



University of Zagreb
FACULTY OF SCIENCE

Mladen Viher

**INFLUENCE OF TROPOSPHERIC DYNAMIC'S
PROCESSES ON NONSTANDARD RADIOWAVE
REFRACTION PHENOMENA**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2011



Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

Mladen Viher

**UTJECAJ TROPOSFERSKIH DINAMIČKIH
PROCESA NA POJAVE NESTANDARDNE
REFRAKCIJE RADIO VALOVA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:
Prof.dr.sc. Branko Grisogono

Zagreb, 2011.

Jasminki, Heleni i Petru

Zahvale

Rad ovog obima ne bi bio moguć bez izravne i neizravne pomoći mnogih osoba i organizacija kojima se, ovim putem, od sveg srca zahvaljujem. Na prvom mjestu izrazio bih zahvalnost prof.dr.sc. Milanu Bajiću koji me uputio u ovu problematiku i uložio veliki stručni i organizacijski napor kako bi one prve i najteže korake doveo do praktične realizacije unutar Oružanih snaga RH. Zahvaljujem se i načelniku stožera Zapovjedništva HRZ i PZO, bivšem zapovjedniku brigade ZMIN, brigadnom generalu Ivanu Koncu koji je prepoznao potrebu za razvojem modela radio vidljivosti i odobrio njegov razvoj. Isto tako, zahvaljujem brigadnom generalu u mirovini Blagi Dujmoviću i brigadiru u mirovini Damiru Ćuriku, bivšim zapovjednicima Središnjice za elektroničko djelovanje/izviđanje koji su prepoznali potencijal ovog rada za potrebe elektroničkog izviđanja i djelovanja. Veliku zahvalnost dugujem kolegama dipl.ing. Ivici Posavcu i mr.sc. Toniju Kovaču s kojima je započeo rad na prvim inačicama programa potencijalne radarske vidljivosti. Za veliku pomoć oko rješavanja problema vezanih za geodetska i kartografska preračunavanja zahvaljujem se dr.sc. Dragi Štembergeru i dr.sc. Dragi Špoljariću s Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Dugujem zahvalnost za razumijevanje i poticaj na inicijalna istraživanja nestandardnih refrakcija mr.sc. Alici Bajić kao i svim djelatnicima Hidrometeorološkog zavoda koji su sudjelovali u postupku obrade i arhiviranja aerosondažnih podataka. Zahvaljujem se ravnateljima Instituta za istraživanje i razvoj obrambenih sustava Ministarstva obrane Republike Hrvatske: brigadiru u mirovini dr.sc. Vjekoslavu Stojkoviću, dr.sc. Tomi Radičeviću i brigadiru dr.sc. Dariu Matiki na velikoj potpori u radu. Zahvaljujem se Ministarstvu obrane Republike Hrvatske na financijskoj i svakoj drugoj pomoći u poslijediplomskom studiju. U završnoj fazi rada imao sam čast surađivati sa stručnjacima iz područja radio-navigacije i utjecaja okoliša na rad elektroničkih sustava prof.dr.sc. Tomislavom Kosom i dr.sc. Renatom Filjarom. Zahvaljujem se kolegici doc.dr.sc. Maji Telišman Prtenjak na suradnji i koautorstvu na radovima koji su prostekli iz ovog istraživanja, posebnu zahvalnost dugujem brigadiru u mirovini dr.sc. Ronaldu Eisenwagneru na brojnim sugestijama iz svojeg izuzetno bogatog iskustva primjene meteorologije i radio tehnike u zrakoplovstvu te pomoći oko pripreme članaka. Najveću zahvalnost dugujem mentoru prof.dr.sc. Branku Grisogonu koji je uložio mnogo truda i vremena u konačnu formu ovog rada i od kojeg sam mnogo naučio.

Pored stručne pomoći, studij i stručni rad ne bi bio moguć bez potpore i poticaja od strane dragih osoba iz najužeg kruga obitelji. Zato jedno veliko hvala mojoj majci Nadi za roditeljsku brigu i poticaj. Veliko, veliko hvala mojoj supruzi Jasminki, kćeri Heleni i sinu Petru na svakoj pomoći, potpori i razumijevanju za rad na ovoj disertaciji zbog kojeg smo propustili previše zajedničkih trenutaka.

Sažetak

Tema rada su pojave nestandardne refrakcije radio valova nad područjem Jadranskog mora i meteorološki čimbenici koji su uzroci ovih pojava. Pojave nestandardne refrakcije značajno utječu na rad elektroničkih sustava: radio-telekomunikacija, radara, radio-navigacijskih uređaja, radio i TV difuzije te elektroničkog ratovanja. Pri tome ne treba zaboraviti ni utjecaj na sve aktualniju zaštitu od prekomjernog neionizirajućeg zračenja i nenamjerno ometanje. Iako su fizikalni uvjeti za nastanak i razvoj nestandardnih refrakcija poznati, a područje Sredozemlja od ranije je poznato po čestini i intenzitetu nestandardnih pojava, detaljan opis pojava nestandardne refrakcije za područje Jadranskog mora, temeljen na meteorološkim mjerenjima, do sada nije bio napravljen.

U radu su korišteni relativno dugi vremenski nizovi meteoroloških podataka, u trajanju sedam do petnaest godina, aeroloških sondaža koje su provodile četiri aerološke postaje koje okružuju Jadransko more: Udine, San Pietro Capofiume, Zadar i Brinidisi. Na temelju tako dobivenih vertikalnih profila tlaka, temperature i vlage izračunati su vertikalni gradijenti profila indeksa loma za radio valove koji određuju refrakcijske uvjete u atmosferi. Proučeni su i fizikalno opisani vertikalni profili indeksa loma do visine 40 km, učestalosti i vertikalne radiobe nestandardnih refrakcija te njihovi godišnji hodovi. Rezultati pokazuju značajan udio pojava nestandardnih refrakcija i pravilnost njihovih godišnjih hodova. Vertikalni profili razdioba pojava nestandardne refrakcije pokazuju kako se one najčešće javljaju u atmosferskom graničnom sloju i u donjim dijelovima troposfere što je povezano s tokovima topline i vlažnosti. U troposferi se broj anomalnih pojava naglo smanjuje s visinom, a u stratosferi vladaju refrakcijski uvjeti bliski uvjetima nestandardne refrakcije.

Poznavanje profila indeksa loma i statističkih parametara anomalnih refrakcija nad Jadranom omogućava adaptaciju postojećih i razvoj novih meteoroloških numeričkih modela koji će moći vizualizirati područja zahvaćena anomalnom refrakcijom i prognozirati pojave nestandardne refrakcije. Na taj način će se praćenje i prognoziranje refrakcijskih uvjeta nad Jadranskim morem moći operacionalizirati u meteorološkoj praksi.

Summary

Topic of this work concerns the occurrence of anomalous refraction of radio waves over the area of the Adriatic Sea and meteorological factors which are causes of these phenomena. Anomalous refraction phenomena significantly affect the operation of electronic systems: radio and telecommunications, radars, radio navigational aids, radio and TV diffusion, and electronic warfare. Also, we should not forget the impact on protection against excessive non-ionizing radiation and unintentional interference. Although the physical conditions for the emergence and development of anomalous refraction were recognized, and the Mediterranean region is known by the frequent and intensive anomalous refraction phenomena, a detailed description of the occurrence of anomalous refraction for the Adriatic Sea, based on meteorological measurements, has not yet been done.

In this work several relatively long time meteorological data series, seven to fifteen years long, were used. These were aerological soundings of four aerological stations around the Adriatic Sea: Udine, San Pietro Capofiume, Zadar and Brinidisi. Based on the resulting vertical profiles of pressure, temperature and humidity, vertical gradients of the refractive index profile of radio waves, which determine the refractive conditions in atmosphere, were calculated. The vertical profiles of refraction index were studied and physically explained, as well as frequencies and vertical distributions of anomalous refractions and their annual cycles. The results show a significant share of nonstandard refraction phenomena and the regularity of their annual cycle. Vertical profiles of distribution of anomalous refraction phenomena show that they most often occur in the boundary layer and the lower parts of the troposphere, where the heat and humidity fluxes are significant. The number of anomalous refraction phenomena in the troposphere rapidly decreases with height while in the stratosphere the refractive conditions are close to the anomalous refraction.

Knowing the refractive index profile and the statistical properties of anomalous refraction over the Adriatic, it is possible to adapt one of existing meteorological numerical models, or developing a new one, which will enable us to visualize the areas affected by anomalous refraction phenomena and predict anomalous refraction. In this way, the monitoring and forecasting refractive conditions over the Adriatic Sea could be a part of the meteorological service operational work.

Ključne riječi

Nestandardne refrakcije radio valova, Jadransko more, aerološke sondaže, vertikalni profili modificiranog indeksa loma.

Sadržaj

Zahvale
Sažetak
Summary
Ključne riječi
Sadržaj

1. UVOD	1
1.1 PROPAGACIJA RADIO VALOVA U TROPOSFERI	3
1.2 VERTIKALNI GRADIJENT INDEKSA LOMA	10
2. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA.....	15
2.1 VREMENSKA I PROSTORNA DOSTUPNOST PODATAKA	15
2.2 KLIMATSKE ZNAČAJKE JADRANA	21
2.3 METODE, TEHNIKE I INSTRUMENTI PRIKUPLJANJA PODATAKA	28
3. REZULTATI.....	31
3.1 VERTIKALNI PROFILI MODIFICIRANOG INDEKSA LOMA NAD JADRANOM	31
3.1.1 Eksponencijalni model indeksa loma za radio valove u atmosferi.....	31
3.1.2 Polinomni model indeksa loma za radio valove u atmosferi.....	33
3.1.3 Linearni model profila indeksa loma u stratosferi.....	36
3.2 POVRŠINSKI INDEKS LOMA ZA JADRANSKE POSTAJE	37
3.2.1 Razdioba iznosa površinskog indeksa loma	38
3.2.2 Razdioba površinskih pojava refrakcije radio valova.....	40
3.3 ČESTINA I VERTIKALNA DISTRIBUCIJA POJAVA NESTANDARDNE REFRAKCIJE	41
3.3.1 Pojave radio-kanala nad Jadranom.....	42
3.3.2 Pojave subrefrakcija nad Jadranom	45
3.3.3 Pojave superrefrakcije nad Jadranom	48
3.4 GODIŠNJI HODOVI NESTANDARDNIH REFRAKCIJA NAD JADRANOM.....	51
3.4.1 Godišnji hodovi pojava radio-kanala	51
3.4.2 Godišnji hodovi pojava subrefrakcija	53
3.4.3 Godišnji hodovi pojava superrefrakcija.....	54
3.5 VERTIKALNI PROFIL GRADIJENTA MODIFICIRANOG INDEKSA DO VISINA 40 KM	56
3.6 MODIFICIRANI INDEKS LOMA U STRATOSFERI	61
ZAKLJUČAK.....	63
LITERATURA	66
PRILOG A: GODIŠNJI HODOVI POJAVA NESTANDARDNE REFRAKCIJE	73
KAZALO.....	76
POPIS KRATICA	77
KRATKA BIOGRAFIJA AUTORA	79

1. Uvod

Propagacijom radio valova u atmosferi fizičari i elektrotehničari bave se oko stotinu godina, ali interes za ovu problematiku bilježi periodične uspone i padove. Nakon velikih otkrića ionosferskih slojeva koji reflektiraju kratkovalne radio valove, za koje je britanski fizičar Sir Edward V. Appleton primio Nobelovu nagradu 1947. godine, slijedilo je razdoblje relativnog zamiranja interesa sve do početka svemirske ere (npr. Flock, 1987; Ippolito, 1989, 1999). Svemirske letjelice nametnule su potrebu za sigurnom vezom sa Zemljom za što je trebalo riješiti probleme vezane uz fizikalne pojave kašnjenja i gušenja signala u ionosferskim slojevima (npr. Spoelstra, 1986; Langley, 1992). Propagacija na malim visinama ostala je na razini jednostavnih geometrijskih modela sve do sredine osamdesetih godina XX. stoljeća kad su se pojavile krstareće rakete, letjelice niskog radarskog odraza i Globalni pozicijski sustav (*Global Positioning System*, GPS kao novi sustav satelitske radio navigacije (npr. Altshuler i Kalaghan, 1974; Altschuler i Mano, 1982; Baby i sur., 1988; Emery i sur., 1990; Ishiguro i sur., 1990; Kaniuth i Tremel, 1992; Elgered i Lundqvist, 1984a, 1984b; Elgered, 1992a, 1992b, 1993; Frühwald, 2000; Elgered i sur., 2004). U ovom novom okruženju američki Mornarički istraživački laboratorij (*Naval Research Laboratory*, NRL) počeo se baviti propagacijom radio valova u troposferi radi otkrivanja područja nestandardne refrakcije u kojima radari na brodovima imaju manju vjerojatnost otkrivanja ciljeva na malim visinama (npr. Barrios, 1994; Hanyok, 2001; Thompson i sur., 2005; Haack i Burk, 2005a). Pritom su se koristila velika iskustva vezana uz propagaciju zvučnih valova u oceanima (Dockery, 1988). Razvijen je parabolički model jakosti polja (npr. Craig, 1988; Craig i Levy, 1991; Baumgartner 1983; Baumgartner i sur. 1983), a iz njega i Napredni propagacijski model (engl. *Advanced Propagation Model*, APM) koji opisuje pojave: apsorpcije, interferencije, difrakcije, raspršenja i refrakcije radio valova (Hitney i sur. 1985; Levy, 1990a; 1990b; Hitney, 1992). Praktičnoj primjeni ovih modela uvelike je pridonio nagli razvoj računala na kojima su se ovi, numerički vrlo zahtjevni modeli, mogli aplicirati.

Potrebu za modeliranjem radarske vidljivosti u Republici Hrvatskoj nametnule su promijenjene okolnosti u kojima se ustrojavala služba Zračnog motrenja i dojavljivanja (ZMID), danas Zračnog motrenja i navođenja (ZMIN). Zimi 1991/92. godine u operativnu uporabu uvedeni su radari P-12, P-14, P-15, 3Mk7 iz ratnog plijena i meteorološki radari na Puntijarki i u Donjem Miholjcu. Već sljedeće godine u rad su pušteni veliki radari S-600 i

mobilni OAR M-61 s tendencijom daljeg povećanja broja uređaja. U to vrijeme bili su ispitani i elaborirani brojni radarski položaji, ali mnogi nisu zadovoljavali novonastale ratne okolnosti. Naime, jugoslavenski radarski položaji bili su optimizirani za rano otkrivanje napadača iz susjednih država, a u 1991. godini prijetnja napada iz zraka dolazila je s prostora bivših republika. Pored toga, sposobnosti ratnog zrakoplovstva još uvijek su bila skromna i nedostatna za praktičnu provjeru radarske vidljivosti praćenjem vlastitih zrakoplova. Ove teškoće mogle su se riješiti samo modeliranjem radio vidljivosti, a u prilog je išlo što su prvi koraci već bili napravljeni 1990. godine u Tehničkom školskom centru JNA u Zagrebu. Zahvaljujući tome, već u proljeće 1992. godine imali smo prvi model radarske vidljivosti nazvan PRV (Potencijalna radarska vidljivost) koji je koristio digitalni model visina rezolucije 4" x 5" (oko 110 m x 120 m na 45° N) i propagacijski model temeljen na geometrijskoj optici (engl. *ray tracing*). PRV je korišten za izbor radarskih položaja brigade ZMIN, ali i za potrebe Hrvatske kontrole letenja (RP Kurilovec i RP Kozjak). Mogućnost modeliranja radarskog i elektroničkog izviđanja iz zraka programom PRV počela se koristiti i za potrebe Središnjice za elektroničko djelovanje, danas Središnjice za elektroničko izviđanje. Upravo na temelju modela vidljivosti programa PRV objektivizirana je potreba za elektroničkim izviđanjem iz zraka, što je realizirano u godinama 1992. do 1995. Tijekom tih izviđačkih letova opažene su brojne pojave nestandardnih refrakcija na visinama do 2500 m.

Iako je PRV izradio preko 2000 izračuna radio vidljivosti, većinom za potrebe elektroničkog izviđanja, pokazala se potreba za naprednijim modelom. Uvidom u literaturu izabran je APM, apliciran u programu AREPS (engl. *Advanced REfraction Prediction System*, Napredni sustav za predviđanje refrakcije) kojeg je razvio NRL. Ovaj model je zahtjevniji od PRV-a jer zahtijeva digitalni model terena rezolucije 3" x 3" (oko 90 m na srednjim geografskim širinama u koji su uključene visine vegetacije, građevina i vrste tla, radi parametriziranja dielektričnosti površine), podatke aeroloških sondaža (računanje realnog profila indeksa loma za radio valove u atmosferi) i tehničkih značajki uređaja i ciljeva (Askne i Westwater, 1986). Nakon višegodišnjeg rada aplikacija AREPS je prilagođena našim potrebama i pripremljen je digitalni model terena do udaljenosti 400 km od granica Hrvatske koji uključuje visine vegetacije i građevina sa stanjem iz 2004. godine. Danas je AREPS u operativnoj uporabi u Hrvatskom ratnom zrakoplovstvu i protuzračnoj obrani (HRZ i PZO).

Usporedno s apliciranjem AREPS-a provedena su istraživanja refrakcijskih uvjeta u troposferi i stratosferi za područje Republike Hrvatske i okolnih zemalja (Viher, 2006). Već

inicijalna istraživanja, provedena u Hidrometeorološkom zavodu 1994/95. godine pokazala su kako su pojave nestandardne refrakcije česte i intenzivne pa bi se trebale proučiti (npr. Ifadis, 1986; Viher, 1995). Složenost problematike refrakcije radio valova upućuje na potrebu suradnje prirodnih i tehničkih znanosti kako bi se objasnili, kvantificirali i u budućnosti prognozirali utjecaji pojava nestandardnih refrakcija na rad elektroničkih uređaja. Zbog izuzetno velike količine podataka koji su bili na raspolaganju, odlučeno je ograničiti se na područje Jadranskog mora, kao važnog prometnog pravca, na kojeg se rezultati odmah mogu primijeniti.

