



## PRILOG ANALIZI UZROKA OTKAZA KORENOG DELA INDUSTRIJSKOG ČELIČNOG DIMNJAKA

Mile Savković<sup>1</sup>, Milomir Gašić<sup>2</sup>, Goran Bošković<sup>3</sup>, Nebojša Zdravković<sup>4</sup>

*Rezime: U ovom radu razmatrani su uzroci zbog kojih je došlo do oštećenja industrijskog čeličnog dimnjaka visine 31 m. Vizuelnom kontrolom i ultrazvučnim merenjem debljine zida plašta dimnjaka utvrđena su mesta na kojima je došlo do oštećenja. Proračuni u analitičkom obliku i primenom metode konačnih elemenata (MKE) pokazuju da dimnjak zadovoljava kriterijum dopuštenog napona. Do oštećenja konstrukcije u kritičnom preseku došlo je usled superponiranja maksimalnih vrednosti napona u konstrukciji sa hemijskim i toplotnim uticajima.,*

*Ključne riječi: čelični dimnjak, naponsko stanje, analiza metodom konačnih elemenata*

### CONTRIBUTION TO THE ANALYSIS OF THE STEEL INDUSTRIAL CHIMNEY ROOT SECTION FAILURE

**Abstract:** *This paper considers the conditions upon which the 31 m tall industrial chimney was damaged. By visual control and ultrasonic examination of the chimney wall thickness, the areas of damage were detected. Analytical calculation and finite element analysis showed that the chimney fulfilled allowable stress criterion. The damage occurred due to superposition of chemical and thermal influences along with highest stress values.*

Keywords: steel chimney, stress state, finite element analysis

#### 1. UVOD

Pojava ozte enja eli nih konstrukcija industrijsih eli nih dimnjaka je esta pojava nakon vizegodiznje eksploatacije. Zavisno od tipa konstrukcije i namene, postoje razli iti uzroci koji mogu dovesti do ozte enja konstrukcije u toku njene eksploatacije, kao zto su: koncentracija napona, zamor, korozija, dinami ka optere enja, uticaj zavarivanja, uticaj agresivne sredine, temperaturni uticaj, ili kombinacije navedenih uticaja.

Kod visokih i vitkih eli nih konstrukcija kao glavni uticaj pojavljuje se dejstvo dinami ke sile vetra a u izuzetnim slu ajevima i zemljotresi. Kao dopunski nepovoljni uticaji pojavljuju se toplotni i hemijski uticaji koji zajedno sa dominantnim optere enjima i korozijom uti u na zamor materijala konstrukcije i smanjenej njegovog veka trajanja.

