

Ministarstvo ekonomije CG & GTZ

Obuka lica za vršenje energetskih pregleda i sertifikovanje zgrada

Mašinski fakultet i Arhitektonski fakultet UCG

Podgorica, 02.03.2011.

ARHITEKTONSKI PARAMETRI EEZ – DIFUZIJA VODENE PARE:
PARAMETRI I METODA PRORAČUNA
[Arhitektura_2d]

Prof. dr Dušan Vuksanović, dipl.inž.arh.

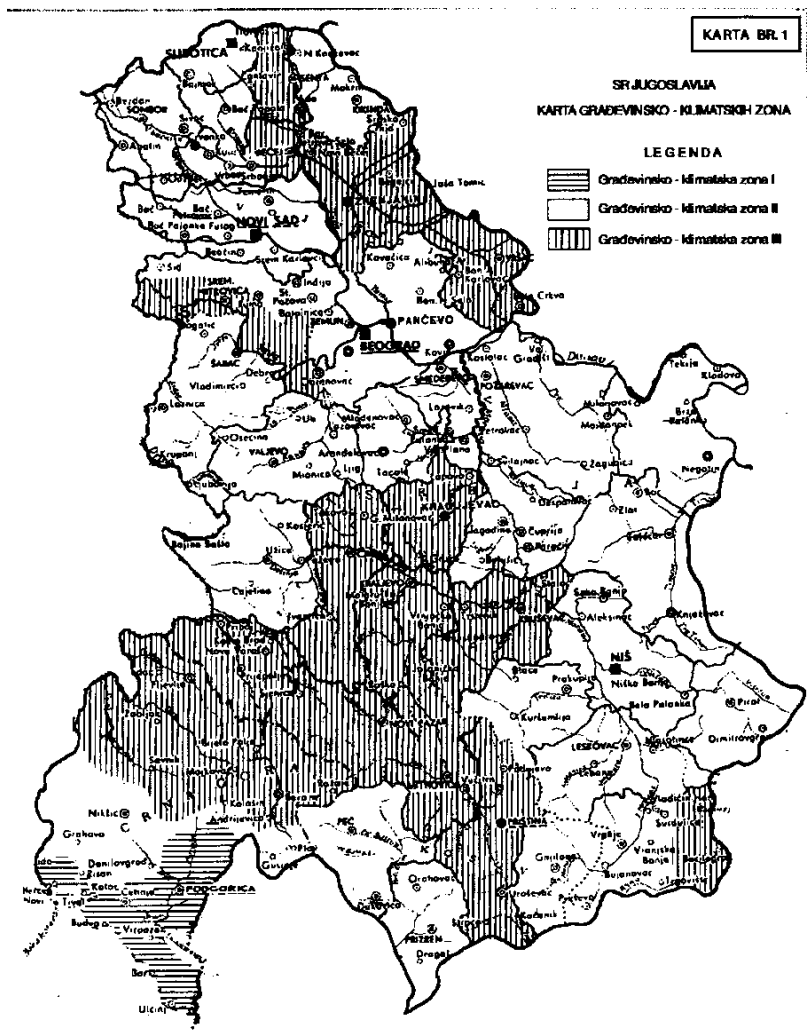
Arhitektonski fakultet u Podgorici

Termička zaštita i propisi (JUS standardi)

- **JUS standardi** – još uvijek u praksi važeći propisi koji regulišu pitanje toplotne zaštite objekata:
 1. **JUS.U.J5.600** – Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada (1998)
 2. **JUS.U.J5.510** – Metode proračuna koeficijenta prolaza toplote u zgradama (1987)
 3. **JUS.U.J5.520** – Proračun difuzije vodene pare u zgradama (1997)
 4. **JUS.U.J5.530** – Proračun faktora prigušenja i proračun kašnjenja oscilacija temperature kroz spoljašnje građevinske pregrade zgrada u ljetnjem razdoblju (1997)

JUS U.J5.: klimatske zone i spoljne projektne temperature

Karta br.1: Karta građevinsko-klimatskih zona



Karta br. 2: Karta spoljnih projektnih temperatura



Algoritam provjere pojedinačnih građevinskih konstrukcija

1. korak

- **Proračun koeficijenta prolaza toplote k (U)**

- $k(U) < k_{\text{dozv}}$

- zahtjev ispunjen – prelazi se na sljedeći korak
- zahtjev nije ispunjen – konstrukcija ne zadovoljava postavljeni zahtjev i iziskuje korekciju

