

GRAĐEVINSKI FAKULTET UNIVERZITETA U BEOGRADU  
KATEDRA ZA TEHNIČKU MEHANIKU I TEORIJU KONSTRUKCIJA

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING OF THE UNIVERSITY OF BELGRADE  
CHAIR FOR TECHNICAL MECHANICS AND THEORY OF STRUCTURES



**TEORIJA KONSTRUKCIJA**  
**MONOGRAFIJA**  
**POSVEĆENA USPOMENI NA POKOJNOG AKADEMIKA**  
**PROF. DR MILANA ĐURIĆA**

**THEORY OF STRUCTURES**  
**MONOGRAPH**  
**DEDICATED TO THE MEMORY OF LATE ACADEMICIAN**  
**PROFESSOR DR MILAN DJURIC**

**UREDNIK / EDITOR**  
**Đorđe Vuksanović**

**Beograd**  
**2008**

Izdavač/Publisher  
GRAĐEVINSKI FAKULTET UNIVERZITETA U BEOGRADU  
Katedra za Tehničku mehaniku i teoriju konstrukcija

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING OF THE UNIVERSITY OF BELGRADE  
Chair for Technical Mechanics and Theory of Structures

Za izdavača/For the Publisher

Dorđe Vuksanović  
Dekan Građevinskog fakulteta/Dean of the Faculty of Civil Engineering

Glavni i odgovorni urednik/ Editor in chief  
Dorđe Vuksanović

Redakcioni odbor/ Editorial Board

Branislav Ćorić  
Dorđe Vuksanović  
Branislav Pujević  
Mira Petronijević

Tehnička priprema/Technical preparation  
Stanko Ćorić

Štampa/Printing  
Dedrapalst, Beograd

Tiraž 500 primeraka  
Number of copies 500

ISBN 978-86-7518-074-6

**Dušan NAJDANOVIĆ, Marina ČETKOVIĆ**

**TERMIČKA ANALIZA AB DIMNJAKA VISINE 120 m  
JKP "BEOGRADSKE ELEKTRANE"**

*THERMAL ANALYSIS OF RC 120M-HEIGHT CHIMNEY OF  
JKP »BEOGRADSKE ELEKTRANE«*

**Dr Dušan Najdanović, dipl. građ. inž., redovni profesor Građevinskog fakulteta u Beogradu**

Rođen je 1949. godine. Diplomirao je 1973., magistrirao je 1982. na Građevinskom fakultetu u Beogradu, a doktorirao je 1987. godine na E.P.F.L. u Lozani, Švajcarska. Redovni je profesor na grupi predmeta Betonske konstrukcije

**Mr Marina Četković, dipl. građ. inž., asistent Građevinskog fakulteta u Beogradu**

Rođena je 1974. godine. Diplomirala je 2000. i magistrirala je 2005. godine na Građevinskom fakultetu u Beogradu. Asistent je na grupi predmeta Teorije konstrukcija

*Rezime*

U radu su prikazane osnovne karakteristike dimnjaka Beogradskih elektrana u Beogradu visine 120 m. Prikazan je termografski snimak kamerom sa infracrvenim zracima koji je ukazivao da na dimnjaku postoje neravnomerne toplije i hladnije zone, što je ukazivalo na oštećenje termoizolacije. Proračun i analiza statičkih uticaja od temperaturnih promena u zidu dimnjaka pri radnim temperaturama gasova koje su više od proračunskih temperatura iz originalnog projekta, kao i statičkih uticaja koji nastaju u slučajevima oštećenja termoizolacije, ukazuju da može doći do ozbiljnih prekoračenja napona u betonu i armaturi zida dimnjaka. S tim u vezi data je metodologija pregleda spoljašnje površine zida dimnjaka, kao i pregled unutrašnje termoizolacije sa ciljem da se utvrdi stanje bitnih elemenata armirano betonske konstrukcije dimnjaka i definišu potrebne sanacione mere, kako bi se objekat doveo u ispravno stanje.

*Summary*

This paper presents basic characteristics of "Beogradske elektrane" 120 m-height-chimney in Belgrade. The thermographic snapshot is made by infra-red rays camera indicating existence of unequal warmer and cooler zones as result of thermoinsulation damage. Design and analysis of static forces arising out of changes of temperature in wall of chimney by gases operation temperatures being higher than temperatures from original design, as well as static forces arising out of thermoinsulation damage, are indicating possible exceeding of ultimate strength in concrete and reinforcement of chimney wall. Therefore, the methodology for surveying outer as well as inner thermoinsulation surface of chimney wall is given in order to determine the state of essential elements of reinforced concrete structure of chimney and to define necessary retrofit intended to bring the system into the operating state.

## 1. Uvod

Na osnovu ugovora između JKP "BEOGRADSKE ELEKTRANE" i Građevinskog Fakulteta – Instituta za materijale i konstrukcije – IMK, predviđeno je vršenje određenih istraživanja i pregleda armiranobetonskog dimnjaka visine 120 m, koji je projektovan za odvođenje gasova iz tri

kotla. U ovoj fazi eksploatacije na dimnjak su priključena dva kotla i dimnovodni kanal iz parne kotlarnice.