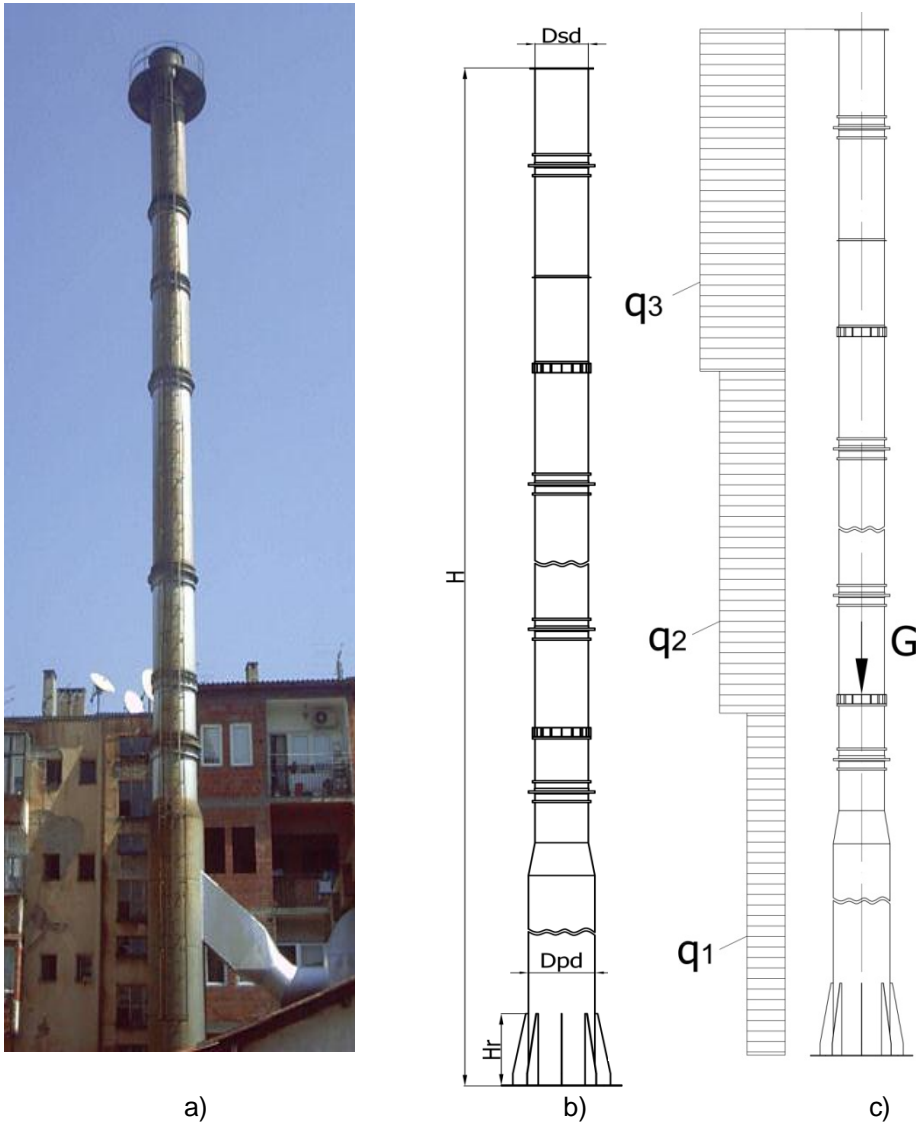
<sup>1</sup> Prof. dr Mile Savkovi , Kraljevo, Mazinski fakultet, savkovic.m@mfkv.kg.ac.rs

<sup>2</sup> Prof. dr Milomir Gazi , Kraljevo, Mazinski fakultet, gasic.m@mfkv.kg.ac.rs

<sup>3</sup> Goran Bozkovi , Kraljevo, Mazinski fakultet, boskovic.g@mfkv.kg.ac.rs

<sup>4</sup> Mr Nebojza Zdravkovi , Kraljevo, Mazinski fakultet, zdravkovic.n@mfkv.kg.ac.rs

eli ni dimnjak koji je predmet razmatranja u ovom radu nalazi se u sklopu kotlovskeg postrojenja u JKP Toplana Novi Pazar, Sl.1(a) u upotrebi je preko 30 godina. Vizuelnom kontrolom konstrukcije dimnjaka otkrivena su značajna oštećenja u podnožju dimnjaka, dok je ultrazvučnim merenjem utvrđeno da postoji otkriveno je još nekoliko lokacija sa oštećenjima spoljnjeg i unutrašnjeg zida dimnjaka i oštećenja na priрубnicama koje spajaju segmente dimnjaka



Sl.1 a) Industrijski čelični dimnjak kotlovskeg postrojenja JKP Toplana Novi Pazar b) Skica dimnjaka sa osnovnim dimenzijama c) Opterećenja koja deluju na dimnjak

Cilj ovog rada je utvrditi pravca prostiranja napona na osnovu opterećenja koja deluju na konstrukciju dimnjaka kao i određivanje odrednih mera za sprovođenje rekonstrukcije i sanacije dimnjaka radi bezbedne eksploatacije.

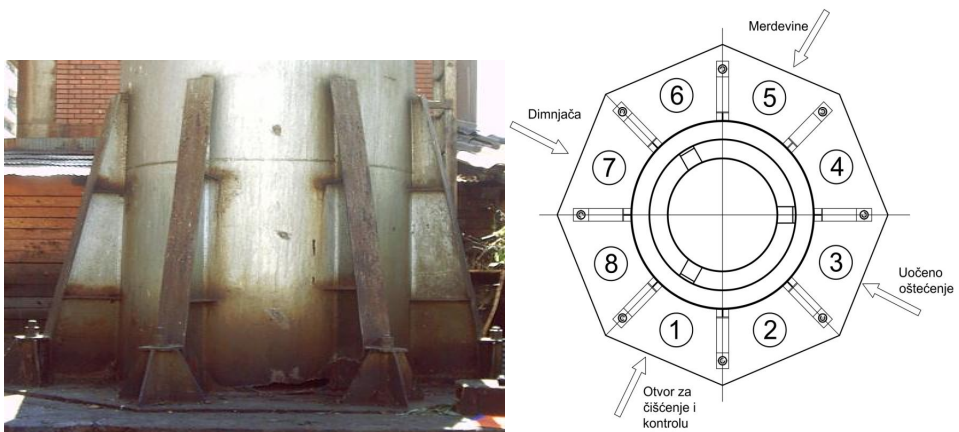
## 2. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE DIMNJAKA

