Dr Slobodan Vukićević,
profesor, dipl. inž.

Mr Slobodan Cvetić,
dipl. inž.
Saobraćajni fakultet,
Beograd

OPTIMIZACIJA PODZEMNIH SKLADIŠTA UBOJNIH SREDSTAVA

UDC: 623.483.001.573

Rezime:

Podzemna skladišta predstavljaju jednu od realnih i često primenjivanih varijanti pri čuvanju ubojnih sredstava. S obzirom na relativno velika investiciona sredstva koja je neophodno izdvojiti za njihovu izgradnju, problemima njihovog projektovanja treba posvetiti značajnu pažnju. U radu je prikazan postupak koji obezbeđuje izbor optimalne konfiguracije ovih skladišta.

Ključne reči: tehnološko projektovanje, ubojna sredstva, podzemna skladišta.

OPTIMIZATION OF UNDERGROUND WAREHOUSE FOR MUNITIONS

Summary:

Underground warehouses are one of the actual and frequently applied alternatives for munitions storage. Relatively great investment are necessary for establish underground warehouse. From that reason optimization of underground warehouse for munition is one of the most important tasks. In this paper model for underground munitions warehouse optimization has been investigated.

Key words: technological design, munitions, underground warehouse.

Uvod

Motivi koji dovode do građenja podzemnih objekata za smeštaj opasnih materija klase 1, po pravilu su povezani sa bezbednošću uskladištenog materijala, ili objekata u okruženju skladišnog kompleksa. Podzemni skladišni objekti veoma su otporni na napade iz vazdušnog prostora a pored toga pružaju znatno bolje uslove za fizičko obezbeđenje od ostalih tipova objekata za smeštaj sličnih materija. Eventualne eksplozije u njima ne dovode do značajnijeg ugrožavanja objekata u okruženju, pa čak ni onih koji se nalaze u neposrednoj blizini skladišta.

Međutim, građenje podzemnih skladišta povezano je sa izdvajanjem relativno velikih investicionih sredstava, što uz činjenicu da se radi o objektima koji nisu pogodni za kasnije rekonstrukcije, u prvi plan nameće potrebu za preciznim projektovanjem koje treba da obezbedi:

- poštovanje svih bezbednosnih aspekata čuvanja opasnih materija,
- definisanje adekvatne tehnologije svih procesa u objektu,
- optimalno iskorišćenje lokacije na kojoj se planira izgradnja, i
- minimizaciju investicione sume.

Ovako postavljen problem praktično dovodi do potrebe za delovanjem u četiri osnovne oblasti, u okviru kojih se, definisanjem parcijalnih rešenja i njihovim kombinovanjem, stvaraju uslovi za dobijanje konačnog optimalnog rešenja:

— *oblast bezbednosti* u okviru koje se preciziraju sva potrebna bezbednosna rastojanja i ostali zahtevi koje je neophodno poštovati sa ciljem da se spreči ugrožavanje uskladištenog sadržaja, kao i ugrožavanje objekata u okruženju skladišnog kompleksa;

— *oblast definisanja građevinskih rešenja* u okviru koje se daju osnovni uslovi koje je neophodno poštovati pri građevinskom planiranju skladišnog kompleksa;

— *oblast definisanja tehnoloških rešenja*, u okviru koje se vrši izbor sredstava i postupaka koji će biti primenjivani pri manipulaciji i čuvanju opasnih materija. Kao posledica izabranih elemenata pojavljuju se i zahtevi za minimalnim dimenzijama pojedinih elemenata skladišnog sistema, kao uslova za primenjivanje tehnologija;

— *oblast optimizacije* u okviru koje se definišu konačna rešenja kroz određivanje veličina pojedinih skladišnih objekata, njihovog broja i konkretnog položaja na lokaciji.

