Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Füüsika Instituut

Ida Pinte

Tuumajaamast lekkivate gaasiliste radioaktiivsete ainete dispersiooni mudeldamine

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Füüsika, keemia ja materjaliteaduse õppekava

Juhendajad:

Marti Jeltsov, PhD

Siiri Salupere, PhD

Krislin Sartakov, MSc

Tartu 2024

Tuumajaamast lekkivate gaasiliste radioaktiivsete ainete dispersiooni mudeldamine

Tuumajaama planeerimise üks oluline osa on hädaolukordade puhuks tegevuste etteplaneerimine. Tuumarajatisest lekkivate radioaktiivsete ainete dispersiooni mudeldamise abil saab hinnata, kui kaugele need ained levivad ja kui suure kiirgusdoosi inimesed selles piirkonnas saada võivad. Töö eesmärgiks on välja töötada meetod tuumajaama puhul rakendatava hädaolukorraks valmisoleku planeerimistsooni määramiseks. Selleks uuriti tuule kiiruse ja sademete intensiivsuse mõju planeerimistsooni raadiusele. Seejärel pandi paika simulatsioonide parameetrid, mida planeerimistsooni määramiseks kasutada tuleks. Planeerimistsoonide raadiused tulid kõige suuremad tuule kiirustel alla 4 m/s. Viimaks rakendati meetodit väikereaktori allikaliikme planeerimistsooni määramiseks. Väikereaktori allikaliikme planeerimistsoon jäi tuumajaama territooriumile.

Märksõnad: tuumaenergeetika, hädaolukordadeks valmisolek, hädaolukordadeks valmisoleku planeerimistsoon, atmosfäärne levi, JRodos

CERCS: T160 – Tuumatehnoloogia

Modeling the dispersion of radioactive gaseous isotopes leaking from a nuclear power plant

An important element when planning a nuclear power plant is also planning the emergency preparedness and response. Modeling of the dispersion of radioactive gaseous isotopes leaking from a nuclear power plant can help estimate how far the isotopes will spread and what dose may the people in the area receive. The objective of this thesis is to develop a method for determining the size of the emergency planning zone (EPZ) of a nuclear power plant. The effect of wind speed and intensity of precipitation on the radius of EPZ was studied and the weather parameters to use for determining the EPZ were set. The radii of EPZ-s were the biggest at wind speeds lower than 4 m/s. Lastly the method was applied to determine the EPZ of a small reactor. The EPZ remained within the territory of the nuclear power plant.

Keywords: nuclear engineering, emergency preparedness, emergency planning zone, atmospheric dispersion, JRodos

CERCS: T160 – Nuclear engineering and technology

Sisukord

Sissejuhatus 4

Töös kasutatavad füüsikalised suurused ja ühikud 5

1. Teoreetiline taust 6

1.1. Miks on hädaolukorraks planeerimistsoon vajalik? 6

1.2. Hädaolukorraks valmisoleku planeerimistsoon ja planeerimiskaugused 7

1.3. Planeerimistsoonide määramine 8

1.4. Allikaliige 10

2. Metoodika 11

2.1. Tarkvara JRodos 11

2.2. Töös kasutatavad arvutusmudelid 12

2.3. Töö käik 13

2.3.1. Töös kasutatavad allikaliikmed 13

3. Tulemused ja arutelu 15

3.1. Arvutusliku võrgu tundlikkuse analüüs 15

3.2. Ilma mõju EPZ-i raadiusele surveveereaktori VVER 440 MW näitel 16

3.3. EPZ-i määramise mudeli rakendamine väikereaktori allikaliikmele 19

Kokkuvõte 21

Kasutatud kirjandus 22

Lisad 24

Lisa 1. Allikaliikme F6.VVER440SEV2 isotoobid ja nende lekkinud aktiivsus 24

Lisa 2. TVA allikaliikme isotoobid ja nende lekkinud aktiivsus 25

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks 26

Sissejuhatus

Tuumajaamadel on mitmeid ohutus- ja turvasüsteeme, et mõne seadme rikke korral suurt õnnetust ei tekiks. Siiski on võimalik, et ohutussüsteemi ja seadme rike toimuvad samal ajal. Tulemuseks on õnnetus, mille tagajärjel võib keskkonda paiskuda radioaktiivseid aineid, mis on inimestele ja keskkonnale kahjulikud. Et tuumajaama õnnetus inimestele võimalikult vähe kahju saaks teha, tegeletakse juba tuumajaama planeerimisel õnnetusteks valmistumisega.

Tuumajaama planeerimise üks oluline osa on hädaolukordade puhuks tegevuste etteplaneerimine. Tuumarajatisest lekkivate radioaktiivsete ainete dispersiooni mudeldamise abil saab hinnata, kui kaugele need ained levivad ja kui suure kiirgusdoosi inimesed selles piirkonnas saada võivad. Nende hinnangute ja seadusandluses kehtestatud normide alusel määratakse tuumarajatiste ümber ohutsoonid, kus tuleb hädaolukorra puhul rakendada kaitsemeetmeid inimeste kaitseks ioniseeriva kiirguse eest.

Töö eesmärgiks on välja töötada meetod tuumajaama puhul rakendatava hädaolukorraks valmisoleku planeerimistsooni määramiseks. Selleks uuriti tuule kiiruse ja sademete intensiivsuse mõju EPZ-i raadiusele. Seejärel pandi paika simulatsioonide parameetrid, mida EPZ-i määramiseks kasutada tuleks. Viimaks rakendati mudelit väikereaktori allikaliikme EPZ-i määramiseks.

Töö koosneb kolmest peatükist: „Teoreetiline taust“, „Metoodika“ ning „Tulemused ja arutelu“. Esimeses peatükis selgitatakse, mis on hädaolukorraks valmisoleku planeerimistsoon ja kuidas seda määratakse. Teises peatükis tutvustatakse töös kasutatavat meetodit ja tarkvara JRodos. Kolmandas peatükis analüüsitakse saadud tulemusi ja määratakse VVER440-tüüpi tuumajaama ja väikereaktori hädaolukorraks valmisoleku planeerimistsoonid. VVER440-tüüpi tuumajaama puhul põhjustab õnnetuse reaktori tuuma ülessulamine ning väikereaktori puhul jahutusvedelikku puudumine.

Uurimistöö teema on aktuaalne kiirgusohutuses, sest see on üks osa kiirgustegevusrajatistega seotud hädaolukordadeks valmisolekuga ja vajalike tegevuste planeerimisel. Tööle lisab Eesti vaates olulisust juurde see, et praegu on aktuaalne teema võimalik tuumaenergeetika kasutuselevõtt Eestis ning soovitakse rajada just väikest reaktorit.

Töös kasutatavad füüsikalised suurused ja ühikud

Aktiivsus on radioaktiivse isotoobi spontaansete lagunemiste arv sekundi jooksul. Aktiivsuse ühik on bekrell (tähis Bq) ning 1 Bq = 1 s^{-1}. Kohati kasutatakse aktiivsuse ühikuna ka küriid (tähis Ci), kus 1 Ci = $3.7 \cdot 10^{10}$ Bq.

Aktiivsuskontsentratsioon on radioaktiivsete lagunemiste arv aines sekundi jooksul massiühiku kohta. Aktiivsuskontsentratsiooni ühik on bekrelli kilogrammi kohta (Bq/kg).

Doosikiirus on doosi muutus ajaühikus. Doosikiiruse ühik on siivertit tunnis (tähis Sv/h).

Efektiivdoos on ekvivalentdoos korrutatud koefaktoriga. Koefaktor väljendab kui tundlik mingi kindel kude või organ ioniseerivale kiirgusele on. Seega efektiivdoos väljendab ioniseeriva kiirguse kahjulikku mõju inimese tervisele. Efektiivdoosi ühik on samuti siivert.

Ekvivalentdoos on neeldumisdoos korrutatud kiirgusfaktoriga. Kiirgusfaktor väljendab vastavat tüüpi kiirguse kahjulikku mõju. Seega ekvivalentdoos väljendab ioniseeriva kiirguse kahjulikku mõju. Ekvivalentdoosi ühik on siivert (tähis Sv) ning 1 Sv = 1 J/kg.

Neeldumisdoos on energia, mille ioniseeriv kiirgus aines neeldumisel aine massiühikule üle andis. Neeldumisdoosi ühik on grei (tähis Gy) ning 1 Gy = 1 J/kg.

Võimsus on toodetud energia ajaühikus. Võimsuse ühik on vatt (tähis W) ning 1 W = 1 J/s. Tähis Wth viitab soojuslikule võimsusele ja tähis We viitab elektrilisele võimsusele.

