

GEOFIZIKA	Vol. 2	1985
-----------	--------	------

*Izvorni znanstveni rad  
UDK 551.543*

## Dnevna varijacija tlaka zraka na Bjelašnici\*

*Božena Volarić*

*Primljeno 20. veljače 1985., u konačnom obliku 13. svibnja 1985.*

Visinski opservatorij Bjelašnica (H = 2067 m), smješten na vrhuncu planine Bjelašnica, udaljen je 23 km od opservatorija Sarajevo (H = 637 m). Na temelju 12-godišnjih satnih vrijednosti tlaka i temperature zraka s tih opservatorija određena je za mjesec siječanj i srpanj solarna dnevna varijacija tlaka i temperature zraka i njihove harmoničke komponente  $S_n$  za  $n = 1, 2, 3, 4$ . Diskutirane su razlike između dnevnih varijacija i odgovarajućih harmoničkih komponenta kao posljedica različite nadmorske visine i orografskog smještaja Sarajeva i Bjelašnice. Prema dnevnoj varijaciji tlaka zraka na Bjelašnici i Sarajevu određene su oscilacije srednje dnevne temperature u stupcu zraka od podnožja do vrha planine.

---

\* Posvećeno Josipu Goldbergu i njegovoj zavičajnoj Bosni koju je toliko volio.

## Daily air pressure variation on Mt. Bjelašnica\*\*

The Bjelašnica mountain observatory (H = 2067 m), located on the top of Mt. Bjelašnica is 23 km distant from the Sarajevo observatory (H = 637 m). Hourly air pressure and air temperature data taken at these observatories over 12 years served to determine solar daily pressure and temperature variations and their harmonical components  $S_n$  for  $n = 1, 2, 3, 4$ .

The paper discusses differences between the daily variations and respective harmonical components as a result of different altitudes and orographic positions of Sarajevo and Mt. Bjelašnica. The daily air pressure variation at Mt. Bjelašnica and Sarajevo served as a basis to determine daily mean temperature in the air column between the foot and the top of the mountain.

---

\*\* Mountain in Prof. Goldberg's beloved native Bosnia.

## 1. Uvod

Nedaleko Sarajeva proteže se planinski masiv Bjelašnica u smjeru NE-SW. U istočnim dijelovima masiva, na istoimenom vrhuncu, smješten je meteorološki opservatorij Bjelašnica. U dolini rijeke Miljacke nalazi se meteorološki opservatorij Sarajevo. Koordinate opservatorija su:

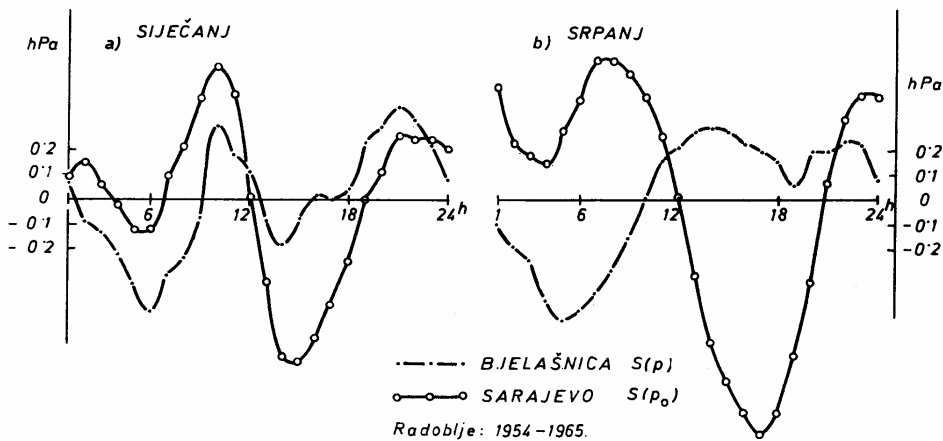
Bjelašnica:  $\varphi = 43^{\circ}42'N$  ,  $\lambda = 18^{\circ}16'E$  ,  $H = 2067$  m  
 Sarajevo:  $\varphi = 43^{\circ}52'N$  ,  $\lambda = 18^{\circ}26'E$  ,  $H = 637$  m

Visinska razlika među njima iznosi 1430 m, a horizontalna udaljenost oko 23 km (Vujević, 1934; HMS NR BiH, 1953). S obzirom na malu udaljenost može se horizontalna promjena tlaka zraka zanemariti, pa meteorološka mjerenja na Bjelašnici i Sarajevu daju prikladan materijal za ispitivanje dnevne varijacije tlaka zraka i njene promjene s visinom.

Dnevna varijacija tlaka zraka je solarnog porijekla, tj. termičkog. Označuje se simbolom  $S(p)$ . Nastaje uslijed rotacije Zemlje u radijacionom polju Sunca što izaziva oscilacije atmosfere: njeno periodičko rastezanje i stezanje koje se pri tlu očituje kao dnevna varijacija tlaka zraka. U atmosferi postoji i gravitaciona lunarna dnevna varijacija tlaka  $L(p)$ , ali je vrlo slabo izražena. Za njeno istraživanje potreban je dugi niz mjerenja.

## 2. Podaci

U ovom radu se razmatra samo termička dnevna varijacija tlaka. Upotrijebljen je 12-godišnji niz satnih vrijednosti tlaka i temperature zraka s opservatorija Sarajevo i Bjelašnica za mjesec siječanj i srpanj u razdoblju 1954–1965. Sarajevski nizovi su



Slika 1. Srednja dnevna varijacija tlaka zraka  $S(p_o)$  Sarajevo i  $S(p)$  Bjelašnica, za mjesec siječanj i srpanj 1954–1965.

Figure 1. Daily mean air pressure variation at Sarajevo  $S(p_o)$  and Bjelašnica  $S(p)$ , January and July 1954–1965.

kompletni za oba elementa, dok su za Bjelašnicu nedostajali podaci za srpanj 1958. god., što je nadopunjeno metodom redukcije. Godišnja oscilacija tlaka i temperature zraka eliminirana je Lamont-ovom metodom.

Razmatrani su samo mjeseci siječanj i srpanj kao predstavnici hladnog i toplog dijela godine.

Odstupanja od mjesečnog srednjaka i vrijeme nastupa ekstrema u dnevnoj varijaciji tlaka i temperature zraka za Sarajevo i Bjelašnicu donosi tabl. 1. Nastup ekstrema određen je po srednjem lokalnom vremenu. Podaci koji se odnose na Sarajevo označeni su sa  $p_o$  i  $t_o$ , a za Bjelašnicu sa  $p$  i  $t$ .

U Sarajevu dnevna varijacija tlaka zraka  $S(p_o)$ , s naglašenim poslijepodnevним minimumom, pokazuje izrazite značajke nizinskog tipa. Na Bjelašnici je dominantan jutarnji minimum što je značajka dnevne varijacije tlaka zraka  $S(p)$  na planinskim vrhovima (tabl. 1 i sl. 1).

Tablica 1. Srednja dnevna varijacija temperature i tlaka zraka: odstupanje ekstrema od mjesečnog srednjaka i njihov nastup po srednjem lokalnom vremenu za mjesec siječanj i srpanj u razdoblju 1954–1965.

Table 1. Daily mean air temperature and air pressure variation: deviation of extremes from monthly average values and their onset by local mean time for January and July, 1954–1965.

