Proračun vjetrene mreže dubokog geološkog odlagališta iskorištenog nuklearnog goriva

Bodružić, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:465645

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

Proračun vjetrene mreže dubokog geološkog odlagališta iskorištenog nuklearnog goriva

Diplomski rad

Nikola Bodružić

R 209

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu Diplomski rad

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

PRORAČUN VJETRENE MREŽE DUBOKOG GEOLOŠKOG ODLAGALIŠTA ISKORIŠTENOG NUKLEARNOG GORIVA

NIKOLA BODRUŽIĆ

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U diplomskom radu opisano je duboko geološko odlaganje visoko radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva. Opisan je švedski koncept odlaganja u vertikalne bušotine (KBS-3). U radu je objašnjeno vjetrenje podzemnih odlagališta, načini vjetrenja, te dijelovi ventilacijskog sustava (npr. ventilatori, vrata, pregrade…). Osim toga napravljen je proračun vjetrene mreže za dva tipa odlagališta u programu Ventsim koji za proračun koristi Hardy Cross metodu. U oba tipa vjetrene mreže izračunat je protok zračne struje te donešena usporedba između dva odlagališta.

Ključne riječi: Duboko geološko odlagalište, VRAO, ING, vjetrena mreža, Ventsim.

Diplomski rad sadrži: 56 stranice, 8 tablica, 40 slika i 27 reference.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Želimir Veinović, docent RGNF-a

Pomagao u izradi: Vjekoslav Herceg, Dipl.ing.rud., asistent

Ocjenjivači: Dr. sc. Želimir Veinović, docent RGNF-a

Dr. sc. Mario Klanfar, docent RGNF-a

Dr. sc. Anamarija Grbeš, docent RGNF-a

Datum obrane: 20. Rujna, 2019. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

University of Zagreb Master's Thesis
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

BUDGET OF THE VENTILATION NETWORK OF THE DEEP GEOLOGICAL DISPOSAL OF SPENT NUCLEAR FUEL

NIKOLA BODRUŽIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering
Institute of Mineralogy, Petrology and Mineral deposits,
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

This master thesis provides a description of the geological disposal of high level waste and spent nuclear fuel. The swedish concept of disposal into vertical wells (KBS-3) is described. There is an explanation of the airing/ventilation of underground storages/landfills, methods/types of airing/ventilation and parts of the ventilation systems (for exampke ventilators, doors, compartments...) The thesis also contains the budget of the airing/ventilation network for 2 types of landfills which was calculated using the Ventsim programme and the Hardy Cross methods for this purpose. In both types of ventilation network calculated the flow of air currents and brought comparison between the two landfills.
Keywords: Deep geological repository, HLW, spent nuclear waste, ventilation network, Ventsim.

Thesis contains: 56 pages, 8 tables, 40 figures and 27 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Assistant Professor, Želimir Veinović, PhD
Tech. assistance: Assistant Vjekoslav Herceg

Reviewers: Assistant Professor, Želimir Veinović, PhD
Assistant Professor Mario Klanfar, PhD
Assistant Professor Anamarija Grbeš, PhD

Date of defense: September 20.2019. Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA: II
POPIS TABLICA: IV
POPIS KRATICA V
POPIS KORŠTENIH OZNAKA I JEDINICA VI
1. UVOD 1
2. DUBOKA GEOLOŠKA ODLAGALIŠTA VRAO I ING 2
2.1. Radioaktivnost 2
2.2. Radioaktivni otpad 4
2.3. VRAO i ING 7
2.4. Duboka geološka odlagališta VRAO i ING 11
2.5. Švedski KBS-3V koncept 14
2.6. Specifičnosti dubokog geološkog odlaganja VRAO i ING 15
3. VJETRENJE PODZEMNIH PROSTORIJA 19
3.1. Vjetrena mreža 21
3.2. Ventilatori 22
3.3. Ostali dijelovi ventilacijskog sustava 27
3.4. Separatno vjetrenje 29
3.5. Hardy cross metoda 31
3.6. Program VENTSIM 32
4. PRORAČUN VJETRENE MREŽE TIPSKOG ODLAGALIŠTA VRAO i ING 35
4.1. Izrada u programu Ventsim 35
4.2. Proračun i simulacija 40
5. ZAKLJUČAK 44
6. LITERATURA: 45

POPIS SLIKA:

Slika 2 - 1. Raspad atoma (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2015) 2
Slika 2 - 2. Vrste radioaktivnog zračenja (Šušak, 2019)..... 2
Slika 2 - 3. Domet različitih vrsta zračenja (Types of ionizing radiation, 2015)..... 4
Slika 2 - 4. Klasifikacija RAO (IAEA, 2009)..... 5
Slika 2 - 5. Nisko radioaktivni otpad u spremnicima (Poslovni-global, 2019)..... 6
Slika 2 - 6. Odlagalište SRAO i NRAO (Raos, 2019)..... 6
Slika 2 - 7. Hlađenje ING u bazenima (Fairley, 2007) 7
Slika 2 - 8. Spremnik za suho skladištenje ING-a (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2015) 8
Slika 2 - 9. Ciklus hlađenja ING u bazenu (The Mainichi, 2019) 10
Slika 2 - 10. Shema dubokog geološkog odlagališta VRAO (Munier, 2008)..... 11
Slika 2 - 11. Koncepti odlaganja istrošenog nuklearnog goriva KBS-3V (Baldwin i dr., 2008)..... 14
Slika 2 - 12. Spremnik za odlaganje ING-a (izvor: prof.dr.sc. Ivan Vrkljan, privatna zbirka) 15
Slika 2 - 13. Koncepti s više barijera (Alexander i dr, 2006.) 17
Slika 2 - 14. Duboko geološko odlagalište s dva vjetrena okna i jednim za ljude i mehanizaciju (Wang i dr., 2018)..... 18
Slika 3 - 1. Jednokrilni i dvokrilni sistem zračenja (Vrkljan, 2016)..... 20
Slika 3 - 2. Dijagonalni (periferni) dvokrilni (Vrkljan, 2016) 20
Slika 3 - 3. Rudarski ventilator (TLT-turbo,2019) 22
Slika 3 - 4. Dijelovi ventilatora (TLT-turbo,2019)..... 23
Slika 3 - 5. Skica radijalnog ventilatora (Vrkljan, 2016)..... 24
Slika 3 - 6. Nagib lopatica kod radijalnog ventilatora (Vrkljan, 2016) 24
Slika 3 - 7. Skica aksijalnog ventilatora i smjer strujanja zraka (Vrkljan, 2016) 25
Slika 3 - 8. Aksijalni ventilator (TLT-turbo,2019) 26
Slika 3 - 9. Izrada aksijalnog ventilatora (TLT-turbo,2019)..... 27
Slika 3 - 10. Shema separatnog vjetrenja (Vrkljan, 2016)..... 29
Slika 3 - 11. Shema tlačne separacije (Vrkljan, 2016)..... 30
Slika 3 - 12. Shema usisnog vjetrenja (Vrkljan, 2016)..... 30
Slika 3 - 13. Vjetreni hodnici i protoci zraka (Ventsim, 2019)..... 32
Slika 3 - 14. Koncentracija plina u vjetrenoj mreži (Ventsim, 2019)..... 33

Slika 3 - 15. Prikaz određenih vrsta podataka pomoću boja (Ventsim, 2019).....33
Slika 3 - 16. Prikaz modela rudnika (Ventsim, 2019).....34
Slike 4 - 1. Dimenzije odlagališta.....35
Slike 4 - 2. Dimenzije odlagališta.....35
Slike 4 - 3. Prozor za unošenje koordinata.....36
Slike 4 - 4. Vjetrena mreža.....36
Slike 4 - 5. Definiranje okna.....37
Slike 4 - 6. Glavni ventilator na ulaznom oknu.....37
Slike 4 - 7. Pomoćni ventilatori u vjetrenoj mreži.....38
Slike 4 - 8. Vjetrena mreža sa izračunatim protocima.....38
Slike 4 - 9. Vjetrena mreža sa izračunatim protocima.....39
Slike 4 - 10. Drugi tip odlagališta.....39

POPIS TABLICA:

Tablica 2 - 1. Udio nisko, srednje i visoko radioaktivnog otpada u nuklearnoj elektrani (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2015).....8
Tablica 2-2. Usporedba koncepata za duboko geološko odlaganje visokoradioaktivnog otpada i iskorištenog nuklearnog goriva (Kujundžić i dr., 2012). 12

Tablica 4 - 1. Protok zraka u ulazno i izlaznom vjetrenom oknu 40
Tablica 4 - 2. Protok zraka u glavnim hodnicima.....40
Tablica 4 - 3. Protok zraka u hodnicima za odlaganje otpada 41
Tablica 4 - 4. Protok zraka u ulazno i izlaznom vjetrenom oknu 41
Tablica 4 - 5. Protok zraka u glavnim hodnicima.....42
Tablica 4 - 6. Protok zraka u hodnicima za odlaganje otpada 43

POPIS KRATICA

RAO- radioaktivni otpad

NRAO -nisko radioaktivni otpad

VNRAO- vrlo nisko radioaktivni otpad

SRAO- srednje radioaktivni otpad

VRAO- visoko radioaktivni otpad

ING- iskorišteno nuklearno

IAEA- Međunarodne agencije za atomsku energiju (International Atomic Energy Agency)

POPIS KORŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
Q	(m^3/s)	protok zraka
P	(mm vode)	gubitak tlaka za svaku granu
R	-	otpor u svakoj grani

1. UVOD

Republika Hrvatska (RH) zajedno s Republikom Slovenijom (RS) sudjelovala je u izgradnji Nuklearne elektrane Krško (NEK) kao zajednički cilj u nuklearnom programu Socijalističke Federativne Republike Jugoslavije (SFRJ). Kao suvlasnici NEK imamo obavezu zbrinuti naš dio radioaktivnog otpada (RAO) koji je nastao njenim radom, a u to spada sav nisko i srednje radioaktivni otpad (NRAO i SRAO) te visokoradioaktivni otpad (VRAO) i iskorišteno nuklearno gorivo (ING).

Odlaganje radioaktivnog otpada može se podijeliti na tri osnovna tipa odlagališta, a to su pripovršinsko i/ili plitko za nisko radioaktivni otpad i srednje radioaktivni otpad te duboka geološka odlagališta za visoko radioaktivni otpad i iskorišteno nuklearno gorivo. Svrha odlagališta je sigurno odlaganje radioaktivnog otpada koje treba spriječiti ugrozu ljudskog zdravlja i života, odnosno kontaminaciju prirode radionuklidima iz otpada.

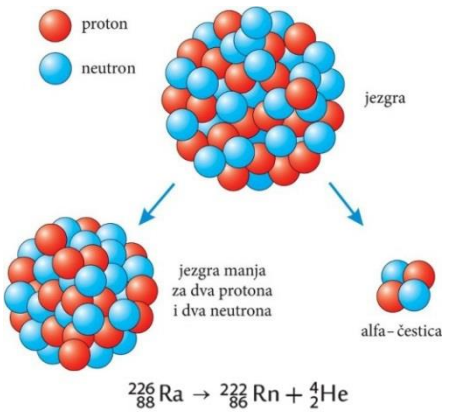
Cilj rada je proračunati parametre vjetrene mreže za duboko geološko odlagalište visoko radioaktivnog otpada ili iskorištenog nuklearnog goriva s dva okna. Osnovna zadaća vjetrenja podzemnih prostorija u odlagalištu je razrjeđivanje otrovnih plinova koji nastaju izgaranjem goriva u strojevima prilikom izrade podzemnih prostorija i rada prilikom punjenja odlagališta s radioaktivnim otpadom, plinova nastalih miniranjem. Sekundarna zadaća je osiguravanje povoljnih atmosferskih uvjeta za boravak i rad ljudi (temperatura, vlaga, zrak).

Cilj ovoga rada je prikazati proračun vjetrene mreže tipskog odlagališta visoko radioaktivnog otpada ili iskorištenog nuklearnog goriva preko geometrije odlagališta, izradom vjetrene mreže u Ventsim programu te simulacijom vjetrene mreže.

2. DUBOKA GEOLOŠKA ODLAGALIŠTA VRAO I ING

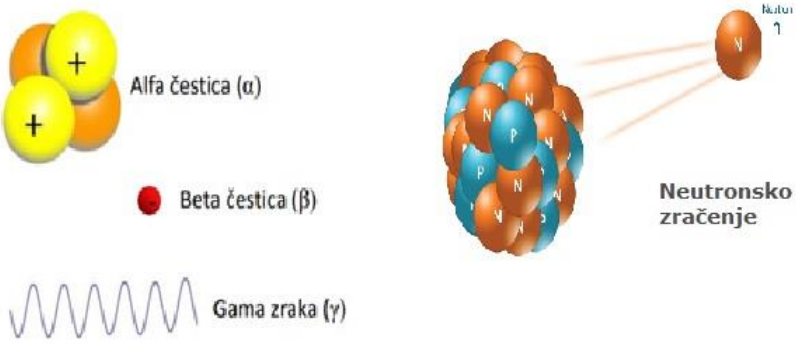
2.1. Radioaktivnost

Radioaktivnost je svojstvo nekih vrsta atoma (izotopa) da im se jezgra spontano mijenja i pri tome emitira energiju u obliku ionizirajućeg zračenja. Radioaktivni izotopi ili radionuklidi su nestabilni atomi koji imaju omjer protona i neutrona veći ili manji od omjera potrebnog za stabilnost te svojim radioaktivnim raspadom postižu stabilnost uz mijenjanjem mase i/ili kemijskih svojstava što je prikazano na slici (2-1) (Šušak, 2019).



Slika 2 - 1. Raspad atoma (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2015)

Postoje različite vrste radioaktivnog zračenja: alfa, beta i gama zračenje, slika (2-2).



Slika 2 - 2. Vrste radioaktivnog zračenja (Šušak, 2019)

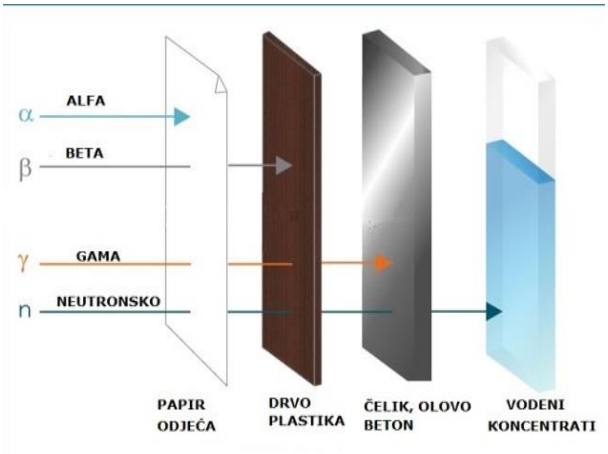
Alfa (α) raspad je emitiranje alfa čestica, odnosno jezgre atoma helija, a koja se sastoji od 2 protona i 2 neutrona. Zbog svoje relativno velike mase zračenje nije prodorno i u zraku ima domet od svega nekoliko centimetara koje može zaustaviti i list papira, slika (2-3), ali ukoliko dospije u tijelo može biti opasno jer ima veliku snagu ionizacije. (Šušak, 2019).