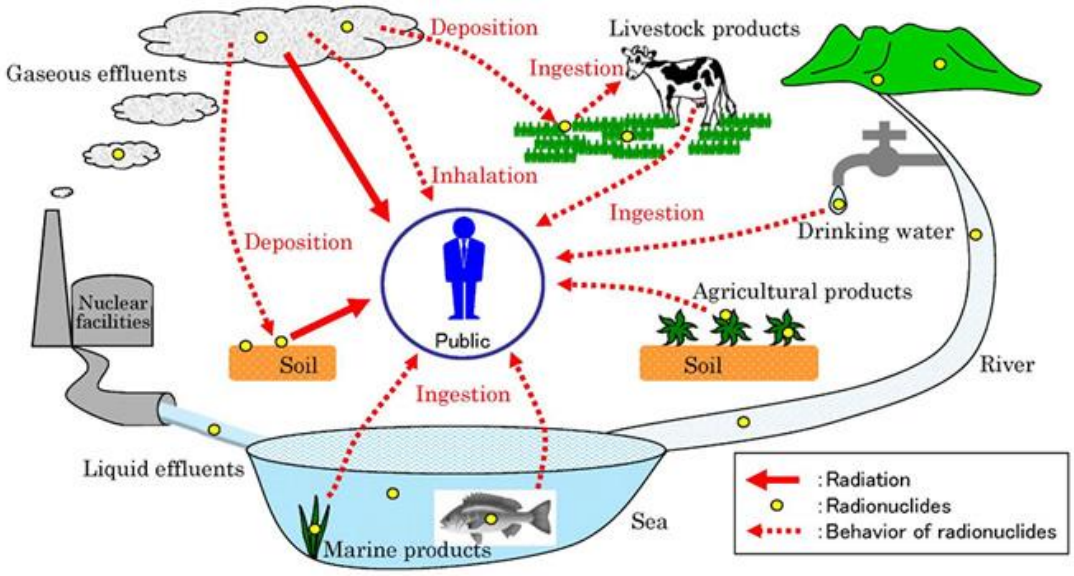
1. Teoreetiline taust

1.1. Miks on hädaolukorraks planeerimistsoon vajalik?

Tuumajaama õnnetuse korral võib sealt lekkida radioaktiivseid aineid – väärisgaase, joodi isotoope ja muid aerosoole. Konkreetsemalt võib radioaktiivses pilves leiduda järgmisi isotoope (sulgudes on poolestusaeg): Kr-85 (1.1 a), Kr-87 (1.3 h), Kr-88 (2.8 h), Xe-133 (5.2 p), Xe-135 (9.1 h), I-131 (8 p), I-133 (20.9 h), I-134 (52.5 min), I-135 (6.6 h), Cs-134 (2.1 a), Cs-137 (30 a).

Selleks, et tuumajaamas oleks võimalik õnnetuse teke ja radioaktiivse aine leke, on vaja mitme juhuse kokkulangemist. Tuumajaamadesse on sisseehitatud turva- ja ohutussüsteemid, mis käivituvad automaatselt. Süsteemide käivitumise võib esile kutsuda näiteks temperatuuri või rõhu tõus reaktoris. Et õnnetus saaks nii tõsiseks minna, et tekib radioaktiivsete ainete leke, peaks midagi juhtuma nii reaktoriga, ohutussüsteemi(de)ga kui ka reaktori kaitsekestaga.

Tuumajaamast lekkiv radioaktiivne pilv levib õhus jaamast järjest kaugemale ja osa sellest sadeneb maapinnale. Radionukliidid ehk radioaktiivse tuumaga aatomid õhus ja maapinnal kiirgavad ioniseerivat kiirgust, millel on inimestele kahjulikud mõjud (1). Viisi, mille kaudu ioniseeriv kiirgus inimest mõjutab, nimetatakse kiiritusrajaks. Kiiritusradadeks on väliskiiritus, mis koosneb õhust ja maapinnalt tulevast kiirgusest; radioaktiivse aine sissehingamine ja sissesöömine. Joonis 1 visualiseerib kiiritusradade toimimist.



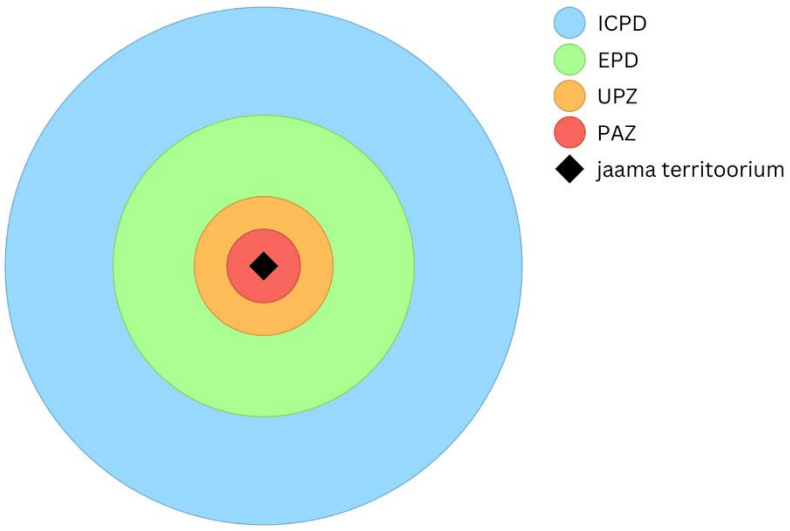
Joonis 1. Tuumajaamast lekkinud radionukliidide põhjustatud kiiritusrajad (2)

Kiiritada saamise tõttu võivad inimesel avalduda deterministlikud ja/või stohhastilised efektid. Deterministlikeks efektideks on kiirituse sümptomid, mis tekivad lühiajaliselt pärast kiiritada

saamist. Mida suurem on lühikese aja vältel saadud kiirgusdoos, seda tõsisemad on deterministlikud efektid. Nendeks efektideks on näiteks iiveldus, naha põletus, rakkude nekroos või surm. Stohhastilised efektid on kiirituse sümptomid, mis võivad pikema aja jooksul pärast kiiritada saamist välja kujuneda. Mida suurem on saadud kiirgusdoos, seda suurem on tõenäosus stohhastilise efekti välja kujunemiseks. Stohhastilisteks efektideks on näiteks vähk ja järeltulijates pärilike geenhaiguste avaldumine. Deterministlikke efekte võib tekitada neeldumisdoos alates 0.5 Gy ning stohhastiliste efektide avaldumise tõenäosust võivad tõsta ka sellest väiksemad neeldumisdoosid (3). Sealjuures ei ole tuvastatud läviväärtust, millest madalama doosi korral stohhastiliste efektide tekkimise välistada saaks. Surmav doos on neeldumisdoos alates 50 Gy, kui see on saadud lühikese aja jooksul. (1)

1.2. Hädaolukorraks valmisoleku planeerimistsoon ja planeerimiskaugused

Tuumajaama ümbrus on jagatud kaheks: jaama territoorium (ingl k *on-site*) ja jaama ümbritsev ala (ingl k *off-site*). Jaama territoorium on operaatorite kontrolli all ja turvatud. Rahvusvahelise Aatomienergiaagentuuri (ingl k *International Atomic Energy Agency*, edaspidi IAEA) juhendite kohaselt jagatakse jaama ümbritsev ala neljaks tsooniks, kus õnnetuse korral võib saadav kiirgusdoos olla nii suur, et inimeste kaitseks tuleb rakendada kaitsemeetmeid. Tsoonide suurused sõltuvad kasutatavast tehnoloogiast, asukoha ilmaoludest ja vastavast regulatsioonist. Peamisteks kaitsemeetmeteks ehk tegevusteks, millega vähendatakse või välditakse doosi saamist, on varjumine, evakueerumine ja jooditablettide manustamine. (4)



Joonis 2. Tuumajaama ümbritsevad tsoonid

Esimene – jaamale lähim – tsoon on ettevaatavate tegevuste tsoon (ingl k *precautionary action zone* – edaspidi PAZ). PAZ-i eesmärk on vältida suure doosi saamist ja deterministlike efektide teket. Seetõttu tuleks seal kaitsemeetmeid rakendada koheselt pärast õnnetuse algust ning juba enne radioaktiivse aine lekke algust. Selles tsoonis rakendatavateks kaitsemeetmeteks evakueerumine ja/või jooditablettide manustamine. IAEA soovituste järgi võiks PAZ-i raadius jääda 3-5 km juurde. (4)

Järgmine tsoon on kiireloomuliste kaitsemeetmete planeerimistsoon (ingl k *urgent protective action planning zone* – edaspidi UPZ). UPZ-i eesmärgiks on vältida kiirgusdoosi saamist ning seal peaks kaitsemeetmeid rakendama kuni ühe tunni jooksul õnnetuse algusest. Peamiselt on UPZ-is kasutatav kaitsemeede siseruumidesse varjumine, kuid vastavalt õnnetuse tõsidusele võib ka sealt evakueerumine ja jooditablettide manustamine vajalik olla. IAEA sõnul võiks UPZ-i raadius olla 15-30 km. (4)

PAZ ja UPZ moodustavad kokku tuumajaama hädaolukorraks valmisoleku planeerimistsooni (ingl k *emergency planning zone* – edaspidi EPZ). Tuumajaama ümbritsevate tsoonide asetust visualiseerib Joonis 2. Joonisel on PAZ ja UPZ kujutatud ringikujulistena, kuid tegelikkuses tuleb nende piirid määratleda maamärkidega, et inimestele ja päästjatele oleks selge, kus nende tsoonide piirid on.