Cilj pregleda, predviđenih istražnih radova, dopunskih ispitivanja i analiza rezultata proračuna je procena i utvrđivanje stanja bitnih elemenata armirano betonske konstrukcije dimnjaka i

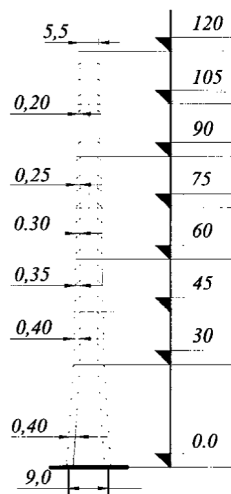
definisane potrebne sanacione mere, kako bi se objekat doveo u ispravno stanje.

## 2. Opis objekta

### 2.1 Geometrija objekta

Dimnjak je visine 120 m sa ab plaštom koji je konusnog oblika od kote terena  $\pm 0.00$  do kote +30 m, a zatim je cilindričnog oblika do vrha, odnosno do kote +120m. Spoljašnji prečnik na koti  $\pm 0.00$  je 9 m, a od kote +30 pa do vrha je 5.5 m.

Debljina ab zida – plašta dimnjaka je stepenasto promenljiva od 40 cm u nižim delovima, do 20 cm na vrhu (debljina zida se menja stepenasto: 40 / 35 / 30 / 25 / 20 cm, slika 1), a promene debljina su izvršene na mestima konzolnih ispusta za nošenje unutrašnjeg ozida. Plašt dimnjaka je armiran obostrano horizontalnom i vertikalnom armaturom do kote 30 m, a zatim do vrha dimnjaka armiranje je samo u spoljašnjoj zoni plašta.



Slika 1 Geometrija dimnjaka

### 2.2 Kvalitet ugrađenog materijala

Projektom je predviđeno da ab plašt dimnjaka bude izveden betonom MB 30 armiran glatkom armaturom GA 240/360.

### 2.3 Fundiranje dimnjaka

Dimnjak je fundiran na armiranobetonsku kružnu ploču MB 30, debljine 2.5 m i prečnika 15 m, koja se na koti  $-4.00$  m oslanja na grupu od 72 šipa sistema "FRANKI". Šipovi su prečnika  $\varnothing 520$  mm, dužine 19 m, nosivosti 1000 kN (100 t) i kvaliteta betona MB 30.

### 2.4 Unutrašnji dimovodni kanal

Unutrašnja dimovodna cev (ozid) je od radijalne kiselo otporne opeke debljine 10 cm. Unutrašnji prečnik dimovodne cevi je do kote 30 m promenljiv, a od ove kote pa do vrha je 4.2 m.

Između unutrašnje površine ab plašta i ozida je neventiliran vazdušni prostor i termoizolacija od

mineralne vune promenljive debljine: od 15 cm u nižim delovima dimnjaka, pa do 5 cm u poslednje dve lamele na vrhu dimnjaka.

Ozid je urađen u lamelama visine 15 m. Do kote 30 m ozid i termoizolacija se oslanjaju na konzolna ojačanja izvedena proširenjem iz ab plašta kontinualno po celom obimu dimnjaka, a od kote 45 m, ozid i termoizolacija se oslanjaju na kružne prstenaste grede oslonjene na 6 konzolnih ispusta iz ab plašta. Ove konzole i ab prstenovi se nalaze na mestima promene debljine plašta, odnosno, počevši od kote 45 m na svakih 15 m visine dimnjaka. Na vrhu dimnjaka je izrađen armirano betonski prsten, prekriven kapom od livenog gvožđa.

### 2.5 Temperaturni režim rada dimnjaka

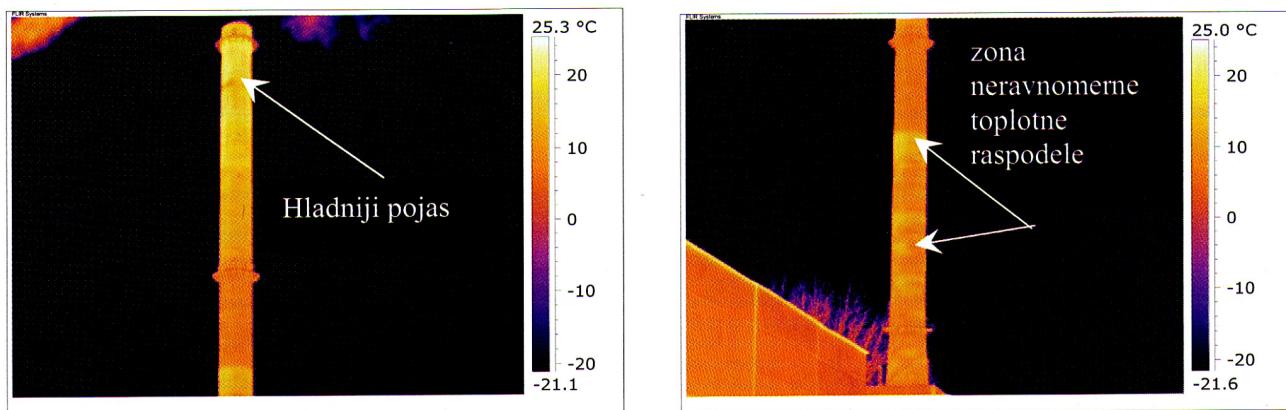
Investitor je dostavio i sledeće podatke o temperaturnom režimu rada: u toku grejne sezone 2004/05. godine maksimalna temperatura gasova na izlazu iz kotla VK6 je  $219^{\circ}\text{C}$ , a iz kotla VK7 je  $173^{\circ}\text{C}$ . Kotlovi VK 6 i VK 7 su snage 116 MW.

