

# Eksperimentano i numeričko određivanje toplinskih svojstava vatrootporne žbuke i vatrobetona na visokim temperaturama

---

**Kuzmić, Roman**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:077883>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](#)/[Imenovanje-Nekomercijalno-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-26**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Roman Kuzmić**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Ivanka Boras, dipl. ing.

Student:

Roman Kuzmić

Zagreb, 2019. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici prof.dr.sc. Ivanki Boras, prof.dr.sc. Srećku Švaiću i mag.ing. Ivanu Horvatu koji su me usmjeravali prilikom izrade ovog rada. Također, hvala laborantu Željku Badžeku na profesionalnoj pomoći tijekom obavljanja eksperimentalnih mjerenja.

Hvala mojoj obitelji na podršci i razumijevanju tijekom cijelog mog obrazovnog putovanja. Također, zahvaljujem se svojoj djevojci koja me pratila tijekom studija i pružila mi neupitnu ljubav i podršku.

Roman Kuzmić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Roman Kuzmić** Mat. br.: 0035199073

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Eksperimentalno i numeričko određivanje toplinskih svojstava vatrootporne žbuke i vatrobetona na visokim temperaturama**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Experimental and numerical determination of thermal properties of fireproof mortar and concrete at high temperatures**

Opis zadatka:

Zaštita od požara građevinskih konstrukcija, između ostalog, postiže se i primjenom odgovarajućih materijala koji su otporni na visoke temperature - vatrootporne žbuke i vatrobetona. Poznavanje njihovih fizikalnih i toplinskih svojstva na visokim temperaturama je nužno radi procjene integriteta cijele građevinske konstrukcije. Parametri koji pri tome određuju ponašanje materijala su: temperatura, vrijeme izloženosti visokoj temperaturi, tijek procesa (grijanje, hlađenje, procesi nakon ohlađivanja i sl.), vrsta betona, vrsta agregata i drugo.

U radu je potrebno mjerenjem odrediti i numeričkom simulacijom potvrditi ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta o temperaturi za dvije vrste materijala:

- vatrootporna žbuka VATROSTOP, proizvođač Samoborka, Samobor i
- vatrobeton VATRIT, proizvođač VIG, Zagreb.

Maksimalna temperatura koju treba postići u uzorcima je 500 °C. Mjerenja je, za svaki ispitivani materijal, potrebno provesti na tri uzorka jednake geometrije, a rezultate prikazati u obliku funkcije  $c = c(\vartheta)$ . Numeričku simulaciju treba provesti za svaki ispitivani uzorak, uvažavajući specifične početne i rubne uvjete procesa zagrijavanja. Rezultate usporediti s rezultatima eksperimenta te analizirati eventualna odstupanja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

26. rujna 2019.

Datum predaje rada:

28. studenoga 2019.

Predviđeni datum obrane:

2. – 6. prosinca 2019.

Zadatak zadao:

*I. Boras*

Prof. dr. sc. Ivanka Boras

Predsjednica Povjerenstva:

*Tanja Jurčević Lulić*

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. O požaru.....	1
1.2. Opasnosti požara.....	2
1.3. Mjere sigurnosti i prevencije požara.....	4
1.3.1. Građevinske mjere prevencije.....	4
1.3.2. Civilne mjere prevencije.....	4
2. VATROOTPORNOSTI MATERIJALI.....	8
2.1. Najčešći primjeri.....	8
2.2. Istraživanja vatrootpornosti.....	10
2.2.1. Izvadci iz literature.....	11
2.3. Svojstva ispitivanih materijala.....	13
2.3.1. VATROSTOP žbuka.....	14
2.3.2. VATRIT vatrobeton.....	15
3. EKSPERIMENTALNA ANALIZA.....	16
3.1. Opis sustava.....	16
3.1.1. Svojstva komponenti sustava.....	17
3.1.2. Model prijelaza topline.....	18
3.1.3. Kritične vremenske točke.....	23
3.2. Provedba mjerenja.....	24
3.2.1. Mjerna oprema.....	25
3.2.3. Geometrija i priprema uzoraka.....	32
3.3. Zapažanja.....	33
3.3.1. Utjecaj vlage.....	34
3.3.2. Identifikacija gubitaka tijekom mjerenja.....	36
3.4. Rezultati mjerenja.....	37
4. NUMERIČKA ANALIZA.....	41
4.1. Opis analize.....	41
4.2. Matematički model.....	42
4.3. Izrada geometrije i mreže.....	45
4.4. Rubni i početni uvjeti.....	48
4.5. Rezultati numeričke analize.....	50
5. ANALIZA REZULTATA.....	54
5.1. Vatrootporna žbuka.....	54
5.3. Vatrobeton.....	56
5.5. Usporedba s literaturom.....	58
6. ZAKLJUČAK.....	59
LITERATURA.....	60
PRILOZI.....	62

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Prikaz raspodjele udjela pojedinih vrsta materijala koji se pojavljuju kao prijenosnici požara .....	1
Slika 2.	Crkva Notre Dame, Pariz (2019.) u požaru .....	3
Slika 3.	Minerali korišteni u vatrostalnim materijalima .....	8
Slika 4.	Materijali korišteni za izradu staklenog vlakna .....	9
Slika 5.	Najčešće korišteni vatrootporni materijali .....	10
Slika 6.	Krivulja razvoja temperature požara [6] .....	11
Slika 7.	Izvadak iz literature: mjerenje betona DSC metodom .....	12
Slika 8.	Ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta gipsa o temperaturi prema [10].....	13
Slika 9.	Izvadak iz literature. Mjerenje DSC metodom.....	13
Slika 10.	Vatrootop protupožarna žbuka [Samoborka].....	14
Slika 11.	Shematski prikaz sustava izolacijske posude, električnog grijača i ispitnog uzorka .....	17
Slika 12.	Prikaz kretanja toplinskog toka u sustavu .....	18
Slika 13.	Krivulja temperatura mjerenih u uzorku .....	23
Slika 14.	Skica izolacijske posude s dimenzijama (lijevo). Poklopac (desno).....	26
Slika 15.	Realni prikaz termoizolacijske posude (lijevo. Pogled odozgora (desno). .....	26
Slika 16.	Električni grijač .....	27
Slika 17.	Termopar tip K .....	27
Slika 18.	Varijabilni transformator korišten tijekom mjerenja (lijevo). Nova izvedba (desno). .....	28
Slika 19.	Mjerni uređaji: ampermetar (lijevo), voltmetar (desno).....	29
Slika 20.	Keysight 34970A za prikupljanje podataka tijekom mjerenja [15] .....	29
Slika 21.	Nadograđeni Keysight uređaj korišten tijekom mjerenja.....	30
Slika 22.	Sučelje sustava Agilent BenchLink 3.0.....	30
Slika 23.	Shematski prikaz eksperimentalne opreme .....	31
Slika 24.	Skica uzorka s dimenzijama (lijevo). Način montiranja uzorka na poklopac (desno). .....	32
Slika 25.	Uzorci žbuke (desno). Uzorci betona (lijevo). .....	32
Slika 26.	Uzorak betona nakon mjerenja (lijevo). Uzorak žbuke nakon mjerenja (desno)..	33
Slika 27.	Utjecaj vlage na rezultate zagrijavanja uzoraka .....	35
Slika 28.	Prikaz toplinskih gubitaka u sustavu .....	36
Slika 29.	Prikaz temperaturnog profila termobetona pri zagrijavanju do 500°C .....	38
Slika 30.	Prikaz temperaturnog profila vatrootporne žbuke pri zagrijavanju do 500°C .....	38
Slika 31.	Krivulja ovisnosti temperature stijenke grijača o vremenu. Zagrijavanje pri 150V. ....	39
Slika 32.	Specifični toplinski kapacitet vatrootporne žbuke u ovisnosti o temperaturi .....	40
Slika 33.	Specifični toplinski kapacitet vatrobetona u ovisnosti o temperaturi.....	40
Slika 34.	Diskretizacija sredine uzorka prema dominantnom širenju topline .....	43
Slika 35.	Diskretizacija modela na rubu uzorka .....	44
Slika 36.	Model ispitnog uzorka izrađenog u SolidWorks-u.....	45
Slika 37.	Detalji izrade mreže (lijevo). Prikaz mreže (desno).....	46
Slika 38.	Mreža uzorka i stijenke posude .....	47
Slika 39.	Zadavanje globalnog početnog uvjeta .....	48
Slika 40.	Zadavanje rubnih uvjeta (ANSYS Mechanical).....	49
Slika 41.	Temperaturna mapa prvog uzorka vatrootporne žbuke (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno). .....	50

---

Slika 42.	Temperaturna mapa drugog uzorka vatrootporne žbuke (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno). ....	51
Slika 43.	Temperaturna mapa trećeg uzorka vatrootporne žbuke (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno). ....	51
Slika 44.	Temperaturna mapa prvog uzorka vatrobetona (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).....	52
Slika 45.	Temperaturna mapa drugog uzorka vatrobetona (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).....	52
Slika 46.	Temperaturna mapa trećeg uzorka vatrobetona (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).....	53
Slika 47.	Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrootporna žbuka, prvi uzorak .....	54
Slika 48.	Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrootporna žbuka, drugi uzorak .....	55
Slika 49.	Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrootporna žbuka, treći uzorak .....	55
Slika 50.	Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrobeton, prvi uzorak	56
Slika 51.	Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrobeton, drugi uzorak .....	56
Slika 52.	Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrobeton, treći uzorak	57
Slika 53.	Usporedba rezultata vatrobetona s literaturom.....	58
Slika 54.	Usporedba rezultata vatrootporne žbuke s literaturom.....	58



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Tehničke karakteristike Vatrostop žbuke .....	14
Tablica 2. Tehničke karakteristike Vatriit vatrobetona .....	15
Tablica 3. Svojstva komponenti mjernog sustava .....	17
Tablica 4. Popis korištenih termoparova .....	28
Tablica 5. Iznos jakosti struje tijekom mjerenja.....	33
Tablica 6. Način zapisivanja podataka iz mjerenja .....	37
Tablica 7. Specifični toplinski kapacitet elektrogrijača .....	39

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$T$	K	Termodinamička temperatura
$t$	s	Vrijeme
$c$	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	Specifični toplinski kapacitet
$e$	-	Maseni sadržaj vode
$f$	-	Korekcijski faktor
$g$	°C	Temperatura
$\lambda$	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	Toplinska provodnost
$E$	J	Električna energija
$Q$	J	Toplinska energija
$P$	W	Snaga
$U$	V	Napon
$I$	A	Jakost struje
$m$	kg	Masa
$A$	m <sup>2</sup>	Površina
$C$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot (100\text{K})^4}$	Konstanta zračenja
$\varepsilon$	-	Emisivnost
$\sigma$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot (100\text{K})^4}$	Stefan-Boltzmannova konstanta
$\omega$	-	Geometrijski faktor
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća
$a$	m <sup>2</sup> /s	Toplinska provodnost
Indeks	Opis	
$d$	Isparena voda	

<i>sl</i>	Slobodna voda
<i>ul</i>	Ulazna komponenta
<i>g</i>	Elektrogrijač
<i>uz</i>	Ispitni uzorak
<i>zr</i>	Zračenje
<i>z</i>	Zrak
<i>EL</i>	Električna energija
<i>0</i>	Početno (nulto) vrijeme
<i>i</i>	Isključivanje
<i>su</i>	Stijenka uzorka
<i>sp</i>	Stijenka termoizolacijske posude
<i>i</i>	i-ti trenutak

**SAŽETAK**

U ovom radu obrađen je i prikazan postupak utvrđivanja specifičnog toplinskog kapaciteta pri požarnim temperaturama (do 500 °C) sljedećih materijala: Vatrostop vatrootporne žbuke (Samoborka, Samobor) i Vatriit vatrobetona (VIG, Zagreb). Analiza je izvedena eksperimentalnom metodom, a onda provjerena numeričkom metodom. Za analizu je osmišljen i predstavljen matematički model prijelaza topline, a krajnji rezultat je definirana funkcijska ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta o temperaturi.

Osim navedenog, u radu su navedene osnove zaštite od požara uključujući i zakonsku regulativu te ispitne mjere koje objekti moraju zadovoljiti. Prikazan je pregled vatrootpornih materijala u svakodnevnoj upotrebi kao i sirovine od kojih se isti proizvode.

Ključne riječi: specifični toplinski kapacitet, požar, termodinamička analiza, Vatrostop, vatrootporna žbuka, Vatriit, vatrobeton, prijenos topline

---

**SUMMARY**

This article addresses the topic of determining the specific heat capacity of Vatrostop fire mortar (Samoborka, Zagreb) and Vatrut high-temperature resistant concrete. An experimental and then numerical approach is used. For the purpose of this analysis, a mathematical model of heat transfer is designed. The final result is a function of temperature-dependent specific heat capacity.

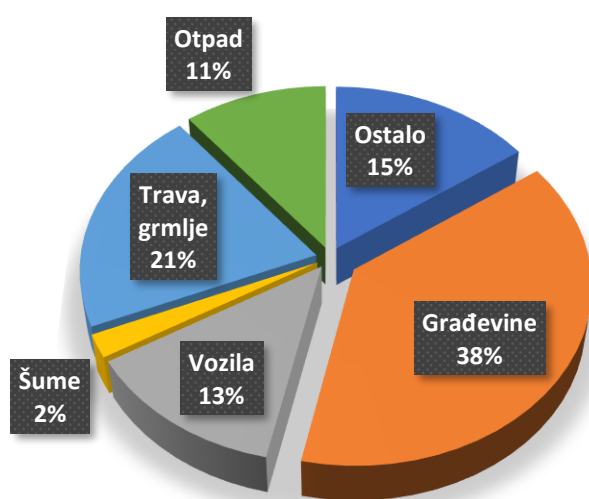
Furthermore, the article deals with the description of fire-resistant materials and precaution measures that are needed for the protection of a fire accident.

Key words: specific heat capacity, fire-resistant materials, fire mortar, fire concrete, heat transfer

## 1. UVOD

Sve utjecajniji problem globalnog zatopljenja donosi između ostalog i veće vjerojatnosti za pojavom požara zbog većih godišnjih prosječnih temperatura. Statistike pokazuju da je 2015. godine u državama koje sudjeluju u vođenju statistike požar odnio 18 400 života. Ukupno je u trideset jednoj državi zabilježeno 3,5 milijuna požara [1]. Od toga je Republici Hrvatskoj 2015. godine zabilježena brojka od 12 156 požara te 24 izgubljena života.

Ono što je iznenađujuće jest da je čak 38,2 % požara prenošeno preko građevina i struktura, što među ostalim medijima širenja (trava, smeće, vozila, šume) čini najveći udio. Na Slici 1. vidljiv je točan raspored udjela medija širenja požara u 2015. godini.



**Slika 1. Prikaz raspodjele udjela pojedinih vrsta materijala koji se pojavljuju kao prijenosnici požara**

Zbog prethodno navedenih podataka od velike je važnosti u građevinarstvu korištenje materijala poznatih svojstava kako bi se pravilno projektirali požarni putevi i brane. Najvažnija svojstva u tom pogledu su ona termodinamička; toplinska provodnost i specifični toplinski kapacitet i mehanička svojstva pri visokim temperaturama. Mjerenje i određivanje specifičnog toplinskog kapaciteta vatrootporne žbuke i vatrobetona predmet je ovog diplomskog rada.

### 1.1. O požaru

Vatra je kemijska reakcija koja je ljudima poznata još od davnih vremena. Stari Grci poznavali su tehniku paljenja vatre pomoću koncentriranja Sunčevih zraka. U današnje vrijeme parabolično se zrcalo i dalje koristi kao tehnika paljenja vatre na olimpijskoj baklji. Poznata je činjenica da je Zemlja jedini poznati planet gdje se može odvijati proces gorenja. Bilo gdje

drugdje nema dovoljno kisika za navedeni proces. Za nastanak i održanje vatre potrebna su tri esencijalna uvjeta: visoka temperatura, kisik i goriva tvar. U slučaju nestanka jedne od ovih komponenti vatra se gasi. Boja plamena vatre određena je količinom kisika u plamenu; žuti plamen je onaj s nedostatkom kisika, a plavi plamen s dovoljno kisika.

Požar ima drukčiju definiciju od vatre; požar je nekontrolirano gorenje vatre koje nanosi materijalnu štetu i/ili ugrožava ljudske živote. Unatoč mjerama opreza požari i dalje izbijaju pod raznim okolnostima. Požari se mogu klasificirati prema više kriterija:

- Fazi požara: početni požar, razbuktali požar, faza zgarišta
- Obujmu požara: mali, srednji, veliki i katastrofalni

U malom požaru izgara manja količina gorive tvari i lako se gasi. Srednji požar zahvaća jednu prostoriju neke zgrade ili više njih, a u velikom zahvaćena je cijela zgrada, tvornica ili velika površina.

*Požari prema vrsti gorive tvari:*

- A. Požari klase A su požari krutih tvari poput papira, ugljena, drva i slično. Za gašenje se koriste sredstva poput vode, pijeska, određenih vrsti praha, pjene i halona.
- B. Požari klase B su požari zapaljivih tekućina - npr. zapaljiva ulja i slično. Gasimo ih pomoću pjene, praha, halona, ugljičnog dioksida ili raspršene vode.
- C. Požari klase C su požari zapaljivih plinova. Gase se pomoću praha i halona.
- D. Požari klase D su specijalni požari koji se teško gase, npr. požari lakih metala i sredstava koja su samozapaljiva i sl. Za njihovo gašenje nisu dovoljni obični vatrogasni aparati već se koriste posebni aparati sa specijalnim prahom ili suhi pijesak.[2]

Prilikom konstruiranja većih objekata (institucije, javne zgrade, tvornice, itd.) obavezno je provođenje mjera zaštite od požara o kojima će više biti u Poglavlju 1.3.

## **1.2. Opasnosti požara**

Posljedice i opasnosti od požara mnogo su drastičnije od onih kakvima se većini ljudi čini i kakvima se prikazuju na televiziji i filmovima. Požari u kućama uzrokuju gusti i crni dim koji uvelike otežava vidljivost; ljudi koji inače poznaju svoj dom i lako se orijentiraju postaju izgubljeni i u mogućnosti su krenuti u krivom smjeru/prema vatri. Spomenuti dim poguban je za ljude i uzima živote puno prije nego vatra dođe blizu. Razlog tomu prisutnost je otrovnih plinova koji djeluju na ljudska osjetila i u stanju su spriječiti čovjeka da se probudi/vrati svijest.

Ova činjenica veoma je značajna zbog toga što većina požara izbija tijekom noći, kad ljudi spavaju.

Temperature koje se postižu tijekom požara u stambenim objektima mogu dostići do 2000 °C u razini stropa, a pri takvim temperaturama zadobivaju se teške opekotine i doživljavaju se gubici svijesti. Plamen tijekom požara rapidno se širi i u stanju je progutati nečiji dom u roku od par minuta te bez prisutnosti detektora dima i požarnih alarmnih sustava, ljudi imaju vrlo male šanse za spasom.

Požari u spavaćoj sobi ili dnevnom boravku čine čak 73% svih smrtnih slučajeva u stambenim objektima. Među najčešćim uzrocima požara u stanovima su: zaboravljena hrana na upaljenom štednjaku, prijenosni grijači koji se nalaze preblizu zapaljivim predmetima (zavjesama, namještaju, rublju), slučajno ostavljen neugašen opušak, neispravna električna oprema ili neugašena električna oprema poput pegle, uvijača za kosu. Također, ljudi znaju ostaviti upaljene svijeće ili neadekvatno odlažu spremnike sa zapaljivim tekućinama.



**Slika 2.** Crkva Notre Dame, Pariz (2019.) u požaru



### **1.3. Mjere sigurnosti i prevencije požara**

#### **1.3.1. Građevinske mjere prevencije**

Građevinske konstrukcije i elementi otporni na požar su bilo koja građevinska konstrukcija (zid, međukatna konstrukcija, stup, greda) ili bilo koji element koji ima neki stupanj otpornosti na požar (od 15 do 360 minuta), a izveden je od negorivog i/ili ograničeno gorivog materijala. Pravilan izbor materijala tijekom izgradnje građevina pokazao se kao jedna od najbitnijih mjera prevencije požara.

Osnovni zahtjevi za zaštitu građevine od požara:

- očuvanje nosivosti konstrukcije u slučaju požara tijekom određenog vremena
- sprječavanje širenja vatre i dima unutar građevine
- sprječavanje širenja vatre na susjedne građevine
- omogućavanje da osobe mogu neozlijeđene napustiti građevinu odnosno da se omogući njihovo spašavanje
- omogućavanje zaštite spašavatelja

Važno je razlikovati pojmove negorivost materijala od požarne otpornosti građevinskih sustava. Negorivost je svojstvo pojedinog materijala koja opisuje njegovo ponašanje tijekom požara. Prema standardu EN 13501-1 materijali su razvrstani u više razreda gorivosti:

- A1 i A2 su razredi negorivih materijala
- B, C, D, E i F su razredi manje ili više gorivih materijala odnosno materijala kod kojih se negorivost ne deklarira

S druge strane, požarna otpornost određuje se za konstrukcije koje su sastavljene od više pojedinačnih građevinskih materijala, a ona u pravilu označava vremenski period u kojem se određena konstrukcija odupire vatri, sprječava njezin prolazak i koliko čuva svoje toplinsko izolacijske sposobnosti.

#### **1.3.2. Civilne mjere prevencije**

Prema [1] sustav zaštite od požara podrazumijeva planiranje zaštite od požara, propisivanje mjera zaštite od požara građevina, ustrojavanje subjekata zaštite od požara, provođenje mjera zaštite od požara, financiranje zaštite od požara te osposobljavanje i ovlašćivanje za obavljanje

poslova zaštite od požara, s ciljem zaštite života, zdravlja i sigurnosti ljudi i životinja te sigurnosti materijalnih dobara, okoliša i prirode od požara, uz društveno i gospodarski prihvatljiv požarni rizik.

U cilju zaštite od požara poduzimaju se organizacijske, tehničke i druge mjere i radnje za:

- otklanjanje opasnosti od nastanka požara,
- rano otkrivanje, obavješćivanje te sprječavanje širenja i učinkovito gašenje požara,
- sigurno spašavanje ljudi i životinja ugroženih požarom,
- sprječavanje i smanjenje štetnih posljedica požara,
- utvrđivanje uzroka nastanka požara
- otklanjanje njegovih posljedica.

#### *Terminologija korištena u zakonskim propisima*

- a) Otpornost na požar je sposobnost dijela građevine da kroz određeno vrijeme ispunjava zahtijevanu nosivost (R) i/ili cjelovitost (E) i/ili toplinsku izolaciju (I) i/ili drugo očekivano svojstvo, kako je propisano normom o ispitivanju otpornosti na požar.
- b) Reakcija na požar je doprinos materijala razvoju požara uslijed vlastite razgradnje do koje dolazi izlaganjem tog materijala određenim ispitnim uvjetima.
- c) Neposredna opasnost je stanje visokog požarnog rizika, koje može u bliskoj budućnosti dovesti do požara.
- d) Evakuacijski put iz građevine je posebno projektiran i izveden put koji vodi od bilo koje točke u građevini do vanjskog prostora ili sigurnog prostora u građevini, čije značajke (otpornost i reakcija na požar, širina, visina, označavanje, protupanična rasvjeta i dr.) omogućuju da osobe zatečene u požaru mogu sigurno (samostalno ili uz pomoć spasitelja) napustiti građevinu.

#### *Zakonska regulativa zaštite od požara*

Svaka fizička i pravna osoba, tijelo državne vlasti te jedinica lokalne i područne (regionalne) samouprave dužni su djelovati na način kojim se ne može izazvati požar.

Svaka fizička i pravna osoba, tijela državne vlasti te jedinice lokalne i područne (regionalne) samouprave dužni su provoditi mjere zaštite od požara utvrđene odredbama Zakona o zaštiti od požara i drugim propisima donesenim na temelju njega, planovima i procjenama ugroženosti od požara, odlukama jedinica lokalne i područne (regionalne) samouprave te drugim općim aktima iz područja zaštite od požara.

Svaka fizička i pravna osoba odgovorna je za neprovođenje mjera zaštite od požara, izazivanje požara, kao i za posljedice koje iz toga nastanu sukladno odredbama Zakona o zaštiti od požara i odlukama jedinica lokalne i područne (regionalne) samouprave.

Svatko ima pravo i obvezu biti upoznat s opasnostima od požara na mjestu gdje boravi ili radi. Radi osiguranja pravodobne i učinkovite zaštite od požara jedinice lokalne i područne (regionalne) samouprave te pravne osobe organiziraju osposobljavanje pučanstva za provedbu preventivnih mjera zaštite od požara, gašenje početnih požara i spašavanje ljudi i imovine ugroženih požarom prema posebnim propisima.

Svaka građevina ili njezin dio, ovisno o svojoj namjeni, mora se tijekom svog trajanja održavati na način da ispunjava bitni zahtjev zaštite od požara.

Svaki prostor ili njegov dio, ovisno o svojoj namjeni, mora se održavati na način da ispunjava propisane mjere zaštite od požara.

Vlasnici, odnosno korisnici građevina, građevinskih dijelova i drugih nekretnina te prostora, odnosno upravitelji zgrada dužni su održavati slobodnima i propisno označenima evakuacijske putove, kao i pristupe vatrogasnim vozilima.

Vlasnici, odnosno korisnici građevina, građevinskih dijelova i drugih nekretnina te prostora, odnosno upravitelji zgrada dužni su posjedovati uređaje, opremu i sredstva za gašenje požara.

Vlasnici, odnosno korisnici građevina, građevinskih dijelova i drugih nekretnina te prostora, odnosno upravitelji zgrada dužni su sukladno propisima, tehničkim normativima, normama i uputama proizvođača održavati u ispravnom stanju postrojenja, uređaje i instalacije električne, plinske, ventilacijske i druge namjene, dimnjake i ložišta, kao i druge uređaje i instalacije, koji mogu prouzročiti nastajanje i širenje požara te o održavanju moraju posjedovati dokumentaciju. Vlasnik, odnosno korisnik građevina, građevinskih dijelova i drugih nekretnina te prostora, odnosno upravitelji zgrada dužni su održavati prijenosne i prijevozne aparata za gašenje požara, sukladno uputi proizvođača, o čemu mora postojati evidencija.

U nastavku slijede primjeri postupaka ustanova za obavljanje poslova zaštite od požara, koje posjeduju predmetna ovlaštenja izdana od nadležnih tijela Republike Hrvatske.

Ispitivanja:

- Pregled i ispitivanje hidrantske mreže
- Mjerenje tlakova i izračun količine vode u vodovodnoj mreži
- Pregled i ispitivanje sustava za gašenje vodom – sprinkle
- Pregled i ispitivanje sustava za gašenje vodom – drencher
- Pregled i ispitivanje sustava za hlađenje vodom

- Pregled i ispitivanje sustava za gašenje požara pjenom
- Pregled i ispitivanje bacača vode i pjene
- Pregled i ispitivanje sustava za gašenje požara plinom
- Pregled i ispitivanje sustava za dojavu požara
- Pregled i ispitivanje sustava za dojavu prisutnosti zapaljivih plinova i para
- Pregled i ispitivanje funkcionalnosti sustava za signalizaciju i gašenja požara
- Pregled i ispitivanje sustava za odvođenje dima i topline
- Pregled i ispitivanje funkcionalnosti klapni (zaklopki) otpornih prema požaru
- Pregled i ispitivanje funkcionalnosti vrata otpornih prema požaru
- Pregled i ispitivanje funkcionalnosti tipkala za isključenje električne energije
- Pregled i ispitivanje funkcionalnosti sigurnosne rasvjete
- Pregled i ispitivanje sustava za dojavu prisutnosti toksičnih plinova i para
- Pregled i ispitivanje nepropusnosti plinske instalacije
- Ispitivanje funkcionalnosti elektromagnetskih ventila
- Pregled i ispitivanje brodova unutrašnje plovidbe:
  - sustava za dojavu i gašenje požara
  - sustava za dojavu zapaljivih plinova

Akti (elaborati):

- Procjena ugroženosti od požara
- Plan zaštite od požara
- Normativni akt iz zaštite od požara (Pravilnik zaštite od požara)
- Elaborat zaštite od požara

## 2. VATROOTPORNI MATERIJALI

Vatrootpornost se definira kao svojstvo materijala da u određenom periodu izdrži visoke temperature koje se razvijaju tijekom gorenja. Takvi materijali pomažu u suzbijanju širenja vatre jer usporavaju njeno napredovanje. Iako se materijali nazivaju vatrootpornima to ipak nije u potpunosti ispravan izraz. Svaki materijal podložan je izgaranju ako se podvrgne utjecajima dovoljno visokih temperatura. Među široko korištenim materijalima su: cigla i opeka, staklena vlakna i kamena vuna (Slika 5.).

### 2.1. Najčešći primjeri

#### *Vatrootporni materijali*

U ovu skupinu tvrdih, vatrootpornih materijala ubrajaju se cement, cigla, keramika i opeka. U sastav ovih materijala ulaze određeni minerali (Slika 3.); aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), krom-željezov oksid ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), vatrena glina, magnezit ( $\text{MgCO}_3$ ) i silicijev karbid ( $\text{SiC}$ ). Vatrootporni materijali najčešće se koriste u visokotemperaturnim okruženjima poput peći, reaktora i ostalih sličnih jedinica u tehničkim procesima. Također se koriste u svrhe električne ili toplinske izolacije. Navedeni materijali u stanju su podnijeti veće temperature od metala ( $540\text{ }^\circ\text{C}$ ) i otporni su na fizičko trošenje i kemijska sredstva.



Slika 3. Minerali korišteni u vatrootpornim materijalima

Stakleno vlakno (eng. fiberglass) kombinacija je primarno stakla i pijeska. Sirovine koje se koriste u proizvodnji „fiberglassa“ su: silicijev pijesak, vapnenac, natrijev karbonat, kalcificirani aluminijev oksid, boraks (natrijev borat), feldspat, nefelin sijenit, magnezit i kaolin glina (Slika 4). Stakleno vlakno proizvodi se na način da se otopljeno staklo gura kroz stroj za prosijavanje koji ga formira u navoje, a koji se dalje sljepljuju. Ovaj materijal je snažan, izdržljiv i prirodno nezapaljiv zbog sastava kojeg čine pijesak i reciklirano staklo. Služi za razne svrhe poput električne izolacije, tekstila i ojačanja. Također koristi se za potrebe stvaranja kiselinske otpornosti i za toplinsku izolaciju. U praksi svoje je mjesto ovaj proizvod našao na trupovima brodova, automobilima, pećima i rashladnim jedinicama te akustičnim zidovima (zvučna izolacija).



