

PROGNOZA RAZBIJANJA INVERZIJE NA PODRUČJU
GRADA ZAGREBA

Edita LONČAR
Republički hidrometeorološki zavod SRH, Zagreb

551.509.7

POVZETEK

U ovom radu prikazana je statistika vremenskih stanja u kojima dolazi do stvaranja prizemnih i podignutih inverzija na području grada Zagreba.

Osim toga ispitani su i oni procesi u atmosferi, koji dovode do razbijanja prizemnih inverzija pri čemu se u toku dana javljaju maksimalne prizemne koncentracije SO_2 .

Na bazi ispitanih meteoroloških parametara izradjena je metodika za prognozu razbijanja prizemnih inverzija, koja implicite odgovara prognozi maksimalnih prizemnih zagadjenja zraka.

TEMPERATURNE INVERZIJE

Sa aspekta difuzije plinova u atmosferi inverzioni slojevi su obilježeni sa zanemarivo malom difuzijom u vertikalnom smjeru. To ima za posljedicu gomilanje polutanata u visini izbacivanja dimnih plinova.

Prizemni inverzioni sloj definiran je porastom temperature počevši od tla (donja baza inverzije B_1) pa do neke visine H koja se zove vrh inverzije ili visina gornje baze (granice) inverzije B_2 . Razgradnja ili razbijanje takvog inverzionog sloja počinje zagrijavanjem zraka od tla na račun primljene sunčeve radijacije. Pri tom se vertikalni profil temperature transformira i dolazi do pada temperature s visinom. Proces razbijanja inverzije je postepen, te istodobno egzistira donji sloj s padom temperature, statičkom nestabilnošću i turbulentnim mješanjem, a iznad njega stabilan inverzioni sloj čija donja baza B_1 nije više tlo, nego se nalazi u nekoj visini H_1 . Tako je stvoren novi oblik inverzije, "inverzija u visini", koji se naziva i "podignuta inverzija".

Prema rezultatima ispitivanja navedenim u literaturi, a izvršenim i kod nas /12/ najveće koncentracije zagadjenja pri tlu poklapaju se sa slučajevima podignutih inverzija. Naime, u dijelu atmosfere ispod podignute inverzije postoji znatna vertikalna difuzija prema dolje, ali istovremeno zanemarivo mala prema gore. Prema tome, količine polutanata nagomilane u visini difundiraju samo prema tlu uvjetujući tu ekstremno velika zagadjenja. Potpunom transformacijom vertikalnog profila temperature odnosno razbijanjem i podignute inverzije uspostavlja se vertikalna difuzija u vis, pa se polutanti nekog izvora šire unutar većeg prostora zbog čega se smanjuju prizemne koncentracije zagadjenja. Prema tome posto-

janje, početak, trajanje i svršetak maksimalnih prizemnih koncentracija vezani su uz meteorološke prilike, koje prate razbijanje prizemne inverzije ili još točnije stvaranje podignute inverzije čija donja baza nije suviše nisko. Inverzije u visini javljaju se i kao posljedica nekih drugih procesa (spuštanje zraka u anticikloni, advekcija toplog zraka u visini, prodori hladnog zraka u plitkom sloju uz tlo), ali za problem ekstremnih (maksimalnih) zagadjenosti zraka značajne su samo one, čija je donja baza iznad nivoa na kojem se momentalno nalaze izbačeni dimni plinovi konkretnog dimnjaka.

Vjerojatnost nastupa prizemnih inverzija

Problem je razmatran za one izvore zagadjenja, čija je visina 80 do 100 m. U vezi s time u razdoblju 1971-1973. ispitivane su sve one prizemne inverzije čiji se vrh nalazi u sloju od 100 do 500 m visine. Kolektivu prizemnih inverzija pridružene su i one podignute inverzije čija se donja i gornja baza nalaze u već navedenom sloju od 100 do 500 m visine.

Relativna čestina takvih inverzija izražena u % broja dana konkretnog mjeseca prema radio-sondažnim podacima opservatorija Zagreb-Maksimir u razdoblju 1971-1973. prikazana je za svaki mjesec i godinu u tabeli 1.

Tabela 1 - Vjerojatnost pojavljivanja prizemnih i podignutih inverzija (baze inverzija u sloju 100 do 500 m nad tlom)
Opservatorij Zagreb-Maksimir 1971.-1973.

Prizemne inverzije 01 h

Mjes.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God
P. %	25	26	24	24	45	33	39	38	41	40	38	31	34

Podignute inverzije 01 h

Mjes.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God
P. %	8	5	3	-	2	2	3	2	-	3	3	3	3

Podignute inverzije 13 h

Mjes.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God
P. %	17	8	2	2	-	-	-	1	-	3	31	15	7

Ovaj kolektiv sadrži samo oko 50% od svih prizemnih inverzija, koje se noću stvaraju na opservatoriju Zagreb-Maksimir /10/.

Procenat podignutih inverzija noćnih i dnevnih (01 i 13 sati) u hladnom dijelu godine je priličan, dok se u toplom dijelu godine može zanemariti.

Vremenske situacije i inverzije

Nakon zalaza Sunca, zbog emisije Zemljine dugovalne radijacije započinje i stvaranje prizemne inverzije zbog hlađenja tla i uz njega ležećih slojeva zraka. Od tada pa do izlaza Sunca (kada je razvoj inverzije praktički zaključen) ne samo stabilnost konkretnog inverzionog sloja nego čak i njegovo postojanje ovise prvenstveno o intenzitetu strujanja i količini naoblake. Preko ova dva varijabilna meteorološka parametra inverzije ovise o odgovarajućim vremenskim stanjima.

Prema tome utvrđen je skup vremenskih situacije (tipova vremena) u kojima se kod nas javljaju prizemne inverzije.

Tipovi vremena prema tipizaciji D. Poje /9/ koji se javljaju nad našom zemljom mogu se podijeliti u 4 grupe. Području visokog tlaka pripadaju anticiklona (V), greben (g) i most visokog tlaka (mv), a u područje niskog tlaka ubrajaju se osim ciklone (N) i doline niskog tlaka (Dol). Situacije s malim gradijentom tlaka označene su s Ba i Bc, a slučajevi gotovo prvocrtnih izobara prema smjeru strujanja obilježavaju se kao stanja slijedećim smjerova: N, NE, E, SE, S, SW, W i NW.

Svakom slučaju "specijalne" prizemne inverzije (gornja baza inverzije nalazi se u sloju od 100-500 m visine), koja se u razdoblju 1971-1973. pojavila u 01 sat pridružen je tip vremena istoga jutra u 7 sati.

Iz slike 1 je očito, da se "specijalne prizemne inverzije" ne pojavljuju kod svakog vremenskog stanja, koje je tipično za naše krajeve. Tipovi vremena, koji pripadaju području visokog tlaka (V, g, mv) i oni sa vrlo malim gradijentom tlaka (Ba, Bc) pogoduju stvaranju noćnih prizemnih inverzija. Čestine prizemnih inverzija koje se u promatranom kolektivu susreću kod tipova vremena niskog tlaka dosta su velike (N i Dol). Stvaranje tih inverzija češće je vezano uz advekciju (nadiranje) toplog zraka u visini uz prisutnost oblačnog sloja, nego li uz radijaciono ohlađivanje prizemnog sloja zraka pri vedrom nebu.