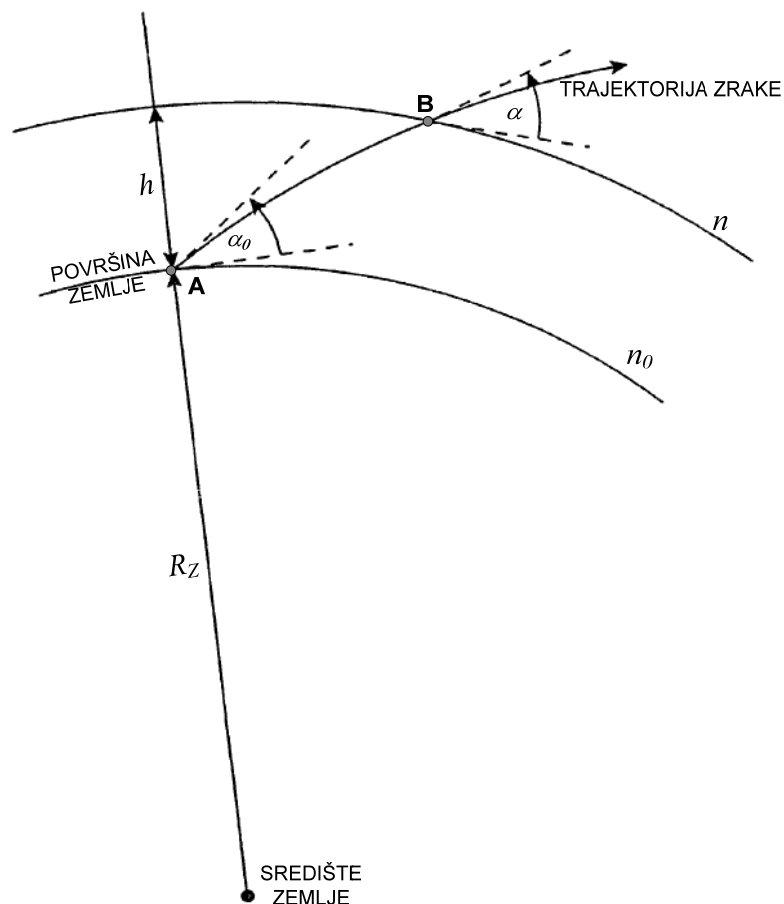
Rezultati ovog rada potenciraju značaj istraživanja pojava nestandardne refrakcije radio valova nad Jadranom jer brojni radovi upućuju na značajan utjecaj obalne cirkulacije (npr. Parlange i Brutsaert, 1990; Brücher, 1997; Brücher i sur. 1999; Haack i Burk, 2001; Brooks, 2001; Burk i sur. 2003; Burk i Haack, 2003a, 2003b, 2004; Burk i sur., 2005; Burk i Haack, 2005; Atkinson i Zhu, 2006; Telišman Prtenjak i sur., 2010). Metodologija korištenja redovitih aeroloških sondaža ima velike prednosti u smislu dostupnosti dugih i verificiranih nizova podataka koji se mogu jednostavno nadopuniti novim postajama i recentnim podacima te meteorološkim radarskim mjerenjima (Krajewski i Vignal, 2001; Alberoni i sur., 2003; Rossa i sur., 2004). Standardna metodologija sondiranja koju propisuje i nadzire Svjetska meteorološka organizacija (engl. *World Meteorological Organisation*, WMO), omogućava usporedivost i nadogradivost ovih podataka. Ipak, ova metodologija ima svojih ograničenja koja se odnose na nemogućnost korištenja u realnom vremenu budući da jedno balonsko sondiranje traje 45 minuta do sat vremena, nakon čega podatke treba provjeriti i odaslati u međunarodnu razmjenu. Tek razvojem numeričkih modela, ili adaptacijom postojećih, steći ćemo sposobnost proučavanja pojava nestandardnih refrakcija s visokom prostornom i vremenskom rezolucijom te prognožiranje pripadnih pojava (npr. Koch i sur. 1985; Haack i Burk, 2003, 2004, 2005b; Bech i sur., 2003a, 2004; Wang i sur., 2009). Vjerujem kako rezultati prikazani u ovom radu opravdavaju i iniciraju jedan takav znanstveni pothvat.

1.1 Propagacija radio valova u troposferi

Propagacija radio valova u troposferi određena je fizikalnim pojavama: refrakcije, atenuacije (prigušenja), raspršenja, refleksije i ogiba (npr. Ramo i sur., 1984; Skolnik, 1980, 1990; Bech i sur., 1998, 2003a, 2003b, 2003c; Stacey, 2008). U ovom radu naglasak je

stavljen na proučavanje utjecaja refrakcije radio valova koji nastaju zbog promjene indeksa loma s visinom. Na slici 1.1 prikazana je geometrijska konstrukcija Snellovog zakona iz kojeg se izvodi izraz za refrakciju elektromagnetskih valova (npr. Agnus-Leppan, 1960; Peebles, 1998).

U standardnoj atmosferi iznos indeksa loma n pada s visinom (npr. Pittman, 1999). Zbog toga se brzina radio valova s visinom povećava što dovodi do otklanjanja trajektorije zraka u visinu kao što je pokazano na slici 1.1.



Slika 1.1 Geometrijski odnosi Snellovog zakona iz kojeg se izvodi izraz za trajektoriju zrake (Peebles, 1998.).

Snellov zakon, koji opisuje promjenu kuta refrakcije zrake s promjenom indeksa loma n u optici izražavamo kutom u odnosu na lokalnu okomicu, ali je u radio tehnici uobičajen kut u odnosu na tangentu. U tom slučaju Snellov zakon dobiva oblik:

$$n(R_Z + h) \cos \alpha = n_0 R_Z \cos \alpha_0. \quad (1.1)$$

U izrazu (1.1) R_Z je polumjer Zemlje, h je visina iznad površine, n_0 je indeks loma na površini, n je indeks loma na visini h (u standardnim uvjetima $n < n_0$), α_0 je kut trajektorije i površine Zemlje, dok je α kut između trajektorije i lokalne horizontale na visini h .

Možemo ispitati teorijski slučaj homogene atmosfere u kojoj bi vrijedilo $n = n_0$, tada (1.1) možemo pisati:

$$n(R_Z + h)\cos\alpha = n R_Z \cos\alpha_0. \quad (1.2)$$

U homogenoj atmosferi nema promjene indeksa loma s visinom, što se vidi u (1.2) po tome što n možemo kratiti pa će posljedično tome doći do različitih iznosa α i α_0 samo zbog različite zakrivljenosti krugova polumjera R_Z i $(R_Z + h)$ na slici 1.1. Nakon kraćeg sređivanja (1.2) dobivamo izraz za refrakciju u homogenoj atmosferi:

$$\left(1 + \frac{h}{R_Z}\right)\cos\alpha = \cos\alpha_0. \quad (1.3)$$

U realnoj atmosferi postoji vertikalni gradijent indeksa loma dn/dh . Rezultati ovog rada pokazuju kako je vertikalni indeks loma u realnoj atmosferi jako složen. No, za praktične potrebe, a prvenstveno radi mjerenja udaljenosti i visine cilja radarom morali su se razviti jednostavni i primjenjivi modeli vertikalnog gradijenta indeksa loma. U praksi se koriste dva modela vertikalnog gradijenta indeksa loma: standardni (linearni) i eksponencijalni (npr. Skolnik, 1980; 1990; Collier, 1996; Smith, 1998). Linearni model vertikalnog gradijenta indeksa loma ima oblik:

$$n = n_0 + \frac{dn}{dh}h, \quad (1.4)$$

pri čemu dn/dh u (1.4) ima konstantnu vrijednost. Uvrstimo li (1.4) u izraz za Snellov zakon (1.1), dobivamo:

$$\left(n_0 + \frac{dn}{dh}h\right)(R_Z + h)\cos\alpha = n_0 R_Z \cos\alpha_0. \quad (1.5)$$

Nakon kraćeg sređivanja (1.5) dobivamo izraz za Snellov zakon u standardnoj atmosferi:

$$\left(1 + \frac{h}{R_Z} + \frac{h}{n_0} \frac{dn}{dh} + \frac{h^2}{n_0 R_Z} \frac{dn}{dh}\right) \cos \alpha \approx \cos \alpha_0. \quad (1.6)$$

Prosječna vrijednost indeksa loma na površini, na umjerenim širinama iznosi $n_0 = 1.000340$, znači možemo pisati $n_0 \approx 1$. Isto tako, u praktičnoj primjeni je iznos visine h reda veličine do 20 – 30 km što je malo u usporedbi s polumjerom Zemlje pa možemo zanemariti omjer $h/R_Z \ll 1$, odnosno možemo zanemariti krajnji desni član u zagradi u (1.6).

Uz pretpostavku kako je vertikalni gradijent indeksa loma stalan, $dn/dh = \text{const.}$ možemo uvesti novu konstantu R_e , koju nazivamo efektivni polumjer Zemlje koji je definiran kao

$$R_e = \frac{R_Z}{1 + R_Z \frac{dn}{dh}}. \quad (1.7)$$

Uvođenje efektivnog polumjera Zemlje je praktično jer uvrštenjem (1.7) u (1.6) dobivamo

$$\left(1 + \frac{h}{R_e}\right) \cos \alpha \approx \cos \alpha_0. \quad (1.8)$$

Vidimo kako se (1.8) podudara s izrazom za refrakciju u homogenoj atmosferi (1.3). To znači da ako zamijenimo stvari polumjer Zemlje R_Z s efektivnim polumjerom R_e možemo refrakciju pojednostaviti na slučaj atmosfere s homogenim indeksom loma. Konstantu proporcionalnosti između stvarnog i efektivnog polumjera Zemlje označavamo k :

$$R_e = k R_Z, \quad (1.9)$$

Tablica 1.1 Iznosi koeficijenta k izveden u (1.9) za različite tipove refrakcije radio valova

Tip refrakcije	k
subrefrakcija	3/4
bez refrakcije	1
standardna refrakcija	4/3
superrefrakcija	3/2
kritična refrakcija	∞
radio kanal	nije moguće modelirati

prema tome, (1.7) možemo pisati na drugačiji način:

$$k = \frac{1}{1 + R_Z \frac{dn}{dh}}. \quad (1.10)$$

Odredimo li dn/dh iz meteoroloških mjerenja (Burrows i Atwood, 1949) dobivamo tipične vrijednosti $1.2 < k < 1.9$ što se obično pojednostavljuje na iznos $k = 4/3$. Atmosfera u kojoj vladaju refrakcijski uvjeti linearnog vertikalnog gradijenta indeksa loma i u kojoj je iznos konstante $k = 4/3$ naziva se standardna atmosfera.

Supstituiranjem polumjera Zemlje R_Z s efektivnim polumjerom R_e postizemo reprezentaciju zraka ravnim crtama kao na slici 1.2. U tom slučaju je duljina projekcije zrake na površinu sfere polumjera $4/3 R_Z$, koju označavamo s na slici 1.2

$$s = R_e \sin \theta \approx R_e \cdot \theta. \quad (1.11)$$

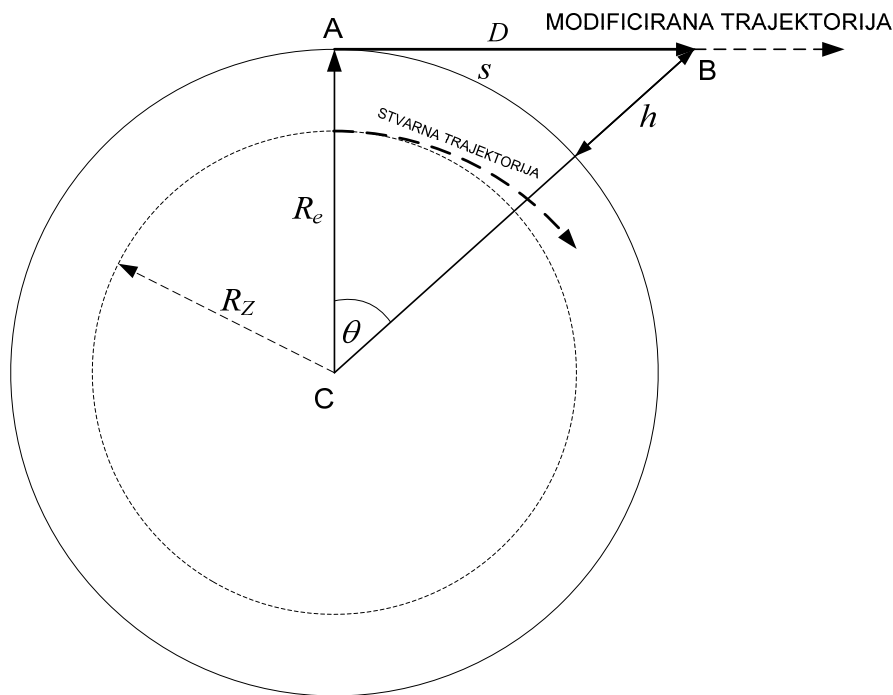
Za male iznose kuta θ vrijedi

$$s = R_e \sin \theta \approx R_e \cdot \theta = R_e \frac{D}{R_e} + h = R_e \frac{\sqrt{(R_e + h)^2 - R_e^2}}{R_e + h} = R_e \frac{\sqrt{2R_e h + h^2}}{R_e + h} \quad (1.12)$$

Praktično je $R_e \gg h$ pa možemo pisati $R_e + h \approx R_e$ i $(2R_e h + h^2) \approx 2R_e h$. U tom slučaju (1.12) možemo prevesti u jednostavniji oblik

$$s \approx \sqrt{2R_e h}. \quad (1.13)$$

Geometrijsko rješenje sa slike 1.2 ima veliku praktičnu vrijednost za modeliranje radio zraka (tzv. *ray tracing* model) u refraktivnoj atmosferi. Kao što je prikazano na slici 1.2 radio zrake su pravci, ako zbog refrakcije pretpostavimo povećanje polumjera Zemlje na efektivnu vrijednost $R_e = 4/3 R_Z$. Pravce je lakše opisati jednačbama analitičke geometrije u prostoru nego što bi to bio slučaj s lukovima krivulja. Osim što su izrazi jednostavniji, oni su i numerički manje zahtjevni te se modeliranje izvodi brže. No, preduvjet je modificiranje iznosa visina reljefa oko radara.



Slika 1.2 Zamjenom stvarnog polumjera Zemlje R_Z s efektivnim polumjerom R_e postiže se geometrijsko preslikavanje stvarne trajektorije zrake iz forme parabole u pravac.

Reljef se najčešće modelira rasterski, u pikselima zadanih dimenzija. Dimenzije piksela mogu biti zadane lučno ili prostorno (npr. lučne dimenzije 3" x 3" odgovaraju 90 m x 90 m na našim geografskim širinama). Svaki piksel reljefa potrebno je podići za iznos h na slici 1.2, što je piksel dalje od točke A na toj slici, veći je iznos h za koliko mu treba povećati nadmorsku visinu. Iz trokuta ABC na slici 1.2 vrijedi odnos

$$D^2 = (R_e + h)^2 - R_e^2 \quad (1.14)$$

iz kojeg nakon kvadriranja zagrade na desnoj strani dobivamo

$$D^2 = 2 R_e h + h^2 \quad (1.15)$$

što možemo pisati u drugačijem odnosu

$$\frac{D^2}{R_e} = 2h + \frac{h^2}{R_e}. \quad (1.16)$$

Za male iznose D , do nekoliko stotina kilometara iznos h je dovoljno malen da možemo pretpostaviti $h \ll R_e$, odnosno možemo zanemariti h^2/R_e u izrazu (1.16), a iz tog pojednostavljenog izraza slijedi

$$h = \frac{D^2}{2R_e}. \quad (1.17)$$

U zrakastim modelima refrakcije radio zraka još se koristi odnos (1.9):

$$h = \frac{D^2}{2k R_z} \quad (1.18)$$

u kojem se s promjenom iznosa k mogu modelirati neki od uvjeta nestandardne refrakcije prema tablici 1.1 (Bajić, 1986; Salapura, 1990).

Geometrijska konstrukcija trajektorije radio zrake kao i granične vrijednosti za pojedine tipove refrakcije prikazani su na slici 1.3. Jednadžbu (1.18) možemo iskoristiti i za računanje optičkog horizonta, u tom slučaju je $k = 1.18$.

1.2 Vertikalni gradijent indeksa loma

Temeljna fizikalna veličina za modeliranje trajektorije radio valova u atmosferi je indeks loma za radio valove (npr. Battan, 1973; Bajić i Viher, 1993; Bech i sur., 2000, 2002a, 2002b, 2003c). Promjene iznosa vertikalnog gradijenta indeksa loma uvjetuju i promjenu smjera širenja radio valova. Indeks loma za radio valove u atmosferi ovisi o tlaku i temperaturi zraka te naročito o količini vodene pare (npr. Liebe, 1992). Molekule vodene pare imaju dipolnu građu i zato jako utječu na prolazak elektromagnetskog vala (npr. Cole i Kantor, 1978; Brunner, 1992). Pri prolasku radio frekvencijskih elektromagnetskih valova kroz zrak orijentacija električnih polja molekula vodene pare mijenja se u ritmu prolazećeg elektromagnetskog vala i dovodi do usporavanja elektromagnetskog vala, povećavajući iznos indeksa loma (npr. David i Voge, 1969; Hill i sur., 1982).

Izrazi prema kojima možemo izračunati indeks loma radio valova frekvencije manje od 15 GHz dobiveni su empirijski, variranjem temperature T i tlaka zraka p te količine vodene pare u zraku. Razvijeni su brojni izrazi za računanje indeksa loma za radio valove (npr. IUGG, 1963; Battan, 1973; Black i Eisner, 1984; IRCC, 1986; Beutler i sur., 1987; de Jong, 1991; Bevis i sur., 1992; Brunner i Welsch, 1993; Brunner i Tregoning, 1994; Gallini, 1994; Rüeger, 2002). U radu je korišten izraz (Patterson i sur., 1994):

$$N = (n-1) \cdot 10^6 = \frac{77.6 [\text{K} \cdot \text{Pa}^{-1}] \cdot p}{T} + \frac{y \cdot 3.73 \cdot 10^5 [\text{K}^2 \text{Pa}^{-1}]}{T^2}, \quad (1.19)$$

$$y = \frac{rh \cdot 6.105 \cdot \exp(x)}{100} \quad x = 25.22 \frac{T - 273.15 [\text{K}]}{T} - 5.31 \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right). \quad (1.20)$$

Prvi član na desnoj strani (1.19) naziva se "suhi član" jer opisuje utjecaj tlaka i temperature zraka (npr. Rotheram, 1989), dok se drugi član naziva "vlažni član" (npr. Davis i sur., 1993; England i sur., 1993) jer u sebi, pored temperature zraka, sadrži i količinu vlage u zraku preko y . U (1.20) konstanta $T_0 = 273.15 \text{ K}$, a rh je relativna vlažnost zraka izražena kao omjer parcijalnog tlaka vodene pare e i parcijalnog tlaka zasićene vodene pare e_s , oba u hPa:

$$rh = 100 \frac{e}{e_s}. \quad (1.21)$$

Tlak vodene pare i tlak zasićene vodene pare možemo izračunati iz termodinamičke temperature zraka T i temperature rosišta T_d , što su fizikalne veličine dostupne aerosondažnim telemetrijskim mjerenjima (npr. Iribarne i Godson, 1973; Viher, 2007):

$$e = e_{s0} \cdot \exp \left[\frac{l_v}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_d} \right) \right], \quad (1.22a)$$

$$e_s = e_{s0} \cdot \exp \left[\frac{l_v}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]. \quad (1.22b)$$

U (1.22a) i (1.22b) konstante su: tlak zasićene vodene pare na 0°C $e_{s0} = 6.11 \text{ hPa}$, latentna toplina isparavanja $l_v = 2.5 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ i plinska konstanta vodene pare $R_v = 461.5 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$. Uvrštavanjem tlaka i temperature zraka te temperature rosišta izmjerenih balonskim sondažama u (1.19) do (1.22) možemo izračunati indeks loma za radio valove na različitim visinama (npr. Kantor i Tattelman, 1984; Viher, 1995; Johnson i sur., 1999).

