

# SIMULACIJA RADA UREĐAJA ZA MJERENJE TOPLINSKE VODLJIVOSTI IZOLACIJSKIH MATERIJALA

---

**Martinić, Josip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split / Sveučilište u Splitu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:265447>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-02**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Prijediplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

**JOSIP MARTINIĆ**

**Z A V R Š N I R A D**

**SIMULACIJA RADA UREĐAJA ZA MJERENJE  
TOPLINSKE VODLJIVOSTI IZOLACIJSKIH  
MATERIJALA**

Split, rujan 2023.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Prijediplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

**Predmet:** Materijali 1

**Z A V R Š N I R A D**

**Kandidat:** Josip Martinić

**Naslov rada:** Simulacija rada uređaja za mjerenje toplinske vodljivosti  
izolacijskih materijala

**Mentor:** Igor Gabrić

Split, rujan 2023.

**REPUBLIKA HRVATSKA**  
**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**Sveučilišni odjel za stručne studije**

**Studij:** Konstrukcijsko strojarstvo  
**Predmet:** Materijali 1  
**Nastavnik:** Igor Gabrić, v. pred.

## **ZADATAK**

**Kandidat:** Josip Martinić

**Zadatak:** Simulacija rada uređaja za mjerenje toplinske vodljivosti izolacijskih materijala

U radu je potrebno:

- Uvodno se osvrnuti o metodama mjerenja toplinske vodljivosti izolacijskih materijala
- Posebno se osvrnuti na postupak mjerenja toplinske vodljivosti metodom vrućeg diska
- Opisati način primjene metode konačnih elemenata (MKE) za rješavanje problema nestacionarnog toplinskog toka
- Koncipirati uređaj za ispitivanje toplinske vodljivosti metodom vrućeg diska te definirati najvažnije parametre uređaja (geometrija, svojstva materijala ...)
- Izvršiti modeliranje uređaja svođenjem na 2D problem nestacionarnog toplinskog toka (modelirani uređaj za analizu MKE prikazati skicom)
- Prikazati načelni postupak rješavanja problema primjenom MKE
- Primjenom raspoloživog Python programa provesti više pokusa prema unaprijed utvrđenom planu
- Rezultate pokusa statistički obraditi i analizirati
- Na temelju provedene analize odrediti najvažnije konstrukcijske mjere za izradu uređaja (dimenzije uzorka, mjerna mjesta, izolacijski materijal i debljine izolacije ...)
- Iznijeti zaključke
- Navesti literaturu i izvore podataka.

## Sažetak

U uvodnom dijelu ovoga rada prikazana je podjela metoda mjerenja toplinske vodljivosti izolacijskih materijala na dvije osnovne skupine: stacionarne i nestacionarne metode, te su ukratko prikazane neke od metoda. Opisan je način primjene metode konačnih elemenata za koju je potom koncipiran i modeliran uređaj za mjerenje toplinske vodljivosti izolacijskih materijala, te je prikazan način postavljanja ravnoteže za jedan čvor. Primjenom raspoloživog Python programa za simulaciju rada uređaja za mjerenje toplinske vodljivosti izolacijskih materijala provedeni su pokusi prema utvrđenom planu, nakon čeka su rezultati analizirani te je donesen zaključak o dimenzijama uređaja.

Ključne riječi: toplinska vodljivost, metoda konačnih elemenata, simulacija, analiza

## Summary (Simulation of the device for measuring the thermal conductivity of insulating materials)

In the introductory part of this paper, the division of methods for measuring the thermal conductivity of insulating materials into two basic groups is presented: stationary and non-stationary methods, and some of the methods are briefly presented. The method of applying the finite element method is described, for which a device for measuring the thermal conductivity of insulating materials was then designed and modeled, and the method of setting the balance for one node is presented. By applying the available Python program for simulating the operation of the device for measuring the thermal conductivity of insulating materials, experiments were carried out according to the established plan, after the check the results were analyzed and a conclusion was made about the dimensions of the device.

Keywords: thermal conductivity, finite element method, simulation, analysis

## SADRŽAJ

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Sažetak .....                                                                                          | ii |
| Summary (Simulation of the device for measuring the thermal conductivity of insulating materials)..... | ii |
| 1. Uvod.....                                                                                           | 1  |
| 2. Metode mjerenja toplinske vodljivosti.....                                                          | 2  |
| 2.1. Stacionarne metode.....                                                                           | 2  |
| 2.2. Nestacionarne metode.....                                                                         | 5  |
| 3. Metoda konačnih elemenata .....                                                                     | 8  |
| 4. Koncipiranje naprave .....                                                                          | 11 |
| 5. Primjena MKE .....                                                                                  | 13 |
| 5.1. Modeliranje uređaja za MKE .....                                                                  | 13 |
| 5.2. Primjer postavljanja uvjeta ravnoteže čvorova.....                                                | 14 |
| 6. Primjena programa.....                                                                              | 16 |
| 6.1. Plan pokusa.....                                                                                  | 16 |
| 6.2. Analiza.....                                                                                      | 17 |
| 7. Zaključak.....                                                                                      | 50 |
| Literatura .....                                                                                       | 51 |

**Popis slika**

|                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 2.1 – Shematski prikaz zaštićene vruće ploče [1] .....                                                                                                                  | 3  |
| Slika 2.2 – Shematski prikaz mjerača protoka topline [2] .....                                                                                                                | 3  |
| Slika 2.3 – Shematski prikaz metode izravnog grijanja [2] .....                                                                                                               | 4  |
| Slika 2.4 – Shematski prikaz metode cijevi [2].....                                                                                                                           | 5  |
| Slika 2.5 – Shematski prikaz metode s 2 uzorka [2] .....                                                                                                                      | 7  |
| Slika 3.1 - Vrste konačnih elementa [3].....                                                                                                                                  | 8  |
| Slika 3.2 – Diskreditizacija vremena i prostora [4].....                                                                                                                      | 9  |
| Slika 4.1 – Koncept naprave .....                                                                                                                                             | 11 |
| Slika 4.2 – Primjer hladnjaka .....                                                                                                                                           | 12 |
| Slika 5.1 – Mreža konačnih elemenata.....                                                                                                                                     | 13 |
| Slika 5.2 – Primjer čvora.....                                                                                                                                                | 14 |
| Slika 6.1 – Izbornik ulaznih podataka.....                                                                                                                                    | 16 |
| Slika 6.2 – Dijagram toplinske vodljivosti.....                                                                                                                               | 18 |
| Slika 6.3 – Raspodjela temperatura.....                                                                                                                                       | 18 |
| Slika 6.4 – Utjecaj promjene visine uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i debljinu izolacije 30 mm. ....     | 20 |
| Slika 6.5 – Utjecaj promjene debljine izolacije na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i visine uzorka 20 mm. ....     | 21 |
| Slika 6.6 – Utjecaj promjene promjera primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa debljinom izolacije 30 mm i visine uzorka 20 mm. ....        | 22 |
| Slika 6.7 – Utjecaj promjene promjera uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i debljine izolacije 30 mm. ....   | 23 |
| Slika 6.8 - Utjecaj promjene debljine izolacije na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i promjerom uzorka 200 mm. .... | 24 |
| Slika 6.9 – Utjecaj promjene promjera primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom uzorka 200 mm i debljine izolacije 30 mm. ....     | 25 |

|                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 6.10 – Utjecaj promjene promjera uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i visine uzorka 20 mm. ....               | 26 |
| Slika 6.11 – Utjecaj promjene visine uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i promjera uzorka 200 mm.....               | 27 |
| Slika 6.12 – Utjecaj promjene promjera primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i visine uzorka 20 mm.....     | 28 |
| Slika 6.13 – Utjecaj promjene promjera uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa visinom uzorka 20 mm i debljinom izolacije 30 mm.....                          | 29 |
| Slika 6.14 - Utjecaj promjene visine uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom uzorka 200 mm i debljinom izolacije 30 mm. ....                        | 30 |
| Slika 6.15 - Utjecaj promjene debljine izolacije na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom uzorka 200 mm i visine uzorka 20 mm. ....                         | 31 |
| Slika 6.16 – Utjecaj promjene snage primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i debljinom izolacije 30 mm.....  | 32 |
| Slika 6.17 – Utjecaj promjene debljine izolacije na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i snagom primarnog grijača 5.5 W. .... | 33 |
| Slika 6.18 – Utjecaj promjene promjera primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa debljinom izolacije 30 mm i snagom primarnog grijača 5.5 W. ....    | 34 |
| Slika 6.19 – Utjecaj promjene snage primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i visine uzorka 20 mm. ....       | 35 |
| Slika 6.20 – Utjecaj promjene visine uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i snagom primarnog grijača 5.5 W. ....      | 36 |
| Slika 6.21 – Utjecaj promjene promjera primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa snagom primarnog grijača 5.5 W i visine uzorka 20 mm. ....          | 37 |
| Slika 6.22 – Utjecaj promjene snage primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa visinom uzorka 20 mm i debljinom izolacije 30 mm. ....                 | 38 |
| Slika 6.23 – Utjecaj promjene visine uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa snagom primarnog grijača 5.5 W i debljine izolacije 30 mm. ....                  | 39 |
| Slika 6.24 – Utjecaj promjene debljine izolacije na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa snagom primarnog grijača 5.5 W i visine uzorka 20 mm. ....                  | 40 |



|                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 6.25 – Utjecaj promjene snage primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i promjerom uzorka 200 mm. .... | 41 |
| Slika 6.26 – Utjecaj promjene promjera uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i snagom primarnog grijača 5.5 W. ....  | 42 |
| Slika 6.27 – Utjecaj promjene promjera primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom uzorka 200 mm i snagom primarnog grijača 5,5 W. ....    | 43 |
| Slika 6.28 – Utjecaj promjene snage primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom uzorka 200 mm i debljinom izolacije 30 mm. ....            | 44 |
| Slika 6.29 – Utjecaj promjene promjera uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa snagom primarnog grijača 5.5 W i debljine izolacije 30 mm. ....              | 45 |
| Slika 6.30 – Utjecaj promjene debljine izolacije na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa snagom primarnog grijača 5.5 W i promjerom uzorka 200 mm. ....            | 46 |
| Slika 6.31 – Utjecaj promjene snage primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom uzorka 200 mm i visine uzorka 20 mm. ....                  | 47 |
| Slika 6.32 – Utjecaj promjene promjera uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa snagom primarnog grijača 5.5 W i visine uzorka 20 mm. ....                   | 48 |
| Slika 6.33 – Utjecaj promjene visine uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa snagom primarnog grijača 5.5 W i promjerom uzorka 200 mm. ....                 | 49 |

**Popis tablica**

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| Tablica 6.1 – Plan pokusa .....      | 17 |
| Tablica 6.2 – Rezultati pokusa ..... | 19 |

## 1. Uvod

Toplinska vodljivost je fizikalna veličina kojom se opisuje sposobnost materijala da provodi toplinu. Materijali poput bakra i srebra, koji su dobri električni vodiči, imaju i dobru toplinsku vodljivost, a materijali poput drva, gume i stiropora imaju slabu toplinsku vodljivost, te se zbog toga koriste kao izolatori. Toplinska vodljivost ima važnu ulogu u svim područjima gdje je potrebno razumjeti i kontrolirati prijenos topline.

Moguće ju je mjeriti na različite načine, od kojih su neki primarno predviđeni za izolacijske materijale, a opisani su u nastavku rada. Metode mjerenja toplinske vodljivosti dijelimo na stacionarne i nestacionarne, a osnovna razlika je u vremenskoj promjeni temperature.

U radu je, primjenom računalnog programa koji se oslanja na metodu konačnih elemenata, simuliran rad uređaja koji se zasniva na jednoj od metoda te je iznijet zaključak u obliku glavnih konstrukcijskih veličina potrebnih za izradu uređaja za mjerenje toplinske vodljivosti izolacijskih materijala.

## 2. Metode mjerenja toplinske vodljivosti

Toplinska vodljivost može se mjeriti primjenom više različitih metoda, a sve metode mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine: stacionarne metode i nestacionarne metode. Glavna razlika je u vremenu potrebnom za mjerenje koje je znatno duže kod stacionarnih metoda zato što je potrebno dostići toplinsku ravnotežu u svim točkama.

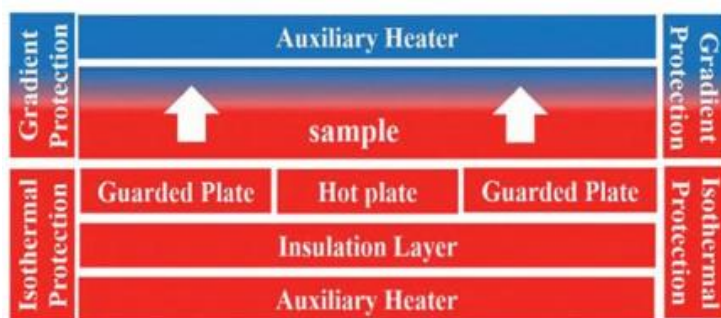
### 2.1. Stacionarne metode

Stacionarne metode zahtjevaju dugotrajna mjerenja kako bi se postigla temperaturna ravnoteža. Temperaturna ravnoteža se postiže kada su temperature u svim dijelovima volumena tijela konstantne i ne mijenjaju se s vremenom. Toplinska vodljivost određuje se preko razlike temperatura  $\Delta T$  između dvije točke uzorka koje su na određenoj udaljenosti kroz koju teče stacionarni toplinski tok. Prednost stacionarnih metoda je što koriste jednostavne matematičke izraze.

#### 2.1.1. Zaštićena vruća ploča

Zaštićena vruća ploča je najjednostavnija metoda i najčešće korištena u praksi, a uz to je i najučinkovitija. Metoda se u osnovi sastoji od vruće ploče koja je ujedno izvor topline i hladne ploče koja je toplinski ponor, obične izolacije i grijane izolacije koja služi za postizanje jednodimenzionalnog usmjerenog toplinskog toka kroz uzorak.

Metoda može biti izvedena s jednim uzorkom ili s dva uzorka, jedan iznad drugog, odvojenih vrućom pločom. Korištenjem varijante s dva uzorka, glavna prednost je to što se postiže simetrična raspodjela toplinskog toka, te se gubitak topline može usmjeriti na drugi uzorak. Prikaz metode s jednim uzorkom vidljiv je na slici 2.1.

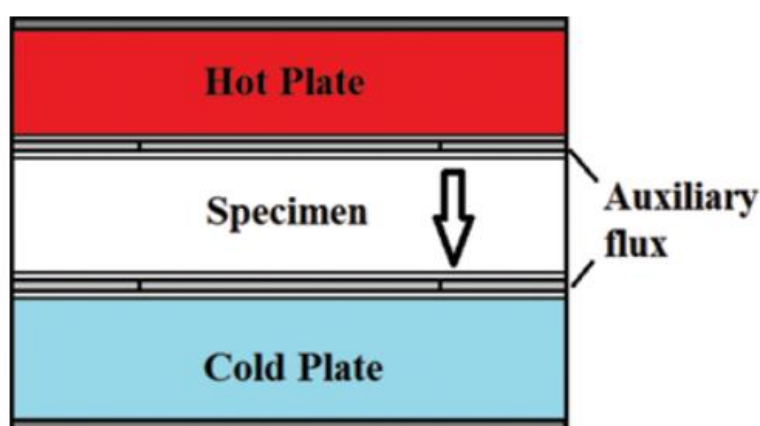


Slika 2.1 – Shematski prikaz zaštićene vruće ploče [1]

### 2.1.2. Mjerač protoka topline

Za metodu mjerenja protoka topline sa slike 2.2 može se reći da je to varijanta već spomenute metode zaštićene vruće ploče. Konstrukcija uređaja slična je konstrukciji zaštićene vruće ploče s jednim uzorkom. Ono što je drugačije za ovu metodu je to što koristi senzore toplinskog toka koji preko temperaturne razlike može mjeriti gustoću toplinskog toka, te kao rezultat daje temperature uzorka i gustoću toplinskog toka.

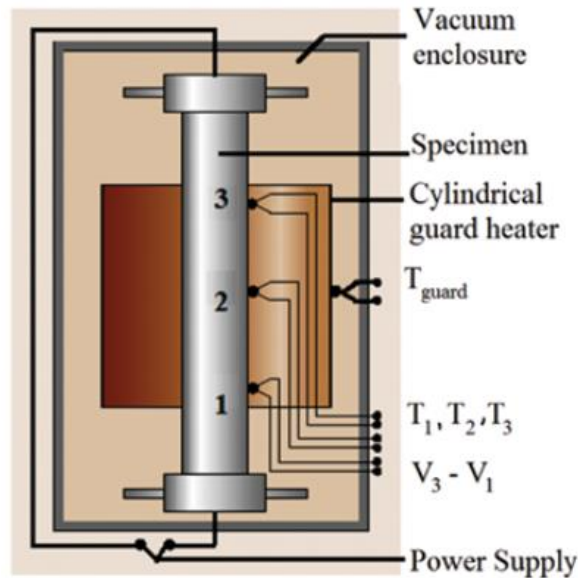
Pomoću ove metode brže se dolazi do traženih veličina jer je vrijeme potrebno za postizanje stacionarnog stanja kraće, ima veći raspon ispitivanja toplinske vodljivosti i ne zahtijeva poznavanje snage grijanja. Međutim, jako je bitna kalibracija pomoću uzorka ispitanog apsolutnom metodom, kao što je metoda zaštićene vruće ploče.



Slika 2.2 – Shematski prikaz mjerača protoka topline [2]

### 2.1.3. Metoda izravnog grijanja

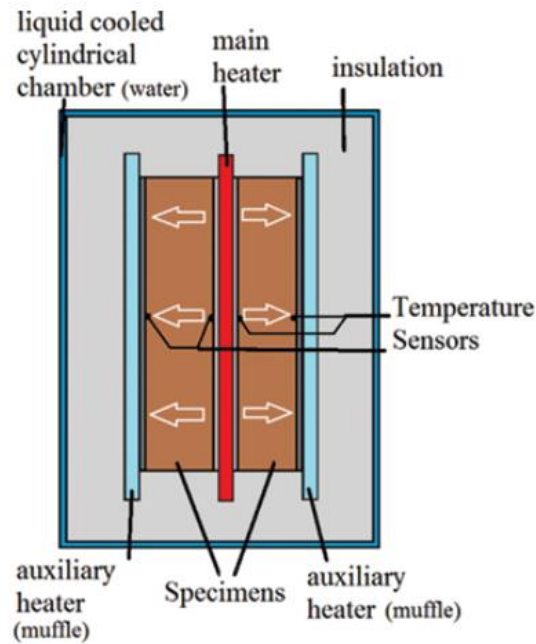
Ovom metodom ispituju se materijali koji provode električnu energiju te je vrijeme potrebno za ispitivanje nešto kraće od ostalih i ima manje radijalne gubitke topline. Uzorak je šipka, cijev ili žica koja se nalazi u vakuumskoj komori, između dva vodom hlađena hladnjaka te mu se mjeri pad napona i temperature u tri točke. Prikaz metode vidljiv je na slici 2.3.



Slika 2.3 – Shematski prikaz metode izravnog grijanja [2]

### 2.1.4. Metoda cijevi

Za mjerenje toplinske vodljivosti metodom cijevi koja je prikazana na slici 2.4 koristi se sklop cjevastog uzorak, glavnog grijača i pomoćnog grijača. U aksijalni provrt uzorka stavlja se cilindrični grijač, te se mjere temperature u unutrašnjosti uzorka i na vanjskoj površini. Čitav sklop grijača i uzorka obložen je izolacijom i nalazi se u hlađenoj komori. Budući da je uzorak cilindričan, zagrijava se iznutra čitavom dužinom. Ovom metodom određuje se radijalni toplinski tok iz kojeg se dobiva toplinska vodljivost.



Slika 2.4 – Shematski prikaz metode cijevi [2]

## 2.2. Nestacionarne metode

Glavna karakteristika nestacionarnih metoda je mijenjanje temperatura uzoraka s vremenom tijekom ispitivanja. Drugim riječima, mjerenje se vrši za vrijeme grijanja. Kod nekih nestacionarnih metoda moguće je zamijeniti mjerenje temperature na oba kraja uzorka s mjerenjem temperature u funkciji vremena samo na jednom kraju uzorka, čime se uređaji i njihovo korištenje pojednostavnjuju. Glavna prednost ovih metoda je ta što za dobivanje rezultata nije potrebno čekati postizanje stacionarnog stanja, odnosno nepromijenjivost temperature s vremenom u svim točkama. Stoga, mjerenje se obavlja za nekoliko minuta, pa čak i sekunda. S druge strane, nedostatak ovih metoda je povećanje pogreške u mjerenju jer je teško zadovoljiti granične uvjete, a pogreške je teže definirati zbog složenosti matematičkih izraza. Pomoću nestacionarnih metoda uz toplinsku vodljivost moguće je odrediti i druge termofizikalne veličine uzorka, što nije slučaj sa stacionarnim metodama.