Na slici 2 prikazana je vjerojatnost pojavljivanja prizemnih inverzija također kao funkcija tipa vremena, ali posebno za noći sa srednjom količinom naoblake $\bar{N} \leq 2/10$, a posebno za slučajeve s $\bar{N} > 2/10$, ili noći s maglom (srednja količina naoblake N odnosi se na period od zalaza Sunca, pa zaključno do vremena radio-sondažnog mjerenja temperature u 01 sat). Na taj se način pokazalo, da su prizemne inverzije kod anticiklonih tipova vremena (osim grebena) vjerojatnije uz vedro ili malo oblačno vrijeme ($\bar{N} \leq 2/10$), nego li onda, kada je umjereno ili potpuno oblačno. Naprotiv, kod tipova vremena koji pripadaju području niskog tlaka češće su prizemne inverzije u oblačnim noćima.

Brzina vjetra u prizemnom sloju bitna je za stvaranje prizemnih inverzija. Za svaki slučaj prizemne inverzije stvorene noću određena je srednja brzina vjetra za sloj od tla do vrha inverzije uvažavajući i brzinu vjetra u visini 100 m nad tlom.

U skupu radijacionih inverzija ($\bar{N} \leq 2/100$) srednja brzina vjetra u inverzionom sloju bila je uvijek manja od 5,0 m/sek. Pri tom se situacija s $\bar{V} \leq 2,0$ m/sek javlja u 70% slučajeva, a s $2,0 < \bar{V} < 5,0$ m/sek u 30% slučajeva.

Srednja brzina vjetra u inverzionom sloju uz $\bar{N} > 2/10$ pokazuje znatno veći rasap (susreću se \bar{V} i do 8 m/sek), iako su i ovdje češći slučajevi s $\bar{V} \leq 2,0$ m/sek (oko 60%).

Prognoza vremena za slijedeći dan (noć) zahtjeva i prognozu tipa vremena za traženi vremenski period. Poznavajući vezu između tipova vremena i prizemnih inverzija olakšano je prognoziranje istih.

NEKI METEOROLOŠKI PARAMETRI O KOJIMA OVISI RAZBIJANJE PRIZEMNE INVERZIJE

Razbijanje prizemne inverzije ovisi o količini energije, koju tlo primi od Sunca i o prenosu iste u atmosferu (do visine gornje granice inverzionog sloja).

Globalna radijacija i naoblaka

Ukupna radijaciona energija (direktna i difuzna), koju od Sunca (fluks Sunčane energije) prima jedinična horizontalna površina, zove se globalna radijacija.

Za probleme prognoze razbijanja prizemne inverzije potrebno je poznavati dnevni hod globalne radijacije i to u ovisnosti u dobu godine (po mjesecima) i o količini i vrsti naoblake.

U vezi s time za svaki dan razdoblja 1971-1973. određena je srednja količina visokih, srednja količina srednjih i srednja količina niskih oblaka i to posebno za dio dana od izlaza Sunca do 13 sati (vrijeme kada se obavlja radio-sondažno mjerenje temperature), a posebno za poslije podne od 13 sati pa do zalaza Sunca. Zatim su satne vrijednosti globalne radijacije mjerene na Opservatoriju Zagreb-Grič različito oblačnih dana međusobno uspoređivane, da bi se odredio kriterij za grupiranje dana sa približno istim količinama primljene Sunčane radijacione energije. Na taj način zadovoljavajuće rješenje je postignuto grupiranjem dana sa srednjom količinom naoblake kako slijedi: $\bar{N} \leq 2/10$, $2/10 < \bar{N} < 8/10$ i $\bar{N} \geq 8/10$. Treba napomenuti, da srednja količina visokih oblaka manja od 5/10 nije bitno djelovala na primljenu količinu globalne radijacije, pa oblake Cirrose ispod 5/10 ne treba ni uvažavati.

Prema tome izračunat je srednji dnevni hod globalne radijacije po mjesecima za Opservatorij Zagreb-Grič razdoblje 1971-1973. (tabele 2, 3 i 4).

PROGNOZA RAZBIJANJA PRIZEMNIH INVERZIJA

Prognoza razbijanja prizemnih inverzija promatra se za one slučajeve, kada nije bilo advekcije.

Takvi uvjeti realizirani su kod anticiklona, Ba i Bc tipova vremena zbog njihove stacionarnosti /12/ i slabog strujanja uz pretežno vedro nebo ($\bar{N} \leq 2/10$).

Razbijanje prizemne inverzije je proces postepene transformacije vertikalnog profila temperature u inverzionom sloju. Poslije izlaza Sunca započinje porast prizemne temperature (mjereno na 2 m visine) kao posljedica prenosa topline od tla u atmosferu zračenjem, vodjenjem i turbulencijom. U početnoj fazi dominira prenos topline zračenjem i vodjenjem, a zahvaća "plitke" slojeve zraka uz tlo. Odgovarajući porast temperature je velik. To dovodi do promjene vertikalnog gradijenta temperature u pripadnom ("plitkom") sloju, a i pojave termičke turbulencije, kada se postigne vrijednost superadijabatskog gradijenta temperature. Čim se uspostavi transport topline turbulentnim miješanjem toplina se iz slojeva zraka neposredno uz tlo brže odvodi u više slojeve, ali koji se još uvijek nalaze ispod gornje granice inverzije.

Istodobno gornja granica inverzionog sloja zbog više temperature od one što je imaju slojevi ispod i iznad nje, zrači energiju i pri tom se hladi.

Prema tome inverzioni sloj se grije odozdo i odozgo, pa se u danom momentu temperaturna raspodjela bitno promijeni to jest temperatura u cijelom sloju pada s visinom i time je definitivno uklonjena inverzija (uključujući u toku procesa stvoreni oblik "podignute inverzije"). Ukoliko su stvoreni uvjeti labiliteta, $\frac{\partial \theta}{\partial z} < 0$, gdje je $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ vertikalni gradijent potencijalne temperature), pojačava se turbulentni prijenos topline u atmosferu zbog čega se smanjuje porast temperature u prizemnom sloju. To je razlog, da upravo u vrijeme kada tlo prima najveće količine Sunčeve radijacione energije (vidi tabele 2, 3 i 4) brzina prirasta temperature je smanjena.

U nedostatku direktnih mjerenja profila temperature i turbulencije u vrijeme razbijanja inverzije prijednevni hod prizemnih temperatura može biti pokazatelj uspostavljanja intenzivnijeg miješanja odnosno i kompletnog razbijanja inverzije.

Opisani mehanizam razbijanja prizemne inverzije (radijacionog tipa) biti će ostvaren u potpunosti ili samo djelomice ovisno o:

1. karakteristikama konkretne prizemne inverzije,
2. količini globalne radijacije,
3. transportu topline u atmosferu.

Karakteristike svake noćne inverzije utvrđuju se radio-sondažnim mjerenjima temperature u 01 sat.

Na slici 3 prikazana je prizemna inverzija od 4. 9. 1973. u 01 sat na opservatoriju Zagreb-Maksimir. Temperatura pri tlu T bila je 16,8°C, na vrhu inverzije (gornja granica) T₁ iznosila je 3,2°C/100 m, a debljina inverzionog sloja bila je 270 m (odnosno 35 mb).

