



UDK: 631.1.017

## NUMERIČKA SIMULACIJA TOPLOTNOG OPTEREĆENJA PLASTENIKA

Olivera Ećim-Đurić<sup>1</sup>, Predrag Milanović<sup>2</sup>, Tijana Marković<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Poljoprivredni fakultet, Beograd,

<sup>2</sup> IHTM - Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Beograd

**Sadržaj:** U radu je opisan postupak rešavanja parcijalnih diferencijalnih jednačina provođenja toplote u zidovima omotača objekta numeričkom diskretizacijom u cilju preciznog određivanja nestacionarnog temperaturnog polja u objektu. Numeričko rešavanje složenih jednačina prenosa toplote ima za cilj određivanje toplotnog ponašanja objekta uzimajući u obzir sve spoljne parametre, stohastički promenljive u vremenu, koji utiču na ponašanje objekta. Numerička simulacija plastenika pogodna je zbog relativno jednostavne geometrije objekta i manjeg broja zona (prostorijski) unutar objekta. Postupak koji je objašnjen u radu primenjen je u pomoć programskog paketa radi lakšeg i bržeg računanja podataka.

**Ključne reči:** numerička simulacija, toplotno ponašanje objekta, nestacionarno temperaturno polje.

### 1. UVOD

Definisanje temperaturnog polja u objektu zahteva spregu nestacionarnih procesa konvekcije, provođenja toplote i zračenja i jedan je od najsloženijih fenomena prostiranja toplote. Uproščavanjem modela uvođenjem pretpostavke o stacionarnim fizičkim procesima koji se odigravaju unutar objekta nije moguće dobiti realnu sliku termičkog ponašanja, kao što nije moguće ni precizno određivanje potrošnje svih oblika energije i eventualno povećanje energetske efikasnosti objekta. Prednost dinamičkih simulacija u kojima se u svakom vremenskom trenutku određuju merodavni parametri (temperatura, relativna vlažnost, toplotni dobitci i gubici objekta) na osnovu promenljivih parametara spoljašnje sredine ima za cilj precizno definisanje svih toplotnih tokova u objektu. Samo u ovakvom slučaju, unapređenje energetske efikasnosti objekta primenom obnovljivih izvora energije kao energenata daće adekvatne rezultate.

Prednost numeričkih simulacija leži upravo u činjenici što se složene parcijalne diferencijalne jednačine prostiranja toplote ne moraju aproksimirati, već se njihovom linearizacijom dolazi do jednostavnog sistema jednačina u kojima su zastupljeni svi

parametri uticajni za toplotno ponašanje objekta. Broj jednačina koje se formiraju zavisi od broja zona (prostorija) u objektu i slojeva zidova omotača objekta. Rešenja ovog sistema jednačina su temperature odgovarajućih slojeva zidova omotača objekta i temperatura vazduha u zoni (prostoriji). Nedostatak ovog metoda je veliki broj nepoznatih i jednačina koje se formiraju, u zavisnosti od broja zona i slojeva omotača objekta, pa je postupak rešavanja komplikovan i iziskuje računarsko rešavanje. Pretpostavke u kojima se u numeričkom rešavanju toplotnog opterećenja polazi su:

- zidovi objekta su neizotermni
- prenos toplote između zidova omotača objekta i vazduha se odvija kombinovanom konvekcijom
- strujanje sa spoljne strane objekta je nestacionarno
- fluid koji opstrujava objekat je viskozni i nestišljiv
- zid objekta je homogen
- materijal zida je izotropan
- materijal zida ima konstantne termofizičke osobine
- nema toplotnih izvora niti toplotnih ponora u zidovima

Plastenici i staklenici su objekti pogodni za ovakvu vrstu analize upravo zbog njihove relativno jednostavne geometrije i unutrašnjeg prostora koji se u većini slučajeva može podeliti u dve ili tri zone. Glavnu ulogu u formiranju temperature u unutrašnjosti objekta ima propušteno sunčevo zračenje kroz transparentni višeslojni omotač plastenika/staklenika koji se delom apsorbuje u samom omotaču, a najvećim delom prolazi u unutrašnjost gde se posle višestrukih refleksija u potpunosti apsorbuje.

