaus lemtos metinės efektinės apšvitos dozės Draučių gyventojams 100-100000 metų periodu



Pav. 32. Reikšmingiausių apšvitos kelių indėlis į metines apšvitos dozes šulinio vandens vartojimo scenarijui Draučių gyventojams 0-700 metų periodu, kai dominuoja <sup>3</sup>H ir <sup>36</sup>Cl



## Pav. 33. Reikšmingiausių apšvitos kelių indėlis į metines apšvitos dozes šulinio vandens vartojimo scenarijui Draučių gyventojams 5000-10000 metų periodu, kai dominuoja <sup>14</sup>C

Apibendrinant šulinio taršos scenarijų, galima teigti, kad net ir lėktuvo kritimo avarijos visiškai pažeista Maišiagalos saugykla trumpuoju periodu (iki 100 metų) nesukeltų reikšmingų padarinių. Reikšmingi padariniai Draučių gyventojams dėl avarijos galėtų pasireikšti tik daugiau kaip po 8000 metų (0,2 mSv/metus dėl <sup>14</sup>C taršos). Tačiau tikėtina, kad tokios avarijos padarinius galima būtų visiškai likviduoti (pvz. apsaugoti saugyklą nuo kritulių ar pašalinti gruntą) iki tol, kol jie paveiktų gyventojus.

Radionuklidas	Maksimali metinė dozė, mSv/metus	Laikas po avarijos, kai pasiekiamas dozės maksimumas, metai	Didžiausia koncentracija								
			Šulinio vanduo, Bq/L	Mėsa, Bq/kg	Pienas, Bq/L	Daržovės, Bq/kg	Žuvis, Bq/kg	Galvijų pašarai, Bq/kg			
<sup>3</sup> Н	1,5E-7	235	0,036	0,011	0,026	0,016	8,8E-10	3,7E-10			
<sup>14</sup> C	0,197	8962	0,39	0,2	0,51	1880	0,37	0,037			
<sup>36</sup> Cl	0,01	356	4,6	13	13,5	41	0,13	6,7E-4			

Lentelė 37. Šulinio vandens vartojimo scenarijaus radiologiniai padariniai Draučių gyvenvietėje

### 5.6. Programos PC COSYMA 2 skaičiavimų verifikacija panaudojant AvarDose programą

Programos PC COSYMA 2 skaičiavimų verifikacijai buvo pasirinkta Fizikos institute sukurta kompiuterinė programa AvarDose. Programa AvarDose buvo sukurta 2005 metais pagal PHARE sutartį Nr. LI0118-03-01-0001, kaip pagalbinė priemonė VATESI avarinio centro darbuotojams vertinti galimų avarijų Ignalinos AE padarinius. Programa AvarDose veikia Microsoft Office XP paketo Excel programos aplinkoje kaip makro-komandų rinkinys. Joje panaudotas panašus kaip ir programoje PC COSYMA 2 Gauso modelis radionuklidų sklaidai prognozuoti po trumpalaikio avarinio išmetimo į atmosferą iš branduolinio objekto.

Siekiant įsitikinti, kad programa PC COSYMA 2 skaičiavimus atlieka taip kaip tikimasi (verifikuoti) nepriklausomai programomis PC COSYMA 2 ir AvarDose buvo įvertintas Cs-137 iškritų ant žemės paviršiaus pavėjinėje linijoje tankis KONS\_F\_0 ir KONS\_D\_0 scenarijams. Gautieji palyginamųjų skaičiavimų duomenys KONS\_F\_0 scenarijui pateikti Pav. 34, o KONS\_D\_0 scenarijui Pav. 35.



Pav. 34. Programų PC COSYMA 2 ir AvarDose <sup>137</sup>Cs iškritų tankio pavėjinėje linijoje palyginamųjų skaičiavimų duomenys KONS\_F\_0 scenarijui.