2. korak

- **Postojanje površinske kondenzacije**

- (temperatura unutraš. pov. građ.kon.) $\theta_i > t_r$ (temperatura rošenja – tačka rose)

- zahtjev ispunjen – prelazi se na sljedeći korak
- zahtjev nije ispunjen – konstrukcija ne zadovoljava postavljeni zahtjev i iziskuje korekciju

Algoritam provjere pojedinačnih građevinskih konstrukcija

3. korak

- **Proračun difuzije vodene pare**

- a. *Da li ima kondenzata?*

- nema – prelazi se na sljedeći korak
 - ima – konstrukcija ne zadovoljava postavljeni zahtjev i iziskuje dalju provjeru:

- b. *Proračun upijanja kondenzata*

- Da li konstrukcija može da upije kondenzat?
 - može – prelazi se na sljedeći korak
 - ne može – konstrukcija ne zadovoljava postavljeni zahtjev i iziskuje dalju provjeru:

- c. *Proračun ljetnjeg isušenja konstrukcije*

- Da li kondenzat može da se isuši tokom ljetnjeg perioda (isušenja)?
 - može – prelazi se na sljedeći korak
 - ne može – konstrukcija ne zadovoljava postavljeni zahtjev i iziskuje korekciju

Algoritam provjere pojedinačnih građevinskih konstrukcija

4. korak

a. Proračun faktora prigušenja amplitude oscilacije temperature

- $v > v_{\min}$
- zahtjev ispunjen – prelazi se na sljedeći korak
- zahtjev nije ispunjen – konstrukcija ne zadovoljava postavljeni zahtjev i iziskuje korekciju

b. Provjera kašnjenja oscilacije temperature

- $\eta > \eta_{\min}$
- zahtjev ispunjen – konstrukcija zadovoljava uslove standarda
- zahtjev nije ispunjen – konstrukcija ne zadovoljava postavljeni zahtjev i iziskuje korekciju

Difuzija vodene pare

- **Ukoliko su paropropustljivi**, slojevi građevinskih materijala se ponašaju kao **porozne membrane** – tokom procesa difuzije uspostavlja se kretanje vodene pare kroz membranu – od gušće ka rjeđoj sredini.
 - **JUS definiše difuziju vodene pare** kao strujanje vodene pare kroz neki pregradni element ili materijal usljed razlike u koncentraciji vodene pare, odnosno usljed razlike parcijalnih pritisaka vodene pare (koji vladaju na unutrašnjoj i spoljašnjoj strani spoljašnje pregrade - konstrukcije).
 - **U našim klimatskim uslovima**, karakteristična je difuzija vodene pare kroz elemente omotača zgrade u zimskim uslovima → **smjer kretanja molekula vodene pare:**
unutra → spolja (!)
- **Uslovi za proračun difuzije (primjer)**
- **unutra (II k.z.)**
 - projektna temperatura (unutraš.vazduha): 20°C
 - relativna vlažnost (unutraš.vazduha): 60%
 - parcijalni pritisak vodene pare 1,402 kPa
 - **spolja (II k.z.):**
 - projektna temperatura (spoljaš.vazduha) -5°C
 - relativna vlažnost (spoljaš.vazduha) 90%
 - parcijalni pritisak vodene pare 0,361 kPa

Difuzija vodene pare: parametri – pregled

- Prema standardu, **proračun difuzije vodene pare** vrši se:
 - ✓ za spoljašnje građevinske pregrade, kao i
 - ✓ za građevinske pregrade kod kojih je razlika parcijalnih pritisaka sa obje strane pregrade veća od 500kPa

Parametri difuzije vodene pare

- Q_m količina difundovane vodene pare kroz neku površinu **A**
- δ koeficijent provodljivosti vodene pare: količina vodene pare u kg koja za jedan čas prođe kroz materijal jedinične površine i debljine, ako je razlika u koncentraciji pare na različitim površinama materijala 1kPa
- ϕ_m difuzijski protok ili fluks vodene pare: količina vodene pare koja u jedinici vremena prođe kroz neku površinu (brzina difuzije)
- **gm (qm)** gustina difuzijskog protoka: masa vodene pare koja se u jedinici vremena difunduje u smjeru upravnom na jedinicu površine

Difuzija vodene pare: parametri – pregled (2)