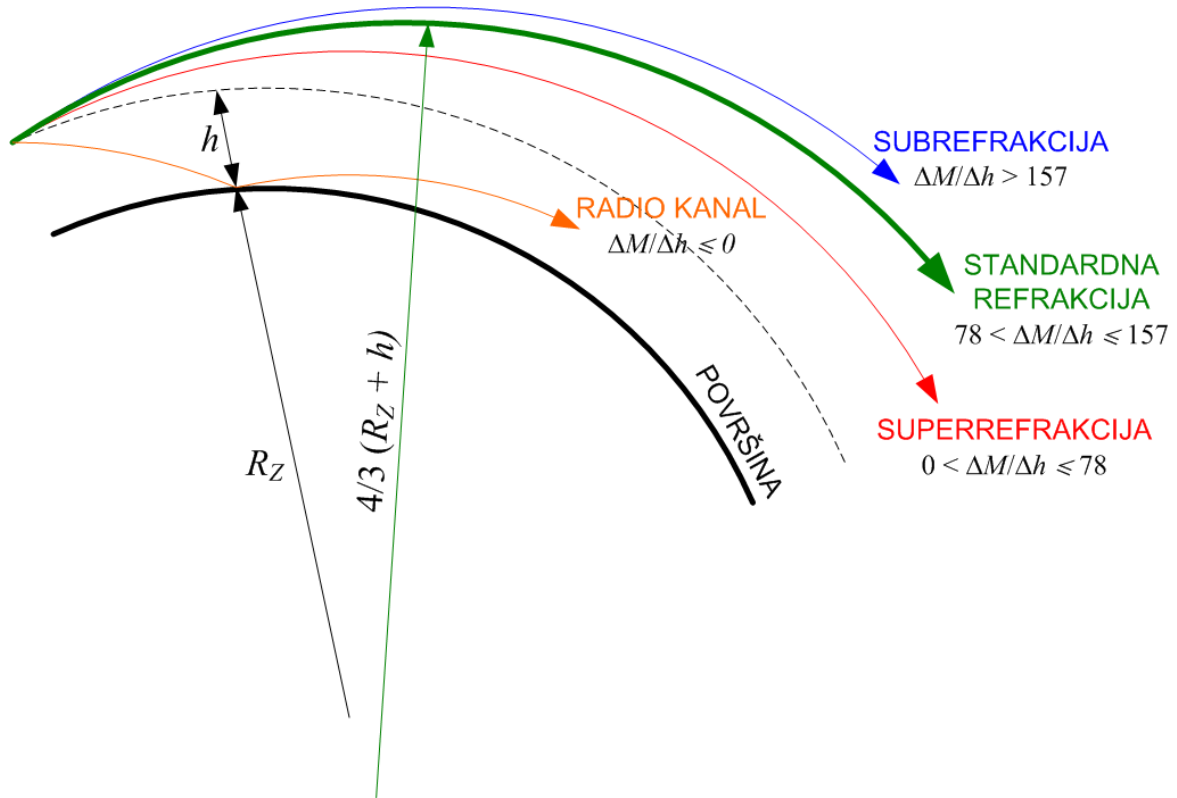
Indeks loma za radio valove n je bezdimenzijska fizikalna veličina čiji je prosječni iznos na površini Zemlje 1.000340 koji se sporo mijenja, tek na petoj-šestoj decimali u rasponu visina od nekoliko kilometara. Iz praktičnih razloga uvodi se N kako je to opisano u (1.19) koji zapravo predstavlja značajne znamenke indeksa loma n . U tehničkoj literaturi se N često izražava u tzv. "N jedinicama" iako je to, poput n , bezdimenzijska fizikalna veličina.

Tip nestandardne refrakcije određujemo po odnosu zakrivljenosti trajektorije zrake i zakrivljenosti lokalne horizontale ($R_Z + h$), kao što je prikazano na slici 1.3. Pri tome uvodimo novu veličinu nazvanu modificirani indeks loma, M :

$$M = \left[\frac{h}{R_Z} + (n-1) \right] \cdot 10^6 \quad (1.23)$$

koja uzima u obzir promjenu zakrivljenosti lokalne horizontale s promjenom visine h . S povećanjem visine h smanjuje se zakrivljenost lokalne horizontale (označeno crtkanim lukom kružnice na slici 1.3), taj utjecaj se ne može zanemariti na visinama većim od nekoliko kilometara.

Modificirani indeks loma M također prikazuje samo značajne znamenke indeksa loma i bezdimenzijska je fizička veličina. Unatoč tome, u tehničkoj literaturi iznos modificiranog indeksa loma M često se navodi u tzv. "M jedinicama" iako to fizikalno nije korektno.



Slika 1.3 Granične vrijednosti vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma za karakteristične slučajeve nestandardne refrakcije u atmosferi.

Postoji izravna veza između N i M na proizvoljnoj visini h (na površini je $M_0 = N_0$):

$$M = \frac{h}{R_Z} \cdot 10^6 + (n-1) \cdot 10^6 = \frac{h}{R_Z} \cdot 10^6 + N = 0.157 [\text{m}^{-1}] \cdot h + N \quad (1.24)$$

jer je $10^6/R_Z = 0.157 [\text{m}^{-1}]$. Iz (1.24) izvodimo odnos vertikalnih gradijenata indeksa loma i vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma:

$$\frac{dM}{dh} = \frac{10^6}{R_Z} + \frac{dN}{dh} \Rightarrow \frac{dN}{dh} = \frac{dM}{dh} - \frac{10^6}{R_Z}. \quad (1.25)$$

Temeljem mjerenja prosječne vrijednosti vertikalnog gradijenta indeksa loma (npr. Smith i Weintraub, 1953; Thayer, 1974; Lane, 1961; Skolnik, 1980) iznos $dn/dh = -4 \cdot 10^{-8} \text{ [m}^{-1}\text{]}$ smatra se standardnom refrakcijom u troposferi jer uvršten u (1.10) daje vrijednost k otprilike $4/3$. Deriviramo li (1.19) po visini h i uvrstimo li isti iznos dn/dh , dobit ćemo iznos gradijenta $dN/dh = -0.04 \text{ m}^{-1}$. Iz praktičnih razloga, standardna refrakcija se u literaturi obično izražava iznosom -40 [N/km] . Izrazimo li standardnu refrakciju u troposferi kroz vertikalni gradijent modificiranog indeksa loma (1.25) dobivamo iznos $dM/dh = 117 \text{ [M/km]}$, primjećujemo kako iznos modificiranog indeksa loma raste s porastom visine h .

Karakteristični tipovi nestandardne refrakcije; subrefrakcija, superrefrakcija i radio kanal (engl. *radio duct*) definiraju se iz iznosa vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma (v. sl. 1.3). Trajektorija radio zrake u standardnoj refrakciji je luk kružnice polumjera oko $(4/3)(R_E + h)$. U slučaju nestandardnih refrakcija granični gradijenti su definirani promjenom iznosa koeficijenta k u tablici 1.1 iz kojih se tada izračunava pripadajući vertikalni gradijent indeksa loma.

U slučaju subrefrakcije zakrivljenost trajektorije je manja nego u standardnim uvjetima. Ona se javlja u slučajevima kad je vertikalni gradijent indeksa loma velik te se brzina propagacije radio valova naglo povećava s visinom. Radio valovi se otklanjaju prema većim visinama što ima kao posljedicu teže ostvarenje radio veze na površini i manju vjerojatnost otkrivanja ciljeva na malim visinama (npr. Goldhirsh i sur., 1994).

U slučaju superrefrakcije zakrivljenost trajektorije radio zrake je veća od standardne trajektorije, ali je još uvijek manja od zakrivljenosti lokalne horizontale na visini h . Posljedica superrefrakcija je teže ostvarivanje radio veze na visini i manja vjerojatnost otkrivanja ciljeva na velikoj visini radarom. Povoljna posljedica superrefrakcije je povećani domet terestričkih veza i elektroničkog izviđanja.

Pri pojavi radio kanala iznos modificiranog indeksa loma ne raste, već pada s visinom. U tom slučaju se povećanjem visine smanjuje brzina propagacije valova te se oni otklanjaju prema tlu. Budući da je zakrivljenost trajektorije radio zraka u slučaju radio kanala veća od zakrivljenosti lokalne horizontale, trajektorije se savijaju prema površini Zemlje. Ukoliko je vodljivost površine dobra (morska voda, vlažno tlo) zraka se može višestruko reflektirati.

Pojava radio kanala omogućava višestruko povećanje dometa radio veza i radara na površini, ali nepovoljno utječe na propagaciju radio valova na većim visinama.

U troposferi vertikalni gradijenti modificiranog indeksa loma značajno variraju i često odstupaju od tzv. standardnih vrijednosti (npr. Newby, 1989; North, 1990; Pan i Shen, 1994; Moszkowicz i sur., 1994; Nesbitt, 2004). Propagacijski uvjeti koji jako odstupaju od standardnih vrijednosti nazivaju se nestandardne propagacije ili kraće anaprop. One su posljedica geometrijskog definiranja standardne trajektorije radio zraka čiji je polumjer zakrivljenosti $(4/3)R_Z$. Geometrijsko pojednostavljenje omogućava niz tehničkih rješenja za brzo određivanje daljina i visina ciljeva na radarima te relativno jednostavno projektiranje sustava radio telekomunikacija i radio difuzije (npr. Hall i Barclay, 1989; Gerstoft i sur., 2000; Newby, 1992; Kopp, 2004).

2. Metodologija istraživanja

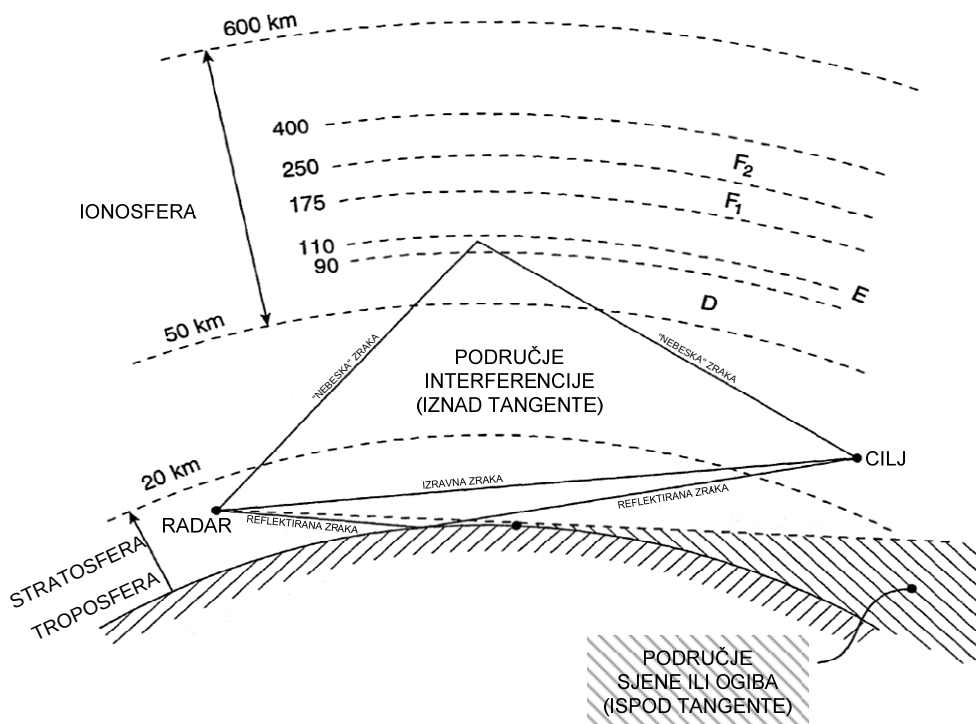
Unatoč velikom napretku, unatrag tridesetak godina, na području telekomunikacija, radionavigacije, radarske tehnike i elektroničkog ratovanja utjecaj lokalnih uvjeta na pojave refrakcije radio valova iznad Jadranskog mora i dalje je slabo istražen. Cilj ovog istraživanja je objektivno, statistički opisati pojave vezane uz refrakciju radio valova u donjim slojevima atmosfere iznad Jadranskog mora. To je moguće uz višegodišnje nizove podataka o vertikalnim gradijentima indeksa loma radio valova. Na temelju tog statističkog opisa pojave dobivaju se: uvid u čestinu pojave, periodičnost pojavljivanja kao i tipične visine na kojima se ona javlja što upućuje na to koji dinamički procesi u atmosferi utječu na stvaranje uvjeta (vertikalnih profila tlaka, temperature i vlažnosti) za pojave nestandardne refrakcije.

Metodologija rada se oslanja na redovite i standardizirane podatke balonskih sondaža koje pružaju aerološke postaje. To omogućava usporedbu podataka s različitim aeroloških postaja kao i mogućnost proširenja istraživanja uključivanjem novih postaja ili produženjem vremenskog niza podataka.

2.1 Vremenska i prostorna dostupnost podataka

Ovo istraživanje bavi se refrakcijskim uvjetima za radio valove u frekvencijskom opsegu od 100 MHz do 15 GHz u kojem vrijedi izraz (1.19). Radio komunikacijski uređaji koji rade u ovom rasponu frekvencija su: VHF (engl. *very high frequency*, vrlo visoke frekvencije) i UHF (engl. *ultra high frequency*, ultra visoke frekvencije) radio i radiorelejni uređaji, televizijska radio difuzija, satelitske veze i bežične taktičke mreže. Radio navigacijski uređaji koji koriste ovo frekvencijsko područje su također brojni: ILS (engl. *Instrumental Landing System*, sustav za instrumentalno slijetanje), DME (engl. *Distance Measuring Equipment*, oprema za mjerenje udaljenosti), GNSS (engl. *Global Navigational Satellite System*, globalni satelitski navigacijski sustavi: GPS, GLONASS, Galileo i dr.), radio visinomjeri i MLS (engl. *Microwave Landing System*, mikrovalni sustav za slijetanje). Također, u tom rasponu frekvencija radi većina radarskih uređaja: za rano otkrivanje, mjerenje visine i navođenje, primarni i sekundarni radari u kontroli letenja, meteorološki radari na zemlji i na avionima, Doppler radari kao i radari za precizni prilaz.

Radio valovi frekvencija nižih od 30 MHz (iznimno do 70 MHz) ne prolaze kroz ionosferu Zemlje, već se od nje reflektiraju (sl. 2.1). Niže frekvencije reflektiraju se od donjih slojeva ionosfere, dok se više frekvencije reflektiraju od gornjih slojeva ionosfere (npr. Stacey, 2008) pri čemu dolazi do složene interferencije zbog koje se izraz (1.19) više ne može koristiti.



Slika 2.1 Radio valovi frekvencija nižih od 30 MHz (iznimno 70 MHz) reflektiraju se od ionosfere stvarajući složenu interferenciju nebeske, izravne i reflektirane zrake od površine (prema Stacey, 2008).

Radio valovi na frekvencijama višim od 15 GHz jako se prigušuju na molekulama atmosferskih plinova (npr. Skolnik, 1990). Zbog toga je ograničen domet radio i radarskih uređaja na tako visokim frekvencijama, odnosno ograničena je primjena na kratke udaljenosti od samo nekoliko kilometara ili na svemirski prostor.

U radu su korišteni balonski sondažni podaci aeroloških postaja: Zadar (WMO# 14430), Udine (WMO# 16044), San Pietro (WMO# 16144) i Brindisi (WMO# 16320), kao što je prikazano u tablici 2.1. Postaje Udine i Brindisi sondiraju četiri puta dnevno stoga je broj sondaža, a prema tome i obrađenih razina (standardnih i značajnih) velik.

Tablica 2.1 Razdoblja sondiranja i ukupan broj podataka

WMO# i naziv postaje	Razdoblje		Sveukupan broj	
	Početak	Kraj	Sondiranja	Podataka ¹
14430 Zadar	4.7.2002.	1.6.2009.	3673	58815
16044 Udine	1.11.1995.	15.6.2009.	16595	558450
16144 San Pietro	1.1.1994.	15.6.2009.	7792	263960
16320 Brindisi	1.7.1996.	15.6.2009.	14959	494554

Nizovi postaje Zadar obuhvaćaju razdoblje od 4.7.2002. do 1.6.2009. s vremenskom rezolucijom 24 h i 12 h (slika 2.2). U vremenu od srpnja 2002. do lipnja 2003. godine postaja je sondirala samo u troposferi i to standardne razine i s relativno malo podataka značajnih razina. Slijedio je prekid sondiranja koji je potrajao do 23. ožujka 2004. U vremenu od 23.3.2004. do 15.3.2006. zadarske sondaže dopiru u stratosferu do visina od 30 km, a u troposferi ima više podataka sa značajnih razina. U tom razdoblju Zadar bilježi nekoliko izoliranih stratosferskih pojava nestandardne refrakcije koje je zbog kratkoće razdoblja nemoguće detaljnije istražiti. U trećem razdoblju koje je trajalo od 15.3.2006. do 1.6.2009. aerološka postaja Zadar davala je kvalitetne podatke o troposferi, s kraćim prekidima rada; pojavljuje se velik broj značajnih razina, a stratosferski podaci su uglavnom odaslani s maksimalnih visina sondiranja od 30 – 35 km. Stratosferskih podataka s ove postaje ima relativno malo zbog ograničenog mjernog opsega senzora za mjerenje temperature koji su bili ograničeni na najnižu temperaturu od -40°C.

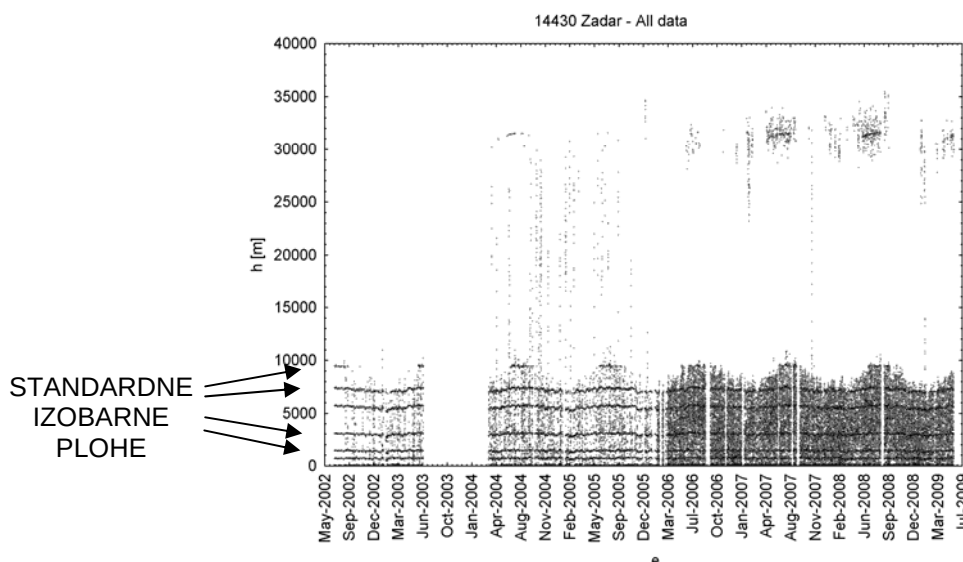
Aerološka postaja Udine pružila je najkvalitetnije nizove podataka; neprekinute tijekom cijelog razdoblja od 1.11.1995. do 15.6.2009. s vremenskom rezolucijom 6 sati (slika 2.3). Ovaj niz podataka podijeljen je na četiri razdoblja uvjetovana promjenom metodologije sondiranja. U prvom od njih, koje je trajalo od 1.11.1995. do 31.9.1997. sondaže dopiru do visina 30-35 km. Slijedilo je razdoblje od 1.10.1997. do 28.2.1999. u kojem su prisutni kontinuirani troposferski podaci. Povremeno se pojavljuju i podaci iz stratosfere s visina većih od 30 km. U trećem razdoblju od 1.3.1999. do 31.1.2004. sondaže dopiru do standardne razine 100 hPa. U zadnjem razdoblju od 1.2.2004. do 15.6.2009. ponovo se javljaju podaci iz troposfere i stratosfere sve do visina oko 35 km.

