

Mezoanaliza radarskih mjerenja 29. 6. 1982. nad područjem sjeverozapadne Hrvatske

Radar Measurements Mesoanalysis on 29 June 1982 over the Region of North-West Croatia

IVAN ČAČIĆ i BOJAN LIPOVŠČAK

Republički hidrometeorološki zavod SRH, Zagreb

Sažetak: U radu je opisana metoda odabiranja radarskih mjerenja istovremeno dobivenih s više radarskih centara. Ova metoda omogućava stvaranje kompozitne radarske slike na osnovi koje se provela mezoanaliza radarskih mjerenja za slučaj olujne nepogode 29. 6. 1982. Mezoanaliza obuhvaća: određivanje staza i brzina gibanja oblačnih stanica, utjecaj orografije na brzinu gibanja i razvoj oblačnih stanica te posebno evoluciju tučoopasnog Cb. Pokazano je da orografska prepreka utječe na brzinu gibanja kao i na promjenu visine vrha oblačnih stanica.

Ključne riječi: Radarski odraz; Oblačna stanica; Karakteristične točke oblaka; Kompozitna slika radarskih mjerenja; Superstanica.

Abstract: The paper presents the method for a selection of radar measurements which are obtained simultaneously from several radar centers. This method allows a complex radar picture creation which has been taken as the basis of a radar measurements mesoanalysis for the case of a severe storm on 29 June 1982. The mesoanalysis involves: a path and a propagation speed determination of cloud cells, an orographical influence on the speed and the development of cloud cells and specially on the evolution of the haildangerous Cb. It was shown that an orographic obstacle has the influence on a velocity and a cloud cell top variation.

Key words: Radar echo; Cloud cell; Cloud characteristic points; Complex picture of radar measurements; Supper-cell.

1. UVOD

Radarska mjerenja oblaka vertikalnog razvoja na području SR Hrvatske provode se od 1971. godine. Prvi podaci primjenljivi za analizu datiraju od 1975. godine nakon što je izvršena revizija načina radarskih mjerenja i mjerenja. Prvi pokušaj klasifikacije radarskih mjerenja dan je u radu (Gelo, 1976). Potreba za potpunom analizom radarskih podataka uvjetuje razvijanje metode mezoanalize radarskih podataka. U ovom radu predstavljena je metoda klasifikacije i obrade radarskih odraza. Obradena je vremenska situacija od 29. 6. 1982. karakteristična po vrlo izraženoj grmljavinskoj aktivnosti nad područjem Slovenije i sjeverozapadne Hrvatske, uz velike brzine premještanja oblačnog sistema i pojavu tuče dimenzije do 70 mm koja je prouzrokovala velike materijalne štete.

2. MEZOANALIZA RADARSKIH MJERENJA

Mezoanaliza radarskih podataka provedena je na osnovi mjerenja radarskih centara obrane od tuče SR

Slovenije i SR Hrvatske. Mjerenja su provedena s radarima WSR 74C, RC Maribor (valno područje $\lambda = 5$ cm) i 3MK7, RC 2A, 2B, 3, 4 (valno područje $\lambda = 10$ cm) (Lipovšćak i suradnici, 1982).

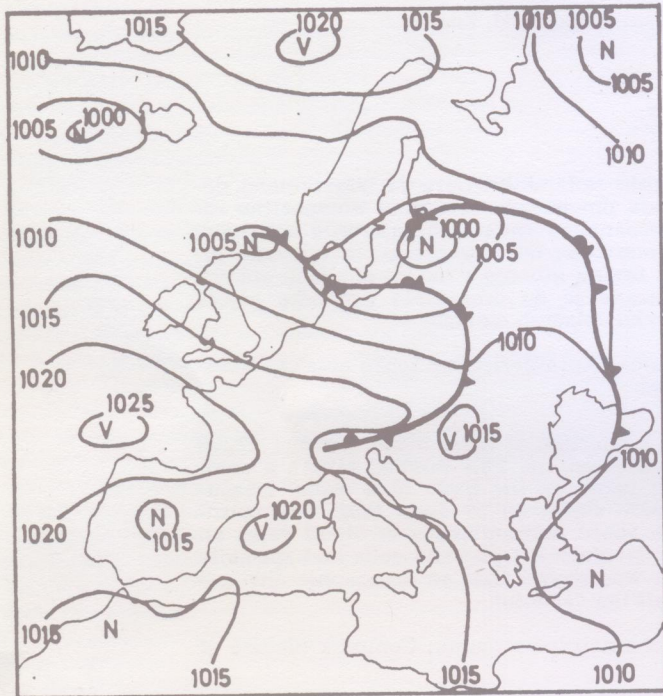
Različito gušenje na trasi prostiranja radarskih valova, različite moći razlučivanja radara (Battan, 1973), različiti dometi radara i problemi vezani uz kalibraciju i točnost mjerenja radara 3MK7 ograničili su upotrebljivost prikupljenih radarskih podataka. Od 215 mjerenih radarskih odraza nad područjem Slovenije i sjeverozapadne Hrvatske izdvojen je skup od 78 mjerenja koja pokazuju evoluciju 6 oblačnih stanica. Prvo mjerenje bilo je u 16 sati i 23 minute, a zadnje u 20 sati i 45 minuta.