## 3. Termovizijsko snimanje dimnjaka

Pri definisanju metodologije pregleda dimnjaka i sa tim u vezi, obima vršenja istražnih radova, vođeno je računa da je Investitor tokom marta meseca izvršio termovizijsko snimanje dimnjaka. Snimanje je obavljeno 20.03.2005. u dnevnim uslovima, sa IR kamerom iz pet pravaca. Prema podacima vreme je bilo vedro, brzina vetra 3 m/s, relativna vlažnost 70 %, a spoljašnja temperatura  $5^{\circ}\text{C}$ . Prilikom ovog snimanja kotao VK6 nije bio u funkciji, tako da dimnjak nije bio u potpunosti opterećen.

Ovim termografskim snimanjem je konstatovan hladniji pojas na oko 8 m ispod gornje platforme, kota oko 110 m, i topla zona na oko 15 m ispod srednje platforme, odnosno, na koti oko 60 m. Ispod pojasa tople zone do donje platforme, na koti oko 30 m, uočena je neravnomerna raspodela toplote sa blažim temperaturnim promenama, slika 2.

Termografski snimci su ukazivali na oštećenja ozida koja su nastala naročito na međusobnim prelazima pojedinih lamela (svaka pojedinačna lamela je dužine 15 m).



Slika 2. Termografski snimak dimnjaka [1]

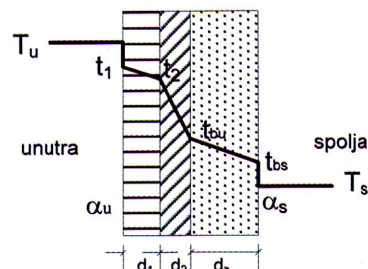
#### 4. Računska analiza proračunskih temperatura u ab plaštu

U osnovnom projektu proračun statičkih uticaja izazvanih temperaturnom promenom u ab plaštu je urađen sa pretpostavljenom računskom temperaturom dimnih gasova od 180 °C (podaci definisani projektnim zadatkom u originalnom projektu). Pri tome je računski spoljašnja temperatura usvojena -10 °C, što odgovara najnepovoljnijem slučaju - zimskom periodu rada dimnjaka sa najvećom temperaturnom razlikom između temperature u unutrašnjosti dimnjaka i spoljašnje temperature vazduha. Kako je kasnije, u eksploataciji, temperaturni režim promenjen na temperaturu gasova od 220 °C, pristupilo se kontrolnim temperaturnim proračunima radi analize uticaja ove promene na ab konstrukciju dimnjaka i na konstrukciju ozida. Takođe je proračunom trebalo da se analizira promena statičkih uticaja u plaštu dimnjaka u slučajevima oštećenja termo izolacije registrovanih na termografskim snimcima.

##### 4.1 Određivanje računске temperaturne razlike u ab zidu plašta dimnjaka

Razlika u temperaturi vazduha spolja i unutar dimnjačke cevi (koja je definisana temperaturom gasa – dima) dovešće do provođenja toplote kroz sve slojeve dimnjačkog zida. Na taj način, doći će do temperaturne razlike na spoljašnjoj i unutrašnjoj strani armiranobetonskog plašta debljine  $d_z$ , slika 3, odnosno do pojave temperaturnog gradijenta. U proračunu su uvedene uobičajene pretpostavke: da je temperaturni gradijent linearna funkcija po debljini zida, kao i da je temperatura dimnjačkog gasa, odnosno spoljašnjeg vazduha, konstantna celom visinom dimnjaka. Samo provođenje toplote kroz armiranobetonski zid, koji nas najviše interesuje, zavisice umnogome i od sposobnosti spoljašnjih i unutrašnjih površina, da apsorbuju ili reflektuju toplotu okolnog vazduha. U slučaju

razmatranog dimnjaka, sa spoljašnje strane je armiranobetonski zid, a sa unutrašnje strane je ozid - obloga od kiselo otporne šamotne opeke. Unutrašnji vazdušni sloj je bez ikakve ventilacije. Zavisno od materijala od koga je sačinjen sloj, pri transportu toplote dolazi i do konvektivnog prelaza sa vazduha na zid na toplijoj – unutrašnjoj strani, i sa zida na vazduh na hladnijoj – spoljnoj strani zida, disipacije toplote na površini zida, usled čega se javlja skok u temperaturi između vazduha i odgovarajuće površine, slika3.



Slika 3. Dijagram provođenja toplote kroz složeni dimnjački zid (slojevi od unutra prema spolja: kiselo otporna opeka, termo izolacija, ab plašt)

U preseku složenog zida koji sadrži više različitih materijala, količina toplote koja prolazi kroz takav slojeviti zid jedinične površine, vodeći računa da su gustine toplotnih flukseva konvekcije i kondukcije jednake, iznosi:

$$Q = \frac{1}{d_1 / \alpha_1} (t_1 - t_2) = \frac{1}{d_2 / \alpha_2} (t_2 - t_{bu}) \quad (1)$$

$$= \frac{1}{1 / \alpha_u} (T_u - t_1) = \frac{1}{1 / \alpha_s} (t_{bs} - T_s)$$

gde su uvedene sledeće oznake:

$T_u$  - temperatura gasa u unutrašnjosti dimnjaka,  
 $T_s$  - temperatura vazduha sa spoljašnje strane dimnjaka,

$t_i$  - temperature na površinama pojedinih slojeva,  
 $d_i$  - debljine pojedinih slojeva,  
 $\alpha_i$  - koeficijenti toplotne provodljivost materijala pojedinih slojeva,  
 $\alpha_u, \alpha_s$  - koeficijenti prelaza toplote na unutrašnjoj i spoljašnjoj strani zida, gde  $\alpha_u$  zavisi od unutrašnjeg prečnika dimnjaka, temperature i brzine kojom se kreće gas unutar cevi i koja se, za proračun, obično usvaja 15 do 20 m/s.