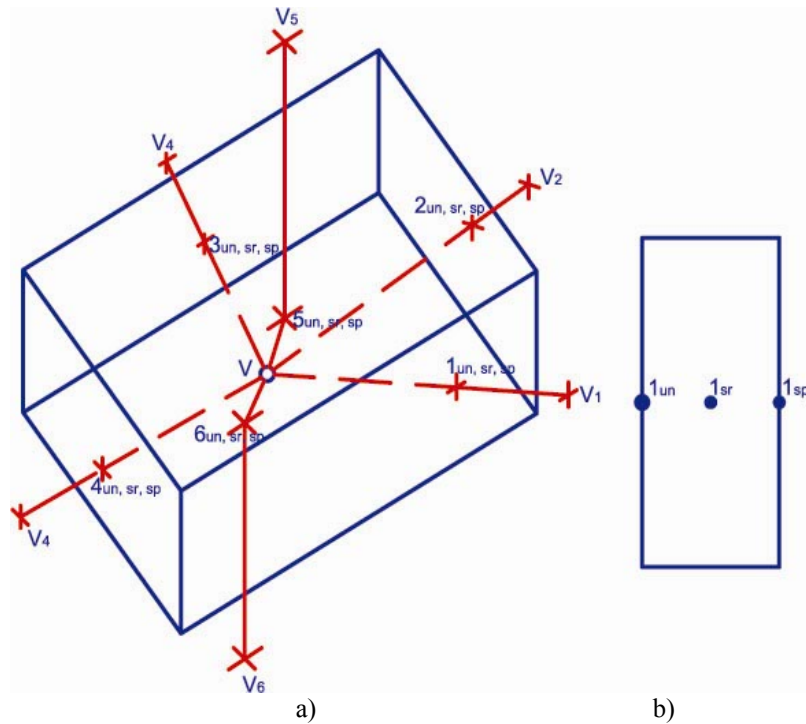
## 2. MATEMATIČKI MODEL

Pacijalna diferencijalna jednačina nestacionarnog provođenja toplote u zidovima omotača objekta

$$T_2 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + T_1 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left( \frac{\rho c_p}{\lambda} T_1 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + \frac{\rho c_p}{\lambda} T_2 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \right) \quad (1)$$

analitičko rešenje nema u realnih slučajevima. Da bi se dobilo rešenje, sa sve površine zidova omotača objekta i podslojeve, jednačina mora da se diskretizuje i numerički rešava. Jedna od metoda za numeričko rešavanje jednačine je i metoda konačnih zapremina. Na Slici 1a prikazan je objekat koji se sastoji iz jedne zone uz pretpostavku da je omotač zida sastavljen iz jednog sloja. Zid omotača se diskretizuje sa tri tačke kao što je prikazano na Slici 1b. Unutrašnji čvor je povezan sa ostalim unutrašnjim površinama zidova omotača (tj. unutrašnjim čvorovima svih ostalih površina) putem zračenja koje površine razmenjuju jedna prema drugoj, a sa čvorom vazduha putem konvekcije.

U slučaju da je zid omotača sastavljen iz više slojeva tada se mora diskretizovati svaki sloj zida, prema Slici 1b, što znači da za svaki sloj zida je potrebno definisati tri tačke u kojima će se postaviti granični uslovi i definisati prenos toplote. Svi spoljni uticaji se linearizuju kako bi se sveli na temperaturnu razliku dve susedne površine, ili površine i vazduha unutar zone.



Slika 1. Shema objekta i zida omotača objekta

Jednačina se rešava integraljenjem od vremenskog koraka  $\tau$  u kom se pretpostavlja da su sve temperature poznate do vremenskog koraka  $\tau + \Delta\tau$ . Implicitnom metodom aproksimacije, koja je bezuslovno stabilna, temperature elemenata omotača i fluida rešavaju se temperature u vremenskom koraku  $\tau + \Delta\tau$ , na osnovu graničnih uslova u istom vremenskom trenutku i temperatura svih elemenata omotača i fluida iz prethodnog vremenskog koraka. Za tačnost rešenja, kao i brzinu konvergencije rešenja veoma bitan izbor početnih vrednosti temperatura.

