

# Glava

## 8

### KLIMA GRADA

#### 8.1. Osnovni činioci klime grada

Klima grada je karakterističan primer nenamerne lokalne modifikacije vremena, stvorene ljudskom delatnošću. Ona se manifestuje na sledeće načine:

- (1) Poremećena je prirodna ravnoteža zračenja zbog promena u osnovnim karakteristikama podloge. Tako je vegetacija zamjenjena velikim površinama betona i drugim građevinskim materijalima. Međutim, u starijim rezidencijalnim delovima grada, drveće i niska vegetacija su pažljivo negovani pa je klima slična onoj u šumi.
- (2) Visoke građevine predstavljaju prepreke vetrui, menjajući tako prirodno strujanje i turbulenciju vazduha.
- (3) Ravnoteža vodene pare u gradu je poremećena zamenom vlažnih suvih površinama.
- (4) Grad emituje toplotu, vodenu paru i zagađenje u atmosferu. Osim toga, automobilski saobraćaj je izvor lokalne turbulencije.

Postoje brojne interakcije između navedenih mehanizama. Na primer, atmosfersko zagađenje utiče na ravnotežu zračenja, kao i na režim temperature u gradu.

Pošto većina svetskog stanovništva živi u gradovima, to proučavanje gradske klime u okviru ekoklimatologije, zadnjih godina dobija na značaju. Tako, postoje pouzdani dokazi da gradska klima utiče na povećanje bolesti, naročito respiratorskih organa kao i smrtnosti ljudi. Postoje tri metoda u proučavanju gradske klime:

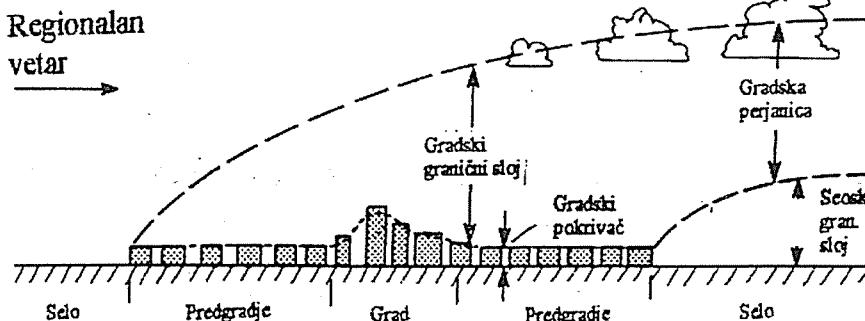
- (1) Poređenje podataka gradskih i seoskih klimatoloških stanica kada se raspolaze sa dovoljno dugim nizovima podataka (dužim od 20 godina).

(2) Analiza višegodišnjih nizova gradskih podataka radi utvrđivanja uticaja porasta industrijalizacije i populacije.

(3) Poređenje gradskih podataka dobijenih nedeljom sa podacima u ostalim danima u sedmici, s obzirom da su nedeljom industrijske i komercijalne aktivnosti u gradu svedene na minimum.

Međutim, primena ovih metoda nailazi na niz teškoća. Tako, retki su dovoljno dugi nizovi klimatoloških osmatranja gradskih i seoskih stanica koji se mogu uporediti. Osim toga, ispitivanje gradske klime je često otežano postojanjem specijalnih orografskih karakteristika kao što su doline, velike reke, jezera i brda na kojima je razmešten grad, pa je veoma teško izolovati gradske od drugih uticaja. Pokazalo se da je poređenje meteoroloških parametara izmerenih u gradu i u selu najbolji metod za utvrđivanje modifikacije klime u gradu.

Kada vazduh struji iz sela ka gradu, sreće se sa novim i veoma različitim graničnim uslovima. Naime, formira se unutrašnji granični sloj niz vetrar od vodeće granice grada (sl. 8.1). Gradski granični sloj čija se donja površina formira na nivou krovova kuća je lokalni mezorazmerni fenomen čije karakteristike zavise od prirode svake gradske površine i u njemu se često može osmotriti inverzija temperature.



Sl. 8.1. Šematski prikaz gradske atmosfere sa širom okolinom (Oke, 1976).

Ispod nivoa krovova nalazi se sloj gradskog pokrivača koji je posledica mikrorazmernih procesa na ulicama između zgrada (kanjona). Njihova klima je uglavnom određena karakteristikama neposredne okoline.

Analizom klimatskih podataka većih gradova u SAD, došlo se do zaključka da u gradovima ranije pada sneg u poređenju sa seoskim sredinama, vegetacioni period je duži, zagađenost je veća, manje je trajanje sijanja Sunca a izgleda i da je količina padavina veća.

Landsberg (1960) je sumirao uticaje grada na klimu umerenih širina, što je prikazano u tabeli 8.1. Uticaj grada na promenu pojedinačnih klimatoloških parametara biće u daljem tekstu posebno analiziran.

Tabela 8.1. Poređenje klimatoloških parametara gradske i seoske sredine (Landsberg, 1960).

| Veličina                      | Poređenje sa seoskom sredinom |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Primese:                      |                               |
| Čestice prašine               | Više od 10 puta               |
| Sumporni gas                  | Više od 5 puta                |
| Gas ugljene kiseline          | Više od 10 puta               |
| Zračenje:                     |                               |
| Globalno                      | Manje za 15 – 20%             |
| Ultraljubičasto, zimi         | Manje za 30%                  |
| Ultraljubičasto, leti         | Manje za 5%                   |
| Oblačnost                     | Veća za 5 – 10%               |
| Čestina magli:                |                               |
| Zimi                          | Veća za 100%                  |
| Leti                          | Veća za 30%                   |
| Padavine:                     |                               |
| Količina                      | Veća za 5 – 10%               |
| Broj dana sa padavinama >5 mm | Veći za 10%                   |
| Temperature:                  |                               |
| Srednja godišnja              | Veća za 0,5 – 0,8°C           |
| Minimalna, zimi               | Veća za 1,0 – 1,5°C           |
| Relativna vlažnost:           |                               |
| Srednje godišnja              | Manja za 6%                   |
| Zimi                          | Manja za 2%                   |
| Leti                          | Manja za 8%                   |
| Brzina veta:                  |                               |
| Srednja godišnja              | Manja za 20 – 30%             |
| Maksimalna                    | Manja za 10 – 20%             |
| Broj tišina                   | Veći za 5 – 20%               |

## 8.2. Ravnoteža energije i vode u gradskom vazduhu

Kao što je napred istaknuto, zagađen gradski vazduh ima značajan uticaj na ravnotežu zračenja smanjujući sunčevu zračenje, dok albedo i druge karakteristike podloge utiču na ravnotežu topotne energije naročito u velikim gradovima.