Iz gornjeg izraza, gustina toplotnog fluksa za složenu dimnjačku cev može se pisati u obliku:

$$Q = \frac{(T_u - T_s)}{\frac{1}{\alpha_u} + \frac{d_1}{\alpha_1} + \frac{d_2}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_v} + \frac{1}{\alpha_s}} = \frac{(T_u - T_s)}{R_e} \quad (2)$$

gde je  $R_e$  oznaka za ekvivalentnu toplotnu otpornost svih slojeva složenog zida uvećanu za otpornost prelaza toplote na spoljašnjim stranama zida i unutrašnjeg vazdušnog prostora ( $\alpha_v$  je koeficijenti prelaza toplote unutrašnjeg vazdušnog prostora).

Na osnovu izraza (2), temperaturni gradijent  $\Delta t = (t_{bu} - t_{bs})$  u armiranobetonskom plaštu debljine  $d_z$  jednog složenog dimnjačkog zida sa unutrašnjim vazdušnim prostorom koji nije ventiliran, može se odrediti na osnovu relacije:

$$\Delta t = (t_{bu} - t_{bs}) = \frac{1}{R_e} \cdot \frac{d_z}{\alpha_b} (T_u - T_s) \quad (3)$$

Temperatura na unutrašnjoj strani armiranobetonskog zida se određuje iz izraza:

$$t_{bu} = T_s + (T_u - T_s) \frac{1}{R_e} \left( \frac{d_z}{\alpha_z} + \frac{1}{\alpha_s} \right) \quad (4)$$

Uticaoj temperaturnog gradijenta  $\Delta t$  na cilindričnu armiranobetonšku dimnjačku cev je takav da proizvodi izduženje  $\Delta l = \alpha_z \Delta t$  unutrašnjih vlakana na zagrejanoj strani armiranobetonskog zida u odnosu na spoljašnju - hladnu stranu. Efekat ove nejednake deformacije je pojava složenog naponskog stanja savijanja u radijalnom i tangencijalnom pravcu armiranobetonskog zida, usled čega se javljaju naponi zatezanja na spoljnoj, a naponi pritiska na unutrašnjoj strani zida.

Koeficijenti  $\alpha_i$  su uzeti prema danas važećem standardu JUS.U.C5.050 pod nazivom: PROJEKTOVANJE I GRAĐENJE VISOKIH INDUSTRIJSKIH DIMNJAKA OD ARMIRANOG BETONA, pravilnik br. 07-93/135 od 15. 05.1987. objavljen u Službenom listu SFRJ, br. 54/87.

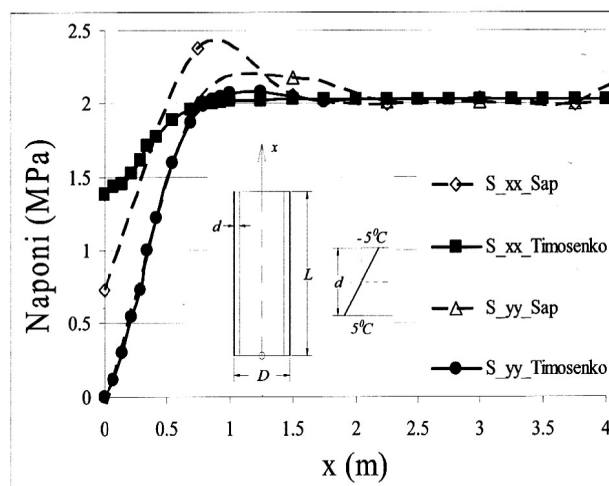
## 4.2 Statički uticaji usled temperature

### 4.2.1 Izotropni cilindar izložen linerano promenljivoj temperaturnoj razlici po debljini zida cilindra

Timošenko<sup>[2]</sup> je dao analitičko rešenje termičkih napona u izotropnom cilindru sa slobodnim krajevima, izloženom linearno promenljivoj temperaturi po debljini zida. Prema ovom rešenju, podužni naponi  $\sigma_{xx}$  i radijalni naponi  $\sigma_{yy}$  na spoljašnjoj i unutrašnjoj površini zida cilindra, u tačkama dovoljno udaljenim od krajeva cilindra, mogu se sračunati iz izraza:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \pm \frac{E \alpha (T_s - T_u)}{2(1-\nu)} \quad (5)$$

gde je  $E$  moduo elastičnosti materijala,  $\nu$  Poisson-ov koeficijent,  $T_s$  i  $T_u$  temperature na spoljašnjoj i unutrašnjoj površini zida cilindra. Analiziran je cilindar sledećih karakteristika materijala:  $E = 36.85 \text{ MPa}$ ,  $\alpha = 7.710^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ ,  $\nu = 0.3$  i prečnika  $D = 3 \text{ m}$ . Debljina zida cilindra je  $d$ . Zamenom prethodnih parametara u jednačinu (5) dobijeni su u preseccima dovoljno daleko od krajeva cilindra podužni i radijalni naponi od  $+2.03 \text{ MPa}$  i  $-2.03 \text{ MPa}$  na unutrašnjem i spoljašnjem zidu cilindra. Rezultati Timošenka su upoređeni sa modelom dimnjaka formiranom po MKE u programu Sap2000. Usvojena je mreža četvorougaoih shell konačnih elemenata, sa odnosom strana bliskim jedinici. Teorijski rezultati koje je dao Timošenko i rezultati MKE, prikazani su na slici 4.