Slika 4. Materijali korišteni za izradu staklenog vlakna

#### *Mineralna i staklena vuna*

Mineralna i staklena vuna loši su vodiči topline i zvuka, a osim toga teško su gorivi i imaju visoku temperaturu zapaljenja. Ovakva svojstva čine ih odličnim vatrootpornim materijalima. Oba materijala su otporna na najezde insekata što ih čini odličnima za građevinsku namjenu. Mineralna vuna, a i staklena načinjene su od šljake, kamena, stakla i minerala. Navedene sirovine tale se i razvijaju u filamente (spiralne čestice). Najčešća upotreba ovih materijala uključuje termoizolaciju, vatrootporne barijere, brtve u autoindustriji i kočione elemente.



Vatrostalna opeka

Stakleno vlakno

Mineralna vuna

Slika 5. Najčešće korišteni vatrootporni materijali

## 2.2. Istraživanja vatrootpornosti

Prema [5] u klasičnom požarnom ispitivanju ispitne su komponente izložene rastućoj temperaturi čija se ovisnost o vremenu prema [6] izražava na sljedeći način:

- a) Celulozni požar (standardni)

$$\vartheta = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

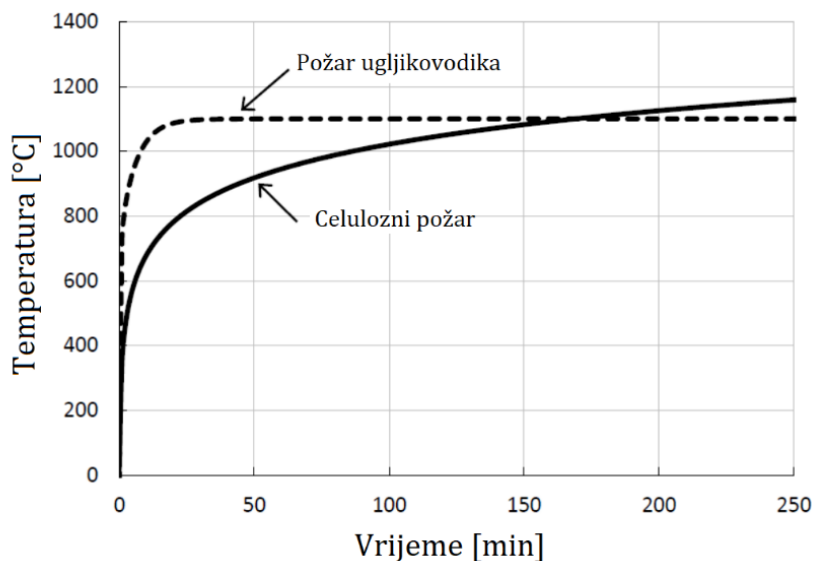
- b) Požar ugljikovodika (prema ISO/DIS 834)

$$\vartheta = 1100(1 - 0.325e^{-0.1667t} - 0.204e^{-1.417t} - 0.471e^{-15.833t}) \quad (2)$$

gdje su

- $\vartheta$  - temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $t$  - vrijeme trajanja požara [ $\text{min}$ ], maksimalno do 360 min.

Na Slici 6. može se vidjeti razvoj temperature ovisno o navedenim vrstama požara. Relevantna vrsta požara za problem ovog rada je celulozni požar koji je najčešći ako govorimo o slučaju požara na klasičnom građevinskom objektu. Razvoj temperature u takvom požaru, kao što potvrđuju krivulje, blaže je prirode i prema takvome će se provoditi scenariji grijanja korišteni tijekom analize dalje u tekstu.



Slika 6. Krivulja razvoja temperature požara [6]

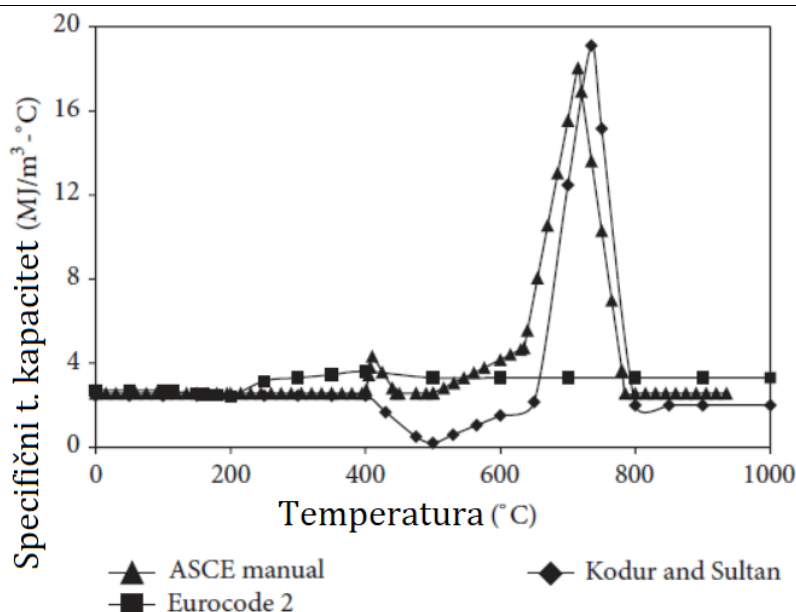
### 2.2.1. Izvadci iz literature

#### Ispitivanje materijala DSC metodom

DSC (eng. differential scanning calorimetry) termoanalitički je pristup pri kojemu se ispituje količina topline potrebna da se ispitni uzorak i referentni objekt zagriju do neke temperature. Rezultat mjerenja je funkcija ovisna o temperaturi. I uzorak i referentni objekt cijelo vrijeme moraju se održavati na istoj temperaturi. Načelo odabira temperature ispitivanja je takvo da temperatura držača uzorka bude povećavana linearno kao funkcija vremena. Referentni uzorak mora imati precizno definiran toplinski kapacitet za raspon temperatura pri kojemu se mjeri ispitni uzorak [10].

Istraživači Khaliq i Kodur [7] sakupili su podatke iz više znanstvenih studija o mjerenim specifičnim toplinskim kapacitetima različitih materijala. Na Slici 7. prikazani su različiti rezultati mjerenja s DSC opremom temeljeni na ne posve jednakim standardima. Međutim, pokazano je da je specifični toplinski kapacitet betona u svim mjerenjima skoro konstantan do vrijednosti od oko 400 °C kada doživljava nagli skok između temperatura 700 i 800 °C. Ovo se objašnjava odvijanjem endotermičke reakcije koja je rezultat raspadanja u strukturi materijala što apsorbira veliku količinu energije.





**Slika 7. Izvadak iz literature: mjerenje betona DSC metodom**

#### *Specifični toplinski kapacitet gipsa pri visokim temperaturama*

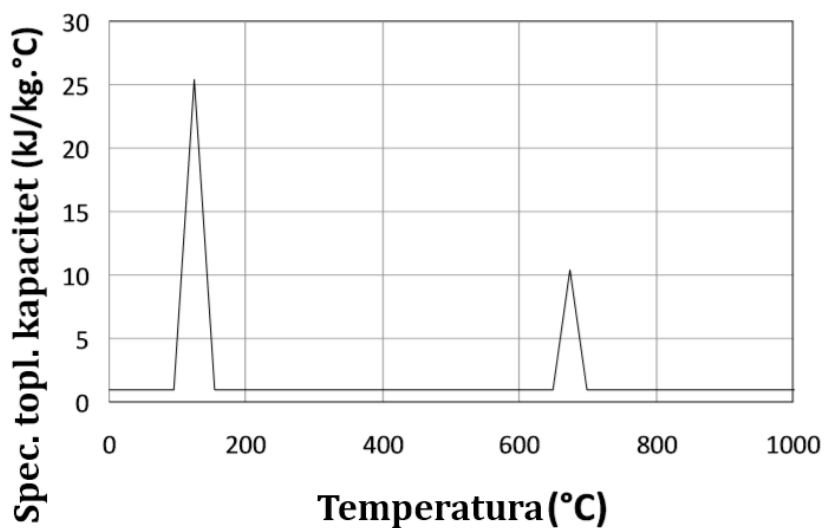
Prema [8] u materijalima se tijekom provođenja ispitivanja specifičnog toplinskog kapaciteta pojavljuju 2 nagla skoka u krivuljama (Slika 8.). Te pojave objašnjavaju se kao pojave dehidracije uzorka. Voda koja isparava iz materijala preuzima toplinu za odvijanje reakcije promjene faznog stanja i prividno povećava specifični toplinski kapacitet. Zbog toga su autori iz navedenog članka naveli izraz za korekciju ove pojave. Dodana vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta zbog isparavanja vode može se izračunati prema

$$\Delta c = \frac{2.26 \times 10^6}{\Delta \vartheta} (e_d f_1 + e_{sl}) f_2 \quad [\text{J/kg}^\circ\text{C}] \quad (3)$$

gdje je

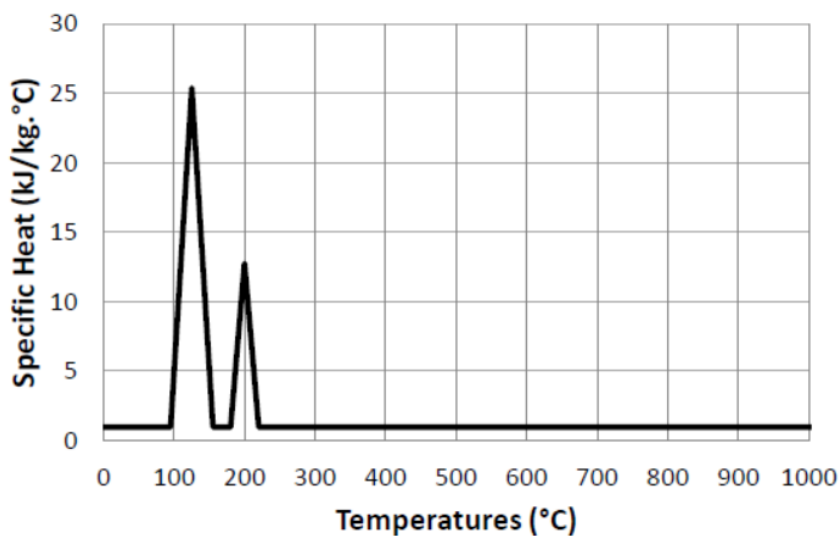
- $\Delta c$  - prosječno povećanje spec. toplinskog kapaciteta [ $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ ],
- $e_d$  - sadržaj isparene vode (postotak ukupne mase),
- $e_{sl}$  - sadržaj slobodne vode (postotak ukupne mase)
- $\Delta \vartheta$  - temperaturni interval [ $^\circ\text{C}$ ],
- $f_1, f_2$  - korekcijski faktori koji u obzir uzimaju brzinu reakcija (ovisno o jačini toplinskog toka) i utjecaj kretanja čestica vode

Vrijednosti faktora  $f_1$  i  $f_2$  su 1,28 i 1,4.[11]



Slika 8. Ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta gipsa o temperaturi prema [10]

Slična opažanja zabilježena su i ovoj doktorskoj studiji [9].



Slika 9. Izvadak iz literature. Mjerenje DSC metodom.

Iako u drugim temperaturnim intervalima, pojava povećanog specifičnog toplinskog kapaciteta prisutna je u svim materijalima s udjelom vlage u svom sadržaju.

### 2.3. Svojstva ispitivanih materijala

U sklopu ovog diplomskog rada određivan je specifični toplinski kapacitet sljedećih materijala:

- vatrootporne žbuke „Vatrostop“, proizvođač Samoborka, Samobor i
- vatrobetona „Vatrit“, proizvođač VIG, Zagreb

### 2.3.1. VATROSTOP žbuka

Ovaj materijal proizvod je Samoborke d.d. i namijenjen je protupožarnoj zaštiti metalnih i armirano-betonskih konstrukcija. Po izgledu to je sivi prah, a tehničke karakteristike i svojstva prikazana su u Tablica 1.

**Tablica 1. Tehničke karakteristike Vatrostop žbuke**

<b>Razredba prema HRN EN 998-1: GP CS II W 2</b>	
Gustoća suhog očvrslog morta (HRN EN 1015-10)	$\approx 550 \text{ kg/m}^3$
Tlačna čvrstoća nakon 28 dana (HRN EN 1015-11)	CS II (1,5 – 5,0 N/mm <sup>2</sup> )
Čvrstoća prionjivosti (HRN EN 1015-12)	$\geq 0,2 \text{ N/mm}^2$ ; SL:B
Vodoupojnost (HRN EN 1015-18)	W 2 ( $\leq 0,2 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ )
Paropropusnost, $\mu$ (HRN EN 1015-19)	$\leq 15$
Toplinska provodljivosti, $\lambda_{10,\text{dry}}$ (HRN EN 1745) tab.	$\approx 0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (kod 20°C)
Razredba reakcije na požar (HRN EN 13501-1)	A 1
Otpornost prema požaru (HRN DIN 4102-2)	razred F120



**Slika 10. Vatrostop protupožarna žbuka [Samoborka]**

### 2.3.2. VATRIT vatrobeton

Vatrit vatrobeton proizvod je tvrtke VIG d.d. iz Zagreba. Namijenjen je upotrebi pri gradnji objekata koji rade u visokotemperaturnim uvjetima. Koristi se za oblaganje konstrukcija poput čeličnih stupova ili ostalih nosivih elemenata koje je potrebno dodatno zaštititi od utjecaja požara. Poznata su sljedeća svojstva ovog materijala.

**Tablica 2. Tehničke karakteristike Vatrit vatrobetona**

<b>VATRIT vatrobeton</b>	
<b>Struktura</b>	Polipropilenska mikroarmatura PM6/15; 2kg/m <sup>3</sup>
	Zrna veličine maksimalno 8mm
	Drobljeni dolomitni agregat
	Mikroarmirani vatrobeton C30/37 (XC4;XS1;CI0,10)
<b>SVOJSTVO</b>	<b>Vrijednost</b>
<b>Gustoća, <math>\rho</math></b>	2006 [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Toplinska provodnost, <math>\lambda</math></b>	-0,221ln(T)+2,0929 [W/m°C] $\lambda = 0,65152 \frac{W}{m^{\circ}C}$ pri 680 °C

### 3. EKSPERIMENTALNA ANALIZA

Veoma je važno znati kako se građevni materijal ponaša u uvjetima požara. Zato se prije stvarne izgradnje objekata konstruiraju njihovi virtualni modeli i provodi se analiza stvarnih uvjeta požara kako bi se utvrdile moguće slabe točke i zadovoljavaju li postavljene požarne barijere i zidovi zadane uvjete i kriterije. Na kraju, ovakve analize svode se na utvrđivanje otpornosti određenog zida ili elementa gradnje na povećanje temperature, odnosno pri kojoj temperaturi takav element popušta (urušava se). Mehanička svojstva materijala koja su od značajne važnosti u ovakvim analizama su linearno istežanje i gubitak mase u ovisnosti o temperaturi. Kako bi se mogla napraviti takva mehanička analiza potrebno je, između ostalog, poznavati funkciju ovisnosti termodinamičkih svojstava o temperaturi; specifičnog toplinskog kapaciteta  $c = c_p(\vartheta) \left[ \frac{J}{kgK} \right]$  i toplinske provodljivosti  $\lambda = \lambda(\vartheta) \left[ \frac{W}{mK} \right]$ .

Za rješavanje predstavljenog problema u ovom radu prvo će se napraviti eksperimentalna analiza nakon koje će slijediti provjera numeričkom analizom.

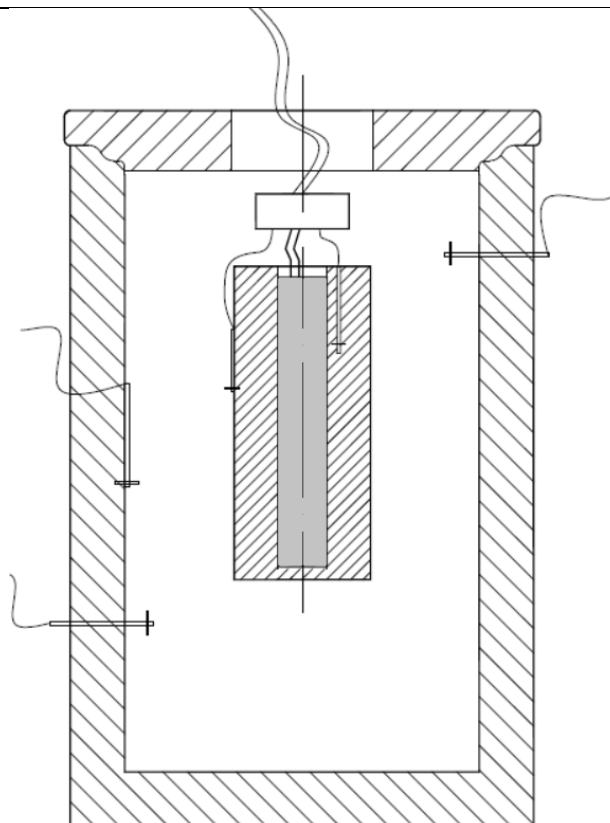
#### 3.1. Opis sustava

Za utvrđivanje specifičnog toplinskog kapaciteta termootporne žbuke i vatrobetona postoji više načina i metoda mjerenja. Za tu svrhu u literaturi se mogu pronaći razni primjeri ispitivanja, ali će se u sklopu ovog rada primijeniti posebno osmišljen i jedinstven sustav za ispitivanje koji se sastoji od sljedećih komponenti:

- uzorak materijala koji se ispituje (cilindrični oblik),
- termoizolacijska posuda u kojoj se nalazi uzorak (cilindrični oblik),
- elektrogrijač s varijabilnim transformatorom
- mjerna oprema: termoparovi, multimetri, računala, itd.

Najvažniji parametar koji se za rješavanje ovog problema prati je temperatura. Iz tog je razloga na svaku komponentu sustava pričvršćen/spojen 1 ili 2 termopara, ovisno o tome koliki volumni temperaturni gradijent na određenoj komponenti postoji.

Na Slici 11. moguće je vidjeti shemu stvarnog sustava predviđenog za mjerenje i točne pozicije termoparova. Sivom bojom označen je električni grijač postavljen u središte uzorka. Dakle, uzorak se nalazi u sredini termoizolacijske posude viseći s poklopca tako da ne postoji direktan dodir sa stijenkom posude u kojoj se uzorak nalazi.



Slika 11. Shematski prikaz sustava izolacijske posude, električnog grijača i ispitnog uzorka

### 3.1.1. Svojstva komponenti sustava

U sklopu analize podataka dobivenih mjerenjem potrebno je poznavati svojstva komponenti koje sudjeluju u izmjenama topline (mase, volumeni, površine, itd.). U sljedećoj tablici (Tablica 3.) prikazana su svojstva važna za izvedbu analize. Toplinska provodljivost materijala dobivena je u srodnom ispitivanju provedenom na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Tablica 3. Svojstva komponenti mjernog sustava

Svojstvo	Komponenta				
	Zrak	Grijač	Žbuka	Beton	Posuda
Masa [kg]	0,007795	0,0507	0,111	0,435	-
Volumen [L]	6,019	0,020027	0,19781		6,019
Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	1,295	2531,58	561,14	2199,08	-
Oplošje [m <sup>2</sup> ]	-	0,011741	0,02147		0,1669
cp [kJ/kgK] pri 20 °C	1,004	1,200	?		-
λ [W/mK] pri 20 °C	0,025	-	0,1014	2,093	-
Emisivnost	-	-	0,91	0,92	0,047

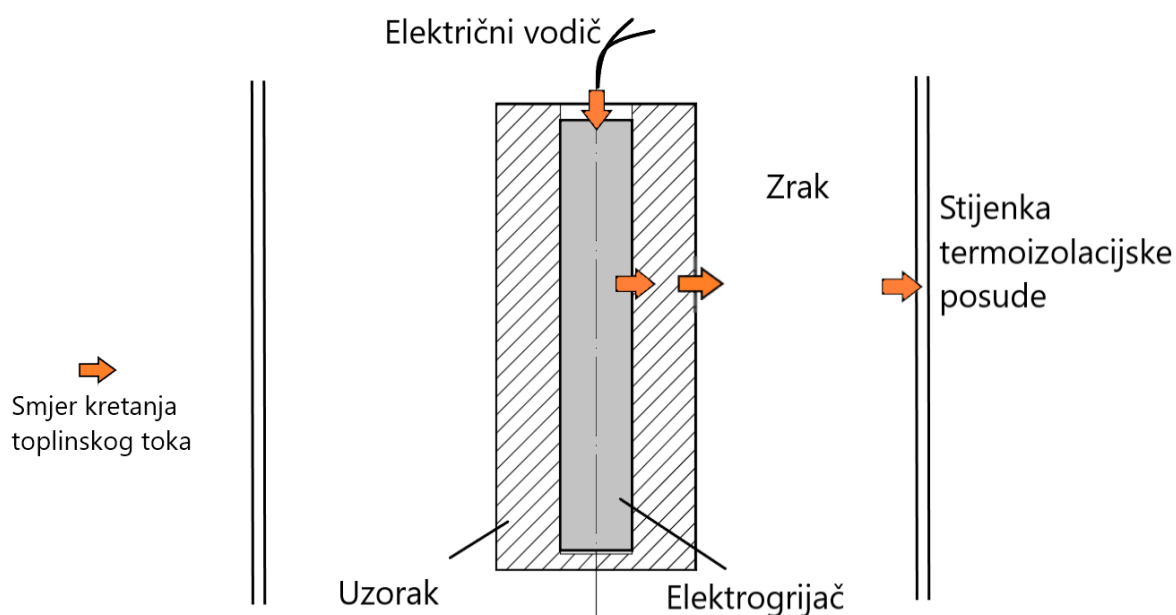
### 3.1.2. Model prijelaza topline

Elektrogrijač koji se nalazi u središtu cilindričnog uzorka izvor je topline u sustavu. Najznačajniji dio toplinskog toka širi se radijalno kroz uzorak, a zanemarivi dio aksijalno (gore i dolje). Toplinski tok polazi iz središta grijača i provodi se kroz grijač prema unutarnjoj stijenci uzorka do vanjske stijenske uzorka gdje postoji prijelaz topline konvekcijom na zrak i zračenjem na unutarnju stijenu termoizolacijske posude.

Matematički model opisanog sustava sastoji se od bilanca energije u više razina (podsustava). Svaka razina predstavlja zatvoreni sustav i određena je prema objektima koji se nalaze u interakciji. Na taj način postoji sljedeća podjela bilanci energija:

- 1) Izmjena energije električnog vodiča i elektrogrijača,
- 2) Izmjena topline provođenjem između elektrogrijača i uzorka,
- 3) Izmjena topline konvekcijom između uzorka i zraka i
- 4) Izmjena topline zračenjem između stijenci uzorka i termoizolacijske posude

Shematski prikaz modela prijelaza topline vidljiv je na Slici 12.



**Slika 12. Prikaz kretanja toplinskog toka u sustavu**

Prema navedenom prikazu moguće je uočiti izmjene topline između određenih objekata. Međutim, kako je cijeli sustav (pod pretpostavkom) idealno izoliran, mogu se postaviti granice oko sustava i promatrati ulazne i izlazne energije iz istog.

*Osnovna energetska bilanca*

Uzimajući u obzir cijeli promatrani sustav, unutar njegovih granica može se postaviti ukupna bilanca energije:

$$E_{ul} - Q_g - Q_{uz} - Q_{zr} - Q_z = 0 \quad [J] \quad (4)$$

gdje je

- $E_{ul}$  - ulazna električna energija [J],
- $Q_g$  - toplinska energija koja zagrijava elektrogrijač [J],
- $Q_{uz}$  - toplinska energija koja zagrijava ispitni uzorak [J],
- $Q_{zr}$  - toplinska energija koja se predaje zračenjem na stijenku posude [J],
- $Q_z$  - toplinska energija koja zagrijava zrak u sustavu [J].

Kako je za potrebe utvrđivanja termodinamičkih svojstava navedenih materijala od najveće važnosti odrediti toplinsku energiju koja zagrijava uzorak, tako će se i opis modela orijentirati tako da krajnji rezultat bude  $Q_{uz}$  i specifični toplinski kapacitet  $c = c_p(\vartheta)$ . Prema tome, jednadžba (1) može se preformulirati na sljedeći način:

$$Q_{uz} = E_{ul} - Q_g - Q_{zr} - Q_z \quad [J] \quad (5)$$

S obzirom na to da su poznate temperature komponenti u sustavu, slijede prikladni matematički izrazi koji opisuju članove iz glavne energetske bilance.

*Ulazna električna energija*

Električna energija koja ulazi u sustav u pretpostavljenom slučaju (bez gubitaka) u 100%-tnoj mjeri pretvara se u ulaznu toplinsku energiju  $Q_{ul}$ , a jednaka je električnoj snazi  $P_{EL}$  (mjerena u vodiču) integriranoj u vremenu. Podatke o naponu i struji tijekom mjerenja moguće je bilo očitati na multimetrima koji su postavljeni na mjernoj liniji (Poglavlje 3.2.1)

$$E_{ul} = Q_{ul} = \int_{t_0}^{t_i} P_{EL} \cdot dt = \int_{t_0}^{t_i} U \cdot I \cdot dt = U \cdot I \cdot \int_{t_0}^{t_i} dt \quad [J] \quad (6)$$

gdje su

- $Q_{ul}$  - toplinska energija koja ulazi u sustav [J],



- $P_{EL}$  - ulazna električna snaga [W],
- $U$  - napon u vodiču (mjeren voltmetrom) [V],
- $I$  - jakost struje u vodiču (mjerena ampermetrom) [A],
- $t_0$  - početni vremenski trenutak [s],
- $t_1$  - vremenski trenutak isključivanja elektrogrijača [s].

#### Toplinska energija predana grijaču

Toplinska energija predana masi grijača  $Q_g$  rezultira povećanjem temperature grijača i može se odrediti prema mjerenim vrijednostima temperatura na temelju jednadžbe

$$Q_g = m_g \cdot c_g \cdot (\vartheta_{g,t2} - \vartheta_{g,t1}) \quad [J] \quad (7)$$

gdje je

- $Q_g$  - toplinska energija koja zagrijava elektrogrijač [J],
- $m_g$  - masa elektrogrijača [kg],
- $c_g$  - specifični toplinski kapacitet grijača [J/kgK],
- $\vartheta_{g,t2}$  - temperatura grijača u krajnjem vremenskom trenutku [s],
- $\vartheta_{g,t1}$  - temperatura grijača u početnom vremenskom trenutku [s].

#### Toplinska energija predana zračenjem

Toplinska energija koja se emitira s površine vanjske stijenke uzorka  $Q_{zr}$  i rezultira povećanjem temperature stijenke termoizolacijske posude može se odrediti prema jednadžbi zračenja temeljem poznatih temperatura dviju stijenki.

$$Q_{zr} = \int_{t_0}^{t_1} A_{uz} \cdot C_{12} \left[ \left( \frac{T_{su}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{sp}}{100} \right)^4 \right] \cdot dt \quad [J] \quad (8)$$

gdje je

- $A_{uz}$  - površina oplošja ispitnog uzorka [m<sup>2</sup>],
- $C_{12}$  - konstanta zračenja između dviju stijenki [W/m<sup>2</sup>(100K)<sup>4</sup>],
- $T_{su}$  - apsolutna temperatura vanjske stijenke uzorka [T],

- $T_{sp}$  - apsolutna temperatura unutarnje stijenke posude [T],
- $t_0$  - početni vremenski trenutak [s],
- $t_i$  - vremenski trenutak postizanja stacionarnog stanja [s](Slika 13.).

Kako su vrijednosti površine oplošja  $A_{uz}$  i konstante zračenja  $C_{12}$  konstantne tijekom vremena integracije, mogu se izvući izvan integrala te jednadžba sada glasi

$$Q_{zr} = A_{uz} \cdot C_{12} \int_{t_0}^{t_i} \left[ \left( \frac{T_{su}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{sp}}{100} \right)^4 \right] \cdot dt \quad [J] \quad (9)$$

Konstanta zračenja  $C_{12}$  svojstvo je određeno emisivnošću stijenki u međudjelovanju te odnosom veličina njihovih površina. Izraz ovisnosti glasi

$$C_{12} = \frac{C_c}{\frac{1}{\varepsilon_{su}} + \omega \left( \frac{1}{\varepsilon_{sp}} - 1 \right)} \quad [W/m^2(100K)^4] \quad (10)$$

gdje je

- $C_c$  - Stefan-Boltzmannova konstanta zračenja [ $W/m^2(100K)^4$ ],
- $\varepsilon_{su}$  - emisivnost stijenke uzorka [-],
- $\varepsilon_{sp}$  - emisivnost stijenke termoizolacijske posude [-],

#### *Toplinska energija predana zraku*

Masa zraka u sustavu izmjenjuje toplinu konvekcijom s ispitnim uzorkom te sa stijenkom posude. Toplinska energija koja se predaje masi zraka  $Q_z$  i rezultira povećanjem temperature zraka u termoizolacijskoj posudi može se odrediti prema mjerenim vrijednostima temperature na temelju sljedećeg izraza

$$Q_z = m_z \cdot c_z \cdot (\vartheta_{z,t2} - \vartheta_{z,t1}) \quad [J] \quad (11)$$

gdje je

- $Q_z$  - toplinska energija predana zraku [J],
- $m_z$  - masa zraka u sustavu [kg],
- $c_z$  - specifični toplinski kapacitet zraka [J/kg·K],

- $\vartheta_{z,t2}$  - temperatura zraka u krajnjem vremenskom trenutku [s],
- $\vartheta_{z,t1}$  - temperatura zraka u početnom vremenskom trenutku [s].