Beta (β) raspad je emitiranje čestica elektrona ili pozitrona. Ovakvo zračenje je puno jače nego alfa zračenje te ga ne može zaustaviti papir nego tek tanki sloj aluminijske folije. Kao jači izvor može prouzročiti razne kožne bolesti i oštećenja te može utjecati i na vid. Postoje dvije vrste beta raspada: beta minus i beta plus raspad. Kod beta minus raspada dolazi do promjene jezgre kod koje dolazi do emisije viška neutrona koji se raspada u proton uz zračenje elektrona i antineutrina, a nastaje zbog djelovanja slab nuklearne sile. Kod beta plus raspada dolazi do emisije viška protona koji se raspadaju na neutron, uz zračenje pozitrona i neutrina, a može se dogoditi samo unutar atomske jezgre kojoj je nuklearna energija vezanja novonastalog kemijskog elementa ili izotopa veća od nuklearne energije. (Šušak, 2019).

Gama (γ) zračenje je prijelaz između stanja više pobuđenosti atomske jezgre u stanje niže pobuđenosti ili osnovno stanje. Gama zračenje predstavlja dio magnetskog zračenja s jako kratkim valovima. Gama zrake su snopovi fotona - to su fotoni s najviše energije u elektromagnetskom spektru. (Šušak, 2019)

Gama fotoni nemaju masu ni električni naboj, ali imaju vrlo visoku energiju, otprilike 10000 puta veću od energije fotona u vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra. Zbog visoke energije gama čestice putuju brzinom svjetlosti i u zraku mogu prijeći stotine tisuća metara prije nego što potroše energiju. Mogu proći kroz mnogo vrsta materijala uključujući i ljudsko tkivo. Vrlo gusti materijali, poput olova, a obično se koriste za zaštitu od gama zračenja. (Šušak, 2019)

Neutronsko zračenje je vrsta zračenja koje se sastoji od slobodnih neutrona, koji se obično emitiraju kao rezultat spontane ili inducirane nuklearne fisije. Neutroni mogu putovati stotine do tisuće metara, ali se mogu zaustaviti s materijalom koji je bogat vodom kao naprimjer beton ili voda. Neutroni su, u stvari, jedina vrsta zračenja koja može druge materijale pretvoriti u radioaktivne. (Types of ionizing radiation, 2015)



Slika 2 - 3. Domet različitih vrsta zračenja (Types of ionizing radiation, 2015)

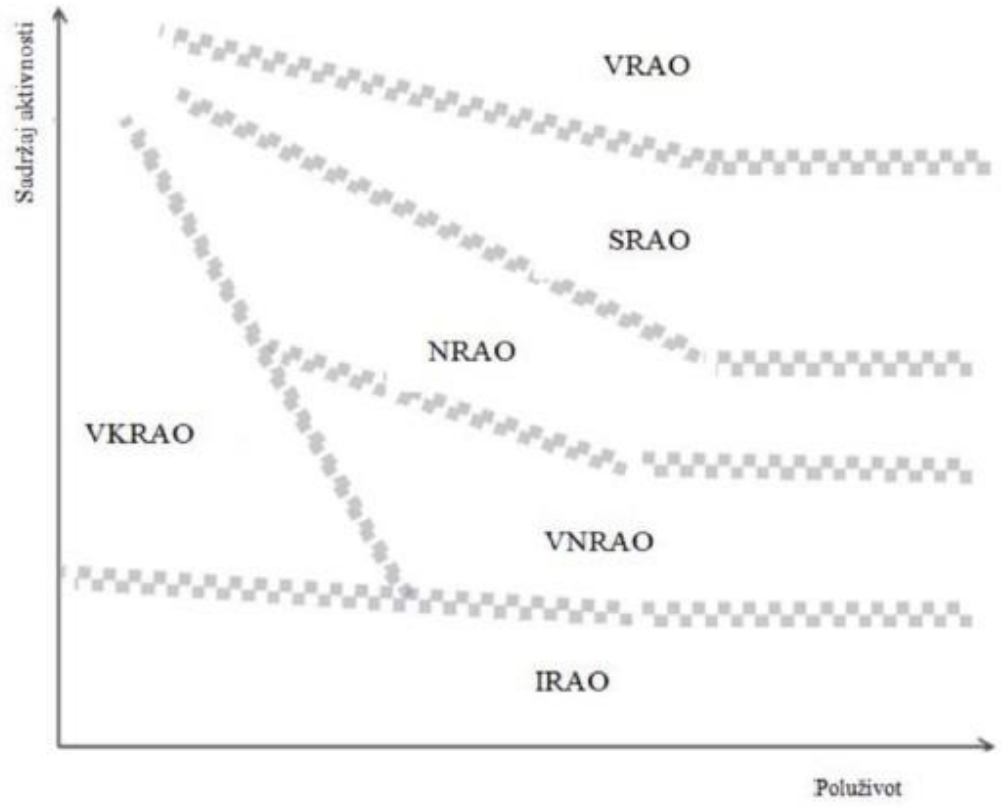
2.2. Radioaktivni otpad

Radioaktivni otpad (RAO) je materijal koji sadrži prirodne radionuklide ili radionuklide koji su nastali nuklearnim reakcijama, a mogu biti u udjelima većim nego prirodni. Prema IAEA radioaktivni otpad je bilo koji materijal koji je onečišćen ili sadrži radio nuklide u koncentracijama u kojima je nivo radioaktivnosti veći od najmanje dozvoljene granice, te za taj otpad nepstoji predviđena upotreba. RAO je potencijalno opasan za okoliš i ljudsko zdravlje te ga treba zbrinjavati na odgovarajući način. Radioaktivni otpad nastaje u procesima obrade pojedinih tvari koje sadrže radionuklide prirodnih torijevih i uranijevih nizova (npr. nafta, plin, razni minerali, ugljen). Osim u procesima obrade pojedinih tvari jedan dio RAO nastaje i u medicinskim ustanovama (primjena izvora ionizirajućeg zračenja u svrhu dijagnosticiranja i liječenja), industriji (detektori dima, gromobrani), znanstvenim i istraživačkim radovima (pri izvođenju eksperimenata u kojima se koriste izvori ionizirajućeg zračenja), a najveća količina nastaje u energetici kao posljedica aktivnosti svake od faza nuklearnog gorivog ciklusa u nuklearnim reaktorima. (Hrvatska enciklopedija, 2019).

Prema Uredbi o uvjetima te načinu zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih zatvorenih radioaktivnih izvora i izvora ionizirajućeg zračenja (NN 44/08) koji se namjeravaju dalje koristiti, radioaktivni otpad je u Republici Hrvatskoj klasificiran u

skladu s klasifikacijom Međunarodne agencije za atomsku energiju-International Atomic Energy Agency, (IAEA) (Veinović, 2016).

Radioaktivni otpad se klasificiran na vrlo nisko, nisko, srednje i visoko radioaktivni otpad, slika (2-4).



Slika 2 - 4. Klasifikacija RAO (IAEA, 2009)

Vrlo nisko radioaktivni otpad (VNRAO) je otpad koji sadrži nisku aktivnost radionuklida te nije opasan za okoliš i ljude i može se zbrinjavati kao komunalni otpad. Nisko radioaktivni otpad (NRAO) sadrži malu aktivnost i zanemariv udio radionuklida s dugim vremenom poluraspada. Većina NRAO nastaje u medicinskim ustanovama, industriji i nuklearnom gorivom ciklusu. Ova vrsta otpada se kompaktira ili spaljuje kako bi se smanjio volumen te se odlaže u pripovršinska ili plitka odlagališta, slika (2-6) (Hrvatska enciklopedija, 2019).



Slika 2 - 5. Nisko radioaktivni otpad u spremnicima (Poslovni-global, 2019)



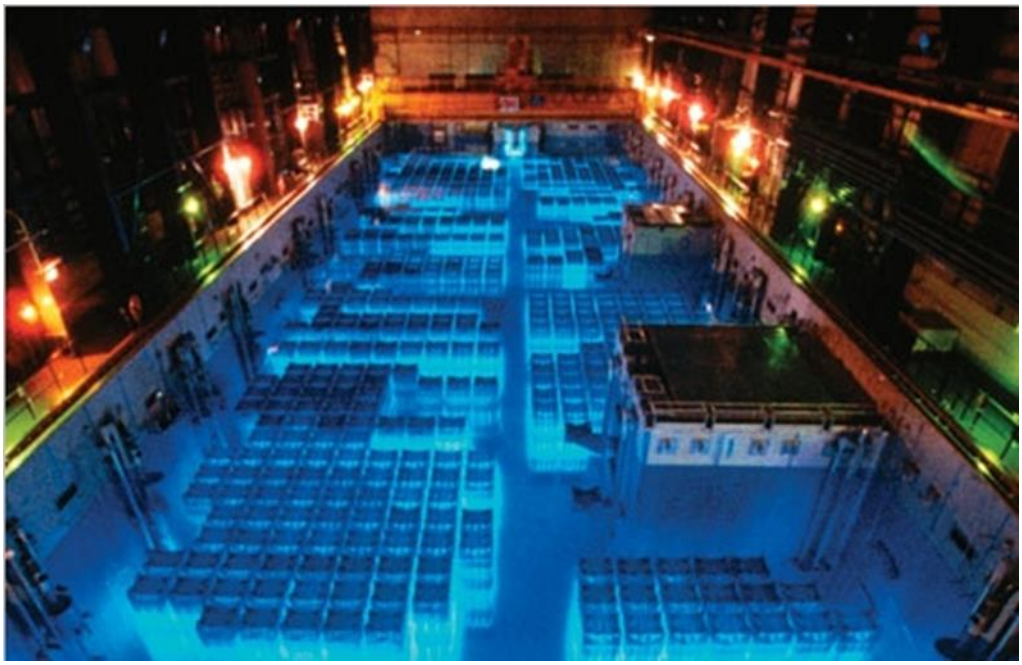
Slika 2 - 6. Odlagalište SRAO i NRAO (Raos, 2019)

Srednje radioaktivni otpad je otpad koji sadrži dugoživuće radionuklide, te zahtijeva veću sigurnost prilikom odlaganja i može se odlagati u pripovršinskim odlagalištima, sa dobrim sustavom barijera. (IAEA, 2009)

Ovakva vrsta otpada nastaje u pogonima nuklearnih elektrana i kod razgradnje nuklearnih elektrana. Njegovo zbrinjavanje ovisi o vremenu poluraspada prisutnih radionuklida. Otpad koji sadrži radionuklide s kratkim vremenom poluraspada zbrinjava se u površinskom odlagalištu, dok se otpad s radionuklidima s dugim vremenom poluraspada zbrinjava u dubokim podzemnim odlagalištima. (Hrvatska enciklopedija, 2019)

2.3. VRAO i ING

Transuranijski elementi i fisijski produkti su radionuklidi koji se stvaraju u jezgri reaktora. Takva vrsta otpada se mora ohladiti prije skladištenja jer stvara značajnu količinu topline, slika (2-7). Ova vrsta otpada pojavljuje se u dva oblika: kao fisijski produkti koji se dobivaju preradom istrošenoga goriva i kao istrošeno gorivo. Istrošeno se gorivo radi hlađenja i smanjenja radioaktivnosti privremeno pohranjuje (na 20 do 50 godina) na lokaciji nuklearne elektrane u bazenu za istrošeno gorivo i u suhim spremnicima, slika (2-8). Na samom kraju se zbrinjava u duboke geološke formacije na dubini od 500 do 1000 metara (Hrvatska enciklopedija, 2019).



Slika 2 - 7. Hlađenje ING u bazenima (Fairley, 2007)



Slika 2 - 8. Spremnik za suho skladištenje ING-a (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2015)

Tablica 2 - 1. Udio nisko, srednje i visoko radioaktivnog otpada u nuklearnoj elektrani (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2015)

Vrsta radioaktivnog otpada	Volumni udio otpada	Udio radionuklida
NRAO i SRAO	95 %	1%
VRAO i ING	5%	99%

Iskorišteno nuklearno gorivo (ING) sastoji se od gorivnih elemenata koji su dosegnuli tehničku i ekonomsku granicu, a sadrži i značajne količine fisijskih materijala, druge aktinide i fisijske produkte. Istrošeno nuklearno gorivo (ING) sastoji se od gorivih

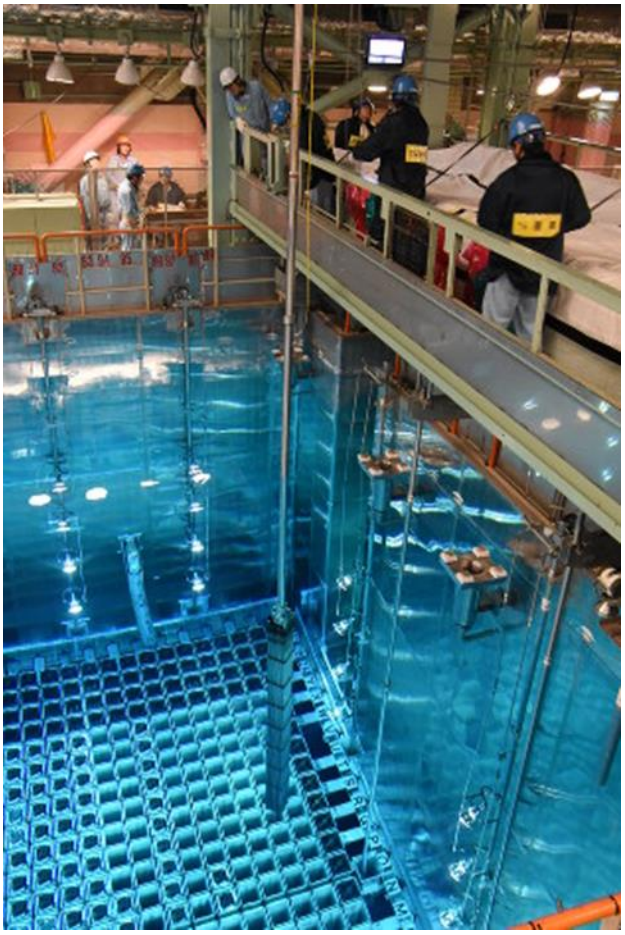
elemenata koji ispuštaju veliku količinu topline (Veinović i dr., 2014; Levanat, 1997; IAEA, 2009).

Iskoristivost iskorištenog nuklearnog goriva ovisi o zatrovanju goriva (fisijski proizvodi gomilaju se u gorivu kao jaki apsorberi neutrona što bi s vremenom dovelo do prekida lančane reakcije), tehnološkim oštećenjima gorivog materijala te oštećenjima ostalih materijala unutar nuklearnog reaktora.

Postoji mogućnost reprocesiranja istrošenog goriva kako bi se iz njega odvojilo gorivo koje se može ponovo koristiti u reaktoru čime nastaje visokoradioaktivni otpad, plutonij, novo gorivo, te srednježivući izotopi cezij-137 i stroncij-90 . Iako se mijenjaju značajke istrošenog goriva, reprocesiranje ne otklanja potrebu za geološkim odlagalištem (Levanat, 1997).

Otvoreni gorivi ciklus je onaj ciklus u kojem se ne koristi iskorišteno gorivo nego se odmah pristupa skladištenju. Vremenski period skladištenja goriva kod otvorenog ciklusa je relativno dug - može trajati od 4 godine sve dok se ne donese konačna odluka o odlaganju istrošenih gorivih elemenata. Takvo gorivo, prema svojemu aktivitetu, predstavlja materijal nalik na VRAO. Aktivnost ING izjednačuje se nakon 10 000-100 000 godina skladištenja s aktivnošću radioaktivnosti izvorne rude urana (Feretić i dr. 1995; Neall i dr., 2008).