Lisaks EPZ-ile on tuumajaama ümber veel hädaolukorraks valmisoleku planeerimiskaugused (*emergency planning distance*), mille moodustavad laiendatud planeerimiskaugus (ingl k *extended planning distance* – edaspidi EPD) ning sissesöömise ja kohaliku toodangu planeerimiskaugus (ingl k *ingestion and commodities planning distance* – edaspidi ICPD). EPD-s hoiatatakse inimesi õues kasvavate söögitaimede radioaktiivse saastatuse eest ning rakendatakse kaitsemeetmeid vastavalt õnnetuse tõsidusele. ICPD eesmärk on kaitsta inimesi ja loomi saastunud söögi ja vee tarbimise eest. IAEA soovitatav EPD raadius tuumajaamast on 50-100 km ning ICPD raadius 100-300 km. (4)

IAEA soovitused on indikatsioonid, mis on hinnatud tänapäeval töötavate reaktorite kasutuskogemuse põhjal. Konkreetsele jaamale konkreetses asukohas EPZ-i määramiseks on aga IAEA poolt ka ettenähtud metodoloogia, mis võtab arvesse nii regulatsioone, tehnoloogiat, ohutus- ja riskianalüüsi kui ka asukoha tingimusi. (5)

1.3. Planeerimistsoonide määramine

Peamiselt koosneb EPZ-i määramine neljast osast (6):

1) riik määrab seadusandlusega dooside piirväärtused kaitsemeetmete rakendamiseks,
2) tehnoloogia ohutusanalüüsi käigus hinnatakse võimalikku radioaktiivse materjali leket (milliseid isotoope, kui palju ja millal neid lekkida võib),
3) selle põhjal arvutatakse kiirgusdoos mõjutatud inimestele ja
4) ala, kus doos ületab seadusega määratud piirväärtusi, määratakse planeerimistsooniks vastavavalt seadusandluses ettenähtud kiirgusdoosi piirväärtustele.

EPZ võib seadusandluses defineeritud olla kaitsemeetmete või sekkumistasemete järgi. Sekkumistase on ekvivalent- või efektiivdoosi väärtus, mille korral peab rakendama kaitsemeetmeid (7).

Kaitsemeetmete järgi on EPZ-i defineeritud näiteks Soome tuumaseaduses. PAZ on ala, millest väljaspool pole inimestel vajadust evakueeruda ning UPZ on ala, millest väljaspool pole inimestel vajadust varjuda. PAZ-i raadius tuleb määrata nii kaugele, kus ühe tunni jooksul pärast lekke algust on efektiivdoos 1 Sv. UPZ-i raadius tuleb määrata nii kaugele, kus 48 tunni jooksul pärast lekke algust on efektiivdoos 10 mSv. EPZ-i suuruse määrab UPZ-i suurus. (8)

IAEA on EPZ-id defineerinud sekkumistasemete järgi. PAZ-i sekkumistasemeks on sissehingamisest ning õhu ja maapinna välikiiritusest põhjustatud summaarne punase luuüdi neeldumisdoos 1 Gy. UPZ-i sekkumistasemeks on ainult sissehingamise põhjustatud efektiivdoos 100 mSv. IAEA juhendites on tsoonide raadiuste ja rakendatavate kaitsemeetmete soovitused tehtud sõltuvalt sellest, kui kaugel jaamast võib radionukliidide leviku tõttu esineda deterministilikke efekte tekitav doos või stohhastiliste efektide teket soodustav doos. (4)

Eestis ei ole tuumajaama, seetõttu pole Eestis ka tuumaseadust ega tuumajaama EPZ-i määramiseks regulatsioone. Siiski on Eestis sekkumistasemed kiirgushädaolukorraks. Sekkumistase varjumiseks on efektiivdoos 10 mSv, evakueerumiseks efektiivdoos 50 mSv. Jooditablettide manustamise sekkumistasemeks on neeldumisdoos lastel 10 mGy, täiskasvanutel 100 mGy ja üle 50-aastastel 1 Gy. (9)

Õnnetuse simuleerimiseks tuleb defineerida tuumajaama ümbritsev keskkond ja ilm ning arvutada jaama tehnoloogia ja asukohapõhise ohutusanalüüsi käigus allikaliige (ptk 1.4). Nende a ndmete põhjal arvutatakse radioaktiivsete ainete levik õhus ja maapinnale sadenemine ning nendest tulenev kiirgusdoos. (6)

1.4. Allikaliige

Allikaliige (ingl k – *source term*) on üks osa simulatsiooni kirjeldavatest tingimustest. See defineerib õnnetuses lekkivad isotoobid, nende oleku, koguse, lekke kõrguse ning lekke algus- ja lõppaja. Allikaliige arvutatakse konkreetse tuumajaama jaoks arvestades jaama ehitust ja turvasüsteeme. Neid ei saa üle kanda ühelt reaktorilt teisele (10).

Allikaliikme arvutamiseks on üldiselt kaks meetodit: deterministlik ja tõenäosuslik. Deterministliku meetodi puhul defineeritakse oletuslik õnnetus, mille tagajärjed on kõige hullemad. Õnnetuse valik tehakse varem toimunud õnnetuste ja tuumajaama ehituse põhjal. Arvutatakse kui palju ja millises olekus tuumkütuses olevaid isotoope õnnetuse käigus tuumajaamast lekib. Eesmärgiks on määrata allikaliige, mis vastab konservatiivselt kõige tõsisemate tagajärgede õnnetuse või avariistsenaariumile. Tõenäosusliku meetodi puhul võetakse arvesse, millise tõenäosusega mingisugune õnnetus juhtuda võib. Arvestatakse ka seda, et mitu õnnetust võib juhtuda samal ajal. Allikaliikme arvutamiseks defineeritakse mitu erinevat õnnetust ja iga õnnetuse puhul arvutatakse kui palju ja millises olekus tuumkütuse isotoope lekib. Lõpuks saadakse mitu erinevat allikaliiget, millel on erinev tegelikkuses esinemise tõenäosus. (10)

2. Metoodika

2.1. Tarkvara JRodos

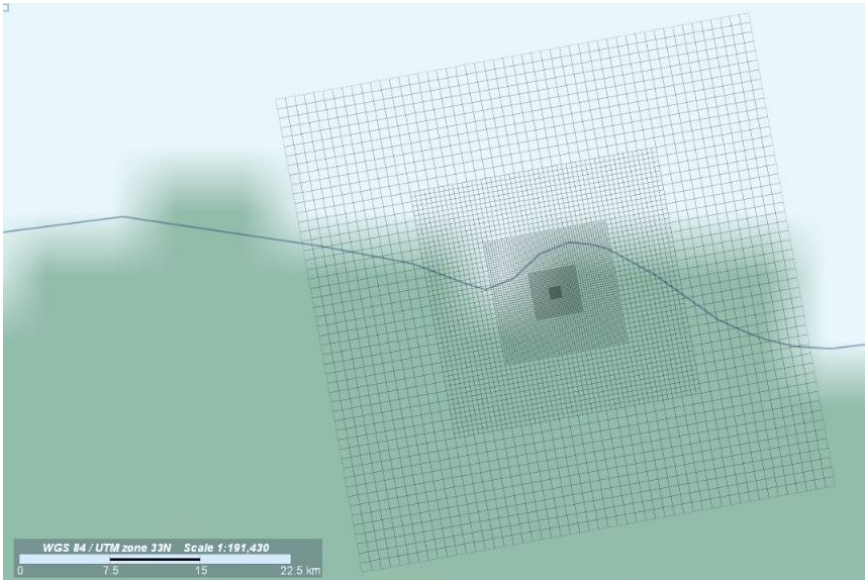
JRodos on Javal põhinev reaalajas võrguühendusega otsustamist toetav süsteem (*Java Based Realtime Online Decision Support System*), mis loodi Karlsruhe Tehnoloogia Instituudis 2010. aastal. JRodos on edasiarendus tarkvarast RODOS (*Realtime Online Decision Support System*). (11)

JRodose eesmärgiks on tuumajaama õnnetuse igas faasis anda kergesti mõistetavat infot hetke olukorra kohta, et hädaolukorra lahendamist koordineerivatel spetsialistidel oleks lihtsam otsustada, millised käitumisjuhised elanikkonnale edastada. JRodoses saab simuleerida ka hüpoteetilisi õnnetusi. Tänu sellele saab JRodost kasutada hädaolukordadeks valmisoleku planeerimiseks. (11)