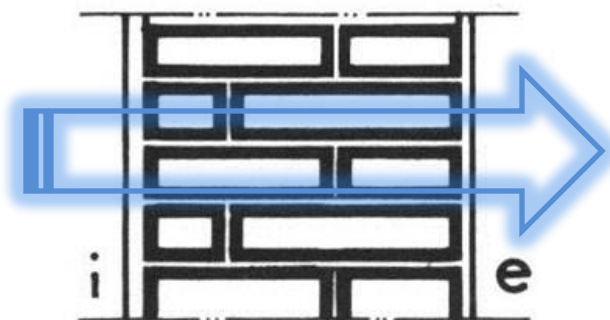
- Δ koeficijent propustljivosti vodene pare: specifičan protok vodene pare kroz neki element debljine d , ukoliko postoji jedinična razlika parcijalnih pritisaka sa njegovih dviju strana
- $1/\Delta$ otpor difuziji vod. pare (analogija sa provođenjem toplote)
- μ koeficijent (faktor) otpora difuziji vodene pare – svojstvo nekog materijala (!)
- r relativni (ekvivalentni) difuzni otpor vodene pare = debljina vazdušnog sloja iste vrijednosti otpora difuziji – svojstvo konstrukcije (!!)

Difuzija vodene pare

- u našim klimatskim uslovima, **karakteristična** je difuzija vodene pare kroz materijale i elemente omotača zgrade **u zimskim uslovima**.

➤ smjer kretanja molekula vodene pare (zimi)

unutra (i)



spolja (e)

projektana temperatura: **+20°C**

relativna vlažnost: **60%**

parcijalni pritisak: **1,402 KPa**

(II klimatska zona)

projektana temperatura: **-5°C**

relativna vlažnost: **90%**

parcijalni pritisak: **0,361 KPa**

Parametri difuzije vodene pare

a. Q_m – količina difundovane vodene pare kroz neku površinu A

$$Q_m = \frac{\delta \cdot A \cdot \Delta\tau \cdot \Delta p}{d} \quad \text{odnosno} \quad \delta = \frac{Q_m \cdot d}{A \cdot \Delta\tau \cdot \Delta p} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}} \right]$$

δ – koeficijent provodljivosti vodene pare

količina vodene pare u kg koja za jedan čas prođe kroz materijal jedinične površine i debljine, ako je razlika u koncentraciji pare na različitim površinama materijala 1kPa

Parametri difuzije vodene pare

- b.** Φ_m - difuzijski fluks ili protok vodene pare

količina vodene pare koja u jedinici vremena prođe kroz neku površinu (brzina difuzije)

$$\varphi_m = \frac{Q_m}{\Delta\tau} = \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

- c.** $g_m (q_m)$ – gustina difuzijskog protoka

masa vodene pare koja se u jedinici vremena difunduje u smjeru na jedinicu površine

$$g_m(q_m) = \frac{\varphi_m}{A} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right]$$

- d.** Δ – koeficijent propustljivosti vodene pare

specifični protok vodene pare kroz neki element debljine d ukoliko postoji jedinična razlika parcijalnih pritisaka sa njihovih dviju strana

$$\Delta = \frac{\delta}{d} = \frac{g_m}{\Delta p} = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{KPa}} \right]$$

Parametri difuzije vodene pare

- e. k_D – koeficijent prolaza vodene pare kroz građevinski element:

$$k_D = \Delta = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}} \right]$$

- otpor difuziji (analogija sa provođenjem toplote)

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{\Delta p}{g_m} = \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}}{\text{kg}} \right]$$

Napomena: Kako je otpor prelaza vodene pare veoma mali, zanemaruje se, pa je otpor difuzijskom prolazu jednak otporu difuzijske propustljivosti vodene pare

Parametri difuzije vodene pare

- f. koeficijent (faktor) otpora difuziji vodene pare – μ

$$\mu = \frac{\delta_z}{\delta} [-]$$

svojstvo materijala!!

- g. relativni (ekvivalentni) difuzni otpor vodene pare = debljina vazdušnog sloja iste vrijednosti otpora – r

$$r = \mu \cdot d [m]$$

svojstvo konstrukcije!!

Vlažnost vazduha – pojam i parametri

Vlažnost vazduha – količina vode u obliku vodene pare u vazduhu koja je uvijek uslovljena temperaturom.

Parametri koji definišu vlažnost vazduha:

Apsolutna vlažnost vazduha (m) predstavlja masu vodene pare u gramima koja je sadržana u 1 m³ vazduha.