Osnovne tehničke karakteristike industrijskog čeličnog dimnjaka date su u Tabeli 1. Konstrukcija dimnjaka sastoji se iz spoljnjeg i unutrašnjeg zida kao i platforme sa merdevinama za penjanje. Konstrukcija spoljnjeg zida sastoji se iz tri segmenta, koji su međusobno povezani prirubnicama i spojeni vijcima odgovarajuće vrste. Unutrašnji zid je kontinualnog tipa i on je odvojen od spoljnjeg zida dimnjaka im distancerima odvojen od spoljnjeg zida dimnjaka. Prvi segment dimnjaka sastoji se iz prozirenog i sušenog dela na koji se kasnije nastavljaju ostala dva segmenta. Na prvom segmentu se nalaze i dva otvora: jedan za prilivak dimnjača i drugi pravougaoni otvor sa vratima za iznenaženje i kontrolu dimnjaka.

Tabela 1. Osnovni podaci o dimnjaku

Visina (H)	31000 mm	Debljina korenog dela zida	8 mm
Spoljni prečnik proširenog dela dimnjaka ( $D_{pd}$ )	1426 mm	Debljina suženog dela zida i unutrašnjeg zida dimnjaka	5 mm
Spoljni prečnik suženog dela dimnjaka ( $D_{sd}$ )	1200 mm	Visina rebra za ojačanje ( $H_r$ )	1960 mm
Prečnik unutrašnjeg zida dimnjaka ( $D_{uz}$ )	900 mm	Materijal S235JRG2	$R_m=235 \text{ N/mm}^2$ $R_{eh}=340-470 \text{ N/mm}^2$

Dimnjak je zavarivanjem spojen sa čeličnom pločom koja je uz pomoć 8 anker zavrtanja ankereisana za fundament. Dimnjak je radi povećanja savojne krutosti ojačan sa 8 trapeznih rebara u podnožju dimnjaka Sl. 2a.



Sl.2 a) Koreni deo dimnjaka sa rebrima za ojačanje b) Prikaz mernih mesta kod vizuelne kontrole dimnjaka

Tokom eksploatacije dimnjak je izložen raznim tipovima opterećenja, među kojima dominira vetar, pri niskim i povizanim temperaturama, uz konstantno negativno dejstvo agresivne sredine koja potiče od produkata sagorevanja. Usled stohastičke prirode vetra pojedini delovi dimnjaka postaju skloni zamoru i kasnije oštećenjima. Na zamor materijala dodatni uticaj ima i hemijska korozija koja se javlja izdvajanjem kiselih jedinjenja iz dimnih gasova na unutrašnji zid dimnjaka.

### 3. KONTROLA NOSEĆE KONSTRUKCIJE DIMNJAKA

Da bi se sagledala sva oštećenja dimnjaka, izvršena je vizuelna kontrola dimnjaka i snimanje debljine spoljnjeg zida dimnjaka Sl.2b u osam polja po obimu zida na različitim visinama. Posle detaljne kontrole na dimnjaku je otkriveno da:

- U korenoj sekciji dimnjaka u polju 3 je došlo do potpunog oštećenja spoljnjeg zida dimnjaka Sl. 3
- U toku merenja debljine zida drugog segmenta, spoljnjaci deo omotača je pretrpeo potpuno oštećenje u zoni ukrštanja (polje 5)
- Unutrašnji zid kod trećeg segmenta je potpuno uništen i umesto prvobitnih 5mm debljina ne prelazi 1mm
- Distanceri (3 kom) koji spajaju spoljnjaci i unutrašnji zid su u potpunosti oštećeni tako da se unutrašnji zid oslanja na spoljnjaci
- Prirubnice koje povezuju segmente su deformisane a takođe i jedan deo zavrtnjeva je deformisan.

Najveće oštećenje dimnjaka nastalo je u korenoj sekciji dimnjaka Slika 3. usled dodatnih toplotnih i hemijskih uticaja.