Podaci aerološke postaje San Pietro obuhvaćaju razdoblje od 1.1.1994. do 15.6.2009. s vremenskom rezolucijom 12 sati tijekom kojeg je bilo više kraćih prekida sondiranja i u kojem se može vidjeti pet razdoblja u kojima se mijenjala metodologija rada (slika 2.4).

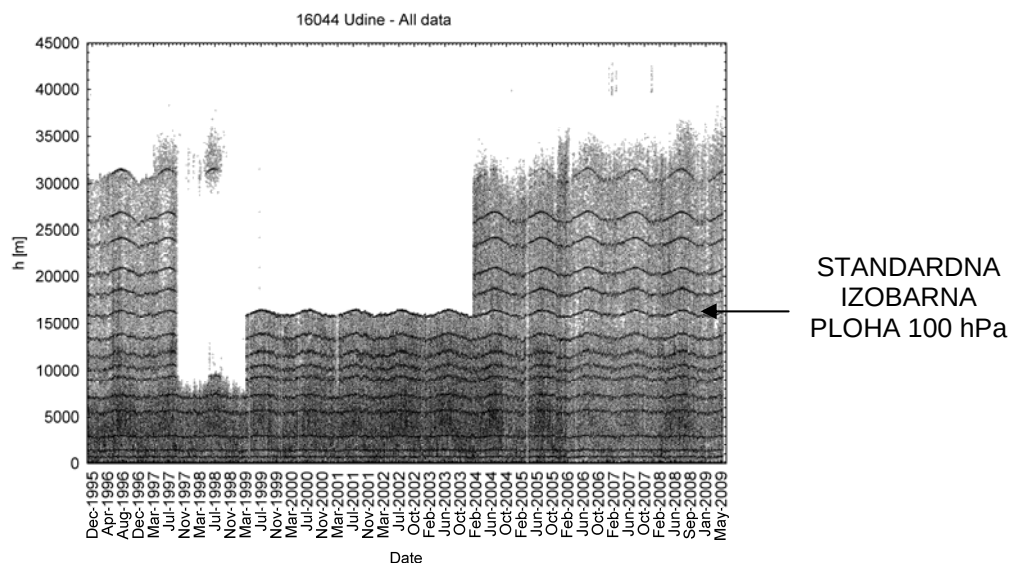
¹ Broj podataka uključuje standardne i značajne plohe

Tijekom prvog razdoblja od 1.1.1994. do 19.9.1997. podaci sondiranja dosežu do visina 30-35 km s dva kraća prekida rada od 7.9.1994. do 20.10.1994. i od 9.5.1996. do 27.5.1996. Drugo razdoblje počinje prekidom rada od 20.9.1997. do 11.10.1997. Nakon toga je slijedilo razdoblje koje je obuhvatilo samo troposferske podatke od 12.10.1997. do 14.1.2000. Promjena metodologije rada slijedila je onu na aerološkoj postaji Udine tako da je u trećem razdoblju od 15.1.2000. do 31.1.2004. sondirano samo do standardne razine 100 hPa. Postaja nije sondirala od 16.7.2001. do 3.10.2001. U četvrtom razdoblju od 1.2.2004. do 30.9.2008. ponovo se pojavljuju redoviti stratosferski podaci sve do visina 25-33 km. U zadnjem razdoblju koje je trajalo od 21.10.2008. do 15.6.2009. sondaže su dosezale samo tropopauzu.

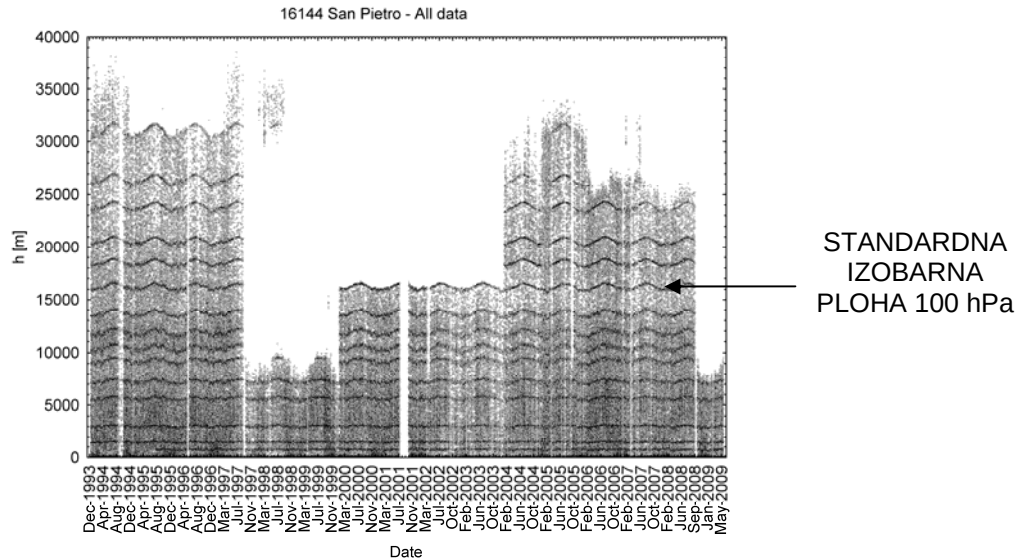
Niz aeroloških podataka postaje Brindisi obuhvaća razdoblje od 1.7.1996. do 15.6.2009. (sl. 2.5) s vremenskom rezolucijom 6 sati tijekom kojega je zabilježeno svega nekoliko kraćih prekida rada postaje. U ovom nizu mogu se izdvojiti tri razdoblja. U prvom od 1.7.1996. do 10.5.1999. prisutni su podaci iz troposfere i neredoviti stratosferski podaci do visine 35 km. U drugom razdoblju od 11.5.1999. do 3.2.2004. podaci dosižu do visine standardne razine 100 hPa (oko 16 km). U trećem podrazdoblju aerološka postaja Brindisi mjeri kontinuirano sve do visine 35 km.



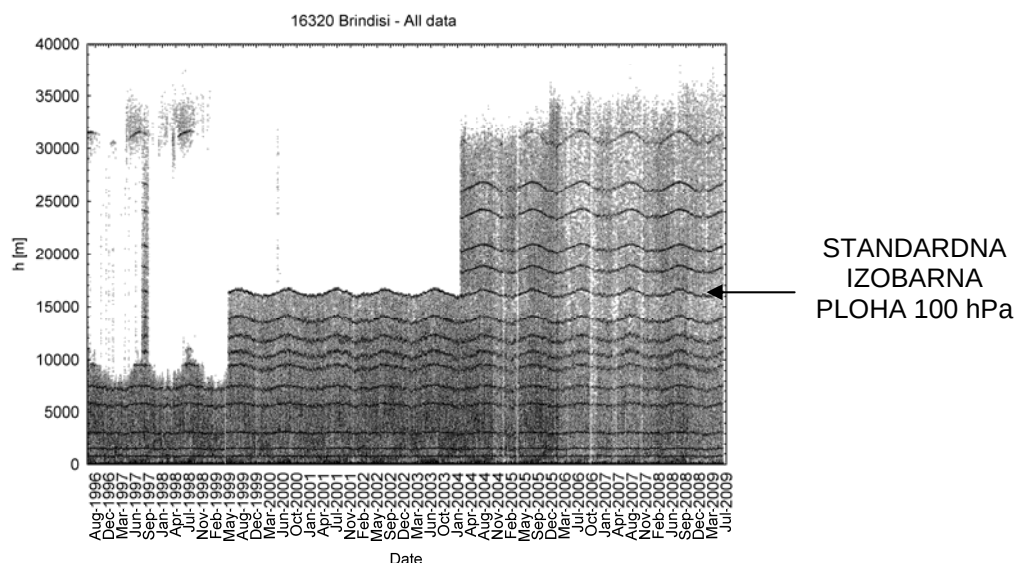
Slika 2.2 Aerosondažni podaci postaje Zadar (WMO# 14430). Svaka točka predstavlja jedno izračunavanje iznosa modificiranog indeksa loma $M(h)$ prema (1.19) i (1.24). Standardne izobarne plohe (1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa, ...) ističu se na dijagramu po velikom broju podataka.



Slika 2.3 Aerosondažni podaci postaje Udine (WMO# 16044) kontinuirano obuhvaćaju razdoblje od 1.11.1995. do 16.6.2009. Podijeljeni su na četiri razdoblja u kojima se mijenjala metodologija rada.



Slika 2.4 Aerosondažni podaci postaje San Pietro (WMO# 16144) u razdoblju 1.1.1994. do 15.6.2009. mogu se podijeliti na pet razdoblja u kojima se mijenjala metodologija rada.



Slika 2.5 Aerosondažni podaci postaje Brindisi (WMO# 16320) skoro su kontinuirani tijekom cijelog razdoblja od 1.7.1996. do 15.6.2009.

Prostorna ograničenja ovog istraživanja odnose se na geografsko područje i visine do kojih su računati vertikalni profili indeksa loma. Aerološki baloni u redovitim sondažama dosežu visine oko 40 km. Zbog niza tehničkih ograničenja to je i praktična granica korištenja balona kao letjelica. No, nisu sva sondiranja dostizala ove visine. Kao što je navedeno u tablici 2.2, samo oko jedne trećine podataka obuhvaćalo je stratosferske visine. Iz podataka u tablici 2.2 vidljivo je kako je aerološka postaja Zadar imala izrazito mali broj stratosferskih podataka. Razlog tome bio je taj što se u velikom broju sondaža koristio temperaturni senzor, termokap (elektronički element kod kojeg se mijenja kapacitet pod utjecajem temperature), koji nije mogao mjeriti temperature niže od -40°C .

Tablica 2.2 Udio stratosferskih sondaža i obrađenih podataka u odnosu na ukupan broj sondaža i obrađenih podataka po postajama (usp. sl. 2.2, 2.3, 2.4 i 2.5)

WMO# i naziv postaje	Udio stratosferskih	
	balonskih sondaža	podataka
14430 Zadar	14.70%	2.73%
16044 Udine	83.70%	36.23%
16144 San Pietro	82.30%	34.78%
16320 Brindisi	79.60%	32.39%

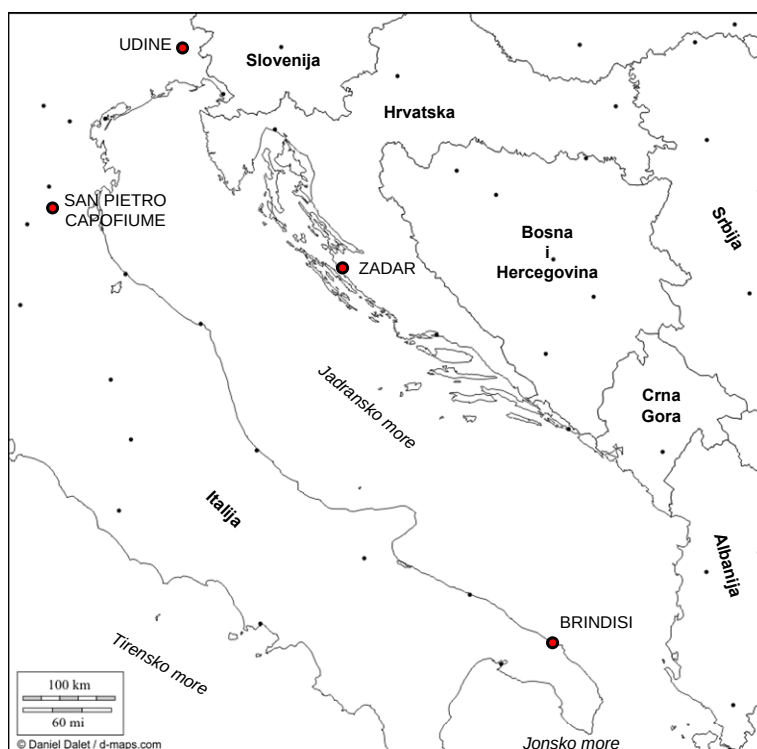
Istraživanje je prostorno ograničeno na Jadransko more koje je, geografski gledano, rubno more Mediteranskog bazena (slika 2.6). Ono zadire duboko u europski kontinent, između Apeninskog i Balkanskog poluotoka. Njegova površina iznosi $138\,595\text{ km}^2$ što

predstavlja oko 4.6% površine Sredozemnog mora. Proteže se u smjeru sjeverozapad-jugoistok, najveća dužina iznosi mu 783 km, a prosječna širina mu je 248 km.

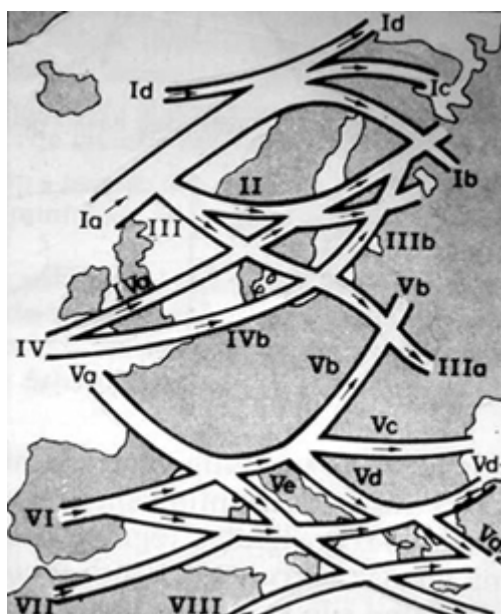
2.2 Klimatske značajke Jadrana

Jadransko more nalazi se na granici između mediteranskog (Cs) i umjereno toplog vlažnog (Cf) klimatskog pojasa, između 40°N i 46°N, s blagim, ali vjetrovitim zimama te toplim i sušnim ljetima. Na sjeverno-zapadnom dijelu Jadranskog mora kontinentalni utjecaji su jači nego na njegovom središnjem i jugo-istočnom dijelu u kojima prevladava jak utjecaj Sredozemnog mora tijekom cijele godine. Visoke planine na hrvatskoj, crnogorskoj i albanskoj obali ograničavaju utjecaj Sredozemlja na uski primorski pojas, a istodobno zaustavljaju hladne zračne mase koje u donjoj troposferi nastoje prodrijeti prema Jadranskom moru. Apeninsko gorje na zapadu i Alpe na sjeveru ograničavaju utjecaje Sredozemlja i kontinentalne Europe, ali ne u potpunosti. Tome ide u prilog i karta ciklonskih staza (slika 2.7) koja pokazuje kako jedna od ciklonskih staza (oznake Vd) prolazi cijelom dužinom Jadranskog mora. Zimi, zbog relativno tople površine mora, ciklone na putu od Atlantika prolaze ovom stazom koja počinje u Biskajskom zaljevu i grana se iznad Genovskog zaljeva. I sam Genovski zaljev je područje ciklogeneze koja ima velik utjecaj na vrijeme na Jadranu.

Tlak iznad Jadranskog mora tijekom cijele godine nešto je niži u odnosu na kopno, a ova barometarska depresija nešto je izraženija zimi. Vjetar nad Jadranskim morem najčešće je posljedica sinoptičkih formacija u polju tlaka (ciklona, anticiklona i fronti) uz relativno često pojavu lokalnog dnevnog temičkog vjetra (npr. Telišman Prtenjak i sur., 2010). Najčešći tip vjetra vezan uz sinoptičke baričke formacije odgovara jugu i buri. Jugo se javlja neposredno prije prolaska ciklone i tople fronte, dok se nakon prolaska hladne fronte razvija bura. Pored njih, javljaju se i drugi tipovi vjetra; zapadnjak (pulenat) koji je čest zimi, tramontana koja se javlja tijekom cijele godine na Sjevernom Jadranu i koja je po značajkama je vrlo slična buri (ali nije mahovita). Tu su također levant koji puše s mora (ali je hladniji od juga), etezije i maestral koji se javljaju ljeti te kratkotrajni jugozapadni vjetar lebić i južni vjetar oštro. Pri jakim olujama stvara se olujni vjetar koji se u narodu naziva nevera, a u rijetkim slučajevima javlja se i pijavica kao ekstremni slučaj ciklostrofičkog strujanja (npr. Penzar i sur., 2001).

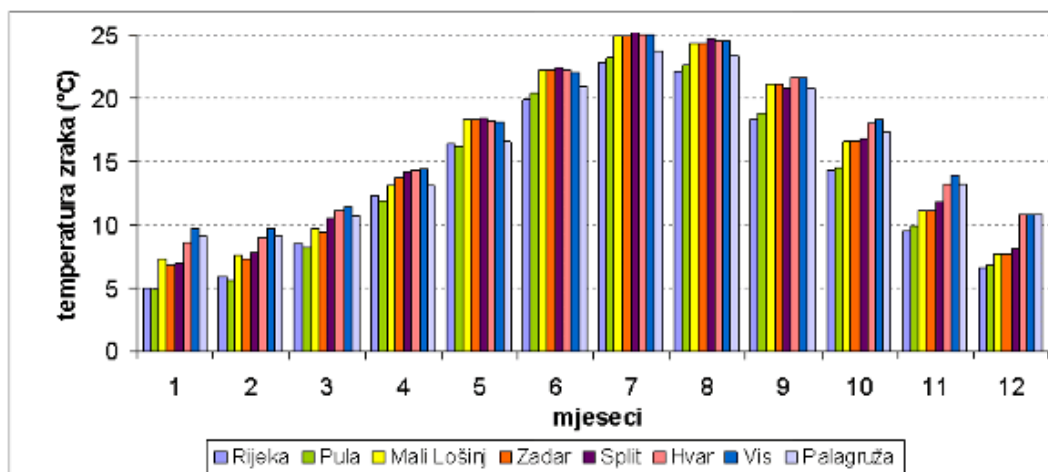


Slika 2.6 Geografski položaj Jadranskog mora i aerološke postaje čiji su podaci korišteni u ovom radu: Zadar, Udine, San Pietro Capodifiume i Brindisi (izvor slijepe karte *d-maps.com*).

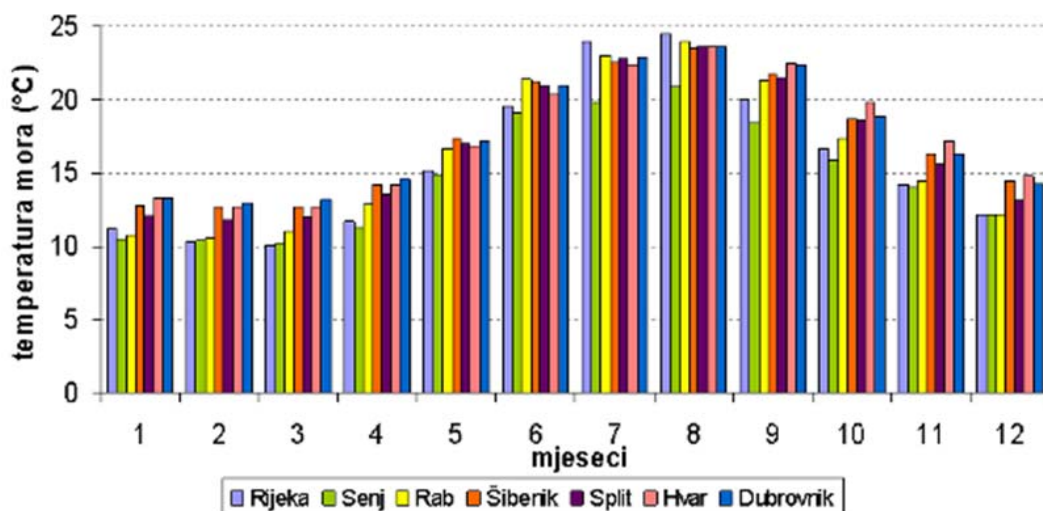


Slika 2.7 Staze ciklona u Europi, Jadranskim morem prolazi staza Vd kojom ciklone zimi često prolaze iz Biskajskog zaljeva prema Sredozemnom moru (Radinović, 1969).