Da bi se noćna inverzija navedenih karakteristika u toku dana razbila potrebno je, da količina globalne radijacije povisi prizemnu temperaturu toliko, da se od tla pa do vrha inverzije uspostavi bar suhoadijabatski gradijent temperature /4/, /5/, /6/ i /13/.

Prizemna temperatura, koja zadovoljava taj zahtjev zove se temperatura razbijanja inverzije T_R. Toplina, koja je potrebna, da prizemna temperatura poraste od T na T_R, proporcionalna je površini trokuta TT_RT₁ i moguće ju je odrediti pomoću emagrama /1/.

Na prikazanom emagramu površini od 1 cm² odgovara količina toplinske energije od 22 cal cm⁻². Izračunavši površinu trokuta i izrazivši je u cal cm⁻² riješen je prvi korak u prognozi razbijanja prizemne inverzije. Naime, određena je količina toplinske energije Q potrebna za razbijanje inverzije.

Da bi se ubrzalo određivanje količine topline Q iz emagrama potrebne za razbijanje inverzije izradjen je nomogram (slika 4). Na os apscisa nanese su razlike temperatura T_R-T (baza trokuta), a na ordinati nalaze se visine (debljine) inverzije D_i izražene u milibarima (visina trokuta). Krivulje na nomogramu predstavljaju traženu količinu topline Q (u cal cm⁻²), koja je potrebna za razbijanje prizemne inverzije.

Pošto prizemna temperatura u 01 sat (T) od vremena kada je obavljano radio-sondažno mjerenje temperature do izlaza Sunca u pravilu još dalje pada, to se mijenja vertikalni gradijent temperature $\frac{\partial T}{\partial z}$ inverzionog sloja, a zbog toga i veličina baze trokuta. Visina se inverzije u tom periodu noći ne mijenja bitno.

Zbog toga se temperatura T mjerena u 01 sat zamjenjuje s minimalnom temperaturom T_{min}, koja se postiže oko izlaza Sunca, dakle u vrijeme maksimalnog razvoja prizemne inverzije.

Analiza razlika temperatura T₀₁(T) s T_{min} neophodna je ne samo za vedre nego i za oblačne noći (\bar{N} se odnosi na period od radio-sondažnog mjerenja do izlaza Sunca). U prosjeku je ta razlika iznosila 2 do 3°C, a u ekstremnim slučajevima kretala se od 0,1 pa do 8,8°C.

Slijedeći korak u prognozi je uspoređivanje količine energije utvrđene na naprijed opisani način (iz emagrama primjenom nomograma) sa očekivanom energijom koju tlo prima od Sunca navedenom u tabelama 2, 3 i 4. Dakle, pomoću tabela "Srednjeg dnevnog hoda globalne radijacije u Zagrebu" doznaje se, da li zahtjevanu energiju za razbijanje inverzije tlo uopće prima i do kojeg vremena je ona primljena. Vrijeme t_Q, kada je primljena potrebna Sunčeva radijaciona

energija, ne odgovara još vremenu razbijanja inverzije t_R . Naime, potrebno je još neko vrijeme Δt , da se posljednje potrebne količine globalne radijacije prenesu od tla u atmosferu.

Pretpostavlja se, da vrijeme razbijanja prizemne inverzije koincidira sa vremenom kada temperatura zraka na 2 m visine postigne vrijednost temperature razbijanja T_R .

Ova se pretpostavka nije mogla direktno ispitati, jer ne postoje istovremena mjerenja temperature sa visinom. Naime, kako je u početku ovog poglavlja istaknuto, hladjenje gornje granice inverzije i turbulentni prijenos topline ubrzavaju razbijanje inverzije, pa je moguće da ono u nekim slučajevima nastupa nešto prije, nego što prizemna temperatura postigne vrijednost temperature razbijanja T_R .

Iz svega naprijed iznesenog slijedi da prognoza razbijanja prizemne inverzije obuhvaća slijedeće:

A) Prognozu stvaranja prizemne inverzije noću:

- Na bazi prognoziranog tipa vremena (za slijedeći dan u 01 ili 07 sati) i
- prognozirane količine naoblake (srednje i niske) za noć, prognozirati da li će doći do stvaranja prizemne inverzije.

B) Prognoza razbijanja prizemne inverzije za slučajeve kada se ne očekuje advekcija niti toplog niti hladnog zraka (situacije s advekcijom zahtevaju još dodatan korak, koji neće biti prikazan ovdje).

- Iz mjerenja temperature u 01 sat na opservatoriju Zagreb-Maksimir (radio-sondažni podaci) utvrditi, da li je nad Zagrebom postojala prizemna inverzija sa gornjom granicom u sloju od 100 do 500 m visine.
- Odrediti karakteristike konkretne prizemne inverzije (pomoću emagrama): visinu inverzije H (odnosno debljinu D_i u mb), temperaturu razbijanja T_R i minimalnu temperaturu T_{min} ($T_R - T_{min}$ u $^{\circ}C$).
- Odrediti količinu globalne radijacije (pomoću nomograma slike 4), koja je potrebna za razbijanje konkretne inverzije.
- Utvrđiti da li je potrebna količina globalne radijacije uopće raspoloživa (do 13 sati) vodeći računa o srednjoj količini naoblake u tom istom periodu vremena (od izlaza Sunca do 13 sati). Za to koristiti tabele "Srednjeg dnevnog hoda, globalne radijacije u Zagrebu". Osim toga, pomoću istih tabela ocijeniti vrijeme t_Q , kada će potrebna Q (količina globalne radijacije) biti primljena.

Ispitivanje je pokazalo, da količinu globalne radijacije potrebnu za razbijanje ovih specijalnih inverzija (gornja granica prizemne inverzije između 100 i 500 m) tlo nad Zagrebom najčešće prima. Bilo je samo nekoliko slučajeva,

da potrebna količina Sunčeve radijacione energije nije bila raspoloživa i to u hladnom dijelu godine samo u situacijama s jakim inverzijama ($H > 160$ m, $T_R - T_{min} > 10^{\circ}C$) uz oblačno nebo nakon izlaza Sunca. U takvim uvjetima razbijanje inverzije je samo djelomično ili nije moguće uopće, te ona ostaje ili kao prizemna (uz tišinu ili vrlo slabe vjetrove pri tlu i uz malo vertikalno smicanje vjetra) ili bar kao podignuta inverzija pa je kao takvu treba i predvidjeti.

Da bi se ubrzao ovaj korak prognoze, za mjesec hladnijeg dijela godine izračunata je količina globalne radijacije primljene od izlaza Sunca do 13 sati (tabela 5).

Tabela 5 - Globalna radijacija ($cal\ cm^{-2}$) od izlaza Sunca do 13 sati, Zagreb-Grič, 1971-1973.