Prikazivanje oblačnih stanica temelji se na operativnoj metodi praćenja oblaka u sistemu obrane od tuče u SR Hrvatskoj (Gelo, 1976, Čačić, 1980).

Za analizu karakterističnih točaka oblaka (visina točke maksimalne refleksije, visina vrha pojačanog radarskog odraza i visina radarskog vrha oblaka) korištene su temperature zraka dobivene iz radiosondaže Aerološkog opservatorija Zagreb—Maksimir i to od 29. 6. 1982. u 12 sati GMT.

Analizom radiosondažnih mjerenja Aerološkog opservatorija Zagreb—Maksimir također je ustanovljeno da se jezgra mlazne struje nalazila između izobarnih razina 312 mb i 201 mb. Mlazna struja imala je zonalan smjer. Na razini 219.8 mb zabilježena je maksimalna brzina vjetera iznosa 35.0 ms^{-1} i smjera 268° . Na 500 mb plohi, vjetar je imao smjer 270° , a brzina je iznosila 20.5 ms^{-1} .

Brzina mlazne struje, kao i brzina vjetera na 500 mb, podudaraju se s radarski izmjerenom brzinom oblačnih stanica, dok odstupanje smjera gibanja oblačnih stanica od srednjeg smjera u troposferi ukazuje na vrlo izraženu dinamiku olujnih procesa (Gelo, 1976).



Slika 1. Sinoptička situacija nad područjem Evrope 29. 6. 1982. u 12 GMT

Figure 1. Synoptic situation over the Europe on 29 June 1982, 12 GMT

Na slici 1. prikazan je položaj frontalnog sistema koji se u 12 sati po GMT prostire od istočnih Karpata do južnih ogranaka Alpa. On je povezan sa slabo izraženom ciklonom čije se središte nalazi nad područjem Baltičkog mora i to između dva zatvorena centra visokog tlaka. Prvi predstavlja Azorsku anticiklonu čiji se greben proteže nad područjem zapadne Evrope, a drugi — malo zatvoreno područje od 1015 milibara nad Panonskom nizinom.

Satelitske snimke (slika 2.) napravljene su u intervalu od 10 sati i 44 minute do 14 sati i 18 minuta po GMT. Slike su dobivene mozaik fotografijom iz tri obilaska satelita NOAA 7. Srednja visina satelita nad morskom razinom iznosi 830 km, a vrijeme pohoda je 101.314 minute. Slika se odnosi na vidljivo područje spektra u intervalu valnih duljina $\lambda = 0.725\text{--}1.100 \mu\text{m}$.

Na slici 2. uočava se uska frontalna zona čiji položaj odgovara položaju frontalnog sistema opisanog na slici 1. Za područje sjeverozapadnog dijela naše zemlje može se zaključiti da se radi o hladnoj fronti.

2.1. Kompozitna slika radarskih mjerenja

Za dobivanje kompozitne slike evolucije oblačnih sistema, napravljena je skupna planšeta radarskih centara. Korištena je geografska karta mjerila 1 : 200 000 na kojoj su ucrtani radarski centri. Svakom centru pridjeljen je lokalni koordinativni sustav.

Nakon ucrtavanja svih mjerenih radarskih odraza, u lokalnim sustavima, uslijedio je postupak jednoznačne identifikacije pojedinih oblačnih stanica. Postupak se sastoji od:

- uspoređivanje visina karakterističnih točaka oblaka,

- uspoređivanje brzina i smjerova premještanja težišta oblaka (koje je na plašeti definirano kao horizontalna projekcija točke maksimalne refleksije),

- uspoređivanja položaja i vremena pojave odraza na zaslonima više radarskih centara.

Na osnovi vremenskih diskretnih radarskih mjerenja potrebno je utvrditi položaj, premještanje i razvoj pojedine oblačne stanice. Jednoznačno određivanje svake oblačne stanice iz skupa radarskih mjerenja dano je slijedećim kriterijima:

- razlika visine karakterističnih točaka oblaka iste oblačne stanice u vremenskom intervalu od jedne minute mora biti manja od 1 kilometra.

- razlika brzine i smjera premještanja težišta oblaka za dva uzastopna radarska mjerenja, ukoliko oblak na stanica ne prelazi prepreku višu od 500 m, mora biti manja od 30% prethodnog mjerenja.



Slika 2. Satelitska vremenska slika nad područjem Evrope 29. 6. 1982. (Berliner Wetterkarte, 1982)

Figure 2. Satellite weather picture over the Europe on 29 June 1982 (Berliner Wetterkarte, 1982)

Iznos brzine premještanja radarskih odraza računat je u koordinatnom sustavu radarskog centra formulom

$$v = \frac{1}{t} \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\Phi_2 - \Phi_1)}, \quad (1)$$

gdje su r_1 i r_2 apsolutne vrijednosti radij-vektora položaja težišta dva uzastopno mjerena odraza jedne oblačne stanice, Φ_1 i Φ_2 kutjevi između korespondentnih radij-vektora i apscise lokalnog koordinatnog sustava.