Postaja	Temperatura °C	Mjesec	1. min.		1. maks.		Mjesečni srednjak
			Nastup	Odstupanje	Nastup	Odstupanje	
Bjelašnica	$t$	I	7 <sup>h</sup>	-0,2	14 1/2 <sup>h</sup>	+ 0,3	-6,9
		VII	4	-1,5	14	+ 1,7	9,5
Sarajevo	$t_o$	I	7 <sup>h</sup>	-1,6	14 1/2 <sup>h</sup>	+ 2,3	-1,6
		VII	5	-5,0	15	+ 5,1	18,7

Postaja	Tlak hPa	Mjesec	1. min.		1. maks.		2. min.		2. maks.		Mjesečni srednjak
			Nastup	Odstupanje	Nastup	Odstupanje	Nastup	Odstupanje	Nastup	Odstupanje	
Bjelašnica	$p$	I	6 <sup>h</sup>	-0,45	10 <sup>h</sup>	+ 0,29	14 <sup>h</sup>	-0,15	21 <sup>h</sup>	+ 0,37	786,20
		VII	5	-0,49	14	+ 0,29	19	+ 0,07	22	+ 0,24	795,45
Sarajevo	$p_o$	I	5 <sup>h</sup>	-0,12	10 <sup>h</sup>	+ 0,53	15	-0,65	21	+ 0,27	942,62
		VII	4	+ 0,15	8	+ 0,56	17	-0,95	23	+ 0,43	942,62

### 3. Analiza podataka

Atmosfera kao oscilatorni sistem reagira na pojedine oscilacije temperature oscilacijama tlaka odgovarajućih perioda. U skladu s rotacijom Zemlje dnevna varijacija temperature, kao i dnevna varijacija tlaka zraka periodički se mijenjaju s periodom  $T = 24$  sata. Na taj osnovni period superponirane su oscilacije kraćih perioda što rezultira u dnevnoj varijaciji tlaka zraka s 2 maksimuma i 2 minimuma. Iako temperatura zraka u svojoj dnevnoj varijaciji ima samo 1 maksimum i 1 minimum, ipak asimetrija krivulje ukazuje na postojanje superponiranih oscilacija kraćih perioda. Radi istraživanja međusobne veze tlaka i temperature zraka potrebno je poznavati parcijalne oscilacije u njihovoj dnevnoj varijaciji.

Harmoničkom analizom može se dnevna varijacija tlaka i temperature zraka rastaviti na komponente i prikazati izrazom:

$$S = \sum_n S_n$$

gdje je:

$$S_n = a_n \sin(nt + \alpha_n) \quad (1)$$

Tablica 2. SARAJEVO, amplitude  $a_n$  harmoničkih komponenata  $S_n$  dnev. varijacije temperature  $t_o$  i tlaka zraka  $p_o$ , nastup ekstrema po sred. lokalnom vremenu i radijus kruga vjer. pogreške  $r_n$  za mjesec siječanj i srpanj, razdoblje 1954–1965.

Table 2. Sarajevo, amplitude  $a_n$ , harmonical components  $S_n$ , daily temperature variation  $t_o$ , daily air pressure variation  $p_o$ . Onset of extremes at local mean time and the radius of probable error circle for January and July, 1954–1965.

Mjes.	$S_n$	temperatura $t_o$ °C				tlak $p_o$ hPa			
		$a_n$	Nastup		$r_n$	$a_n$	Nastup		$r_n$
			1. maks.	1. min.			1. maks.	1. min.	
I.	$S_1$	1,70	16 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup>	04 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup>	0,07	0,233	03 <sup>h</sup> 52 <sup>m</sup>	15 <sup>h</sup> 52 <sup>m</sup>	0,048
	$S_2$	0,60	02 14	08 14	0,06	0,355	09 45	03 45	0,016
	$S_3$	0,15	05 43	09 43	0,03	0,151	02 27	06 27	0,015
	$S_4$	0,01	02 24	05 24	–	0,051	04 06	07 06	–
VII.	$S_1$	4,95	15 03	03 03	0,19	0,596	04 44	16 44	0,067
	$S_2$	0,53	01 06	07 06	0,05	0,364	10 15	04 15	0,020
	$S_3$	0,36	01 34	05 34	0,04	0,076	06 53	02 53	0,017
	$S_4$	0,01	00 03	03 03	–	0,007	05 00	08 00	–

Tablica 3. BJELAŠNICA amplitude  $a_n$  harmoničkih komponenata  $S_n$  dnev. varijacije temperature  $t$  i tlaka zraka  $p$ , nastup ekstrema po sred. lokal. vremenu i radijus kruga vjer. pogreške  $r_n$  za mjesec siječanj i srpanj, razdoblje 1954–1965.

Table 3. Bjelašnica, amplitude  $a_n$ , harmonical components  $S_n$ , daily temperature variation  $t$ , daily air pressure variation  $p$ . Onset of extremes at local mean time and the radius of probable error circle for January and July, 1954–1965.

Mjes.	$S_n$	temperatura $t$ °C				tlak $p$ hPa			
		$a_n$	Nastup		$r_n$	$a_n$	Nastup		$r_n$
			1. maks.	1. min.			1. maks.	1. min.	
I	$S_1$	0,23	15 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup>	03 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup>	0,07	0,251	19 <sup>h</sup> 03 <sup>m</sup>	07 <sup>h</sup> 03 <sup>m</sup>	0,057
	$S_2$	0,06	02 16	08 16	0,03	0,219	10 12	04 12	0,034
	$S_3$	0,01	03 51	07 51	0,01	0,077	02 44	06 44	0,026
	$S_4$	0,02	02 50	05 50	–	0,071	04 10	07 10	–
VII	$S_1$	1,48	14 25	02 25	0,08	0,319	17 05	05 05	0,042
	$S_2$	0,23	01 14	07 14	0,03	0,159	11 41	05 41	0,032
	$S_3$	0,09	00 10	04 10	0,03	0,021	06 27	02 27	0,010
	$S_4$	0,03	01 20	04 20	–	0,023	04 00	07 00	–

Oznake u (1) znače:

$a_n$  = amplituda  $n$ -tog harmonika

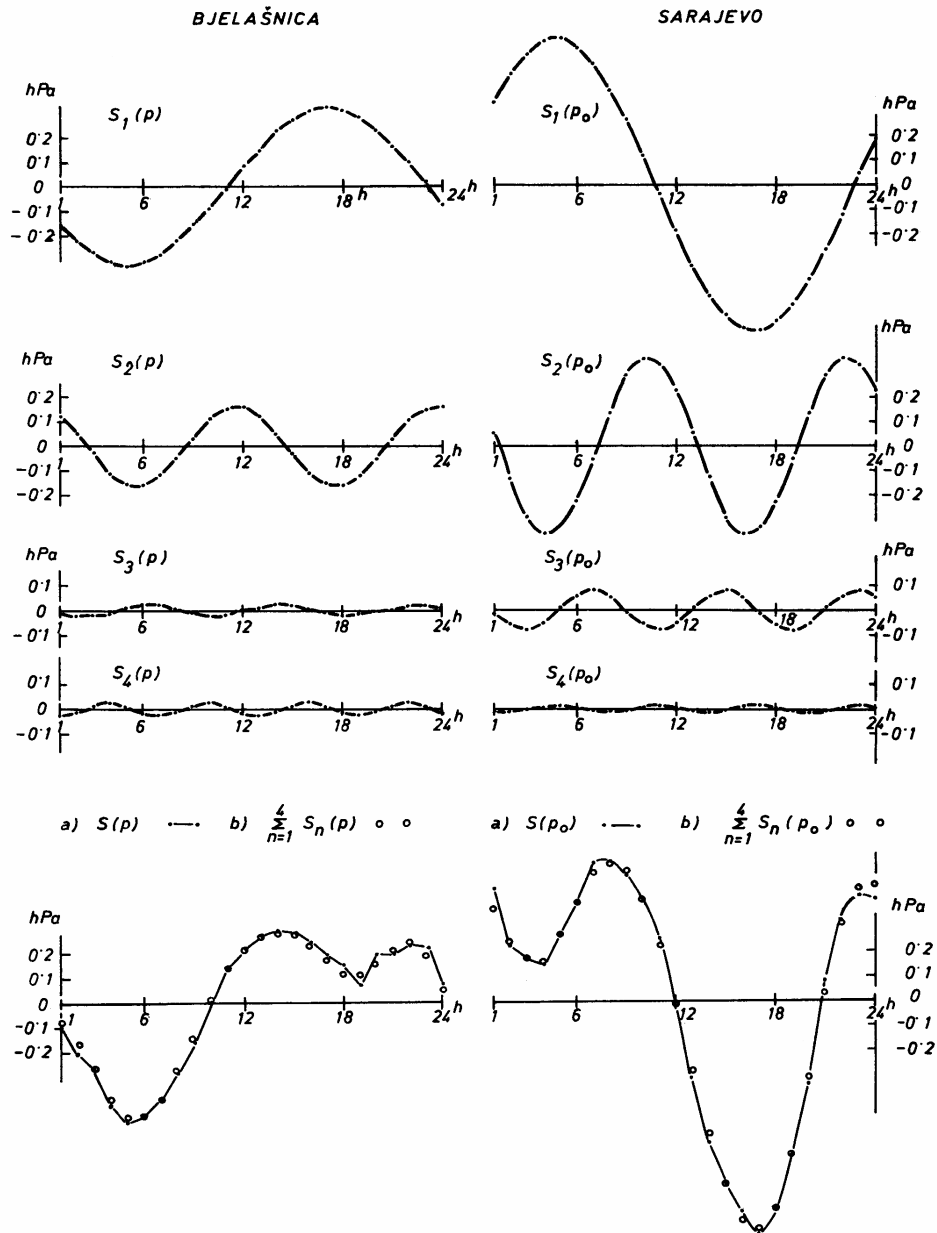
$t$  = srednje lokalno vrijeme izraženo u kutnoj mjeri