Primenom diskretizovane jednačine (1) za svaku površinu i vazduh unutar zone, dobija se sistem jednačina oblika:

$$A \cdot T = C \quad (2)$$

gde je  $T$  matrica temperatura čvorova svake površine i fluida unutar kaviteta,  $A$  je matrica koeficijentata koji se dobijaju iz prethodnih jednačina, a  $C$  je matrica slobodnih članova sa desne strane jednakosti svake jednačine. Matrica se formira za vremenski trenutak  $\tau + \Delta\tau$ , koeficijenti se određuju saglasno uslovima koji su ranije dati.

Razvijeni oblik matrične jednačine (2) za sve površine zone prikazan je u izrazu (3)

$$\begin{array}{cccccccccccc|cccc|c}
 b_{1,1} & c_{1,2} & & & & & & & & & & & & & & & & T_{1,1} & g_1 \\
 a_{1,1} & b_{1,2} & c_{1,3} & & & & & & & & & & & & & & & T_{1,2} & g_2 \\
 & a_{1,2} & b_{1,3} + f_{1,1} & & & & & & & & & & & & & & & T_{1,3} & g_3 \\
 & & b_{2,1} & c_{2,2} & f_{1,2} & & f_{1,3} & & f_{1,4} & & & & & & & & & T_{2,1} & g_4 \\
 & & & a_{2,1} & b_{2,2} & c_{2,3} & & & & & & & & & & & & T_{2,2} & g_5 \\
 & & f_{2,1} & & a_{2,2} & b_{2,3} + f_{2,2} & & f_{2,3} & & f_{2,4} & & f_{2,5} & & & & & & T_{2,3} & g_6 \\
 & & & & & b_{3,1} & c_{3,2} & & & & & & & & & & & & T_{3,1} & g_7 \\
 & & & & & a_{3,1} & b_{3,2} & c_{3,3} & & & & & & & & & & & T_{3,2} & g_8 \\
 & & f_{3,1} & & f_{3,2} & & a_{3,2} & b_{3,3} + f_{3,3} & & f_{3,4} & & f_{3,5} & & & & & & T_{3,3} & g_9 \\
 & & & & & & & b_{4,1} & c_{4,2} & & & & & & & & & & T_{4,1} & g_{10} \\
 & & & & & & & a_{4,1} & b_{4,2} & c_{4,3} & & & & & & & & & T_{4,2} & g_{11} \\
 & & f_{4,1} & & f_{4,2} & & f_{4,3} & & a_{4,2} & b_{4,3} + f_{4,4} & & f_{4,5} & & & & & & T_{4,3} & g_{12} \\
 & & & & & & & & & b_{5,1} & c_{5,2} & & & & & & & & T_{5,1} & g_{13} \\
 & & & & & & & & & a_{5,1} & b_{5,2} & c_{5,3} & & & & & & & T_{5,2} & g_{14} \\
 & & f_{5,1} & & f_{5,2} & & f_{5,3} & & f_{5,4} & a_{5,2} & b_{5,3} + f_{5,5} & & & & & & & T_{5,3} & g_{15} \\
 & & & & & & & & & & & b_{6,1} & c_{6,1} & & & & & & T_{6,1} & g_{16} \\
 & & & & & & & & & & & a_{6,1} & b_{6,2} & c_{6,2} & & & & & T_{6,2} & g_{17} \\
 & & f_{6,1} & & f_{6,2} & & f_{6,3} & & f_{6,4} & & f_{6,5} & & a_{6,2} & b_{6,3} + f_{6,6} & & d_g & & T_{6,3} & g_{18} \\
 r_1 & & & r_2 & & r_3 & & r_4 & & r_5 & & & r_6 & & v & & & T_{nn} & g_{19}
 \end{array} = (3)$$

Matrične jednačine mogu se rešiti Gauss-ovom metodom eliminacije, počevši od prvog reda u svakoj matrici eliminacijom elemenata ispod glavne dijagonale.

