

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

TEHNIČKO REŠENJE
MONITORING I PROGNOZA STANJA PODZEMNIH PROSTORIJA

Beograd, 2015. godine

DOKUMENTACIJA TEHNIČKOG REŠENJA
IDENTIFIKACIONI PODACI

Vrsta tehničkog rešenja	M84
Autori tehničkog rešenja	Prof. dr Zoran Gligorić Prof. dr Aleksandar Ganić Prof. dr Aleksandar Milutinović dr Čedomir Cvijović Prof. dr Čedomir Beljić Prof. dr Rade Tokalić Doc. dr Branko Gluščević Prof. dr Ines Grozdanović Doc. dr Suzana Lutovac Dipl. inž. geod. Zoran Gojković Dipl. inž. rud. Miloš Gligorić, doktorand Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-Geološki fakultet, Beograd, Dušina 7, zoran.gligoric@rgf.bg.ac.rs
Naziv tehničkog rešenja	Monitoring i prognoza stanja podzemnih prostorija
Za koga je tehničko rešenje rađeno	TR 33029 Izučavanje mogućnosti valorizacije preostalih rezervi uglja u cilju obezbeđenja stabilnosti energetskeg sektora Republike Srbije
Godina izrade tehničkog rešenja	2015
Verifikacija rezultata	Od strane recenzenta 1. Prof. dr Gordana Hadži Niković 2. Prof. dr Igor Miljanović
Ko je prihvatio tehničko rešenje	Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-Geološki fakultet
Primena rezultata	Rudarstvo-podzemna eksploatacija, Građevinarstvo-podzemni objekti

1. Oblast na koju se tehničko rešenje odnosi

Tehničko rešenje se prvenstveno odnosi na naučnu oblast Rudarstvo-podzemna eksploatacija ležišta mineralnih sirovina. Primena tehničkog rešenja je veoma široka, odnosno može se koristiti za praćenje i prognozu deformacija svih tipova objekata (zgrada, mostova, garaža, kolektora, cevovoda, itd.).

2. Problem koji se rešava

Podzemni rudnik predstavlja integrisani sistem jamskih prostorija čija je svrha obezbeđivanje komunikacije između rudnog ležišta i površine terena, odnosno infrastrukturni sistem koji služi za eksploataciju mineralne sirovine. Efikasnost eksploatacije direktno zavisi od stanja ovog sistema. Uzimajući u obzir da se uslovi eksploatacije sve više usložnjavaju, održavanje sistema jamskih prostorija postaje sve zahtevnije. Tehničko rešenje omogućava praćenje stanja jamske prostorije tokom nekog vremena, a zatim na osnovu dobijenih podataka daje prognozu njenog stanja za definisani budući vremenski interval. Na ovaj način stvara se dobra osnova za upravljanje stanjima jamske prostorije, odnosno određivanju kada koju deonicu prostorije treba rekonstruisati.

3. Stanje rešenosti ovog problema u svetu

Praćenje stanja stenskog masiva predstavlja važnu ulogu pri definisanju stabilnosti podzemnih prostorija. Jednoaksijalna čvrstoća na pritisak predstavlja jedan od najvažnijih parametara u istraživanju ponašanja stenskog masiva. Direktno metode koje se koriste za određivanje vrednosti ovog parametra su vremenski zahtevne i skupe, jer se sprovode u laboratorijskim uslovima i zahtevaju skupu opremu za testiranje uzoraka stenskog masiva. Za praćenje deformacija podgrade koriste se različite metode merenja i interpretacije dobijenih rezultata. Primenjuju se metode regresionih analiza, sivih modela, neuronskih mreža kao i kombinovane metode.

