

# ENERGETSKE KARAKTERISTIKE ZGRADA PREMA EN ISO 13790

---

# HIGROTHERMALNE KARAKTERISTIKE GRAĐEVINSKIH ELEMENTATA PREMA EN ISO 13788

---

**Difuzija vodene pare**

**Površinska temperatura kojom se izbjegava kritična  
površinska vlažnost**

**Proračun kondenzacije**

## VAZDUH, VODA, VODENA PARA

Vazduh uvijek sadrži određenu količinu vodene pare koja tu dopijeva usljed isparavanja.

Brzina isparavanja sa vodenih površina i vlažnih predmeta raste sa porastom temperature. Zavisí i od strujanja vazduha i postojeće količine vodene pare u vazduhu.

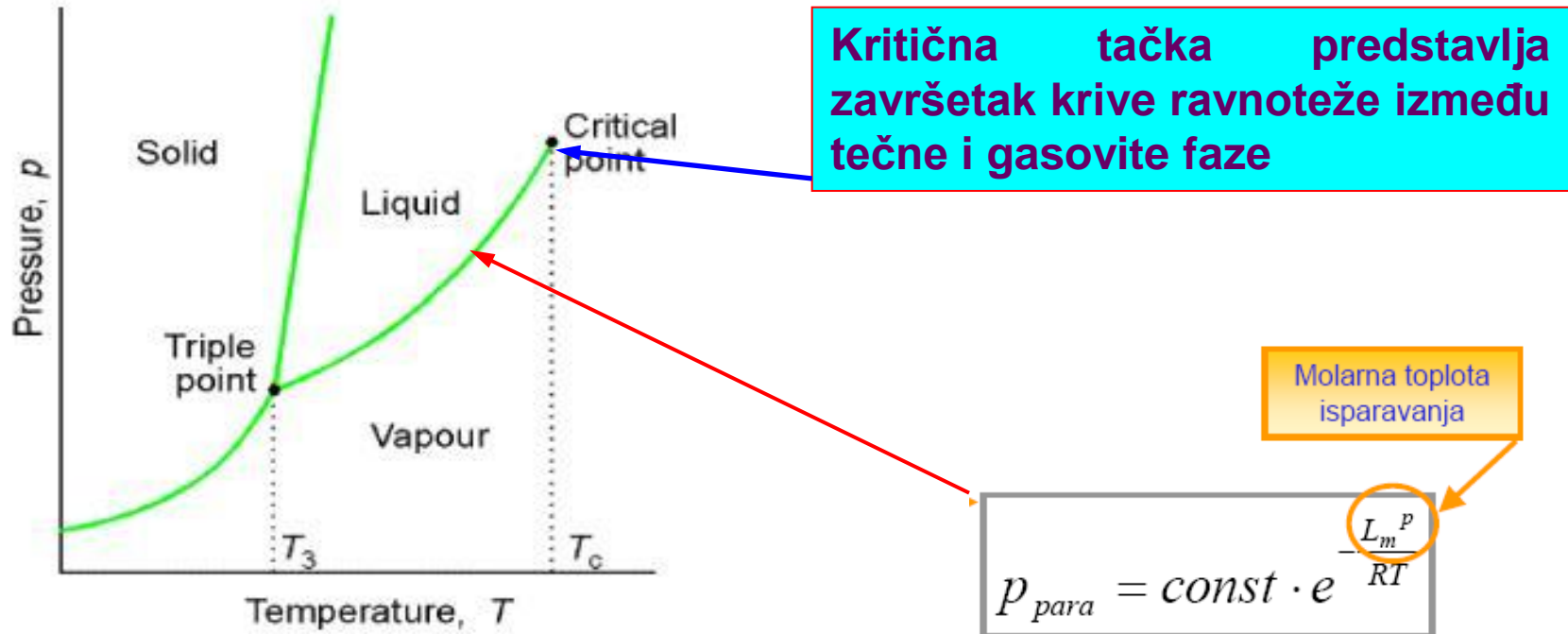
Sadržaj vodene pare u vazduhu ima veliki uticaj na uslove komfora u životnom prostoru.

Prekomjerni sadržaj vodene pare, kao i previše isušen vazduh mogu negativno uticati na zdravlje ljudi.

Jedna od najnepoželjnijih pojava koje nastaju usljed prisustva vlage je pojava buđi na površinama zidova.



## Dijagram stanja vode u zavisnosti od temperature i pritiska



Uticaj vlage na elemente zgrade i životni prostor, u vezi je sa promjenom stanja vode, koje zavisi od pritiska i temperature.

## Apsolutna i relativna vlažnost vazduha

**Apsolutna vlažnost** predstavlja količinu vodene pare sadržanu u  $1\text{m}^3$  vazduha na određenoj temperaturi. Uvodi se oznaka  $v$  koja prema EN ISO 13788 označava vlažnost vazduha po zapremini.

**Relativna vlažnost** predstavlja odnos stvarne količine vodene pare i maksimalne količine vodene pare koju vazduh može da primi na toj temperaturi ( $v_{sat}$  - vlažnost zasićenja), a da pri tome ne dođe do kondenzacije, odnosno pojave rose.

**Relativna vlažnost vazduha RH ( $\phi$ ) matematički se izražava:**

$$RH = \phi = \frac{v}{v_{sat}} \cdot 100(\%) \quad (1)$$

**Sa porastom temperature vazduha povećava se i količina vode u obliku vodene pare koju vazduh može da primi.**

**Važi i obrnuto - sa snižavanjem temperature vazduha smanjuje se količina vodene pare koju vazduh može da sadrži.**

## Pritisak vodene pare – pojam zasićenja

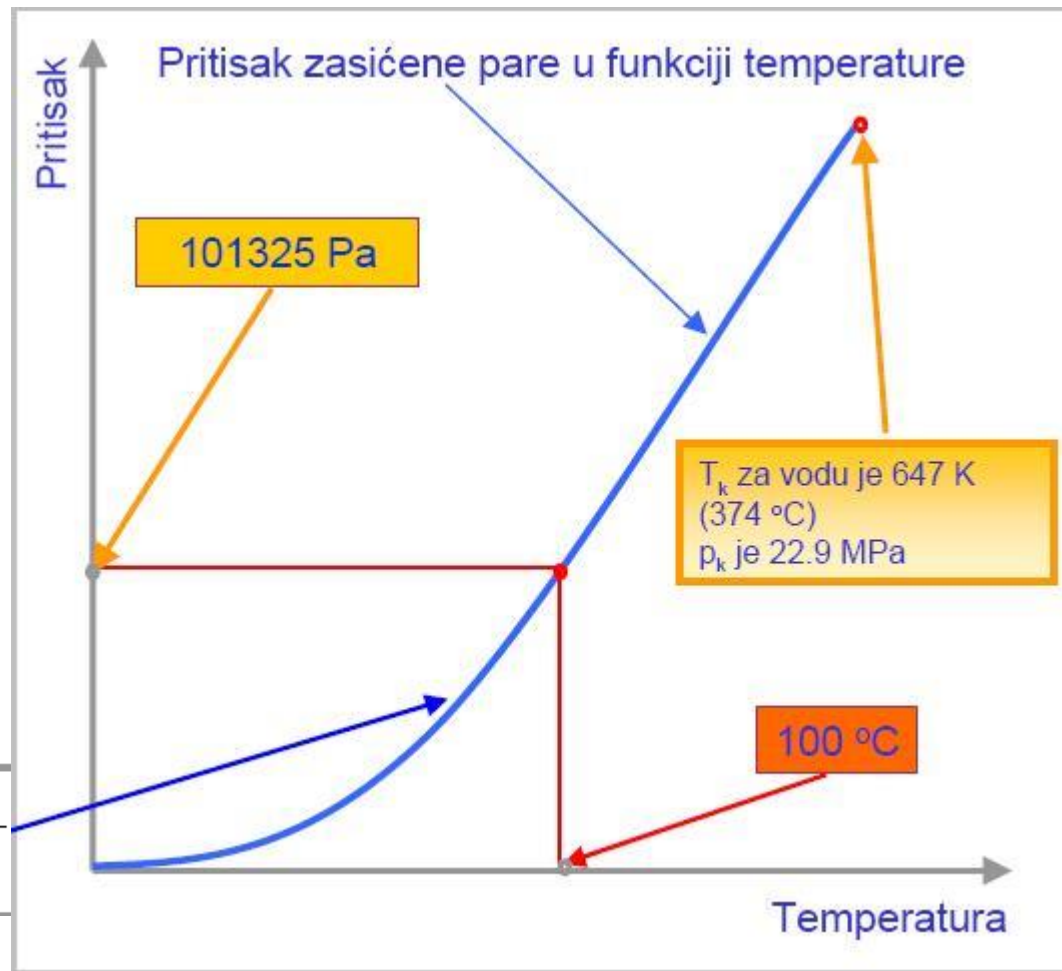
**Količina vodene pare u vazduhu utiče na pritisak vodene pare.**

**Parcijalni pritisak vodene pare  $p$  (Pa ili kPa)** - pritisak koji izaziva stvarna količina vodene pare u jedinici zapremine vazduha određene temperature (odgovara apsolutnoj vlažnosti vazduha).

**Pritisak zasićenja  $p_{sat}$  (Pa ili kPa)** - pritisak koji izaziva maksimalna količina vodene pare u jedinici zapremine vazduha određene temperature (odgovara vlažnosti zasićenja).

**Pritisak zasićenja se povećava sa porastom temperature i obrnuto.**

## Dijagram pritiska zasićenja vodene pare u funkciji temperature



$$p_s = p_{para} = const \cdot e^{-\frac{L_m}{RT}}$$

Pritisak zasićenja vodene pare se može odrediti pomoću empirijskih formula, u funkciji temperature vazduha.

Proračun pritiska zasićenja vodene pare se vrši prema izrazima (2) i (3) koji su predviđeni prema EN ISO 13788.