### Specifični toplinski kapacitet uzorka

Nakon što se prema izrazu (5) odredi toplinska energija  $Q_{uz}$  koja zagrijava masu uzorka  $m_{uz}$  moguće je odrediti specifični toplinski kapacitet uzorka  $c_{uz}$  koji je ispitivan. Navedeno se računa prema sljedećem izrazu

$$c_{uz} = \frac{Q_{uz}}{m_{uz}(\vartheta_{uz,t2} - \vartheta_{uz,t1})} \quad [\text{J/kgK}] \quad (12)$$

gdje je

- $Q_{uz}$  - toplinska energija koja zagrijava masu uzorka [J],
- $m_{uz}$  - masa ispitivanog uzorka [kg],
- $c_{uz}$  - specifični toplinski kapacitet uzorka [J/kgK],
- $\vartheta_{uz,t2}$  - temperatura uzorka u krajnjem vremenskom trenutku [s],
- $\vartheta_{uz,t1}$  - temperatura uzorka u početnom vremenskom trenutku [s].

Važno je napomenuti da je fizički nemoguće montiranje više termoparova u samo središte uzorka na način kako bi jedan mjerio točnu temperaturu grijača, a drugi temperaturu središta uzorka (nekoliko mm razmaka). Navedeno bi uzrokovalo pucanje i degradaciju materijala na tom dijelu pa se stoga temperatura grijača odredila prema mjerenim rezultatima gdje je zagrijavan samo grijač i prikladno se ta informacija iskoristila u ovoj analizi.

Specifični toplinski kapacitet uzorka pridružuje se maksimalnoj prosječnoj temperaturi uzorka postignutoj u jednom mjerenju. Prosječna temperatura uzorka računa se na sljedeći način:

$$\vartheta_{uz,ti} = \frac{(\vartheta_{sr,ti} + \vartheta_{su,ti})}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (13)$$

gdje je

- $\vartheta_{uz,ti}$  - prosječna temperatura uzorka u i-tom trenutku [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- $\vartheta_{sr,ti}$  - temperatura središta uzorka u i-tom trenutku [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- $\vartheta_{su,ti}$  - temperatura stijenke uzorka u i-tom trenutku [ $^{\circ}\text{C}$ ].

### 3.1.3. Kritične vremenske točke

Kako bi se unaprijed razjasnilo u kojim trenucima se uzimaju relevantne temperature (krajnja i početna) koje su važne u prethodno navedenim jednadžbama topline u analizi, prikazana je krivulja razvoja temperature u uzorku na središnjem termoparu i onome na stijenci (Slika 13.).

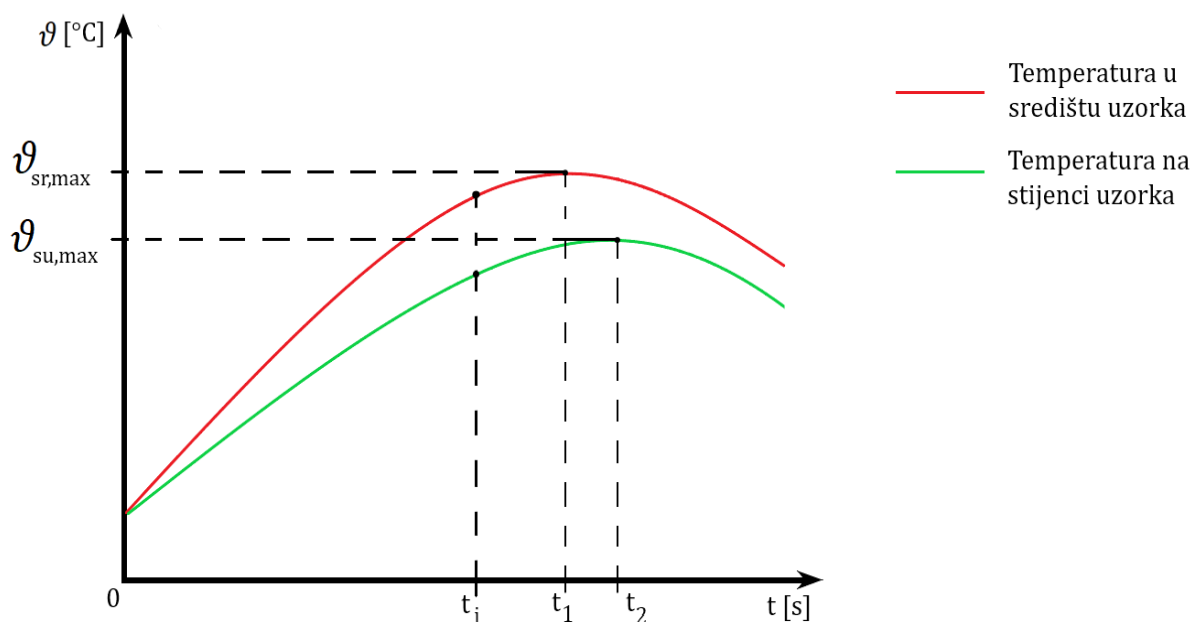
#### Stacionarno stanje

Zbog različitih pozicija dvaju termoparova u uzorku, onaj na stijenci bilježi sporiji porast temperature i niži maksimum (zelena krivulja). Početna vremenska točka u nultom trenutku  $t_0$  jednostavna je za odrediti jer obje krivulje počinju iz iste točke, ali ona krajnja koja predstavlja stacionarno stanje sustava dobiva se iz aritmetičke sredine vremenskih točaka s maksimalnim temperaturama. Stoga, izraz za izračun krajnje vremenske točke  $t_{12}$  glasi

$$t_{12} = \frac{(t_1 + t_2)}{2} \quad [\text{s}] \quad (14)$$

gdje je

- $t_{12}$  - vrijeme dogovorenog postizanja stacionarnog stanja sustava [s],
- $t_1$  - vrijeme potrebno za postizanje maksimalne temperature u središtu uzorka [s],
- $t_2$  - vrijeme potrebno za postizanje maksimalne temperature na stijenci uzorka [s].



Slika 13. Krivulja temperatura mjerenih u uzorku

---

*Točka isključivanja grijača*

U jednadžbama termodinamičkog modela ključan je trenutak  $t_i$  koji označava vrijeme trajanja uključenosti elektrogrijača u sekundama jer će to vrijeme direktno utjecati na količinu energiju ubačenu u sustav. Tijekom mjerenja bilježi se točno vrijeme isključivanja grijača, a to je u trenutku postizanja unaprijed dogovorene temperature središta (npr. 400°C ili 500 °C). Na grafu (Slika 13.) označen je opisani vremenski trenutak.

### 3.2. Provedba mjerenja

Mjerenja na ispitnim uzorcima provedena su u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Zbog mjerenja tijekom duljeg vremenskog perioda, početni temperaturne uvjeti u uzorcima i sustavu razlikovali su se i po 10 °C. Osim toga, veliki faktor tijekom provođenja eksperimenta bila je vlaga u zraku koja se proširila na uzorke tijekom hlađenja sustava i između mjerenja. Temperatura i vlaga uzrokovale su sporiji ili brži trend zagrijavanja uzorka (unošenja topline u sustav) i zbog toga su morale biti uvedene korekcije kako bi analiza bila valjana.

Prilikom određivanja temperaturno ovisnih svojstava materijala, potrebno je napraviti takve uvjete mjerenja koji će isključiti utjecaj ostalih faktora na rezultate. U slučaju utvrđivanja specifičnog toplinskog kapaciteta kada je uzorke potrebno nadzirati termoparovima ili ostalim mjernim uređajima tijekom postupka grijanja, sustav u kojem se uzorak nalazi potrebno je idealno izolirati tako da toplina koja ulazi u sustav može biti kontrolirana (zatvoren sustav).

Analiza se provodila na sljedeći način: u prije opisani zatvoren sustav kreće se s ubacivanjem toplinskog toka preko elektrogrijača (svaki materijal s određenom vrijednošću toka). Od početnog trenutka obavlja se mjerenje temperature u središtu uzorka i stijenke uzorka, kao i temperature zraka u posudi i stijenke posude. Kako se uzorak zagrijava središnji termopar mjeri rapidno povećanje temperature dok onaj vanjski bilježi sporije povećanje. Uzrok tomu je masa grijača, uzorka, isparavanje vode u uzorku itd.

Grijač se isključuje u trenutku postizanja središnje temperature koja je određena scenarijem grijanja, a ta se točka u vremenu bilježi. Svaki uzorak prošao je kroz minimalno 6 scenarija grijanja, a koji se očituju u maksimalnoj temperaturi mjerenoj u uzorku.

Scenarij s minimalnom temperaturom bio je pri 250 °C, a maksimalnom 500 °C. Dakle temperature su povećavane s inkrementom od 50 °C (250, 300, 350, 400, 450 i 500 °C). Redosljed obavljanja mjerenja nije nužno bio od najmanje do najveće temperature, a u pravilu

je bilo moguće provesti jedno do dva mjerenja u jednom danu zbog potrebnog postizanja istih početnih uvjeta (sustav se u potpunosti morao ohladiti).

Napon na varijabilnom izlazu transformatora (napon koji napaja grijač) u slučaju žbuke iznosio je 150 V (0,7 A), a u slučaju betona 220 V (1 A). Navedeni podaci mjereni su na multimetrima (Poglavlje Mjerna oprema). Prema navedenom bilo je moguće izračunati snagu koja je napajala električni grijač i određivala ulazni toplinski tok u sustav.

Nakon isključivanja grijača u trenutku postizanja željene temperature zbog akumulirane topline u grijaču se u uzorak i dalje dovodi toplina, a stacionarno stanje u sustavu postiglo se par minuta kasnije. U trenutku postizanja stacionarnog stanja bilježi se druga točka u vremenu kako bi se za analizu mogla dobiti vrijednost ubacivane topline.

Po završetku mjerenja poklopac termoizolacijske posude ostavljen je otvoren kako bi se uzorak i cijeli sustav učinkovitije ohladio. Ovo je donijelo i nužnu smetnju prilikom sljedećeg mjerenja, a to je povlačenje vlage iz okolnog prostora nazad u sustav.

### 3.2.1. Mjerna oprema

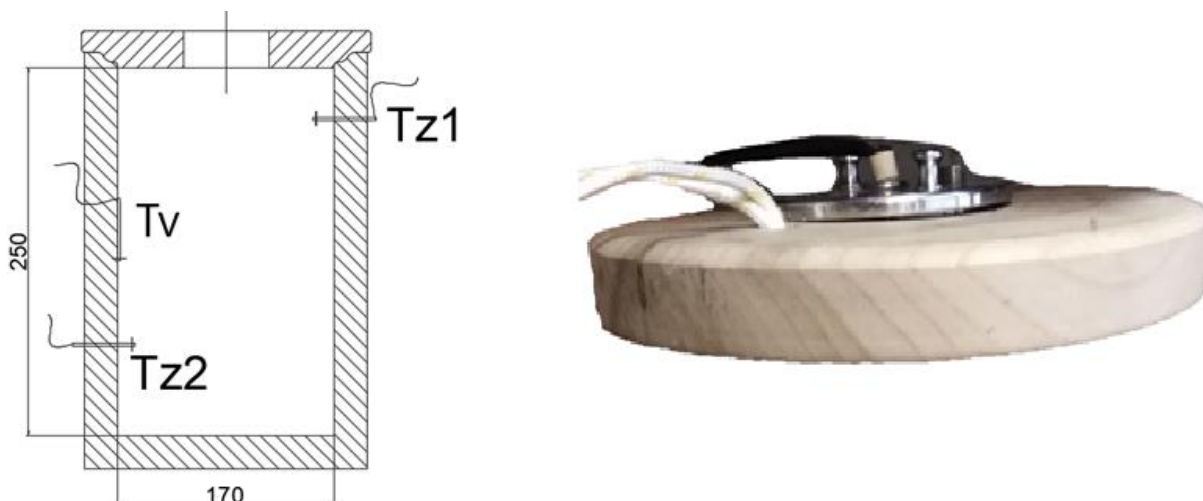
Sva mjerna oprema omogućena je od strane fakulteta i osoblja Laboratorija za toplinu i toplinske uređaje. Od mjerne opreme bile su potrebne sljedeće komponente:

- Termoizolacijska posuda
- Elektrogrijač
- Termoparovi
- Varijabilni transformator
- Multimetri
- Modul za obradu podataka
- Računalo

#### *Termoizolacijska posuda*

Kako bi se kontrolirali uvjeti tijekom provedbe ispitivanja uzorci su bili postavljeni u termički izoliranu posudu. Posuda je cilindričnog oblika promjera 170 mm i visine 250 mm (Slika 14.). U posudi su se nalazila tri termopara K tipa; dva koja su mjerila temperaturu zraka u peći i jedan koji je mjerio temperaturu stijenke posude. Stijenka posude limena je i glatka sjajna površina faktora emisivnosti  $\varepsilon_s = 0,1$ . Izolacijska posuda sastoji se (gledajući iznutra) od unutarnje sjajne stijenke, više međuslojeva za izolaciju, vanjske stijenke (obični lim). Iako je navedena izolacijska posuda nekomercijalni proizvod, proizvedena je u laboratoriju Fakulteta

strojarstva i brodogradnje na Zavodu za tehničku termodinamiku i odlično služi namijenjenoj funkciji, izoliranju ispitnog sustava. Također, na skici su vidljive pozicije triju termoparova (Tv, Tz1 i Tz2) kao i provrta u poklopcu posude kroz koji se montira uzorak. Poklopac ima središnji provrt u koji dolazi čelični umetak s držačima za grijač te bočni provrt za žice termoparova (Slika 14. desno). Dno poklopca obloženo je aluminijskom folijom za dodatnu toplinsku izolaciju.



Slika 14. Skica izolacijske posude s dimenzijama (lijevo). Poklopac (desno).



Slika 15. Realni prikaz termoizolacijske posude (lijevo. Pogled odozgora (desno).

Svaki uzorak na sebi ima montirana 2 termopara; jedan koji mjeri temperaturu središta TC i nalazi se u spomenutom provrtu na dubini od 40 mm od vrha uzorak, dok drugi TS mjeri temperaturu stijenke uzorka (Slika 15.).

### *Elektrogrijač*

Ubacivanje topline u sustav postignuto je elektrogrijačem cilindričnog oblika koji je načinjen od kvarcnog pijeska i keramika (punjenje i kontaktna površina) te bakra (vodič). Grijač ( $\phi 17$ ) je postavljen u provrt promjera 18 mm i oslanja se na donju stranicu uzorka dok s gornje strane visi na vodiču. Prikaz elektrogrijača nalazi se na Slici 16.

Grijač je vodičima spojen na varijabilni transformator preko kojega je moguće kontrolirati ubacivanu električnu snagu (toplinski tok grijača)



**Slika 16. Električni grijač**

### *Termoparovi*

Vrsta opreme koja služi za mjerenje temperature tijekom ispitivanja materijala jesu termoparovi. Korišteni su termoparovi tipa K (nikal,krom-nikal) (Slika 17.). Ovaj mjerni element funkcionira na temelju termoelektričnog efekta kojeg je otkrio Thomas Johann Seebeck. Sastoji se od dva različita električna vodiča koji pri mjerenim temperaturama proizvode razliku u potencijalu (napon). Termoparovi su tijekom predmetnog mjerenja bili spojeni s jedne strane u jedinicu za obradu mjernih podataka, a s druge strane su mjerili temperature u sustavu. U sljedećoj tablici navedeni su svi termoparovi korišteni tijekom eksperimenta.



**Slika 17. Termopar tip K**



Tablica 4. Popis korištenih termoparova

Oznaka	Mjerno mjesto
102	Temperatura okolnog (sobnog) zraka
103	Temperatura središta uzorka
104	Temperatura stijenke uzorka
105	Temperatura zraka u posudi
106	Temperatura zraka u posudi
107	Temperatura stijenke posude

### Varijabilni transformator

Varijabilni transformator dio je opreme koji služi za regulaciju snage grijača. Ulazni vodiči spojeni su na standardnu utičnicu (220V), a izlazni vodiči spojeni su na električni grijač. Okretanjem potencijometra na transformatoru moguće je odrediti izlazni napon koji napaja grijač (150V za žbuku i 220V za beton). Na Slici 18. vidi se fotografija opisanog varijabilnog transformatora korištenog tijekom mjerenja (lijevo) i slika novog modela tog uređaja (desno)[14]. Izlazne vrijednosti električne energije mjerene su na multimetrima.



Slika 18. Varijabilni transformator korišten tijekom mjerenja (lijevo). Nova izvedba (desno).

Transformator se uključivao (ručno) u isto vrijeme kada je započeto mjerenje, a isključivao u trenutku postizanja zadane temperature u središtu uzorka predviđene za određeni scenarij. S obzirom da je potrebno neko vrijeme da se transformator zagrije, početne vrijednosti ubacivane snage ne odgovaraju onima koje se ustale nakon par minuta, što je uzeto u obzir u proračunu.

*Multimetar*

Tijekom mjerenja korištena su istodobno uvijek dva multimetra. Jedan je mjerio jakost izlazne struje iz transformatora, dok je drugi bilježio izlazni napon iz transformatora. Produkt ovih dviju veličina daje iznos električne snage kojom se napajao električni grijač u sustavu. Na Slici 19. u nastavku moguće je vidjeti opisane mjerne uređaje u stvarnom eksperimentalnom postavu. Uređaji su jednaki, ali su podešeni na odgovarajući način kako bi se mjerile oba temeljna parametra električne energije.



**Slika 19.** Mjerni uređaji: ampermetar (lijevo), voltmetar (desno).

*Modul za obradu podataka*

Tijekom mjerenja korišten je Keysightov 34970A uređaj koji služi za prikupljanje podataka iz mjernih instrumenata, obradu i transfer obrađenih podatak prema računalu. Na komercijalni uređaj nadograđena je dodatna jedinica za prihvat većeg broja termoparova (proizvod iz Laboratorija za toplinu i toplinske uređaje)(Slika 21.). Ovaj uređaj omogućuje čitanje podataka iz termoparova na rezoluciji do 3 decimale, što je i više nego dovoljno za potrebe ovog rada.



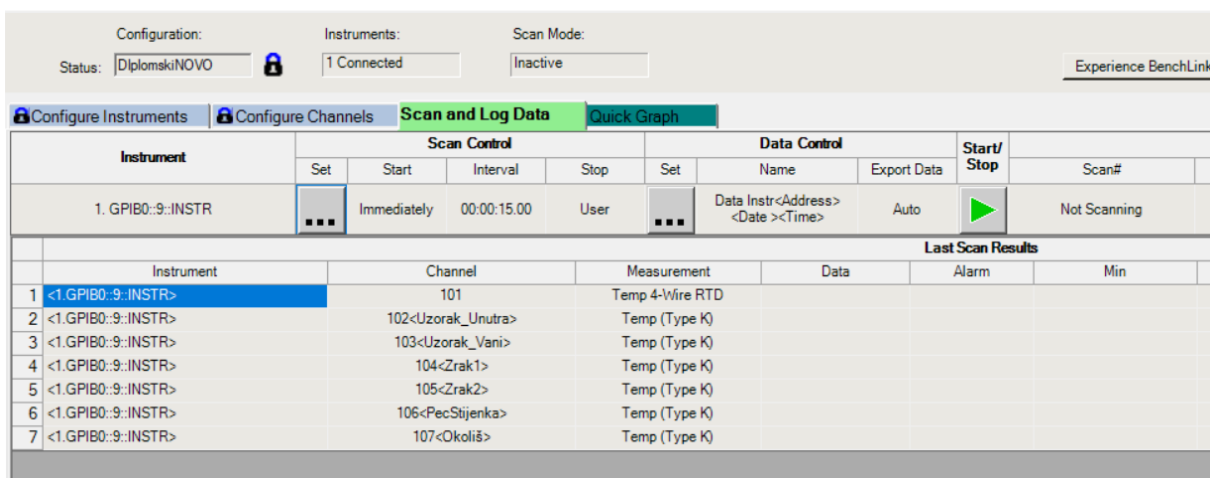
**Slika 20.** Keysight 34970A za prikupljanje podataka tijekom mjerenja [15]



Slika 21. Nadograđeni Keysight uređaj korišten tijekom mjerenja

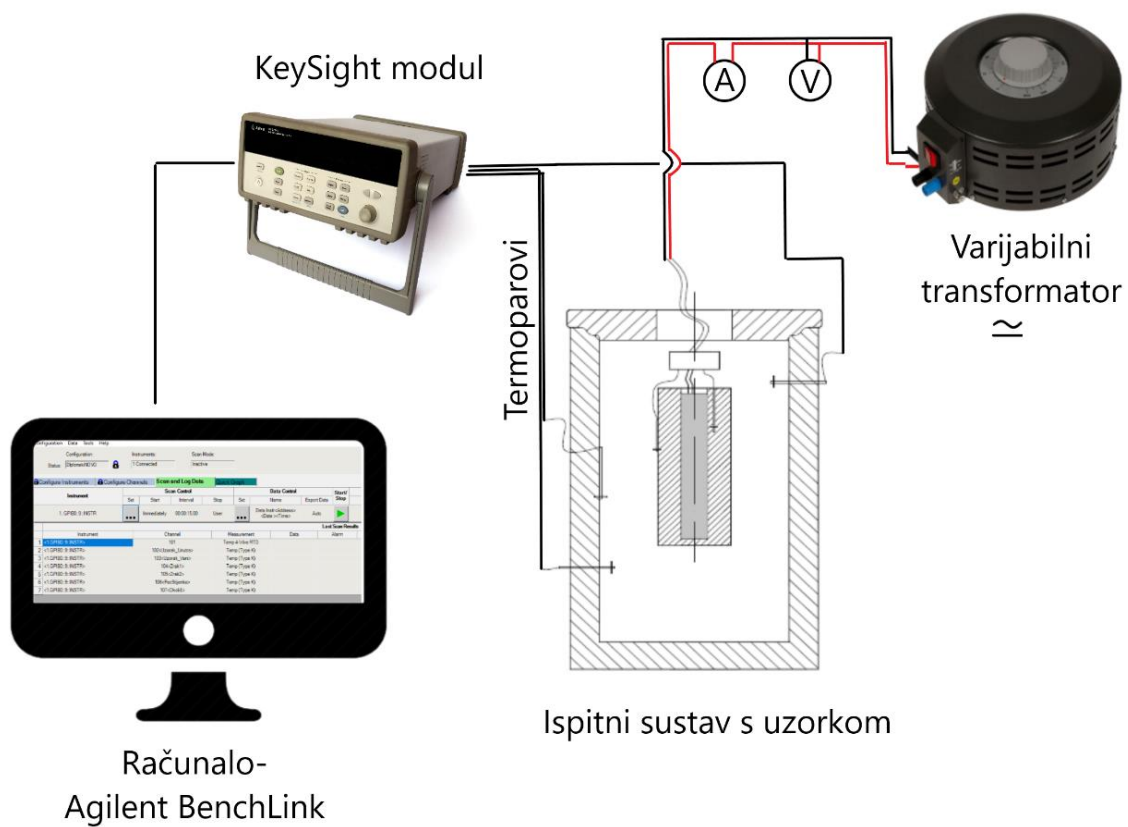
### Računalo

Sustav praćenja rezultata, kontroliranja i podešavanja scenarija eksperimenta nalazio se na računalo. Preko softverskog alata Agilent BenchLink Data Logger 3.0. (Slika 22.) moguće je bilo postaviti interval mjerenja, termoparove koji su od interesa tijekom mjerenja i ostale informacije potrebne za konačnu analizu podataka. Podaci dobiveni mjerenjem u programu su strukturirani i prilagođeni daljnjoj upotrebi.



Slika 22. Sučelje sustava Agilent BenchLink 3.0

Shema spajanja mjerne opreme tijekom izvođenja eksperimenta vidljiva je na Slici 23.



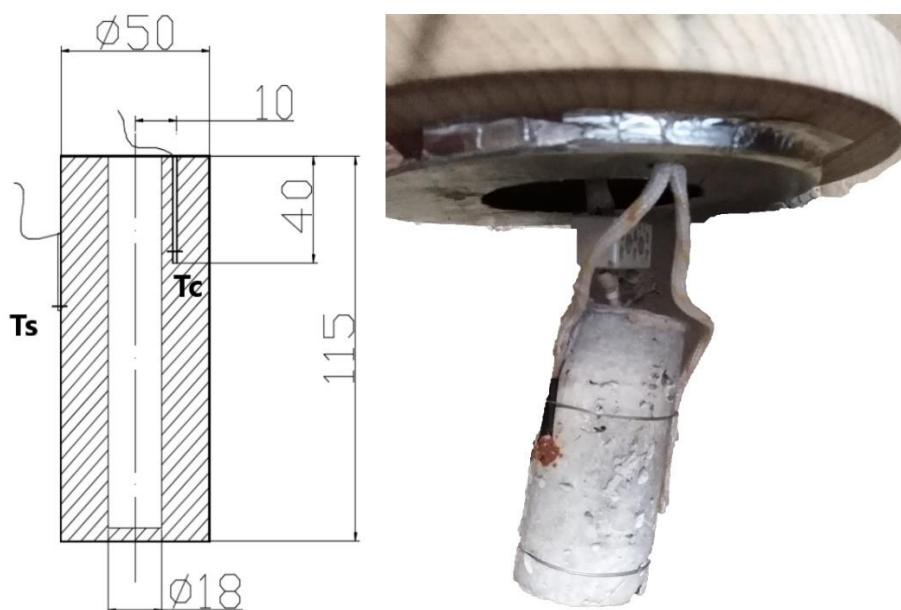
Slika 23. Shematski prikaz eksperimentalne opreme

### 3.2.3. Geometrija i priprema uzoraka

Uzorci vatrootporne žbuke i vatrobetona proizvedeni su u obliku cilindara promjera 50 mm i visine 115 mm sa središnjim provrtom promjera 14 mm. Važno je spomenuti da su uzorci porozne strukture i nisu u potpunosti homogeni kao što je vidljivo na priloženim fotografijama. Zbog navedenih činjenica strukturne prirode očekivano je odstupanje u mjerenjima dvaju uzoraka istih materijala. Tijekom pripreme za mjerenja na udaljenosti od 10 mm od središta cilindričnog uzorka izbušena je rupa minimalnog provrta za ugradnju termopara. Ta rupa kasnije je zatvorena istim materijalom koji je nastao bušenjem uz primjesu termostakla.

Uzorak je montiran na ranije opisani poklopac termoizolacijske posude. Termoparovi koji mjere temperature na uzorku (središte i stijenku) prolaze kroz provrt na poklopcu posude (Slika 24., desno).

Kotiranu skicu uzorka moguće je vidjeti na. Stvarni prikaz uzoraka vidljiv je na Slici 25. Žbuka je prikazana desno, a betonski uzorci lijevo.



**Slika 24.** Skica uzorka s dimenzijama (lijevo). Način montiranja uzorka na poklopac (desno).



**Slika 25.** Uzorci žbuke (desno). Uzorci betona (lijevo).

### 3.3. Zapažanja

Tijekom prvih mjerenja na ispitnim uzorcima zamijećena je značajna količina isparavanja iz termoizolacijske posude, a po završetku mjerenja u posudi u blizini gornjeg poklopca nalazio se kondenzat (u manjoj ili većoj mjeri) u obliku kapljica na rubu otvora. Kondenzat je nakon mjerenja uklonjen.

Osim toga, ispitivanje koje je uključivalo zagrijavanje uzoraka na visoke temperature (iznad 500 °C) vizualno je ostavilo pukotine u uzorku (najviše kod žbuke) kao posljedicu dehidracije uzoraka (Slika 26.). Također, jedan uzorak betona nakon par mjerenja po sebi je imao nakupine stvrdnute pjene iz nepoznatog razloga.

Tijekom svakog mjerenja na početku procesa grijanja snaga koja je ulazila u električni grijač bila je na maksimumu, a vremenom se smanjila i stabilizirala. Razlog tomu je povećana količina struje za vrijeme inicijacije grijanja (veći otpor energiji zbog hladnog grijača).

**Tablica 5. Iznos jakosti struje tijekom mjerenja**

Vrsta materijala (desno)		
Vrijeme mjerenja (dolje)	Žbuka	Beton
Početak grijanja	I=0,74 A	I=1,06 A
Nakon 5 minuta	I=0,69 A	I=1,00 A



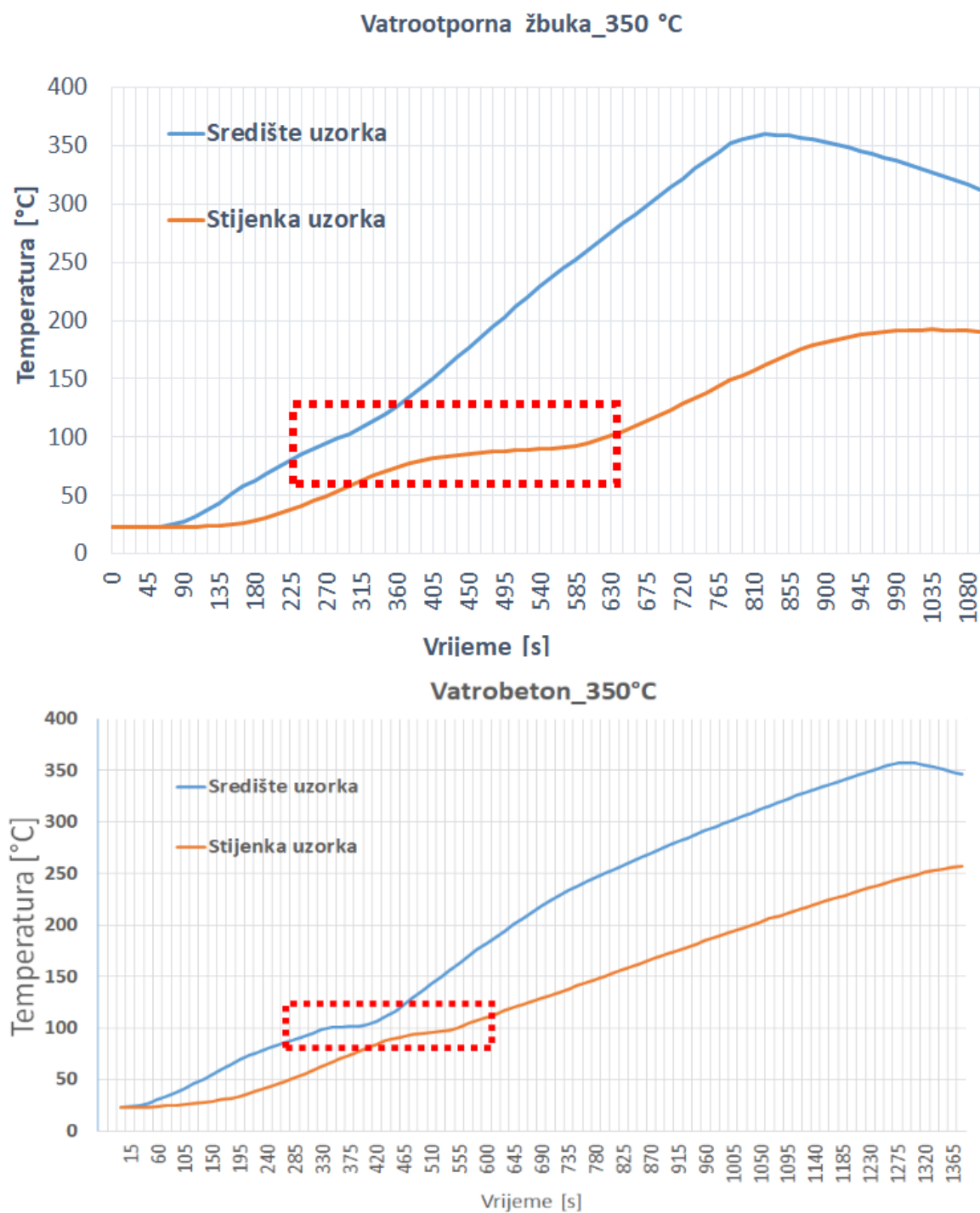
**Slika 26. Uzorak betona nakon mjerenja (lijevo). Uzorak žbuke nakon mjerenja (desno).**

### 3.3.1. Utjecaj vlage

Kao što je navedeno u literaturi [8] specifični toplinski kapacitet nekog materijala značajno ovisi o udjelu vlage u tom materijalu. Zagrijavajući uzorke unutar ovog ispitivanja zamijećena je stagnacija temperature (od 90 °C do 120 °C) na termoparu stijenke uzorka, dok je ona u središtu linearno rasla cijelo vrijeme. Dakle, toplina koja je provođenjem iz središta krenula prema stijenci potrošena je na isparavanje sadržaja vode u materijalu te iz tog razloga nije bilo porasta temperature stijenke uzorka. Ovaj proces isparavanja vode (dehidracije materijala) prividno povećava specifični toplinski kapacitet materijala jer je potrebna veća količina energija za postizanje određene temperaturne razlike.