Ukoliko se oblačna stanica nalazi u dometu dva radara koji provode sinhrona mjerenja, tada je (na osnovi tih mjerenja) potrebno definirati koja radarska mjerenja jednoznačno određuju oblačnu stanicu. U izbor ulaze radarska mjerenja dva radarska centra u 5-minutnom intervalu, ukoliko je zadovoljen kriterij brzine.

Kompozitna slika radarskih mjerenja 29. 6. 1982. ostvarenih na pet radarskih centara prikazana je na slici 3.

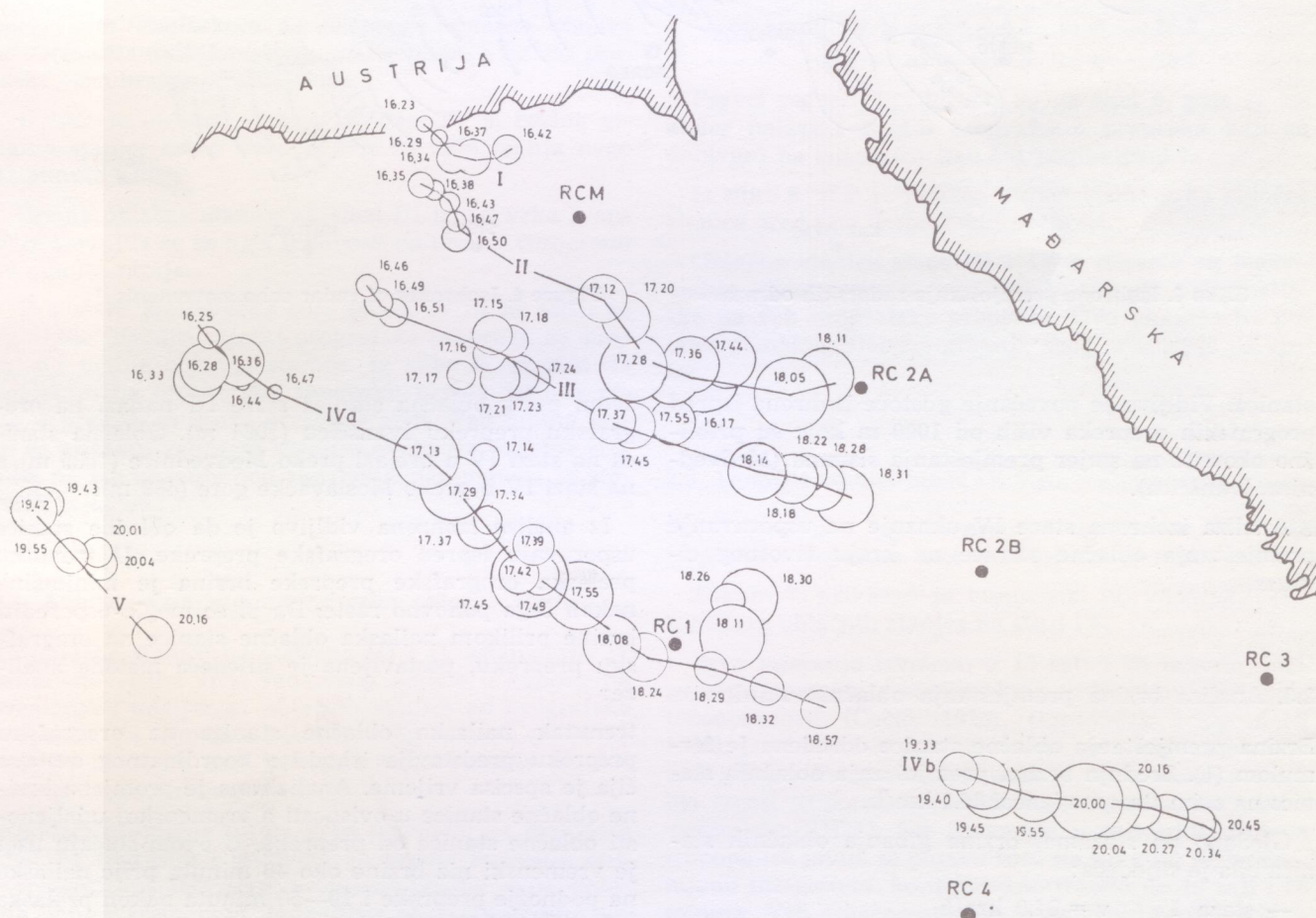
Staza III, dužine 157 km, proteže se južno od Pohorja, uz Maceljsku goru, preko Ivanščice do Kalnika.

Staza IV, dužine 347 km, proteže se od Savinjskih Alpi, dolinom Savinje preko Celja, sjeverno od Bohora, dolinom Sutle prema Medvednici, Dugog Sela preko Moslavačke gore do Daruvara. Staza IV podijeljena je u dva dijela. Prvi dio (IV a) dugačak je 225 km, a drugi (IV b) 80 km. Karakterističan je diskontinuitet između prvog i drugog dijela staze, duljine 47 km, na kojem nije izmjeren ni jedan radarski odraz.

Na osnovi podataka o položaju pojedinog radarskog odraza u vremenu, načinjena je karta izohrona premještanja odraza (slika 4.).

Interpolacijom su određeni položaji oblačnih stanica svakih 10 minuta, počevši od 16.20 do 20.40 sati.

