

POGOSTNOST IN RAZKROJ TALNIH IN DVIGNJENIH TEMPERATURNIH
INVERZIJ V TREH KRAJIH JUGOSLAVIJE

FREQUENCY AND DESTRUCTION OF GROUND-BASED AND LIFTED
INVERSIONS AT THREE PLACES IN YUGOSLAVIA

551.524.4

Lučka B. KAJFEŽ

VTOZD Agronomski oddelek BF, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani

SUMMARY

Ground-based and lifted inversions are especially important in basins, where their atmosphere is often separated from the free atmosphere by strong temperature inversions. Development and destruction of these inversions occur in a different manner from that of the development and destruction of inversions over flat terrain.

Tethered balloon sounding was used to collect vertical temperature profiles at three sites in Yugoslavia. Frequencies and time distribution of inversions below 600 m, (i.e. ground-based), lifted, and both inversions at the same time are given. Some examples of inversion destruction and their main characteristics are considered for Sarajevo, Maribor and Stanežiče near Ljubljana.

POVZETEK

Talne in dvignjene inverzije so pomembne predvsem v kotlinah, kjer spodnjo plast ozračja pogosto loči od proste atmosfere močna temperaturna inverzija. Razvoj in razkroj teh inverzij se pojavljata v kotlinah na drugačen način kot nad ravnino.

Za meritve vertikalnih temperaturnih profilov so uporabili sondiranje s privezanim balonom v treh mestih: Sarajevo, Maribor in Stanežičah pri Ljubljani. Podani sta pogostost in časovna porazdelitev inverzij pod 600 m, to je talnih, dvignjenih in obojih inverzij hkrati.

UVOD

Temperaturne inverzije so v splošnem zelo pogost naravni pojav. V zvezi z visokimi koncentracijami onesnaženja so še zlasti v razgibanem reliefu, kot so alpske in predalpske doline in kotline, pomembne prizemne, to so talne in dvig-

njene temperaturne inverzije. Talne inverzije, ki imajo spodnjo mejo na tleh, pogosto enačimo z radiacijskimi inverzijami, ki nastajajo zaradi ohlajevanja zemeljskega površja, ki je posledica dolgovalovnega sevanja zemeljske površine. Najpogosteje nastajajo ob mirnem vremenu v jasnih nočeh, pozimi pa nastajajo tudi podnevi, če je površina prekrita s snegom. Običajno dosežejo višine nekaj deset metrov, redkeje nekaj sto metrov. Lahko nastanejo tudi z advekcijo toplega zraka nad hladno podlago. Dvignjene inverzije nastajajo na več načinov in sicer z razkranjem talne nočne inverzije po sončnem vzhodu, zaradi advekcije toplega zraka nad hladno podlago ali pa zaradi subsidence zraka.

Z radiacijskimi prizemnimi inverzijami se je ukvarjalo precej avtorjev. Pučnik /6/ in Petkovšek /4/, /5/ sta se ukvarjala s pogostnostjo in lastnostmi prizemnih inverzij v naših kotlinah, Lončarjeva /3/ je obravnavala inverzije v prizemnih plasteh v Zagrebu. Zanimive so tudi študije Bernhardta /1/ in Hoslerja /2/, ki navajata podatke za NDR in ZDA. Veliko avtorjev se je ukvarjalo tudi s proučevanjem nastanka in razkroja inverzij z matematičnimi modeli, katerih bistvo so prognostične enačbe v obliki algebranih zvez, ki so dobljene s številnimi poenostavitvami. Omenimo naj modela Yamade /9/ in Tennekese /7/, ki dajeta dobre rezultate nad ravnino.

