

Statistička analiza inverzija i visine sloja miješanja na području Zagreba

A Statistical Analysis of Inversions and Mixing Layer Heights in Zagreb Area

Edita Lončar

Republički hidrometeorološki zavod, Zagreb, Hrvatska

Primljeno 06.06. 1991., u konačnom obliku 25.07. 1991

Sažetak

Statistička analiza prizemnih inverzija, podignutih inverzija i visine sloja miješanja za područje Zagreba temeljena je na radiosondažnim mjerjenjima opservatorija Zagreb - Maksimir u razdoblju 1977-1982 (01 i 13 sati).

Godišnja frekvencija svih noćnih inverzija je 90 %, a svih (prizemnih i podignutih) u 13 sati je oko 5 %. Najčešće visine prizemnih inverzija su oko 100 m u svim sezonomama. Visoke prizemne inverzije karakteristične su za zimu, a javljaju se u 10 % slučajeva s perzistencijom i od nekoliko dana. Visine podignutih inverzija pokazuju veliku sezonsku i dnevnu varijabilnost, pri čemu je tipično da su visine njihove donje baze u hladnom dijelu godine znatno niže nego li u toplom.

Za visinu sloja miješanja karakteristično je da je u toplom dijelu godine veća nego li u hladnom. Najniže visine tog sloja značajne su za zimu, a najviše za ljeto.

Ključne riječi: prizemna inverzija, podignuta inverzija, visina sloja miješanja, statistička analiza, područje Zagreba.

Abstract

A statistical analysis of surface inversions, elevated inversions and mixing heights over Zagreb region has been performed by means of radio-sonde observations at Zagreb-Maksimir at 00 and 12 UTC (1977-82).

Annual frequency of all night inversions is 90%, and of all day inversions is about 65%. During all seasons the surface inversions most frequently reach the height of about 100 m. Height surface inversions are winter characteristics and having a persistency up to several days. Elevated inversion heights show a considerable seasonal and diurnal variability with their lower basis being much lower during the colder part of a year.

Mixing layer heights are greater during summer than during winter time.

Key words: ground (surface) inversions, elevated inversion, mixing height, statistical analysis, the area of Zagreb.

1. Uvod

Energija Sunca, koja se prenosi do Zemlje radijacijom, osnovni je pokretač svih procesa i pojava u atmosferi. Odnos između kratkovalnog zračenja Sunca i dugovalnog zračenja sistema Zemlja-atmosfera u kojem Zemlja prima energiju od Sunca i atmosfere, a gubi (hladi se) zbog vlastitog dugovalnog zračenja, mijenja se tijekom godine i dana.

Zbog toga sva stanja atmosfere koja se baziraju na prijenosu i ravnoteži energija imaju izraziti sezonski i dnevni ciklus. To je najočitije kod vertikalnih promjena temperature najdonjeg sloja atmosfere u kojem dominiraju prizemne inverzije noću, a turbulentni sloj miješanja danju. Redovitom izmjenom dana i noći, kao i godišnjih doba, definirane su s energetskog gledišta mogućnosti razvoja, trajanja i održavanja inverzija i sloja miješanja.

Budući da topografija terena, osobine podloga, urbanizacija i zagadenost zraka utječu na toplinsku ravnotežu najdonjeg sloja atmosfere, navedeni parametri odražavaju također i lokalna obilježja.

Dakle, prizemne i podignute inverzije i sloj miješanja koji su pokazatelji stabilnosno-turbulentnog režima atmosfere ovise o energetskim i lokalnim faktorima. Navedeni parametri mogu se odrediti na temelju mjerjenja radio-sondom ili sodarom, a u nedostatku istih za ocjenu stabilnosti mogu se koristiti kriteriji i izvedene veličine raznih autora: Pasquill-Turnera, Uliga, Kluga, Vogta, Mitchella, Richardsona, Frouda (Bennett E. 1980, Hanna S.R. 1977, Mitchell E.A. 1982).

U ovom radu prikazane su karakteristike statistički obrađenih skupova prizemnih inverzija, podignutih inverzija i visina sloja miješanja, podataka određenih iz radio-sondažnih mjerjenja koja se na observatoriju Zagreb-Maksimir obavljaju dva puta dnevno (niz 1977-1982. godine).

2. Analiza parametara stabilnosti

Lokacija prizemnih i visinskih (radio-sondažnih) mjerjenja na sjeveroistočnoj periferiji Zagreba podliježe urbanizaciji, ali ipak još ne toliko kao u gradskoj jezgri. To

je utvrđeno nizom istraživanja temperature, strujanja i oborine na području grada (Čapka M. 1982, 1985, 1989, 1990, Lončar 1974, 1975, 1978, Pleško 1974, Poje 1974, 1978, Šnik 1974). Prema tome (visinski) podaci dobiveni mjerjenjima na observatoriju Zagreb-Maksimir mogu se smatrati reprezentativnima za cijelo gradsko područje.

Statistička obrada parametara stabilnosti prikazana je tabelarno ili grafički po sezonomama i za godinu, i to posebno za skup radio-sondažnih podataka u 01 sat, a posebno za onaj koji je dobiven mjerjenjima u 13 sati. Ona obuhvaća osnovne statističke veličine svakog skupa podataka (broj slučajeva (N), srednjak, standardnu devijaciju, medijan, kvartile i ekstreme) i histograme učestalosti.

2.1. Prizemne inverzije

Prizemne inverzije definirane su visinom sloja u kojem temperatura počevši od tla raste, a nastaju na različite načine.