### **2.2.1. Metoda laserskog bljeska**

Laserska metoda mjerenja toplinske vodljivosti je najčešće korištena metoda za krute tvari, ali se može koristiti i za tekućine te za višeslojne materijale. Kratkim laserskim bljeskom zagrijava se prednja strana uzorka, dok se na stražnjoj strani mjeri promjena temperature. Mjerenjem se dobiva toplinska difuznost, iz koje se poznavanjem specifičnog toplinskog kapaciteta i gustoće može izračunati toplinska vodljivost. Ova metoda ima širok raspon mjerenja toplinske vodljivosti pri temperaturama od -100 do 3000 °C.

### **2.2.2. Metoda vruće žice**

Osnovni elementi metode vruće žice dva su uzorka istog materijala i jednakih dimenzija, između kojih se postavlja žica od platine. U uzorcima se izradi utor za žicu kako bi se ostvarilo što bolji prijenos topline sa žice na uzorke. Žica je spojena na istosmjernu struju, te njeno zagrijavanje uzrokuje i zagrijavanje uzoraka. Postoje tri različite izvedbe metode vruće žice: okomita, paralelna i metoda otpornog termometra. Osnovna razlika okomite i paralelne je u postavljanju mjerne točke (termopara) u odnosu na vruću žicu, dok je kod treće metode žica ujedno i izvor topline i temperaturni senzor.

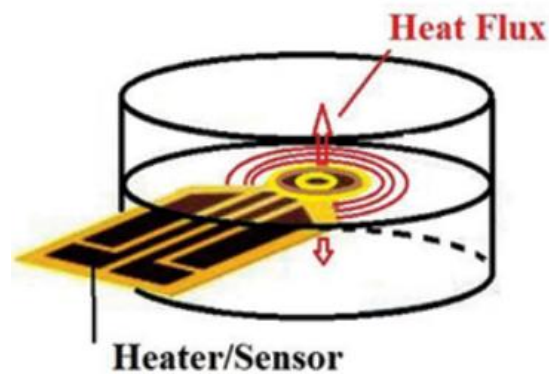
### **2.2.3. Metoda vrućeg diska**

Ova tehnika provodi se u svrhu mjerenja toplinske vodljivosti i toplinske difuznosti. Glavni element čini ravninska spirala, odnosno disk. Disk ima funkciju toplinskog senzora te zagrijavajućeg elementa. Disk je postavljen između dva identična uzorka, a struja se dovodi do diska koji se pritom zagrijava. Uloga senzora je i praćenje promjene temperature u vremenu, te se na taj način određuje toplinska vodljivost materijala. Međutim, poteškoće se mogu javiti prilikom odabira vremena trajanja testiranja, parametara zagrijavanja i odabira odgovarajuće veličine senzora s obzirom na uzorke, što može izazvati određene nejasnoće. Stoga, s ciljem standardizacije metode, razvijena je modificirana verzija metode vrućeg diska. Navedena metoda ima standardizirane parametre vremena i struje zagrijavanja, što otklanja već navedene nejasnoće i omogućava precizne rezultate. Disk je u ovom slučaju smješten na izoliranome postolju te okružen izolacijskim prstenom, čime se osigurava jednodimenzionalan toplinski tok. Iz tog razloga, omogućeno je korištenje samo jednog uzorka s jednom dodirnom površinom. Toplina se oslobađa kada se struja dovede senzoru. Također, istovremeno se prati i porast temperature mjerenjem pada napona senzora, a pad napona senzora kalibriran je s promjenom



temperature. Toplinska vodljivost uzorka obrnuto je proporcionalna stopi povećanja praćene temperature. Što je manja toplinska vodljivost uzorka, to je strmija krivulja porasta temperature, i obrnuto. Prikaz metode nalazi se na slici 2.5.

Glavne prednosti ove metode su u dobivanju rezultata visoke točnosti u vrlo kratkom vremenskom periodu pomoću uređaja kojemu je vrlo jednostavna upotreba. Uzorci mogu biti i načinjeni od širokog raspona vrsta materijala, primjerice tekući, gelasti ili čvrsti. Također, metoda vrućeg diska najčešće zahtjeva korištenje uzoraka koji su mnogo manji u odnosu na one u drugim metodama.

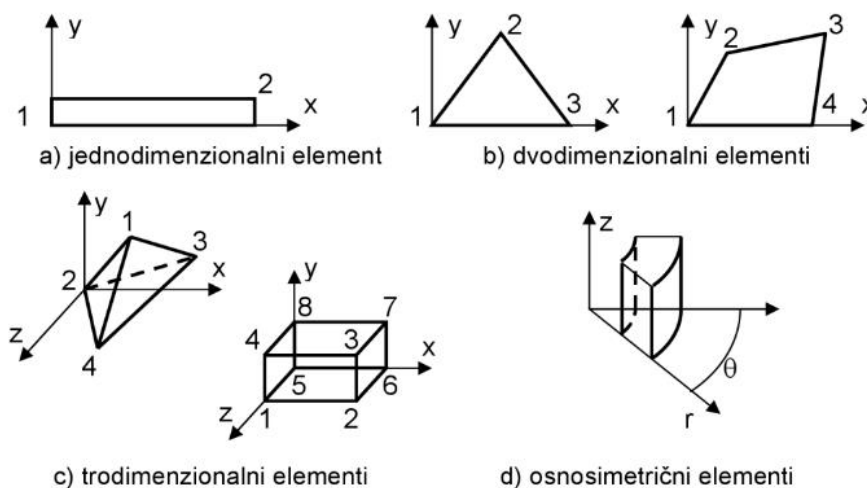


Slika 2.5 – Shematski prikaz metode s 2 uzorka [2]

### 3. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata numerički je postupak za rješavanje problema u inženjerstvu. Najčešće se koristi kod analiziranja struktura kod kojih nije moguće dobiti rješenje u analitičkom obliku, a karakterizira ih složena geometrija, opterećenje ili upotreba više različitih materijala. U takvim se situacijama koriste numeričke metode, od kojih je u najvećem broju slučajeva korištena metoda konačnih elemenata.

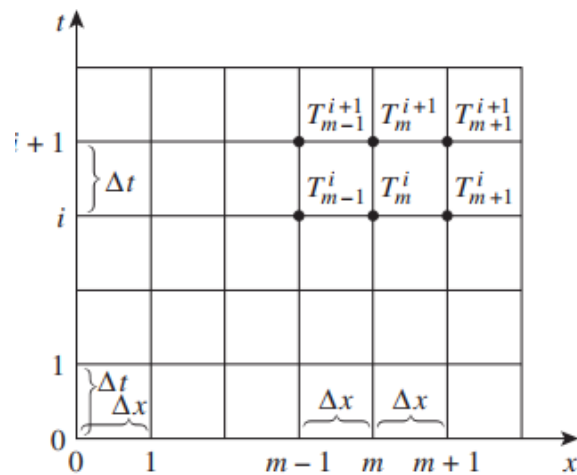
Model korišten u navedenoj metodi čine konačni elementi povezani u čvorove, a čvorovi su smješteni po graničnim zajedničkim linijama ili površinama. Za svaki od konačnih elemenata postavljene su jednačbe, čijom se kombinacijom dobivaju jednačbe strukture. Konačni elementi mogu biti jednodimenzionalni, dvodimenzionalni, trodimenzionalni i osnosimetrični, što je prikazano na slici 3.1.



Slika 3.1 - Vrste konačnih elemenata [3]

Glavni korak u proračunu metode konačnih elemenata jest diskretizacija područja kod koje se konstrukcija diskretizira podjelom na mrežu konačnih elemenata. U tom slučaju, kontinuirani sustav zamjenjuje se diskretnim sustavom opisanim s konačnim brojem nepoznatih varijabli. Nakon diskretizacije, postavlja se sustav jednačbi s čvornim veličinama kao nepoznicama, a potom se uspostavlja globalni sustav jednačbi koji vrijedi za cijeli diskretizirani model.

Kod problema nestacionarnog toplinskog toka, temperature se mijenjaju u vremenu, stoga je uz diskretizaciju u prostoru, neophodna i diskretizacija vremena, kao što je prikazano na slici 3.2.



Slika 3.2 – Diskreditizacija vremena i prostora [4]

Diskretizacija vremena učinjena je na način da se postavi prikladni korak u vremenu ( $\Delta t$ ). Za svaki  $\Delta t$  postavljaju se jednadžbe za nepoznate temperature čvorova dok se ne dobije rješenje za željeno vrijeme. Odabirom manjeg  $\Delta t$  povećava se preciznost rješenja, ali se isto tako povećava i vrijeme računanja. U prijelaznim problemima, eksponent  $i$  koristi se kao pokazatelj vremenskog koraka. Primjerice,  $i = 0$  označava početno stanje. U slučaju da je odabrani vremenski korak 5 minuta,  $i = 1$  odgovara  $t = 1 \cdot \Delta t = 5$  min,  $i = 2$  odgovara  $t = 2 \cdot \Delta t = 10$  min, i tako dalje. Izraz  $T_m^i$  predstavlja temperaturu čvora  $m$  u vremenskom koraku  $i$ . Problemi nestacionarnog toplinskog toka sadrže izraz za promjenu energije tijekom vremena, koji je izražen u diferencijalnoj jednadžbi kao prva derivacija temperature s obzirom na vrijeme, te kao promjena u unutarnjoj energiji tijekom  $\Delta t$ . Pretpostavljajući da se sva toplina prenosi unutar elementa, ravnoteža energije tijekom intervala  $\Delta t$  može biti izražena kao zbroj prenesene topline u element sa svih dodirnih površina tijekom intervala  $\Delta t$  i topline generirane u elementu za vrijeme  $\Delta t$ .

$$\Delta t \cdot \sum Q + \Delta t \cdot E_{gen} = \Delta E_{elementa} \quad (3.1)$$

Prijenos topline  $Q$  za unutarnje čvorove normalno se sastoji od kondukcije, dok za vanjske čvorove može uključivati konvekciju i zračenje.

Ako je  $\Delta E_{\text{elementa}} = m \cdot C_p \cdot \Delta T = \rho \cdot V_{\text{elementa}} \cdot C_p \cdot \Delta T$ , gdje je  $\rho$  gustoća, a  $C_p$  specifični toplinski kapacitet elementa, te podijelimo izraz 3.1 s  $\Delta t$ , dobije se:

$$\sum Q + E_{gen} = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

Za svaki čvor  $m$  vrijedi:

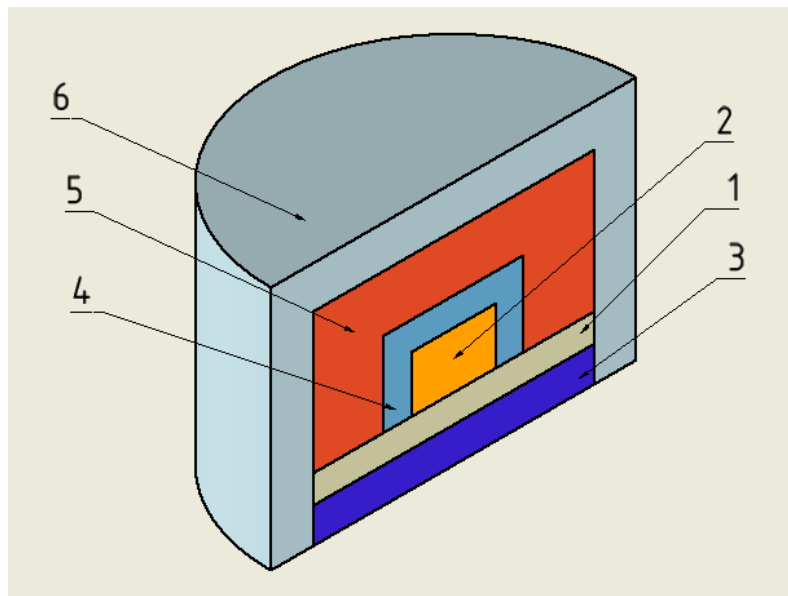
$$\sum Q + E_{gen} = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}$$

Gdje je  $T_m^i$  i  $T_m^{i+1}$  temperatura čvora u trenutku  $i$  te  $i+1$ .

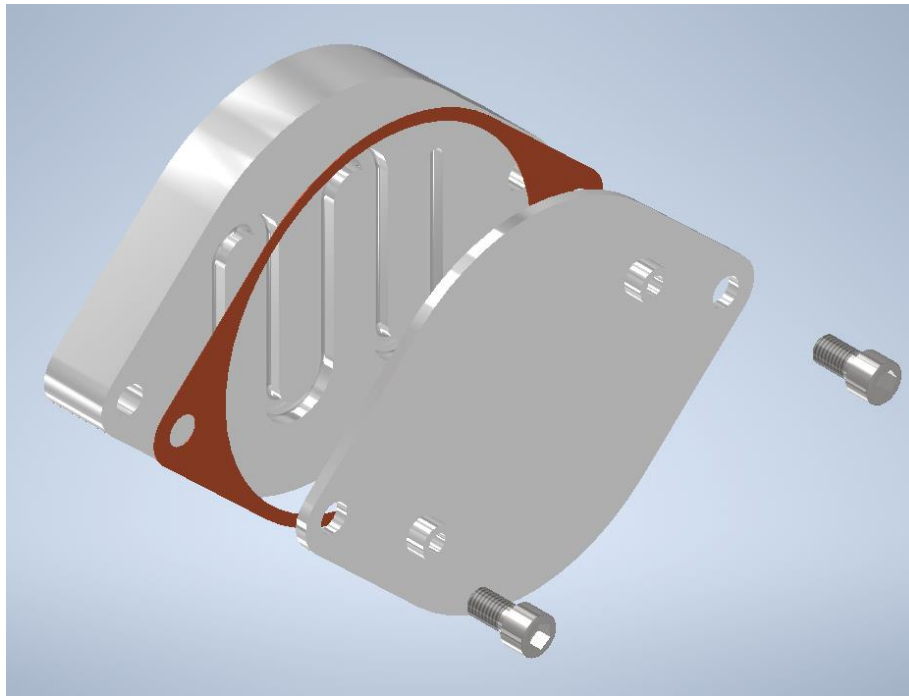
## 4. Koncipiranje naprave

Koncipiranje određenog uređaja odnosi se na proces planiranja i stvaranja ideja. Koncipiranje je ključan korak u razvoju i dizajnu, a služi kako bi se dobila jasnija vizija.

Naprava za mjerenje toplinske vodljivosti trebala bi biti izrađena od kombinacije materijala koji su dobri toplinski vodiči i materijala koji su dobri toplinski izolatori. Uzorak je cilindričnog oblika te su i svi ostali elementi prilagođeni njemu. Uzorak (1) smješten je između izvora topline i toplinskog ponora. Izvor topline je sklop primarnog grijača (2) koji je sastavljen od kućišta materijala visoke toplinske vodljivosti i pločastog električnog grijača. Ponor topline, odnosno hladnjak (3), je cilindrična ploča iz materijala velike toplinske vodljivosti, hladena vodom, čija je uloga održavanje konstantne temperature donjeg čela uzorka. U ovom slučaju hladnjak je zamišljen kao ploča s kanalima kroz koje cirkulira voda za hlađenje, a primjer hladnjaka vidljiv je na slici 4.2. Primarni grijač okružen je sekundarnim grijačem (4), čija je uloga usmjeriti cjelokupni toplinski tok primarnog grijača prema uzorku. Sekundarni grijač se uključuje i isključuje ovisno o potrebi, a to upravljanje može se izvesti primjenom Peltierova modula. Primarni i sekundarni grijač odvojeni su slojem toplinske izolacije (5), a svi do sada spomenuti elementi su toplinski izolirani vanjskom izolacijom (6). Koncept naprave prikazan je na slici 4.1.



Slika 4.1 – Koncept naprave



Slika 4.2 – Primjer hladnjaka

Primarni grijač kako je ranije spomenuto može biti sastavljen od bakrenih valjčića između kojih je pločasti grijač, dok je sekundarni grijač moguće izvesti pomoću uložnih cjevastih grijača koji se nalaze u masivnom bakrenom kućištu.

Ovakva izvedba naprave je jednostavna i za izradu i za korištenje te je potrebno poznavati snagu grijača i mjeriti temperaturu na toploj i hladnoj površini uzorka, a toplinska vodljivost se dobiva primjenom izraza 4.1.

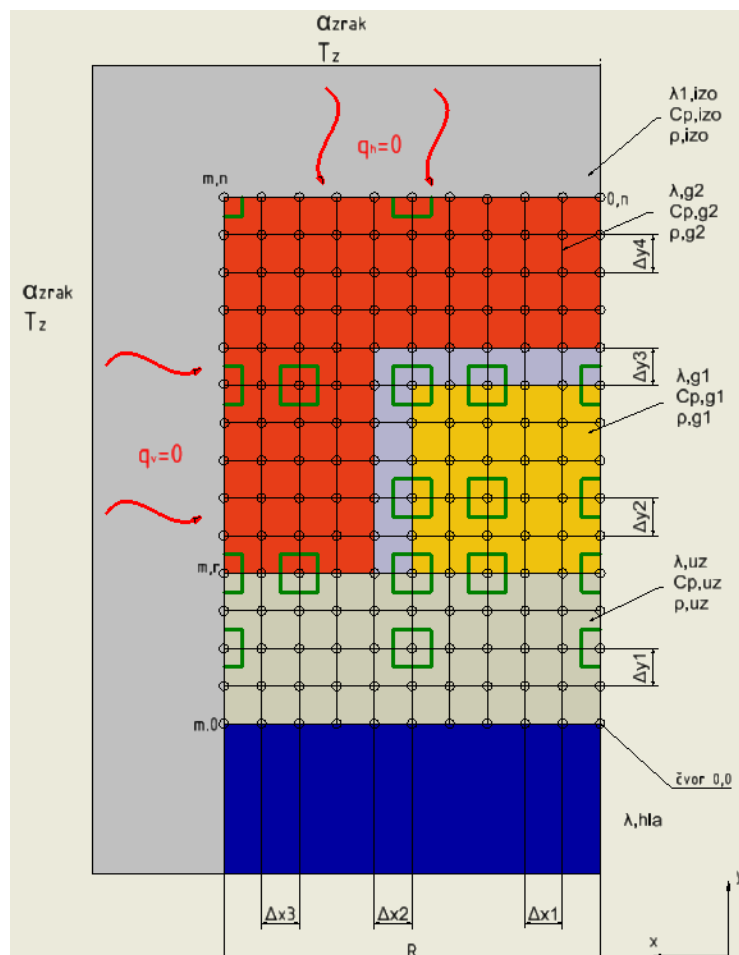
$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{A \cdot \Delta T} \quad (4.1)$$

U izrazu 4.1  $\lambda$  je toplinska vodljivost uzorka,  $Q$  je toplinski tok,  $d$  je visina uzorka,  $A$  je grijana površina i  $\Delta T$  je razlika temperatura tople i hladne strane.

## 5. Primjena MKE

### 5.1. Modeliranje uređaja za MKE

Koncipiranu napravu sa slike 3.1 potrebno je modelirati primjenom metode konačnih elemenata. To se vrši diskretizacijom, odnosno podjelom naprave na mrežu konačnih elemenata. Budući da je koncipirana naprava valjkastog oblika, to jest simetrična, mrežu konačnih elemenata je dovoljno postaviti na polovinu uzdužnog presjeka. Mreža konačnih elemenata prikazana je na slici 5.1.

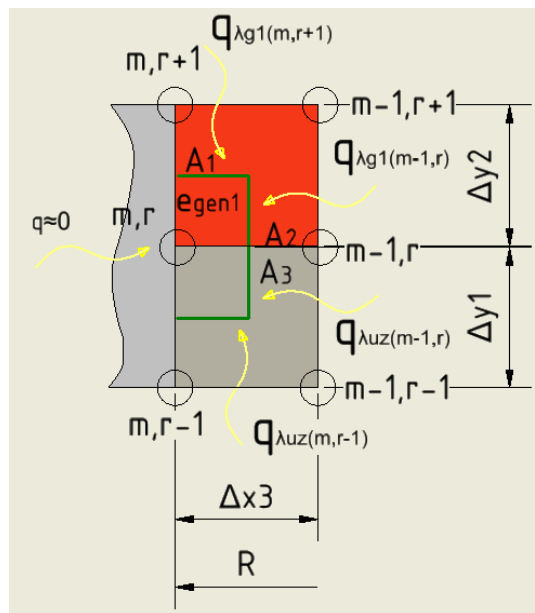


Slika 5.1 – Mreža konačnih elemenata

Na slici 5.1 je vidljiva mreža koju čine konačni elementi, a njihove dodirne točke su čvorovi koji su označeni kružićem. Zelenim kvadratićem označeni su volumeni čvorova za koje je potrebno izvesti uvjet ravnoteže energije. Različite boje označavaju različite materijale te su za svaki materijal dana njegova svojstva toplinske vodljivosti ( $\lambda$ ), toplinskog kapaciteta ( $C_p$ ) i gustoće ( $\rho$ ).

## 5.2. Primjer postavljanja uvjeta ravnoteže čvorova

Primjer postavljanje uvjeta ravnoteže čvorova prikazan je na jednom čvoru prikazanom na slici 5.2.