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269\theta}{237,3+\theta}} \quad \text{za} \quad \theta \geq 0^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875\theta}{265,5+\theta}} \quad \text{za} \quad \theta < 0^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

Vrijednosti koje se dobijaju primjenom izraza (2) i (3) se mogu očitati iz tabele 1.

**Tabela 1: Pritisak zasićenja vodene pare  $p_{sat}$  u kPa za zadate vrijednosti temperature**

temperatura (°C)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
20	2.337	2.351	2.366	2.381	2.395	2.410	2.426	2.441	2.455	2.471
19	2.196	2.210	2.223	2.238	2.251	2.266	2.279	2.294	2.309	2.323
18	2.063	2.075	2.089	2.102	2.115	2.129	2.142	2.155	2.169	2.182
17	1.937	1.949	1.961	1.974	1.986	1.999	2.013	2.025	2.037	2.050
16	1.817	1.829	1.841	1.853	1.865	1.877	1.889	1.901	1.913	1.925
15	1.704	1.716	1.726	1.738	1.749	1.760	1.772	1.782	1.794	1.806
14	1.598	1.608	1.618	1.629	1.640	1.650	1.661	1.672	1.682	1.696
13	1.497	1.506	1.517	1.526	1.537	1.546	1.557	1.568	1.577	1.588
12	1.402	1.412	1.421	1.430	1.440	1.449	1.458	1.468	1.477	1.488
11	1.312	1.321	1.330	1.338	1.348	1.357	1.365	1.374	1.384	1.393
10	1.227	1.236	1.244	1.252	1.261	1.269	1.277	1.286	1.294	1.304
9	1.147	1.156	1.164	1.172	1.178	1.186	1.194	1.202	1.212	1.220
8	1.072	1.080	1.086	1.094	1.097	1.102	1.117	1.125	1.132	1.140
7	1.001	1.008	1.016	1.022	1.029	1.036	1.044	1.050	1.058	1.065
6	0.935	0.941	0.948	0.954	0.961	0.968	0.974	0.981	0.988	0.994

## Nastavak tabele 1

temperatura (°C)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
5	0.872	0.878	0.884	0.890	0.897	0.902	0.909	0.916	0.922	0.928
4	0.813	0.818	0.825	0.830	0.836	0.842	0.848	0.854	0.860	0.866
3	0.758	0.762	0.768	0.774	0.780	0.785	0.790	0.796	0.799	0.808
2	0.705	0.710	0.716	0.721	0.726	0.732	0.736	0.741	0.746	0.752
1	0.657	0.661	0.667	0.670	0.676	0.681	0.685	0.690	0.696	0.701
+0	0.610	0.615	0.620	0.624	0.628	0.633	0.637	0.643	0.647	0.652
-0	0.610	0.605	0.600	0.596	0.591	0.587	0.581	0.576	0.572	0.567
-1	0.561	0.557	0.553	0.548	0.544	0.539	0.535	0.531	0.525	0.521
-2	0.516	0.513	0.508	0.504	0.500	0.496	0.492	0.488	0.484	0.480
-3	0.475	0.472	0.468	0.464	0.460	0.456	0.452	0.448	0.444	0.440
-4	0.436	0.433	0.429	0.425	0.423	0.419	0.415	0.412	0.408	0.404
-5	0.401	0.397	0.395	0.391	0.388	0.384	0.381	0.377	0.375	0.371

Relativna vlažnost vazduha se može definisati i preko odnosa parcijalnog pritiska i pritiska zasićenja:

$$\varphi = \frac{p}{p_{sat}} 100(\%) \quad (4)$$

Pritisak zasićenja  $p_{sat}$  je konstantna vrijednost za određenu temperaturu vazduha, dok se relativna vlažnost vazduha može izmjeriti.

Zbog toga se izraz (4) najčešće koristi za određivanje parcijalnog pritiska pare, prema izrazu (5).

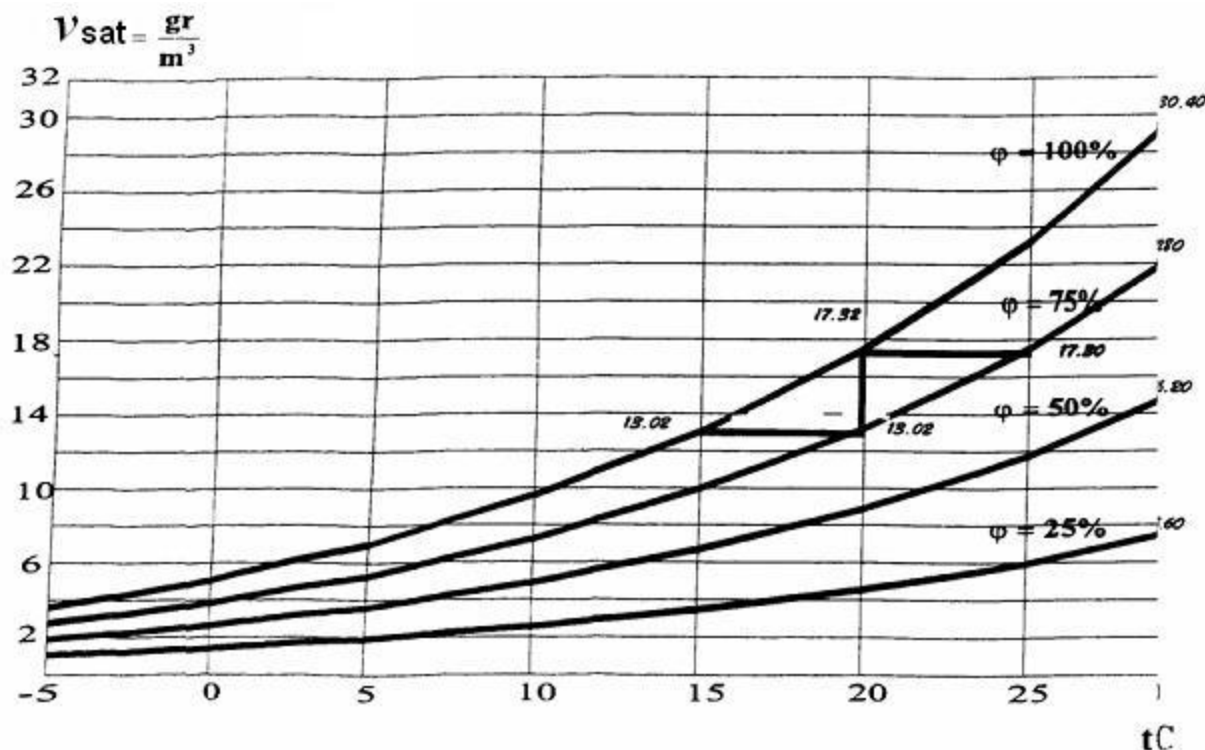
$$p = \varphi \cdot p_{sat} (Pa) \quad (5)$$

**Primjer**

U jednoj prostoriji izmjerena je: temperatura vazduha  $t=20^{\circ}\text{C}$  i apsolutna vlažnost vazduha  $V=0.013\text{kg}/\text{m}^3$

**Maksimalna količina vlage u vazduhu za  $t=20^{\circ}\text{C}$  je  $v_{sat}=0.01732\text{ kg}/\text{m}^3$  pa je relativna vlažnost vazduha:  $\phi = (0.013/0.01732)100=75\%$**

Da bi sa sadržajem vlage u vazduhu  $0.013\text{kg}/\text{m}^3$  došlo do zasićenja vazduha, tj. da bi relativna vlažnost  $\phi$  iznosila 100%, potrebno je sniziti temperaturu vazduha u prostoriji na  $15^{\circ}\text{C}$ .



**Pri dodatnom snižavanju temperature vazduha u prostoriji doći će do pojave KONDENZACIJE.**

**KONDENZACIJA** je izdvajanje (kondenzovanje) vodene pare u obliku kapljica vode na hladnijim površinama zidova, staklenih i drugih predmeta, cijevima za dovod hladne vode itd.

Da bi se spriječila pojava kondenzacije na površinama predmeta ili zidova, potrebno je da njihova temperatura bude dovoljno visoka, odnosno viša od temperature tačke rose.

**TAČKA ROSE** je ona temperatura vazduha na kojoj dolazi do izdvajanja vodenih kapi iz zasićenog vazduha (temperatura koju ima vlažan vazduh u trenutku kada je hlađenjem postao zasićen).

Ako su predmeti, pregrade i zidovi napravljeni od materijala koji su dobri provodnici toplote, ili sadrže "toplotne mostove", tada oni imaju nižu temperaturu od temperature okoline i na njima dolazi do kondenzovanja vodene pare i pojave vlaženja na njihovim površinama.