Splet pogojev, ki odločajo o nastanku in razkroju inverzije v razgibanem reliefu, je bistveno drugačen od tistega nad ravnino. Nad ravninami se inverzije razkrajajo, ko se konvektivno premešana plast zraka po sončnem vzhodu debeli. Rast višine te plasti in naraščanje temperature v plasti sta posledica divergence toka energije, tudi s penetrativno konvekcijo. V kotlinah pa se pojavi poleg konvektivno premešane plasti zraka ob tleh, ki se kontinuirano debeli, še spuščanje zgornje meje inverzije. Iz prvotne talne inverzije dobimo obliko dvignjene inverzije. Po meritvah Whitemana /8/ je za razkorj inverzije v kotlini vsekakor pomembnejše spuščanje zgornje meje plasti inverzije kot rast višine konvektivno premešane plasti. Po sončnem vzhodu se namreč zaradi sončnega obsevanja ustvarijo na dnu in na prisojnih pobočjih tanke plasti zraka s superadiabatnim temperaturnim gradientom, v katerih se sprožijo pobočni vetrovi ali konvekcija, ki na posameznih mestih predre v zgoraj ležečo stabilno zračno maso. Posledica tega je vstopanje zraka iz stabilne plasti v toplejšo spodaj ležečo plast. Zaradi nestisljivosti se mora torej zgornja meja inverzije spuščati. Ta proces se ves dan nadaljuje, stabilna plast se vse bolj krči, pobočni vetrovi se še krepijo, dokler se inverzija ne razkroji. Bistvena značilnost razkroja inverzije v kotlini je prav v prej opisanem odtoku zraka iz dna kotline s pobočnimi vetrovi prek nagnjenih pobočij.

TEMPERATURNE INVERZIJE V TREH NAŠIH KRAJIH

Temperaturne inverzije so na področju naših krajev vsakodneven pojav. Glede na vzroke nastanka so najpogostejše radiacijske inverzije, ki se pojavljajo večinoma kot talne in dvignjene inverzije ter subsidenčne inverzije, ki so večinoma inverzije v višini.

Pri študiju temperaturnih inverzij lahko uporabimo temperaturne krivulje, ki so jih izmerili na HMZS z vezanim balonom volumna 4 m^3 , napolnjenim z vodikom, ki je nosil temperaturno sondo - termistor firme Bendix. Za našo analizo smo uporabili podatke za tri jugoslovanske kraje - Sarajevo, Maribor in Stanežiče pri Ljubljani, nekaj analiz pa nam je na voljo tudi za druge naše kraje /10/.

V tabeli 1 imamo poleg časa in števila meritev podano tudi število inverzij in njihovo relativno pogostnost. Največ meritev imamo na voljo za Sarajevo, ki prav tako kot v Mariboru zajemajo zimsko obdobje. Merjenj je več v nočnih urah, ki so čas formiranja in razvoja radiacijskih inverzij in zato je število primerov povsod precejšnje. Pripomnimo naj, da je velika relativna pogostnost inverzij v Mariboru, ki je sicer bolj prevetren kot obe kotlini in so v splošnem inverzije tam manj izrazite, deloma pogojena tudi z vremenskimi situacijami, ki so vladale v obdobju meritev. Kot bomo videli pozneje, so v Mariboru prevladoval dvignjene inverzije, ki niso nastale z radiacijskim ohlajanjem tal.

Za analizo pogostnosti posameznih tipov inverzij moramo upoštevati odvisnost pojavljanja inverzij od dnevnega časa. Zato prikazujemo v tabeli 2 časovno razporeditev števila meritev in relativne pogostnosti posameznih vrst inverzij za posamezne kraje. Izbrali smo 4 časovne intervale po šest ur. Pri podatkih tabele 2 moramo za vsak kraj upoštevati tudi vremenske situacije v obdobju merjenj, ki nedvomno povzročijo dodatne razlike med posameznimi kraji. Tako npr. vidimo iz podatkov HMZS, da v Sarajevu v obdobju merjenj ni bilo izrazitih anticiklonalnih situacij, ki so ugodne za nastanek radiacijskih talnih in dvignjenih inverzij ob razkroju talnih. Relativna pogostnost je zato v Sarajevu nekoliko nižja od pričakovane, pa tudi časovna razporeditev je v primerjavi s Stanežičami, ki ravno tako ležijo v kotlini, drugačna. Tudi visoka relativna pogostnost dvignjenih inverzij v časovnem intervalu od 00 do 06 potrjuje, da je prevladoval v času meritev advektivni tip vremena. Razmeroma visoka relativna pogostnost talnih inverzij v primerjavi z dvignjenimi v intervalu od 18 do 00 sicer kaže, da so se formirale talne radiacijske inverzije po sončnem zahodu, vendar so bile dokaj neizrazite in niso presegale višine 150 metrov. V nadaljevanju noči so se velikokrat razkrojile, pojavile pa so se dvignjene inverzije v višinah od 200 do 300 metrov.