4. Suština tehničkog rešenja

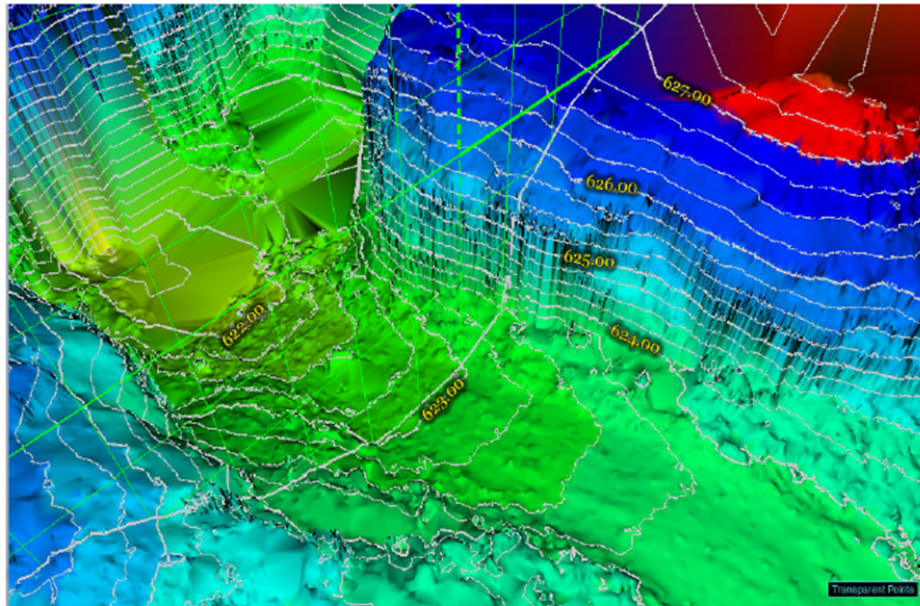
Tehničko rešenje predstavlja hibrid metode merenja, koja je zasnovana na primeni savremenog mernog instrumenta velike preciznosti (3-D laserskog skenera) i analize dobijenih podataka. Višekanalnom singularnom spektralnom analizom opisuje se mehanizam realizovanih deformacija, a zatim se vrši prognoza budućih stanja.

5. Detaljan opis tehničkog rešenja

5.1 Koncept tehničkog rešenja

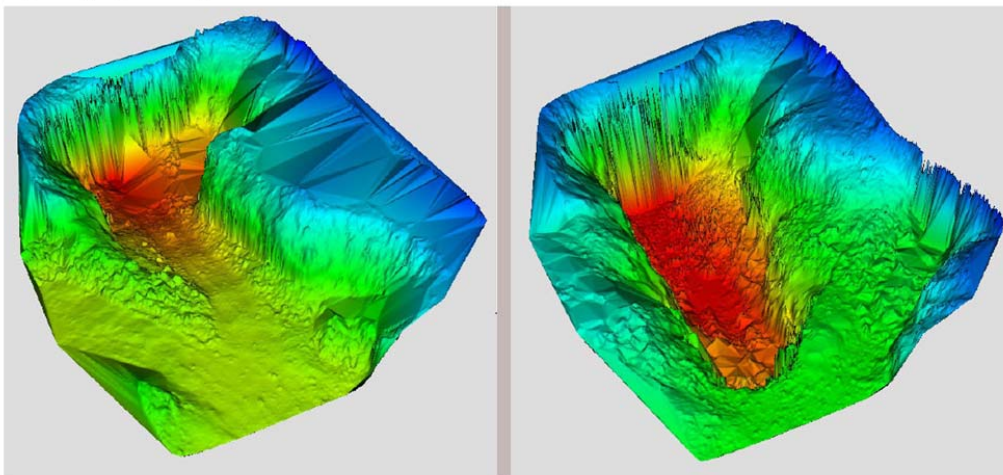
Glavni koncept tehničkog rešenja zasniva se na istraživanjima sprovedenim u podzemnom rudniku olova i cinka „Rudnik“, u blizini Gornjeg Milanovca, tokom 2008 i 2009 godine. Istraživanja su bila fokusirana na upotrebu 3-D laser skenera, kako bi se definisala efikasnost Komorno-stubne metode otkopavanja. Laser skener Leica HDS 3000 korišćen je za snimanje otkopanog prostora tokom dve vremenske pozicije, a za obradu dobijenih podataka korišćen je