**Link za kalkulator temperature tačke rose pri zadatoj relativnoj vlažnosti i temperaturi:**

[http://www.ajdesigner.com/phphumidity/dewpoint\\_equation\\_dewpoint\\_temperature.php](http://www.ajdesigner.com/phphumidity/dewpoint_equation_dewpoint_temperature.php)

## Temperatura tačke rose u [°C] u funkciji relativne vlažnosti vazduha i temperature

RH100%	→													
RH100%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
30 °C	10,5	12,9	14,9	16,8	18,4	20,0	21,4	22,7	23,9	25,1	26,2	27,2	28,2	29,1
29 °C	9,7	12,0	14,0	15,9	17,5	19,0	20,4	21,7	23,0	24,1	25,2	26,2	27,2	28,1
28 °C	8,8	11,1	13,1	15,0	16,6	18,1	19,5	20,8	22,0	23,2	24,2	25,2	26,2	27,1
27 °C	8,0	10,2	12,2	14,1	15,7	17,2	18,6	19,9	21,1	22,2	23,3	24,3	25,2	26,1
26 °C	7,1	9,4	11,4	13,2	14,8	16,3	17,6	18,9	20,1	21,2	22,3	23,3	24,2	25,1
25 °C	6,2	8,5	10,5	12,2	13,9	15,3	16,7	18,0	19,1	20,3	21,3	22,3	23,2	24,1
24 °C	5,4	7,6	9,6	11,3	12,9	14,4	15,8	17,0	18,2	19,3	20,3	21,3	22,3	23,1
23 °C	4,5	6,7	8,7	10,4	12,0	13,5	14,8	16,1	17,2	18,3	19,4	20,3	21,3	22,2
22 °C	3,6	5,9	7,8	9,5	11,1	12,5	13,9	15,1	16,3	17,4	18,4	19,4	20,3	21,2
21 °C	2,8	5,0	6,9	8,6	10,2	11,6	12,9	14,2	15,3	16,4	17,4	18,4	19,3	20,2
20 °C	1,9	4,1	6,0	7,7	9,3	10,7	12,0	13,2	14,4	15,4	16,4	17,4	18,3	19,2
19 °C	1,0	3,2	5,1	6,8	8,3	9,8	11,1	12,3	13,4	14,5	15,5	16,4	17,3	18,2
18 °C	0,2	2,3	4,2	5,9	7,4	8,8	10,1	11,3	12,5	13,5	14,5	15,4	16,3	17,2
17 °C	-0,6	1,4	3,3	5,0	6,5	7,9	9,2	10,4	11,5	12,5	13,5	14,5	15,3	16,2
16 °C	-1,4	0,5	2,4	4,1	5,6	7,0	8,2	9,4	10,5	11,6	12,6	13,5	14,4	15,2
15 °C	-2,2	-0,3	1,5	3,2	4,7	6,1	7,3	8,5	9,6	10,6	11,6	12,5	13,4	14,2
14 °C	-2,9	-1,0	0,6	2,3	3,7	5,1	6,4	7,5	8,6	9,6	10,6	11,5	12,4	13,2
13 °C	-3,7	-1,9	-0,1	1,3	2,8	4,2	5,5	6,6	7,7	8,7	9,6	10,5	11,4	12,2
12 °C	-4,5	-2,6	-1,0	0,4	1,9	3,2	4,5	5,7	6,7	7,7	8,7	9,6	10,4	11,2
11 °C	-5,2	-3,4	-1,8	-0,4	1,0	2,3	3,5	4,7	5,8	6,7	7,7	8,6	9,4	10,2
10 °C	-6,0	-4,2	-2,6	-1,2	0,1	1,4	2,6	3,7	4,8	5,8	6,7	7,6	8,4	9,2

## Proračun higrotermičkih karakteristika građevinskih elemenata

Za izračunavanje higrotermičkih karakteristika građevinskih elemenata i konstrukcija, difuzije vodene pare, kondenzacije i isušenja, kao i opasnosti od površinske kondenzacije (orošavanje), primenjuje se standard EN ISO 13788.

**EN ISO 13788** daje uprošćeni proračunski metod za:

- Unutrašnju površinsku temperaturu građevinskih elemenata ispod koje je vjerovatna pojava buđi, za datu unutrašnju temperaturu vazduha i relativnu vlažnost. Metod se takođe može primijeniti za ocjenu rizika od drugih problema izazvanih površinskom kondenzacijom.
- Ocjenu rizika od međuslojne kondenzacije usljed difuzije vodene pare.

**Uslov pri projektovanju konstrukcija - da se para u normalnim uslovima korišćenja objekta ne kondenzuje. Ukoliko dođe do kondenzacije potrebno je obezbijediti period u kome će doći do potpunog isušenja.**

**Unutrašnja površinska temperatura kojom se izbjegava kritična površinska vlažnost i međuslojna kondenzacija**

**EN ISO 13788 proračun površinske temperature kojom se izbjegava kritična vlažnost unutrašnje površine definiše preko proračunskog temperaturnog faktora  $f_{R_{si,min}}$  na unutrašnjoj površini:**

$$f_{R_{si,min}} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (7)$$

**Proračun obuhvata sljedeće korake:**

- a) definisati spoljašnju temperaturu vazduha
- b) definisati spoljašnju vlažnost
- c) definisati unutrašnju temperaturu prema nacionalnim parametrima
- d) proračunati unutrašnju relativnu vlažnost iz  $\Delta v$  ili  $\Delta p$  ili uzeti konstantnu relativnu vlažnost za kondicionirane uslove korigovanu faktorom sigurnosti
- e) za maksimalnu prihvatljivu relativnu vlažnost na unutrašnjoj površini  $\varphi_{si}=0.8$  sračunati minimalno prihvatljivu vlažnost zasićenja po zapremini ili pritisak pare

$$v_{sat}(\theta_{si}) = \frac{v_i}{0,8}$$

$$p_{sat}(\theta_{si}) = \frac{p_i}{0,8}$$

**Napomena:** Kriterijum maksimalne unutrašnje vlažnosti od 80% ( $\varphi_{Si} \leq 0.8$ ) je usvojen za izbjegavanje pojave buđi na unutrašnjim površinama spoljnog zida. Mogu se usvojiti i drugi kriterijumi, kao npr. ( $\varphi_{Si} \leq 0.6$ ) za izbjegavanje korozije i sl.

- f) odrediti minimalnu prihvatljivu površinsku temperaturu  $\theta_{Si,min}$  iz minimalno prihvatljive vlažnosti zasićenja.
- g) za minimalnu prihvatljivu površinsku temperaturu  $\theta_{Si,min}$ , pretpostavljene unutrašnju temperaturu  $\theta_i$  i spoljašnju temperaturu  $\theta_e$ , minimalni temperaturni faktor  $f_{RSi,min}$  se računa iz jednačine (7).

**Mjesec sa najvećim zahtijevanom vrijednošću faktora  $f_{RSi,min}$  je kritičan mjesec.**

**Temperaturni faktor za taj mjesec je  $f_{RSi,max}$  i konstrukcija se projektuje tako da je uvijek prekoračen, tj.  $f_{RSi} > f_{RSi,max}$ .**

Unutrašnja vlažnost se prikazuje preko pet klasa vlažnosti. Na slici 1 su prikazane granične vrijednosti  $\Delta v$  i  $\Delta p$  za svaku klasu. Preporučuje se da se za proračun usvoji gornja granica za svaku klasu, osim ako projektant može da pokaže da su uslovi blaži. Podaci na slici su izvedeni za zgrade u Zapadnoj Evropi. Izmjereni podaci se mogu iskoristiti za izvođenje vrijednosti upotrebljivih za druge klimate.

**Za svaki mjesec u godini proračun treba da sadrži:**

**Korak 1:** Definisanje srednje mjesečne spoljašnje temperature  $\theta_e$ , koja je određena prema EN ISO 15927-1

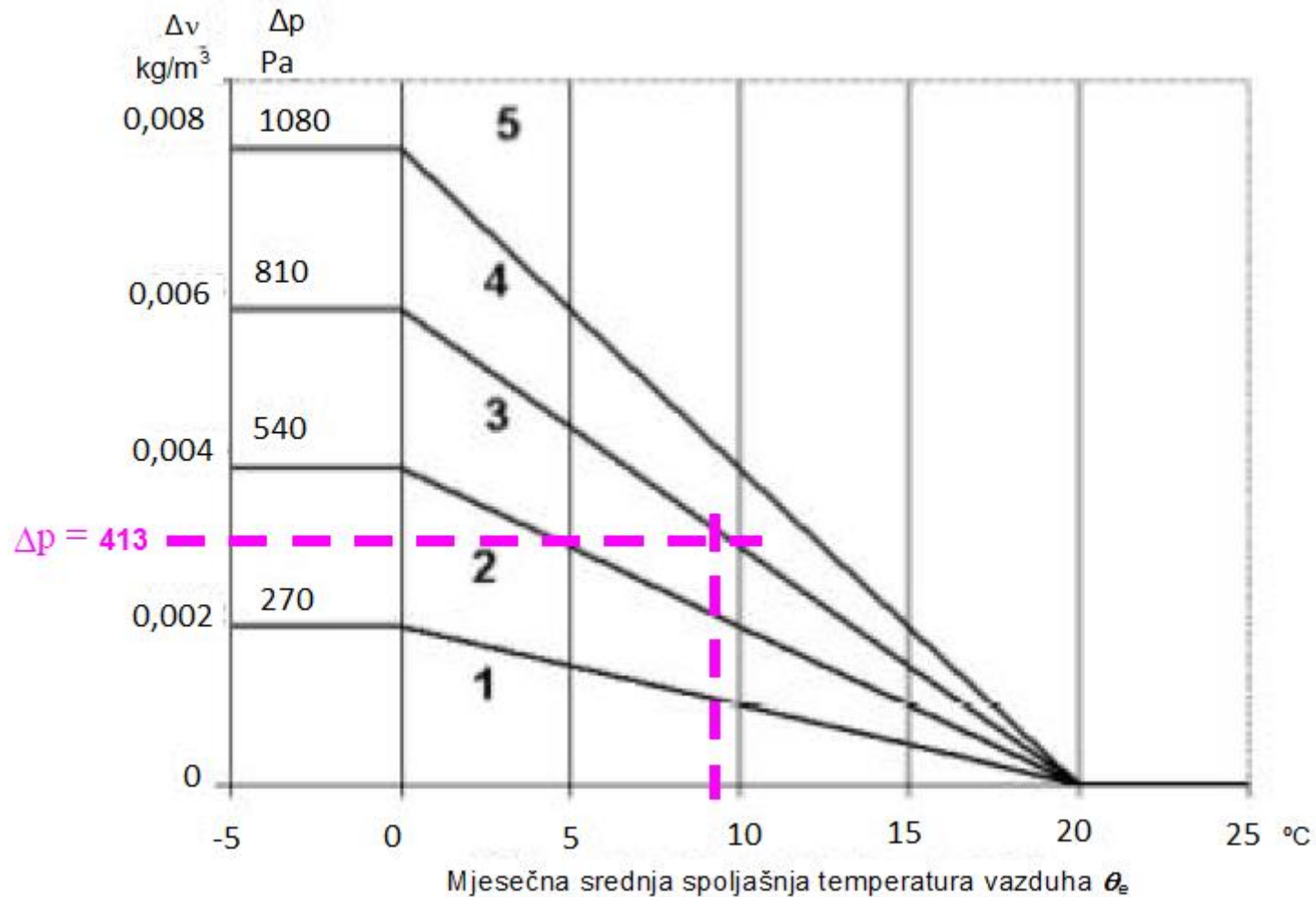
**Korak 2:** Izračunavanje spoljašnjeg parcijalnog pritiska pare primjenom izraza:

$$p_e = \varphi_e \cdot p_{sat,e}$$

Mjesečni spoljašnji pritisak zasićenja  $p_{sat,e}$  se dobija iz raspoloživih tabela ili empirijskih formula u zavisnosti od temperature:

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269\theta}{237,3+\theta}} \quad \text{za } \theta \geq 0$$

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875\theta}{265,5+\theta}} \quad \text{za } \theta < 0$$



Slika 1: Variranje klase unutrašnje vlažnosti u zavisnosti od spoljašnje temperature

**Napomena:** EN ISO 13788:2012 propisuje nešto izmijenjen dijagram u odnosu na EN ISO 13788 2001.

**Korak 3:** Izračunavanje porasta pritiska pare u unutrašnjosti  $\Delta p$  (podaci: klasa vlažnosti zgrade, spoljašnji pritisak pare  $p_e$ ) za svaki mjesec.