Tudi v Mariboru se dvignjene inverzije pojavljajo v vseh časovnih intervalih, in to relativno precej pogosto. Podobno kot v Sarajevu, so zajemale anticiklonalne situacije le nekaj dni, prevladovala so ciklonalne situacije s stratusno oblačnostjo, večkrat je tudi rosilo ali rahlo deževalo. Dvignjene inverzije tako niso bile samo posledica razkroja talnih inverzij, marveč tudi advekcije toplega zraka pred prihodom tople fronte. Tako je npr. relativna pogostnost talnih in dvignjenih inverzij v intervalu od 00 do 06 enaka. Talne inverzije so spet prevladovala v času po sončnem zahodu, v intervalu od 18 do 00.

Bistveno drugačno sliko dobimo v Stanežičah, kjer je velika večina inverzij po nastanku radiacijskih in kjer prevladujejo talne inverzije v vseh obdobjih, razen v intervalu dopoldanskih ur, ko se talna inverzija po sončnem vzhodu razkroja in preide v dvignjeno inverzijo. To potrjuje tudi relativna pogostnost primerov istočasnih talnih in dvignjenih inverzij v intervalu od 06. do 12. ure. Glede na

zimski čas je razumljiva tudi nekoliko visoka relativna pogostnost inverzij v obdobju od 12. do 18. ure, saj se v hladnem obdobju leta pojavijo talne inverzije že pred sončnim zahodom. Talnih inverzij je največ v nočnem času, ko dvignjenih inverzij praktično ni. Vse to je posledica anticiklonalnih vremenskih situacij s pretežno jasnim nebom.

Talne inverzije, ki so nastale v večini primerov v navedenih krajih zaradi radiacijskega ohlajanja, so dosegale različne višine. Izrazito močne inverzije z vertikalnim gradientom do 8 K/100 m ponavadi niso presegle višine 50 m. Maksimalne višine talnih inverzij so bile v navedenih krajih med 300 in 350 m, povprečne vrednosti pa niso presegle 200 m. Glede na vremensko situacijo prevladujejo v Sarajevu nizke inverzije v obeh delih dneva z redkimi izjemami, nekako do višine 150 m. V Mariboru in Stanežičah se inverzije pojavljajo izrazite vse do višine 250 m. Podobne rezultate dobimo tudi za druga mesta /10/, za Gorenjo vas npr. Petkovšek /4/ ugotavlja maksimalne pogostnosti višin inverzij v nižjih plasteh, okrog 100 m in niže.

Dvignjene inverzije v obravnavanih krajih so nastale na več načinov. Tiste, ki so nastale z razkrojem talne inverzije so trajale malo časa. Trajale so nekaj ur in so se pred sončnim zahodom razkrojile. V nasprotju z njimi so bile inverzije tipa tople advekcije večdnevne in veliko bolj intenzivne. Tak tip je prevladoval v Mariboru in je bil pogojen z vremensko situacijo. Nekaj dvignjenih inverzij v Sarajevu bi lahko pripisali tudi učinkom lokalne cirkulacije.

RAZKROJ INVERZIJ

Pri razkroju inverzij v naših primerih nas je zanimalo spuščanje zgornje meje inverzije, kar je največkrat povezano s splošnim ogrevanjem zraka dopoldne in dviganju ob pobočjih.

