

# Proračun difuzije vodene pare programom *Toplina 2000*

Krešimir Plander

## Ključne riječi

vodena para,  
difuzija,  
građevinska konstrukcija,  
proračun,  
program *Toplina 2000*,  
energija

## Key words

water vapor,  
diffusion,  
manmade structure,  
calculation,  
*Heat 2000* software,  
energy

## Mots clés

vapour d'eau,  
diffusion,  
construction de génie civil,  
calcul,  
logiciel *Toplina 2000*,  
énergie

## Schlüsselworte:

Wasserdampf,  
Diffusion,  
Baukonstruktion,  
Berechnung,  
Programm *Toplina 2000*,  
Energie

K. Plander

Stručni rad

## Proračun difuzije vodene pare programom *Toplina 2000*

Prikazuje se proračun prolaza topline i difuzije vodene pare kroz građevinske konstrukcije pomoću računalnog programa *Toplina 2000* baziranog na Glaser-ovoj iterativnoj metodi. Rezultati su prikazani tablično i grafikoni. Upućuje se na ono što se događa u Europi i širim međunarodnim okvirima kada se radi o ovom području. Modeliranje problema građevne fizike koji se odnose na difuziju vodene pare kroz porozne materijale radi se sa svrhom racionalnog postupanja s energijom.

K. Plander

Professional paper

## Calculation of water vapor diffusion by means of the *Heat 2000* software

The use of *Heat 2000* software based on Glaser's iterative method for calculating heat transfer and water vapor diffusion through manmade structures is presented. The results are provided in form of tables and charts. Current developments in this field, both in European countries and worldwide, are summarized. In conclusion, it is indicated that modeling of building-physics problems relating to water vapor diffusion through porous materials is undertaken in order to make a more rational use of energy resources.

K. Plander

Ouvrage professionnel

## Calcul de la diffusion de la vapeur d'eau assisté par le logiciel *Toplina 2000*

L'article présente le calcul du passage de la chaleur et de la diffusion de la vapeur d'eau à travers les constructions de génie civil assisté par le logiciel *Toplina 2000*, fondé sur la méthode itérative de Glaser. Les résultats sont fournis sous forme de tableaux et de graphiques. On signale les développements récents en la matière en Europe et partout dans le monde. En vue d'une gestion plus rationnelle de l'énergie, on a recours à la modélisation des problèmes de la physique de génie civil relatifs à la diffusion de la vapeur d'eau à travers les matériaux poreux.

K. Plander

Fachbericht

## Berechnung der Wasserdampfdiffusion mit dem Programm *Toplina 2000*

Dargestellt ist eine Berechnung des Wärmedurchlasses und der Wasserdampfdiffusion durch Baukonstruktionen mit Hilfe des Computerprogramms *Toplina 2000*, begründet auf der Iterationsmethode von Glaser. Die Ergebnisse sind in Tabellen und Schaubildern dargestellt. Es wird auf das hingewiesen was sich in Europa und weiteren internationalen Bereichen erärgnet wenn es sich um dieses Gebiet handelt. Die Modellierung der Bauphysikprobleme die sich auf die Wasserdampfdiffusion durch poröse Baustoffe beziehen ist auf rationalem Energieverbrauch begründet.

Autor: **Krešimir Plander**, dipl. ing. građ., Hrvatska elektroprivreda d.d., Direkcija za prijenos, Prijenosno područje Osijek, Šetalište kardinala F. Šepera 1a, Osijek

## 1 Uvod

Postupak proračuna difuzije vodene pare kroz građevinske konstrukcije s pomoću Glaserove metode i/ili približne Glaserove metode građanalitička je metoda ustanovljena još 1958. godine i osnovna joj je pretpostavka da u konstrukciji u kojoj eventualno nastaje kondenzat on nastaje u zoni ili ravnini kondenzacije, tj. ne dopušta se, a teoretski nije niti moguće da parcijalni tlakovi budu veći od tlaka zasićenja, jer dolazi do orošenja. Na ovaj način eventualna količina nakupljenog kondenzata proračunava se iz razlike ulaznog i izlaznog difuzijskog toka vodene pare:

$$q_{m1} = \frac{p_i - p'_{k1}}{\tau'}$$

$$q_{m2} = \frac{p'_{k2} - p_e}{\tau''}$$

$$q'_m = q_{m1} - q_{m2} \quad [\text{kg/m}^2\text{h}]$$

(za slučaj ravnine kondenzacije  $p'_{k1}$  i  $p'_{k2} = p'_k$ )

gdje su  $\tau'$  i  $\tau''$  specifični difuzijski otpori od početka, tj. kraja konstrukcije do ravnine odnosno početka zone kondenzacije.