Bezbednosni aspekt skladištenja ubojnih sredstava u podzemnim objektima

Ubojna sredstva se, u zavisnosti od vrste opasnosti koja je dominantna u trenutku eventualne eksplozije, dele na pet osnovnih grupa:

— klasa 1.1. — opasne materije koje detoniraju u masi, sa osnovnom opasnošću od vazdušnog udarnog talasa,

— klasa 1.2. — opasne materije koje ne detoniraju u masi, sa osnovnom opasnošću od razleta fragmenata,

— klasa 1.3. — opasne materije sa osnovnom opasnošću od požarnog dejstva,

— klasa 1.4. — opasne materije koje ne predstavljaju veću opasnost (osnovna opasnost od umerenog požara),

— klasa 1.5. — opasne materije koje detoniraju u masi, sa osnovnom opasnošću od vazdušnog udarnog talasa, uz veoma otežano iniciranje.

Pri smeštanju ovih materija u podzemne objekte treba voditi računa o činjenici da su oni izuzetno pogodni za klase 1.1, 1.2, 1.4 i 1.5, a da nisu pogodni za materije iz klase 1.3 zbog značajne mogućnosti prenošenja požara iz jednog skladišnog objekta u drugi.

Bezbednost uskladištenog materijala i objekata u okruženju skladišnog kompleksa postiže se, u osnovi, definisanjem minimalnog rastojanja koje je potrebno ostvariti između dva skladišna objekta, ukoliko se od incidenta u jednom skladišnom objektu želi zaštititi sadržaj u susednom skladišnom objektu, i između skladišnih objekata i objekata u okruženju, ukoliko se želi zaštititi objekat u okruženju.

Minimalno bezbednosno rastojanje koje je potrebno ostvariti između dva skladišna objekta, sa ciljem da se spreči prenos eksplozije sa jednog na drugi, ali uz moguće oštećenje materijala u susednom objektu preko udara rasprsnutog kamenja, izračunava se prema formuli:

$$d^* = c_0^* \cdot \sqrt[3]{Q} \quad (1)$$

Bezbednosno rastojanje koje se zahteva radi sprečavanja oštećenja uskladištenog materijala u susednom objektu, određuje se prema sledećoj formuli:

$$d = c_0 \cdot \sqrt[3]{Q} \quad (2)$$

gde je:

d^*, d — minimalno bezbednosno rastojanje u metrima,

c^*_0, c_c — koeficijent za proračun rastojanja, sa sledećim vrednostima

$$c^*_0 = 0,6$$

$c_0 = 1,4$ — za objekte izrađene u pesku, šljunku i vlažnoj glini;

$c_0 = 1,72$ — za meku stenu;

$c_0 = 2$ — za tvrdnu stenu,

Q — količina čistog eksploziva u kilogramima.

Objekti u okruženju skladišnog kompleksa mogu biti ugroženi od dejstva eksplozije u nekom od skladišnih objekata:

- tektonskim efektima,
- vazdušnim udarnim talasom,
- parčadnim dejstvom.

Intenzitet i mogućnost pojavljivanja nekog od ovih dejstava direktno je povezana sa dubinom na kojoj se nalazi konkretan skladišni objekat (slika 1).

Sl. 1 — Dejstva eksplozije prema debljini sloja iznad skladišnog objekta

Minimalna dubina na kojoj se mora nalaziti objekat da bi se tretirao kao podzemni, izračunava se prema formuli:

$$a_v = c_v \cdot \sqrt[3]{Q} \quad (3)$$

Kritična dubina koja obezbeđuje da uticaj od parčadnog dejstva i dej-

stva vazdušnog udarnog talasa bude eliminisan, dobija se na osnovu izraza:

$$a_n = c_n \cdot \sqrt[3]{Q} \quad (4)$$

gde je:

a_v, a_n — debljina nadsloja iznad skladišnog objekta u metrima,

c_v, c_n — koeficijent za proračun debljine nadsloja ($c_v = 0,2$; $c_n = 1,4$).

