

**PRIOLOG ANALIZI DINAMIČKOG PONAŠANJA IZVOZNIH  
POSTROJENJA PRIMJENOM NUMERIČKIH I EKSPERIMENTALNIH  
METODA**

**CONTRIBUTION TO ANALYSIS DYNAMIC BEHAVIOR OF THE  
MINE HOISTING APPLIED NUMERICAL AND EXPERIMENTAL  
METHOD**

**mr.sc. Mustafa Hadžalić, dipl. inž.**  
**Univerzitet u Zenici Metalurški institut "Kemal Kapetanović"**  
**Travnička br. 5 - Zenica**

**prof. dr Dušan Vukojević, dipl. inž., doc. Nedeljko Vukojević, dipl. inž.**  
**Univerzitet u Zenici Mašinski fakultet**  
**Fakultetska br. 1 - Zenica**

**REZIME**

*U radu je istraživano naponsko-deformaciono stanje elemenata konstrukcije izvoznog postrojenja pri radu pogonskog mehanizma i za ovaj slučaj su razvijeni odgovarajući matematski modeli. U smislu kompleksne analize deformacija konstrukcije izvozne posude u statičko-dinamičkim uslovima ponašanja primjenjena je numerička metoda. Eksperimentalna mjerenja vršena su na realnom sistemu sa mjernim trakama kako bi se utvrdila zavisnost deformacija u konstrukciji izvozne posude i tehnoloških parametara, tj. visine izvoza (dužina užeta), ubrzanja izvozne posude i korisnog tereta. Na temelju numeričkih i eksperimentalnih rezultata, naponsko-deformaciono stanje u konstrukciji izvozne posude je izračunato i uspoređeno. Usporedba pokazuje dobro slaganje između naponsko-deformacionog stanja određenog s dvije različite metode.*

**Ključne riječi:** izvozno postrojenje, dinamičko ponašanje, eksperimentalno-numerički metod

**SUMMARY**

*Stress-strain states in structural elements of the mine hoist installation at operation drive mechanism is researched in this paper, and for it equivalent mathematical models are developed. In the case complex analysis of cage strains in static-dynamical operating conditions are investigated using numerical method. Experimental measurements were performed on a real system with a ganges measurements to determine the dependence of cage strains and technological parameters, i.e. the heigh of hoisting (rope length), cage acceleration and payload. Based on numerical and experimental results, the stress-strain state in the construction of export container was calculated and compared. The comparison shows good agreement between the stress-strain state determined with the two different methods.*

**Keywords:** mining hoisting, dynamic behaviour, experimental-numerical method

## 1. UVOD

Razvoj tehnologija u rudarstvu doveo je do nastanka kompleksnih tehnoloških sistema koji se ne mogu izučavati bez sistemskog pristupa u analitičkom i metodološkom smislu. Izvozna postrojenja su složene transportne mašine prekidnog transporta koje karakteriše periodična smjena više različitih operacija i pokreta pogonskih mehanizama prilikom premještanja tereta u toku jednog radnog ciklusa. Uporedo sa rastom zahtjeva koji se postavljaju prema izvoznim postrojenjima u pogledu transportne brzine, visine izvoza i povećanja težine korisnog tereta neophodna su i poboljšanja u projektovanju osnovnih dijelova u cilju njihovog kvalitetnijeg iskorišćenja uz istovremeno poboljšanje pogonske sigurnosti izvoznih postrojenja.

Predmet uže analize jeste izvozna posuda izvoznog postrojenja Rudnika mrkog uglja u Zenici – pogon "Raspotočje", slika 1. Dimenzije izvozne posude su 3750 x 6000 x 1400 (mm<sup>3</sup>) [1], i služi za transport radnika i materijala u i iz jame. Prema originalnim nacrtima rudnika na računaru je rekonstruiran trodimenzionalni model izvozne posude. Metodom konačnih elemenata proračunati su svi nosivi dijelovi te su određena područja najvećih naprezanja konstrukcije kako bi se eksperimentalno ispitala u statičkim i dinamičkim uslovima.



