



UNIVERZITET U BEOGRADU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

NAVODNJAVANJE

ŠKOLSKA 2016/2017

EVAPOTRANSPIRACIJA

Predmetni profesor:

prof.dr Miloš Stanić, dipl. građ. inž.

Predmetni asistent:

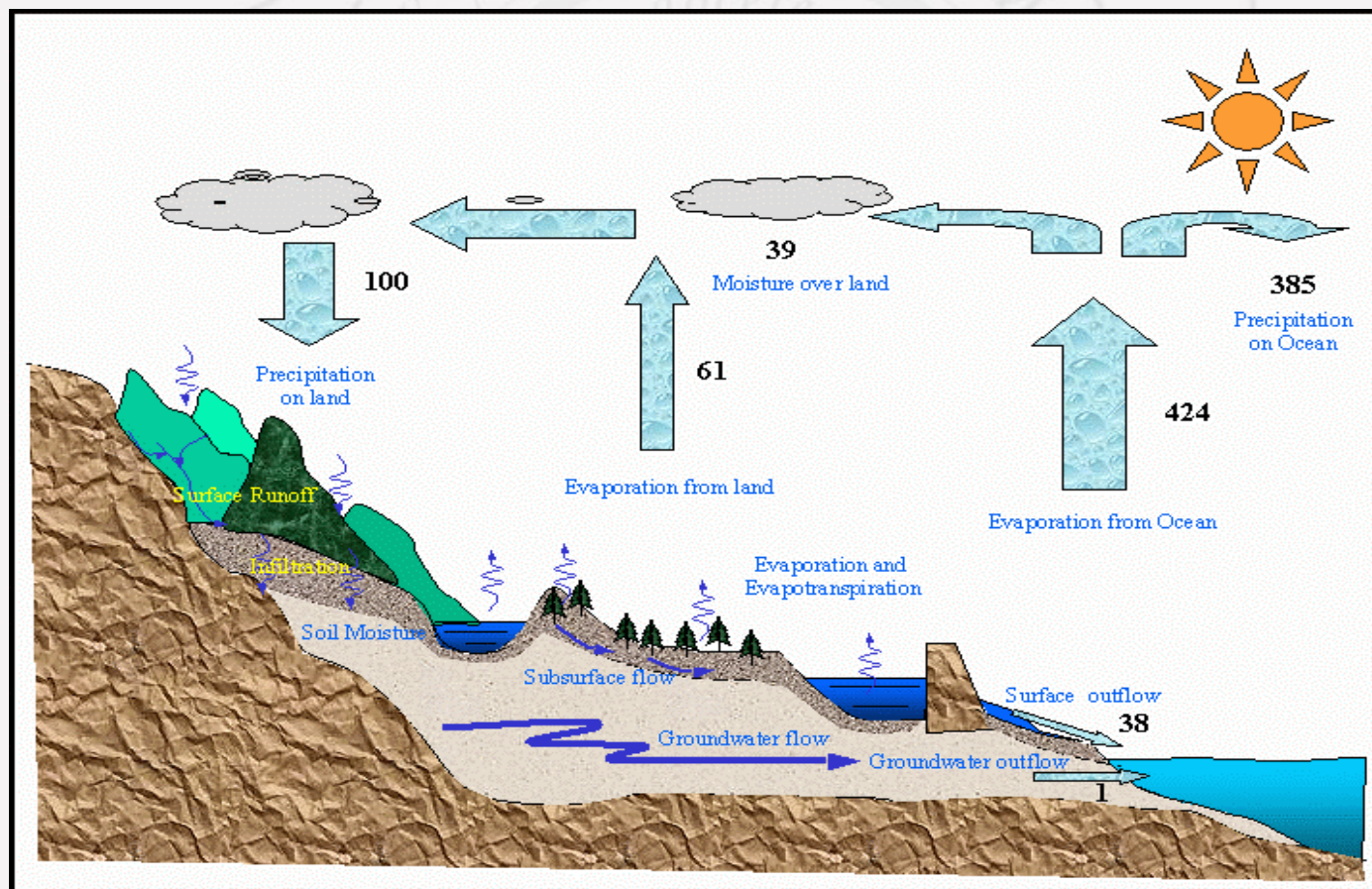
Željko Vasilić, dipl. građ. inž.

Beograd, 2016.

Водни биланс – хидролошки циклус



Водни биланс - збир улазних и излазних количина воде (без обзира на агрегатно стање) на одређену површину и у току одређеног временског периода

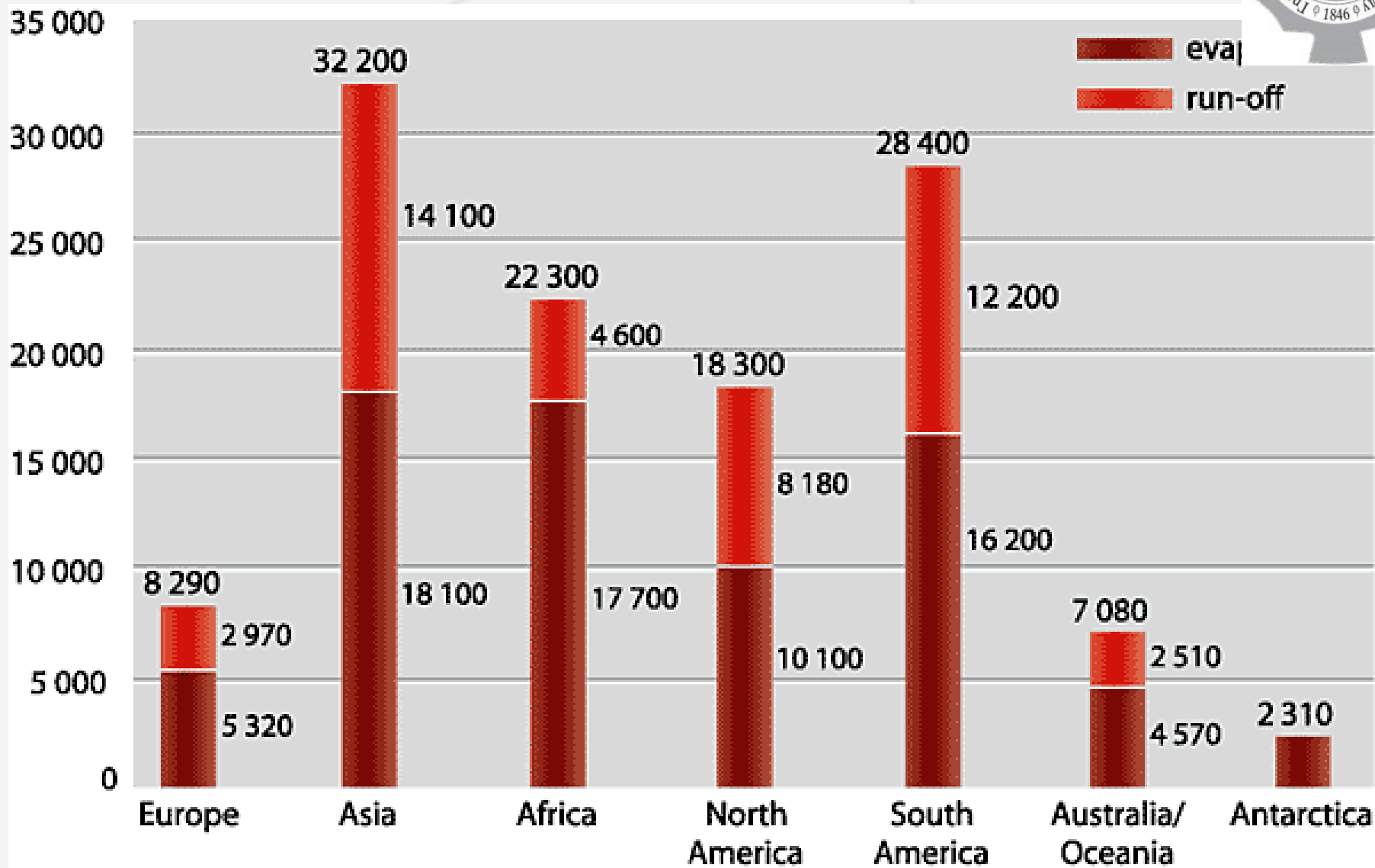


Водни биланс – хидролошки циклус

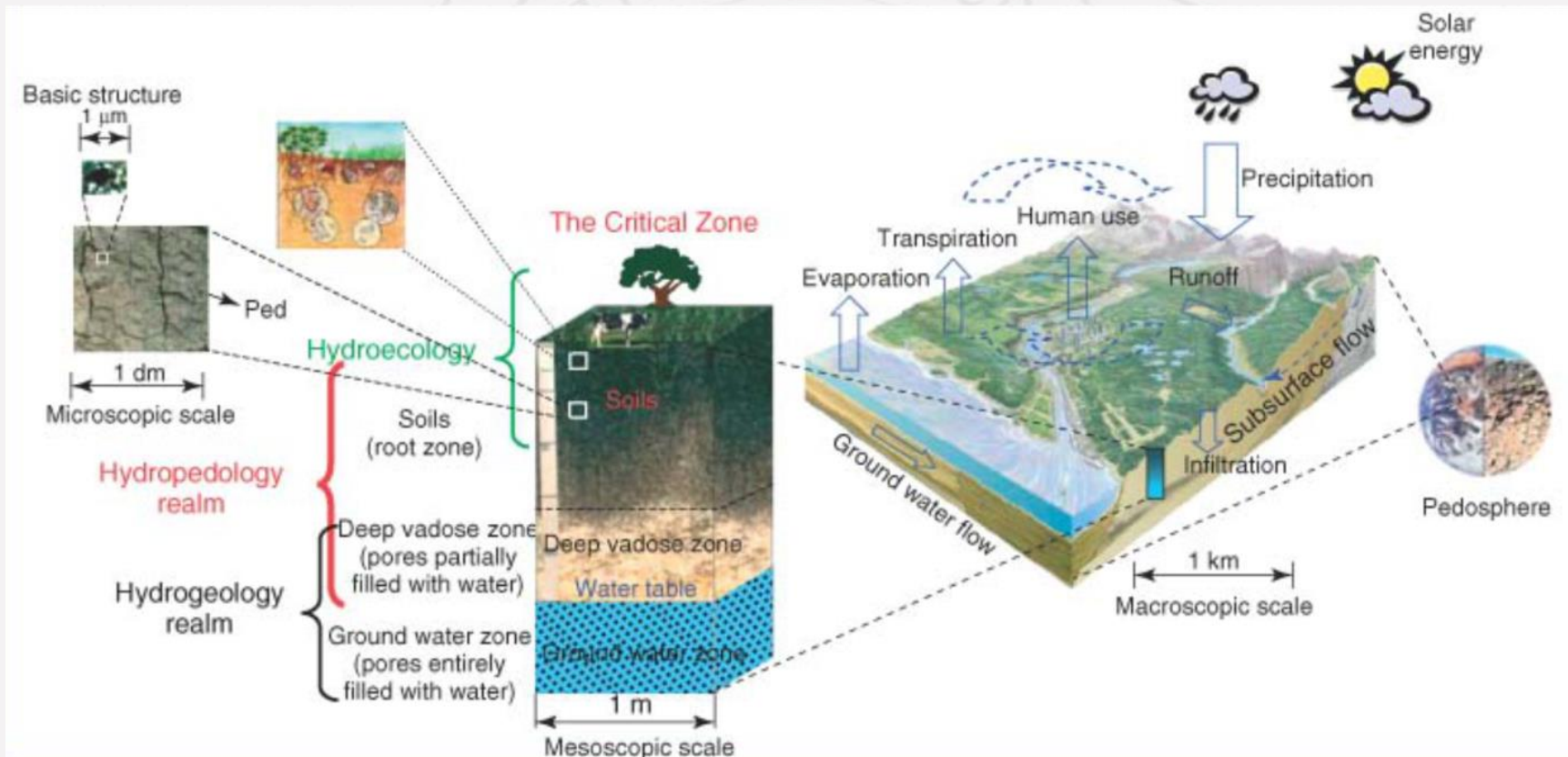


Parts of the Hydrosphere	Volume of Freshwater (km ³)	Share of Total Volume of Freshwater (percent)
Ice sheets and glaciers	24,000,000	84.945
Groundwater	4,000,000	14.158
Lakes and reservoirs	155,000	0.549
Soil moisture	83,000	0.294
Water vapor in the atmosphere	14,000	0.049
River water	1,200	0.004
Total	28,253,200	100.000