Smatra se da je objekat u okruženju bezbedan od tektonskih efekata, ukoliko se od skladišnog objekta nalazi na rastojanju koje se dobija korišćenjem izraza:

$$d_t = c_t \cdot f_g \cdot \sqrt[9]{Q^4} \quad (5)$$

$$f_g = 0,116 \cdot \left(\frac{Q}{V} \right)^{0,3} \quad (6)$$

gde je:

d_t — potrebno bezbednosno rastojanje za sprečavanje tektonskog dejstva eksplozije,

c_t — koeficijent za proračun rastojanja:

$c_t = 1,4$ — za objekte izrađene u pesku, šljunku i vlažnoj glini;

$c_t = 1,72$ — za meku stenu;

$c_t = 2$ — za tvrdnu stenu.

V — zapremina podzemnog objekta (komore).

Kako je već istaknuto, vazdušni udarni talas se kod podzemnih objekata pojavljuje na izlazu iz hodnika kojim su oni međusobno povezani, ukoliko je objekat smešten tako da je debljina nadsloja manja od a_v . Potrebno bezbednosno rastojanje zavisi od položaja objekta u okruženju u odnosu na osu izlaznog hodnika podzemnog objekta, a proračunava se korišćenjem izraza:

$$d_u = c_u \cdot \sqrt[3]{\frac{Q}{n \cdot k}} \quad (7)$$

gde je:

d_u — potrebno bezbednosno rastojanje,

c_u — koeficijent za proračun rastojanja koji zavisi od ugla između ugroženog objekta i ose izlaznog hodnika:

$c_u = 7,6$ — za ugao od 120 do 180°,

$c_u = 13,2$ — za ugao od 90 do 120°,

$c_u = 20$ — za ugao od 60 do 90°,

$c_u = 27,2$ — za ugao 30 do 60°,

$c_u = 30,4$ — za ugao od 0 do 30°;

n — koeficijent kojim se uzima u obzir broj ulaza u podzemni objekat

$n = 1$ — ukoliko skladište nema više od jednog ulaza,

$n = 2$ — ukoliko skladište ima dva ili više ulaza, pri čemu se vazdušni udarni talasi ne sabiraju;

k — koeficijent kojim se uzima u obzir položaj objekta:

$k = 3$ — ukoliko se objekat nalazi na kraju sporednog hodnika čiji je presek najviše polovina preseka glavnog hodnika, a dužina najmanje jednaka trećini bezbednosnog rastojanja između podzemnih objekata,

$k = 1$ — u ostalim slučajevima.

Potrebno bezbednosno rastojanje koje obezbeđuje objekte u okruženju od parčadnog dejstva dobija se uz korišćenje izraza:

$$d_p = 0,42 \cdot f_c \cdot f_d \cdot Q^{0,41} \quad (8)$$

$$f_c = \frac{c_u}{\sqrt[3]{Q}} \quad (9)$$

$$f_d = 0,261 \cdot \left(\frac{Q}{V} \right)^{0,18} \quad (10)$$

Osnovne postavke pri definisanju građevinskih rešenja podzemnih objekata

Podzemni skladišni kompleks sačinjavaju: glavni hodnik koji povezuje ulaz u kompleks sa svim skladišnim

objektima, sporedni hodnici koji povezuju glavni hodnik i pojedine skladišne objekte, kao i sami skladišni objekti.

Tehnologija gradnje podzemnih objekata, u većini slučajeva, podrazumeva postavljanje lučne armirano-betonske konstrukcije, kako u glavnom, tako i u sporednim hodnicima, pa i u samom skladišnom objektu.

U principu veća ograničenja nametnuta potrebom za građevinskim obezbeđenjem objekta ne postoje. Za većinu terena u kojima se grade podzemni objekti, kao osnovna mogu se pojaviti dva ograničenja:

— minimalno rastojanje između dva skladišna objekta (komore) mora biti najmanje 5 m,

— minimalna dužina sporednog hodnika koja se dobija kao funkcija širine skladišnog objekta i glavnog hodnika i proračunava se na osnovu izraza

$$1,5 \cdot a + \frac{s}{2} \quad (11)$$

gde je:

a — širina objekta,

s — širina glavnog hodnika.