Radijacijsko hlađenje podloge uzrok je stvaranju prizemnih inverzija kroz cijelu godinu, a njintenzivnije je za vedrih i mirnih noći, iznad snijegom pokrivenog tla. Ukoliko mu se pridruži zatopljenje u visini, koje može biti posljedica supersidencije u antikloni i/ili advekcije toplog zraka, nastaju slojevi čija visina i gradijent temperature znatno prelaze vrijednosti tipične za konkretnu sezonu na promatranoj lokaciji. Ako primitak sunčeve radijacije u konkretnom mjesecu nije dovoljan da u prijepodnevnim satima razbije takvu netipičnu inverziju, nastaju višednevne sa zdravstveno-ekološkog i privrednog gledišta vrlo nepovoljne inverzione vremenske situacije. Naime, minimalna turbulencija u samom inverzijskom sloju i ograničena vertikalna turbulentna razmjena zraka između nižih i viših slojeva sa trajanjem od nekoliko dana doprinose porastu gradjenata meteoroloških parametara i uvjetuju gomilanje svih primjesa u zraku, što se očituje u maglovitom i prekomjerno zagadenom zraku koji može poprimiti karakter epidazonog stanja. Budući da je u takvima uvjetima povećana smrtnost pučanstva, povećan broj oboljelih, otežan i onemogućen saobraćaj,

oštećene mreže za telekomunikacije i za prijenos energije (ako se stvara i inje) štete mogu biti vrlo velike. Zbog toga stacionarne inverzije zapravo spadaju u "elementarne nepogode". To je jedan od razloga za postavljanje kriterija kojima se definiraju du-

Tab. 1. Prizemne inverzije (m) u 01 i 13 sati, Zagreb-Maksimir 1977-1982.

Tab. 1. Prizemne inverzije (m) u 01 i 13 sati, Zagreb-Maksimir 1977-1982.

	Proljeće	Ljeto	Jesen	Zima	Godina
Broj slučajeva (N)	393	485	376	293	1548
Srednjak	142	164	196	221	177
Median	110	130	150	160	140
Mod	70	70	70	70	70
Standardna devijacija	99	109	144	196	139
Minimum	10	20	20	10	10
Maksimum	520	620	770	1260	1260
Maksimum-Minimum	510	600	750	1250	1250
Donji kvartil	70	80	90	84	80
Gornji kvartil	180	210	260	280	230
Razlika kvartila	110	130	170	196	150
<hr/>					
13 sati	Proljeće	Ljeto	Jesen	Zima	Godina
Broj slučajeva (N)		7	43	50	
Srednjak		319	289	293	
Median	+	300	280	285	
Mod	+	300	350	270	
Standardna devijacija		172	185	182	
Minimum		60	20	20	
Maksimum		580	780	780	
Maksimum-Minimum		520	760	760	
Donji kvartil		190	140	140	
Gornji kvartil		460	360	370	
Razlika kvartila		270	220	230	

Tab. 1a. Učestalost trajanja prizemnih inverzija u ≥ 2 uzastopna termina radio-sondažnih mjerena, Zagreb-Maksimir 1977-1982. (hladni dio godine)

Tab. 1a. Učestalost trajanja prizemnih inverzija u ≥ 2 uzastopna termina radio-sondažnih mjerena, Zagreb-Maksimir 1977-1982. (hladni dio godine)

Uzastopni termini	2	3	4	5	...	11
Učestalost	16	15	2	2		1

boki stabilni slojevi (Wolyn, 1989). Oni se temelje najčešće na visini i gradijentu temperature inverzijskih slojeva. Međutim, u skladu s osnovnim problemom nedovoljnog primitka radijacije Sunca u odnosu na energiju potrebnu za razbijanje dubokih inverzija hladnog dijela godine bilo bi realnije postaviti kriterij na temelju međusobnog odnosa navedenih energija.

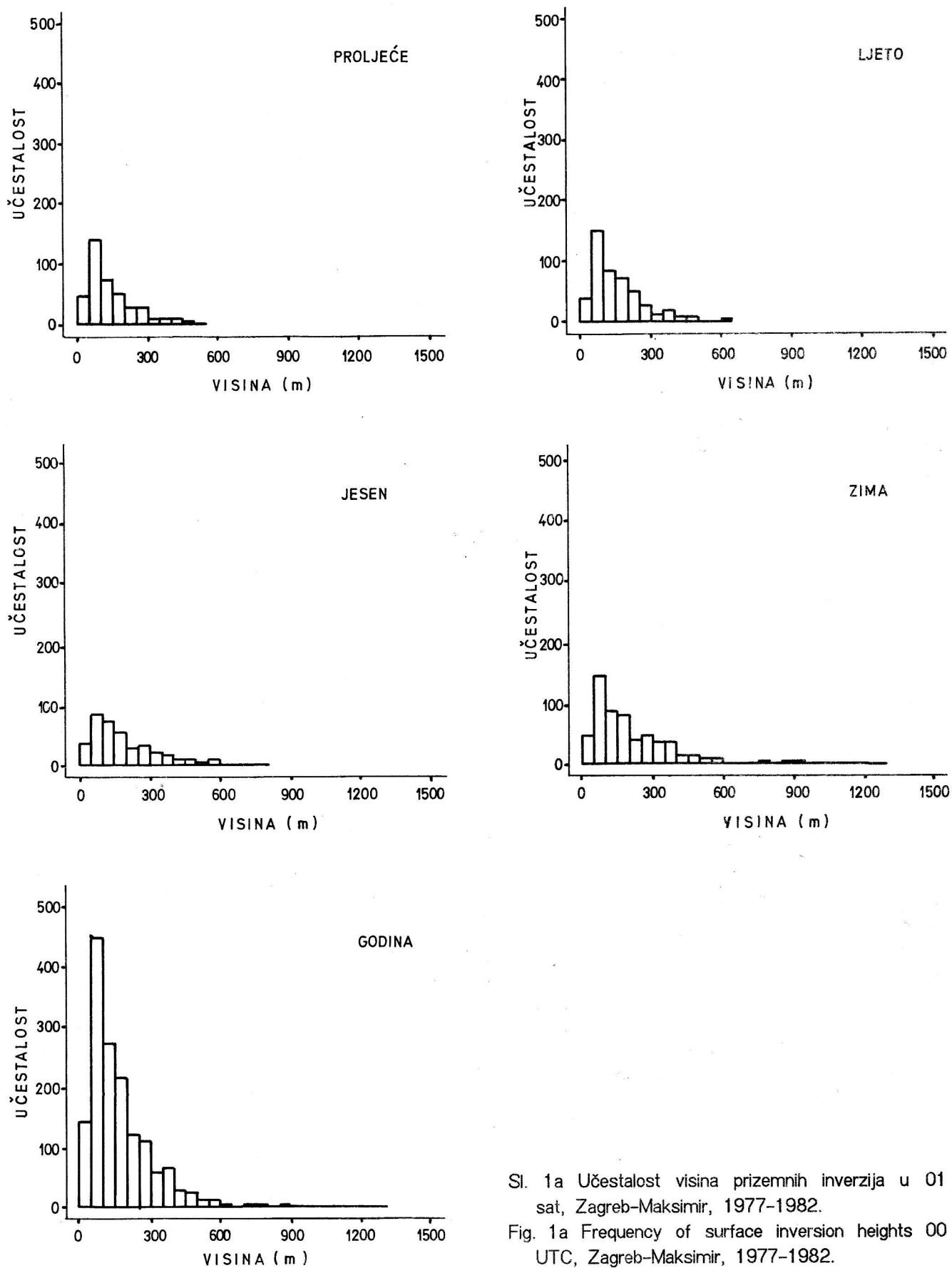
Budući da izrada takvog kriterija nije predmet ovog rada, u okviru ove "statističke analize" smatrat će se "nepovoljnim" situacijama one u kojima se inverzije pojavljuju u najmanje dva uzastopna termina (noćni i podnevni) radio-sondažnih mjerena (trajanje inverzija).