U prvoj fazi se istrošeno gorivo pohranjuje u bazen s boriranom vodom zbog procesa hlađenja i smanjenja radioaktivnosti. Gorivo se u bazenu nalazi unutar metalne konstrukcije koja ga drži u vertikalnom položaju i podupire. Hladi se prirodnom cirkulacijom vode, a bazen je opskrbljen posebnim sustavom za hlađenje, slika (2-9). Toplina se iz bazena odvodi preko jednog ili više izmjenjivača topline tako da se toplija voda uzima pri vrhu bazena, a hladna vraća na dno bazena. U većini slučajeva se istrošeno nuklearno gorivo pohranjuje u bazenu u krugu nuklearne elektrane nekoliko godina, ponekad i desetak, ovisno o kapacitetu bazena (Fond-NEK,2016).



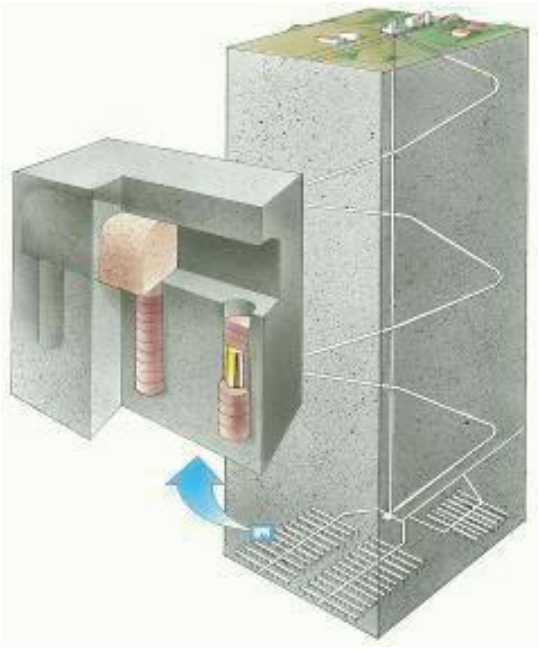
Slika 2 - 9. Ciklus hlađenja ING u bazenu (The Mainichi, 2019)

Nakon dovoljno dugog vremena provedenog u bazenu, gorivo je moguće premjestiti u suho skladište. Tada se istrošeno nuklearno gorivo pohranjuje u spremnicima i čuva u skladištima u posebno izgrađenim zgradama uz dodatnu zaštitu od prirodnih katastrofa, nesreća i napada (Fond-NEK, 2016).

2.4. Duboka geološka odlagališta VRAO i ING

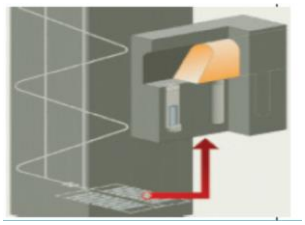
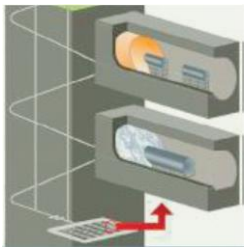
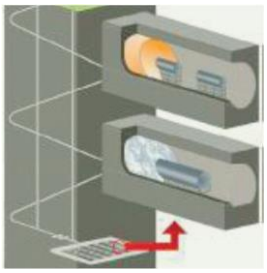
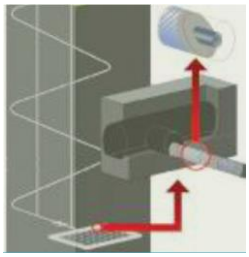
Duboka geološka odlagališta podrazumijevaju korištenje prirodnih barijera koje čine stijene, velike dubine i barijera od kojih je izgrađeno odlagalište. Barijere su dizajnirane tako da nakon njihovog postavljanja nema daljnjeg održavanja. Svaka država koja radi na nacionalnom programu za zbrinjavanje VRAO i ING razvila je neki koncept odlaganja otpada, a u tablici (2-3) prikazana je usporedba nekih koncepata za duboko geološko odlaganje visokoradioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva, slika (2-10) (Kujundžić i dr., 2012).

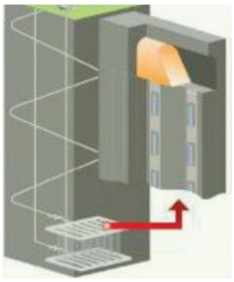
Izgradnja dubokog geološkog odlagališta zahtijevat će uporabu velike količine gline (bentonitna) zbog njenog dobrog svojstava bubrenja. Osim toga posjeduje izvrsne sposobnosti bubrenja i samozacijeljivanja, visoku razinu plastičnosti i omogućava minimalnu hidrauličku vodljivost. Glavna funkcija bentonitne ispune je smanjiti protok vode oko spremnika u kojem se nalazi istrošeno nuklearno gorivo i na taj način spriječiti potencijalno oslobađanje radionuklida u biosferu (Kujundžić i dr, 2012).



Slika 2 - 10. Shema dubokog geološkog odlagališta VRAO (Munier, 2008)

Tablica 2-2. Usporedba koncepata za duboko geološko odlaganje visokoradioaktivnog otpada i iskorištenog nuklearnog goriva (Kujundžić i dr., 2012).

Ime i ilustracija koncepta (Baldwin et al. 2008).. 2008).	Dimenzionalne karakteristike odlagališta	Razvoj koncepta
1. U tunelu (vertikalna bušotina) 	Sustav horizontalnih tunela na dubini od 400-700m. Tuneli su oko 250m dugi i raspoređeni na udaljenosti od 40m. Na podu tunela se nalaze vertikalne bušotine u koje se odlaže otpad koji će biti raspoređene na svakih 6m, dubine 8m. i promjera 1.75m.	Švedska, Finska
2. U tunelu (aksijalno) 	Promjer tunela za odlaganje 3.7m za kristalinične stijene. Duljina tunela je 800m. Razmak između tunela za odlaganje je oko 40m.	Švicarska
3. U tunelu (aksijalno) 	Ovaj koncept je vrlo sličan konceptu 2., ali koristi dugoživući bakreni ili titanski spremnik sa dodatkom željeza kako bi se povećala mehanička čvrstoća spremnika.	Kanada
4. U tunelu (aksijalno) sa super spremnikom 	Spremnici su odloženi u horizontalnim bušotinama (Ø 1.75m duljine 7.83m) bušenim u oba zida odlagališnog tunela. Razmak između odlagališnih tunela je 60m.	Švedska, Finska

5. Duboke bušotine 	Spremnici s otpadom se odlažu u duge vertikalne bušotine, koje se buše direktno iz odlagališnog tunela ili između gornje i donje radne galerije. U nekom slučaju se rade bušotine velikog promjera (1.5 do 2m).	Kanada, Japan

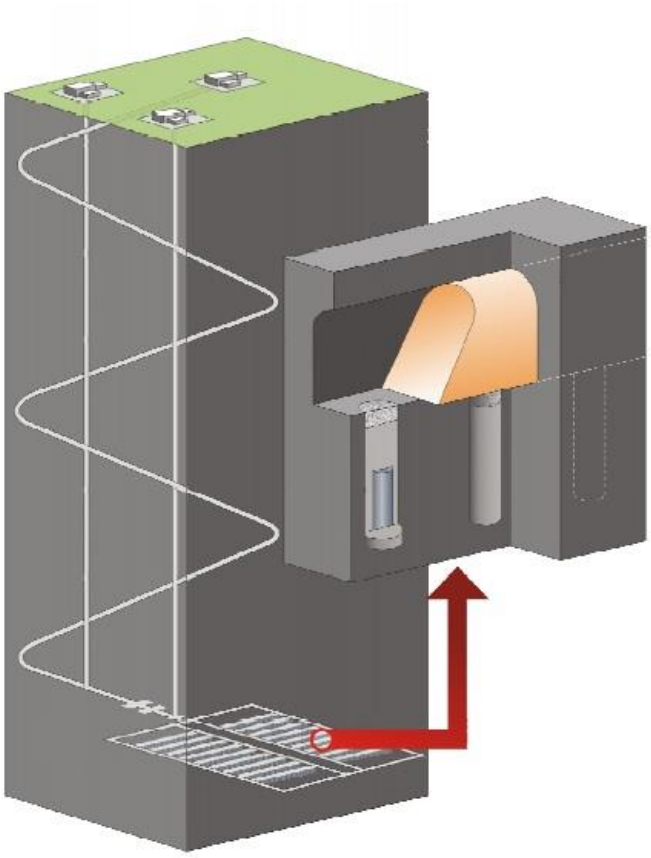
U tablici (2-2) prikazano je nekoliko različitih koncepata dubokog geološkog odlaganja u različitim državama. Koncepti su prikazani sa slikama te su opisane neke karakteristike za određeni tip koncepta. Neki od ovih primjera se već istražuju ili su dobro istraženi, dok se drugi još pojavljuju samo kao ideja za moguća odlaganja.

Koncepti 2. i 3. podrazumijevaju tunele s relativno velikim kružnim promjerom za odlaganje spremnika s VRAO-om i ING-om, iako je samo koncept 2 dovoljno „zreo“ za provedbu s obzirom na 30 godina sustavnog istraživanja i razvoja. Bušotine velikog promjera karakteristične su i za ostale (1., 4. i 5.) koncepte. Kao i koncept 3, koncept 1 je temeljen na dugotrajnim istraživanjima, dok koncept 4 još nije dovoljno zreo za provedbu iako je u velikom dijelu baziran na znanjima i iskustvima iz koncepta 1. Na konceptu 5 se provode dugotrajna istraživanja čije glavne smjernice uključuju testove sigurnosti i razvoj metoda koje će spriječiti da težina gornjih otpadnih paketa utječe na one ispod sebe (Kujundžić i dr., 2012).

Nakon usporedbe relevantnih koncepata odlaganja u kristalinične stijene razvijenih od strane različitih država vidljivo je korištenje velikih promjera bušotina (~ 0,6 do 2 m) za odlaganje spremnika VRAO-a i ING-a. Orijentacija bušotina može biti vertikalna, horizontalna ili pod blagim kutem dok njihove duljine mogu varirati od 8 ili 9 do preko 200 metara. Unatoč različitim uvjetima u geološkim sredinama, sve države nastoje projektirati odlagalište tako da se izbjegne podzemna voda koja na razne načine otežava čitav proces. Odlaganje u kristalinične stijene je kvalitetno istraženo i spremno za provedbu (Kujundžić i dr., 2012).

2.5. Švedski KBS-3V koncept

Primjer u radu je osmišljen primjenom švedskog koncepta KBS-3V Odlaganje bi se izvodilo u okomite bušotine u koje bi se stavljali spremnici s otpadom te bi se bušotina zapunjavala glinom (bentonitnom), slika (2-11). Otpad se stavlja u kratke (obično 6-8 m) bušotine srednjeg do velikog promjera (npr. 0,6 do 1,5 m) izbušene u podu tunela za odlaganje. Obično se koristi bakreni spremnik otporan na koroziju sa željeznim umetkom. Koncept je fleksibilan u pogledu zbrinjavanja ING i VRAO te u primjeni širokog raspona stijena. Spreman je za primjenu pogotovo nakon 30 godina istraživanja, razvoja i demonstracija po mnogim nacionalnim programima, a najzaslužniji za njegov razvoj su SKB (Švedska) i Posiva (Finska). (Baldwin T i dr., 2008)



Slika 2 - 11. Koncepti odlaganja istrošenog nuklearnog goriva KBS-3V (Baldwin i dr., 2008)



Slika 2 - 12. Spremnik za odlaganje ING-a (izvor: prof.dr.sc. Ivan Vrkljan, privatna zbirka)

2.6. Specifičnosti dubokog geološkog odlaganja VRAO i ING

Odlaganje VRAO-a i ING-a u duboka geološka odlagališta se smatra najboljim načinom zbrinjavanja ovih materijala iz nekoliko razloga (Veinović i dr., 2015):

- Predviđena dubina odlaganja (400-1 000 m) podrazumijeva dugi put za radionuklide koji će doći do površine, odnosno do razine pitke podzemne vode, jednako kao i smanjenu mogućnost ljudske intruzije;
- Dobro odabrana geološka sredina (slabopropusne magmatske, sedimentne ili metamorfne stijene) značit će manju brzinu transporta radionuklida prema površini;
- Inženjerske barijere (spremnik i materijal ispune između stijene i spremnika) predstavljaju dodatnu barijeru koja će sama po sebi usporiti transport radionuklida.

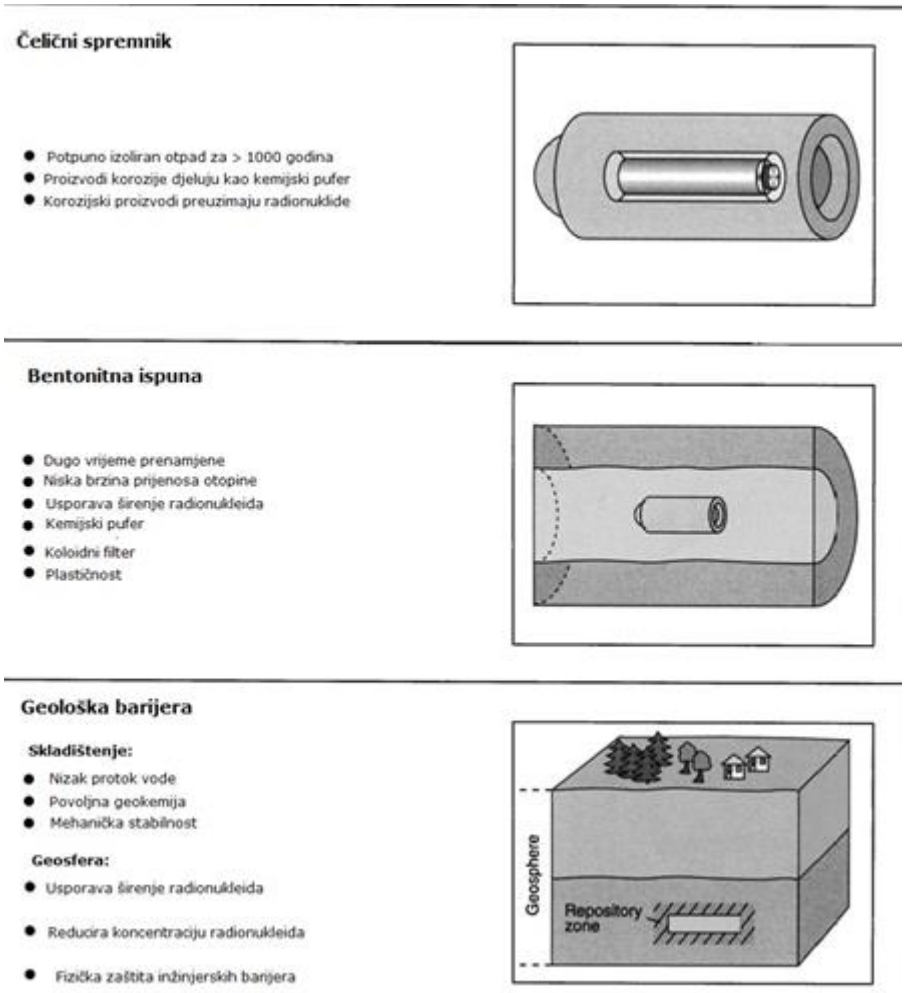
Zbog toga svaki od ovih istraživačkih laboratorija ima neke ciljeve koje mora ispuniti, a to su:

a) Razviti tehnologije i metodologije podzemnih pokusa;
b) Razviti i poboljšati metodologije za karakterizaciju i ispitivanje stijena;
c) Bolje razumijeti, modelirati i ispitati relevantne procese u geosferi;
d) Bolje razumijeti, modelirati i ispitati ponašanje različitih komponenti sustava inženjerskih barijera u odgovarajućim uvjetima;
e) Dobiti kvantitativne podatke za izračune u procjeni sigurnosti;
f) Testirati i optimizirati pojedine komponente i operativne postupke odlagališta u punoj veličini;
g) Optimizirati tehnike izgradnje odlagališta i njihov utjecaj obzirom na poremećaj matične stijene;
h) Trenirati osoblje;
i) Promovirati međunarodnu suradnju;
j) Izgraditi povjerenje u znanstvenu i tehničku zajednicu;
k) Doprinijeti jačanju povjerenja javnosti.