Pri analizi temperaturnih krivulj smo opazili, da se spuščanje plasti inverzije, ki naj bi se pojavilo šele po sončnem vzhodu /8/ hkrati s pojavljanjem konvektivno premešane plasti tik ob tleh, včasih pojavlja že pred sončnim vzhodom. Petkovšek je za Gorenjo vas /4/ ugotavljal spuščanja v zimskem obdobju kaki dve uri pred sončnim vzhodom, med 5. in 7. uro, v drugih krajih /10/ pa smo spuščanje opazili še prej, včasih že pred polnočjo, v Sarajevu in Stanežičah med 3. in 5. uro zjutraj. Spuščanje je povezano tudi z ogrevanjem zraka ob tleh ponoči, kar potrjuje ugotovitve Tenekesa /7/. Praviloma se spuščanje začne in nadaljuje v dopoldanskih urah. Redke so izjeme, ko čez dan višina zgornje meje inverzije narašča. Tedaj so to primeri večdnevni močnih in debelih talnih inverzij, ponavadi ob oblačnem vrenemu, ko razkroj ovira zmanjšana insolacija, tok zaznavne toplote in konvekcija pa sta neznatna.

Zanimive so hitrosti spuščanja ali dviganja zgornje meje inverzije dopoldan oz. po sončnem vzhodu. Hitrost dviganja in spuščanja se zelo spreminja od primera do primera, saj je vpliv trenutne vremenske situacije zelo močan. Zato navajamo le povprečne vrednosti, ki so okvirne tudi zaradi malo podatkov. Povprečne hi-

trosti dviganja plasti inverzije ponoči znašajo za Maribor 18 m na uro, za Stanežiče 25 m na uro in za Sarajevo 27 m na uro. Primerjajmo s podatki za Gorenjo vas - 23 m na uro. Omenimo naj še, da so hitrosti ponoči neenakomerne, največje so v prvih urah nastajanja inverzije, ko so tudi do trikrat večje kot v nadaljevanju noči.

Hitrosti spuščanja plasti inverzije so nekoliko manjše, in sicer je poprečje za Maribor 13 m na uro, Stanežiče 23 m na uro in Sarajevo 27 m na uro; maksimalne vrednosti pa so bile do 80 m na uro.

V obravnavanih krajih so bile meritve opravljene v hladni polovici leta, zato večkrat opazimo, da se je proces razkroja prenesel iz dopoldanskih ur na popoldne. Prvotna temperaturna inverzija se razkroji takrat v navedenih krajih šele med 13. in 15. uro, ko se pojavi ponavadi do višine 10 ali 20 m že nova talna inverzija. Navadno se enodnevne inverzije razkroje do 13. ure, redkeje že do 9. ure. V topli polovici leta pa je razkroj končan do 9. ure. Našteto deloma potrjujejo tudi opazovanja megle v Ljubljanski kotlini /5/.

Oglejmo si nekaj konkretnih primerov razkroja temperaturnih inverzij v navedenih krajih. Izbrali smo tri značilne, in sicer dva primera razkroja v Stanežičah in enega v Sarajevu. Temperaturni profili so prikazani na slikah 1, 2 in 3. Dodan je še časovni potek višine spodnje in zgornje meje inverzije ob razkroju v istih treh primerih (slika 4).

Na sliki 1 opazimo tipično spuščanje zgornje meje inverzije (h_i) in hkrati pojavljanje konvektivno premešane plasti z višino (h_c). Tako naraščanje h_c kot zmanjševanje h_i je nekoliko hitrejše v prvih urah razkroja inverzije in se kasneje upočasnjuje. Razkroj se prične pred 9. uro in se konča po 13. uri, torej traja 5 ur in dvignjena inverzija se razkroji do 15. ure, ko se ob tleh pojavi že nova talna inverzija do višine 20 m (slika 4a).

Podobno se je razkrojila tudi inverzija naslednji dan (slika 2). Ob 5. uri imamo še talno inverzijo, katere zgornja meja je 300 m. Dve uri kasneje že nastopi spuščanje zgornje meje in pojavi se konvektivno premešana plast do višine 50 m. Dvignjena inverzija se razkroji po 13. uri in njeno trajanje znaša okrog 7 ur (slika 4b).