Primjer: Ako je spoljašnja temperatura  $\theta_e=9,8$  °C, povećanje pritiska  $\Delta p$  za zgradu niske naseljenosti (klasifikacija prema Tabeli 2) je  $\Delta p=413$  Pa (Slika 1)

**Tabela 2 Klase unutrašnje vlažnosti**

Klasa vlažnosti	Zgrada
1	skladišta
2	kancelarije, prodavnice
3	zgrade male naseljenosti
4	zgrade velike naseljenosti, sportske hale, kuhinje, kantine; zgrade grijane na gas
5	specijalne zgrade, npr: praonice veša, pivare, plivački bazeni.

**Korak 4:** Izračunavanje unutrašnjeg pritiska pare  $p_i = p_e + \Delta p \times 1,10$  (faktor sigurnosti)

**Korak 5:** Proračun minimalnog pritiska zasićenja  $p_{sat}(\theta_{si})$

$p_{sat}(\theta_{si}) = p_i / 0,8$  (relativna vlažnost ne treba da dostigne vrijednost 80%)

**Korak 6:** Proračun minimalne prihvatljive površinske temperature  $\theta_{si,min}$

Temperature se računaju iz formula koje se dobijaju invertovanjem formula za pritisak zasićenja:

$$\theta_{si,min} = \frac{237,3 \times \log_e\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)}{17,269 - \log_e\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)} \quad \text{for } p_{sat} \geq 610,5Pa$$

$$\theta_{si,min} = \frac{265,5 \times \log_e\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)}{21,875 - \log_e\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)} \quad \text{for } p_{sat} < 610,5Pa$$

**Korak 7:** Određivanje unutrašnjih temperatura  $\theta_i$ **Korak 8:** Proračun faktora  $f_{R_{si,min}}$ 

$$f_{R_{si}} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad f_{R_{si,min}} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

Tabela 2a: Proračun vrijednosti  $f_{R_{si,max}}$  koristeći klase unutrašnje vlažnosti

Mjesec	$\theta_e$	$\varphi_e$	$p_{sat,e}$	$p_e$	$\Delta p$	$p_i$	$p_{sat}(\theta_{si})$	$\theta_{si,min}$	$\theta_i$	$f_{R_{si}}$
	[°C]	[-]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[°C]	[°C]	[-]
Jan.	2,8	0,92	747	687	697	1453	1817	16,0	20	0,767
Feb.	2,8	0,88	747	657	697	1423	1779	15,7	20	0,748
Mart	4,5	0,85	842	716	628	1406	1758	15,5	20	0,708
April	6,7	0,80	981	785	539	1377	1722	15,2	20	0,636
Maj	9,8	0,78	1211	945	413	1399	1749	15,4	20	0,549
Jun	12,6	0,80	1458	1167	300	1496	1870	16,5	20	0,520
Jul	14,0	0,82	1598	1310	243	1577	1972	17,3	20	0,547
Avg.	13,7	0,84	1567	1316	255	1597	1996	17,5	20	0,600
Sep.	11,5	0,87	1356	1180	344	1559	1948	17,1	20	0,658
Okt	9,0	0,89	1147	1021	446	1511	1889	16,6	20	0,692
Nov	5,0	0,91	872	793	608	1462	1827	16,1	20	0,739
Dec	3,5	0,92	785	722	668	1457	1821	16,0	20	0,760

Iz Tabele 2a je jasno da je januar kritičan mjesec jer ima maksimalnu vrijednost  $f_{Rsi,max}=0,767$ .

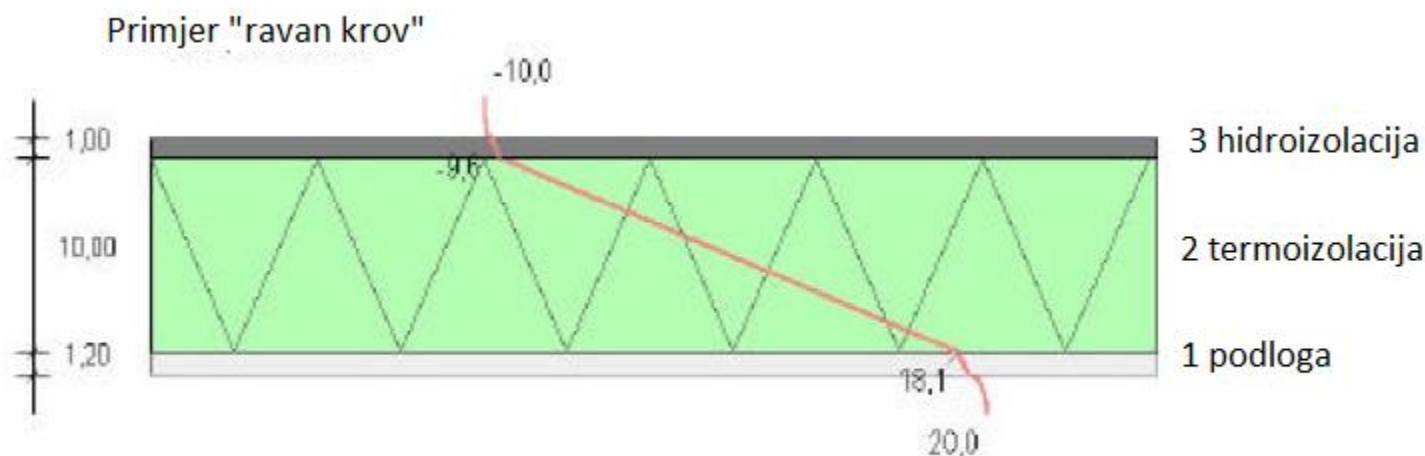
### Korak 9: Određivanje termičkih karakteristika

Potrebno je da bude zadovoljen uslov:

$$f_{Rsi}(zgrade) > f_{Rsi,max}$$

$f_{Rsi}(zgrade) = [(1/U - R_{si}) \times U]$  zavisi od vrijednosti U (koeficijenta prolaza toplote)

### Primjer: Proračun koeficijenta $f_{Rsi}$ za ravni krov



Slika 2: Ravan krov

Tabela 3 Otpor prolaza toplote za posmatrani element

Sloj	Od unutra ka spolja	deblj. sloja [cm]	zap.masa [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Prelaz	$R_{si}$				0,13
1	podloga	1,2	900	0,160	0,08
2	termoizolacija	10,0	45	0,033	3,00
3	hidroizolacija	1,0	1000	0,20	0,05
Prelaz	$R_{se}$				0,04
		d=12,2			$R_T=3,3$

$$U=1/R_T=0,303 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$f_{Rsi} = (1/U - R_{Si}) \times U = [(1/0,303) - 0,13] \times 0,303 = 0,96 > 0,767 = f_{Rsi,max}$$

Posmatrani krovni element ispunjava potrebne uslove u pogledu potrebne vrijednosti koeficijenta  $f_{Rsi,min}$ .

# Proračun međuslojne kondenzacije

## Proračun sadrži sljedeće korake:

- Odrediti prvi mjesec pojave kondenzacije;
- Izračunati nivo godišnje kondenzacije sabiranjem iznosa za svaki mjesec;
- Odrediti prvi mjesec pojave isparavanja (isušivanja);
- Izračunati količinu isparenja sabirajući iznose za sve mjesece u godini;
- Uporediti ukupnu kondenzaciju i isparenje. Isparenje mora biti veće od kondenzacije.