Karakteristična je istovremena pojava oblačnih stanica na stazama I, II, III i IV. Do pojave oblačne stanice na stazi V dolazi 3 sata i 20 minuta kasnije, pri-



Slika 3. Kompozitna slika radarskih mjerenja 29. 6. 1982.

Figure 3. Complex picture of radar measurements on 29 June 1982

2.2. Staze i izohrone oblačnih stanica

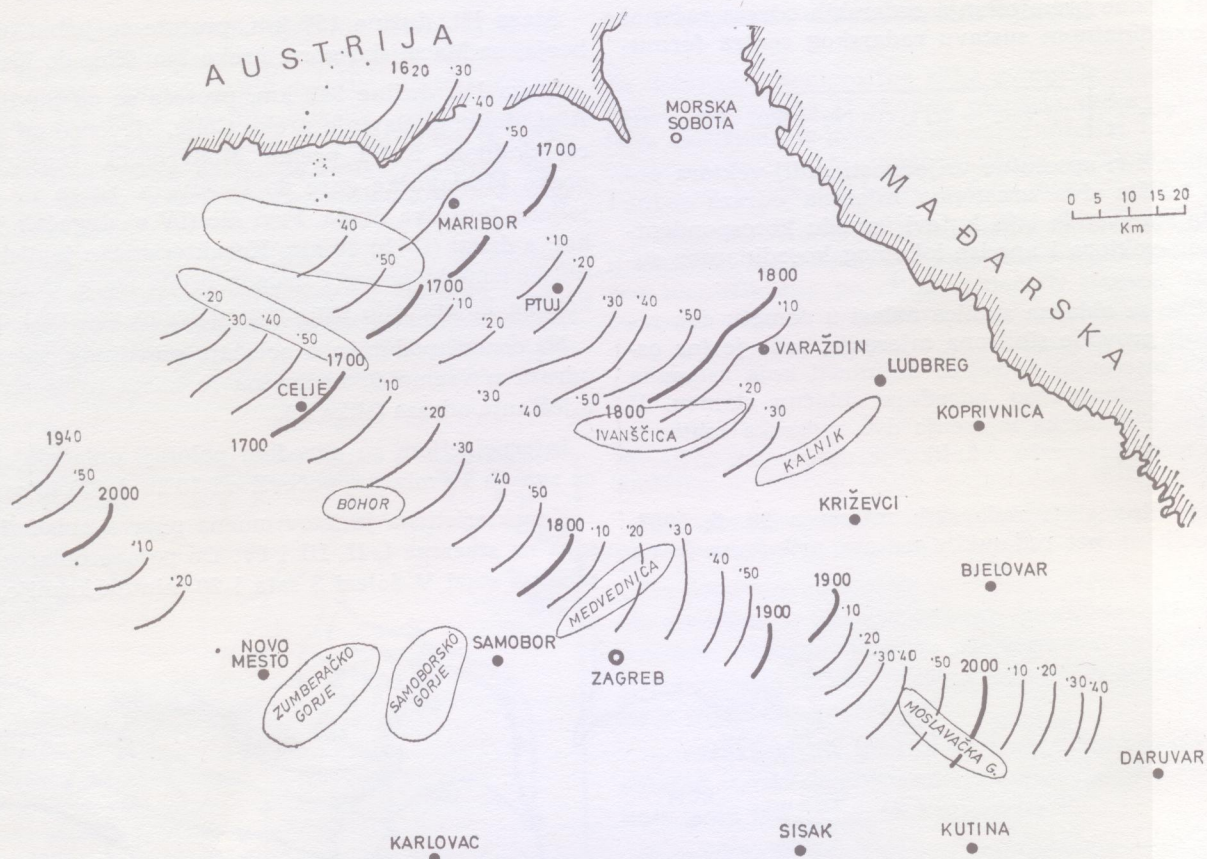
Analiza slike 3. ukazuje na 5 staza premještanja oblačnih stanica. Staze su kvaziparalelne, orijentirane NW—SE, a njihov razmak se povećava u smjeru okomitom na orijentaciju staza. Staze su označene brojevima I do V. Staze I i V određene su na osnovi mjerenja RC Maribor i ne prelaze područje poligona SR Hrvatske pa u ovom radu nisu uzete u razmatranje.

Staza II, dužine 136 km, proteže se sjeverno od Pohorja uz Dravu preko Ptuja do Varaždina.

blizno u vrijeme nastanka nove oblačne stanice na drugom dijelu staze IV (IV b).

Na slici 4. se uočava diskontinuitet izohrona između staza II, III, IV i V koji je nastao zbog nepostojanja radarskih odraza oblačnih stanica u tom području, te diskontinuitet na stazi IV koji je nastao zbog disipacije oblačne stanice na prvom dijelu staze (IV a) i razvoja nove stanice na drugom dijelu staze (IV b).

Na slici 4. se uočava različita gustoća izohrona koja ukazuje na promjenu brzine premještanja oblačnih



Slika 4. Izohrone premještanja radarskih odraza

Figure 4. Isochrones of radar echo movements

stanica. Vidljivo je povećanje gustoće izohrona ispred orografskih prepreka viših od 1000 m koje su približno okomite na smjer premještanja sistema (Medvednica, Ivanščica).