Zanimiv je tudi sarajevski primer (slika 3), ko imamo ob 7. uri talno inverzijo do višine 280 m. Ob 9. uri nastane dvignjena inverzija na višini 30 m z zgornjo mejo na 200 m. V nadaljevanju kaže razkroj določene nepravilnosti, saj med 9. in 11. uro h_i naraste, vendar se dvignjena inverzija po 13. uri vseeno razkroji. Trajanje dvignjene inverzije znaša tako več kot 6 ur (slika 4c).

ZAKLJUČEK

Z analizo podatkov vertikalne razporeditve temperature za tri naše kraje: Maribor, Stanežiče in Sarajevo, smo ugotovili, da je relativna pogostnost posameznih vrst temperaturnih inverzij različna za posamezne kraje in je bistveno odvisna predvsem od splošne vremenske situacije in od dnevnega časa. Tako prevladujejo pri anticiklonalnem tipu vremena talne inverzije večino dnevnega časa, z izjemo dopoldanskih ur. Pri ciklonalnih tipih vremena pa prevladujejo dvignjene inverzije, ki nimajo radiacijskega nastanka. Ugotavljali smo tudi hitrosti naraščanja in spuščanja zgornje meje inverzije in ugotovili večje hitrosti v kotlinah kot nad ravnino. Tudi razkroj inverzij je pogojen z več faktorji, med katerimi so najpomembnejši sama vrsta inverzij, splošna vremenska situacija in pa v razgibanem reliefu še posebej lokalna cirkulacija. Tako smo za kotline ugotovili spuščanje glavne inverzije že pred sončnim vzhodom in pa značilen razkroj talnih inverzij z vmesno fazo dvignjene inverzije. Tako se enodnevnne talne inverzije v Stanežičah in Sarajevu razkrojijo v 6 do 7 urah po sončnem vzhodu v hladni polovici leta. Naše ugotovitve se tako ujemajo z opazovanji in analizami za nekatere druge kraje, ki jih navajajo različni avtorji /4,6,8/.

LITERATURA

- /1/ BERNHARDT K.: Some results of the lower troposphere inversion statistics in middle Europe. WMO symposium on boundary layer physics applied to specific problems of air pollution 1978. WMO-No.510.
- /2/ HOSLER F.: Low-level inversion frequency in the contiguous United States. Monthly Weather Review Vol.89No.9.
- /3/ LONČAR E.: Prognoza razbijanja inverzije na področju grada Zagreba. Razprave. Posebna številka - Meteorologija in gospodarstvo.
- /4/ PETKOVŠEK Z.: Širjenje onesnaženja v kotlinah - II. faza. FNT 1975.
- /5/ PETKOVŠEK Z.: Širjenje onesnaženja v kotlinah - III.faza. FNT 1977.
- /6/ PUČNIK J.: Temperaturne inverzije v Ljubljanski kotlini. Razprave XIV. 1972.
- /7/ TENNKES H.: A model for the dynamics of the inversion above a CBL. J. Atmos. Sci. 30.No.4.
- /8/ WHITEMAN D.C.: Observations of vertical atmospheric structure in a deep mountain valley. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie. Ser.A, 26, 39-50.
- /9/ YAMADA T.: Prediction of the Nocturnal surface inversion height. J. Applied Meteor. Vol. 18 No.4.
- /10/ KAJFEŽ L.: Talne in dvignjene temperaturne inverzije. Diplomsko delo. FNT. Ljubljana 1980.

Tabela 1 Pregled krajev; čas in število meritev, število in relativna pogostnost inverzij