Slika 5.2 – Primjer čvora

U središnjem dijelu slike 5.2 prikazan je čvor čija je koordinata ( $m, r$ ) za koji će se u nastavku postaviti uvjeti ravnoteže. Zelene linije predstavljaju granice konačnog elementa promatranog čvora, a žute valovite strelice prirast energije uslijed toplinskog toka od svakog pojedinog susjednog čvora.

Prvi korak u postavljanju uvjeta ravnoteže je određivanje površina koje su oblika plašta valjka i kružnog vijenca, a zatim i volumena prstenastog oblika pravokutnog poprečnog presjeka.



$$A_1 = R^2 \cdot \pi - \left(R - \frac{\Delta x_3}{2}\right)^2 \cdot \pi$$

$$A_2 = 2 \cdot \left(R - \frac{\Delta x_3}{2}\right) \cdot \pi \cdot \frac{\Delta y_2}{2}$$

$$A_3 = 2 \cdot \left(R - \frac{\Delta x_3}{2}\right) \cdot \pi \cdot \frac{\Delta y_1}{2}$$

$$V_{g1} = A_1 \cdot \frac{\Delta y_2}{2}$$

Iz volumena elementa grijača  $V_{g1}$  može se dobiti generirana energija u njemu koja pridonosi povećanju topline.

$$E_{gen} = e_{gen} \cdot V_{g1}$$

Nadalje možemo postaviti jednadžbu ravnoteže za ovaj čvor:

$$Q_{\lambda g1(m,r+1)} + Q_{\lambda g1(m-1,r)} + Q_{\lambda uz(m-1,r)} + Q_{\lambda uz(m,r-1)} + E_{gen} =$$

$$(\rho_{g1} \cdot V_{g1} \cdot C_{p,g1} + \rho_{uz} \cdot V_{uz} \cdot C_{p,uz}) \cdot \frac{(T_{m,r}^{i+1} - T_{m,r}^i)}{\Delta t} \quad (4.2)$$

gdje su  $Q_{\lambda}$  prirasti topline od pojedinih susjednih čvorova, a  $E_{gen}$  toplina generirana u čvoru od grijača 1. Temperature  $T_{m,r}^{i+1}$  i  $T_{m,r}^i$  su temperature u prethodnom i sljedećem trenutku, a  $\Delta t$  vremenski korak.

Sređivanjem jednadžbe 4.2 dobije se izraz za temperaturu čvora u idućem trenutku:

$$T_{m,r}^{i+1} = T_{m,r}^i + \frac{\Delta t}{\rho_{g1} V_{g1} C_{p,g1} + \rho_{uz} V_{uz} C_{p,uz}} \left[ \lambda_{g1} \frac{T_{m,r+1}^i - T_{m,r}^i}{\Delta y_2} A_1 + \lambda_{g1} \frac{T_{m-1,r}^i - T_{m,r}^i}{\Delta x_3} A_2 + \lambda_{uz} \frac{T_{m-1,r}^i - T_{m,r}^i}{\Delta x_3} A_3 \right. \\ \left. + \lambda_{g1} \frac{T_{m,r-1}^i - T_{m,r}^i}{\Delta y_1} A_1 + e_{gen} V_1 \right]$$

## 6. Primjena programa

Prvobitnom primjenom raspoloživog programa i variranjem različitih ulaznih podataka te promatranjem rezultata, odabiru se sljedeće veličine kao glavne konstrukcijske veličine: snaga primarnog grijača, promjer uzorka, visina uzorka, debljina vanjske izolacije te promjer primarnog grijača. Veličina bitna za konstrukciju je također i širina unutarnje izolacije koja se usvaja da je jednaka 3 mm. Izbornik za unos podataka u program za simulaciju naprave prikazan je na slici 6.1.

**ULAZNI PODACI**  
**UNOS ULAZNIH PODATAKA:**

|                                                                                      |                 |                                                                       |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------|------|
| Trajanje ispitivanja, min                                                            | 120             | Toplinska vodljivost sekundarnog grijača $\lambda_{n,g2}$ , W/mK      | 220  |
| Vremenski korak, s                                                                   | 0.01            | Toplinski kapacitet sekundarnog grijača $C_{p,g2}$ , W/kg.K           | 900  |
| Broj elemenata duž x osi $x_m$                                                       | 9               | Gustoća sekundarnog grijača $\rho_{n,g2}$ , kg/m <sup>3</sup>         | 2700 |
| Broj elemenata duž y osi $y_n$                                                       | 10              | Visina uzorka $h_{uz}$ , mm                                           | 17.5 |
| Temperatura rashladne vode $T_{hladnjaka}$ , degC                                    | 20              | Toplinska vodljivost uzorka $\lambda_{n,uz}$ , W/mK                   | 0.07 |
| Temperatura okolnog zraka $T_{okoline}$ , degC                                       | 20              | Toplinski kapacitet uzorka $C_{p,uz}$ , W/kg.K                        | 1030 |
| Koeficijent konvekcije hladnjak - voda $\alpha_{hlad}$ , W/m <sup>2</sup> K          | 1000            | Gustoća uzorka $\rho_{n,uz}$ , kg/m <sup>3</sup>                      | 245  |
| Koeficijent konvekcije izolacija - zrak $\alpha_{zrak}$ , W/m <sup>2</sup> K         | 5               | Debljina vanjske izolacije $x_{izo}$ , mm                             | 55   |
| Dopuštena razlika temperatura grijača $\Delta T_{grijača\_dop}$ , W/m <sup>2</sup> K | 0.1             | Toplinska vodljivost vanjske izolacije $\lambda_{n,izo}$ , W/mK       | 0.07 |
| Snaga primarnog grijača $P_{g1}$ , W                                                 | 5.5             | Toplinski kapacitet vanjske izolacije $C_{p,izo}$ , W/kg.K            | 1030 |
| Promjer primarnog grijača $d_{g1}$ , mm                                              | 200             | Gustoća vanjske izolacije $\rho_{n,izo}$ , kg/m <sup>3</sup>          | 245  |
| Visina primarnog grijača $h_{g1}$ , mm                                               | 11              | Debljina izolacije grijača $x_{izo\_grijača}$ , mm                    | 1    |
| Toplinska vodljivost primarnog grijača $\lambda_{n,g1}$ , W/mK                       | 220             | Toplinska vodljivost izolacije grijača $\lambda_{n,izo\_grij}$ , W/mK | 0.07 |
| Toplinski kapacitet primarnog grijača $C_{p,g1}$ , W/kg.K                            | 900             | Toplinski kapacitet izolacije grijača $C_{p,izo\_grij}$ , W/kg.K      | 1030 |
| Gustoća primarnog grijača $\rho_{n,g1}$ , kg/m <sup>3</sup>                          | 2700            | Gustoća izolacije grijača $\rho_{n,izo\_grij}$ , kg/m <sup>3</sup>    | 245  |
| Snaga sekundarnog grijača $P_{g2}$ , W                                               | 20              | Debljina stijenke hladnjaka $x_{hlad}$ , mm                           | 3    |
| Promjer sekundarnog grijača $d_{g2}$ , mm                                            | 225             | Toplinska vodljivost stijenke hladnjaka $\lambda_{n,hlad}$ , W/mK     | 230  |
| Visina sekundarnog grijača $h_{g2}$ , mm                                             | 20              | Toplinski kapacitet stijenke hladnjaka $C_{p,hlad}$ , W/kg.K          | 900  |
| <b>Potvrdi unos</b>                                                                  | <b>Proracun</b> | Gustoća stijenke hladnjaka $\rho_{n,hlad}$ , kg/m <sup>3</sup>        | 2700 |

The schematic diagram on the right shows a cross-section of the device. It includes a Peltier module and an electric heater. The diagram is divided into several regions (V1, V2, V3, V4) and interfaces (A11, A12, A21, A22). The temperature distribution is shown with a color scale from blue (cold) to red (hot). The diagram also shows the coordinate system (x, y) and the boundary conditions (Tz, Tzrak, Tzhlad).

Slika 6.1 – Izbornik ulaznih podataka

### 6.1. Plan pokusa

Na osnovu veličina koje su prethodno odabrane kao glavne konstrukcijske veličine izrađen je plan pokusa. Svrha izrade plana pokusa je dobivanje najboljih kombinacija ranije spomenutih veličina.

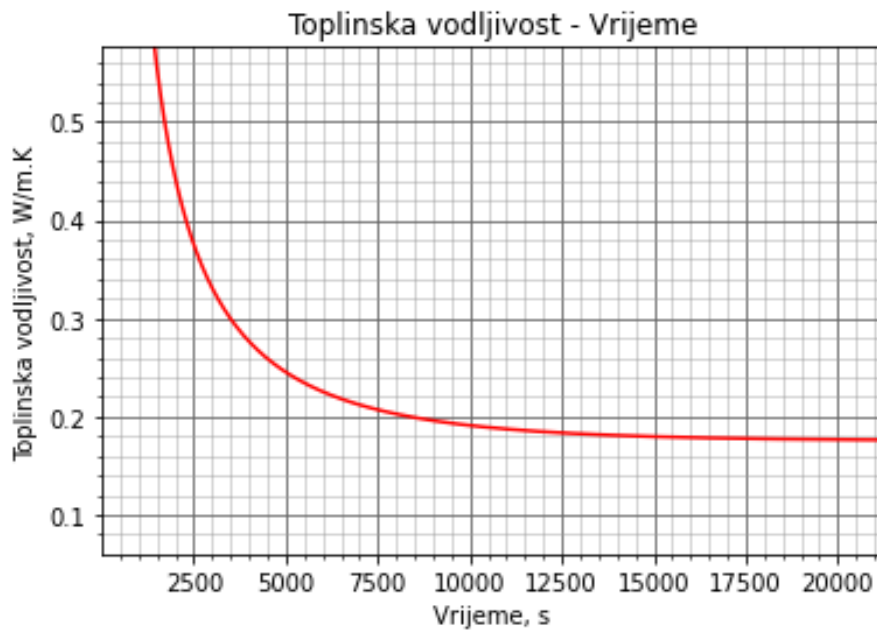
Plan pokusa je izrađen pomoću programa Design Expert, a služi za planiranje i analizu pokusa. Plan pokusa prikazan je u tablici 6.1.

Tablica 6.1 – Plan pokusa

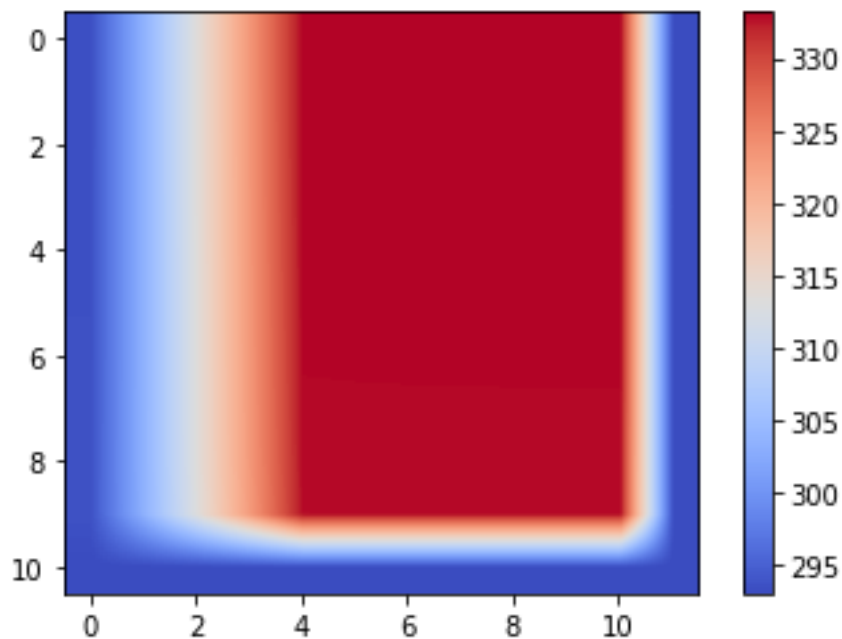
| Std | Run | Factor 1<br>A:P_g1<br>W | Factor 2<br>B:d_uz = d_g2<br>mm | Factor 3<br>C:h_uz<br>mm | Factor 4<br>D:x_izo<br>mm | Factor 5<br>E:d_g1<br>mm |
|-----|-----|-------------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 11  | 1   | 1                       | 300                             | 10                       | 50                        | 250                      |
| 42  | 2   | 5,5                     | 200                             | 20                       | 30                        | 67                       |
| 31  | 3   | 1                       | 300                             | 30                       | 50                        | 100                      |
| 39  | 4   | 5,5                     | 200                             | 20                       | 10                        | 95                       |
| 8   | 5   | 10                      | 300                             | 30                       | 10                        | 250                      |
| 27  | 6   | 1                       | 300                             | 10                       | 50                        | 100                      |
| 18  | 7   | 10                      | 100                             | 10                       | 10                        | 33                       |
| 34  | 8   | 10                      | 200                             | 20                       | 30                        | 95                       |
| 20  | 9   | 10                      | 300                             | 10                       | 10                        | 100                      |
| 5   | 10  | 1                       | 100                             | 30                       | 10                        | 83                       |
| 33  | 11  | 1                       | 200                             | 20                       | 30                        | 95                       |
| 21  | 12  | 1                       | 100                             | 30                       | 10                        | 33                       |
| 37  | 13  | 5,5                     | 200                             | 10                       | 30                        | 95                       |
| 43  | 14  | 5,5                     | 200                             | 20                       | 30                        | 95                       |
| 32  | 15  | 10                      | 300                             | 30                       | 50                        | 100                      |
| 26  | 16  | 10                      | 100                             | 10                       | 50                        | 33                       |
| 13  | 17  | 1                       | 100                             | 30                       | 50                        | 83                       |
| 10  | 18  | 10                      | 100                             | 10                       | 50                        | 83                       |
| 2   | 19  | 10                      | 100                             | 10                       | 10                        | 83                       |
| 40  | 20  | 5,5                     | 200                             | 20                       | 50                        | 95                       |
| 35  | 21  | 5,5                     | 100                             | 20                       | 30                        | 48                       |
| 9   | 22  | 1                       | 100                             | 10                       | 50                        | 83                       |
| 41  | 23  | 5,5                     | 200                             | 20                       | 30                        | 167                      |
| 38  | 24  | 5,5                     | 200                             | 30                       | 30                        | 95                       |
| 17  | 25  | 1                       | 100                             | 10                       | 10                        | 33                       |
| 36  | 26  | 5,5                     | 300                             | 20                       | 30                        | 143                      |
| 12  | 27  | 10                      | 300                             | 10                       | 50                        | 250                      |
| 29  | 28  | 1                       | 100                             | 30                       | 50                        | 33                       |
| 22  | 29  | 10                      | 100                             | 30                       | 10                        | 33                       |
| 1   | 30  | 1                       | 100                             | 10                       | 10                        | 83                       |
| 6   | 31  | 10                      | 100                             | 30                       | 10                        | 83                       |
| 3   | 32  | 1                       | 300                             | 10                       | 10                        | 250                      |
| 7   | 33  | 1                       | 300                             | 30                       | 10                        | 250                      |
| 28  | 34  | 10                      | 300                             | 10                       | 50                        | 100                      |
| 25  | 35  | 1                       | 100                             | 10                       | 50                        | 33                       |
| 15  | 36  | 1                       | 300                             | 30                       | 50                        | 250                      |
| 4   | 37  | 10                      | 300                             | 10                       | 10                        | 250                      |
| 19  | 38  | 1                       | 300                             | 10                       | 10                        | 100                      |
| 30  | 39  | 10                      | 100                             | 30                       | 50                        | 33                       |
| 16  | 40  | 10                      | 300                             | 30                       | 50                        | 250                      |
| 23  | 41  | 1                       | 300                             | 30                       | 10                        | 100                      |
| 14  | 42  | 10                      | 100                             | 30                       | 50                        | 83                       |
| 24  | 43  | 10                      | 300                             | 30                       | 10                        | 100                      |

## 6.2. Analiza

Primjenom raspoloživog Python programa provedena je analiza primjenom metode konačnih elemenata za sve prethodno definirane pokuse. Nakon provedenih pokusa rezultati pokusa su prikazani tablično i dijagramima te zasebno analizirani. Trajanje pokusa u programu je namješteno na 20 sati. Nakon provedbe jednog pokusa program daje rezultate u obliku Excel dokumenta i slike dijagrama toplinske vodljivosti prikazanoj na slici 6.2 te raspodjele temperature prikazane na slici 6.3.



Slika 6.2 – Dijagram toplinske vodljivosti



Slika 6.3 – Raspodjela temperatura

Nakon provedena sva četrdeset i tri pokusa koja su prikazana u tablici 6.1 dobiveni su rezultati prikazani u tablici 6.2.

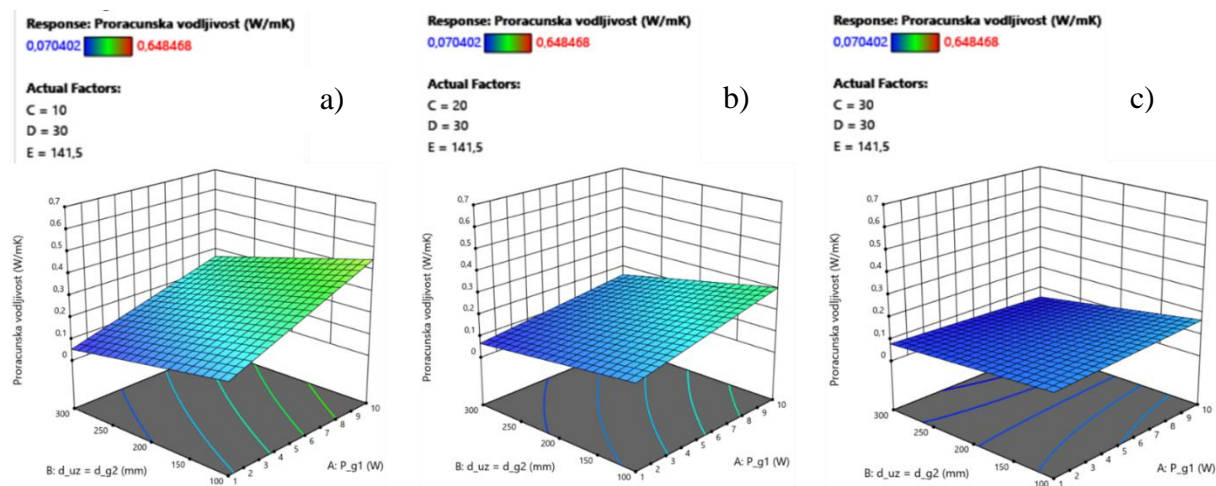
Tablica 6.2 – Rezultati pokusa

| Std | Run | Factor 1<br>A:P_g1<br>W | Factor 2<br>B:d_uz = d_g2<br>mm | Factor 3<br>C:h_uz<br>mm | Factor 4<br>D:x_izo<br>mm | Factor 5<br>E:d_g1<br>mm | Response 1<br>Proracunska vod...<br>W/mK |
|-----|-----|-------------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------------|
| 11  | 1   | 1                       | 300                             | 10                       | 50                        | 250                      | 0,074142                                 |
| 42  | 2   | 5,5                     | 200                             | 20                       | 30                        | 67                       | 0,089063                                 |
| 31  | 3   | 1                       | 300                             | 30                       | 50                        | 100                      | 0,071295                                 |
| 39  | 4   | 5,5                     | 200                             | 20                       | 10                        | 95                       | 0,144053                                 |
| 8   | 5   | 10                      | 300                             | 30                       | 10                        | 250                      | 0,071309                                 |
| 27  | 6   | 1                       | 300                             | 10                       | 50                        | 100                      | 0,074078                                 |
| 18  | 7   | 10                      | 100                             | 10                       | 10                        | 33                       | 0,294768                                 |
| 34  | 8   | 10                      | 200                             | 20                       | 30                        | 95                       | 0,165898                                 |
| 20  | 9   | 10                      | 300                             | 10                       | 10                        | 100                      | 0,215839                                 |
| 5   | 10  | 1                       | 100                             | 30                       | 10                        | 83                       | 0,075284                                 |
| 33  | 11  | 1                       | 200                             | 20                       | 30                        | 95                       | 0,074373                                 |
| 21  | 12  | 1                       | 100                             | 30                       | 10                        | 33                       | 0,071462                                 |
| 37  | 13  | 5,5                     | 200                             | 10                       | 30                        | 95                       | 0,208363                                 |
| 43  | 14  | 5,5                     | 200                             | 20                       | 30                        | 95                       | 0,114038                                 |
| 32  | 15  | 10                      | 300                             | 30                       | 50                        | 100                      | 0,071238                                 |
| 26  | 16  | 10                      | 100                             | 10                       | 50                        | 33                       | 0,24725                                  |
| 13  | 17  | 1                       | 100                             | 30                       | 50                        | 83                       | 0,086768                                 |
| 10  | 18  | 10                      | 100                             | 10                       | 50                        | 83                       | 0,648468                                 |
| 2   | 19  | 10                      | 100                             | 10                       | 10                        | 83                       | 0,464607                                 |
| 40  | 20  | 5,5                     | 200                             | 20                       | 50                        | 95                       | 0,103872                                 |
| 35  | 21  | 5,5                     | 100                             | 20                       | 30                        | 48                       | 0,144094                                 |
| 9   | 22  | 1                       | 100                             | 10                       | 50                        | 83                       | 0,083222                                 |
| 41  | 23  | 5,5                     | 200                             | 20                       | 30                        | 167                      | 0,145397                                 |
| 38  | 24  | 5,5                     | 200                             | 30                       | 30                        | 95                       | 0,070402                                 |
| 17  | 25  | 1                       | 100                             | 10                       | 10                        | 33                       | 0,083199                                 |
| 36  | 26  | 5,5                     | 300                             | 20                       | 30                        | 143                      | 0,105573                                 |
| 12  | 27  | 10                      | 300                             | 10                       | 50                        | 250                      | 0,074078                                 |
| 29  | 28  | 1                       | 100                             | 30                       | 50                        | 33                       | 0,078674                                 |
| 22  | 29  | 10                      | 100                             | 30                       | 10                        | 33                       | 0,071556                                 |
| 1   | 30  | 1                       | 100                             | 10                       | 10                        | 83                       | 0,120296                                 |
| 6   | 31  | 10                      | 100                             | 30                       | 10                        | 83                       | 0,071481                                 |
| 3   | 32  | 1                       | 300                             | 10                       | 10                        | 250                      | 0,082821                                 |
| 7   | 33  | 1                       | 300                             | 30                       | 10                        | 250                      | 0,071225                                 |
| 28  | 34  | 10                      | 300                             | 10                       | 50                        | 100                      | 0,421029                                 |
| 25  | 35  | 1                       | 100                             | 10                       | 50                        | 33                       | 0,085236                                 |
| 15  | 36  | 1                       | 300                             | 30                       | 50                        | 250                      | 0,072305                                 |
| 4   | 37  | 10                      | 300                             | 10                       | 10                        | 250                      | 0,299334                                 |
| 19  | 38  | 1                       | 300                             | 10                       | 10                        | 100                      | 0,07427                                  |
| 30  | 39  | 10                      | 100                             | 30                       | 50                        | 33                       | 0,131392                                 |
| 16  | 40  | 10                      | 300                             | 30                       | 50                        | 250                      | 0,091934                                 |
| 23  | 41  | 1                       | 300                             | 30                       | 10                        | 100                      | 0,0717777                                |
| 14  | 42  | 10                      | 100                             | 30                       | 50                        | 83                       | 0,087203                                 |
| 24  | 43  | 10                      | 300                             | 30                       | 10                        | 100                      | 0,071792                                 |

Uzorak korišten u simulaciji ima toplinsku vodljivost  $\lambda = 0.007$  W/mK, a iz tablice 6.2 se primjećuje više pokusa koji daju proračunsku vodljivost s greškom manjom od 0.005 W/mK.