Sred. naoblaka	Mjesec	X	XI	XII	I	II	III
$\bar{N} < 2/10$		180	130	89	104	162	261
$2/10 < \bar{N} < 8/10$		166	92	70	81	134	183
$\bar{N} \geq 8/10$		72	48	27	34	56	85

Kada je količina globalne radijacije potrebna za razbijanje prizemne inverzije veća od vrijednosti navedenih u tabeli 5 u slučaju oblačnog neba i slabog strujanja treba očekivati zadržavanje prizemne inverzije, odnosno postojanje podignute inverzije ako vjetar nije slab i ako brzina vjetra s visinom raste (male vrijednosti Richardsonovog broja).

- Odrediti da li će prizemna temperatura do 13 sati postići vrijednosti temperature razbijanja T_R . Ispitivanjem je utvrđeno, da u pravilu, kada prizemna temperatura do 13 sati ne poraste do vrijednosti temperature razbijanja T_R , ne nastupa potpuno razbijanje prizemne inverzije, nego se stvara podignuta inverzija. Naprotiv u slučaju kada prizemna temperatura dosegne temperaturu razbijanja T_R prije 13 sati prizemna se inverzija potpuno razbije.

Za kontrolu prognoze razbijanja prizemne inverzije koristila su se mjerenja temperature u 13 sati (radio-sondažni podaci na opservatoriju Zagreb-Maksimir).

- Odrediti vrijeme postizavanja temperature razbijanja t_R iz dnevnog hoda prizme temperature. Testiranje da li vrijeme postizavanja temperature razbijanja T_R odgovara vremenu potpunog razbijanja inverzije nije bilo moguće učiniti jer odgovarajućih istovremenih mjerenja temperature s visinom (u ispitivnom razdoblju) u ovom gradu nema.

U slijedećem tekstu prikazat će se rezultati jedinih mjerenja temperature i vjetra sa visinom koja su obavljena u vrijeme razbijanja prizemne inverzije u Zagreb-Podsusedu.

Rezultati mjerenja Zagreb-Podsused od 4. do 6.9.1973

Jedina specijalna mjerenja razdiobe temperature i vjetra sa visinom kojima smo raspolagali, a koja su od 3. do 6. 9. 1973. g. obavljena na području Podsuseda, dala su dragocjene podatke o procesima u vezi razbijanja prizemne inverzije (slika 5).

Za cijeli period mjerenja karakteristično je:

- postojanje stacionarne anticiklone i
- odsutnost advekcije.

Na gornjem dijelu slike prikazani su vertikalni profili temperature u 01 i 13 sati na bazi radio-sondažnih mjerenja na opservatoriju Zagreb-Maksimir, a u 6, 7, 30 i 9, 30 sati na osnovu specijalnih mjerenja u Podsusedu. Proces razbijanja inverzije nije toliko lokalno uvjetovan, da ne bi bile dozvoljene usporedbe između navedenih profila temperature (Maksimir-Podsused).

Prvi dnevni profil temperature zraka (6 sati) pokazuje već bitnu transformaciju u svom najdonjem dijelu, pad temperature s visinom (prvih 50 m) i nižu vrijednost temperature na gonjoj granici inverzije od one što je bila registrirana za vrijeme noćnog radio-sondažnog mjerenja u Maksimiru. Za drugi vertikalni profil temperature karakteristična su velika kolebanja temperature s visinom i za državanje donje baze prve podignute inverzije na istoj visini od 50 m, kao što je to bilo još u 6 sati. U 9, 30 sati inverzija je bila potpuno razbita do visine od 150 m, nakon čega slijedi plitka (oko 50 m) slabo izražena podignuta inverzija. U 13 sati očito, inverzije više nema.

Na donjem dijelu slike prikazana su za ovaj problem samo najbitnija mjerenja vjetra s visinom i dio dnevnog hoda prizemne temperature mjerene također u Podsusedu. Od izlaza Sunca zanimljive su vremenske promjene smjera i brzine vjetra na svim visinama koje ilustriraju utjecaj Medvednice na režim strujanja na tom području. Pri samom tlu bilo je tiho ili su puhali slabi vjetrovi promjenljiva smjera.

Sa aspekta razbijanja inverzije značajne su promjene strujanja u vremenu od 10, 30 do 11, 30 sati. U 11 sati u cijelom promatranom sloju (do 500 m), uspostavljeno je strujanje iz istočnog kvadranta, a u 11, 30 sati brzine vjetra bile su istog iznosa u sloju debljine čak 300 m (od 30 do 310 m), što je tipično za vertikalni profil brzine vjetra u labilnoj atmosferi. Koristeći ove indirektno pokazatelje stabilnosti atmosfere ocjenjuje se, da se je inverzija potpuno razbila između 10, 30 i 11 sati.

Analizirajući dnevni hod prizemne temperature u Podsusedu (tab. 6) očito je da su i satni porasti temperature bili najveći do tog vremena.

Tabela 6 - Satne promjene temperature ($^{\circ}\text{C sat}^{-1}$) od 4 do 6.9.1973

Sat Dan	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14
4.	-0,2	2,8	4,4	2,8	2,2	2,7	1,4	0,6	1,0
5.	-0,1	2,0	4,1	3,0	3,0	1,6	0,8	0,8	1,2
6.	-0,2	2,0	3,6	2,6	2,6	1,8	1,0	-0,3	0,4

U konkretnom slučaju (4.9.1973.) za razbijanje inverzije registrirane u Zagreb-Maksimiru noću (sl. 5) potrebno je da se u toku priepodneva primi količina Sunčeve radijacije od 50 cal cm^{-2} . Prema stvarnim mjerenjima globalne radijacije (tabela 7) potrebna količina Sunčeve radijacije energije primljena je približno do 8, 30 sati (t_Q).

Temperatura razbijanja T_R (vidi sliku 3) prema emagramu iznosi 28,2. Prizemna temperatura postigla je tu vrijednost u Podsusedu i u Maksimiru oko 12 sati. Uvaživši mjerenja profila temperature i vjetra u Podsusedu i to na sve dane mjerenja (4. 5. i 6. 9. 1973.) očita je činjenica da je razbijanje prizemne inverzije nastupilo ranije nego li je prizemna temperatura postigla vrijednost T_R i to 4. 9. za oko 1 sat, 5. 9. za oko 1, 30 sati i 6. 9. također približno 1 sat.

Tabela 7 - Satne vrijednosti globalne radijacije Q ($\text{cal cm}^{-2} \text{ sat}^{-1}$) od 4. do 6. 9. 1973.

Zagreb-Grič

Sat Dan	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19
4.	1	10	25	39	55	67	71	71	67	59	43	27	11	1
5.	1	11	24	41	54	66	72	71	67	52	43	26	11	1
6.	1	10	25	40	5	65	71	71	67	50	43	27	11	1

Rezultati mjerenja u Podsusedu korišteni sa aspekta razbijanja prizemnih inverzija pokazuju, da vrijeme, kada prizemna temperatura postigne vrijednost temperature razbijanja T_R ne mora odgovarati i stvarnom vremenu potpunog razbijanja prizemne inverzije. Da bi se ispitivanje u tom smislu kompletiralo neophodno je na dane s prizemnom inverzijom obavljati mjerenja temperature s visinom u vrijeme njenog razbijanja.

