

6 TOPLOTNO OPTEREĆENJE I KLIMATIZACIJA

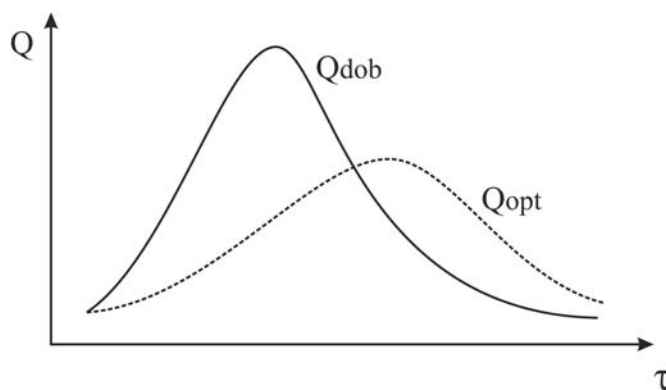
6.1 UVODNA RAZMATRANJA

Analiza prenosa toplote kroz građevinski omotač zgrade ima za cilj da se što realnije izračunaju potrebe za grejanjem i hlađenjem unutrašnjeg prostora i da se prema tim potrebama odrede merodavni grejni i rashladni kapaciteti elemenata opreme termotehničkih instalacija.

U zimskom periodu se u prostorijama u kojima borave ljudi održava temperatura vazduha koja je viša od spoljne, pa zgrada „gubi“ toplotu. U cilju održavanja konstantne temperature vazduha u prostoriji na nivou koji odgovara uslovima ugodnosti, potrebno je nadoknaditi toplotu koja se odaje okolini, tj. nadoknaditi gubitke toplote. Gubici toplote, prema tome, predstavljaju količinu toplote u jedinici vremena koju prostorija *odaje* okolini. Kada je u pitanju letnji period, temperatura spoljnog vazduha je visoka, dani su pretežno dugi i vedri, sa velikim uticajem Sunčevog zračenja. U zgradu dospeva značajna količina toplote, koju je potrebno elimisati, kako bi se u prostorijama održavala niža temperatura vazduha od spoljne. **Dobici toplote** predstavljaju količinu toplote u jedinici vremena koju prostorija *prima* (bilo od spoljnih ili unutrašnjih izvora toplote).

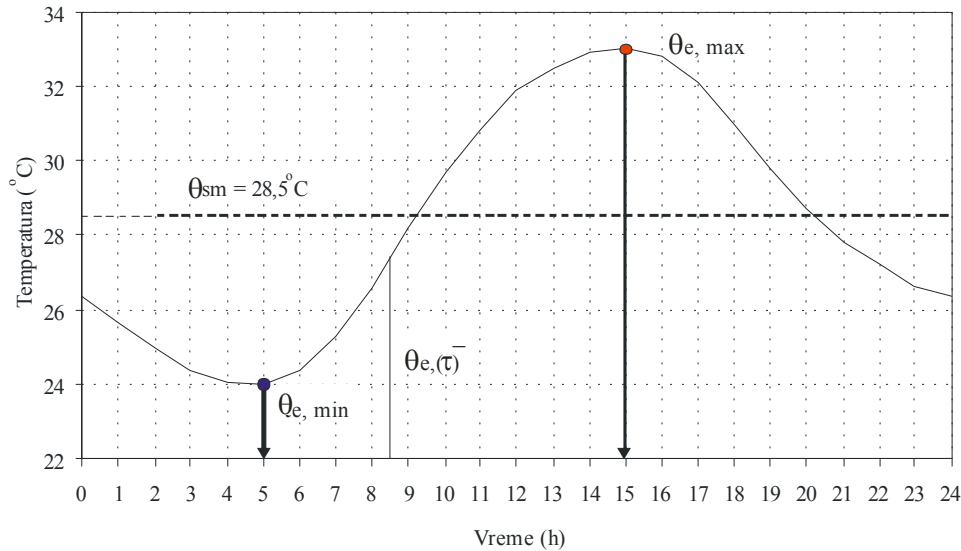
Klimatizacija se obično vezuje za letnji period, odnosno za hlađenje vazduha, međutim sistem za klimatizaciju radi tokom cele godine, što znači da se u našim klimatskim uslovima vrši i zagrevanje vazduha zimi i hlađenje vazduha tokom leta.

U zimskim uslovima izračunata količina toplote koju prostorija gubi pri projektnim uslovima (gubici toplote) odgovara količini toplote koju treba da nadoknadi sistem za grejanje. Proračun se vrši za stacionarne uslove razmene toplote prostorije sa okolinom, jer je razlika između maksimalne i minimalne temperature spoljnog vazduha tokom dana mala, zatim je uticaj variranja spoljne temperature ublažen efektom akumulacije toplote u omotaču prostorije, a uticaj Sunčevog zračenja je jako mali - dani su kratki i često sa povećanom oblačnošću. Za letnji period se takođe definišu projektni uslovi, ali se proračun potrebne količine toplote koju je potrebno eliminisati ne može vršiti za stacionarne uslove, pre svega jer je: razlika ekstremnih dnevnih temperatura znatna i intenzitet Sunčevog zračenja je veliki i promenljiv tokom dana u veoma širokim granicama. Osim toga, zbog izražene nestacionarnosti tokom leta, pojave različitih izvora toplote i akumulacione sposobnosti zidova prostorije, dobitak toplote ne odgovara količini toplote koju treba eliminisati iz prostorije. Količina toplote u jedinici vremena, koju je tokom leta potrebno odvesti iz prostorije naziva se toplotno opterećenje. **Toplotno opterećenje** obuhvata svu količinu toplote koja zagreva isključivo sobni vazduh, pa na taj način ima direktnog uticaja na temperaturu vazduha u prostoriji i na kapacitet rashladnog postrojenja.



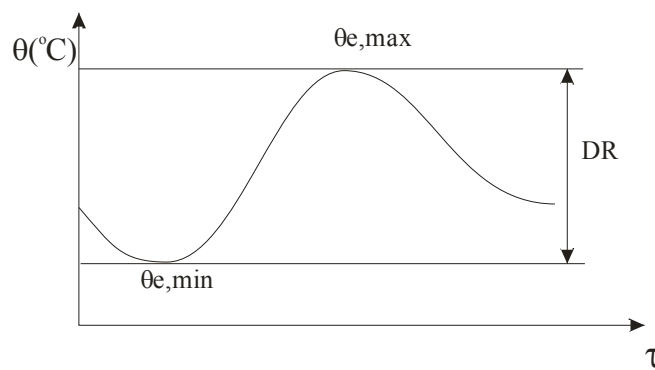
Slika 6.1 Razlika između toplotnog opterećenja i dobitaka toplote

Promenljivosti spoljne temperature vazduha se može pratiti tokom letnjeg perioda. Postavlja se pitanje kako definisati projektne uslove za leto. Za zimski period se usvaja spoljna projektna temperatura, dok se za letnje definiše **letnji projektni dan**. Letnji projektni dan sačinjavaju časovne vrednosti temperatura spoljnog vazduha tokom 24 časa (slika 6.2). Spoljna projektna temperatura za leto je maksimalna temperatura koja se javlja u toku letnjeg projektnog dana. Za Beograd letnja projektna temperatura iznosi 33°C.

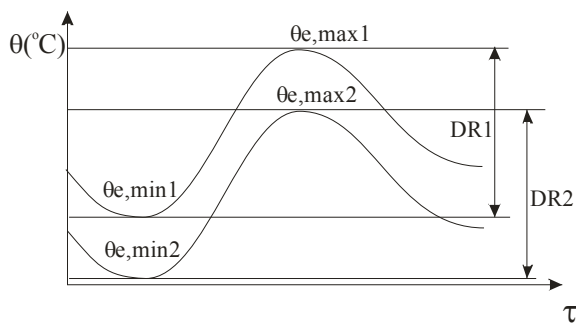


Slika 6.2 Letnji projektni dan za Beograd

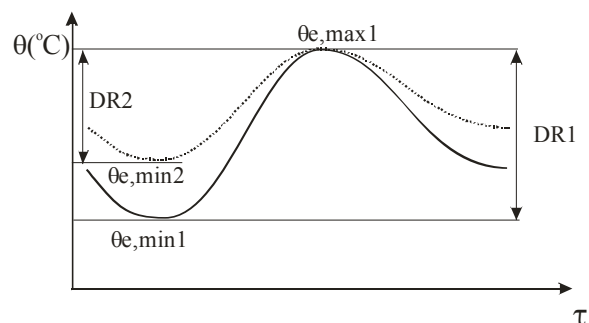
U Americi se letnji projektni dan dan definiše preko spoljne projektne temperature za leto $\theta_{e,max}$ i razlike između ekstremnih temperatura tokom dana, koja se naziva *Daily Range* ($DR = \theta_{e,max} - \theta_{e,min}$), što je prikazano na slici 6.3a.



a) Način određivanja DR



b) Letnji projektni dan za dva mesta sa istim DR i različitim $\theta_{e,max}$



c) Letnji projektni dan za dva mesta sa različitim DR i istim $\theta_{e,max}$

Slika 6.3 Letnji projektni dan, spoljna projektna temperatura i Daily Range

Definiše se funkcija raspodele spoljne temperature u toku jednog dana $P(\tau)$, koja zapravo predstavlja procenualno odstupanje trenutne spoljne temperature od maksimalne vrednosti. Funkcija raspodele temperature je univerzalna funkcija koja se koristi za određivanje letnjeg projektnog dana za sve gradove u Americi:

$$\theta_e(\tau) = \theta_{e,\max} - \frac{P(\tau)}{100} \cdot DR \quad (6.1)$$

Potrebno je poznavati spoljnu projektnu temperaturu za neko mesto i DR i na osnovu toga je moguće odrediti tok temperature za letnji projektni dan.

Kada je u pitanju određivanje spoljne projektne temperature za leto ($\theta_{e,\max}$), postoji nekoliko kriterijuma:

Stari kriterijum je obuhvatao samo letnje mesece - od juna do septembra, ukupno 2928 h i spoljna projektna temperatura je određivana kao temperatura koja se određeni broj časova dostigne ili prebaci:

1. Kriterijum 1% - $\theta_e \geq \theta_{e, \text{proj}}$ - 29 h/god,
2. Kriterijum 2,5% - $\theta_e \geq \theta_{e, \text{proj}}$ - 73 h/god,
3. Kriterijum 5% - $\theta_e \geq \theta_{e, \text{proj}}$ - 146 h/god.

Novi kriterijum se zasniva na bazi godišnjih časovnih vrednosti temperatura spoljnog vazduha i obuhvata 8760 h/god:

1. Kriterijum 0,4% - $\theta_e \geq \theta_{e, \text{proj}}$ - 35 h/god,
2. Kriterijum 1% - $\theta_e \geq \theta_{e, \text{proj}}$ - 88 h/god,
3. Kriterijum 2% - $\theta_e \geq \theta_{e, \text{proj}}$ - 175 h/god.

Dakle, prilikom proračuna toplotnog opterećenja, promenljivost temperature spoljnog vazduha se uzima u obzir preko časovnih vrednosti za letnji projektni dan, ali se ne sme zaboraviti intenzitet Sunčevog zračenja koji dospeva na površinu fasadnog zida, koji je takođe promenljiv tokom dana i koji utiče na temperatursko polje u zidu, a samim tim i na transmisiju toplote kroz njega. Taj problem se rešava uvođenjem sunčano-vazdušne temperature. Sunčano-vazdušna temperatura predstavlja fiktivnu temperaturu koju bi trebalo da ima spoljni vazduh da bi se prouzrokovao toplotni fluks na površinu zida jednak onom toplotnom fluksu koji potiče od zbirnog uticaja Sunčevog zračenja i spoljne temperature vazduha. Zatim se uvodi pojam ekvivalentne temperaturske razlike, pomoću koje se izračunava toplotni fluks prilikom prolaza toplote kroz spoljni zid prostorije. Drugi, opštiji model koji služi za proračun toplotnog opterećenja kroz spoljne zidove (prolaz toplote kroz zid pri nestacionarnim uslovima) je Metoda prenosnih funkcija (*Transfer Function Method*). On polazi od trouglastog delovanja impulsa temperature na spoljnoj površini i reakcije (odziva) na unutrašnjoj površini. Koriste se Laplasove transformacije i veoma složen matematički aparat. Kada se primenjuju Laplasove transformacije gubi se fizikalnost problema, pa je prilikom njegove primene potrebno dobro poznavanje fizikalnosti procesa razmene toplote. Prema nemačkim normativima koristi se metod proračuna preko ekvivalentnih temperaturskih razlika.

Osim što Sunčevo zračenje zagreva spoljnu površinu fasadnih zidova i krova objekta, ono prodire u prostoriju kroz transparentne površine (stakla prozora i vrata). Predata toplota od Sunčevog zračenja zagreva masu zidova i poda prostorije i kada temperatura unutrašnjih površina omotača prostorije poraste iznad temperature vazduha u prostoriji, zidovi i pod predaju određenu količinu toplote vazduhu u prostoriji, i na taj način povećavaju vrednost toplotnog opterećenja. Da bismo mogli da proračunamo toplotno opterećenje neophodno je da znamo koliki se udeo toplote koji u prostoriju prodire Sunčevim zračenjem predaje vazduhu u prostoriji, a koliki udeo se

akumuliraju u masi zidova i poda prostorije. Iz navedenog razloga, u proračun toplotnog opterećenja se uvode koeficijenti akumulacije toplote.