Temperatura zraka nad Jadranom i površinske temperature mora su u jakoj korelaciji. Vodena masa Jadranskog mora, zbog visokog iznosa toplinskog kapaciteta vode, djeluje kao ublaživač godišnjeg hoda temperature zraka i ograničava amplitudu godišnjeg hoda temperature zraka. To potvrđuju podaci mjerenja temperature zraka meteoroloških postaja na otocima kod kojih su amplitude godišnjih hodova temperature manje izražene u odnosu na obalne postaje (slika 2.8). Temperatura zraka nad Jadranom je najniža u siječnju (od 2.6°C kod Venecije do 9.8°C na Visu), a najviša je u srpnju (prosječno 23°C na sjeveru i 25°C na jugu). Površinska temperatura mora pokazuje izraženi godišnji hod (slika 2.9) s maksimumom u kolovozu i minimumom u veljači/ožujku. Razlog malom kašnjenju u odnosu na godišnji hod temperature zraka je visok specifični toplinski kapacitet vode (npr. Penzar i sur., 2001).

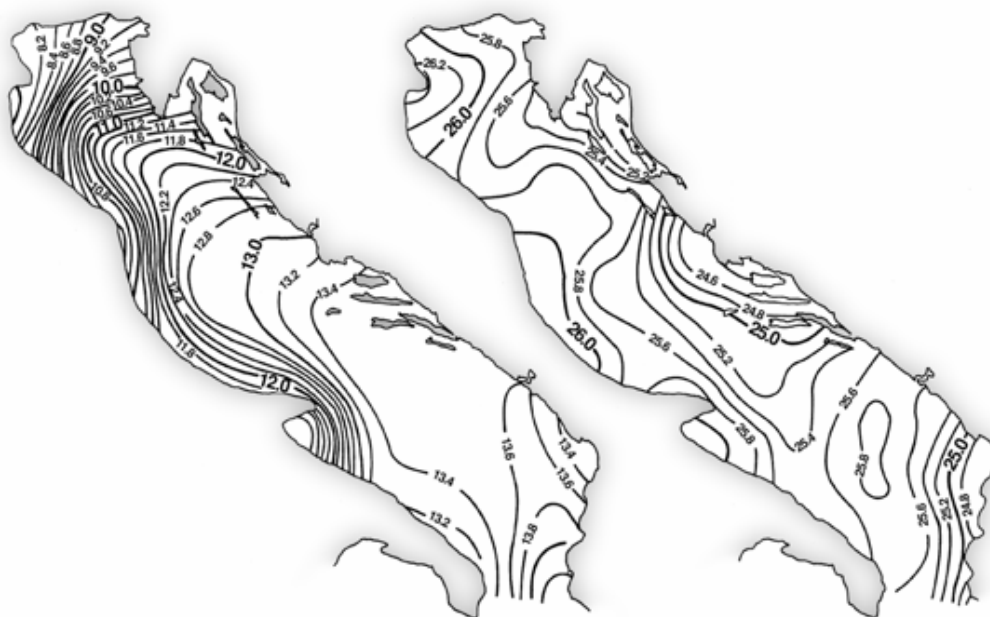


Slika 2.8 Godišnji hod temperature zraka izmjeren na osam meteoroloških postaja na hrvatskoj obali (Penzar i sur., 2001) tijekom razdoblja 1961. – 1990.



Slika 2.9 Godišnji hod površinske temperature Jadranskog mora prema podacima sedam postaja duž hrvatske obale tijekom razdoblja 1961. – 1990. (Penzar i sur., 2001).

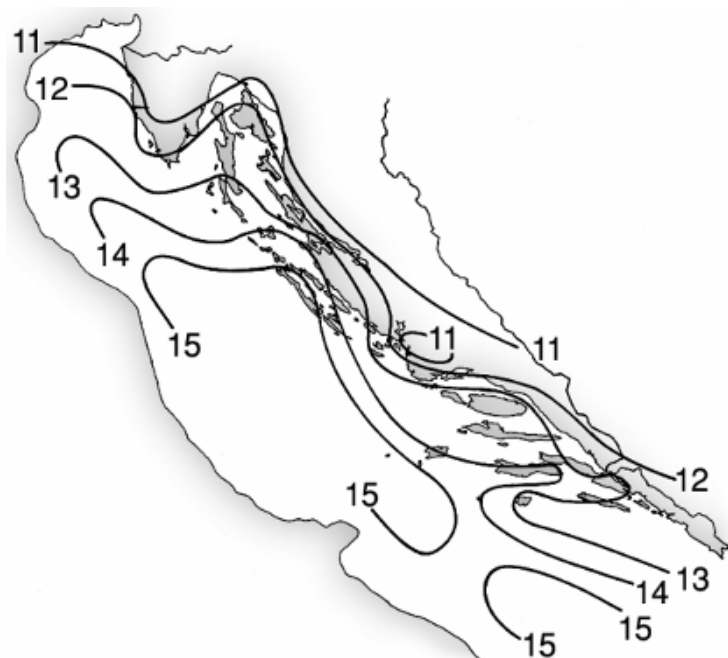
Na slici 2.10 opaža se kako je površinska temperatura mora na sjevernom dijelu Jadranskog mora zimi niža za oko 3°C od one na južnom dijelu što je posljedica dotoka tople vode iz Sredozemnog mora i naglog povećanja dubine jadranskog bazena, dok se ljeti ta razlika ne primjećuje. Bolju sliku prostorne razdiobe površinske temperature Jadranskog mora prikazuje slika 2.10 dobivena usrednjavanjem površinske temperature mora izmjerene satelitskim radiometrom i korigirane mjerenjima na meteorološkim i oceanografskim postajama (Penzar i sur., 2001).



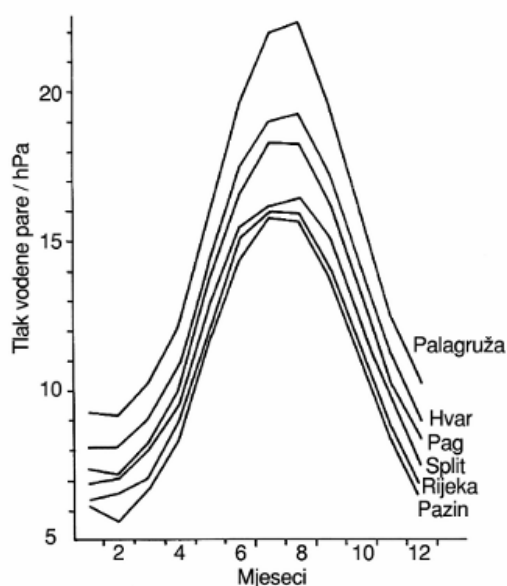
Slika 2.10 Srednje površinske temperature Jadranskog mora u veljači (lijevo) i kolovoza (desno) dobivene iz satelitskih snimki u razdoblju od 1984. do 1992. godine (Penzar i sur., 2001).

Površinske temperature Jadranskog mora na slici 2.10 pokazuju jak utjecaj Sredozemnog mora na jugoistočnom dijelu te dotoka slatke vode u jadranskom slivu Italije, Hrvatske, Crne Gore i Albanije. Tlak vodene pare nad Jadranom veći je na pučini u odnosu na obalni pojas što je i očekivano s obzirom na evaporaciju morske površine tijekom cijele godine koja obogaćuje prizemni sloj zraka vodenom parom (slika 2.11).

Tlak vodene pare nad Jadranom pokazuje izraženi godišnji hod s minimalnim vrijednostima u siječnju/veljači i maksimalnim u srpnju/kolovoza (slika 2.12). Na ovoj slici godišnji hodovi pokazuju amplitude veće od 10 hPa, no povezanost godišnjih hodova temperature zraka i tlaka vodene pare koji uvjetuju relativnu vlažnost zraka donekle ublažavaju utjecaj velikih amplitude u godišnjem hodu tlaka vodene pare (Penzar i sur., 2001.).



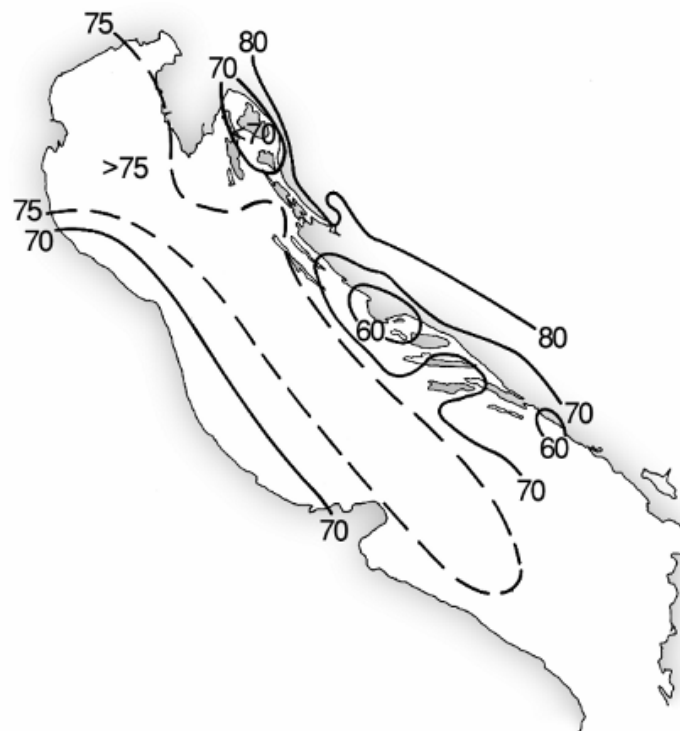
Slika 2.11 Srednji tlak vodene pare (hPa) nad površinom Jadrana u razdobljima 1961. - 1990. i 1981. - 1996. prema podacima postaja na hrvatskoj obali i otocima (Penzar i sur. 2001).



Slika 2.12 Godišnji hod tlaka vodene pare izmjeren na meteorološkim postajama na hrvatskoj obali i otocima u razdobljima 1961. - 1990. i 1981. - 1996. te usrednjen (Penzar i sur., 2001.). Godišnji hodovi tlaka vodene pare pokazuju amplitude veće od 10 hPa što predstavlja značajan utjecaj na godišnji hod iznosa indeksa loma za radio valove.

Relativna vlažnost zraka ima dominantan utjecaj na iznos indeksa loma za radio valove, prema (1.19) i (1.20), zato su njena prostorna razdioba nad Jadranom i njen godišnji hod od primarnog značaja za tumačenje pojava promjene iznosa indeksa loma i pojave nestandardne refrakcije.

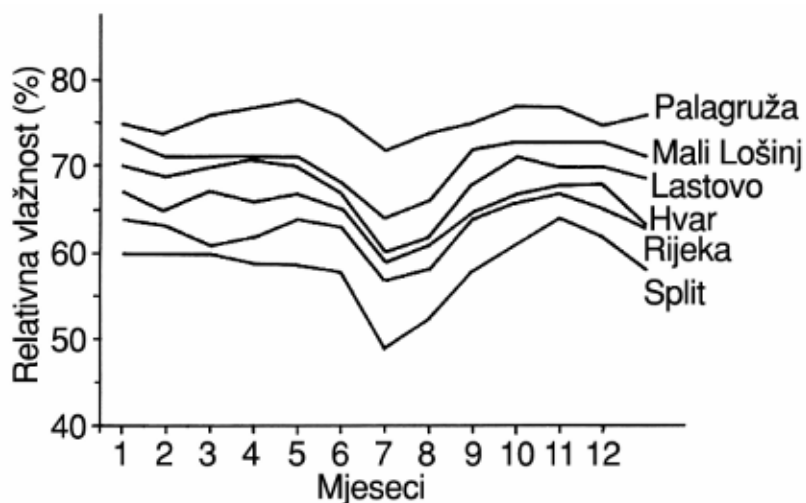
Visoki iznosi relativne vlažnosti zraka javljaju se u slučajevima niske temperature zraka, a visokog tlaka vodene pare. Zbog toga se izrazito vlažni dani na Jadranu obično javljaju u hladnom dijelu godine i to posebice na otocima (slika 2.13) zbog velike evaporacije s površine mora. Na hrvatskoj obali Jadrana ističu se područja s minimalnim iznosima relativne vlažnosti što je najčešće posljedica puhanja bure, koja advektira hladan i suhi zrak.



Slika 2.13 Prosječne godišnje relativne vlažnosti zraka dobivene iz mjerenja u razdoblju od 1961. - 1990. (Penzar i sur., 2001).

Na ublažavanje godišnjeg hoda relativne vlažnosti zraka nad Jadranom (slika 2.14) velik utjecaj ima činjenica što je povećana evaporacija (slika 2.12) povezana s maksimumom u godišnjem hodu površinske temperature mora (slika 2.9). Minimum relativne vlažnosti uz istovremeni maksimum u godišnjem hodu temperature zraka uvjetovat će, prema (1.19), (1.20) i (1.24), više iznose modificiranog indeksa loma (npr. Penzar i sur., 2001; Brown i van Diggelen, 1994).

Općenito, zbog malog iznosa relativne vlažnosti u srpnju/kolovozu, iznos indeksa loma za radio valove postat će osjetljiviji na promjene temperature zraka, koje su česte, što će imati kao posljedicu povećani broj pojava nestandardnih refrakcija u ljetnim mjesecima.



Slika 2.14 Godišnji hodovi relativne vlažnosti zraka za šest postaja na hrvatskoj obali i otocima, u godišnjim hodovima izraženi su minimumi u srpnju/kolovozu (Penzar i sur., 2001).

Zbog činjenice da izrazi (1.19), (1.20) i (1.24) mogu opisati utjecaj meteoroloških čimbenika samo na refrakciju radio valova koja ovisi o temperaturi, tlaku i vlažnosti zraka (npr. Westwater, 1993; Saha, 2008), a ne na apsorpciju i raspršenje radio valova, ostale čimbenike klime Jadrana: zračenje, oborine, vidljivost i naoblaka na ovom mjestu nije potrebno detaljnije opisivati.

2.3 Metode, tehnike i instrumenti prikupljanja podataka

Izvor podataka o visini, tlaku i temperaturi zraka te temperaturi rosišta potrebnih za računanje modificiranog indeksa loma u (1.24) bila su redovita aerološka balonska sondiranja atmosfere. Suvremene sonde koriste senzore koji mijenjaju kapacitet ovisno o promjenama tlaka, temperature i vlažnosti zraka (npr. Leiterer i sur., 2002). Kapacitivni senzori odlikuju se velikom osjetljivosti i preciznosti mjerenja kao i pouzdanosti u radu jer nemaju mehaničkih dijelova. Proizvođači aeroloških sondi veliku pažnju posvećuju zaštiti senzora od zagrijavanja Sunca kao i kontaminacije senzora česticama i aerosolima, a posebice kapljicama kondenzirane vode. Postaje čiji su podaci korišteni u ovom radu koriste suvremene sonde tipa Vaisala RS-80 i RS-90, prikazane su u tablici 2.3. Podaci se odnose na razdoblje od 1994. do 2009. koje je obrađeno u radu. Tehničke značajke aeroloških sondi prikazane su u tablici 2.4, a iz njih možemo procijeniti pogrešku računanja indeksa loma za radio valove prema (1.19) i (1.24) parcijalnom derivacijom tih jednadžbi po varijablama: visina h , tlak p , termodinamička temperatura T i relativne vlažnosti, koju u (1.19) opisuje funkcija y :

$$\Delta M \leq 0.157 \cdot \Delta h + \frac{77.6}{T} \Delta p + \frac{3.73 \cdot 10^5}{T^2} \Delta y - \frac{7.46 \cdot 10^5 \cdot y}{T^3} \Delta T. \quad (2.1)$$

Prema podacima proizvođača, apsolutne pogreške mjerenja sonde RS-80 pri uvjetima na površini: $p = 1013$ hPa, $T = 290$ K, $y = 10$ hPa su: $\Delta T = 0.2$ K, $\Delta p = 0.5$ hPa i $\Delta y = 1$ hPa. Slijedi kako je apsolutna pogreška $\Delta M \leq 4.8$ [M jedinica]. Budući da je prosječna površinska vrijednost $M = 340$ [M jedinica], slijedi kako je relativna pogreška 1.4 %, što je prihvatljivo u danim uvjetima aeroloških sondaža.

Korištenje aeroloških sondi osigurava redovit i kvalitetan izvor podataka prema metodologiji koju je propisala WMO. Zahvaljujući tome, rezultati dobiveni u ovom radu mogu se izravno uspoređivati i proširivati podacima s drugih postaja i lako se mogu naknadno nadopunjavati kako bi se dobili još duži vremenski nizovi. Aerološke postaje koristile su prateće sustave DIGICORA. Gašenjem radio navigacijskog sustava LORAN, aerološke postaje su odnedavno prešle na novi sustav temeljen na GPS radio navigaciji i koriste sonde Vaisala VRS92G/L i prateće postaje Vaisala MW-15.

Tablica 2.3 Periodičnost sondiranja i tipovi sonde aeroloških postaja čiji su podaci korišteni u ovom radu

WMO# i naziv postaje	Periodičnost sondiranja	Tip sonde
14430 Zadar	12 sati	RS-80
16044 Udine	6 sati	RS-90
16144 San Pietro	12 sati	RS-80
16320 Brindisi	6 sati	RS-90

Podaci aeroloških postaja uključuju standardne izobarne plohe: površinske podatke, (1000 hPa), 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa, ... kao i značajne plohe na kojima se javljaju znatna odstupanja vertikalnih profila tlaka, temperature i temperature rosišta. Značajne plohe često otkrivaju nestandardne refrakcije u atmosferi. Razlike među tehničkim značajkama korištenih radio-sondi Vaisala RS-80 i RS-90 nisu velike, a sažete su u tablici 2.4.

Metodologija rada na aerološkim postajama zahtijeva provjeru podataka na samoj postaji. To je moguće jer sonda nakon što dosegne maksimalnu visinu, na kojoj puca balon, slobodno pada i nastavlja mjeriti i odašiljati podatke. Na taj način ona potvrđuje mjerenja za vrijeme penjanja u visinu. U ovisnosti o kvaliteti plina, težini sonde, temperaturi zraka i kvaliteti materijala od kojeg je balon napravljen sonde mogu dosegnuti stratosferske visine i do 45 km. Podaci sonde se nakon provjere šalju u međunarodnu razmjenu kako bi se mogli koristiti za operativne svrhe i za numeričke modele. Nacionalna agencija za oceanografiju i atmosferu Sjedinjenih Država (engl. *National Oceanic and Atmospheric Agency*, NOAA) prikuplja aerosondažne podatke na globalnoj razini i smješta ih na stranicu RAOB (engl. *Raw Aero sonde OBservation*) <http://www.esrl.noaa.gov/raobs/>. Podaci sondaža mogu se dobiti u tekstualnom (TEMP ili FSB) ili grafičkom formatu (*SqewT* dijagrami).