Važno je napomenuti da je ova pojava zamijećena prilikom prvog i drugog mjerenja na istom uzorku jer je u njemu bila prisutna količina vode koja je utjecala na rezultate. Na trećem mjerenju uzorak je bio dehidriran i utjecaj vlage više nije bio značajan. Iz tog razloga se na mjerenjima koja su prikazala opisane stagnacije temperature primijenila korekcija rezultata opisana jednadžbom (3).

Na Slici 27. vidi se promjena u nagibu krivulje pri navedenim temperaturama (označeno crvenom površinom). Temperatura stijenke stagnira oko vrijednosti 100 °C, a na krivulji temperature središta vidi se smanjenje nagiba. Graf pripada mjerenjima vatrootporne žbuke.



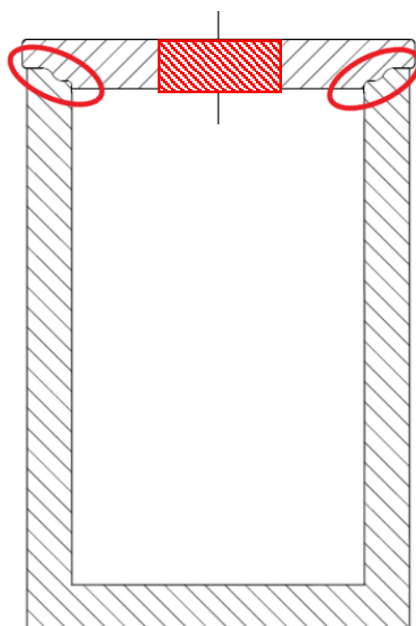
Slika 27. Utjecaj vlage na rezultate zagrijavanja uzoraka



### 3.3.2. Identifikacija gubitaka tijekom mjerenja

Tijekom mjerenja zbog opaženih kapljica kondenzata na kontaktu termoizolacijske posude i poklopca moguće je bilo zaključiti da je tu mjesto gdje postoji značajan gradijent temperature te da zbog toga para na tom mjestu kondenzira. Na shemi ispod (Slika 28.) moguće je vidjeti točno mjesto gdje se opisani proces odvija.

Osim toga, zbog isparavanja vode iz uzorka postoji bježanje vodene pare iz sustava kroz prostor u poklopcu (označen šrafiranim pravokutnikom). Međutim, taj toplinski gubitak ne uzima se u obzir tijekom proračuna jer se radi o neznčajnoj masi vodene pare.



**Slika 28. Prikaz toplinskih gubitaka u sustavu**

Osim gubitaka vezanih uz postojanje vlage u sustavu, zbog ne 100% idealno izolirane termoizolacijske posude sigurno postoji zagrijavanje mase stijenke posude te prijelaz topline u okoliš s vanjske stijenke posude. Međutim, ovi gubici zanemarivi su i nisu uzimani u obzir tijekom analize i proračuna rezultata.

Pored navedenih toplinskih gubitaka, praksa govori da postoje gubici u transformatoru tijekom pretvorbe napona, ali u razmatranjima koja su važna za zatvoreni termodinamički sustav ovakvi su gubici nevažni jer ono što se mjeri jest energija u vodiču tik ispred električnog grijača.

### 3.4. Rezultati mjerenja

Rezultati dobiveni tijekom eksperimentalnih ispitivanja spremeni su u Excel tablice, a sadržavaju podatke o temperaturama zapisanim u pravilnim vremenskim intervalima. Znajući koliko je prošlo vremena od početka do kraja zagrijavanja može se izračunati ukupno ubačena toplinska energija u sustav (Jednadžba (6)).

Tablica tempertaura sastoji se od onolikog broja kolona koliko je termoparova sudjelovalo u mjerenju. Sljedeća demonstracijska tablica (Tablica 6.) prikazuje način na koji su rezultati bili prikazani. Legenda koja sadrži odgovarajuće nazive za termoparove 102,103, itd. nalazi se u potpoglavlju Mjerna oprema (Tablica 4.).

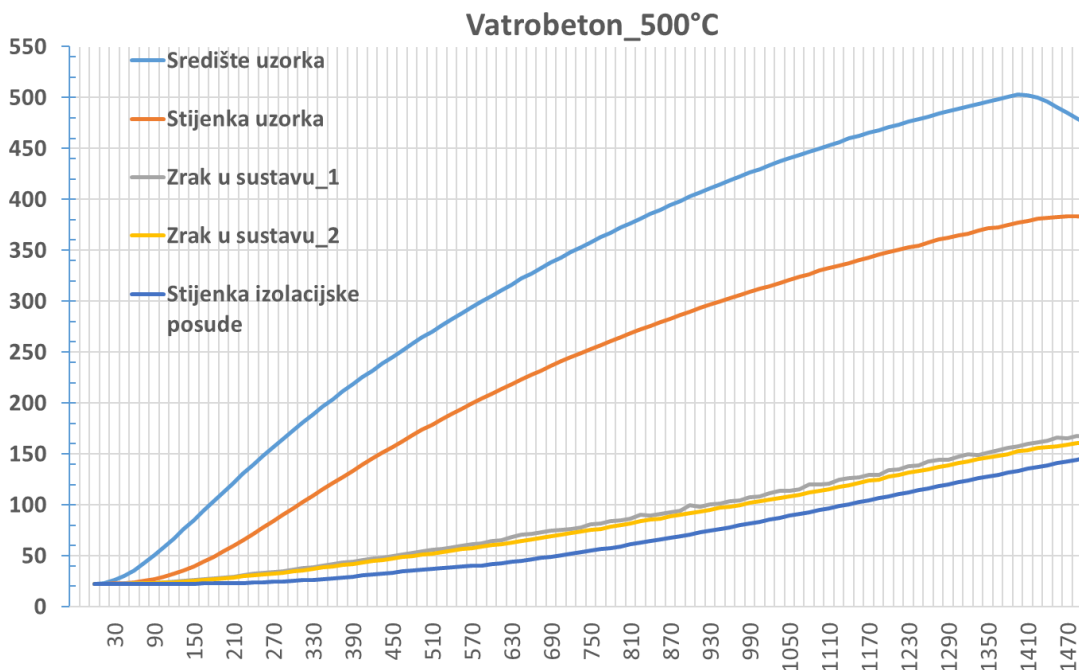
**Tablica 6. Način zapisivanja podataka iz mjerenja**

Scan	Time	101	102	103	104	105	106	107
1	30.9.2019. 12:55:36	20,881	24,96	24,51	22,637	22,435	22,598	20,853
2	30.9.2019. 12:55:46	20,884	24,929	24,537	22,682	22,567	22,601	20,872
3	30.9.2019. 12:55:56	20,886	24,928	24,541	22,713	22,632	22,59	20,911
4	30.9.2019. 12:56:06	20,883	24,946	24,533	22,76	22,705	22,587	20,906
5	30.9.2019. 12:56:16	20,883	24,949	24,536	22,768	22,729	22,605	20,879
6	30.9.2019. 12:56:26	20,882	25,045	24,53	22,783	22,741	22,58	20,867
7	30.9.2019. 12:56:36	20,88	25,264	24,591	22,791	22,741	22,57	20,884
8	30.9.2019. 12:56:46	20,882	25,671	24,7	22,825	22,754	22,565	20,875
9	30.9.2019. 12:56:56	20,879	26,347	24,842	22,838	22,751	22,593	20,872
10	30.9.2019. 12:57:06	20,878	27,253	25,088	22,855	22,789	22,584	20,879

Krajnji rezultat analize grafički je prikaz ovisnosti specifičnog toplinskog kapaciteta o temperaturi. S obzirom da su za svaki materijal ispitana po 3 uzorka, a na svakom uzorku u prosjeku je napravljeno 6 ispitivanja, po završetku ispitivanja svakom materijalu pridruženo je minimalno 18 točaka koje su sadržavale informaciju o specifičnom toplinskom kapacitetu i temperaturi kojoj isti pripada.

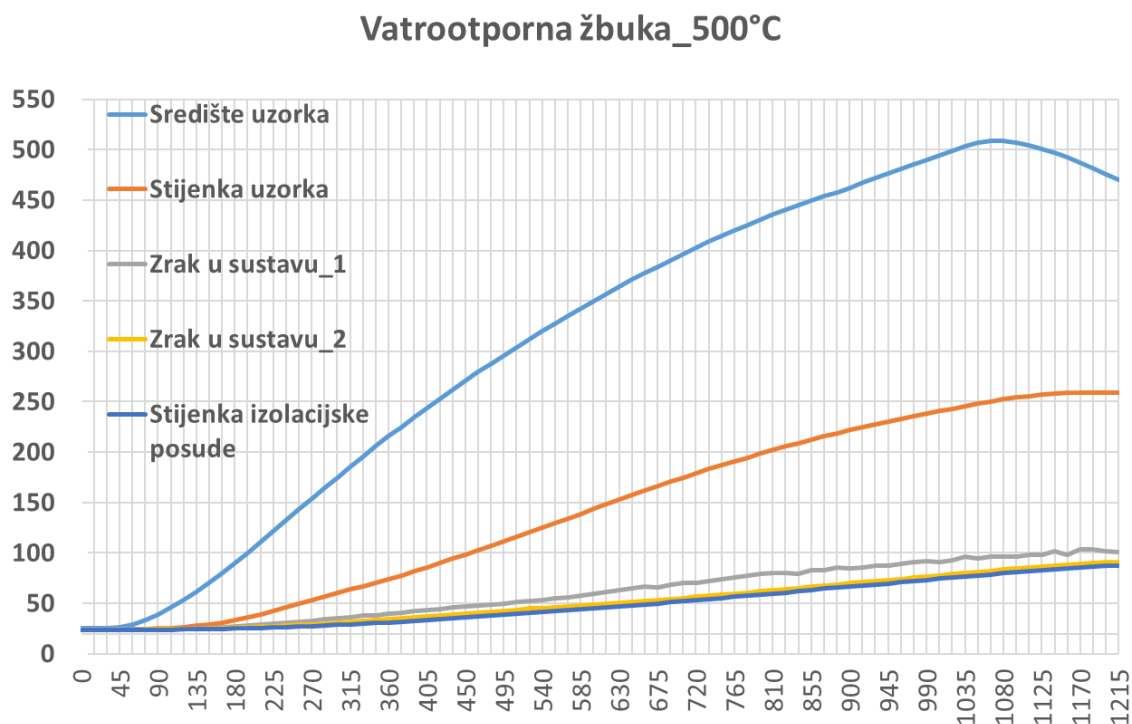
Za temperaturu kojoj se pridružuje navedeno termodinamičko svojstvo odabran je prosjek temperature kroz cijeli volumen uzorka u trenutku postizanja stacionarnog stanja (opisano prethodno u tekstu).

Nakon što su podaci sortirani u Excel tablice bilo je moguće napraviti krivulje temperaturnog razvoja u uzorcima tijekom zagrijavanja i hlađenja (Slika 29.).



**Slika 29. Prikaz temperaturnog profila termobetona pri zagrijavanju do 500°C**

Moguće je uočiti na krivulji temperature stijenke uzorka da ne postoji opisana stagnacija u porastu temperature zbog ishlapljivanja vode iz uzorka. Razlog tomu jest što je navedeni uzorak već prošao nekoliko ciklusa mjerenja (grijanja) koji su za posljedicu već imali dehidraciju uzorka te nije postojala značajna količina vode koja bi mogla naknadno ishlapiti.

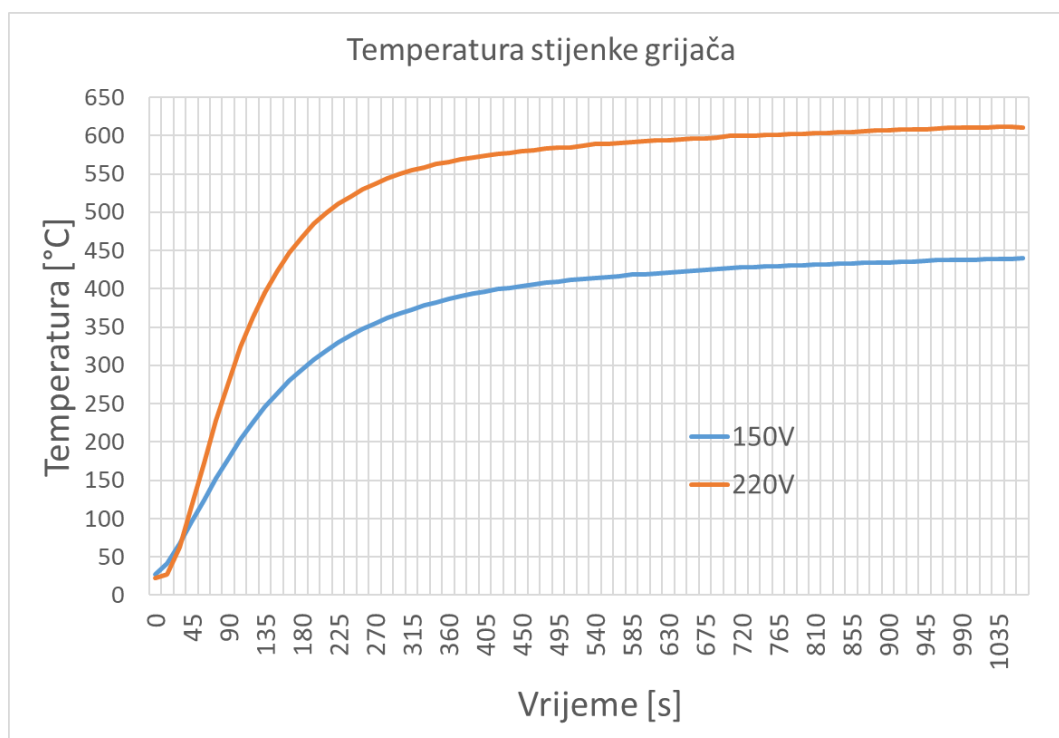


**Slika 30. Prikaz temperaturnog profila vatrootporne žbuke pri zagrijavanju do 500°C**

S obzirom na to da točni tehnički podaci o električnom grijaču nisu bili dostupni tijekom analize, grijač je zasebno podvrgnut ispitivanju kako bi se utvrdila dinamika njegovog ponašanja prilikom zagrijavanja. Na taj način izmjereni podaci o grijaču su se mogli primijeniti na analizu zagrijavanja cijelog sustava.

Eksperimentalni postav i mjerna oprema koji su korišteni pri ispitivanju grijača u potpunosti su bili jednaki kao u slučaju analize uzoraka materijala. Grijač je bio ispitan na sljedeći način: u termoizolacijsku posudu (koja je korištena i za ostala mjerenja) bio je postavljen samo grijač bez uzorka. Mjerenje je započelo u trenutku paljenja transformatora spojenog na vodiče grijača. Ispitivanje je napravljeno pod istim naponima koji su korišteni tijekom analize vatrootporne žbuke i termobetona (150V i 220V). Izmjerene jakosti struje na ampermetru tijekom oba mjerenja odgovarale su onima u slučaju osnovne analize (0,7A u slučaju žbuke i 1A u slučaju betona).

Točni cilj ovog dodatnog ispitivanja bio je odrediti krivulju temperaturne ovisnosti grijača o vremenu zagrijavanja te njegov specifični toplinski kapacitet. Rezultati ispitivanja prikazani su u nastavku.

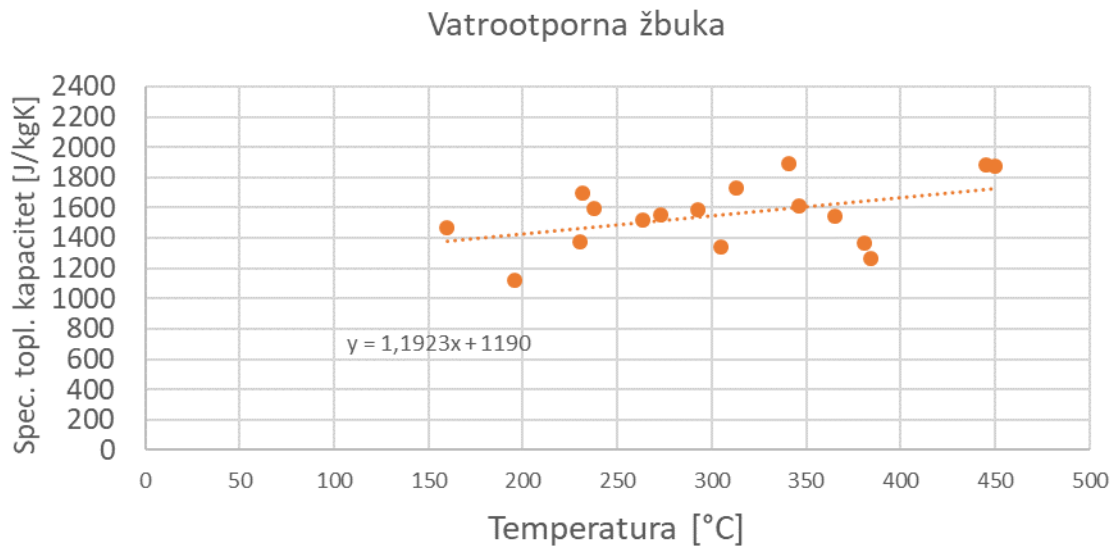


**Slika 31. Krivulja ovisnosti temperature stijenke grijača o vremenu. Zagrijavanje pri 150V.**

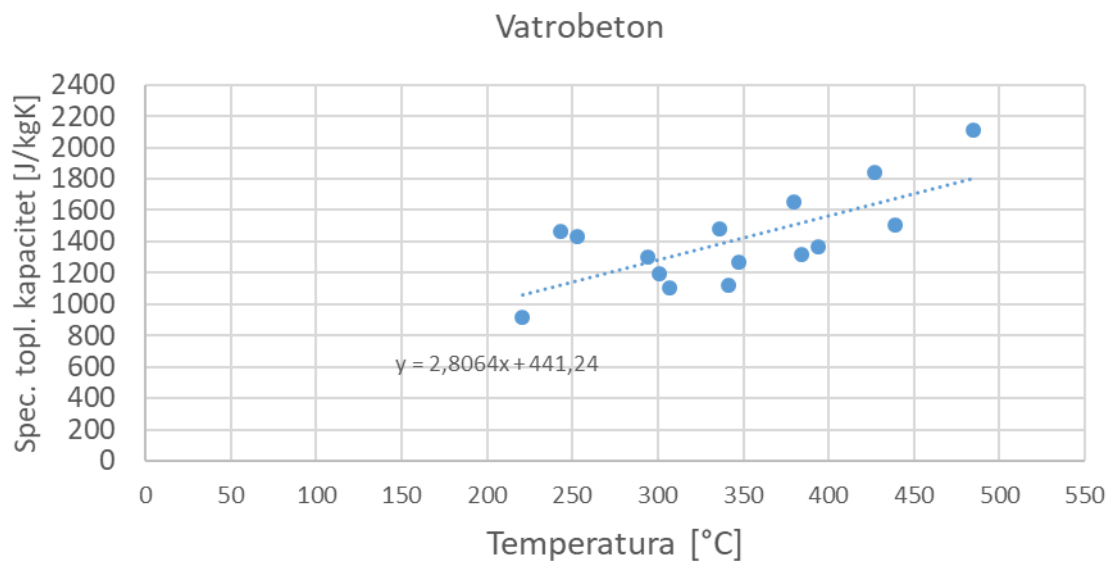
**Tablica 7. Specifični toplinski kapacitet elektrogrijača**

Temperatura [°C]	20	100	200	300	400
$c_p$ [J/kgK]	1200	1250	1300	1400	1600

Rezultati dobiveni mjerenjem specifičnog toplinskog kapaciteta materijala vatrootporne žbuke i vatrobetona prikazani su u nastavku (Slika 32. i Slika 33.).



**Slika 32. Specifični toplinski kapacitet vatrootporne žbuke u ovisnosti o temperaturi**



**Slika 33. Specifični toplinski kapacitet vatrobetona u ovisnosti o temperaturi**

## 4. NUMERIČKA ANALIZA

U sklopu utvrđivanja termodinamičkih svojstava materijala poželjno je napraviti numeričku provjeru eksperimentalnih mjerenja kako bi se utvrdila ispravnost rezultata i zaključaka donesenih temeljem toga. Pristupajući rješavanju problema potrebno je odabrati valjani model prijelaza topline u sustavu. Cilj numeričke analize je potvrditi trend i zaključke dobivene na temelju rezultata mjerenja. Odstupanja su očekivana, zbog različitih faktora koji onemogućuju potpuno podudaranje rezultata ovih dviju metoda pri provođenju analize predstavljenog problema.

Numerička analiza predstavljenog problema provedena je u računalnom alatu ANSYS (Transient Thermal modul).

### 4.1. Opis analize

Tijekom numeričke analize prioritet je bio motrenje temperature uzorka pa je stoga ostatak komponenti izdvojen iz ovog postupka. Umjesto stvarnih komponenti koje sudjeluju u numeričkoj analizi uvedeni su adekvatni rubni uvjeti. Umjesto fizičkog sudjelovanja grijaača u simulaciji predstavljen je razvoj temperature na unutarnjoj stijenci uzorka. Vrijednost te temperature dobivena je na temelju ranije odrađene eksperimentalne analize.

Postupak provjere eksperimentalnih rezultata temeljio se na praćenju dobivenih temperatura stijenke uzorka numeričkom analizom. Kao ulazni parametri u numeričkoj analizi bili su podaci iz eksperimentalne analize: specifični toplinski kapacitet i temperatura unutarnje stijenke uzorka te temperatura okolišnog zraka.

Rezultat numeričke analize je vremenski razvoj temperature na vanjskoj stijenci uzorka koji je uspoređen sa stvarnim vremenskim razvojem temperature stijenke mjerenim tijekom eksperimenta.

Tijekom svakog pojedinog mjerenja mijenjani su ispitni uvjeti (početne temperature i različiti scenariji grijanja). Stoga se u numeričkoj provjeri vodilo računa da specifični početni i rubni uvjeti svakog pokusa odgovaraju onima koji su u stvarnosti zabilježeni u laboratoriju. U nastavku slijedi matematički model na kojem se temelji numerički rješavač i detalji o izradi geometrije i postavkama rješavača.

## 4.2. Matematički model

Model prijenosa topline koji se koristi u numeričkoj metodi rješavanja zasniva se na temeljnoj jednadžbi provođenja topline u krutinama. Prema [16] polazna jednadžba provođenja topline u Kartezijevom koordinatnom sustavu, bez izvora topline glasi

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) \quad (15)$$

u kojoj

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (16)$$

predstavlja temperaturnu provodnost (eng. thermal diffusivity) i izražava se u  $\text{m}^2/\text{s}$ .

U cilindričnom koordinatnom sustavu,  $r, \varphi, z$ , jednadžba (15) poprima oblik

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + \frac{\Phi_v}{\rho c} \quad (17)$$

Prema [16] može se pretpostaviti dominantno širenje topline samo u smjeru polumjera uzorka  $r$ . Radi toga iščezavaju sljedeći članovi u prethodnoj diferencijalnoj jednadžbi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = 0; \quad & \text{i} \quad \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = 0 \\ \frac{\partial \vartheta}{\partial \varphi} = 0; \quad & \text{i} \quad \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \varphi^2} = 0 \end{aligned}$$

te se ista transformira u oblik

$$\lambda(t) \left( \frac{\partial^2 \vartheta(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta(r,t)}{\partial r} \right) = \rho c(t) \frac{\partial \vartheta(r,t)}{\partial t} \quad (18)$$

gdje je

- $\vartheta(r, t)$  - temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- $\lambda(\vartheta)$  - toplinska provodnost [ $\text{W}/\text{mK}$ ],
- $\rho$  - gustoća materijala [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],
- $c$  - specifični toplinski kapacitet materijala [ $\text{J}/\text{kgK}$ ],
- $t$  - vrijeme [ $\text{s}$ ]
- $r$  - koordinata ( $0 \leq r \leq D/2$ ,  $D$  je vanjski promjer uzorka).

Koristeći eksplicitnu metodu prema [17], za izračun temperature određene ćelije u određenom vremenskom trenutku koristi se samo informacija o temperaturama susjednih ćelija što dovodi do jednostavne računalne sheme operacija:

(i) Za ćeliju u sredini modela (Slika 34.) vrijedi:

$$\vartheta'_m = F_0 \left[ \frac{2(\lambda_{m-1,m} \cdot \vartheta_{m-1} + \lambda_{m+1,m} \cdot \vartheta_{m+1})}{\lambda_{m-1,m} + \lambda_{m+1,m}} + \vartheta_m \left( \frac{1}{F_0} - 2 \right) \right] \quad (19)$$

gdje je  $F_0$  definiran kao

$$F_0 = \frac{(\lambda_{m-1,m} + \lambda_{m+1,m}) \cdot \Delta t}{2\rho c(\Delta r)^2} \quad (20)$$

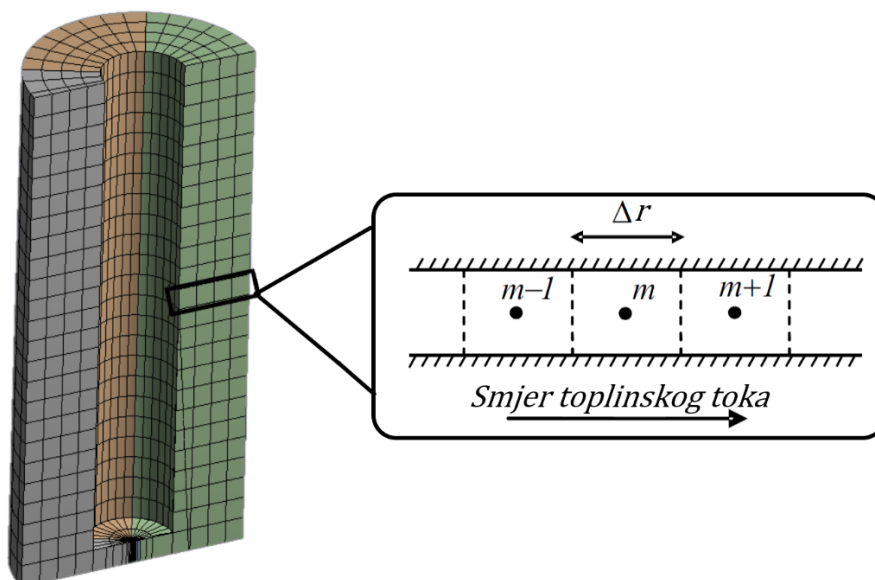
$\vartheta'_m$  je temperatura ćelije  $m$  u sljedećem vremenskom koraku, dok je  $\lambda_{i,j}$  toplinska provodnost pri prosječnoj temperaturi ćelija  $i$  i  $j$ :

$$\lambda_{i,j} = \lambda \left( \frac{\vartheta_i + \vartheta_j}{2} \right). \quad (21)$$

Numerička stabilnost ove eksplicitne metode zahtijeva da je

$$\Delta t \leq \frac{\rho c(\Delta r)^2}{(\lambda_{m-1,m} + \lambda_{m+1,m})}. \quad (22)$$

Kako je dominantno širenje topline u radijalnom smjeru, prikazat će se takav isječak modela koji prikazuje ćelije numerirane prema jednadžbama (Slika 34.).



Slika 34. Diskretizacija sredine uzorka prema dominantnom širenju topline



(ii) Za rubnu ćeliju (Slika 35.) vrijedi:

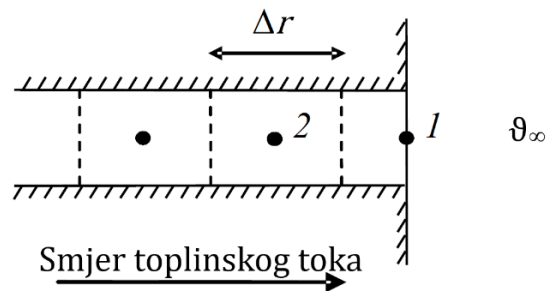
$$\vartheta'_m = 2F_0 \left[ \vartheta_2 + \frac{\alpha \Delta r}{\lambda_1} \vartheta_\infty + \vartheta_1 \left( \frac{1}{2F_0} - 1 - \frac{\alpha \Delta r}{\lambda_1} \right) \right] + \omega \varepsilon \sigma [(\vartheta_\infty + 273)^4 - (\vartheta_1 + 273)^4] \frac{2\Delta t}{\rho c \Delta r} \quad (23)$$

gdje je  $F_0$

$$F_0 = \frac{\lambda_1 \Delta t}{\rho c (\Delta r)^2},$$

- $\alpha(\vartheta)$  - koeficijent konvekcije [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ],
- $\vartheta_\infty$  - temperatura okolišnog zraka [ $^\circ\text{C}$ ],
- $\omega$  - geometrijski faktor,
- $\varepsilon$  - emisijski faktor,
- $\sigma$  - Stefan-Boltzmannova konstanta [ $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ].