Analiza izohrona staze IV ukazuje na usporavanje premještanja oblačne stanice na kraju životnog ciklusa.

2.3. Analiza brzina premještanja oblačnih stanica

Brzina premještanja oblačne stanice određena je formulom (1). Srednja brzina premještanja oblačnih stanica na svim stazama iznosi 84.1 km/h.

Gledano po stazama, brzina gibanja oblačnih stanica bila je slijedeća:

- staza I $v = 84.0$ km/h
- staza II $v = 85.0$ km/h
- staza III $v = 89.0$ km/h
- staza IV a $v = 86.8$ km/h
- staza IV b $v = 66.0$ km/h
- staza V $v = 96.4$ km/h

Uočava se porast brzina prema jugu što potvrđuje opažanja vezana uz premještanje hladne fronte, koja povećava brzinu od centra ciklone prema periferiji (Palmen i Newton, 1969).

Daljom analizom su obuhvaćene one brzine oblačnih stanica koje su se kretale stazama III i IV. Na

svom putu, oblačna stanica staze III nailazi na orografsku prepreku Ivanščicu (1061 m). Oblačna stanica na stazi IV a prelazi preko Medvednice (1035 m), a na stazi IV b preko Moslavačke gore (489 m).

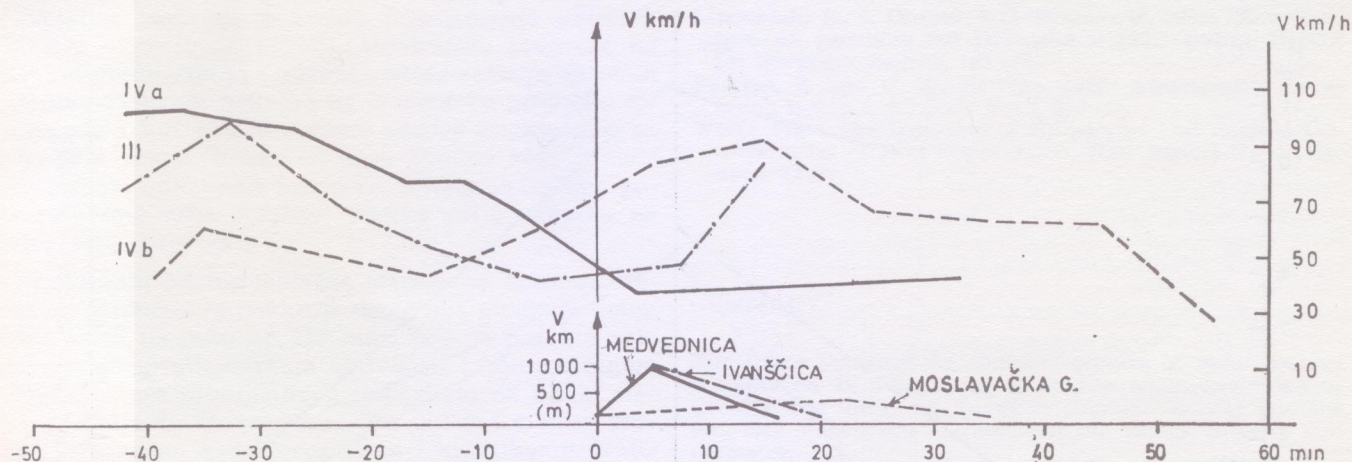
Iz analize izohrona vidljivo je da oblačne stanice usporavaju ispred orografske prepreke. U trenutku prelaska orografske prepreke brzina je minimalna nakon čega ponovno raste. Da bi se mogle usporediti brzine prilikom nailaska oblačne stanice na orografsku prepreku, postavljena je slijedeća metoda analize:

trenutak nailaska oblačne stanice na orografsku prepreku predstavlja ishodište koordinatnog sustava čija je apscisa vrijeme. Analizirana je promjena brzine oblačne stanice u ovisnosti o vremenskoj udaljenosti oblačne stanice od prepreke. U ovom slučaju uzet je vremenski niz brzine oko 40 minuta prije nailaska na podnožje prepreke i 10—50 minuta nakon prolaska vrha orografske prepreke.

Rezultati su prikazani na slici 5. gdje je os apscisa — relativno vrijeme, a ordinata — brzina.

Na slici 5. je označen i profil orografske prepreke koji je dan u ovisnosti o brzini prolaza oblačne stanice iznad prepreke. U slučaju prolaska oblačne stanice preko Moslavačke gore dolazi do prenaplašenog razvlačenja orografske prepreke zbog male brzine premještanja stanice. Profil orografske prepreke je definiran s tri točke: navjetrinskim i zavjetrinskim podnožjem i vrhom.

Na slici 5. u slučaju Medvednice i Ivanščice, uočava se usporenje oblačnih stanica pred orografskom



Slika 5. Utjecaj orografske prepreke na brzinu oblačne stanice. Rimskim brojevima označene su staze oblačnih stanica na koje se odnose izračunate brzine.

Figure 5. Orographical obstacle influence on a cloud cell speed. The evaluated speed correspond to the cloud cell paths which are marked by roman numbers.

preprekom. Nailaskom na prepreku oblačna stanica se premješta kvazikonstantnom brzinom, a nakon prelaska vrha brzina gibanja raste.