Водни биланс – хидролошки циклус



Водни биланс – компоненте

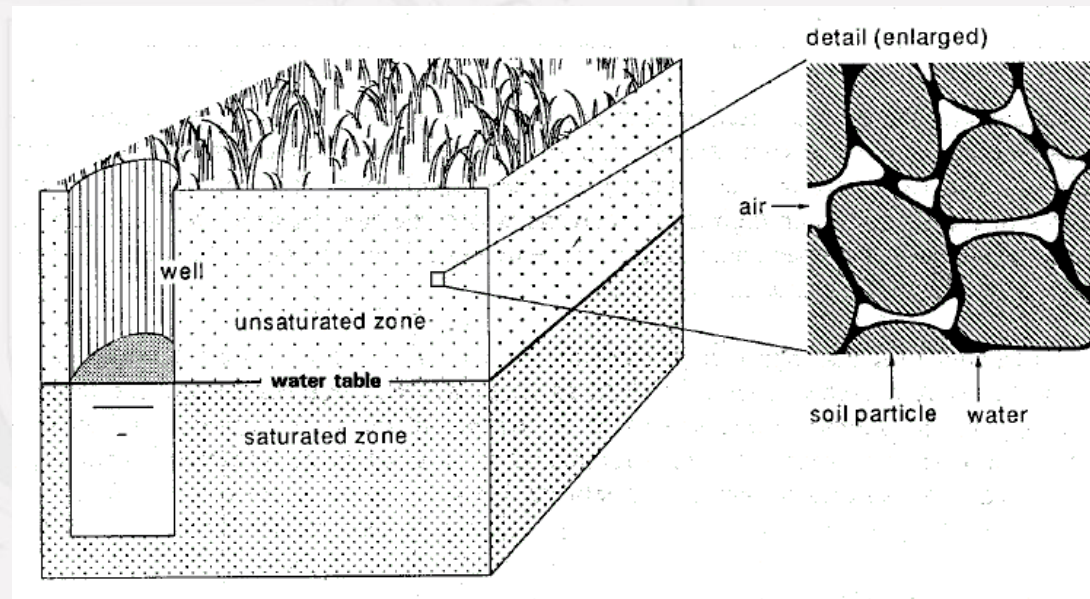
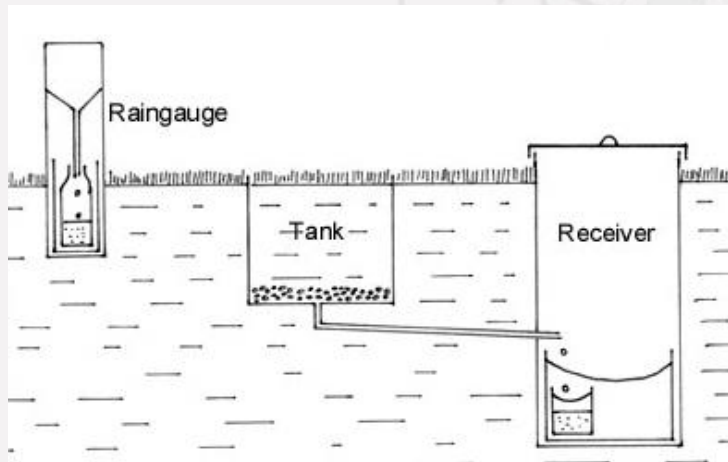


Водни биланс – компоненте



- Вертикални водни биланс активног слоја незасићене средине на нивоу елементарне површине dA :

$$\frac{1}{dA} \frac{dV_v}{dt} = P - P_{ot} - q_d - E - T$$



- Биланс подземне воде:

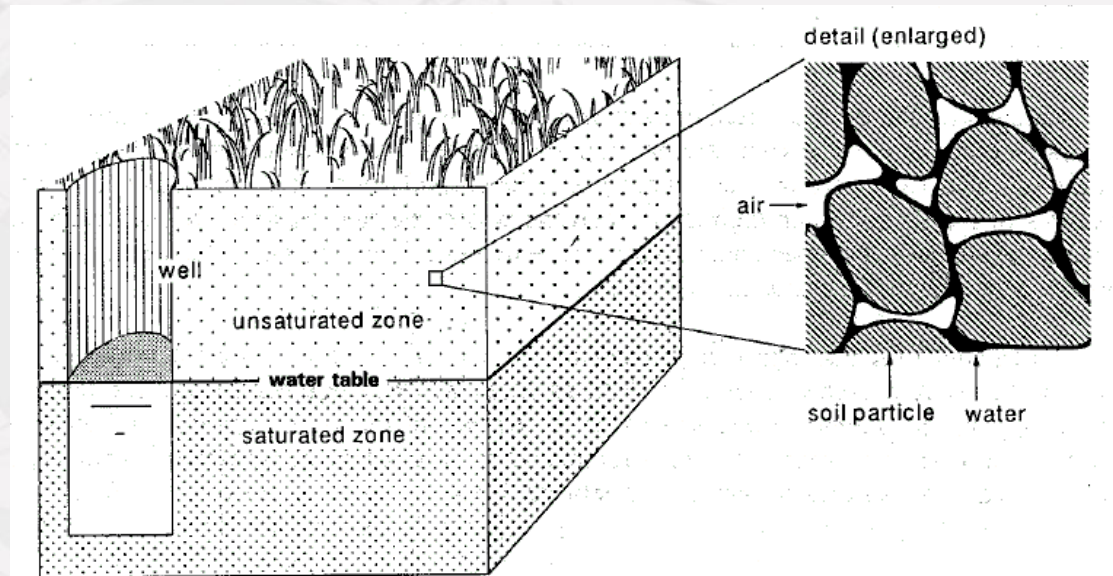
$$S_e \frac{\partial \Pi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \Pi \frac{\partial \Pi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \Pi \frac{\partial \Pi}{\partial y} \right) + q_d$$

Водни биланс – евапорација



- Вертикални водни биланс активног слоја незасићене средине на нивоу елементарне површине dA :

$$\frac{1}{dA} \frac{dV_v}{dt} = P - P_{ot} - q_d - E - T$$



- Биланс подземне воде:

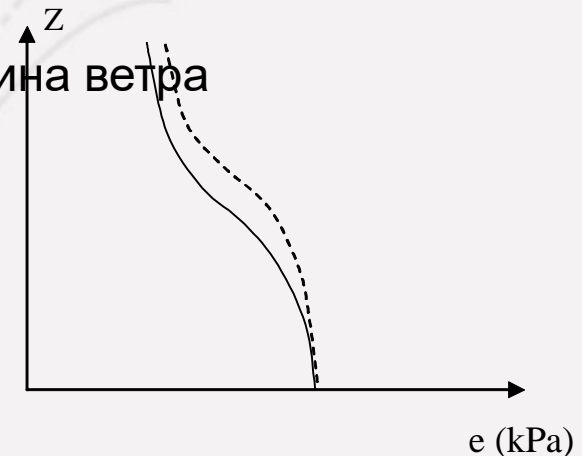
$$S_e \frac{\partial \Pi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \Pi \frac{\partial \Pi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \Pi \frac{\partial \Pi}{\partial y} \right) + q_d$$

Водни биланс – евапорација



Евапорација:

- испаравање (са земљишта)
- процес у коме вода из течног прелази у гасовито агрегатно стање трошећи при томе енергију
- потребни услови за испаравање:
 - **енергија** (највећим делом потиче од директног сунчевог зрачења, а мањим, од размене топлоте са околином)
 - **градијент влажности ваздуха** (најзначајнији утицај ветра)
- са испаравањем, влажност ваздуха изнад површине терена се повећава и уколико се не транспортује и замени сувим ваздухом, евапотранспирација се успорава и може у потпуности да престане
- највећи утицај на транспорт влажног ваздуха има брзина ветра



Водни биланс – евапорација



Евапорација зависи од:

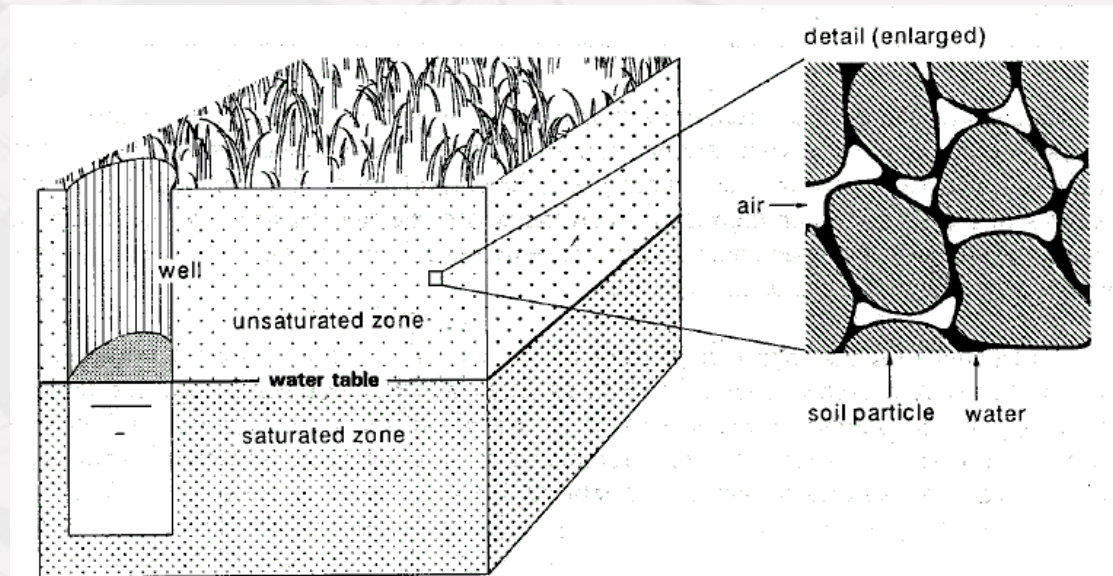
- климатолошких параметара:
 - сунчево зрачење
 - температура ваздуха
 - влажност ваздуха
 - брзина ветра
- услова у земљишту:
 - влажност земљишта
 - могућност земљишта да транспортује воду из дубљих слојева
- покривености земљишта вегетацијом
(вегетација одређује степен изложености површине терена директном сунчевом зрачењу)

Водни биланс – транспирација



- Вертикални водни биланс активног слоја незасићене средине на нивоу елементарне површине dA :

$$\frac{1}{dA} \frac{dV_v}{dt} = P - P_{ot} - q_d - E - T$$



- Биланс подземне воде:

$$S_e \frac{\partial \Pi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \Pi \frac{\partial \Pi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \Pi \frac{\partial \Pi}{\partial y} \right) + q_d$$

Водни биланс – транспирација



Транспирација:

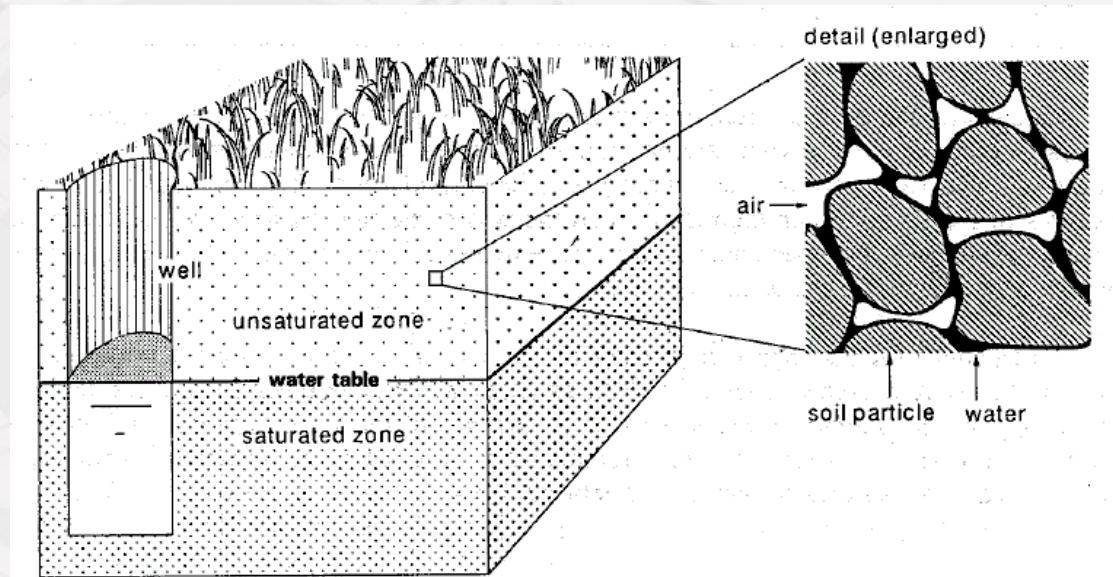
- процес повлачења воде из земљишта, њено искоришћење у развоју биљке и испаравање кроз лишће
(биљка повлачи воду у течном стању и хранљиве материје кроз корен и претвара их у водену пару која кроз лист одлази у атмосферу)
- зависи, слично као и евапорација, од:
 - климатолошких параметара:
 - сунчево зрачење
 - температура ваздуха
 - влажност ваздуха
 - брзина ветра
 - услова у земљишту:
 - влажност земљишта
 - могућност земљишта да транспортује воду из дубљих слојева
 - типа културе која се гаји, као и од фазе развоја биљке
- разлика се јавља у стању потпуне засићености земљишта водом: евапорација се повећава, а транспирација се смањује (засићеност неповољно утиче на биљку)

Водни биланс – евапотранспирација



- Вертикални водни биланс активног слоја незасићене средине на нивоу елементарне површине dA :

$$\frac{1}{dA} \frac{dV}{dt} = P - P_{ot} - q_d - E - T$$



- Биланс подземне воде:

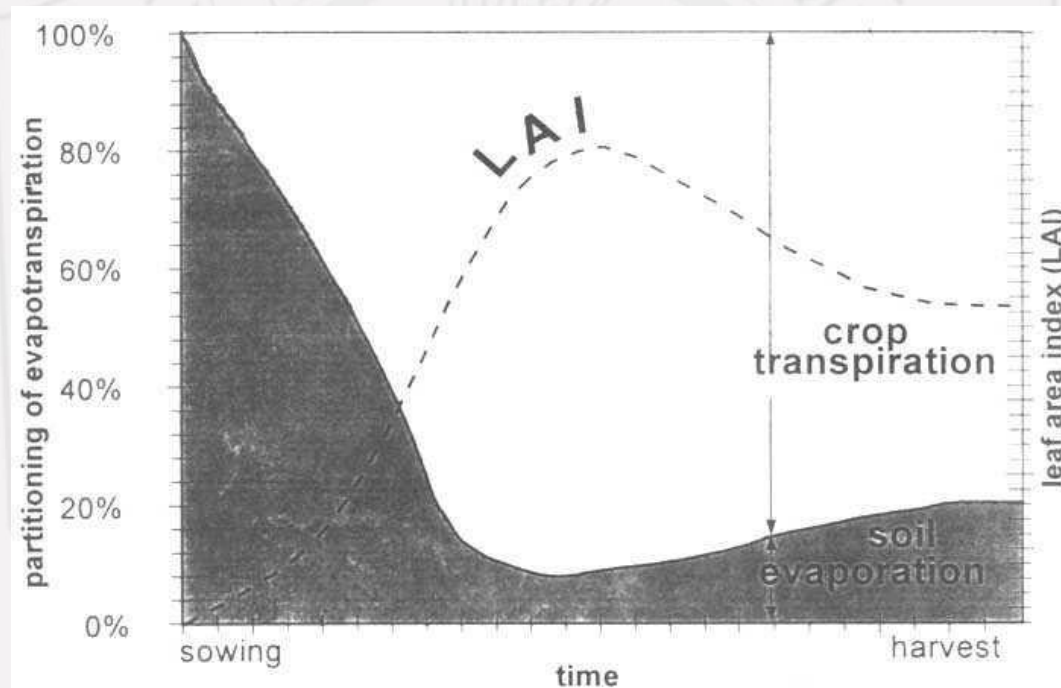
$$S_e \frac{\partial \Pi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \Pi \frac{\partial \Pi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \Pi \frac{\partial \Pi}{\partial y} \right) + q_d$$

Водни биланс – евапотранспирација



Евапотранспирација:

- збир два процеса (евапорације и транспирације), имајући у виду да су они веома повезани и да их је тешко раздвојити



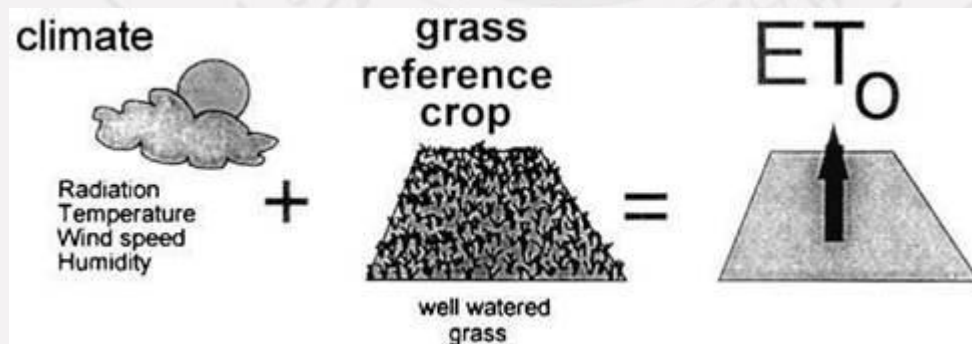
- у почетним фазама развоја биљке, готово да нема транспирације - укупна потрошња воде одлази на евапорацију
- са порастом биљке, земљиште је све мање изложено сунчевом зрачењу (заклоњено је сенком коју ствара биљка) - транспирација постаје доминантна

Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација:

- уводи се да би се олакшао прорачун
- зависи **само од климатолошких параметара**, елиминише се утицај:
 - услова у земљишту и
 - врсте вегетације и фазе развоја вегетације
- испаравање са референтне површине која има довољну влажност (земљиште је натопљено водом)
- референта култура је густа трава висине 12 cm, која има оптималне услове за развој
- препоручена метода прорачуна: Penman-Monteith



Водни биланс – евапотранспирација



Прорачун референтне евапотранспирације
применом једначине Penman-Monteith:

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \gamma \lambda \frac{187250}{T + 273} \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (MJ m^{-2} dan^{-1})$$

- ET_0 - референтна евапотранспирација (mm/dan)
- λ - латентна топлота испаравања (MJ/kg)
- R_n - нето радијација (MJ/(m² dan))
- G - размена топлоте са земљом (MJ/(m² dan))
- $e_s - e_a$ - дефицит засићене водене паре (kPa)
- Δ - извод криве засићене водене паре (kPa/°C)
- γ - психрометријска константа (kPa/°C)
- r_a, r_s - аеродинамички и отпор површине (s/m)

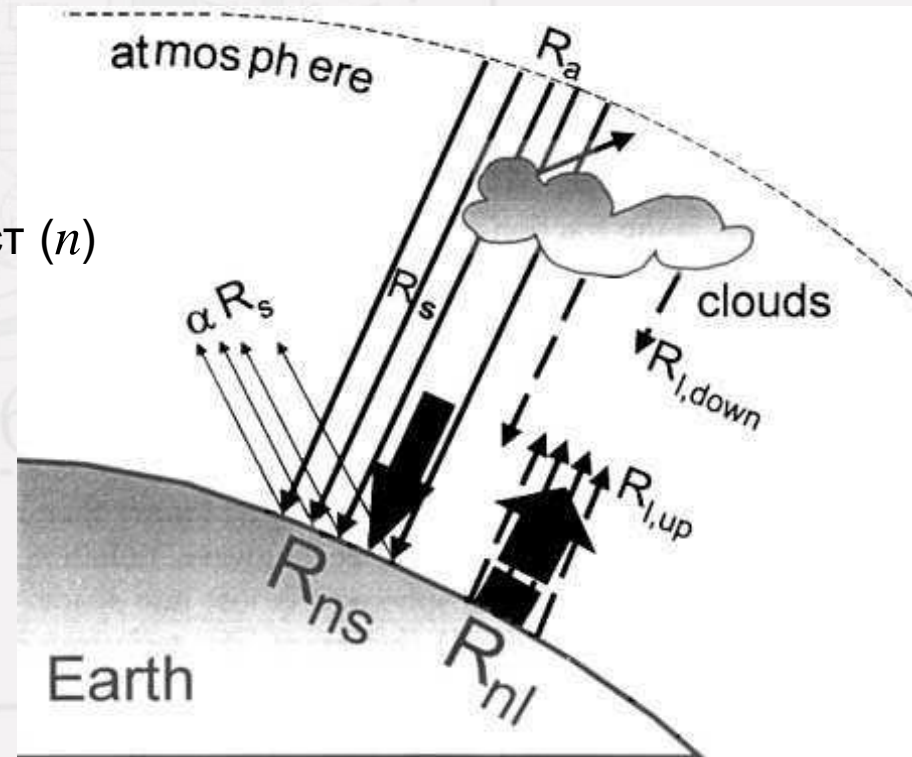
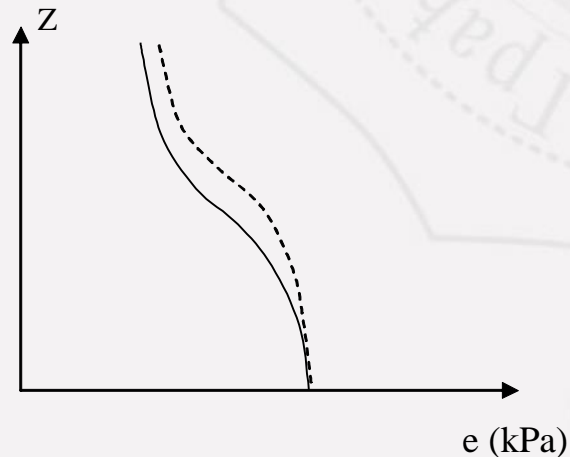
Водни биланс – евапотранспирација



Прорачун референтне евапотранспирације
применом једначине Penman-Monteith:

Улазни подаци:

1. који се односе на локацију
 - географска ширина $\rightarrow R_a, N$
 - надморска висина $\rightarrow p_a$
2. метеоролошки подаци
 - температура ваздуха (T_{min}, T_{max})
 - влажност ваздуха (e_a или RH)
 - брзина ветра (U_2)
 - нето радијација (R_n) или осунчаност (n)



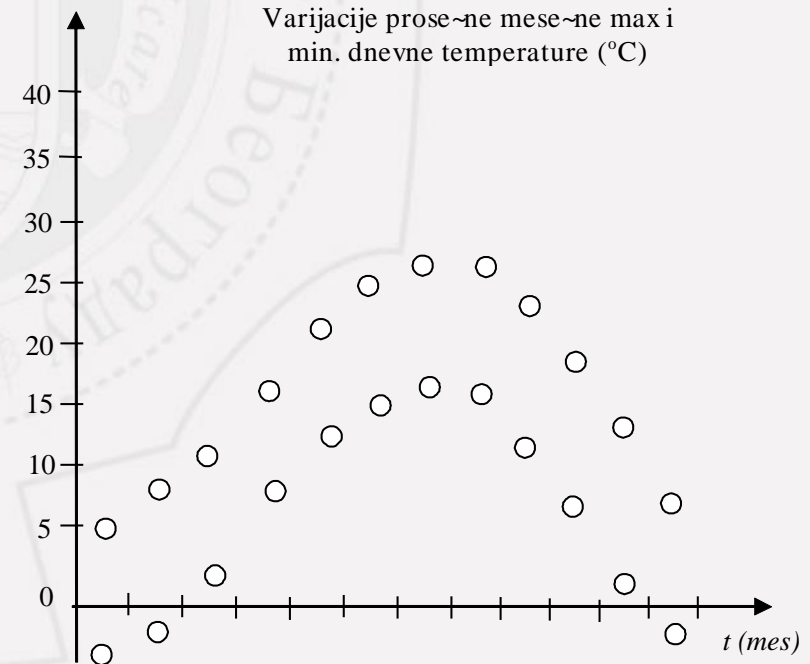
Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – улазни подаци