Sl.3 Oštećenje korene sekcije dimnjaka.

#### 4. ANALITIČKI I NUMERIČKI PRORAČUN DIMNJAKA

Glavna opterećenja, u dejstvu je izložen dimnjak, a koja su uzeta u proračunu su:

- Sopstvena težina
- Dejstvo vetra
- Temperaturni uticaj
- Opterećenje snega i leda

Najvažnija opterećenja dimnjaka su sopstvena težina dimnjaka i sila vetra koji konstantno opterećuju konstrukciju dimnjaka Sl.1(c). Dimnjak predstavlja konzolni nosač sa prstenastim poprečnim presekom u svim segmentima. Usled prisustva otvora na spoljnjem zidu dimnjaka dolazi do promene momenta inercije u tom preseku i smanjenja nosivosti.

Na osnovu proračuna mase pojedinih elemenata i njihovim sabiranjem dobijamo opterećenje sopstvene težine:

$$m_u = 6900 \text{ kg} \rightarrow F_{st} = m_u \cdot g = 67.67 \text{ kN}$$

Opterećenje od sile vetra računamo na osnovu standarda [SRPS U.C7.110:1992; SRPSU.C7.111:1992; SRPS U.C7.113:1992].

$$W = q_{m,T,z} \cdot G_z \cdot C_f \cdot A_1 \text{ (kN)}$$

$q_{m,T,z} \left( \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right)$  - osrednjeni aerodinamički pritisak vetra

$G_z$  - dinamički koeficijent vetra

$C_f$  - koeficijent sile pritiska vetra zavisan od oblika konstrukcije

$A_1$  - površina izložena dejstvu vetra

$q_{m,T,z} = q_{m,T,10} \cdot S_z^2 \cdot K_z^2 \left( \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right)$ , pri čemu je:

$q_{m,T,10} \left( \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right)$  - osnovni pritisak vetra na visini od  $z=10\text{m}$

$S_z = 1.5$  -faktor uticaja topografije terena na brzinu vetra

$K_z = 0.91$  -faktor ekspozicije terena (uticaj hrapavosti terena na profil vetra)

Osnovni pritisak vetra računamo na osnovu izraza:

$$q_{m,T,10} = \frac{1}{2} \rho (g_{m,50,10} \cdot k_t \cdot k_T)^2 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right)$$

$g_{m,50,10} = 19 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$  - osnovna brzina vetra za teren hrapavosti  $\%B+$  i povratni period vetra

od  $T=50$  god, na visini od  $z=10$  m.

$\rho = 1.157 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$  - vredost gustine vazduha zadanad morskouvisinu opzttine Novi

Pazar  $H = 545 (m)$

$k_t = 1$  - faktor vremenskog osrednjavanja brzine vetra

$k_T = 1$  - faktor povratnog perioda osrednjene brzine vetra

$$q_{m,T,10} = \frac{1}{2} \rho \left( \mathcal{G}_{m,50,10} \cdot k_t \cdot k_T \right)^2 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{2} 1.163 (19 \cdot 1 \cdot 1)^2 \cdot 10^{-3} = 0.21 \left( \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right)$$

$$q_{m,T,z} = q_{m,T,10} \cdot S_z^2 \cdot K_z^2 = 0.21 \cdot 1.5^2 \cdot 0.91 = 0.391 \left( \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right)$$

$$A_1 \approx 40 \text{ m}^2$$

Na osnovu prora una prema datom standardu ukupno optere enje od sile vetra iznosi:

$$W_u = 24.1 (\text{kN})$$

Na osnovu prethodno izra unatih optere enja vrzimo naponsku analizu metodom kona nih elemenata (MKE)u programskom paketu ANSYS.

### FEM analiza

Na osnovu 3D modela dimnjaka i prethodno izra unatih optere enja, izvrzena je linearna stati ka analiza radi utvr ivanja naponskog stanja u konstrukciji dimnjaka. 3D model je izra en na osnovu podataka dobijenih merenjem i vizuelnom kontrolom dimnjaka. Sintezom 3D modela svih strukturnih delova, formiran je 3D model nose e konstrukcije dimnjaka. Za anlizu izabran je 10- vorni tetraedalni kona ni element (tetra-mesh).

