

KONSTRUKCIJE, MATERIJALI I GRAĐENJE

Fond: 4+2

Prof. dr Vlastimir RADONJANIN

Prof. dr Mirjana MALEŠEV

PREDAVANJE br. 3

PRENOŠENJE TOPLOTE

Prema drugom zakonu termodinamike, toplota se kreće od toplijeg tela ka hladnijem telu, odnosno od više prema nižoj temperaturi.

Na taj način je određen smer prostiranja toplote.

Prenošenje toplote se može odvijati na 3 načina:

- ❖ Zračenjem (radijacijom)
- ❖ Strujanjem (konvekcijom)
- ❖ Provođenjem (kondukcijom)

2

PRENOŠENJE TOPLOTE

Prenošenje toplote zračenjem (radijacijom)

Izvor zračenja: Sunce ili bilo koje telo čija je temperatura viša od temperature okoline.

Način prenošenja: Toplota izvora zračenja prenosi se tako što se unutrašnja toplotna energija transformiše u energiju elektromagnetskog zračenja, proporcionalno temperaturi tela.

Ovo zračenje se naziva infracrveno zračenje.

Kada elektromagnetni talas stigne do čvrstog tela ponaša se kao svetlosni talas: delimično se apsorbuje, a delimično reflektuje - odbija).

3

PRENOŠENJE TOPLOTE

Prenošenje toplote zračenjem (radijacijom)

$$Q_{\text{zračenja}} = Q_{\text{reflektovano}} + Q_{\text{apsorbovan}}$$

Odnos odbijene i upijene toplote zavisi:

- od prirode zračenja (talasne dužine) i
- od prirode površine materijala.

Pri tome značajnu ulogu ima boja podloge.

Primeri: zagrevanje objekata - tamna boja,
smanjenje zagrevanja kod ravnih krovova - bela boja

4

PRENOŠENJE TOPLOTE

Prenošenje toplote zračenjem (radijacijom)

Količine odbijene i upijene toplotne energije definišu se koeficijentima:

$$\text{refleksije} \quad \alpha_R = 100 \cdot Q_{\text{ref}} / Q_{\text{zra}} \quad i$$

$$\text{apsorbcije} \quad \alpha_A = 100 \cdot Q_{\text{aps}} / Q_{\text{zra}}$$

5

PRENOŠENJE TOPLOTE

Prenošenje toplote zračenjem (radijacijom)

Osnovne karakteristike ovog načina prenošenja toplote su:

- ❖ Toplota se kreće brzinom svetlosti,
- ❖ Toplota se prenosi pravolinijski,
- ❖ Toplota se može prenositi i kroz vakum i
- ❖ Toplota se može prenositi i na velika rastojanja.

6

PRENOŠENJE TOPLOTE

Prenošenje toplote strujanjem (konvekcijom)

Ovaj način prenošenja toplote je karakterističan za fluide (gasove i tečnosti).

Način prenošenja: Ostvaruje se kretanjem molekula, pri čemu molekuli predaju svoju toplotnu energiju drugim molekulima.

Za arhitektonske objekte važan je proces u kome se toplotna energija prenosi sa nekog fluida na čvrsto telo i obratno.

7

PRENOŠENJE TOPLOTE

Prenošenje toplote strujanjem (konvekcijom)

Ukoliko je neki fluid u kontaktu sa čvrsttim telom i postoji razlika u temperaturi površine čvrstog tela i fluida, doći će do prenošenja toplotne energije sa materije koja ima VIŠU temperaturu na onu sa NIŽOM temperaturom.

Pri tome, toplotna energija treba da savlada OTPOR KOJI PRELAZU TOPLOTE pruža kontaktna površina između dve sredine.

Veličina kojom se karakteriše prelaz toplote sa čvrstog na fluidni medijum i obratno, naziva se KOEFICIJENT PRELAZA TOPLOTE.

8

PRENOŠENJE TOPLOTE

Prenošenje toplote strujanjem (konvekcijom)

Definicija: Koeficijent prelaza toplote je količina toplote koja se u jedinici vremena (1 sec) razmeni između jedinične površine čvrstog tela i fluida pri temperaturnoj razlici od 1°C (K), i označava se sa α .

U građevinskim konstrukcijama se razlikuju:

- α_i - Za unutrašnju stranu objekta i
- α_e - Za spoljašnju stranu objekta.

9

PRENOŠENJE TOPLOTE

Prenošenje toplote provođenjem (kondukcijom)

Toplota se prenosi provođenjem ili kondukциjom kroz čvrsta tela.