U slučaju oblačne stanice na stazi IV a, brzina gibanja stanice iznad vrha je bila za 63% manja nego 41 minuta ranije.

Brzina oblačne stanice na stazi III iznad vrha Ivanšćice smanjila se za 51% u odnosu na brzinu izmjerenu 30 minuta ranije.

U slučaju Moslavačke gore (staza IV b) ne može se egzaktno utvrditi utjecaj orografske prepreke na promjenu brzine oblačne stanice. Iz slike 5. se vidi da dolaskom na orografsku prepreku brzina stanice raste, a prelaskom preko prepreke pada. Pad brzine može se pripisati zadnjem stupnju evolucije oblačne stanice, na što ukazuje hod radarskih parametara za stazu IV b na slici 7.

2.4. Analiza promjene visine vrha oblačne stanice

Za oblačne stanice na stazama III i IV analizirana je promjena visine vrha radarskog odraza u odnosu na vremensku udaljenost oblačnih stanica od orografske prepreke. Za ishodište koordinatnog sustava (slika 6.) uzet je trenutak kad je visina vrha oblačne stanice postala maksimalna.

Podaci promjene visine vrha izgladjeni su metodom linearne regresije i dobiveni su pravci regresije koji reprezentiraju teorijsku promjenu visine vrha oblačne stanice vremenom. Jednadžba pravca regresije koji se odnosi na promjenu visine vrha s vremenom dana je s

$$t = aH + b, \quad (2)$$

gdje su: t — vrijeme, H — visina vrha, a i b — koeficijenti pravca regresije.

Za pojedine staze dobiveni su slijedeći koeficijenti pravca regresije:

— za stazu III	$a_1 = 6.6$	$b_1 = -58.4$
	$a_2 = -8.7$	$b_2 = 72.5$
— za stazu IV a	$a_1 = 19.8$	$b_1 = -240.3$
	$a_2 = -5.6$	$b_2 = 69.7$

$$\begin{aligned} \text{— za stazu IV b } a_1 &= 4.1 & b_1 &= -38.2 \\ a_2 &= -10.5 & b_2 &= 98.1 \end{aligned}$$

Pravci regresije prikazani su na slici 6, gdje se također nalaze i profili orografskih prepreka koji su dobiveni na isti način kao i u poglavlju 3.2.

Iz slike 6. vidi se izražen porast visine vrha oblačne stanice pred i na orografskoj prepreci.

Oblačne stanice staze III i IV a dosegle su maksimalnu visinu vrha 5, odnosno 10 minuta prije nailaska na vrh orografske prepreke. Ovo ukazuje na pojavu pomaka uzlaznog gibanja zbog orografije uz vjetar.