Kao relevantan podatak može se dati i odnos cena izgradnje pojedinih elemenata sistema. Ukoliko se cena izgradnje hodnika po dužnom metru proglasi jediničnom, onda se cena izgradnje skladišnog objekta može definisati faktorom 5, a cena razrade objekta faktorom 7,5.

Tehnološka koncepcija podzemnog skladišta

Tehnološka koncepcija skladišnog objekta je definisana ukoliko su poznata rešenja za:

— čuvanje materijala u samom skladišnom objektu,

— rad na frontu pretovara (pri utovaru, istovaru materijala),

- transport materijala između fronta pretovara i skladišnog objekta,
- uskladištenje i iskladištenje materijala.

Tehnologija čuvanja materijala u objektu podrazumeva definisanje načina slaganja skladišnih jedinica i određivanje položaja saobraćajnice (glavnog prolaza) kojom se kreću sredstva za uskladištenje i iskladištenje. Analiza većeg broja tehnologija pokazala je da najpovoljnije rešenje podrazumeva formiranje homogenih polja čija je širina usaglašena sa dimenzijom jedinice tereta (najčešće palete) i potrebnom širinom prolaza za sredstva za uskladištenje i iskladištenje (slika 2).

Sl. 2 — Konceptija formiranja slogova u skladišnoj zoni

Palete, odnosno neke druge skladišne jedinice se slažu u slog po dubini

ovako formiranog polja, pri čemu je direktan pristup omogućen samo onoj skladišnoj jedinici koja se nalazi na njegovom početku. Ovakav pristup podrazumeva da se jedno polje angažuje za smeštanje samo jedne homogene vrste tereta, naročito u uslovima kada se očekuju veći koeficijenti obrta uskladištenog materijala.

Najpogodniji način postavljanja objekta u odnosu na glavni hodnik je kada je osa objekta paralelna osi glavnog hodnika.

Sporedni hodnik u tom slučaju povezuje objekat i glavni hodnik tako što njegova osa sa osom glavnog hodnika zaklapa ugao od 90° . Sporedni hodnik u skladišni objekat može ući u njegovom centru, a može biti postavljen i ekscentrično. Njegovim položajem tako se može regulisati dužina homogenih polja. Postavljanjem sporednog hodnika u centar objekta, sva homogena polja imaju jednaku dužinu. Njegovim ekscentričnim postavljanjem dobijaju se dve dužine homogenih polja, što može biti pogodno u slučajevima kada je asortiman uskladištenog materijala izuzetno veliki, pa se pojavljuju homogene grupe sa relativno malim količinama materijala.

Sl. 3 — Angažovanje skladišne površine u objektu

U produžetku sporednog hodnika, po celoj širini skladišnog objekta, ostavlja se radni prolaz za kretanje sredstava za uskladištenje i iskladištenje.

Pri projektovanju *tehnologije utovara i istovara na frontu pretovara*, kao jedan od osnovnih principa pojavila se potreba za obezbeđenjem realizacije ovih operacija bez izlaska pretovarnog sredstva iz skladišta. Ovakav pristup podrazumeva postavljanje vozila direktno na ulaz u skladište i njegovo eventualno pomeranje kako bi se obezbedilo zahvatanje svih jedinica tereta po dužini vozila. Potreba da vozilo bude istovareno u relativno kratkom vremenu podrazumeva obezbeđenje posebnog prostora kod početka glavnog hodnika na koji će se odlagati skladišne jedinice pre njihove otpreme do skladišnog objekta (pri ulazu), odnosno, na kome će se izvršiti prikupljanje jedinica tereta pre početka utovara vozila (kod izlaza robe iz skladišta).

Transport između fronta pretovara i skladišnog objekta se, u principu, može realizovati na dva načina. Kod kraćih rastojanja pogodno je primenjivati čeonu elektroviljuškar, koji ujedno može biti angažovan i na operacijama pretovara i uskladištenja — iskladištenja. Za veća rastojanja preporučuje se primena vučnog voza, čime su, naročito pri većem obimu robnog rada obezbeđene značajne uštede. U ovom slučaju, pogodno je da operacije pretovara i uskladištenja — iskladištenja realizuje hibridni elektroviljuškar, bez sedišta za vozača, sa težištem tereta unutar baze viljuškara.