Slika 1. Prikaz izvozne posude

Kao eksperimentalna metoda odabrana je tenzometrija. Vizuelnim pregledom odabrana je reprezentativna izvozna posuda za ispitivanje. Prema rezultatima numeričkog proračuna definisana su mjerna mjesta od kojih jedno na ovjesnoj ploči i jedno na bočnom štapu. Signali sa mjernih mjesta snimali su se istovremeno preko višekanalnog mjernog uređaja spojenog na računar.

Statičko ispitivanje izvršeno je u prostoru rudnika sa ispitnim opterećenjem određenim na osnovu statičkog proračuna i pravilnika o tehničkim normativima pri prevozu ljudi i materijala oknima [2] i iznosilo je 135 kN. Za simulaciju opterećenja pri ispitivanju otpornosti konstrukcije posuda korištena je hidraulična presa. Snimanjem je obuhvaćeno vrijeme opterećivanja, opterećeno stanje te vrijeme rasterećivanja izvozne posude.

Dinamičko ispitivanje obuhvaćalo je snimanje signala svih kanala za vrijeme vožnje pri čemu je izvozna posuda bila opterećena prethodno izvaganim vagonetima sa teretom težine 4300 i 8600 [kg]. Zabilježene su deformacije konstrukcije tokom cijelog ciklusa vožnje uključujući i dinamičke oscilacije zavisno od položaja izvozne posude u oknu, brzine kretanja izvoznih posuda, težine tereta u vagonetima i otpora kretanju izvozne posude kroz okno [4].