Toplotno opterećenje, kao i dobici toplote mogu se podeliti prema izvorima toplote i to na:

- spoljne:
 - kroz spoljne zidove (krov) prostorije,
 - kroz prozore (transmisijom i od Sunčevog zračenja),
 - infiltracijom spoljnog vazduha kroz procepe.
- unutrašnje:
 - od osvetljenja u prostoriji,
 - od električnih uređaja, mašina i aparata (disipacije toplote)
 - od ljudi koji borave u prostoriji,
 - od susednih neklimatizovanih prostorija,
 - od tehnoloških procesa koji se odvijaju u prostoriji.

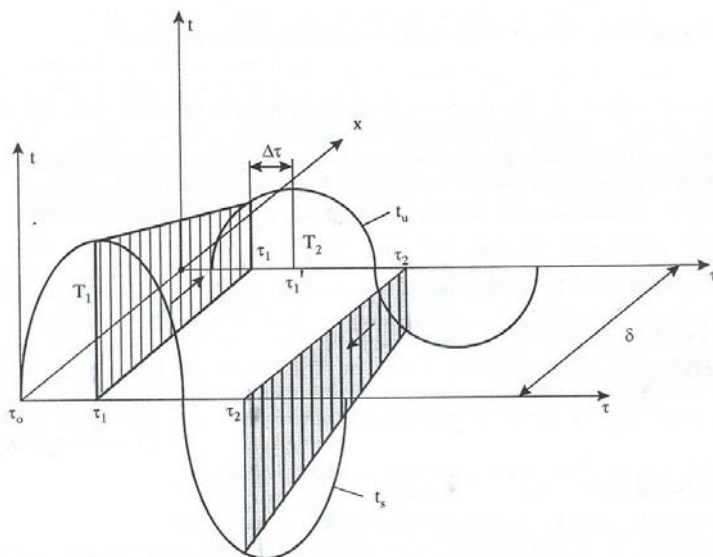
6.2 PRORAČUN TOPLOTNOG OPTEREĆENJA

6.2.1 Toplotno opterećenje transmisijom kroz zidove

Količina toplote koja prolazi kroz spoljni zid prostorije je promenljiva veličina, jer odavanje toplote spoljašnjih izvora varira u toku dana. Spoljna temperatura je stohastička veličina, ali se za letnji projektni dan ona može predstaviti odgovarajućom trigonometrijskom funkcijom. Posmatrajmo njen uticaj na prolaz toplote kroz spoljni zid debljine δ (slika 6.4):

1. Usled akumulacije toplote u zidu javlja se:

- fazno zakašnjenje toka količine toplote,
- smanjenje amplitude oscilacije temperature na unutrašnjoj površini zida u odnosu na spoljnu površinu zida.



Slika 6.4 Transport toplote kroz spoljni zid

Vremensko kašnjenje $\Delta\tau$ javlja se na unutrašnjoj strani zida u odnosu na spoljnu stranu. Faktor smanjenja amplitude oscilacije temperature je Δf . U dva vremenska trenutka (τ_1 i τ_2) obeleženi su tokovi temperaturnih promena (šrafirane površine) kako bi se videla promena temperaturnog gradijenta $\frac{\partial t}{\partial x}$:

τ_1 - toplotni fluks sa spoljne strane je usmeren ka unutrašnjoj i

τ_2 - toplotni fluks sa unutrašnje strane je usmeren ka spoljašnjoj strani.

Odnos amplituda temperatura krivih na spoljnoj i unutrašnjoj strani zida A_s/A_u zove se faktor prigušenja amplitude:

$$\frac{A_s}{A_u} = \frac{1}{\Delta f^2}.$$

Na osnovu toplotne provodljivosti i debljine zida može se izračunati vremensko kašnjenje temperaturske oscilacije na unutrašnjoj strani zida u odnosu na spoljnu. Prolaz toplote je nestacionaran, ali periodično promenljiv proces. Može se napisati izraz za toplotni fluks kroz zid jedinične površine (specifični toplotni fluks, po jedinici površine fasadnog zida):

$$q(\tau) = \alpha_i (\theta_{zi}(\tau) - \theta_i) = \alpha_i [(\theta_{zi}(\tau) - \theta_{zm}) + (\theta_{zm} - \theta_i)] \quad [\text{W/m}^2], \quad (6.2)$$

gde je:

α_i - koeficijent prelaza toplote sa unutrašnje strane zida,

θ_{zi} - trenutna temperatura unutrašnje strane zida,

θ_{zm} - srednja temperatura unutrašnje površine zida,

θ_i - temperatura vazduha u prostoriji.

S obzirom na periodičnost promene temperature, ceo nestacionaran slučaj posmatra se kao kombinacija stacionarnog i nestacionarnog prenosa toplote. Stacionaran prenos je posledica razlike srednje temperature spoljnog vazduha i unutrašnje strane zida. Temperaturske oscilacije spoljnog vazduha u odnosu na srednju dnevnu temperaturu predstavljaju se trigonometrijskom funkcijom:

$$(\theta_e(\tau) - \theta_{em}) = T_0 \cdot \cos[\omega(\tau - \tau_0)], \quad (6.3)$$

gde je:

$\theta_e(\tau)$ - trenutna spoljna temperatura,

θ_{em} - srednja dnevna spoljna temperatura,

T_0 - amplituda spoljne temperature,

τ - vreme za koje se računa toplotno opterećenje,

τ_0 - vreme javljanja maksimuma spoljne temperature,

ω - ugaona brzina temperaturskih oscilacija.

Oscilacije temperature na unutrašnjoj strani zida prema srednjoj temperaturi zida tokom 24h:

$$(\theta_{zi}(\tau) - \theta_{zm}) = T_0 \cdot f_i \cdot \cos[\omega(\tau - \tau_0) - \omega\tau_i], \quad (6.4)$$

gde je:

f_i - faktor smanjenja amplitude usled akumulacione sposobnosti zida,

τ_i - vremensko zakašnjenje na unutrašnjoj strani zida.

Iz jednačina (6.3) i (6.4) dobija se veza između spoljne temperature i temperature unutrašnje strane zida:

$$(\theta_{zi}(\tau) - \theta_{zm}) = f_i \cdot (\theta_e(\tau - \tau_i) - \theta_{em}). \quad (6.5)$$

Iz jednačina (6.2) i (6.5) dobija se toplotni fluks u trenutku τ :

$$q(\tau) = \alpha_i [f_i (\theta_e(\tau - \tau_i) - \theta_{em}) + (\theta_{zm} - \theta_i)]. \quad (6.6)$$

Da bi se eliminisala nepoznata temperatura θ_{zm} posmatra se stacionaran prenos toplote:

$$q_{stac} = \alpha_i(\theta_{zm} - \theta_i) = U \cdot (\theta_{em} - \theta_i), \quad (6.7)$$

gde je:

U - koeficijent prolaza topline kroz zid.

Iz jednačina (6.6) i (6.7) eliminiše se nepoznata θ_{zm} :

$$q(\tau) = \alpha_i f_i (\theta_e(\tau - \tau_i) - \theta_{em}) + U \cdot (\theta_{em} - \theta_i). \quad (6.8)$$

Ako se uvede korigovani koeficijent $f = \frac{\alpha_i \cdot f_i}{k}$, onda je konačan izraz za nestacionaran prenos toplote:

$$q(\tau) = U \cdot [f \cdot (\theta_e(\tau - \tau_i) - \theta_{em}) + (\theta_{em} - \theta_i)]. \quad (6.9)$$

Svaka promena uslova razmene toplote na graničnim površinama građevinske konstrukcije (bilo promena temperature okoline, bilo promena intenziteta razmene toplote: vetar, sunčevo zračenje) izazvaće nestacionarnost u temperaturnoj raspodeli i u vrednosti toplotnog fluksa koji se razmenjuje na površini elementa. Dinamičke karakteristike građevinske konstrukcije opisuju vremenski odgovor nekog građevinskog elementa na toplotnu promenu iz njegove okoline. Proračun se sprovodi prema standardu SRPS EN ISO 13786.

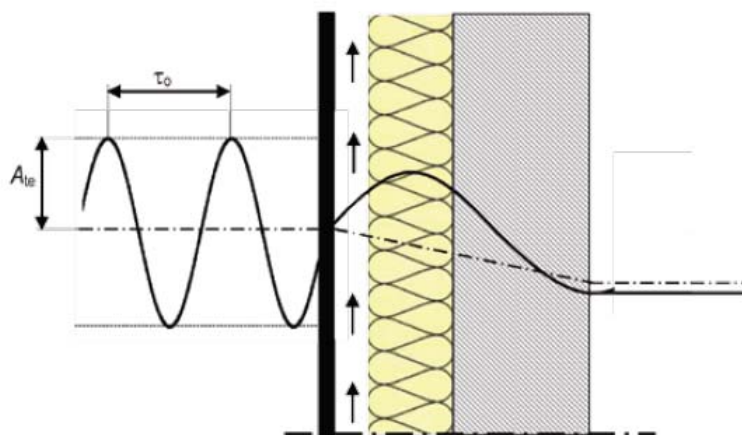
Svojstva koja određuju dinamičke karakteristike građevnog elementa su: toplotna provodljivost λ , W/(mK), specifični toplotni kapacitet c , J/(kg · K) i gustina materijala ρ , (kg/m³). Veličina koja povezuje ova svojstva je toplotna difuzivnost ili temperaturska provodljivost a , m²/s. Ova veličina određuje toplotnu inerciju objekta, odnosno definiše brzinu kojom objekat reaguje promenom svoje temperature po celoj zapremini na pobudu iz okoline.

Relativno velike dnevne promene temperature spoljnog vazduha (ili ekvivalentne temperature za slučaj delovanja i sunčevog zračenja) karakteristične su za letnji period, tako da je u proračunu to potrebno uzeti u obzir. Iz tog razloga se pred građevinski element postavlja dodatni zahtev – toplotna stabilnost elementa. Pod toplotnom stabilnošću spoljnog građevinskog elementa podrazumeva se njegovo svojstvo očuvanja relativno ustaljene temperature na svojoj unutrašnjoj površini tokom periodičnih promena temperature spoljnog vazduha, odnosno toplotnog fluksa koji prolazi kroz posmrani element.

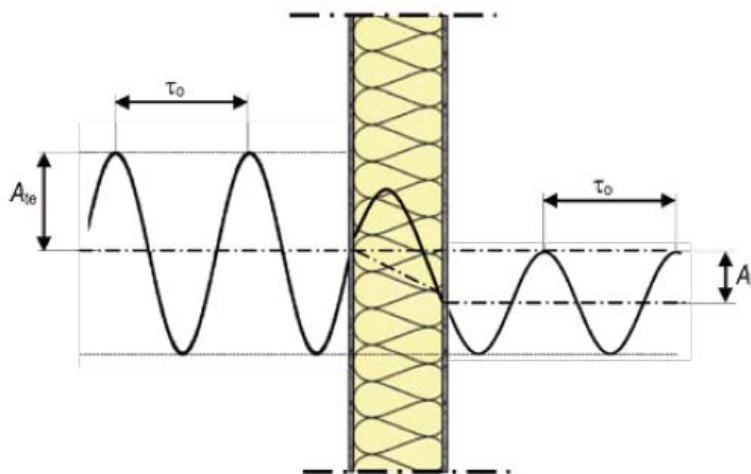
U teoriji toplotne stabilnosti pretpostavka je da se temperatura spoljnog vazduha (odnosno ekvivalentna temperatura) i toplotni fluks kroz površinu spoljnog građevinskog elementa menjaju (osciliraju) po zakonu kosinusoide. Promena temperature unutrašnje površine građevinskog elementa zahteva određeno vremensko razdoblje koje je potrebno za transport toplote od spoljne površine. Zato se promena temperature spoljne površine građevinskog elementa neće trenutno odraziti na temperaturu unutrašnje površine.

Za zgradu je povoljno da je prigušenje temperaturnih oscilacija što veće i da je što veći fazni pomak. To osigurava vremenski ujednačenu temperaturu unutrašnje površine prostorija u zgradi. Letnja stabilnost građevinskog elementa podrazumeva da do zagrevanja unutrašnjih prostorija dolazi što kasnije (kada na fasadi već dolazi do pada temperature, u večernjim satima). Za letnju stabilnost je tako povoljnije postavljanje toplotne izolacije sa spoljne strane (sprečava se zagrevanje masivnih elemenata konstrukcije i time uslovljena akumulacija toplote).

Provetravana fasada u smislu letnje toplotne stabilnosti ima prednosti u odnosu na klasične konstrukcije jer je montažna obloga, zbog sloja provetranog vazduhom, odličan izolator od Sunčevaog zračenja tako da ne treba proračunavati letnju stabilnost. Na slikama 6.5 i 6.6 prikazana je promena oscilacije temperature kroz građevinski element sa provetranom fasadom i laku građevinsku konstrukciju.



Slika 6.5 Promena temperaturske oscilacije i kašnjenje toplotnog fluksa za građevinski element sa provetravanom fasadom



Slika 6.6 Promena temperaturske oscilacije i kašnjenje toplotnog fluksa za laku građevinsku konstrukciju

Sunčano-vazдушna temperatura

Već je ranije bilo reči o sunčano-vazdušnoj temperaturi. Po definiciji, sunčano-vazдушna temperatura predstavlja fiktivnu temperaturu koju bi trebalo da ima spoljni vazduh da bi se prouzrokovao toplotni fluks na površinu zida jednak onom toplotnom fluksu koji potiče od zbirnog uticaja Sunčevog zračenja i spoljne temperature vazduha.