Iz uobičajene statističke analize (dokumentirane tab. 1 i 1a i sl. 1a i 1b) treba istaknuti najvažnije činjenice.

Prizemne se inverzije na observatoriju Zagreb-Maksimir u noćnom terminu javljaju u 70 % dana godišnje, a u podnevnom u oko 5 % dana (hladni dio godine). Pri tom su najčešće visine noćnih prizemnih inverzija od 50 do 200 m, a podnevnih od 250 do 350 m (jesen i zima). Za hladni dio godine (osobito zima) značajna je stacionarnost prizemnih inverzija koje se u pomatranom razdoblju javljaju najmanje u dva, a najviše u uzastopnih 11 termina radio-sondažnih mjerena (tab. 1a).

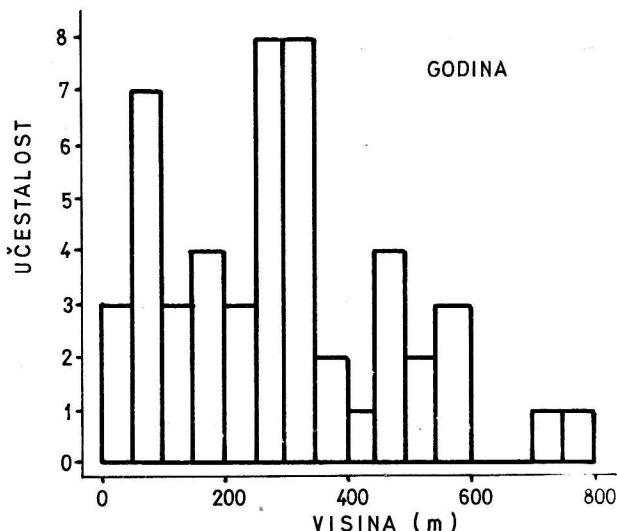
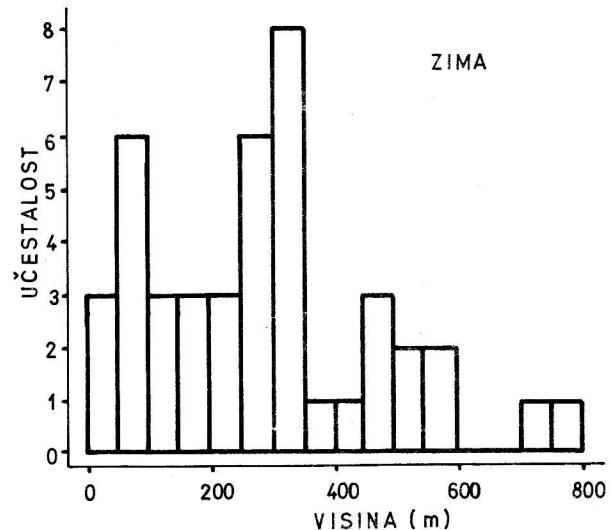
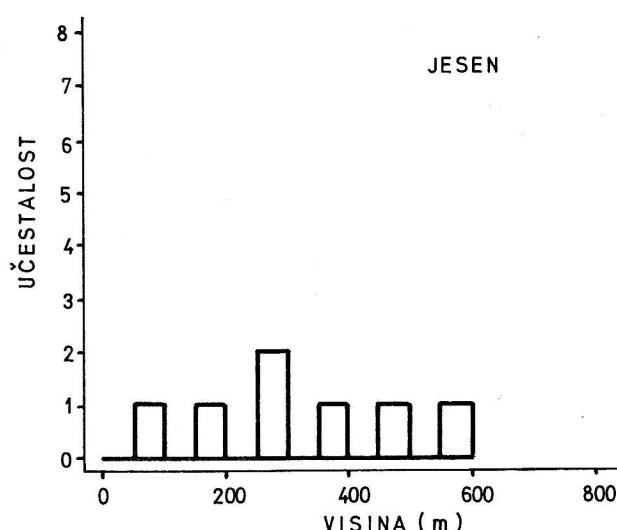
2.2 Podignite inverzije

Podignite inverzije su slojevi zraka u kojima temperatura s visinom raste, samo što donja baza nije tlo (kao kod prizemnih), nego se nalazi na nekoj udaljenosti od podloge. Podignite inverzije su definirane upravo sa visinom donje baze. One mogu nastati na nekoliko različitih načina. Najčešće se stvaraju u prvoj fazi procesa razbijanja prizemnih inverzija, kada se zbog turbulentnog fluksa topline nakon izlaza Sunca donji dio inverzionog sloja transformira u adijabatski (ili labilni), iznad kojega ostatak noćne inverzije čini podignutu inverziju. Ako je fluks topline dovoljan da razbijje takvu podignutu inverziju, podnevna radio-sondažna mjerena neće je registrirati. Međutim, zimi kada



Sl. 1a Učestalost visina prizemnih inverzija u 01 sat, Zagreb-Maksimir, 1977-1982.

Fig. 1a Frequency of surface inversion heights 00 UTC, Zagreb-Maksimir, 1977-1982.



Sl. 1b Učestalost visina prizemnih inverzija u 13 sati, Zagreb-Maksimir, 1977-1982.

Fig. 1b Frequency of surface inversion heights 12 UTC, Zagreb-Maksimir, 1977-1982.

energija primljena od Sunca nije dovoljna za potpuno nego samo djelomično razbijanje prizemne inverzije, tako stvorena podignuta inverzija zadržat će se tijekom dana i detektirat će se podnevnim radio-sondažnim mjeranjima temperature.