#### Pav. 35. Programų PC COSYMA 2 ir AvarDose <sup>137</sup>Cs iškritų tankio pavėjinėje linijoje palyginamųjų skaičiavimų duomenys KONS\_D\_0 scenarijui

Abiem programomis gauti panašūs prognozuojami Cs-137 iškritų tankio rezultatai atstumui iki 10 km nuo MRAS. KONS\_F\_0 scenarijaus atveju rezultatų skirtumas neviršija 15 %, o KONS\_D\_0 scenarijaus atveju – neviršija 29 %. Toliau negu už 10 km skirtumas padidėja, nes programos naudoja skirtingus skiedimosi įsisotinimo *z* ašimi modelius, kai dūmų šleifas pasiekia atmosferos inversijos sluoksnį. Palyginimas parodė, kad įvesties duomenys programos PC COSYMA skaičiavimuose yra adekvačiai interpretuoti ir teisingai įvesti atliekant lėktuvo kritimo avarijų scenarijų skaičiavimus.

#### 5.7. Radiologinių padarinių vertinimo rezultatų apibendrinimas ir išvados

Tyrimo metu išnagrinėti lėktuvo kritimo ant MRAS kai avarijos scenarijų atvejai: Sc\_1 (gaisro apimtas visas rūsys), Sc\_2 (neapimti 6 sekcijos PUŠ) ir Sc\_3 (neapimti visi PUŠ).

Taikant scenarijuje Sc\_1 radionuklidų išmestą pažeme į atmosferą kiekį, sudaryti konservatyvūs sklaidos scenarijai KONS. Nepalankiausi yra mažiausio skiedimosi sąlygomis vykstantys scenarijai, esant atmosferos stabilumo F klasei: scenarijai KONS\_F\_0 – be kritulių ir KONS\_F\_5 – su 5 mm lietaus. Taip pat nagrinėti konservatyvūs platesnį

taršos arealą apimantys scenarijai: KONS\_D\_0 – be kritulių ir KONS\_D\_5 – su 5 mm lietaus, esant atmosferos stabilumo D klasei. Papildomai analizuoti tikėtiniausi scenarijai TIK\_D\_0 (be kritulių) ir TIK\_D\_5 (5 mm lietaus), kurie gauti suvidurkinant (imamas geometrinis vidurkis) scenarijų Sc\_1, Sc\_2 ir Sc\_3 radionuklidų kiekių ir visų galimai MRAS rūsyje esančių medžiagų degimo būdus (kietos plokštės ir mišinio su betonu) ir parametrus (šiluminę galią, liepsnos aukštį, degimo trukmę). Sklaida vyksta dažniausiai vietovėje pasikartojančios atmosferos stabilumo D klasės sąlygomis, pradinis dūmų šleifo pakėlimas įvertintas iš vidutinės degimo šiluminės galios. Geometrinis parametrų vidurkis atspindi labiausiai tikėtiną avarijos scenarijų ir TIK scenarijai laikomi pagrindiniais realistiniais scenarijais.

Papildant analizę, taip pat nagrinėti realistiniai REAL tipo scenarijai, kurie gauti imant atmosferos stabilumo D klasę su įvertintu pradiniu dūmų šleifo pakėlimu dėl plūdrumo, bei atskirai suvidurkinant scenarijų Sc\_1, Sc\_2 ir Sc\_3 atvejus (REAL1\_D\_0, REAL2\_D\_0 ir REAL3\_D\_0 scenarijai su 0 mm kritulių). Atsižvelgiant į buvusio MRAS darbuotojo ekspertinę nuomonę, kad MRAS rūsyje didžioji dalis degiųjų medžiagų buvo mediena ir kad ji sudarė 10% rūsio tūrio, papildomai analogiškai sudaryti ir nagrinėti scenarijai MED1\_D\_0, MED2\_D\_0, MED3\_D\_0. Iš viso išnagrinėta 12 avarijos plėtros scenarijų ir įvertinti jų galimi radiologiniai padariniai.

Atmosferos keliu radionuklidų sklaidai ir iškritoms apie MRAS bei gyventojų apšvitos dozėms vertinti pasitelkta Europos sąjungoje rekomenduojama taikyti PC COSYMA kompiuterinė programa. Ja gauti radionuklidų integrinio tūrinio aktyvumo bei iškritų tankio 2D laukai apie MRAS polinėse koordinatėse 100 m iki 50 km atstumu nuo saugyklos visiems 12 scenarijų. Taip pat įvertintos prognozuojamos trumpalaikės gyventojų apšvitos efektinės dozės 10 val., 1 paros, 7 parų, 1 metų laikotarpiams įskaitant išorinės apšvitos nuo debesies ir iškritų bei vidinės apšvitos dėl įkvėptųjų radionuklidų būdus. Artimiausia pastoviai gyvenama gyvenvietė (Antakalniai) yra už 2,7 km nuo MRAS, ir nepalankiausio scenarijaus KONS\_F\_5 atveju jos gyventojas galėtų gauti 2,98E-04 Sv per 1 metus apšvitos efektinę dozę. Dominuojanti yra vidinės apšvitos dozė dėl įkvėptojo Pu-239. Tuo tarpu, vertinant ilgojo laikotarpio apšvitą, papildomai įtrauktas vidinės apšvitos dėl su maistu į žmogaus organizmą patenkančių radionuklidų būdas. Per 50 metų laikotarpį Antakalnių gyventojas galėtų patirti 6,06E-03 Sv efektinę dozę. Didžiausią indėlį šiuo atveju įneša su maistu patenkantis Cs-137 radionuklidas.