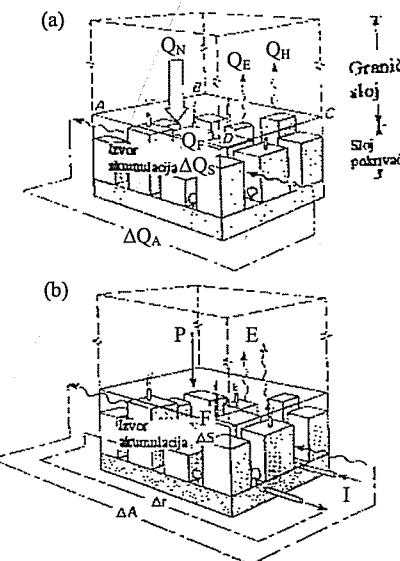
Smanjenje direktnog sunčevog zračenja je najuočljivije zimi kada se povećava debљina sloja zamućenosti a sunčevi zraci padaju na podlogu pod najmanjim uglom. Po podacima, Chandler (1965), gubitak direktnog sunčevog zračenja u Londonu usled slabljenja zbog primesa u atmosferi, pre svega čestica dima, iznosio je u srednjoj vrednosti 8,5% za visinu Sunca od  $30^{\circ}$  i 12,8% za visinu Sunca od  $14,3^{\circ}$ . Pri tmurnim zimskim danima, sloj aerosola može da oslabi sunčevu zračenje i do 90%. Monteith (1966) je pokazao da je smanjenje srednje koncentracije dima u centru Londona za  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dovelo do povećanja globalnog sunčevog zračenja (difuzno + direktno) za 1%. Međutim, ostale prime, čije se koncentracije u Londonu kreću od 200 do  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , smanjuju globalno sunčevu zračenje za 20 do 30% u poređenju sa okolnim seoskim oblastima.

Do današnjeg vremena ne postoje potpuni podaci o ravnoteži zračenja u gradovima. Neka istraživanja u tom pravcu vršena su u SAD sa ciljem stvaranja modela režima zračenja velikih gradova. Proučavanjem ravnoteže zračenja grada Sinsinatija pri anticiklonalnom tipu vremena, Bach and Patterson (1969) su zaključili da pod uticajem oblaka primesa nastaje efekat „staklene baštice“: fluks kratkotalasnog zračenja u gradu je smanjen za 6%, dok je fluks dugotalasnog zračenja za 1 do 14% veći nego u okolini.

Najznačajnije promene u klimatskom režimu grada dešavaju se u najnižim slojevima atmosfere. Tako, u sloju atmosfere visine do 1000 m od podloge, pri vedrim danima energija sunčevog zračenja oslabi do 35%, dok isto slabljenje pri velikoj zagađenosti iznosi 70%.

Osim neto zračenja,  $Q_N$ , na ravnotežu energije u nekoj „zapremini grada“ utiče antropogeni toploploti  $Q_F$  nastala sagorevanjem čvrstih i tečnih goriva, osetna i latentna toploplota ( $Q_H + Q_E$ ), razmena akumulirane topote između zgrada i okolnog vazduha  $\Delta Q_S$ , kao i neto horizontalna advekcija latentne i osetne topote  $\Delta Q_A$  (sl. 8.2a). Na osnovu rečenog, jednačina za ravnotežu energije se može napisati kao:

$$Q_N + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A. \quad (8.1)$$



Sl. 8.2. Šematski opis flukseva sadržanih u jednačinama: (a) za ravnotežu energije i (b) ravnotežu vode u zapremini gradskog vazduha, (Oke, 1983).

Slična jednačina se može napisati i za ravnotežu mase vode u istoj zapremini (sl. 8.2b):

$$P + F + I = E + \Delta r + \Delta S + \Delta A, \quad (8.2)$$

gde su:  $P$  – padavine,  $F$  – izvor vode u gradu koji je antropogenog porekla,  $I$  – snabdevanje grada vodom iz reka ili rezervoara,  $E$  – evapotranspiracija,  $\Delta S$  – razmena akumulirane vode između zemljišta i zgrada,  $\Delta A$  – horizontalna advekcija vodene pare i vodenih kapi kroz stranice posmatrane zapremine i  $\Delta r$  – neto oticaj.

U tabeli 8.2. pokazano je oslobođanje topote antropogenom aktivnošću u gradovima različitih klimatskih zona. Naime, količina oslobođene energije svih raspoloživih goriva u jednom gradu zavisi od ukupne energije koju koristi svaki stanovnik, kao i od broja stanovnika u gradu. Primećuje se da je u mnogim gradovima  $Q_F$  značajan izvor energije koji se približava neto zračenju  $Q_N$  ili ga premašuje, naročito za vreme zime. Tako se na Menhetnu (centar Njujorka) za grejanje troši tri puta manje energije po stanovniku nego u Los Andelesu, koji ima znatno topliju klimu. Razlika nastaje zbog različite konstrukcije pomenutih gradova. Naime, Los Andeles je razmešten na širokom prostoru, dok Njujork čini ogroman broj visokih zgrada u kojima su gubici topote svedeni na minimum.

*Tab. 8.2. Srednja antropogena topota ( $Q_F$ ) za izabrane gradove, (Oke, 1974).*

| Grad               | God.   | Period                 | Populacija ·10 <sup>6</sup> | Broj osoba po km <sup>2</sup> | Potroš. energ. po stanovniku (MJ·10 <sup>3</sup> ) | $Q_F$ (Wm <sup>-2</sup> ) | $Q_N$ (Wm <sup>-2</sup> ) |
|--------------------|--------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--|---------------------------|---------------------------|
| Menhetn (40°N)     | 1967   | Godina<br>Leto<br>Zima | 1,7                         | 28810                         | 128  | 117<br>40<br>198          | 93                        |
| Montreal(45°N)     | 1961   | Godina<br>Leto<br>Zima | 1,1                         | 14102                         | 221  | 99<br>57<br>153           | 52<br>92<br>13            |
| Budimpešta (47°N)  | 1970   | Godina<br>Leto<br>Zima | 1,3                         | 11500                         | 118  | 43<br>32<br>51            | 46<br>100<br>-8           |
| Šefild (53°N)      | 1952   | Godina                 | 0,5                         | 10420                         | 58   | 19                        | 56                        |
| Zap. Berlin (52°N) | 1967   | Godina                 | 2,3                         | 9830                          | 67   | 21                        | 57                        |
| Vankuver (49°N)    | 1970   | Godina<br>Leto<br>Zima | 0,6                         | 5360                          | 112  | 19<br>15<br>23            | 57<br>107<br>6            |
| Hong Kong (22°N)   | 1971   | Godina                 | 3,7                         | 3730                          | 34   | 4                         | ≈ 110                     |
| Singapur (1°N)     | 1972   | Godina                 | 2,1                         | 3700                          | 25   | 3                         | ≈ 110                     |
| Los Andeles (34°N) | '65-70 | Godina                 | 7,0                         | 2000                          | 331  | 21                        | 108                       |
| Ferbanks (64°N)    | '65-70 | Godina                 | 0,03                        | 810                           | 740  | 19                        | 18                        |

Srednje godišnje vrednosti  $Q_F$  pokazuju značajne klimatske i prostorne promene. Međutim, grad sa umerenom zimom (Vankuver) ne pokazuje neku značajnu promenu  $Q_F$  u odnosu na grad sa hladnom zimom (Montreal). Postoji malo informacija koje se tiču dnevnih promena  $Q_F$ , ali za umerenu klimu izgleda da se  $Q_F$  značajno menja tokom dana sa pikovima u jutarnjim i večernjim satima (Oke, 1974).

Značajne količine vodene pare ispuštaju se u gradsku atmosferu sagorevanjem fosilnih goriva kao što su prirodni gas, benzin, nafta i kameni uglj. Značaj gradske vode (I) je u obezbeđenju potreba stanovništva, industrije i drugih korisnika.