JRodos kasutab mitmeid erinevaid arvutuslikke mudeleid erinevate kiiritusradade kaudu, sh maapinnast, veekogudest kui ka õhust saadava kiirgusdoosi arvutamiseks. Lisaks on eraldi mudelid ka erinevate kauguste jaoks tuumajaamast. Tänu suurele arvutuslike mudelite mitmekesisusele JRodoses, on selle simulatsioonidel palju väljundeid. (11)

Õnnetuse simuleerimiseks tuleb esmalt valida, milliseid mudeleid kasutatakse. JRodoses on kujundatud erinevad mudelite komplektid erinevate olukordade jaoks. Näiteks on olemas mudelite komplektid hädaolukorras käitumiseks, hädaolukorraks valmisoleku planeerimiseks ja erinevate looduskatastroofide jaoks. Seejärel tuleb valida uuritav tuumajaam, allikaliige, ilmaandmed ja arvutusliku ala suurus. Arvutuslik võrk ehk ala, kus arvutused läbi viiakse, on ruut 8056 võrguelemendiga. Võrguelemendid on samuti ruudukujulised ning nende suurus sõltub kaugusest arvutusliku võrgu keskkohast – võrguelemendi suurus kasvab kaugusega jaamast eemale ehk keskelt väljapoole liikudes, iga uue raami võrguelemendi suurus on eelmisest kaks korda suurem. Joonisel 3 on näha arvutuslik võrk, mille pool küljepikkust on 40 km ja kõige sisemise ruudu võrguelemendi küljepikkus on 100 m. (12)

Kasutajaliideses sisestatud andmete põhjal arvutab JRodos, kui kaugele tuumajaamast radioaktiivsed ained levivad, nende aktiivsuskontsentratsiooni maapinnal ja õhus ning milline on radioaktiivse aine aktiivsuskontsentratsioon sellel alal kasvavas toidus ja söödas. Lisaks arvutab JRodos kui suure efektiivdoosi saab inimene erinevatest kiiritusradadest. Tulemusi saab näha nii kuumkaardina kui ka graafikul. (13)



Joonis 3. JRodose arvutuslik võrk

2.2. Töös kasutatavad arvutusmudelid

Töös kasutatakse mudelite komplekti „Emergency“, mis koosneb järgmistest arvutuslikest mudelitest:

- LSMC (*Local Scale Model Chain*),
- EMERSIM (*early emergency measures simulation*),
- DEPOM (*Deposition Model*) ja
- FDMT (ingl k – *Food Chain and Dose Module for Terrestrial Pathways*).

Mudel LSMC on atmosfäärse dispersiooni arvutamiseks tuumajaama lähiulatuses (suurusjärk 10 km) kasutaja sisestatud ilmaandmete põhjal. LSMC kasutab arvutuste tegemisel Gaussi joa mudelit (14). Mudel EMERSIM võimaldab võrrelda simulatsiooni väljundite olukorda, kui kaitsemeetmeid pole rakendatud olukorraga, kui neid on juba rakendatud. EMERSIM arvutab simulatsiooni lõpuks ja 30 päeva jooksul saadud efektiivdoosid. EMERSIM võtab efektiivdoosi arvutamisel arvesse maapinnalt, õhust ja sissehingamisest saadud luuüdi, kilpnäärme ja kogu keha doosi. Mudel FDMT simuleerib radioaktiivse aine sattumist söögiahelasse ja teeb doosihinnanguid erinevate kiiritusradade kaudu. Mudel DEPOM arvutab mudeli FDMT jaoks radioaktiivsete isotoopide sadenemist. (12; 15; 16)

2.3. Töö käik

Töö käigus uuriti tuule kiiruse ja sademete intensiivsuse mõju planeerimistsooni raadiusele. Simulatsioonide tulemuste põhjal määrati planeerimistsoon Soome kiirgusseaduse alusel. Planeerimistsooni raadius peab olema nii suur, kui kaugel on 48 h pärast lekke algust võimalik saada efektiivdoos 10 mSv. Kui oli võimalik, määrati ka PAZ-i raadius. PAZ-i raadius peab olema nii suur, kui kaugel on 10 h pärast lekke algust võimalik saada efektiivdoos 1 Sv.

Enne oluliste simulatsioonide tegemist analüüsiti arvutusliku võrgu suuruse mõju EPZ-ile. Kuna suuremal arvutuslikul võrgul on suurem võrguelement, on sellel väiksem lahutusvõime. Lisaks kasutatakse töös atmosfäärse dispersiooni mudelit, mille usaldusväärsus väheneb tuumajaamast suurtel kaugustel arvutuste tegemisel. Arvutusliku võrgu suuruse mõju analüüsimiseks tehti samasuguse ilmaga simulatsioonid, kus muudeti arvutusliku võrgu suurust. Seejärel võrreldi nende simulatsioonide põhjal määratud EPZ-i raadiuseid. Nendes simulatsioonides kasutati tuule kiirust 10 m/s ja vihma intensiivsust 3 mm/h.

EPZ-i raadiusele tuule kiiruse ja sademete intensiivsuse mõju uurimiseks valiti n-ö kontroll-allikaliikmeks JRodose kogust tõsise õnnetuse stsenaariumiga allikaliige. Tehti simulatsioonid erinevate tuule kiiruste (vahemikus 0-32 m/s) ja sademete intensiivsusega (0 mm/h, 3 mm/h ja 6 mm/h). Kuna simulatsioonides oli sademeteks vihm, siis edaspidi räägitakse selguse mõttes vihma intensiivsusest. Tuule kiirused on defineeritud kümne meetri kõrgusel. Simulatsioonide tulemustest mõõdeti, kui kaugel tuumajaamast on võimalik saada efektiivdoos 10 mSv 48 h pärast lekke algust. Simulatsioonide puhul, millel oli võimalik määrati ka PAZ-i suurus. Selleks mõõdeti, kui kaugel tuumajaamast on 10 h pärast lekke algust võimalik saada efektiivdoos 1 Sv. Lisaks vaadati ka mitmendal tunnil sai täis efektiivdoos 10 mSv ja kui suur oli efektiivdoos 48 h pärast lekke algust.

Viimaks rakendati EPZ-i määramise mudelit väikemoodulreaktori allikaliikmele. Väikemoodulreaktori allikaliikme simulatsioonid tehti nende ilmaandmetega, mis kontroll-allikaliikme õnnetuse kõige karmimad tagajärjed põhjustas ehk EPZ-i kõige suuremaks tegid.

2.3.1. Töös kasutatavad allikaliikmed

Kontroll-allikaliikmena kasutati JRodose kogust pärinevat allikaliiget nimega F6.VVER440SEV2. Selle allikaliikme puhul on tegemist surveveereaktori VVER-iga (vene keelest: *водо-водяной энергетический реактор*), mille elektriline võimsus on 440 MW. Tuumkütuse lekke põhjuseks on tuumajaama südamiku sulamine ja kaitsekesta leke. Lisaks on

kaitsekesta automaatne turvasüsteem väljalülitatud. Radioaktiivse aine lekke kestus on 12 tundi, radioaktiivse inventari vabanemise kiirus 0.5 %/h ja kõrgus 120 meetrit. Isotoobid, mida antud allikaliikme tuumkütus sisaldas ja kui palju neid õnnetuse käigus lekkis, on toodud Lisas 1.

Ajalooliselt tõsise radioaktiivse lekkega tuumajaama õnnetused on olnud Fukushima Daiichi ja Tšernobõli õnnetused. Hinnanguliselt oli Fukushima Daiichi õnnetuses õhu kaudu lekkinud isotoopidest suurima aktiivsusega Cs-137, I-131 ja Xe-133 (17). Nende summaarseks lekkinud aktiivsusteks hinnatakse ligikaudu 625 PBq (17). Surveveereaktori VVER-440 allikaliikme lekkinud isotoopidest olid suurima aktiivsusega Xe-133, Kr-88 ja I-134. Nende summaarseks lekkinud aktiivsuseks on 24 PBq. Töös kasutatava allikaliikme lekkinud aktiivsus on ligikaudu 26 korda väiksem Fukushima Daiichi õnnetuses lekkinud aktiivsusest. Fukushima õnnetuses õhu kaudu lekkinud aktiivsus oli Tšernobõli õnnetusega võrreldes väiksem (17). Seega on ka töös kasutatava allikallikme lekkinud aktiivsus väiksem Tšernobõlis lekkinud aktiivsusest.