TESTIRANJE METODE

Za testiranje metode izabrani su svi dani sa prizemnim inverzijama čije je gornja granica bila između 100 i 500 m nad tlom u periodu od siječnja do svibnja 1974. godine. Od 32 takve inverzije samo njih 15 stvoreno je u toku vedre ili malo oblačne noći. Preostalih sedamnaest nastalo je ili kao posljedica advekcije toplog zraka u visini ili su bile rezultat istovremenog djelovanja radijacionog hlađenja pri tlu i nadiranja toplog zraka u visini.

Inverzije ovog uzorka bile su vrlo različitih veličina što se vidi i iz količine toplinske energije Q potrebne za njihovo razbijanje (ordinate točaka \cdot i x -eva na slici 6). Temperature razbijanja inverzije T_R varirale su od $2,5^\circ\text{C}$ (u siječnju) do $21,8^\circ\text{C}$ (u svibnju) (slika 6).

Primjenivši metodu opisanu u točki 3 prognozirano je, da će prizemne inverzije registrirane radio-sondažnim mjerenjima temperature na opservatoriju Zagreb-Maksimir u 01 sat noću, potpuno se razbiti u 24 slučaja između 10 i 11 sati u I, II i III mjesecu, a od 8 do 12 sati u IV i V mjesecu.

Pri ovoj prognozi korisno su poslužile vrijednosti Richardsonovog broja izračunate posebno za 01 sat i posebno za 07 sati. Naime, u ovom je uzorku unatoč oblačnom vremenu poslije izlaza Sunca nastupilo potpuno razbijanje i "jačih" inverzija, kod kojih je vrijednost Richardsonovog broja (bilo u 01, bilo u 07 ili u oba termina) bila malena. Očito, da se stabilnost takvih inverzionih slojeva zbog znatnog vertikalnog smicanja brzine vjetra lakše narušava.

Prognoza, da će nastupiti potpuno razbijanje inverzije, koja je kontrolirana radio-sondažnim mjerenjima temperature u 13 sati ostvarila se u svim slučajevima (24 puta), iako ne postoji nikakva mogućnost, da se testira i vrijeme, kada je u toku prijedodnevni sati razbijanja inverzije stvarno nastupilo.

U 6 slučajeva prizemna temperatura nije do 13 sati postigla vrijednost temperature razbijanja T_R , a zbog malog iznosa Richardsonovog broja od 01 sat prognoziralo se nepotpuno razbijanje prizemne inverzije to jest stvaranje podignute inverzije.

U jednom slučaju (u siječnju) inverzija je bila toliko jaka, da količinu topline Q potrebnu za njeno razbijanje od 60 cal cm^{-2} pri oblačnom nebu tlo u I mjesecu uopće ne prima. Zbog malog Richardsonovog broja i ovdje se predvidjelo stvaranje podignute inverzije.

Inverzija od 1. II 1974. bila je izrazito stabilna zaključujući po količini topline Q (40 cal cm^{-2}) potrebnoj za njeno razbijanje i Richardsonovom broju, koji je bio neizmerno velik (☉) pa je prognozirano zadržavanje prizemne inverzije.

Od 7 prognoza o stvaranju podignute inverzije opravdalo ih se 5, a u 2 slučaja nastupilo je potpuno razbijanje prizemne inverzije. Naknadnom analizom ova dva slučaja ustanovilo se, da su advekcije hladnog zraka i promjene strujanja uvje-

tovale razbijanje ovih prizemnih inverzija. Prognoza o zadržavanju prizemne inverzije 1. II 1974. također je realizirana.

Na slici 6 prikazani su svi slučajevi ostvarenih i neostvarenih prognoza (kružnica unutar koje se nalazi slovo x) grafički i tabelarno.

Dakle, u ovom uzorku od ukupno 32 prognoze samo dva puta nije došlo do njene realizacije, što znači da je prognoza bila ostvarena u 94% slučajeva.

ZAKLJUČAK

Ovom studijom određena je metodika za prognozu prizemnih inverzija, koristeći meteorološke parametre od kojih su neki izrazito lokalno uvjetovani (globalna radijacija), pa je njena primjena vezana isključivo za područje grada Zagreba.

Nepostojanje podataka o vertikalnoj raspodjeli temperature i o promjenama prizemnih koncentracija SO_2 na temelju jednosatnih uzoraka u prijedodnevni satima ograničilo je mogućnosti ovog ispitivanja i kompletiranje same metode.

Primjenom u praksi trebalo bi uz izdavanje prognoze obavljati mjerenja temperature sa visinom u fazi razbijanja prizemnih inverzija i uvesti redovita mjerenja polusatnih ili jednosatnih koncentracija SO_2 bar na dva mjesta u gradu (s različitim nadmorskom visinom).