Veličina komponenti balansa energije za zapreminu grad – vazduh (kao na sl. 8.2.) pokazana je u tabeli 8.3. Merenja su obavljena u gradu Vankuveru u toku vedrog letnjeg dana. Površina tla je bila vlažna, a sam grad je imao dosta parkova sa lepim drvećem. Članovi  $Q_N$  i  $Q_H$  su direktno mereni,  $\Delta Q_S$  je aproksimirano izrazom  $\Delta Q_S = 0,25 Q_N$ , dok je član  $Q_E$  dobijen rešavanjem jednačine:

$$Q_E = Q_N - Q_H - \Delta Q_S. \quad (8.3)$$

Ovde je pretpostavljen da je advektivni član  $\Delta Q_A$  zanemarljiv, dok

je  $Q_F$  priključen tokom merenja članova  $Q_N$ ,  $Q_H$  i  $\Delta Q_S$ .

*Tabela 8.3. Ukupan iznos komponenti balansa energije u zapremini gradskog vazduha u Vankuveru (49°N) u periodu od 07 – 17h, 17. jula 1972, (Oke, 1974).*

| Komponenta   | Energija (MJm <sup>-2</sup> /10h) | Procenat od $Q_N$ |
|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| $Q_N$        | 16,9                              | 100               |
| $Q_H$        | 5,7                               | 34                |
| $Q_E$        | 7,0                               | 41                |
| $\Delta Q_S$ | 4,2                               | 25                |

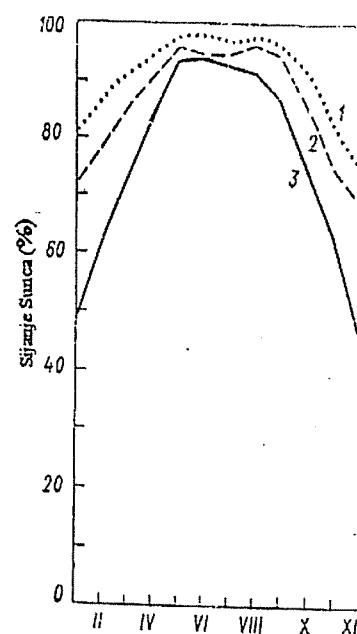
Preraspodela energije u gradu nije slična onoj u seoskim mestima (tabela 8.3). Izgleda da je u gradu član  $Q_E$  donekle redukovani, što se slaže sa već iznesenom konstatacijom da je materijal od koga su izgrađene gradske četvrti dobar akumulator topote, a rđav vlage. Merenja su pokazala da se član  $\Delta Q_S$  kreće u granicama od 15% do 30% od  $Q_N$  za zapreminu kao na sl. 8.2, od 5% do 15% za useve, šumu i travnati pokrivač i od 25% do 30% za golu površinu zemljišta. Razlika u snežnom pokrivaču između grada i sela teži dalje da naglasi razliku između akumulirane topote u gradu i selu.

Dok  $\Delta Q_S$  predstavlja neki fiksni deo,  $Q_N$ ,  $Q_H$  i  $Q_E$  u mnogome zavise od vode u tlu i karakteristika vazdušne mase (temperatura i vlažnost). Tako, na primer, Oke (1974) iznosi da  $Q_H$  ima vrednosti od 20% od  $Q_N$  posle jakе kiše, dok u suvim danima poraste do 65% od  $Q_N$ . U toku suvih dana  $Q_E$  može biti zanemarljivo u gradskom centru, dok u navodnjavanim parkovima imamo efekat oaze, jer  $Q_E$  poprima red veličine neto zračenja  $Q_N$ . Ravnoteža energije u noćnim satima nije dovoljno ispitana. Većina radova ukazuje da su turbulentni fluksevi mali po veličini i usmereni su, za razliku od seoske sredine, u atmosferu, jer su gradske površine toplije od okolnog vazduha. U gradu, tokom noći izgleda da postoji značajna evapotranspiracija, a smanjeni su izgledi za pojavu rose. Sve to ukazuje da je grad značajan izvor energije noću zbog akumulirane i antropogene topote.

Sloj gradskog pokrivača je kompleksan uglavnom zbog različite prirode aktivne površine. Problem se može donekle pojednostaviti ako aktivnu gradsku površinu razdelimo po jedinicama koje se ponavljaju u gradskom pokrivaču. Jedna takva najvažnija jedinica je gradski kanjon koga čine zidovi i tlo (obično ulica) između dve susedne zgrade, što je čest predmet istraživanja u gradskoj klimi poslednjih godina.

### 8.3. Sijanje Sunca i vidljivost u gradu

Trajanje sunčevog sijanja, kao i količina zračenja, smanjeno je u gradskim područjima. U većim gradovima ove veličine uglavnom monotono opadaju idući od periferije ka centru grada. Tako je srednje dnevno trajanje sunčevog sijanja u periodu 1921 – 1950. godine iznosilo 4,33 časa u oblastima van uticaja Londona, 4,07 časa u daljem predgrađu, 3,95 časa u bližem predgrađu i 3,60 časova u centru grada (Chandler, 1965). Srednji gubitak kretao se od 16 min/dan u daljem predgrađu do 44 min/dan u centru grada. Tako su na sl. 8.3. date srednje mesečne vrednosti trajanja sunčevog sijanja izražene u procentima od trajanja sunčevog sijanja u oblastima udaljenim od Londona. Sa sl. 8.3. se uočava da je sredinom zime trajanje sunčevog sijanja u centralnim delovima Londona upola manje nego u oblastima udaljenim od Londona. Čak je i u letnjim mesecima trajanje sunčevog sijanja u centralnim oblastima grada za 10% manje nego u seoskim sredinama. Navedene razlike se objašnjavaju porastom zagadenja u gradu u obliku dima tako da je u velikim gradovima uvedena i zakonska kontrola koncentracije dima.



Sl. 8.3. Srednje mesečno trajanje sunčevog sijanja u različitim delovima Londona izraženo u procentima od vrednosti istog parametra izmerenog van grada u periodu 1921 – 1950. (Chandler, 1965): 1 – dalje predgrađe, 2 – bliže predgrađe, 3 – centar.

Uporedno sa smanjenjem dužine trajanja sunčevog sijanja, u većini gradskih oblasti je osmotrena loša vidljivost zbog lokalnog zagađenja atmosfere.

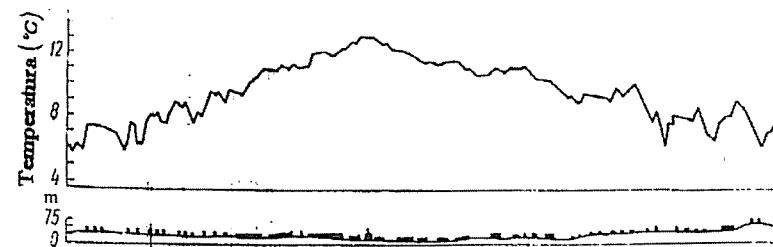
Tako je, proučavajući uslove vidljivosti blizu Liverpula, Reynolds (1957) izračunao da se pod uticajem industrije vidljivost smanjila za 25% u jutarnjim časovima, kada je vazduh najstabilniji i za 10% u podne. Takođe, ne treba smatrati da su gradske oblasti uvek pod uticajem gustih magli. Changnon (1968) je uočio da se vidljivost manja od 200 m češće osmatra u seoskim oblastima u istočnoj Engleskoj nego u centru Londona. Tako je pokazano da je u periodu 1947–1962. čestina gustih magli (sa vidljivošću manjom od 200 m) i veoma gustih magli (sa vidljivošću manjom od 50 m) bila veća u predgrađu nego u centru Londona. Može se prepostaviti da se veoma česte magle u centru grada ne obrazuju zbog zagrevanja i male vlažnosti vazduha u urbanizovanim delovima grada. Sa druge strane treba uzeti u obzir lokalne izvore zagađenja kao i topografiju.