Relativna vlažnost vazduha (φ) predstavlja odnos između **apsolutne vlažnosti** (m) i **vlažnosti zasićenja** (M) (maksimalne moguće vlažnosti koju bi vazduh mogao imati na datoj temperaturi, do zasićenja). Izražava se u procentima.

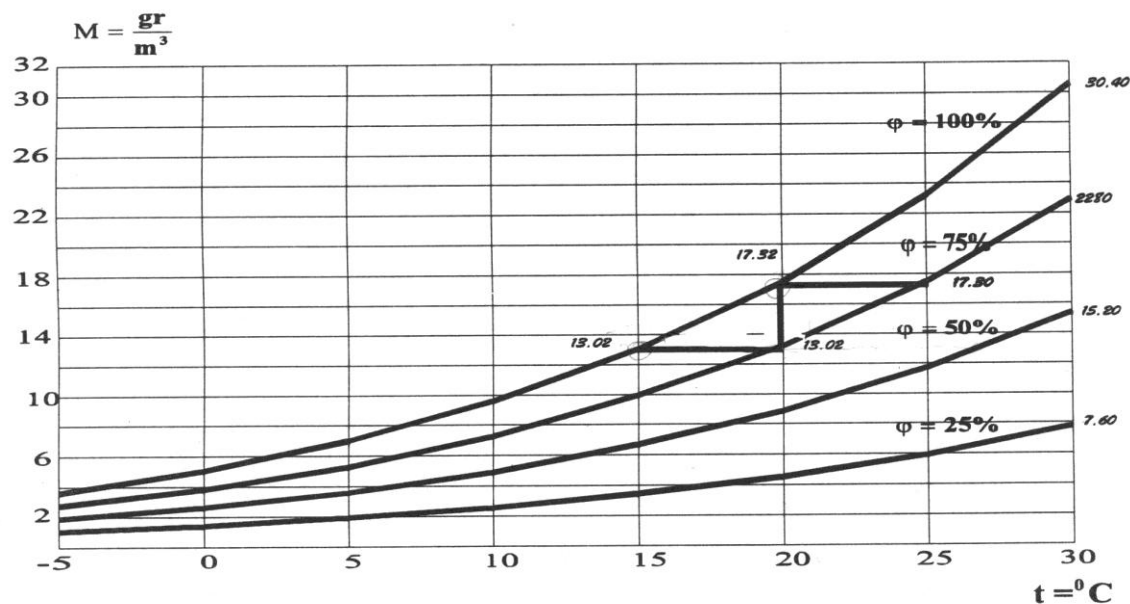
<i>apsolutna vlažnost</i>	m [g/m ³]	<i>parcijalni pritisak vodene pare</i>	p [kPa]
<i>vlažnost zasićenja</i>	M [g/m ³]	<i>pritisak zasićenja</i>	p' [kPa]

Relativna vlažnost vazduha

$$\varphi = \frac{m}{M} [\%] = \frac{p}{p'} [\%]$$

Vlažnost vazduha – pojam i parametri

Tačka rose - temperatura na kojoj određena količina vodene pare u m^3 vazduha (apsolutna vlažnost) predstavlja vlažnost zasićenja



Odnos između temperature i količine vodene pare u m^3 vazduha (njenog parcijalnog pritiska) je upravo proporcionalan!

Difuzija i kondenzacija vodene pare

- **Neophodni koraci za utvrđivanje postojanja i mjesta kondenzacije unutar konstrukcije - *rezime***
 1. utvrditi relevantne podatke za realne klimatske uslove i odgovarajuću namjenu objekta
 $t_i' = 20^{\circ}\text{C}$, $i \phi_i = 60\%$
Broj dana vlaženja 60
 2. odrediti pad temperature kroz element (po slojevima)
 3. za svaku od definisanih temperatura, utvrditi pritiske zasićenja (prema tabeli iz standarda)
 4. polazeći od projektnih uslova u pogledu unutrašnjih i spoljašnjih temperatura i relativne vlažnosti vazduha sa jedne i sa druge strane elementa omotača, računski i grafički utvrditi parcijalni pritisak v.p. kroz građevinski element
 5. izračunati vrijednosti ekvivalentne debljine
 6. utvrditi dijagram difuzije