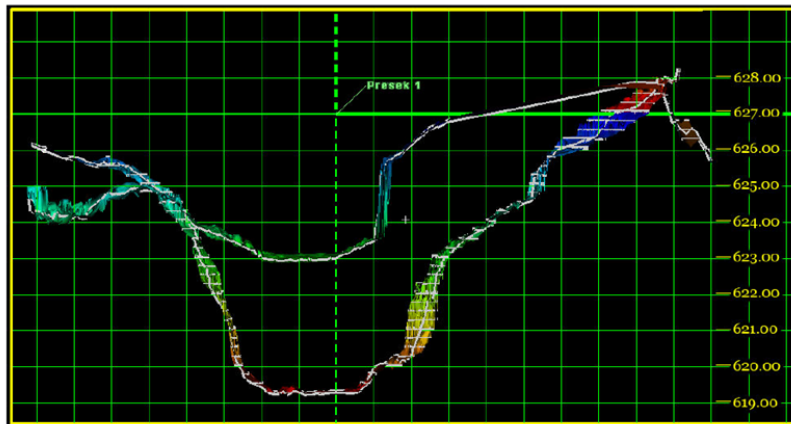
Cyclone i Bentley program. Kreirana su dva digitalna modela otkopanog prostora u skladu sa dobijenim podacima izmerenim u dva različita vremenska trenutka. Na slici br. 1 prikazan je mrežni model komore u inicijalnom merenju.



Slika br. 1 - Digitalni 3-D mrežni model komore

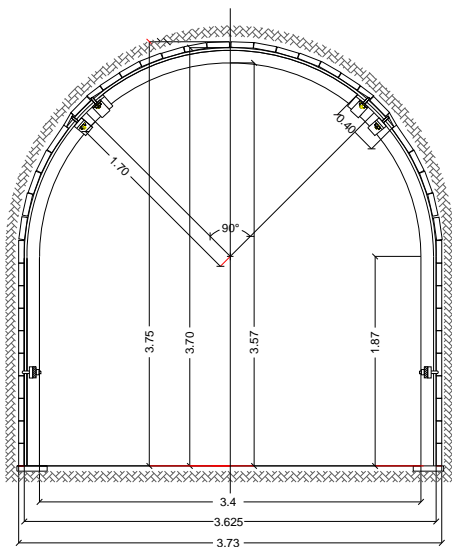
Na slici br. 2 prikazan je digitalni model komore u inicijalnom merenju i nakon otkopavanja, kao i odgovarajući poprečni preseći.





Slika br. 2 - Digitalni 3-D model komore pre i posle otkopavanja sa odgovarajućim poprečnim presecima

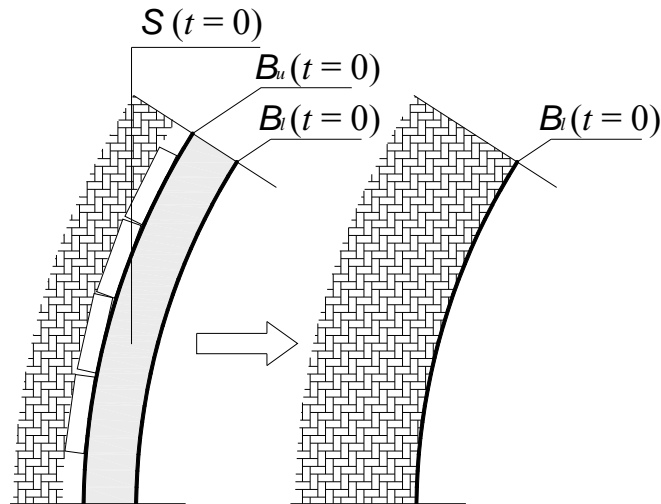
Tehničko rešenje koristi analogni pristup, pri čemu je objekat merenja i analize jamska ili podzemna prostorija. Funkcionalnost tehničkog rešenja prikazana je na primeru podgrađenog jamskog hodnika, slika br. 3. Važno je naglasiti da se tehničko rešenje, uz mala prilagođavanja, može koristiti za sve jamske prostorije, kao i sve podzemne prostorije.