Tablica 2.4 Tehnički podaci aeroloških sonde RS-80 i RS-90

Fizikalna veličina	Tip sonde:	RS-80	RS-90
TLAK	Vrsta senzora	BAROCAP ²	silikonski
	Raspon mjerenja	1060 hPa – 3 hPa	1080 hPa – 3 hPa
	Rezolucija mjerenja	0.1 hPa	0.1 hPa
	Apsolutna pogreška mjerenja	0.5 hPa	1 hPa (1080 hPa > p > 100 hPa) 0.6 hPa (100 hPa > p > 3 hPa)
TEMPERATURA	Vrsta senzora	THERMOCAP ³	kapacitivni vodič
	Raspon mjerenja	+60°C do -90°C	+60°C do -90°C
	Rezolucija mjerenja	0.1°C	0.1°C
	Apsolutna pogreška mjerenja	0.2°C (p > 50 hPa) 0.3°C (50 hPa > p > 15 hPa) 0.4°C (p < 15 hPa)	0.2°C (1080 hPa > p > 100 hPa) 0.3°C (100 hPa > p > 20 hPa) 0.5°C (20 hPa > p > 3 hPa)
	Vrijeme uzastopnih mjerenja	2.5 s	< 0.4 s na 1000 hPa < 1 s na 100 hPa 2.5 s na 10 hPa
VLAŽNOST	Vrsta senzora	HUMICAP ⁴	kondenzator s tankim filmom, grijani dvostruki senzor
	Raspon mjerenja	0 – 100 %	0 – 100 %
	Rezolucija mjerenja	1 %	1 %
	Relativna pogreška mjerenja	3 %	5 %
	Vrijeme uzastopnih mjerenja	1 s	< 0.5 s na +20°C < 20 s na -40°C

² BAROCAP, aneroidni senzor promjenjivog električnog kapaciteta

³ THERMOCAP, kondenzator promjenjiva električnog kapaciteta, ovisno o temperaturi

⁴ HUMICAP, kondenzator promjenjiva električnog kapaciteta, ovisno o vlazi zraka

3. Rezultati

Tijekom dvadesetogodišnjeg rada na modeliranju propagacije radio valova u atmosferi nije poznat niti jedan rad koji se detaljno bavi refrakcijskim uvjetima nad Jadranom. Jedino se iz preporuke Međunarodnog udruženja za telekomunikacije (engl. *International Telecommunication Union*, ITU) pod oznakom ITU-R P.453-9 (ITU, 2003), koji globalno opisuje refrakcijske uvjete, može steći slika o jakom utjecaju Sredozemlja kao jednom od područja izrazite nestandardne refrakcije. Doprinos poznavanju refrakcijskih uvjeta nad Jadranskim morem imat će prepoznatljivu vrijednost za projektiranje telekomunikacijskih radio sustava, radarskom praćenju prometa, radio navigaciji i elektroničkom djelovanju.

3.1 Vertikalni profili modificiranog indeksa loma nad Jadranom

3.1.1 Eksponecijalni model indeksa loma za radio valove u atmosferi

Iznos modificiranog indeksa loma M raste s visinom prema (1.24). U slučaju da nisu dostupni vertikalni profili temperature i vlažnosti u preporuci ITU-R P.453-9 (ITU, 2003) pretpostavlja jednostavan eksponecijalni model vertikalnog profila indeksa loma oblika:

$$M(h) = M_s e^{h/h_0} \quad (3.1)$$

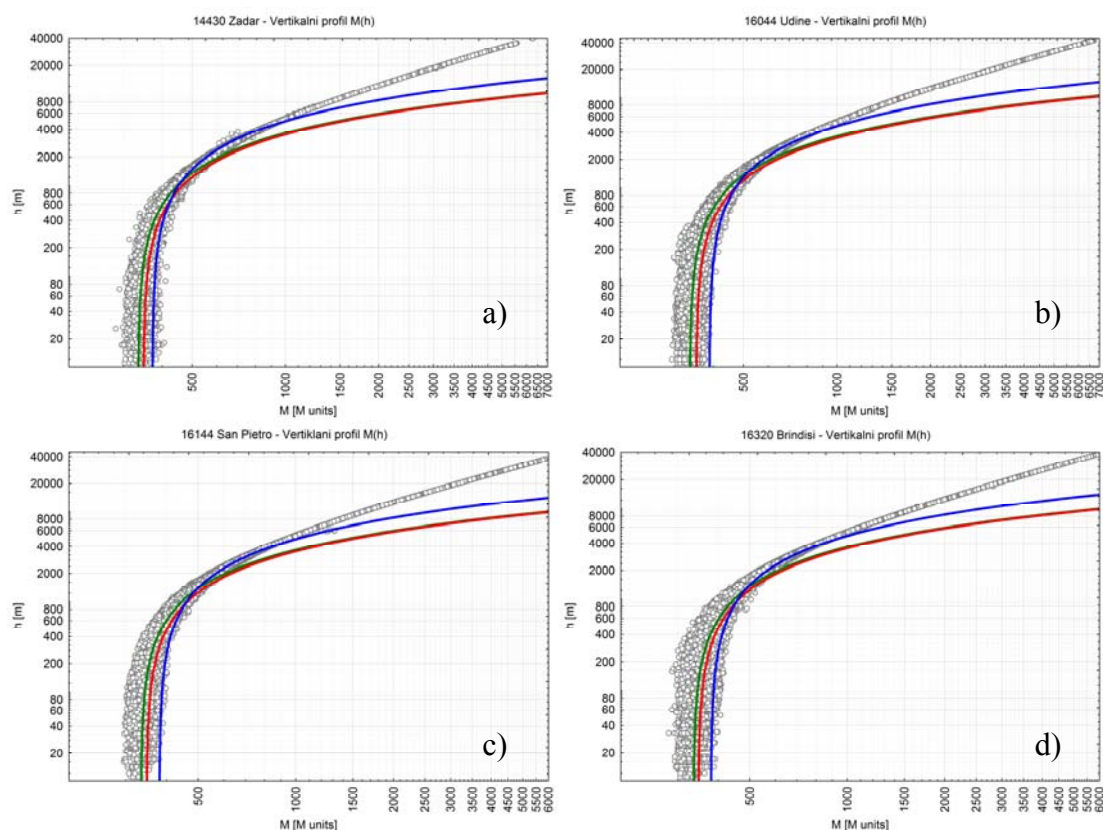
u kojoj je M_s iznos modificiranog indeksa loma na površini, a h_0 je skala visine (Lear, 1980). Oba parametra moraju se odrediti statistički iz višegodišnjih nizova vertikalnih profila modificiranih indeksa loma što za Jadran do sada nije bilo napravljeno. Iznimno, na površini je $h = 0$ pa je iznos M jednak iznosu N , prema (1.24). Prema toj preporuci ITU iznosi površinskog indeksa loma dobivaju se reduciranjem na srednju razinu mora kako bi se, unatoč različitim nadmorskim visinama postaja, podaci mogli usporediti. Ovu metodologiju ne smatramo ispravnom jer su na površini najveći gradijenti tokova topline i vlažnosti pa su ondje prisutni diskontinuiteti u vertikalnom profilu indeksa loma. U ovom radu površinski indeksi loma nisu reducirani na srednju razinu mora, ali su korišteni podaci aeroloških postaja koje su locirane na malim nadmorskim visinama, na obali ili relativno blizu obale Jadranskog mora kako bi podaci bili što je moguće bolje usporedivi.

Unatoč ovom nedostatku, eksponencijalni model (3.1) može se primijeniti na malim visinama. Kolika je granična visina do koje se taj eksponencijalni model može primijeniti preporuka ITU-R P.453-9 (ITU, 2003) ne govori. Zbog toga je provedena studija u kojoj su parametri (3.1) određeni na temelju eksponencijalne regresije oblika $M(h) = M_S \cdot \exp(h/h_0)$ pri čemu su izdvojeni samo podaci ispod maksimalne visine u lijevom stupcu tablice 3.1.

Tablica 3.1 Koeficijenti eksponencijalnog modela u (3.1) u ovisnosti o graničnoj maksimalnoj visini (korišteni su samo podaci ispod granične visine), M_S je modelirani površinski indeks loma, $\bar{M}_0$ je srednjak površinskog indeksa loma dobiven i aerosondažnih podataka, a h_0 je skala visine

	<i>Udine</i>		<i>Zadar</i>		<i>San Pietro</i>		<i>Brindisi</i>	
max. visina [m]	M_S [M/km]	h_0 [m]	M_S [M/km]	h_0 [m]	M_S [M/km]	h_0 [m]	M_S [M/km]	h_0 [m]
500	333.774	3333	333.257	3333	332.783	3333	334.667	3333
1000	333.483	3333	333.192	3333	331.611	3333	334.572	3333
1500	334.858	3333	334.233	3333	332.436	3333	334.820	3333
2000	335.947	3333	334.973	3333	333.302	3333	335.356	3333
2500	337.949	3333	336.502	3333	334.906	3333	336.528	3333
3000	341.671	3333	339.700	3333	337.597	3333	338.512	5000
5000	352.133	5000	348.169	5000	346.945	5000	347.002	5000
10000	388.465	5000	372.420	5000	380.036	5000	379.537	5000
$\bar{M}_0$	335.17± 15.74		332.76± 14.93		335.56± 15.13		334.48± 17.39	

U zadnjem redu tablice 3.1 navedene su srednje vrijednosti površinskog indeksa loma $\bar{M}_0$ dobivene iz višegodišnjih nizova vertikalnih profila modificiranog indeksa loma $M(h)$, radi usporedbe s modeliranim iznosima površinskog indeksa loma M_S za svaku postaju na različitim graničnim visinama. Prema tablici 3.1, na visinama 3000 m postoje značajne razlike $\bar{M}_0$ i M_S kao i skale visine, no tablica ne pokazuje kakvo je poklapanje stvarnog profila $M(h)$ i eksponencijalnog modela pa moramo proučiti sliku 3.1 koja pokazuje poklapanje eksponencijalnog modela za sve četiri postaje na tri granične visine modela: 2000 m, 5000 m i 10000 m. Na slici 3.1 primjećujemo kako je poklapanje eksponencijalnog modela i stvarnih podataka dobro do visine oko 2000 m. Za veće granične visine model neprihvatljivo precjenjuje površinski indeks loma i povećava skalu visine kako bi se bolje prilagodio profilu na visini.



Slika 3.1 Poklapanje aktualnih iznosa modificiranog indeksa loma dobivenih aerosondažnim mjerenjima (sivi kružići) s modelom eksponencijalnog profila modificiranog indeksa loma (3.1) za granične visine 2000 m (zeleno), 5000 m (crveno) i 10000 m (plavo) za aerološke postaje: a) Zadar, b) Udine, c) San Pietro i d) Brindisi. Parametri za granične visine, M_S i h_0 preuzeti su iz tablice 3.1. U slučaju jadranskih postaja eksponencijalni model pokazuje dobro poklapanje do granične visine 2000 m, s povećanjem granične visine eksponencijalni model precjenjuje iznos površinskog indeksa loma i povećava skalu visine kako bi se bolje prilagodio profilu na većim visinama. Dijagram je prikazan u log – log mjerilu.

3.1.2 Polinomni model indeksa loma za radio valove u atmosferi

Prethodno poglavlje ilustrira kako jednostavni eksponencijalni model (3.1) može biti primjenjiv samo u vrlo ograničenom rasponu visina. Tražeći općenit model vertikalnog profila indeksa loma primijenjena je regresijska metoda na različite funkcije kako bi se ispitala njihova mogućnost opisivanja vertikalnog profila indeksa loma: linearna, eksponencijalna, potencijalna, logaritamska i polinomna. Najbolje rezultate pokazala je polinomna funkcija petog stupnja općeg oblika (Viher i Telišman Prtenjak, 2011):

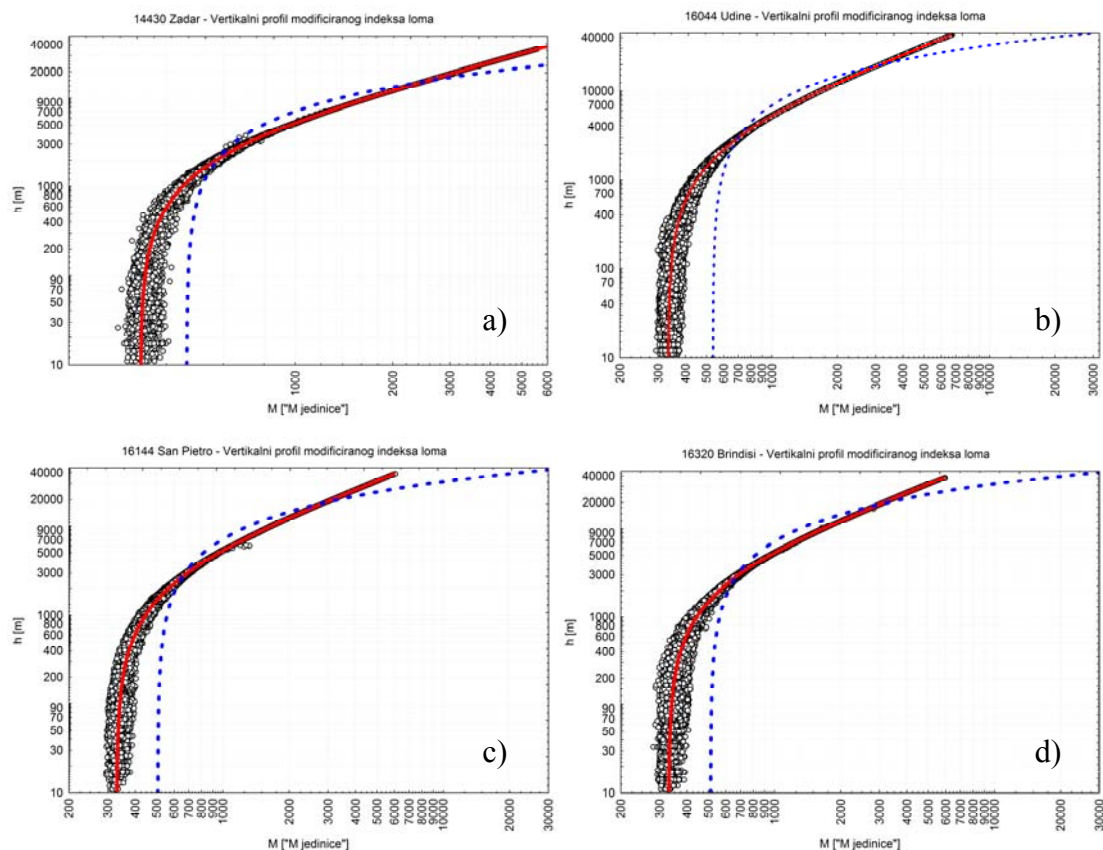
$$M_5(h) = M_0 + A \cdot h + B \cdot h^2 + C \cdot h^3 + D \cdot h^4 + E \cdot h^5 \quad (3.2)$$

u kojoj h predstavlja visinu iznad tla. Koeficijenti M_0 , A , B , C , D i E određeni su regresijom iz višegodišnjih nizova aeroloških mjerenja i prikazani u tablici 3.2.

Tablica 3.2 Koeficijenti polinomnog modela (3.2) vertikalnog profila modificiranog indeksa loma za radio valove: M_0 je modelirani površinski indeks loma, A je linearni koeficijent, a B , C , D i E su koeficijenti viših redova i r je koeficijent korelacije izračunat metodom namanjih kvadrata između stvarnih i modeliranih iznosa profila modificiranog indeksa loma $M(h)$

	M_0 [M]	A [M/m]	B [M/m ²]	C [M/m ³]	D [M/m ⁴]	E [M/m ⁵]	r
14430 Zadar	332.82	0.1132	$3.3352 \cdot 10^{-6}$	$-1.5576 \cdot 10^{-10}$	$3.7792 \cdot 10^{-15}$	$-3.5445 \cdot 10^{-20}$	0.99807
16044 Udine	332.88	0.1155	$2.8254 \cdot 10^{-6}$	$-1.2279 \cdot 10^{-10}$	$2.9590 \cdot 10^{-15}$	$-2.8856 \cdot 10^{-20}$	0.99931
16144 San Pietro	329.54	0.1124	$3.4557 \cdot 10^{-6}$	$-1.7419 \cdot 10^{-10}$	$4.7508 \cdot 10^{-15}$	$-5.0760 \cdot 10^{-20}$	0.99927
16320 Brindisi	330.09	0.1087	$4.1738 \cdot 10^{-6}$	$-2.2888 \cdot 10^{-10}$	$6.5242 \cdot 10^{-15}$	$-7.1355 \cdot 10^{-20}$	0.99919

M_0 predstavlja površinski indeks loma modeliran polinomnom funkcijom (3.2). Koeficijent A , čiji je iznos najveći, predstavlja linearnu promjenu iznosa modificiranog indeksa loma s visinom. Njegov iznos nešto je manji od standardnog gradijenta modificiranog indeksa loma koji iznosi 117 M/km, razlika potječe od utjecaja nelinearnih članova čiji su koeficijenti B , C , D i E . Iako su iznosi koeficijenata viših članova vrlo mali, njihov utjecaj je značajan jer je raspon visina velik; od površine do maksimalne visine koju dosežu aerosondažni baloni, a to je 40 - 45 km. Snižavanjem stupnja polinoma (3.2) značajno se smanjuje koeficijent korelacije r (usporedi tablice 3.2 i 3.3) koji je izračunat metodom najmanjih kvadrata na temelju razlike stvarnog iznosa modificiranog indeksa loma i iznosa modeliranog pomoću (3.2). Vrlo visoku korelaciju polinomnog modela (3.2) i stvarnih podataka potvrđuju primjeri sa slike 3.2 na kojima je prikazana usporedba vertikalnog profila modificiranog indeksa loma; stvarnih podataka te eksponencijalnog i polinomnog modela. Jednostavni eksponencijalni model nije primjenjiv u velikom rasponu visina (0 - 45 km) što je vidljivo iz neadekvatnog slaganja stvarnih i modeliranih vrijednosti na slici 3.2 i relativno malom iznosu koeficijenta korelacije u tablici 3.3. koji dobiven je na temelju razlike stvarnih i modeliranih iznosa $M(h)$. Isto tako, tablica 3.3 pokazuje neprihvatljivo visoke iznose površinskog indeksa loma M_S . Na taj način još jednom je potvrđena tvrdnja da se jednostavni eksponencijalni model (3.1) smije koristiti samo u malom rasponu visina iznad tla.



Slika 3.2 Usporedba stvarnih vrijednosti modificiranog indeksa loma (kružići) i modela: eksponencijalnog (3.1) prikazanog plavom isprekidanom krivuljom i polinomnog (3.2) prikazanog punom crvenom krivuljom za aerološke postaje: a) Zadar, b) Udine, c) San Pietro i d) Brindisi. Dijagram je prikazan u log-log mjerilu.