Avarijos liudininkų ir gelbėjimo tarnybų darbuotojų apšvitos dozės MRAS SAZ ribose vertintos papildomai pasitelkiant programinį paketą MicroShield 7, kuriuo buvo modeliuota išorinės apšvitos dėl būvimo šalia radionuklidais praturtinto vertikalaus dūmų šleifo apšvitos dozė. Skaičiavimai parodė, kad šis apšvitos kelias yra mažai reikšmingas ir didžiausia

apšvitos dozė patiriama dėl įkvėptųjų radionuklidų, jeigu žmogus patenka į radioaktyvųjį debesį netoli MRAS. Įvertinta didžiausia paros efektinė dozės gali siekti 4,11E-04 Sv gelbėtojų kritinės grupės atstovui. Skaičiavimų rezultatai programa PC COSYMA 2 apibendrinti Priedo 2 (<sup>137</sup>Cs iškritų tankis ir <sup>239</sup>Pu integrinis tūrinis aktyvumas) bei Priedo 3 (apšvitos dozių sandai bei indėlio analizė) lentelėse. Detalūs skaičiavimo rezultatai programa PC COSYMA 2 2D 50x50 km teritorijai apie MRAS pateikti atskiroje Excel rinkmenoje.

Papildomai įvertinta, ar dėl iš avarijos suardytos MRAS gruntinio vandens keliu pasklidę radionuklidai galėtų paveikti artimiausios Draučių, esančios už 3,2 km nuo MRAS gruntinio vandens tekėjimo kryptimi, nuolatinį gyventoją. Skaičiavimai atlikti programa RESRAD-OFFSITE 3.2. Nustatyta, kad poveikis pasireikštų tik po kelių šimtų metų, o didžiausia apšvitos metinė efektinė dozė dėl <sup>14</sup>C užteršto šulinio vandens vartojimo galėtų siekti 0,2 mSv/metus tik po daugiau kaip 8 000 metų.

Apibendrinant nagrinėtuosius scenarijus galima teigti, kad ženklių apšvitos dozių, dėl kurių reikėtų taikyti skubius apsaugomuosius veiksmus gyventojams nenumatoma, nebent gali tekti apriboti netoli MRAS po avarijos surinktų <sup>137</sup>Cs užterštų grybų (iki 1 km) ir uogų (iki 0,5 km) vartojimą.

### 6. IŠVADOS

Atlikta galimų branduolinių ir radiologinių avarijų Maišiagalos radioaktyviųjų atliekų padarinių dėl lėktuvo Boeing 737-800 su pilnu kuro baku kritimo į atidengtą MRAS rūsį radioaktyviųjų atliekų išėmimo metu 2020 m. sausio 1 d.

Išnagrinėti 4 lėktuvo smūgio į MRAS rūsį mechaninio poveikio scenarijai, atlikta jautrumo analizė įvertinti grunto po MRAS rūsiu savybių įtakai gaisro baseino susidarymui.

Atlikta rūsyje esančių medžiagų išsidėstymo jame, medžiagų charakteristikų ir tarpusavio išsidėstymo bei sukibimo įtakos KRA gaisrui analizė. Tuo tikslu išnagrinėti 12 scenarijų.

Atliktas avarijos metu j aplinką išmestų radionuklidų sklaidos vertinimas, nustatytos radiologinio užterštumo teritorijos ir įvertinta avarijų nulemta apšvita gyventojams, esantiems už SAZ ribų nepalankiausiomis ir labiausiai tikėtinomis meteorologinėmis sąlygomis 12-kai KRA gaisro scenarijams.