Jednačina toplotnog bilansa za spoljnu površinu zida glasi:

$$\alpha_e \cdot (\theta_s - \theta_{ze}) = \alpha_e \cdot (\theta_e - \theta_{ze}) + a \cdot I, \quad (6.10)$$

gde je:

$$\theta_s = \theta_e + \frac{a \cdot I}{\alpha_e} + \frac{e \cdot \Delta R}{\alpha_e} - \text{sunčano-vazдушna temperatura,}$$

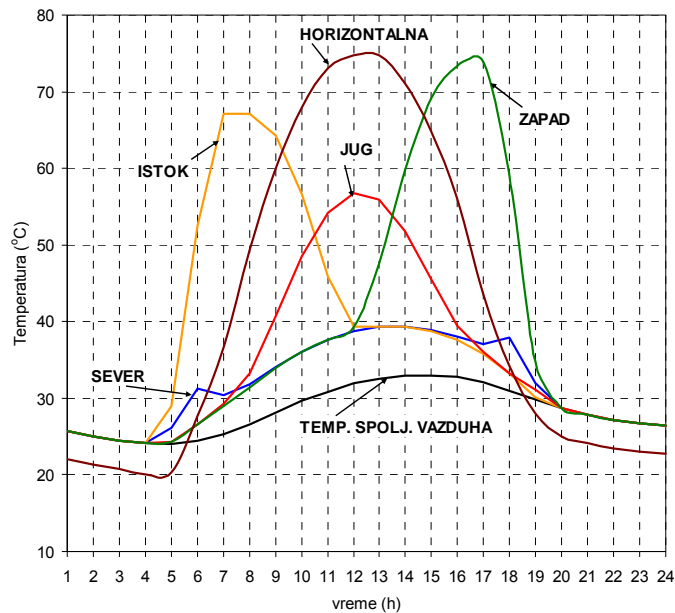
α_e - koeficijent prelaza toplote sa spoljnog vazduha na spoljnu površinu zida,

θ_e - temperatura spoljnog vazduha,

θ_{ze} - temperatura spoljne površine zida,

a - apsorptivnost Sunčevog zračenja sa spoljne strane zida,

- I - intenzitet Sunčevog zračenja,
 e - emisivnost površine,
 ΔR - razlika između dozračenog dugotalasnog zračenja na površinu i emitovanog zračenja apsolutno crnog tela na temperaturi površine zida.



Slika 6.7 Tok sunčano- vazdušnih temperatura za juli mesec i 45° SGŠ

Maksimalne vrednosti intenziteta Sunčevog zračenja i spoljne temperature ne javljaju se istovremeno. Sunčano-vazdušna temperatura nije maksimalno zabeležena temperatura (kao što ni spoljna projektna nije maksimalna temperatura spoljnog vazduha), već su to one časovne vrednosti koje mogu biti prevaziđene samo u 5% slučajeva, u periodu od više godina za koje je vrešeno posmatranje i proračun. Na slici 6.7 je prikazan tok sunčano-vazdušnih temperatura za juli mesec, 45° SGŠ i različite orijentacije zidova.

Ekvivalentna temperaturska razlika

Kada u jednačinu (6.10) uvedemo umesto trenutne spoljne temperature sunčano-vazdušnu temperaturu, dobija se izraz:

$$q(\tau) = U \cdot [f \cdot (\theta_s(\tau - \tau_i) - \theta_{sm}) + (\theta_{sm} - \theta_i)] \quad (6.11)$$

Kako bi bilo moguće da se nestacionaran prolaz toplot računa kao kvazi-stacionaran, uvodi se fiktivna temperatura:

$$t_{f\tau} = f(\theta_s(\tau - \tau_i) - \theta_{sm}) + \theta_{sm} \quad (6.12)$$

Sada se može definisati ekvivalentna temperaturska razlika, koja se koristi pri proračunu toplotnog opterećenja:

$$\Delta\theta_{ekv}(\tau) = f(\theta_s(\tau - \tau_i) - \theta_{sm}) + \theta_{sm} - \theta_i \quad (6.13)$$

Ekvivalentna temperaturska razlika je fiktivna razlika temperatura koja obuhvata:

- fizička svojstva zidova ($\delta, \lambda, \rho, c_p, \varepsilon \dots$)
- sve posledice osobina zidova (akumulaciju toplote, vremensko kašnjenje transporta toplote, smanjenje amplitude temperaturske oscilacije)
- spoljne izvore toplote (spoljnu temperaturu i Sunčevo zračenje, koje zavisi od orijentacije zida),
- unutrašnje uslove (željenu temperaturu vazduha u prostoriji).

Toplotno opterećenje koje nastaje prilikom nestacionarnog prolaza toplote kroz zid računa se za svaki sat preko časovnih vrednosti ekvivalentne temperaturske razlike:

$$Q_z(\tau) = A \cdot U \cdot \Delta\theta_{ekv}(\tau). \quad (6.14)$$

Časovne vrednosti ekvivalentnih temperaturskih razlika daju se tabelarno za različite vrste i različite orijentacije zidova.

Ukoliko se tablične vrednosti koriste pri drugačijim uslovima (različita temperatura vazduha u prostoriji, drugačija zamućenost atmosfere, različita srednja dnevna temperatura spoljnog vazduha ili neki drugi mesec u godini), neophodna je korekcija tabličnih vrednosti:

$$\Delta\theta_{ekv} = \left[\Delta\theta_{ekv,T} + (\theta_{em} - 28,5) + (26 - \theta_i) + a_T \right] \cdot \frac{I_{max}}{I_{max,juli}}. \quad (6.15)$$

6.2.2 Sunčevo zračenje

Sa aspekta klimatizacije prostorija, Sunčevo zračenje u letnjem periodu je štetno, zato što prouzrokuje prekomerno zagrevanje prostorija, tako da je potreban utrošak energije za hlađenje kako bi se eliminisala toplota koja potiče od Sunčevog zračenja. Svako korišćenje energije, osim troškova koji su neizbežni, izaziva i određene ekološke probleme.

6.2.2.1 O suncu kao izvoru toplote

Sunce je zvezda patuljak - velika užarena gasovita lopta prečnika 1,391 miliona km. Zemlja se vrti oko Sunca po eliptičnoj putanji sa vrlo malim ekscentricitetom ($e=0,017$) tako da se udaljenost Zemlje i Sunca menja vrlo malo tokom godine. Srednja udaljenost Zemlje i Sunca je 149,68 miliona km. U perihelu (tačka eliptične putanje najbliža fokusu), početkom januara, Zemlja je 1,67% bliža, a u afelu (tačka eliptičke putanje najudaljenija od fokusa), početkom jula, Zemlja je 1,67 % udaljenija od Sunca. Kako se Sunčevo zračenje menja s kvadratom udaljenosti, Zemlja u januaru prima 6,9 % više Sunčeve energije nego u julu. Prema tome januarske temperature bi trebalo da budu više od julskih, zima na severnoj polulopti bi trebalo da bude toplija nego na južnoj, a leto na južnoj polulopti toplije od leta na severnoj. U stvarnosti je sve upravo suprotno jer postoji deklinacija Zemlje (nagnutost ose Zemlje u odnosu na putanju), a i odnosi u atmosferi značajno zavise i od drugih faktora.

Sunce se sastoji se uglavnom od vodonika (80%) i helijuma (19%). U unutrašnjosti Sunca vodonik se nuklearnim reakcijama fuzije pretvara u helijum, što rezultira oslobađanjem velikih količina energije:

$$\sim 600 \cdot 10^6 t/s H_2 \Rightarrow 596 \cdot 10^6 t/s He, \text{ pa sledi da je } \Delta m \sim 4 \cdot 10^6 t/s$$

Prema Ajnštajnovoj teoriji sledi količina energije koju Sunce oslobađa:

$$E = \Delta m \cdot c^2 \cong 360 \cdot 10^{24} W$$

Usled tih reakcija temperatura u unutrašnjosti Sunca premašuje 20 miliona K. Međutim, to nije temperatura koja određuje elektromagnetska svojstva Sunčevog zračenja, jer zračenje iz unutrašnjosti u velikom delu apsorbuje sloj negativnih vodonikovih jona blizu površine, pa je temperatura površine Sunca oko 5500°C, a spektar Sunčevog zračenja približno odgovara spektru crnog tela na temperaturi od 5760 K. Prema tome, temperatura od 5760 K se može uzeti kao efektivna temperatura Sunčeve površine, a iz nje je primenom Plankovog zakona moguće

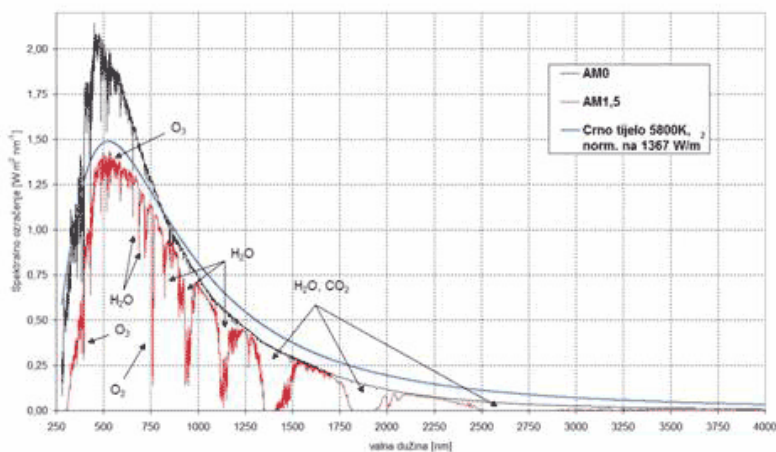
proračunati energijski spektar Sunčevog zračenja. Snaga zračenja koje Sunce zrači sa svoje površine iznosi oko $95 \cdot 10^{24}$ W i to se zračenje sastoji od različitih talasnih dužina. Većina (99%) Sunčevog zračenja nalazi se u spektru od 0,275 do 4,6 mm. Maksimum Sunčevog zračenja je na talasnoj dužini od 0,48mm i sastoji se od ultraljubičastog (0,12-0,4 mm), vidljivog (0,4-0,75 mm) i infracrvenog dela (>0,75 mm). Ultraljubičasti deo iznosi oko 9%, vidljivi oko 41,5% i infracrveni oko 49,5% ukupne energije Sunčevog zračenja (slika 6.8).

Sunčevo zračenje na ulazu u Zemljinu atmosferu nazivamo ekstraterestijalnim zračenjem. Kako se udaljenost Zemlje od Sunca menja tokom godine i ekstraterestijalno zračenje (iradijansa) se menja od najmanje vrijednosti 1321 W/m^2 do najveće 1412 W/m^2 .

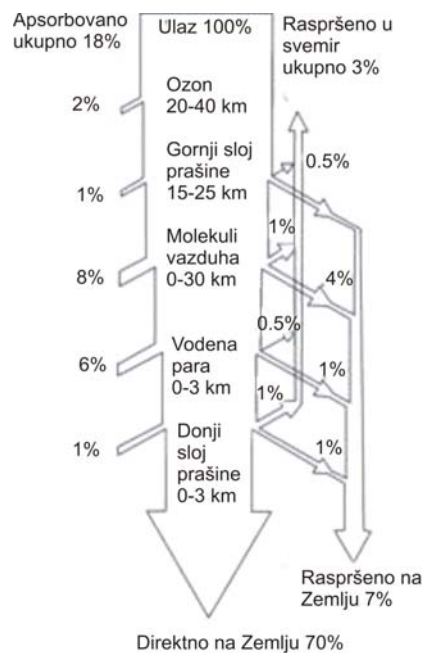
Ekstraterestijalno zračenje upravo na Sunčeve zrake za srednju udaljenost Zemlje od Sunca naziva se Sunčeva (Solarna) konstanta. Na osnovu satelitskih merenja, utvrđeno je da *Solarna konstanta* nije konstanta, već se menja kako se i Sunčeva aktivnost menja. Sunčeva aktivnost ima u proseku 11-godišnji ciklus (tzv. Schwabe-ov ciklus), a na zračenje utiču i drugi fenomeni, kao što je 27-dnevna rotacija Sunca oko svoje ose, Sunčeve pege, prominencije i erupcije. Svetska meteorološka organizacija je 1981. godine standardizovala Sunčevu konstantu čija vrednost iznosi $I_0=1367 \text{ W/m}^2$.

Pri prolasku kroz zemljinu atmosferu Sunčevo zračenje slabi u zavisnosti od dužine puta zraka do površine Zemlje (što je funkcija geografske širine, doba godine, doba dana, nadmorske visine i zamućenosti atmosfere). Intenzitet Sunčevog zračenja kreće se u granicama od $100 - 1000 \text{ W/m}^2$. Na slici 6.9 prikazano je slabljenje Sunčevog zračenja pri prolasku kroz atmosferu.

Najveći intenzitet Sunčevog zračenja javlja se u delu talasne dužine zračenja koja odgovara vidljivom zračenju u oblasti zelene boje - $0,48 \mu\text{m}$.