## 2. NUMERIČKA ANALIZA IZVOZNE POSUDE

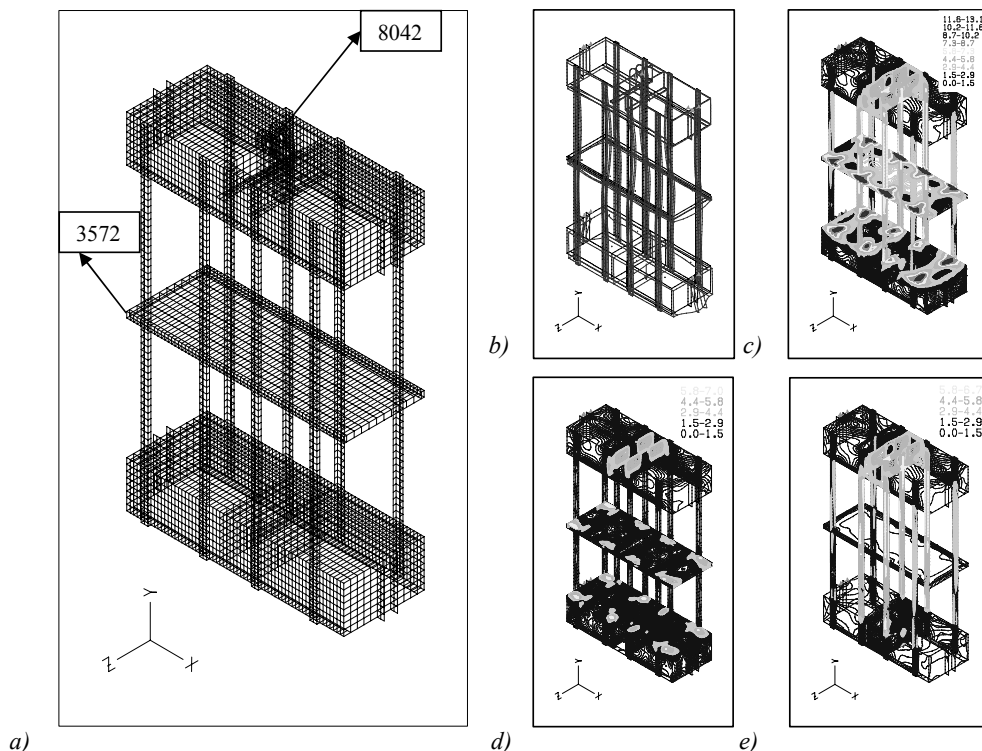
### 2.1 Izrada 3D modela

Kako bi se izvršio numerički proračun izvozne posude nacrtan je kompletan 3D model prema originalnim nacrtima rudnika (Slika 1.a). Rezultati numeričkog proračuna koristit će se za određivanje mjesta najvećih naprezanja kako bi se izvozna posuda na tim mjestima mogla eksperimentalno ispitati.

U konkretnom slučaju numerička analiza podrazumijeva diskretizaciju kompleksne strukture izvozne posude, određivanje graničnih uslova koji će opisivati realno ponašanje konstrukcije, a zatim za različite kombinacije statičko-dinamičkih veličina opterećenja po fazama analize moguće je dati deformaciono-naponske odzive za sve elemente strukture, [3,4].

Diskretizacija kompleksne prostorne strukture je izvršena sa 7706 konačnih elemenata tipa ploče, odnosno 8162 čvorne tačke. Granični uslovi su određeni tako da simuliraju realna

ograničenja u pojedinim pravcima pri vožnji koša u smislu dobijanja adekvatnih slika naponsko-deformacionih i dinamičkih pokazatelja za ocjenu ponašanja konstrukcije.



Slika 2. Izrada 3D modela i statička analiza: a) diskretizacija izvozne posude, b) max. fleksija, c) sekvencijalni napon, d) smicajni napon, e) membranski napon

## 2.2 Opterećenje konstrukcije i rubni uslovi

Materijali svakog elementa izvozne posude definisani su prema nacrtima. Nosivi dijelovi izrađeni su uglavnom od konstrukcijskog čelika Č0562 zatezne čvrstoće  $\sigma_m = 550$  MPa, modula elastičnosti  $E=0,21 \cdot 10^6$  MPa. Kod numeričke analize za opterećenje konstrukcije uzeto je nominalno vertikalno opterećenje što obuhvaća težinu vagoneta sa korisnim teretom ( $G_t$ ) težinu donjeg užeta ( $G_{du}$ ) i djelujuće dinamičko opterećenje ( $F_d$ ) [4].

Granični uslovi su određeni tako da simuliraju realna ograničenja u pojedinim pravcima pri vožnji izvozne posude u smislu dobijanja adekvatnih slika naponsko-deformacionih i dinamičkih pokazatelja za ocjenu ponašanja konstrukcije. Vlastita težina raspoređena je po cijelom tijelu i djeluje vertikalno prema dolje.

## 2.3 Rezultati i analiza rezultata

### 2.3.1 Statička analiza

U tabeli 1 je dat prikaz polja napona, maksimalnih napona i polja pomjeranja samo za III slučaj opterećenja kada se izvozna posuda nalazi u gornjem položaju.

Procentualno učešće napona membrane (54,95%) i savijanja (45,05%), a procentualno učešće normalnih (69,20%) i smicajnih napona (30,80%). Na slici 2 je data analiza za III slučaj statičkog opterećenja:  $F_{max} = 135$  (kN);  $m_{koša} = 5775$  (kg);  $F_{du} = 16,5$  (kN).

Na slici 2. jasno se vidi raspodjela naprezanja kao i mjesta povišenih stanja naprezanja koja je potrebno eksperimentalno ispitati.