Grafički prikaz mreže na opisanom rubnom dijelu moguće je vidjeti na Slici 35.

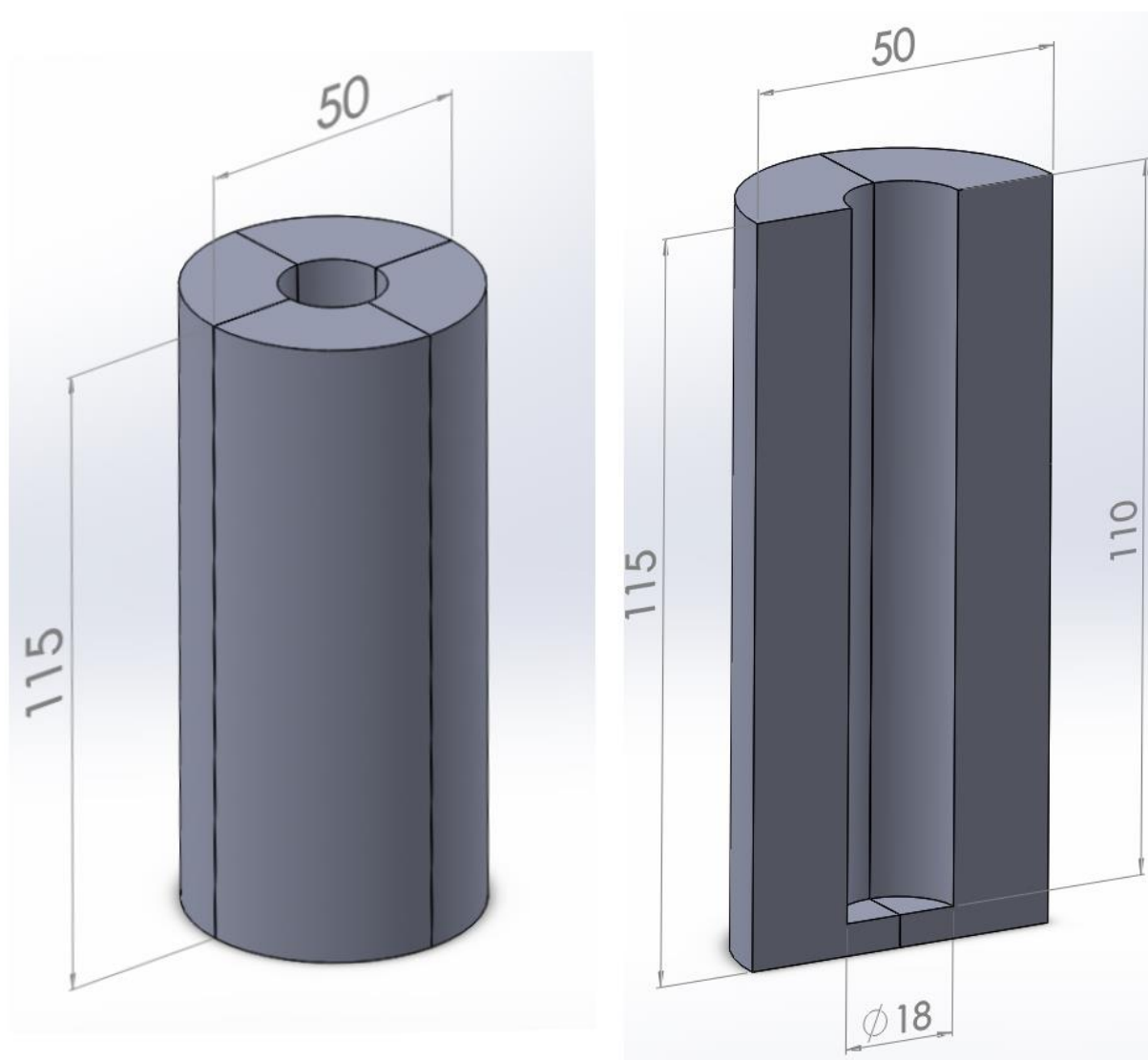


Slika 35. Diskretizacija modela na rubu uzorka

### 4.3. Izrada geometrije i mreže

Geometrija uzorka izrađena je u softverskom paketu Solidworks 2017 prema stvarnim dimenzijama uzoraka izmjerenim u laboratoriju. Dimenzije ispitnog uzorka mogu se pogledati na tehničkom crtežu u Prilogu I.

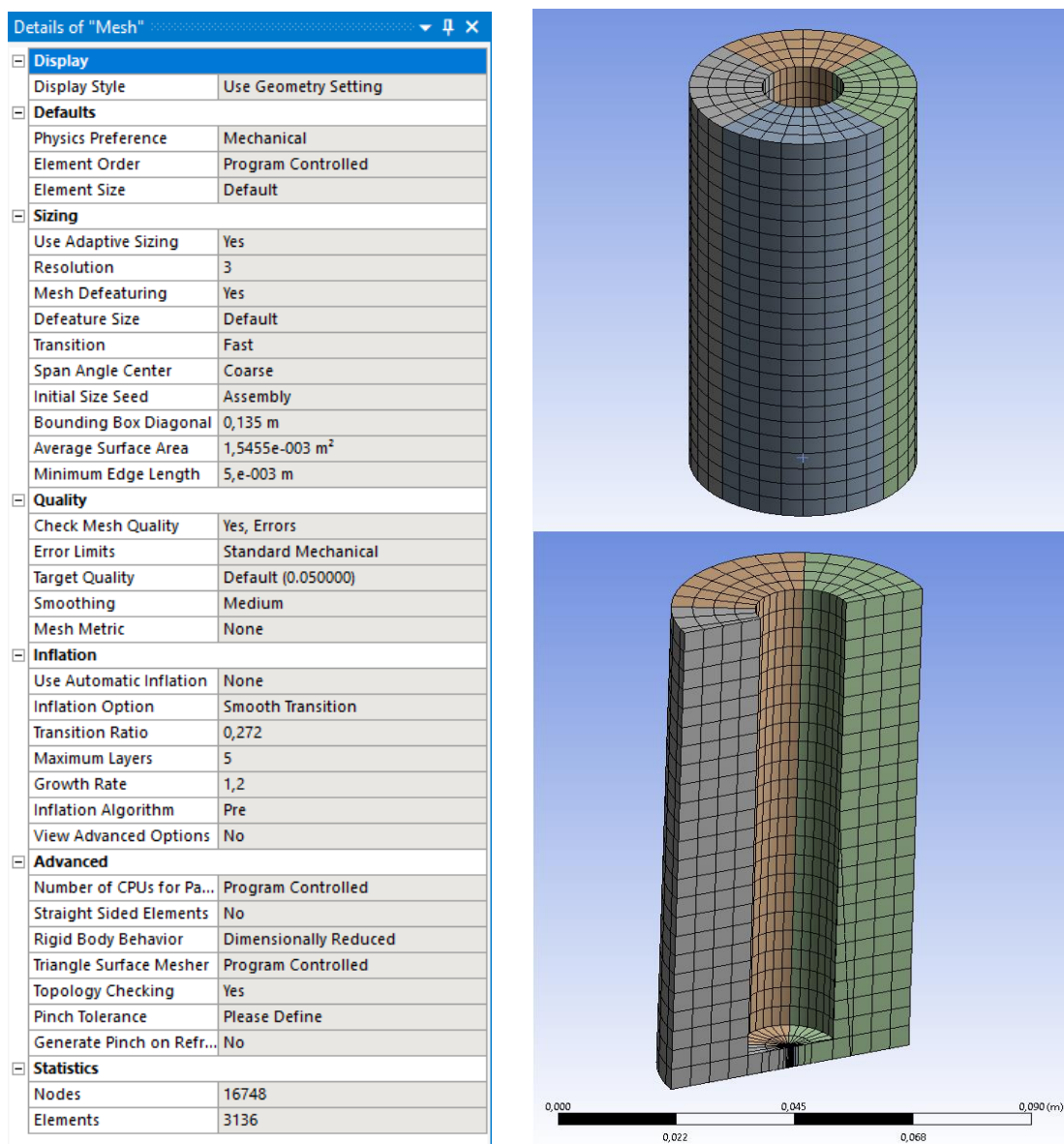
Tijekom ekstrudiranja modela pazilo se da uzorak bude simetrično podijeljen na 4 dijela kao što je vidljivo na Slici 36. Na ovaj način model je bio pravilno pripremljen za izradu mreže u sljedećem koraku. Iako je podijeljen na dijelove, uzorak se i dalje ponaša kao jedno kruto tijelo jer su dijelovi idealno spojeni.



Slika 36. Model ispitnog uzorka izrađenog u SolidWorks-u.

Nakon što je dio iz Solidworks-a uvezen u Mechanical modul ANSYS-a bilo je potrebno odrediti metodu izrade mreže (način podjele uzorka na sitnije dijelove). Pravilna podjela modela uzorka na djeliće skraćuje vrijeme potrebno za numeričku simulaciju i pogoduje ciljanoj analizi određenih dijelova uzorka. Na taj način može se preciznije odraditi analiza rubnih dijelova uzorka (unutarnja stijenka gdje je kontakt s grijačem i vanjska stijenka). Ciljana analiza dijelova u numeričkom modelu olakšava usporedbu sa stvarno izmjerenim temperaturama pomoću termoparova u eksperimentu.

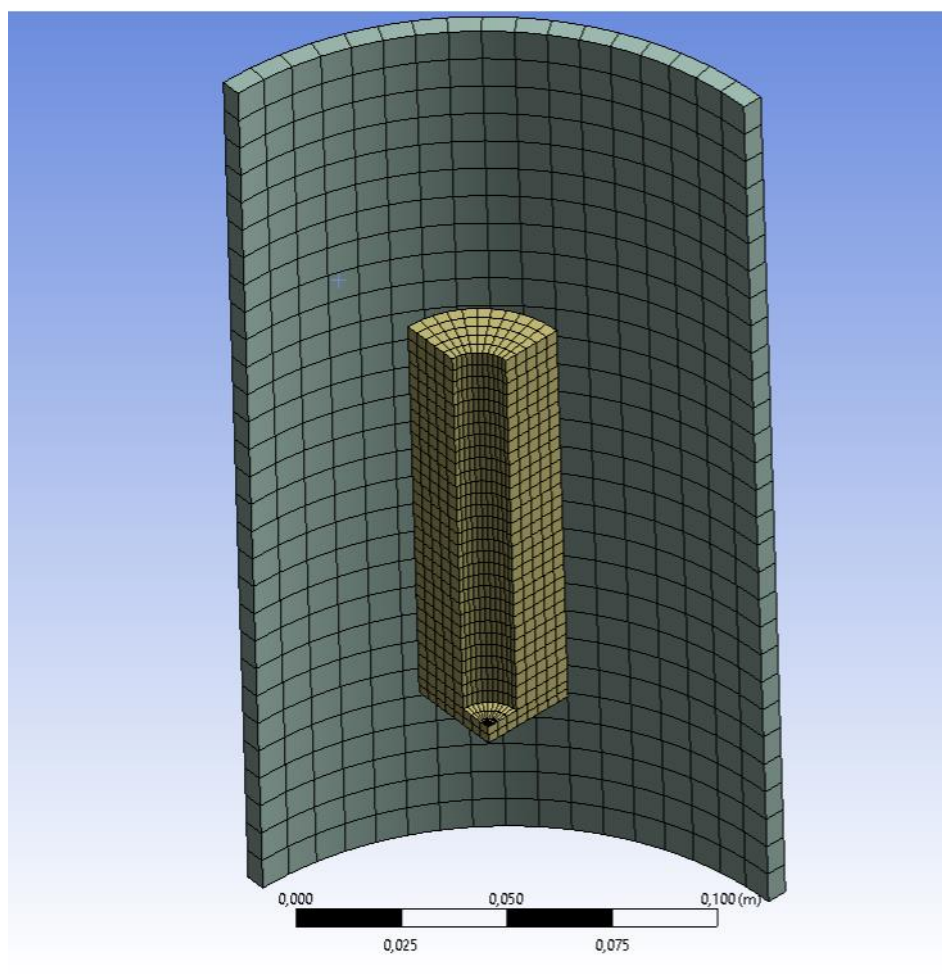
Za izradu mreže odabrana je heksagonalna metoda s dodatnom višezonskom podjelom. Na priloženoj grafici (Slika 37.) vidljiv je način na koji je napravljena mreža modela uzorka.



Slika 37. Detalji izrade mreže (lijevo). Prikaz mreže (desno).

Rezolucija mreže odabrana je najbolja moguća (najveći broj ćelija) u rasponu koji dopušta ANSYS-ov rješavač (maksimalno 500.000 ćelija).

Osim geometrije uzorka u numeričku analizu bilo je potrebno uključiti geometriju termoizolacijske posude za pravilno definiranje rubnog uvjeta zračenja. Kako je dominantni prijenos topline u radijalnom smjeru, za analizu je model uzorka i stijenke posude podijeljen na četvrtine kako bi se uštedilo na broju potrebnih računalnih operacija. Ispod je prikazana mreže podijeljenog uzorka i modela stijenke posude.



**Slika 38. Mreža uzorka i stijenke posude**

Tijekom izrade mreže i geometrije isprobano je više mogućih kombinacija uzorka i stijenke posude (više ploha u modelu, cijeli sustav uključen, itd.). Uključivanje ostalih stranica i ploha u simulaciju nije donosilo značajne promjene u rezultatima, a zahtijevalo je dodatni procesorski angažman. Stoga je kao optimalni rezultat izabrana kombinacija ploha vidljiva na Slici 38.

#### 4.4. Rubni i početni uvjeti

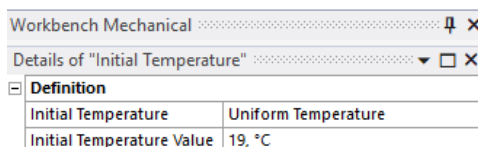
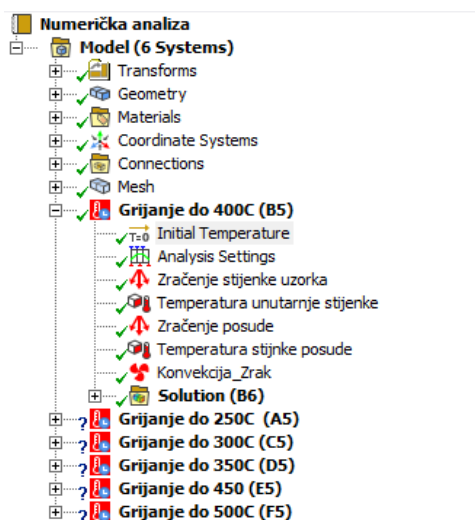
Rubni i početni uvjeti su preuzeti iz eksperimentalne analize te su primijenjeni u numeričkoj analizi kao ulazni parametri ili kao referentne vrijednosti za provjeru (promjenjiva temperatura vanjske stijenke uzorka).

##### Početni uvjeti

Temperatura cijelog sustava na početku mjerenja je jednake vrijednosti što znači da je u početnom trenutku sustav u stacionarnom stanju. U Prilogu II prikazana je tablica sa svim početnim temperatura tijekom mjerenja.

Početna temperatura (iz tablice rezultata eksperimenta) u ANSYS rješavaču primijenjena je se za cijeli sustav preko unosa „Initial Temperature“. U grafičkom prilogu u nastavku, na primjeru početne temperature od 19,1 °C , može se vidjeti način unosa početnog uvjeta.

Osim navedenog globalnog početnog uvjeta, informacija o početnim temperaturama pojedinih stijenki ili zraka sadržana je u promjenjivom rubnom uvjetu (nulti trenutak).



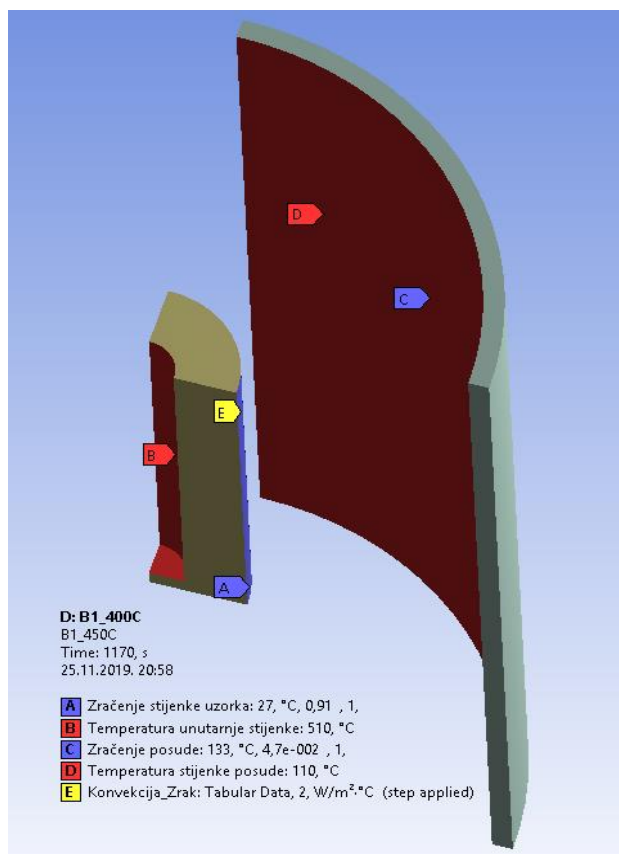
Slika 39. Zadavanje globalnog početnog uvjeta

Rubni uvjeti primijenjeni u numeričkoj analizi također su dobiveni iz rezultata eksperimentalne analize. Prema podacima o temperaturi grijača koja se posebno mjerila, uz korekcije je u numeričkom modelu na unutarnju stijenku primijenjen pridruženi promjenjivi rubni uvjet temperature stijenke. Nadalje, na isti način je prema rezultatima mjerenja temperature zraka u posudi (termoparovi mjere temperaturu zraka na dvije pozicije u posudi) primijenjen rubni uvjet temperature okolišnog zraka u numeričkoj analizi. Na Slici 39. moguće je vidjeti sve uvjete zadane u izborniku postavki rješavača:

- Temperatura unutrašnje stijenke uzorka
- Konvekcija sa stijenke uzorka prema zraku
- Zračenje stijenke uzorka prema stijenci posude
- Temperatura stijenke posude

U Prilogu II moguće je pogledati tablice svih podataka o temperaturama korištenim u numeričkoj analizi.

Na Slici 40. može se vidjeti način zadavanja spomenutih promjenjivih rubnih uvjeta temperature unutarnje stijenke uzorka i temperature okolišnog zraka (zraka u sustavu).

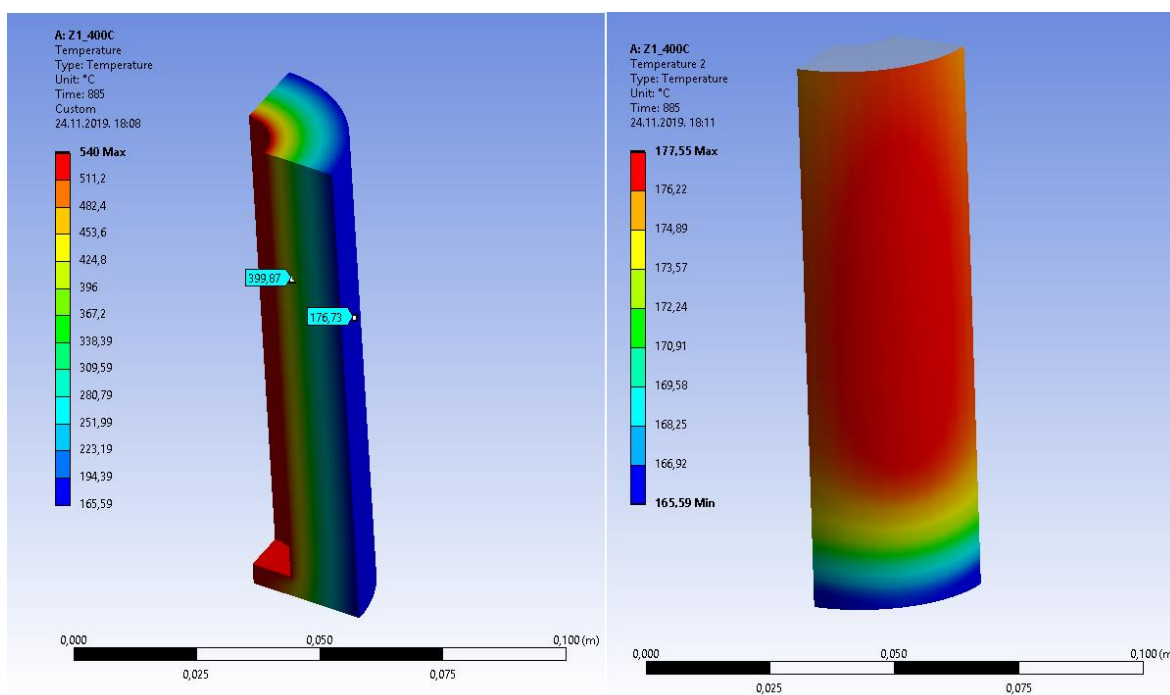


Slika 40. Zadavanje rubnih uvjeta (ANSYS Mechanical)

#### 4.5. Rezultati numeričke analize

Prikaz rezultata biti će priložen za određene scenarije u obliku temperaturnih mapa, dok će krajnji prikaz rezultata biti dan na grafu, kako bi konačna usporedba bila preglednija.

Prvi uzorak vatrootporne žbuke zagrijavan je u nekoliko scenarija od kojih je ovdje za provjeru numeričkom analizom odabran scenarij zagrijavanja do 400°C (Slika 41.).



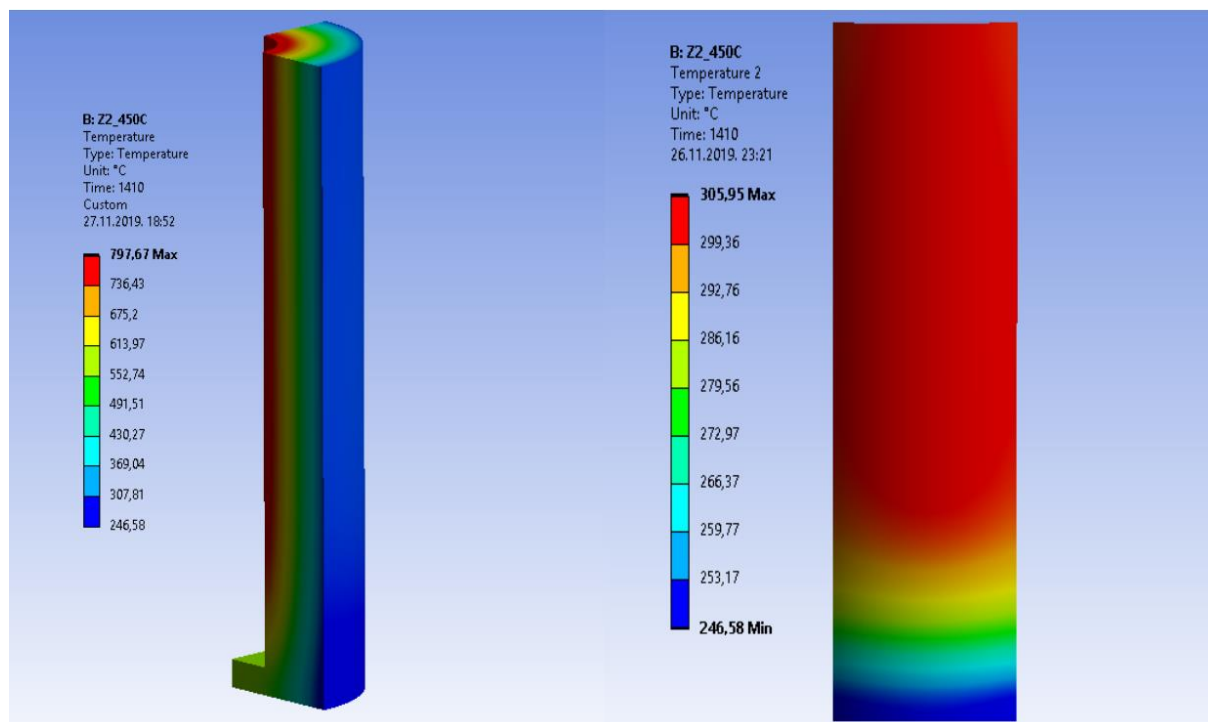
**Slika 41. Temperaturna mapa prvog uzorka vatrootporne žbuke (lijevo).  
Temperatura vanjske stijenske (desno).**

Prema priloženim slikama vidljivo je kako je zbog pozicije grijača na udaljenosti 5 mm od donjeg ruba uzorka temperaturna raspodjela tako orijentirana da je donji dio ostao najmanje zagrijan, odnosno najniže je temperature. To odgovara zapažanjima tijekom eksperimenta kada je i zrak u donjem dijelu posude bio hladniji (utjecaj strujanja zraka je zanemariv).

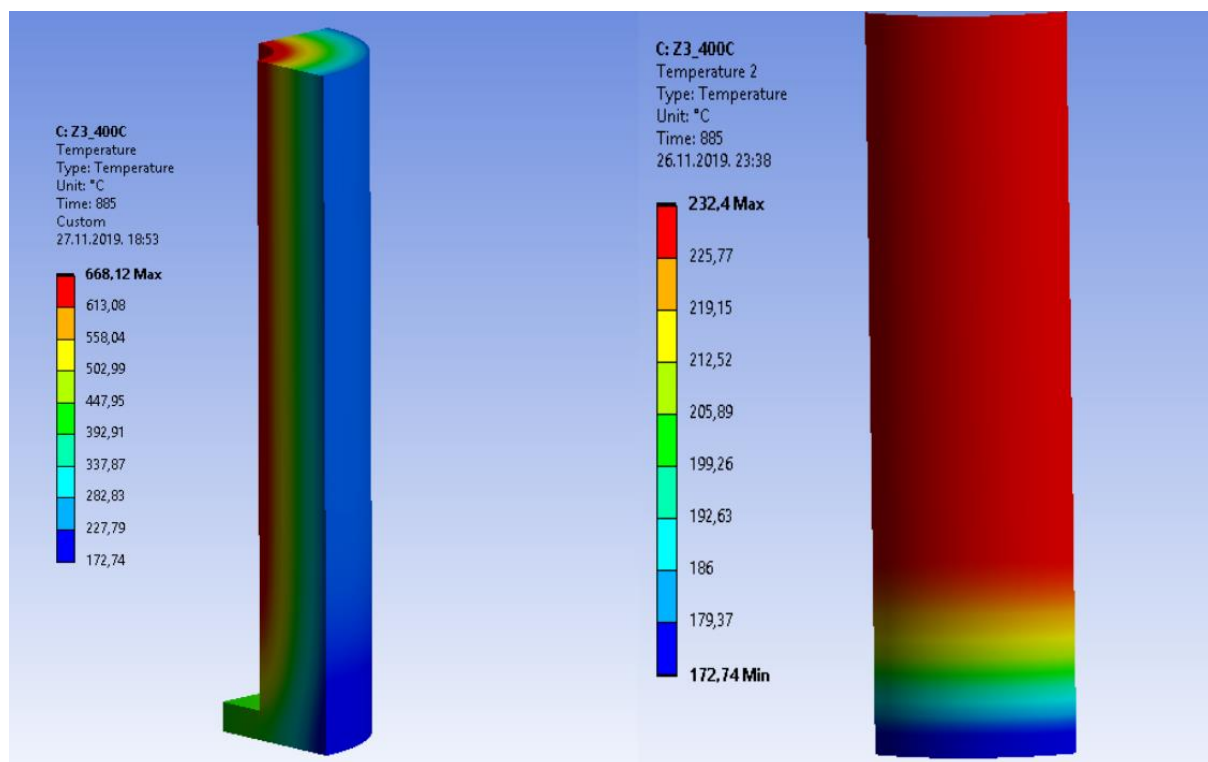
Scenarij grijanja koji je u eksperimentu proveden bez utjecaja vlage izabran je kao referentni scenarij provjere specifičnog toplinskog kapaciteta. Pritom je biran scenarij zagrijavanja uzorka na višu temperaturu, što je poželjno, jer numerički model u tom slučaju razvije dovoljno veliku razliku u odnosu na eksperimentalne rezultate, a broj računalnih operacija je u željenom graničnom intervalu.

Na sljedećoj stranici moguće je vidjeti rezultate numeričke analize vatrootporne žbuke (Slika 42. i Slika 43.).