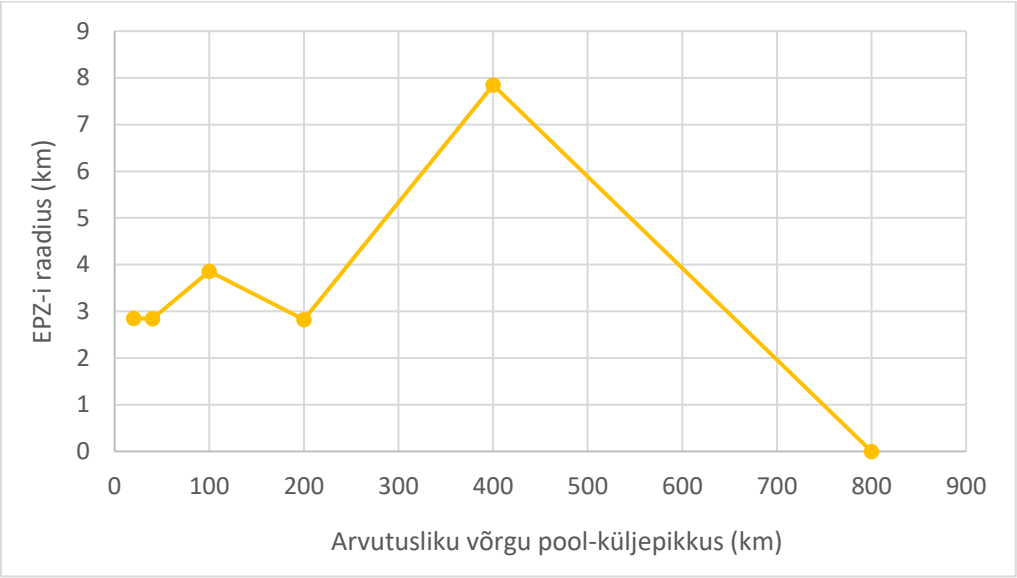
EPZ-i määramise mudeli rakendamiseks väikereaktori juhtumile kasutati USA energiaettevõtte TVA (*Tennessee Valley Authority*) Clinch Riveri väikereaktoritega tuumajaama hädaolukorraks valmisoleku planeerimistsooni määramise dokumendist. See allikaliige on arvutatud nelja väikese võimsusega surveveereaktori tüübi põhjal: BWXT mPower, NuScale, Holtec SMR-160 ja Westinghouse SMR. Õnnetuse põhjuseks on jahutusvedeliku lekkimine reaktorist, mis põhjustab tuuma ülessulamise ja kaitsekesta lekke. (18)

Lisas 2 on toodud TVA allikaliikme isotoobid ja nende nelja päeva jooksul lekkinud aktiivsus. TVA allikaliikmes on välja toodud isotoopide aktiivsus nelja päeva jooksul, kuid tulenevalt UPZ-i definitsioonist, on antud töös oluline isotoopide aktiivsus 48 h pärast lekke algust. Seetõttu rakendati EPZ-i määramise mudelit TVA allikaliikme kolme erineva lekke kiiruse korral. Esimesel juhul jäeti lekke kiirus selliseks, et leke toimub nelja päeva jooksul, teisel juhul muudeti lekke kiirust nii, et leke toimuks 48 h jooksul ning kolmandal juhul, et leke toimuks 12 h jooksul. Kõigil juhtudel lekkis iga tund võrdne kogus tuumkütust.

3. Tulemused ja arutelu

3.1. Arvutusliku võrgu tundlikkuse analüüs

Esmalt hinnati arvutusmudeli võrgu suuruse mõju simulatsiooni tulemustele. Simulatsioonides kasutati kõiki JRodose võimalikke arvutusliku võrgu suurusi, mille pool-küljepikkused on 20, 40, 100, 200, 400 ja 800 km ning vastavad võrguelemendi küljepikkused muutuvad seestpoolt väljapoole 50-800 m, 100-1600 m, 250-4000 m, 500-8000 m, 1-16 km ja 2-32 km. Tundlikkuse analüüsi tulemused ehk kuidas sõltub EPZ-i suurus arvutusliku võrgu suurusest on toodud Joonisel 4.



Joonis 4. Arvutusliku võrgu suuruse mõju EPZ-i raadiusele

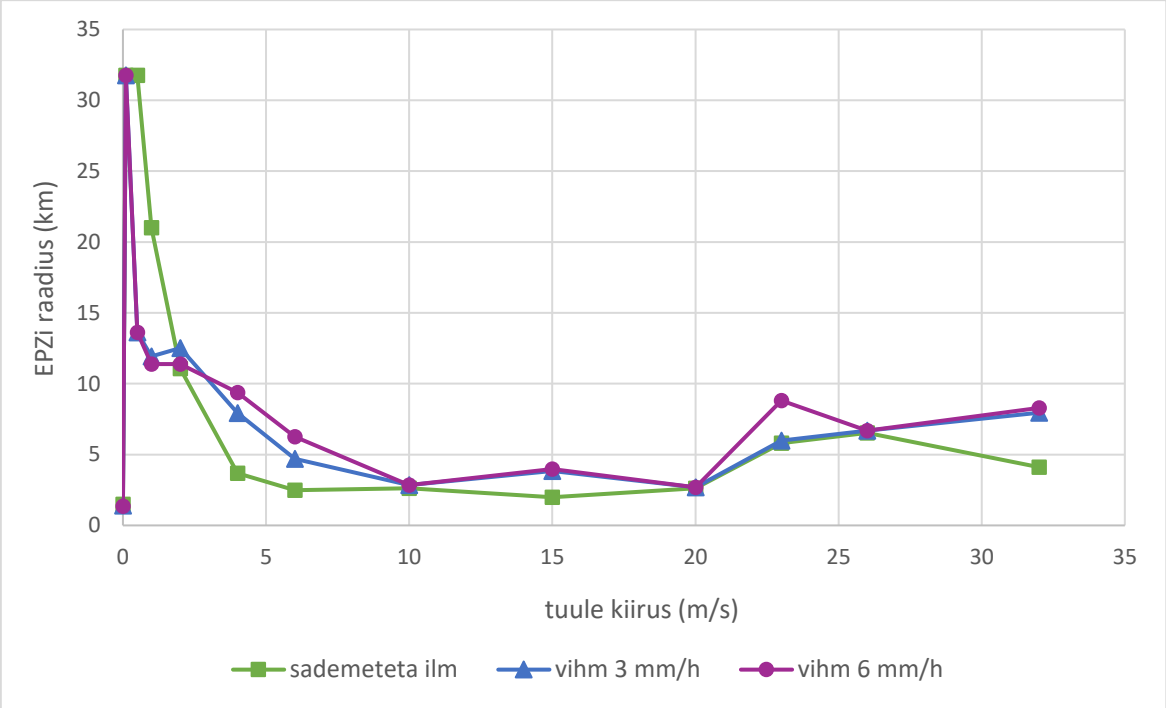
Väiksemate arvutusliku võrgu suuruste puhul on EPZ-i raadiuse muutus samuti väiksem. Suuremate võrgu suuruste puhul suureneb arvutuste määramatus lahutusvõime vähenemise tõttu. Arvutusliku võrgu 40 ja 20 km pool-küljepikkuse puhul mõõdetud EPZ-i raadiused erinevad 0.25 % võrra. Seega võib öelda, et EPZ-i raadius ei sõltu arvutusliku võrgu suurusest, kui selle pool-küljepikkus on 40 km või väiksem.

Edaspidi kasutati simulatsioonides võrku, mille pool-küljepikkus on 20 km ja kõige sisemise ruudu võrguelemendi küljepikkus on 50 m. Kui simulatsioonist nähti, et EPZ ei mahu sellele alale ära, kasutati arvutuslikku võrku, mille pool-küljepikkus on 40 km ja kõige sisemise ruudu võrguelemendi küljepikkus on 100 m.

3.2. Ilma mõju EPZ-i raadiusele surveveereaktori VVER 440 MW näitel

Õhus olevate osakeste leviku analüüsimisel on oluline roll ilmastikuoludel. Seetõttu hinnati töös kiirgusdoosi ja EPZ-i suuruse sõltuvust tuule kiirusest ja vihma intensiivsusest. Simulatsioonid tehti tuule kiirustega 0-32 m/s vihma intensiivsuste 0, 3 ja 6 mm/h korral.