Ovaj proračun ne uzima dovoljno točna mjesta nastanka, tj. početka i kraja nastanka zone kondenzacije. Točke  $p_{k1}$  i  $p_{k2}$  grafički se određuju u odnosu na krivulju tlaka zasićenja, a specifični difuzijski otpori difuziji vodene pare zamjenjuju se u približnoj Glaserovoj metodi relativnim otporom difuzije vodene pare koji glasi:

$$r = d x^\mu$$

gdje su :

$d$  = debljina pojedinog sloja

$\mu$  = faktor otpora difuzije vodene pare pojedinog materijala

Ova metoda može nam dati samo poznate veličine parcijalnih i zasićenih tlakova na počecima i na krajevima pojedinog sloja građevinske konstrukcije.

Postupak u programu Toplina 2000 nalazi količinu stvarnog kondenzata na temelju pretpostavke da se pronađe količina kondenzata za parcijalni tlak, koji je u zoni kondenzacije veći od zasićenog tlaka, proračunavajući taj parcijalni tlak kao zasićeni tlak, ali s povećanjem temperature nastanka ovog tlaka kao zasićenog tlaka, te se pronalazi koliko je puta količina kondenzata takvog zasićenog tlaka, fiktivnog parcijalnog tlaka, veća od količine kondenzata stvarnog zasićenog tlaka.

## 2 Metoda Toplina 2000

### 2.1 Proračun količine kondenzata koji nastaje u zimskom razdoblju

Postupak i program pod nazivom Toplina 2000 pisan je u Visual Basic aplikaciji za Excel 7.0 programski paket i zapravo je interpolacijska metoda Glaserove metode prilagođena računalu, koja obavlja proračun difuzije vodene pare te proračun isušavanja konstrukcije u ljetnom razdoblju na temelju poznavanja tokova funkcija parcijalnog i zasićenog tlaka vodene pare s korakom iteracije 0,1 mm kroz građevinsku konstrukciju. Funkcija izračuna parcijalnog tlaka glasi:

$$p = p_{prethodno} - \left( \frac{p_i - p_e \times \frac{d \times \mu \times R_D \times T}{D}}{\frac{1}{\Delta}} \right)$$

gdje su:

$p_i, p_e$  - tlakovi vodene pare na početku i na kraju konstrukcije [Pa]

$D$  - koeficijent difuzije vodene pare kroz zrak [ $\text{m}^2/\text{h}$ ]

$R_D$  - plinska konstanta 462 [J/kgK]

$T$  - termodinamička temperatura [K]

$d$  - udaljenost od početka pojedinog sloja [m]

$1/\Delta$  - otpor difuzijskoj propustljivosti vodene pare [ $\text{m}^2\text{hPa/kg}$ ]

$\mu$  - faktor otpora difuzije vodene pare materijala pojedinog sloja

Interpolirana funkcija zasićenog tlaka prema Lagrangeovoj interpolacijskoj formuli glasi:

$$p' = R_D \times T \times (0,0015852 \times t^6 - 0,10692 \times t^5 + 3,6502 \times t^4 + 211,245277 \times t^3 + 8876,884569 \times t^2 + 342184,3222 \times t + 4836433) / 1.000.000.000.000,00 \text{ [kPa]}$$

gdje su:

$t$  - temperatura u  $^{\circ}\text{C}$

$T$  - termodinamička temperatura u K

$R_D$  - plinska konstanta 462 J/kgK.