Kako podzemni istraživački laboratoriji objedinjuju podzemno iskapanje, podgrađivanje i vjetrenje, moguće ih je koristiti za optimiziranje tehnika iskopa budućeg odlagališta. Ujedno, uvjeti u podzemnim laboratorijima odgovaraju razvoju tehnologije povrata odloženog otpada zahtijevanog u nekim zemljama.

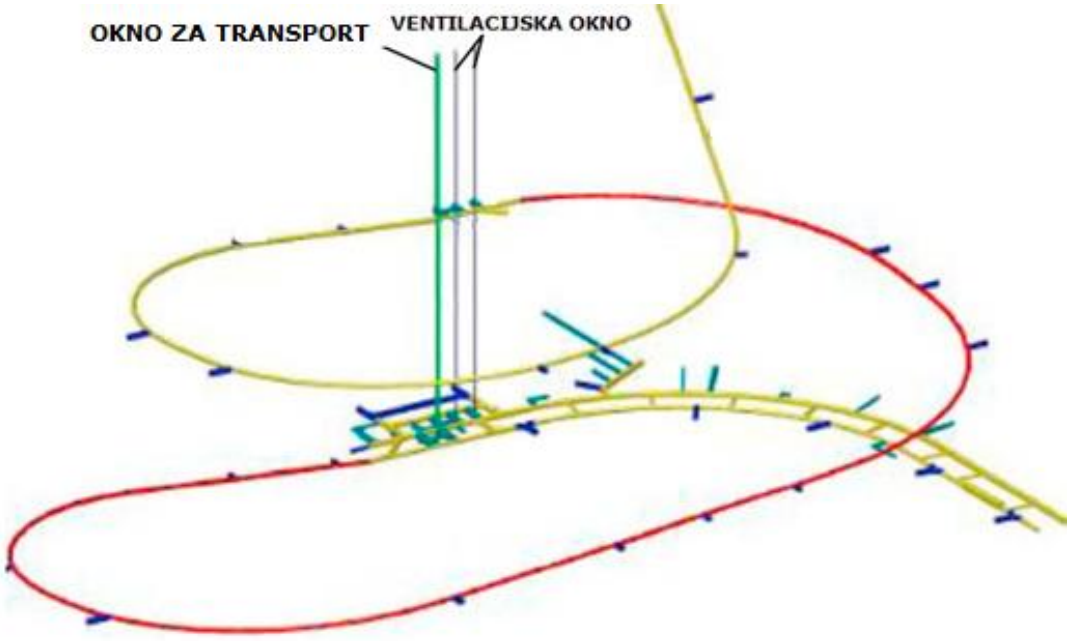
S obzirom na to da se odlagalište VRAO i ING, odnosno trajnost sustava odlaganja, projektira na period od 100 000 do 1 000 000 godina (Veinović i dr., 2015), gore navedeni razlozi za izbor dubokih geoloških odlagališta također idu u prilog trajnosti odlagališta. Očekivani pad aktivnosti VRAO-a i ING-a na razinu uranijeve rude bit će već nakon 10 000 godina za VRAO i na oko 100 000 godina za ING, ali se to smatra prihvatljivim trajanjem u trenutku dolaska radionuklida iz odlagališta na površinu. U oba slučaja odlagališta se projektiraju na 100 000 do 1 000 000 godina.

Da bi bili još sigurniji prilikom odlaganja VRAO i ING koristimo “sustav s više barijera” koji je izgrađen od spremnika u koji je odložen otpad te sama izolacijska svojstva geološkog okoliša u kojem se nalazi odlagalište. Otpad se stavlja u metalni spremnik s debelim zidom ili visoko korozijski otporan te se zatim odlaže i zapunjava školjkom ili 'puferom' od zbijene gline ili cementa koji izolira spremnik od okolne stijene i od vode u stijeni.



Slika 2 - 13. Koncepti s više barijera (Alexander i dr, 2006.)

Duboka geološka odlagališta sastoje se od dva okna (vjetrena) za ulazak svježe zračne struje i izlazak onečišćene zračne struje te niskopa za ulazak ljudi i mehanizacije. Izlazna zračna struja ne smije ići preko ljudi kako bi se zaštitilo ljudsko zdravlje od zračenja i od drugih plinova koji se nalaze u odlagalištu.



Slika 2 - 14. Duboko geološko odlagalište s dva vjetrena okna i jednim za ljude i mehanizaciju (Wang i dr., 2018)

3. VJETRENJE PODZEMNIH PROSTORIJA

Svaki podzemni objekt, u ovom slučaju podzemno odlagalište, mora imati učinkoviti ventilacijski sustav. Bez takvog sustava nema zahvata u objektu, a ključna činjenica je sigurnost ljudi i mehanizacije. Učinkovito vjetrenje poboljšava produktivnost rudnika, odnosno napredovanje radova, odlaganje otpada i drugih zahvata za što je podzemni objekt namijenjen.

Vjetrenje treba osigurati: a) dovoljne količine kisika za disanje

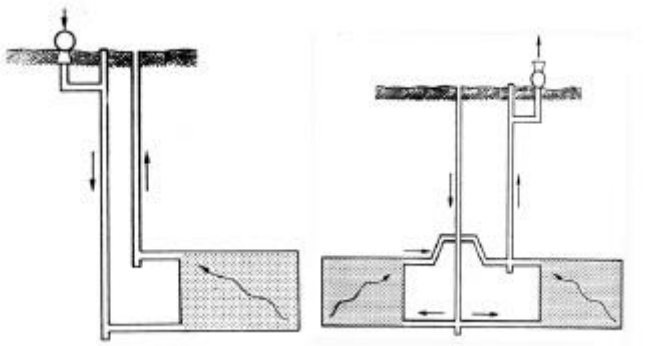
b) spriječiti skupljanje eksplozivnih, otrovnih, zagušljivih, radioaktivnih ili drugih štetnih plinova i tvari te štetne prašine

c) klimu pogodnu za rad

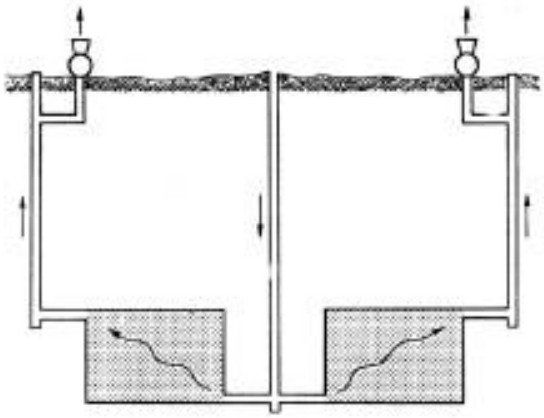
Kako bi održali odgovarajuće uvjete za rad potrebno je pažljivo projektirati vjetrenu mrežu za određeni objekt. Vjetrena (ventilacijska) mreža sastoji se od vjetrenih provodnika- grana (okna, prekopi, glavnih i sporednih hodnika, hodnici, uskopi i niskopi) koje se spajaju u čvorovima. Tako čine orijentirani i povezani graf sa svojstvom da u pojedini čvor ulazi i izlazi barem jedna grana.

S obzirom na međusobni položaj glavnih prostorija (izlazne i ulazne zračne struje) vjetrenja razlikujemo sisteme zračenja, slika (3-1) i (3-2):

a) Središnji jednokrilni
b) Središnji dvokrilni
c) Dijagonalni (periferni) jednokrilni
d) Dijagonalni (periferni) dvokrilni
e) Kombinirani



Slika 3 - 1. Jednokrilni i dvokrilni sistem zračenja (Vrkljan, 2016)



Slika 3 - 2. Dijagonalni (periferni) dvokrilni (Vrkljan, 2016)

Dva glavna faktora koja će biti potrebno razmatrati prilikom izrade vjetrene mreže su:

a) ukupni volumen protoka zraka potreban rudniku i njegova zadovoljavajuća i ekonomska distribucija,
b) protok zraka koji daje ventilator

U nekim okolnostima atmosferski tlak i temperatura prelaze dopuštene granice, ali su i dalje prihvatljive za zdravlje čovjeka. Na primjer, u podzemnom odlagalištu nuklearnog otpada visoke razine, odlagalište otpada može biti zatvoreno za ljude nakon što je završeno odlaganje te je zatvoren spremnik za otpad. Međutim, okoliš unutar odlagališta mora se održavati takav da se u stijeni kontrolira temperatura. Ovo je potrebno kako bi se omogućilo relativno brzo ponovno otvaranje odlagališta za odlaganje nuklearnog otpada u svakom sljedećem vremenu tijekom aktivnog vijeka

odlaganja. Drugi oblici podzemnih skladišta često zahtijevaju kontrolu okoliša tlaka, temperature i vlaga za očuvanje pohranjenog materijala (Abramović i dr.).

Za izradu ventilacijskog sustava koriste se ventilatori, pregrade, regulatori te vrata.

3.1.Vjetrena mreža

Vjetrena mreža sastoji se od niza hodnika (grana) koje su spojene u čvorovima. Svaka grana u mreži ima samo jedan početni i jedan završni čvor. U svakoj grani moraju biti poznati otpori ili protok koji prolazi kroz taj dio mreže. Mreža se sastoji od strujnih krugova ili petlji. To su zatvoreni krugovi koji su sastavljeni od grana koje počinju i završavaju s istim čvorom, ali bez ponavljanja grana ili čvorova. Broj strujnih krugova s određen je izrazom:

$$s = m - n + 1$$

Svaka grana vjetrene mreže definirana je i opisana trima veličinama:

a) Otporom
b) Protokom
c) Depresijom

U praksi se javljaju zadatci raznih tipova glede određivanja osnovnih veličina vjetrene mreže (Vrkljan,2016):

a) Slobodna raspodjela zraka u vjetrenoj mreži - uz poznate otpore vjetrenih provodnika Ri i poznate izvore depresija h (prirodne ili umjetne) potrebno je utvrditi glavnu ulaznu (izlaznu) i protočne količine zraka po pojedinim granama vjetrene mreže
b) Regulacija vjetrene mreže - za poznate otpore grana vjetrene mreže Ri i poznate (tražene) količine zraka u pojedinim granama vjetrene mreže Qi potrebno je utvrditi veličine dodatnih otpora
c) Stabilnost vjetrenih mreža - izrada planova obrane i spašavanja iz rudnika

3.2. Ventilatori

Kako bi osigurali ulaz svježe zračne struje u podzemno odlagalište potrebni su ventilacijski uređaji. Primarno sredstvo za proizvodnju i kontroliranje protoka zraka za cijeli sustav vjetrenja su ventilatori, slika (3-3). Ventilatori s obzirom na smjer djelovanja mogu biti kompresijski i depresijski: tlačni odnosno sisajući.

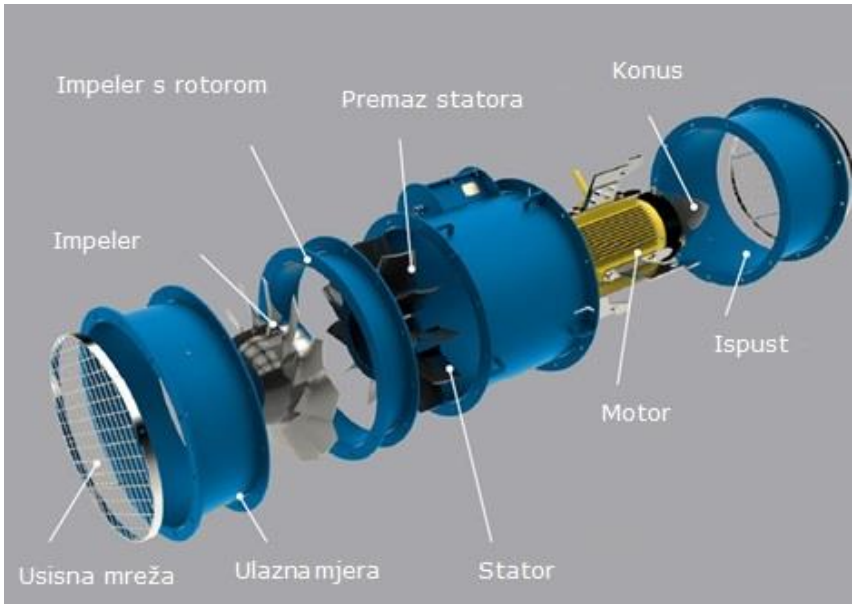
Ventilator je rotacijski radni stroj koji služi za transport plinova i para. Princip rada zasniva se na pretvorbi energije prilikom strujanja medija kroz kanale koje oblikuju lopatice statora, rotora i difuzora. U rotoru ventilatora pretvara se mehanička energija rotacije rotora, dobivena od nekog izvora energije, u kinetičku ili potencijalnu energiju strujanja fluida.



Slika 3 - 3. Rudarski ventilator (TLT-turbo,2019)

Vjetreno postrojenje sačinjavaju:

a) ventilator
b) vjetreni kanal
c) difuzor
d) te ostali dijelovi koji su prikazani na slici (3-4.).



Slika 3 - 4. Dijelovi ventilatora (TLT-turbo,2019)

Ventilatori se prema konstrukciji dijele na radijalne i aksijalne, a prema položaju u vjetrenoj mreži dijele se na vanjske i unutarnje.

Prema propisima ventilatore dijelimo na: a) glavne

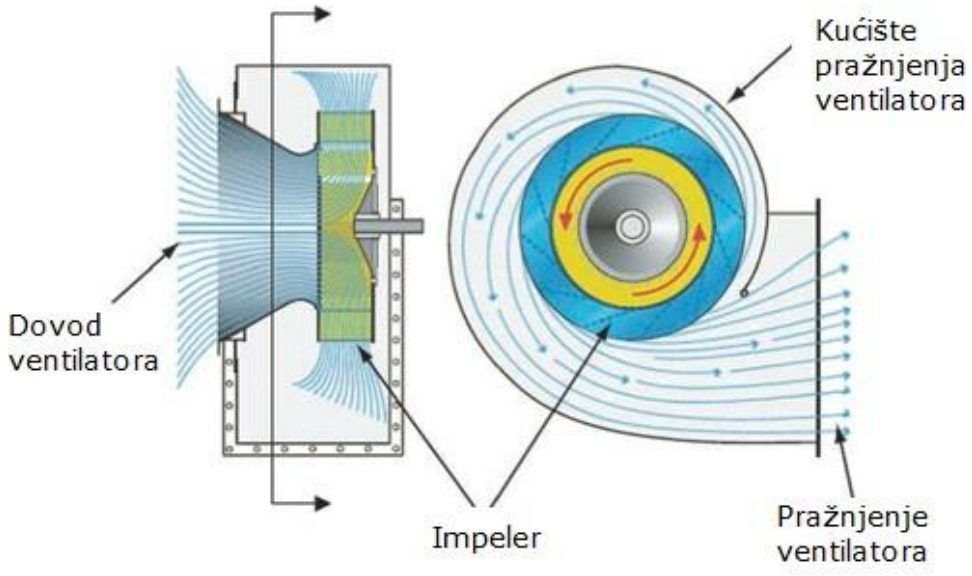
b) pomoćne na površini

c) jamske

Glavni ventilator upravlja svom količinom zraka koja cirkulira u podzemnom odlagalištu ili rudniku. Oni su obično, ali ne i nužno smješteni na površini.