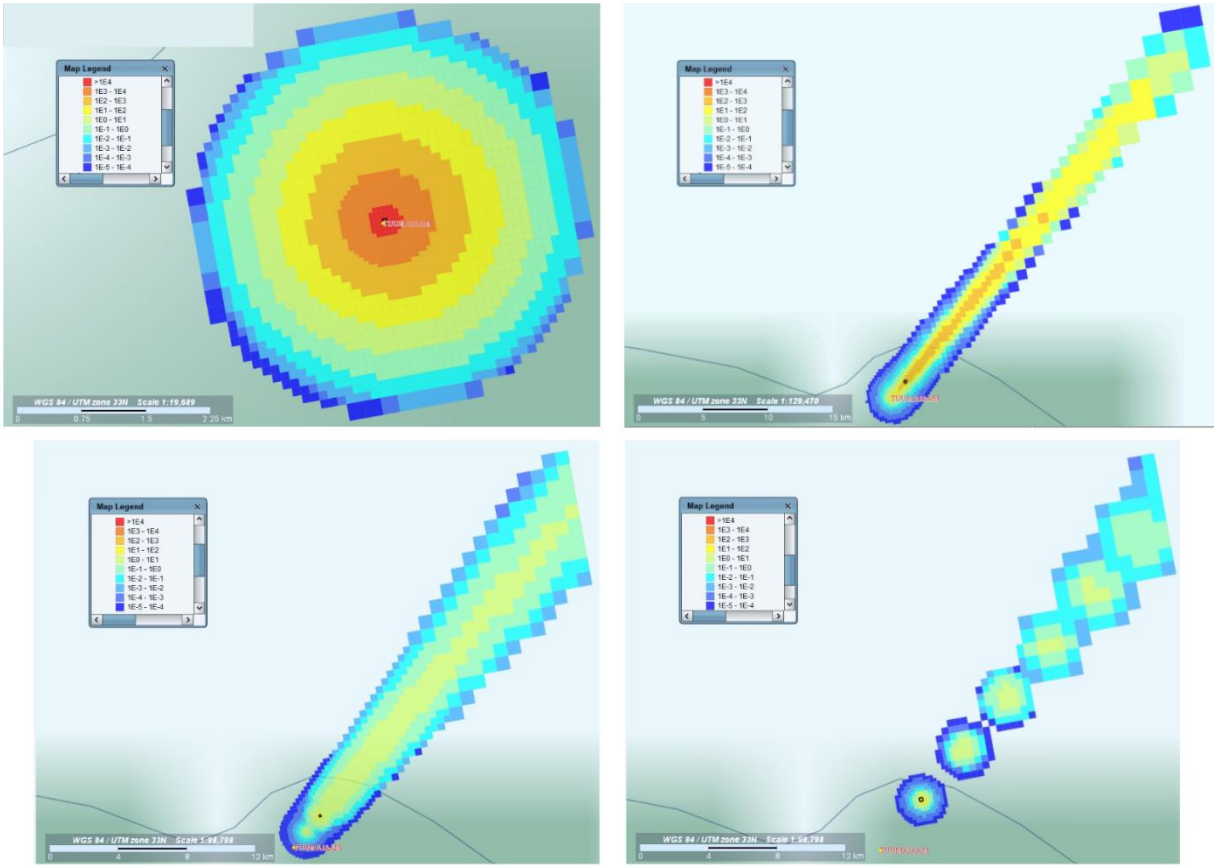
Joonisel 5 on simulatsioonidest määratud EPZ-ide raadiused erinevate tuule kiiruste ja vihma intensiivsuste korral. EPZ-i raadius vastab kõige kaugemale kohale, kus 48 h pärast radioaktiivse aine lekke algust saaks inimene efektiivdoosi 10 mSv.



Joonis 5. EPZ-i raadiuse sõltuvus tuule kiirusest erineva intensiivsusega vihma korral

Kõige halvemaks juhuks ehk olukorraks, mil EPZ on kõige suurem – raadiusega 31.8 km iga intensiivsusega vihma korral – osutus olukord, kus 48 tunni jooksul alates radioaktiivse aine lekke algusest puhus tuul 0.1 m/s. Lekkinud radioaktiivsed ained jõuavad nii väikse tuule kiiruse puhul peaaegu 32 km kaugusele, sest õhu kiirus suureneb kõrguse tõustes. Lekke kõrgus oli defineeritud 120 m kõrgusel ja tuule kiirus 10 m kõrgusel. Vaadates tuule kiirusega 0.1 m/s tehtud simulatsiooni kuumkaarti Joonisel 6, näeme, et tuumajaama ümber on efektiivdoosi tekitava pilve külgsuunaline hajumine suhteliselt väike. Sademeteta ilma korral on tuule kiirusega 0.1 m/s pilve läbimõõt tuule suunaga risti olevas suunas ligikaudu 3.8 km. Ilma tuuleta ja sademeteta juhul on pilve läbimõõt umbes 4,7 km. Tuule kiirus 0.1 m/s tähendab, et tegu on peaaegu olematu tuule kiirusega. Seetõttu peaks radioaktiivse pilve läbimõõt tuumajaama juures, tuule suunaga ristuvas suunas, olema suurem.

Kõige väiksem EPZ, raadiusega 1.4 km, tuli iga sademete intensiivsuse korral tuule kiirusega 0 m/s. Sellise ilma korral levib radioaktiivne aine ainult õhus olevate turbulentside tõttu. Kuna töös kasutatud atmosfäärse levi mudel põhineb Gaussi mudelil, siis ilma tuuleta juhul jaotuvad lekkinud radioaktiivsed ained ühtlaselt ümber tuumajaama (Joonis 6).



Joonis 6. VVER 440 allikaliikmega tehtud simulatsioonide kuumkaardid sademeteta ilma ja tuule kiirustel 0 m/s (üleval vasakul), 0.1 m/s (üleval paremal), 10 m/s (all vasakul) ja 32 m/s (all paremal). Kaardi legend näitab kuumkaardi värvi sõltuvust efektiivdoosi väärtusest millisiivertites.

Väikestel tuule kiirustel on EPZ suurem sademeteta ilma puhul, kuid alates tuule kiirusest 4 m/s on EPZ suurem vihmase ilma korral. Sademeteta ilma korral lenduvad tuumajaamast lekkivad radioaktiivsed ained rohkem kui vihmase ilma korral, sest vihm peseb radionukliidid maapinnale. Seetõttu on sademeteta ilma korral EPZ-i sõltuvus tuule kiirusest suurema langusega kui vihmaste ilmade korral.

Tabel 1 koondab kõikide simulatsioonide tulemusi: EPZ-ide raadiused, mitmendal tunnil sai täis 10 mSv, maksimaalne doos 48 h pärast lekke algust ja UPZ-ide raadiused. Tabelis on kasutatud värve, et näidata kui tõsine olukord on – rohelised ja sinised kastid viitavad leebemale olukorrale ning punased kastid viitavad tõsisele olukorrale.

Tabel 1. Surveveereaktori VVER 440 allikaliikme simulatsioonide tulemused

Tuule kiirus (m/s)	**EPZi raadius (km)**			**Mitmendal tunnil sai täis 10 mSv**			**Maksimaalne efektiivdoos (mSv)**			**PAZi raadius (km)**		
0	1,5	1,4	1,4	1	1	1	22100	29500	29600	0,34	0,11	0,11
0,1	31,8	31,8	31,8	2	1	1	648	5790	8570	-	0,28	0,28
0,5	31,8	13,6	13,6	1	1	1	182	1130	1700	-	-	-
1	21,0	11,9	11,4	2	1	1	92	1060	1620	-	-	-
2	11,1	12,5	11,4	3	2	1	48	700	1060	-	-	-
4	3,7	7,9	9,4	4	2	2	33	498	756	-	-	-
6	2,5	4,7	6,3	5	3	2	9	313	474	-	-	-
10	2,6	2,9	2,8	9	4	3	14	128	188	-	-	-
15	2,0	3,8	4,0	5	4	3	29	93	126	-	-	-
20	2,6	2,7	2,7	4	3	3	35	74	95	-	-	-
23	5,8	6,0	8,8	5	4	4	28	54	68	-	-	-
26	6,5	6,7	6,7	6	11	5	21	38	47	-	-	-
32	4,1	8,0	8,3	6	5	5	24	40	49	-	-	-
Vihma intensiivsus (mm/h)	**0**	**3**	**6**	**0**	**3**	**6**	**0**	**3**	**6**	**0**	**3**	**6**

Võrreldes Tabelis 1 olevaid EPZ-ide raadiuseid ja vastavaid maksimaalseid doose, on näha, et väikeste tuule kiiruste puhul on sademeteta ilma korral EPZ suurem kui vihmase ilma korral nagu oli näha ka Joonisel 5. Kuid tabelist on veel juurde näha, et maksimaalne efektiivdoos on sademeteta ilma korral väiksem kui vihmase ilma korral. Vihm takistab õhus radionukliidide levikut. Seetõttu on vihmase ilma korral, väiksematel tuule kiirustel kui 4 m/s, saadav efektiivdoos suurem, kuid EPZ-i raadius väiksem kui sademeteta ilma korral. Saadava efektiivdoosi suurenemist põhjustab mahasadenenud radionukliididest põhjustatud väliskiiritus. Alates tuule kiirusest 4 m/s on sademeteta ilma korral EPZ-ide raadiused väiksemad kui vihmase ilma korral, sest kõvem tuul hajutab radionukliide järjest rohkem.