## Koraci proračuna

### Korak 1: Analiza konstrukcije:

- Izdijeliti element zgrade na paralelne homogene slojeve;
- Definirati karakteristike materijala za svaki sloj i površinske koeficijente;
- Proračunati otpor prolaza toplote i otpor difuziji videne pare.
- Izračunati debljinu difuziono-ekvivalentnog vazdušnog sloja [m]

$$s_d = \mu \cdot d$$

gdje je :  $\mu$  - koeficijent otpora difuziji vodene pare

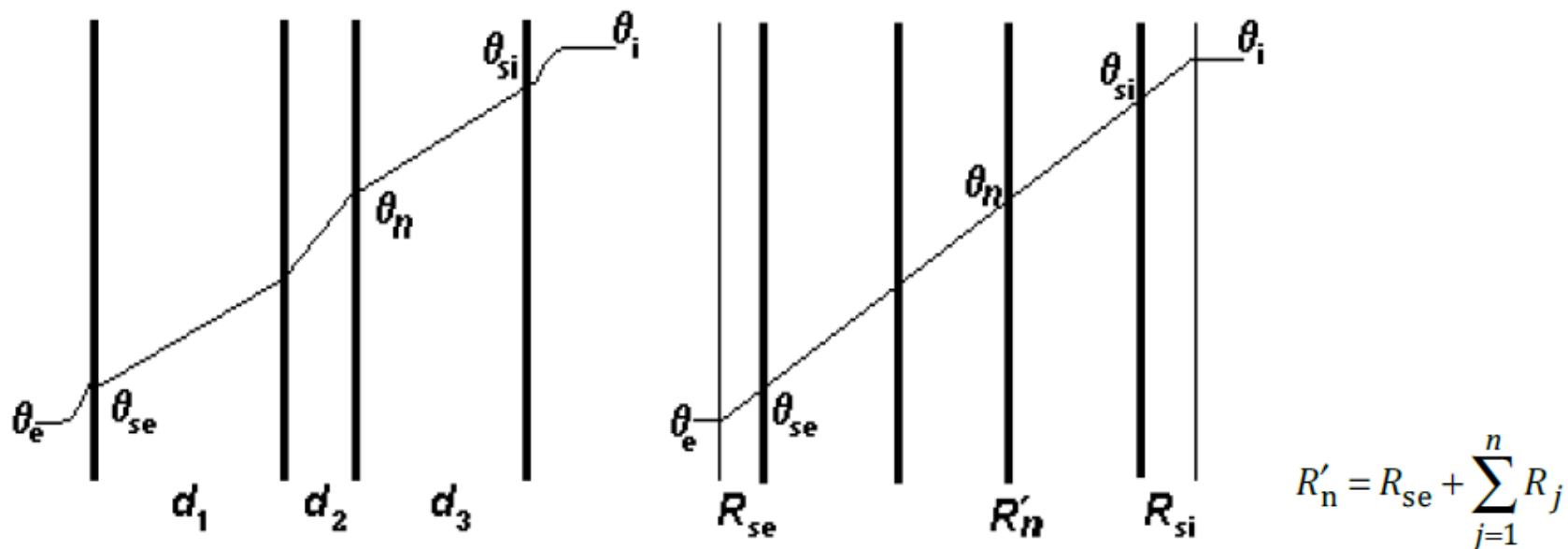
$d$  – debljina sloja materijala

### Korak 2: Proračunati temperaturu na među-površinama slojeva koristeći izraz:

$$\theta_n = \theta_e + \frac{R'_n}{R'_T} (\theta_i - \theta_e)$$

## Raspodjela temperatura u građevinskom elementu

**Pretpostavka:** raspodjela temperature u svakom sloju je linearna (uslovi stacionarnog stanja).



**Slika 3: Raspodjela temperature u višeslojnom elementu nacrtana u razmjeri sa stvarnom debljinom slojeva i vrijednostima toplotnog otpora slojeva**

**Korak 3:** Proračunati pritisak zasićenja vodene pare  $p_{sat}$  na osnovu temperature na unutrašnjim površinama između materijala koristeći odgovarajuće tabele ili empirijske formule.

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269\theta}{237,3+\theta}} \quad \text{za } \theta \geq 0$$

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875\theta}{265,5+\theta}} \quad \text{za } \theta < 0$$

**Korak 4:** Nacrtati poprečni presjek elementa zgrade sa debljinom slojeva ekvivalentnom otporu difuziji vodene pare za svaki sloj,  $s_d$  (u odgovarajućoj razmjeri, slike 4-6). Nacrtati prave linije spajanjem pritiska zasićenja na svakoj površini između materijala.

Izračunati parcijalne pritiske u prostoru sa spoljašnje i unutrašnje strane elementa, koristeći podatke o relativnoj vlažnosti i pritiske zasićenja (izračunate iz temperature ).

$$p_i = \varphi_i \cdot p_{i,sat} \quad p_e = \varphi_e \cdot p_{e,sat}$$

Nacrtati pravu liniju koja spaja  $p_e$  i  $p_i$ . Vrijednosti na međuslojnim površinama se mogu izračunati iz nagiba ove linije.

Promjena pritiska pare u nekom sloju je proporcionalna otporu propuštanja pare za taj sloj.

Za proračun pritiska pare na površini  $j$  se može koristiti formula

$$p_j = p_i - \frac{p_i - p_e}{\sum_{k=1}^{k=n} S_{d,k}} \sum_{k=1}^{k=j} S_{d,k}$$

## **Moguće su tri sljedeće situacije:**

### **1. Nema kondenzacije**

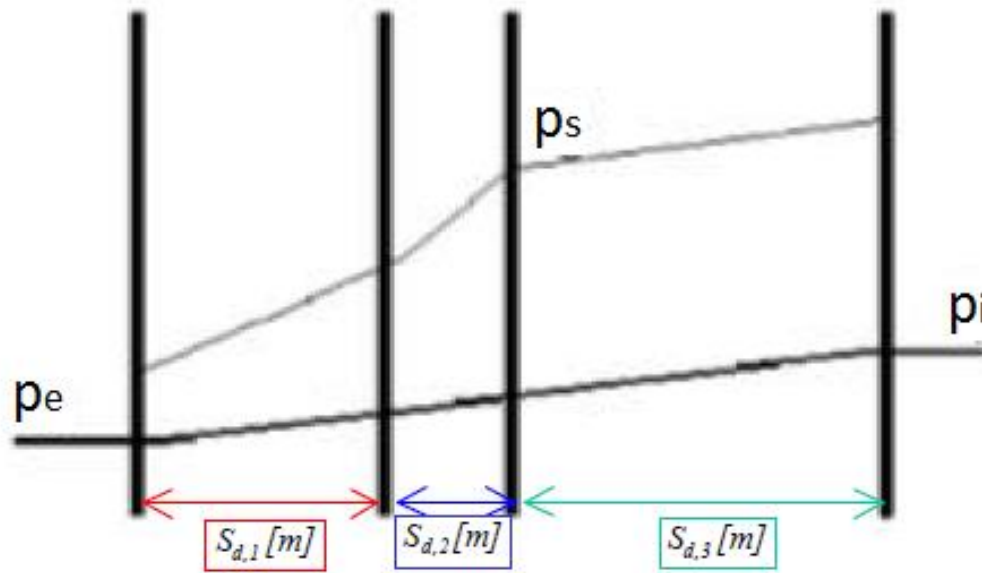
Ukoliko nema akumuliranog kondenzata za prethodni mjesec, profil pritiska je prava linija između unutrašnjeg i spoljašnjeg pritiska pare. Ukoliko ta linija ne prekoračuje pritisak zasićenja ni na jednoj međupovršini, kondenzacija se ne javlja, (slika 4).

### **2. Međuslojna kondenzacija na jednoj površini**

Ako pritisak pare prekorači pritisak zasićenja na jednoj površini, raspodjela pritiska pare je kao na slici 5.

### **3. Međuslojna kondenzacija na više od jedne površine**

## 1. Nema kondenzacije

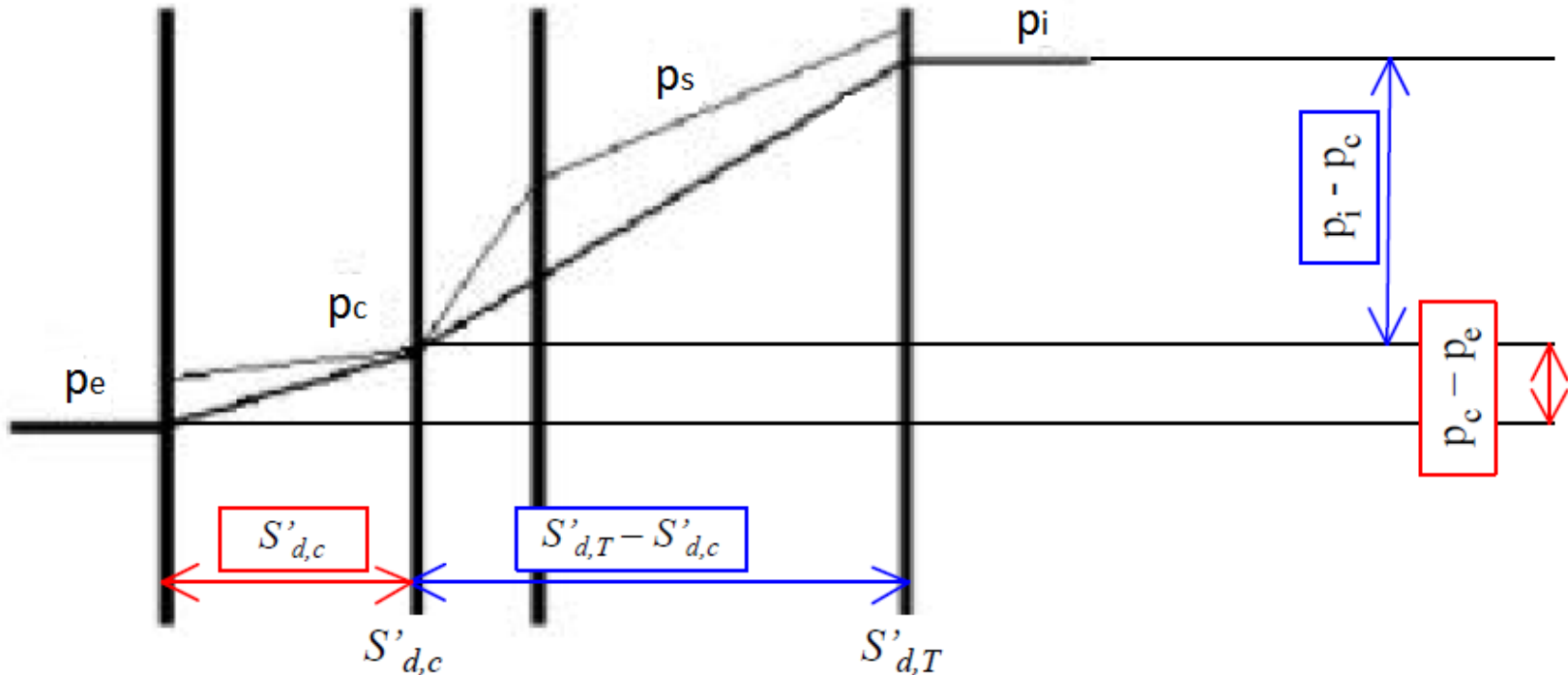


Slika 4: Difuzija vodene pare u višeslojnom građevinskom elementu bez međuslojne kondenzacije