Температура

- поред падавина је најчешће мерена метеоролошка величина
- утиче на испаравање, транспирацију, топљење снега
- дневне и сезонске варијације – последица позиције Земље у односу на
- просторне варијације: географски положај, надморска висина
(температура опада за 0.65°C на 100 м висине)
- мерење: у мет. заклонима на 2 м висине
- термометри (живини и алкохолни)
- термографи (континуално)
- максимални и минимални термометар



Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – улазни подаци

Брзина ветра

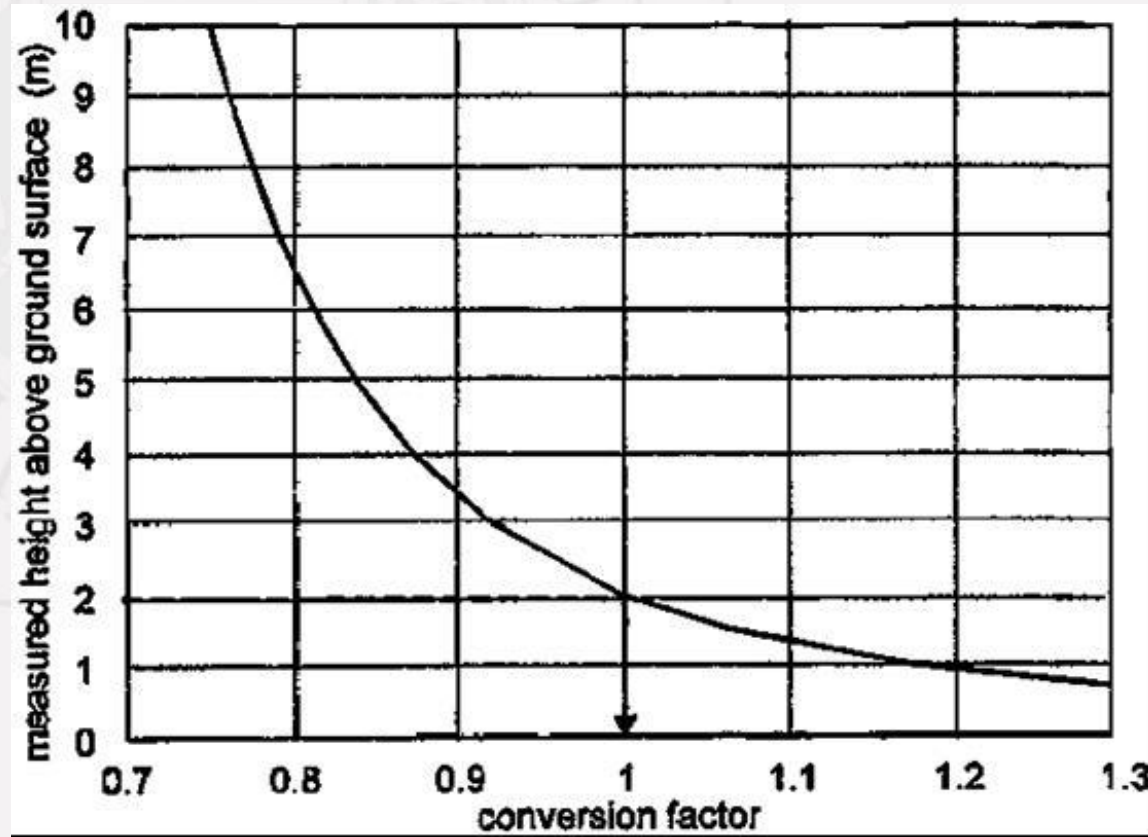
- брзина ветра се као и сваки вектор описује правцем и интензитетом
- брзина ветра зависи од висине на којој је постављен анемометар
- за прорачун ET_0 су потребни подаци о брзини ветра на 2м од површине терена (U_2)

Распоред брзина у граничном слоју:

$$u(z) = az^b$$

$$u(z) = a \log z + b$$

$$U_2 = U_z \frac{4.87}{\ln(6.78z - 5.42)}$$



Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – улазни подаци

Брзина ветра

Boforov broj	opis	m/s	km/h	čvorova
0	tišina	0	0	0
1	lahor	0.9	3	0.5
2	povetarac	2.4	9	1.2
3	slab vetar	4.4	16	2.3
4	umereni vetar	6.7	24	3.4
5	jak vetar	9.3	34	4.8
6	žestok vetar	12.3	44	6.3
7	olujni vetar	15.5	55	8.0
8	oluja	18.9	68	9.7
9	jaka oluja	22.6	82	11.6
10	žestoka oluja	26.4	96	13.6
11	vihor	30.5	110	15.7
12 (-17)	orkan (uragan)	34.8	125	17.9

Водни биланс – евапотранспирација

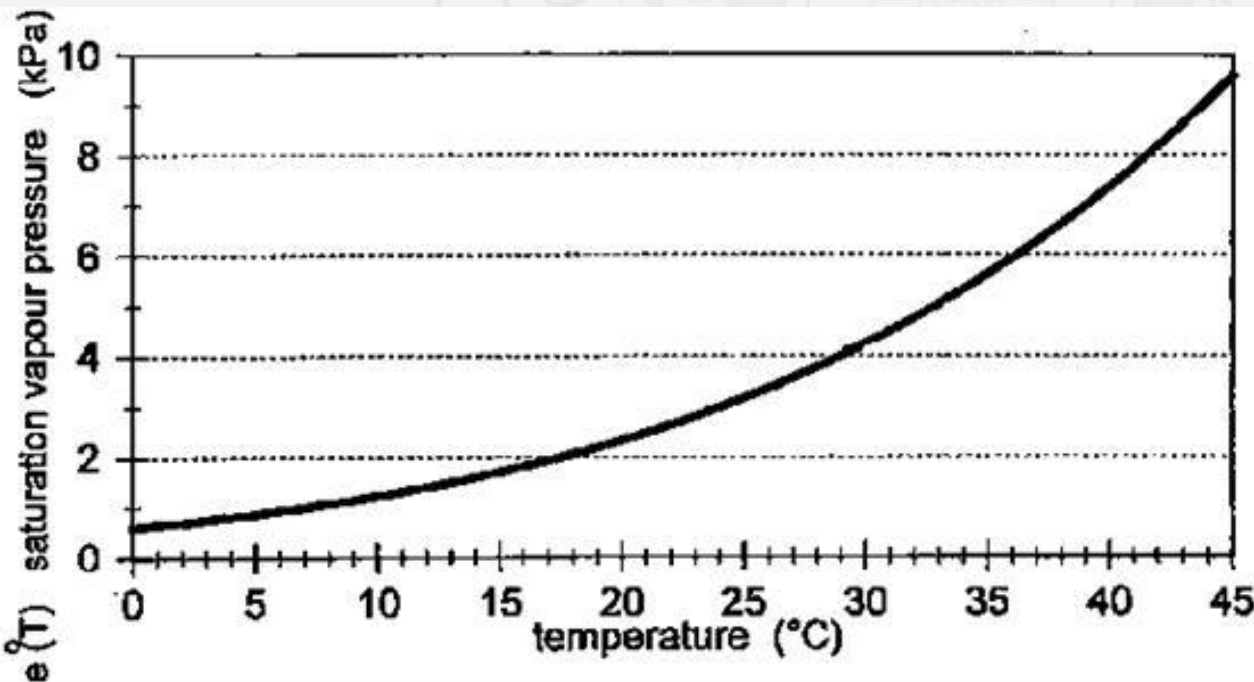


Референтна евапотранспирација – улазни подаци

Влажност ваздуха

Напон водене паре је парцијални притисак водене паре у укупном атмосферском притиску који је директна мера влажности ваздуха.

Парцијални притисак водене паре који се остварује при равнотежи између молекула воде који испаравају и оних који се из ваздуха враћају на површину је напон засићене водене паре e_s (кПа).



$$e_s(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3}\right)$$

Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – улазни подаци

Влажност ваздуха

Са повећањем температуре, расте капацитет ваздуха за пријем молекула воде, а самим тим и напон засићене водене паре.

Релативна влажност ваздуха је однос стварног и засићеног напона водене паре.

$$RH = \frac{e_a}{e_s} \cdot 100 (\%)$$

Са порастом температуре расте нагиб криве засићене водене паре Δ (kPa/°C).

$$\Delta(T) = \frac{de_s}{dT} = 4098 \frac{e_s(T)}{(T + 237.3)^2}$$

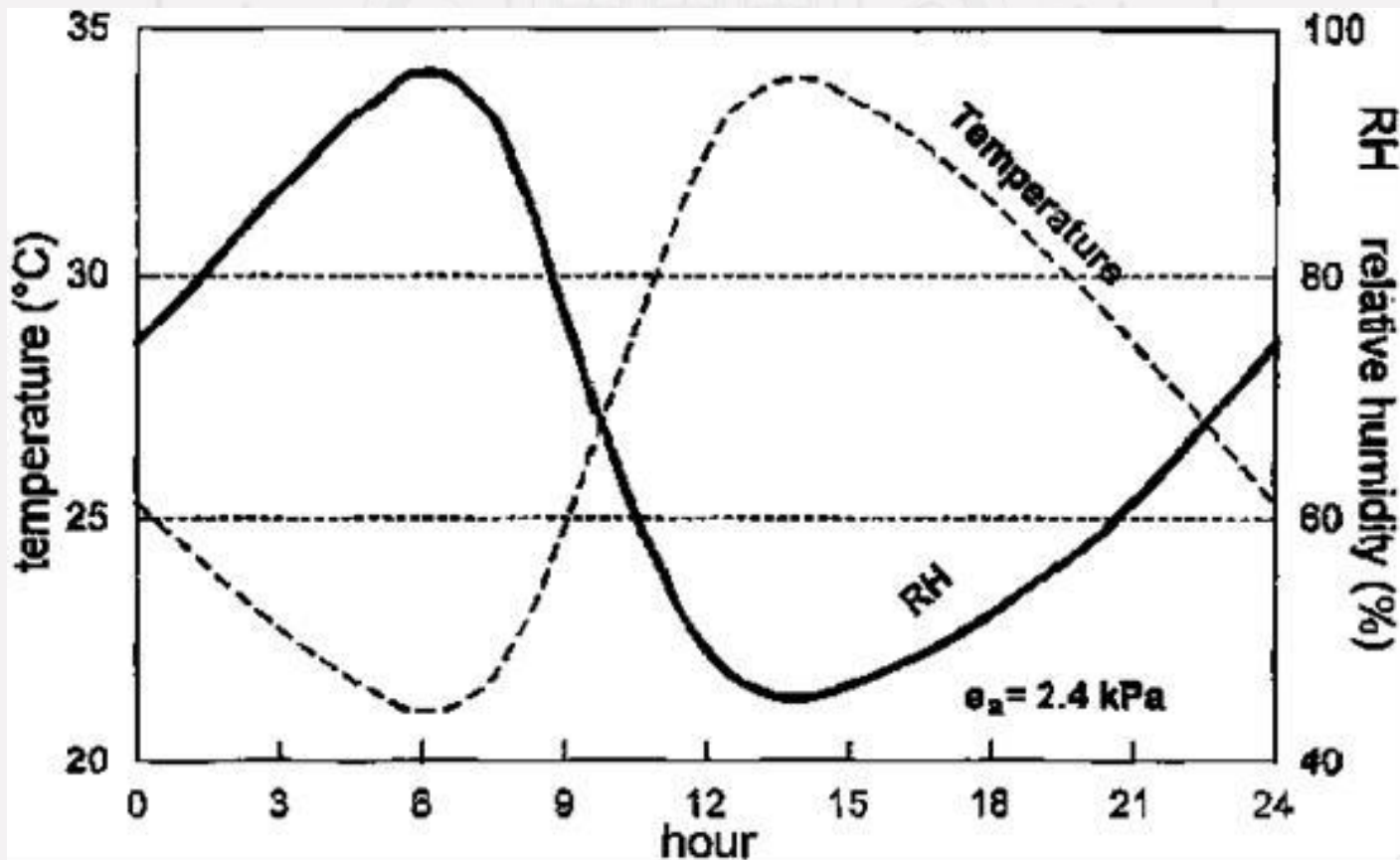
Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – улазни подаци

Влажност ваздуха

Дефицит водене паре ($e_s - e_a$) је разлика између напона засићене водене паре и стварног напона водене паре и мера је способности ваздуха да прихвати нове молекуле воде.