Koraci za utvrđivanje nastajanja i mjesta kondenzacije unutar konstrukcije

1. Utvrditi relevantne podatke za realne klimatske uslove i odgovarajuću namjenu objekta (*Tabela 10*; JUS U.J5.600)

Građevinska klimatska zona	I	II	III
Spoljašnja temperatura	5°	-5°	-10°
Spoljašnja relativna vlažnost	90%	90%	90%
Broj dana vlaženja	60	60	60

$$t_i' = 20^{\circ}\text{C}$$

$$\phi_i = 60\%$$

Koraci za utvrđivanje **nastajanja i mjesta kondenzacije** unutar konstrukcije

2. Odrediti **pad temperature kroz slojeve** konstrukcije (za odg. spolj. temperaturu za proračun difuzije, *Tabela 10*; JUS U.J5.600)

$$\Delta T_j = \frac{T_i - T_e}{R_k} \cdot R_j$$

3. za svaku od definisanih temperatura, utvrđuju se **pritisci zasićenja** (prema tabeli iz standarda)

Koraci za utvrđivanje **nastajanja** i **mjesta kondenzacije** unutar konstrukcije

4. polazeći od projektnih uslova u pogledu unutrašnjih spoljašnjih temperatura i relativne vlažnosti vazduha sa jedne i sa druge strane omotača, **računski** i **grafički** se određuje parcijalni pritisak kroz građevinsku konstrukciju

$$g_m = \frac{\Delta p}{\sum_1^n r_j}$$

$$\Delta p = p_i - p_e$$

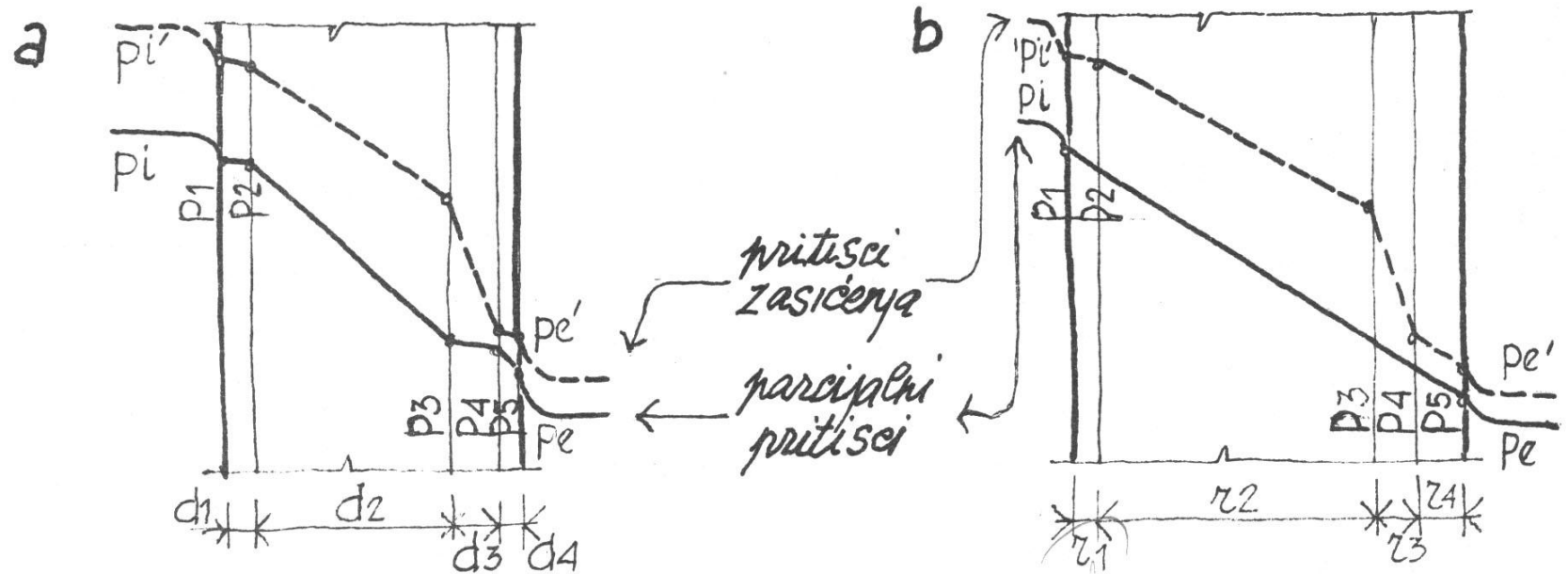
$$\Delta p_j = \frac{\Delta p}{\sum_1^n r} \cdot r_j$$