Protok pare kroz element zgrade se može računati pomoću izraza

$$g = \delta_0 \frac{p_i - p_e}{s'_{d,T}} \quad [g] = \left[ \frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]$$

## 2. Međuslojna kondenzacija na jednoj površini

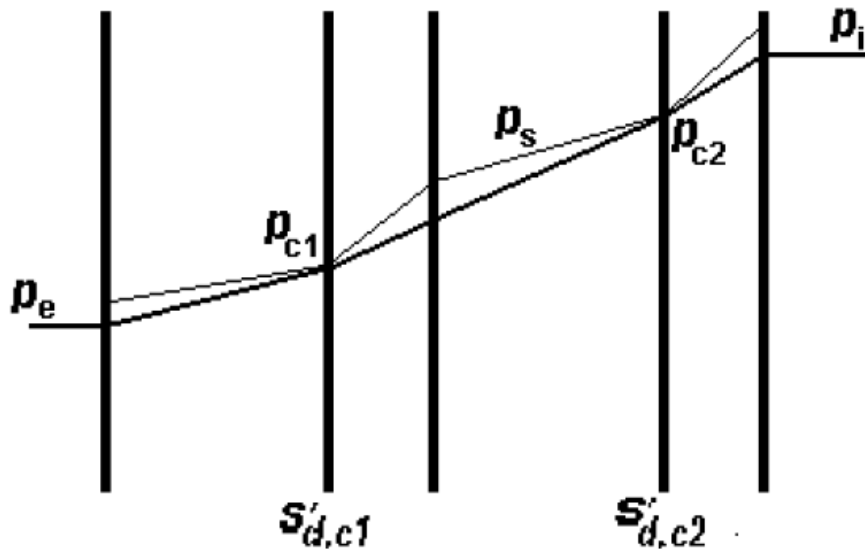


Slika 5: Difuzija vodene pare sa međuslojnom kondenzacijom na jednoj unutrašnjoj površini

Ovdje je stepen kondenzacije jednak razlici između količine vlage koja je transportovana do površine kondenzacije i količine vlage transportovane od površine kondenzacije. Računa se:

$$g_c = \delta_0 \left( \frac{p_i - p_c}{S'_{d,T} - S'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{S'_{d,c}} \right)$$

### 3. Međuslojna kondenzacija na više od jedne površine



Stepen kondenzacije se računa za svaku površinu iz razlike nagiba pravih linija.

Slika 6: Difuzija vodene pare sa međuslojnom kondenzacijom na dvije površine

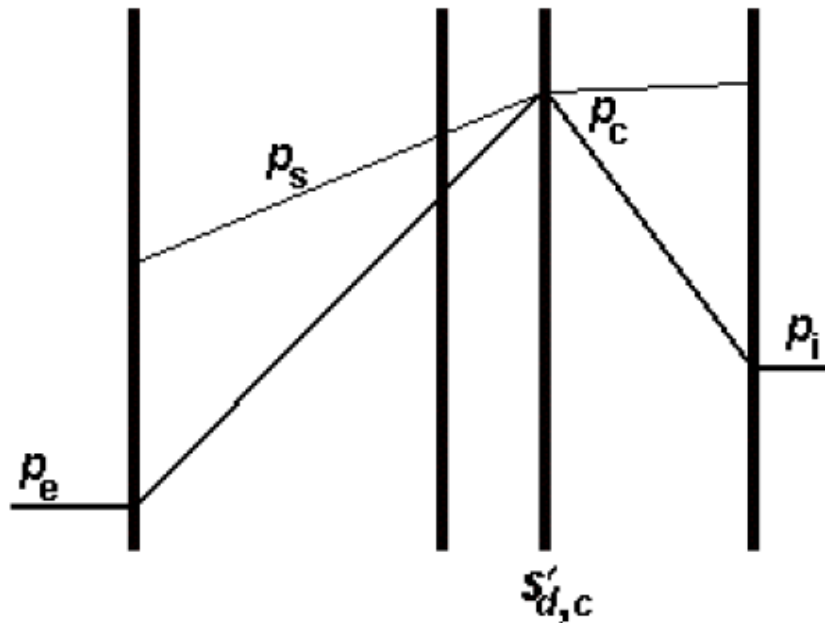
Stepen kondenzacije na površini 1: 
$$g_{c1} = \delta_0 \left( \frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} - \frac{p_{c1} - p_e}{s'_{d,c1}} \right)$$

Stepen kondenzacije na površini 2: 
$$g_{c2} = \delta_0 \left( \frac{p_i - p_{c2}}{s'_{d,T} - s'_{d,c2}} - \frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} \right)$$

## Isušenje (isparavanje)

Stepen isparavanja:

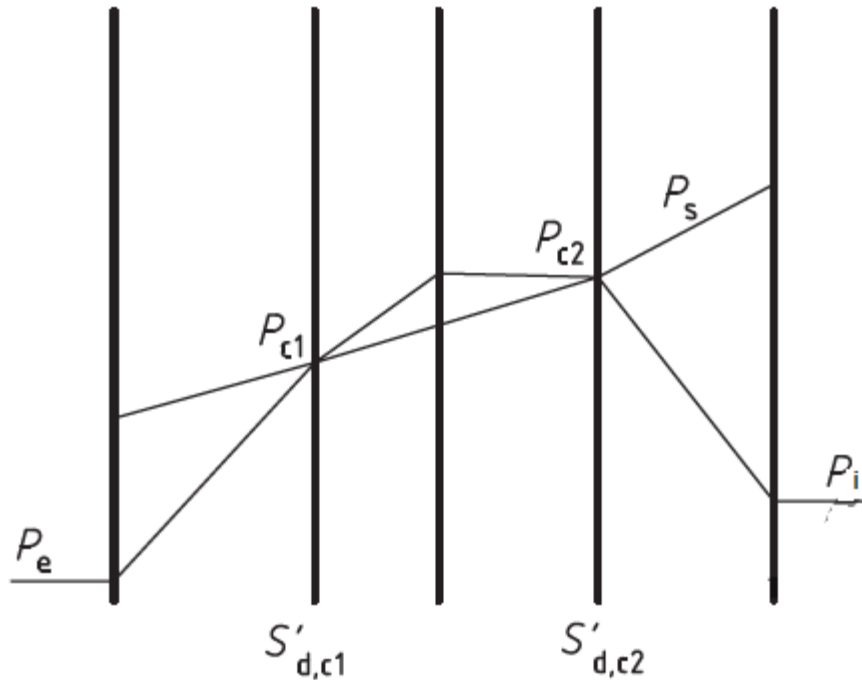
$$g_{ev} = \delta_0 \left( \frac{p_i - p_c}{s'_{d,\Gamma} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right)$$



*Isparavanje sa jedne unutrašnje ravni u građevinskom elementu*

**Napomena:** Izrazi sa stepen kondenzacije i stepen isparavanja su isti. Prema konvenciji kondenzacija se pojavljuje kad vrijednost izraza ima pozitivan, a isparavanje kad ima negativan znak.

U elementu sa više od jedne površine kondenzacije, može se javiti u istom mjesecu kondenzacija na jednoj površini i isparavanje na drugoj površini.



Kondenzacija na površini 1:

$$g_c = \delta_0 \left( \frac{p_{c2} - p_{c1}}{S'_{d,c2} - S'_{d,c1}} - \frac{p_{c1} - p_e}{S'_{d,c1}} \right)$$

Isparavanje na površini 2:

$$g_{ev} = \delta_0 \left( \frac{p_i - p_{c2}}{S'_{d,T} - S'_{d,c2}} - \frac{p_{c2} - p_{c1}}{S'_{d,c2} - S'_{d,c1}} \right)$$

Slika 7: Isparavanje na jednoj i kondenzacija na drugoj površini u građevinskom elementu

## Korak 5: Proračun isparavanja

Formule za proračun stepena isparenja i kondenzacije su iste. Kondenzacija se javlja ako je stepen pozitivan, a isparenje ako je negativan.

## Korak 6: Proračun za svaki mjesec

- proračunati stepen kondenzacije  $g_c$
- proračunati sadržaj akumulirane vlage  $M_a$

**Napomena:** Količina kondenzata  $g_c$  se dobija u  $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ , pa je za proračun količine kondenzata na mjesečnom nivou potrebno proračunati korigovati brojem skundi u jednom mjesecu.

$$M_{a, mi} = \sum_1^{mi} g_{c, mi}$$

## Proračun difuzije i kondenzacije prema EN ISO 13788

**EN ISO 13788 daje metodu za proračun godišnjeg balansa vlažnosti i računa maksimalan iznos akumulirane vlage usljed kondenzacije u elementu.**

Proračun se vrši na mjesečnom nivou za svih dvanaest mjeseci u godini, pri čemu se računaju količine kondenzovane ili isušene pare s obzirom na mjesečne prosječne spoljašnje uslove. Ukupna akumulirana vlaga, za sve mjesece u kojima se pojavljuje kondenzacija, se upoređuje sa ukupno isušenom količinom pare tokom ostatka godine.

Za proračun gustine protoka vodene pare  $g$  koristi se izraz:

$$g = \frac{\delta_0}{\mu} \frac{\Delta p}{\Delta x} = \delta_0 \frac{\Delta p}{s_d} \quad [g] = \left[ \frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]$$

gdje je:

$\delta_0 = 2 \times 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ . koeficijent propustljivosti vodene pare za vazduh

$\Delta p$  razlika pritiska,  $p_i - p_e$  u Pa

$$s_d = \mu d \quad [m]$$

$\Delta x$  pređeni put pare (debljina sloja  $d$ ) u m

$\mu$  koeficijent otpora difuziji vodene pare

Upoređivanjem izraza koje je predviđao JUS U.J5.520 i izraza prema EN ISO 13788, uvažavajući predviđene jedinice mjere i vrijednosti koeficijenta  $\delta_0$ , može se zaključiti sljedeće:

Izraz za vrijednost gustine difuzionog toka

$$g = 0.625 \frac{(p_1 - p_2)}{r} \quad \left[ \frac{g}{m^2 h} \right]$$

daje nešto manje vrijednosti nego izraz koji predviđa EN ISO 13788.