Druga skupina podignutih inverzija posljedica je supsidencije u anticikloni i/ili advekcije toplog zraka u visini.

Dimenzije takvih podignutih inverzija obično su veće i njihova donja baza je nešto udaljenija od tla.

Podignite inverzije na observatoriju Zagreb-Maksimir u razdoblju 1977-1982. javljale su se s godišnjom frekvencijom od 59 % u podnevnom terminu, odnosno 20 % u noćnom.

Visine podignutih inverzija kreću se u promatranom skupu podataka od 30 do 2000 m (tab. 2 i sl. 2a i 2b) i pokazuju veliku sezonsku i dnevnu varijabilnost. Za njih je tipično da su u hladnom dijelu godine i noću niže nego li danju i u toplim mjesecima (tab. 2).

2.3 Visina sloja miješanja

Sloj miješanja je onaj sloj atmosfere u kojem se miješanje zraka bazira na turbulentnosti. Energija potrebna za stvaranje i održavanje ovog turbulentnog miješanja crpi se iz termičko-dinamičkih karakteristika atmosfere. Dimenzije turbulentnih vrtloga i

Tab. 2. Visina donje baze podignutih inverzija (m) u 01 i 13 sati, Zagreb-Maksimir 1977-1982.

Tab. 2. Visina donje baze podignutih inverzija (m) u 01 i 13 sati, Zagreb-Maksimir 1977-1982.

01 sat	Proljeće	Ljeto	Jesen	Zima	Godina
Broj slučajeva (N)	208	153	350	379	1090
Srednjak	1161	1173	814	643	871
Median	1185	1200	740	560	820
Mod	820	1800	240	100	470
Standardna devijacija	478	489	534	485	546
Minimum	140	170	60	30	30
Maksimum	1950	1990	2000	1980	2000
Maksimum-Minimum	1810	1820	1940	1950	1970
Donji kvartil	805	800	330	210	370
Gornji kvartil	1575	1620	1220	920	1310
Razlika kvartila	770	820	890	710	940

13 sati	Proljeće	Ljeto	Jesen	Zima	Godina
Broj slučajeva (N)	88	41	127	180	436
Srednjak	735	701	763	598	683
Median	625	550	670	535	590
Mod	400	550	650	320	670
Standardna devijacija	526	511	445	381	449
Minimum	60	70	70	70	60
Maksimum	1950	1900	1820	1700	1950
Maksimum-Minimum	1890	1830	1750	1630	1890
Donji kvartil	320	340	410	290	320
Gornji kvartil	1070	1270	1050	855	970
Razlika kvartila	750	930	640	565	650

intenzitet razmjene zraka između različitih slojeva definiraju visinu sloja. Budući da je dominantni faktor u stvaranju i održavanju turbulencije termička struktura atmosfere, visina sloja miješanja definira se visinom sloja u kojem temperatura počevši od tla pada za $\geq 1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. U praksi se to svodi na određivanje visine sjecišta vertikalnog profila temperature i one suhe adijabate koja polazi od prizemne temperature zraka (Holzworth 1967, Lončar 1981).

Dakle, labilna i neutralna atmosfera generiraju i podržavaju turbulentne vrtloge termičkog porijekla. Nasuprot tome inverzije sputavaju i reduciraju njihov razvoj. Zbog tih činjenica karakteristike sloja miješanja najizraženije su tijekom dana toplog dijela

godine u neutralnim i labilnim uvjetima. U hladnom dijelu godine i osobito noću, kada prevladava stabilna stratifikacija atmosfere, razvoj sloja miješanja ne ovisi (kao danju) o termičkim nego primarno o dinamičko-mehaničkim faktorima. Samo u iznimnim situacijama postoji noću termički uvjetovan sloj miješanja (133 slučaja u skupu noćnih radiosondažnih mjerena 1977-1982), kao posljedica hladne kaplje u visini ili nagle advekcije hladnog zraka.

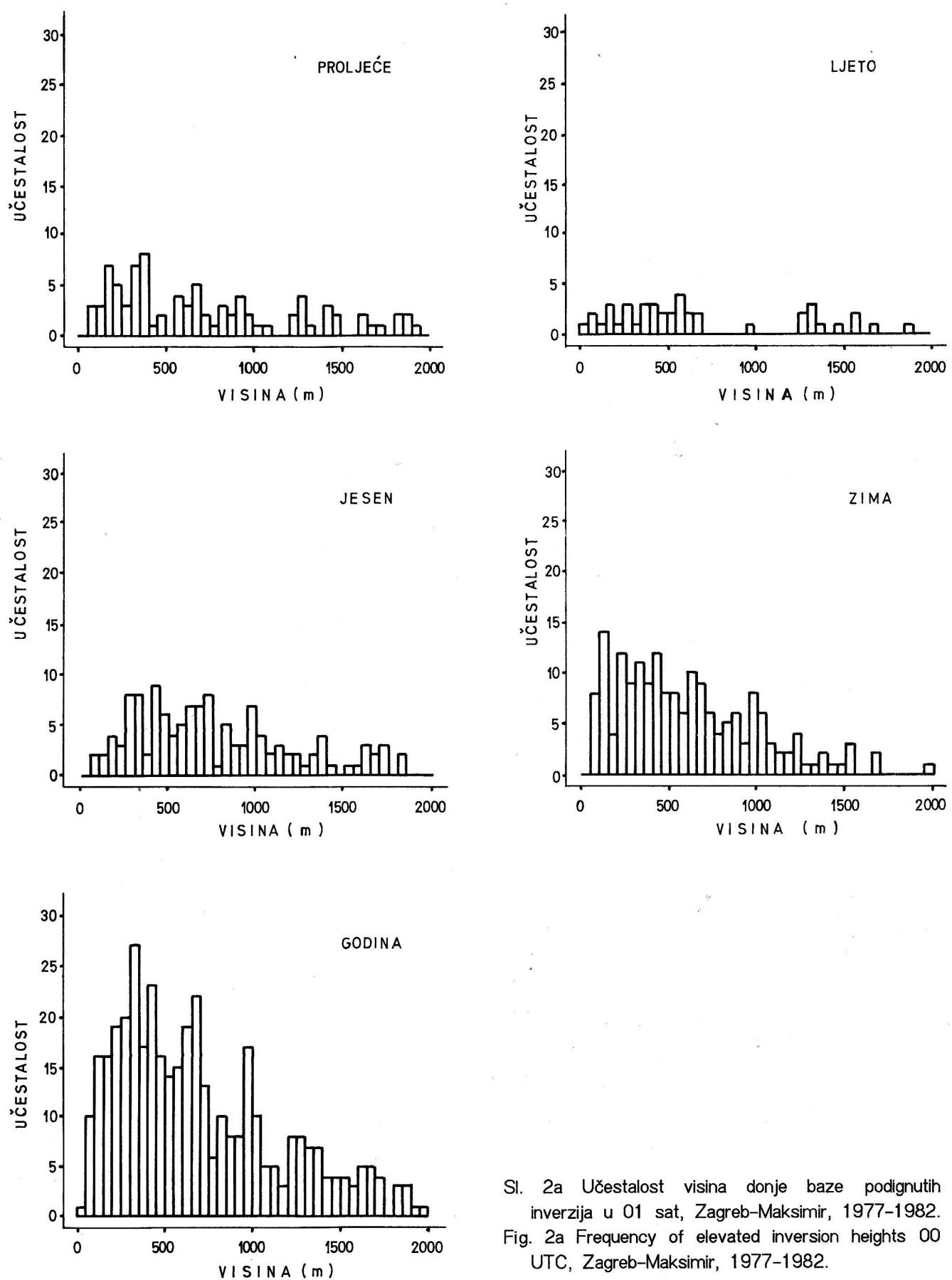
Visina sloja miješanja je parametar s tipičnim dnevnim i godišnjim hodom. Od izlaza Sunca započinje termički uvjetovan rast visine sloja miješanja koji istovremeno prati razbijanje noću stvorenih inverzija. U toj fazi razvoja pa sve do potpunog razbijanja