5. Izračunavaju se vrijednosti ekvivalentne debljine

$$r_i = d_i \cdot \mu_i [m]$$

Koraci za utvrđivanje nastajanja i mjesta kondenzacije unutar konstrukcije

6. utvrditi dijagram difuzije



Koraci za utvrđivanje nastajanja i mjesta kondenzacije unutar konstrukcije

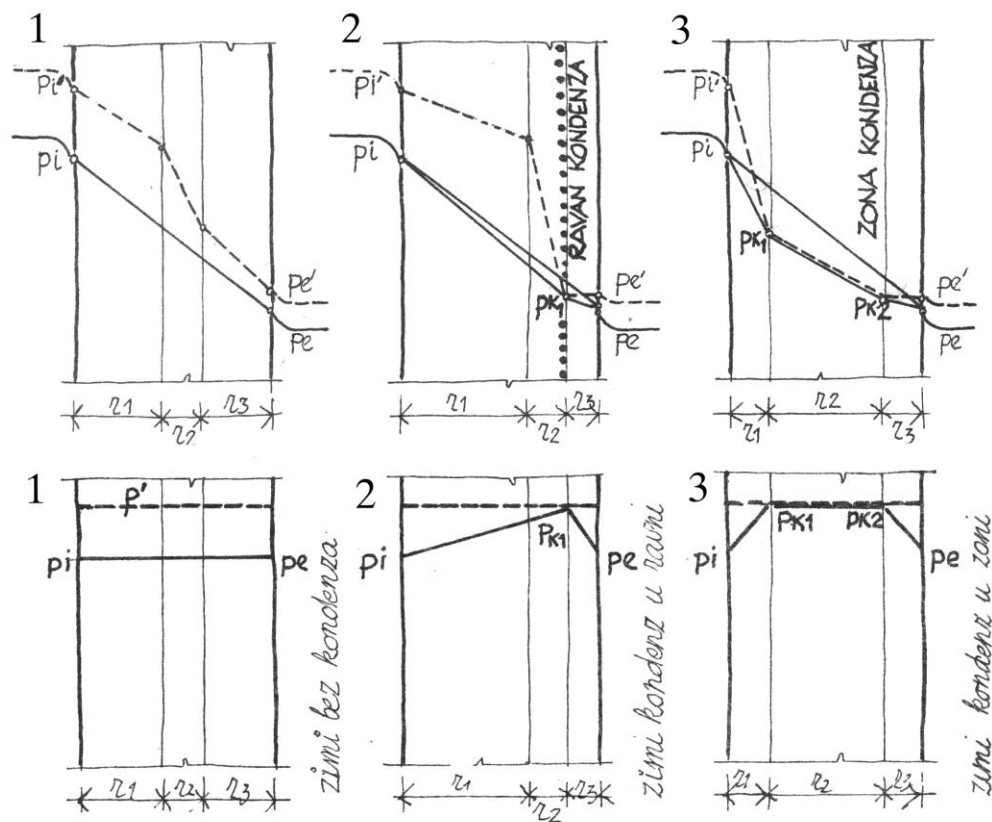
➤ Karakteristični slučajevi

pojave difuzije u građevinskim konstrukcijama:

1. bez kondenza u posmatranom elementu / konstrukciji: kriva pritiska zasićenja *nema tačaka presjeka* sa krivom parcijalnih pritiska v.p.