Slika 6.8 Spektar Sunčevog zračenja



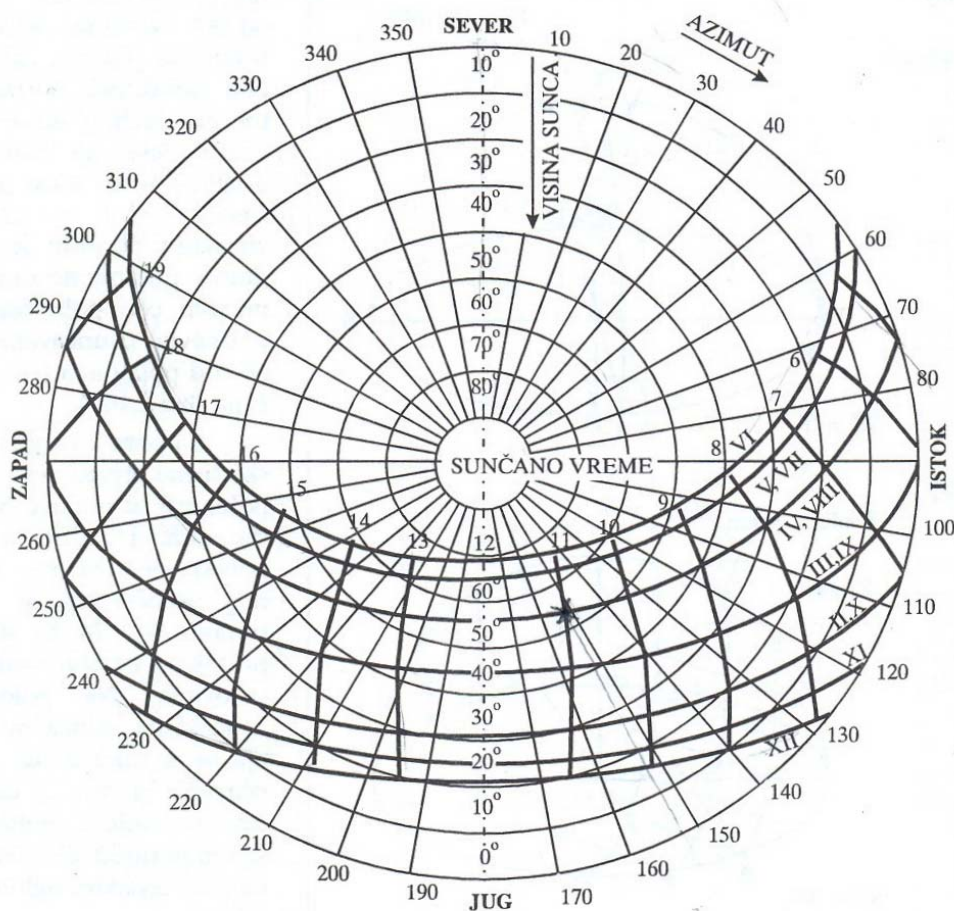
Slika 6.9 Slabljenje Sunčevog zračenja pri prolasku kroz atmosferu

6.2.2.2 Solarna geometrija

Intenzitet Sunčevog zračenja koji dospeva na površinu Zemlje zavisi od mesta, odnosno položaja posmatrane lokacije. Osa oko koje Zemlja rotira nagnuta je prema ravni njene ekliptike (putanje oko Sunca) za $23,5^\circ$. Zbog nagiba ose rotacije, Zemlja ima 5 klimatskih pojaseva. Položaj nekog mesta na Zemljinoj površini određen je geografskom širinom, časovnim uglom i

Ugao visine Sunca je ugao između direktnog Sunčevog zraka i njegove horizontalne projekcije. Meri se u vertikalnoj ravni. Azimut Sunca je ugao između pravca severa i horizontalne projekcije Sunčevog zraka i meri se u horizontalnoj ravni. Upadni gao je ugao koji direktan Sunčev zrak zaklapa sa normalom na posmatranu vertikalnu površinu. Azimut površine je ugao između pravca severa i normale na posmatranu vetikalnu površinu - meri se u horizontalnoj ravni, kao i azimut Sunca.

Za različite proračune, kao i za proračun toplotnog opterećenja koje potiče od prodora direktnog Sunčevog zračenja kroz staklo, koristi se dijagram putanje Sunca, koji se konstruiše za određenu geografsku širinu. Na slici 6.12 prikazan je dijagram putanje Sunca (odakle se mogu očitati uglovi položaja Sunca) se severnu geografsku širinu od 45° .



Slika 6.12 Dijagram putanje Sunca za 45° SGŠ

6.2.2.4 Sunčevo zračenje i fizička svojstva atmosfere

Propustljivost atmosfere za Sunčevo zračenje zavisi od njene zamućenosti, usled čega dolazi do gubitka u energiji **direktnog** Sunčevog zračenja. Gubici nastaju usled:

- sudara Sunčevih zraka sa molekulima O_2 , N_2 , vodene pare i česticama prašine (kada najviše oslabe zraci manjih talasnih dužina - ultraljubičasto zračenje),
- selektivne apsorpcije Sunčevih zraka od strane troatomnih gasova (najviše CO_2 i vodene pare H_2O , kada slabe ili se potpuno gube zraci iz crvenog dela spektra vidljivog zračenja i infracrvenog dela spektra).

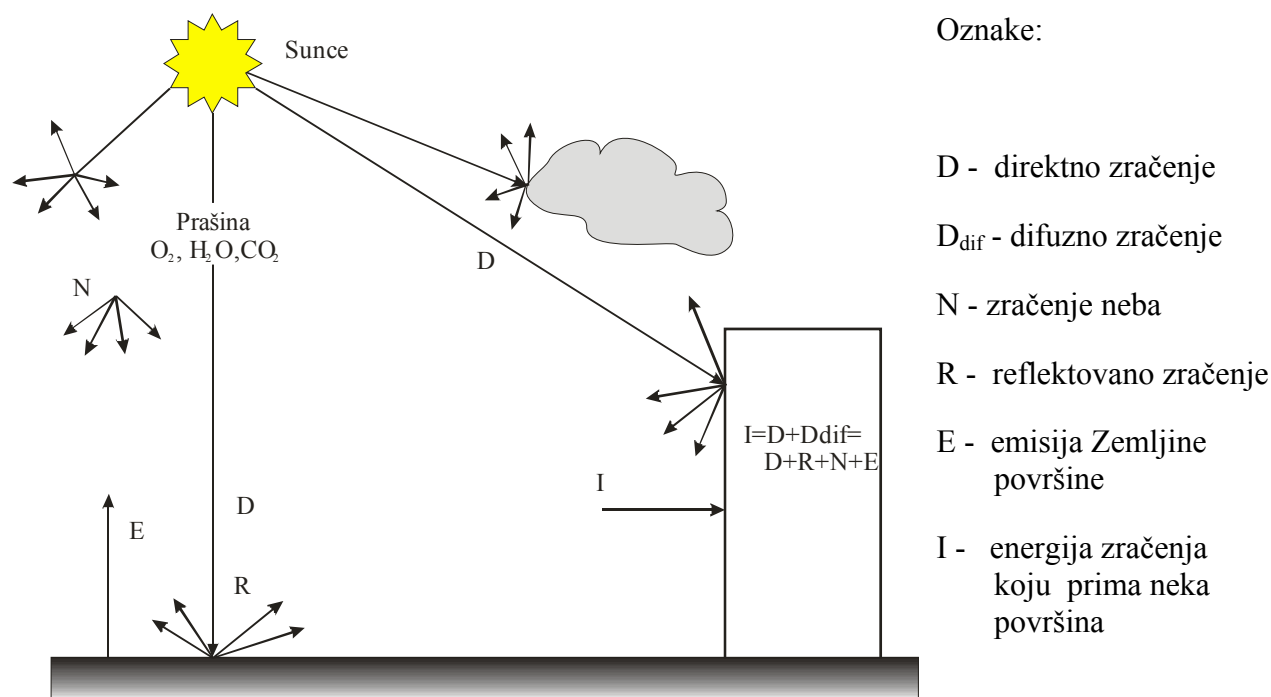
Ovi gubici su veći ukoliko zraci prolaze duži put kroz atmosferu (npr. kada je Sunce bliže horizontu). Deo energije Sunca koji je apsorbovan u atmosferi dolazi opet do Zemlje u vidu difuznog zračenja neba. Difuzno zračenje varira u toku dana i zavisi od:

- visine Sunca,
- vremenskih prilika,
- intenziteta oblačnosti i
- zagađenosti vazduha česticama nečistoća.

Globalnim zračenjem se naziva zbir direktnog i difuznog Sunčevog zračenja koje dospeva na Zemljinu površinu na horizontalnu ravan.

Šematski prikaz prolaza Sunčevog zračenja kroz atmosferu je prikazan na slici 6.13.

Refleksija Sunčevih zraka na površini Zemlje nastaje od ukupnog zračenja koje dospe na zemljinu površinu. Jedan deo se apsorbuje, a jedan deo se reflektuje. Odnos zračenja koji se reflektuje i energije koja dospeva na zemlju naziva se ALBEDO. Najveće vrednosti albeda imaju površina snega i mirna vodena površina.



Slika 6.13 Šematski prikaz prolaza Sunčevog zračenja kroz atmosferu

Linke uvodi faktor zamućenosti atmosfere i koristi pojam vazdušne mase. Pod jedinicom vazdušne mase podrazumeva se debljina vazdušnog sloja koja odgovara zenitalnom položaju Sunca u mestu na nivou morske površine. Određena vrednost vazdušne mase označava dužinu puta koji treba da pređu Sunčevi zraci kroz atmosferu, u odnosu na jediničnu masu, koja odgovara najkraćem mogućem putu. Vrednost vazdušne mase na nivou morske površine zavisi od:

- ugla visine Sunca,
- geografske širine i
- doba dana.

Međutim, vrednost vazdušne mase zavisi i od nadmorske visine mesta, pa tako planinski predeli imaju manje vrednosti vazdušne mase.

Po Linkeu, faktor zamućenosti atmosfere pokazuje koliko puta treba uvećati dužinu puta koji Sunčevi zraci treba da pređi kroz sasvim čistu i suhu atmosferu, da bi oslabili onoliko koliko oslabe pri prolasku kroz stvarnu, zamućenu atmosferu. Zamućenost atmosfere se menja tokom godine. Leti je najveća, jer je veće isparavanje vode sa Zemljine površine, ima više prašine u vazduhu i izraženija su verzikalna strujanja vazduha, koja prašinu podižu u više slojeve atmosfere. Faktor zamućenosti daje se pomesecima u godini za neko mesto. Za Beograd se vrednosti kreću od 4,5 u julu mesecu do 3 u decembru (srednje mesečne vrednosti).

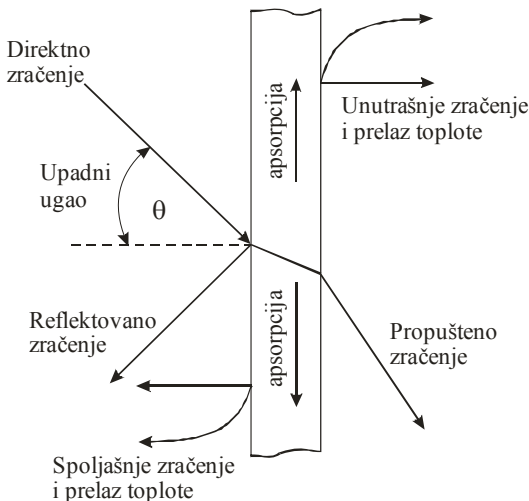
6.2.3 Toplotno opterećenje usled prodora Sunčevih zraka kroz staklo

Sunčev zrak koji dospeva na spoljnu površinu stakla prozora se delimično reflektuje, apsorbuje i propušta:

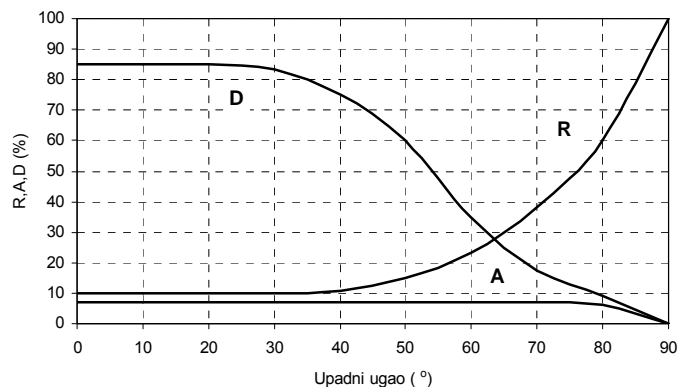
$$r + a + d = 1 \quad (6.16)$$

Odnos energija zračenja koje se reflektuje, apsorbuje i propusti zavisi od:

1. Upadnog ugla Sunčevih zraka i
2. Vrste stakla.



Slika 6.14 Bilans toplote Sunčevog zračenja za prozorsko staklo



Slika 6.15 Odnos propustljivosti D , apsorpcije A i refleksije R direktnog Sunčevog zračenja za obično staklo debljine 3 mm

Upadni ugao se menja za određenu geografsku širinu i zavisi od:

- doba godine,
- doba dana i
- orijentacije prozora.

Za upadne uglova koji su manji od 40° , propustljivost D je skoro konstantna i iznosi 87%. apsorbovani deo energije skoro i da ne zavisi od upadnog ugla i iznosi oko 6%. U unutrašnjost prostorije se konvekcijom i zračenjem prenosi 1/3 apsorbovane energije.