U nastavku su prikazani dijagrami koji su dobiveni pomoću programa Design Expert, a prikazuju utjecaj svih veličina izabranih kao glavne konstrukcijske mjere.

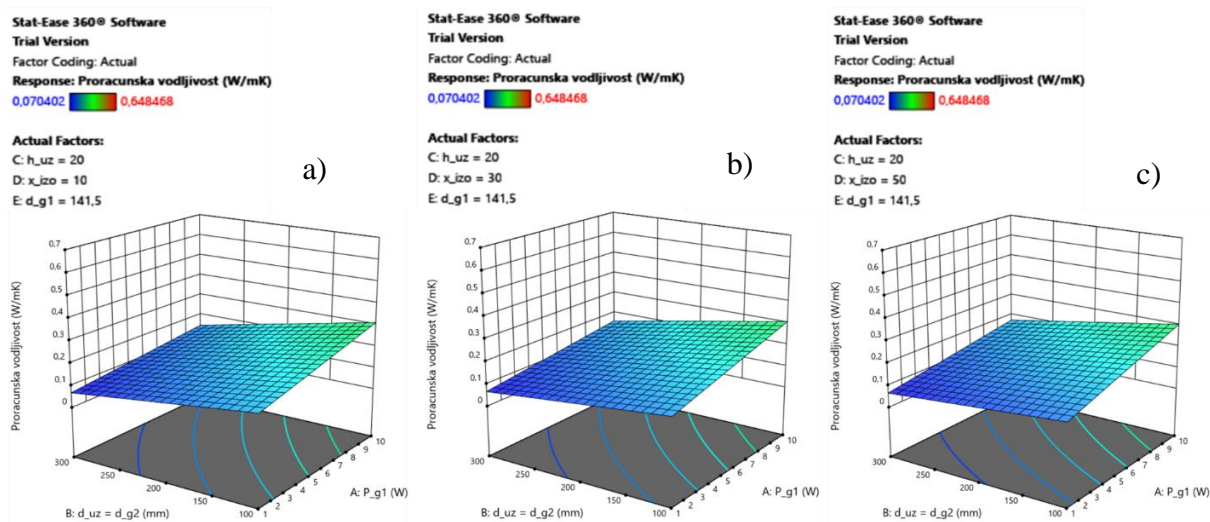
Na slici 6.4 prikazani su dijagrami s osima promjer uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ) i snaga primarnog grijača (A:  $P_{g1}$ ). Mijenjana je vrijednost visine uzorka (C:  $h_{uz}$ ) i to za vrijednosti  $h_{uz} = 10$  mm (dijagram a),  $h_{uz} = 20$  mm (dijagram b) i  $h_{uz} = 30$  mm (dijagram c).



Slika 6.4 – Utjecaj promjene visine uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i debljinu izolacije 30 mm.

Povećanjem visine uzorka smanjuje se utjecaj snage primarnog grijača i promjera uzorka na dobiveni rezultat proračunske toplinske vodljivosti. Također, uočava se da se za slučaj manjih visina uzorka ( $h_{uz} = 10$  mm) smanjenjem promjera uzorka  $d_{g2}$  i povećanjem snage primarnog grijača  $P_{g1}$  smanjuje preciznost proračuna toplinske vodljivosti. Za manje visine uzorka  $h_{uz}$  snaga primarnog grijača  $P_{g1}$  bi trebala biti manja, a promjer uzorka  $d_{g2}$  veći. Najprecizniji rezultati se dobivaju za visinu uzorka  $h_{uz} = 30$  mm i promjer uzorka  $d_{g2} = 300$  mm sa zanemarivim utjecajem snage grijača  $P_{g1}$ .

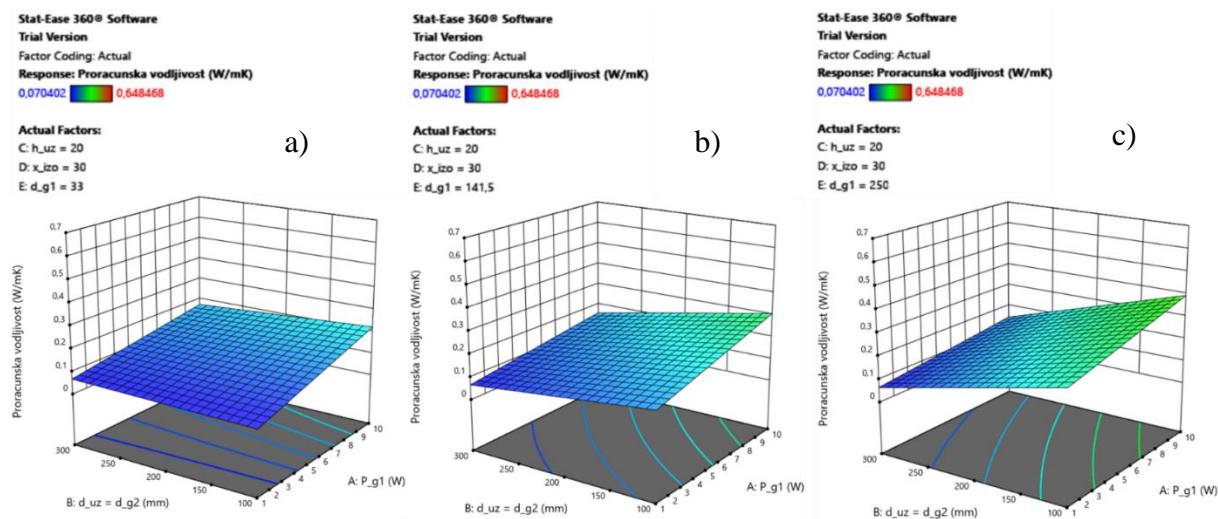
Na slici 6.5 prikazani su dijagrami s osima promjer uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ) i snaga primarnog grijača (A:  $P_{g1}$ ). Mijenjana je vrijednost debljine izolacije (D:  $x_{izo}$ ) i to za vrijednosti  $x_{izo} = 10$  mm (dijagram a),  $x_{izo} = 30$  mm (dijagram b) i  $x_{izo} = 50$  mm (dijagram c).



Slika 6.5 – Utjecaj promjene debljine izolacije na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i visine uzorka 20 mm.

Povećavanjem debljine izolacije  $x_{izo}$  do vrijednosti  $x_{izo} = 50$  mm nema nikakvog utjecaja na proračunsku toplinsku vodljivost. Najprecizniji rezultati se dobivaju za snagu primarnog grijača  $P_{g1} = 1$  W i promjer uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm.

Na slici 6.6 prikazani su dijagrami s osima promjer uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ) i snaga primarnog grijača (A:  $P_{g1}$ ). Mijenjana je vrijednost promjera primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ) i to za vrijednosti  $d_{g1} = 33$  mm (dijagram a),  $d_{g1} = 145.5$  mm (dijagram b) i  $d_{g1} = 250$  mm (dijagram c).

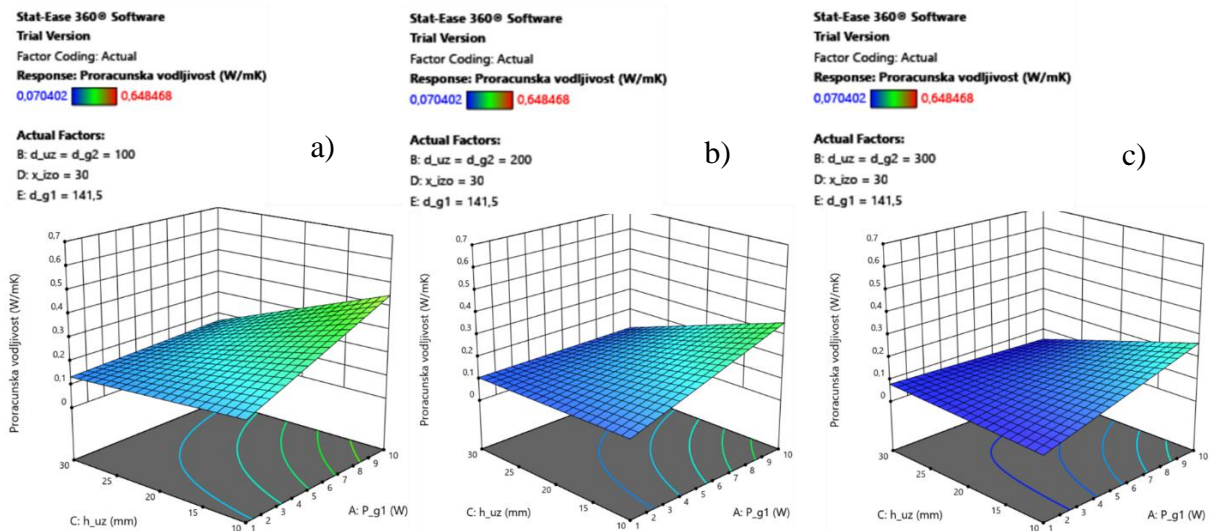


Slika 6.6 – Utjecaj promjene promjera primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa debljinom izolacije 30 mm i visine uzorka 20 mm.

Povećavanjem promjera primarnog grijača negativno se povećava utjecaj promjera uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost. Za manje promjere primarnog grijača ( $d_{g1} = 33$  mm), srednje ( $d_{g1} = 141.5$  mm) i veće ( $d_{g1} = 250$ ) povećavanjem snage primarnog grijača  $P_{g1}$  smanjuje se preciznost proračunske toplinske vodljivosti. Najprecizniji rezultati se dobivaju za promjer uzorka  $d_{uz} = 300$  mm i snagu primarnog grijača  $P_{g1} = 1$  W za sve tri vrijednosti promjera primarnog grijača  $d_{g1}$ .



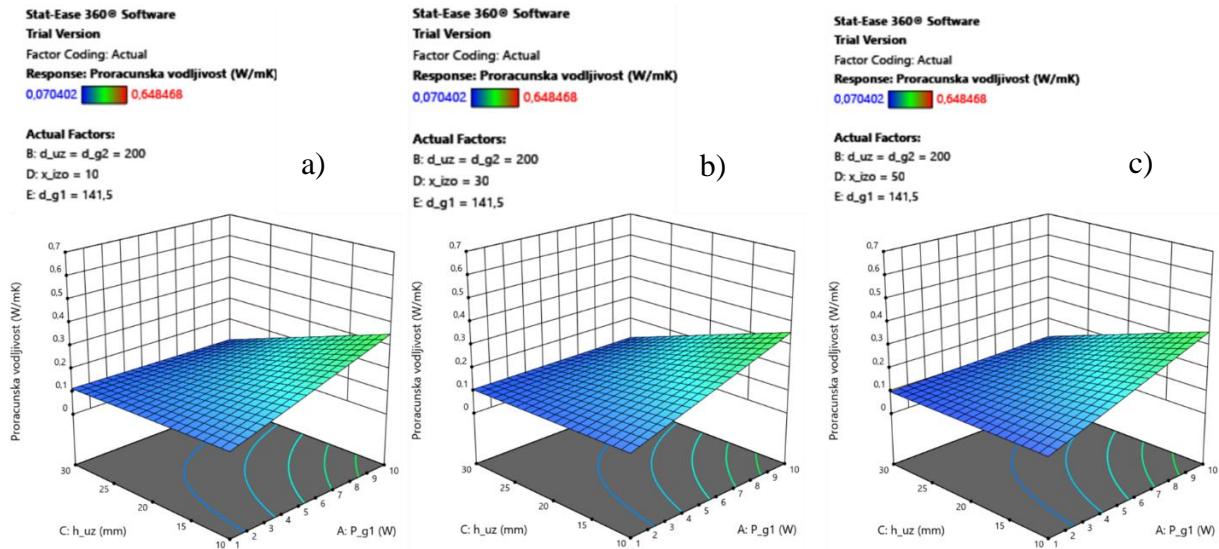
Na slici 6.7 prikazani su dijagrami s osima visina uzorka (C:  $h_{uz}$ ) i snaga primarnog grijača (A:  $P_{g1}$ ). Mijenjana je vrijednost promjera uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ) i to za vrijednosti  $d_{uz} = d_{g2} = 100$  mm (dijagram a),  $d_{uz} = d_{g2} = 200$  mm (dijagram b) i  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm (dijagram c).



Slika 6.7 – Utjecaj promjene promjera uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i debljine izolacije 30 mm.

Povećavanjem promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  smanjuje se utjecaj visine uzorka i snage primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost. Za sva tri slučaja povećanjem snage primarnog grijača  $P_{g1}$  i smanjenjem visine uzorka  $h_{uz}$  smanjuje se preciznost proračunske toplinske vodljivosti, što je najizraženije za slučaj manjih promjera uzorka ( $d_{uz} = d_{g2} = 100$  mm). Najprecizniji rezultati se dobivaju za promjer uzorka  $d_{uz} = 300$  mm, snagu grijača  $P_{g1} = 1$  W i visinu uzorka  $h_{uz} = 30$  mm.

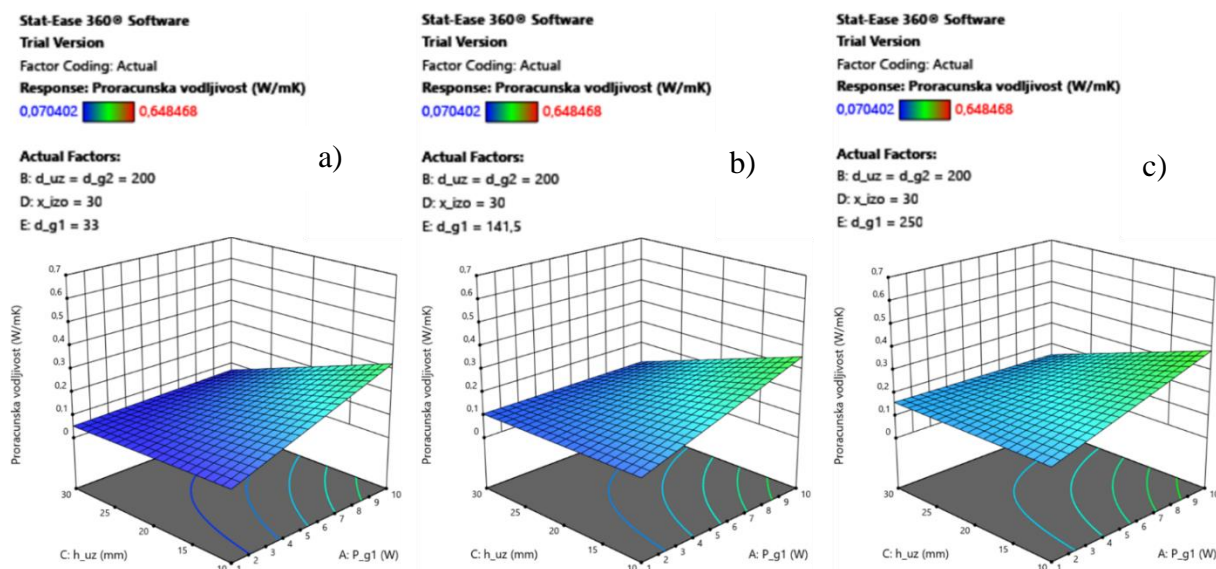
Na slici 6.8 prikazani su dijagrami s osima visina uzorka (C:  $h_{uz}$ ) i snaga primarnog grijača (A:  $P_{g1}$ ). Mijenjana je vrijednost debljine izolacije (D:  $x_{izo}$ ) i to za vrijednosti  $x_{izo} = 10$  mm (dijagram a),  $x_{izo} = 30$  mm (dijagram b) i  $x_{izo} = 50$  mm (dijagram c).



Slika 6.8 - Utjecaj promjene debljine izolacije na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i promjerom uzorka 200 mm.

Povećavanjem debljine izolacije  $x_{izo}$  ne mijenja se utjecaj visine uzorka  $h_{uz}$  i snage primarnog grijača  $P_{g1}$ . Najprecizniji rezultat proračunske toplinske vodljivosti za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača  $d_{g1} = 141,5$  mm i promjerom uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 200$  mm dobije se za visinu uzorka  $h_{uz} = 30$  mm i snagu primarnog grijača  $P_{g1} = 1$  W za sva tri prikazane debljine izolacije.

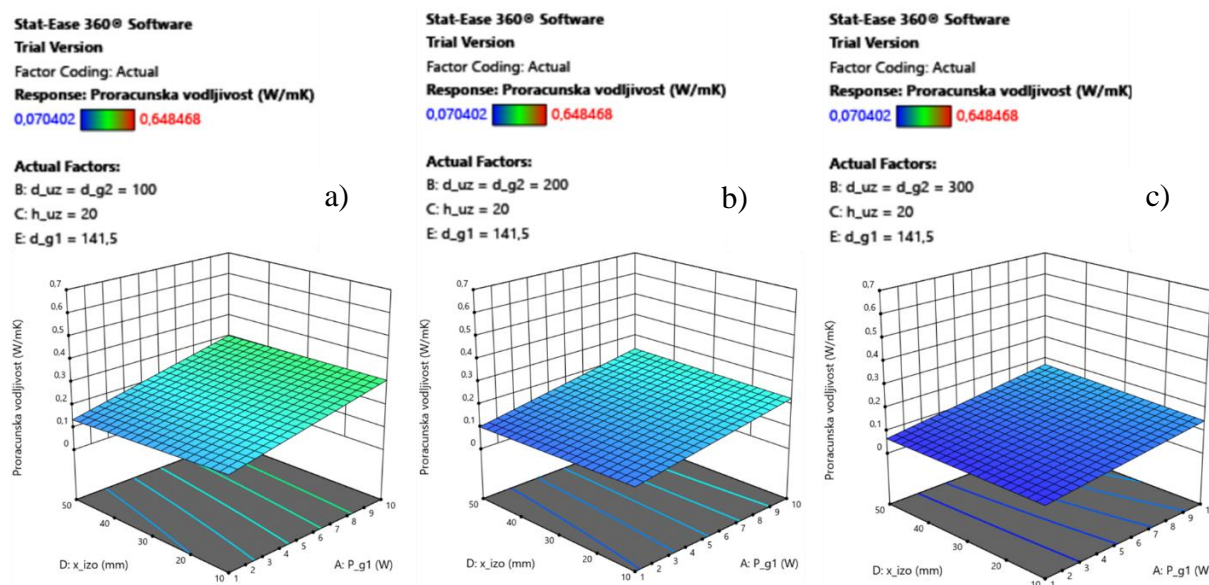
Na slici 6.9 prikazani su dijagrami s osima visina uzorka (C:  $h_{uz}$ ) i snaga primarnog grijača (A:  $P_{g1}$ ). Mijenjana je vrijednost promjera primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ) i to za vrijednosti  $d_{g1} = 33$  mm (dijagram a),  $d_{g1} = 141.5$  mm (dijagram b) i  $d_{g1} = 250$  mm (dijagram c).