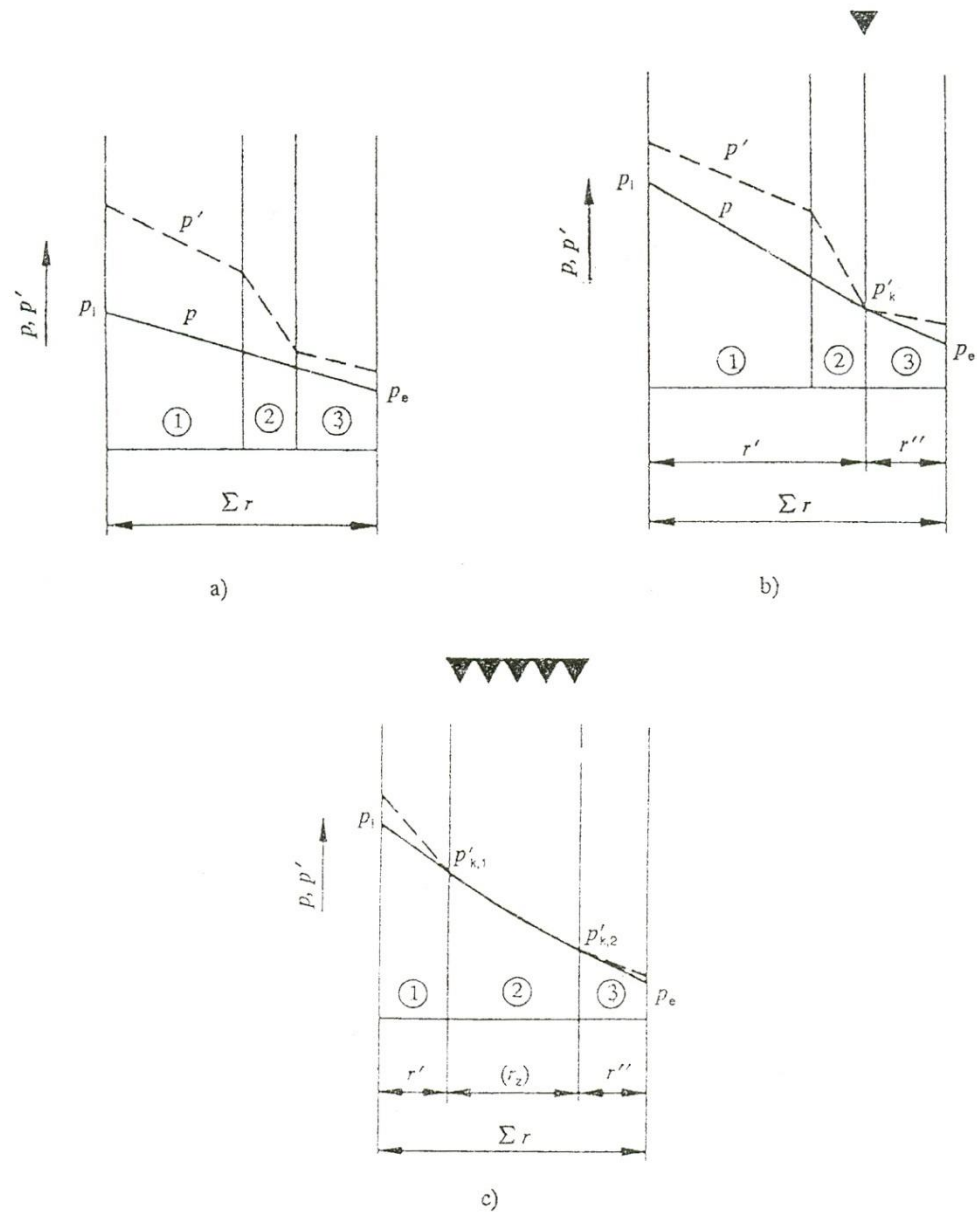
2. kondenz u ravni konstrukcije: kriva pritiska zasićenja *ima 1 tačku presjeka* sa krivom parcijalnih pritiska v.p.

3. kondenz u zoni konstrukcije: kriva pritiska zasićenja *ima 2 tačke presjeka* sa krivom parcijalnih pritiska v.p.



Koraci za utvrđivanje nastajanja i mjesta kondenzacije unutar konstrukcije

- dalji koraci direktno zavise od toga da li i na koji način postoji kondenzacija u konstrukciji:
- bez kondenza u posmatranom elementu/ konstrukciji (1/a) – *konstrukcija zadovoljava zadate uslove*
- ✓ kondenz u ravni kondenzacije (2/b)
- ✓ kondenz u zoni kondenzacije (3/c)
- *javlja se kondenzat – slučajevi 2/b i 3/c:*
 - izračunati masu kondenzata po jedinici površine u toku “**z**” dana kondenzacije (**z** = 60 dana prema Tabeli 10);
 - provjeriti da li materijal u sloju u kojem se dešava kondenzacija može da podnese količinu kondenzovane vlage bez posljedica po konstrukciju;
 - provjeriti da li konstrukcija može da se isuši u roku standardom definisanom.