### 8.4. Temperatura vazduha u gradu

Karakteristično povećanje temperature vazduha u pravcu ka centru grada je najbolje izučen aspekt gradske klime. Mnogo istraživanja je bilo posvećeno ispitivanju tzv. gradskog ostrva topote, koje se može najjednostavnije definisati kao deo grada u kome je temperatura viša u odnosu na okolinu. Prva maršrutna merenja u Beču (Schmidt, 1929) vršena su radi utvrđivanja prostornih promena minimalnih temperatura na teritoriji grada. Ovaj metod može da da jasnu sliku sumarnog uticaja grada na temperaturu vazduha. Na sl. 8.4. je data horizontalna raspodela temperature u pravcu od severa ka jugu kroz London u noći između 11. i 12. oktobra 1961. godine pri anticiklonalnim uslovima. Bez obzira na razlike u vezi gustine urbanog dela grada, dobro je izraženo monotono povećanje, a zatim smanjenje temperature udaljavanjem od centra grada.

Veliki gradovi, kao London, stvaraju termičke uslove koji se mogu analizirati i na osnovu srednjih godišnjih temperatura. Po podacima iz tab. 8.4 vidi se da su temperature u centru grada više od okoline, dok su najveće razlike registrovane kod minimalnih temperatura. Na primer, u centru Londona, srednje godišnje minimalne temperature su više za oko  $2^{\circ}\text{C}$  u odnosu na okolne seoske oblasti, što je nazvano ostrvo topote. U Londonu se, bez obzira što se granica ostrva topote obično poklapa sa granicom jako urba-

nizovanog dela grada, centar ostrva topote nalazio u severoistočnom delu pod uticajem preovlađujućeg jugozapadnog vetra i velikog topotnog kapaciteta zgrada u tom reonu (Chandler, 1965).



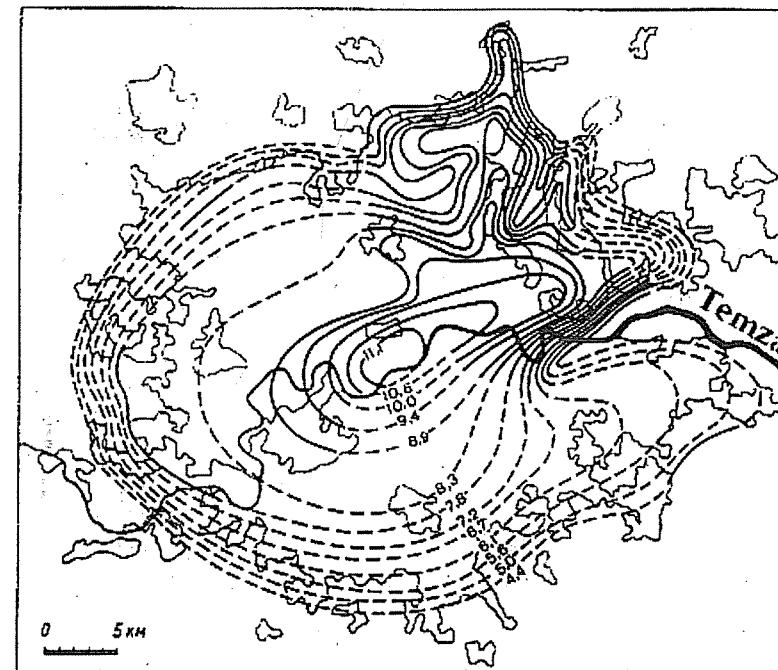
Sl. 8.4. Horizontalan raspored temperature vazduha u Londonu dobijen po podacima maršrutnih merenja obavljenih između 11. i 12. oktobra 1961. g. (Chandler, 1965).

Ostrva topote koja su okarakterisana dnevnim maksimalnim temperaturama manjeg su intenziteta i postojanosti od noćnih ostrva topote. U Londonu se maksimalne temperature mogu razlikovati za 4°C leti u popodnevnim satima u odnosu na okolinu. Nasuprot tome, noćna ostrva topote su intenzivnija i imaju jasniji oblik naročito u uslovima zimskog anticiklona. Ovo se objašnjava ne samo velikim prilivom veštačkog zagrevanja zimi, već i slabom noćnom turbulencijom.

Tabela 8.4. Srednje godišnje temperature u Londonu, (Chandler, 1965).

|                     | Nadmorska visina (m) | Temperatura (°C) |      |         |
|---------------------|----------------------|------------------|------|---------|
|                     |                      | Maks.            | Min. | Srednja |
| Selo                | 87,5                 | 13,7             | 5,5  | 9,6     |
| Granica grada       | 144,2                | 13,4             | 6,2  | 9,8     |
| Predgrađe na visini | 137,2                | 13,4             | 5,9  | 9,7     |
| Predgrađe u nizini  | 61,9                 | 14,2             | 6,4  | 10,3    |
| Centar              | 26,5                 | 14,6             | 7,4  | 11,0    |

Na sl. 8.5. je dat primer intenzivnog noćnog ostrva topote koje se obrazovalo iznad Londona pri postojanju jakog anticiklona. Temperatura u centru ostrva topote bila je viša od temperature okoline za 6,7°C, dok je tipično veliki gradijent temperature postojao na granici urbanog dela grada (mesta sa najgušćim izotermama na slici).



Sl. 8.5. Prostorni raspored minimalnih temperatura vazduha u Londonu izmerenih 14. maja 1959. g. Isprekidane linije su povučene na osnovu približnih procena, (Chandler, 1965).

Takođe je uočljiv izražen temperaturski kontrast u istočnom delu grada gde je hladna vazdušna masa iznad nižeg dela korita Temze došla u kontakt sa toplim vazduhom iznad gusto urbanizovanog istočnog dela Londona. Kao posledica navedenog, formirao se skok u temperaturi koji je bio veći od osmotrenog skoka u temperaturi pri prolasku frontova iznad Velike Britanije. Stoga je Chandler (1965) prepostavio da pod uticajem ovakvih skokova mogu nastati lokalni neregularni vetrovi usmereni ka centralnim delovima Londona.