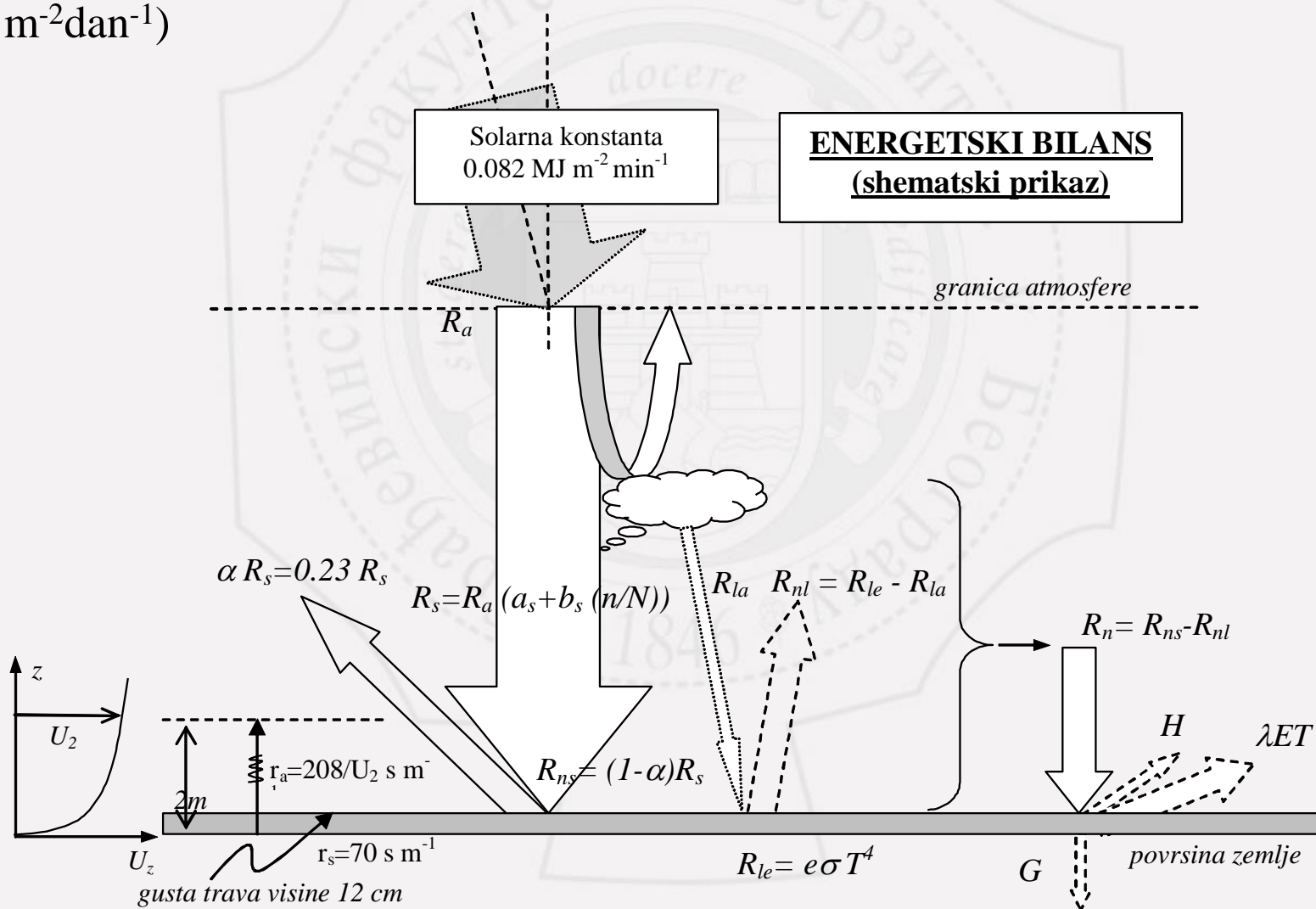


Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – улазни подаци

Радијација - енергетски флуks – протицај енергије по јединици површине (MJ m⁻²dan⁻¹)



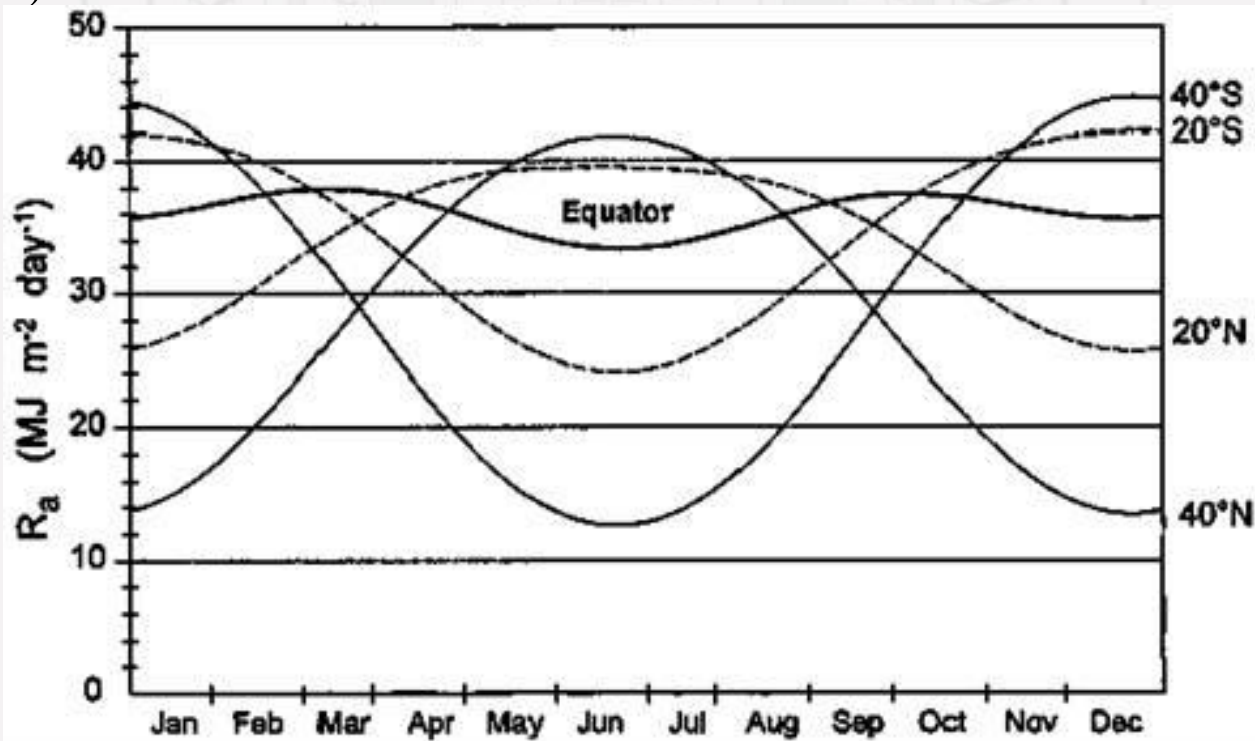
Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – улазни подаци

Радијација на граници атмосфере

Соларна константа је максимална-потенцијална количина енергије која по јединици времена и јединици површине стиже на границу атмосфере. Радијација на граници атмосфере (R_a) која долази у току дана на јединицу површине у јединици времена зависи од соларне деклинације, која је функција периода године и географске ширине (астрономска величина).



Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – улазни подаци

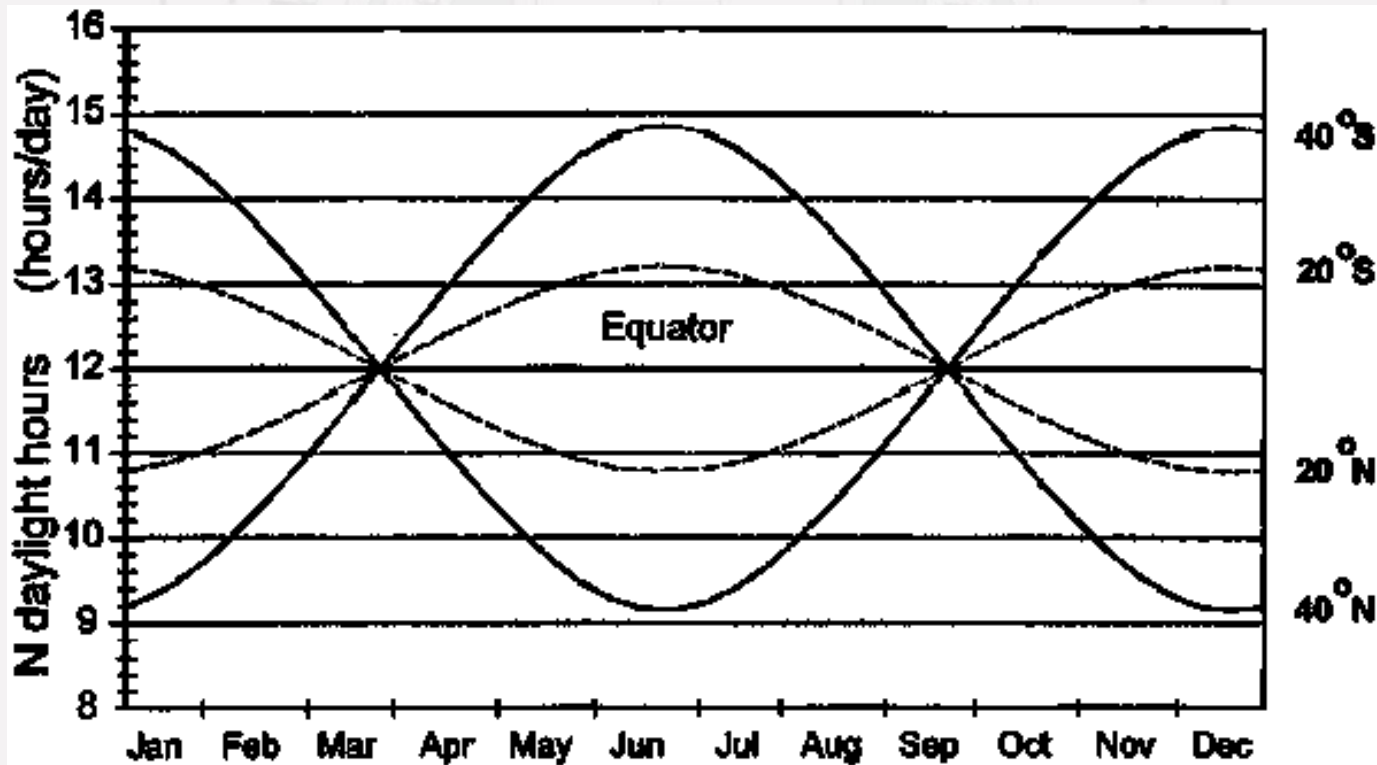
Релативна инсолација (n/N)

Релативна инсолација је однос:

стварног-мереног трајања сунчевог сјаја – n (h/dan)

потенцијалног трајања сунчевог сјаја – N (h/dan).

Потенцијално трајање сунчевог сјаја N је астрономска величина која зависи од периода године и географске ширине.