Izraz koji predviđa EN ISO 13788

$$g = \delta_0 \frac{\Delta p}{s_d} \quad \left[ \frac{kg}{m^2 s} \right]$$

poslije prilagođavanja jedinica mjere i unošenja vrijednosti za  $\delta_0$  glasi:

$$g = 0.72 \frac{\Delta p}{s_d} \quad \left[ \frac{g}{m^2 h} \right]$$

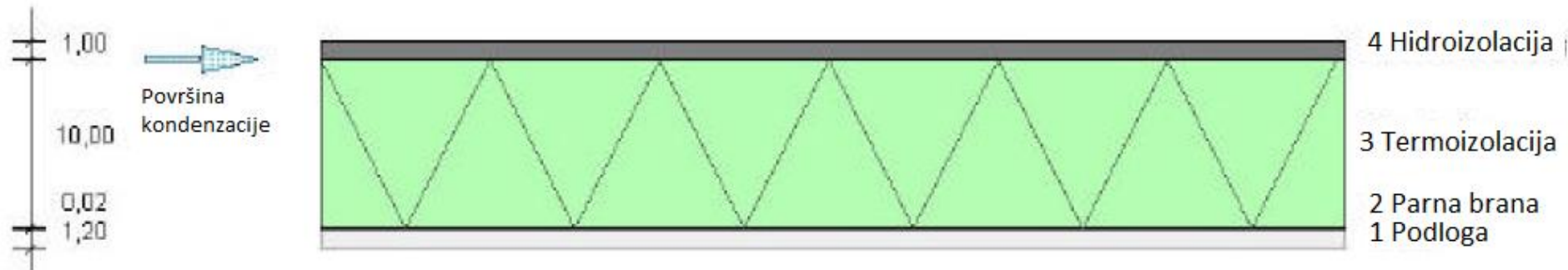
Pri tome je uzeto u obzir da je

$$s_d \equiv r$$

i da se pritisak  $\Delta p$  unosi u kPa.

Razlika je nastala zbog različitih usvojenih vrijednosti koeficijenata propustljivosti pare za vazduh koje zavise od temperature vazduha, a u Glaserovom postupku se zanemaruje uticaj.

## Primjer: Kondenzacija u jednoj ravni



Slika 8: Ravni krov sa parnom branom

Tabela 4: Otpor prolaza toplote krovnog elementa

Sloj	Od unutra ka spolja	deblj. sloja [cm]	zap.masa [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Prelaz	$R_{si}$				0,13
1	Podloga	1,2	900	0,160	0,08
2	Parna brana	0,02	930	0,170	0,001
3	Termoizolacija	10,0	45	0,033	3,00
4	Hidroizolacija	1,0	1000	0,20	0,05
Prelaz	$R_{se}$				0,04
		d=12,2			$R_T=3,3$

$$U=1/R_T=0,303 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Mjesečne spoljašnje temperature  $\theta_e$  i relativne vlažnosti  $\varphi_e$  su definisane prema lokaciji zgrade.

Unutrašnji uslovi, temperatura  $\theta_i$  i relativna vlažnost  $\varphi_i$ , su definisani zavisno od namjene zgrade.

U tabeli C.1 su prikazani unutrašnji i spoljašnji uslovi korišćeni u analizi.

**Table C.1 - Internal and external conditions used for analysis**

Month	Internal		External	
	$\theta_i$ °C	$\varphi_i$	$\theta_e$ °C	$\varphi_e$
October	20	0,57	10	0,83
November	20	0,57	5	0,88
December	20	0,59	1	0,88
January	20	0,57	-1	0,85
February	20	0,58	0	0,84
March	20	0,54	4	0,78
April	20	0,51	9	0,72
May	20	0,51	14	0,68
June	20	0,50	18	0,69
July	20	0,56	19	0,73
August	20	0,52	19	0,75
September	20	0,56	15	0,79

## Korak 1: Analiza materijala u građevinskom elementu

Spoljašnji pritisak zasićenja  $p_{e,sat}$  i unutrašnji pritisak zasićenja  $p_{i,sat}$  se proračunavaju iz odgovarajućih temperatura,  $\theta_e$  i  $\theta_i$ . Parcijalni pritisci spolja i unutra,  $p_e$  i  $p_i$  se računaju iz pritiska zasićenja i relativne vlažnosti:

Tabela 5 Proračun pritiska zasićenja i parcijalnog pritiska vodene pare

							Oktobar	$\Delta\theta$	$q[W/m^2]$	Novemb ar	$\Delta\theta$	$q[W/m^2]$
Sloj	Od unutra ka spolja	d	$\lambda$	R	$\mu$	$S_d = \mu \cdot d$	$\theta$	$p_{sat}$	p	$\theta$	$p_{sat}$	p
		[m]	[W/mK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[-]	[m]	[°C]	[Pa]	[Pa]	[°C]	[Pa]	[Pa]
Unutr.							20	2337	1332	20,0	2337	1332
Prelaz	$R_{si}$			0,13			19,6	2281	1332	19,4	2254	1332
1	podloga	0,012	0,16	0,075	10	0,12	19,4	2250	1332	19,1	2207	1332
2	parna brana	0,002	0,17	0,012	500000	1000	19,4	2245	1280	19,0	2200	1238
3	termoiz.	0,1	0,033	3,030	150	15	10,3	1250	1279	5,4	897	1237
4	hidroiz.	0,01	0,2	0,050	500000	5000	10,1	1237	1019	5,2	883	767
Prelaz	$R_{se}$			0,04			10,0	1227	1019	5,0	872	767
	$\Sigma$	0,124		3,337		6015,12						

### Postupak proračuna prikazanog u Tabeli 5:

- Unijeti odgovarajuće podatke za sve slojeve građevinskog elementa:  $d$ ,  $\lambda$ ,  $R$ ,  $\mu$
- Proračunati vrijednosti otpora difuziji vodene pare  $s_d$  [m]
- Proračunati temperature na granicama slojeva za svaki mjesec u godini, pri čemu su promjene temperature po slojevima proporcionalne otporu toplotne provodljivosti datog sloja. Može se koristiti formula:

$$\theta_{j+1} = \theta_j - qR_j$$

gdje je:

$$q = \frac{1}{R_T} (\theta_i - \theta_e)$$

- Za proračunate temperature na granicama slojeva odrediti pritiske zasićenja  $p_{\text{sat}}$  koristeći empirijske formule, ili ih očitati iz tabele.
- Spoljašnji i unutrašnji pritisci zasićenja se koriste za proračun parcijalnih pritisaka vodene pare u spoljašnjem i unutrašnjem prostoru, koristeći podatke o relativnoj vlažnosti, koji su takođe zadati uslovima zadatka.
- Raspodjela pritisaka pare po slojevima se vrši proporcionalno otporu difuziji svakog sloja.

$$p_j = p_i - \frac{p_i - p_e}{\sum_{k=1}^{k=j} s_{d,k}} \sum_{k=1}^{k=j} s_{d,k}$$

- Iako postoje određeni otpori difuziji na prelaznim površinama iz vazduha na element (analogni otporima prelaza toplote), zanemaruje se njihov uticaj. Usvaja se da su pritisci vodene pare na površinama elementa jednaki pritiscima u spoljašnjem i unutrašnjem prostoru.
- **Do kondenzacije dolazi u ravni gdje parcijalni pritisak dostiže ili prevazilazi pritisak zasićenja.**

Do kondenzacije može doći na jednoj ili više površina u elementu. U datom primjeru do kondenzacije dolazi na jednoj površini. Takođe je utvrđeno da kondenzacija počinje u oktobru (kad se pojavljuje parcijalni pritisak veći od pritiska zasićenja u jednoj površini između slojeva). Ova pojava je, u datom primjeru, prisutna do marta. Nakon toga dolazi do isparavanja (isušenja) koje traje do septembra.

U Tabeli 5 su prikazani rezultati proračuna pritiska zasićenja i parcijalnih pritiska za oktobar i novembar. Na isti način potrebno je izvršiti proračun za sve mjeseci u godini.