$\alpha_n$  = fazni kut

Kako se radi o periodičkim funkcijama, red harmoničkih komponenata brzo konvergira, pa su dovoljna samo prva 4 člana, jer njihova suma s dovoljnom točnošću aproksimira dnevnu varijaciju tlaka i temperature zraka.

Harmonička analiza primijenjena je na podatke tlaka i temperature zraka za Sarajevo i Bjelašnicu. Amplitude  $a_n$  harmoničkih komponenata  $S_n$  za  $n = 1, 2, 3, 4$  i nastup ekstrema po srednjem lokalnom vremenu donose tabl. 2 i 3. Kao primjer prikazane su na sl. 2 za mjesec srpanj prve 4 harmoničke komponente dnevne varijacije tlaka zraka  $S(p_o)$  za Sarajevo i  $S(p)$  za Bjelašnicu, njihova sinteza i usporedba s pripadnom dnevnom varijacijom tlaka zraka.

Signifikantnost harmoničkih komponenata testirana je uobičajenom metodom na harmoničnoj uri (Chapman, 1952). Testiranje je zadovoljilo kriterij da radijus kruga vjerojatne pogreške  $r_n$  bude manji od trećine amplitude  $a_n$  i da najmanje 50% mjerenja pada unutar kruga (tabl. 2 i 3). Slika 3, 4 i 5 prikazuju za Sarajevo i Bjelašnicu amplitude  $a_n$ , faze  $\alpha_n$  i radijus kruga  $r_n$  vjerojatne pogreške harmoničkih komponenata tlaka zraka za  $n = 1, 2$  i 3.



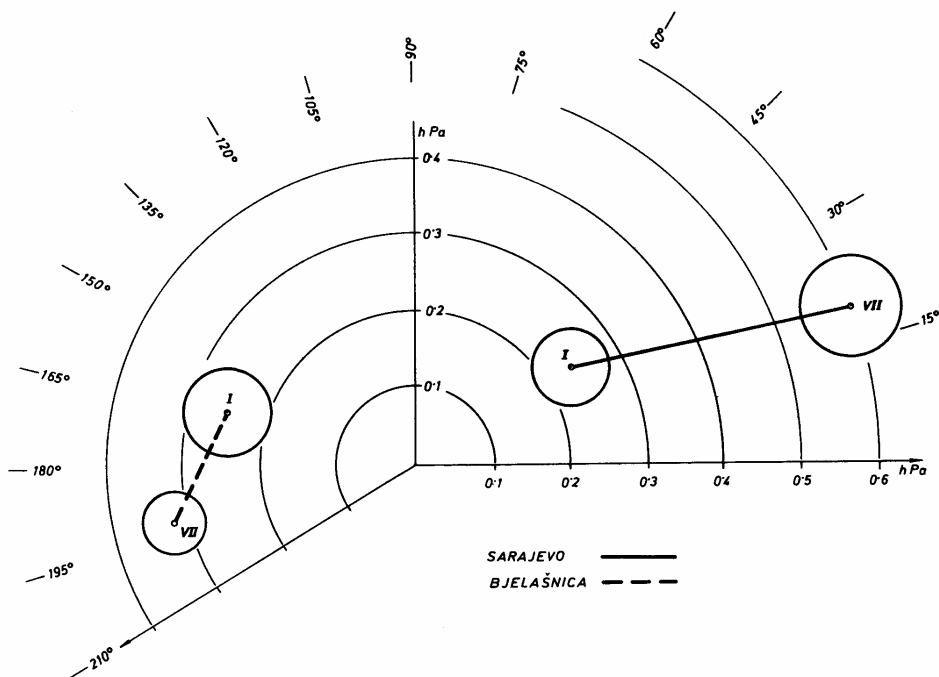
Slika 2. Prve 4 harmoničke komponente srednje dnevne varijacije tlaka zraka  $S_n(p_0)$  Sarajevo i  $S_n(p)$  Bjelašnica, sinteza komponentata  $\sum_{n=1}^4 S_n(p_0)$  i  $\sum_{n=1}^4 S_n(p)$ .

te njihova usporedba s pripadnom srednjom dnevnom varijacijom tlaka zraka, srpanj 1954–1965.

Figure 2. First four harmonic components of daily mean air pressure variation at Sarajevo  $S_n(p_0)$  and Mt Bjelašnica  $S_n(p)$ , synthesis of the components  $\sum_{n=1}^4 S_n(p_0)$  and  $\sum_{n=1}^4 S_n(p)$  and their comparison with the corresponding daily mean air pressure, January and July, 1954–1965.

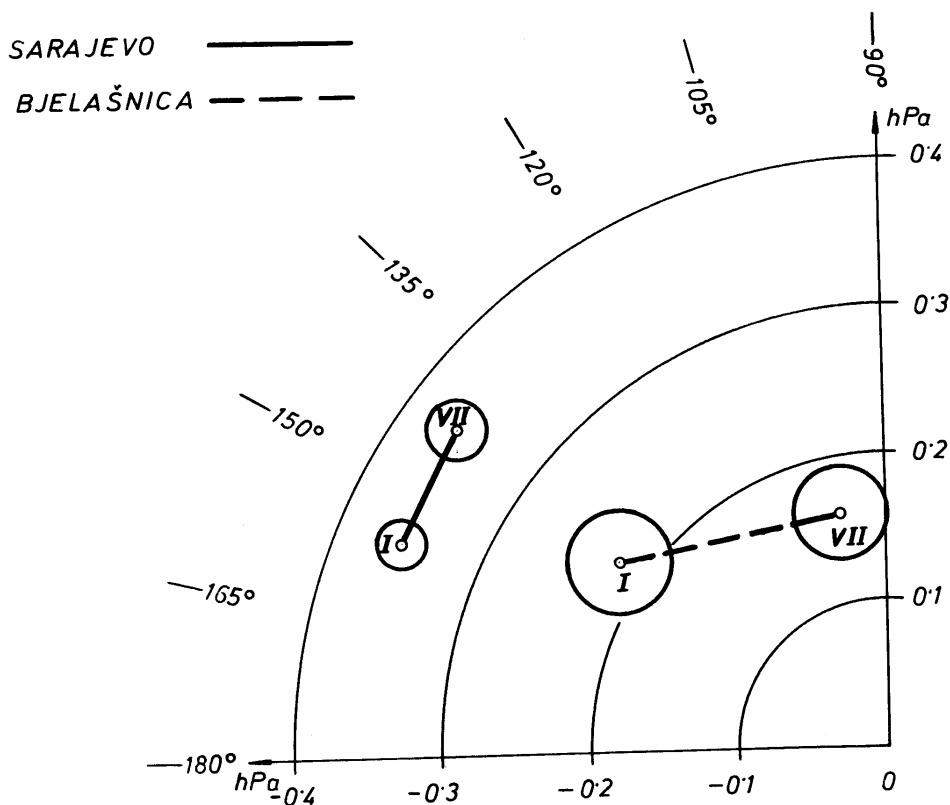
#### 4. Komparacija harmoničkih komponenata tlaka i temperature