Ovaj proces u suštini predstavlja razmenu kinetičke energije i može se odvijati na dva načina:

- Sa molekulima na molekul, oscilovanjem oko ravnotežnog položaja (sporji, karakterističan za termoizolacione materijale) i
- Preko slobodnih elektrona koji se sudaraju sa atomima i jonima i predaju im svoju toplotnu energiju (brži, karakterističan je za metale).

10

Prenošenje toplote provođenjem (kondukcijom)

Temperatursko polje

Definicija: Skup temperature u svim tačkama prostora, koji postoji u trenutku posmatranja, naziva se TEMPERATURSKO POLJE.

Temperatura u bilo kojoj tački prostora određena je:

- Koordinatama te tačke (x, y, z) i
- Vremenom " τ ".

Raspodela temperature u svim tačkama prostora u raznim vremenskim trenucima, data je opštim analitičkim izrazom:

$$t = t(x, y, z, \tau)$$

11

Prenošenje toplote provođenjem (kondukcijom)

Temperatursko polje

Temperaturska polja mogu biti:

- Nestacionarna i
- Stacionarna.

Nestacionarno temperatursko polje:

Ako se temperature u temperaturskom polju menjaju tokom vremena, takvo temperatursko polje se naziva nestacionarno, a provođenje toplote je neustaljeno. Izraz:

$$t = t(x, y, z, \tau)$$

opisuje temperatursko polje najopštije vrste, takozvano trodimenzionalno nestacionarno temperatursko polje.

12

Prenošenje toplote provođenjem (kondukcijom)

Temperatursko polje

Ako se temperature u nekom temperaturskom polju ne menjaju u toku vremena, takvo polje se naziva **stacionarno temperatursko polje**, a provođenje toplote je ustaljeno. Analitički izraz za opisivanje stacionarnog temp. polja je:

$$t = t(x, y, z), \quad dt/d\tau = 0$$

Najjednostavniji slučaj je kada je temperatura funkcija samo jedne koordinate (x) - jednodimenzionalno stacionarno temperatursko polje:

$$t = t(x), \quad dt/dy = dt/dz = dt/d\tau = 0$$

13

Prenošenje toplote provođenjem (kondukcijom)

Izotermiske površine

U nekom telu (sredini) moguće je izdvojiti slojeve jednakih temperatura.

Površine koje graniče te slojeve nazivaju se **IZOTERMSKE POVRŠINE**.

Pravila:

- ❖ Temperatura na izot. površinama je konstantna i menja se samo u pravcu preseka kroz površine.
- ❖ Dve izotemske površine se ne mogu seći, jer je fizički nemoguće da u istoj tački prostora postoje istovremeno dve različite temperature.
- ❖ Najveća promena temperatura je u pravcu normale na izotermiske površine.

14

Prenošenje toplote provođenjem (kondukcijom)

Stacionarno provođenje toplote - I Furijeov zakon

Joseph Fourier (1768-1830) je definisao empirijski izraz koji opisuje količinu toplote (Q) koja se prenosi kondukcijom kroz stacionarno jednodimenzionalno polje za promenu temperature u pravcu x-ose:

$$dQ = -\lambda \cdot S \frac{dt}{dx} \tau$$

(-) ⇒ provođenje toplote odvija iz oblasti više ka oblasti niže temperature!

λ - koeficijent toplotne provodljivosti
 S - površina kroz koju se odvija provođenje toplote
 dt/dx - promena temperature u pravcu x-ose
 τ - vreme u kome se odvija provođenje toplote

15

Prenošenje toplote provođenjem (kondukcijom)

Stacionarno provođenje toplote - I Furijeov zakon

I Furijeov zakon može da se napiše i preko izraza za toplotni fluks (Φ), koji predstavlja promenu količine toplote u jedinici vremena:

$$\Phi = \frac{dQ}{d\tau} = -\lambda \cdot S \frac{dt}{dx}$$

ili preko gustine toplotnog fluksa (q):

$$q = \frac{d\Phi}{dS} = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx}$$

16

Prenošenje toplote provođenjem (kondukcijom)

Nestacionarno provođenje toplote - II Furijeov zakon

Pri provođenju toplote kroz neko telo, ono može da se zagreva ili hlađi, zbog čega se temperatura tela menja.

U telu mogu postojati i unutrašnji toplotni izvori, gde se neka druga vrsta energije pretvara u toplotnu energiju.

Primeri:

- hemijska reakcija (hidratacija cementa) ili
- proticanje električne struje.

U ovakvim slučajevima temperatursko polje nije stacionarno nego promenljivo (nestacionarno).