S pomoću ove metode i ovog postupka moguće je dovoljno točno odrediti mjesta presjeka krivulja zasićenog i parcijalnog tlaka vodene pare, a time i mjesta nastanka - početka i kraja zone kondenzacije, i veličinu tlakova u te dvije točke. No, problem određivanja količine kon-

denzata nije rješiv na temelju poznavanja samo diferencije tlakova na početku i na kraju zone kondenzacije, jer su te diferencije za parcijalni i zasićeni tlak vodene pare identični.

Ovaj problem riješen je općom jednačbom stanja plina koja glasi:

$$p \times v = R_D \times T \times G, \text{ tj.}$$

$$p \times V = R_D \times T$$

gdje su:

$p$  - tlak vodene pare (plina) [kPa]

$V$  - volumen vodene pare (plina) [m<sup>3</sup>]

$v$  - specifični volumen vodene pare (plina) [m<sup>3</sup>/kg]

$R_D$  - plinska konstanta [J/kgK]

$T$  - termodinamička temperatura [K]

$G$  - stvarna količina, masa, vodene pare - plina pri određenoj temperaturi pare (plina) [kg/kg]

Potrebno je izračunati srednji tlak i temperaturu zasićenog tlaka u zoni kondenzacije, te srednji tlak i temperaturu parcijalnog tlaka tako da parcijalni tlak stekne uvjete zasićenog tlaka povećanjem temperature vodene pare u zoni kondenzacije.

Naime, za krivulju zasićenog tlaka vodene pare, tj. za srednju vrijednost zasićenog tlaka u zoni kondenzacije postoji određena količina kondenzata koja nastaje na određenoj srednjoj temperaturi zasićenog tlaka, a dana je prema Lagrangeovoj interpolacijskoj funkciji i glasi:

$$G = (1,014 \times t^6 - 46,26 \times t^5 + 2655 \times t^4 + 145890 \times t^3 + 6024360 \times t^2 + 210873600 \times t + 2808000000) / 720.000.000.000,00 \text{ [kg/kg]}$$

$t$  = temperatura vodene pare u °C

Na temelju poznavanja količine kondenzata za srednju vrijednost zasićenog tlaka, pri srednjoj vrijednosti temperature takvog zasićenog tlaka pare, izračuna se specifični volumen tog plina - pare jednačbom:

$$v = \frac{G_p \times R_D \times T_{sr'}}{p_{sr'}} \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

i volumen takvog plina - pare:

$$V = \frac{R_D \times T_{sr'}}{p_{sr'}} \text{ [m}^3\text{]}$$

$T_{sr'}$  - Srednja termodinamička temperatura za  $p_{sr'}$  srednje i volumena pare parcijalnog (sada zasićenog) tlaka:

$$V = \frac{R_D \times T_{sr'}}{p_{sr'}} \text{ [m}^3\text{]}$$

$T_{sr}$  - Povećana srednja termodinamička temperatura za  $p_{sr}$  srednje (parcijalni tlak koji uz povećanje temperature pare postaje zasićeni tlak)

$$V = \frac{R_D \times T_{sr}}{p_{sr}} \text{ [m}^3\text{]}$$

$v = G_p \times V$  [m<sup>3</sup>/kg] ( $G_p$  se dobije iz interpolacijske funkcije za povećanu srednju termodinamičku temperaturu  $T_{sr}$ , kao i  $G_p$ )

$G_p = \rho \times v$  [kg/kg] (odgovara količini kondenzata dobivenog iz interpolacijske funkcije za povećanu srednju termodinamičku temperaturu  $T_{sr}$ )

Koeficijent  $k_1$  nam pokazuje koliko je puta količina kondenzata fiktivnog parcijalnog pritiska (zasićenog pritiska) veći od količine kondenzata stvarno zasićenog pritiska:

$$k_1 = G_p / G_p'$$

da bi se na kraju dobila količina kondenzata u konstrukciji:

$$q_m = \frac{\Delta p'}{\tau} \times k_1 \times 24 \times \text{dani navlaženja [kg/m}^2\text{]}$$

$\tau'$  - specifični difuzijski otpor u zoni kondenzacije za stvarni zasićeni tlak.