### 3. MODEL ISPITIVANJA

Model na kom je primenjen princip numeričkog rešavanja toplotnog opterećenja plastenika nalazi se uz magistralni put Šabac-Obrenovac u neposrednoj blizini reke Save. Platenik je površine 4,2ha, orijentisan u pravcu istok-zapad prateći magistralni put. Omotač plastenika napravljen je od višeslojnih folija između kojih se konstantno uduvava vazduh koji se održava na nadpristiku. Platenik se sastoji iz četiri celine:

- deo tehničkih prostorija za boravak radnika u kojima ne postoji sistem grejanja ili klimatizacije. Temperatura vazduha u ovom delu održava se samo na osnovu propuštenog sunčevog zračenja kroz kupolu krova i dodatno grejanje u kancelarijskom prostoru

- dve klima komore koje imaju zaseban sistem hlađenja i tehničko-tehnološki su odvojene od preostalog dela plastenika

- deo sa kontrolisanim uslovima za pripremu rasada u kome se tokom cele godine održavaju zadate vrednosti temperature, vlažnosti i nivoa osvetljenosti i u potpunosti je izolovanih od ostalih delova plastenika

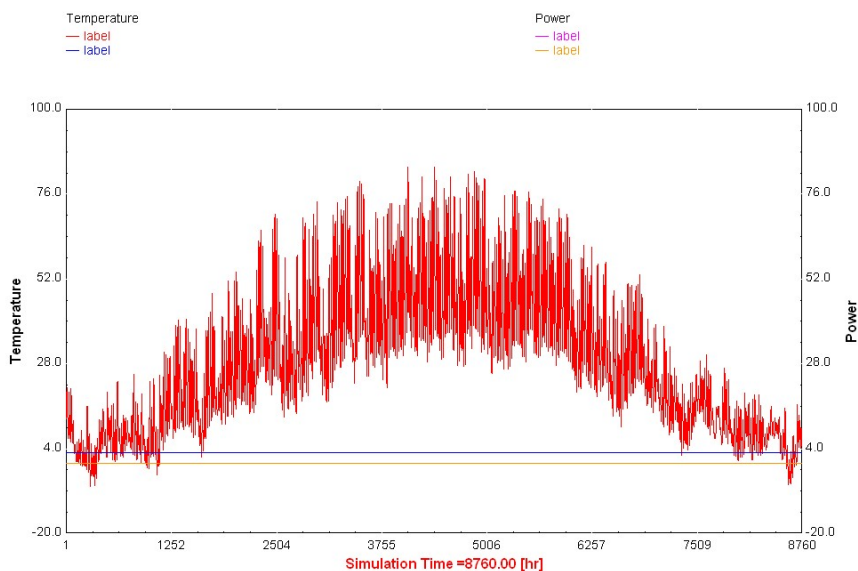
- glavni deo objekta tj. zona gajenja biljaka u kojoj je postavljen sistem za grejanje geotermalnom vodom iz obližnjeg izvora.

Prema fiziološkim potrebama biljaka koje se gaje u plasteniku, optimalna temperatura tokom godine treba da se kreće u intervalu 18 – 20°C. Relativna vlažnost u delu za pripremu rasada treba da bude oko 50%, dok se u prostoru za uzgajanje povrtnarskih kultura kreće tokom godine i do 90%, zbog dodatnog orošavanja biljaka u cilju smanjenja temperature u letnjem periodu. U glavnom delu plastenika za gajenje biljaka optimalna temperatura u zimskom periodu je 16 - 17°C; međutim u letnjem periodu temperatura vazduha ne bi smela da pređe 50°C (što se prihvata kao gornja granica normalnog fizioloških uslova gajenja biljaka).