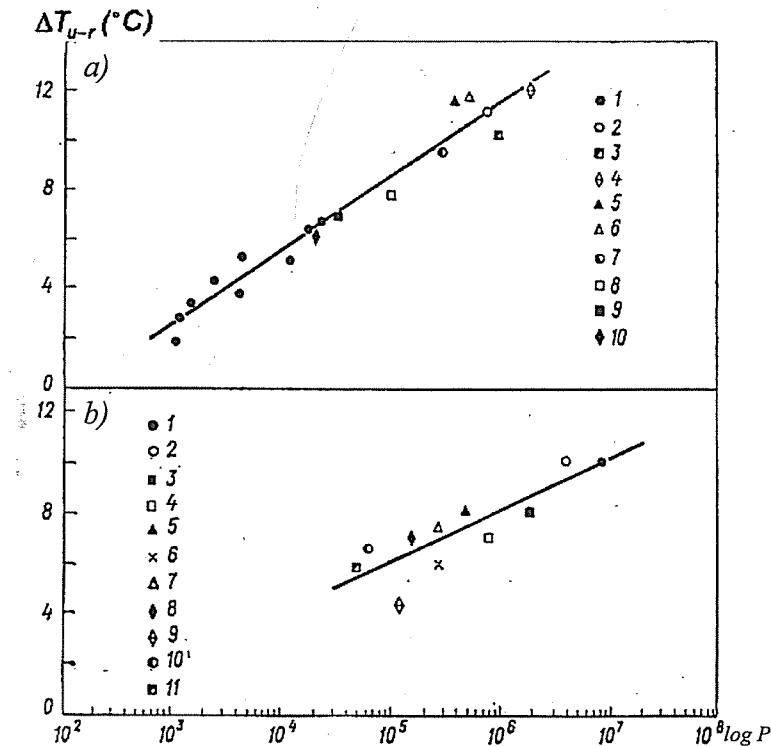
Mnoge opisane karakteristike mogu se javiti i kod drugih gradova, na primer, u Beogradu (Unkašević, 1994). Merenja temperature vazduha u Beogradu jednog zimskog (23. II 1979) i jednog letnjeg dana (20.VIII 1981) sa vedrim i mirnim atmosferskim uslovima (idealni uslovi za pojavu gradskog ostrva topote) ukazala su na sledeće činjenice. Kao što se i očekivalo, 23. II 1979. u 7.00 h po lokalnom vremenu u samom centru grada uočeno je ostrvo topote intenziteta -1°C. Centralne oblasti grada bile su toplije za 5°C u odnosu na okolne ruralne delove.

Međutim, merenja 20.VIII 1981. pokazala su da su temperature vazduha u centru grada celog dana bile više za  $2^{\circ}\text{C}$  u odnosu na okolne ruralne oblasti. Znači da se najveće razlike u temperaturi vazduha između centra grada i njegove okoline javljaju u zimskim jutrima. Naime, zimska jutra mogu u ruralnim sredinama da budu veoma hladna zbog izrazitog radijacionog hlađenja, dok se u gradskim sredinama tako nešto ne dešava. Poređenjem dobijenih rezultata merenja temperature vazduha u Londonu i Beogradu, možemo zaključiti da intenzitet gradskog ostrva topote više zavisi od gustine urbanizacije nego od veličine samog grada. Naime, gradovi sa uskim ulicama i veoma visokim zgradama imaju izrazitije gradsko ostrvo topote.

I tokom letnjih noći može doći do pojave ostrva topote, jer se sam grad sporije hlađi u odnosu na okolne ruralne oblasti. Stoga bi neka osnovna preporuka urbanistima gradova bila da se gradovi planiraju sa širokim ulicama, zgradama relativno udaljenim jedne od drugih i sa dosta parkova, o čijem će uticaju na klimu grada biti govora kasnije.

Oke (1973) je ukazao na tesnu povezanost između intenziteta ostrva topote i populacije u gradu. Analizom podataka dobijenih za slične uslove, pri maršrutnim merenjima u 10 tačaka čija se populacija menjala od 1000 do 2.000 000 stanovnika (tačke su bile razmeštene u dolini Sent – Lorenc u Kanadi), on je pokazao da je pri vedrim noćima razlika u temperaturi između grada i okoline obrnuto proporcionalna lokalnoj brzini veta, a direktno proporcionalna logaritmu populacije. Da bi ustanovio tačniju zavisnost koja bi važila i za druge lokacije, Oke (1973) je nacrtao grafik zavisnosti maksimalnih razlika temperatura između grada ( $u$ ) i sela ( $r$ ), ( $\Delta T_{u-r}$ ) od logaritma populacije ( $\log P$ ) po podacima osmatranja u gradovima Severne Amerike i Evrope (sl. 8.6).

Kao što se sa sl. 8.6. vidi, oba niza osmatranja karakteriše dobra korelaciona povezanost. Međutim, pojavljuje se razlika u nagibu linije regresije, jer su pri istoj populaciji ostrva topote u Evropi slabija po intenzitetu nego u Severnoj Americi. Rezultat je neočekivan jer su u evropskim gradovima veće gustine populacije i može se objasniti funkcionalnim i strukturnim razlikama između urbanizovanih površina jednakih razmara. Intenzitet ostrva topote zavisi od količine veštački proizvedene topote i termičke cirkulacije koja nastaje u većim gradovima i doprinosi smanjenju razlika temperature između grada i njegove okoline. Stoga možemo pretpostaviti da klimu grada treba realno posmatrati kao kolekciju različitih mikroklima.



Sl. 8.6. Zavisnost između osmotrenih maksimalnih razlika temperature između grada i sela ( $\Delta T_{u-r}$ ) od logaritma populacije ( $\log P$ ) za gradove u:

(a) Severnoj Americi i (b) Evropi (Oke, 1973).

$$a) \Delta T_{u-r} = 2,96 \log P - 6,4, r^2 = 0,96, \sigma_{\Delta T} = \pm 0,7^{\circ}\text{C};$$

1–Kvebek, 2–San Francisko, 3–Vankuver, 4–Montreal, 5–Edmonton,

6–Vinipeg, 7–Hamilton, 8–San Hoze, 9–Palo Alto, 10–Korvalis.

$$b) \Delta T_{u-r} = 2,01 \log P - 4,06, r^2 = 0,74, \sigma_{\Delta T} = \pm 0,9^{\circ}\text{C};$$

1–London, 2–Berlin, 3–Beč, 4–Minhen, 5–Šefild, 6–Utrecht,

7–Malme, 8–Karlsrue, 9–Reding, 10–Upsala, 11–Lung.

Iz svega navedenog možemo zaključiti da za postojanje urbanih ostrva topote postoje različiti uzroci kao što su:

- (1) povećanje apsorpcije sunčevog kratkotalasnog zračenja;
- (2) povećanje dugotalasnog zračenja atmosfere;
- (3) smanjenje gubitaka dugotalasnog zračenja podloge;
- (4) antropogeni izvori topote;
- (5) povećanje očuvanja osetne topote;

- (6) smanjenje evapotranspiracije i
- (7) smanjenje ukupnog turbulentnog transporta topote u atmosferu.

Svaki od navedenih hipotetičkih uzroka deluje tako da urbanu oblast čini toplijom, ali relativne uloge svakog uzroka unutar sloja urbanog pokrivača još nisu dovoljno poznate. Tako se smatra da su u toku leta uzroci (1) i (5), a u manjoj meri (4) i (6) odgovorni za bolje skladištenje osetne topote u urbanoj sredini tokom dana, a da uzroci (3) i (7) sprečavaju bržu disipaciju te topote tokom noći. Preko zime uloga uzroka (4) postoje veoma značajna, pa čak i dominantna, dok izgleda da je uzrok (2) manjeg značaja (WMO, 1974).

Postojanje urbanih ostrva topote ima brojne biološke, ekonomске i meteorološke implikacije. Urbana ostra topote su odgovorna za ranije pupljenje i cvetanje drveća u gradovima, za generalno dužu vegetacionu sezonu, kao i za privlačenje nekih vrsta ptica ka topotno pogodnjim prebivalištima. Sa ekonomskog stanovišta, topota je korisna zbog smanjene potrebe za zagrevanjem u toku zime, ali ona nepovoljno utiče na letnje uslove, kao i na trajnost nekih urbanih materijala.