## 2.2 Proračun isušivanja u ljetnom razdoblju

Proračun isušivanja poseban je problem koji je također riješen postupkom u programu Toplina 2000 na način da se na temelju različitih količina vodene pare – kondenzata koji se isušuje u ljetnom razdoblju s vanjske i unutrašnje strane konstrukcije svedu na iste količine vodene pare koja isušuje, tj. na isto vrijeme isušivanja izvana i iznutra, a za različite specifične otpore difuziji vodene pare s različitih strana konstrukcije prema sljedećim izrazima:

$$q_{mi1} = \frac{p' - p}{\tau'} \text{ [kg/m}^2\text{h]}$$

$$q_{mi2} = \frac{p' - p}{\tau''} \text{ [kg/m}^2\text{h]}$$

$\tau'$  - specifični difuzni otpor do točaka tlakova koji se proračunava gledano iznutra

$\tau''$  - specifični difuzni otpor do točaka tlakova koji se proračunava gledano izvana

$$\tau' \text{ i } \tau'' = \frac{d \times \mu \times R_D \times T}{D} \text{ [Nh/kg]}$$

$$t_1 = \frac{q'_m}{q_{mi1} \times 24} \text{ [dani]}$$

VANJSKI ZID

ZA RASPON TEMPERATURE -20 DO +35 C

MATERIJAL SLOJA	d (m)	d <sub>0</sub> (maks)	λ (W/mK)	R <sub>s</sub> =d/λ	Δt (°C)	t (°C)	p (kPa)	p (MPa)	μ	D	(g*Ro*T*d/D)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
UNUTARNJI ZRAK	0,001	0,001				20,00	2,337	1,168	1	9,43E-02	1,44E+03
P.U. PRIJELAZA	0,020	0,021	1,000	0,13	3,10	16,90	1,924	1,151	1	9,25E-02	2,90E+04
PRODUŽENA ŽBUKA 1700	0,010	0,031	0,810	0,01	0,31	16,60	1,887	1,065	10	9,24E-02	1,45E+05
PLINO I PJEVO BETON 400	0,080	0,111	0,140	0,57	14,16	2,44	0,729	0,886	2,5	8,43E-02	3,02E+05
CEMENTNA ŽBUKA	0,010	0,121	1,400	0,01	0,18	2,27	0,720	0,619	30	8,43E-02	4,53E+05
	0,000	0,121	1,000	0,00	0,00	2,27	0,720	0,619	1	8,43E-02	0,00E+00
	0,000	0,121	1,000	0,00	0,00	2,27	0,720	0,619	1	8,43E-02	0,00E+00
	0,000	0,121	1,000	0,00	0,00	2,27	0,720	0,619	1	8,43E-02	0,00E+00
	0,000	0,121	1,000	0,00	0,00	2,27	0,720	0,619	1	8,43E-02	0,00E+00
	0,000	0,121	1,000	0,00	0,00	2,27	0,720	0,619	1	8,43E-02	0,00E+00
	0,000	0,121	1,000	0,00	0,00	2,27	0,720	0,619	1	8,43E-02	0,00E+00
P.V. PRIJELAZA	0,020	0,141	1,000	0,04	1,07	1,20	0,666	0,601	1	8,37E-02	3,03E+04
VANJSKI ZRAK	0,001	0,142				1,20	0,666	0,600	1	8,37E-02	1,52E+03

KLIMATSKA ZONA	III	P	X <sub>r</sub>	X <sub>u..</sub>	X <sub>v..</sub>	Poč. zone kond. (m)	0,09040			
KLIMATSKI PODACI:	Vlažni dani:	110	1700	3	6	3,0	Poč. zone kond. (m)	0,09040		
ZRAK:	t (°C)	φ (%)	p' (kPa)	p (kPa)	400	12,5	25	18,0	Tlak na poč. zone kond. (kPa)	0,93167
UNUTRA	20	50	2,337	1,17	2100	2,5	5	3,4	Kraj zone kond. (m)	0,11600
VANI	1,20	90	0,666	0,60				0,0	Tlak na kraj zone kond. (kPa)	0,72372
								0,0	Ukupna kol. kond. (kg/m <sup>2</sup> )	1,96332
								0,0	Dužina zone kond. (m)	0,02560
								0,0	Temp. na poč. zone kond.	5,91025
								0,0	Temp. na kraju zone kond.	2,33421
								0,0	Max. vrijeme isušenja (dana)	60,00