Budući da je dnevna varijacija tlaka zraka pobuđena dnevnom varijacijom temperature zraka, one međusobno moraju biti usporedive. To isto vrijedi i za njihove sastavne komponente pa se traži odnos harmoničkih komponenata  $S_n(p_0)$  i  $S_n(t_0)$  za nizinske uvjete, kao i odnos između  $S_n(p)$  i  $S_n(t)$  za planinske uvjete.



Slika 3. Harmonična ura za cjelodnevnu oscilaciju tlaka zraka  $S_1(p_0)$  Sarajevo i  $S_1(p)$  Bjelašnica za mjesec siječanj i srpanj 1954–1965.

Figure 3. Harmonic dial for daily air pressure oscillation at Sarajevo  $S_1(p_0)$  and Mt Bjelašnica  $S_1(p)$ , January and July, 1954–1965.



Slika 4. Harmonična ura za poludnevnu oscilaciju tlaka zraka  $S_2(p_0)$  Sarajevo i  $S_2(p)$  Bjelašnica, za mjesece siječanj i srpanj 1954–1965.

Figure 4. Harmonic dial for a 12-hour air pressure oscillation at Sarajevo  $S_2(p_0)$  and Mt Bjelašnica  $S_2(p)$ , January and July, 1954–1965.

Iako Sarajevo, s obzirom na nadmorsku visinu i goroviti okolišni krajolik, ne spada u nizinska područja, ipak se relativno prema Bjelašnici može smatrati nizinom pa će se u daljnjem tekstu tako i označavati.

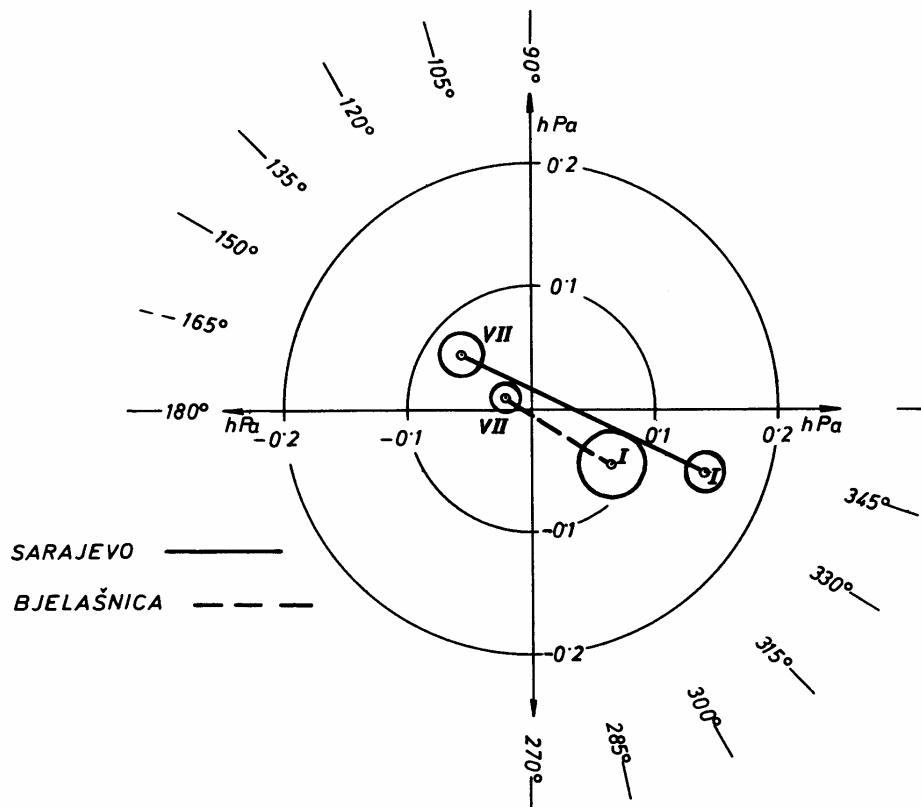
#### Nizina (Sarajevo):

– *prva harmonička komponenta* ili cjelodnevna oscilacija tlaka zraka  $S_1(p_0)$  i temperature zraka  $S_1(t_0)$  međusobno teku skoro inverzno, minimum tlaka odgovara maksimumu temperature i obratno. Amplituda tlaka raste od siječnja do srpnja, prateći porast amplitude temperature. Faktor povećanja za tlak iznosi 2,6, za temperaturu 2,9 (tabl. 2);



– *druga harmonička komponenta* ili poludnevna oscilacija tlaka zraka  $S_2(p_0)$  – za razliku od cjelodnevne oscilacije – skoro je jednaka u siječnju i srpnju, naročito po amplitudi. Kod temperature zraka amplituda je slabo razvijena, kod tlaka zraka naprotiv, vrlo napadna. Maksimum tlaka slijedi minimum temperature, ali sa zakašnjenjem koje je u srpnju veće (oko 3 sata) nego u siječnju (oko 1 1/2 sat) kako pokazuje tabl. 2;

– *treća harmonička komponenta* ili 8-satna oscilacija tlaka zraka  $S_3(p_0)$  i temperature zraka  $S_3(t_0)$  ponaša se slično poludnevnoj oscilaciji, samo zakašnjenje minimuma tlaka iza maksimuma temperature iznosi u pola manje nego kod poludnevne, kako u siječnju tako i u srpnju. Značajka ove oscilacije je skok u fazi za oko  $180^\circ$  od siječnja do srpnja (tabl. 2 i sl. 5);



Slika 5. Harmonična ura za 8-satnu oscilaciju tlaka zraka  $S_3(p_0)$  Sarajevo i  $S_3(p)$  Bjelašnica za mjesec siječanj i srpanj 1954–1965.

Figure 5. Harmonic dial for a 8-hour air pressure oscillation at Sarajevo  $S_3(p_0)$  and Mt Bjelašnica  $S_3(p)$ , January and July 1954–1965.

Amplituda temperature zraka  $S_3(t_0)$  slabo je razvijena, tlaka zraka  $S_3(p_0)$  razmjerno bolje, osobito u siječnju. U to doba godine prvi maksimum oscilacije tlaka  $S_3(p_0)$  javlja se oko 2 sata noću i njegov se utjecaj jasno razabire u dnevnoj varijaciji tlaka zraka  $S(p_0)$  uzrokujući tzv. treći maksimum zapažen samo zimi u umjerenom pojasu. Tako u Sarajevu, u siječnju tlak je u 2 sata noću veći u prosjeku za 0,07 hPa nego što je sat ranije ili sat kasnije. Ljeti odgovarajući minimum, što bi ga trebao prouzročiti  $S_3(p_0)$  u dnevnoj varijaciji tlaka zraka, ne zapaža se uslijed snažno razvijene cjelodnevnoscilacije  $S_1(p_0)$  koja u jutarnjim satima postizava maksimum i prigušuje djelovanje  $S_3(p_0)$ ;

– četvrta harmonička komponenta ili 6-satna oscilacija tlaka zraka  $S_4(p_0)$  i temperature zraka  $S_4(t_0)$  nije razmatrana zbog malene amplitude, kako kod tlaka tako i kod temperature (tabl. 2).