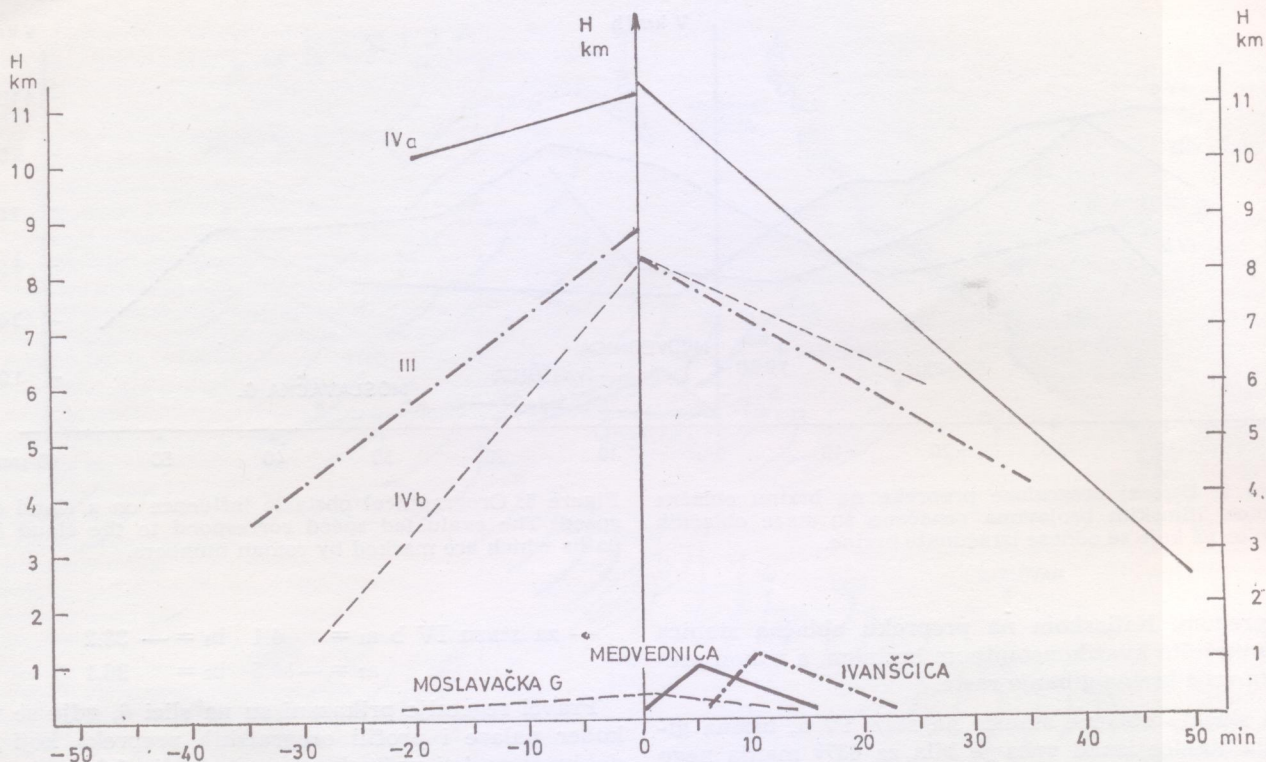
2.5. Oblačne stanice staze IV

Oblačna stanica koja se premještala stazom IV a bila je praćena pojavom tuče veličine do 70 mm.

Slikom 7. prikazan je vremenski niz radarskih parametara oblačnih stanica na stazi IV.

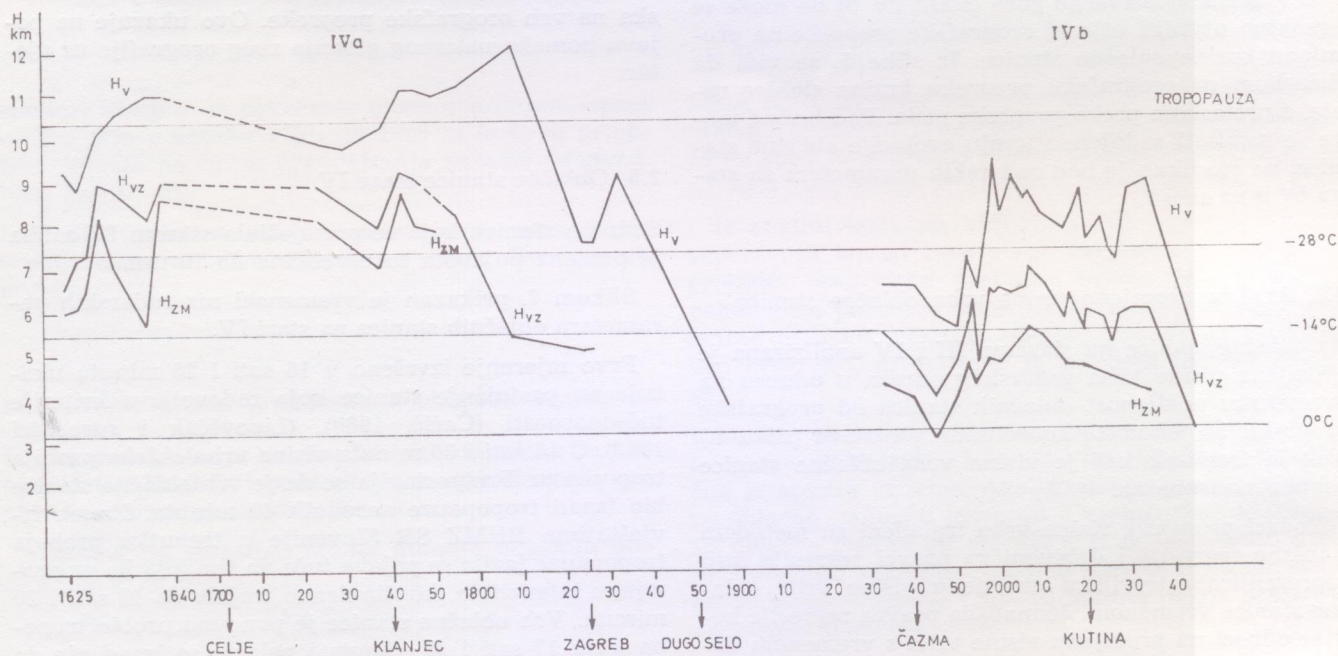
Prvo mjerenje izvršeno u 16 sati i 25 minuta ukazuje na postojanje stanice koja zadovoljava kriterije tučoopasnosti (Čačić, 1980), (Lipovščak i suradnici 1982). U 16 sati i 30 minuta visina vrha oblaka probija tropopauzu. Pretpostavlja se da je vrh oblačne stanice bio iznad tropopauze narednih 40 minuta. Prema izvještajima RHMZ SR Slovenije u trenutku proboja tropopauze javila se pojava tuče na tlu koja je, uz promjenu intenziteta, kontinuirano trajala do 18 sati i 20 minuta. Vrh oblačne stanice je ponovno probio tropopauzu u 17 sati i 35 minuta i nalazio se iznad nje do 18 sati i 15 minuta. U 18 sati i 08 minuta vrh odraza je dosegao maksimalnu visinu od 12.3 km, nakon čega je naglo padao (slika 6, slika 7). Prema WMO klasifikaciji oblačnih stanica (WMO, 1981), oblačna stanica na stazi IVa spada u grupu super-stanica. Na to ukazuju: brzina, duljina života, horizontalna i vertikalna rasprostranjenost, duljina staze, vrsta i intenzitet atmosferskih pojava, veličina zrna tuče i nastale štete.