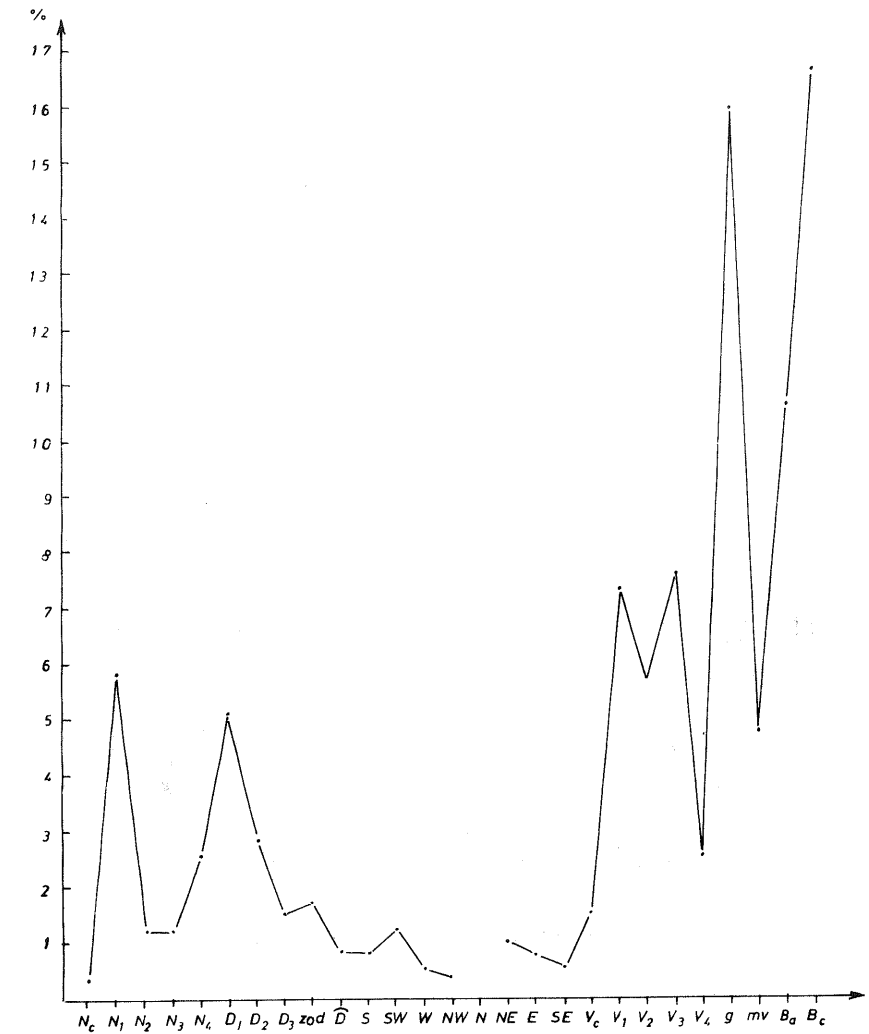
LITERATURA

- /1/ Barthram J.A. 1964: A diagram to assess the time of fog clearance, Met. Mag., Vol. 93, str. 51-56.
- /2/ Berljand M.E. 1974: Zaščita vazdušnoj sredy ot zagrjazneneja i issledovanija atmosfernih primessy, Trudy GGO Vypusk 344 (jubilarni zbornik) str. 209-231.
- /3/ Durst C.S. 1933: The breakdown of steep wind gradients in inversions, Quart. J.R. Met. Soc., Vol. 59, str. 131-136.
- /4/ Gold E. 1933: Maximum day temperatures and the tephigram, M.O. Professional Notes, Vol. 5, No 63, str 1-9.
- /5/ Jefferson G.J. 1950: Temperature rise on clear mornings, Met. Mag., Vol. 79, str. 33-41.
- /6/ Kennington M.A. 1961: An approach to the problem of the forecasting of fog clearance, Met. Mag., Vol. 90, str. 70-73.

- /7/ Lyons R., Panofsky H.A., Wollaston S. 1964: The critical Richardson number and its implications for forecast problem. Jour of App. Met. Vol. 3, str. 136-142.
- /8/ Penzar I. 1959: Globalna radijacija u Zagrebu na temelju 10-godinjega mjerenja. Geofizički institut, Radovi.
- /9/ Poje D. 1967: Makrovremenske situacije koje donose velike oborine u Gorskom Kotaru i Lici, Republički hidrometeorološki zavod SRH, Zagreb (Elaborat).
- /10/ Poje D. 1970: Studija meteoroloških uvjeta za lokaciju NTE na području Zagreba i Siska, Rep. hidrometeorološki zavod SRH, Zagreb (elaborat).
- /11/ Poje D. 1971: Einige Merkmale der Bodeninversionen über Zagreb, V Konferenz für Karpathen Meteorologie, Bucuressti-Romania, str. 233-238.
- /12/ Šinik, Poje, Pleško, Lončar, Katušin, Hrabak 1974: Ovisnost zagadjenosti zraka u Zagrebu o meteoroloških faktorima, Rep. hidrometeorološki zavod SRH, Rasprave i prikazi br. 11, Zagreb.
- /13/ Zverev A.C. 1968: Sinoptičeskaja meteorologija i osnovi predvičisenija pogodi, str. 522-534.
- /14/ Yutaka I. 1964: The evolution of temperature and velocity profiles during breakdown of a nocturnal inversion and a lowlevel yet, Jour. of Applied Met. Vol. 3, str. 70-82.

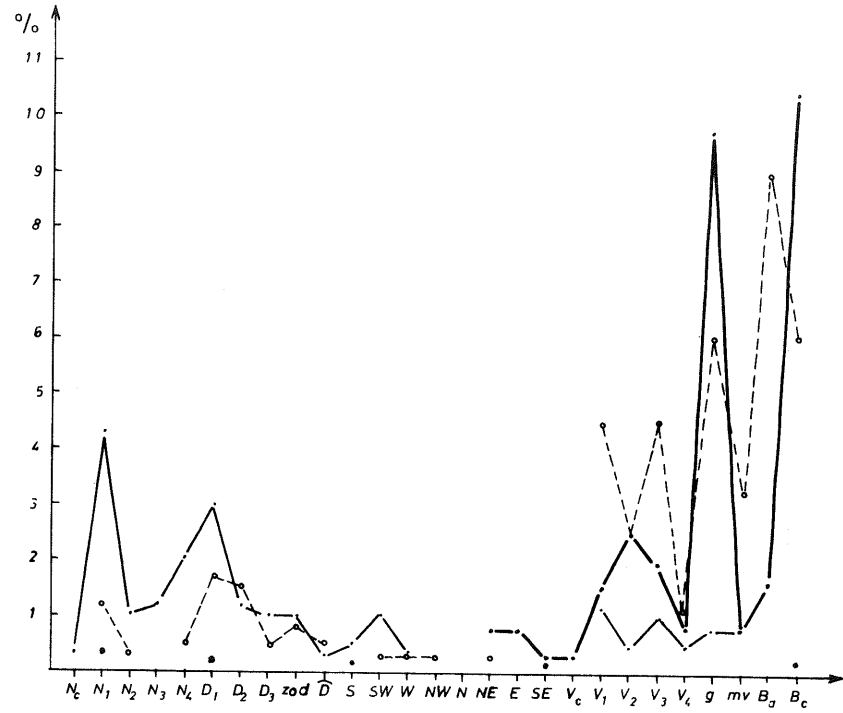
SUMMARY

This report comprises the statistics of weather types with a formation of surface and elevated inversions in the Zagreb region. Besides, the atmospheric processes have been analysed which cause the surface inversions breaking up and the resulting increase of SO₂ surface concentrations. The analysed meteorological parameters made the basis for a new method of forecasting the surface inversions break up - which implies the forecasting of maximum air pollution as well.



VJEROJATNOST POJAVLJIVANJA PRIZEMNIH INVERZIJA KOD RAZLIČITIH TIPOVA VREMENA, ZAGREB Maksimir 1971-1973. 01 h

Slika 1



VJEROJATNOST POJAVLJIVANJA PRIZEMNIH INVERZIJA KOD RAZLIČITIH TIPOVA VREMENA I KOLIČINA NAOBLAKE ($\bar{N} > 2/10$ —, $\bar{N} \leq 2/10$ ----, MAGLA —•—) ZAGREB Maksimir 1971-1973. 01h

Slika 2

GLOBALNA RADIJACIJA (cal cm⁻² sat⁻¹) NA DANE $S \leq \bar{N} \leq 1/10$
Srednji dnevni hod u razdoblju 1971-1973. god.

ZAGREB - GRIČ

Sat	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
4-5					0.87	1.52	1.14	0.16				
5-6				1.91	6.75	8.82	6.56	3.24	0.80			
6-7		0.42	2.73	10.73	18.99	21.85	17.84	13.03	7.39	0.75	0.12	
7-8	0.45	4.48	13.60	22.15	32.52	36.27	30.58	26.43	19.65	7.56	2.25	0.71
8-9	7.35	14.60	25.31	38.09	40.58	51.51	48.35	40.09	33.61	18.75	10.52	4.87
9-10	15.00	24.50	38.66	51.69	60.95	64.05	57.46	53.30	46.51	30.27	20.42	13.34
10-11	22.92	34.80	68.23	61.95	70.36	71.00	66.74	62.73	56.71	38.86	28.66	20.11
11-12	27.90	40.80	55.88	64.65	74.15	73.08	71.70	67.31	54.63	42.50	34.43	24.71
12-13	30.30	42.20	57.01	66.31	72.17	71.71	68.43	65.06	62.61	41.65	33.15	25.45
13-14	26.16	39.38	50.41	60.87	71.10	67.90	70.68	64.15	57.96	40.40	30.00	22.42
14-15	18.96	30.80	43.11	50.21	61.45	61.72	62.81	55.39	47.30	30.98	22.76	15.60
15-16	9.48	17.20	31.33	40.71	48.94	49.07	51.25	44.52	35.70	20.25	12.00	6.25
16-17	1.60	5.58	16.56	26.11	34.07	36.35	37.23	29.45	20.97	7.90	3.05	1.02
17-18		0.92	4.66	12.26	18.47	22.42	22.76	15.21	7.62	1.20	0.10	
18-19			0.42	6.48	7.37	10.18	9.37	4.12	0.71			
19-20				1.12	1.95	1.63	0.26					

Tabela 2

GLOBALNA RADIJACIJA (cal cm⁻² sat⁻¹) NA PANE S 2/10 < N < 8/10
Srednji dnevni hod u razdoblju 1971-1973. god.