## 8.5. Vlažnost vazduha u gradu

Sadržaj vodene pare u vazduhu, kao i stepen zasićenosti vazduha vodenom parom je od velikog značaja zbog prioritetnog uticaja na kondenzaciju vodene pare u gradskoj atmosferi. Za određivanje sadržaja vodene pare najčešće se koriste pritisak vodene pare i relativna vlažnost vazduha. Faktori koji određuju raspodelu vlage u gradskom vazduhu su:

- (1) turbulencija u urbanom pokrivaču;
- (2) smanjena evapotranspiracija;
- (3) emisija i uklanjanje vodene pare.

Proučavajući polje vlage u Londonu sa širom okolinom, Chandler (1967) je ustanovio da je apsolutna vlažnost noću bila češće veća na gradskim nego na seoskim površinama, mada su srednje vrednosti apsolutne vlage bile niže za gradske površine. Koristeći merenja tačke rose, neki autori su ustanovili da je, pri sunčanim i vedrim danima sa uniformnim vetrovima, pritisak vodene pare u gradu bio viši noću, a niži u jutarnjim i popodnevним satima, u poređenju sa okolnim seoskim oblastima.

Ispitivanje časovnih vrednosti pritiska vodene pare u Beogradu i Tamnavi (ruralna oblast) u vremenskom periodu od 1974. do 1990. godine ukazuje na češću pojavu većeg noćnog pritiska vodene pare u Beogradu nego u Tamnavi (tabela 8.5.).

**Tabela 8.5. Pritisak vodene pare u Beogradu ( $e_b$ ) i Tamnavi ( $e_T$ ) u 3 h, kao i njihova razlika  $\Delta e$  (mb) u periodu 1974 – 1991. god. (Unkašević, 1996).**

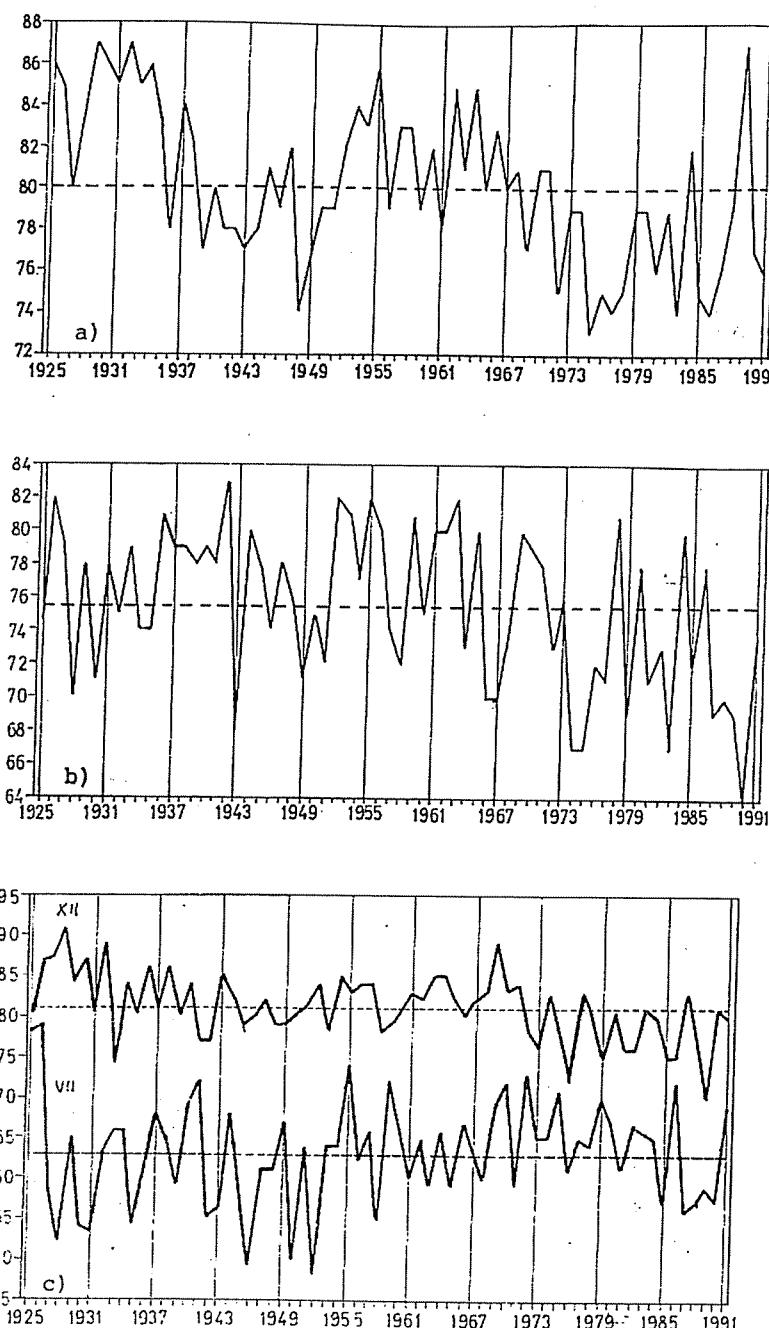
|                 | I   | II   | III  | IV  | V    | VI   | VII  | VIII | IX   | X   | XI  | XII |
|-----------------|-----|------|------|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|
| $e_b$           | 4,9 | 5,1  | 6,0  | 8,5 | 12,1 | 15,2 | 16,5 | 15,9 | 12,9 | 9,7 | 7,6 | 6,3 |
| $e_T$           | 4,8 | 5,2  | 6,6  | 8,4 | 12,3 | 14,7 | 15,6 | 15,3 | 12,5 | 9,4 | 7,0 | 5,6 |
| $\Delta e$ (mb) | 0,1 | -0,1 | -0,6 | 0,1 | -0,2 | 0,5  | 0,9  | 0,6  | 0,4  | 0,3 | 0,6 | 0,7 |

Objašnjenje za ovu pojavu može biti sledeće. Naime, u rano predvečerje, seoski vazduh se hlađi mnogo brže od gradskog, pa postaje stabilniji. Kao posledica toga, vlaga zbog evapotranspiracije sa seoske površine dospeva samo u najniže slojeve atmosfere, zbog čega se obrazuje rosa i vlažnost tokom noći opada. Posle izlaska Sunca isparavanje rose naglo povećava vlagu u seoskoj atmosferi jer se proces razvoja konvekcije odvija usporeno. Kasnije tokom dana, nestabilnost atmosfere podstiče smanjenje koncentracije vodene pare u najnižim slojevima kako seoske tako i gradske atmosfere. Opisan model je karakterističan za vedar i tih letnji dan.

Zimi, u hladnim klimatima, gradovi mogu biti vlažniji od seoske okoline i tokom dana. To su situacije pri kojima je seoski izvor vodene pare bitno smanjen jer je zemljište pokriveno snegom i ledom, dok u gradovima antropogeni izvori obezbeđuju značajne količine vodene pare.