Tabela 2. Prikaz veličina za karakteristične tačke – OPTEREĆENJE III

Opterećenje (kN)	Položaj	NAPONI (MPa)					POMJERANJE (cm)		
		SigEkv	Sig	Tau	Mem	Sav	Xi	Yi	Zi
G <sub>r</sub> = 84,366 G <sub>du</sub> = 50,520 F <sub>du</sub> = 16,375	Tačka 3572	14,2	3,78	1,15	10,9	0,145	0,0175	-0,133	-0,0176
	Tačka 8042	1,33	0,386	1,29	1,26	0,127	0,0105	-0,037	-0,01

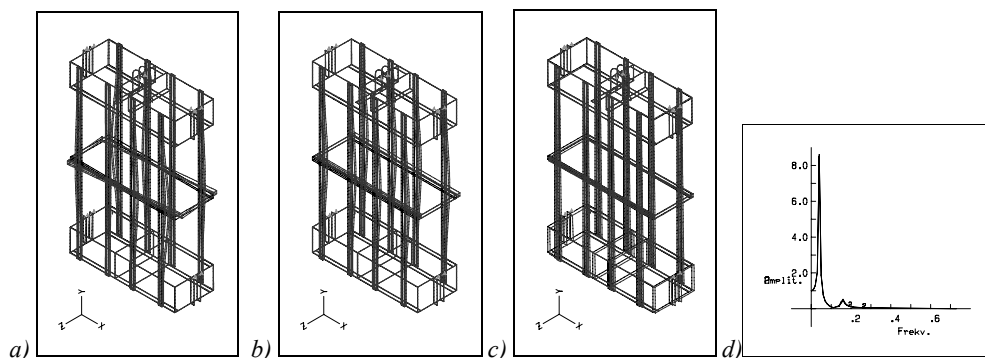
Za slučaj statičke analize maksimalna fleksija je dobijena u srednjoj zoni donjeg dijela konstrukcije, a ukupno ekvivalentno naponsko stanje pokazuje maksimalnu vrijednost u srednjoj zoni dva gornja potporna lima, blizu ovisnih ploča. Očekivani tok sile kroz konstrukciju je u smislu opterećenja dva gornja i donja srednja pojasa, kao i sredine četiri vertikalna štapa.

### 2.3.2 Dinamička analiza

U smislu kompleksne identifikacije dinamičkog ponašanja izvozne posude razmatrane su sopstvene oscilacije sistema, raspored kinetičke i potencijalne energije po strukturi, te frekventni domen za karakteristične tačke.

Tabela 3. Sopstvene oscilacije konstrukcije izvozne posude

Slobodne oscilacija (Hz)	Max. pomjeranje (cm)	Ravan oscilovanja	E <sub>p</sub> (%)	E <sub>k</sub> (%)
4,12	3,7	XZ – pravac x	66,7	33,3
10,03	4,6	XZ – pravac z	82,2	17,8
15,26	7,4	XZ – pravac z	64,7	35,3



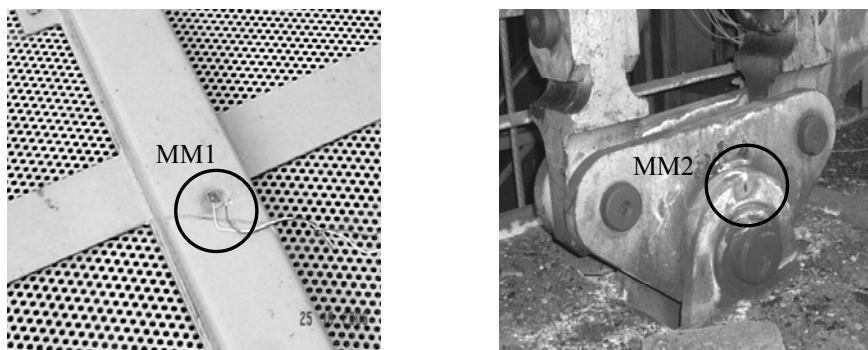
Slika 3. Dinamička analiza – sopstvene oscilacije: a)  $f_{01} = 4,12$  (Hz), b)  $f_{02} = 10,03$  (Hz), c)  $f_{03} = 15,26$  (Hz), d) frekventna analiza

Posmatranjem glavnih oblika oscilovanja očekuje se obično da kombinacija pobude i odziva osciluje najviše na prvoj frekvenci. Glavni oblici oscilovanja ukazuju na to da konstrukcija ima manju krutost u horizontalnoj ravni čemu su uzrok vertikalni spojni štاپovi. Također, mogu se primjetiti male vrijednosti sopstvenih frekvenci na svih 5 oblika oscilovanja, te bliskost frekvenci (pogotovo u zadnja 3 oblika).