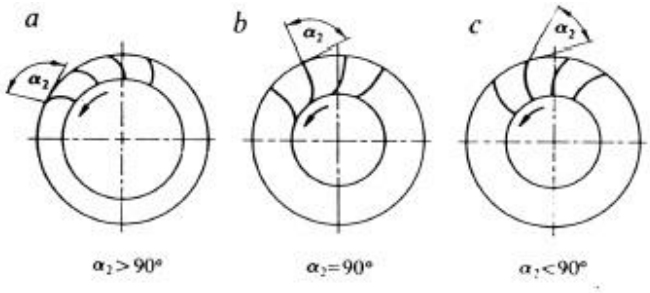
3.2.1. Radijalni ventilator

Radijalni ventilator smješten je u kućište pužnog oblika te se pokreće direktno kopčanim elektromotorima ili prijenosom preko klinastog remenja, slika (3-5). Zrak u ventilator ulazi aksijalno u sredinu kola s jedne ili obje strane, struji kroz kolo ventilatora radijalno te izlazi iz kola (kućišta) u tangencijalnom smjeru.



Slika 3 - 5. Skica radijalnog ventilatora (Vrkljan, 2016)

Nagib lopatica kod radijalnog ventilatora utječe na jakost ventilatora obzirom na tlak koji razvija u smjeru okretanja pod kutom ALFA>90 (manji tlakovi, veći broj lopatica), te pod kutom ALFA<90 (veći tlakovi, manji broj lopatica). (Vrkljan, 2016)

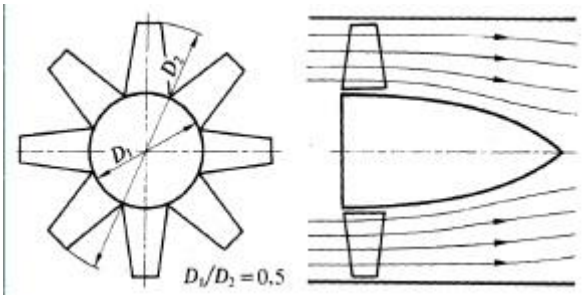


Slika 3 - 6. Nagib lopatica kod radijalnog ventilatora (Vrkljan, 2016)

3.2.2. Aksijalni ventilatori

Aksijalni ventilator pojavio se tek tijekom tridesetih godina prošlog stoljeća. Nedostatak poznavanja strujanja zraka preko aksijalnih lopatica uzrokovao je njegovu kasnu primjenu. Prvi ventilatori imali su ravne lopatice i postizali su slabu učinkovitost. Kao i kod svih vrsta ventilatora, samo ime potječe od smjera glavnog strujanja kroz rotor, slika (3-7). Taj je smjer kod aksijalnih ventilatora duž osi rotacije dok su same lopatice postavljene radijalno. (Vrkljan, 2016)

Broj lopatica kod aksijalnog ventilatora je između 5 i 10. Smjer strujanja moguće je promijeniti pokretanjem smjera vrtnje kola ventilatora pri čemu opada kapacitet.



Slika 3 - 7. Skica aksijalnog ventilatora i smjer strujanja zraka (Vrkljan, 2016)

Gubitci koji nastaju u aksijalnom ventilatoru mogu se podijeliti u dvije skupine:

a) povratni
b) nepovratni

Rotirajući impeler pomoću lopatica prenosi energiju pogona na pokretni zrak. Lopatice rotora izrađene su od čelika. Lopatice rotora mogu imati asimetrični ili simetrični profil. Ovisno o profilu lopatica ovisi i njegova učinkovitost. Na primjer kod aksijalnog ventilatora s lopaticama simetričnih radnih kola njihova učinkovitost se ne mijenja prilikom promjene smjera vrtnje rototra, dok ventilatori s asimetričnim radnim noževima nemaju takvu kvalitetu, njihov učinak se naglo smanjuje kada se okreće smjer vrtnje rotora, ali ti ventilatori imaju dobre aerodinamičke karakteristike i povećanu učinkovitost. (Vsemixfight, 2019)



Slika 3 - 8. Aksijalni ventilator (TLT-turbo,2019)

Životni vijek ventilatora može se produžiti tako da:

a) Kut lopatica može biti različit- noviji ventilatori omogućuju da se kut lopatica mijenja neovisno o tome radi li ventilator ili miruje
b) Kut ulaznih i izlaznih vodećih lopatica može se mijenjati s ili bez izmjena kuta lopatica rotora
c) Nagib rotora može se mijenjati dodavanjem ili uklanjanjem lopatica, ali radno kolo mora ostati u dinamičnoj ravnoteži što može rezultati znatnom uštedom energije
d) Brzina rotora može se mijenjati motorom koji ima promjenjive brzine ili promjenom stupnja prijenosa između motora i vratila ventilatora



Slika 3 - 9. Izrada aksijalnog ventilatora (TLT-turbo,2019)

3.3. Ostali dijelovi ventilacijskog sustava

3.3.1. Pregrade

Pregrade mogu biti izrađene od zidova, betonskih blokova ili vatrootpornih drvenih blokova. Također se mogu koristiti i čelične pregrade. Pregrade bi trebale biti dobro uvučene u krovinu, pod i bočne strane, posebno ako su slojevi slabi. U svim slučajevima, sastavni dijelovi pregrada trebaju biti vatrootporni i ne bi trebali stvarati toksičnost prilikom zagrijavanja (McPherson, 1993).

3.3.2. Regulatori

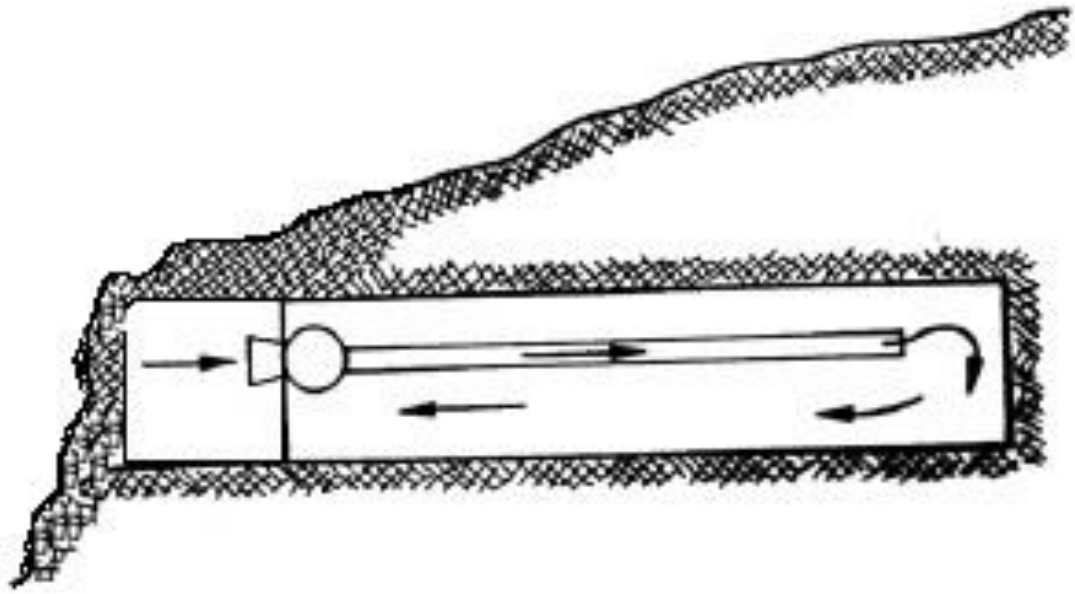
Regulatori su jednostavna vrata s jednim ili više podesivih otvora. Njihova je svrha smanjenje protoka zraka na željenu vrijednost u određenom vjetrenom hodniku ili dijelu rudnika. Najosnovniji regulator je pravokutni otvor koji je urezan u vrata i djelomično zatvoren kliznom pločom. Protok zraka može se mijenjati ručnim podešavanjem položaja klizne ploče. (McPherson, 1993)

3.3.3. Vrata

Ako prostor između usisnog i povratnog vjetrenog puta mora biti zaustavljen koriste se vjetrena vrata. U svom najjednostavnijem obliku to su drvena ili čelična vrata; zglobna kako bi se otvarila prema većem tlaku zraka. Mehanizirana vrata, koja se otvaraju pneumatskim ili električnim putem, posebno su prikladna za prolazak u prometu, te u slučajevima gdje su mrata velika pa je otežanootvaranje ili na mjestu gdje tlak zraka čini ručno otvaranje otežanim. (McPherson, 1993).

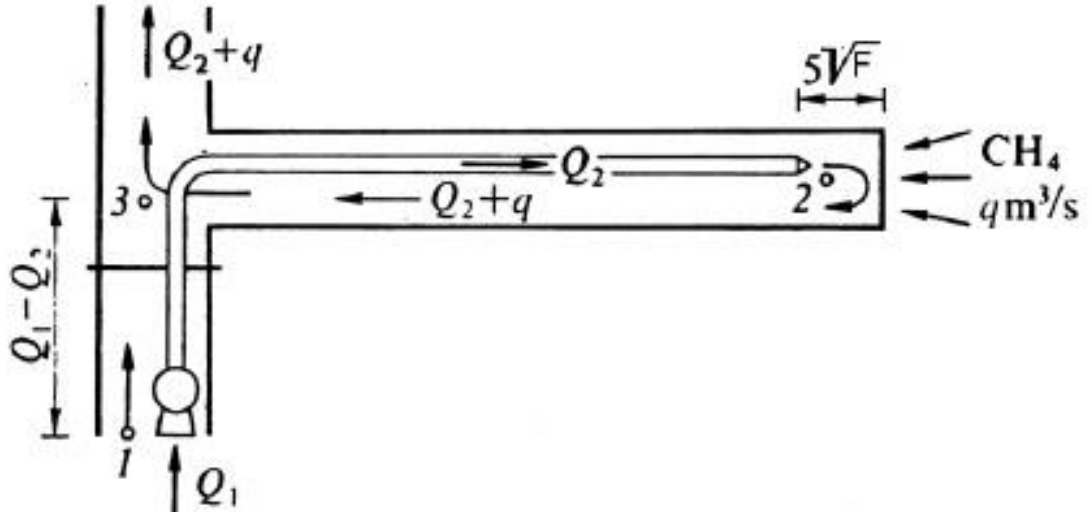
3.4. Separatno vjetrenje

Separatno vjetrenje podrazumijeva vjetrenje slijepih radilišta pomoću zračnih cijevi, slika (3-10). Separatno vjetrenje može se odnositi na vjetrenje slijepih prostorija s površine ili iz jamskih prostorija. S obzirom na način vjetrenja razlikujemo tlačno, usisno i složeno separatno vjetrenje.

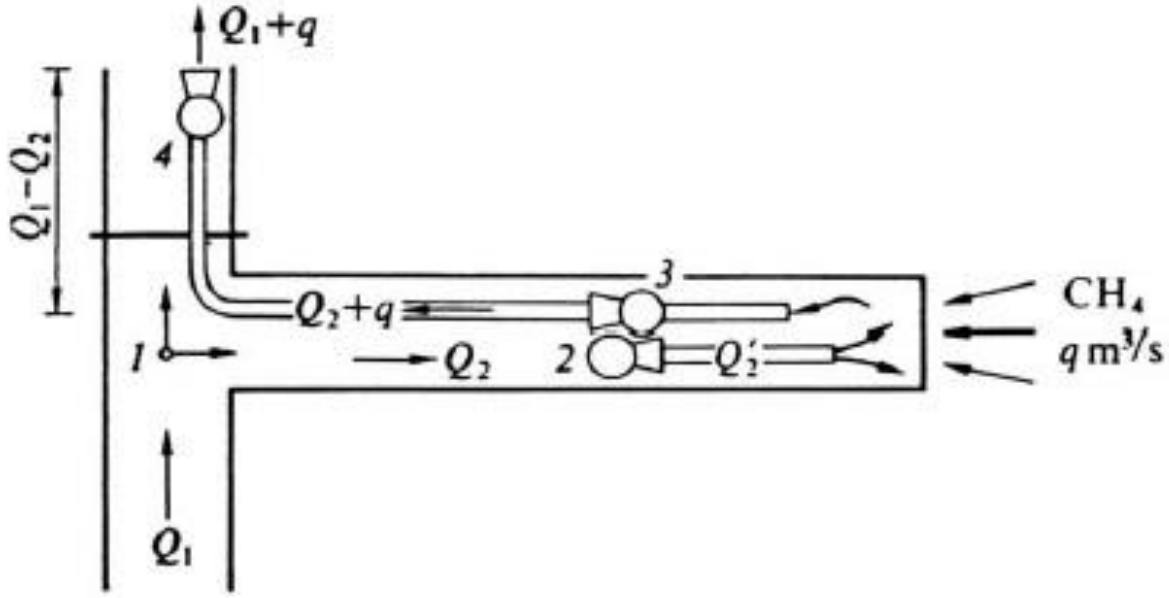


Slika 3 - 10. Shema separatnog vjetrenja (Vrkljan, 2016)

Kod tlačnog separatnog vjetrenja pozicija ventilatora mora biti dovoljno odmaknuta od križišta sa slijepim radilištem radi sprječavanja miješanja istrošene (zagađene) zračne struje sa svježom zračnom strujom, slika (3-11). Cijevi ventilatora usisnog djelovanja nalazi se u izlaznoj zračnoj struji, slika (3-12). Svježa zračna struja vodi se do radilišta kroz hodnik. Prednost ovog vjetrenja je svježi zrak u hodniku, ali ovo vjetrenje ne osigurava potpuno dreniranja radilišta od izlazećeg plina, pa se mogu naći povećane koncentracije plina na čelu radilišta. (Vrkljan, 2016)



Slika 3 -11. Shema tlačne separacije (Vrkljan, 2016)



Slika 3 - **12**. Shema usisnog vjetrenja (Vrkljan, 2016)

3.5. Hardy cross metoda

Hardy-Cross metoda je numerička metoda za izračun protoka i otpora u vjetrenoj mreži pomoću aritmetičke iteracije. Metoda se sastoji od nekoliko koraka rješavanja jednadžbe.