Tab. 3. Visina sloja miješanja (m) u 01 i 13 sati, Zagreb-Maksimir 1977-1982.

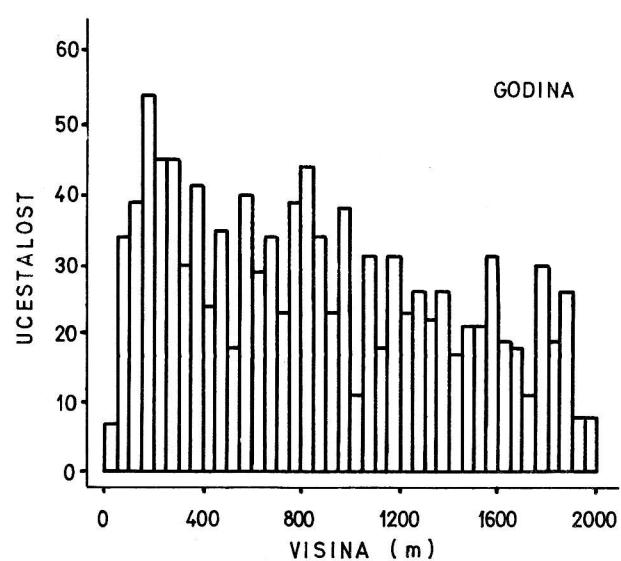
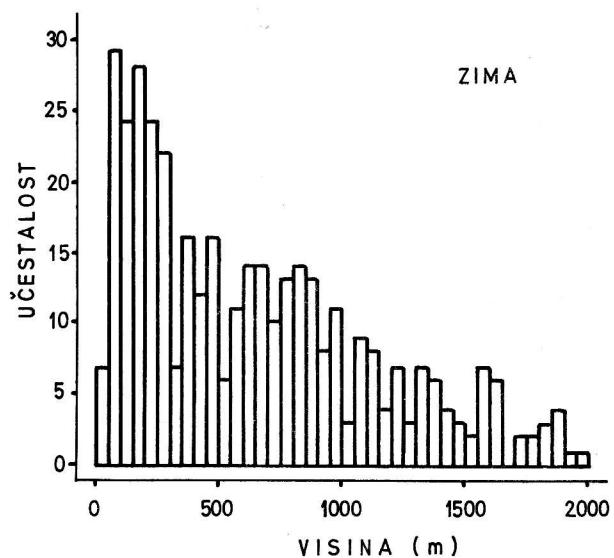
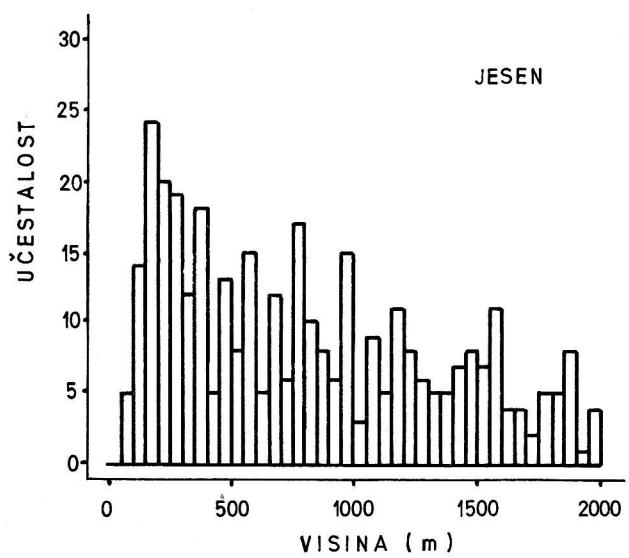
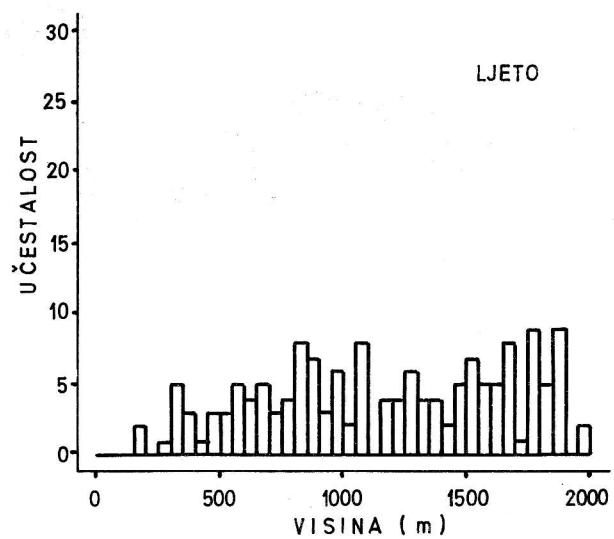
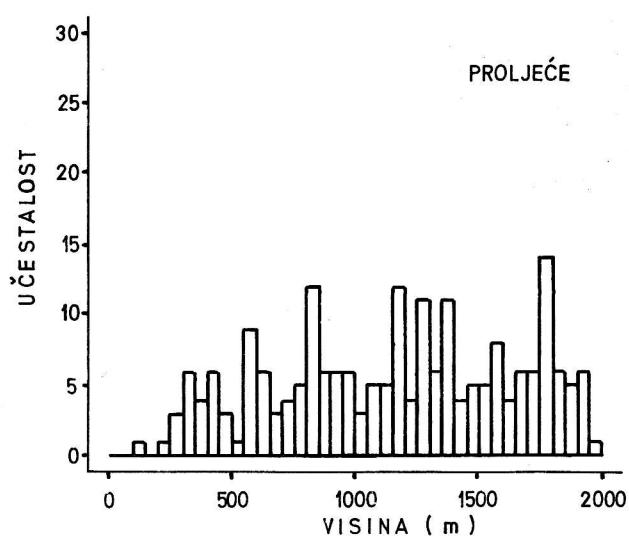
Tab. 3. Visina sloja miješanja (m) u 01 i 13 sati, Zagreb-Maksimir 1977-1982.