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_s = 0,759 \text{ m}^2\text{KW}$$

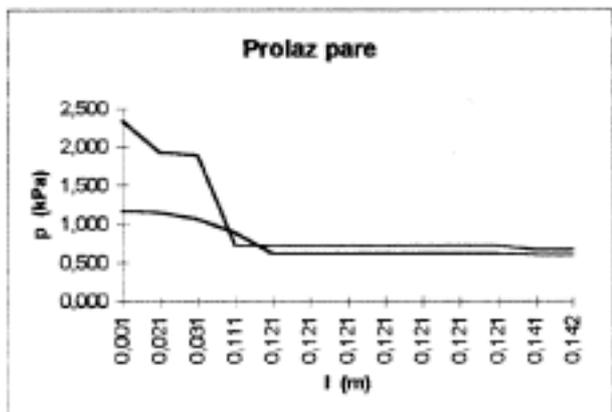
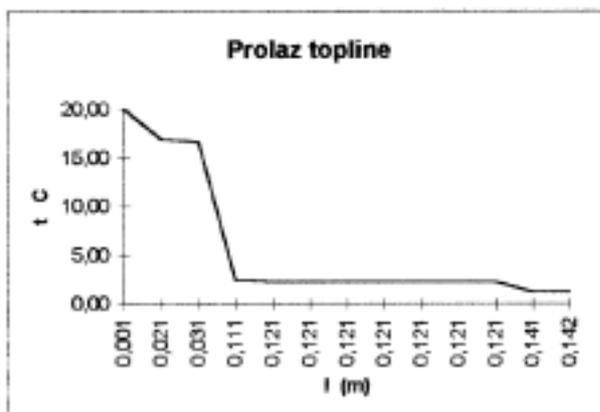
$$k = \frac{1}{R} = 1,32 > 0,80 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\frac{t_i - t_e}{R} = 24,8 \text{ W/m}^2$$

$$\frac{p_i - p_e}{\lambda} = 0,0006 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

$$\Delta = \frac{1}{\frac{d_1}{\delta_1} + \frac{d_2}{\delta_2} + \dots + \frac{d_n}{\delta_n}} = 1E-06 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{hPa}}$$

Vrijeme isušenja: 69,53 dana



Gušenje temperature:	Sloj:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\nu = 7,31$	$\rho$ (W/kgK)	1050	1050	1050						
Temperaturno kašnjenje:	$\eta$	= 3,04 sati								

Slika 1. Fizikalni koeficijenti i vrijednosti te ostali klimatski podaci

$$t_2 = \frac{q'_m}{q_{mi2} \times 24} \quad [\text{dani}]$$

$$t_3 = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad [\text{dani}]$$

$$q_{mi1} = \frac{q'_m}{t_3 \times 24} \quad [\text{kg/m}^2 \text{ dani}]$$

$$q_{mi2} = \frac{q'_m}{t_3 \times 24} \quad [\text{kg/m}^2 \text{ dani}]$$

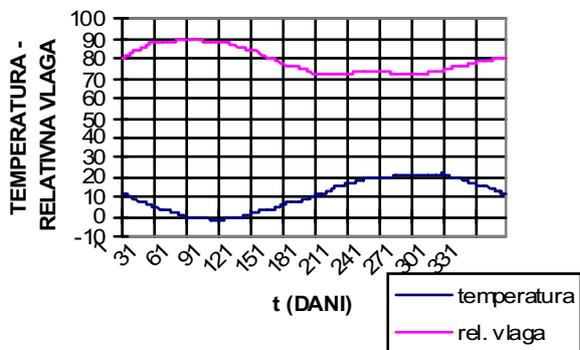
$$d_1 = \frac{p' - p}{q_{mi1} \times \frac{\tau \times 24}{0,0001}} \quad [\text{m}]$$

$$d_2 = \frac{p' - p}{q_{mi2} \times \frac{\tau \times 24}{0,0001}} \quad [\text{m}]$$

Proračun se vrši do uvjeta kada suma  $d_1 + d_2$  postaje jednaka ili veća od dužine zone kondenzacije.