Za difuzno zračenje propustljivost, apsorpcija i refleksija su konstantne veličine koje ne zavise od upadnog ugla (difuzno zračenje je raspršeno zračenje i prostire se u svim pravcima) i iznose: $D = 0,79$, $A = 0,06$ i $R = 0,15$.

Za specijalna ostakljenja (apsorpciono, refleksiono staklo) oblik krivih na slici 12 može biti potpuno drugačiji. Poznati proizvođači stakla imaju ovakav tip dijagrama za svoja stakla.

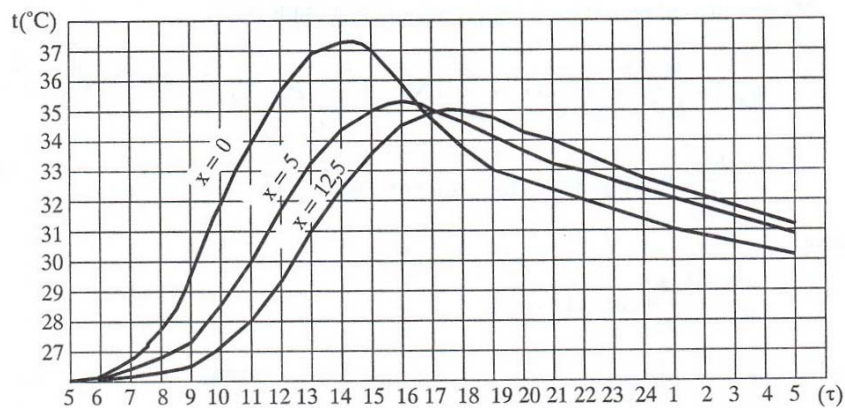
6.2.3.1 Akumulacija toplote u zidovima

Sunčevi zraci koji prodru u prostoriju kroz staklo prozora i dospeju na zidove se delimično apsorbuju (aI) i delimično reflektuju (rI). Apsorbovani deo energije zagreva površinu zida, tako da dolazi do:

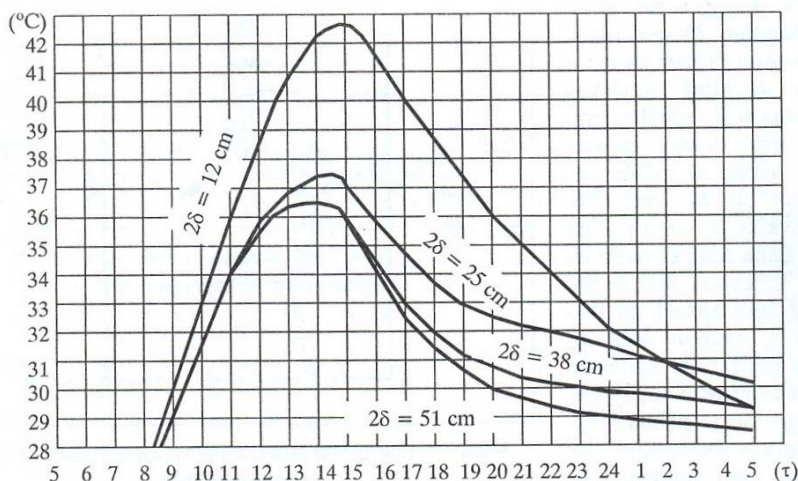
- konvektivnog prelaza toplote na sobni vazduh i
- provođenje toplote u unutrašnjost zida.

Deo energije Sunčevog zračenja koji se provodi ka unutrašnjosti zida nazivamo **akumulisanom toplotom**, dok deo koji se preda vazduhu prostorije usled konvekcije predstavlja **toplotno opterećenje** od Sunčevog zračenja koje je potrebno eliminisati iz prostorije.

Na slici 6.16 je prikazana temperatura zida na površini ($x=0$) i u unutrašnjim slojevima, a na slici 19 temperatura površina zidova različitih debljina.



Slika 6.16 Temperatura zida na površini ($x=0$) i u unutrašnjim slojevima



Slika 6.17 Temperatura površina zidova različitih debljina

Za unutrašnje slojeve zida je karakteristično:

1. Maksimalna temperatura se javlja kasnije - fazni pomeraj i
2. Maksimum temperature u unutrašnjosti je manji - smanjenje amplitude.

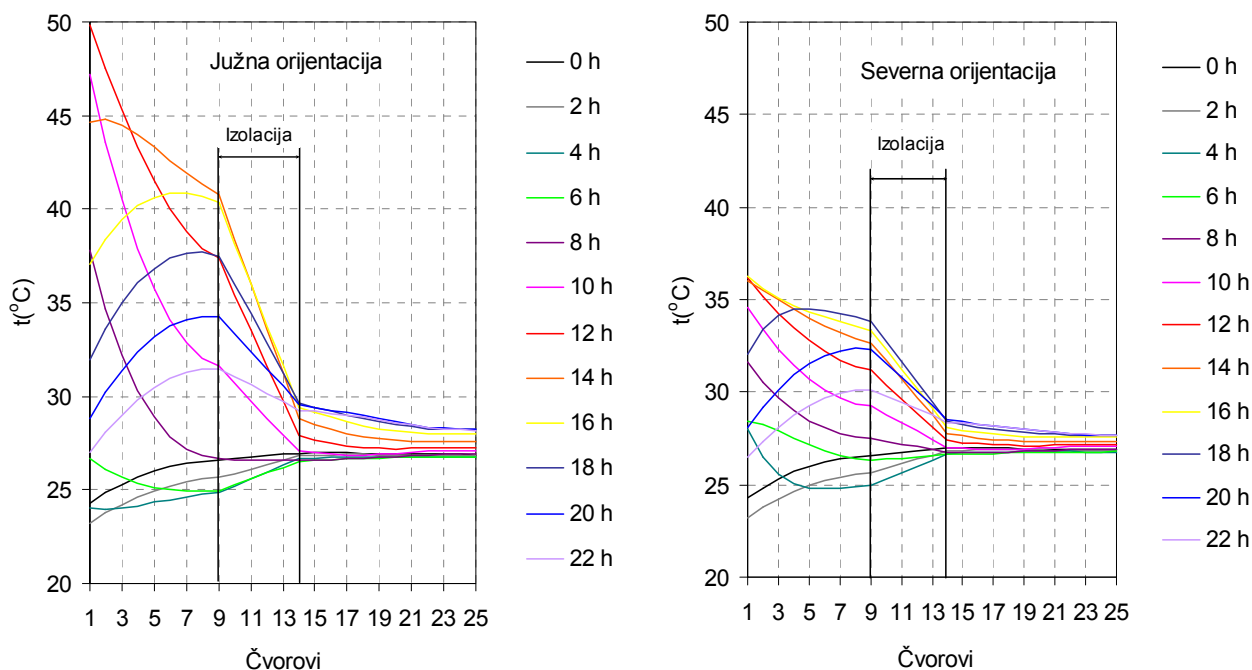
Što je unutrašnji zid deblji temperatura na površini zida je niža jer je izraženija akumulacija toplote, odnosno više se toplote provodi ka unutrašnjosti zida. S obzirom da toplotno opterećenje obuhvata samo onu količinu toplote koja zagreva sobni vazduh, potrebno je rešenja Furijeove jednačine naći na površini zida, pa je onda toplotno opterećenje prostorije od propuštenog Sunčevog zračenja:

$$q(\tau) = \alpha \cdot (\theta_{x=0} - \theta_i) \quad (6.17)$$

Rešenje Furijeove jednačine daje tačne vrednosti temperatura zida u toku dana, ali je potrebno znati:

1. Količinu Sunčeve energije koja dospeva na zid,
2. Tačno određen koeficijent apsorpcije zida i
3. Termo-fizičke karakteristike zida.

Na slici 6.18 prikazana je promena temperaturnog polja unutar fasadnog zida u toku jednog dana, za južnu i severnu orijentaciju model-prostorije (klimatizovane prostorije) dobijena simulacionim programom. Sistem za klimatizaciju, u ovom slučaju, radi bez prekida, a osvetljenje u prostoriji nije uključeno. Sa dijagrama se može uočiti dnevna promena temperature spoljne i unutrašnje površine zida: spoljašnja strana fasadnog zida izložena je uticaju spoljašnjeg vazduha, kako u zavisnosti od temperature, tako i u zavisnosti brzine strujanja vazduha (uticaj vetra), zatim uticaju zračenja nebeskog svoda i tla i izložena je Sunčevom zračenju; kao što se može videti sa dijagrama, dominantan uticaj na promenu temperature spoljšnje površine zida, prostorije orijentisane ka jugu, ima direktno Sunčevo zračenje, tako da temperatura površine fasadnog zida južno orijentisane prostorije dostiže čak 50°C, dok za severnu orijentaciju zagrevanje spoljašnje površine zida ide do 36°C, gde je manje izražen uticaj Sunčevog zračenja. Izolacioni sloj od mineralne vune, postavljen je između dva sloja opeke i mogu se uočiti “prelomne” tačke na linijama temperature na granicama izolacionog sloja. Temperatura unutrašnje strane fasadnog zida menja se u opsegu od 27.5°C do 28.5°C, za južnu orijentaciju, dok je dnevna promena temperature unutrašnje površine fasadnog zida prostorije orijentisane ka severu, još manja.



Slika 6.18 Promena temperaturnog polja unutar fasadnog zida u toku dana za južnu i severnu orijentaciju prostorije (letnji projektni dan)

Koeficijenti akumulacije toplote

Kada su u pitanju dobici toplote, njih je relativno lako odrediti (izračunati), ali je mnogo teže odrediti toplotno opterećenje prema kome se dimenzioniše postrojenje za klimatizaciju. Dobici toplote, koji predstavljaju polazni podatak za računanje toplotnog opterećenja, zavise od mnogo veličina u samoj prostoriji (mase zidova i poda, materijala zidova, geometrije prostorije, itd.) S obzirom da je preračunavanje dobitaka toplote u toplotno opterećenje prilično matematički složeno i obimno, nije pogodno da se vrši za svaki konkretan slučaj proračuna. Zato se problem rešava uvođenjem koeficijenata akumulacije toplote.

Po definiciji koeficijent akumulacije toplote je odnos između trenutnog toplotnog opterećenja i maksimalne vrednosti dobitaka toplote:

$$s(\tau) = \frac{Q_{opt}(\tau)}{Q_{dob,max}} \quad (6.18)$$

Za određene, *karakteristične* tipove prostorija određene su složenim detaljnim matematičkim modelom krive toplotnog opterećenja za zadatu krivu dobitaka toplote i na osnovu tih proračunasa određeni koeficijenti akumulacije toplote za određene tipične slučajeve.

Strogo uzevši, naziv *koeficijent akumulacije toplote* je potpuno pogrešan, jer on ne pokazuje akumulisanu toplotu, već sasvim suprotno - deo toplotnog dobitka koji predstavlja trenutno *toplotno opterećenje*. Naziv potiče od striktnog prevoda sa nemačkog i engleskog jezika (*wärmespeicher*, *heat storage factor*), mada se u novijoj američkoj literaturi nalazi naziv faktor toplotnog opterećenja (*cooling load factor*) što i jeste njegova fizikalna suština.

Domen promene koeficijenta akumulacije toplote za referentni slučaj najviše zavisi od tipa gradnje; tako se vrednosti koeficijenta akumulacije uzimaju iz tablica za najpribližniji slučaj i računa se toplotno opterećenje:

$$Q_{opt}(\tau) = Q_{dob,max} \cdot s(\tau). \quad (6.19)$$

Ovaj koncept koriste skoro sve u svetu poznate metode proračuna toplotnog opterećenja klimatizovanih prostorija, izuzev TFM (*Transfer Function Method*), ali ga koriste čak i metode koje su izvedene iz TFM, kao i najnovije metode bazirane na bilansu toplote za svaku površinu u prostoriji.

Toplotno opterećenje od sunčevog zračenja kroz prozor računa se prema jednačini:

$$Q(\tau) = Q_{dob,max} \cdot s(\tau) = [F_{os} \cdot I_{max} \cdot a + (F - F_{os}) \cdot I_{dif,max}] \cdot b \cdot s(\tau), \quad (6.20)$$

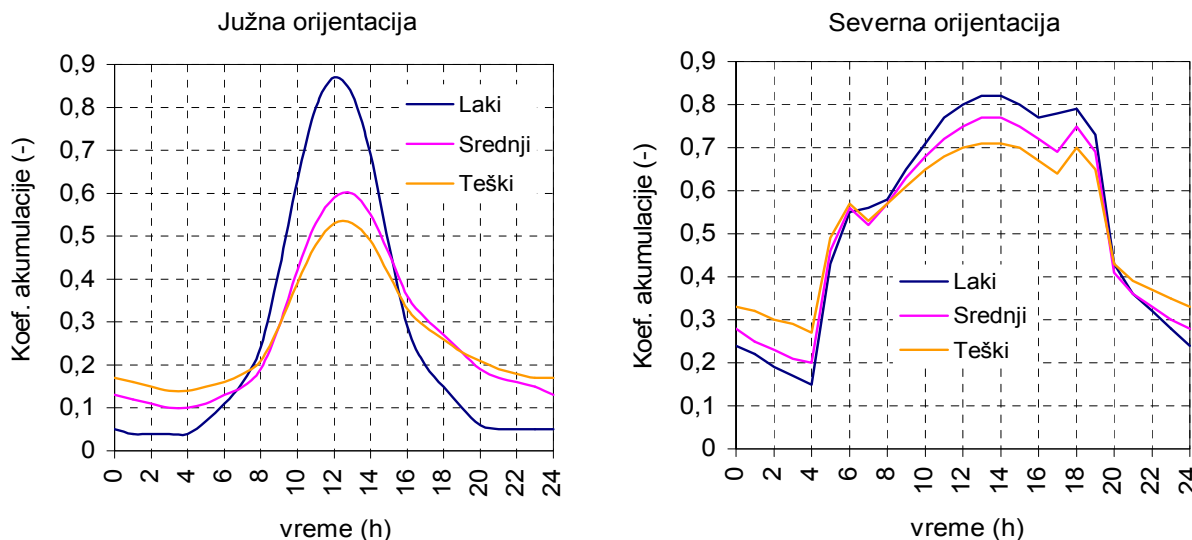
gde je:

- F_{os} - osunčana površina stakla prozora,
- F - ukupna površina stakla prozora,
- I_{max} - ukupni intenzitet Sunčevog zračenja za posmatranu orijentaciju propušten kroz jednostruko obično staklo debljine 3mm,
- $I_{dif,max}$ - intenzitet difuznog Sunčevog zračenja propušten kroz jednostruko obično staklo debljine 3mm,
- a - koeficijent korekcije za zamućenost atmosfere,
- b - koeficijent propustljivosti stakla prozora i zastora za Sunčevo zračenje u odnosu na jednostruko obično staklo,
- $s(\tau)$ - koeficijent akumulacije toplote od Sunčevog zračenja.