17

Prenošenje toplote provođenjem (kondukcijom)

Nestacionarno provođenje toplote - II Furijeov zakon

Radi pojednostavljenja određivanja funkcije raspodele temperature u prostoru i vremenu, uvode se sledeće prepostavke:

- ❖ Telo je homogeno i izotropno,
- ❖ Fizički parametri tela su konstantni (λ - koeficijent toplotne provodljivosti, ρ - gustina tela i c - specifična toplota tela),
- ❖ Promena posmatrane zapremine tela usled temperaturske promene je zanemarljiva,
- ❖ Toplotni fluks je jednodimenzionalan u pravcu x-ose.

18

Prenošenje topline provođenjem (kondukcijom)

Nestacionarno provođenje topline - II Furijeov zakon

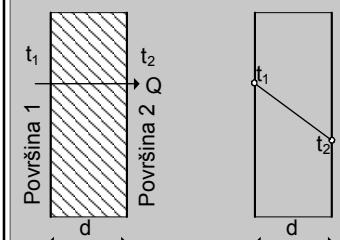
Sa ovim pretpostavkama, izraz za II Furijeov zakon glasi:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \frac{d^2 t}{dx^2}$$

19

Provođenje topline kroz jednoslojan ravan zid

ili po standardu SRPS UJ.5.510: provođenje topline kroz homogenu građevinsku konstrukciju



Pošto je $t_1 \neq t_2$, doći će do prenošenja topline.

Ravan zid

Homogen materijal, debljine d,
Granične površ. su izotermeske površine sa temp. t_1 i t_2
Tokom vremena se ne menjaju (stacionarno polje).

20

Provođenje topline kroz jednoslojan ravan zid

Prema Fourier-u, koji je prvi postavio teoriju provođenja topline, može se napisati:

$$Q = \frac{S}{d} \lambda (t_1 - t_2) \tau \quad (J) \text{ ili } (Ws)$$

Količina topline koja se prenese provođenjem kroz ravan homogen zid upravo je proporcionalna:

- površini preko koje se prenosi (S),
- koeficijentu toplotne provodljivosti (λ),
- temperaturnoj razlici ($t_1 - t_2$) i
- vremenu (τ), a obrnuto proporcionalna debljini zida (d).

21

Provođenje topline kroz jednoslojan ravan zid

Iz prethodnog izraza može se odrediti vrednost koeficijenta toplotne provodljivosti:

$$\lambda = \frac{Qd}{S(t_1 - t_2)\tau} \quad \left(\frac{W}{mK} \right)$$

Koeficijent toplotne provodljivosti predstavlja količinu topline koja se prenese provođenjem:

- ✓ kroz zid debljine 1m,
- ✓ preko površine od $1m^2$,
- ✓ pri temperaturnoj razlici od 1° ,
- ✓ u vremenskom periodu od 1h.

22

Provođenje topline kroz jednoslojan ravan zid

Vrednost koeficijenta toplotne provodljivosti je eksperimentalno određena za sve vrste građevinskih materijala, a zavisi od:

- ❖ vrste i strukture materijala,
- ❖ zapreminske mase materijala (poroznosti) i
- ❖ vlažnosti.

23

Provođenje topline kroz jednoslojan ravan zid

Materijal	Mermer	Pod. ker. pločice	Obična opeka	Šuplja opeka	Normalni beton
γ_z (kg/m ³)	2850	2300	1800	1400	2500
λ (W/mK)	3.5	1.28	0.76	0.61	2.33

Materijal	Cem. estrih	Termoiz. malter	Drvo (hrast)	Miner. vuna	Stiropor
γ_z (kg/m ³)	2200	600	700-800	30-200	15-30
λ (W/mK)	1.40	0.19	0.21	0.041	0.035

24

Provodenje toplote kroz jednoslojan ravan zid

Uместо kolicine toplote Q jednostavnije je koristiti topotni fluks Φ , koji predstavlja kolicinu toplote u jedinici vremena.

$$\Phi = \frac{Q}{\tau} = \frac{S}{d} \lambda (t_1 - t_2) \quad (\text{W})$$

Ovaj izraz se može pojednostaviti uvođenjem specifičnog topotnog fluksa q , koji predstavlja topotni fluks na jedinicu površine.

$$q = \frac{\Phi}{S} = \frac{\lambda}{d} (t_1 - t_2) = \frac{t_1 - t_2}{\frac{d}{\lambda}} \quad (\text{W/m}^2)$$

25

Provodenje toplote kroz jednoslojan ravan zid

U gornjem izrazu d/λ predstavlja otpor provodenju toplote i obeležava se sa R , pa se dobija:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{R}$$

Ovaj izraz odnosi se na provodenje toplote samo kroz zid.