Smanjena difuzija vodene pare u vazduhu između zgrada (uprkos mogućeg porasta turbulencije iznad krovova zgrada zbog većeg parametra hraptavosti) više utiče na distribuciju vodene pare nego na isparavanje u samom gradu. Na ovaj način vazduh unutar gradskog pokrivača održava svoju visoku dnevnu temperaturu i sadržaj vlage. Tamo gde su zgrade udaljene jedna od druge, povećana turbulencija može da smanji vlažnost u vazduhu neposredno iznad površine tla, dok će na površinama sa zbijenim zgradama, vazduh između njih održavati svoj visok dnevni pritisak vodene pare.

Ispitivanja relativne vlage u gradskom vazduhu tokom vedrih letnjih dana sa slabim vetrovima ukazala su na njeno smanjenje u gradskoj atmosferi, tako da se jedna polovina osmotrenog smanjenja relativne vlage u gradu može pripisati uticaju gradskog ostrva topote, a druga polovina smanjenom isparavanju.



Sl. 8.7. Srednje mesečne vrednosti relativne vlage (%) u Beogradu tokom:  
(a) januara, (b) februara, (c) jula i decembra, (Unkašević, 1996).

Za razliku od pritiska vodene pare čije se srednje mesečne vrednosti u Beogradu nisu značajnije menjale iz godine u godinu u periodu od 1925 – 1991. godine, srednja mesečna relativna vlažnost pokazuje konstantni pad počev od 1970. godine tokom zimskih meseci (Unkašević, 1996). Srednje mesečne vrednosti relativne vlažnosti tokom januara, februara i jula i decembra pokazane su na sl. 8.7a, b i c.

Varijacija relativne vlažnosti tokom dana je u obrnutoj srazmeri sa temperaturom vazduha, tako da je termička kontrola veoma značajna, naročito u urbanom pokrivaču. Kao i kod drugih evropskih gradova, srednje mesečne vrednosti relativne vlažnosti u Beogradu (1974 – 1991) bile su niže od okolnih seoskih sredina (Unkašević, 1996). Tako se iz tabele 8.6. može videti da je razlika između relativne vlage u Tamnavi i Beogradu maksimalna u toploj polovini godine.

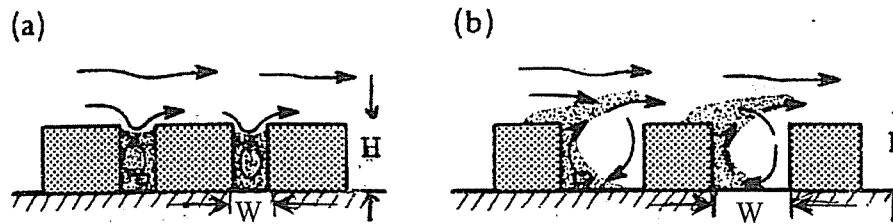
*Tabela 8.6. Razlika relativne vlage izmerene u Tamnavi i Beogradu  $\Delta RH$  (%) u periodu 1974 – 1991. god. (Unkašević, 1996).*

|                 | I  | II | III | IV | V  | VI | VII | VIII | IX | X  | XI | XII |
|-----------------|----|----|-----|----|----|----|-----|------|----|----|----|-----|
| $RH_B$ (%)      | 78 | 73 | 64  | 62 | 65 | 67 | 65  | 65   | 70 | 72 | 77 | 78  |
| $RH_T$ (%)      | 82 | 77 | 72  | 71 | 75 | 77 | 74  | 73   | 78 | 79 | 83 | 83  |
| $\Delta RH$ (%) | 4  | 4  | 8   | 9  | 10 | 10 | 9   | 8    | 8  | 7  | 6  | 5   |

## 8.6. Vetar u gradu

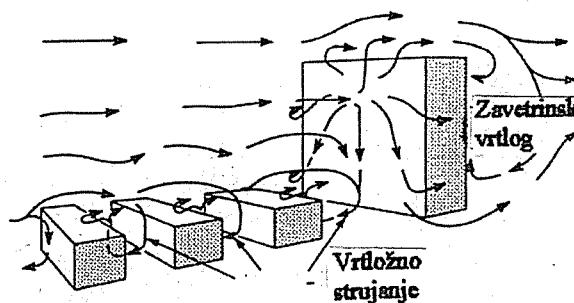
Brzina vetra unutar gradskog pokrivača je obično smanjena u poređenju sa vетром u selu na istoj visini. Međutim, postoje dve situacije u kojima to ne mora da bude tako. Prva situacija se javlja kada strujanje iz viših slojeva atmosfere zbog relativno visokih zgrada skreće na dole, ili kada se vetar kanališe u mlazeve duž ulica orijentisanih u istom pravcu kao i osnovna struja. Druga situacija se javlja pri uslovima slabog veta i vedrog neba, tj. pri uslovima idealnim za pojavu gradskog ostrva topote, kada je gradijent temperature, odnosno pritiska, kroz urbano – seosku granicu dovoljan da savlada silu trenja i uspostavi lokalnu cirkulaciju. Tada u prizemnim slojevima atmosfere strujanje konvergira ka centru grada, dok se na visini uspostavlja povratno strujanje.

Model strujanja vazduha iznad gradskih kanjona različitih dimenzija i sa osama normalnim na pravac vetra istraživan pomoću tzv. vind – tunela prikazan je na sl. 8.8.



Sl. 8.8. Model strujanja vazduha oko zgrada pri: a)  $W < H$  i b)  $W > H$ , gde je  $H$  visina zgrade i  $W$  rastojanje između zgrada, (Oke, 1983).

Kada su rastojanja između zgrada mala, tj. kada su kanjoni uski, osnovno strujanje prelazi iznad krovova zgrada, dok u zavetru zgrada dolazi do pojave posebnih vrtloga (sl. 8.8a). U slučaju kada su zgrade relativno široko razmaknute, za kanjon u obliku kocke, ili za niz zgrada, model prikazan na sl. 8.8b odgovara modelu strujanja vazduha oko izolovane prepreke. Naime, u zavetru zgrada dolazi do formiranja vrtloga koji su u neposrednoj vezi sa osnovnim strujanjem (sl. 8.8b). Primer strujanja vazduha u gradu sa zgradama različitih visina pokazan je na sl. 8.9.



Sl. 8.9. Primer strujanja preko i između zgrada približno iste visine (levo) i u okolini relativno visoke zgrade (desno), (Oke, 1983).

U ovom slučaju dolazi do formiranja vrtložnog strujanja između zgrada istih visina, dok kod visokih zgrada dolazi do delimičnog zaustavljanja strujanja na visini jednakoj  $3/4$  od visine zgrade. Od te visine vazduh počinje da divergira. Jedan deo vazduha struji iznad zgrade, dok drugi deo formira zavetinski vrtlog. Preostali deo vazduha skreće oko uglova zgrada omotavajući zgradu u obliku potkovice.

Poznavanje ponašanja vetra unutar urbanih kanjona veoma je značajno kako bi se zaštitiće zgrade od opterećenja i da bi se najekonomičnije održavale s obzirom na neminovna opterećenja. Vetar je, takođe, od značaja i za

sigurnost i udobnost stanara i pešaka u urbanim kanjonima, a ima bitan uticaj i na raspodelu urbanih zagadenja.