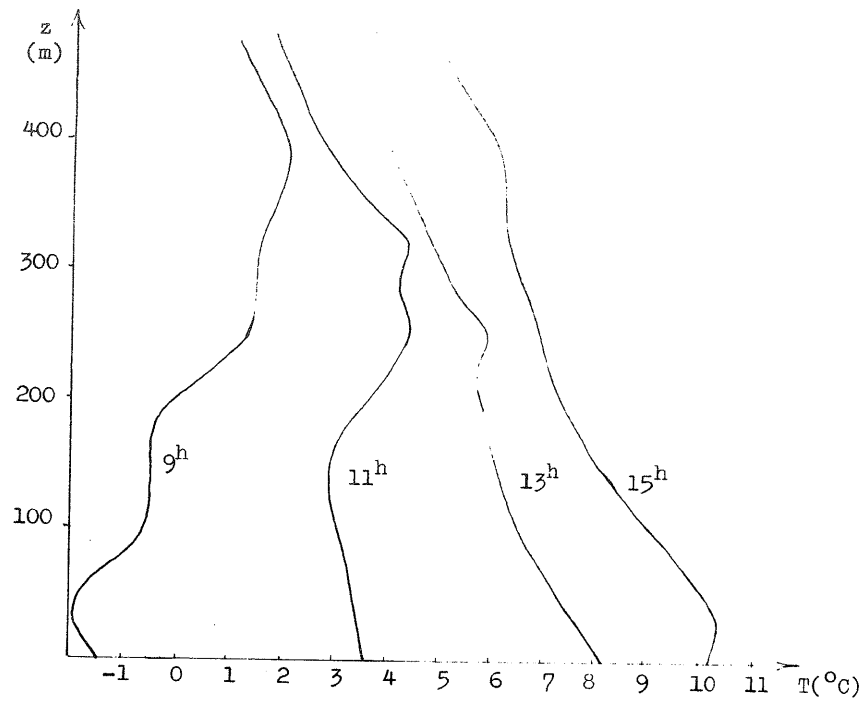
Table 1 Site, period and number of measurements, number and relative frequency of inversions

kraj	čas meritev	število meritev	število inverzij	rel. pogost. inverzij
SARAJEVO	10. 1. - 6. 2.74	271	172	63%
MARIBOR	26.12. - 1. 2.77	89	79	89%
STANEŽIČE	7.11. - 22.11.74	108	80	74%

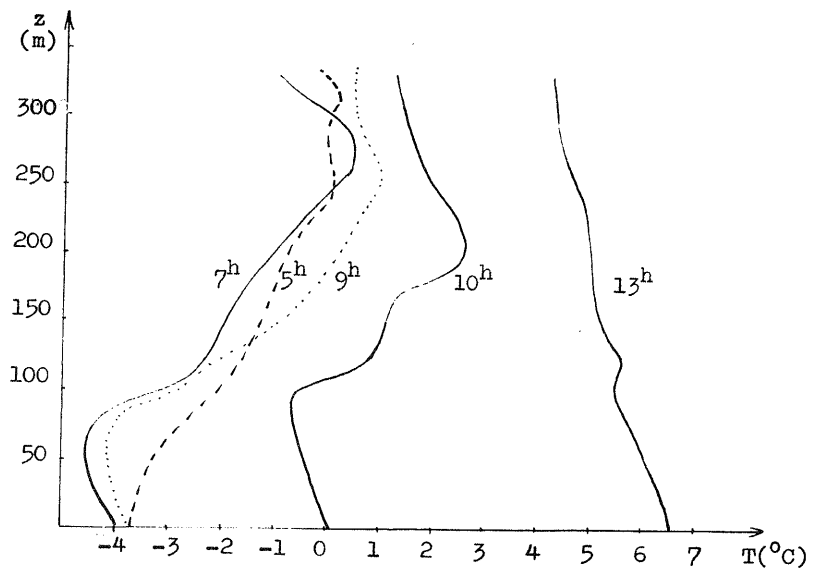
Tabela 2 Število meritev (N), relativna pogostnost vseh inverzij (%I), talnih (%T), dvignjenih (%D), hkrati talnih in dvignjenih (%TD) v časovnih intervalih za Sarajevo, Maribor in Stanežiče

Table 2 The time distribution of the number of measurements (N), the relative frequency of all inversions (%I), ground-based (%T), lifted (%D) and simultaneous ground-based and lifted inversions (%TD) for Sarajevo, Maribor and Stanežiče