01 sat	Proljeće	Ljeto	Jesen	Zima	Godina
Broj slučajeva (N)	25	11	34	63	133
Srednjak	151	212	135	169	160
Median	100	100	100	100	100
Mod					
Standardna devijacija	127	182	101	166	146
Minimum	100	80	20	50	20
Maksimum	620	580	570	780	780
Maksimum-Minimum	520	500	550	730	760
Donji kvartil	100	100	100	100	100
Gornji kvartil	100	440	100	120	100
Razlika kvartila	0	340	0	20	0

13 sati	Proljeće	Ljeto	Jesen	Zima	Godina
Broj slučajeva (N)	542	540	544	540	2102
Srednjak	763	905	443	243	588
Median	760	910	315	100	470
Mod					
Standardna devijacija	573	578	441	341	557
Minimum	0	0	0	0	0
Maksimum	2000	2280	1870	1650	2280
Maksimum-Minimum	2000	2280	1870	1650	2280
Donji kvartil	140	460	0	0	100
Gornji kvartil	1200	1335	770	370	1000
Razlika kvartila	1060	875	770	370	900

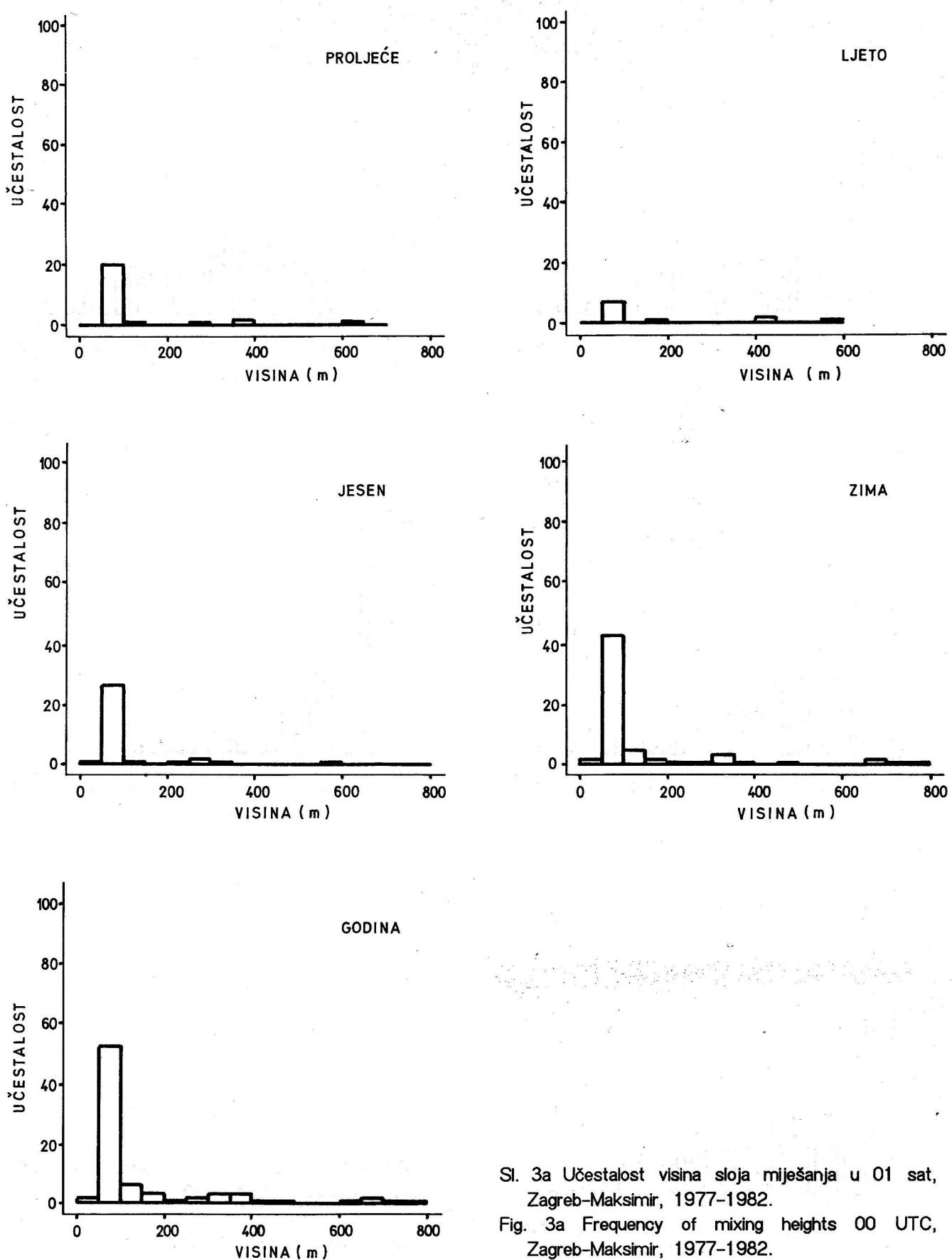


Sl. 2a Učestalost visina donje baze podignutih inverzija u 01 sat, Zagreb-Maksimir, 1977-1982.
Fig. 2a Frequency of elevated inversion heights 00 UTC, Zagreb-Maksimir, 1977-1982.