Slika br. 3 - Poprečni presek podzemne prostorije, jamskog hodnika [7]

Da bi opisali deformacije podgrade, razmatramo pomeranja podgrade tokom vremena u vertikalnoj ravni (ravanski problem) snimanjem pomoću 3-D laserskog skenera u jednakim vremenskim intervalima. Ukoliko se snimanja ne mogu sprovesti u jednakim vremenskim intervalima, tada se ona odgovarajućim transformacijama prevode u niz snimanja jednakih vremenskih intervala. Neka je $S(t)$ površina podgrade u vremenu t ograničena njenom donjom i

gornjom ivicom, $B(t) = [B_l(t), B_u(t)]$. Bez gubljenja uopštenosti, izjednačimo gornju ivicu podgrade sa donjom ivicom i transformišimo površinu podgrade u liniju (konturu podgrade), odnosno redukujmo površinsku prirodu podgrade u veštačku linijsku, $S(t = 0) \in \mathbb{R}^2 \rightarrow B_l(t = 0) \in \mathbb{R}$, slika br. 4.



Slika br. 4 - Transformacija površinske prirode podgrade u veštačku linijsku

Postavljanjem markera po konturi podgrade stvoreni su potrebni uslovi za praćenje deformacija tokom vremena. Inicijalna kontura, $B_l(t), t = 0$, je nedeformisana i poznata (snimljena skenerom). Pomeranje svakog markera na konturi, iz početnog stanja u trenutno, definisano je vremenskom funkcijom preslikavanja. Pošto je oblik ove funkcije nepoznat, neophodno je vršiti monitoring podgrade tokom vremena. Podaci dobijeni u svakom merenju predstavljaju se u istom koordinatnom sistemu (inicijalni koordinatni sistem). Pozicija markera, $\mathbf{m}(\vec{v}, t)$, slika br. 5, indukovana naponskim stanjem oko konture, menja se u skladu sa sledećom vektorskom jednačinom:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}(t - 1) + \vec{u}(t), \quad t = 1, 2, \dots, N$$

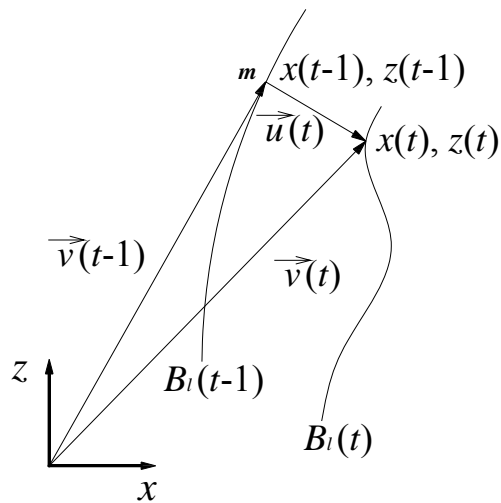
gde je

$\vec{v}(t)$ – vektor pozicije markera \mathbf{m} u sledećoj konturi podgrade

$\vec{v}(t - 1)$ – vektor pozicije markera \mathbf{m} u prethodnoj konturi podgrade

$\vec{u}(t)$ – vektor deformacije

N – vreme snimanja



Slika br. 5 - Promena pozicije markera u vremenu

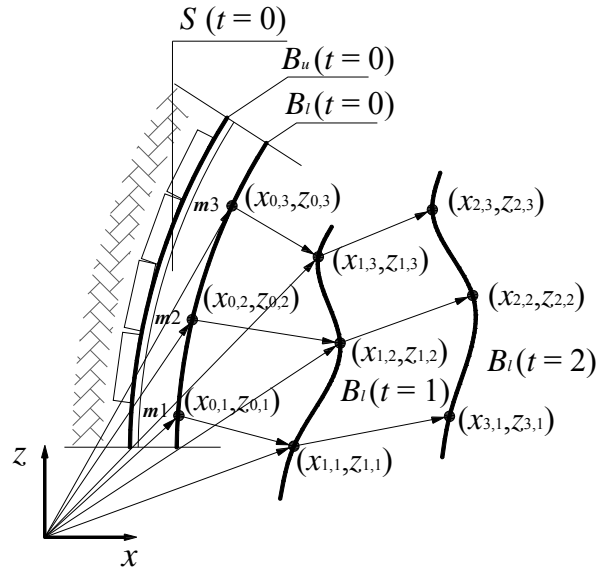
U xz koordinatnom sistemu, pozicija markera, $\mathbf{m}(x, z, t)$, definisana je sledećim izrazima:

$$x(t) = x(t - 1) + \Delta x(t)$$

$$z(t) = z(t - 1) + \Delta z(t)$$

Oblast konture $B_l(t)$ podeljena je u segmente koji su "povezani" markerima. Kontura podgrade u trenutku t definisana je skupom $B_l(t) = \{\mathbf{m}_{t,h}\}$, $h = 1, 2, \dots, M$, gde M predstavlja ukupan broj markera. Definišimo segment inicijalne konture podgrade skupom $D_l(t = 0) \subset B_l(t = 0)$; $D_l(t = 0) = \{\mathbf{m}_{0,1}, \mathbf{m}_{0,2}, \mathbf{m}_{0,3}\}$, slika br. 6. U trenutku $t = 1$, segment inicijalne konture podgrade transformisaće se i biće definisan skupom $D_l(t = 1) = \{\mathbf{m}_{1,1}, \mathbf{m}_{1,2}, \mathbf{m}_{1,3}\}$. U trenutku $t = 2$ topologija segmenta definisana je skupom $D_l(t = 2) = \{\mathbf{m}_{2,1}, \mathbf{m}_{2,2}, \mathbf{m}_{2,3}\}$. Vremenski zavisani način transformacije topologije segmenta konture definisan je na sledeći način:

$$D_l(0,1,2) := \{\mathbf{m}_{0,1}, \mathbf{m}_{0,2}, \mathbf{m}_{0,3}\} \rightarrow \{\mathbf{m}_{1,1}, \mathbf{m}_{1,2}, \mathbf{m}_{1,3}\} \rightarrow \{\mathbf{m}_{2,1}, \mathbf{m}_{2,2}, \mathbf{m}_{2,3}\}$$



Slika br. 6 - Promena topologije segmenta konture podgrade u vremenskom intervalu [0,2]

Podaci o pozicijama markera, koji su dobijeni skeniranjem u vremenu $1 \leq t \leq N$, mogu se predstaviti u obliku sledeće matrice:

$$\vec{v}(t) = [\vec{v}_{ij}]_{M \times N} = \begin{bmatrix} \vec{v}_{11} & \vec{v}_{12} & \vec{v}_{13} & \cdots & \vec{v}_{1N} \\ \vec{v}_{21} & \vec{v}_{22} & \vec{v}_{23} & \cdots & \vec{v}_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vec{v}_{M1} & \vec{v}_{M2} & \vec{v}_{M3} & \cdots & \vec{v}_{MN} \end{bmatrix}$$

Svaki red matrice predstavlja poziciju svakog markera, a kolona oblik konture podgrade u vremenu. Podaci iz prethodne matrice se mogu projektovati na x i z osu na sledeći način:

$$x(t) = [x_{ij}]_{M \times N} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & x_{M3} & \cdots & x_{MN} \end{bmatrix}$$

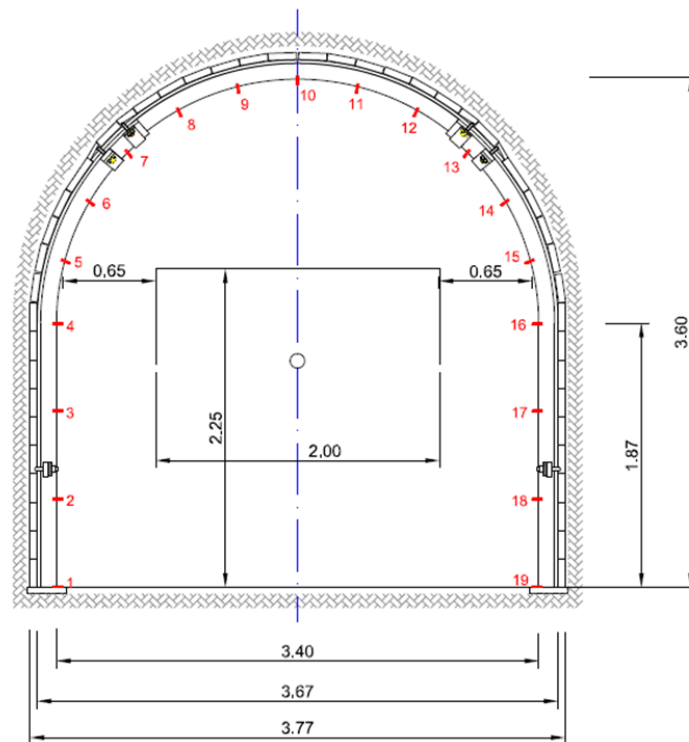
$$z(t) = [z_{ij}]_{M \times N} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & \cdots & z_{1N} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & \cdots & z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{M1} & z_{M2} & z_{M3} & \cdots & z_{MN} \end{bmatrix}$$