Водни биланс – евапотранспирација



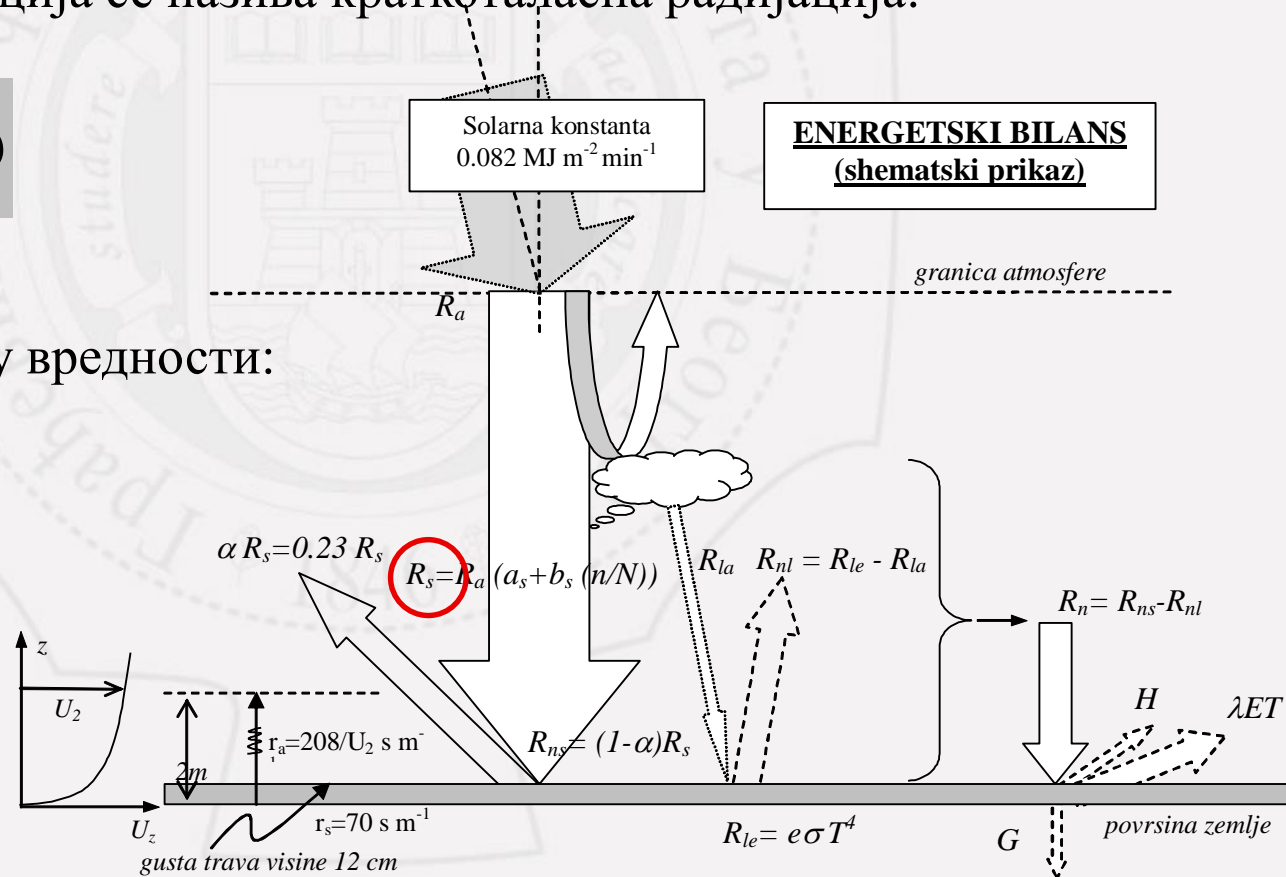
Референтна евапотранспирација – улазни подаци

Краткоталасна – сунчева радијација (R_s)

Део радијација која стиже на границу атмосфере R_a се потроши на загревање атмосфере, део се рефлектује од облака или честица прашине и преостала радијација се назива краткоталасна радијација.

$$R_s = R_a \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right)$$

Константе a_s и b_s имају вредности:
 $a_s = 0.25$ и $b_s = 0.5$.



Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – улазни подаци

Нето краткоталасна радијација (R_{ns})

Део радијације се рефлектује од површине земље.

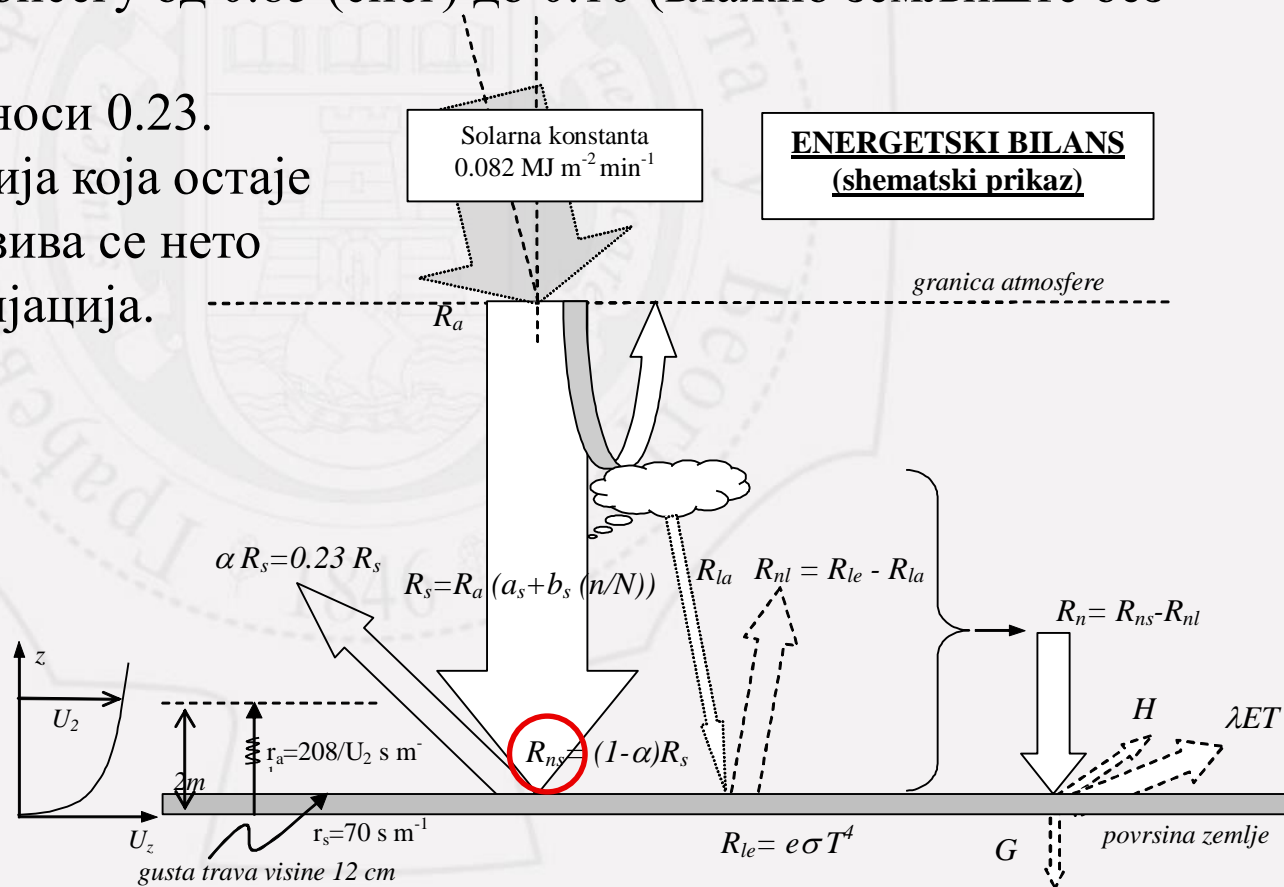
Коефицијент рефлексије се назива албедо (α) и зависи од површине.

Албедо се креће у опсегу од 0.85 (снег) до 0.10 (влажно земљиште без вегетације).

За траву албедо износи 0.23.

Преостала радијација која остаје на располагању назива се нето краткоталасна радијација.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s$$



Водни биланс – евапотранспирација



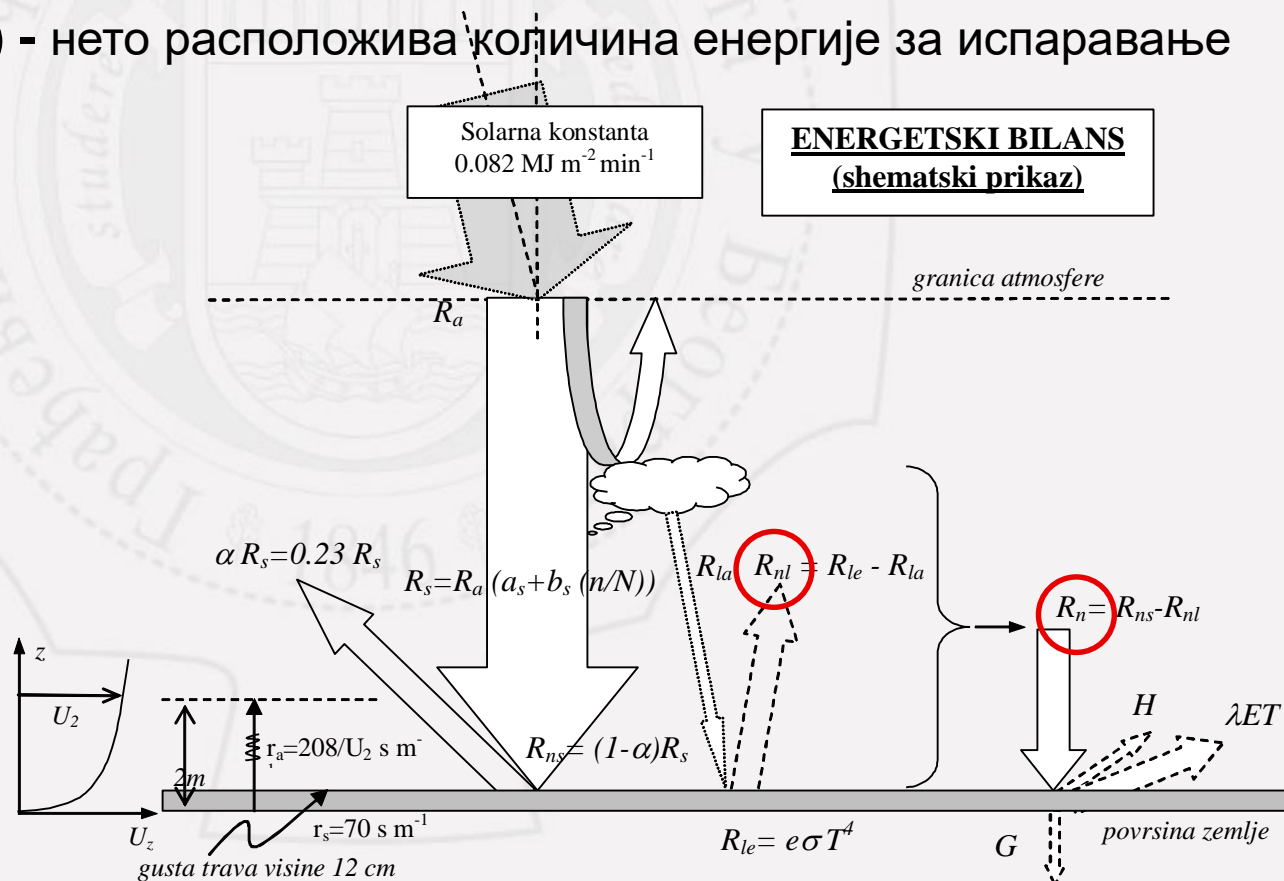
Референтна евапотранспирација – улазни подаци

Нето дуготаласна радијација (R_{nl})

$$R_{nl} = \sigma / 2 \cdot (T_{mx}^4 + T_{mn}^4) \cdot (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \cdot (0.1 + 0.9 \cdot \frac{n}{N})$$