Slika 6.9 – Utjecaj promjene promjera primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom uzorka 200 mm i debljine izolacije 30 mm.

Povećanjem promjera primarnog grijača  $d_{g1}$  primjećuje se da se površina dijagrama paralelno podiže prema gore udaljavajući se od stvarne vrijednosti toplinske vodljivosti. Primjećuje se da se povećanjem snage primarnog grijača  $P_{g1}$  za sva tri slučaja, negativno utječe na proračunsku toplinsku vodljivost za manje visine uzorka  $h_{uz}$ . Najprecizniji rezultati dobivaju se za promjer primarnog grijača  $d_{g1} = 33$  mm kad je visina uzorka  $h_{uz} = 30$  mm i snaga grijača  $P_{g1} = 10$  W.

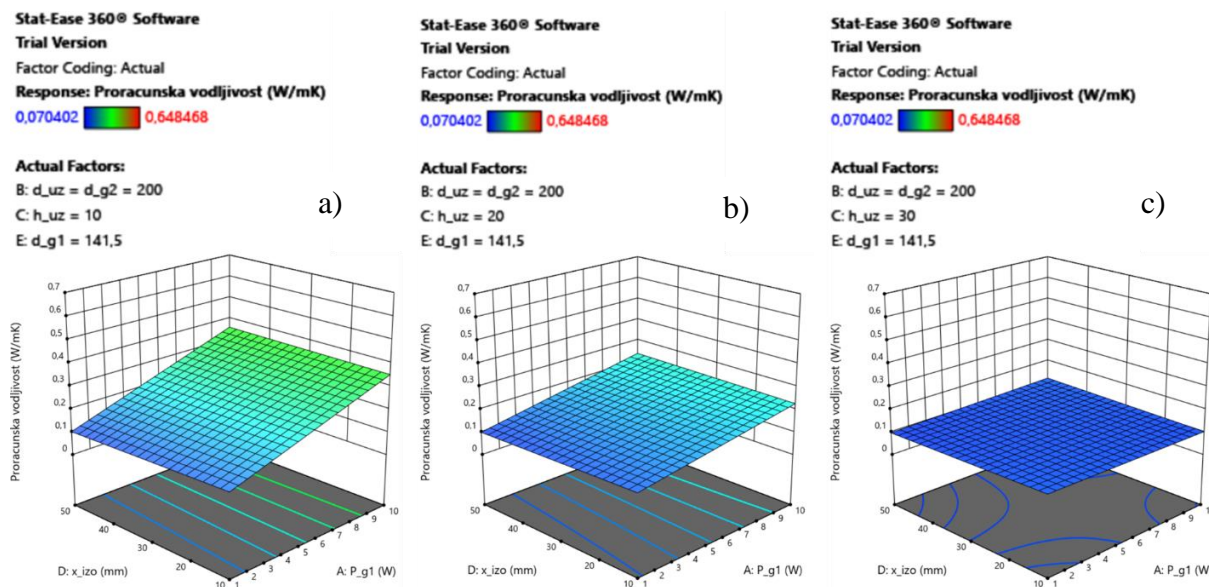
Na slici 6.10 prikazani su dijagrami s osima debljina izolacije ( $D: x_{izo}$ ) i snaga primarnog grijača ( $A: P_{g1}$ ). Mijenjana je vrijednost promjera uzorka ( $B: d_{uz} = d_{g2}$ ) i to za vrijednosti  $d_{uz} = d_{g2} = 100$  mm (dijagram a),  $d_{uz} = d_{g2} = 200$  mm (dijagram b) i  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm (dijagram c).



Slika 6.10 – Utjecaj promjene promjera uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i visine uzorka 20 mm.

Povećanjem promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  smanjuje se utjecaj snage primarnog grijača  $P_{g1}$  i debljine izolacije  $x_{izo}$  na dobiveni rezultat proračunske vodljivosti. Primjećuje se da se za veće vrijednosti promjera uzorka ( $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm) dobivaju precizniji rezultati nego za manje ( $d_{uz} = d_{g2} = 100$  mm). Najprecizniji rezultati se dobivaju za promjer uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm i manje snage primarnog grijača  $P_{g1}$  sa zanemarivim utjecajem debljine izolacije  $x_{izo}$ .

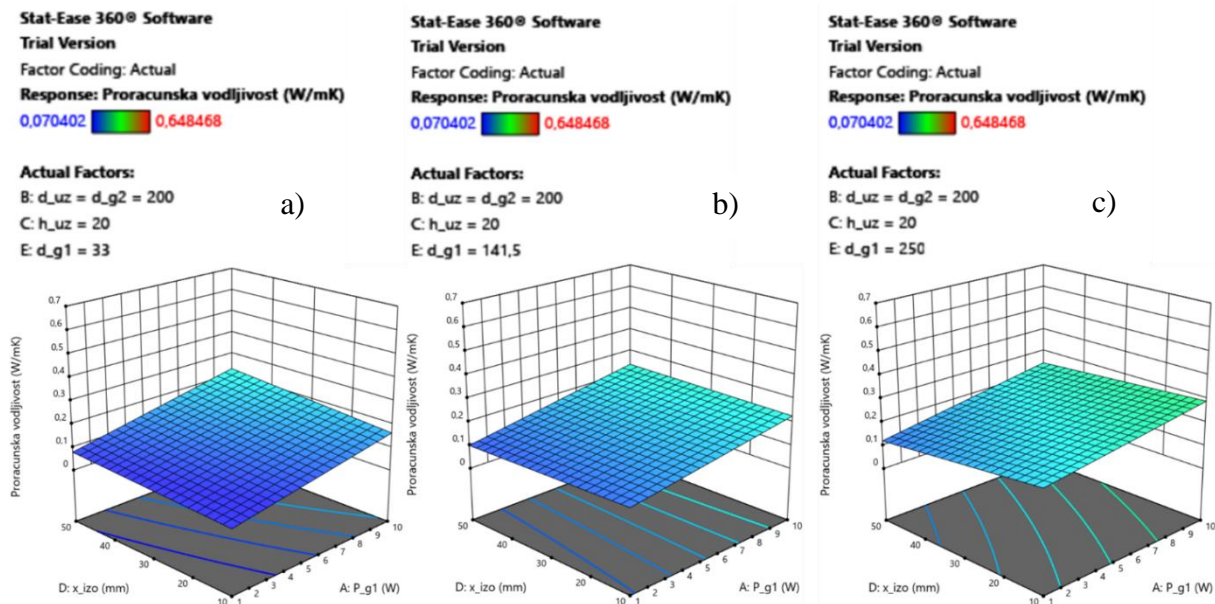
Na slici 6.11 prikazani su dijagrami s osima debljina izolacije ( $D: x_{izo}$ ) i snaga primarnog grijača ( $A: P_{g1}$ ). Mijenjana je vrijednost visine uzorka ( $C: h_{uz}$ ) i to za vrijednosti  $h_{uz} = 10$  mm (dijagram a),  $h_{uz} = 20$  mm (dijagram b) i  $h_{uz} = 30$  mm (dijagram c).



Slika 6.11 – Utjecaj promjene visine uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i promjera uzorka 200 mm.

Povećanjem visine uzorka  $h_{uz}$  znatno se smanjuje utjecaj snage primarnog grijača  $P_{g1}$  na proračunsku toplinsku vodljivost, dok se utjecaj debljine izolacije ne mijenja. Za manje visine uzorka ( $h_{uz} = 10$  mm), povećanjem snage primarnog grijača  $P_{g1}$  smanjuje se preciznost proračunske vodljivosti. Za veće visine uzorka ( $h_{uz} = 30$  mm) preciznost proračunske vodljivosti približno je jednaka za sve snage primarnog grijača  $P_{g1}$ . Najprecizniji rezultati se dobivaju za visinu uzorka  $h_{uz} = 30$  mm, snagu primarnog grijača  $P_{g1} = 1$  W i debljinu izolacije  $x_{izo} = 50$  mm.

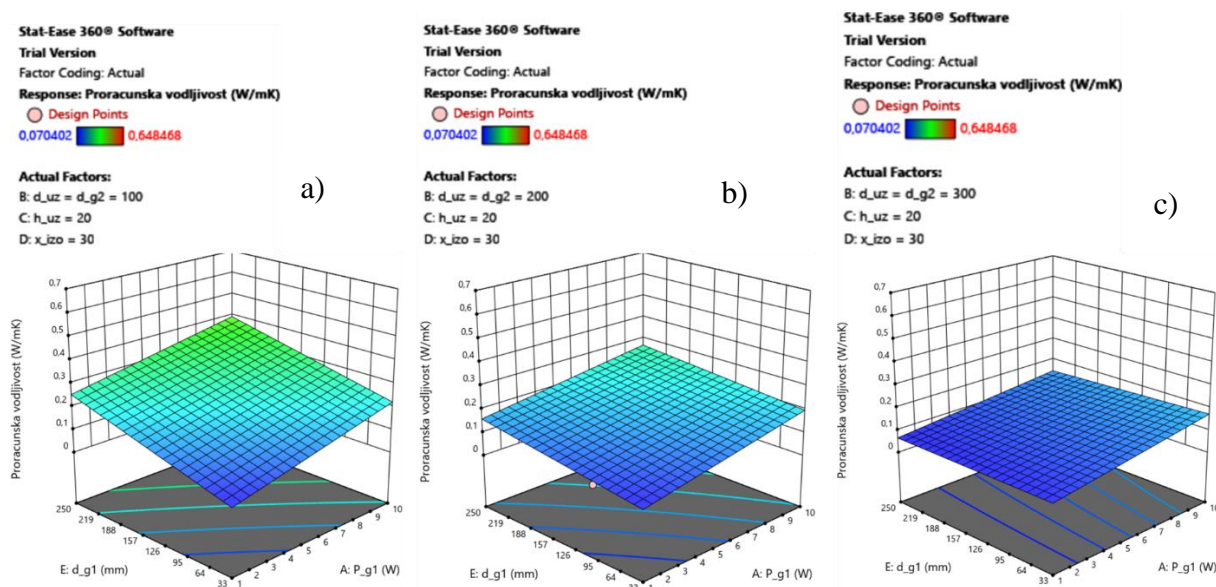
Na slici 6.12 prikazani su dijagrami s osima debljina izolacije ( $D: x_{izo}$ ) i snaga primarnog grijača ( $A: P_{g1}$ ). Mijenjana je vrijednost promjera primarnog grijača ( $E: d_{g1}$ ) i to za vrijednosti  $d_{g1} = 33$  mm (dijagram a),  $d_{g1} = 141.5$  mm (dijagram b) i  $d_{g1} = 250$  mm (dijagram c).



Slika 6.12 – Utjecaj promjene promjera primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom uzorka 200 mm i visine uzorka 20 mm.

Povećavanjem promjera primarnog grijača  $d_{g1}$  povećava se utjecaj debljine izolacije  $x_{izo}$ . Primjećuje se da se za manje promjere primarnog grijača ( $d_{g1} = 33$  mm) povećanjem snage primarnog grijača  $P_{g1}$  i povećavanjem debljine izolacije  $x_{izo}$  smanjuje preciznost proračunske toplinske vodljivosti. Najprecizniji rezultati se dobivaju za promjer primarnog grijača  $d_{g1} = 33$  mm kad je debljina izolacije  $x_{izo} = 50$  mm a snaga primarnog grijača  $P_{g1} = 1$  W.

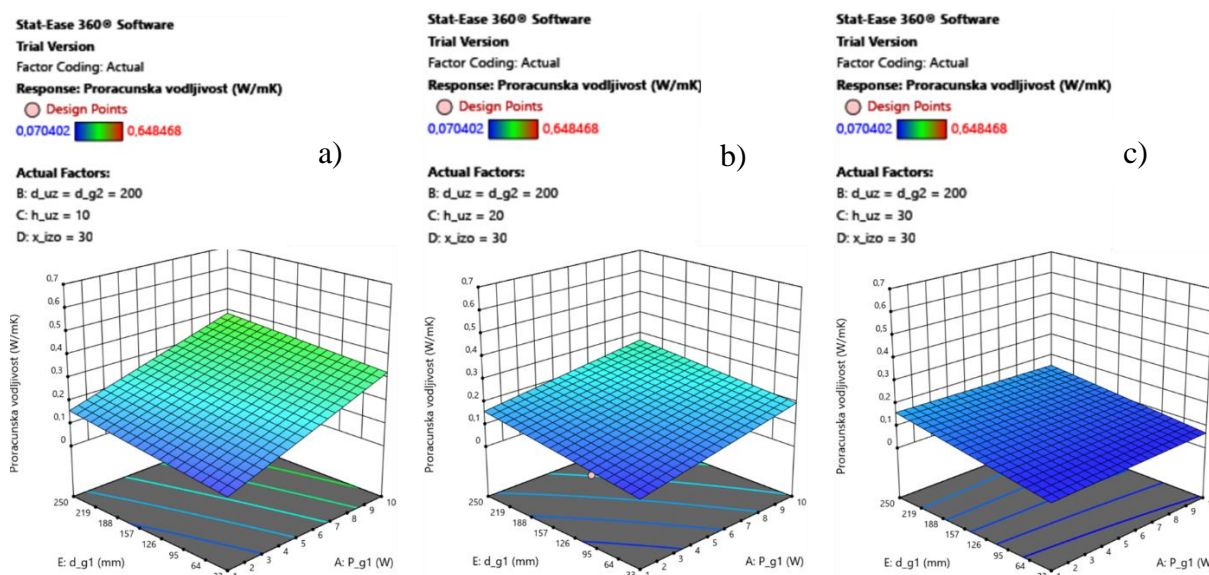
Na slici 6.13 prikazani su dijagrami s osima promjer primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ) i snaga primarnog grijača (A:  $P_{g1}$ ). Mijenjana je vrijednost promjera uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ) i to za vrijednosti  $d_{uz} = d_{g2} = 100$  mm (dijagram a),  $d_{uz} = d_{g2} = 200$  mm (dijagram b) i  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm (dijagram c).



Slika 6.13 – Utjecaj promjene promjera uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa visinom uzorka 20 mm i debljinom izolacije 30 mm.

Povećavanjem promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  smanjuje se utjecaj promjera primarnog grijača  $d_{g1}$  i snage primarnog grijača  $P_{g1}$  na dobiveni rezultat proračunske toplinske vodljivosti. Uočava se da se za slučaj manjih promjera uzorka ( $d_{uz} = d_{g2} = 100$  mm) povećanjem promjera primarnog grijača  $d_{g1}$  i povećanjem snage primarnog grijača  $P_{g1}$  smanjuje preciznost proračunske toplinske vodljivosti. Za manje promjere uzorka ( $d_{uz} = d_{g2} = 100$  mm) snaga primarnog grijača  $P_{g1}$  i promjer primarnog grijača  $d_{g1}$  bi trebali biti manji. Za veće promjere uzorka ( $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm) potrebno je da je samo snaga primarnog grijača  $P_{g1}$  manja. Najprecizniji rezultati se dobivaju za promjer uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm i snagu grijača  $P_{g1} = 1$  W.

Na slici 6.14 prikazani su dijagrami s osima promjer primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ) i snaga primarnog grijača (A:  $P_{g1}$ ). Mijenjana je vrijednost visine uzorka (C:  $h_{uz}$ ) i to za vrijednosti  $h_{uz} = 10$  mm (dijagram a),  $h_{uz} = 20$  mm (dijagram b) i  $h_{uz} = 30$  mm (dijagram c).

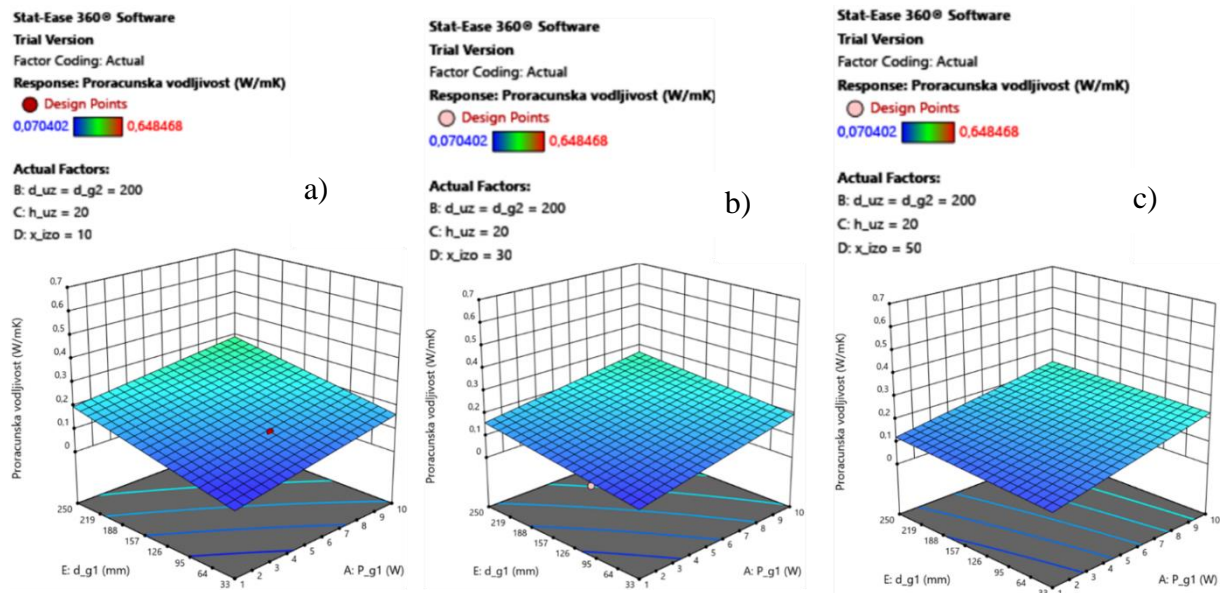


Slika 6.14 - Utjecaj promjene visine uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom uzorka 200 mm i debljinom izolacije 30 mm.

Povećanjem visine uzorka  $h_{uz}$  smanjuje se utjecaj snage primarnog grijača  $P_{g1}$ . Za manje visine uzorka ( $h_{uz} = 10$  mm) snaga primarnog grijača  $P_{g1}$  bi trebala biti manja dok za slučaj većih visina uzorka ( $h_{uz} = 30$  mm) snaga primarnog grijača  $P_{g1}$  može biti i veća. Kod oba slučaja promjer primarnog grijača  $d_{g1}$  bi trebao biti manji. Najprecizniji rezultati dobivaju se za visinu uzorka  $h_{uz} = 30$  mm i promjer primarnog grijača  $d_{g1} = 33$  mm.



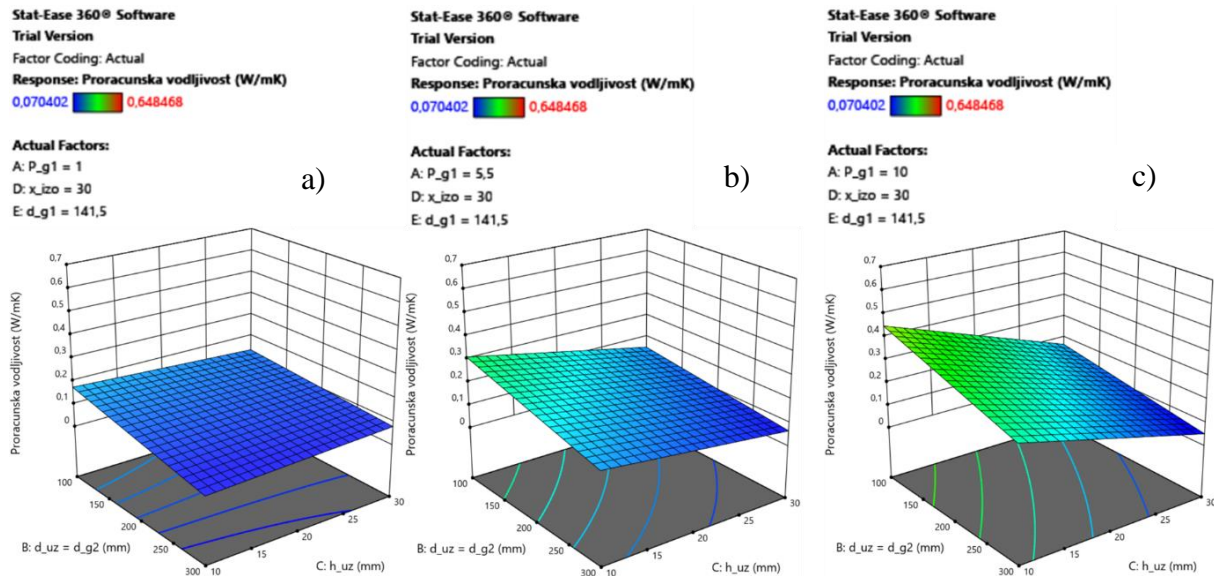
Na slici 6.15 prikazani su dijagrami s osima promjer primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ) i snaga primarnog grijača (A:  $P_{g1}$ ). Mijenjana je vrijednost debljine izolacije (D:  $x_{izo}$ ) i to za vrijednosti  $x_{izo} = 10$  mm (dijagram a),  $x_{izo} = 30$  mm (dijagram b) i  $x_{izo} = 50$  mm (dijagram c).