Zadatak ispitivanja je određivanje toplotnog opterećenja zone gajenja biljaka i zone pripreme rasada tokom cele godine, na osnovu kog se dobijaju precizne vrednosti u potrebama za grejanjem i klimatizacijom objekta. Kako je u zoni gajenja biljaka postavljen sistem za grejanje geotermalnog vodom, simulacijom se mogu ustanoviti tačne potrebe objekta za toplotnom energijom, pa je moguće modeliranje crpljenja izvora geotermalne vode i dimenzionisanje sistema za skladištenje u vremenskim trenucima kada izvor nije u mogućnosti da obezbedi dovoljne količine vode. Kako u plasteniku ne postoji sistem klimatizacije u letnjem periodu numeričkom simulacijom se pre svega dobijaju časovne vrednosti temperature na osnovu kojih se mogu odrediti vršne vrednosti kritične za rast i razvoj biljaka. Ova pojava je takođe bitna i za prelazni period proleće i jesen, kada je moguće u unutrašnjosti plastenika postići visoke temperature usled izraženog intenziteta sunčevog zračenja propusštenog u unutrašnjost objekta. Na ovaj način moguće je modeliranje sistema za klimatizaciju i mehaničku ventilaciju koji ne postoje u objektu čime se umanjuje efikanost gajenja biljaka.

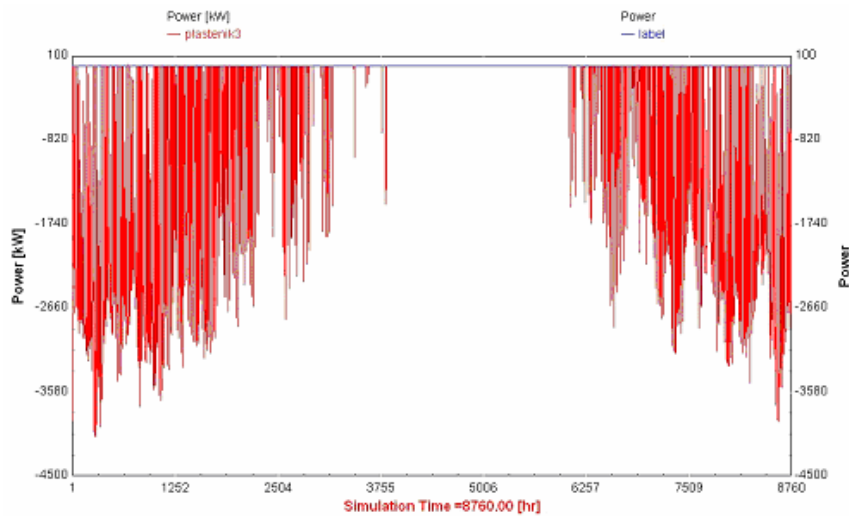
#### 4. REZULTATI ISPITIVANJA

Numerička simulacija toplotnog opterećenja plastenika s obzirom na veliki broj jednačina koje se dobijaju u modelu vršena je pomoću programskog paketa TNSYS, u kom se toplotno opterećenje objekata računa na ranije opisanom metodu. U cilju određivanja optimalnih vrednosti toplotnih dobitaka i gubitaka objekta, definisan je nulti model objekta u kom je prepostavljeno da u objektu nema ni jednog KGH sistema, izuzimajući iz ovog proračuna samo zonu sa klima komorama koja je zasebna celina. Promenljivi parametri spoljne sredine određeni su iz tipične meteorološke godine za datu lokaciju, koja je određena na osnovu prosečnih vrednosti iz desetogodišnjeg perioda. Časovne vrednosti temperature u zoni gajenja biljaka u nultom modelu prikazane su na Slici 2.

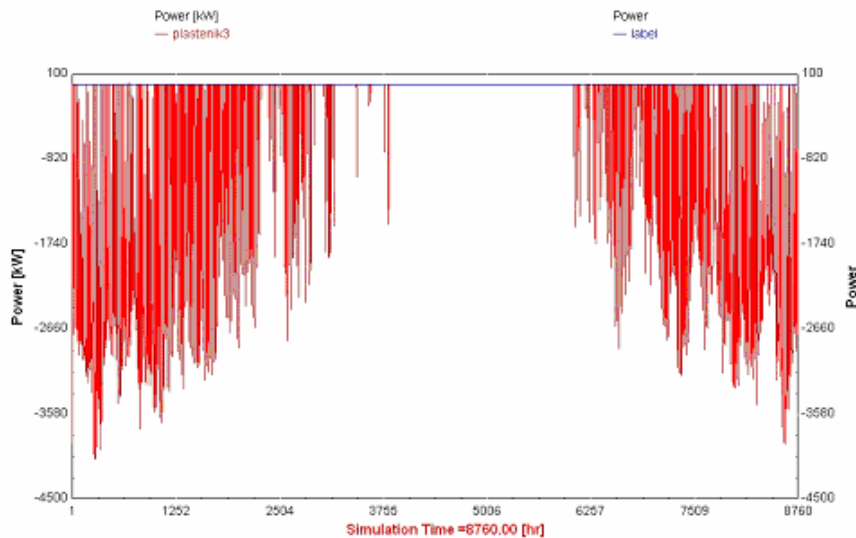


Slika 2. Časovne vrednosti temperature u zoni gajenja biljaka tokom godine u nultom modelu