Slika 4. Promena podužnih napona  $S_{xx}$  i radijalnih napona  $S_{yy}$ , na slobodnoj ivici cilindra usled linearno promenljive temperature po debljini zida cilindra

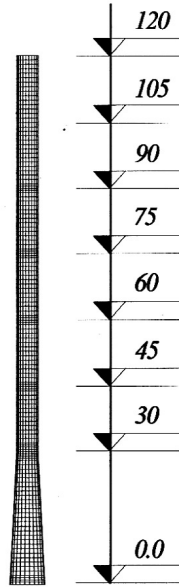
Sa slike 4 uočavamo da oba napona  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  imaju male vrednosti na slobodnom kraju,

odnosno da kako se udaljavamo od slobodnog kraja, ovi naponi naglo rastu i na rastojanju približno jednakom polovini prečnika cilindra, dostižu istu vrednost od  $2.03 \text{ MPa}$ .

#### 4.2.2 Računski model dimnjaka za termičku analizu programom SAP 2000

Pošto se u prethodnom primeru potvrdila pouzdanost shell konačnog elementa u oblasti termičke analize, formiran je realan model ab dimnjaka. Usvojen je materijal sledećih karakteristika:  $\nu=0.2$ ,  $E=2.1 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ ,  $\alpha_z=10^{-5} \text{ } 1^\circ\text{C}$ .

Granični uslovi su uklještenje u osnovi i slobodan kraj na vrhu dimnjaka. U programu Sap2000 formiran je numerički model dimnjaka po MKE, prikazan na slici 5. Usvojena je mreža od 2993 četvorougona shell elementa, sa odnosom strana bliskim jedinici. Na mestima na kojima se očekivala koncentracija napona, tj. u osnovi dimnjaka, mestima skokova u temperaturnom režimu, kao i mestima naglih promena u geometriji poprečnog preseka, usvojena je finija mreža konačnih elemenata.



Slika 5 Model dimnjaka

#### 4.2.3 Temperaturni režimi

Analizirani su uticaji u dimnjaku usled tri temperaturna režima, prikazana u tabeli 1. Prvi, u oznaci T\_180 odnosio se na stanje projektovane računске temperature od  $180^\circ\text{C}$  i projektovne termoizolacije, drugi, u oznaci T\_219\_1 na stanje povišene temperature u eksploataciji od  $219^\circ\text{C}$  i projektovne termoizolacije i treći, u oznaci T\_219\_2 na stanje pri temperaturi  $219^\circ\text{C}$  kada je

na koti između +30 m i +40 m došlo do otpadanja termoizolacije.

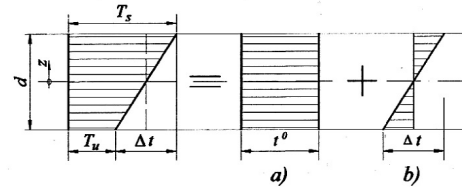
$d$	$t^0$	$\Delta t$	$t^0$	$\Delta t$	$t^0$	$\Delta t$
0.20	10	22	14	26	14	26
0.25	4	16	7	20	7	20
0.30	5	19	8	23	8	23
0.35	6	22	10	27	10	27
0.40	3	19	6	22	6	104

Tabela 1. Temperaturni režimi

Pretpostavljeno je da je zagrevanje dimnjaka osnosimetrično i da se menja prema izrazu:

$$T(x, z) = t^0(x) + \Delta t(x) \frac{z}{d} \quad (6)$$

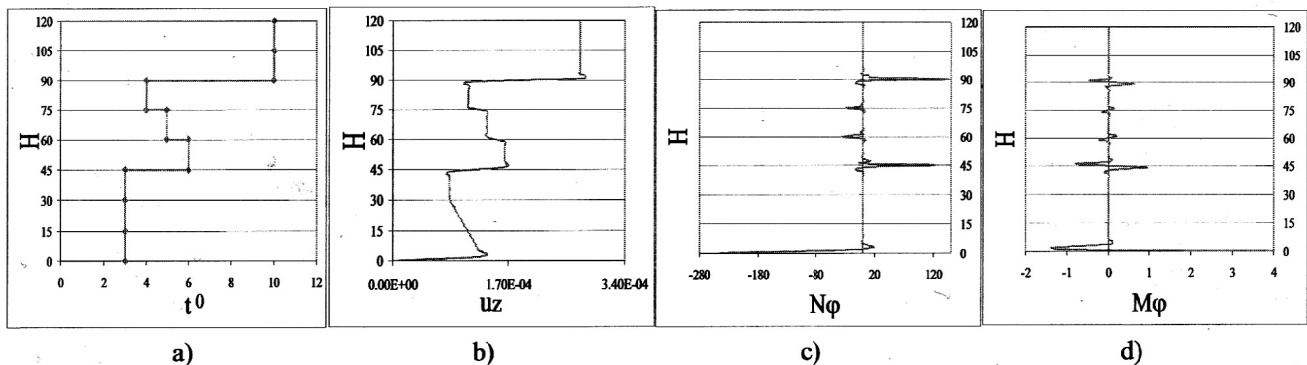
gde su:  $t^0 = \frac{T_s + T_u}{2}$  temperatura u osi zida dimnjaka,  $\Delta t = T_s - T_u$  temperaturna razlika po debljini zida dimnjaka sa vrednošću nula u srednjoj ravni, kako je prikazano na slici 6.