Arhitektonski objekti i elementi objekata se uvek nalaze u nekom medijumu (vazduh, voda) čija se temperatura razlikuje od od temperature površina zida, pa je zato prilikom termičkog proračuna potrebno uzeti u obzir i temperature i otpore na granicama između medijuma i čvrstog tela.

26

Provodenje toplote kroz jednoslojan ravan zid

Ako se uvedu oznake:
unutrašnja temperatura vazduha

$$t_i$$

spoljašnja temperatura vazduha

$$t_e$$

koeficijent prelaza toplote za
unutrašnju stranu elementa

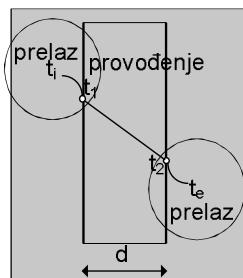
$$\alpha_i$$

koeficijent prelaza toplote za
spoljašnju stranu elementa

$$\alpha_e$$

...

27



Provodenje toplote kroz jednoslojan ravan zid

... onda je izraz za specifičan topotni fluks:

$$q = \frac{t_i - t_e}{\frac{1}{\alpha_i} + R + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{t_i - t_e}{R_i + R + R_e} = \frac{t_i - t_e}{R_k}$$

gde je:

R_k - ukupan otpor prenošenju toplote

$$R_k = R_i + R + R_e \quad (\text{m}^2\text{K/W})$$

28

Provodenje toplote kroz jednoslojan ravan zid

Recipročna vrednost ukupnog otpora R_k predstavlja koeficijent prolaza toplote k :

$$k = \frac{1}{R_k} \quad (\text{W/m}^2\text{K})$$

Maksimalne vrednosti ovog koeficijenta (k) definisane su standardom SRPS U.J5.600 za različite tipove konstrukcija i za tri klimatske zone.

Novi Sad je u II klimatskoj zoni sa srednjom vrednošću najnižih godišnjih temperatura od -18°C .

29

Provodenje toplote kroz jednoslojan ravan zid

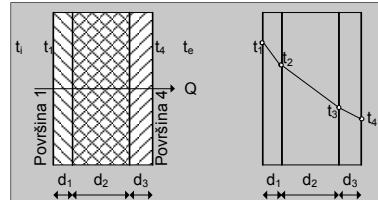
Najveće dozvoljene vrednosti
koeficijenta prolaza toplote - k

Tip konstrukcije	Građevinske klimatske zone			R_i i R_e
	I	II	III	
Spoljni zid	1.10	0.90	0.80	0.13, 0.04
Ravan krov iznad grejane prostorije	0.50	0.45	0.40	0.10, 0.04
Unutrašnji zid prema negrejanom stepeništu	1.0	0.80	0.70	0.13, 0.11
Međuspratna konstrukcija ispod negrejanog prostora	0.95	0.80	0.70	0.10, 0.08
Zid u tlu	0.90	0.90	0.90	0.13, 0.00

30

Provodenje toplote kroz višeslojan ravan zid

ili po standardu SRPS UJ.5.510: provodenje toplote kroz građevinsku konstrukciju sastavljenu od više homogenih slojeva



Ravan zid se sastoji od 3 sloja.

Sve granične površine predstavljaju izotermeske površine sa temperaturama t_1 , t_2 , t_3 i t_4 .

Tokom vremena temp. se ne menjaju ($q = \text{const.}$ - stac. polje).

Provodenje toplote kroz višeslojan ravan zid

Specifični toplotni fluks za svaki pojedinačni sloj i za konstrukciju u celini, je:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{d_1}{\lambda_1}} = \frac{t_2 - t_3}{\frac{d_2}{\lambda_2}} = \frac{t_3 - t_4}{\frac{d_3}{\lambda_3}} = \frac{t_1 - t_4}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} \quad (\text{W} / \text{m}^2)$$

Za konstrukciju koja se sastoji od "n" slojeva, specifični toplotni fluks je:

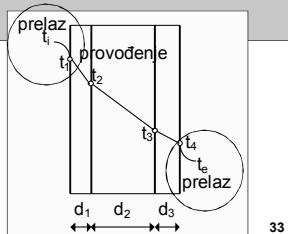
$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{d_i}{\lambda_i}} = \quad (\text{W} / \text{m}^2)$$

32

Provodenje toplote kroz višeslojan ravan zid

Kada se u obzir uzmu i temperature vazduha spolja i unutra, dobija se:

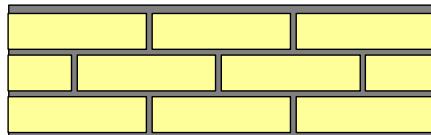
$$q = \frac{t_i - t_e}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{t_i - t_e}{R_i + R + R_e} = \frac{t_i - t_e}{R_k} \quad (\text{W} / \text{m}^2)$$



33

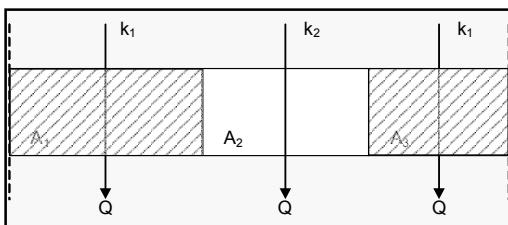
Provodenje toplote kroz građevinske konstrukcije jednostavne heterogenosti

Pod građevinskom konstrukcijom jednostavne heterogenosti podrazumeva se konstrukcija čije se karakteristike menjaju upravno na pravac prostiranja topline.



34

Provodenje toplote kroz građevinske konstrukcije jednostavne heterogenosti



U konkretnom slučaju razlikuju se dva koeficijenta prolaza topline:

k_1 i k_2 ,

sračunata za karakteristične preseke konstrukcije.

35

Provodenje toplote kroz građevinske konstrukcije jednostavne heterogenosti

Zamenjujući (srednji) koeficijent prolaza topline "k" čitave konstrukcije ili elementa, određuje se:

$$k = \frac{A_1 k_1 + A_2 k_2 + A_3 k_1}{A_1 + A_2 + A_3}$$

Zamenjujući koeficijent prolaza topline za konstrukciju sa više različitih slojeva je:

$$k = \frac{\sum A_j k_j}{\sum A_j}$$

36

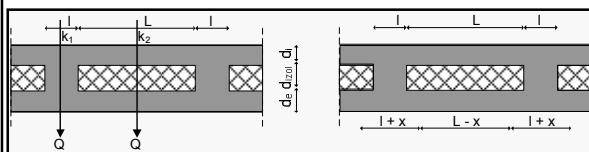
Provodenje toplote kroz građevinske konstrukcije složene heterogenosti

Pod građevinskom konstrukcijom složene heterogenosti podrazumeva se konstrukcija prikazana na narednoj slici, čije se karakteristike takođe menjaju upravno na pravac prostiranja toplote

Primer: Prefabrikovani AB elementi sa ugrađenim termoizolacionim slojem.

37

Provodenje toplote kroz građevinske konstrukcije složene heterogenosti



Zamenjujući koeficijent prolaza toplote "k" računa se na isti način kao i kod konstrukcije jednostavne heterogenosti, s tim da se prethodno poveća računska vrednost površine skeleta ($l+x$), a za jednak iznos smanji površina tipičnog preseka konstrukcije ($L-x$).

38

Provodenje toplote kroz građevinske konstrukcije složene heterogenosti

Vrednost "x", je definisana na dijagramu (standard SRPS U.J5.510), kao funkcija:

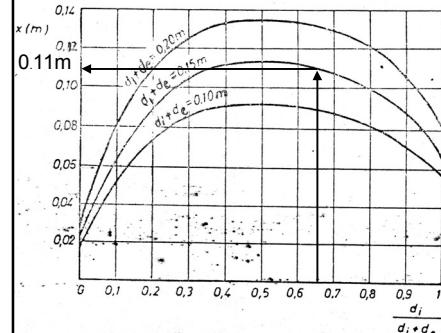
ukupne debeline betona $(d_i + d_e)$ i

$$\text{odnosa } \frac{d_i}{d_i + d_e}$$

Uz ivice arhitektonskih konstrukcija povećanje i smanjenje širina uzima se sa " $x/2$ ".

39

Provodenje toplote kroz građevinske konstrukcije složene heterogenosti



Primer:
 $d_i = 0.10m$
 $d_e = 0.05m$
 $(d_i + d_e) = 0.15m$

$$\frac{d_i}{d_i + d_e} = 0.67$$

40

Provodenje toplote kroz građevinske konstrukcije složene heterogenosti

Ova metoda proračuna može se koristiti samo ako su zadovoljena sledeća dva uslova:

- ❖ Da je vrednost koeficijenta toplotne provodljivosti "λ" materijala termoizolacionog sloja manja od 0.06 W/mK
- ❖ Da je srednja udaljenost "L" između skeleta bar tri puta veća od širine skeleta "l" ($L \geq 3l$)

41