Prva faza je spajanje jednog protoka iz svih grana, tj. pretpostaviti intenzitet protoka s pretpostavljenim smjerom strujanja u vjetrenoj mreži. U drugoj fazi potrebno je odrediti zatvorenu petlju u vjetrenoj mreži u skladu s jednadžbom:

$$N_R = N_B - N_J + 1$$

gdje je:

$N_R -$ broj korisnih petlji

$N_B -$ broj grana u ventilacijskoj mreži

$N_J -$ broj spojeva u ventilacijskoj mreži

U trećoj fazi se radi izračun gubitka tlaka u svakoj petlji.

$$\Delta \mathrm{P} = \mathrm{R} * Q^2$$

Q − stvarni intenzitet protoka (m^3/s)

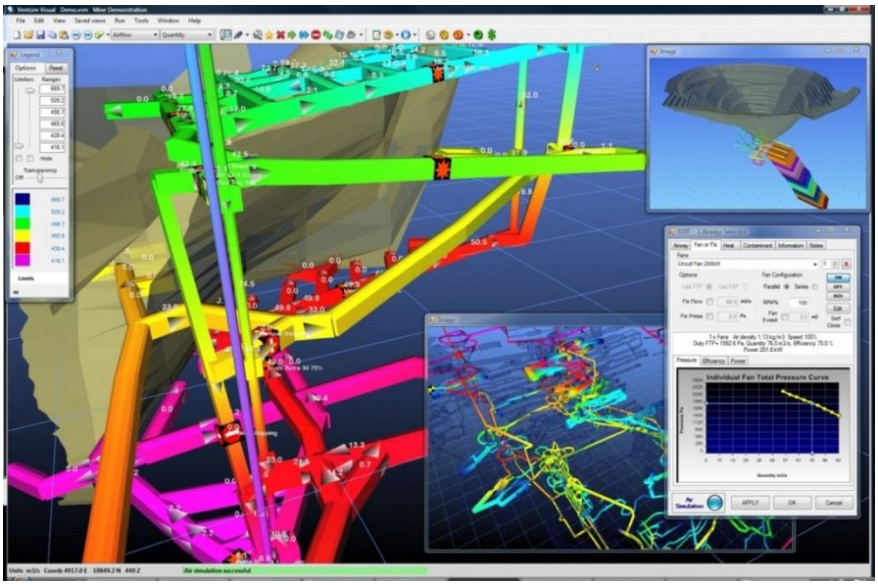
P− gubitak tlaka za svaku granu (mm vode)

R−otpor rudarskih radova u svakoj grani

U četvrtoj fazi se gleda tlak iz proračuna jednadžbe. Ako je riječ o gubitku tlaka onda je znak pozitivan, a u suprotnom slučaju znak je negativan. U petoj fazi radi se izračun novog protoka za svaku granu mreže. Ispravljaju se pogreške te se rade određene korekcije ukoliko su potrebne i gleda se vrijednost novog protoka u grani te se mijenja predznak. Šesta faza nam služi da ponavljamo operacije od treće do pete faze sve dok pogreška ne bude manja ili jednaka potrebnoj točnosti (Sereshki F., Elaih E., Saffari A., 2016).

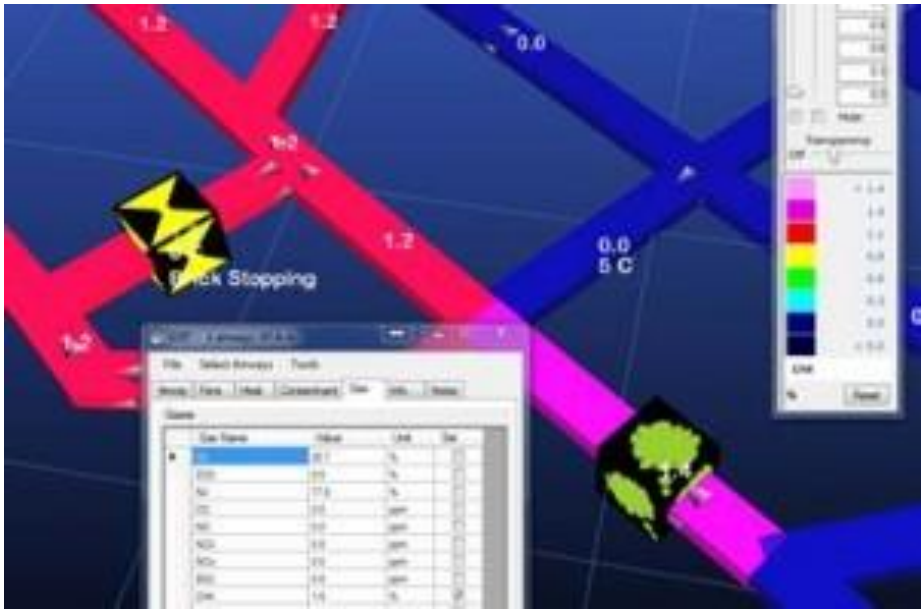
3.6. Program VENTSIM

Kao program za izradu vjetrene mreže korišten je Ventsim lite. Ovo je edukacijska verzija koja se temelji na prikazu vjetrene mreže u 3D. Program može simulirati protoke i uključuje dinamičnu animiranu 3D grafiku koja prikazuje stvarne dimenzije i oblike vjetrenih hodnika zajedno s animiranim protocima zraka, slika (3-13).

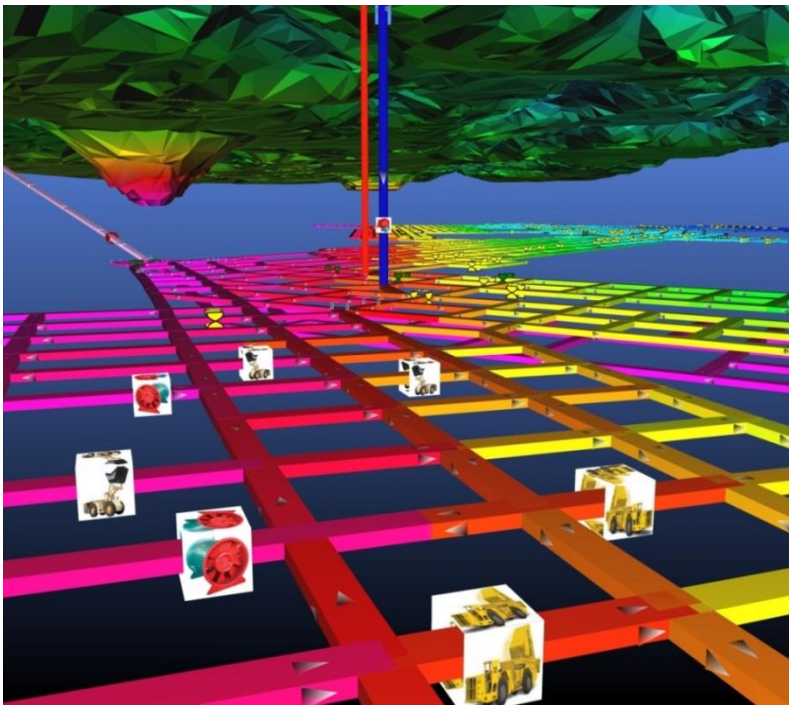


Slika 3 - 13. Vjetreni hodnici i protoci zraka (Ventsim, 2019)

Boje pokazuju preko 30 različitih vrsta podataka, uključujući protok zraka, brzine, različite pritiske i troškove. Uz to, prikazana je i pojava radiokativnosti, širenja onečišćenja koja pomažu predvidjeti stalan protok plinova, prašine i dima, slike (3-14) i (3-15).

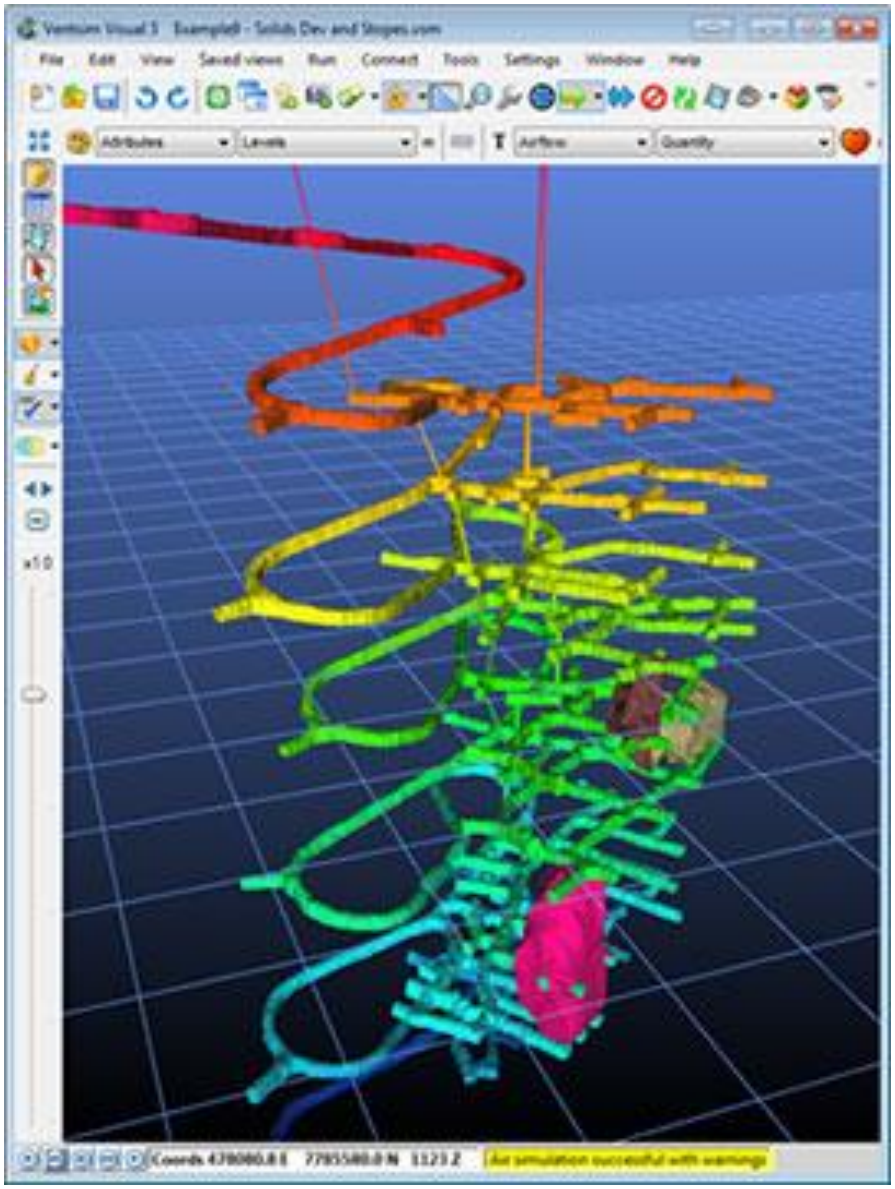


Slika 3 - 14. Koncentracija plina u vjetrenoj mreži (Ventsim, 2019)



Slika 3 - 15. Prikaz određenih vrsta podataka pomoću boja (Ventsim, 2019)

U programu se protoci zraka kreću u stvarnom vremenu kroz mrežu, a veličine puteva se mogu mijenjati. Broj mrežnih puteba koji se mogu nacrtati u programu je neograničen. Brzina ventilatora je promjenjiva te ju je moguće preokrenuti sa smanjenim učinkom za simulaciju u hitnim slučajevima.

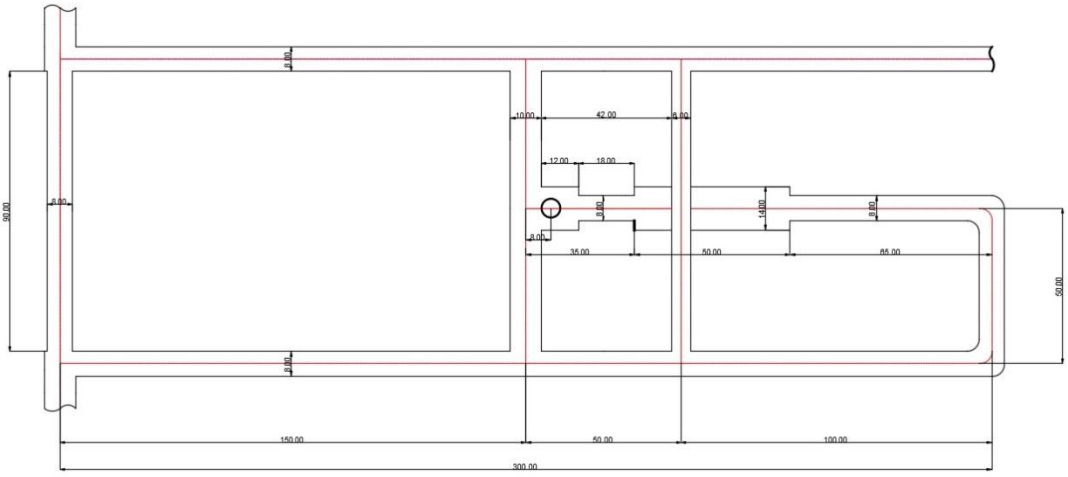


Slika 3 - 16. Prikaz modela rudnika (Ventsim, 2019)

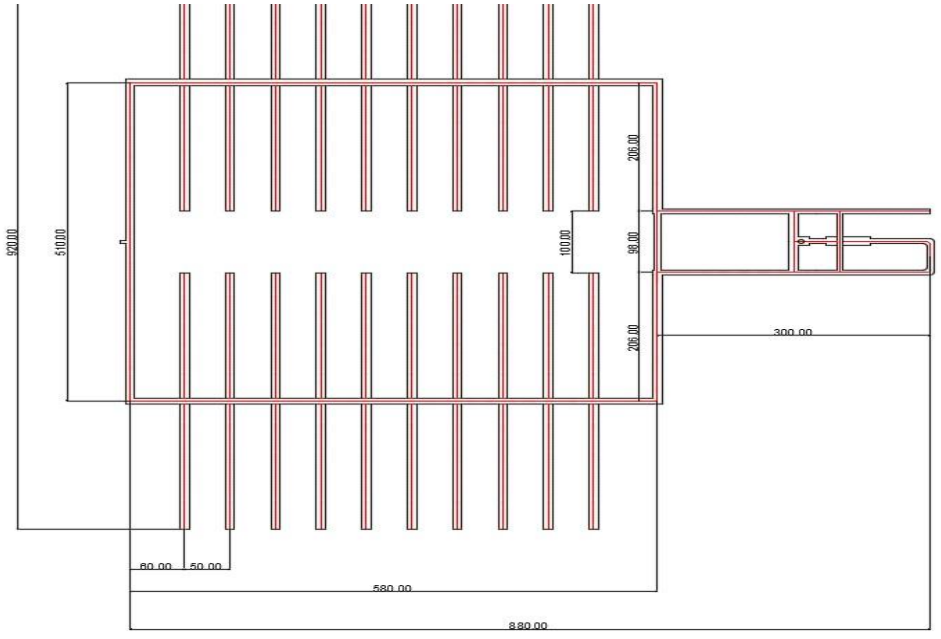
4. PRORAČUN VJETRENE MREŽE TIPSKOG ODLAGALIŠTA VRAO i ING

4.1. Izrada u programu Ventsim

Za crtanje vjetrene mreže potrebno je poznavati dimenzije odlagališta (hodnika, okna) koje smo odredili prilikom izrade odlagališta u programu AutoCad što je vidljivo na slikama (4-1) i (4-2). Odlagalište se sastoji od dva vjetrena okna (ulazno i izlazno) te dva glavna hodnika. Svaki od glavnih hodnika razgranat je na još dvadeset odnosno četrdeset hodnika, a koji su podijeljeni na deset sa svake strane glavnog hodnika.