#### Planina (Bjelašnica):

– cjelodnevna oscilacija tlaka zraka  $S_1(p)$  nije inverzna sa  $S_1(t)$ , naprotiv skoro su u fazi, tako da maksimum tlaka slijedi maksimum temperature i to u siječnju u razmaku oko 4 sata, dok je u srpnju razmak manji, iznosi oko 2 1/2 sata. Amplituda tlaka razmjerno je dobro razvijena s obzirom na slabo razvijenu amplitudu temperature, osobito u siječnju (tabl. 3);

– poludnevna oscilacija tlaka zraka  $S_2(p)$  je inverzna prema  $S_2(t)$  kao i u nizini, ali zaostajanje suprotnih ekstrema tlaka i temperature zraka više je naglašeno na planinskom vrhuncu, tako u srpnju iznosi oko 4 1/2 sata, u siječnju oko 2 sata. Iako je amplituda temperature vrlo neizrazita, osobito u siječnju, amplituda tlaka je relativno visoka. Od siječnja do srpnja amplituda ove oscilacije tlaka zraka na Bjelašnici nema tako neznatne promjene kao u nizini, a i promjena faze je na planini oko 3 puta jače izražena (tabl. 3 i sl. 4);

– 8-satna oscilacija tlaka zraka  $S_3(p)$  i temperature zraka  $S_3(t)$  slabije je razvijena u srpnju nego u siječnju, a faza ima skok oko  $180^\circ$  od zime na ljeto, kao i u nizini (tabl. 3 i sl. 5).

### 5. Komparacija harmoničkih komponenata: nizina–planina

Prema tabl. 1 i sl. 1, dnevna varijacija tlaka zraka  $S(p)$  na Bjelašnici jako je poremećena u odnosu na  $S(p_0)$  za Sarajevo. Koliko pojedina harmonička komponenta utječe na poremećenje pokazat će njihova usporedba s odgovarajućom komponentom u nizini. Razlike su slijedeće:

– cjelodnevna oscilacija tlaka zraka  $S_1(p)$  na Bjelašnici bitno se razlikuje od  $S_1(p_0)$  u Sarajevu (tabl. 2 i 3). Na Bjelašnici fazni kut  $\alpha_1(p)$  cjelodnevnoscilacije tlaka zraka pada u siječnju u drugi, a u srpnju u treći kvadrant. U Sarajevu, naprotiv, za oba mjeseca  $\alpha_1(p_0)$  pada u prvi kvadrant (sl. 3). Izrazi li se nastup ekstrema cjelodnevnoscilacije

oscilacije temperature zraka pomoću faznog kuta, preračunavši podatke iz tabl. 2 i 3, fazni kut  $\alpha_1(t)$  za Bjelašnicu i  $\alpha_1(t_0)$  za Sarajevo padaju u treći kvadrant u zimskom i ljetnom mjesecu.

Na Bjelašnici, dakle, izostaje inverznost između ekstrema cjelodnevne oscilacije tlaka i temperature zraka, što nije u skladu s predodžbom o termičkom porijeklu oscilacija tlaka zraka. U Sarajevu inverzni odnos  $S_1(p_0)$  i  $S_1(t_0)$  potvrđuje predodžbu da cjelodnevna oscilacija temperature prizemnog sloja zraka pobuđuje cjelodnevnu oscilaciju tlaka zraka koja se kreće za Suncem od istoka prema zapadu. Ova oscilacija jako varira od mjesta do mjesta u pogledu faze i amplitude, jer podliježe lokalnim utjecajima i promjenama u vremenskim zbivanjima. Ipak je zapažena izvjesna pravilnost, pa se cjelodnevna oscilacija tlaka zraka može prikazati empirijskim izrazom kao funkcija zemljopisne širine ;

– *poludnevna oscilacija tlaka zraka*  $S_2(p)$  na Bjelašnici razlikuje se od  $S_2(p_0)$  u Sarajevu po smanjenoj amplitudi i po nastupu ekstrema. Na Bjelašnici ekstremi kasne u odnosu na Sarajevo, u siječnju oko 1/2 sata, u srpnju oko 1 1/2 sat. To je značajna razlika budući da je ova oscilacija poznata po svojoj pravilnosti u pogledu amplitude, ali još više u pogledu faze. Neovisna je o lokalnim i vremenskim utjecajima i pravilno opada idući od ekvatora prema polovima. Postoji nekoliko empirijskih izraza kojima se izražava ovisnost poludnevne oscilacije tlaka zraka o zemljopisnim koordinatama. Pravilnost je donekle poremećena u polarnim područjima, gdje varira s godišnjim dobama, ali još više sa zemljopisnom dužinom, tako da se maksimum ne pojavljuje oko 10 sati prije podne po lokalnom vremenu kao u tropima i umjerenom pojasu. Upotrijebi li se svjetsko vrijeme, javlja se pravilno i u polarnim krajevima s maksimumom oko 11 1/2 sati.

Poludnevna oscilacija tlaka zraka je zbog svoje pravilnosti nazvana „planetarna”. Kod nje zbunjuje jedino to, što slabo razvijena poludnevna oscilacija temperature zraka pobuđuje tako jako razvijenu i pravilnu oscilaciju tlaka zraka. Ali, prema novijim istraživanjima, poludnevna oscilacija temperature jako je razvijena u višim slojevima atmosfere gdje se ozon, apsorbirajući direktnu sunčevu radijaciju, raspada uz emisiju topline. Vodena para u atmosferi također apsorbira direktnu sunčevu radijaciju i na taj način je zagrijava. Oscilatorna energija, koja nastaje u atmosferi djelovanjem ozona i vodene pare, može se lako izgubiti u svemirskom prostoru, što se i događa sa cjelodnevnom oscilacijom. Naprotiv, oscilacije kraćih perioda, primjerice poludnevna i 8-satna oscilacija, totalno se reflektiraju na plohama diskontinuiteta gustoće u srednjoj i visokoj atmosferi. Ostaju tako blokirane unutar atmosfere što se ispoljuje s razmjerno jako razvijenim oscilacijama temperature u tim njenim dijelovima (Weekes and Wilkes, 1947; Butler and Small, 1963; Lindzen, 1968).

Uzrok postanka poludnevne oscilacije tlaka zraka nije dakle u prizemnom sloju atmosfere, već u višim slojevima, pa otuda i potječe njen planetarni karakter.

– *8-satna oscilacija tlaka zraka*  $S_3(p)$  na Bjelašnici razlikuje se od  $S_3(p_0)$  u Sarajevu po jako smanjenoj amplitudi i po pomaku faze. Kod ove oscilacije pomak faze je slabije izražen nego kod poludnevne oscilacije tlaka, pa malo pridonosi poremećenju dnevne varijacije tlaka zraka na planini.

## 6. Usporedba starijih i novijih istraživanja

U opširnem prikazu klimatskih prilika na Bjelašnici za razdoblje 1895.–1901. Hann se ukratko osvrnuo i na dnevnu varijaciju tlaka zraka (Hann, 1903). Analiza Hannovih podataka pokazuje također da ekstremi poludnevne oscilacije tlaka zraka  $S_2(p)$  na Bjelašnici kasne u odnosu na  $S_2(p_0)$  u Sarajevu. Ali, zakašnjenje iznosi samo 1 sat u prosjeku za cijelu godinu, odnosno 1 sat i 3 minute za ljetni period, što je praktički isto i razlikuje se od rezultata za razdoblje koje se razmatra u ovom radu (tabl. 2 i tabl. 3).