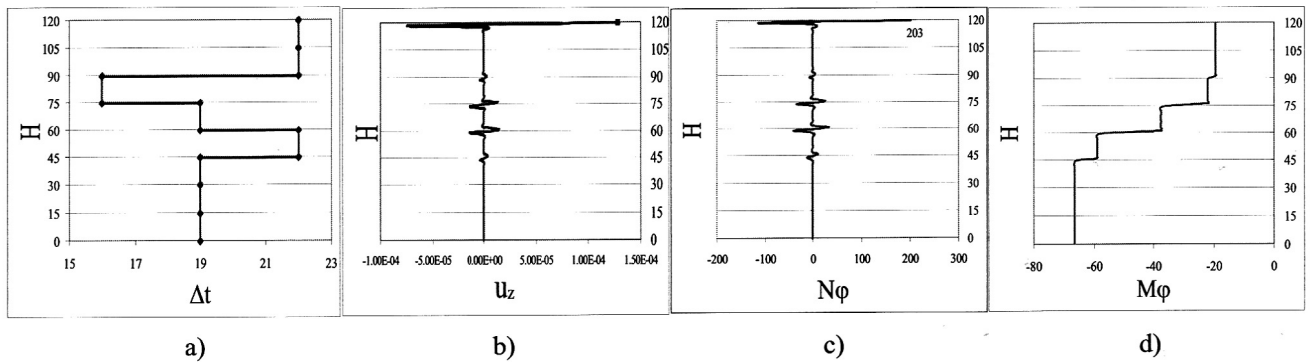
Slika 6. Raspodela temperature po debljini zida ljske

#### 4.2.4 Uticaju u dimnjaku usled temperature

Dobro je poznato da je naprezanje kružne cilindrične ljske usled temperaturnog polja (6) opisano jednom diferencijalnom jednačinom, što za posledicu ima istovremenu pojavu membranskog stanja i savijanja srednje ravni ljske. Sa željom da se ukaže na doprinos koji svaka od komponenti a) i b) sa slike 6 ima na ukupno naprezanje u dimnjaku, na slici 7 i slici 8 dat je prikaz temperaturnog polja, radijalnog pomeranja  $u_z$ , aksijalnih sila u radijalnom pravcu  $N_\varphi$  i radijalnih momenata savijanja  $M_\varphi$  pri režimu T\_180.



Slika 7. Uticaji u dimnjaku usled  $t^0$  pri režimu temperature T\_180: b) radijalno pomeranje, c) aksijalne sile u radijalnom pravcu, d) radijalni momenti savijanja



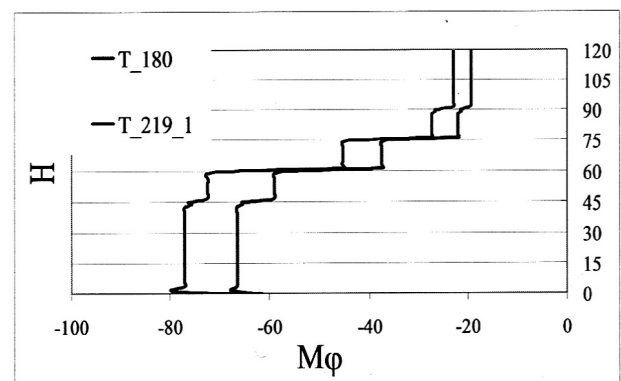
Slika 8. Uticaji u dimnjaku usled  $\Delta t$  pri režimu temperature  $T_{180}$ : b) radijalno pomeranje, c) aksijalne sile u radijalnom pravcu, d) radijalni momenti savijanja

Sa slike 7 uočavamo da usled konstantne temperature  $t^o$  u osi zida, radijalna pomeranja tačaka (slika 7.b) gotovo u potpunosti prate skokoviti temperaturni režim (slika 7.a) po visini dimnjaka. Kao posledica sprečenog širenja u osnovi zida, dimnjak je lokalno pritisnut do visine od oko dva metra iznad osnove velikom silom pritiska u radijalnom pravcu. Kako se udaljavamo od osnove dimnjaka, statički uticaji teže nultim vrednostima. Do lokalnih poremećaja u statičkim uticajima po visini dimnjaka, ponovo dolazi samo na mestima naglih promena u temperaturnom režimu.

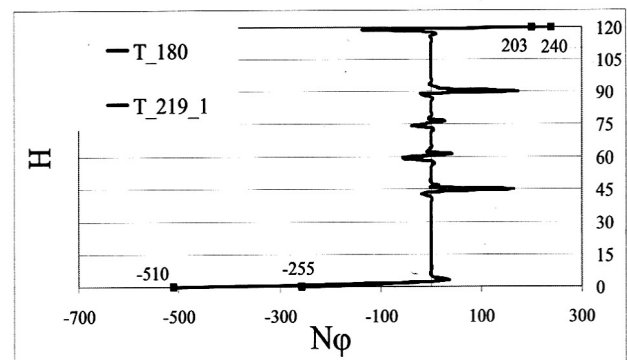
Linearno promenljivi gradijent temperature  $\Delta t$ , prikazan na slici 8a, izaziva gotovo čisto savijanje ljuske duž segmenata sa uniformnim režimom temperature. Do složenog napreznja, uz istovremeno prisustvo radijalnih momenata savijanja i radijalnih sila, dolazi u zonama naglih promena u temperaturnom režimu, slike 8 c i 8 d. Ovakvi lokalni efekti u saglasnosti su i sa deformisanim oblikom dimnjaka sa slike 8.b.