## Temperaturna mape vatrootporne žbuke



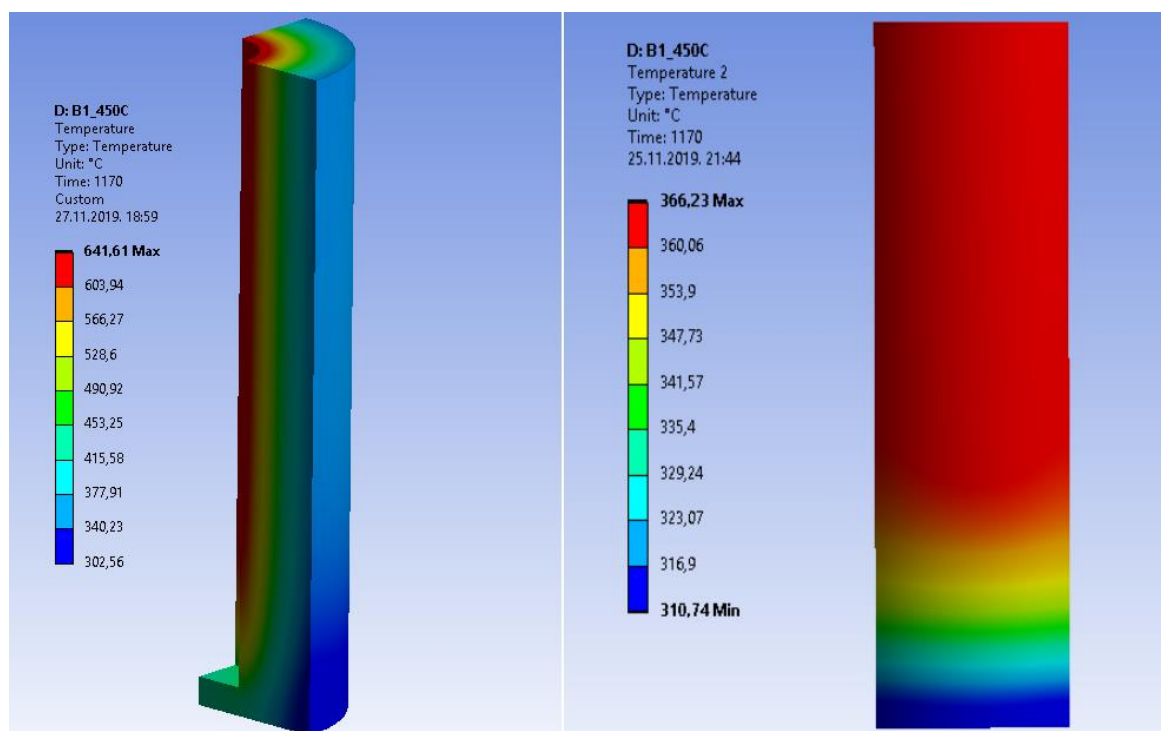
**Slika 42.** Temperaturna mapa drugog uzorka vatrootporne žbuke (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).



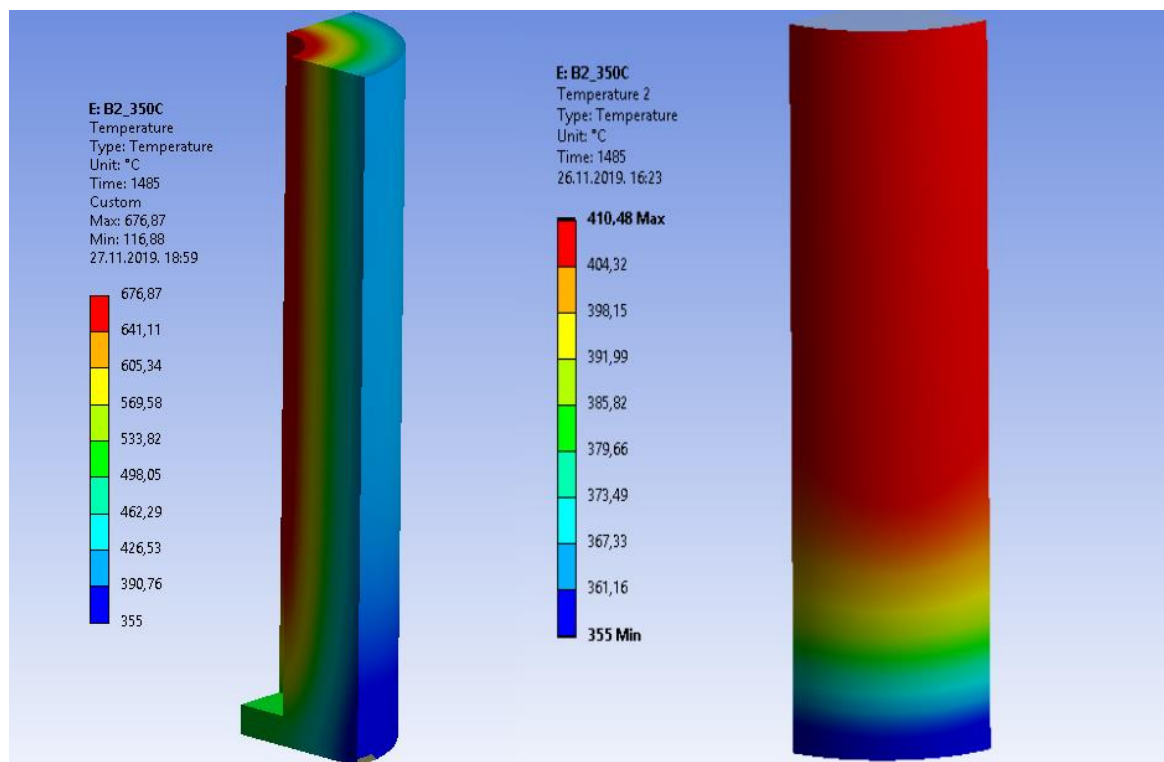
**Slika 43.** Temperaturna mapa trećeg uzorka vatrootporne žbuke (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).



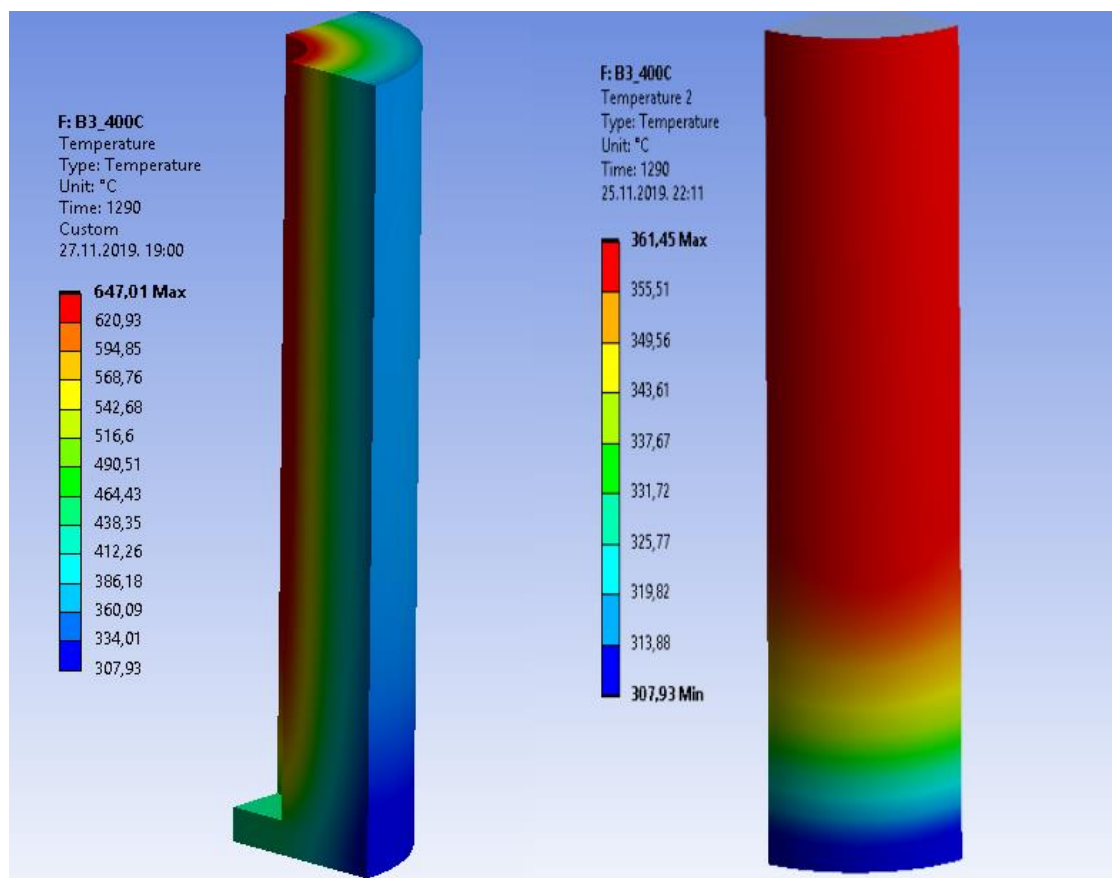
## Temperaturne mape vatrobetona



**Slika 44.** Temperaturna mapa prvog uzorka vatrobetona (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).



**Slika 45.** Temperaturna mapa drugog uzorka vatrobetona (lijevo). Temperatura vanjske stijenke (desno).



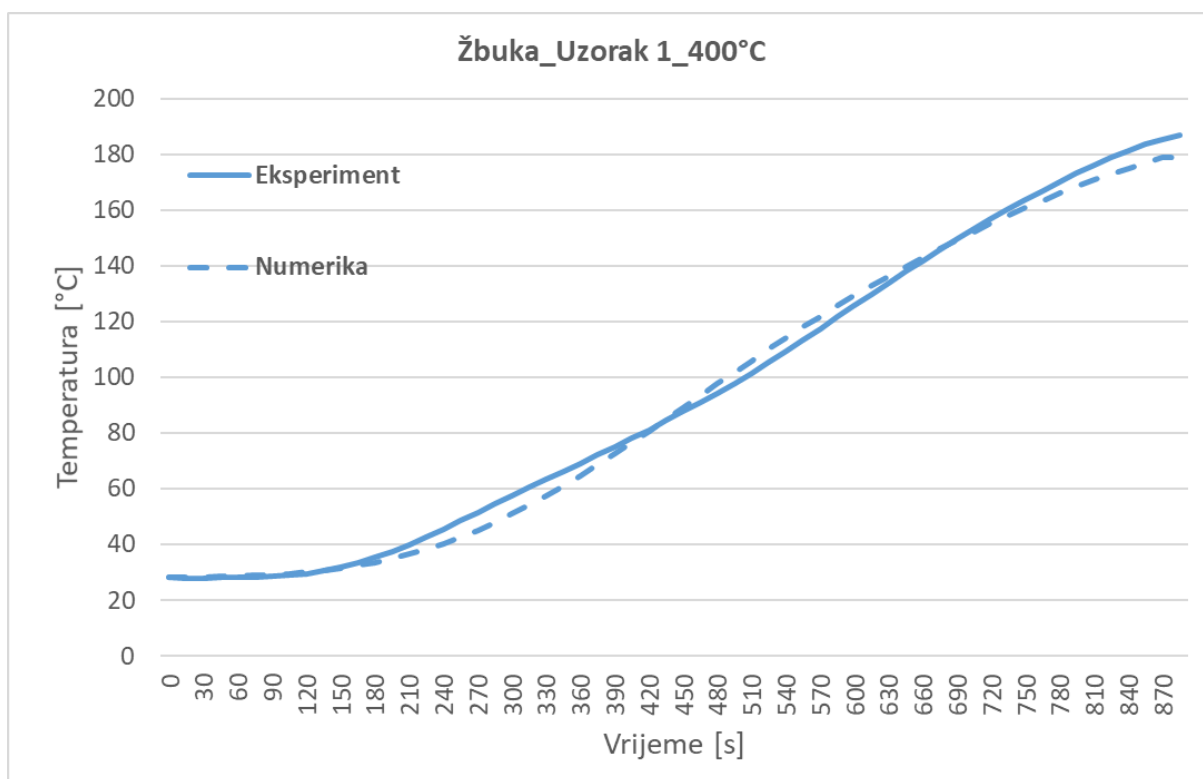
**Slika 46.** Temperaturna mapa trećeg uzorka vatrobetona (lijevo). Temperatura vanjske stijenske (desno).

## 5. ANALIZA REZULTATA

Kako bi se utvrdila opravdanost korištenih metoda tijekom utvrđivanja specifičnog toplinskog kapaciteta materijala vatrootporne žbuke i vatrobetona potrebno je usporediti rezultate dobivene eksperimentalnom i numeričkom metodom.

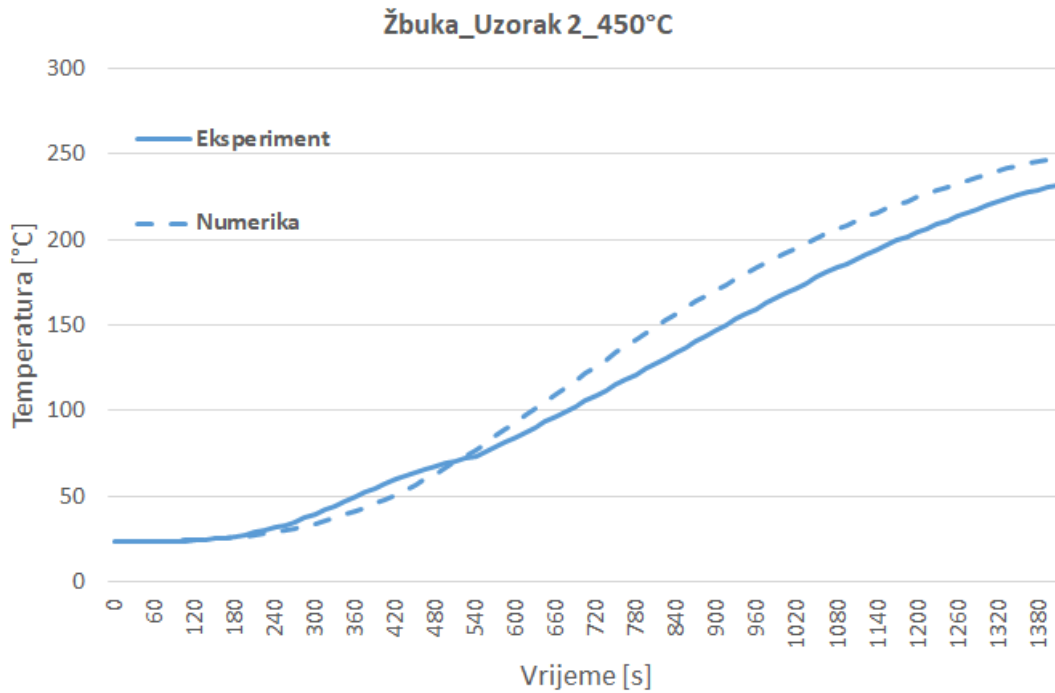
Temeljni kriterij usporedbe je krivulja temperature vanjske stijenke uzorka. U slučaju numeričke analize korišteni su ulazni parametri koji su dobiveni eksperimentom te je krajnji rezultat dobiven u obliku temperature mape u trenutku završetka procesa (npr. Slika 41. (desno)) i grafa ovisnosti temperature o vremenu. Na Slici 47. nalazi se prikaz opisane krivulje za slučaj eksperimenta (plavo) i numeričkog rješenja (crtkano plavo).

### 5.1. Vatrootporna žbuka

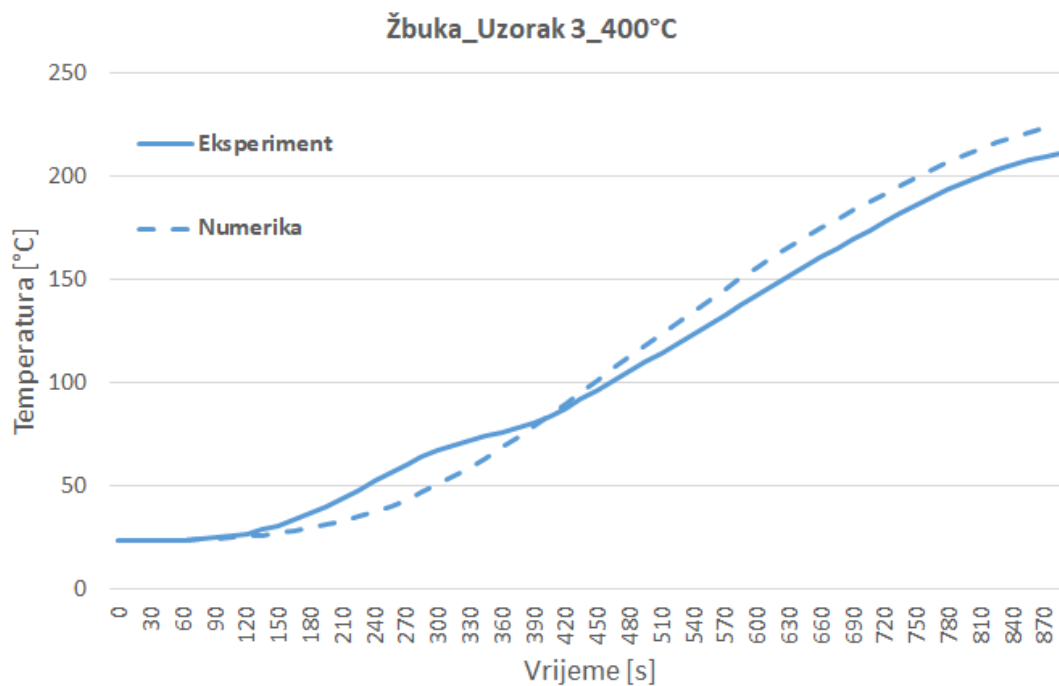


**Slika 47. Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrootporna žbuka, prvi uzorak**

Prema priloženom grafičkom prikazu moguće je uočiti podudaranje rezultata eksperimenta i numeričke analize. Odstupanja koja su sve izraženija s povećanjem ukupne temperature u sustavu moguće je pripisati utjecaju vlage na mjerenja i poroznosti uzoraka koja je složena za primjenu u numeričkoj analizi. Na primjeru drugog i trećeg uzorka žbuke gdje je vidljiva stagnacija temperature opisana ranije, odstupanja dvaju rješenja su izraženija.



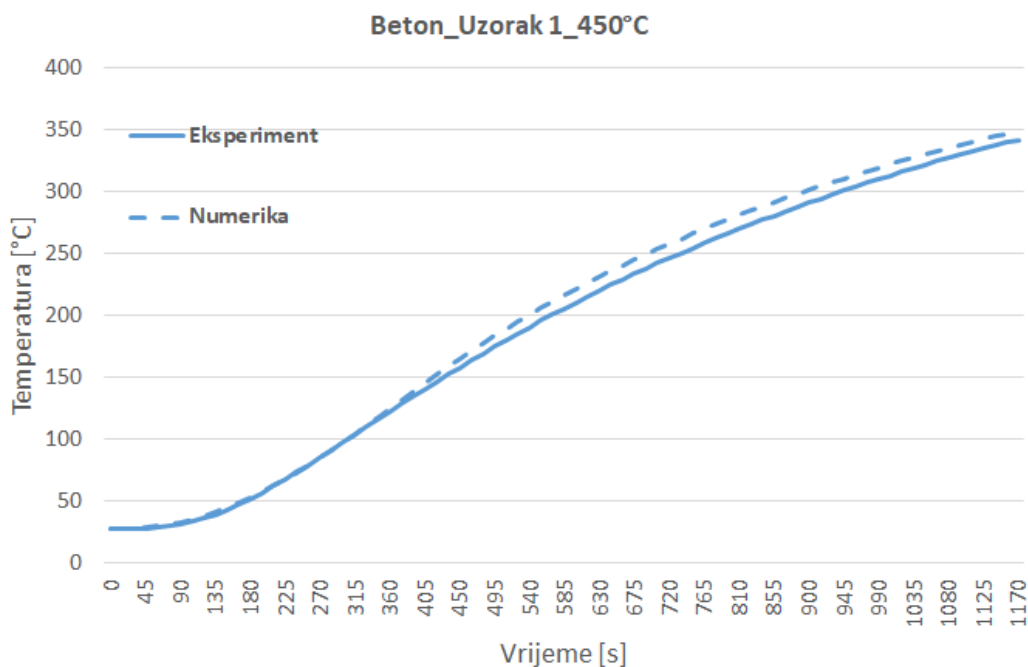
Slika 48. Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrootporna žbuka, drugi uzorak



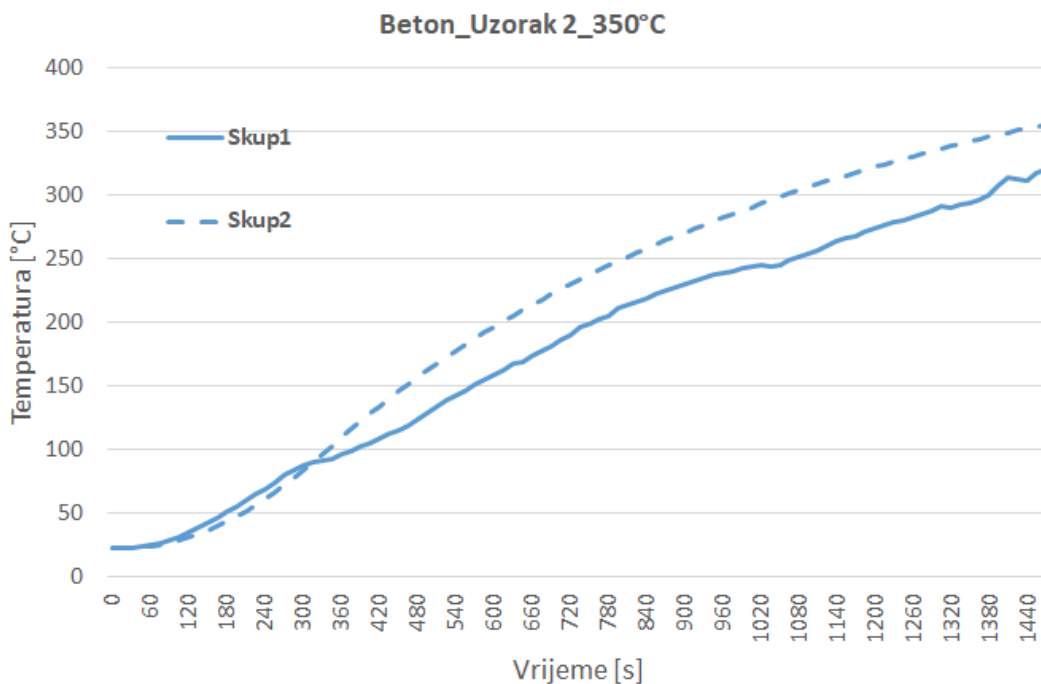
Slika 49. Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrootporna žbuka, treći uzorak

### 5.3. Vatrobeton

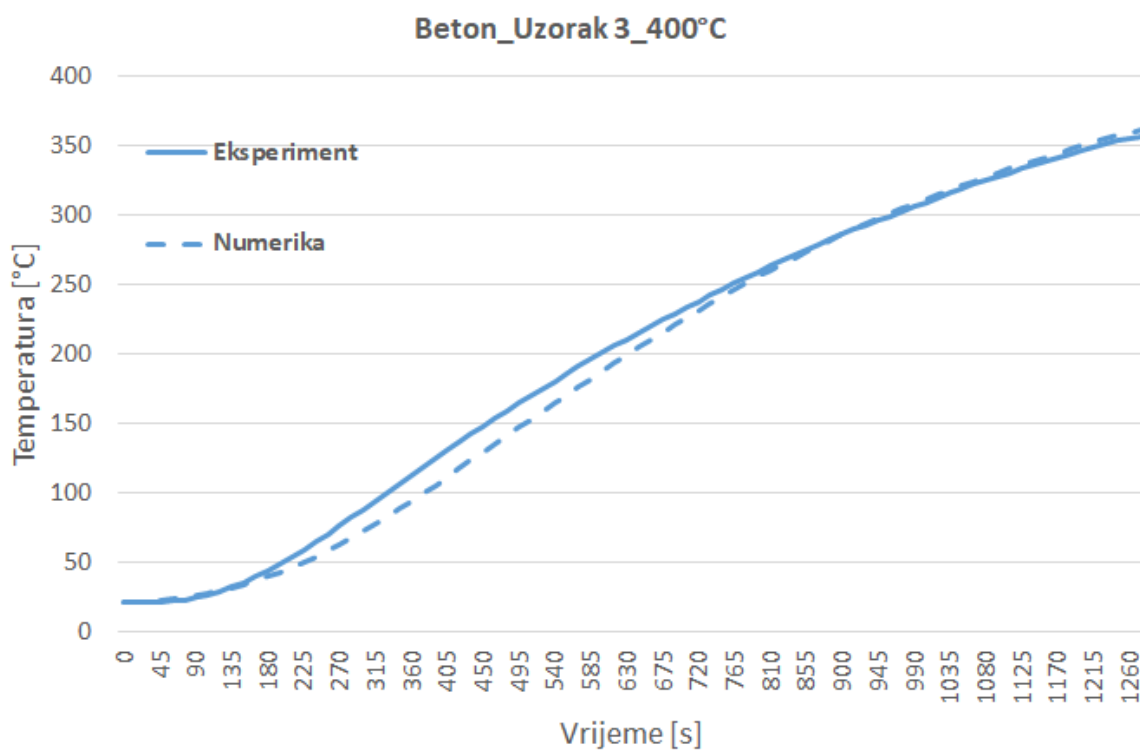
Na primjeru rezultata vatrobetona također je uočljivo poklapanje numeričkog rješenja s mjerenjima. Veća odstupanja vidljiva su na uzorku koji je sadržavao značajniji udio vodenog sadržaja (Slika 51.).



Slika 50. Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrobeton, prvi uzorak



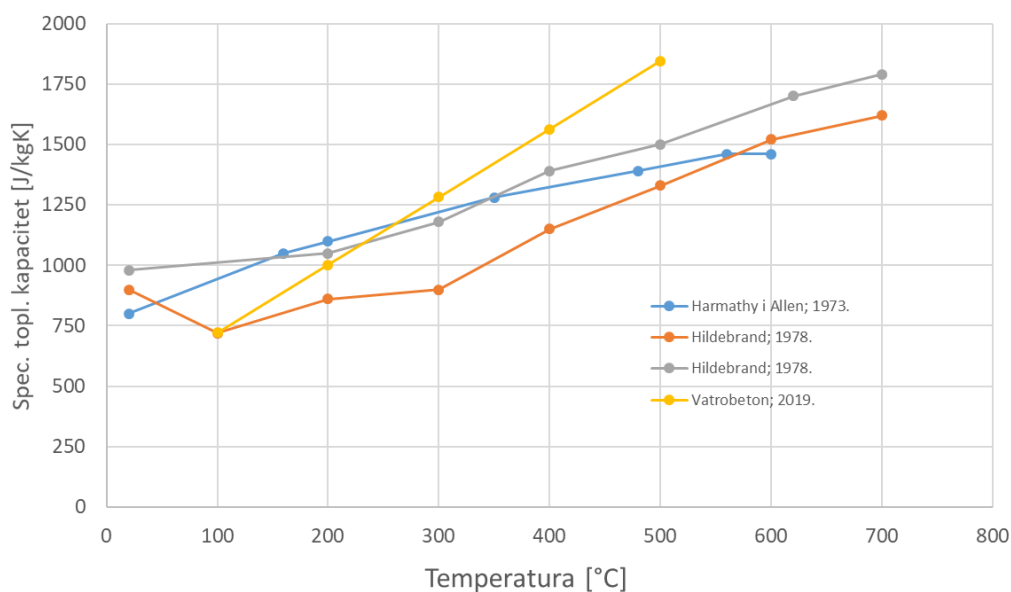
Slika 51. Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrobeton, drugi uzorak



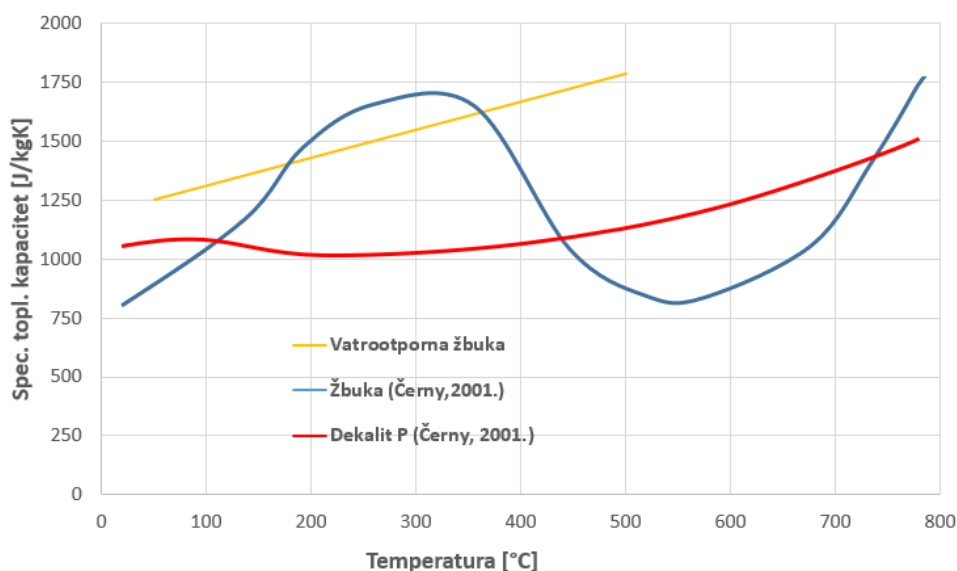
**Slika 52.** Usporedba rezultata eksperimenta i numeričke analize: Vatrobeton, treći uzorak

## 5.5. Usporedba s literaturom

Rezultati mjerenja betona pronađeni u literaturi dobiveni su DSC metodom (vidi Poglavlje 2.2.1) koja s velikom točnošću ispituje specifični toplinski kapacitet tvari. Međutim, metoda korištena u ovom radu pokazuje rezultate sukladne onima iz [18] za temperaturni raspon od 150 do 450 °C (Slika 53.). Usporedba vatrootporne žbuke s rezultatima pronađenim u literaturi prikazana je na Slici 54.



Slika 53. Usporedba rezultata vatrobetona s literaturom



Slika 54. Usporedba rezultata vatrootporne žbuke s literaturom

---

## 6. ZAKLJUČAK

Utvrđeni rezultati specifičnog toplinskog kapaciteta materijala vatrootporne žbuke i vatrobetona pokazuju da je moguće mjeriti navedeno termodinamičko svojstvo na način opisan u ovom radu.

Odstupanja numeričke analize i eksperimentalnih mjerenja su prihvatljiva uzevši u obzir s jedne strane različite faktore koji su utjecali na preciznost mjerenja (nehomogenost materijala, nedosljednost položaja termoparova), a s druge strane nemoguću idealnu simulaciju numeričkom analizom.

Prema prikazanim rezultatima može se zaključiti da se izmjereni specifični toplinski kapaciteti u eksperimentalnoj analizi s dovoljnom sigurnošću mogu primjenjivati u numeričkim analizama. Međutim, treba imati na umu da je u ovom radu numerički model zanemario utjecaj poroznosti u materijalu koja donosi određena odstupanja od stvarnih mjerenja.

Eksperimentalni dio analize bi za potpunu sigurnost trebalo obaviti DSC metodom koja bi sa sigurnošću mogla utvrditi krivulju specifičnog toplinskog kapaciteta.