Usprkos nađenoj razlici, ipak se rezultati starijeg i novijeg razdoblja dobro slažu, jer treba naglasiti da oni međusobno nisu potpuno ni usporedivi. Naime, Hann razmatra u prosjeku svih 12 mjeseci, odnosno 3 ljetna mjeseca, a ne pojedinačno mjesece siječanj ili srpanj, što znatno utječe na rezultat. Uzme li se srednjak između siječanskog i srpanjskog zakašnjenja dobije se otprilike 1 sat što se podudara s Hannovim rezultatima. K tome i različita razdoblja i različita duljina razmatranih nizova mogu pridonijeti neslaganju.

## 7. Barometrijska visinska formula

Za analizu i usporedbu dnevnih varijacija tlaka zraka u nizini i na planinskim visovima može poslužiti i barometrijska visinska formula:

$$\Delta p = \frac{p}{p_0} \Delta p_0 + \frac{pgh}{RT_m^2} \Delta T_m \quad (2)$$

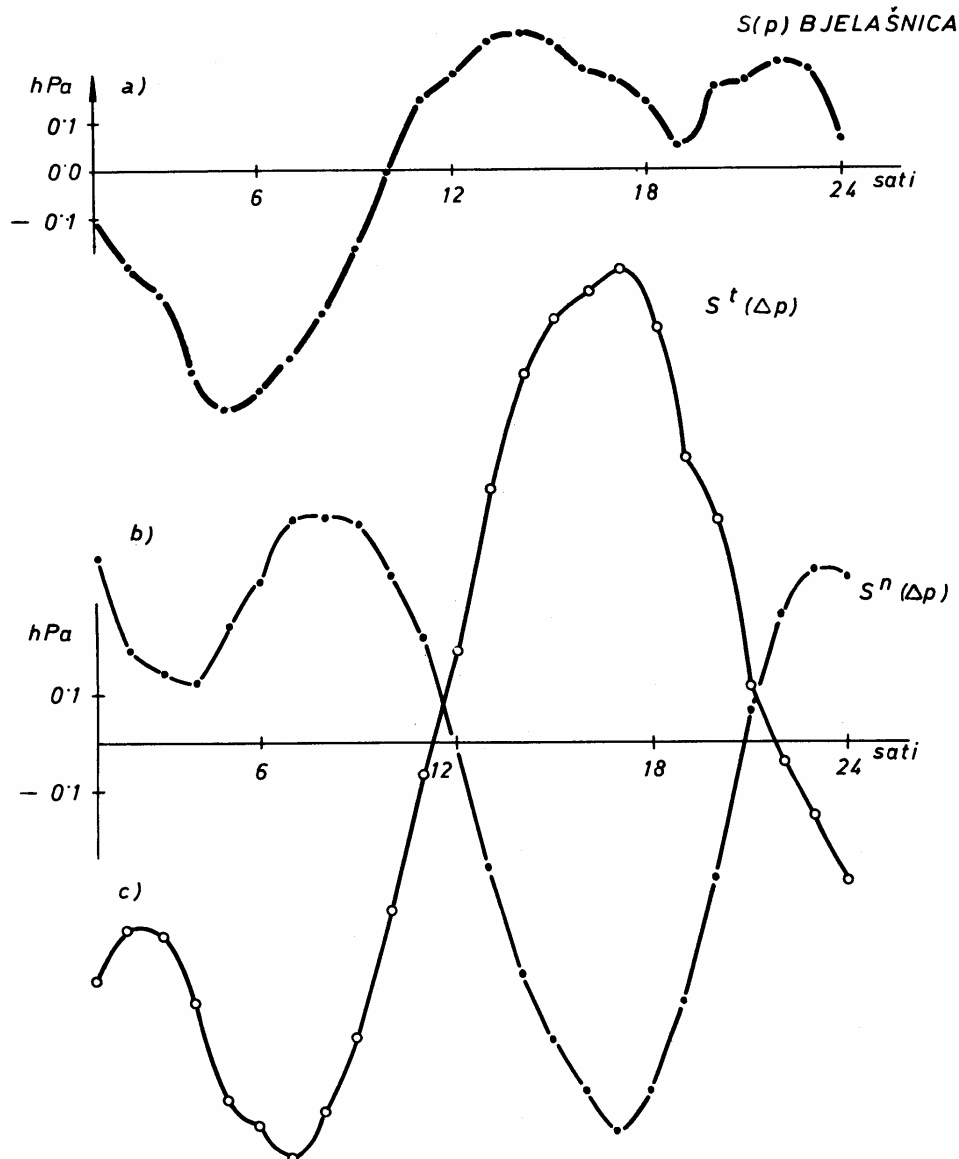
koja daje odnos između malih promjena: tlaka zraka  $p$  na visini  $h$ , prizemnog tlaka zraka  $p_0$  i srednje temperature  $T_m$  stupca zraka između  $p_0$  i  $p$ . Pri tome je  $g$  akceleracija sile teže, a  $R$  plinska konstanta za zrak.

Pomoću (2) dnevna varijacija tlaka zraka u visini raščlanjuje se u dva člana:

– *prvi član* pokazuje da je dnevna varijacija tlaka u visini posve slična onoj u nizini, jedino ima smanjenu amplitudu u omjeru  $p/p_0$ , dok faza, tj. nastup ekstrema, ostaje nepromijenjen (sl. 6 i sl. 1). Ovaj član se naziva „normalna” oscilacija tlaka zraka (Hann, 1898) i označuje se simbolom  $S^n(\Delta p)$ ;

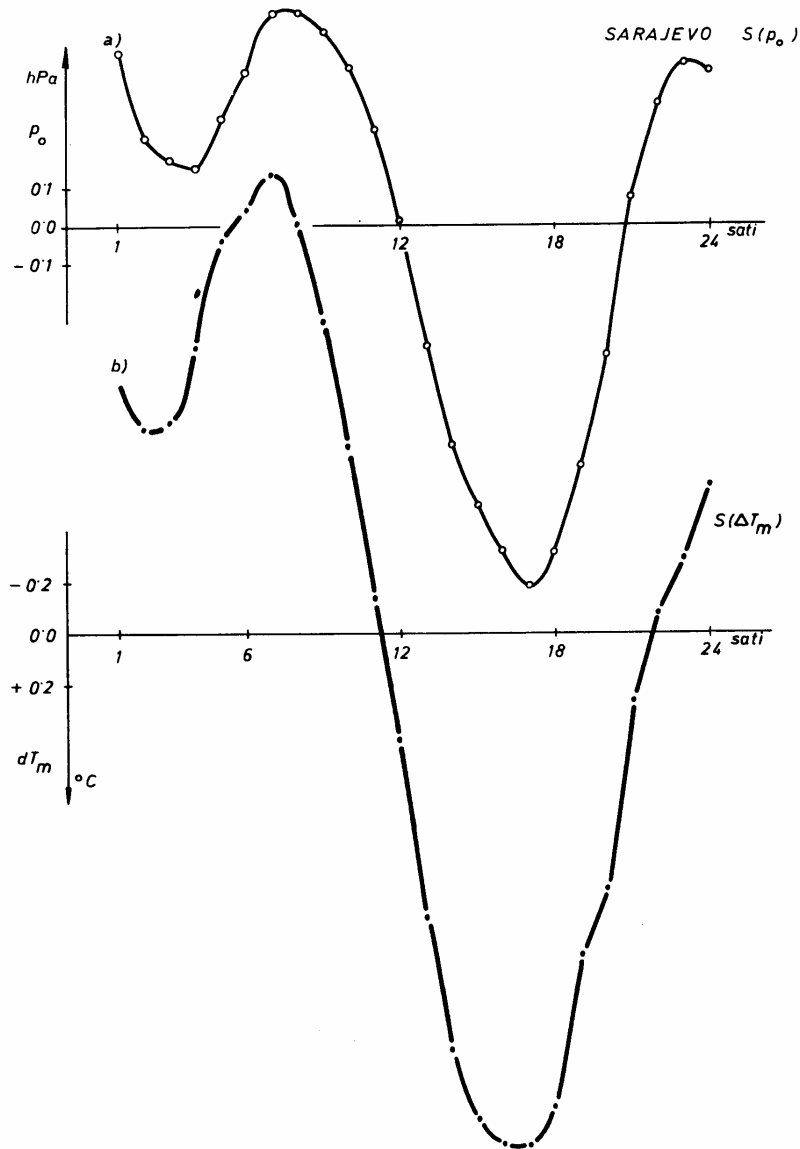
– *drugi član* nastaje dnevnim ugrijavanjem i ohlađivanjem stupca zraka od podnožja do vrha planine. Njegovim ugrijavanjem podižu se izobarne plohe, te masa zraka na visini počinje otjecati prema obližnjim planinskim vrhovima. Ohlađivanje stupca djeluje suprotno. Usljed toga će na planini u poslijepodnevnom satima porasti tlak, a po noći i u rano jutro će padati. Kako je sve to posljedica termičkih procesa, pojava je nazvana „termička” oscilacija tlaka zraka (Hann, 1898) i označuje se simbolom  $S^t(\Delta p)$ .