Koeficijent akumulacije toplote od Sunčevog zračenja bira se u odnosu na:

- vrste gradnje (akumulacione sposobnosti zidova prostorije),
- orijentacije prozora,
- doba godine i
- doba dana.

Na slici 6.19 prikazani su koeficijenti akumulacije toplote od Sunčevog zračenja za različite tipove gradnje i dve orijentacije prostorije.



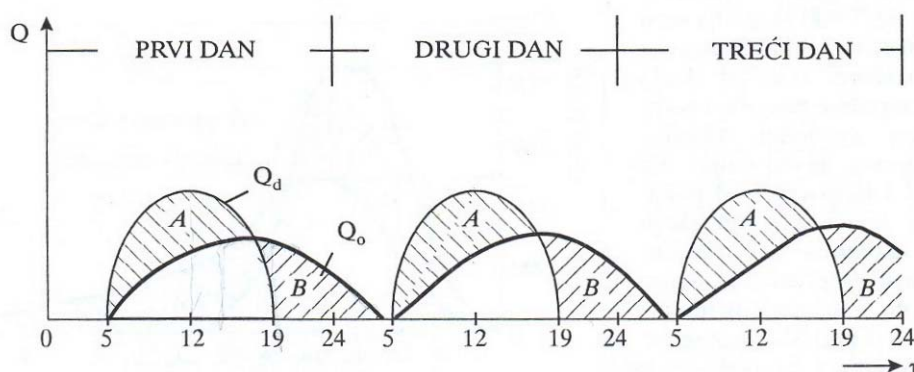
Slika 6.19 Uticaj tipa gradnje na koeficijente akumulacije toplote od Sunčevog zračenja

6.2.3.2 Toplotno opterećenje sa produženim efektom akumulacije

Za analizu produženog efekta akumulacije toplote posmatraćemo neki prosečan dan iz dužeg perioda rada klimatizacionog postrojenja. Razlikujemo dva slučaja:

- Masa zidova prostorije je mala, pa se akumulisana toplota brzo oslobađa i nema uticaja na toplotno opterećenje narednog dana (slika 6.20).

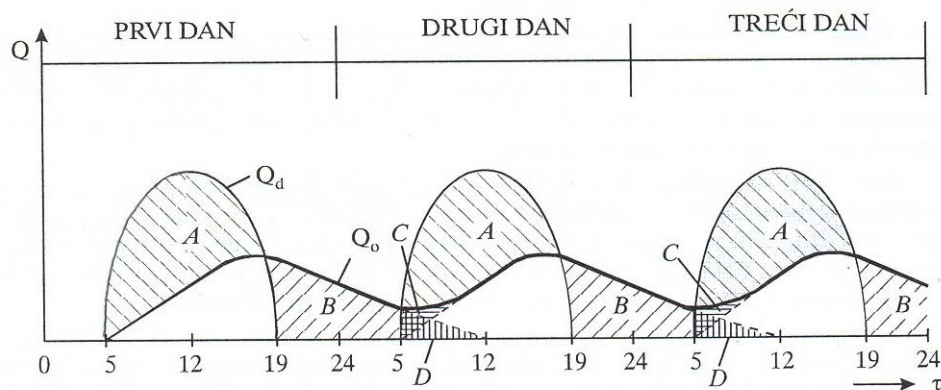
A - akumulisana količina toplote
 B - oslobođena količina toplote



Slika 6.20 Tok dnevnih toplotnih opterećenja pri malom efektu akumulacije

- Masa zidova prostorije ima veći stepen akumulacije, pa akumulisana toplota ostaje duži period vremena u zidovima prostorije i utiče na povećanje toplotnog opterećenja narednog dana (slika 6.21).

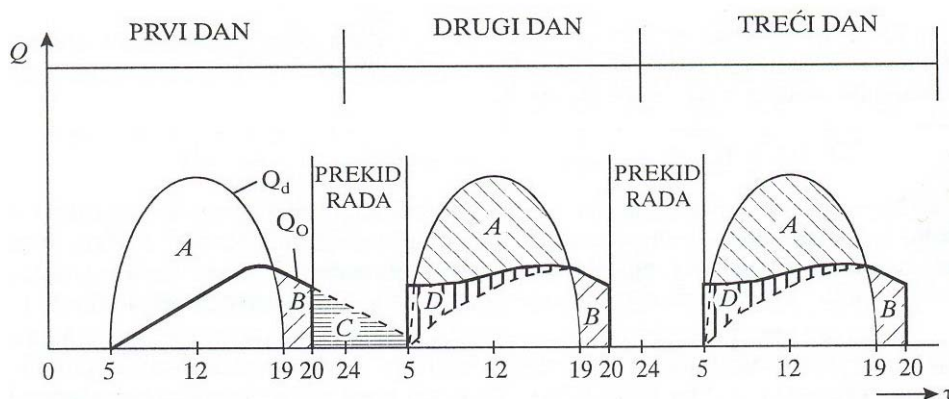
- A - akumulisana količina toplote
 B - oslobođena količina toplote
 C,D - ostaci akumulisane toplote od prethodnog dana



Slika 6.21 Tok dnevnih tolotnih opterećenja pri većem efektu akumulacije

Još izraženiji uticaj akumulacije javlja se u prostorijama gde klimatizacija radi sa dnevnim prekidima (kao što su poslovne prostorije - npr. uključuje se ujutro u 6h a isključuje u 20h) što je prikazano na slici 6.22.

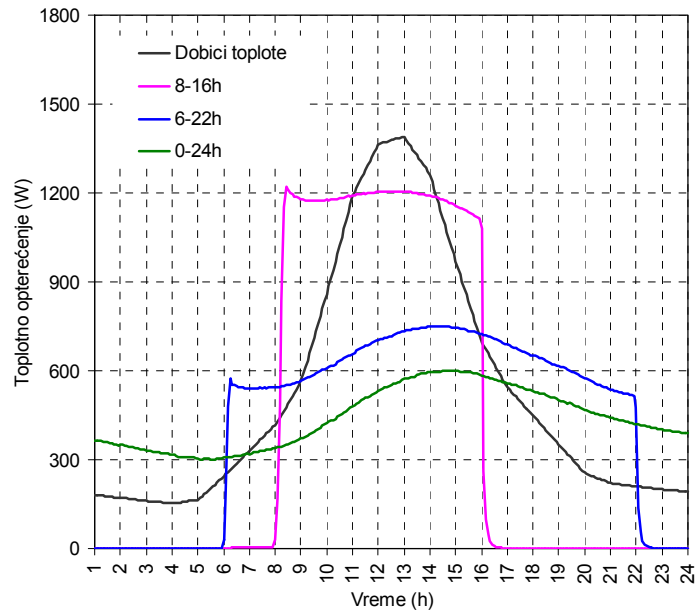
- A - akumulisana količina toplote
 B - oslobođena količina toplote
 C - toplota koja ostaje akumulisana u toku prekida rada postrojenja
 D - prethodno akumulisana toplota koja se oslobađa narednog dana



Slika 6.22 Tok dnevnih tolotnih opterećenja pri radu klimatizacionog postrojenja sa prekidom

Kada se postrojenje isključi, temperatura vazduha u prostoriji brzo poraste, pa više na postoje uslovi za razmenu toplote pri konvekciji, tako da akumulisana toplota u zidovima tu ostaje sve do ponovnog uključanja postrojenja narednog dana, kada se snižava temperatura vazduha u prostoriji i ponovo uspostavljaju uslovi za prelaz toplote sa površine zidova na vazduh u prostoriji. Narednog dana, prilikom uključanja postrojenja za klimatizaciju, osim zaostale akumulisane toplote javljaju se novi dobici i novo toplotno opterećenje. Sve to rezultuje povećanim toplotnim opterećenjem u trenutku uključivanja klimatizacionog postrojenja narednog dana.

Na slici 6.23. prikazan je tok toplotnog opterećenja prostorije orijentisane ka jugu za različite režime rada klimatizacije - bez prekida i sa različitom dužinom prekida uporedo sa dobicima toplote koji potiču od spoljnih izvora (transmisije kroz zidove i prozor i Sunčevog zračenja).



Slika 6.23 Tok dnevnih tolotnih opterećenja pri različitim režimima rada klimatizacionog postrojenja

6.2.4 Toplotno opterećenje transmisijom toplote kroz prozor

S obzirom da su prozori sačinjeni pretežno od tankih staklenih površina i da imaju mali otpor provođenju toplote, smatra se da ne postoji akumulacija toplote u prozorima i da je prolaz toplote kroz prozore trenutani. Zbog toga se toplotno opterećenje transmisijom toplote kroz prozor računa za posmatrani vremenski trenutak sa trenutnom razlikom temperatura spoljnog i unutrašnjeg vazduha:

$$Q(\tau) = U_w \cdot F \cdot (\theta_e(\tau) - \theta_i), \quad (6.21)$$

gde je:

- U_w - koeficijent prolaza toplote kroz prozor,
- F - površina prozora (građevinskog otvora),
- $\theta_e(\tau)$ - temperatura spoljnog vazduha,
- θ_i - temperatura vazduha u prostoriji.

Infiltracija spoljnog vazduha

Infiltracija spoljnog vazduha je u klimatizovanim prostorijama, po pravilu, znatno manja nego u prostorijama koje imaju neki od uobičajenih sistema grejanja. Čest je slučaj klimatizovanih zgrada u kojima su prozori fiksni i ne otvaraju se - tada je propustljivost procepa zanemarljiva.

U slučaju kada dolazi do infiltracije spoljnog vazduha, posebno se računa latentno i suvo toplotno opterećenje usled infiltracije:

$$Q_{INF,s} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (\theta_e(\tau) - \theta_i) \quad (6.22)$$

$$Q_{INF,lat} = \dot{V} \cdot \rho \cdot r \cdot (x_e(\tau) - x_i). \quad (6.23)$$

6.2.5 Toplotno opterećenje od unutrašnjih izvora

Toplotno opterećenje koje potiče od unutrašnjih izvora toplote često može nadmašiti toplotno opterećenje od spoljnih izvora. Unutrašnji izvori toplote su:

- ljudi,
- osvetljenje,
- mašine i aparati,
- susedne neklimatizovane prostorije,
- tehnološki procesi (u industriji).

6.2.5.1 Toplota koju odaju ljudi

Toplotno opterećenje od ljudi je uvek prisutno, s obzirom da se komforna klimatizacija uvek uvodi zbog prisustva ljudi u prostorijama, kako bi se obezbedili uslovi ugodnosti. Toplota koju odaju ljudi može biti jako značajna kada se radi o prostorijama u kojima boravi veliki broj ljudi, kao što su: bioskopi, pozorišta, sportske dvorane, itd.

$Q_{lj} = \sum_1^n q_{lj,n}$ odnosno, razdvaja se osetna (suva) i latentna toplota koju ljudi odaju:

$$Q_{lj,s} = n \cdot q_{lj,s} \text{ i}$$

$$Q_{lj,lat} = n \cdot q_{lj,lat} \text{ ,} \tag{6.24}$$

gde je:

- n - broj ljudi koji boravi u prostoriji i
- q_{lj} - količina toplote koju odaje jedan čovek pri datim uslovima.

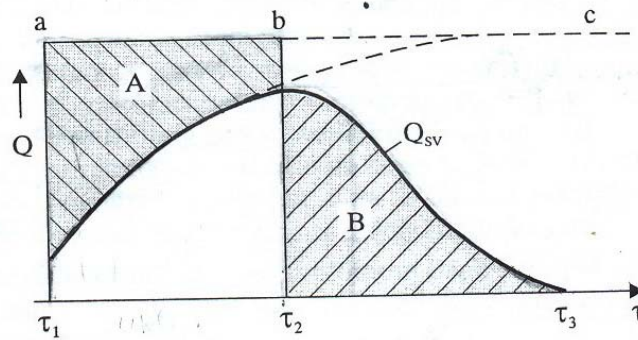
Prema većini metoda ne uzima se koeficijent akumulacije toplote od ljudi, već se toplota koju odaje čovek smatra toplotnim opterećenjem, odnosno smatra se da se celokupno odata suva toplota predaje vazduhu prostorije. Po novom ASHRAE standardu usvaja se koeficijent toplotnog opterećenja od ljudi CLF (*Cooling Load Factor*), što ima smisla kada u prostoriji boravi mali broj ljudi koji predaju toplotu zračenjem prema okolnim površinama u prostoriji. Međutim, kada u prostoriji boravi veći broj ljudi, onda bi trebalo uzeti u obzir međusobno razmenjenu toplotu zračenjem između ljudi.