Tablica 3.3 Koeficijenti jednostavnog eksponencijalnog modela (3.1) vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma $M(h)$ sve do visine 45 km, prikazano plavom isprekidanom krivuljom na slici 3.2: M_s je modelirani iznos površinskog indeksa loma koji jako odstupa od $\bar{M}_0$ iz tablice 3.1, za svaku postaju iznos mu je osjetno manji u odnosu na polinomni model u tablici 3.2, (h_0 je skala visine i r je koeficijent korelacije između modeliranih i stvarnih iznosa profila $M(h)$)

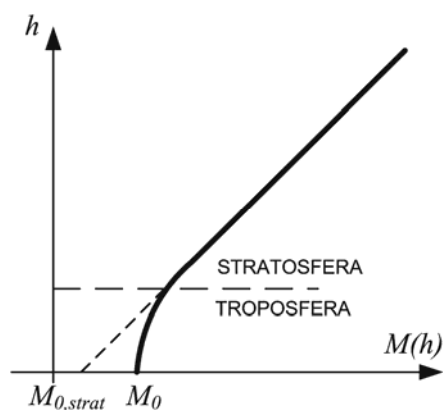
Postaja	M_s ["M jedinice"]	h_0 [m]	r
14430 Zadar	462.57	10000	0.67703
16044 Udine	535.89	11128	0.59887
16144 San Pietro	506.83	10493	0.63228
16320 Brindisi	512.71	10759	0.65239

3.1.3 Linearni model profila indeksa loma u stratosferi

Kvalitativno analizirajući stvarni profil modificiranog indeksa loma na slikama 3.1 i 3.2 vidljivo je kako, generalno gledajući, vertikalni profil modificiranog indeksa loma do visina 45 km možemo podijeliti u troposferski, nelinearni dio te u stratosferski, linearni dio kao što je prikazano na slici 3.3. Linearni, stratosferski profil modificiranog indeksa loma možemo aproksimirati kao

$$M(h) = \frac{\Delta M}{\Delta h} \cdot h + M_{0,STRAT} . \quad (3.3)$$

Parametri linearnog, stratosferskog modela imaju fizikalno značenje; gradijent $\Delta M/\Delta h$ predstavlja stratosferski gradijent modificiranog indeksa loma, a $M_{0, strat}$ pokazuje koliki bi bio površinski indeks loma kad ne bi bilo utjecaja troposfere (sl. 3.3). Geometrijski gledano $M_{0, strat}$ predstavlja ekstrapolaciju linearnog profila modificiranog indeksa loma prema površini i to je točka na apscisi dijagrama na slici 3.3.



Slika 3.3 Opći oblik vertikalnog profila modificiranog indeksa loma u troposferi i stratosferi na kojem se razlikuje nelinearni troposferski dio i linearni stratosferski dio profila. M_0 predstavlja stvarni iznos površinskog indeksa loma, dok $M_{0, strat}$ predstavlja iznos površinskog indeksa loma kad ne bi bilo utjecaja troposfere (geometrijski predstavlja ekstrapolaciju linearnog dijela profila prema površini, prikazano isprekidanom crtom).

Podjela vertikalnog profila modificiranog indeksa loma na troposfersko i stratosfersko područje omogućava razvoj jednostavnog linearnog modela za stratosferu (koji u stratosferi može zamijeniti složeni polinomni model petog stupnja (3.2)), a na temelju razlike M_0 i $M_{0, strat}$ može se procijeniti i usporediti utjecaj troposfere za svaku od aeroloških postaja.

Izdvajanjem samo stratosferskih podataka (pomoću podatka o visini tropopauze u TEMP sondažama, ukoliko nije bilo oznake "7" u TEMP sondaži tada su uzeti podaci viši od 10 km). Linearnom regresijom stratosferskih podataka za sve postaje dobiveni su iznosi parametara

linearnog stratosferskog modela modificiranog indeksa loma koji su prikazani u tablici 3.4. Uspoređujući koeficijent korelacije r , dobiven na temelju razlike stvarnih podataka modificiranog indeksa loma i onih dobivenih linearnim modelom (3.3) na istoj visini, zaključujemo kako je linearni model vertikalnog profila u stratosferi vrlo dobar.

Tablica 3.4 Parametri stratosferskog linearnog modela vertikalnog profila modificiranog indeksa loma (3.3): $\Delta M/\Delta h$ je stratosferski gradijent indeksa loma, $M_{0, strat}$ je iznos površinskog indeksa loma kad ne bi bilo utjecaja troposfere, ΔM_0 je razlika između površinskog indeksa loma $\bar{M}_0$ i $M_{0, strat}$ i ona predstavlja iznos utjecaja troposfere (v sl. 3.3) i r je koeficijent korelacije između stvarnih i modeliranih iznosa modificiranog indeksa loma, prema (3.3) u stratosferi

	Stratosferski gradijent $\Delta M/\Delta h$ [M/m]	$M_{0, STRAT}$ [M]	ΔM_0 [M]	r
14430 Zadar	0.1539	109.38	223.44	0.99996
16044 Udine	0.1528	129.53	203.35	0.99994
16144 San Pietro	0.1524	126.44	203.10	0.99993
16320 Brindisi	0.1527	118.85	211.24	0.99994

Uspoređujući razlike ΔM_0 , odnosno utjecaj troposfere u četvrtom stupcu tablice 3.3, mogli bismo zaključiti kako je troposferski utjecaj izraženiji na istočnom (Zadar) i južnom dijelu Jadranskog mora (Brindisi). Udine i San Pietro imaju manje iznose ΔM_0 , no ne treba zanemariti njihov geografski položaj koji je nešto dublje u unutrašnjosti, za razliku od Zadra i Brindisija.

3.2 Površinski indeks loma za jadranske postaje

Poznavanje refrakcijskih uvjeta pri površini ima velik praktični značaj za ostvarivanje terestričkih radio komunikacija i radarsko praćenje pomorskog prometa. Proučavanje površinskog indeksa loma podijelili smo u dvije studije: statističku razdiobu iznosa površinskog indeksa loma i vremenske hodove površinskog indeksa loma.

3.2.1 Razdioba iznosa površinskog indeksa loma

Prosječni površinski indeks loma $\bar{M}_0$ za sve četiri promatrane postaje, prema podacima prikazanim u tablici 3.1, je oko 334 "N jedinice" s relativno malom standardnom devijacijom od oko 16 "N jedinica". Analiza razdiobe iznosa površinskog indeksa loma prikazana je grafički na slici 3.4 i kvantitativno u tablici 3.5. Razdioba iznosa površinskog indeksa loma pokazuje zvonoliki oblik, međutim iznos parametra χ^2 koji opisuje razliku između empiričkih f_i i teorijskih frekvencija f_{ti} iznosa površinskog indeksa loma (npr. Wilks, 1995)

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(f_i - f_{ti})^2}{f_{ti}} \quad (3.4)$$

je prevelik (v. tablicu 3.5) pa razdiobe površinskih indeksa loma ne možemo predstaviti normalnom razdiobom. Prema tome, kod projektiranja radio sustava objektivnije je koristiti medijanski iznos površinskog indeksa loma nego aritmetički srednjak.

Jedan pokušaj eksplicitnog opisa razdiobe površinskog indeksa loma nalazimo u Preporuci ITU-R P.453-9; ona pokušava dati i funkciju razdiobe površinskih indeksa loma preko medijanske vrijednosti površinskog indeksa loma (ITU, 2003):

$$Med(N) = \frac{D_N + k_1}{\sqrt[E_0]{\frac{1}{P_0} - 1}} - k_1 \quad (3.5)$$

u kojoj su: $Med(N)$ medijanska vrijednost površinskog indeksa loma, P_0 je vjerojatnost da je površinski indeks loma niži ili jednak D_N , a konstante $E_0 = \log |D_N|$ i $k_1 = 30$. Razdioba iznosa površinskog indeksa loma za radio valove (3.5) je vrlo složena i nije praktična što je upućivalo na traženje mogućnosti opisa razdiobe pomoću koeficijenata asimetrije i spljoštenosti.

Koeficijent spljoštenosti K (engl. *kurtosis*) definiran je (npr. Wilks, 1995):

$$K = \frac{n(n+1)M_4 - 3M_2M_2(n-1)}{(n-1)(n-2)(n-3)\sigma^4} \quad (3.6)$$

u kojem su: broj podataka n , standardna devijacija σ i centralni moment r -tog reda

$$M_r = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^r. \quad (3.7)$$

Koeficijent spljoštenosti ima negativnu vrijednost za sve postaje (koeficijent spljoštenosti za normalnu razdiobu jednak je 0) što znači da je empirijska frekvencija srednje vrijednosti niža od teorijske frekvencije srednjaka normalne razdiobe (vrha krivulje normalne razdiobe).

Koeficijent asimetričnosti S (engl. *skewness*) definiran je (npr. Wilks, 1995) kao:

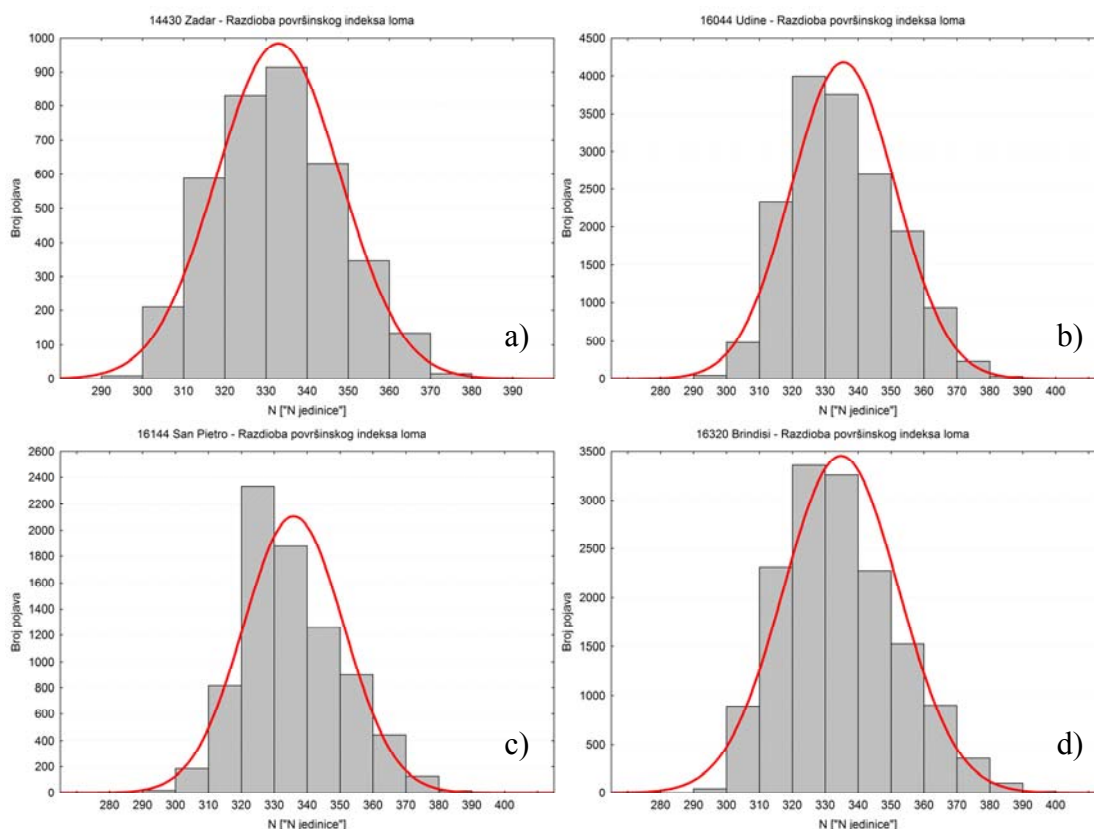
$$S = \frac{n M_3}{(n-1)(n-2)\sigma^3} \quad (3.8)$$

oznake centralnih momenata M , standardne devijacije i broja podataka u (3.8) identične su onima u (3.6). Kod sve četiri jadranske postaje koeficijent asimetričnosti ima malu pozitivnu vrijednost što znači da je empirijska razdioba pomaknuta u lijevo (prema nižim iznosima površinskog indeksa loma). Prema tome, možemo očekivati veći broj slučajeva s iznosom površinskog indeksa loma koji je niži od srednjaka za promatranu postaju.

Povećani broj iznosa nižih od srednje vrijednosti za postaje koje se nalaze dalje od obale (Udine i San Pietro) u skladu je sa činjenicom da su od svih pojava nestandardne refrakcije pri površini na tim postajama superrefrakcije najčešće nestandardne pojave. U projektiranju radio telekomunikacijskih sustava to znači da se može očekivati jači signal pri tlu u odnosu na standardnu atmosferu. S druge strane, to znači i povećano izlaganje okoliša jakom polju odašiljača. Poznavanje razdiobe površinskog indeksa loma, a ne samo medijanske vrijednosti, korisno je za određivanje potrebnog raspona snage odašiljača.

Tablica 3.5 Parametri statističke razdiobe površinskog indeksa loma dobiveni iz površinskih podataka aeroloških sondaža upućuju na nemogućnost prilagodbe normalnoj razdiobi (neprihvatljivo visok iznos χ^2 funkcije)

	14430 Zadar	16044 Udine	16144 S.Pietro	16320 Brindisi
Broj podataka	3682	16468	7982	15044
Median	332.165	333.630	332.915	332.510
Minimum	293.83	268.02	292.21	264.71
Maksimum	382.85	410.33	399.08	402.10
Srednjak	332.76	335.17	335.56	334.48
Std.devijacija	14.93	15.74	15.13	17.39
Koef.spljošt.	-0.376±0.08	-0.230±0.04	-0.119±0.05	-0.113±0.04
Koef.asimetr.	0.221±0.04	0.374±0.02	0.473±0.03	0.448±0.02
χ^2	80.49	688.6	593.1	706.2



Slika 3.4 Razdioba površinskog indeksa loma za postaje: a) Zadar, b) Udine, c) San Pietro i d) Brindisi prikazana je histogramom sa stupcima širine 10 "N jedinica". Gaussova razdioba, izračunata iz srednjaka i standardne devijacije podataka površinskog indeksa loma, prikazana je crvenom krivuljom (v. tablicu 3.5).

3.2.2 Razdioba površinskih pojava refrakcije radio valova

Na površini Zemlje u pravilu su najveći tokovi topline i vlage pa je atmosferski granični sloj područje najčešćih pojava nestandardne refrakcije. Pojave nestandardne refrakcije u ovom području posebno su zanimljive u radio tehnici jer jako utječu na značajke

terestričkih radio uređaja. Razdioba pojava refrakcije radio valova po vrstama prikazana je u Tablici 3. 6.

Prema podacima iz Tablice 3.6 vidljivo je kako se normalna refrakcija javlja u manje od 50% slučajeva, ekstrem je San Pietro Capofiume koji pri površini ima samo oko 32% normalnih refrakcija. Podaci u Tablici 3.6 suglasni su s lijevom asimetričnom u razdiobama površinskog indeksa loma prikazanim na slikama 3.4a do 3.4d jer udio superrefrakcija i radio kanala nadmašuje udio subrefrakcija. Primjećujemo kako su subrefrakcije znatno rjeđe pri tlu iznad postaja Udine i San Pietro Capofiume koje su dublje na kopnu što je vjerojatno posljedica slabijeg toka vlage. Istovremeno, Udine i San Pietro Capofiume bilježe više pojava superrefrakcije.

Tablica 3.6 Razdioba pojava radio refrakcije na površini po vrstama u postocima (%) u odnosu na ukupni broj površinskih gradijenata modificiranog indeksa loma

	Normalna ref.	Superrefrakcija	Subrefrakcija	Radio kanal
14430 Zadar	39.48 %	16.63 %	22.61 %	21.28 %
16044 Udine	48.59 %	22.54 %	10.83 %	18.04 %
16144 San Pietro	31.95 %	23.62 %	9.82 %	35.15 %
16320 Brindisi	46.77 %	16.65 %	21.55 %	15.03 %

3.3 Čestina i vertikalna distribucija pojava nestandardne refrakcije

Višegodišnji nizovi aeroloških podataka omogućavaju objektivan statistički opis pojave koji pokazuje kako su pojave nestandardne refrakcije česte - tek u 10 - 20% sondaža nije zabilježena niti jedna pojava nestandardne refrakcije kao što prikazuje tablica 3.7. Ova tablica dobivena je omjerom broja sondaža u kojima su zabilježene pojave nestandardne refrakcije i ukupnim brojem sondaža. Sondaže zadarske postaje imaju gušća mjerenja značajnih razina tek u drugoj polovici ansambla podataka, od 15. ožujka 2006. pa je u obradi korišten samo ovaj kvalitetniji dio ukupnog broja sondaža. Stupac "Anaprop" pokazuje postotni udio sondaža u kojima se javlja najmanje jedna, bilo koja, pojava nestandardne propagacije. Ona nije jednostavan zbroj stupaca s različitim tipovima anomalnih refrakcija jer se u jednoj sondaži može javiti više anomalnih pojava, ponekad i različitih tipova.

Prema podacima iz tablice 3.7 postotak nestandardnih pojava veći je na zapadnom i južnom dijelu Jadrana, dok je najmanji na njegovom sjevernom dijelu. To se može tumačiti utjecajem mora koji je izrazitiji za postajama Brindisi i San Pietro i poklapa se s ITU procjenama (ITU, 2003).