Na osnovu ovih podataka što je ujedno i rešenje matrične jednačine (3), određeni su unaprećeni modeli u zavisnosti od postavljene temperature vazduha u pojedinim zonama. Na ovaj način moguće je za određenu temperaturu u zoni u zimskom i letnjem periodu odrediti potrebe za grejanjem i klimatizacijom. Temperatura vazduha u unapređenim modelima varirala je u okviru donje i gornje granice ugodnosti biljaka kako bi se odredila vršna opterećenja. Na Slici 3 prikazane su časovne vrednosti potrebne toplote za grejanje u zoni gajenja biljaka za  $t_u=18^{\circ}\text{C}$ , a na Slici 4 časovne vrednosti potrebne toplote za grejanje u zoni rasada za istu vrednost temperature

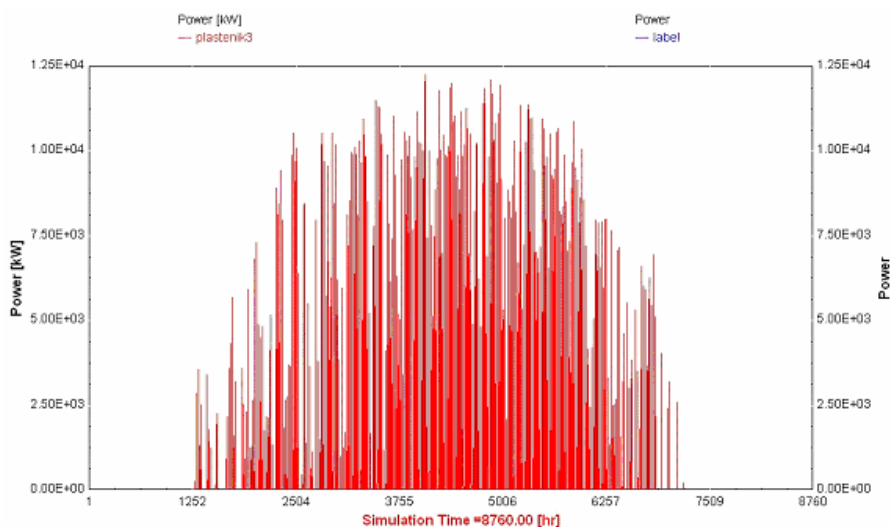


Slika 3. Časovne vrednosti toplote za grejanje u zoni gajenja,  $t_u=18^{\circ}\text{C}$