Tulpade kolmik „Mitmendal tunnil sai täis 10 mSv“ annab aimu, kui kaua alates lekke algusest on aega kaitsemeetmete rakendamiseks ilma, et inimesed tõsiselt kiiritada saaksid. Madalate tuule kiiruste puhul sai 10 mSv täis juba kohe lekke alguses. See põhjendab vajadust PAZ-i määramiseks, kus tuleb kaitsemeetmeid rakendada juba enne lekke algust (4).

Soomes Loviisa tuumajaamas kasutatava VVER-440 tüüpi tuumajaama puhul rakendub EPZ-i raadius 20 km (19). Simulatsioonide põhjal leitud EPZ-id on väga väikeste tuule kiiruste puhul sellest suuremad, kuid enamike katsepunktide puhul jäävad simulatsioonidest määratud EPZ-id Soomes määratud EPZ-ist väiksemaks.

PAZ-i oli võimalik määrata ainult viies simulatsioonis (hinnatud doosid ei ületanud enamikel juhtudel sekkumistaset). PAZ-ide raadiused tulid kõik väiksemad kui IAEA juhendites indikeeritud 3 km (4). Soome Loviisa tuumajaama PAZ-i raadiuseks on 5 km (19). Selline suur erinevus simulatsiooni ja tegelikkuse vahel viitab, et antud töös kasutatud meetod ei sobi PAZ-i määramiseks või Soomes rakendatud 5 km on konservatiivne. PAZ-i hindamise meetodi väljatöötamine võib olla üheks töö edasiarendamise võimaluseks.

3.3. EPZ-i määramise mudeli rakendamine väikereaktori allikaliikmele

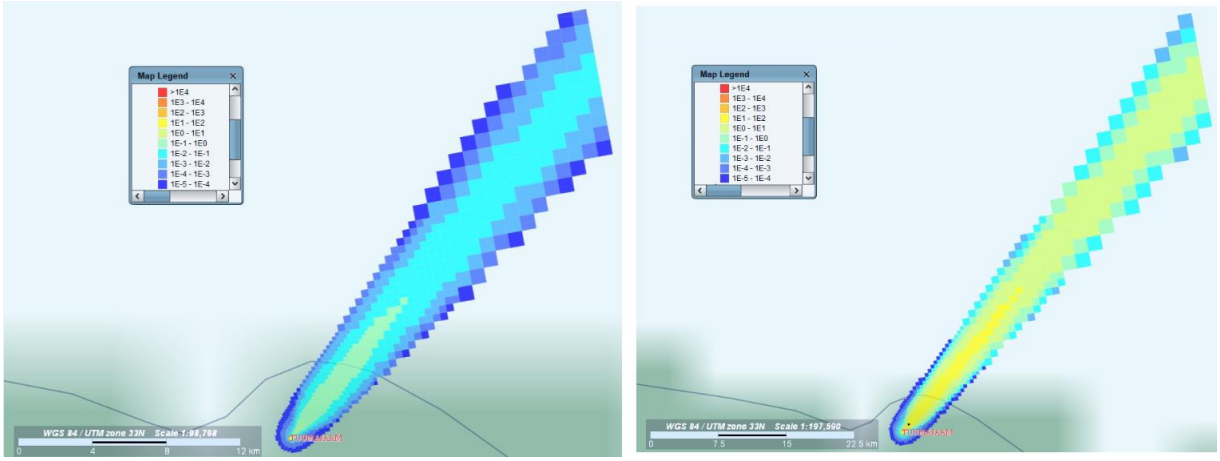
EPZ-i määramise mudeli rakendamiseks tehti simulatsioonid TVA väikereaktori allikaliikmega. Kasutati tuule kiirust 1 m/s ja vihma simulatsioonis ei olnud, sest ilma vihmata juhul tuli kontroll-allikaliikme EPZ suurem. Ilma mõju uurides otsustati, et simulatsioonid tuule kiirusega 0.1 m/s ei pruugi tegelikkusele vastata. Seetõttu otsustati, et tuule kiiruseid väiksemad kui 1 m/s ei ole asjakohane tegeliku EPZ-i määramise jaoks kasutada.

Väikereaktori allikaliikmega tehtud simulatsioonide korral ei olnud lekkiva radioaktiivse aine kogus nii suur, et kuskil tekiks 48 tunni jooksul pärast lekke algust efektiivdoos 10 mSv.

Seetõttu jääb kogu EPZ tuumajaama territooriumile. Joonisel 7 on TVA väikereaktori allikaliikme simulatsiooni ja surveveereaktori VVER 440 allikaliikme simulatsiooni kuumkaardid. TVA leidis *Clinch River*'i jaama analüüsis, et ala, kus tuumajaama loa omanikul on kontroll kõigi tegevuste üle jäi jaama territooriumi piiresse ning madala asustustihedusega ala oli 1.6 km (1 miil) raadiusega jaama keskmest (18).

Allikaliikme ühtlase lekke korral 4 päeva jooksul oli suurim efektiivdoos 48 h pärast lekke algust 0.618 mSv. Kui kogu leke toimus ühtlaselt 48 h tunni jooksul, oli suurim efektiivdoosi väärtus 1.25 mSv. Kui kogu leke toimus ühtlaselt 12 h tunni jooksul, oli suurim efektiivdoosi väärtus 48 h tundi pärast lekke algust 1.30 mSv.

Tulemused viitavad, et TVA *Clinch River*'i projektis kasutatud väikereaktori andmeid rakendades jääks esimene planeerimistsoon, PAZ, jaama territooriumile ning järgmine planeerimistsoon, UPZ, oleks samuti üsna piiratud.



Joonis 7. TVA väikereaktori allikaliikme (vasakul) simulatsiooni kuumkaardi võrdlus VVER 440 allikaliikme (paremal) simulatsiooni võrdlus tuule kiirusega 1 m/s sajuta ilma korral

Kokkuvõte

Et tuumajaama õnnetustega paremini hakkama saada, planeeritakse juba tuumajaama planeerimisega ühel ajal hädaolukordadeks valmisoleku tegevusi. Neid tegevusi nimetatakse kaitsemeetmeteks. Planeerimise käigus määratakse tuumajaama ümber neli äratuntava märgistusega tsooni, kuhu on planeeritud erinevad kaitsemeetmed. Kaks tuumajaamale lähemat tsooni, PAZ ja UPZ, moodustavad kokku hädaolukorra planeerimistsooni ehk EPZ-i. PAZ-is tuleb kaitsemeetmeid rakendada kohe õnnetuse alguses ning UPZ-is ühe tunni jooksul õnnetuse algusest.

Töö eesmärgiks oli välja töötada meetod EPZ-i määramiseks. EPZ on tsoon tuumajaama ümber, kus tuleb inimeste kaitseks rakendada kaitsemeetmeid, et vältida õnnetuse tõttu saadavat kiirgusdoosi. EPZ-i määramine koosneb üldiselt neljast sammust: riik määrab seadusandluses sekkumistasemed kaitsemeetmete rakendamiseks; arvutatakse kui palju, milliseid ja millal mingeid isotoope tuumajaamast lekkida võib; tehakse simulatsioon, et hinnata õnnetuse mõjusid inimestele ja ala, kus doos sekkumistasemeid, määratakse EPZ-iks. Töös kasutati simulatsioonide tegemiseks tarkvara JRodos, mis on Javal põhinev reaalajas võrguühendusega otsustamist toetav süsteem.

Esmalt viidi läbi arvutusliku võrgu tundlikkuse analüüs. Seejärel uuriti tuule kiiruse ja sademete intensiivsuse mõju EPZ-i raadiusele. Simulatsioonide EPZ-id määrati Soome kiirgusseaduse alusel. Ilmaandmete mõju uurimisel EPZ-i raadiusele kasutati JRodose kogust pärit VVER440-tüüpi tuumajaama allikaliiget. Otsustati, et tuule kiiruseid väiksemad kui 1 m/s ei ole asjakohane tegeliku EPZ-i määramise jaoks kasutada, sest nende puhul tundus radioaktiivse pilve külgsuunaline hajumine liiga väike. EPZ-i raadiuse määramise meetodina otsustati kasutada sademeteta ilma ja tuule kiirust 1 m/s, sest sel juhul tuli VVER-440-tüüpi tuumajaama allikaliikme EPZ kõige suurem. Lõpuks rakendati EPZ-i määramise meetodit *Tennessee Valley Authority Clinch River*'i projekti raames loodud väikereaktori allikaliiget. Leiti, et väikereaktorist lekkinud radioaktiivsete ainete tekitatud hinnanguline doos on niivõrad madal, et planeerimistsoonid oleks väga väikesed – tuumajaama territoorium või selle lähiümbrus. Töö eesmärk sai täidetud.

Täpsustamist vajab PAZ-i määramise meetod, sest praeguses töös sai PAZ-i määrata ainult viies simulatsioonis 39-st. Lisaks saab tööd edasi arendada lekke kõrguse ja pilvisuse mõju detailsema uurimisega ning reaalse meetodi rakendamise korral on vaja asukoha ja tehnoloogiapõhist allikaliiget.