U radu je potvrđena pojava povećanog specifičnog toplinskog kapaciteta u materijalu zbog postojanja određenog masenog sadržaja vode. Također, provjereni su promjenjivi početni i rubni uvjeti te se potvrđuje trend povećanog specifičnog toplinskog kapaciteta s povećanjem temperature.



**LITERATURA**

- [1] Center of Fire Statistics of CTIF 2017
- [2] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Požar>; 12.11.2019.
- [3] <https://www.zus.hr/zastita-od-pozara>; 12.11.2019.
- [4] <https://www.vig.hr>; 12.11.2019.
- [5] Rahmanian, I., Thermal and mechanical properties of gypsum boards and their influences on fire resistance of gypsum board based systems, 2011
- [6] BS 476; Part 7; 1997.
- [7] Khaliq, W., Kodur, V., “High temperature mechanical properties of high strength fly ash concrete with and without fibers,”ACI Materials Journal, vol. 109, no. 6, pp. 665–674, 2012.
- [8] Rahmanian, I., Wang, Y., Thermal Conductivity of Gypsum at High Temperatures A Combined Experimental and Numerical Approach, Acta Polytechnica Vol. 49 No. 1/2009
- [9] Rahmanian, I., Thermal and mechanical properties of gypsum boards and their influences on fire resistance of gypsum board based systems, 2011
- [10] Michael H. Chiu, Elmar J. Prenner; Differential scanning calorimetry: An invaluable tool for a detailed thermodynamic characterization of macromolecules and their interactions; J Pharm Bioallied Sci.; 2011 (39-59)
- [11] Ang, C.N., Wang, Y.C., The Effect of Water Movement on Specific Heat of Gypsum Plasterboard in Heatt Transfer Analysis Under Natural Fire Exposure. Construction and Building Materials, Vol.18 (str. 505–51), 2003.
- [12] Galović, A., Termodinamika I, FSB, Zagreb, 2016.
- [13] <https://www.samoborka.hr/upload/proizvodi/TUP-%20Vatrostop.pdf>; 14.11.2019.
- [14] <http://www.micom.hr/varijabilni-transformatori>; 17.11.2019.
- [15] <https://www.keysight.com/en/pd-1000001313%3Aepsg%3Apro-pn-34970A/data-acquisition-data-logger-switch-unit?cc=HR&lc=eng>; 17.11.2019.
- [16] Galović, A., Termodinamika II, FSB, Zagreb, 2016.
- [17] Wang, H. B.: Heat Transfer Analysis of Components of Construction Exposed to Fire. Department of Civil Engineering and Construction, University of Salford, U.K., 1995.
- [18] Jansson, R., Measurement of thermal properties at elevated temperatures – Brandforsk project 328-031, 2004.

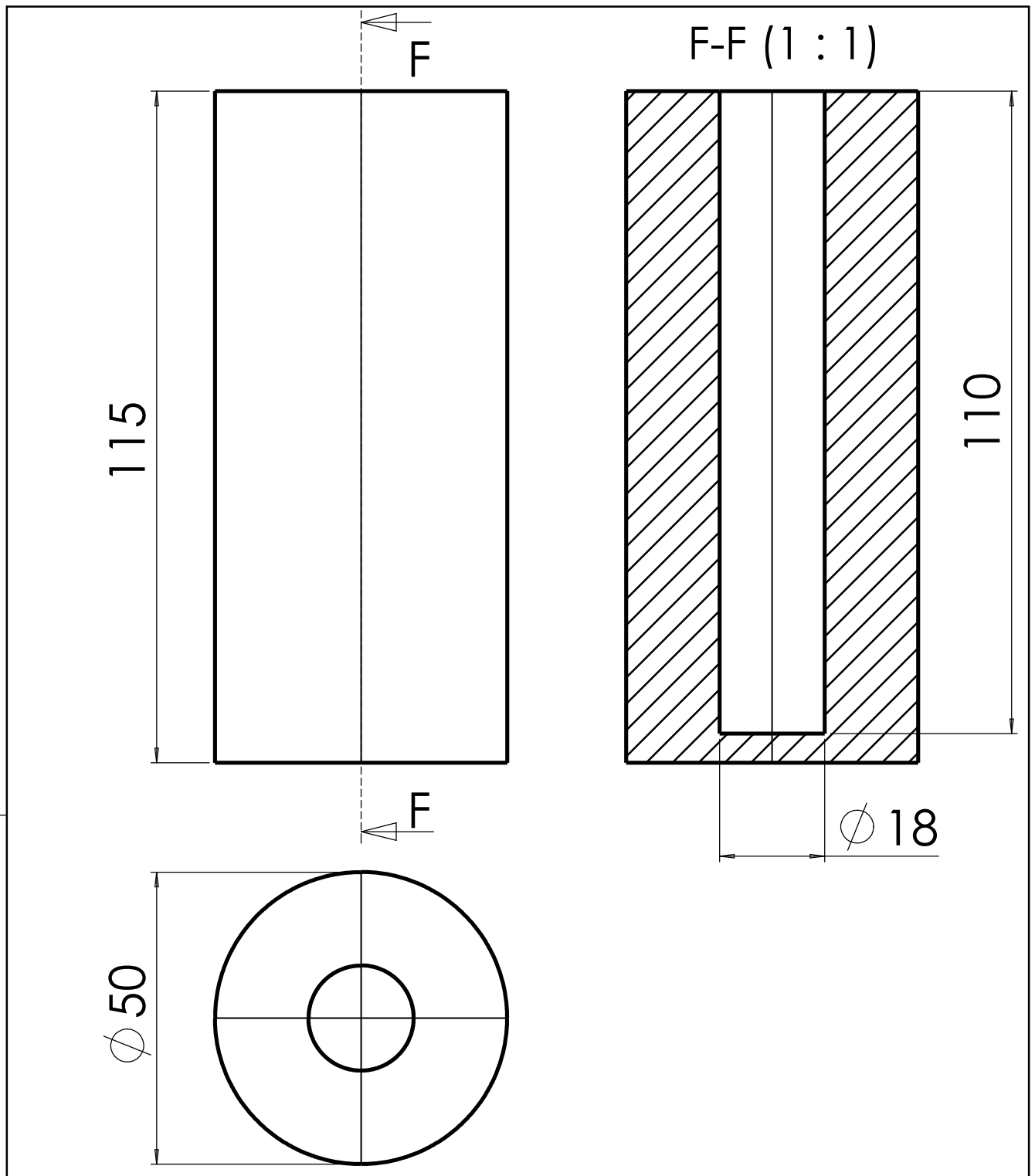
- 
- [19] Černý, R., Toman, J., Determination of changes in thermal properties of building materials in the conditions of a fire, CIB World Building Congress, 2001.

---

**PRILOZI**

- I. Tehnički crtež ispitnog uzorka
- II. Tablice rezultata mjerenja
- III. CD-R disc

# PRILOG I



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>			
Projektirao							
Razradio							
Crtao	28.11.2019	Roman Kuzmić					
Pregledao							
Napomena:			Objekt broj:				
			R. N. broj:				
					Kopija		
Materijal: Beton/Žbuka			Masa:				
		Naziv:				Pozicija:	
Mjerilo originala		ISPITNI UZORAK				1	
1:1		Crtež broj: RK-2019-01				Format: A4	
					Listova: 1		
					List: 1		

Design by CADLab

# PRILOG II: Tablice rezultata mjerenja

Scan	Vrijeme	600					600_2					400					300					200					Pec
		Zbuka Centar	Zbuka Stijenska	Zbuka Zrak	Stijenska2	Pec Stijenska	Zbuka Centar	Zbuka Stijenska	Zbuka Zrak	Stijenska2	Pec Stijenska	Zbuka Centar	Zbuka Stijenska	Zrak	Zrak2	Pec Stijenska	Zbuka Centar	Zbuka Stijenska	Zrak1	Zrak2	Pec Stijenska	Zbuka Centar	Zbuka Stijenska	Zrak1	Zrak2	Stijenska	
1	0	19.271	19.191	19.084	19.139	19.089	21.982	21.875	21.867	21.758	21.675	28.104	28.049	27.833	27.816	27.606	27.05	27.006	26.913	26.896	26.791	23.58	23.961	23.911	23.862	23.767	
2	15	19.326	19.196	19.089	19.149	19.113	22.086	21.896	21.948	21.909	21.675	28.231	28.041	27.817	27.821	27.608	27.113	27.003	26.934	26.899	26.775	23.95	24.07	23.996	23.932	23.756	
3	30	19.797	19.196	19.115	19.131	19.115	23.012	21.908	22.007	21.869	21.697	28.925	28.044	27.83	27.829	27.577	27.739	26.985	26.952	26.925	26.799	24.73	24.273	24.091	24.098	23.727	
4	45	21.39	19.23	19.11	19.206	19.12	25.02	21.93	22.007	21.888	21.685	30.82	28.089	27.869	27.862	27.627	27.579	27.034	27.01	26.994	26.799	24.52	24.668	24.225	24.262	23.769	
5	60	24.327	19.97	19.197	19.257	19.197	26.92	21.949	22.029	21.949	21.684	34.043	28.154	27.932	27.934	27.694	27.642	27.035	26.975	26.804	25.234	25.276	24.538	24.441	23.769		
6	75	28.663	19.372	19.148	19.363	19.117	33.441	22.111	22.265	22.038	21.684	38.427	28.291	28.048	28.017	27.663	27.528	27.221	27.165	27.025	26.841	30.907	26.173	24.933	24.699	23.788	
7	90	34.278	19.176	19.207	19.371	19.132	39.251	22.354	22.748	22.125	21.701	44.002	28.514	28.318	28.139	27.674	27.442	27.263	27.263	26.833	36.071	27.361	25.464	25.054	23.79		
8	105	40.917	20.064	19.242	19.611	19.13	46.666	22.832	23.416	22.051	21.705	50.584	29.983	28.303	28.373	27.666	27.504	27.26	27.26	26.859	42.414	28.845	25.966	25.451	23.817		
9	120	48.459	20.779	19.309	19.823	19.145	54.716	23.527	24.75	22.884	21.724	58.049	29.645	28.542	28.602	27.7	27.527	28.41	27.625	27.524	46.859	49.41	30.644	26.998	25.898	23.89	
10	135	56.729	21.796	19.386	20.086	19.167	63.506	24.467	26.325	23.298	21.737	66.238	30.619	28.866	28.875	27.703	27.689	29.287	27.937	28.199	46.87	50.074	32.81	26.859	26.415	23.959	
11	150	65.653	22.102	19.514	20.41	19.181	72.916	25.741	28.276	23.577	21.768	75.062	31.855	29.866	29.004	27.729	27.62	30.456	28.464	28.629	46.883	67.012	35.296	27.652	24.092		
12	165	75.05	24.766	19.703	20.757	19.2	82.821	27.321	30.593	24.235	21.81	84.466	33.432	30.024	29.641	27.794	30.61	31.95	29.059	29.079	46.912	76.608	37.915	27.729	27.669	24.226	
13	180	84.841	26.804	19.868	21.159	19.249	93.171	29.254	33.177	23.687	21.839	94.27	35.326	30.775	30.109	27.983	32.138	31.789	29.811	29.276	46.975	86.708	40.762	28.996	28.31	24.376	
14	195	94.954	29.147	20.107	21.611	19.308	103.605	31.413	35.696	22.906	21.861	104.394	37.469	31.58	30.669	27.923	30.673	35.803	30.571	30.149	46.993	97.255	43.783	28.717	29.059	24.56	
15	210	105.371	31.819	20.388	22.102	19.347	114.544	33.927	38.95	24.461	21.939	114.73	39.881	32.424	31.242	28.012	31.486	38.12	31.489	30.767	47.054	108.076	46.887	30.629	29.843	24.847	
16	225	115.96	34.777	20.681	22.652	19.454	125.545	36.689	42.322	25.383	22.029	125.233	42.544	33.616	31.947	28.097	30.485	42.425	31.468	27.169	47.117	120.049	32.339	30.632	25.173		
17	240	126.586	37.951	21.034	23.254	19.603	136.622	39.662	45.747	26.723	22.144	135.689	45.415	34.862	32.707	28.225	33.301	43.817	33.448	32.166	47.303	130.164	33.108	33.49	31.558	25.526	
18	255	137.283	41.337	21.419	23.936	19.769	147.383	42.542	47.348	23.203	22.152	146.205	48.501	35.762	33.499	28.488	33.416	43.871	32.871	27.432	44.188	156.089	34.531	32.525	25.983		
19	270	147.847	44.849	21.832	24.767	19.992	158.069	45.907	49.973	23.781	22.236	156.566	51.567	36.879	34.288	27.514	33.603	45.975	35.019	33.659	27.529	159.098	35.921	34.093	33.496	26.496	
20	285	158.347	48.402	22.29	25.626	20.304	168.946	49.245	55.093	27.194	22.54	166.865	54.651	37.919	35.011	29.096	33.748	46.954	35.25	34.463	27.847	162.935	36.538	34.122	34.425	27.633	
21	300	168.704	51.879	22.787	26.491	20.647	179.713	52.67	58.377	29.402	22.88	176.999	57.639	39.134	35.783	29.941	34.562	47.564	36.339	35.13	28.161	173.618	37.004	35.105	35.376	27.047	
22	315	178.945	55.195	23.285	27.342	21.05	190.305	56.075	61.352	30.529	23.296	187.064	60.562	41.108	36.603	29.927	34.521	47.373	35.945	28.568	184.167	66.318	34.797	36.178	28.226		
23	330	188.99	58.311	23.826	28.251	21.539	200.666	59.368	64.277	31.62	23.749	196.599	63.53	44.066	37.536	30.46	202.583	42.408	39.294	36.882	29.273	194.569	66.683	36.043	37.119	28.831	
24	345	198.244	61.213	24.376	29.285	22.028	210.798	62.555	67.185	32.783	24.214	206.573	66.312	42.382	38.428	31.01	212.544	45.5	40.19	37.758	29.557	204.617	71.101	38.425	38.866	29.614	
25	360	208.46	63.905	24.974	30.271	22.627	220.782	65.263	68.14	28.293	23.961	215.981	69.131	43.974	39.425	31.556	222.28	46.571	40.426	38.668	30.078	214.411	73.525	39.927	39.015	30.312	
26	375	217.881	66.434	25.609	31.256	23.097	230.416	68.277	72.37	33.638	24.296	225.175	72.058	45.018	40.453	32.21	231.736	47.662	40.206	39.639	30.646	223.025	75.916	40.654	39.62	30.946	
27	390	227.094	68.924	26.294	32.223	23.732	239.841	71.349	75.39	35.847	25.607	234.317	75.076	47.035	41.503	33.014	241.032	48.844	42.265	40.64	31.309	228.96	78.339	41.372	40.345	31.564	
28	405	236.261	71.458	27.001	33.173	24.294	249.03	74.406	78.419	37.11	26.254	243.114	78.073	48.062	42.425	33.74	250.165	48.168	43.052	41.702	31.934	232.415	80.83	42.75	41.048	32.197	
29	420	245.138	74.079	27.59	34.098	24.734	259.765	77.435	81.404	38.085	27.661	251.775	81.213	50.573	43.348	34.495	250.018	48.426	44.145	42.765	32.668	234.411	83.265	42.618	41.716	32.865	
30	435	253.791	76.785	28.483	35.031	25.734	266.703	80.506	84.608	39.175	27.69	260.268	84.445	51.899	44.342	35.203	267.589	48.451	45.116	43.783	33.241	234.481	85.487	43.758	42.354	33.473	
31	450	262.249	79.649	29.208	35.806	26.048	275.256	83.682	88.115	40.303	28.442	268.565	87.179	52.948	45.341	35.887	275.98	47.956	43.692	42.499	33.865	233.954	87.888	45.833	42.913	34.051	
32	465	269.645	82.486	27.846	36.447	26.557	283.59	86.959	92.048	41.364	29.189	276.619	90.945	53.819	46.298	36.61	284.501	49.067	45.965	38.799	33.883	234.849	89.349	47.43	43.268	34.593	
33	480	277.378	85.865	30.493	36.025	27.378	291.679	90.19	96.23	42.22	29.857	284.488	94.179	55.048	47.156	37.247	292.555	49.193	49.734	43.32	34.682	231.402	91.212	47.911	43.666	35.131	
34	495	285.219	89.305	31.847	36.569	27.963	299.347	93.298	97.395	33.498	29.849	292.358	97.756	56.163	48.303	38.008	300.433	49.779	51.769	45.176	35.347	229.645	93.028	48.545	44.041	35.648	
35	510	292.964	92.781	32.925	36.855	28.732	306.557	95.704	101.788	28.65	29.218	299.956	101.553	56.763	49.274	38.689	308.153	50.949	47.362	36.044	227.611	94.747	48.227	44.255	36.662		
36	525	300.569	96.302	33.895	37.185	29.365	314.557	98.256	104.868	32.035	29.294	307.429	105.494	57.545	50.185	39.3	315.867	50.066	50.032	47.465	36.777	225.475	96.35	49.159	44.563	36.555	
37	540	308.078	100.089	34.888	38.64	30.1	321.818	102.732	111.717	40.409	30.665	314.91	109.538	58.842	51.264	39.986	323.031	51.081	56.78	48.588	37.45	225.256	97.879	50.026	44.976	36.989	
38	555	315.495	104.119	35.784	39.891	30.817	329.187	107.136	115.181	43.811	31.433	322.244	113.583	59.437	52.356	40.646	328.315	51.404	56.661	40.659	38.121	221.066	99.234	49.562	45.379	37.374	
39	570	322.798	108.29	36.766	40.956	31.448	336.46	111.422	120.927	45.607	32.603	334.317	117.552	60.553	53.291	41.299	331.081	51.818	56.783	50.417	38.786	218.83	100.372	49.596	45.789	37.717	
40	585	330.055	112.437	37.78	42.329	32.121	343.591	115.658	124.342	47.02	32.948	336.614	121.679	59.957	54.449	41.918	332.073	52.284	59.414	51.101	39.441	216.334	101.47	49.775	46.081	38.12	
41	600	337.176	116.596	38.774	43.792	32.694	350.875	119.909	128.088	48.144	33.797	343.689	125.837	61.095	55.389	42.662	331.668</										



Scan	Vrijeme	250					300					350					400					450					500				
		Zbuka Centar	Zbuka Stjenka	Zrak1	Zrak2	Pec Stjenka	Zbuka Centar	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec	Zbuka Centar	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec	Zbuka	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec	Zbuka	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec	Zbuka	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Pec
1	0	22,93	22,81	22,75	22,76	22,68	23,15	23,07	22,99	23,07	22,96	22,98	22,84	22,81	22,76	22,68	23,48	23,24	23,15	23,11	23,10	23,47	23,46	23,38	23,37	23,38	24,98	24,77	24,10	23,88	23,94
2	15	23,74	22,88	22,81	22,73	22,68	23,25	23,08	23,02	22,97	22,98	23,52	22,87	22,82	22,74	22,63	23,96	23,24	23,19	23,17	23,09	23,67	23,42	23,34	23,36	23,38	25,25	24,78	24,19	23,98	23,916
3	30	25,83	22,86	22,97	22,73	22,61	24,39	23,09	23,10	23,03	22,93	25,14	22,86	22,77	22,78	22,66	25,74	23,31	23,23	23,16	23,10	24,08	23,46	23,40	23,32	23,37	26,54	24,76	24,15	23,98	23,924
4	45	29,47	22,97	23,16	22,81	22,66	25,36	23,06	23,15	23,07	22,98	28	23,07	22,91	22,85	22,78	31,23	23,97	23,26	23,01	23,17	25,28	23,42	23,46	23,49	23,31	29,02	24,72	24,15	24,03	23,911
5	60	34,32	23,91	23,84	23,88	22,65	28,17	23,15	23,32	23,05	23,02	32,14	23,08	23,06	22,95	22,91	37,27	23,67	23,49	23,39	23,29	23,17	27,11	23,49	23,59	23,56	33,58	24,88	24,26	24,03	23,942
6	75	40,38	23,64	23,45	23,02	22,66	30,08	23,17	23,26	23,01	23,06	37,53	23,75	23,18	23,05	22,72	43,88	23,98	23,42	23,33	23,15	29,65	23,56	23,66	23,41	23,3	34,09	25,29	24,75	24,19	23,97
7	90	47,31	24,39	23,48	23,18	22,718	34,562	23,396	23,635	23,157	23,009	44,015	24,479	23,328	23,237	22,807	51,03	24,637	23,632	23,527	23,164	32,822	23,668	23,939	23,486	23,381	45,676	25,838	24,564	24,376	24,041
8	105	55,07	25,49	23,78	23,421	22,752	38,564	23,672	23,82	23,238	23,015	51,209	25,495	23,561	23,477	22,883	53,18	25,583	23,854	23,731	23,233	36,624	23,843	24,053	23,58	53,377	53,222	26,618	24,878	24,513	24,141
9	120	63,518	26,877	24,157	23,727	22,849	42,987	24,007	23,881	23,328	23,002	57,891	27,011	23,951	23,843	23,051	61,411	26,898	24,317	23,994	23,346	40,876	24,139	24,012	23,652	23,365	61,533	27,791	25,239	24,739	24,257
10	135	72,491	28,637	24,599	24,09	22,923	47,867	24,485	23,788	23,446	23,007	63,439	28,884	24,343	24,179	23,224	70,311	28,612	24,844	24,355	23,493	45,608	24,501	23,975	23,704	70,389	70,978	29,228	25,765	25,071	24,441
11	150	81,953	30,854	25,217	24,564	23,004	53,077	25,108	23,942	23,574	23,004	68,942	31,24	24,485	24,595	23,44	79,642	30,867	25,492	24,794	23,724	50,67	25,048	24,141	23,802	23,412	79,558	31,11	26,353	25,463	24,67
12	165	91,719	33,543	25,98	25,05	23,128	58,659	25,867	24,117	23,723	23,092	74,372	34,234	25,563	25,125	23,742	89,306	33,492	26,249	25,26	23,921	56,056	25,724	24,251	23,964	23,422	89,902	33,343	27,176	25,877	24,951
13	180	101,851	36,633	27,005	25,61	23,283	64,533	26,795	24,383	23,883	23,107	80,06	37,5	26,374	25,701	24,073	99,208	36,573	27,109	25,867	24,195	61,784	26,532	24,485	24,104	23,464	100,218	35,966	28,101	26,322	25,28
14	195	112,251	40,082	28,232	26,258	23,478	70,679	27,879	24,677	24,091	23,141	85,416	41,285	27,311	26,532	24,384	109,224	40,025	27,958	26,598	24,555	67,719	27,501	24,752	24,315	23,887	110,75	38,987	28,773	26,879	25,596
15	210	122,639	43,773	29,489	26,932	23,678	76,992	29,158	25,044	24,37	23,2	90,254	45,333	28,671	27,331	24,77	119,342	43,796	29,396	27,31	24,868	73,981	28,638	25,05	24,566	23,525	121,48	42,346	29,87	27,466	25,933
16	225	133,113	47,599	30,415	27,507	23,927	83,399	30,614	25,505	24,645	23,238	94,654	49,743	30,104	28,139	25,248	129,703	47,885	30,445	27,999	25,236	81,404	29,967	25,403	24,796	23,591	132,363	46,006	30,948	28,211	26,397
17	240	143,618	51,935	31,687	28,401	24,777	90,021	32,312	26,033	24,957	23,313	98,789	54,256	31,653	29,01	25,749	140,038	52,063	31,731	28,83	25,749	87,057	31,46	25,846	25,099	23,645	143,068	49,77	32,126	28,775	26,918
18	255	154,029	55,912	32,976	29,048	24,553	96,82	34,208	26,667	25,325	23,384	103,08	58,697	32,489	30,529	26,337	150,311	56,241	33,061	29,602	26,254	93,835	33,216	26,342	25,517	23,709	153,859	53,537	32,857	29,471	27,502
19	270	164,314	59,787	34,002	29,853	24,874	103,711	36,272	27,395	25,73	23,884	108,442	63,125	34,646	31,75	27,017	246,457	30,673	34,633	30,593	26,877	100,718	35,079	26,956	25,838	23,773	164,554	57,214	34,117	30,064	28,013
20	285	174,501	63,25	35,409	30,644	25,268	110,765	38,428	28,167	26,134	23,564	114,124	67,201	37,003	32,599	27,41	180,864	64,066	35,894	31,411	27,374	107,736	37,127	27,598	26,348	23,897	174,972	60,689	34,978	30,709	28,597
21	300	184,551	66,24	36,96	31,459	25,642	117,855	40,803	28,965	26,605	23,73	120,314	70,877	37,97	33,64	28,554	170,824	67,218	37,328	32,184	22,824	114,895	39,422	24,185	24,676	20,02	185,306	63,689	36,117	31,582	29,215
22	315	194,456	68,81	37,811	32,244	26,115	122,003	43,313	29,648	27,028	23,877	127,158	74,309	39,668	34,5	29,35	190,644	69,922	38,116	33,065	28,702	121,987	41,775	26,87	27,41	24,154	195,592	66,634	37,554	32,373	29,819
23	330	204,311	71,076	39,382	33,073	26,654	135,225	45,91	30,257	27,438	24,008	134,751	77,182	39,323	35,086	30,184	200,409	72,134	39,054	33,983	29,307	129,203	44,298	25,934	28,071	24,325	205,653	70,286	38,386	33,296	30,487
24	345	213,872	73,385	40,331	34,041	27,151	139,286	48,609	31,003	27,889	24,185	142,63	79,663	40,848	36,19	31,047	209,909	73,974	40,288	34,707	30,091	136,323	46,859	30,183	28,584	24,444	215,521	73,933	39,925	34,072	31,047
25	360	223,354	75,998	41,587	34,917	27,703	146,388	51,274	31,86	28,422	24,343	151,118	81,84	41,538	37,279	31,788	219,328	75,738	41,495	35,742	30,748	143,512	49,505	30,99	29,144	24,619	225,218	77,601	41,119	34,961	31,792
26	375	232,631	78,864	42,702	35,873	28,721	153,469	53,936	32,366	28,899	24,516	159,513	83,466	41,833	38,639	32,267	228,529	78,071	43,32	36,893	31,603	150,885	52,175	31,72	29,77	24,675	234,666	81,589	42,383	35,923	32,505
27	390	241,691	82,2	43,252	36,715	28,871	160,503	56,583	33,332	29,421	24,738	168,284	84,874	43,226	39,065	33,095	237,598	80,748	43,994	37,447	32,366	157,782	54,788	32,223	29,947	24,973	244,03	85,853	43,157	36,717	33,448
28	405	250,759	86,303	44,729	37,754	29,607	167,505	59,044	34,085	30,019	24,952	177,094	86,089	43,421	40,344	24,657	246,457	83,884	45,194	38,366	33,024	164,818	57,301	33,177	30,347	25,167	253,108	90,05	44,522	37,655	34,245
29	420	259,474	90,949	45,775	38,623	30,278	174,421	61,37	35,076	30,634	25,173	185,816	87,034	44,224	41,017	34,72	255,103	87,552	47,011	39,419	33,786	171,843	59,715	34,047	30,914	25,411	261,98	94,232	45,621	38,665	34,861
30	435	266,895	95,448	46,663	39,236	31,001	181,721	63,498	35,901	31,155	25,434	194,523	87,782	44,253	41,141	35,553	263,739	91,984	47,745	40,38	34,654	178,702	61,905	35,103	31,367	25,622	270,723	98,422	46,594	39,471	35,791
31	450	275,198	99,775	47,773	40,197	31,682	188,066	65,411	36,884	31,781	25,705	203,243	88,496	45,317	42,783	36,263	272,131	96,463	49,353	40,816	35,397	185,587	63,969	36,025	31,775	25,875	279,379	102,758	47,891	40,599	36,633
32	465	275,768	104,147	49,458	41,063	32,476	194,855	67,149	37,971	32,226	25,763	211,922	89,027	45,978	43,221	37,394	280,327	100,895	48,55	41,891	36,125	192,428	65,835	37,195	32,298	26,151	287,309	107,135	48,32	41,638	37,59
33	480	277,885	108,316	50,761	41,723	33,205	201,619	68,712	38,632	33,202	26,289	220,849	89,312	46,669	44,189	38,049	288,438	105,298	51,339	42,817	36,886	199,17	67,497	37,532	32,928	26,442	296,013	111,491	49,797	42,481	38,601
34	495	279,817	112,322	51,413	42,723	33,988	208,262	70,149	39,563	33,335	26,591	223,885	89,673	47,413	45,269	38,974	296,496	109,867	50,269	43,771	37,871	205,815	69,039	38,875	33,435	26,746	304,114	115,922	51,175	42,501	39,488
35	510	279,179	116,113	52,887	43,337	34,741	214,881	71,622	40,343	33,958	26,927	237,147	90,106	48,195	46,967	39,741	304,221	114,388	51,823	44,718	3										