Interferencijom termičke oscilacije  $S^t(\Delta p)$  i normalne  $S^n(\Delta p)$  poremećuje se dnevna varijacija tlaka zraka na planini. Poremećenje je to jače što je veća visina planine.



Slika 6. Srednja dnevna varijacija tlaka zraka  $S(p)$ , normalna oscilacija tlaka zraka  $S^n(\Delta p)$  i termička oscilacija tlaka zraka  $S^t(\Delta p)$  na Bjelašnici, srpanj 1954–1965.

Figure 6. Daily mean air pressure variation  $S(p)$ , air pressure normal oscillation  $S^n(\Delta p)$ , and air pressure thermic oscillation  $S^t(\Delta p)$  at Mt Bjelašnica, July 1954–1965.



Slika 7. Srednja dnevna varijacija tlaka zraka  $S(p_o)$  u Sarajevu, srednja dnevna varijacija temperature  $S(\Delta T_m)$  u stupcu zraka Sarajevo-Bjelašnica, srpanj 1954–1965.

Figure 7. Daily mean air pressure variation  $S(p_o)$  at Sarajevo, daily mean air temperature variation  $S(\Delta T_m)$  in the Sarajevo-Bjelašnica air column, July 1954–1965.

Iznad prostrane ravnice ili iznad prostrane visoravni, bez obzira na nadmorsku visinu, podizanjem i spuštanjem izobarnih ploha uslijed dnevnog zagrijavanja ne stvaraju se uvjeti za otjecanje ni pritjecanje mase zraka, pa izostaje termička oscilacija tlaka zraka.

Na sl. 6 prikazane su za srpanj, 1954–1965. slijedeće krivulje:

- normalna oscilacija tlaka zraka  $S^n(\Delta p)$  koja je vjerna kopija dnevne varijacije tlaka zraka u nizini  $S(p_o)$ , ali sa smanjenom amplitudom u omjeru 0,844 prema tabl. 1.;
- termička oscilacija tlaka zraka  $S^t(\Delta p)$ ;
- dnevna varijacija tlaka zraka  $S(p)$  na Bjelašnici koja je sinteza normalne i termičke oscilacije.

U Sarajevu se ne pojavljuje termička oscilacija jer nema uvjeta za njeno nastajanje. Naprotiv, većem otjecanju mase zraka u visini odgovara veći pad tlaka zraka u nizini tako da opadanje dnevne varijacije tlaka zraka  $S(p_o)$  u nizini slijedi porast dnevne varijacije temperature  $S(\Delta T_m)$  u stupcu zraka Sarajevo-Bjelašnica, pa se u doba temperaturnog maksimuma produbljuje već postojeći minimum tlaka zraka. Odnos  $S(p_o)$  i  $S(\Delta T_m)$  prikazan je na sl. 7 za mjesec srpanj 1954–1965. Radi boljeg uočavanja njihove međusobne veze pozitivna os temperature usmjerena je prema dolje.

#### 8. Primjena barometrijske visinske formule na harmoničke komponente

Raščlanjivanje dnevne varijacije tlaka zraka pomoću (2) ne znači da se harmonička analiza smatra formalnom. Naprotiv, pojedine harmoničke komponente predstavljaju stvarne oscilacije koje sačinjavaju dnevnu varijaciju tlaka zraka. Komponente dnevne varijacije tlaka zraka ustanovljene su i drugim metodama, primjerice Vercelijevom periodalnom analizom (Volarić, 1970) ili spektralnom analizom (Del Llano i Nuñez, 1975). Periodalna analiza se bitno razlikuje od harmoničke, jer odnos perioda komponenta ne mora biti u harmoničkom nizu niti komponente moraju biti kontinuirane u razmatranom intervalu s konstantnom amplitudom (Vercelli, 1923; Mosetti, 1960). Kada se radi o dnevnoj varijaciji tlaka zraka na planinskim visovima, tada neke njene značajke dolaze do punog izražaja baš primjenom barometrijske visinske formule, odnosno njenom kombinacijom s nekom od spomenutih metoda, u našem slučaju s harmoničkom analizom.

Djelovanje termičke oscilacije bolje se razabira ako se (2) primijeni na pojedine komponente harmoničke analize, što potvrđuju slijedeća razmatranja:

- termička oscilacija tlaka zraka  $S_1^t(\Delta p)$  jako utječe na cjelodnevnu oscilaciju tlaka zraka  $S_1(p)$ . Pod njenim utjecajem toliko se modificira  $S_1(p)$  da dolazi do promjene faze u odnosu na  $S_1(p_o)$ , u srpnju za  $180^\circ$ , u siječnju nešto manje. Radi toga izostaje inverznost cjelodnevne oscilacije tlaka zraka  $S_1(p)$  sa cjelodnevnom oscilacijom temperature zraka  $S_1(t)$ .

Termička oscilacija  $S_1^t(\Delta p)$  i normalna  $S_1^n(\Delta p)$  imaju suprotni hod, ali isti period zbog čega ih se ne može razlučiti harmoničkom analizom (tabl. 4). To isto vrijedi i za ostale oscilacije tlaka zraka kraćih perioda.

Tablica 4. Amplitude  $a_n$  normalne  $S^n(\Delta p)$  i termičke oscilacije tlaka zraka  $S^t(\Delta p)$  i nastup ekstrema po srednjem lokalnom vremenu na Bjelašnici za mjesec siječanj i srpanj u razdoblju 1954–1965.

Table 4. Normal  $S^n(\Delta p)$  and thermic  $S^t(\Delta p)$  air pressure oscillation amplitudes  $a_n$  and onset of extremes at Mt Bjelašnica, local mean time, January and July, 1954–1965.

NORMALNA OSCILACIJA  $S^n(\Delta p)$

Mjesec	$a_1$			$a_2$			$a_3$		
	hPa	Nastup maks.	min.	hPa	1. maks.	1. min.	hPa	1. maks.	1. min.
Siječanj	0,193	3 <sup>h</sup> 52 <sup>m</sup>	15 <sup>h</sup> 52 <sup>m</sup>	0,296	9 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup>	3 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup>	0,124	2 <sup>h</sup> 26 <sup>m</sup>	6 <sup>h</sup> 26 <sup>m</sup>
Srpanj	0,503	4 44	16 44	0,307	10 16	4 16	0,064	6 53	2 53

TERMIČKA OSCILACIJA  $S^t(\Delta p)$

Siječanj	0,407	17 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup>	5 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup>	0,099	2 <sup>h</sup> 42 <sup>m</sup>	8 <sup>h</sup> 42 <sup>m</sup>	0,051	6 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>	2 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>
Srpanj	0,823	16 52	4 52	0,165	3 16	9 16	0,044	3 05	7 05

– termička oscilacija tlaka zraka  $S_2^t(\Delta p)$  je slabo razvijena, ali se ipak na planini očituje njeno djelovanje na  $S_2(p)$  zakašnjenjem ekstrema i smanjenjem amplitude više nego u omjeru  $p/p_0$ .