Kasutatud kirjandus

1. United Nations Scientific Committee. *Radiation Effects and Sources.* Viin : United Nations Scientific Committee, 2016.

2. Japan Atomic Energy Agency. Environmental monitoring and suveillance. *Japan Atomic Energy Agency Nuclear Science Research Institute.* [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 30. mai 2024. a.] https://www.jaea.go.jp/english/04/ntokai/houkan/houkan_02.html.

3. European Commission, Joint Research Centre – Cinelli, G.; De Cort, M. & Tollefsen, T. *European Atlas of Natural Radiation.* Luxembourg : Publication Office of the European Union, 2019.

4. International Atomic Energy Agency. *Actions to Protect the Public in an Emergency Due to Severe Conditions at a Light Water Reactor.* Viin : International Atomic Energy Agency, 2013.

5. IAEA SMR Regulators' Forum. *Report from Working Group on Emergency Planning Zone.* 2018. a.

6. *Determination of Emergency Planning Zones distances and scaling-based comparison criteria for downsized Nuclear Power Plants.* de la Rosa Blul, Juan Carlos. 2021. a., Nuclear Engineering and Design.

7. Kiirgusseadus. *Riigi Teataja.* [Võrgumaterjal] 1. juuli 2023. a. [Tsiteeritud: 28. jaanuar 2024. a.] https://www.riigiteataja.ee/akt/130062023026#para105lg3.

8. Radiation and Nuclear Safety Authority Regulation on the Emergency Arrangements of a Nuclear Power Plant. *STUKlex.* [Võrgumaterjal] 25. jaanuar 2024. a. [Tsiteeritud: 23. mai 2024. a.] https://www.stuklex.fi/en/maarays/stuk-y-2-2024.

9. Sekkumis- ja tegutsemistasemed ning avariikutsekiirituse viitetase kiirgushädaolukorras. *Riigi Teataja.* [Võrgumaterjal] 31. juuli 2018. a. [Tsiteeritud: 28. jaanuar 2024. a.] https://www.riigiteataja.ee/akt/131072018011.

10. International Atomic Energy Agency. *Derivation of the Source Term and Analysis of the Radiological Consequences of Research Reactor Accidents.* Viin : International Atomic Energy Agency, 2008.

11. Karlsruhe Institute of Technology. JRodos: An off-site emergency management system for nuclear accidents. *JRODOS: Realtime Online DecisiOn Support System.* [Võrgumaterjal] märts

2017. a. [Tsiteeritud: 25. detsember 2023. a.] https://resy5.ites.kit.edu/JRODOS/documents/JRodos_Report_forHomepage.pdf.

12. Ievdin, Ievgin, et al. JRodos User Guide. *JRODOS: Realtime Online DecisiOn Support System.* [Võrgumaterjal] 26. märts 2019. a. [Tsiteeritud: 7. mai 2024. a.] https://resy5.ites.kit.edu/JRODOS/documents/JRodos_UserGuide.pdf.

13. Ievdin, Ievgen, et al. Result Guide for the models in the JRodos Emergency Chain. *JRODOS: Realtime Online DecisiOn Support System.* [Võrgumaterjal] september 2019. a. [Tsiteeritud: 30. jaanuar 2024. a.] https://resy5.ites.kit.edu/JRODOS/documents/JRodos_ResultGuide_v3.pdf.

14. Thykier-Nielsen, Søren, Deme, Sandor ja Mikkelsen, Torben. Description of the Atmospheric Dispersion Module RIMPUFF. *JRODOS: Realtime Online DecisiOn Support System.* [Võrgumaterjal] 29. aprill 1999. a. [Tsiteeritud: 28. mai 2024. a.] https://resy5.ites.kit.edu/RODOS/Documents/Public/HandbookV5/Volume3/4_2_6_RIMPUFF.pdf.

15. Päsler-Sauer, Jürgen. Model Description of the Early Contermeasures Module EmerSim - in RODOS PV 6.0. *JRODOS: Realtime Online DecisiOn Support System.* [Võrgumaterjal] 2. mai 2007. a. [Tsiteeritud: 24. mai 2024. a.] https://resy5.ites.kit.edu/RODOS/Documents/Public/HandbookV6f/Volume3/EmerSimAll2007color.pdf.

16. Müller, Heinz, Gering, Florian ja Pröhl, Gerard. Model Description of the Terrestrial Food Chain and Dose Module. *JRodos, Java based RODOS version.* [Võrgumaterjal] 18. veebruar 2004. a. [Tsiteeritud: 8. mai 2024. a.] https://resy5.ites.kit.edu/JRODOS/.

17. International Atomic Energy Agency. *The Fukushima Daiichi Accident.* Viin : International Atomic Energy Agency, 2015.

18. U. S. Nuclear Regulatory Commission. Final Safety Evaluation Report for the Early Site Permit Application for the Clinch River Nuclear Site. [Võrgumaterjal] 2019. a. https://www.nrc.gov/docs/ML1916/ML19162A157.pdf.

19. Instructions in Case of Radiation Hazard. *Fortum.* [Võrgumaterjal] märts 2019. a. [Tsiteeritud: 28. mai 2024. a.] https://www.fortum.fi/sites/default/files/documents/toimintaohje_sateilyvaara_en_2019_0.pdf.

Lisad

Lisa 1. Allikaliikme F6.VVER440SEV2 isotoobid ja nende lekkinud aktiivsus

Tabel 2. Allikaliikme F6.VVER440SEV2 isotoobid ja nende 12 h jooksul lekkinud aktiivsus

Isotoop	**12 tunni jooksul lekkinud aktiivsus (Bq)**
Xe-133	$1.4 \cdot 10^{16}$
Kr-88	$5.5 \cdot 10^{15}$
I-134	$4.2 \cdot 10^{15}$
Kr-87	$3.9 \cdot 10^{15}$
I-133	$3.8 \cdot 10^{15}$
I-135	$3.3 \cdot 10^{15}$
I-132	$2.7 \cdot 10^{15}$
Xe-135	$2.6 \cdot 10^{15}$
I-131	$1.9 \cdot 10^{15}$
Kr-85m	$1.9 \cdot 10^{15}$
Cs-134	$1.2 \cdot 10^{14}$
Cs-137	$7.6 \cdot 10^{13}$
Kr-85	$4.6 \cdot 10^{13}$

Lisa 2. TVA allikaliikme isotoobid ja nende lekkinud aktiivsus

Tabel 3. TVA allikaliikme isotoobid ja nende lekkinud aktiivsus nelja päeva jooksul (18)

Isotoop	Nelja päeva jooksul lekkinud aktiivsus (Ci)	Isotoop	Nelja päeva jooksul lekkinud aktiivsus (Ci)
Xe-135	14900	Sr-90	7,46
Kr-85	3290	Y-92	7,46
Kr-88	3040	Nd-147	6,82
Rb-88	2590	La-140	4,75
Kr-85m	1940	Ru-103	4,13
Xe-133	1740	Rh-103m	4,11
Kr-87	1100	Nb-97	3,95
I-133	972	Rh-105	2,9
Xe-135m	695	Te-127m	2,86
I-131	679	Rh-106	2,7
I-135	659	Ru-106	2,68
I-134	208	Ru-105	1,55
Te-132	178	Ce-141	1,31
I-132	135	Ce-144	1,1
Cs-134	126	Ce-143	1,09
Cs-137	88,8	Rb-86	0,992
Ba-137m	80	Pr-144	0,965
Nb-95	64,5	La-142	0,865
Mo-99	61,6	Zr-95	0,634
Tc-99m	58	Zr-97	0,564
Ba-140	48,2	Y-90	0,505
Cs-136	28,2	Pr-143	0,31
Te-131m	22,2	Y-93	0,29
Sr-89	22	Y-91	0,274
Sr-91	20,5	Pu-241	0,16
Te-129	17,5	Cm-242	0,0261
Te-127	16	La-141	0,0245
Sb-127	15,1	Pr-144	0,0172
Sr-92	12,7	Cm-244	0,0109
Sb-129	12,3	Pu-238	$7,75 \cdot 10^{-3}$
Ba-139	12,2	Co-60	$8,74 \cdot 10^{-4}$
Np-239	11	Pu-240	$6,48 \cdot 10^{-4}$
Te-131	10,9	Pu-239	$3,21 \cdot 10^{-4}$
Y-91	9,9	Am-241	$1,06 \cdot 10^{-4}$
Te-129m	8,15	Co-58	$7,88 \cdot 10^{-5}$

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Ida Pinte,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose Tuumajaamast lekkivate gaasiliste radioaktiivsete ainete dispersiooni mudeldamine, mille juhendajad on PhD Marti Jeltsov, PhD Siiri Salupere ja MSc Krislin Sartakov, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Ida Pinte

31.05.2024