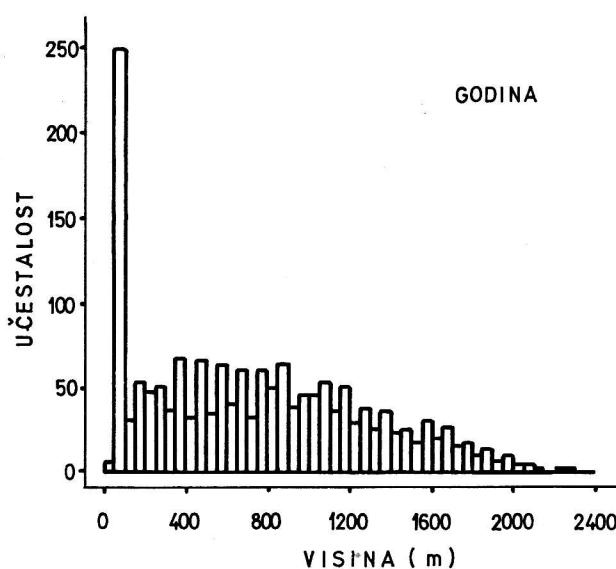
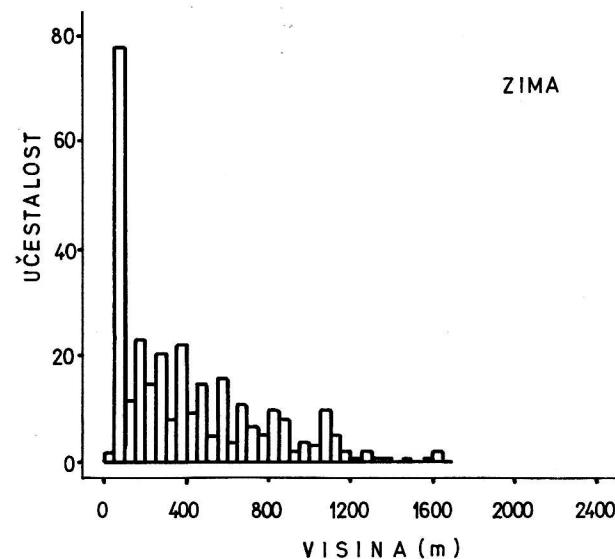
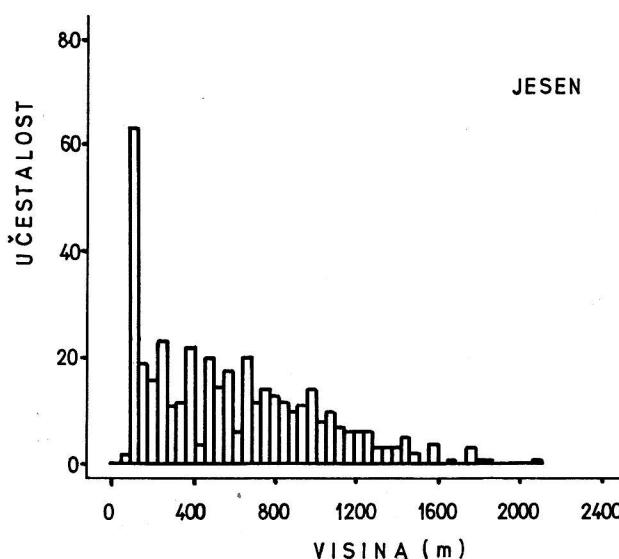
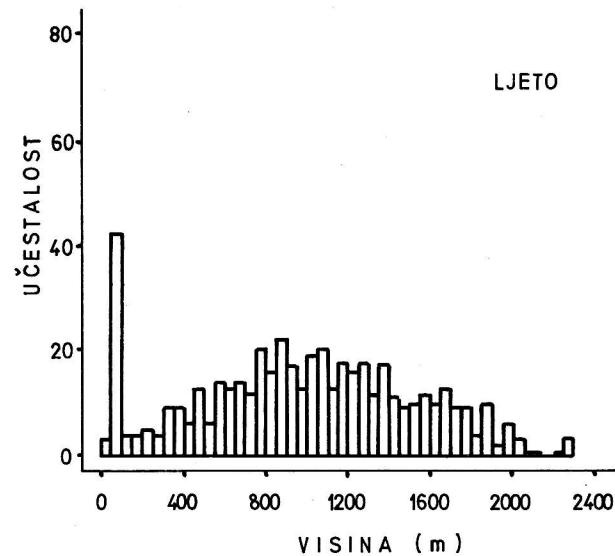
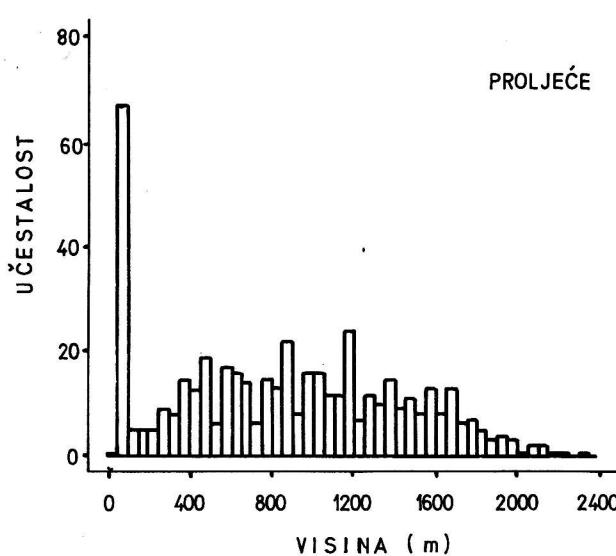
Sl. 2b Učestalost visina donje baze podignutih inverzija u 13 sati, Zagreb-Maksimir, 1977-1982.

Fig. 2b Frequency of elevated inversion heights 12 UTC, Zagreb-Maksimir, 1977-1982.



Sl. 3a Učestalost visina sloja miješanja u 01 sat, Zagreb-Maksimir, 1977-1982.

Fig. 3a Frequency of mixing heights 00 UTC, Zagreb-Maksimir, 1977-1982.



Sl. 3b Učestalost visina sloja miješanja u 13 sati,
Zagreb-Maksimir, 1977-1982.