Parengti galimo teritorijos aplink MRAS radiologinio užteršimo detalūs žemėlapiai bei lentelės ir gyventojų galimos apšvitos nuo debesies, žemės paviršiaus, įkvėpimo išsamūs žemėlapiai bei lentelės.

Papildomai įvertinta, ar dėl iš avarijos suardytos MRAS gruntinio vandens keliu pasklidę radionuklidai galėtų paveikti artimiausios Draučių, esančios už 3,2 km nuo MRAS gruntinio vandens tekėjimo kryptimi, nuolatinį gyventoją.

Nustatyta, kad MRAS rūsyje yra nepakankamas daliųjų medžiagų kiekis, kad įvyktų branduolinė dalijimosi reakcija net esant palankiausioms šiai reakcijai sąlygomis.

Išnagrinėjus lėktuvo Boeing 737-800 smūgio į MRAS rūsį mechaninį poveikį rasta, kad konservatyviai vertinant lėktuvas įsiskverbia į rūsį ir išsiliejęs lėktuvo kuras gali kontaktuoti su rūsyje esančiomis KRA.

Dėl lėktuvo Boeing 737-800 smūgio į MRAS rūsį gruntas po rūsiu nusėda ir susidaro įduba pakankama, kad į ją būtų išpilta didelė lėktuvo kuro dalis, jeigu nepriklausomai nuo lėktuvo sparnų orientacijos rūsio paviršiaus atžvilgiu, lėktuvas smogia į rūsio paviršiaus centrą. Priklausomai nuo mechaninių grunto po rūsiu mechaninių savybių, kurios nulemia skystojo kuro degimo baseino dydį, lėktuvo kuro gaisro trukmė varijuoja maždaug tarp 0,5 val. ir 2 val., o liepsnos aukštis iki skystojo kuro gaisro baigiamosios stadijos – tarp maždaug 10 m ir 20 m.

Konservatyviai vertinant, kad dėl skystojo kuro degimo liepsna apima didžiąją dalį (nemažiau kaip 70 %) rūsyje esančių KRA, gaunama, kad KRA gaisro trukmė viršija 0,5 val., o liepsnos aukštis iki kietojo kuro gaisro baigiamosios stadijos gali varijuoti tarp maždaug tarp 2 m ir 15 m priklausomai nuo KRA ir betono rūsyje tarpusavio išsidėstymo ir sukibimo.

Laikant, kad KRA gaisras vyksta pasibaigus lėktuvo kuro gaisrui, bendra gaisro trukmė viršija 1 val.

Dėl išorinės apšvitos nuo debesies ir iškritų bei vidinės apšvitos dėl įkvėptųjų radionuklidų artimiausios pastoviai gyvenamos gyvenvietės (Antakalniai) gyventojas nepalankiausio scenarijaus atveju galėtų gauti 2,98E-04 Sv per 1 metus apšvitos efektinę dozę. Dominuojanti yra vidinės apšvitos dozė dėl įkvėptojo Pu-239. Per 50 metų laikotarpį Antakalnių gyventojas galėtų patirti 6,06E-03 Sv efektinę dozę. Didžiausią indėlį šiuo atveju įneša su maistu patenkantis Cs-137 radionuklidas.

Didžiausia paros efektinė dozės gelbėtojų kritinės grupės atstovui gali siekti 4,11E-04 Sv. Ji patiriama dėl įkvėptųjų radionuklidų, jeigu žmogus patenka į radioaktyvųjį debesį netoli MRAS.

Didžiausia metinė efektinė dozė dėl radionuklidu C-14 užteršto šulinio vandens vartojimo, kurią gautų nuolatinis gyventojas artimiausioje MRAS gruntinio vandens tekėjimo kryptimi. gyvenvietėje (Draučiai), galėtų siekti 0,2 mSv/metus tik po daugiau kaip 8000 metų.

Apibendrinant galima teigti, kad ženklių apšvitos dozių, dėl kurių reikėtų taikyti skubius apsaugomuosius veiksmus gyventojams nenumatoma, nebent gali tekti apriboti netoli MRAS po avarijos surinktų Cs-137 užterštų grybų (iki 1 km) ir uogų (iki 0,5 km) vartojimą.