Najve a pomeranja konstrukcije, usled dejstva sile vetra, su na vrhu dimnjaka i iznose 68,6 mm (Sl. 4b). U onosu na visinu dimnjaka veli ina pomeranja iznosi:

$$\frac{H}{f} = \frac{31000}{68.6} = 451.9$$

Ova veli ina pomeranja je u dopuztenim granicama i ne ugro0ava funkciju nose e konstrukcije dimnjaka.

Analiza dobijenih napona pokazala je da su najve e vrednosti u donjoj-korenoj zoni. Ova injenica je od velikog zna aja imaju i u vidu da se u ovom delu nose a konstrukcija oslabljena izradom revizionih otvora. Na mestu postavljanja ovih otvora dopunsko oja anje konstrukcije izvrzeno je ugradnjom rebara (Sl.3 ).

Vrednost najve ih napona u konstrukciji usled dejstva sile vetra je daleko manja od vrednosti napona na granici te enja:

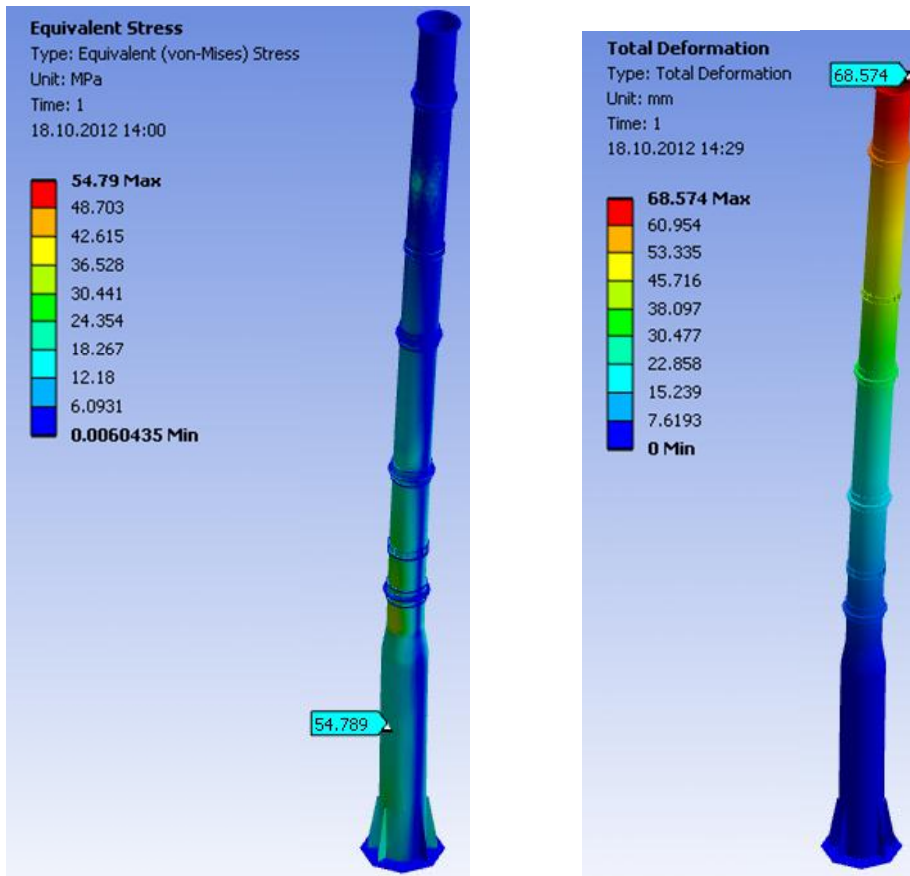
$$\frac{R_e}{\sigma_{\max}} = \frac{235}{54.8} = 4.3$$

Me utim u ovom delu dolazi do izdvajanja i talo0enja kiselih jedinjenja iz dimnih gasova koja nagrizaju unutrajnji plazt, a nakon njegovog ozte enja i razaranja i spoljazniji plazt dimnjaka.

Na zamor materijala dodatni uticaj ima i hemijska korozija koja se javlja izdvajanjem kiselih jedinjenja iz dimnih gasova na unutraznji zid dimnjaka

Izgled mreže za navedene oblike prikazan je na slikama 6-8, respektivno.

Rezultati analize napona i pomeranja, primenom metode kona nih elemenata prikazani su na Sl. 4a i Sl.4b.



Sl.4 a) Raspodela napona kod industrijskog dimnjaka analizom MKE b) Prikaz pomeranja industrijskog dimnjaka analizom MKE.