Osnovna transformacija strujanja pri tlu nastaje zbog hrapavosti u gradu. Efekat kočenja površinom tla dovodi do smanjenja srednje brzine veta u gradskom kompleksu. Tako je Chandler (1965) pokazao da je srednja brzina veta u centru Londona za oko 5% manja nego u njegovoj okolini. Sa druge strane, trenje nije svuda jednako pa lokalni vihor i turbulencija mogu da uslove povećanje brzine veta na nekim lokacijama naročito u ulicama čija orientacija pogoduje nastanku takvih strujanja. Sledeća činjenica koja doprinosi složenosti problema je uticaj topografije podloge. Na stanicama metra u Londonu, koje se nalaze na južnom delu grada, srednja brzina veta je bila manja nego što se očekivalo na osnovu njihovih nadmorskih visina i lokacija na granici urbanog dela grada (Chandler, 1965). Međutim, stanice na severnom delu grada pod uticajem brda Nort – Dauns imale su vjetar znatno većeg intenziteta.

Ukoliko je brzina veta u gradu veća od neke kritične vrednosti, pod uticajem zajedničkog delovanja turbulencije i advekcije u nižim delovima atmosfere dolazi do slabljenja ili čak do potpunog izčeščavanja ostrva toplote. Po nekim podacima izgleda da kritična vrednost brzine veta zavisi od veličine grada i da se kreće između 5 i 11 m/s.

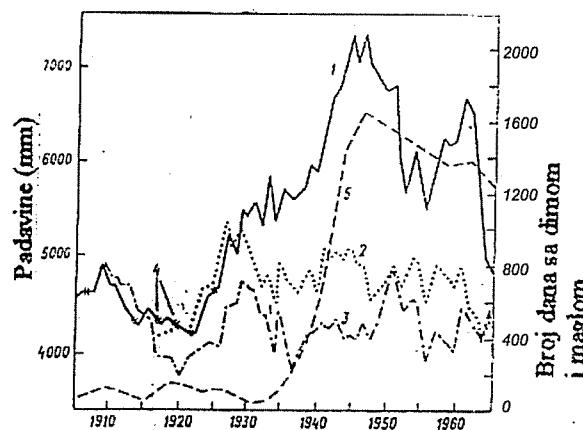
## 8.7. Padavine u gradu

Za razliku od potvrđenog uticaja grada na obrazovanje ostrva topline, uticaj grada na lokalne padavine nije u potpunosti objašnjen. Iako je vlažnost u gradu manja nego u okolini (zbog smanjene površine rezervoara i biljnog pokrivača), preovlađuje mišljenje da velike industrijske oblasti pogođuju povećanje padavina. To je verovatno uslovljeno zajedničkim uticajem obilja jezgara kondenzacije i povećanja brzine uzlaznog vazduha iznad grada pod uticajem turbulencije i termičkih činilaca, a takođe i pod uticajem lokalnog iznosa vodene pare koja se obrazuje u procesu sagorevanja fosilnih goriva.

Prvi istraživači padavina u gradu poredili su padavine koje padnu u nedelju sa onima koje padnu drugih dana u sedmici. Lawrence (1971) je pokazao da je leti u 20-godišnjem periodu (1949 – 1969) razlika između srednjih dnevних maksimuma temperature u centru Londona i njegovojoko-

lini četvrtkom veća nego nedeljom. Dobijeni rezultati su omogućili pretpostavku da su ove razlike u temperaturi pogodovale stvaranju sedmičnog hoda konvektivnih padavina pod uticajem termičke nestabilnosti. Takav hod padavina doveo je do osmotrenog smanjenja dnevnog maksimuma temperature sredinom sedmice. Do današnjih dana sedmični hod padavina u drugim gradovima nije razmatran. Postoji mnogo ubedljivih dokaza da se letnje padavine u gradovima Velike Britanije javljaju u obliku nepogoda na koje grad deluje kao mehanizam za „okidanje“. Atkinson (1969) je takođe pokazao da se maksimum padavina za vreme nepogode javio u centralnom delu Londona. Većina padavina u gradu bila je posledica letnjih pljuskova vezanih za prolaskе toplih frontova sa veoma visokim dnevним temperaturama i povećanom turbulentcijom vazduha iznad gusto naseljenog dela grada.

Ispitivanje uticaja višegodišnjeg režima padavina otežano je uticajem lokalne topografije na kolebanje padavina, pa je potrebna guta mreža padavinskih stanica. Osim toga, često nedostaje dovoljno dug niz podataka merenja. Tako je Changnon (1968) analizirao osmotrene padavine u gradu La Port koji se nalazi blizu Čikaga. U periodu 1951 – 1965. godina u La Portu je izmereno 31% više padavina, 38% više olujnih nepogoda i 246% više dana sa gradom nego na okolnim stanicama. Dobijeni rezultati su pokazani na sl. 8.10.



Sl. 8.10. Količine padavina izmerene u gradovima u državi Indijani i broj dana sa dimom i maglom u Čikagu dobijene na osnovu petogodišnjih vrednosti (Changnon, 1968). 1—La Port, 2—Valparaizo, 3—Saut—Bend, 4—osmotrena promena u La Portu, 5—broj dana sa dimom i maglom u Čikagu.

Sl. 8.10. ukazuje na tendenciju povećanja količine padavina u La Portu istovremeno sa porastom broja dana sa dimom i maglom u Čikagu, što nije bio slučaj sa režimom padavina u gradovima Valparaizo i Saut – Bend, koji se nalaze izvan oblasti sa jakom industrijom.

Ispitujući polje padavina u široj okolini Beograda koristeći mrežu od 48 padavinskih stanica u periodu od 1951. do 1985. godine, Unkašević (1996) je pokazala da je srednje godišnje povećanje padavina u centru grada iznosi 11% u poređenju sa okolnim seoskim stanicama iste nadmorske visine.

## 8.8. Uticaj parkova i vodenih površina na klimu grada

Parkovi i vodene površine u gradovima predstavljaju posebne celine u klimatskom smislu. Naime, lokalna mikroklima formirana pod uticajem vegetacije u parkovima je slična klimi u šumi, dok vodene površine, kao što su reke i jezera, imaju sličan efekat na klimu kao i morske površine, o kojima je već bilo govorilo.

Albedo vegetacije u parkovima je daleko veći od albeda betonskih površina u gusto naseljenim delovima grada, što zajedno sa povećanom evapotranspiracijom utiče na smanjenje temperature i povećanje vlažnosti u vazduhu iznad parkova tokom letnjih dana. Što se tiče hlađenja, parkovi se hlađe kao i ruralna sredina. Naime, parkovi se tokom noći hlađe mnogo brže od pregrijanih betonskih zgrada, što znači da je u njima znatno svežije i prijatnije za boravak. Možemo reći, da slično lokalnom vetu, parkovi doprinose redukciji negativnih efekata gradskog ostrva topote na klimu grada.

Parkovi u većim gradovima imaju značajnu ulogu i u poboljšanju kvaliteti vazduha. Naime, lokalna cirkulacija vazduha, nastala pod uticajem gradskog ostrva topote, transportuje značajnu količinu aerozagađenja ka gradskom centru. Stoga parkovi deluju kao veliki filtri za zagađen gradski vazduh.

Velike rečne, kao i jezerske površine, povećavaju vlažnost vazduha, što je od posebnog značaja tokom leta u gradu, u kome je vazduh uglavnom suv. Treba istaći da je termički efekat jezera i reka na klimu grada posledica karakteristika vodenih površina u smislu zagrevanja i hlađenja, što znači da su amplitude temperature vazduha na tim mestima znatno smanjene.