Scan	Vrijeme	500					450					400					350_1					350_2					250						
		Zbuka		Stijenka		Pec	Zbuka		Stijenka		Pec	Zbuka		Stijenka		Pec	Zbuka		Stijenka		Pec	Zbuka		Stijenka		Pec	Zbuka		Stijenka		Pec		
		Centar	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Stijenka	Centar	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Stijenka	Zbuka	Centar	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Stijenka	Zbuka	Centar	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Stijenka	Zbuka	Centar	Zbuka	Zrak1	Zrak2	Stijenka	Zbuka	Centar	Zbuka	Zrak1
1	0	22,67	22,67	22,56	22,59	22,48	27,98	27,81	25,86	25,89	25,16	23,38	23,34	23,21	23,18	23,30	23,28	23,24	23,21	23,18	23,20	21,95	21,57	21,42	21,4	21,37	22,81	22,82	22,85	22,79	22,75		
2	15	23,408	22,677	22,605	22,542	22,486	28,445	27,819	25,966	25,93	25,895	23,681	23,37	23,355	23,349	23,236	23,581	23,27	23,253	23,249	23,226	22,152	21,581	21,536	21,401	21,38	23,223	22,816	22,828	22,82	22,746		
3	30	25,862	22,809	22,679	22,605	22,473	30,704	27,885	25,974	25,972	25,884	24,815	23,4	23,41	23,405	23,313	24,715	23,3	23,31	23,305	23,213	24,404	21,643	21,631	21,446	21,359	25,454	22,906	22,921	22,965	22,792		
4	45	30,147	23,156	22,72	22,695	22,478	35,014	28,118	25,062	25,069	25,879	26,973	23,493	23,425	23,504	23,317	26,873	23,393	23,325	23,404	23,217	28,571	21,995	21,696	21,529	21,383	29,987	23,147	23,053	23,06	22,791		
5	60	35,869	23,908	22,884	22,847	22,489	40,847	28,723	26,181	26,211	25,892	30,092	23,64	23,503	23,606	23,319	30,332	24,935	23,717	23,701	23,204	34,195	22,667	21,858	21,67	21,375	35,775	23,825	23,253	23,254	22,811		
6	75	42,658	25,115	23,376	23,103	22,489	47,736	29,707	26,447	26,281	25,879	33,975	23,966	23,624	23,745	23,324	33,331	24,699	23,794	23,781	23,214	40,965	23,83	22,666	21,925	21,383	42,656	23,578	23,258	23,258	22,809		
7	90	50,225	26,894	23,055	23,373	22,515	55,39	31,232	26,641	26,584	25,889	38,405	24,424	23,693	23,935	23,33	37,431	25,13	23,92	23,872	23,241	48,635	25,539	22,356	22,24	21,401	50,406	26,421	23,612	23,942	22,846		
8	105	58,433	29,274	23,96	23,773	22,528	63,567	33,326	27,002	26,87	25,897	43,235	25,052	23,811	24,05	23,308	41,549	25,737	24,033	24,011	23,27	56,939	27,822	22,937	22,68	21,457	58,554	28,536	23,889	24,434	22,88		
9	120	67,016	32,194	24,46	24,217	22,578	72,149	35,972	27,988	27,241	25,913	48,364	26,956	23,999	24,199	23,331	45,955	26,523	24,174	24,122	23,285	65,752	30,7	23,641	23,128	21,502	67,088	31,223	24,373	25,014	22,927		
10	135	75,892	35,696	25,231	24,761	22,62	81,01	39,228	28,407	27,766	25,992	53,812	27,041	24,49	24,393	23,327	50,528	27,527	24,341	24,291	23,318	74,821	34,157	24,434	23,763	21,592	75,937	34,449	24,916	25,637	22,956		
11	150	84,941	39,688	26,302	25,416	22,686	90,049	42,959	29,451	28,365	26,086	59,495	28,42	24,345	24,753	23,367	55,344	28,774	24,581	24,518	23,366	84,078	38,093	25,483	24,379	21,64	85,042	38,237	25,705	26,599	23,019		
12	165	94,106	44,152	26,9	26,147	22,7	99,195	47,147	30,022	28,991	26,138	65,323	30,042	24,674	25,181	23,387	60,163	30,317	24,872	24,793	23,425	94,464	42,474	26,578	25,207	21,73	94,207	42,459	26,557	27,354	23,101		
13	180	103,333	49,024	27,878	27,063	22,915	108,369	51,693	30,986	29,916	26,215	71,309	31,882	25,064	25,59	23,399	64,95	32,095	25,227	25,061	23,48	102,865	47,299	28,206	25,976	21,823	103,439	47,149	27,667	28,237	23,203		
14	195	112,568	54,267	28,953	27,975	23,078	117,581	56,62	31,996	30,686	26,328	77,406	33,96	25,453	25,966	23,422	69,42	34,118	25,604	25,427	23,578	112,155	52,443	28,72	26,758	21,946	112,629	52,177	28,47	29,184	23,34		
15	210	121,746	59,865	29,717	28,907	23,282	126,87	59,32	32,541	31,42	26,452	83,61	36,263	25,961	26,337	23,415	73,354	36,497	26,061	25,816	23,665	121,318	57,902	30,688	27,558	22,108	121,805	57,463	28,672	29,863	23,472		
16	225	130,744	65,563	30,322	29,775	23,461	136,001	67,418	33,285	32,173	26,596	89,838	38,775	26,566	26,516	25,515	76,736	39,046	26,541	26,249	23,787	130,355	63,628	31,998	28,452	22,3,131	130,635	29,751	30,116	23,648	23,648		
17	240	139,576	71,494	32,329	30,833	23,69	144,933	73,149	33,972	32,962	26,786	96,081	41,517	27,162	27,949	25,572	79,972	41,936	27,099	26,699	23,898	139,182	69,526	32,961	24,423	22,523	139,99	32,033	31,013	32,217	23,9		
18	255	148,162	77,562	32,92	31,786	23,982	153,675	79,066	34,896	33,91	27,019	102,346	44,44	28,089	28,047	25,667	83,238	45,017	27,691	27,176	24,046	147,904	75,66	34,165	30,558	22,831	148,795	34,554	32,543	33,621	24,258		
19	270	156,574	83,71	34,23	32,757	24,387	162,205	85,067	36,343	33,963	27,316	108,652	47,523	28,438	28,456	23,664	86,212	48,295	28,34	27,695	24,218	156,462	81,872	34,808	31,199	23,253	157,4	35,003	33,971	34,883	24,665		
20	285	164,85	89,961	35,157	33,643	24,84	170,471	91,16	37,473	35,957	27,574	115,022	50,777	29,096	29,009	23,746	89,104	51,739	28,984	28,232	24,41	164,827	88,092	36,582	32,508	23,615	165,793	36,647	35,16	36,131	25,204		
21	300	172,967	96,22	36,344	34,809	25,35	178,633	97,317	38,736	37,122	27,9	121,359	54,191	29,719	29,208	23,858	91,846	55,262	29,674	28,809	24,605	173,023	94,333	38,272	33,688	24,125	174,009	37,029	37,026	37,418	25,754		
22	315	181,014	102,613	37,823	35,961	25,988	185,544	103,495	40,15	38,258	28,779	127,739	57,684	30,314	30,485	23,962	94,436	58,94	30,504	29,428	24,796	181,005	106,669	39,899	34,941	24,653	182,058	38,753	37,459	38,799	26,399		
23	330	188,765	108,85	38,833	37,275	26,684	194,336	109,677	41,313	39,18	28,671	133,998	61,282	30,33	31,308	24,604	98,394	62,648	31,185	30,143	29,993	188,983	106,966	40,566	36,255	24,523	189,87	40,483	38,454	40,249	27,122		
24	345	196,372	115,053	40,419	38,459	27,343	202,08	115,926	42,56	40,402	29,167	140,195	65,028	31,447	32,157	24,239	100,95	66,543	32,228	30,852	25,226	196,765	113,259	40,857	37,3	25,924	197,421	110,683	40,24	42,229	27,893		
25	360	203,818	121,232	41,482	39,618	28,095	209,59	122,103	44,162	41,567	29,643	146,178	68,802	32,466	32,792	24,406	101,053	70,287	32,883	31,683	25,481	204,334	119,575	42,884	38,633	26,691	204,833	116,607	41,587	43,49	28,716		
26	375	211,099	127,325	43,003	40,967	28,879	216,931	128,285	45,29	42,646	30,151	152,105	72,677	32,93	33,47	24,605	101,409	74	33,965	32,432	25,698	211,737	125,752	44,631	39,554	27,464	212,172	122,994	42,705	45,152	29,615		
27	390	218,188	133,434	44,189	42,202	29,734	224,165	134,425	47,018	43,579	30,719	157,933	76,577	34,008	34,258	25,084	101,817	77,317	31,905	28,662	25,642	218,954	131,896	45,486	40,721	28,267	219,188	128,428	44,204	46,572	30,588		
28	405	225,171	139,498	45,828	43,66	30,691	231,223	140,491	47,317	44,517	31,311	163,656	80,593	34,082	35,162	25,094	103,46	81,207	34,607	32,41	25,771	226,026	137,955	48,455	41,914	29,217	226,045	134,274	45,446	47,917	31,514		
29	420	231,963	145,44	47,105	44,809	31,611	238,313	146,515	48,672	45,851	31,994	169,259	84,597	35,232	36,142	25,394	106,583	84,743	36,57	35,348	26,308	232,918	143,904	49,821	43,17	30,068	232,672	140,007	47,958	49,262	32,471		
30	435	238,646	151,237	48,25	46,068	32,574	245,137	152,307	50,243	46,923	32,718	174,835	88,633	35,886	37,139	25,698	111,043	87,679	38,069	36,878	26,804	239,804	149,836	50,526	46,628	31,023	239,246	145,805	48,355	50,203	33,41		
31	450	245,212	156,97	49,747	47,282	33,545	251,816	158,027	52,439	48,388	33,415	180,315	92,689	37,1	37,891	26,034	116,544	90,095	39,669	38,286	27,3	246,434	155,572	52,249	45,8	31,993	245,741	151,536	50,81	51,949	34,436		
32	465	251,685	162,595	51,008	48,539	34,552	258,816	163,649	52,853	49,544	34,13	185,165	96,725	37,954	38,729	26,411	122,925	92,323	41,152	39,457	27,793	252,949	161,225	55,423	46,827	32,966	251,962	157,086	51,775	53,189	35,415		
33	480	258,065	168,177	52,686	49,626	35,511	264,965	169,281	54,571	50,675	34,914	190,996	100,742	38,322	39,625	26,839	129,627	93,599	42,532	40,801	28,324	259,319	166,797	56,016	48,33	33,921	257,916	162,551	53,699	54,499	36,362		
34	495	264,287	173,584	54,618	51,097	36,416	271,91	174,749	55,956	52,529	35,77	196,136	104,801	38,915	40,415	27,636	136,47																



Scan	Vrijeme	500					400					350					250				
		Zbuka	Zbuka	Zbuka	Pec	Pec	Zbuka	Zbuka	Zbuka	Pec	Pec	Zbuka	Zbuka	Zbuka	Pec	Pec	Zbuka	Zbuka	Zbuka	Pec	Pec
		Centar	Stjenka	Zrak1	Zrak2	Stjenka	Centar	Stjenka	Zrak1	Zrak2	Stjenka	Centar	Stjenka	Zrak1	Zrak2	Stjenka	Centar	Stjenka	Zrak1	Zrak2	Stjenka
1	0	72	22,329	22,432	22,258	22,319	21,353	21,286	21,243	21,185	21,107	22,127	22,097	21,089	20,945	20,575	22,339	22,382	22,391	22,344	22,262
2	15	23,965	22,242	22,242	22,318	22,412	21,499	21,432	21,384	21,321	21,257	22,237	22,295	21,182	20,999	20,538	22,528	22,528	22,603	22,413	22,322
3	30	25,94	22,65	22,752	22,526	22,35	21,829	21,805	21,793	21,793	21,093	22,679	22,718	21,299	21,121	20,604	22,729	22,715	22,673	22,479	22,319
4	45	28,556	23,106	23,035	22,683	22,346	22,235	21,679	21,411	21,109	23,523	23,589	21,551	21,342	20,617	23,616	23,221	22,883	22,652	22,337	
5	60	31,83	23,87	23,452	22,934	22,355	23,965	23,539	22,062	21,624	21,123	24,918	24,878	21,99	21,637	20,641	24,941	24,005	23,215	22,895	22,418
6	75	35,566	24,981	24,226	23,292	22,361	25,94	24,852	22,453	21,755	21,152	26,93	26,614	22,723	22,089	20,66	26,875	25,129	23,68	23,198	22,408
7	90	39,817	26,468	24,992	23,761	22,394	28,556	26,643	23,151	22,825	21,192	29,633	28,992	23,476	22,605	20,734	29,591	26,692	24,341	23,207	22,484
8	105	44,492	28,308	25,894	24,3	22,416	31,83	28,888	24,099	22,868	21,273	32,798	31,738	23,999	23,074	20,779	32,877	28,572	25,305	24,053	22,52
9	120	49,533	30,509	27,05	24,957	22,476	35,566	31,438	24,711	23,467	21,321	36,497	34,941	24,153	23,804	20,829	36,726	30,8	26,078	24,221	22,565
10	135	54,796	33,067	28,464	25,597	22,527	39,817	34,373	25,665	24,14	21,401	40,995	38,457	24,795	24,648	20,909	41,176	33,476	26,972	25,383	22,659
11	150	59,839	35,767	29,767	26,727	23,581	44,492	37,592	27,086	24,804	21,511	45,212	42,443	25,999	25,519	21,018	46,083	36,419	27,683	26,109	22,748
12	165	65,842	39,042	31,599	28,088	22,74	49,533	41,112	28,141	25,711	21,67	50,998	46,525	28,112	26,547	21,127	51,291	39,54	28,732	26,994	22,846
13	180	71,403	42,423	33,267	27,879	22,853	54,796	44,848	29,974	26,615	21,882	55,139	50,855	29,698	27,597	21,303	57,029	43,088	29,699	27,976	23,055
14	195	77,173	46,031	35,022	28,809	23,03	60,255	48,761	31,408	27,623	22,087	60,356	55,348	30,784	28,597	21,502	62,884	46,708	31,125	28,991	23,255
15	210	82,875	49,722	36,327	29,931	23,237	65,842	52,785	33,175	28,657	22,395	65,708	59,912	35,237	29,704	21,787	68,995	50,484	31,948	29,935	23,518
16	225	88,671	53,523	37,751	31,125	23,534	71,403	56,984	33,865	29,692	22,737	71,198	65,037	36,605	30,844	22,119	75,276	54,469	33,17	30,953	23,904
17	240	94,999	57,47	40,461	32,179	23,943	77,13	61,234	36,611	30,875	23,063	76,568	69,309	40,047	32,528	22,581	81,661	58,842	34,363	31,981	24,249
18	255	100,24	61,444	42,033	33,082	24,288	82,875	65,595	38,134	32,051	23,607	81,906	73,241	42	33,861	23,057	88,08	62,556	35,441	33,104	24,661
19	270	106,027	65,485	44,676	34,454	24,745	88,671	69,955	39,941	33,085	24,141	87,284	80,266	42,86	35,209	23,675	94,626	66,814	36,821	34,34	25,187
20	285	111,624	69,6	47,092	35,565	25,254	94,999	74,271	41,381	33,851	24,675	92,397	83,307	44,806	36,752	24,338	101,039	71,087	38,545	35,45	25,708
21	300	117,841	73,639	51,278	37,008	25,788	100,24	78,976	42,994	35,226	25,411	97,996	87,012	44,866	38,45	25,095	107,582	75,688	40,309	36,929	26,382
22	315	123,047	77,882	51,873	38,522	26,397	106,027	83,166	44,691	36,344	26,059	102,199	89,556	46,204	40,211	26,016	114,006	79,972	41,526	38,145	26,991
23	330	129,04	82,077	57,104	39,777	27,091	111,624	87,684	46,192	37,556	26,795	106,579	91,167	45,293	41,568	26,91	120,462	84,354	43,665	39,491	27,737
24	345	134,165	86,285	52,686	41,06	27,849	117,261	92,149	48,059	39,027	27,589	110,834	92,834	50,137	43,34	28,015	126,852	88,746	44,882	41,07	28,547
25	360	139,846	90,463	56,143	42,38	28,608	123,047	96,88	49,4	40,057	28,386	114,812	95,886	52,433	44,926	29,243	133,069	93,096	47,669	42,418	29,328
26	375	145,883	94,62	59,119	44,268	29,438	129,04	101,433	51,886	41,233	29,196	119,05	98,814	53,376	46,415	30,695	139,43	97,518	52,235	43,799	30,259
27	390	151,956	98,733	60,112	46,232	30,373	134,165	105,728	53,294	42,729	30,032	123,391	102,115	55,503	44,242	32,225	145,537	101,869	55,628	45,015	31,085
28	405	161,648	102,822	61,889	47,417	31,242	139,846	109,727	55,96	43,956	30,924	127,886	105,044	59,069	49,413	33,746	151,531	106,202	59,495	46,364	31,95
29	420	173,693	106,935	62,231	48,243	32,143	145,883	113,944	55,202	45,37	31,855	132,213	108,673	60,243	52,111	35,305	157,496	110,657	61,585	47,26	32,889
30	435	179,115	111,105	62,905	49,059	33,046	151,956	117,574	57,268	47,292	32,691	136,521	112,702	61,337	53,471	36,948	163,231	114,981	61,716	49,79	33,749
31	450	184,116	115,216	66,811	51,115	34,01	161,648	121,786	58,798	48,244	33,562	141,659	114,473	63,763	54,477	38,588	168,937	119,22	65,197	50,76	34,748
32	465	189,185	119,364	67,535	52,91	34,908	173,693	125,889	59,507	49,496	34,424	146,044	118,206	67,746	56,597	40,267	174,539	123,428	65,194	52,343	35,677
33	480	195,02	123,619	68,328	54,001	35,892	179,115	130,285	60,301	50,394	35,251	150,772	123,298	70,62	58,354	42,142	179,948	127,63	68,221	53,815	36,509
34	495	200,073	127,66	71,173	55,52	36,77	184,557	134,421	63,958	51,95	36,248	155,191	128,729	79,901	58,797	43,819	185,417	131,618	72,167	54,737	37,423
35	510	205,18	131,825	70,271	57,087	37,644	189,185	138,545	64,827	52,901	36,984	159,741	134,254	75,643	61,799	45,677	190,679	136,097	68,64	56,514	38,234
36	525	210,081	135,914	73,897	59,011	38,457	195,02	142,978	65,747	54,65	37,899	163,971	138,311	75,766	63,191	47,219	195,868	140,313	74,204	57,587	39,006
37	540	214,885	139,947	75,001	59,292	39,253	200,073	146,597	66,345	55,956	38,788	168,875	142,62	77,224	64,141	48,768	201,031	144,605	78,775	59,114	39,77
38	555	219,65	144,033	75,557	61,82	39,95	205,18	150,883	69,419	57,705	39,596	172,908	146,586	77,766	65,564	50,344	205,951	148,666	77,556	60,169	40,42
39	570	224,314	147,985	77,832	62,502	40,597	210,081	154,613	72,628	58,569	40,381	177,243	151,629	81,221	66,976	51,771	210,887	152,762	74,492	61,903	40,981
40	585	229,041	151,936	79,046	63,25	41,17	214,885	158,753	75,572	60,29	41,091	181,349	155,277	82,338	68,136	52,881	215,676	156,707	74,431	63,095	41,545
41	600	233,334	155,782	80,904	65,441	41,618	219,65	162,838	78,545	61,636	41,785	186,111	159,122	81,085	69,687	54,025	220,382	160,69	79,543	65,565	42,016
42	615	237,744	159,761	79,965	66,964	42,131	224,314	166,819	74,208	62,542	42,372	190,935	162,14	83,253	70,442	55,093	225,086	164,695	78,35	69,594	42,613
43	630	241,976	163,679	85,67	69,098	42,574	228,803	170,711	78,711	64,232	43,181	195,507	167,027	85,477	72,421	56,08	229,603	168,493	81,489	67,897	43,38
44	645	246,215	167,483	83,892	69,213	42,992	233,334	174,669	79,637	65,452	43,266	199,626	168,928	83,657	74,076	57,015	234,065	172,392	84,214	69,541	44,326
45	660	250,477	171,412	85,832	70,621	43,705	237,744	177,866	79,251	67,373	44,214	204,346	174,26	80,741	75,316	57,872	238,463	176,141	85,469	70,729	45,519
46	675	254,432	175,455	89,044	72,748	44,588	241,976	181,114	81,528	69,063	44,755	209,597	177,648	83,282	75,768	58,588	242,711	179,836	85,033	72,123	46,59
47	690	258,489	179,225	86,967	74,56	45,831	246,215	184,901	82,217	70,424	45,333	214,891	181,768	84,946	77,338	59,219	246,956	183,833	86,623	73,721	47,848
48	705	262,361	183,055	88,1	75,202	47,029	250,477	188,466	83,747	71,704	46,476	223,05	186,724	84,572	77,791	59,984	251,107	187,95	84,866	74,257	49,226
49	720	266,283	186,721	90,504	76,477	48,245	254,432	191,642	87,369	73,722	47,475	227,231	190,605	88,141	79,74	60,622	255,126	191,445	85,581	76,324	50,344
50	735	270,49	190,2	91,277	79,044	49,511	258,489														

Scan	Vrijeme	460			400			350			300			270												
		Zbuka Centar	Zbuka Stijenka	Zrak1	Zrak2	Pec Stijenka	Zbuka Centar	Zbuka Stijenka	Zrak1	Zrak2	Pec Stijenka	Zbuka Centar	Zbuka Stijenka	Zrak1	Zrak2	Pec Stijenka										
1	0	21,393	21,188	21,092	21,204	21,111	21,399	21,393	21,167	21,43	21,14	29,008	28,721	25,291	28,687	26,061	21,393	21,553	21,335	21,474	21,293	21,157	21,157	21,045	21,175	21,101
2	15	21,399	21,191	21,077	21,207	21,117	21,399	21,399	21,184	21,413	21,174	28,969	28,761	25,733	28,677	26,049	21,399	21,507	21,342	21,499	21,345	21,19	21,19	21,055	21,201	21,1
3	30	23	21,23	21,087	21,196	21,14	21,23	21,448	21,24	21,469	21,155	29,015	28,815	25,85	28,809	26,05	23	21,498	21,335	21,482	21,319	21,273	21,273	21,095	21,353	21,079
4	45	25	21,301	21,133	21,338	21,123	25	21,672	21,289	21,752	21,556	29,528	28,923	25,948	28,871	26,051	25	21,583	21,338	21,593	21,343	21,479	21,219	21,152	21,697	21,088
5	60	28	21,575	21,192	21,841	21,123	30	22,197	21,36	22,441	21,155	30,818	29,295	26,044	29,227	26,017	28	21,94	21,406	22,055	21,323	21,814	21,814	21,211	22,254	21,094
6	75	30	22,18	21,322	22,885	21,138	30	23,135	21,45	23,738	21,184	32,914	30,073	26,191	30,202	25,975	30	22,612	21,533	22,044	21,336	28,939	22,303	21,268	23,103	21,074
7	90	34	23,197	21,411	24,467	21,129	34	24,524	21,7	25,584	21,187	35,707	31,372	26,427	31,383	25,998	34	23,787	21,699	24,602	21,327	29,961	23,047	21,379	24,173	21,097
8	105	38	24,687	21,727	26,694	21,152	38	26,466	21,967	28,047	21,206	39,202	33,191	26,643	33,206	25,991	38	25,451	21,959	26,785	21,352	31,1064	23,928	21,546	25,522	21,07
9	120	43,367	26,69	22,063	29,463	21,185	43,367	28,977	22,291	31,079	21,218	43,367	35,583	26,937	35,201	26,025	43,367	27,7	22,729	29,594	21,422	32,6118	25,086	21,741	27,198	21,1
10	135	48,101	29,19	22,393	32,754	21,172	48,101	31,966	22,636	34,607	21,238	48,101	38,486	27,126	38,254	26,034	48,101	30,467	22,61	32,871	21,424	34,4331	26,487	21,977	29,023	21,163
11	150	53,285	32,216	22,728	36,51	21,211	53,285	35,507	23,059	38,252	21,32	53,285	41,918	27,597	41,463	26,079	53,285	33,756	23,063	36,649	21,464	36,4533	28,041	22,228	31,116	21,126
12	165	58,865	35,762	23,121	40,621	21,291	58,865	39,5	23,419	42,786	21,381	58,865	45,801	27,929	45,042	26,12	58,865	37,527	23,575	40,792	21,509	38,883	29,91	22,501	33,443	21,186
13	180	64,811	39,703	23,712	45,109	21,344	64,811	44,264	24,475	47,719	21,475	64,811	50,11	28,438	48,062	26,171	64,811	41,734	24,239	45,465	21,605	41,5519	31,963	22,748	35,899	21,192
14	195	71,001	44,056	24,233	49,949	21,43	71,001	49,065	24,925	52,749	21,57	71,001	54,819	28,925	53,268	26,276	71,001	46,367	24,777	50,404	21,738	44,5458	34,266	23,118	36,622	21,244
15	210	77,408	48,772	24,789	54,999	21,547	77,408	54,19	25,526	58,758	21,691	77,408	59,786	29,44	57,745	26,376	77,408	51,341	25,311	55,502	21,891	47,7711	36,747	23,415	41,448	21,261
16	225	83,99	53,757	25,607	60,254	21,712	83,99	60,558	26,05	63,484	21,852	83,99	65,035	30,263	62,626	26,527	83,99	56,587	25,63	60,88	22,025	51,298	39,46	23,766	44,439	21,292
17	240	90,728	59,037	26,092	65,66	21,916	90,728	64,538	26,816	69,098	21,991	90,728	70,557	31,012	72,792	26,691	90,728	62,046	26,397	66,416	22,196	55,0433	42,341	24,127	47,598	21,378
18	255	97,6	64,511	26,868	71,193	22,088	97,6	70,257	27,851	74,872	22,196	97,6	76,171	32	72,992	26,883	97,6	67,739	25,766	72,145	22,47	58,9836	45,372	24,379	50,831	21,444
19	270	104,577	70,187	27,475	76,874	22,323	104,577	76,073	28,474	80,67	22,432	104,577	82,069	32,783	78,066	27,138	104,577	73,569	28,106	77,91	22,646	63,1072	48,544	24,864	54,248	21,525
20	285	111,569	76,002	28,533	82,557	22,551	111,569	82,016	29,401	86,524	22,67	111,569	87,965	33,312	83,246	27,378	111,569	79,55	29,049	83,715	23,054	67,3842	51,834	25,466	57,749	21,602
21	300	117,734	81,89	29,7	88,277	22,832	117,734	87,989	30,481	92,341	22,913	118,676	93,933	34,711	88,565	27,65	117,734	85,513	30,038	89,511	23,351	71,825	55,25	26,013	61,287	21,663
22	315	124,843	87,81	30,825	94,031	23,118	124,843	94,019	31,421	98,242	23,238	125,718	100,023	35,591	94,168	27,962	124,843	91,603	31,072	95,376	23,804	76,4275	58,825	26,41	64,89	21,758
23	330	131,867	93,81	31,885	99,751	23,428	131,867	100,049	32,484	104,09	23,627	132,692	106,197	36,273	99,62	28,374	131,867	97,67	32,169	101,202	24,262	81,2058	62,466	27,149	68,571	21,918
24	345	138,802	99,805	33,116	105,478	23,836	138,802	106,149	33,765	109,91	24,085	139,683	112,461	36,733	105,125	28,814	138,802	103,727	33,28	107,083	24,847	86,0208	66,156	27,654	72,287	21,992
25	360	145,682	105,82	33,844	111,207	24,287	145,682	112,262	34,347	115,681	24,544	145,681	118,808	37,534	110,344	29,251	145,682	109,685	34,245	112,825	25,397	90,9129	69,933	28,255	76,047	22,155
26	375	152,4	111,826	35,092	116,775	24,717	152,4	118,446	35,769	121,488	25,132	153,546	125,052	38,722	115,995	29,701	152,4	115,726	35,799	118,586	26,01	95,9829	73,833	28,714	79,23	22,359
27	390	159,059	117,962	36,768	122,422	25,314	159,059	124,566	36,94	127,121	25,722	159,851	131,248	39,633	121,469	30,292	159,059	121,929	36,714	124,386	26,646	101,0737	77,749	29,401	83,543	22,549
28	405	165,655	124,142	37,673	127,869	25,593	165,655	130,656	38,13	132,729	26,337	166,594	137,245	40,802	126,821	30,881	165,655	128,809	38,652	129,836	27,402	106,1337	81,649	30,005	87,33	22,764
29	420	172,138	130,233	38,812	133,352	26,267	172,138	136,533	39,261	138,185	26,995	173,324	143,487	41,732	132,175	31,446	172,138	133,544	39,354	135,79	28,107	111,4307	85,639	30,662	91,146	22,997
30	435	178,529	136,201	40,409	138,659	27,224	178,529	142,375	40,212	143,555	27,692	179,347	149,006	42,62	137,125	32,19	178,529	139,128	40,216	141,297	28,805	116,5346	89,642	31,458	94,957	23,283
31	450	184,754	142,086	41,254	143,775	27,971	184,754	148,096	41,24	148,927	28,387	185,708	155,123	43,718	142,174	32,883	184,854	144,878	41,157	146,654	29,576	121,7177	93,629	32,292	98,732	23,596
32	465	191,047	147,81	42,214	148,884	28,593	191,047	153,698	42,909	154,093	29,107	192,099	161,268	45,059	147,51	33,599	191,047	150,565	42,597	151,907	30,433	126,9645	97,665	33,864	105,215	23,936
33	480	197,153	153,393	43,991	153,953	29,376	197,153	159,197	43,946	159,197	29,731	198,094	167,101	46,112	152,443	34,413	197,153	155,165	44,096	157,103	31,231	127,127	101,648	33,367	106,267	24,239
34	495	203,124	158,889	45,292	158,971	30,069	203,124	164,701	45,39	164,256	30,52	203,871	172,602	47,322	157,545	35,263	203,124	161,656	45,236	162,208	32,024	128	105,642	34,401	109,966	24,579
35	510	209,106	164,294	45,916	163,836	30,726	209,106	170,042	46,456	169,288	31,11	209,747	177,321	48,781	162,282	36,198	209,106	167,576	46,37	167,111	32,84	129	109,666	35,357	113,793	25,023
36	525	214,951	169,599	47,758	168,72	31,461	214,951	175,326	47,86	174,157	31,889	214,933	182,91	50,144	166,976	37,166	214,951	171,436	47,862	169,996	33,705	131,8874	113,696	35,843	117,523	25,438
37	540	220,645	174,8	48,791	173,527	32,037	220,645	180,599	49,006	178,959	32,451	220,886	187,612	51,92	171,764	38,245	220,645	176,25	48,697	174,743	34,493	136,6868	117,935	36,768	121,178	25,845
38	555	226,352	179,894	49,922	178,284	32,6	226,352	185,748	50,277	183,732	32,348	225,845	192,938	53,045	176,078	39,287	226,352	181,265	50,348	179,431	35,131	141,4968	121,98	37,749	124,802	26,288
39	570	231,857	184,844	51,572	182,873	33,206	231,857	190,792	52,003	188,38	34,003	231,32	197,47	54,75	180,473	40,431	231,857	186,296	51,456	184,15	35,803	146,2714	126,096	39,144	128,447	26,768
40	585	237,282	189,737	53,123	187,388	33,935	237,282	195,813	53,012	193,012	34,672	236,693	202,687	55,887	185,12	41,515	237,282	191,338	52,646	188,79	36,524	150,9485	130,128	39,236	131,952	27,248
41	600	242,732	194,536	53,664	191,989	34,811	242,732	200,783	54,735	197,54	35,273	242,076	206,62	58,19	189,203	42,688	242,732	195,979	54,072							