6.2.5.2 Toplotno opterećenje od osvetljenja

Svetiljke odaju toplotu zračenjem i prelazom toplote na vazduh u prostoriji. Usled predaje toplote zračenjem javlja se efekat akumulacije toplote u podu i zidovima prostorije, slično kao kod Sunčevog zračenja.

Dobici toplote od osvetljenja su konstanti sve vreme rada osvetljenja, od trenutka uključenja τ_1 do trenutka isključenja τ_2 . Površina A na dijagramu predstavlja akumulisanu toplotu u zidovima i podu prostorije, a površina B je naknadno odata toplota, koja se odaje od trenutka isključenja osvetljenja τ_2 pa sve do nekog trenutka τ_3 . Ukoliko prethodno akumulisana toplota (površina A) uspe da se u potpunosti oslobodi pre ponovnog uključenja osvetljenja, onda je naknadno oslobođena toplota (površina B) koja predstavlja toplotno opterećenje po isključenju osvetljenja jednaka prethodno akumulisanoj toploti ($A = B$, iz bilansa toplote).

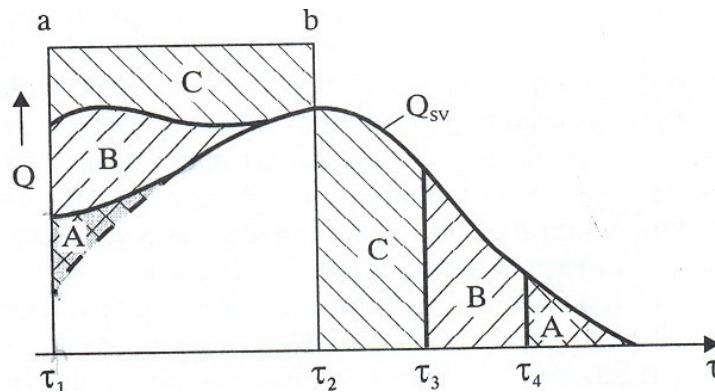
Na slici 6.24 prikazan je tok toplotnog opterećenja od osvetljenja za neprekidan rad klimatizacionog postrojenja.



Slika 6.24 Tok toplotnog opterećenja od osvetljenja za neprekidan rad klimatizacionog postrojenja

Ako je osvetljenje neprekidno uključeno, dobici toplote i toplotno opterećenje se izjednačavaju i tada je i toplotno opterećenje konstantno, i tada efekat akumulacije toplote ne dolazi do izražaja.

Kada klimatizaciono postrojenje radi sa prekidom, onda se sva akumulisana toplota ne prenosi na sobni vazduh, već deo akumulisane toplote ostaje u zidovima i oslobađa se narednog dana, kada se toplotno opterećenje povećava (slika 6.25).



Slika 6.25 Tok toplotnog opterećenja od osvetljenja u slučaju rada klimatizacionog postrojenja sa prekidom

Ako se klimatizacija isključi u trenutku τ_4 , onda se akumulisani deo toplote A ne može preneti na sobni vazduh, pa dolazi do produženog efekta akumulacije toplote i povećanja toplotnog opterećenja sledećeg dana, kada se klimatizaciono postrojenje ponovo uključuje.

Ako se klimatizacija ranije isključi, npr. u trenutku τ_3 , onda veća količina toplote (A+B) podleže efektu produžene akumulacije toplote.

Praktično izračunavanje toplotnog opterećenja od osvetljenja vrši se pomoću koeficijenata akumulacije:

$$Q_B(\tau) = Q_{dob, max} \cdot s_B(\tau), \text{ odnosno} \quad (6.25)$$

$$Q_B(\tau) = P \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot s_B(\tau), \quad (6.26)$$

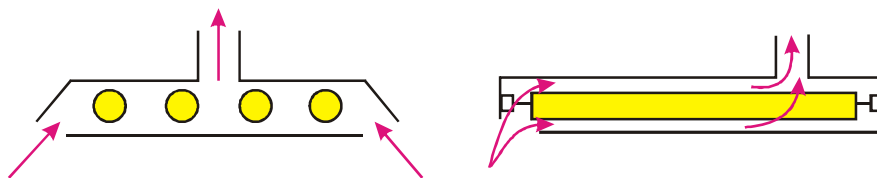
gde je:

P - ukupna instalisana snaga svetiljki u prostoriji,

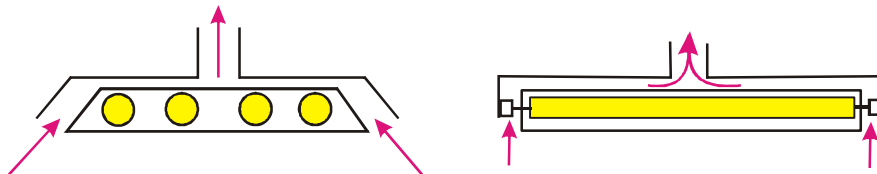
- l_1 - koeficijent jednovremenosti uključenja osvetljenja (u saradnji sa projektantom električnih instalacija)
- l_2 - koeficijent ostatka toplote kod provetranih svetiljki (kod neprovetranih je $l_2=1$) i
- $s_B(\tau)$ - koeficijent akumulacije toplote od osvetljenja.

Koeficijent l_2 pokazuje koji deo instalisane snage svetiljke opterećuje vazduh prostorije pri stalnom uključenju osvetljenja. Prema VDI normama, razlikuju se tri osnovna načina provetranja svetiljki:

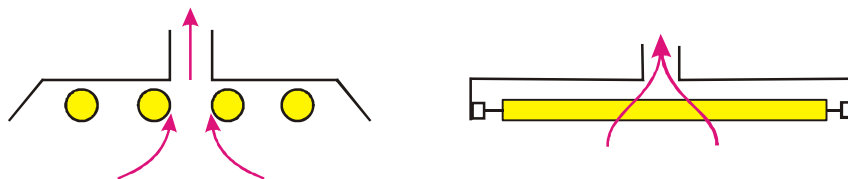
1. Provetranje kroz svetiljku – vazduh opstrujava svetiljku po celoj dužini;



2. Provetranje cirkulacijom vazduha oko svetiljke – vazduh opstrujava zatvoreno telo svetiljke. Cev svetiljke se ne hladi direktno vazduhom za provetranje;



3. Delimično provetranje kroz svetiljku – na gornjoj strani svetiljke se nalazi otvor za izvlačenje vazduha. Samo deo cevi svetiljke koji se nalazi u blizini otvora biće prinudno opstrujavan vazduhom za provetranje.



Osim od načina provetranja svetiljki, koeficijent l_2 zavisi i od:

- protoka vazduha za provetranje (m^3/h) i
- načina odvođenja vazduha iz prostorije (kroz plenum, neizolovane ili izolovane kanale).

Koeficijent akumulacije toplote od osvetljenja uzima u obzir da svetiljke nisu uključene 24 h tokom dana. Što je vreme uključenosti svetla kraće efekat akumulacije toplote je izraženiji.

Koeficijenti akumulacije toplote zavise od:

- mase zidova i poda prostorije;
- položaja svetiljki, koji utiče na količinu toplote koja se preda pri konvekciji – svodi se na dva slučaja: slobodno obešene svetiljke i svetiljke u plafonu ili ugrađene na samom plafonu;
- vremenskog perioda uključenosti osvetljenja; sa porastom dužine trajanja uključenosti, vrednosti koeficijentata akumulacije toplote od osvetljenja se približavaju jedinici. Usvaja se $s_B = 1$ kada je osvetljenje uključeno 20 ili više časova u toku dana.

6.2.5.3 Toplotno opterećenje od mašina u prostoriji

Obično se u praksi smatra da je disipacija toplote od rada mašine jednaka instalisanoj snazi mašine i da se predaje vazduhu prostorije, tako da čini toplotno opterećenje:

$$Q_M = P_{el} \cdot \quad (6.27)$$

Ako se u prostoriji nalazi više mašina, onda se toplotno opterećenje opterećenje računa kao:

$$Q_M = \sum \left(\frac{N_i}{\eta \cdot a_1} \right) \cdot a_2, \quad (6.28)$$

gde je:

- N_i - instalisana snaga i -te mašine,
- η - srednji stepen iskorišćenja motora,
- a_1 - koeficijent opterećenja i -te mašine u posmatrano vreme,
- a_2 - koeficijent jednovremenosti uključenosti mašina.

6.2.5.4 Toplotno opterećenje od susjednih prostorija

Toplota koja se transmisijom prenese u prostoriju od susjednih neklimatizovanih prostorija (kroz pod, zidove, tavanicu, vrata...) predstavlja toplotno opterećenje od susjednih prostorija:

$$Q_R = \sum U_i \cdot F_i \cdot \Delta\theta_i, \quad (6.29)$$

gde je:

- U_i - koeficijent prolaza toplote kroz i -tu pregradu,
- F_i - površina posmatrane pregrade,
- $\Delta\theta_i$ - razlika temperatura vazduha neklimatizovane prostorije i vazduha klimatizovane prostorije.

Ukupno toplotno opterećenje prostorije je zbir toplotnih opterećenja od svih izvora toplote:

$$Q_{ukup} = Q_e + Q_i = Q_Z + Q_S + Q_T + Q_{LJ} + Q_B + Q_M + Q_R + Q_G. \quad (6.30)$$

6.3 ZAŠTITA OD SUNČEVOG ZRAČENJA

U ukupnom energetskom bilansu zgrade važnu ulogu igraju i toplotni dobici od Sunca. U savremenoj arhitekturi puno pažnje se posvećuje korišćenju energije Sunca, ali i zaštiti od preteranog osunčanja, jer se i pasivni dobici toplote moraju regulisati i optimizirati u zadovoljavajuću celinu. Sistemi za zaštitu od Sunčevog zračenja usklađeni s spoljnim promenama osiguravaju dobre uslove rada i boravka u zgradi. Ako se kontroliše njihova primena (mobilnost, automatika rada) onda je omogućen prilagodljivo propuštanje Sunčevog zračenja u zgradu. Na taj način je moguće potrošnju energije za hlađenje leti i grejanje zimi značajno smanjiti i koristiti, ili izbegavati dobicke od Sunca.

Za efikasnu zaštitu od intenzivnog osvetljenja (blještanja) primjenjuju se sledeća rešenja:

- arhitektonska geometrija: zelenilo, tremovi, nadstrešnice, balkoni
- elementi spoljne zaštite od Sunca: pokretni i nepokretni brisoleji, spoljne žaluzine
- roletne, tende, savremena ostakljenja i dr.

- elementi unutrašnje zaštite od Sunca: roletne, žaluzine, rolo i obične zavese i dr .
- elementi unutar stakla za zaštitu od Sunca i usmeravanje svetla - hologramski elementi, reflektirajuća stakla i folije, staklene prizme i dr.
- višefunkcionalni konstruktivni elementi zgrada.

Elementi mogu biti fiksirani ili pokretni, klizni, rolo i uz to automatizovani. Mogu biti postavljeni kao pojedinačni vertikalni ili horizontalni elementi ili kao ploče, u oba slučaja spolja ili unutra. Elementi treba da budu lagani, a postavljaju se na potkonstrukciju koja je odmaknuta od noseće konstrukcije zgrade.

Materijali od kojih se izrađuju elementi zaštite od Sunca su :

- aluminijum (ekstrudiran, peskaren)
- drvo (otporno na spoljne uslove)
- tkanine (fiberglas, impregnirani ili prirodni materijali).

Korisni elementi zaštite od Sunca su nadstrešnice ili tremovi određene dubine na južnom zidu koje sprečavaju upad Sunčevog zračenja leti, a propuštaju ga zimi. Po pravilu se na južnoj strani postavljaju horizontalni elementi jer leti, na južnoj strani, Sunčevo zračenje upada pod velikim uglom, pa ga horizontalna ploča može odbiti. Zimi Sunčevo zračenje upada pod blagim uglom i prolazi kroz horizontalne elemente u prostor. Na zapadnoj i istočnoj strani se postavljaju vertikalni elementi koji mogu raspršiti zrake, s obzirom da Sunčevo zračenje uvek upada pod blagim uglom.

Dodatno, moguće je upotrebom mobilnih i automatizovanih elemenata optimizirati korišćenje dobitaka od Sunčevog zračenja za pojedine prostore prema trenutnoj potrebi.


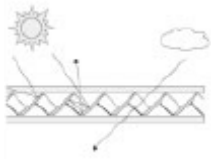
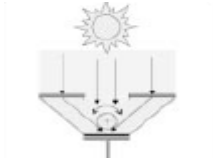

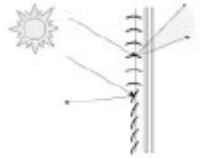


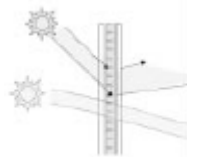
Ipak, zaštiti od Sunca najviše doprinosi pravilna orijentacija zgrade, odnosno grupisanje prostorija po nameni prema uslovima pojedine orijentacije.