Нето радијација (R_n) - нето расположива количина енергије за испаравање

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$



Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – улазни подаци

Размена топлоте са земљом (G)

За прорачун ове компоненте енергетског биланса уводи се претпоставка да промена температуре земљишта прати промену температуре ваздуха.

$$G = c_s \cdot \Delta z \cdot \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \quad (\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1})$$

c_s – топлотни капацитет зем. ($\text{MJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
 (= $2.1 \text{ MJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)

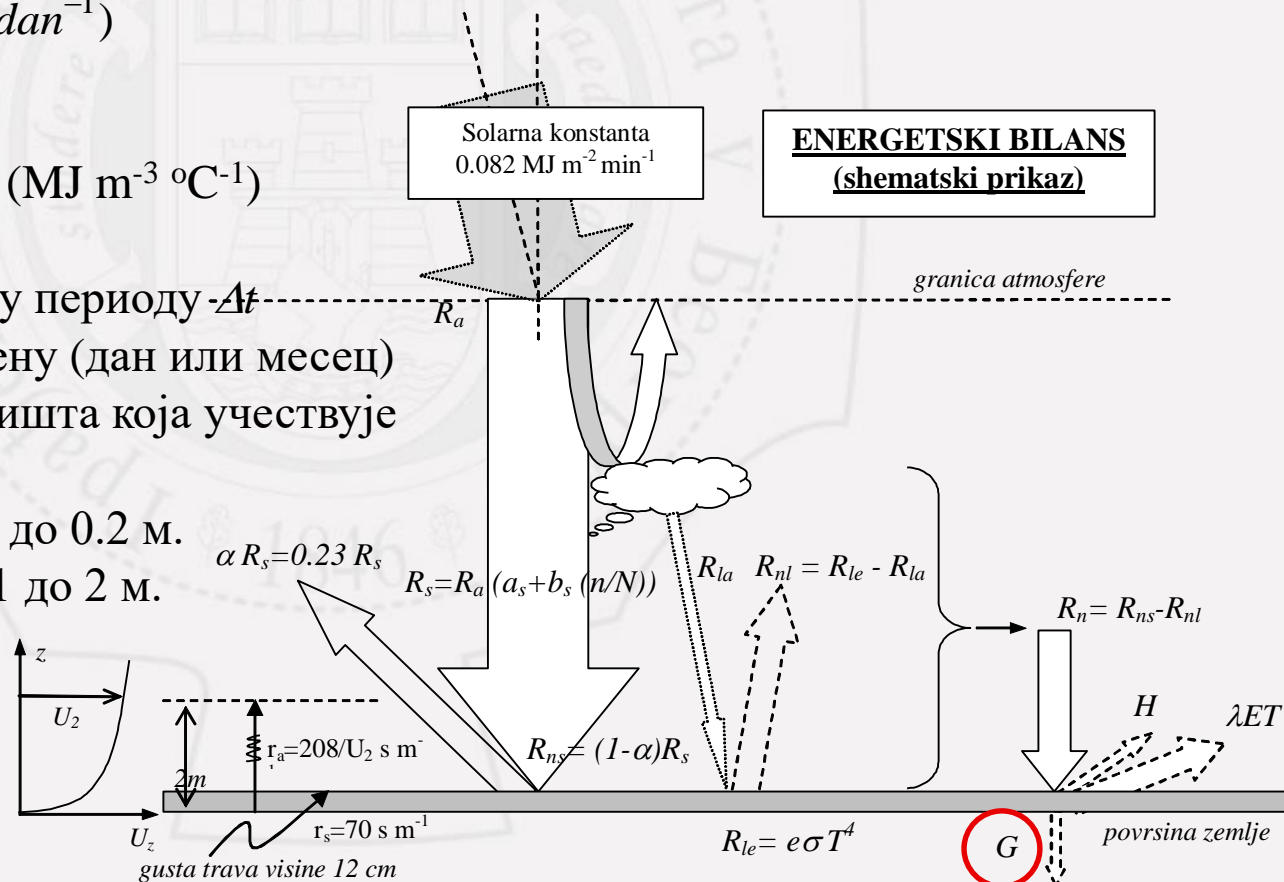
ΔT – промена темп. ваздуха у периоду Δt

Δt – дискретизација по времену (дан или месец)

Δz – ефективна дубина земљишта која учествује у размени топлоте.

Ако је Δt дан усваја се Δz 0.1 до 0.2 м.

Ако је Δt месец усваја се Δz 1 до 2 м.

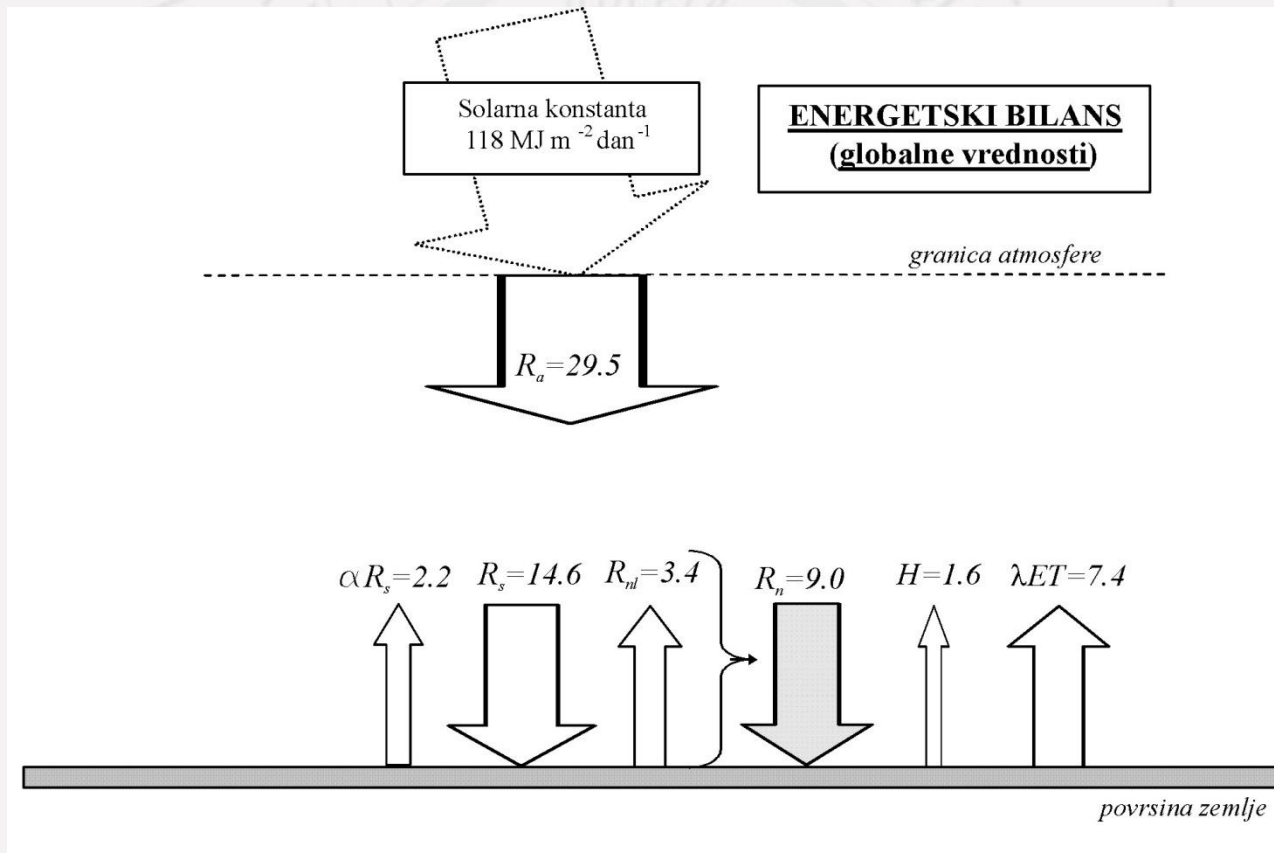


Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – улазни подаци

Глобалне вредности компоненти енергетског биланса



Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – улазни подаци

Латентна топлота испаравања (λ)

Количина енергије која је потребна да се 1 кг воде претвори у 1 кг водене паре, под претпоставком да су притисак и температура константни.

Вредност λ мало варира у односу на вредност 2.45 MJ kg^{-1} која се односи на температуру од $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Психрометријска константа (γ)

c_p - специфична топлота ваздуха на константном притиску,
 $1.013 \cdot 10^{-3} \text{ (MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})$

p_a - атмосферски притисак (кРа)

ε - однос молекуларне тежине водене паре и сувог ваздуха (0.622)

$$\gamma = \frac{c_p p_a}{\varepsilon \lambda}$$

Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – улазни подаци

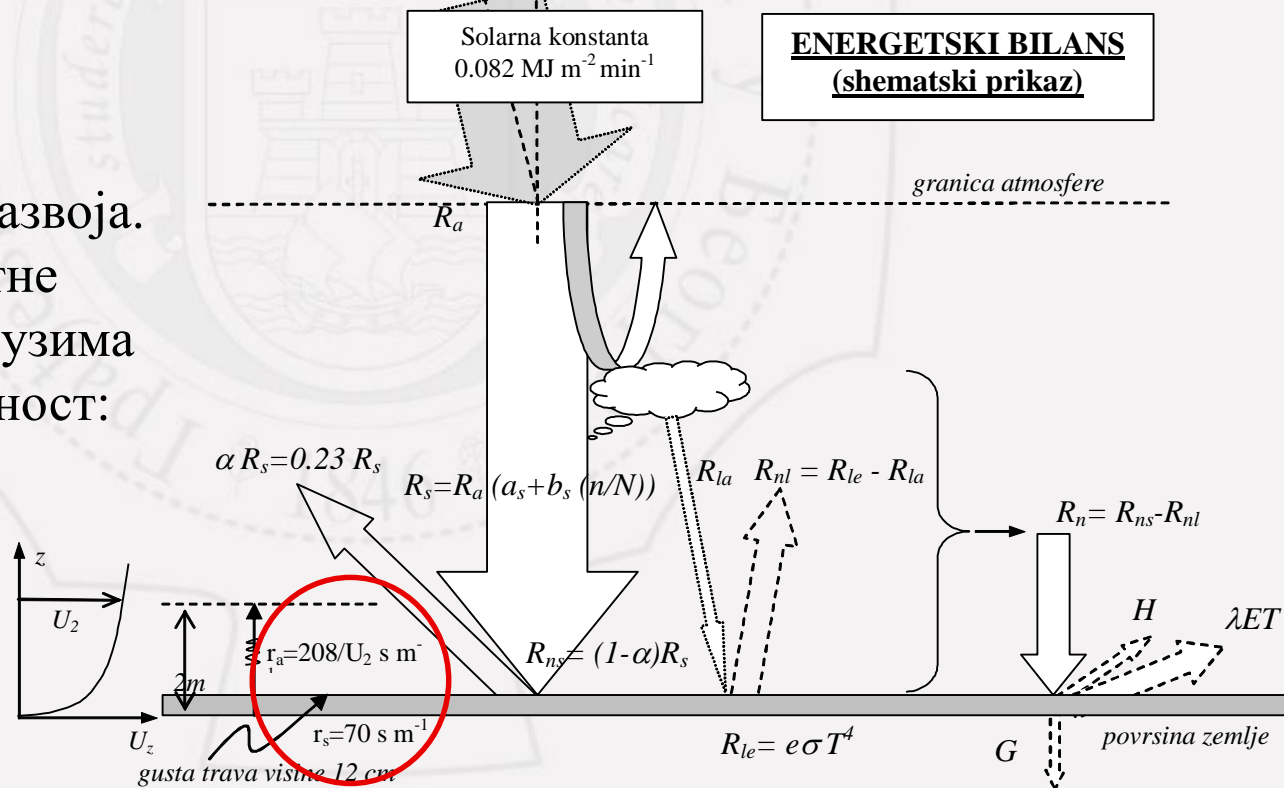
Аеродинамички отпор испаравању (r_a)

Могућност испаравања и трансфера топлоте и водене паре у више слојеве зависи од аеродинамичког отпора: $r_a = \text{coef} / U_2$ (s m^{-1})

Коефицијент *coef* зависи од висине вегетације. За референтну површину (трава 12 цм висине) усваја се вредност 208.