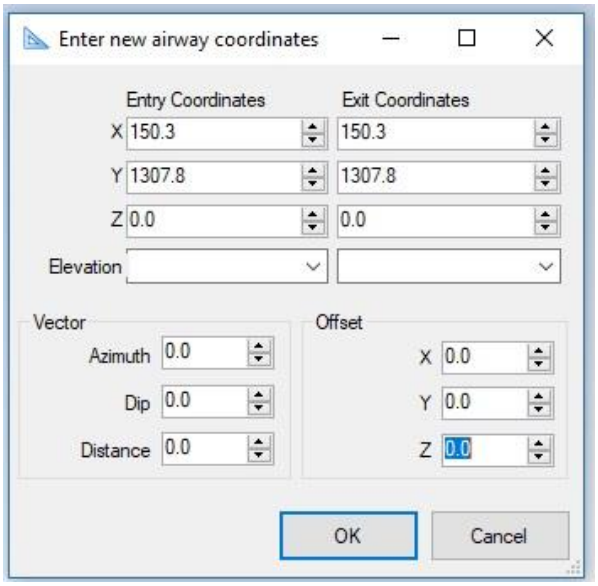


Slike 4 - 1. Dimenzije odlagališta



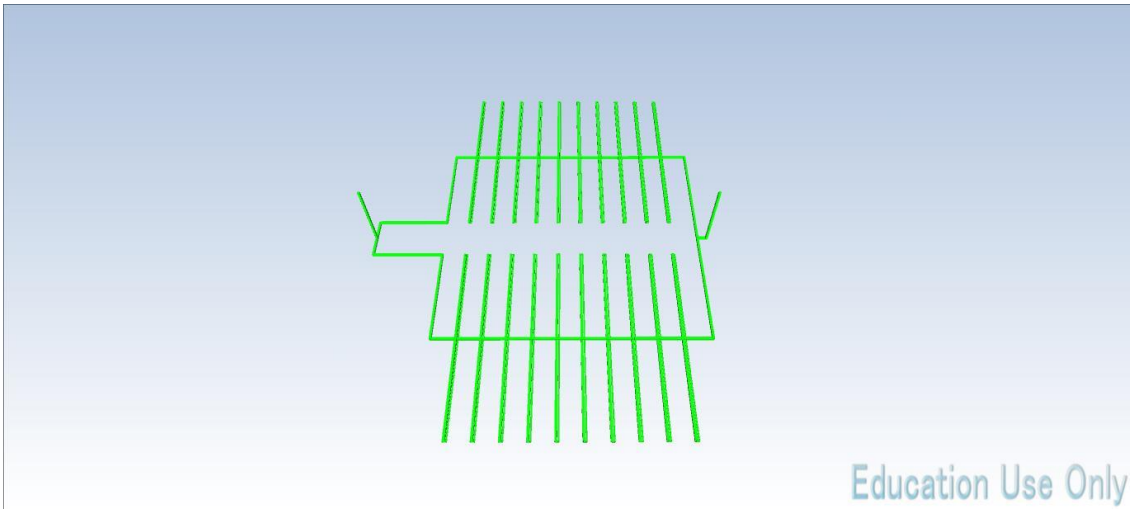
Slike 4 - 2. Dimenzije odlagališta

Nakon dimenzioniranja odlagališta može se početi crtati vjetrena mreža u programu Ventsim. Za crtanje vjetrene mreže koristi se naredba „Draw airways“, zatim se stisne bilo gdje na ekranu dok se ne otvori prozor za unošenje koordinata i crtanje vjetrenih puteva koji je prikazan na slici (4-3.).



Slike 4 - 3. Prozor za unošenje koordinata

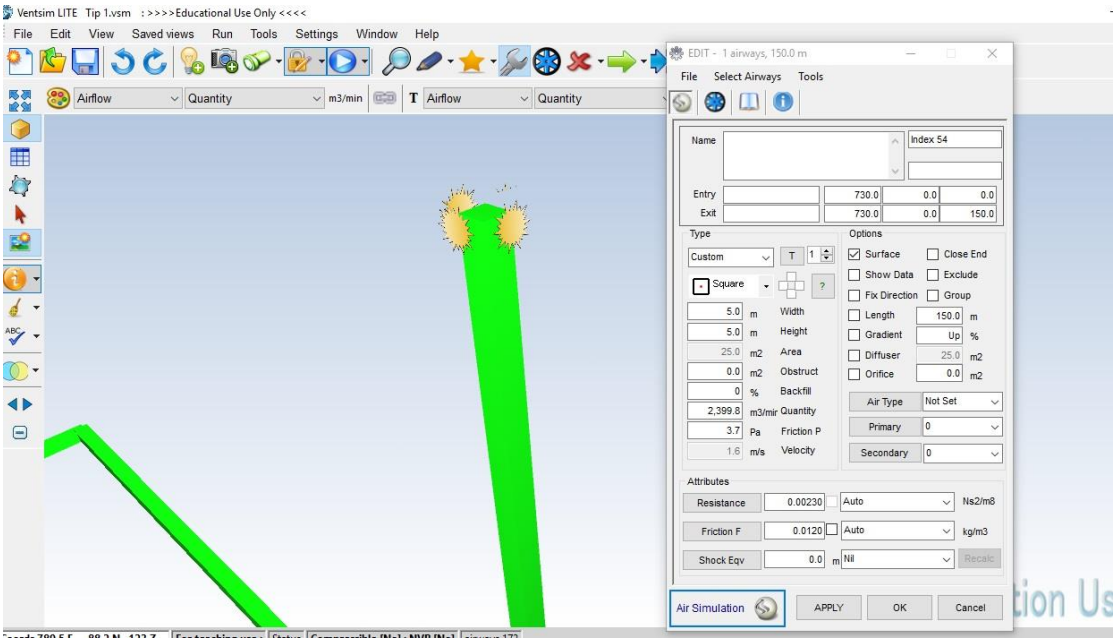
Za svaki vjetreni put iznova upisujemo koordinate te nastaje vjetrena mreža koja je prikazana na slici (4-4).



Slike 4 - 4. Vjetrena mreža

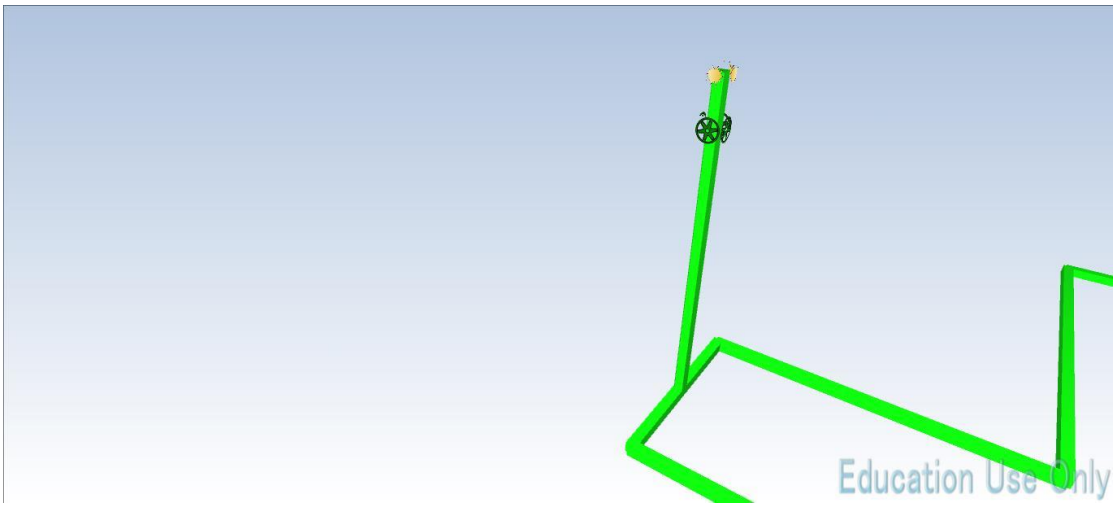
Nakon crtanja vjetrene mreže koristi se naredba „Edit airways“ te se stisne na jedno okno kako bi se otvorio prozor prikazan na slici (4-5). Nakon što se otvori prozor na njemu se označi kvadratić ispred riječi „Surface“ pod izbornikom „Options“ kako bi

u programu definirali gdje izlazi okno. Nakon što se to napravi s jednim oknom, ponovimo sve i sa drugim te kad se izađe iz prozora na vrhu okna pojavi nam se oznaka u obliku sunca.



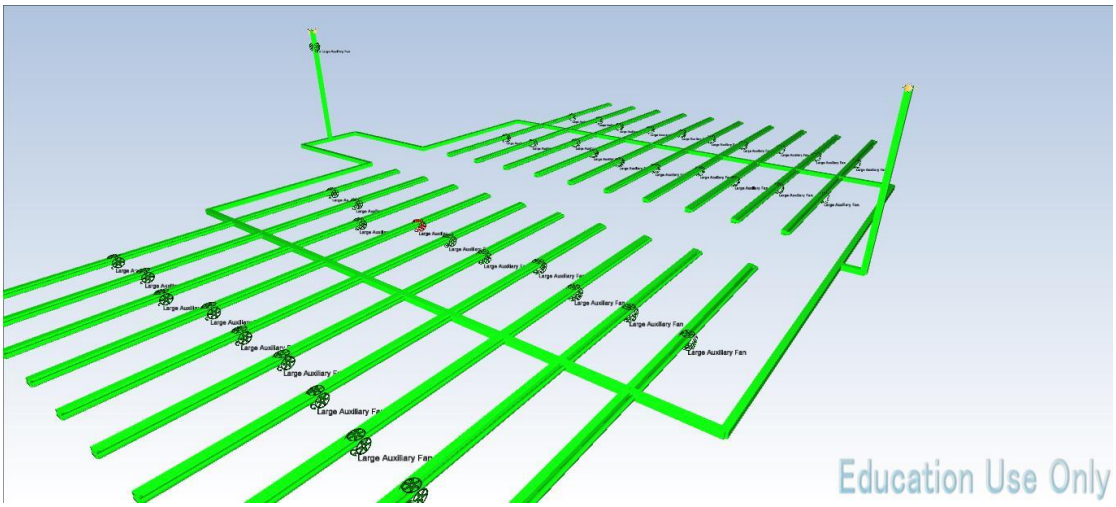
Slike 4 - 5. Definiranje okna

Poslije definiranja okna, na ulazno okno stavljamo glavni ventilator koji će definirati protok svježe zračne struje u odlagalištu, slika (4-6).



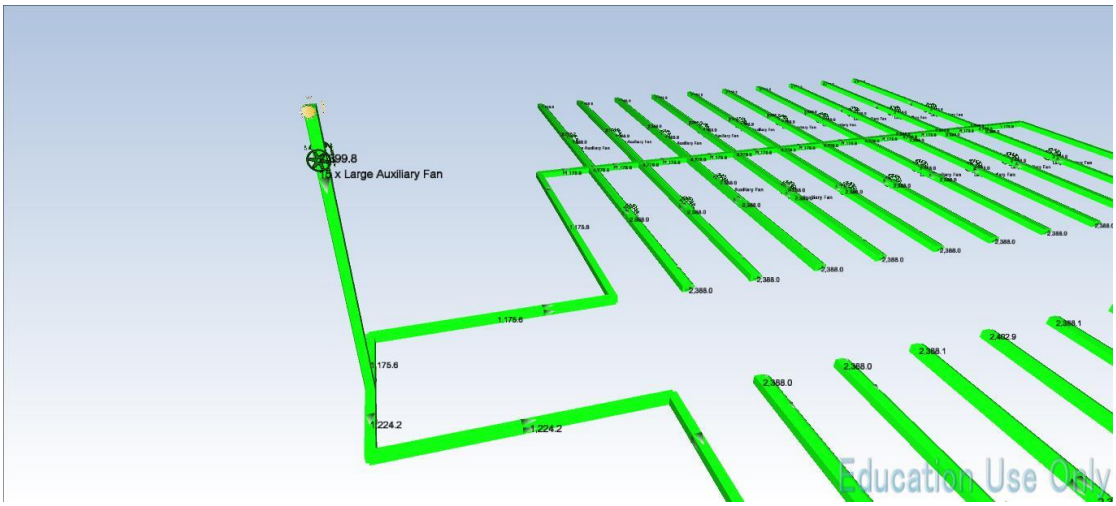
Slike 4 - 6. Glavni ventilator na ulaznom oknu

Osim glavog ventilatora postavljaju se i zrakovodi u svaki hodnik za odlaganje otpada kako bi poboljšali provjetravanje hodnika i odvod zagađenog zraka, slika (4-7).

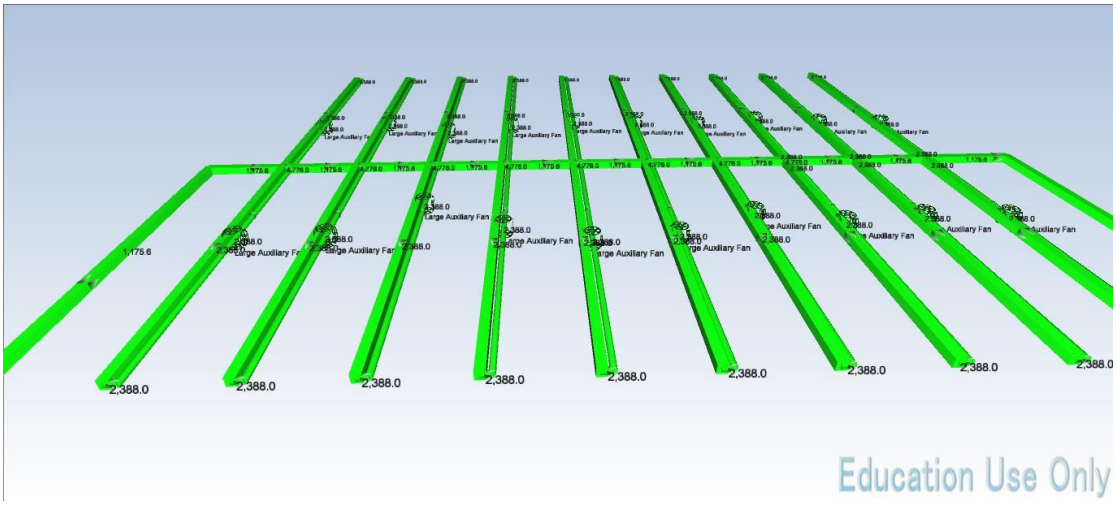


Slike 4 - 7. Pomoćni ventilatori u vjetrenoj mreži

Kad smo postavili sve ventilatore i odredili smjer zračne struje koji je označen sa strelicama, stisnemo na simulaciju kako bi program izračunao protoke u granama vjetrene mreže što je vidljivo na slikama (4-8) i (4-9).

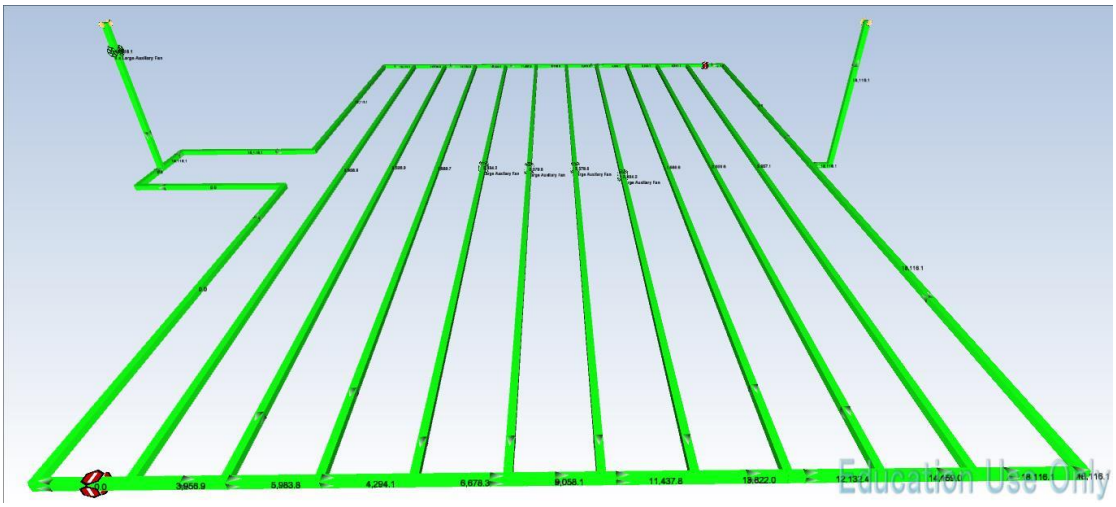


Slike 4 - 8. Vjetrena mreža sa izračunatim protocima



Slike 4 - 9. Vjetrena mreža sa izračunatim protocima

Osim ovog odlagališta za simulaciju vjetrene mreže napravili smo i drugi tip odlagališta koji ima sve dimenzije iste kao i ovaj. Jedina razlika jesu hodnici u kojima se vrši odlaganje postavljeno između dva glavna hodnika. Zračna struja kod ovog tipa odlagališta ulazi na jednu stranu, a izlazi na drugu što je vidljivo na slici (4-10). Kod ovog tipa odlagališta koristili smo pregrade kako bi usmjerili zračnu struju da ide samo kroz određene hodnike koje smo mi odredili. Osim toga na četiri srednja hodnika smo stavili pomoćne ventilatore kako bi postigli veći protok svježe zračne struje.