Na oblačnu stanicu, nailaskom na područje SR Hrvatske, u 17 sati i 15 minuta počelo je djelovanje reagensom na bazi AgI. Od 17 sati i 15 minuta do 18 sati i 08 minuta, kad je super-stanica dosegla maksi-



Slika 6. Utjecaj orografije na visinu vrha oblačnih stanica. Rimskim brojevima označene su staze oblačnih stanica na koje se odnose radarske visine vrha.

Figure 6. Orographical influence on a cloud cell top height. The radar top heights correspond to the cloud cell paths which are marked with roman numbers.



Slika 7. Vremenski niz radarskih parametara oblačnih stanica na stazi IV. Rimskim brojevima označen je prvi, odnosno drugi dio staze.

Figure 7. Radar parameters time series of the cloud cells on the path IV. The first and the second part of the path are marked with roman numbers.

malnu visinu, ispaljeno je 35 TG 10 i 11 SAKO 6—3 raketa. Nakon toga dolazi do razmjerno brze disipacije oblaka koja je bila praćena dodatnim zasijavanjem. Potpuna disipacija oblaka i pad visine vrha ispod 4 km zabilježena je u 18 sati i 57 minuta.

U 19 sati i 42 minuta na stazi IVb zabilježena je pojava nove oblačne stanice na koju se također djelovalo reagensom.

4. ZAKLJUČAK

I pored teškoća u analizi, zbog nesavršenosti radara 3MK7 i diskontinuiteta u mjerenju uvjetovanim ručnom upotrebom radara, dana metoda za stvaranje kompozitne slike može poslužiti kao predložak za mezoanalizu radarskih podataka na većem području.

Analiza izohrona i brzine premještanja oblačnih stanica ukazuje na utjecaj orografske prepreke na brzinu premještanja i karakteristiku razvoja oblačnih stanica. Prilikom nailaska na orografsku prepreku visine oko 1 km, brzina oblačne stanice smanjuje se na 50–60% iznosa brzine oblačne stanice koja prolazi područjem gdje nema prepreke. Hodogrami visina pokazuju rast vrha oblačne stanice prije nailaska na orografsku prepreku.

Detaljnija analiza oblačne stanice na stazi od Celja do Medvednice pokazuje da se ona gibala brzinom 86.8 km/h na putu od 225 km i bila je praćena vrlo izraženom grmljavinskom aktivnosti i kontinuiranom pojavom tuče promjenjivog intenziteta na dijelu staze od Celja do Medvednice. Ova oblačna stanica prema prikazanim karakteristikama i klasifikaciji WMO predstavlja superstanični Cb.

LITERATURA

- Battan, L. J., 1973: Radar Observation of the Atmosphere, Univ. of Chicago Press, Chicago, 161 str.
- Berliner Wetterkarte, 1982: Das Eeropaeische Wetterbild, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.
- Browning, K. A., 1976: The structure and Mechanisms of Hailstorms, NCAR, Boulder, 43 str.
- Čačić, I., 1980: Metode obrade meteoroloških radarskih podataka, Zbornik radova sa znanstvenog skupa »Numeričke metode u tehnici«, Stubičke Toplice, 465–472.
- , i B. Lipovšćak, 1982: Prilog upoznavanju oblaka vertikalnog razvoja u međurječju Save i Drave, (predano za publiciranje SOAREN II).
- Gelo, B., 1976: Razvoj i gibanje konvektivnih oblaka u sjeverozapadnoj Hrvatskoj u razdoblju radarskih mjerenja, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, 77 str.
- Lipovšćak, B., I. Huzjak, i Č. Branković, 1982: Obrana od tuče na području SR Hrvatske u 1981. godini, RHMZ SR Hrvatske, Zagreb, 163 str.
- Palmen, E. and C. W. Newton, 1969: Atmospheric circulation systems, AP New York, 603 str.
- WMO, 1981: The Dynamic of Hailstorms and Related Uncertainties of Hail Suppression, Hail Report No. 3, Geneva, 22 str.

SUMMARY

The paper presents the complex picture of radar measurements on 29 June 1982, when the north-west area of Croatia was under an intensive thunder activity and the hail size measurements indicated the values up to 70 mm diameter.

It is derived on the basis of 215 radar echoes measured by the WSR 74C (Maribor) and the 3MK7 (RC-2A, RC-2B, RC-3 and RC-4) radars. With the analyses of radar data the group of 78 radar echoes is separated. The echoes represent 6 cloud cell evolution and demonstrate the frontal system movement.

The problem of compatibility of radar echoes obtained by radars with wave lengths $\lambda = 5$ and 10 cm has been recognized, as well as the problem of the 3MK7 radar measurement accuracy.

Radar measurements have been performed from 4.23 p.m. to 8.45 p.m. The velocity analysis of a cloud cell propagation shows 5 basic cloud cell propagation trajectories, with the mean speed 84.1 km/h on the path of 360 km length. The orographical influence on a velocity and a cloud cell top variation is found at the windward slope of Ivanščica and Medvednica where the cloud cell movement decelerate down to 50–60 per cent of its former velocity.

The time series of radar hail cell parameters on the path from Celje to Medvednica, according to the World Meteorological Organisation classification (WMO, 1981), corresponds to a cloud supper cell.