ZAGREB - GRIČ

Sat	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
4-5					0.64	1.51	0.88	0.07				
5-6				1.33	4.16	7.73	5.53	1.94	0.55			
6-7		0.33	2.12	7.48	13.44	16.81	15.14	9.90	4.91	1.53	0.17	
7-8	0.68	3.70	9.57	18.78	25.54	30.27	27.45	21.56	14.75	4.65	1.60	0.68
8-9	4.94	11.45	21.22	31.40	40.84	42.72	38.77	33.87	26.63	11.59	7.36	5.11
9-10	11.81	20.52	31.84	44.59	51.99	52.46	50.73	43.25	39.36	25.44	13.92	10.17
10-11	19.61	27.80	37.90	51.48	59.69	57.41	58.32	49.05	46.07	43.34	21.33	15.85
11-12	22.41	33.10	41.05	54.40	63.13	57.88	58.13	55.76	47.73	44.51	17.81	18.17
12-13	22.09	36.65	38.90	52.87	59.29	55.06	54.37	54.24	40.71	41.32	25.50	21.31
13-14	18.82	29.91	38.16	47.45	56.40	56.92	52.22	48.18	41.78	35.33	22.58	16.33
14-15	13.48	24.26	32.93	41.51	49.99	48.47	45.97	43.10	34.63	28.53	17.40	13.31
15-16	6.28	13.48	24.38	32.98	41.72	43.06	38.92	32.23	25.81	17.87	7.91	5.44
16-17	1.25	6.12	9.34	21.10	28.57	25.57	25.50	23.86	14.24	9.17	1.67	1.35
17-18		0.85	4.00	9.57	17.39	17.27	16.63	15.15	5.54	1.15		
18-19			0.43	1.53	6.91	7.99	6.79	3.35	0.48			
19-20				0.98	1.64	1.37	0.30					

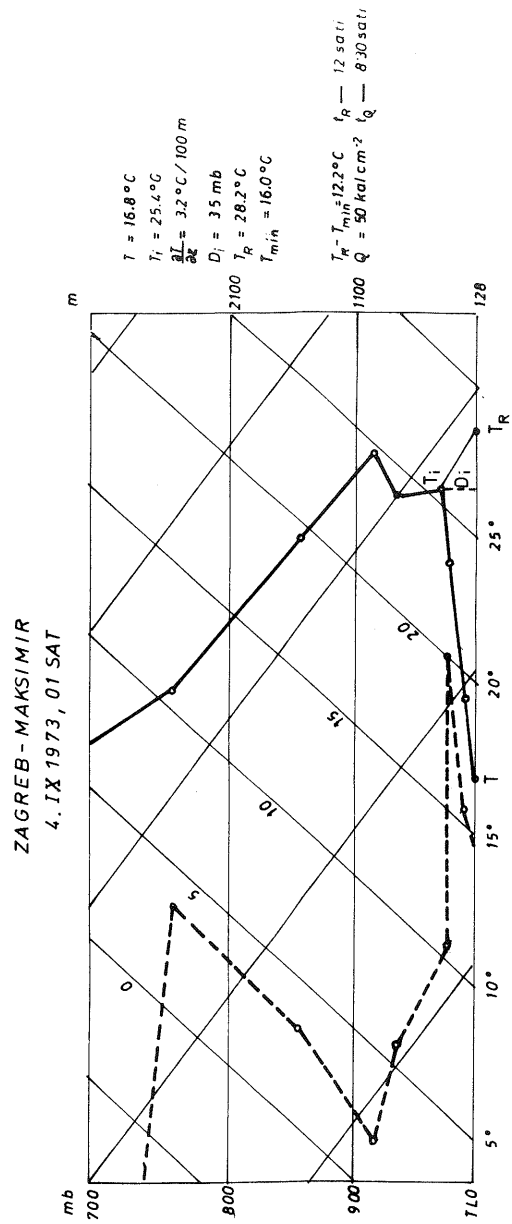
Tabela 3

GLOBALNA RADIJACIJA (cal cm⁻² sat⁻¹) NA DANE S N ≥ 8/10
Srednji dnevni hod u razdoblju 1971-1973. god.

ZAGREB - GRIČ

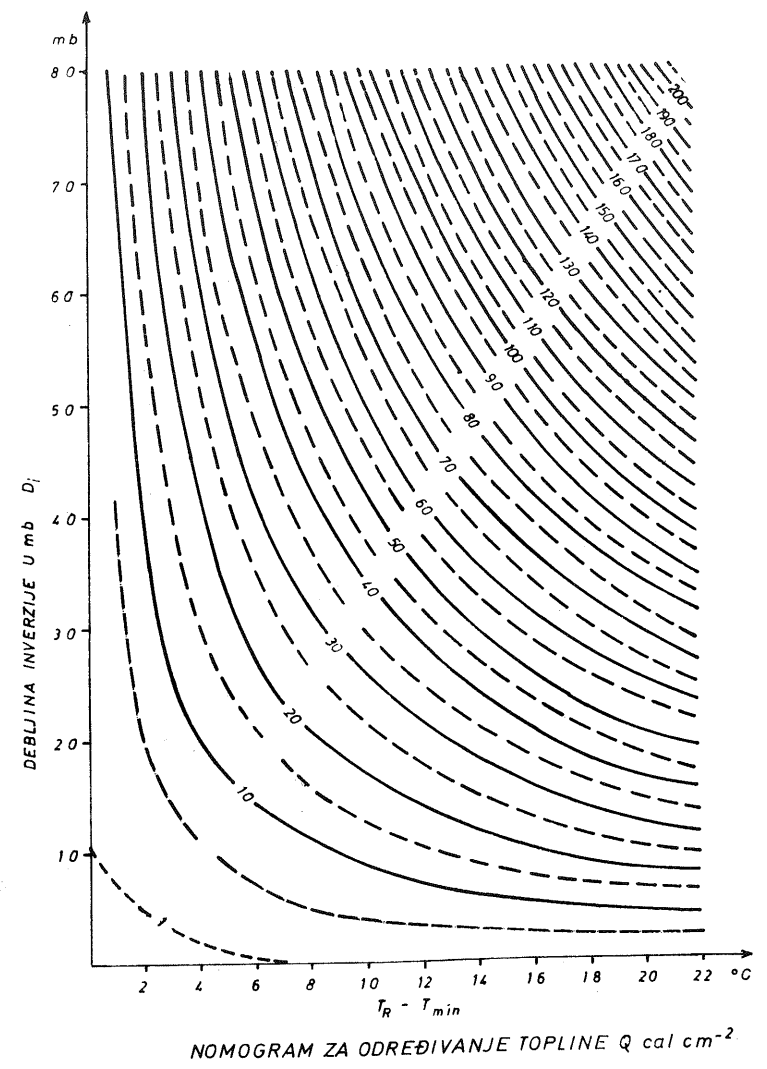
Sat	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
4-5					0.32	0.74	0.45	0.02				
5-6			0.01	0.54	2.38	3.31	2.10	0.98	0.16			
6-7		0.07	0.87	3.15	5.65	8.86	4.63	3.02	1.28	0.55	0.04	
7-8	0.33	1.16	3.79	8.28	9.95	14.26	9.57	6.66	4.40	2.78	0.83	0.18
8-9	1.77	3.48	7.54	13.35	16.63	19.29	16.18	11.83	8.12	6.82	3.35	1.44
9-10	4.82	7.54	13.53	19.74	20.44	21.68	21.24	16.51	12.14	10.45	7.41	3.88
10-11	7.73	12.29	17.88	21.60	24.82	31.57	26.52	24.61	16.42	14.94	10.41	6.05
11-12	8.96	14.86	21.10	23.07	27.30	33.57	28.53	21.28	20.58	17.78	12.07	7.55
12-13	9.91	14.44	20.02	24.87	26.45	37.52	29.13	22.94	23.27	19.01	13.76	8.01
13-14	7.84	10.88	16.43	22.40	26.32	28.60	26.25	19.25	17.93	17.45	9.30	6.03
14-15	5.00	7.28	12.57	19.91	17.59	24.96	21.92	16.65	13.80	13.18	6.88	3.96
15-16	2.45	4.55	8.71	12.04	16.46	19.85	18.18	12.13	9.13	8.73	3.79	1.91
16-17	0.62	1.76	5.44	8.22	10.95	13.13	12.81	7.87	4.12	3.35	1.17	0.47
17-18		0.38	1.91	4.00	6.31	7.95	7.26	4.08	1.30	0.60		
18-19			0.21	0.86	2.77	3.51	3.21	1.27	0.20			
19-20				0.60	0.89	0.86	0.86	0.05				