Slike 4 - 10. Drugi tip odlagališta

4.2. Proračun i simulacija

Ventsim za proračun protoka zraka u vjetrenoj mreži koristi Hardy cross metodu koja je opisana u trećem poglavlju. Za prvi tip odlagališta u tablici (4-1) je prikazan protok u ulaznom i izlaznom vjetrenom oknu. U tablici (4-2) prikazan je protok zraka u glavnim hodnicima koji se dijele na lijevi i desni.

Tablica 4 - 1. Protok zraka u ulazno i izlaznom vjetrenom oknu

Broj hodnika	Ime hodnika	Protok zraka m^3/min
77	Ulazno okno	2399.8
91	Izlazno okno	2399.8

Tablica 4 - 2. Protok zraka u glavnim hodnicima

Broj hodnika	Ime hodnika	Protok zraka m^3/min
6	Glavni hodnik L	1224.2
7	Glavni hodnik D	1224.2
41	Glavni hodnik L	1175.6
42	Glavni hodnik L	1175.6
43	Glavni hodnik L	1175.6
44	Glavni hodnik L	1175.6
47	Glavni hodnik L	1175.6
50	Glavni hodnik L	1175.6
53	Glavni hodnik L	1175.6
56	Glavni hodnik L	1175.6
59	Glavni hodnik L	1175.6
62	Glavni hodnik L	1175.6
65	Glavni hodnik L	1175.6
68	Glavni hodnik L	1175.6
254	Glavni hodnik L	1175.6
257	Glavni hodnik D	1224.2
75	Glavni hodnik L	1175.6
279	Glavni hodnik D	1224.2
283	Glavni hodnik D	1224.2
291	Glavni hodnik D	1224.2
293	Glavni hodnik D	1224.2
306	Glavni hodnik D	1224.2
308	Glavni hodnik D	1224.2
312	Glavni hodnik D	1224.2
317	Glavni hodnik D	1224.2
318	Glavni hodnik D	1224.2
322	Glavni hodnik D	1224.2
325	Glavni hodnik D	1224.2
72	Glavni hodnik L	1175.6
8	Glavni hodnik D	1224.2

U tablici (4-3) prikazan je protok zraka u hodnicima za odlaganje otpada koji su isto podjeljeni na lijevi i desni u glavnim hodnicima.

Tablica 4 - 3. Protok zraka u hodnicima za odlaganje otpada

Broj hodnika	Ime hodnika desni	Protok zraka m^3/min	Broj hodnika	Ime hodnika lijevi	Protok zraka m^3/min
258	D1L	2388	45	L1D	2388
274	D1D	2388	46	L1L	2388
280	D2L	2388	48	L2D	2388
301	D2D	2388	49	L2L	2388
17	D3L	2388.1	51	L3D	2388
18	D3D	2388.1	52	L3L	2388
20	D4L	1048.8	54	L4D	2388
21	D4D	1048.8	55	L4L	2388
23	D5L	2388.1	57	L5D	2388
24	D5D	2388.1	58	L5L	2388
26	D6L	2388.1	60	L6D	2388
27	D6D	2388.1	61	L6L	2388
29	D7L	2388.1	63	L7D	2388
30	D7D	2388.1	64	L7L	2388
32	D8L	2388.1	67	L8L	2388
33	D8D	2388.1	66	L8D	2388
35	D9L	2388.1	69	L9D	2388
36	D9D	2388.1	71	L9L	2388
38	D10L	2388.1	73	L10D	2388
39	D10D	2388.1	74	L10L	2388

Kod drugog tipa odlagališta možemo vidjeti veći protok zraka u odnosu na prvi tip odlagališta. Razlog tomu jest taj što se vjetrena struja ne dijeli na dva glavna hodnika već ide kroz jedan, zatim prolazi kroz hodnike za odlaganje i prolazi kroz drugi van. Osim toga protok zraka na ulazu u prvi hodnik za odlaganje i na ulazu u zadnji razlikuje se gotovo za 14000 m^3/min. U tablici (4-4) prikazan je protok zraka na ulazno i izlaznom vjetrenom oknu.

Tablica 4 - 4. Protok zraka u ulazno i izlaznom vjetrenom oknu

Broj hodnika	Ime hodnika	Protok zraka m^3/min
45	Izlazno okno	18139
46	Ulazno okno	18139

U tablicama (4-5) i (4-6) prikazani su protoci zraka u glavnim hodnicima i u hodnicima za odlaganje otpada. Možemo vidjeti da neki dijelovi glavnog hodnika imaju protok zraka 0 m^3/min zbog toga što su ti hodnici zatvoreni vratima kako ne bi bilo strujanja zraka kroz njih i kako bi smjer strujanja bio kroz hodnike za odlaganje.

Tablica 4 - 5. Protok zraka u glavnim hodnicima

Broj hodnika	Ime hodnika	Protok zraka m^3/min
74	Glavni hodnik L	0
1	Glavni hodnik D	0
2	Glavni hodnik D	18139
4	Glavni hodnik D	18139
7	Glavni hodnik D	0
10	Glavni hodnik D	18139
12	Glavni hodnik D	18139
42	Glavni hodnik D	18139
43	Glavni hodnik D	0
50	Glavni hodnik D	0
51	Glavni hodnik D	3962.8
52	Glavni hodnik D	5993.7
53	Glavni hodnik D	4305.6
54	Glavni hodnik D	6689.7
55	Glavni hodnik D	9069.5
56	Glavni hodnik D	11449.3
57	Glavni hodnik D	13833.4
58	Glavni hodnik D	12145.3
59	Glavni hodnik D	14176.2
60	Glavni hodnik D	18139
63	Glavni hodnik D	14176.2
64	Glavni hodnik D	12145.3
65	Glavni hodnik D	13833.4
66	Glavni hodnik D	11449.2
67	Glavni hodnik D	9069.5
68	Glavni hodnik D	6689.7
69	Glavni hodnik D	4305.6
70	Glavni hodnik D	5993.6
71	Glavni hodnik D	3962.8
72	Glavni hodnik D	0

Tablica 4 - 6. Protok zraka u hodnicima za odlaganje otpada

Broj hodnika	Ime hodnika	Protok zraka m^3/min
48	Hodnik 1	3962.8
16	Hodnik 2	2030.9
19	Hodnik 3	1688.1
22	Hodnik 4	2384.2
25	Hodnik 5	2379.8
28	Hodnik 6	2379.8
31	Hodnik 7	2384.2
34	Hodnik 8	1688.1
37	Hodnik 9	2030.9
40	Hodnik 10	3962.8

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je opisano duboko geološko odlagalište radioaktivnog otpada i načini vjetrenja podzemnih odlagališta te je izrađen proračun vjetrene mreže u programu Ventsim.

Opisane su vrste otpada koji se odlaže u duboka geološka odlagališta (VRAO i ING) i ostale vrste radioaktivnog otpada, a to su: NASRO i SRAO. Odlagališta se projektiraju na 100 000 do 1 000 000 godina jer se smatra da će u tom vremenu aktivnost VRAO i ING pasti na razinu uranijeve rude. Duboka geološka odlagališta se projektiraju na dubinama od 400 do 1000 m, u dobrim geološkim sredinama (slabopropusne magmatske, sedimentne ili metamorfne stijene), te se za odlaganje otpada koriste spremnici od (npr. čelika, bakra) i materijali koji služe kao ispune između spremnika i stijene (bentonitna glina) koji su dodatna barijera koja će sama po sebi usporiti transport radionuklida prema površini. Kao primjer dobrog koncepta dubokog geološkog odlagališta naveli smo švedski koncept KBS-3V gdje se otpad odlaže u vertikalne bušotine.

Prilikom izrade vjetrene mreže mora se osigurati dovod svježe zračne struje na mjesto odlaganja (radilište), osigurati dobro provjetravanje kako bi smanjili količine opasnih i radioaktivnih plinova, te osigurati klimu pogodnu za rad. Onečišćena vjetrena struja ne smije ići preko ljudi. Opisani su dijelovi ventilacijskog sustava, a to su: ventilatori, pregrade i brtve, regulatori, zračni prilazi te vrata. Osim toga opisan je način separatnog vjetrenja koji se korisiti kod prvog tipa odlagališta za koji se projektirala vjetrena mreža.

Program koji je korišten za proračun vjetrene mreže je Ventsim. Za proračun vjetrene mreže program koristi Hardy cross metodu. Proračun i simulaciju vjetrene mreže napravita je za dva tipa odlagališta, gdje se u jednom vjetrena struja dijeli na dva glavna hodnika, te se pomoću separatnog vjetrenja vjetre hodnici u kojima se odlaže otpad i drugi tip u kojem vjetrena struja idem kroz jedan hodnik te prolazi kroz odlagalište i završava na drugom hodniku te izlazi van na izlaznom vjetrenom oknu. Proračun je pokazao kako se kod dugog tipa odlagališta postiže veći protok zraka u odnosu na prvi tip odlagališta uz iste parametre kod jednoga i drugoga.

6. LITERATURA:

ALEXANDER, W.R., MCKINLEY, L.E., 2006. Deep geological disposal of radioactive waste. Švicarska: Elsevier

BALDWIN, T., CHAPMAN, N. I NEALL, F., 2008. Geological Disposal Options for

High-Level Waste and Spent Fuel.,

Ujedninjeno Kraljevstvo: Nuclear Decommissioning Authority

CHAPMAN N., 2008. The Concept of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes. IAEA, Švicarska: ITC School

IAEA 2009. Classification of Radioactive Waste. General safety guide. Vienna. Austria.

KUJUNDŽIĆ, T., KORMAN, T., MACENIĆ, M., 2012. Sadašnje spoznaje o bušenju bušotina velikog promjera za odlaganje otpada visokog stupnja radioaktivnosti i istrošenog nuklearnog goriva. , Zagreb: Rudarsko- geološko- naftni fakultet.

LEVANAT, I., 1997. Odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada. Zagreb:APO.

MCPHERSON, M., 1993. Subsurface Ventilation Engineering. University of Nottingham, England

VRKLJAN, D., 2016. Separatna ventilacija. Prezentacija. Zagreb: Rudarsko-geološko- naftni fakultet.

VRKLJAN, D., 2016. Sistemi ventilacije. Prezentacija. Zagreb: Rudarsko- geološko-naftni fakultet.

WWW IZVORI:

ABRAMOVIĆ V., MARUŠIĆ R., TEPLY E., 2019. Rudarstvo, vjetrenje rudnika. URL:

http://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/rudarstvo_vjetrenje_rudnika.pdf (17.8.2019)

FAIRLEY, P., 2007. Nuclear Wasteland. URL:

https://spectrum.ieee.org/energy/nuclear/nuclear-wasteland (12.7.2019)

FOND-NEK, 2019. Kako se zbrinjava istrošeno nuklearno gorivo? URL:

http://www.fond-nek.hr/hr/pitanje/3.-kako-se-zbrinjava-istroseno-nuklearno-gorivo-7 (16.7.2019)

HRVATSKA ENCIKLOPEDIJA, 2019. Radioaktivni otpad. URL:

http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=51471# (11.7.2019)

MIRION TECHNOLOGIES, 2015. Types of ionizing radiation. URL:

https://www.mirion.com/learning-center/radiation-safety-basics/types-of-ionizing-radiation (21.8.2019)

MUNIER, R., 2008. Slip on repository rock fractures induced by large earthquakes. Results from dynamic discrete fracture modeling. URL:

https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-the-KBS-3-concept_fig1_254542387 (16.7.2019)

POSLOVNI GLOBAL, 2015. BiH će moći izraziti dvojbe bude li Trgovska gora odabrana za odlaganje radioaktivnog otpada. URL:

https://poslovni-global.ba/coric-bih-ce-moci-izraziti-dvojbe-bude-li-trgovska-gora-odabrana-za-odlaganje-radioaktivnog-otpada/ (12.7.2019)

RAOS, N., 2016., Demokratski deficit URL:

https://zg-magazin.com.hr/demokratski-deficit/ (10.6.2019)

SERESHKI F., ELAIH E., SAFFARI A., 2016. International Journal of Mining Science. Comparison of Mathematical Approximation Methods for Mine Ventilation Network Analysis. URL:
https://pdfs.semanticscholar.org/1702/0a4329c16e5b1b1b464f170b9788294c1570.pdf (21.8.2019.)

ŠUŠAK, M., 2019. Radioaktivnost. URL:

https://ldap.zvu.hr/~msusak/Zracenje%20i%20radioaktivnost_web_objava.pdf

(16.7.2019)

THE MAINICHI, 2016. KEPCO begins to insert nuclear fuel into No. 4 reactor at Takahama plant. URL:

https://mainichi.jp/english/articles/20160201/p2a/00m/0na/018000c (16.7.2019)

TLT-TURBO, 2017. Mining Auxiliary Fans. URL:

https://www.tlt-turbo.com/TLT/wp-content/uploads/TLT-MechCaL-Brochure-Mining-Auxiliary-Fans-EN.pdf (20.8.2019)

VENTSIM, 2019. 3D Mine Ventilation Simulation Software. URL:

https://ventsim.com/ventsim-lite/ (23.5.2019)

VSEMIXFIGHT, 2019. Glavni ventilatori za ventilaciju. URL:

https://vsemixfight.ru/hr/poleznye-sovety/shahtnye-ventilyatory-glavnogo-provetrivaniya-osobennosti-raboty-shahtnyh.html (20.8.2019)

ZBRINJAVANJE RADIO AKTIVNOG OTPADA, 2019. Skladištenje ING-a i VRAO-a. URL:

https://radioaktivniotpad.org/skladistenje-ing-a-i-vrao-a/ (11.7.2019)

ZBRINJAVANJE RADIO AKTIVNOG OTPADA, 2019. Odlaganje VRAO- a. URL:

https://radioaktivniotpad.org/odlaganje-vrao-a/ (11.7.2019)

ZBRINJAVANJE RADIO AKTIVNOG OTPADA, 2019. Klasifikacija radioaktivnog otpada. URL:

https://radioaktivniotpad.org/klasifikacija-radioaktivnog-otpada/ (11.7.2019)

WANG J., CHEN L.,SU R., ZHAO X., 2018. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests, 10 (3), str. 411-435. URL:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775518300246 (21.8.2019)