Slika 6.15 - Utjecaj promjene debljine izolacije na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom uzorka 200 mm i visine uzorka 20 mm.

Povećanjem debljine izolacije  $x_{izo}$  smanjuje se utjecaj promjera primarnog grijača  $d_{g1}$  na rezultate proračunske toplinske vodljivosti. Također se povećanjem debljine izolacije  $x_{izo}$  smanjuje preciznost rezultata proračunske toplinske vodljivosti za veće snage primarnog grijača  $P_{g1}$ .

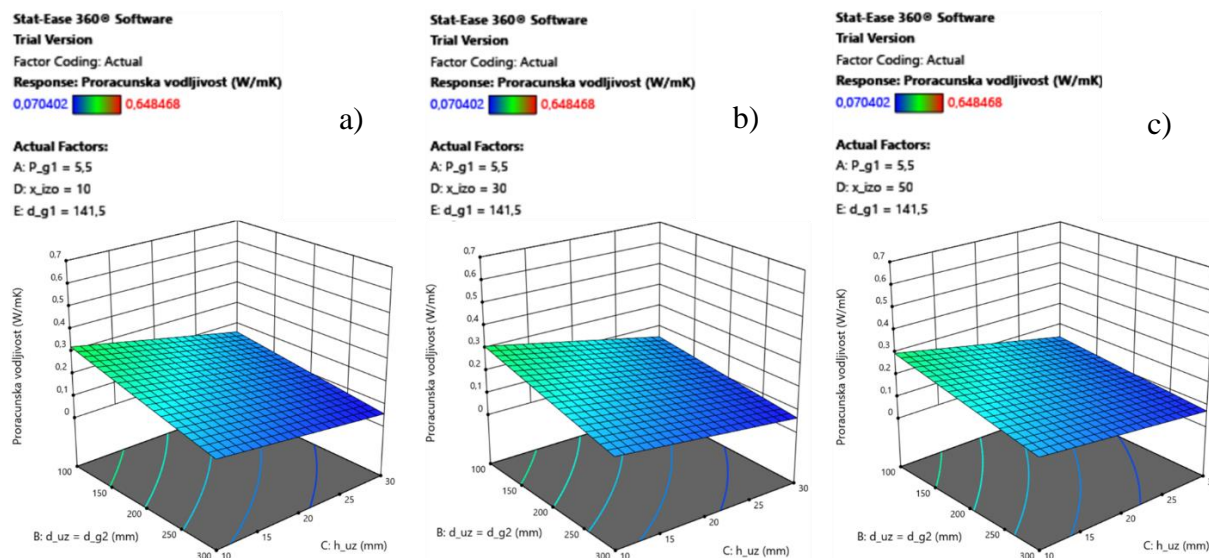
Na slici 6.16 prikazani su dijagrami s osima promjer uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ) i visina uzorka (C:  $h_{uz}$ ). Mijenjana je vrijednost snage primarnog grijača (A:  $P_{g1}$ ) i to za vrijednosti  $P_{g1} = 1$  W (dijagram a),  $P_{g1} = 5.5$  W (dijagram b) i  $P_{g1} = 10$  W (dijagram c).



Slika 6.16 – Utjecaj promjene snage primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i debljinom izolacije 30 mm.

Povećavanjem snage primarnog grijača  $P_{g1}$  povećava se utjecaj promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  i visine uzorka  $h_{uz}$  na rezultat proračunske toplinske vodljivosti. Za veće snage primarnog grijača ( $P_{g1} = 10$  W) promjer uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  i visina uzorka  $h_{uz}$  bi trebali biti veći. Dok za manje snage primarnog grijača ( $P_{g1} = 1$  W) bi promjer uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  trebao biti veći a visina uzorka nema velikog utjecaja  $h_{uz}$ .

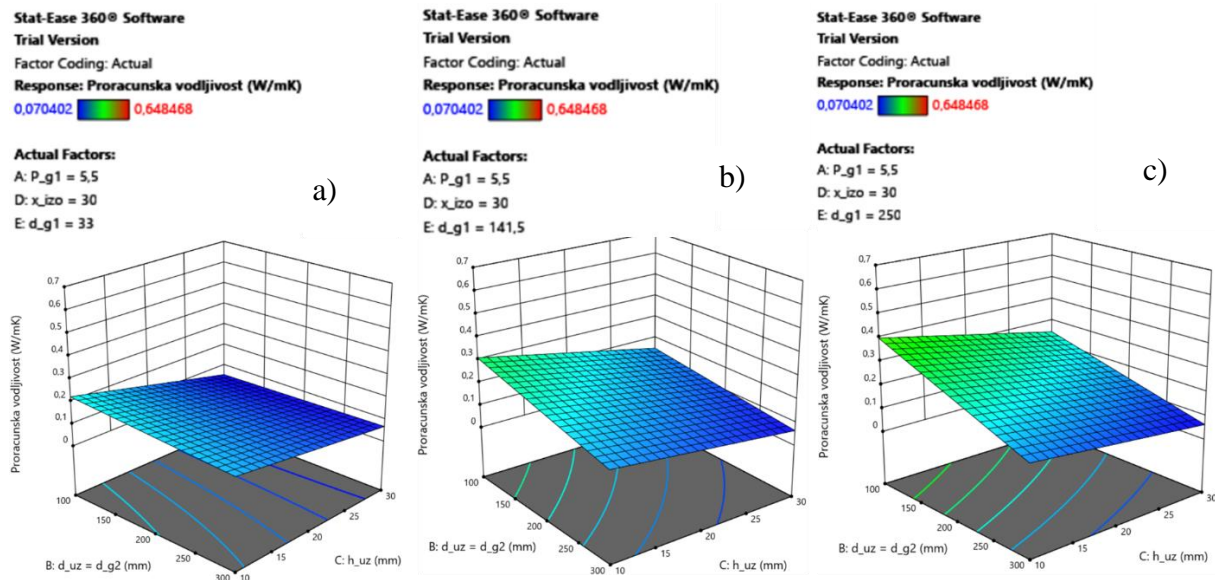
Na slici 6.17 prikazani su dijagrami s osima promjer uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ) i visina uzorka (C:  $h_{uz}$ ). Mijenjana je vrijednost debljine izolacije (D:  $x_{izo}$ ) i to za vrijednosti  $x_{izo} = 10$  mm (dijagram a),  $x_{izo} = 30$  mm (dijagram b) i  $x_{izo} = 50$  mm (dijagram c).



Slika 6.17 – Utjecaj promjene debljine izolacije na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i snagom primarnog grijača 5.5 W.

Povećavanjem debljine izolacije  $x_{izo}$  ne mijenja se utjecaj promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  i visine uzorka  $h_{uz}$  na dobiveni rezultat proračunske vodljivosti. Za sva tri slučaja preciznost proračunske toplinske vodljivosti se smanjuje smanjenjem promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  i visine uzorka  $h_{uz}$ . Najprecizniji rezultati se dobivaju za promjer uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm i visine  $h_{uz} = 30$  mm za sva tri slučaja debljine izolacije  $x_{izo}$ .

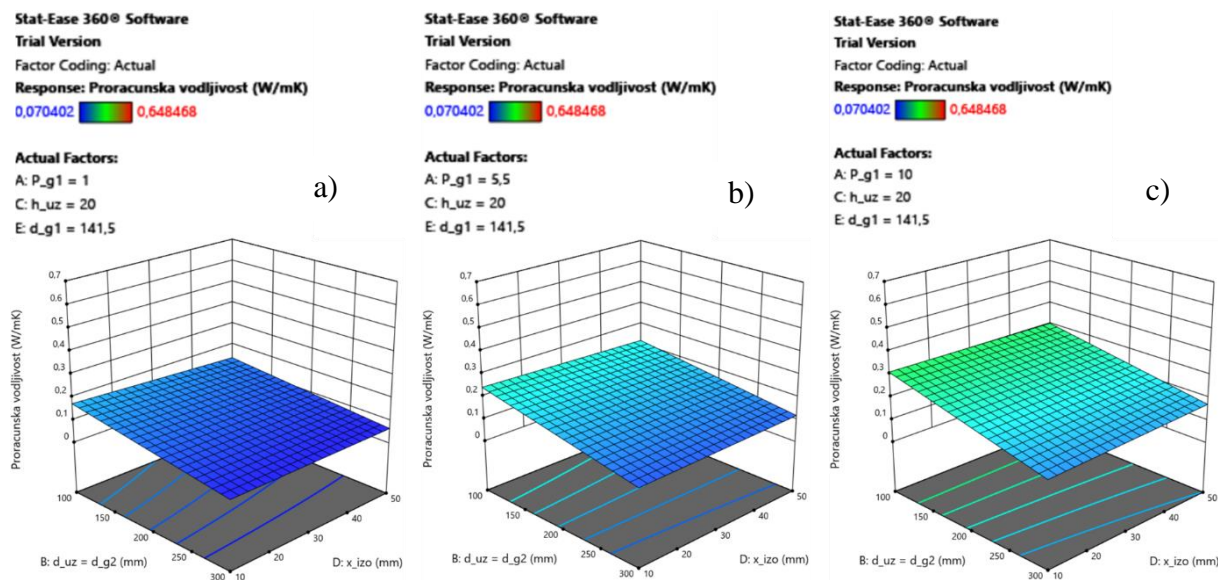
Na slici 6.18 prikazani su dijagrami s osima promjer uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ) i visina uzorka (C:  $h_{uz}$ ). Mijenjana je vrijednost promjera primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ) i to za vrijednosti  $d_{g1} = 33$  mm (dijagram a),  $d_{g1} = 141.5$  mm (dijagram b) i  $d_{g1} = 250$  mm (dijagram c).



Slika 6.18 – Utjecaj promjene promjera primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa debljinom izolacije 30 mm i snagom primarnog grijača 5.5 W.

Povećanjem promjera primarnog grijača  $d_{g1}$  povećava se utjecaj promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  dok utjecaj visine uzorka  $h_{uz}$  ostaje isti. Za manje promjere primarnog grijača ( $d_{g1} = 33$  mm) najprecizniji rezultati proračunske toplinske vodljivosti se dobivaju za visinu uzorka  $h_{uz} = 30$  mm sa zanemarivim utjecajem promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$ . kod većih promjera primarnog grijača ( $d_{g1} = 250$  mm) najprecizniji rezultati se dobivaju za visinu uzorka  $h_{uz} = 30$  mm i promjer uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm.

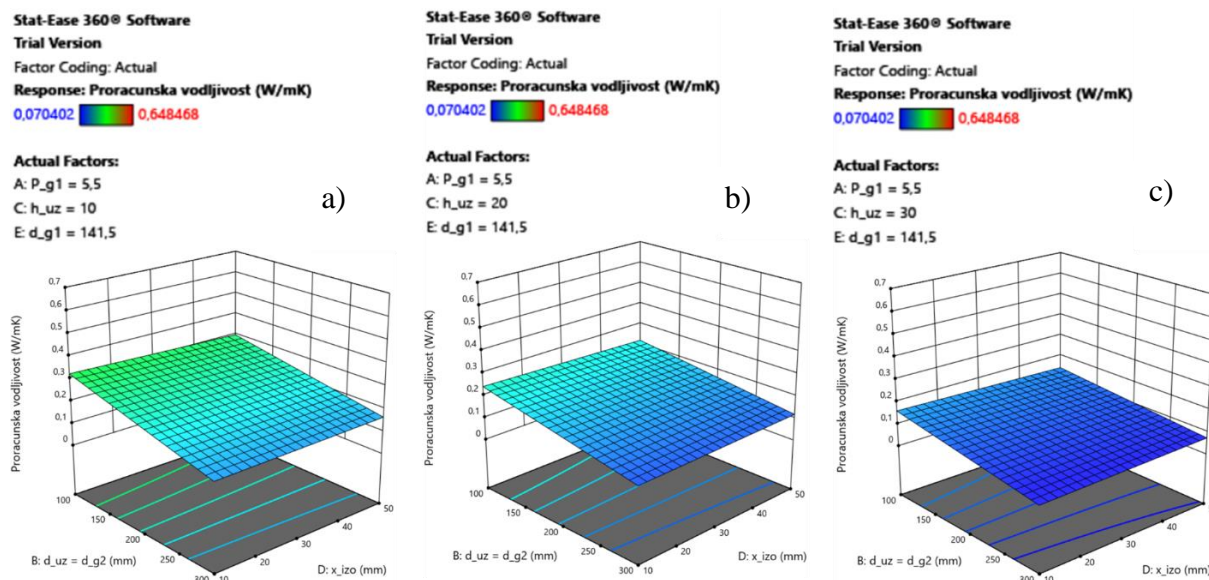
Na slici 6.19 prikazani su dijagrami s osima promjer uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ) i debljina izolacije (D:  $x_{izo}$ ). Mijenjana je vrijednost snage primarnog grijača (A:  $P_{g1}$ ) i to za vrijednosti  $P_{g1} = 1$  W (dijagram a),  $P_{g1} = 5.5$  W (dijagram b) i  $P_{g1} = 10$  W (dijagram c).



Slika 6.19 – Utjecaj promjene snage primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i visine uzorka 20 mm.

Povećavanjem snage primarnog grijača  $P_{g1}$  raste utjecaj promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  na rezultat proračunske toplinske vodljivosti. Povećavanjem promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  za slučaj manjih snaga primarnog grijača ( $P_{g1} = 1$  W) smanjuje se preciznost proračuna toplinske vodljivosti. Najprecizniji rezultati dobivaju se za snagu grijača  $P_{g1} = 1$  W i promjer uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm.

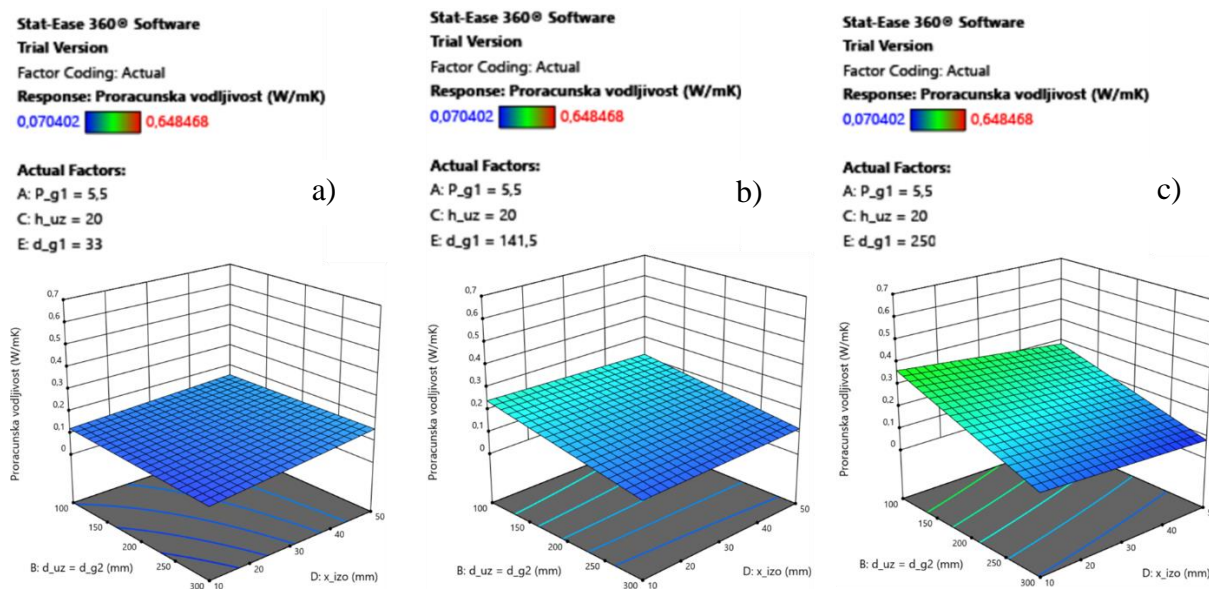
Na slici 6.20 prikazani su dijagrami s osima promjer uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ) i debljina izolacije (D:  $x_{izo}$ ). Mijenjana je vrijednost visine uzorka (C:  $h_{uz}$ ) i to za vrijednosti  $h_{uz} = 10$  mm (dijagram a),  $h_{uz} = 20$  mm (dijagram b) i  $h_{uz} = 30$  mm (dijagram c).



Slika 6.20 – Utjecaj promjene visine uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i snagom primarnog grijača 5.5 W.

Povećavanjem visine uzorka  $h_{uz}$  smanjuje se utjecaj promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  na rezultat proračunske toplinske vodljivosti a utjecaj debljine izolacije  $x_{izo}$  ostaje isti. najprecizniji rezultati se dobivaju za visinu uzorka  $h_{uz} = 30$  mm, promjer uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm i debljina izolacije  $x_{izo} = 50$  mm. Smanjenjem promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  smanjuje se preciznost proračuna toplinske vodljivosti.

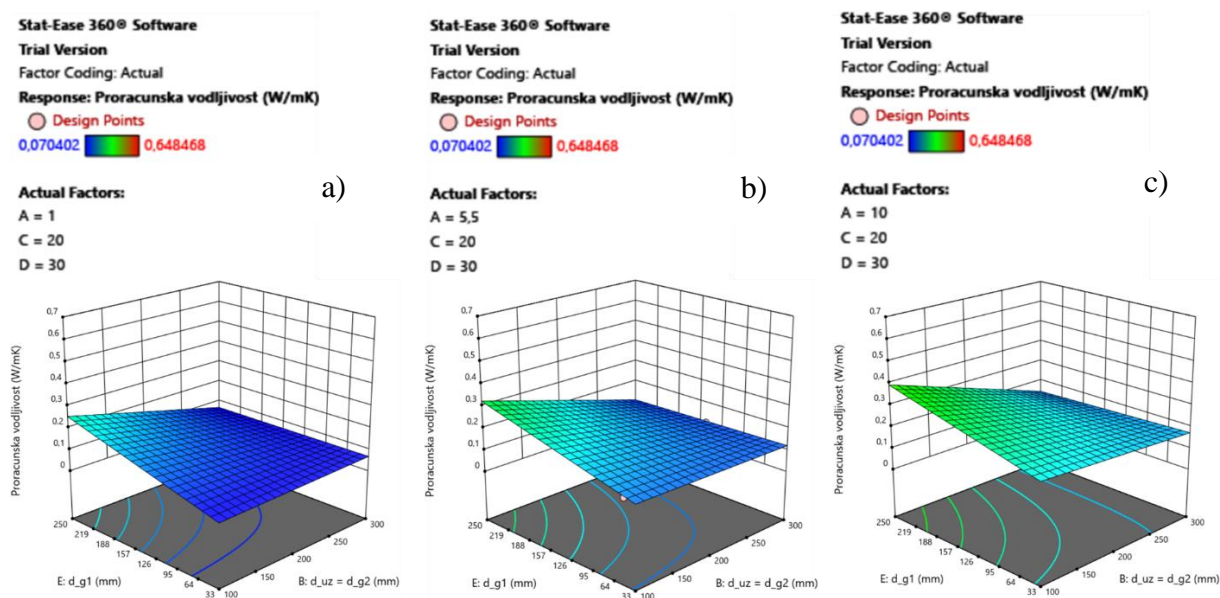
Na slici 6.21 prikazani su dijagrami s osima promjer uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ) i debljina izolacije (D:  $x_{izo}$ ). Mijenjana je vrijednost promjera primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ) i to za vrijednosti  $d_{g1} = 33$  mm (dijagram a),  $d_{g1} = 141.5$  mm (dijagram b) i  $d_{g1} = 250$  mm (dijagram c).



Slika 6.21 – Utjecaj promjene promjera primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa snagom primarnog grijača 5.5 W i visine uzorka 20 mm.

Povećavanjem promjera primarnog grijača  $d_{g1}$  povećava se utjecaj promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  na rezultat proračunske toplinske vodljivosti. Primjećuje se da za slučaj manjih promjera grijača ( $d_{g1} = 33$  mm) najprecizniji rezultat dobiva za vrijednost promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm i debljine izolacije  $x_{izo} = 10$  mm. Dok se u slučaju većih promjera primarnog grijača ( $d_{g1} = 250$  mm) najprecizniji rezultati dobivaju za promjer uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm i debljine izolacije  $x_{izo} = 50$  mm.

Na slici 6.22 prikazani su dijagrami s osima promjer primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ) i promjer uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ). Mijenjana je vrijednost snage primarnog grijača (A:  $P_{g1}$ ) i to za vrijednosti  $P_{g1} = 1$  W (dijagram a),  $P_{g1} = 5.5$  W (dijagram b) i  $P_{g1} = 10$  W (dijagram c).