U srpnju je amplituda poludnevne oscilacije  $S_2(p)$  više smanjena nego u siječnju i zakašnjenje ekstrema je ljeti veće nego zimi. Obje pojave su posljedica jače razvijene termičke oscilacije  $S_2^t(\Delta p)$  u toplom dijelu godine (tabl. 4);

– termička oscilacija tlaka zraka  $S_3^t(\Delta p)$  djeluje na oscilaciju tlaka zraka  $S_3(p)$  također smanjenjem amplitude i pomakom faze. Utjecaj ove oscilacije dolazi manje do izražaja zbog njene slabe razvijenosti (tabl. 4).

### 9. Oscilacije srednje dnevne temperature u stupcu zraka Sarajevo–Bjelašnica

Pomoću (2) izračunate su oscilacije srednje dnevne temperature u stupcu zraka Sarajevo–Bjelašnica za harmoničke komponente  $S_1(\Delta T_m)$ ,  $S_2(\Delta T_m)$  i  $S_3(\Delta T_m)$  (tabl. 5). Kod računanja su upotrijebljeni 12-godišnji mjesečni srednjaci tlaka i temperature za razdoblje 1954–1965. prema tabl. 1.

Srednja dnevna varijacija temperature  $S(\Delta T_m)$  u spomenutom stupcu zraka sastoji se pretežno od cjelodnevne oscilacije temperature  $S_1(\Delta T_m)$  (tabl. 5). Doprinos poludnevne oscilacije temperature  $S_2(\Delta T_m)$ , iako je po iznosu neznatan, ipak je značajan



Tablica 5. Amplitude  $a_n(\Delta T_m)$  oscilacija srednje dnevne temperature u stupcu zraka Sarajevo-Bjelašnica i nastup ekstrema po srednjem lokalnom vremenu za mjesece siječanj i srpanj u razdoblju 1954-1965.

Table 5. Daily mean temperature oscillation amplitudes  $a_n(\Delta T_m)$  in the Sarajevo-Bjelašnica air column and onset of extremes at local mean time, January and July, 1954-1965.

Mjesec	$a_1(\Delta T_m)$ °C	Nastup		$a_2(\Delta T_m)$ °C	Nastup		$a_3(\Delta T_m)$ °C	Nastup	
		maks.	min.		1. maks.	1. min.		1. maks.	1. min.
Siječanj	0,77	17 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup>	5 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup>	0,19	2 <sup>h</sup> 41 <sup>m</sup>	8 <sup>h</sup> 41 <sup>m</sup>	0,095	5 <sup>h</sup> 59 <sup>m</sup>	1 <sup>h</sup> 59 <sup>m</sup>
Srpanj	1,74	16 52	4 52	0,47	3 16	9 16	0,093	3 05	7 05

zbog asimetrije koju prouzrokuje u srednjoj dnevnoj varijaciji temperature. Sl. 7 prikazuje srednju dnevnu varijaciju temperature  $S(\Delta T_m)$  za mjesec srpanj 1954-1965.

Oscilacije temperature  $S_n(\Delta T_m)$  u stupcu zraka Sarajevo-Bjelašnica intenzivnije su i postizavaju veće amplitude nego u stupcu zraka Zürich-Säntis (Haurwitz, 1975). Razlike su, u prvom redu, uvjetovane sjevernijim položajem i većom visinskom razlikom Züricha i Säntisa, a mogu potjecati i zbog različite duljine niza i zbog različitog razdoblja. Haurwitz k tome razmatra godišnja doba, a računsku obradu je proveo pretpostavljajući konstantan tlak zraka kroz cijelu godinu na donjoj i gornjoj postaji, isto tako i srednju temperaturu stupca zraka. Naši rezultati, za razliku od njegovih, odnose se na pojedinačne mjesece, a kod izračunavanja su upotrijebljene srednje vrijednosti tlaka i temperature zraka za odgovarajuće mjesece.

## 10. Zaključak

Dnevna varijacija tlaka zraka na Bjelašnici  $S(p)$ , kao općenito na planinskim visovima, modificirana je u odnosu na Sarajevo i u hladnom i u toplom dijelu godine. U siječnju je poslijepodnevni minimum dnevne varijacije tlaka zraka na planini ublažen, dok u srpnju skoro posve nestaje. Harmoničkom analizom određene su prve 4 komponente dnevne varijacije tlaka i temperature zraka, kako za Bjelašnicu tako i za nedaleko Sarajevo. Usporedba harmoničkih komponenata za Bjelašnicu i Sarajevo pokazala je znatne razlike, najviše kod prve i druge komponente. Primjenom barometrijske visinske formule ustanovljena je na planini dodatna oscilacija tlaka zraka, tzv. „termička” oscilacija  $S^t(\Delta p)$ , koja je prouzročena dnevnim zagrijavanjem i ohlađivanjem stupca zraka Sarajevo-Bjelašnica. Termička oscilacija  $S^t(\Delta p)$  djeluje suprotno nego dnevna varijacija temperature  $S(t)$ , što dovodi do modificiranog oblika dnevne varijacije tlaka zraka  $S(p)$  karakterističnog za planinske visove.

### Zahvala

Sa zahvalnošću ističemo da smo podatke o tlaku i temperaturi zraka dobili od Hidrometeorološkog zavoda BiH, Sarajevo. Potrebne računске operacije izračunate su na elektroničkom računalu Wang, vlasništvu Geofizičkog zavoda PMF-a, Zagreb. Velika hvala prof. dr B. Makjaniću na izradi programa, a Upravi Geofizičkog zavoda na upotrebi računala. Također srdačna hvala inž. Ivi Lukšiću na savjesnom čitanju rukopisa i korisnoj diskusiji.

### Literatura

Butler S. T. and K. A. Small (1963): The excitation of atmospheric oscillations, *Proceedings Royal Society A* 274, 91–121.

Chapman S. (1952): The calculation of the probable error of determinations of lunar daily harmonic component variations in geophysical data, *Australian Journal Sciences Research A* 5, 218–222.

Hann J. v. (1898): Weitere Beiträge zu den Grundlagen für eine Theorie die tägliche Oscillation des Barometers, *Denkschriften Kaiserliche Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse*, 107. Band, 300–356.

Hann J. v. (1903): Die meteorologischen Verhältnisse auf der Bjelašnica (2067 m) in Bosnien, *Meteorologische Zeitschrift*, Januar, 1–19.

Haurwitz B. and A. D. Cowley (1975): The barometric tides at Zürich and on the summit of Säntis, *Pure and Applied Geophysics* 113, 355–364.

Hidrometeorološka služba NR BiH (1953): *Opservatorium Bjelašnica, Sarajevo.*

Del Llano R. and J. M. Nuñez (1975): On a method for analysing atmospheric oscillations, *Meteorological Magazine* 104, 297–302.

Lindzen R. S. (1968): The application of classical atmospheric tidal theory, *Proceedings Royal Society A* 303, 299–316.

Mosetti F. (1960): Su alcuni problemi di analisi delle periodicità, *Bollettino di geofisica teorica ed applicata*, Anno II, n. 7, 1–8.

Vercelli F. (1923): *Nuovi esperimenti di previsioni meteorologiche*, Roma, *Arti grafiche Ugo Pinnarò*

Volarić B. (1970): Dnevna varijacija tlaka zraka na podnožju i vrhu Medvednice, rukopis

Vujević P. (1934): Utjecaj reljefa zemljišta na podneblje u okolini Bjelašnice, *Glasnik geografskog društva*, sv. XX, 18–38.

Weekes K. and M. V. Wilkes (1947): Atmospheric oscillations and the resonance theory, *Proceedings Royal Society A* 192, 80–99.