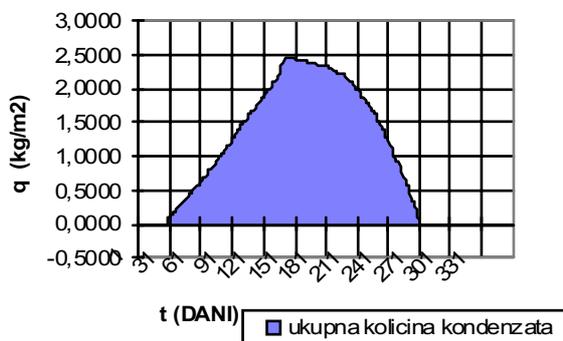
### 3 Primjer

Dobiveni rezultati ovog modela pokazuju različita vremena isušivanja konstrukcije u ljetnom razdoblju od onih dobivenim klasičnom Glaserovom metodom i koja su uglavnom znatno veća od onih dobivenih klasičnom metodom. Također različite su i količine dobivenog kondenzata u konstrukcijama što je vidljivo u test primjeru zida od plinobetona (8,0 cm) obloženog produženim vapnenim mortom (1,0 cm) iznutra i cementnim mortom (1,0 cm) izvana. Uvjeti uzeti za ovaj test su srednje tridesetogodišnje klimatske prilike - temperature i vlage za grad Osijek te 50 % vlage i 20 °C unutar prostorije za cijelu godinu. Svi fizikalni koeficijenti i vrijednosti zajedno s ostalim klimatskim podacima dani su na slici 1.



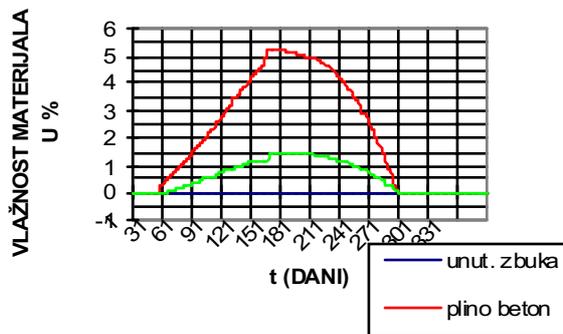
Slika 2. Srednje dnevne temperature i srednje dnevne relativne vlage za područje grada Osijeka

Početak promatranja je 15. listopada karakteristične prosječne godine.

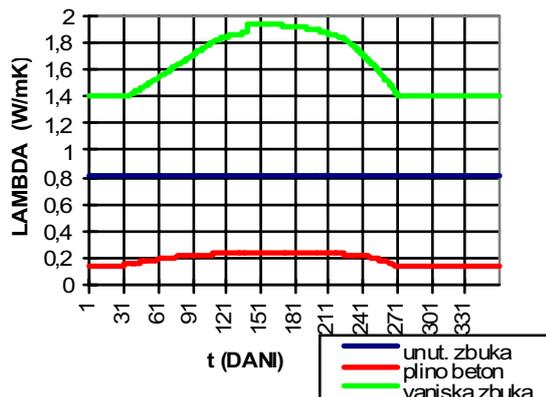


Slika 3. Kumulativno nastajanje kondenzata i isušivanje u ljetnom razdoblju

Promjena vlažnosti mase materijala pojedinog sloja vidi se iz dijagrama prikazanog na slici 4.



Slika 4. Promjena vlažnosti mase pojedinog sloja materijala bez računске vlage u masi



Slika 5. Prosječna promjena koeficijenta toplinske vodljivosti  $\lambda$  u ovisnosti o navlaženosti materijala pojedinog sloja

Također, iz slike 5. vide se promjena i kretanje prosječnog koeficijenta toplinske vodljivosti  $\lambda$  pojedinog sloja konstrukcije. Mora se reći da su promjene koeficijenta toplinske vodljivosti  $\lambda$  s obzirom na proračun vlage u masi materijala ograničene na tri vrste materijala: 1. po-

rozni homogeni izotropni materijali, 2. vlaknasti materijali - izrazito vodoupojni, 3. homogeni izotropni slabo ili nikako vodoupojni materijali, tj. ne uzima se promjena koeficijenta toplinske vodljivosti  $\lambda$  za svaku vrstu materijala posebno.