### 3. EKSPERIMENTALNI MODEL I REALIZACIJA

#### 3.1 Raspored mjernih mjesta

Izbor mjernih mjesta na nosećoj konstrukciji napravljen je na temelju rezultata proračuna napreznja metodom konačnih elemenata i iskustvenim podacima. Ukupno su odabrana dva mjerna mjesta: MM1 – bočni štap, jedan tenzometar i mjesto MM2 – ovisna ploča, jedan tenzometar. Tokom ispitivanja korištene su mjerne trake - tenzometri LY 11-10/120 proizvodnje HOTTINGER BALDWIN MESSRECHNIK GMBH, u spoju sa mjernim instrumentom Spider 8 HBM. Na slici 4 prikazan je raspored mjernih traka na konstrukciji izvozne posude.

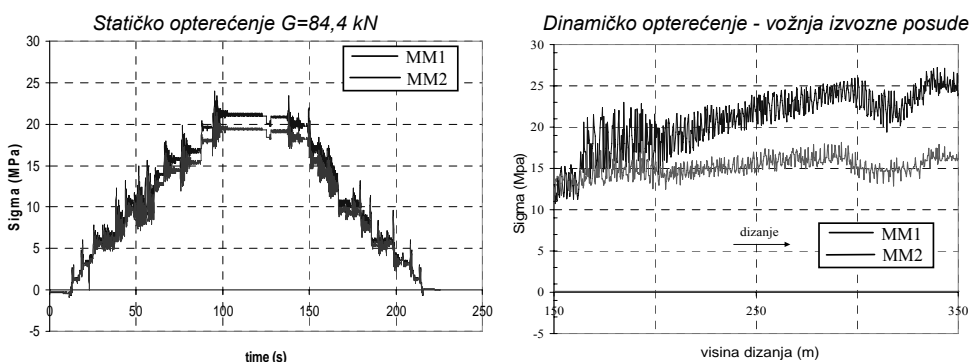


Slika 4. Raspored mjernih traka LY11-10/120 (HBM) - na konstrukciji izvozne posude

#### 3.2 Rezultati i analiza mjerenja

Statičko opterećenje konstrukcije izvozne posude provedeno je postepenim opterećivanjem posude korištenjem hidraulične prese sa mjernim setom za mjerenje unešene sile mjernog područja 0÷250 kN. Povećanje opterećenja praćeno je pomoću manometra sa podjelom u jedinicama sile kN. Opterećenje je vršeno u dvije faze. Veličina ispitnog opterećenja određena je na osnovu projektne dokumentacije i proračuna.

Dinamičko opterećenje izvozne posude snimano je neprekidno u toku vožnje ali na dijagramu prikazani su samo karakteristični detalji vožnje.



Slika 5. Naprezanja na mjernim mjestima MM1 i MM2 za vrijeme statičkog i dinamičkog opterećenja izvozne posude

Za vrijeme mjerenja tokom vožnje izvozna posuda opterećena je teretom  $m = 13750$  kg ili približno  $G=135$  kN. Na osnovu dobijenih eksperimentalnih vrijednosti deformacionih stanja mjernih mjesta, preračunate su vrijednosti napona za sve eksperimentalne tačke, a na kraju date su u tabeli 4 maksimalne vrijednosti napona u posmatranim elementima konstrukcije.