Očigledno je da se dobijeni podaci skeniranja mogu tretirati kao višekanalna vremenska serija. Za obradu dobijenih podataka, kao i za prognozu njihovih budućih stanja primenjujemo Višekanalnu singularnu spektralnu analizu.

Uspostavljanjem fuzzy logičkog pravila vršimo klasifikaciju deformacija i izdvajamo zone prema intenzitetu vektora pomeranja $\vec{v}(t)$.

5.2 Testiranje tehničkog rešenja

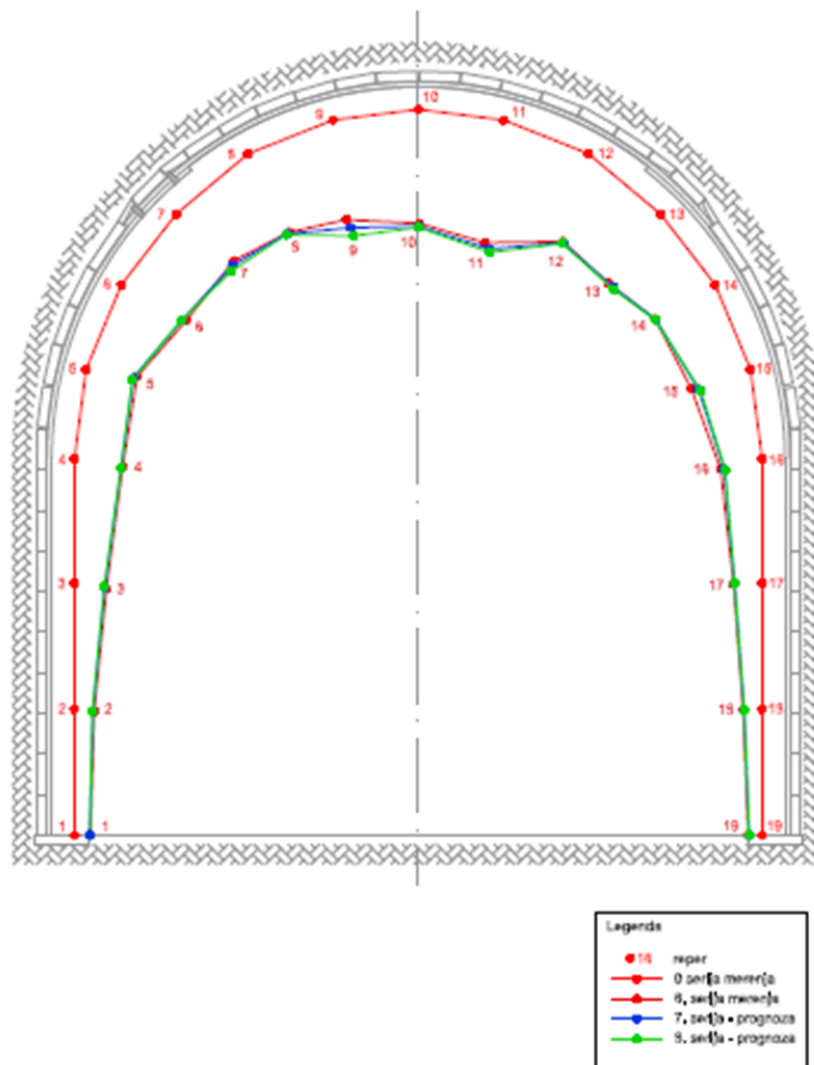
Razvijeno tehničko rešenje testirano je na generičkom primeru. Na slici br. 7 prikazana je jamska prostorija (hodnik), podgrađena čeličnom lučnom podgradom, sa pozicijama markera (repera) u trenutku $t=0$.