Optimizacija veličine i rasporeda skladišnih objekata

Analiza bezbednosnih, građevinskih i tehnoloških aspekata problema projektovanja podzemnih skladišta upućuje na zaključak da se u okviru postavljenih ograničenja (bezbednosna rastojanja, međusobni odnosi pojedinih

nih elemenata skladišnog sistema i minimalne konstruktivne i tehnološke dimenzije) za zadatu količinu materijala, može definisati praktično beskonačno varijantnih rešenja. Razlike između njih posledica su veličine pojedinih skladišnih objekata, kao i položaja ovih objekata u odnosu na ulaz u skladište.

Povećanjem dužine glavnog hodnika obezbeđuje se da nadsloj iznad skladišnih objekata bude veći, pa da se, samim tim, za zadatu količinu materijala može primeniti manji broj većih objekata. Međutim, ovakvo rešenje uslovljava da troškovi transporta i troškovi povezani sa potencijalnim uništenjem sadržaja u jednom objektu zbog destrukcije, izazvane ma kojim razlogom, znatno rastu. Manje dužine glavnog hodnika, u principu, upućuju, zbog manje debljine nadsloja, na izgradnju više manjih objekata, čime investicije u objekte rastu, ali se smanjuju troškovi transporta i troškovi povezani sa eventualnom destrukcijom.

U ovakvim okolnostima neophodno je pristupiti optimizaciji rasporeda i veličina objekata kroz definisanje jedinstvene funkcije cilja i kriterijuma, koji, na dovoljno kvalitetan način, mogu opisati stepen njegovog dostizanja za svaku od definisanih varijanti. Logično je da za funkciju cilja treba proglasiti minimizaciju ukupnog koštanja bilo koje varijante. Do ukupnog koštanja varijante može se doći respektovanjem:

- investicija u skladišni objekat,
- investicija u pomoćne hodnike,
- investicija u glavni hodnik,
- manipulativnih troškova,
- troškova destrukcije.

Svaka od varijanti rasporeda i veličina objekata može se opisati kroz definisanje položaja objekta u odnosu na koordinatni sistem xy (čiji se početak nalazi u preseku ose glavnog hodnika i linije terena) i dužine objekta,

kako je to prikazano (slika 4), pri čemu je poprečni presek objekata jednak za sve skladišne objekte. Veličine prikazane na ovoj slici imaju sledeće značenje:

- x_i — dužina glavnog hodnika od ulaza do objekta (i),
- l_i — dužina objekta (i),
- p_{i+1} — rastojanje duž x ose između krajnje tačke objekta (i) i najbliže tačke objekta (i+1),
- r_{i+1} — rastojanje duž ose y između najbližih tačaka objekata (i) i (i+1),
- d_{i+1} — rastojanje između najbližih tačaka objekata (i) i (i+1).

CR — cena razrade po dužnom metru,
n — broj skladišnih objekata.

Investicije u glavni hodnik (IS) zavise isključivo od njegove dužine i mogu se izraziti, uz definisanu cenu gradnje dužnog metra hodnika (CG), preko izraza:

$$IG = CG \cdot \left(x_i + \frac{l_i}{2} \right) + CG \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \frac{l_i + l_{i+1}}{2} + p_{i+1} \quad (13)$$

Na sličan način dolazi se i do investicija za gradnju sporednog hodnika

Sl. 4 — Principi pri definisanju položaja i veličine objekata

Usvajajući ove oznake, investicije koje je potrebno obezbediti za izgradnju skladišnog objekta (IO) mogu se definisati na sledeći način¹:

$$IO = \sum_{i=1}^n (l_i - k) \cdot CO + k \cdot CR \quad (12)$$

gde je:

- k — dužina neophodna za razradu pri gradnji objekta,
- CO — cena gradnje dužnog metra objekta,

ka (IS), uz odgovarajuću jediničnu cenu (CS):

$$IS = CS \cdot \sum_{i=1}^n Y_i \quad (14)$$

Najprihvatljiviji način za definisanje troškova manipulacije podrazumeva njihovo povezivanje sa vremenom angažovanja manipulativnih sredstava. Do dužine jednog ciklusa (t_c) ovih sredstava može se doći korišćenjem sledećeg izraza:

$$t_c = k_f + k_p \cdot \left(x_i + \frac{3}{4} \cdot l_i + y_i \right) \quad (15)$$

¹ Poprečni presek svih objekata je definisan i jednak za sve skladišne objekte.

gde je:

k_f — suma vremena u ciklusu koja ne zavise od dužine transportnog puta,

k_p — koeficijent koji dovodi u vezu dužinu transportnog puta i vreme.

Broj ciklusa koje je potrebno ostvariti u toku jedne godine posledica je veličine objekta, odnosno količine materijala koja se u njega može smestiti (Q_i)², srednje težine jedinice tereta (N) i godišnjeg obrta uskladištenog materijala (w), tako da se može napisati izraz:

$$B_i = \frac{Q_i}{N} \cdot w \quad (16)$$

U ovim uslovima ukupni manipulativni troškovi (TM) mogu se definisati, uz poznavanje jedinične časovne cene (TVh),³ kao:

$$TM = TVh \cdot \sum_{i=1}^n B_i \cdot t_c \quad (17)$$

Troškovi koji se odnose na spontanu destrukciju posledica su verovatnoće da do nje dođe u veku trajanja objekta (p_d), i količine tom prilikom uništene municije. Tražena verovatnoća može se definisati na osnovu stranih i domaćih iskustava. Kako se radi o verovatnoći jednog incidenta, on se može realizovati u bilo kom objektu, pa je realno da se kvantifikacija poveže sa količinom koja je jednaka srednjoj uskladištenoj količini po objektu. Ove troškove moguće je kvantifikovati na sledeći način:

$$TD = CE \cdot \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n} \cdot p_d \quad (18)$$

² Relaciju između dužine objekta i količine uskladištenog materijala moguće je ostvariti u uslovima definisanog poprečnog preseka objekta i poznate tehnologije skladištenja.

³ U časovnu cenu rada manipulativnih sredstava uključeni su svi investicioni i eksploatacioni troškovi, kao i odgovarajući troškovi angažovanja radne snage.

Jasno je da se svi definisani troškovi pojavljuju u različitim vremen-
skim presecima, pa je neophodno izvršiti njihovo svođenje na istu dimenziju. Ovaj zahtev se pogodno ispunjava definisanjem čiste sadašnje vrednosti varijante, odnosno diskontovanjem svih troškova na godinu početka eksploatacije objekta. Do čiste sadašnje vrednosti, kao kriterijuma na osnovu koga je moguće oceniti stepen ispunjenja generalno postavljenog cilja, može se doći uz korišćenje sledećeg izraza:

$$SV = IO + IS + IG + \sum_{i=1}^{t_{eks}} \frac{TM}{(1+d)^i} + \frac{TD}{(1+d)^{t_{eks}/2}} \quad (19)$$

gde je:

SV — čista sadašnja vrednost,

t_{eks} — eksploatacioni vek objekta,

d — diskontni faktor,

Generisanje varijanti rasporeda i veličina objekata u podzemnom skladišnom kompleksu

Radi definisanja varijanti rasporeda i veličina objekata u podzemnom skladišnom kompleksu neophodno je analizirati odnos između dva susedna skladišna objekta, pri čemu se kao zadatak pojavljuje potreba za određivanjem položaja i veličine narednog, uz uslov da je poznata lokacija i veličina prethodnog objekta. Pored ekonomskih kriterijuma, na veličinu i položaj narednog objekta utiču i bezbednosni zahtevi koji se manifestuju potrebom da se između ova dva objekta ostavi dovoljno bezbednosno rastojanje, kao i da se iznad narednog objekta ostavi dovoljno veliki nadsloj, kako objekti u okruženju skladišnog kompleksa ne bi bili ugroženi.