Koraci za utvrđivanje **nastajanja i mjesta kondenzacije** unutar konstrukcije

- **dozvoljeno vrijeme isušenja** konstrukcije u danima, po građevinskim klimatskim zonama (*Tabela 4; JUS U.J5.600*)

Klimatska zona	I	II	III
Dozvoljeno vrijeme isušenja konstrukcije tokom ljetnjeg razdoblja	120	90	60

$$t_i = t_e = 18^{\circ}\text{C}$$

$$\phi_i = \phi_e = 65 \%$$

Difuzija vodene pare – opšte karakteristike

- Ponašanje materijala u odnosu na vodenu paru:
 - Difuzija ne izaziva štetne posljedice po građevinske materijale i elemente sve dok je smjer difuzijskog transporta nepromjenljiv (stacionaran), osim ukoliko nije došlo do kondenzacije vodene pare.

Kondenzacija se javlja:

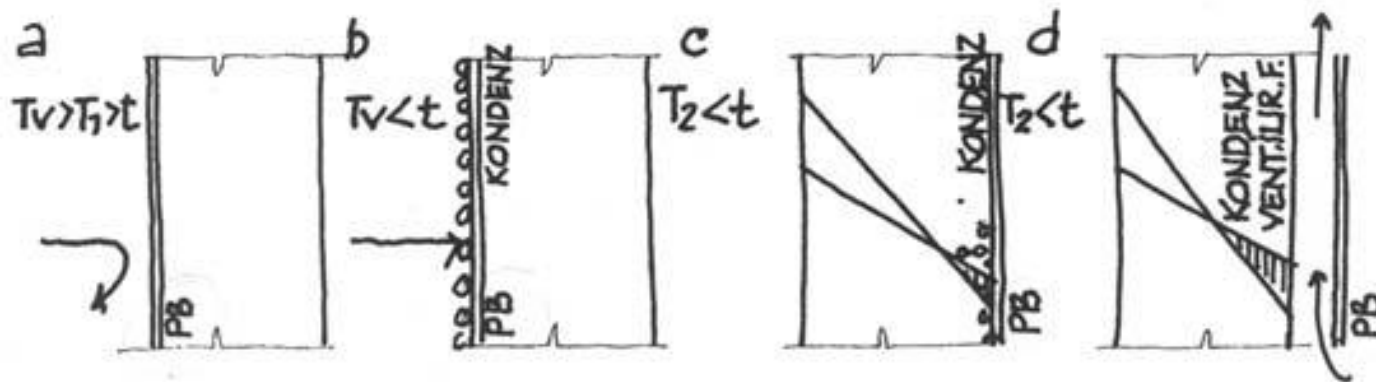
- kada je vazduh zasićen vodenom parom, a dođe do dodatnog povećanja koncentracije vodene pare;
- kada se vazduh zasićen vodenom parom naglo ohladi.

Difuzija vodene pare – karakteristike građevinskih materijala i kriterijumi u odnosu na difuziju

- **Problemi difuzije i kondenzacije vodene pare u direktnoj su sprezi sa paropropustljivošću materijala!!!**
- **Posljedice difuzije vodene pare u građevinskim materijalima i elementima:**
 - **Standard ne dozvoljava površinsku kondenzaciju** za date unutrašnje projektne uslove i uslove u spoljnjoj sredini.
 - **Kondenzacija u unutrašnjosti konstrukcije je dozvoljena pod uslovom da je:**
 - vrijeme potrebno za njeno isušenje kraće od dopuštenog vremena potrebnog za isušenje konstrukcije (prema tabeli u standardu),
 - ukupna masena vlažnost manja od najveće dozvoljene vlažnosti za materijal u kome je nastala kondenzacija.

Difuzija i kondenzacija vodene pare – mjere za sprječavanje negativnih posljedica

- Sprječavanje negativnih posljedica difuzije / kondenzacije djelovanjem na:
 - temperaturu unutrašnjih površina – **povećanjem temperature unutraš. površina pregrada**
 - mogućnost difuzije vodene pare – **postavljanjem paronepropusnih slojeva (parnih brana), i kontrolom izvođenja vodene pare iz konstrukcije**
 - stepen relativne vlažnosti (unutraš.vazduha) – **ograničavanjem isparavanja ili intenziviranjem provjetravanja**



Difuzija i kondenzacija vodene pare – **položaj TI i PB**

- **Za naše klimatske uslove**, kao opšte načelo za rješavanje problema difuzije vodene pare kod višeslojnih konstrukcija važi da:
 - **otpor prolazu toplote** svih slojeva **treba da raste** idući od unutrašnje prema spoljašnjoj strani (**TI je spolja**), a da istovremeno
 - **otpори difuziji vodene** pare **opadaju** od unutrašnje prema spoljašnjoj strani (**PB je unutra**)