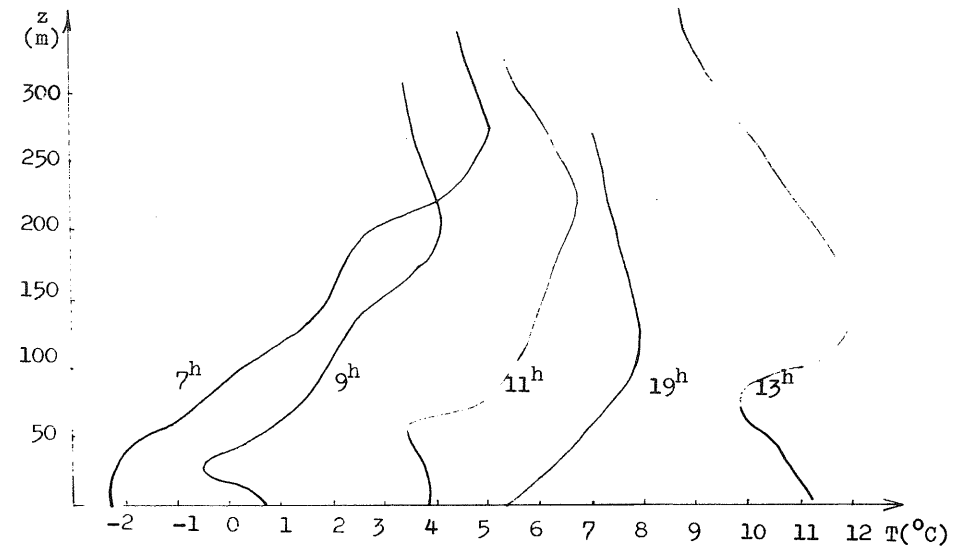
		N	%I	%T	%D	%TD
SARAJEVO	00-06	68	59	45	53	2
	06-12	68	63	35	56	19
	12-18	65	65	40	55	5
	18-00	70	67	62	36	2
MARIBOR	00-06	22	91	50	50	-
	06-12	19	89	59	35	6
	12-18	15	80	50	42	8
	18-00	33	91	73	23	4
STANEŽIČE	00-06	30	80	96	4	-
	06-12	25	76	21	63	16
	12-18	21	48	70	30	-
	18-00	33	82	96	4	-



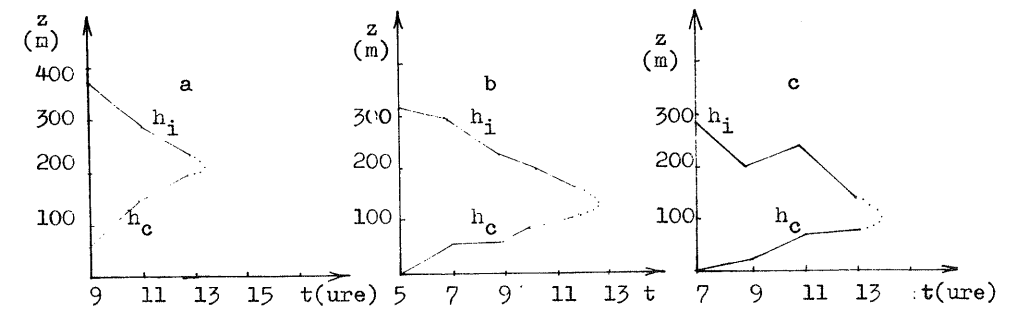
Slika 1 Vertikalna rasporeditev temperature v Stanežičah ob 9^h, 11^h, 13^h, 15^h
 Fig. 1 The vertical distribution of temperature at Stanežiče at 9, 11, 13, 15 LT



Slika 2 Vertikalna rasporeditev temperature v Stanežičah ob 5^h, 7^h, 9^h, 10^h, 13^h
 Fig. 2 The vertical distribution of temperature at Stanežiče at 5, 7, 9, 10, 13 LT



Slika 3 Vertikalna rasporeditev temperature v Sarajevu ob 7^h, 9^h, 11^h, 13^h, 19^h
 Fig. 3 The vertical distribution of temperature at Sarajevo at 7, 9, 11, 13, 19 LT



Slika 4 Spremembe h_i in h_c s časom za primere razkroja temperaturnih inverzij v (a,b) Stanežičah in (c) Sarajevu
 Fig. 4 Time variations of h_i the upper, and h_c the lower boundary of inversion layer for 3 typical inversion destructions at (a,b) Stanežiče and (c) Sarajevo