Dakle, može se zaključiti da na mestima poremećaja nastlih uslovima oslanjanja, odnosno naglih promena u temperaturi, ima smisla govoriti o istovremenom uticaju temperature  $t^o$  u osi zida i temperaturnog gradijenta  $\Delta t$  po debljini zida dimnjaka. Izvan ovih mesta, uticaji usled temperature  $t^o$  u osi zida postaju zanemarljivi, pa temperaturni gradijent postaje dominantan faktor koji utiče na veličinu napreznja u dimnjaku.

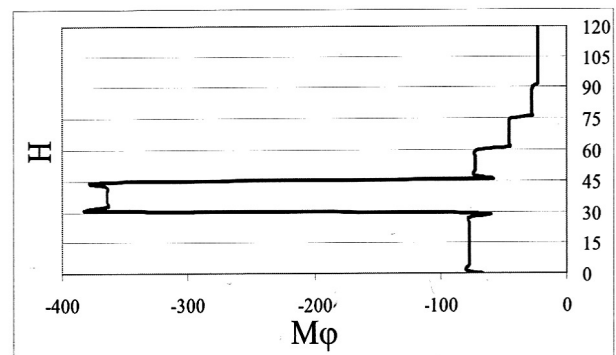
Na slici 9 i slici 10 prikazani su radijalni momenti savijanja i radijalne sile usled istovremenog delovanja  $t^o$  i  $\Delta t$ , pri temperaturnim režimima  $T_{180}$  i  $T_{219_1}$ . Sa povećanjem temperature pri istoj debljini termoizolacije, povećanje statičkih uticaja je izraženije u delovima dimnjaka sa većim debljinama zida.



Slika 9. Radijalni momenti savijanja u dimnjaku pri režimu temperature  $T_{180}$  i  $T_{219_1}$



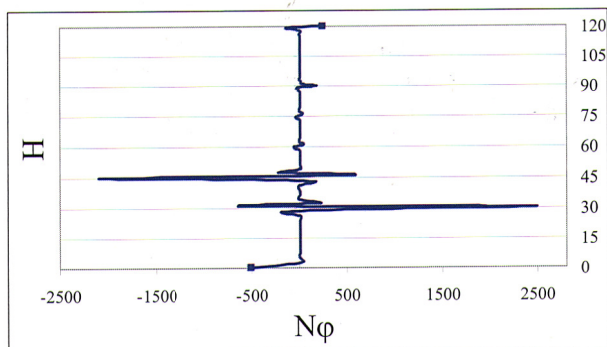
Slika 10. Aksijalne sile u radijalnom pravcu u dimnjaku pri režimu temperature  $T_{180}$  i  $T_{219_1}$



Slika 11. Radijalni momenti savijanja u dimnjaku pri režimu temperature  $T_{219_2}$



Konačno, na slici 11 i slici 12 su prikazani uticaji u dimnjaku pri režimu temperature  $T_{219\_2}$ , kada je na koti između +30 m i +40 m došlo do otpadanja termoizolacije.



Slika 12. Aksijalne sile u radijalnom pravcu u dimnjaku pri režimu temperature  $T_{219\_2}$

Primećujemo da na mestu naglog skoka vrednosti temperature, između kota +30 m i +40 m, istovremeno dolazi i do značajnog skoka u veličini radijalnih momenata savijanja i radijalnih sila. Na osnovu izraza (5), i do sada rečenog, zaključujemo da je veličina skoka u radijalnim momentima savijanja direktno proporcionalna odnosu temperaturnih gradijenata, odnosno da je veličina skoka u radijalnim silama direktno proporcionalna odnosu temperatura u osi, pri stanju  $T_{219\_1}$  sa izolacijom i stanju  $T_{219\_2}$  bez izolacije između kota +30 m i +40 m.

## 5. Metodologija pregleda

Rezultati računskih analiza sprovedenih u tački 4, kao i analiza prethodno navedenih podataka, ukazivali su da je na dimnjaku potrebno izvršiti sledeće preglede radi utvrđivanja:

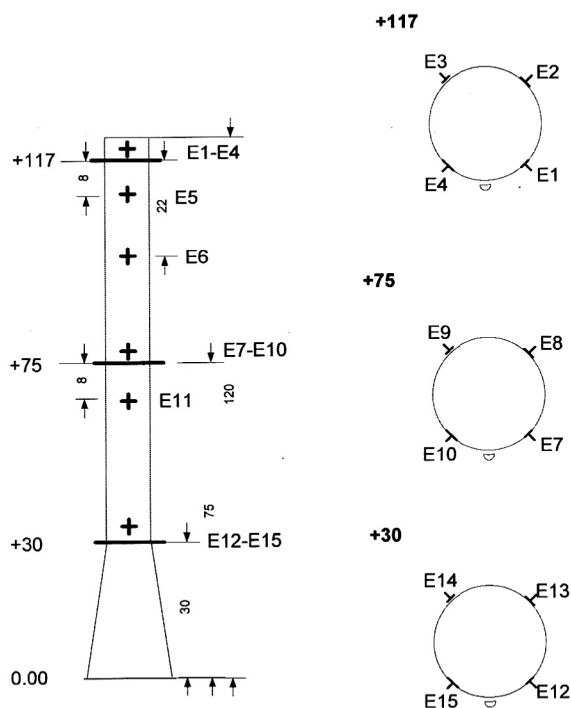
- stanja spoljašnje površine ab plašta dimnjaka,
  - stanja termoizolacije između ab plašta i unutrašnjeg ozida,
  - mehaničkih i fizičkih karakteristika betona.
- Utvrđivanje stanja i oštećenja noseće armiranobetonske konstrukcije dimnjaka izvršilo bi se uz pomoć alpinista spuštanjem preko užadi postavljenih u 5 sekcija po obimu dimnjaka i pregledom površine plašta iz neposredne blizine, pri čemu je, na taj način omogućeno osmatranje svake pojedinačne sekcije ukupne širine približno 3 m. Ovi vizuelni pregledi bi služili za izradu tehničkog snimka oštećenja uočenih na spoljašnjoj površini ab plašta dimnjaka. Na snimcima bi se prikazala oštećenja prema unapred urađenoj klasifikaciji oštećenja karakterističnoj za armiranobetonske konstrukcije.

Pored ovih pregleda, u cilju izrade tehničkog snimka oštećenja, vršilo bi se i snimanje oštećenja digitalnim fotoaparatom radi sačinjavanja odgovarajuće fotodokumentacije kao pratećeg priloga dokumentacije o stanju konstrukcije.



Slika 13. Radijalni momenti savijanja po visini dimnjaka pri stanjima  
a) T 180, b) T 219 1 i c) T 219 2

- b) Zbog nemogućnosti da se na drugi način izvrši pregled zatvorenog prostora između ab plašta i unutrašnje obloge - ozida dimnjaka, utvrđivanje stanja termoizolacije izvršice se endoskopskim snimanjem međuprostora između ab plašta dimnjaka i ozida. Snimanje pomoću sonde video endoskopa vršice se kroz prethodno bušenje otvora u plaštu sa radnih platformi i mernih mesta između radnih platformi prema sledećem rasporedu, slika 14:



Slika 14. Dispozicija mesta snimanja termoizolacije pomoću video endoskopa

Koristeći sondu video endoskopa potrebno je pregledati prostor levo, desno i dole od mernog mesta i izvršiti fotografisanje izolacije, ozida od šamotne opeke i unutrašnje površine ab plašta dimnjaka.

- c) Utvrđivanje mehaničkih i fizičkih karakteristika betona vršice se na uzorcima – kernovima koji će se vaditi mašinskom garniturom i to: 3 uzorka sa kote  $\pm 0.00$ , 3 uzorka sa radne platforme na koti +30 m i 3 uzorka sa radne platforme na koti +75 m. Ispitivanje mehaničkih karakteristika betona izvršiti na uzorcima posle njihove pripreme u laboratoriji koja je predviđena za te namene u svemu prema važećim standardima.

## 6. Zaključak

Usled povećane radne temperature dimnih gasova sa  $180^{\circ}\text{C}$  na  $219^{\circ}\text{C}$  i sa termoizolacijom prema originalnom projektu, rezultati računskih analiza su pokazali da je porast statičkih uticaja takav da se u zidu dimnjaka moraju javiti oštećenja u vidu vertikalnih prslina sa otvorima nedozvoljeno velikih širina. Eventualno oštećenje unutrašnje termoizolacije, ili njen nedostatak, na šta ukazuje termovizijski snimak, takođe izaziva veliki porast radijalnih momenata savijanja i sila zatezanja u radijalnom pravcu u zoni oštećenja termoizolacije, i to veći od onog nastalog usled navedenih povišenih radnih temperatura dimnih gasova u dimnjaku.

Rezultati termovizijskog snimanja dimnjaka i sprovedene računске analize statičkih uticaja u dimnjaku usled povišene radne temperature i nedostatka termoizolacije, jasno ukazuju na neophodnost detaljnog pregleda dimnjaka po metodologiji prikazanoj u ovom radu. Na osnovu ovakvih pregleda i dodatnih računskih analiza uticaja termoizolacije na ponašanje ab plašta dimnjaka, definisaće se potrebne sanacione mere kako bi se objekat doveo u ispravno stanje.

## 7. Literatura

- [1] Termovizijsko ispitivanje, Izveštaj broj 05013, objekat: dimnjak VK6 i VK7, JKP „Beogradske termoelektrane“, mart 2005.
- [2] Timošenko, S., Vojnovski-Kruger, S., Teorija ploča i ljuski, MCGRAW HILL, 1959
- [3] El Damatty, A. A., Awad, A. S., Vickery, B. J., Thermal analysis of FRP chimneys using consistent laminated shell element, *Thin-Walled structures*, Elsevier, 37 (2000), 57-76
- [4] Mikhail, A. E., El Damatty, A. A., Non-linear analysis of FRP chimneys under thermal and wind loads, *Thin-Walled structures*, Elsevier, 35(1999), 289-309
- [5] Ventsel, E., Krauthammer, T., Thin Plates and Shells, Marcel Dekker, 2001
- [6] NASA, Thermal stresses in shells, TM-X-73307, 1975
- [7] Diver M., Calcul pratique des tours en beton arme, Dunod, Paris, 1972
- [8] Markus, G., Theorie und Berechnung rotationssymmetrischer Bauwerke, Werner-Verlag, 1978
- [9] CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA, 2004