Slika br. 7 - Jamska prostorija sa pozicijama markera pre merenja

Posle izvršenih šest serija opažanja, u jednakim vremenskim intervalima, dobijeni su podaci prikazani u Tabeli br. 1. Grafička prezentacija podataka prikazana je na slici br. 8.

Višekanalna singularna spektralna analiza iskorišćena je za formiranje modela prognoze pomeranja markera u sledećim vremenskim intervalima, a na osnovu pomeranja dobijenih iz prethodnih šest serija merenja. Rezultati prognoze prikazani su na slici br. 9.



Slika br. 9 - Prognozni profil jamske prostorije za dva vremenska intervala unapred

Fuzzy logičko pravilo na osnovu kojeg se izdvajaju zone deformacija prema intenzitetu pomeranja markera (repera) prikazano je na slici br. 10.

6. Zaključak

Ponašanje stenskog masiva tokom same izrade jamskih prostorija, kao i tokom njihovog korišćenja predstavlja izuzetno važan proces. Rezultati ovog procesa manifestuju se deformacijama podgrade, odnosno stabilnošću same jamske prostorije. Tehničko rešenje pruža mogućnost da se na osnovu veoma preciznih merenja realizovanih deformacija podgrade, dobijenih pomoću 3-D laser skenera, prognoziraju buduće deformacije primenjujući algoritam zasnovan na Višekanalnoj singularnoj spektralnoj analizi. Na osnovu ovog tehničkog rešenja moguće je razviti program upravljanja stanjima jamskih prostorija. Beneficije se ogledaju u poboljšanju efikasnosti celokupnog sistema jamske eksploatacije preventivnim delovanjem na očuvanju funkcionalnosti jamskih prostotrija.

7. Literatura

- [1] Hossein Hassani, Anatoly Zhigljavsky: Singular Spectrum Analysis: Methodology and Application to Economics Data, Jrl Syst Sci & Complexity (2009) 22: pp. 372-394.
- [2] T.J. Harris, Hui Yuan: Filtering and frequency interpretations of Singular Spectrum Analysis, Physica D 239 (2010), pp.1958-1967.
- [3] C. Cvijovic: Application of Advanced Mining Surveying Technology in the Underground Mining, Thesis, University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, (2010), pp. 185.
- [4] M. Sharifzadeh, A. Tarifard, and M.A. Moridi, "Time-dependent behavior of tunnel lining in weak rock mass based on displacement back analysis method", Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 38, 348-56, 2013.
- [5] H. Minghua, D. Xinhong, and Y. Hua, "Study on grey model of deformation of tunnel", Journal of East China Jiaotong University, vol. 25, pp. 22-4, 2008.
- [6] C. Yong, and W. Xinghua, "Application of grey model in tunnel surrounding rock displacement forecasting", Geotechnical Engineering World, vol. 10, pp. 30-32, 2008.
- [7] www.minenv.com
- [8] Chung-Ho Su, Ching-Hsue Cheng and Wei-Lun Tsai, Fuzzy Time Series Model Based on Fitting Function for Forecasting TAIEX Index, International Journal of Hybrid Information Technology Vol. 6, No. 1, January, 2013, pp.111-122.
- [9] Ackermann, A.W., Hunt, C., (2004): *The Role of Digital Monitoring Technologies in the Development of Comprehensive Tunnel Maintenance Strategies*, http://www.ctta.org/FileUpload/ita/2004/data/abs_b12.pdf.
- [10] Borshch-Komponiets, V., Navitny, A., Knysh, G., (1989): *Mine Surveying*, Mir Publishers, Moscow.
- [11] Saal, K., (2009): *Tunneldrive Scanning with Leica HDS6000*, Leica Reporter 61, https://portal.leica.com/enewsletters/enews5.4/Reporter_61_741802_6100.pdf.
- [12] *Leica TMS – Tunnel Measurement System*, <http://www.leica-geosystems.us/common/shared/downloads/inc>
- [13] *TMS Solution: Surveyig for tunnelling professionals*, <http://www.amberg.ch/at/fileadmin/documents/Systems>