Način postavljanja zaštite od Sunca i odnos prema konstrukcijama otvora i zidova mora biti takav da omogući kvalitetno zasenčenje, sa što manjim ograničavanjem pogleda kroz otvore. Potrebno je sprečiti stvaranje džepova toplog vazduha ispod ili iza konstrukcija za zaštitu od Sunca, jer lokalnim povećanjem temperature iza takvih konstrukcija se transmisionim i ventilacionim dobicima anuliraju smanjeni dobici usled zračenja. Povećanje temperature kod određenih oblika konstrukcija za zaštitu od insolacije može se koristiti za dodatno povećanje brzine strujanja vazduha i povećano provetranje zgrada.



Slika 6.26 Primeri spoljnih elemenata za zaštitu od Sunčevog zračenja

Tabela 6.2 Pregled sistema za zaštitu od Sunčevog zračenja

Kat.	Tip	Skica	Klima	Mesto postavljanja	Potencijal za uštedu
1A	Usmeravajuće žaluzine		Umerena klima	Vertikalne zastakljene površine	DA
1A	Ogledala za zaštitu od Sunca		Umerena klima	Zastakljeni krovovi	NE
1A	Hologramski optički element		Sve klime	Vertikalne i horizontalne zastakljene površine	DA
1B	Zasenčenja sa usmeravanjem svetla		Tople klime sa visokom insolacijom	Vertikalne zastakljene površine (gornji deo)	Zavisi
1B	Pokretne žaluzine		Sve klime	Vertikalne zastakljene površine	DA
1B	Staklo sa reflektujućim elementima		Umerena klima	Vertikalne zastakljene površine	Zavisi
2A	Svetleće police		Umerena klima i mala insolacija	Vertikalne zastakljene površine	Zavisi
2B	Staklo-paneli sa povoljnim odnosom r/d		Sve klime	Vertikalne zastakljene površine	DA

1A – Primarno korišćenje dnevnog difuznog svetla

1B – Primarno korišćenje direktnog Sunčevog zračenja

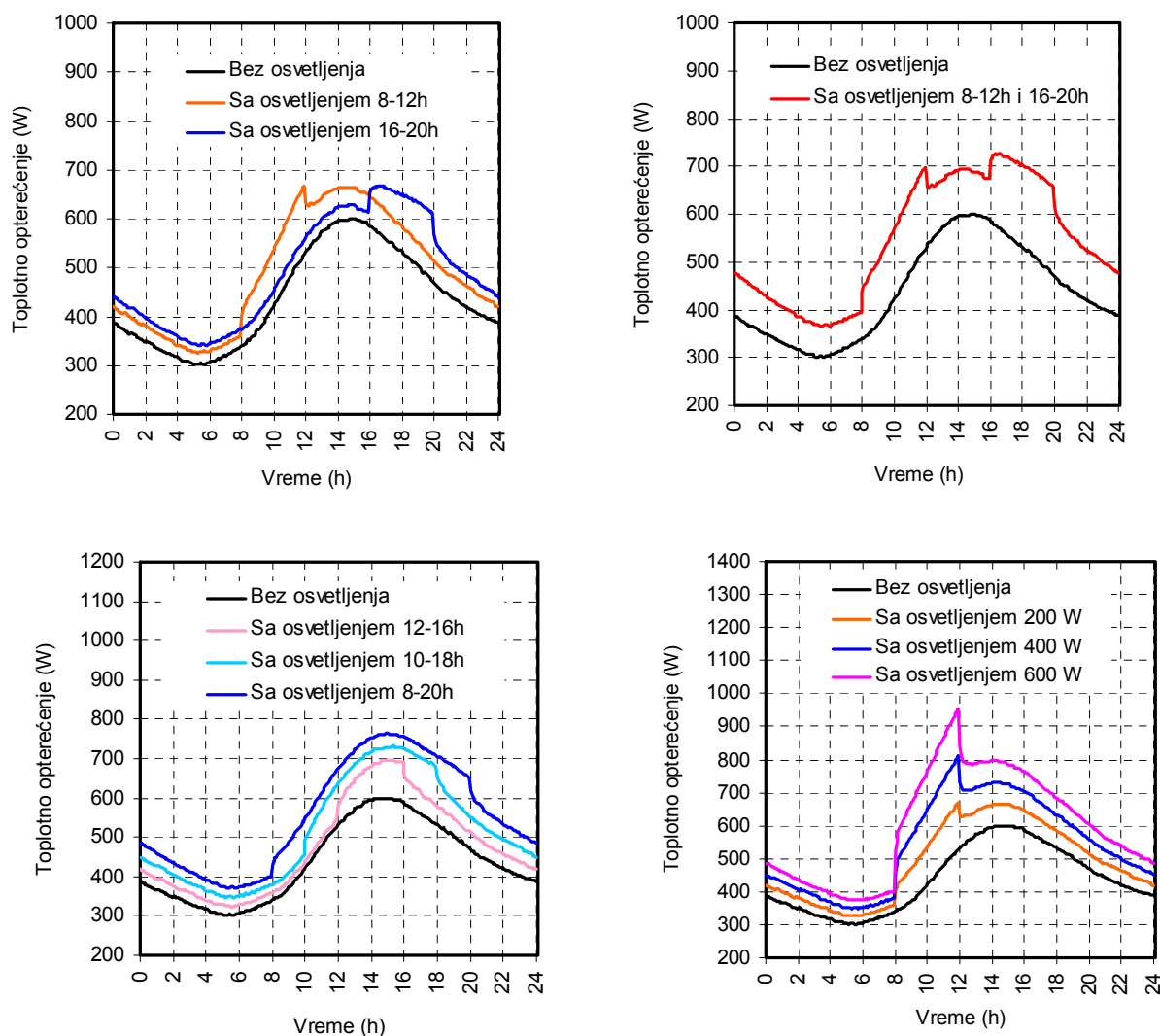
2A – Sistemi za usmeravanje difuznog svetla

2B – Sistemi za usmeravanje i propuštanje direktnog Sunčevog zračenja

6.4 UTICAJ POJEDINIH FAKTORA NA TOPLOTNO OPTEREĆENJE

6.4.1 Uticaj režima rada osvetljenja u prostoriji

Na slici 6.27 prikazani su tokovi toplotnog opterećenja južno orijentisane prostorije sa različitim režimima i intenzitetom veštačkog osvetljenja u prostoriji. Uključenost osvetljenja u prostoriji varirana je i vremenski i po intenzitetu. Razmatrane su tri dužine perioda trajanja veštačkog osvetljenja: 4, 8 i 12 časova (jedan ili dva perioda uključenosti tokom dana). Pri tome je varirano vreme tokom dana kada osvetljenje radi. Intenzitet svetiljke je tokom ovih simulacija bio konstantan i iznosio je 200W. Na kraju je variran intenzitet osvetljenja u prostoriji.

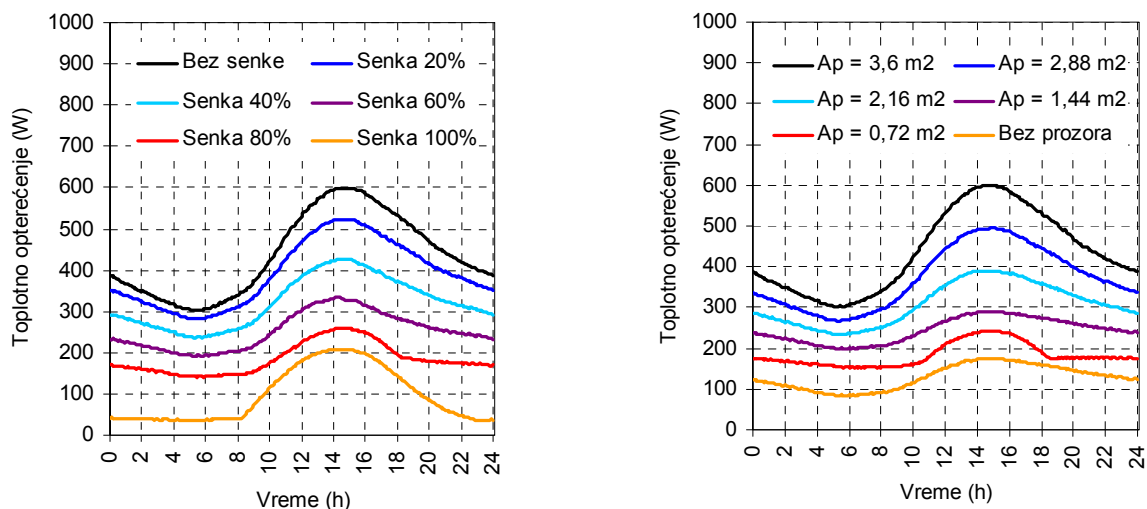


Slika 6.27 Uticaj različitog režima rada osvetljenja – dužine trajanja i instalisane snage svetiljki

6.4.2 Uticaj zastora i veličine prozora

Veličina senke na prozoru takođe je jedna od veličina koje mogu varirati. U ovom slučaju smatra se da senka koja postoji, bilo da je u pitanju vrsta zastora ili neki spoljašnji objekat koji pravi senku, u potpunosti sprečava prodor Sunčevog zračenja u prostoriju, kako direktnog, tako i difuznog. U zavisnosti od veličine senke smanjuju su dobici toplote od Sunčevog zračenja, a samim tim i ukupno toplotno opterećenje prostorije. Na slici 6.28 levo prikazan je tok toplotnog opterećenja južno orijentisane prostorije tokom letnjeg projektog dana za različite veličine senke na prozoru uporedo sa referentnim slučajem kada senka ne postoji.

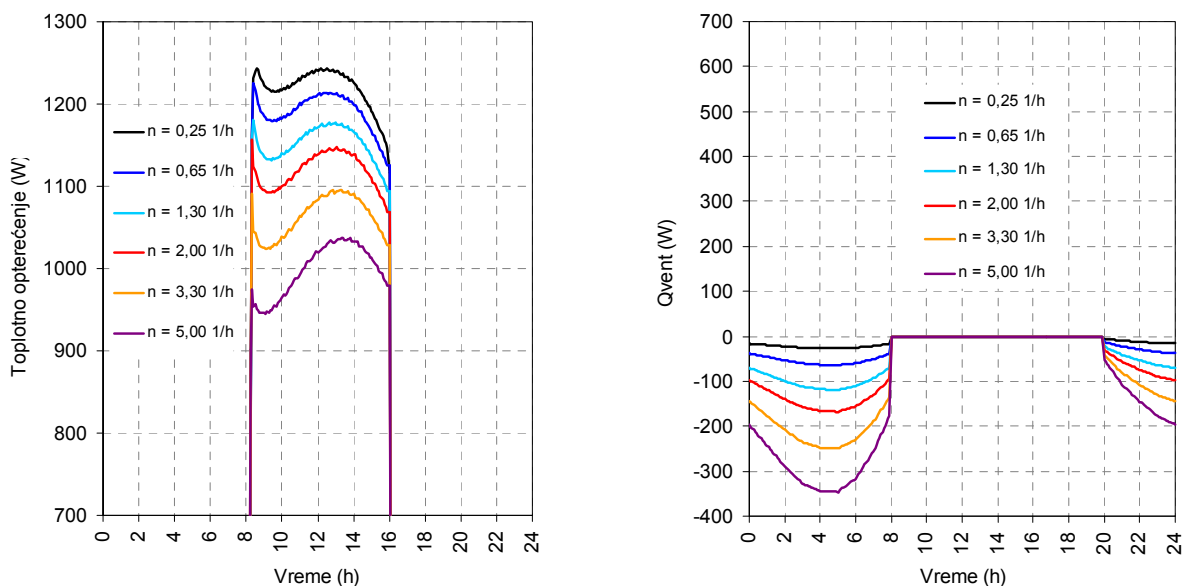
U cilju praćenja uticaja veličine prozora na toplotno opterećenje prostorije, dimenzije prozora su varirane tako da je površina prozora proporcionalno umanjivana za po 20% u odnosu na referentni prozor površine 3.6 m^2 , na isti način kako je varirana veličina senke. Na taj način je omogućena dodatna analiza transmisije toplote kroz zid i staklo prozora. Na slici 6.28 desno prikazan je tok toplotnog opterećenja južno orijentisane prostorije tokom letnjeg projektnog dana za različite dimenzije prozora uporedo sa referentnim slučajem i slučajem kada nema prozora na fasadnom zidu.



Slika 6.28 Uticaj veličine senke na prozoru i veličine prozora

6.4.3 Uticaj prirodnog provetravanja tokom noći

Na slici 6.29 levo prikazana su toplotna opterećenja prostorije pri različitom broju izmena vazduha tokom prirodne noćne ventilacije, a na slici 6.29 desno količina toplote koja se odvodi iz prostorije provetravanjem spoljnim vazduhom. Sa dijagrama se jasno može uočiti da sa povećanjem intenziteta ventilacije tokom noći opada toplotno opterećenje prostorije, jer spoljašnji vazduh u toku noći ima nižu temperaturu od unutrašnjeg vazduha, tako da se hlade zidovi prostorije.



Slika 6.29 Uticaj prirodne ventilacije tokom noćnih sati (od 20 do 8 h ujutro)