## 5. ZAKLJUČAK

Usvojeno konstrukcijsko rešenje eli nog industrijskog dimnjaka zadovoljava kriterijume dopuztenih napona i deformacija. Uporedni naponi su u granicama dozvoljenih a pomeranja vrha dimnjaka manja od dopuztenih za ovu vrstu konstrukcije. Ozte enja koja su se javila kod dimnjaka rezultat su kombinacije zamora materijala, hemijskih i toplotnih uticaja koji su delovali na konstrukciju dimnjaka.

Konstrukcija se mo0e sanirati uklanjanjem ozte enih delova i njihovu zamenu

novim, što je urađeno i nakon ovog inspeksijskog pregleda. Međutim, potrebno je prilikom izrade novih dimnjaka uzeti u obzir ove činjenice i izvršiti izvesne konstruktivne izmene na mestu spajanja dimnjaka i sa nosačima konstrukcijom dimnjaka, odnosno predvideti odgovarajuće mere koje bi se menjali nakon izvesnog vremena eksploatacije kako bi se zaštitili elementi na konstrukciji dimnjaka.

Za sve napravljene elemente konstrukcije dimnjaka koje su dugo godina u eksploataciji i koje nemaju ove mere, iz navedenih razloga preporučuje se redovna vizuelna i ultrazvučna kontrola elemente konstrukcije dimnjaka kao i zamena oštećenih elemenata.

## LITERATURA

- [1] S.A. Jenabali Jahromi, S. Javadpour, Kh. Gheisari (2006). Failure analysis of welded joints in a power plant exhaust flue. *Engineering Failure Analysis*, vol. 13, no. 4, p. 527-536.
- [2] J. Kawecki, J.A. Gura (2007). Cross-wind vibrations of steel chimneys - A new case history. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 95, no. 9-11, p. 1166-1175.
- [3] Mile Savković, Milomir Gazi, Dragan Petrović, Nebojša Zdravković, Radmila Pljaki (2012). Analysis of the drive shaft fracture of the bucket wheel excavator. *Engineering Failure Analysis*, vol. 20, p. 105-117.
- [4] Yu. A. Radin, T. S. Kontorovich, A. V. Davydov, S. A. Breiterman, K. N. Danilov and B. M. Sobolev (2004). Reconstruction of the Front End Gland of the Intermediate-Pressure Cylinder of the K-300-240 Turbine at the Konakovskaya GRES Using Mathematical Modeling. *POWER TECHNOLOGY AND ENGINEERING*, VOL. 38, NO. 2, P. 106-111.
- [5] A. P. Baskakov, V. A. Munts, N. F. Filippovskii and E. V. Cherepanova (2006). On the condensation of steam from combustion products in chimneys. *JOURNAL OF ENGINEERING PHYSICS AND THERMOPHYSICS*, vol. 79, no. 5, p. 875-885.
- [6] Gyu-ho Kim, Bok-won Lee, Hongbing Lua, Jong-hyun Park (2012). Failure analysis of an aircraft APU exhaust duct flange due to low cycle fatigue at high temperatures. *Engineering Failure Analysis*, vol. 20, p. 97-104.
- [7] Prat, M. et al. (2005). *CICIND Chimney Book*, CICIND, Zurich
- [8] Gazi M., Savković M., Marinković D., Marković G., Zdravković N. (2004). Statički proračun i analiza debljine zida njegovog plazta. *JKP Gradska Toplana, Novi Pazar*
- [9] M. Javed Hydera, M. Asif (2008). Optimization of location and size of opening in a pressure vessel cylinder using ANSYS. *Engineering Failure Analysis*, vol. 15, no. 1-2, p. 1-19.
- [10] M. Reihaniana, K. Sherafatniab, M. Sajjadnejad (2011). Fatigue failure analysis of holding U-bolts of a cooling fan blade. *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, no. 8, p. 2019-2027.
- [11] Bišćan Milan, Petrović Dragan (2011). Identifikacija uticaja kružnog otvora na naponsko stanje homogene izotropne jednoosno zategnute ploče. *IMK-14 - Istraživanje i razvoj*, vol. 17, no. 3, p. 17-22.
- [12] Standardi za proračun konstrukcija usled dejstva sile vetra: SRPS U.C7.110:1992; SRPS U.C7.111:1992; SRPS U.C7.113:1992.