Tabela 4



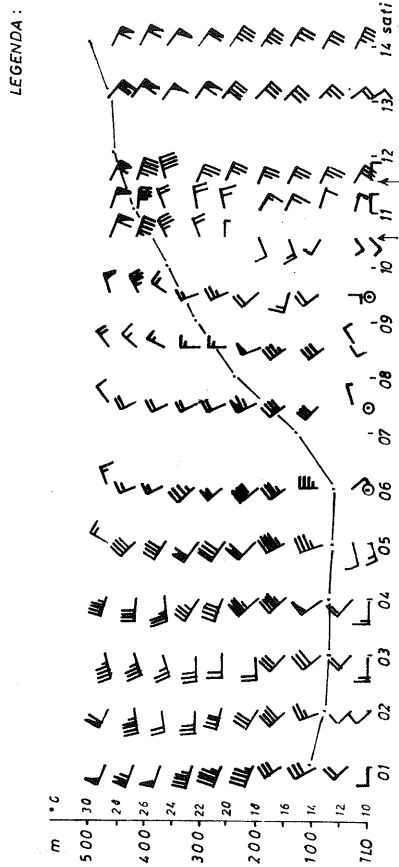
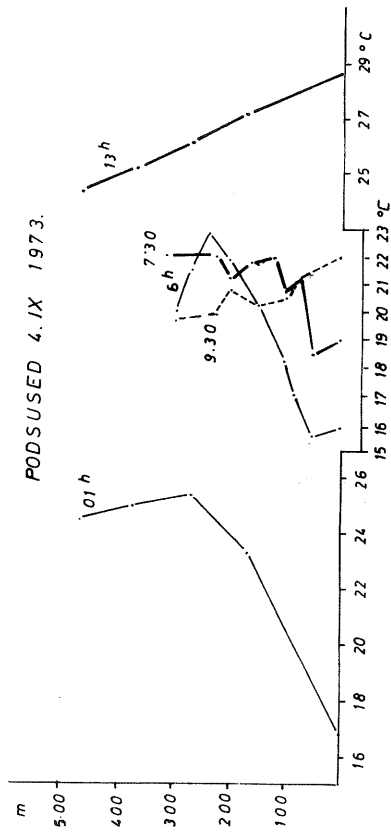
VERTIKALNI PROFIL TEMPERATURE (—) I VLAGE (---), I KARAKTERISTIKE PRIZEMNE INVERZIJE U SLOJU OD 100 DO 500 m VISINE 4. IX 1973. U 01 SAT, U ZAGREB-MAKSIMIRU

Slika 3



Slika 4

PODSUSED 4. IX 1973.



LEGENDA :

○ tišina

— 0,5 m sek⁻¹

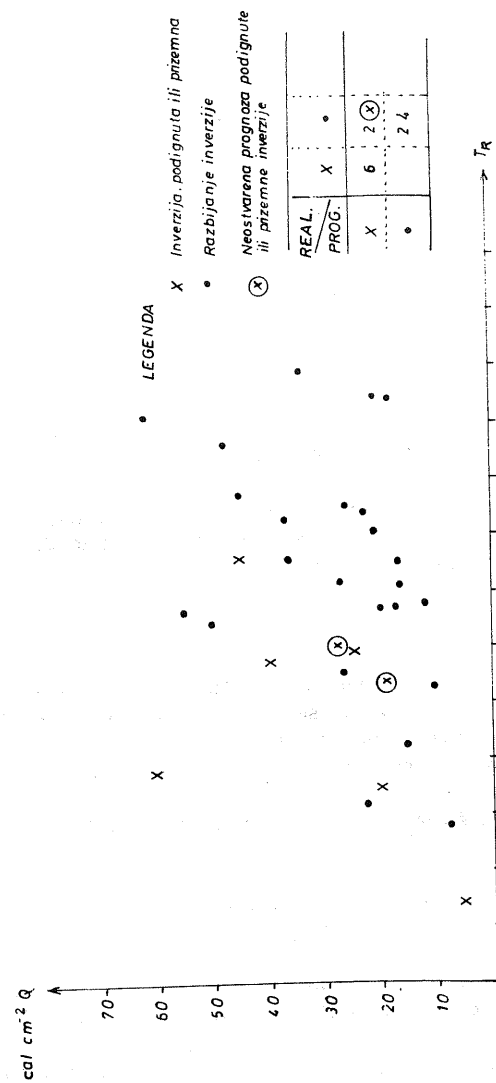
— 1 m sek⁻¹

— 1,5 m sek⁻¹

— 5 m sek⁻¹

VERTIKALNI PROFILI TEMPERATURE I DNEVNI HOD TEMPERATURE (—), TE STRUJANJE U SLOJU OD TLA DO 500 m VISINE — PODSUSED, 4. IX 1973.

Slika 5



RAZBIJANJE PRIZEMNE INVERZIJE U OVISNOSTI O KOLIČINI GLOBALNE RADIJACIJE Q I TEMPERATURI RAZBIJANJA Tr ZAGREB - MAKSIMIR OD I DO V MJESECA 1974.

Slika 6