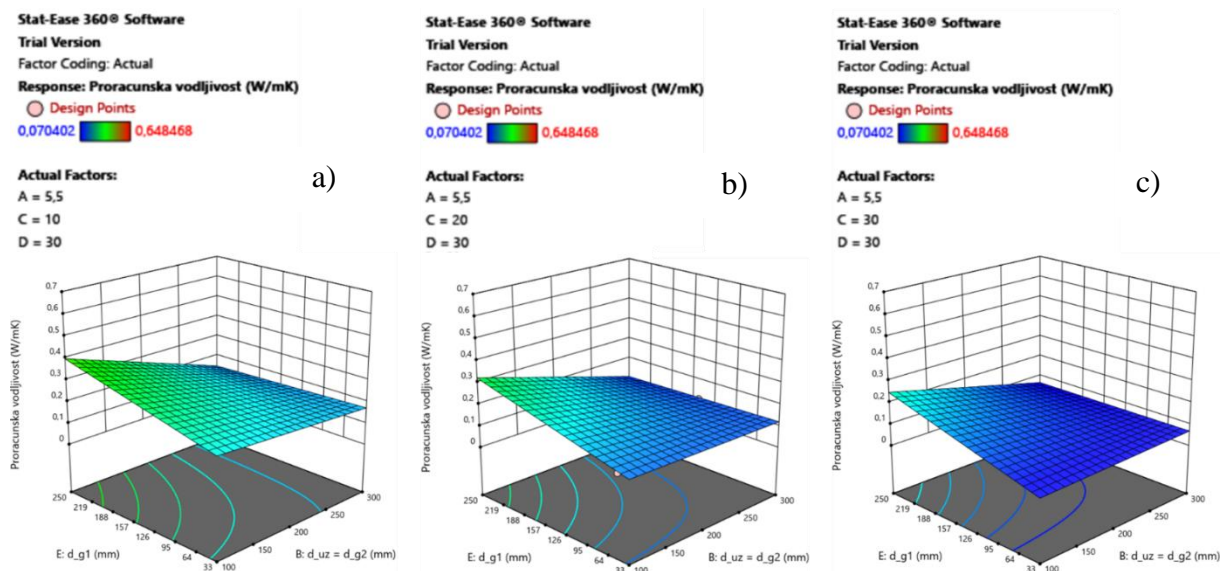


Slika 6.22 – Utjecaj promjene snage primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa visinom uzorka 20 mm i debljinom izolacije 30 mm.

Povećavanjem snage primarnog grijača  $P_{g1}$  smanjuje se preciznost proračuna toplinske vodljivosti za slučaj uređaja sa visinom uzorka  $h_{uz} = 20$  mm i debljine izolacije  $x_{izo} = 30$  mm. Najprecizniji rezultat se dobije za snagu primarnog grijača  $P_{g1} = 1$  W, promjer primarnog grijača  $d_{g1} = 33$  mm i promjer uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm. Povećavanjem promjera primarnog grijača  $d_{g1}$  i smanjenjem promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  smanjuje se preciznost proračuna toplinske vodljivosti.



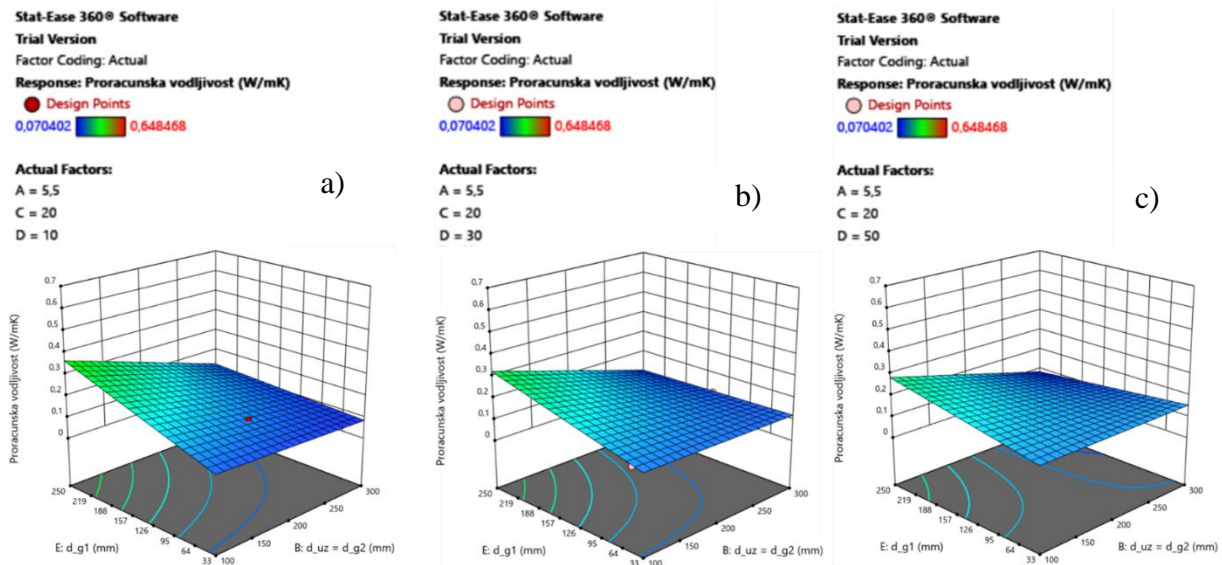
Na slici 6.23 prikazani su dijagrami s osima promjer primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ) i promjer uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ). Mijenjana je vrijednost visine uzorka (C:  $h_{uz}$ ) i to za vrijednosti  $h_{uz} = 10$  mm (dijagram a),  $h_{uz} = 20$  mm (dijagram b) i  $h_{uz} = 30$  mm (dijagram c).



Slika 6.23 – Utjecaj promjene visine uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa snagom primarnog grijača 5.5 W i debljine izolacije 30 mm.

Povećanjem visine uzorka  $h_{uz}$  povećava se preciznost proračuna toplinske vodljivosti. Za manje visine uzorka ( $h_{uz} = 10$  mm) najprecizniji rezultati se dobivaju sa promjerom primarnog grijača  $d_{g1} = 250$  mm i promjerom uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm. U slučaju većih visina uzorka ( $h_{uz} = 30$  mm) najprecizniji rezultati proračunske vodljivosti se dobivaju za promjer primarnog grijača  $d_{g1} = 33$  mm i promjer uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm.

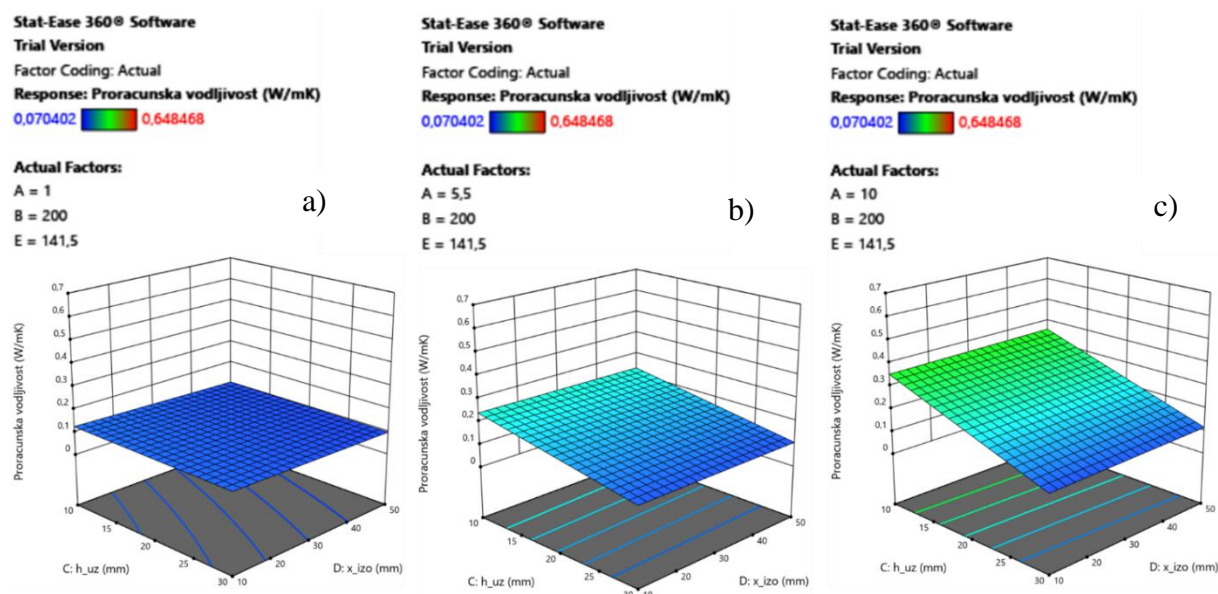
Na slici 6.24 prikazani su dijagrami s osima promjer primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ) i promjer uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ). Mijenjana je vrijednost debljine izolacije (D:  $x_{izo}$ ) i to za vrijednosti  $x_{izo} = 10$  mm (dijagram a),  $x_{izo} = 30$  mm (dijagram b) i  $x_{izo} = 50$  mm (dijagram c).



Slika 6.24 – Utjecaj promjene debljine izolacije na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa snagom primarnog grijača 5.5 W i visine uzorka 20 mm.

Povećavanjem debljine izolacije  $x_{izo}$  smanjuje se utjecaj promjera primarnog grijača  $d_{g1}$  na rezultat proračunske toplinske vodljivosti. Primjećuje se da povećanjem debljine izolacije  $x_{izo}$ , preciznije rezultate proračuna toplinske vodljivosti daju veći promjeri primarnog grijača  $d_{g1}$ . Kod manjih debljina izolacije ( $x_{izo} = 10$  mm) najprecizniji rezultati se dobivaju za promjer primarnog grijača  $d_{g1} = 33$  mm i promjer uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm. Za slučaj većih debljina izolacije ( $x_{izo} = 50$  mm) najprecizniji rezultati se dobivaju za promjer primarnog grijača  $d_{g1} = 250$  mm i promjer uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm.

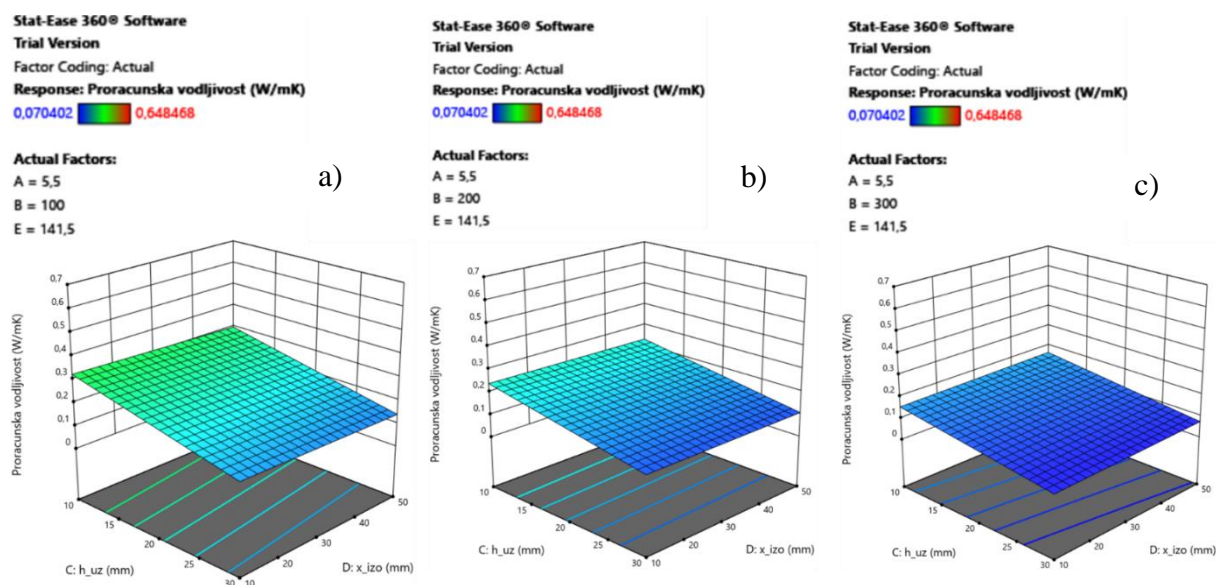
Na slici 6.25 prikazani su dijagrami s osima visina uzorka (C:  $h_{uz}$ ) i debljina izolacije (D:  $x_{izo}$ ). Mijenjana je vrijednost snage primarnog grijača (A:  $P_{gI}$ ) i to za vrijednosti  $P_{gI} = 1$  W (dijagram a),  $P_{gI} = 5.5$  W (dijagram b) i  $P_{gI} = 10$  W (dijagram c).



Slika 6.25 – Utjecaj promjene snage primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i promjerom uzorka 200 mm.

Povećanjem snage primarnog grijača povećava se utjecaj visine uzorka  $h_{uz}$  na dobiveni rezultat proračunske toplinske vodljivosti, a utjecaj debljine izolacije se ne mijenja. Za veće snage primarnog grijača  $P_{gI}$  visina uzorka  $h_{uz}$  bi trebala biti veća. Također se uočava da za manje snage primarnog grijača ( $P_{gI} = 1$  W), visina uzorka  $h_{uz}$  i debljina izolacije  $x_{izo}$  imaju zanemariv utjecaj.

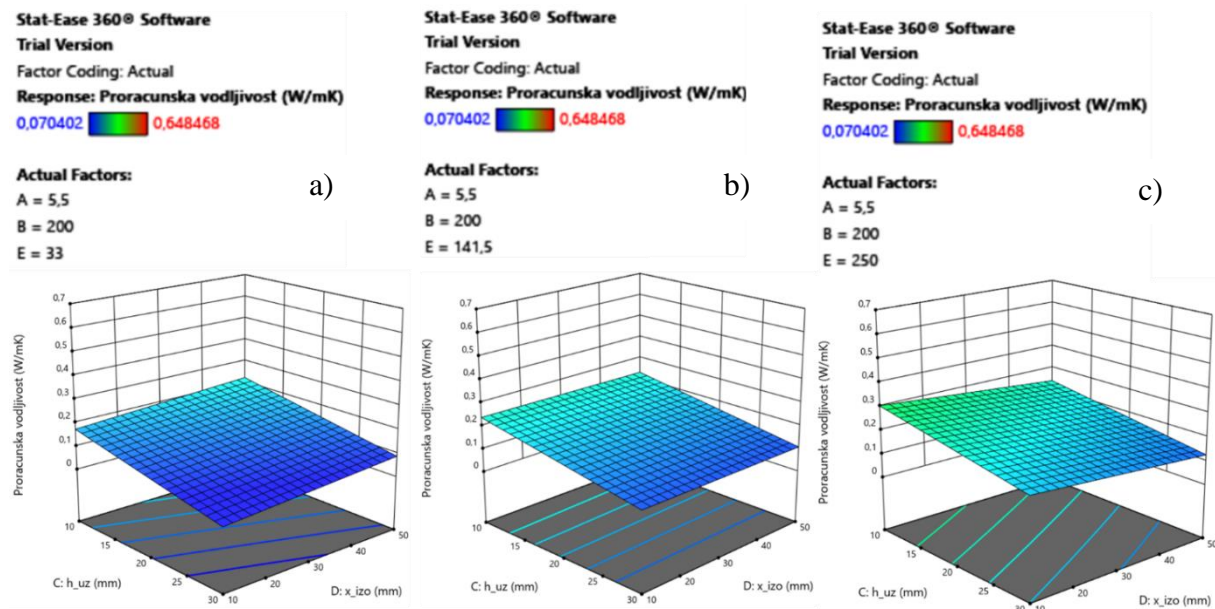
Na slici 6.26 prikazani su dijagrami s osima visina uzorka (C:  $h_{uz}$ ) i debljina izolacije (D:  $x_{izo}$ ). Mijenjana je vrijednost promjera uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ) i to za vrijednosti  $d_{uz} = d_{g2} = 100$  mm (dijagram a),  $d_{uz} = d_{g2} = 200$  mm (dijagram b) i  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm (dijagram c).



Slika 6.26 – Utjecaj promjene promjera uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom primarnog grijača 141,5 mm i snagom primarnog grijača 5.5 W.

Povećanjem promjera uzorka smanjuje se utjecaj visine uzorka  $h_{uz}$  i povećava preciznost proračuna toplinske vodljivosti. Najprecizniji rezultati se dobivaju za slučaj većih promjera uzorka ( $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm) kad je visina uzorka  $h_{uz} = 30$  mm a debljina izolacije  $x_{izo} = 50$  mm. Smanjenjem visine uzorka smanjuje se preciznost proračuna toplinske vodljivosti.

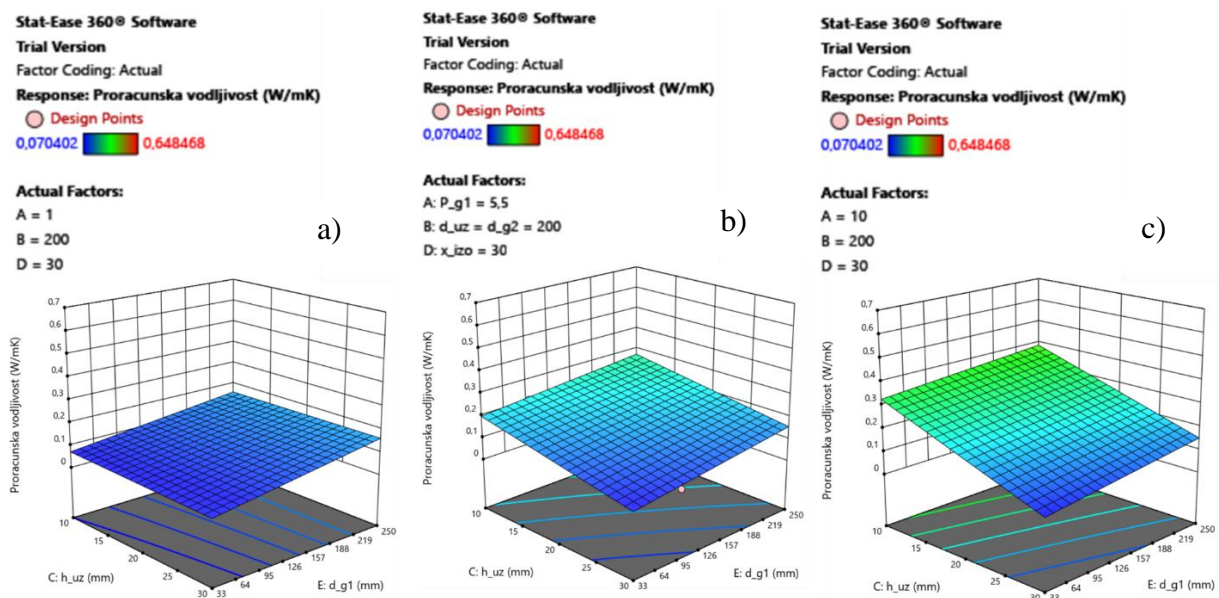
Na slici 6.27 prikazani su dijagrami s osima visina uzorka (C:  $h_{uz}$ ) i debljina izolacije (D:  $x_{izo}$ ). Mijenjana je vrijednost promjera primarnog grijača (E:  $d_{gl}$ ) i to za vrijednosti  $d_{gl} = 33$  mm (dijagram a),  $d_{gl} = 141.5$  mm (dijagram b) i  $d_{gl} = 250$  mm (dijagram c).



Slika 6.27 – Utjecaj promjene promjera primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom uzorka 200 mm i snagom primarnog grijača 5,5 W.

Povećavanjem promjera primarnog grijača  $d_{gl}$  smanjuje se utjecaj visine uzorka  $h_{uz}$  na rezultat proračunske toplinske vodljivosti. Najprecizniji rezultati proračunske vodljivosti dobivaju se za slučaj manjih promjera primarnog grijača ( $d_{gl} = 33$  mm) i to za visinu uzorka  $h_{uz} = 30$  mm i debljinu izolacije  $x_{izo} = 50$  mm. Povećavanjem promjera primarnog grijača  $d_{gl}$  i smanjenjem visine uzorka  $h_{uz}$  smanjuje se preciznost proračunske toplinske vodljivosti.