#### 7. NUORODOS

1. Galimų branduolinių ir radiologinių avarijų MRAS padarinių analizės paslaugų pirkimo techninė specifikacija, VĮ IAE Eksploatacijos nutraukimo departamento projektų valdymo tarnyba, 2019, vasario 13 d. Spc-27(13.67).

2. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 7 "Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency".

3. Method for Developing Arrangements for Response to a Nuclear or Radiological Emergency. Updating IAEA-TECDOC-953. EPR-METHOD (2003).

4. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-1.4.1-2016 "Vadybos sistema", patvirtinti VATESI viršininko 2016 m. sausio 29 d. įsakymu Nr. 2.2.3-13.

5. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-1.9.3-2016 "Radiacinė sauga branduolinės energetikos objektuose", patvirtinti VATESI viršininko 2011 m. spalio 6 d. įsakymu Nr. 22.3-95.

6. Branduolines saugos reikalavimai BSR-1.7.1-2014 "Saugai svarbių branduolinės energetikos objekto konstrukcijų, sistemų ir komponentų priešgaisrinė sauga", patvirtinti 2014 m. balandžio 10 d. VATESI viršininko įsakymu Nr. 22.3-57.

7. Branduolines saugos reikalavimai BSR-1.9.1-2011 "Radionuklidų išmetimo į aplinką iš branduolinės energetikos objektų normos ir reikalavimai radionuklidų išmetimo į aplinką planui", patvirtinti VATESI viršininko 2011 m. rugsėjo 27 d. įsakymu Nr. 22.3-89 (Žin., 2011, Nr. 118-5599).

8. Sprogimo ir lėktuvo kritimo poveikio branduolinės energetikos objektams analizės reikalavimai, P-2005-02, patvirtinti VATESI viršininko 2005 m. gruodžio 30 d. įsakymu Nr. 22.3-72.

9. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-1.4.2-2014 "Branduolinės energetikos objekto statybos vadyba", patvirtinti VATESI viršininko 2017 m. sausio 24 d. įsakymu Nr. 22.3-14 (TAR, 2017-01-24, Nr. 1349).

 Branduolinės saugos reikalavimai BSR-2.1.2-2010 "Bendrieji atominių elektrinių su RBMK-1500 tipo reaktoriais saugos užtikrinimo reikalavimai", patvirtinti VATESI viršininko 2010 m. vasario 5 d. įsakymu Nr. 22.3-16 (Žin., 2010. Nr. 20-961).

11. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-1.4.3-2017 "Licencijuojamą veiklą branduolinės energetikos srityje vykdančių organizacijų žmogiškieji ištekliai", patvirtinti VATESI viršininko 2017 m. rugsėjo 20 d. įsakymu Nr. 22.3-160 (TAR, 2017-09-20, Nr. 14856).

12. IAE saugai svarbaus produkto tiekėjų bei subtiekėjų vertinimo ir jų veiklos kontrolės tvarkos aprašas, DVSta-1708-4, patvirtintas IAE generalinio direktoriaus 2017 gruodžio 18 d. įsakymu Nr. ĮsTa-398.

13. Galutinis Maišiagalos radioaktyviųjų atliekų saugyklos eksploatavimo nutraukimo planas, LEI,
2018.

14. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 2018 edition, IAEA Safety Standards Series, no. SSR-6 (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2018.

15. Plutonium-239, https://en.wikipedia.org/wiki/Plutonium-239 (žiūrėta 2019 m. rugpjūčio 9 d.).

16. Fat Man, https://en.wikipedia.org/wiki/Fat\_Man (žiūrėta 2019 m. lapkričio 6 d.).

17. Nuclear Weapon Design,

https://web.archive.org/web/20081226091803/http://www.fas.org/nuke/intro/nuke/design.htm, (žiūrėta 2019 m. lapkričio 6 d.).

18. Accident Analysis for Aircraft Crash into Hazardous Facilities, DOE-STD-3014-2006.

https://www.standards.doe.gov/standards-documents/3000/3014-astd-2006/@@images/file (žiūrėta 2019 m. rugpjūčio 9 d.).

19. Riera J., On the Stress Analysis of Structures Subjected to Aircraft Impact Forces, Nuclear Engineering and Design 8 (1968) 415-426.

20. Riera J., A Critical Reappraisal of Nuclear Power Plant Safety against Accidental Aircraft Impact. Nuclear Engineering and Design 57 (1980) 193-206.