Fig. 3b Frequency of mixing heights 13 UTC,
Zagreb-Maksimir, 1977-1982.

inverzije visina sloja turbulentnog miješanja podudara se s visinom donje baze podignute inverzije, sve dok podignuta inverzija ne nestane. Prema tome razvoj visine sloja miješanja na specifičan način odražava transformacije termičke strukture atmosfere od stabilne atmosfere noću do neutralne ili labilne u podnevnim satima. Radio-sondažim mjerenjima u 13 sati dobije se podatak o visini sloja miješanja u vrijeme njegovog maksimalnog razvoja. Međutim, o karakteristikama tog parametra u uzlaznoj i silaznoj granici njegovog dnevnog hoda ne postoje redovito mjereni podaci. Što se tiče godišnjeg hoda visine sloja miješanja u toplog dijelu godine dominiraju veće visine a u hladnom obratno, manje (tab. 3 i sl. 3a i 3b).

Statistikom visine sloja miješanja na temelju radio-sondažih mjerena na opservatoriju Zagreb-Maksimir, a u promatranom razdoblju (1977-1982) upotpunjuje se poznavanje strukture graničnog sloja atmosfere nad Zagrebom (tab. 3 i sl. 3a i 3b). Naime, u hladnom dijelu godine i noću, kada u najdonjim slojevima grada Zagreba dominiraju inverzije, najmanja je vjerojatnost za pojavljivanje sloja miješanja, a ako se i formira ostaje plitak osim u iznimnim situacijama. Tako se i na drugi način izražava činjenica da je u mjesecima hladnog dijela godine (naročito zime), čak i na dane bez inverzija, turbulentija slab i ograničena samo na prvi nekoliko stotina metara iznad grada (tab. 3 i sl. 3b), kao posljedica malog primjeka radijacione energije Sunca.

Danju, osobito ljeti, radijacijski režim (vedri, sunčani dani) generira i održava jaku turbulentnu razmjenu pa su podnevne visine sloja miješanja češće ($> 50\%$ slučajeva) iznad 1000 m nego li ispod (tab. 3 i sl. 3b). Dakle, struktura graničnog sloja atmosfere toplog dijela godine (osobito ljeta) je takva da omogućuje danju turbulentnu razmjenu ne samo do vrhova Medvednice, nego i znatno iznad.

3. Zaključak

Statistička analiza prizemnih i podignutih inverzija s jedne strane i visine sloja miješanja s druge opisuje termičko-dinamičku

strukturu atmosfere nad Zagrebom u razdoblju 1977 do 1982. godine.

Godišnja frekvencija svih noćnih inverzija (prizemnih i podignutih) je vrlo velika i iznosi ukupno oko 90 % dana. Perzistencija najnepovoljnijih inverzijskih situacija sa minimalnom turbulentijom tipična je isključivo za hladne mjeseca godine. Nasuprot tome intenzivna turbulentna razmjena, koja se izražava visinom sloja miješanja, karakteristična je za labilnu atmosferu toplog dijela godine i odvija se u sloju čije dimenzije najčešće prelaze vrh Medvednice.

Literatura

- Bennett E., Sedefian L., 1980: A Comparison of Turbulence Classification Schemes. *Atm Env.*, **14**, 741-750.
- Bolanča Z., Hrabak-Tumpa G., Katušin Z., Lončar E., Pleško N., Poje D., Šinik N., 1974: Ovisnost zagadenosti zraka u Zagrebu o meteorološkim faktorima, *Rasprave i prikazi* **11**, RHMZ SRH, Zagreb.
- Gajić-Čapka M., 1982: Variabilnost prosječnog oborinskog režima šire zagrebačke regije, *Rasprave*, **17**, RHMZ SRH, Zagreb, 23-40.
- Gajić-Čapka M., Čapka B., 1985: Analiza ljetnih oborina na području Zagreba, *Rasprave*, **20**, RHMZ SRH, Zagreb, 31-40.
- Gajić-Čapka M., 1989: Karakteristike kratkotrajnih oborina za vrijeme poplava na širem zagrebačkom području ljeti 1989. godine. Savjetovanje: Nagle poplave - uzroci i posljedice (JUSOP '89), Kopaonik, 19-21. 12. 1989, Zbornik radova, 15-20.
- Hanna S.R., Briggs G.A., Deardorff J., Egan B.A. Gifford F.A., and Pasquill F., 1977: Summary of Recommendations Made by the AMS Workshop on Stability Classification Schemes and Sigma Curves, *Bull. Am. Meteor. Soc.* **58**, 1305-1309.
- Holzworth G.C., 1967: Mixing Depths, Wind Speeds and Air Pollution Potential for Selected Locations in the United States. *Jour. of App. Meteor.* **6**, 1039-1044.
- Lončar E., 1981: Metoda određivanja satnih vrijednosti sloja miješanja, *Rasprave*, **16**, RHMZ SRH, Zagreb 35-46.
- Mitchell E.A., 1982: A Comparison of Short-Term Dispersion Estimates Resulting from Various At-

- mospheric Stability Classification Methods. Atm. Env., **16**, 765-773.
- Wolyn P.G. McKee T.B., 1989: Deep Stable Layers in the Intermountain Western United States. Month. Weat. Rev., **117**, 461-472.

Summary

A statistical analysis of surface inversions, elevated inversions and mixing heights over Zagreb region has been performed by means of radiosonde observations at Zagreb - Maksimir at 00 and 12 UTC (1977-82). It gives a rough presentation of thermodynamical structure of Zagreb atmosphere baundary layer. Annual frequency of surface inversions at 00 UTC amounts to 70 %, it is only 5 % at 12 UTC in the colder part of a year while those ones of elevated inversions are 20 % at night and up to 59 %

in the daytime. During all seasons the surface inversions most frequently reach the height of about 100 m. Height surface inversions (400-1 260 m) are winter characteristics occuring in 10 % of all cases and having a persistency up to several days. Elevated inversion heights show a considerable seasonal and diurnal variability with their lower basis being much lower during the colder part of a year. Also, annual frequency of all night inversions (surface and elevated) is fairlys great being about 90 %. The most unfavorable inversions with a minimal turbulence appear to be persistent only during colder months of year. On the contrary, an intensive turbulent exchange accompanied by the mixing heights increase and unstable stratification during warmer part of a year may occupy an atmospheric layer which dimensions often surmount Medvednica top.