Отпор вегетације испаравању (r_s)

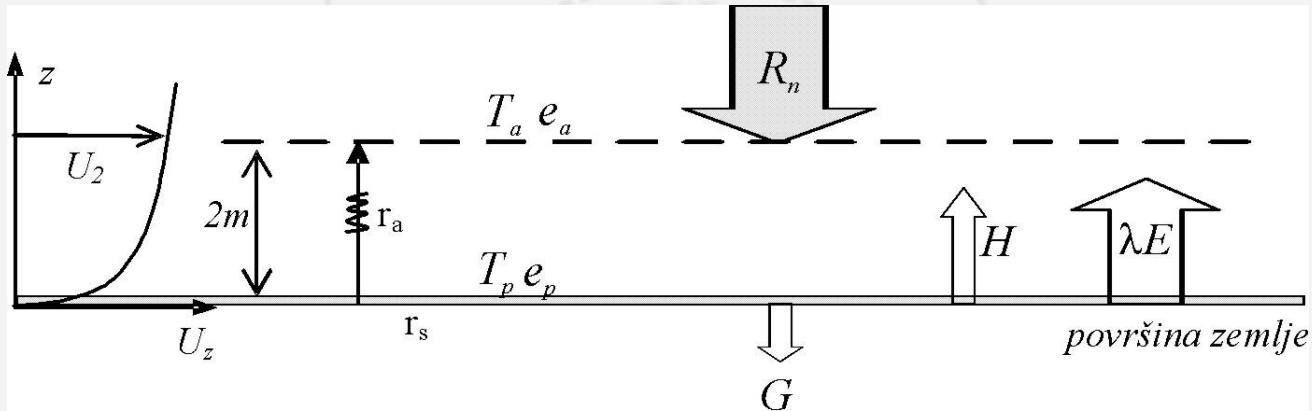
Зависи од врсте вегетације и фазе развоја. У случају референтне вегетације – траве, узима се константна вредност: 70 s m^{-1}



Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – извођење



Енергетски биланс:

$$R_n - G = H + \lambda E$$

$$H = c_1 \frac{T_a - T_p}{r_a}$$

$$\lambda E = c_2 \frac{e_a - e_p}{r_a}$$

Бовен-ов однос:

$$\frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{T_a - T_p}{e_a - e_p}$$

Психрометријска
константа:

$$\gamma = (c_p \rho_a) / (\varepsilon \lambda)$$

где су:

c_p – специфична топлота ваздуха
на константом притиску,
 $1.013 \cdot 10^{-3} \text{ (MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$

ρ_a – атмосферски притисак (kPa)

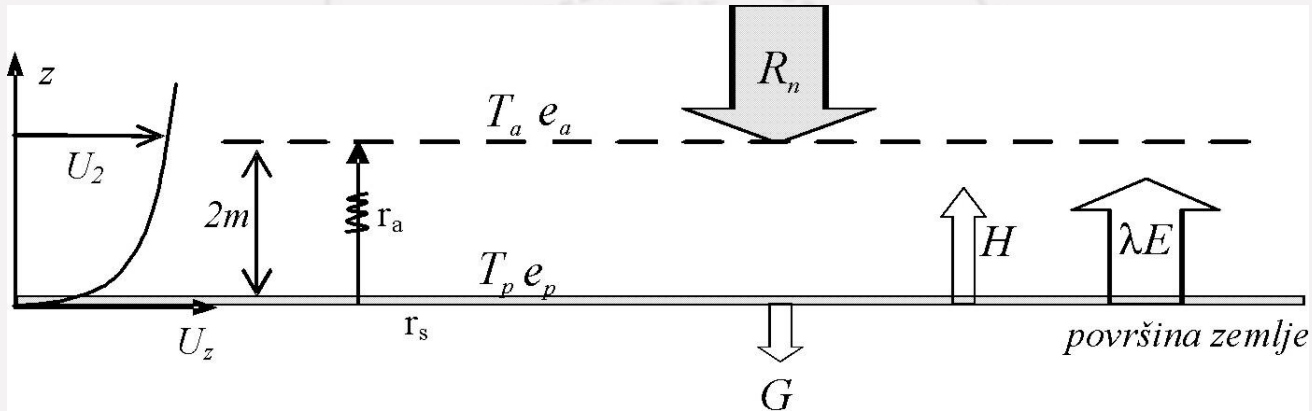
ε – однос молекуларне тежине
водене паре и сувог ваздуха
(0.622)

λ – latentna toplota isparavanja
($= 2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$)

Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – извођење



$$\Delta = \frac{de_s}{dT} = \frac{e_s(T_a) - e_s(T_p)}{T_a - T_p}$$

За земљиште засићено водом: $e_s(T_p) = e_p$

$$T_a - T_p = \frac{e_s - e_p}{\Delta}$$



Bowen-ов однос:

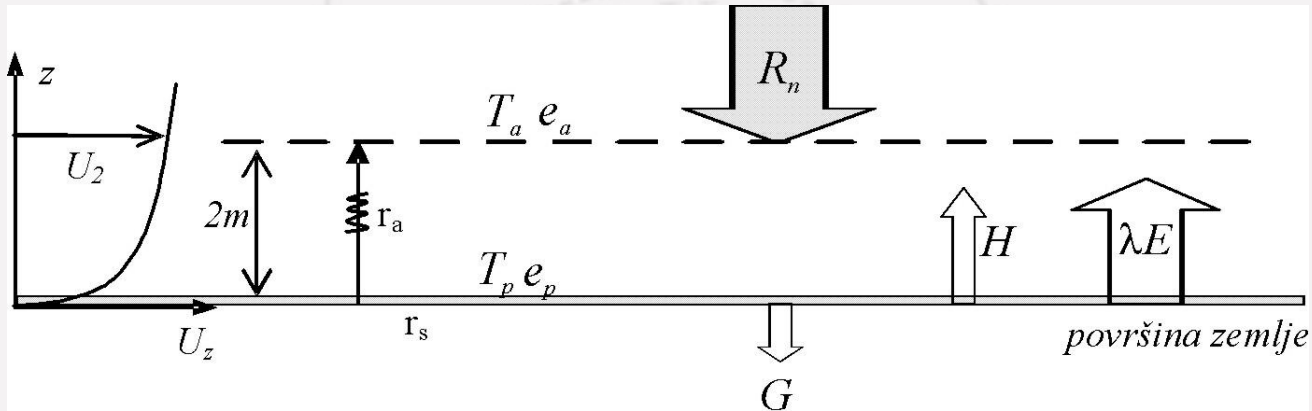
$$\frac{H}{\lambda E} = \frac{\gamma}{\Delta} \frac{e_s - e_p}{e_a - e_p}$$

$$\frac{H}{\lambda E} = \frac{\gamma}{\Delta} \left(1 - \frac{e_s - e_a}{e_p - e_a}\right)$$

Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – извођење



У изотермним условима испаравања ($T_p = T_a$ и $e_p = e_s$), испаравање се рачуна:

$$\lambda E_a = \frac{c_p \rho_a (e_s - e_a)}{\gamma r_a} \quad \longrightarrow \quad \frac{\lambda E_a}{\lambda E} = \frac{e_s - e_a}{e_p - e_a}$$

Однос изотермног и стварног испаравања

Из Bowen-овог односа и једначине енергетског биланса добија се коначна форма једначине за прорачун испаравања:

$$\frac{H}{\lambda E} = \frac{\gamma}{\Delta} \left(1 - \frac{\lambda E_a}{\lambda E}\right) \quad \longrightarrow \quad \lambda E = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \overbrace{c_p \rho_a (e_s - e_a) / r_a}^{\gamma \lambda E_a}}{\Delta + \gamma}$$

[MJ m⁻² dan⁻¹]

Водни биланс – евапотранспирација



Референтна евапотранспирација – извођење

Заменом израза за густину ваздуха: $\rho_a = \frac{1}{0.287} \frac{P_a}{(T + 273)}$ ($kg\ m^{-3}$)

и константи у претходној једначини и увођењем параметра r_s који представља отпор испаравању кроз вегетацију добија се:

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \gamma \lambda \frac{187250}{T + 273} \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})}$$

За прорачун референтне евапотрацпирације ET_0 узима се да су:

Алbedo: $\alpha = 0,23$

Отпор испаравању кроз вегетацију: $r_s = 70\ s\ m^{-1}$

Аеродинамички отпор испаравању: $r_a = 208/U_2\ s\ m^{-1}$

Водни биланс – евапотранспирација



Пример прорачуна ET_o :

Дате су следеће просечне месечне вредности:

$$T_{min} = 34.8 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{max} = 35.6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$e_a = 2.85 \text{ kPa}$$

$$U_2 = 2 \text{ m/s}$$

$$n = 8.5 \text{ h/dan}$$

$$\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$$

На основу података о географској ширини и месецу у години, срачунате су следеће астрономске величине:

$$R_a = 38.06 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$$

$$N = 12.31 \text{ h/dan}$$

На основу података о надморској висини срачунат је атмосферски притисак и вредност психрометријске константе:

$$p_a = 101.3 \text{ kPa}$$

$$\gamma = 0.665 \cdot 10^{-3} p_a = 0.0674 \text{ kPa }^\circ\text{C}^{-1}$$

Прорачун прос.температуре, напона зас.вод.паре, дефицита вод.паре и нагиба криве зас.вод.паре :

$$T_{sr} = (T_{max} + T_{min})/2 = 30.2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$e_s(T_{max}) = 5.56 \text{ kPa}, e_s(T_{min}) = 3.28 \text{ kPa}$$

$$e_s = (e_s(T_{min}) + e_s(T_{max})) / 2 = 4.42 \text{ kPa}$$

$$(e_s - e_a) = 1.57 \text{ kPa}$$

$$\Delta(T_{max}) = 0.306 \text{ kPa }^\circ\text{C}^{-1}, \Delta(T_{min}) = 0.182 \text{ kPa }^\circ\text{C}^{-1}, \Delta = (\Delta(T_{max}) + \Delta(T_{min})) / 2 = 0.244 \text{ kPa }^\circ\text{C}^{-1}$$

Водни биланс – евапотранспирација



Пример прорачуна ET_o :

Прорачун нето расположиве количине енергије за испаравање (R_n)

$$n/N = 0.69$$

$$R_s = (0.25 + 0.50 (n/N)) R_a = 22.65 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$$

$$\alpha = 0.23$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s = 0.77 \cdot 22.65 = 17.44 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$$

$$\sigma (T_{minK}^4 + T_{maxK}^4) / 2 = 41.58 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$$

$$e = 0.34 - 0.14 e_a^{0.5} = 0.10$$

$$(0.1 + 0.9 n/N) = 0.72$$

$$R_{nl} = 41.58 \cdot 0.10 \cdot 0.72 = 3.11 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$$

Neto raspoloživa količina energije

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} = 14.33 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$$

Размена топлоте са земљом

$$G = 0.14 (T_i - T_{i-1}) = 0.14 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$$

$$r_s = 70 \text{ s m}^{-1}$$

$$r_a = 208 / U_2 = 104 \text{ s m}^{-1}$$

$$\Delta / (\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)) = 0.684$$

$$\gamma / (\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)) = 0.189$$

Водни биланс – евапотранспирација



Пример прорачуна ET_0 :

Радијациона компонента испаравања:

$$ET_{rad} = (R_n - G) \Delta / \lambda (\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)) = 3.97 \text{ mm/dan}$$

Аерациона компонента испаравања:

$$ET_{aer} = \gamma / (\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)) \cdot 187250 / (T + 273) (e_s - e_a) / r_a = 1.75 \text{ mm/dan}$$

РЕФЕРЕНТНА ЕВАПОТРАНСПИРАЦИЈА:

$$ET_0 = ET_{rad} + ET_{aer} = 5.72 \text{ mm/dan}$$

Водни биланс – евапотранспирација



Прорачун потенцијалне евапотранспирације $ET_p = K_c \cdot ET_0$