21. AIRBUS A320, Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning, 2019.

22. BOEING 737, Airplane Characteristics for Airport Planning, 2013.

23. BOEING 707, Airplane Characteristics for Airport Planning, 2011.

24. Iravanian A. and Bilsel H., Tensile Strength Properties of Sand-bentonite Mixtures Enhanced with Cement, Procedia Engineering 143 (2016) 111-118.

25. Wolf J. P., Spring-Dashpot-Mass models for foundations, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 26 (1997) 931-949.

26. Maišiagalos radioaktyviųjų atliekų saugyklos periodinės saugos vertinimo ataskaita. Tomas I. FTMC, LEI, Eksortus, Vilnius, 2015.

27. NRC. Fire Dynamics Tools (FDTs) – Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program (NUREG-1805). Washington, DC: s.n., 2004.

28. Corrosionpedia. https://www.corrosionpedia.com/definition/627/heat-release-rate-hrr (žiūrėta 2019 m. rugpjūčio 9 d.).

29. SFP Handbook of Fire Protection Engineering, Third edition. NFPA, 2002.

30. EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities. Volume 2: Detailed Methodology, NUREG/CR-6850, NRC, 2005.

31. Lietuvos higienos norma HN 99:2011 "Gyventojų apsauga įvykus radiologinei ar branduolinei avarijai", Nr. 155-7369, Valstybės žinios, 2011-12-20.

32. Method for Developing Arrangements for Response to a Nuclear or Radiological Emergency. EPR METHOD 2003. IAEA, Vienna, 2003.

33. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. Safety Reports Series No. 19, STI/PUB/1103, IAEA, Vienna 2001.

34. PC COSYMA Version 1.0 User Guide, National Radiological Protection Board and Forchungszentrum Karlsruhe GmbH, Commission of the European Communities, Publication no. EUR 14917 EN, 1993.

35. Yu, C., E. Gnanapragasam, B.M. Biwer, S. Kamboj, J.-J. Cheng, T. Klett, D. LePoire, A.J. Zielen, S.Y. Chen, W.A. Williams, A. Wallo, S. Domotor, T. Mo, and A. Schwartzman, 2007, User's Manual for RESRAD-OFFSITE Version 2, ANL/EVS/TM/07-1, DOE/HS-0005, NUREG/CR-6937, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois. http://resrad.evs.anl.gov/codes/resrad-offsite/ (žiūrėta 2019 m. rugpjūčio 9 d.).

36. Maišiagalos radioaktyviųjų atliekų saugyklos periodinės saugos vertinimo ataskaita. Tomas II. FTMC, LEI, Eksortus, Vilnius, 2015.

37. Enclosure Fire Dynamics. 1999. Björn Karlsson, James G. Quintiere. CRC Press. ISBN 0-8493-1300-7.

38. MicroShield®, https://www.radiationsoftware.com/file/msproddesc (žiūrėta 2019 m. rugpjūčio 9 d.).

39. External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil. Federal Guidance Report No. 12, EPA-402-R-93-081, U.S. EPA 1993.

40. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60, ICRP Publication 119, Ann. ICRP 41(Suppl.), K. Eckerman, J. Harrison, H-G. Menzel, C.H. Clement, ICRP, 2012.

41. RCE-5: Guidance on the Application of Dose Coefficients for the Embryo, Fetus and Breastfed Infant in Dose Assessments for Members of the Public, ISBN 978-0-85951-614-3, Public Health England, 2008.

42. International Response Technical Manual (RTM-95), Volume 2, Ed. T. McKenna, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, 1995.

43. S. G. Homann, F. Aluzzi. HotSpot Health Physics Codes Version 3.0 User's Guide, LLNL-SM-636474, National Atmospheric Release Advisory Center, Lawrence Livermore National Laboratory, 2014, https://narac.llnl.gov/content/assets/docs/HotSpot-UserGuide-3-0.pdf (žiūrėta 2019 m. rugpjūčio 9 d.).

44. Maišiagalos radioaktyviųjų atliekų saugyklos eksploatavimo nutraukimas. Poveikio aplinkai vertinimo ataskaita, LEI, 2017.

45. Chernobyl Catastrophe and Consequences. Jim Smith, Nicholas A. Beresford. Springer; 2005 edition (September 27, 2005). ISBN 3-540-23866-2. 310 p.