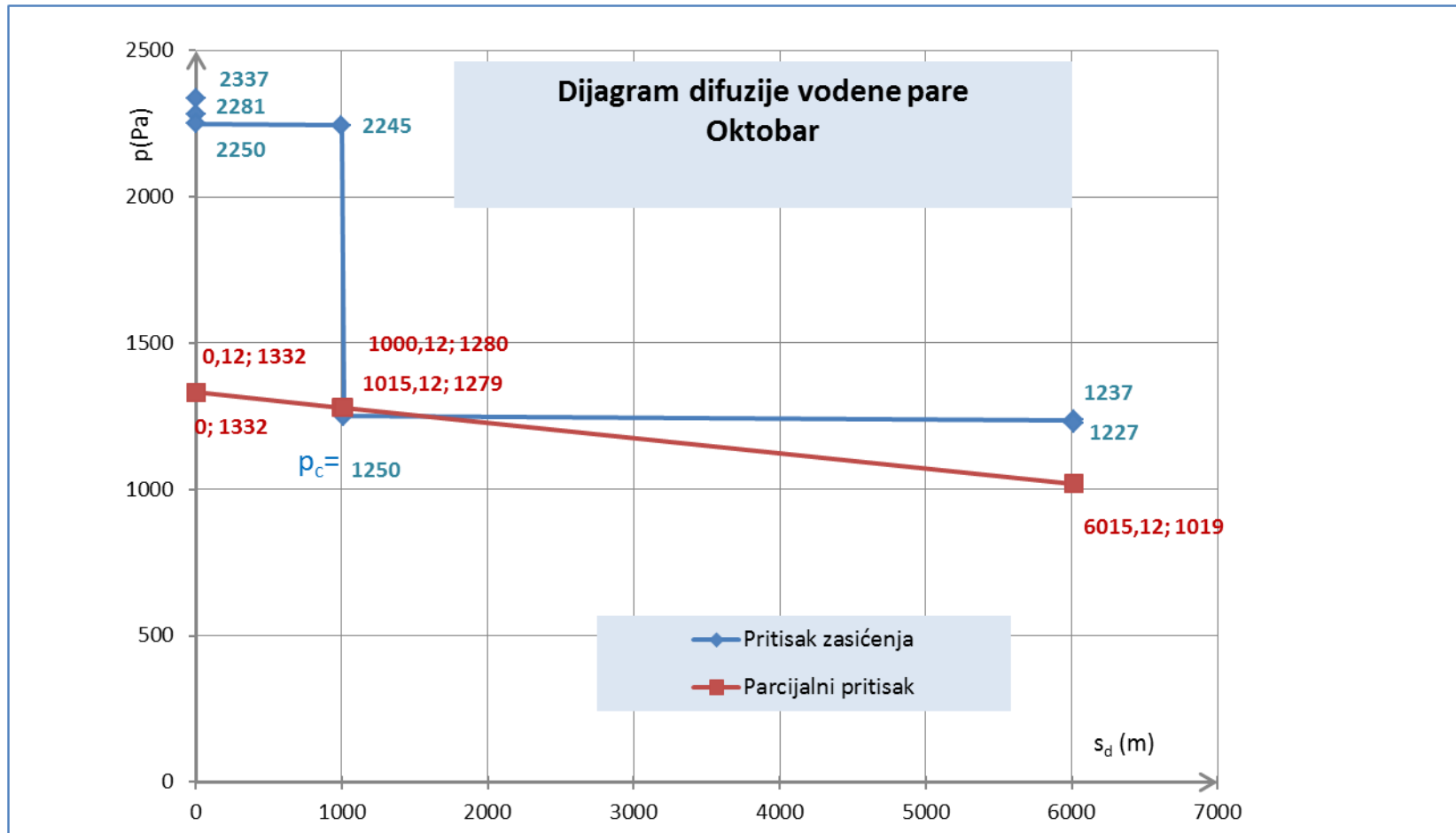
- Proračun količine kodenzovane pare se vrši po mjesecima, iz razlike količine pare koja je „ušla“ i koja „izlazi“ iz konstrukcije. Za kondenzaciju u jednoj ravni koristi se formula:

$$g_c = \delta_0 \left( \frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right) \quad \text{gdje je} \quad \delta_0 = 2 \times 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}).$$

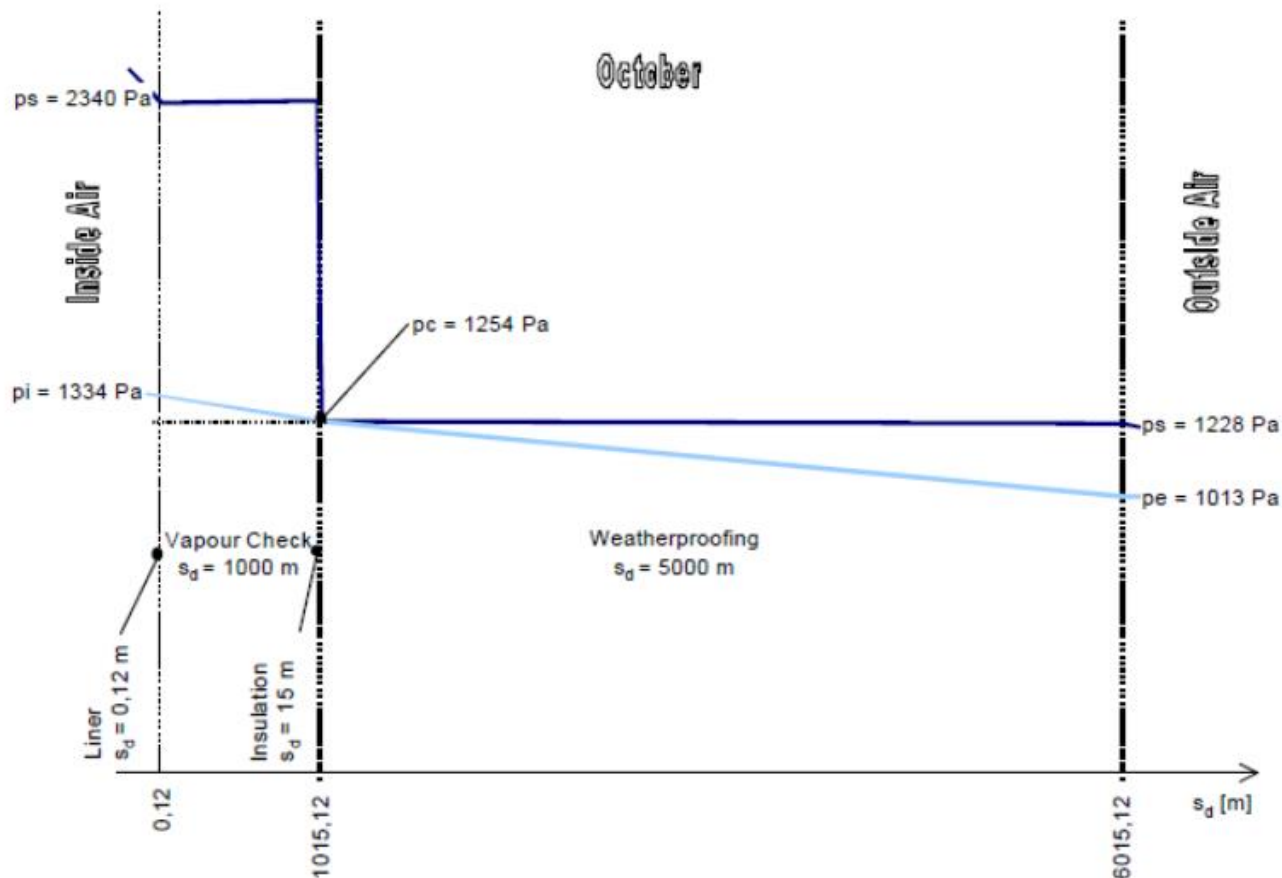
Parcijalni pritisak u ravni kondenzacije je po proračunu veći od pritiska zasićenja. Međutim, pritisak pare u realnim uslovima ne može imati veću vrijednost od pritiska zasićenja, pa se pri proračunu količine kodenzovane pare koristi vrijednost pritiska zasićenja u toj ravni, označena sa  $p_c$  na dijagramu difuzije.

Vrijednosti koje se proračunavaju primjenom izraza za  $g_c$  su  $[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}]$ .

Za proračun količine kodenzovane pare na mjesečnom nivou vrijednost se koriguju brojem sekundi u jednom mjesecu.



Slika 9. Dijagram difuzije vodene pare za oktobar



Slika 10 Dijagram difuzije vodene pare za oktobar prema [2]

Tabela 6 Spoljašnji uslovi i proračunata količina kondenzata za oktobar i novembar.

Mjese c	$\theta_i$ [ °C]	$\varphi_i$	$\theta_e$ [ °C]	$\varphi_e$	Količina kondenzata	
					$g_c$	Ma
					[kg/m <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]
Okt	20	0,57	10	0,83	1,80961E-05	1,81E-05
Nov	20	0,57	5	0,88	0,000208819	0,000227
Dec	20	0,59	1	0,88		
Jan.	20	0,57	-1	0,85		
Feb.	20	0,58	0	0,84		
Mart	20	0,54	4	0,78		
April	20	0,51	9	0,72		
Maj	20	0,51	14	0,68		
Jun	20	0,5	18	0,69		
Jul	20	0,56	19	0,73		
Avg.	20	0,52	19	0,75		
Sep.	20	0,56	15	0,79		

U tabeli su dati rezultati proračuna za oktobar i novembar. Potrebno je izvršiti proračun i za ostale mjesece u godini. Rezultati ukupnog proračuna su prikazani u Tabeli 7, prema [2].

Tabela 7: Rezultati proračuna kondenzacije i isparavanja za primjer krovnog elementa sa parnom branom i bez parne brane

Month	With vapour barrier		Without vapour barrier	
	<i>gc</i>	<i>Ma</i>	<i>gc</i>	<i>Ma</i>
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]
October	0,00002	0,00002	0,00288	0,00288
November	0,00021	0,00023	0,01490	0,01778
December	0,00036	0,00058	0,02470	0,04248
January	0,00038	0,00096	0,02621	0,06869
February	0,00033	0,00129	0,02304	0,09173
March	0,00020	0,00150	0,01499	0,10672
April	-0,00003	0,00147	0,00068	0,10740
May	-0,00028	0,00119	-0,01504	0,09236
June	-0,00053	0,00066	-0,03097	0,06139
July	-0,00053	<b>0,00013</b>	-0,03164	<b>0,02975</b>
August	-0,00058	<b>0</b>	-0,03494	<b>0</b>
September	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Proračunata količina kondenzata počev od aprila ima negativnu vrijednost, pa se i ukupna količina akumulirane vlage smanjuje, tako da u avgustu dostiže 0.

U Tabeli 7 su prikazani rezultati proračuna za sve mjesece u godini za dva slučaja:

1. kad postoji parna brana
2. bez parne brane.

Stepen kondenzacije je mnogo veći u slučaju bez parne brane, nego sa parnom branom, (npr. bez parne brane je 0,02975, a sa parnom branom 0,00013).

### **Literatura:**

1. BS EN ISO 13788:2002
2. THOMAS MAIER: ISO 13788, HYGROTHERMAL CALCULATION PROCEDURE OF BUILDING COMPONENTS, DESCRIPTION OF THE CALCULATION METHOD