Tabela 4. Prikaz napona određenih eksperimentalno na mjernim mjestima MM1 i MM2

	Položaj posude	Opterećenje (kN)	Mjerno mjesto MM1		Mjerno mjesto MM2	
			Deformacija	Napon (MPa)	Deformacija	Napon (MPa)
Statička analiza	D	84,4	88E-06	18,6	74E-06	15,5
	G	134,9	110E-06	22,0	90E-06	19,0
Dinamička analiza	D	100,7	95E-06	20,9	85E-06	17,8
	G	151,3	115E-06	23,9	103E-06	21,6

U prelaznom (period ubrzanja i usporenja), a naročito u stacionarnom režimu rada pogona dizanja, maksimalno naprezanje izmjereno na mjernom mjestu MM1 ne prelazi 25 MPa. Ovo naprezanje znatno je manje od dopuštenih naprezanja materijala konstrukcije.

### 3.3 Komentar analize i komparacija rezultata

Eksperimentalne vrijednosti napona za sve tačke iz tabelu 5. upotrebljene su u smislu poređenja eksperimentalnih i numeričkih vrijednosti napona na referentnim mjestima izvozne posude.

Tabela 5. Uporedne vrijednosti napona određenih numerički eksperimentalno

	Opterećenje (kN)	Napono i odstupanja MM1			Napono i odstupanja MM2		
		$\sigma_N$ (MPa)	$\sigma_E$ (MPa)	%	$\sigma_N$ (MPa)	$\sigma_E$ (MPa)	%
Statička analiza	84,4	17,02	18,6	8,5	14,21	15,5	9,2
	134,9	19,54	22,0	11,2	16,73	19,0	12,3
Dinamička analiza	100,7	17,45	20,9	17,45	16,52	17,8	18,6
	151,3	19,92	23,9	16,65	16,24	21,6	24,6

Primijećeno je odstupanje eksperimentalnih i numeričkih vrijednosti napona manje pri statičkoj, a veće pri dinamičkoj analizi. Razlog je u posmatranom dinamičkom opterećenju elemenata konstrukcije samo pri prelaznom režimu rada pogona dizanja, (usljed inercijalnih sila), dok su dinamička opterećenja u periodu ustaljene vožnje zanemarena. Razlika ovih napona se pripisuje karakteristikama lošeg profila brzine, stepenastim spojevima zglobova vođica, ekscentričnošću užnica, trošenju vođica i vodećih točkova. Dakle rezonantna stanja mogu nastati tokom rada ovih postrojenja.

## 4 ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena je provjera napona konstrukcije izvozne posude: numerički i eksperimentalno. Na temelju svih provedenih proračuna i mjerenja može se zaključiti da rezultati numeričke analize, pokazuju da su naprezanja u konstrukciji izvozne posude u granicama koja su dopuštena za ovaj tip konstrukcije. Rezultati mjerenja za vrijeme statičkog opterećenja izvozne posude u skladu su s rezultatima proračuna te također potvrđuju gornji zaključak. Dinamička mjerenja provedena za vrijeme vožnje daju dopunski uvid u naprezanja koja se javljaju za vrijeme stvarnih uslova eksploatacije izvoznog postrojenja. Dinamička naprezanja koja su izmjerena u prelaznim i stacionarnim režimima rada pogonskog mehanizama mogu biti i do 25 % veća od statičkih, ali i ona su u dopuštenim granicama.

## 5 LITERATURA

- [1] xxx: Projektno tehnička dokumentacija Rudnika mrkog uglja u Zenici – pogon "Raspotočje".
- [2] xxx: Pravilnik o tehničkim normativima pri prevozu ljudi i materijala oknima rudnika –Tehnički propisi, Rudarstvo, Beograd, 1986, pp.490-526,
- [3] T. Maneski i dr.: Postavke čvrstoće konstrukcija, Mašinski fakultet Beograd, 2002.
- [4] Hadžalić M.: "Prilog definisanju proračuna pogona dizanja izvoznih postrojenja", Magistarski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici, Zenica, 2010.