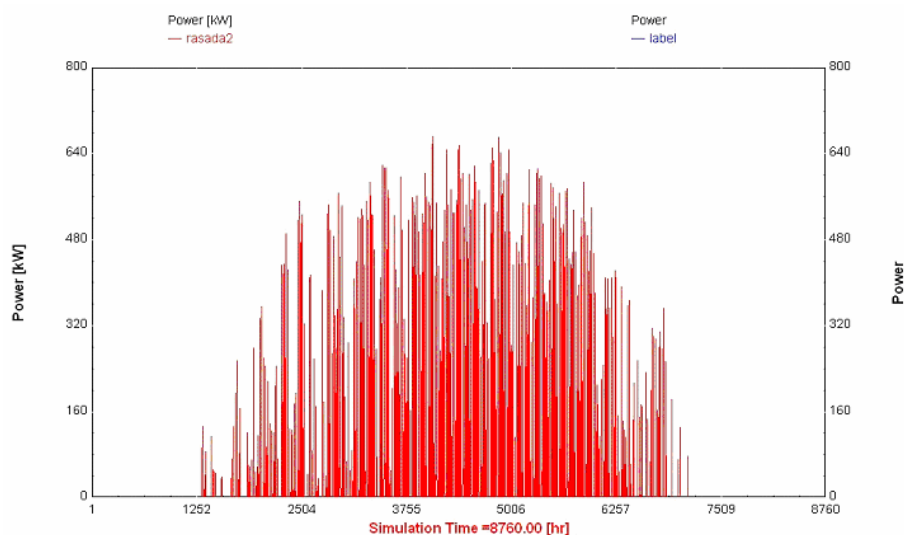


Slika 4. Časovne vrednosti toplote za grejanje u zoni rasada,  $t_u=18^{\circ}\text{C}$

Za letnji period karakterične su vrlo visoke vrednosti temperatura i relativnih vlažnosti u objektu. Na osnovu analize ponašanja objekta u periodu april – oktobar, usvojene vrednosti temperatura vazduha u zoni pripreme rasada je  $33^{\circ}\text{C}$ , a u zoni gajenja biljaka  $36^{\circ}\text{C}$ . Na Slici 5 prikazane su časovne vrednosti potrebne toplote hlađenja zone gajenja biljaka, a na Slici 6 časove vrednosti potrebne toplote hlađenja u zoni pripreme rasada.



Slika 5. Časovne vrednosti toplote hlađenja u zoni gajenja,  $t_u=33^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi=50\%$



Slika 6. Časovne vrednosti toplote hlađenja u zoni rasada,  $t_u=33^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi=50\%$

Rezultati ispitivanja pokazuju da prednost numeričkih simulacija toplotnog ponašanja objekte leži u dobijanju časovnih vrednosti relevantnih parametara objekta. Pored temperature, moguće je određivanje relativne vlažnosti vazduha, prelaza toplote na unutrašnjim i spoljašnjim površinama zidova omotača, propuštenog sunčevog zračenja i sl. Časovne vrednosti toplotnih dobitaka i gubitaka određenih na osnovu promenljivih meteoroloških podataka daju precizniju sliku o energetskim potrebama objekta, a za krajnji cilj imaju izbor i unapređenje optimalnih sistema grejanja, klimatizacije i hlađenja objekta.

### LITERATURA

- [1] \*\*: ASHRAE Handbook – Fundamentals, 2001
- [2] Abdel-Ghany Ahmed M., Kozai Toyoki: Dynamic modeling of the environment in a naturally ventilated, fog-cooled greenhouse, *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 1521-1539, 2006
- [3] Clarke J.A: Energy simulation in building design, Second edition, Butterworth-Heinemann, 2001
- [4] Donnely John, Flynn Jim, Monaghan Paul F.: Integration of energy simulation & ventilation design tools via an object oriented data model, *Renewable Energy*, Vol. 5, pp. 1190-1192, 1994
- [5] TRNSYS 15 Manual, University of Wisconsin – Madison Solar Energy Lab and the University of Colorado Solar Energy Applications Lab., 2003
- [6] Ećim Olivera, Zlatanovic Ivan: The Air Layer Influence on Greenhouses Membrane Cover Heat Transmission, 6<sup>th</sup> International Symposium “Young People and Multidisciplinary Research”, Timisoara, 2004

### NUMERICAL SIMULATION OF GREENHOUSES HEAT LOAD

**Olivera Ećim-Đurić\*, Predrag Milanović\*\*, Tijana Marković\***

<sup>1</sup>*Faculty of Agriculture, Belgrade-Zemun*

<sup>2</sup>*IHTM- Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy, Belgrade*

**Abstract:** The paper described the process of solving partial differential equations of heat conduction in the walls of the building envelope by numerical discretization in order to determine the precise unsteady temperature fields in the object. Numerical solution of complex equations of heat transfer is aimed at determining the thermal behavior of the object taking into account all the external parameters, stochastic variable in time, affecting the behavior of the object. Numerical simulation of the greenhouse is suitable for relatively simple geometry of the object and a small number of zones (rooms) inside the building. The procedure is explained in this paper is applied to the aid package for easier and faster calculation data

**Key words:** *numerical simulations, thermal behavior of the object, unsteady temperature field.*