Sa aspekta bezbednosnog rastojanja između prethodnog (i)-tog i nared-

nog (i+1)-og objekta, moguće je uspostaviti sledeće funkcionalne veze:⁴

$$d_{i+1} = c_0 \cdot \sqrt[3]{Q_{i+1}}$$

$$d_{i+1} = r_{i+1} \quad \text{za } p_{i+1} \leq 0 \quad (20)$$

$$d_{i+1} = \sqrt{p_{i+1}^2 + r_{i+1}^2} \quad \text{za } p_{i+1} > 0$$

odnosno:

$$\sqrt[3]{Q_{i+1}} = \frac{1}{c_0} \cdot \sqrt{p_{i+1}^2 + r_{i+1}^2} \quad \text{za } p_{i+1} > 0 \quad (21)$$

$$\sqrt[3]{Q_{i+1}} = \frac{1}{c_0} \cdot r_{i+1} \quad \text{za } p_{i+1} \leq 0 \quad (22)$$

Sa aspekta debljine nadsloja, dovodeći u vezu količinu eksploziva u objektu (i+1) i njegov položaj, moguće je, uz definisanje nagiba terena α u odnosu na horizontalni glavni hodnik, uvesti sledeće relacije:

$$a_{n_{i+1}} = c_n \cdot \sqrt[3]{Q_{i+1}} \quad (23)$$

$$a_{n_{i+1}} = (z_i + p_{i+1}) \cdot \sin \alpha \quad (24)$$

$$\sqrt[3]{Q_{i+1}} = \frac{1}{c_n} \cdot (z_i + p_{i+1}) \cdot \sin \alpha \quad (25)$$

Izjednačavajući količinu eksploziva koju je moguće smestiti na narednu lokaciju u odnosu na bezbednosno rastojanje između objekata i debljinu nadsloja, dobijaju se geometrijska mesta tačaka na koje ima smisla postaviti naredni objekat. Ova veza može se izraziti kao:

$$r_{i+1} = \sqrt{\frac{c_0^2}{c_n^2} \cdot (z_i + p_{i+1})^2 \cdot \sin^2 \alpha - p_{i+1}^2}$$

$$p_{i+1} > 0 \quad (26)$$

$$r_{i+1} = \frac{c_0}{c_n} \cdot (z_i + p_{i+1}) \cdot \sin \alpha$$

$$p_{i+1} \leq 0 \quad (27)$$

⁴ Uvodi se pretpostavka da je $Q_{i+1} > Q_i$ jer se smatra da nema smisla u objekat smeštati manje količine eksploziva od onih koje taj nadsloj omogućava.

Primer proračuna za položaj polazne tačke narednog objekta u funkciji od udaljenosti prethodnog objekta od ulaza u podzemno skladište (z), za koeficijente $c_0=0,6$ i $c_n=1,4$ i karakteristične nagibe terena α , dat je na slici 5.

Sl. 5 — Geometrijska mesta tačaka na koje ima smisla postaviti naredni objekat

Između svih ovih moguće je izabrati i rešenje koje je blisko optimalnom, ukoliko se primeni ekonomski kriterijum koji obuhvata cenu gradnje glavnog hodnika i cenu izrade samog

skladišnog objekta. Cenu izrade sporednog hodnika, transportne troškove i troškove povezane sa destrukcijom, za ove potrebe moguće je eliminisati. Da bi se do traženih veličina moglo doći, neophodno je uvesti parametar (R) koji dovodi u odnos cenu izrade skladišnog objekta sa cenom izgradnje jedinice dužine glavnog hodnika, kao i specifično opterećenje eksplozivom dužnog metra objekta (q_n), što je moguće ostvariti u uslovima poznate tehnologije i poznatih karakteristika materijala koji će se skladištiti.