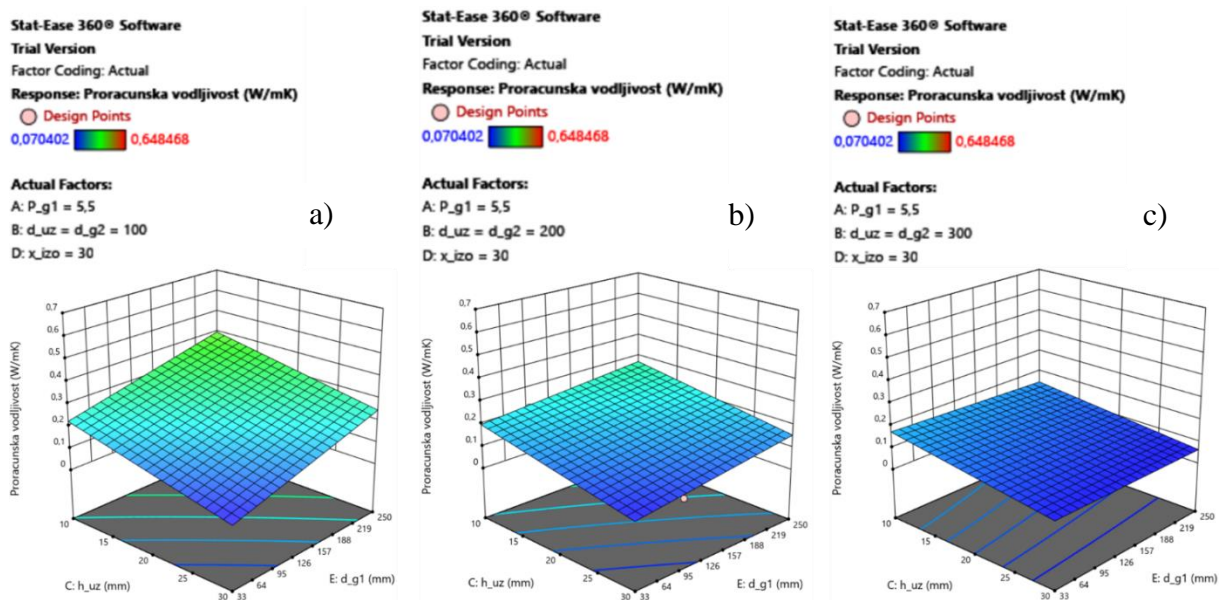
Na slici 6.28 prikazani su dijagrami s osima visina uzorka (C:  $h_{uz}$ ) i promjer primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ). Mijenjana je vrijednost snage primarnog grijača (A:  $P_{g1}$ ) i to za vrijednosti  $P_{g1} = 1$  W (dijagram a),  $P_{g1} = 5.5$  W (dijagram b) i  $P_{g1} = 10$  W (dijagram c).



Slika 6.28 – Utjecaj promjene snage primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom uzorka 200 mm i debljinom izolacije 30 mm.

Povećanjem snage primarnog grijača  $P_{g1}$  povećava se utjecaj visine uzorka  $h_{uz}$  na rezultat proračunske toplinske vodljivosti, a utjecaj promjera primarnog grijača  $d_{g1}$  ostaje isti. Za slučaj manjih snaga primarnog grijača ( $P_{g1} = 1$  W) najprecizniji rezultati se dobivaju za promjer primarnog grijača  $d_{g1} = 33$  mm sa zanemarivim utjecajem visine uzorka  $h_{uz}$ . Povećavanjem promjera primarnog grijača  $d_{g1}$  se smanjuje preciznost proračuna toplinske vodljivosti. Kod većih snaga primarnog grijača ( $P_{g1} = 10$  W) najprecizniji rezultati se dobivaju za promjer primarnog grijača  $d_{g1} = 33$  mm i visinu uzorka  $h_{uz} = 30$  mm, a njihovim povećavanjem se smanjuje preciznost proračuna toplinske vodljivosti.

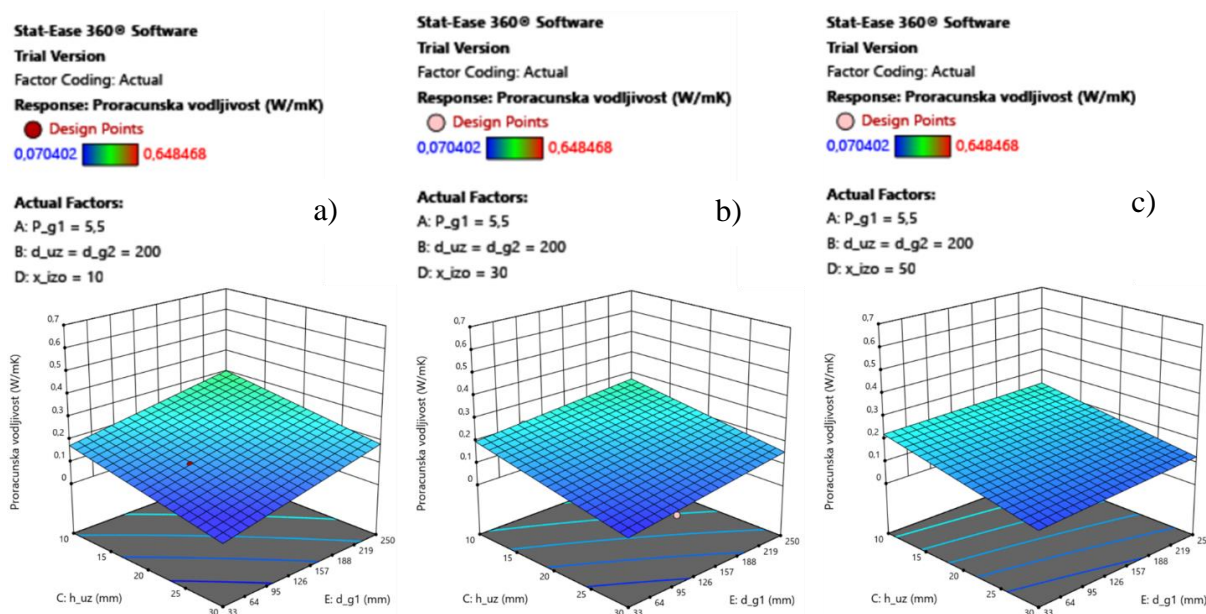
Na slici 6.29 prikazani su dijagrami s osima visina uzorka (C:  $h_{uz}$ ) i promjer primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ). Mijenjana je vrijednost promjera uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ) i to za vrijednosti  $d_{uz} = d_{g2} = 100$  mm (dijagram a),  $d_{uz} = d_{g2} = 200$  mm (dijagram b) i  $d_{uz} = d_{g1} = 300$  mm (dijagram c).



Slika 6.29 – Utjecaj promjene promjera uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa snagom primarnog grijača 5.5 W i debljine izolacije 30 mm.

Povećanjem promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  smanjuje se utjecaj visine uzorka  $h_{uz}$  i promjera primarnog grijača  $d_{g1}$  na rezultat proračunske toplinske vodljivosti. Za slučaj manjih promjera uzorka ( $d_{uz} = d_{g2} = 100$  mm) najprecizniji rezultat se dobiva za visinu uzorka  $h_{uz} = 30$  mm i promjer primarnog grijača  $d_{g1} = 33$  mm. Kod većih promjera uzorka ( $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm) najprecizniji rezultati se dobivaju za visinu uzorka  $h_{uz} = 30$  mm i različite promjere primarnog grijača  $d_{g1}$ .

Na slici 6.30 prikazani su dijagrami s osima visina uzorka (C:  $h_{uz}$ ) i promjer primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ). Mijenjana je vrijednost debljine izolacije (D:  $x_{izo}$ ) i to za vrijednosti  $x_{izo} = 10$  mm (dijagram a),  $x_{izo} = 30$  mm (dijagram b) i  $x_{izo} = 50$  mm (dijagram c).

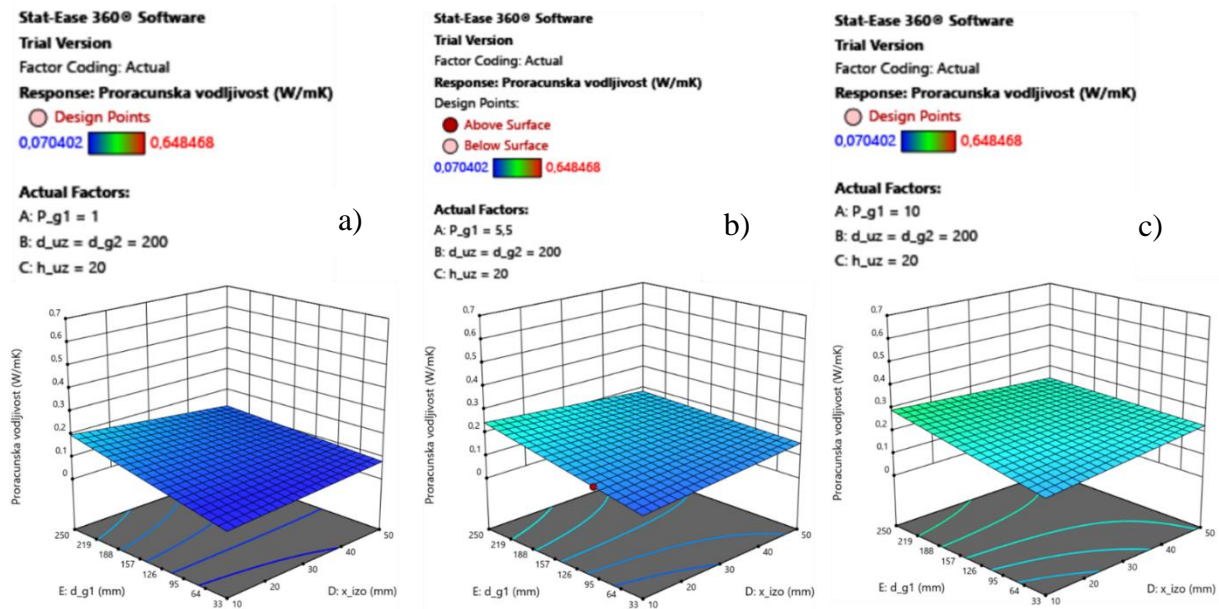


Slika 6.30 – Utjecaj promjene debljine izolacije na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa snagom primarnog grijača 5.5 W i promjerom uzorka 200 mm.

Povećanjem debljine izolacije  $x_{izo}$  povećava se preciznost proračuna toplinske vodljivosti za slučaj većih visina uzorka  $h_{uz}$  i većih promjera primarnog grijača  $d_{g1}$ . U slučaju manjih debljina izolacije ( $x_{izo} = 10$  mm) najprecizniji rezultat se dobiva za visinu uzorka  $h_{uz} = 30$  mm i promjer primarnog grijača  $d_{g1} = 33$  mm. Za veće debljine izolacije ( $x_{izo} = 50$  mm) utjecaj promjera primarnog grijača  $d_{g1}$  je zanemariv.



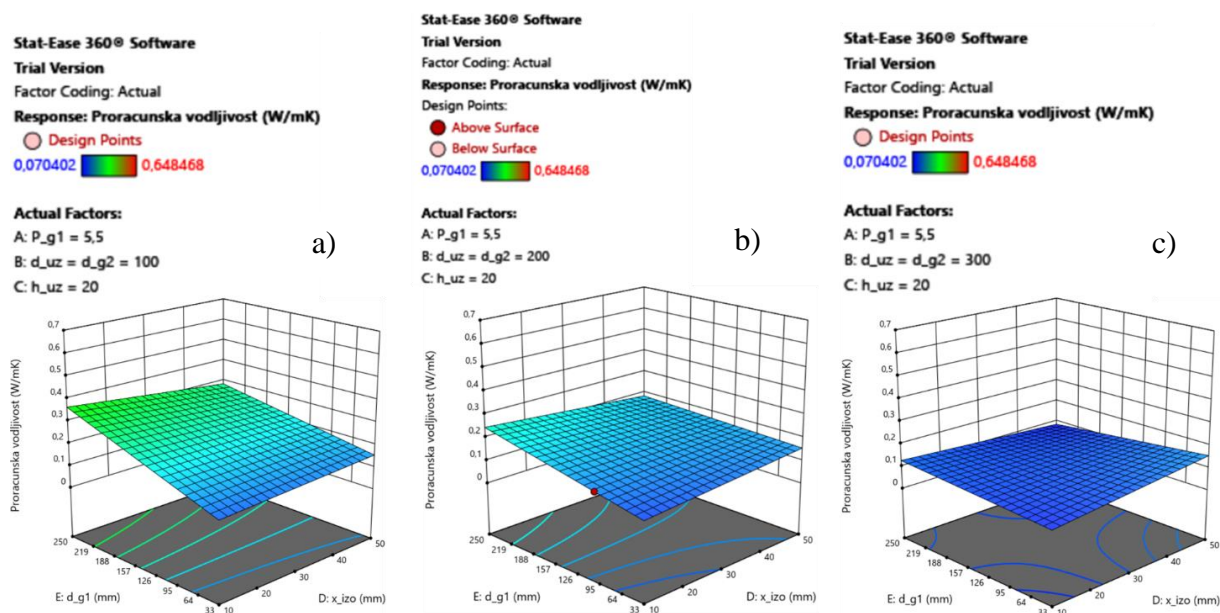
Na slici 6.31 prikazani su dijagrami s osima promjer primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ) i debljina izolacije (D:  $x_{izo}$ ). Mijenjana je vrijednost snage primarnog grijača (A:  $P_{g1}$ ) i to za vrijednosti  $P_{g1} = 1$  W (dijagram a),  $P_{g1} = 5.5$  W (dijagram b) i  $P_{g1} = 10$  W (dijagram c).



Slika 6.31 – Utjecaj promjene snage primarnog grijača na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa promjerom uzorka 200 mm i visine uzorka 20 mm.

Povećanjem snage primarnog grijača  $P_{g1}$  smanjuje se preciznost proračuna toplinske vodljivosti. Najprecizniji rezultat se dobiva kod manjih snaga primarnog grijača ( $P_{g1} = 1$  W) za promjer primarnog grijača  $d_{g1} = 33$  mm i debljinu izolacije  $x_{izo} = 50$  mm.

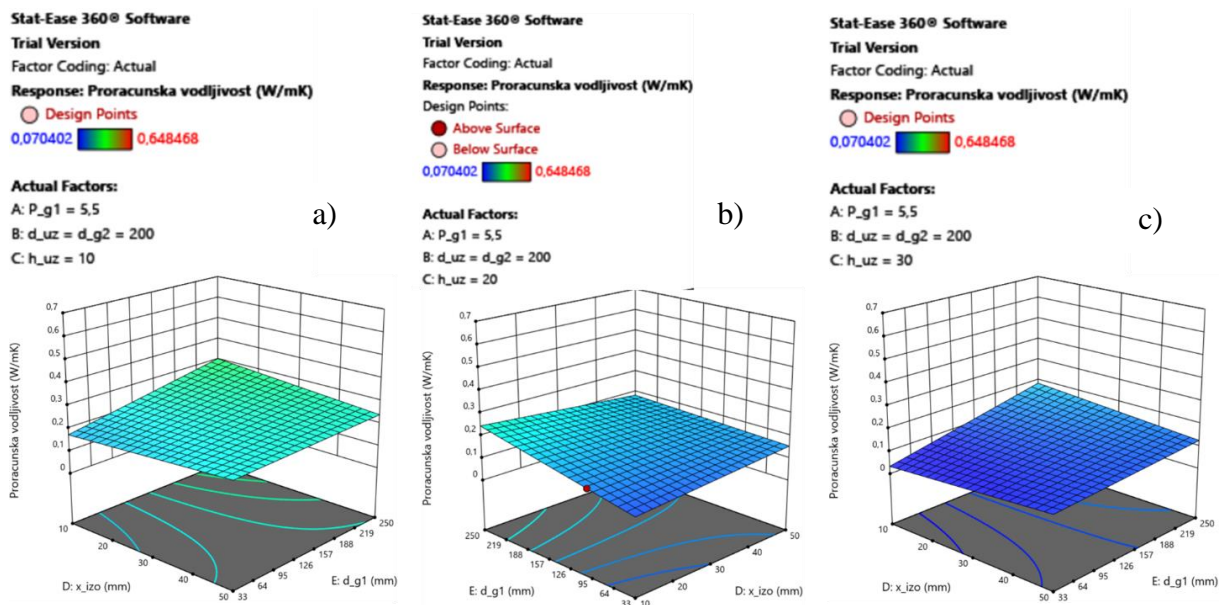
Na slici 6.32 prikazani su dijagrami s osima promjer primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ) i debljina izolacije (D:  $x_{izo}$ ). Mijenjana je vrijednost promjera uzorka (B:  $d_{uz} = d_{g2}$ ) i to za vrijednosti  $d_{uz} = d_{g2} = 100$  mm (dijagram a),  $d_{uz} = d_{g2} = 200$  mm (dijagram b) i  $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm (dijagram c).



Slika 6.32 – Utjecaj promjene promjera uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa snagom primarnog grijača 5.5 W i visine uzorka 20 mm.

Povećanjem promjera uzorka  $d_{uz} = d_{g2}$  smanjuje se utjecaj promjera primarnog grijača  $d_{g1}$  i povećava se preciznost proračuna toplinske vodljivosti. Najprecizniji rezultat proračunske toplinske vodljivosti dobije se za veće promjere uzorka ( $d_{uz} = d_{g2} = 300$  mm) sa promjerom primarnog grijača  $d_{g1} = 250$  mm i debljinom izolacije  $x_{izo} = 50$  mm.

slici 6.33 prikazani su dijagrami s osima promjer primarnog grijača (E:  $d_{g1}$ ) i debljina izolacije (D:  $x_{izo}$ ). Mijenjana je vrijednost visine uzorka (C:  $h_{uz}$ ) i to za vrijednosti  $h_{uz} = 10$  mm (dijagram a),  $h_{uz} = 20$  mm (dijagram b) i  $h_{uz} = 30$  mm (dijagram c).



Slika 6.33 – Utjecaj promjene visine uzorka na proračunsku toplinsku vodljivost za slučaj uređaja sa snagom primarnog grijača 5.5 W i promjerom uzorka 200 mm.

Povećanjem visine uzorka  $h_{uz}$  povećava se preciznost proračuna toplinske vodljivosti za slučaj uređaja sa snagom primarnog grijača  $P_{g1} = 5.5$  W i promjerom uzorka  $d_{uz} = d_{g2} = 200$  mm. Najprecizniji rezultati proračunske toplinske vodljivosti dobivaju se za veće visine uzorka ( $h_{uz} = 30$  mm) i debljinu izolacije  $x_{izo} = 50$  mm a promjer primarnog grijača  $d_{g1} = 33$  mm.

## 7. Zaključak

Nakon provedenih pokusa i analize rezultata primjećuje se da je postizanje visoke točnosti proračunske toplinske vodljivosti moguće korištenjem više različitih kombinacija vrijednosti konstrukcijskih veličina. Smanjenjem snage primarnog grijača uglavnom se dobivaju rezultati veće točnosti, a povećavanjem volumena uzorka, bilo povećanjem promjera ili visine uzorka, također se povećava preciznost dobivene proračunske toplinske vodljivosti. Iz dijagrama je vidljivo da se povećanjem debljine izolacije negativno utječe na točnost rezultata, što potvrđuje i tablica sa rezultatima pokusa u kojoj se vidi da su vrijednosti toplinske vodljivosti bliže stvarnoj vrijednosti za slučaj manjih vrijednosti debljine izolacije.

Uz debljinu izolacije grijača koja je predefinicirana na 3 mm, a bitna je za konstrukciju, na temelju provedene analize pokazalo se da najprecizniji rezultat proračuna toplinske vodljivosti daju sljedeće vrijednosti parametara: snaga primarnog grijača  $P_{gl} = 5.5$  W, promjer uzorka  $d_{uz} = 200$  mm, visina uzorka  $h_{uz} = 30$ , debljina izolacije  $x_{izo} = 30$  mm i promjer primarnog grijača  $d_{gl} = 95$  mm. Uz te parametre dobiva se proračunska vodljivost  $\lambda = 0.070402$  W/mK, što je odstupanje od 0.57 %, ali je vrijeme potrebno za postizanje stacionarnog stanja dugo i iznosi nešto manje od 20 sati. Kombinacijom sljedećih parametara dobije se i dalje prihvatljivo odstupanje proračunske od stvarne toplinske vodljivosti, ali uz znatno kraće vrijeme ispitivanja: snaga primarnog grijača  $P_{gl} = 1$  W, promjer uzorka  $d_{uz} = 300$  mm, visina uzorka  $h_{uz} = 30$  mm, debljina izolacije  $x_{izo} = 10$  mm i promjer primarnog grijača  $d_{gl} = 250$  mm. Odstupanje je 1.75 %. Vrijeme potrebno za ispitivanje iznosi 11,35 sati.

S obzirom da se u oba slučaja radi o dugotrajnom ispitivanju, neprimjerenom za demonstraciju na laboratorijskim vježbama, razlika u vremenu trajanja ispitivanja nema velikog značaja. Stoga bi trebalo odabrati prvu kombinaciju konstrukcijskih parametara s ciljem dobivanja preciznijeg mjerenja toplinske vodljivosti izolacijskih materijala.

Provedenom analizom u ovom radu se pokazalo da najveći utjecaj na preciznost mjerene toplinske vodljivosti imaju snaga grijača i visina uzorka. Kod izvedbe uređaja, treba razmotriti mogućnost ugradnje grijača čija se snaga može podešavati u određenom rasponu, a kako bi se u praktičnoj primjeni omogućilo variranje ovog parametra. Također, prikazanom izvedbom uređaja omogućeno je korištenje uzoraka različitih visina. Ovim bi se omogućilo precizno podešavanje parametara prilikom praktične primjene uređaja.

## Literatura

1. Gu, J.: *Thermally conductive polymer composites*, Elsevier, Amsterdam, 2023.
2. Almusaed, A. i Almssad, A.: *Insulation Materials in Context of Sustainability*, IntechOpen, 2016.
3. Zaimović-Uzunović, N. i Lemeš, S.: *Metod konačnih elemenata*, Dom štampe Zenica, 2002.
4. Cengel, Y., Ghajar, A.: *Heat and mass transfer*, Fifth edition, The McGraw-Hill Companies, 2015.