Pod ovim uslovima, do cene izgradnje glavnog hodnika (G) koji je neophodan da bi se pristupilo narednom objektu može se doći uz korišćenje izraza:

$$G = \frac{\frac{l_i}{2} + \frac{l_{i+1}}{2} p_{i+1}}{Q_{i+1}} \quad (28)$$

odnosno:

$$G = \frac{x_i^3}{2(z_i + p_{i+1})^3 \cdot q_n} + \frac{1}{2q_n} + \frac{c_n^3 \cdot (L_h + p_{i+1})}{(z_i + p_{i+1})^3 \sin^3 \alpha} \quad (29)$$

Kao što se iz izraza može videti, cena izgradnje glavnog hodnika svedena je na jedinicu težine uskladištenog eksploziva u narednom objektu.

Do cene izgradnje samog skladišnog objekta dolazi se pomoću izraza:

$$\begin{aligned} O &= R \cdot \frac{l_{i+1}}{Q_{i+1}} = \\ &= \frac{R}{q_n} + R \cdot \frac{c_n^3 \cdot L_h}{(z_i + p_{i+1})^3 \cdot \sin^3 \alpha} \end{aligned} \quad (30)$$

Diferenciranjem zbira ove dve vrednosti po promenljivoj p_{i+1} , dolazi se i do optimalnog položaja narednog objekta u odnosu na prethodni:

$$p_{i+1} = \frac{x_i - L_h \cdot (2 + 3 \cdot R)}{2} + \frac{x_i^3 \cdot \sin^3 \alpha}{4 \cdot c_n^3 \cdot q_n} \quad (31)$$

Na ovaj način stvorena je mogućnost da se lokacija narednog objekta na blisko optimalan način utvrdi na osnovu lokacije prethodnog objekta. Na slici 6 prikazane su osnovne zavisnosti između pojedinih karakterističnih veličina: nagiba terena, odnosa cena izgradnje pojedinih elemenata sistema i količine čistog eksploziva koja se može smestiti po dužnom metru objekta.

Ukoliko bi se odredio položaj prvog objekta u nizu to bi značilo da bi

Sl. 6 — Lokacija narednog u funkciji od položaja prethodnog objekta u nizu

se korišćenjem ove relacije mogao odrediti i položaj svih ostalih objekata, kao i njihove veličine. Samim tim, i proces generisanja varijanti veličina i lokacija objekata u podzemnom skladištu svodi se na definisanje lokacije i veličine prvog objekta u nizu. Optimizacija se sprovodi generisanjem više varijanti veličina i rasporeda objekata, pri čemu je svaka od varijanti potpuno određena prvim objektom u nizu. Izbor optimalne varijante vrši se na osnovu čiste sadašnje vrednosti koja se proračunava za svaku od varijanti.

Razvijeni modeli su u potpunosti prilagođeni primeni odgovarajućeg softvera, tako da se svi proračuni mogu obaviti u kratkom vremenu, uz minimalne troškove.

Zaključak

U okviru rada predložen je postupak koji obezbeđuje izbor optimalne strukture i rasporeda objekata u podzemnom skladištu opasnih materija klase 1. Proces optimizacije zasnovan je na ekonomskim pokazateljima funkcionalnosti skladišta koji obuhvataju: investicije, manipulativne troškove i troškove povezane sa spontanom destrukcijom sadržaja u nekom od objekata.

Optimizacija se sprovodi generisanjem više varijanti veličina i rasporeda objekata, pri čemu je svaka od varijanti određena položajem prvog objekta u nizu. Izbor optimalne varijante vrši se na osnovu čiste sadašnje vrednosti koja se proračunava za svaku od varijanti.

Razvijeni model je u potpunosti prilagođen jednostavnoj izradi odgovarajućeg softvera, tako da se svi proračuni mogu obaviti u realnom vremenu, uz minimalne troškove.

Literatura:

- [1] Transport of dangerous goods, OUN, 1995.
- [2] Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, American Institute of Chemical Engineers, N. Y., 1985.

- [3] Stojanović, D.: Zaštita od požara i eksplozija, Institut zaštite od požara i eksplozija, Sarajevo, 1988.