Tablica 3.7 Čestine pojava nestandardne refrakcije po tipovima za sve četiri ispitivane postaje

Aerološka postaja	Ukupan broj balonskih sondaža	Udio sondaža u kojoj se javlja jedna ili više pojava nestandardnih refrakcija			
		anaprop	radio-kanali	superrefrakc.	subrefrakc.
14430 Zadar⁵	2051	86.79%	55.00%	66.11%	63.19%
16044 Udine	16595	80.11%	33.44%	62.95%	43.94%
16144 San Pietro	7792	91.30%	54.41%	72.73%	53.13%
16320 Brindisi	14959	91.20%	56.94%	73.94%	58.55%

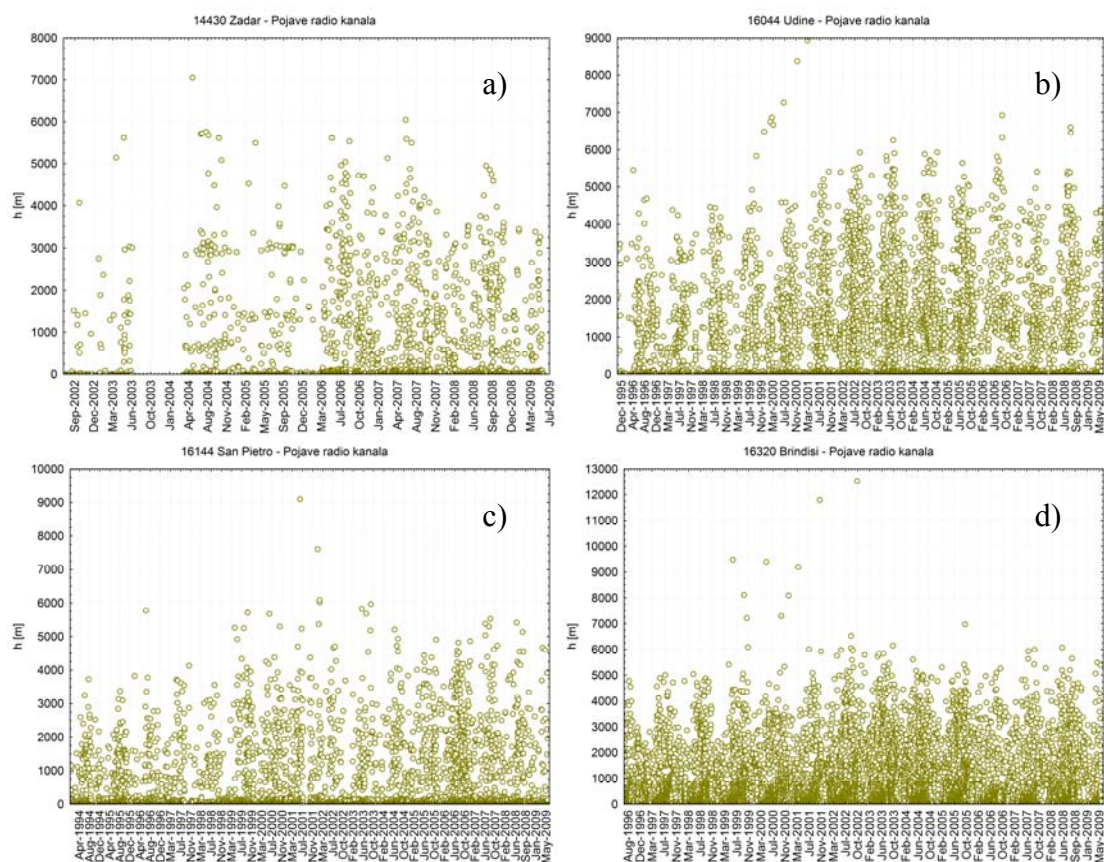
3.3.1 Pojave radio-kanala nad Jadranom

U odnosu na ostale pojave nestandardne refrakcije, pojava radio kanala je najrjeđa i u većini slučajeva javlja se neposredno na površini ili na maloj visini. Visine na kojima su se javljali kanali u vremenskim nizovima podataka prikazane su na slikama 3.5a do 3.5d. Sa slika 3.5a do 3.5d može se zapaziti redovita pojava visinskih radio kanala. Prikaz na ovim slikama ne daje uvid u vertikalnu distribuciju pojava jer se pojave kanala neposredno iznad površine međusobno preklapaju. Na prikazu pojava kanala iznad Udina (sl. 3.5b) i Brindisija (3.5d) zapaža se češća pojava visinskih radio kanala u ljetnim mjesecima.

Vertikalna distribucija čestina pojava kanala prikazana je na slici 3.6, s korakom 100 m po visini. S obzirom da aerološke postaje imaju nizove podataka različitog trajanja, izračunate su relativne čestine pojava radio kanala za svaku postaju posebno i uspoređene na zajedničkom dijagramu. Brindisi se izdvaja po relativno velikom broju radio kanala na visinama do 1000 m

⁵ Zbog čestih prekida sondiranja koristio se reducirani vremenski niz podataka u razdoblju u kojem su zadarska sondiranja bila redovita; od 15. ožujka 2006. do 1. lipnja 2009.

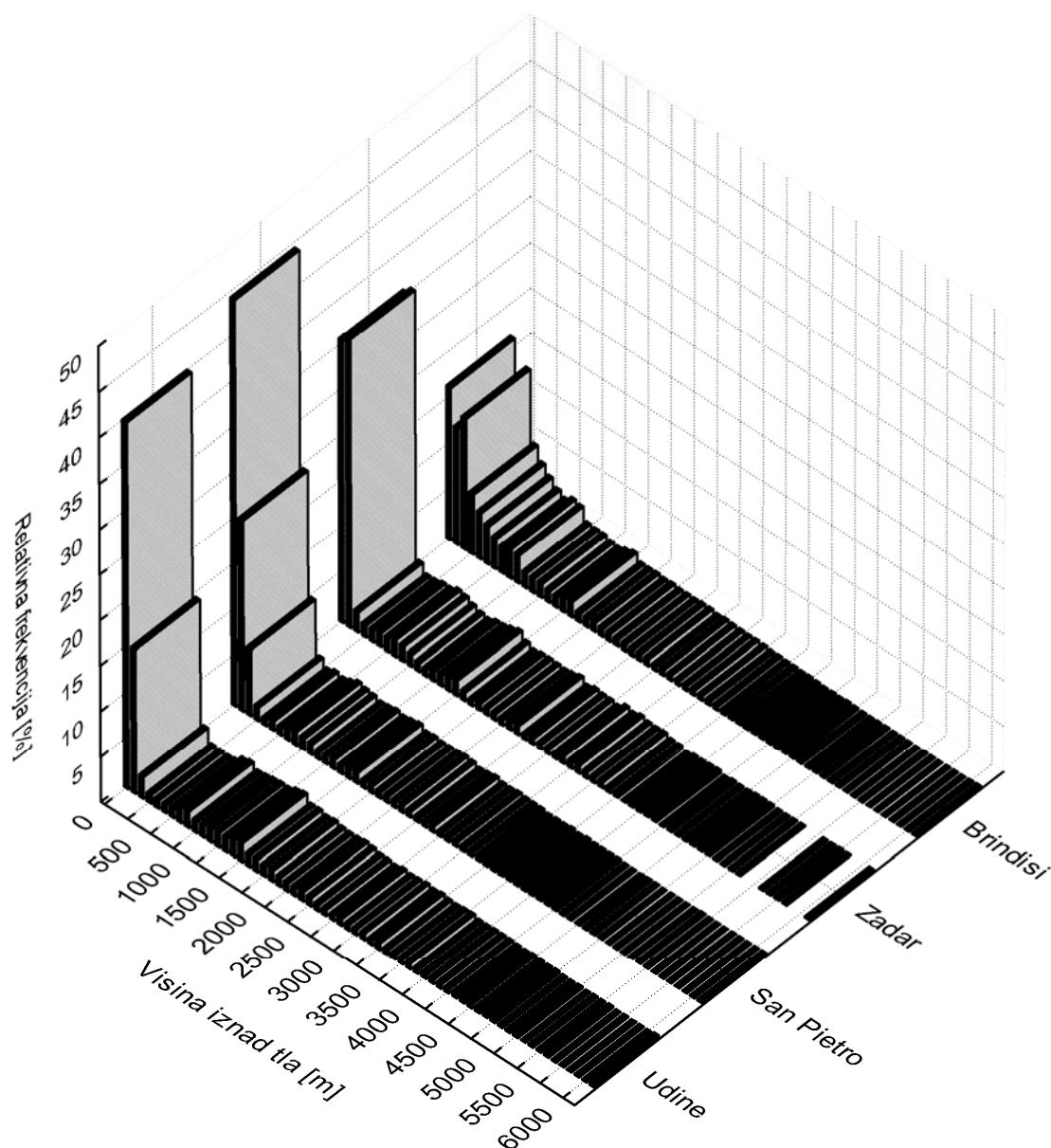
dok ostale tri postaje imaju najveći udio pojava radio kanala neposredno iznad prizemne površine.



Slika 3.5 Visine pojava radio-kanala iznad aeroloških postaja: a) Zadar, b) Udine, c) San Pietro i d) Brindisi. Svaki kružić predstavlja visinu na kojoj je detektirana pojava radio kanala. Vertikalna os dijagrama h odnosi se na visinu iznad tla.

Tablica 3.8 prikazuje usporedbe visina pojava: minimalne, medijanske, visine ispod koje se javlja 95% pojave, maksimalne zabilježene visine (uzeti s rezervom zbog nehomogenosti stratosferskih podataka), brojem opaženih pojava i omjerom broja opaženih pojava s brojem sondaža iz tablice 3.7. Omjer opaženih pojava i broja sondaža nije vjerojatnost pojave, jer se u jednoj sondaži može javiti i više pojava iste nestandardne refrakcije na različitim visinama. Ako je taj omjer veći od jedinice, to znači da se često javlja veći broj pojava u jednoj sondaži.

Vertikalna distribucija kanala



Slika 3.6 Čestine pojava radio kanala iznad četiri jadranske postaje izračunatih iz omjera ukupnog broja pojava radio kanala i broja pojava unutar pojaseva visina po 100 m za svaku postaju posebno.

Tablica 3.8 pokazuje ovisnost o geografskoj širini postaje; na južnom dijelu Jadrana (Brindisi) pojava kanala je dvostruko češća u odnosu na sjeverni dio Jadrana (Udine). Razdioba broja pojava radio kanala po visini ne može se prilagoditi teorijskim statističkim razdiobama tako da su medijanska visina i granična visini ispod koje se javlja 95% pojava radio-kanala najbolji parametri koji opisuju ovu pojavu. Brindisi, koji reprezentira južni Jadran, bilježi dvostruko više pojava kanala u troposferi u odnosu na talijanske postaje Udine i San Pietro, koje reprezentiraju sjeverni dio Jadrana. Visina do koje se javlja 95% pojava radio kanala nad

Jadranskim morem je od 2700 m do 3700 m što znači da radio kanale možemo očekivati u donjoj trećini troposfere.

Tablica 3.8 Statistički parametri vertikalnog profila pojava radio kanala iznad jadranskih postaja: Min predstavlja najmanju visinu, a Max najveću visinu na kojoj je detektirana pojava radio kanala, 95% predstavlja graničnu visinu ispod koje se javlja 95% pojava radio kanala

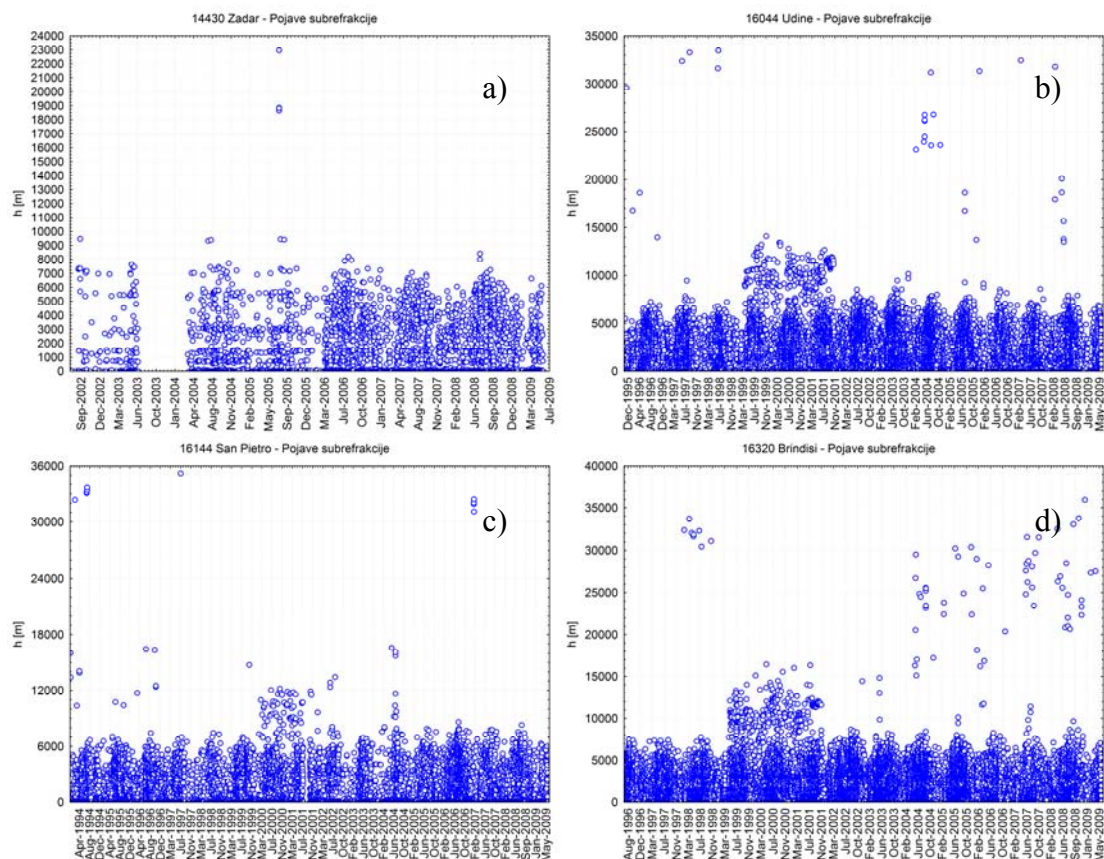
Aerološka postaja	Visina iznad tla [m]				Ukupni broj pojava nestandardne refrakcije	Omjer broja pojava i broja sondaža O/S
	Min [m]	Med [m]	95 % [m]	Max [m]		
14430 Zadar	0	39	3210	20069	2510	0.68318
16044 Udine	0	49	3685	8932	7377	0.43913
16144 San Pietro	0	33	2680	9094	6284	0.75123
16320 Brindisi	0	291.5	3213	12525	13554	0.88064

3.3.2 Pojave subrefrakcija nad Jadranom

Poput ostalih pojava nestandardne refrakcije, subrefrakcije se najčešće javljaju pri površini, ali je udio visinskih subrefrakcija veći u odnosu na pojave kanala i superrefrakcija na visini (sl 3.7). Postaje Udine i Brindisi redovito sondiraju u stratosferi u razdoblju od početka 2004. godine do kraja 2008. godine i podaci iz ovog razdoblja prikazuju realnu sliku pojava stratosferskih subrefrakcija. Zapažanje o relativno čestim subrefrakcijama u skladu je sa studijom vertikalnog profila modificiranog indeksa loma u poglavlju 3.1.3 u kojem se pokazalo kako je vertikalni gradijent modificiranog indeksa loma u stratosferi konstantan i iznosi 152 M/km (tablica 3.4 i slika 3.3), što je na samoj granici pojave subrefrakcija. Budući da je na tako velikim visinama zrak suh, do pojava stratosferskih subrefrakcija dolazi zbog pojava snižavanja temperature zraka, prema (1.19), izazvanih stratosferskom dinamikom atmosfere.

Vertikalna razdioba pojava subrefrakcije u troposferi prikazana je na slici 3.8. Iako se najveći broj pojava subrefrakcija javlja pri površini, subrefrakcija se, u odnosu na druge dvije pojave nestandardne refrakcije, češće javlja na visinama; granica ispod koje se javlja 95% pojave nalazi se na visinama od 5680-6400 m. Lokalni maksimumi čestina pojavljivanja zapažaju se

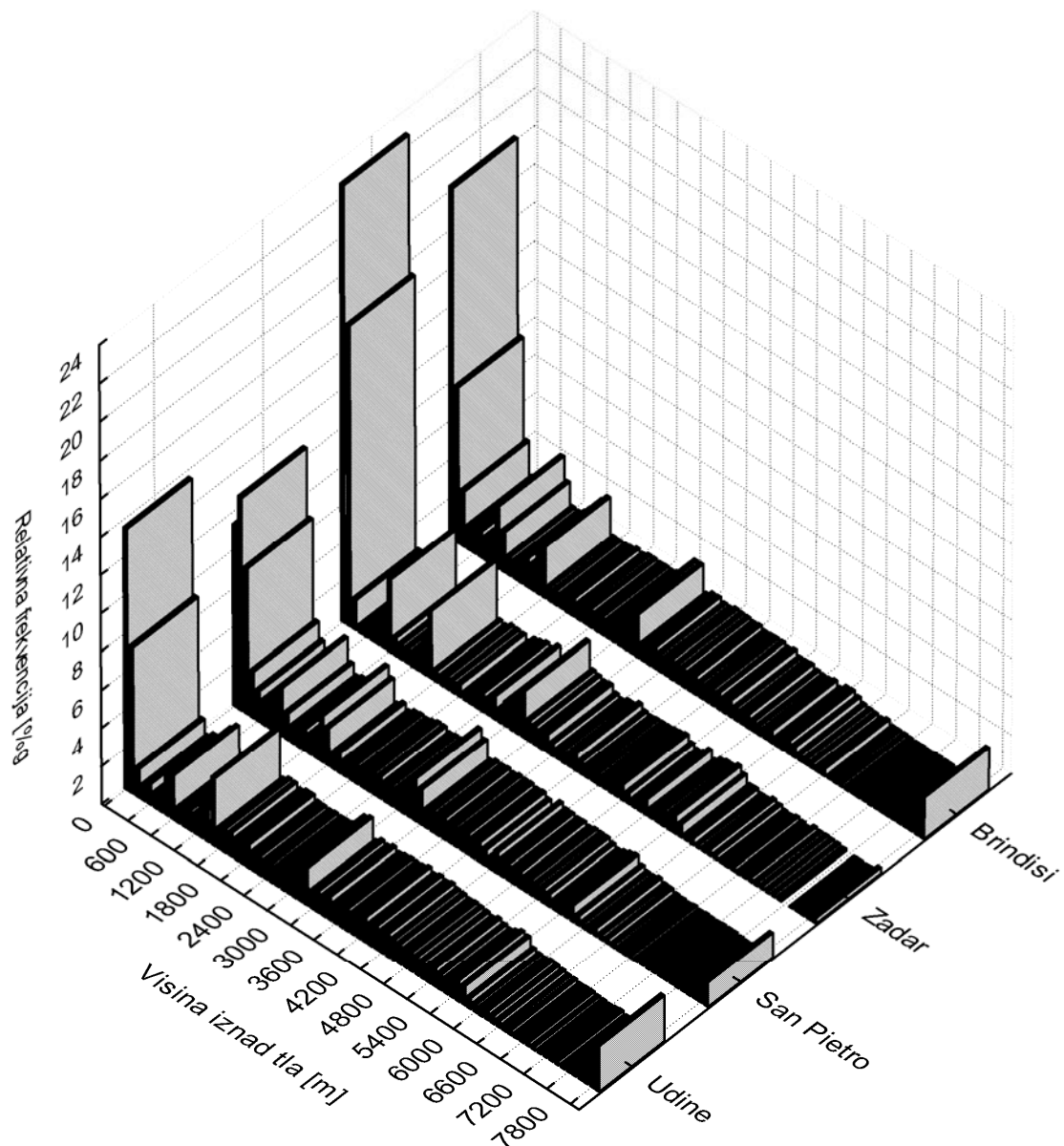
na sve četiri postaje u rasponu visina od 600-800 m, 1400-1600 m i 2800-3200 m. Medijanska visina subrefrakcija osjetno je veća nego u slučajevima kanala i superrefrakcija (v. tablicu 3.9).



Slika 3.7 Visine pojava subrefrakcija iznad aeroloških postaja: a) Zadar, b) Udine, c) San Pietro i d) Brindisi. Svaki kružić predstavlja visinu na kojoj je detektirana pojava subrefrakcije. Vertikalna os dijagrama h odnosi se na visinu iznad tla.

Tablica 3.9 potvrđuje kako je subrefrakcija česta na visinama (maksimalnu opaženu visinu i ovdje treba uzeti s rezervom zbog nehomogenosti stratosferskih sondaža). Uspoređujući omjer između broja pojava subrefrakcija naprema ukupnom broju sondaža, možemo zaključiti kako su višestruke subrefrakcije u jednoj sondaži česte.

Vertikalna distribucija subrefrakcija



Slika 3.8 Čestine pojava subrefrakcija iznad četiri jadranske postaje izračunatih iz omjera ukupnog broja pojava subrefrakcija i broja pojava unutar pojaseva visina po 100 m za svaku postaju posebno. Zadnji stupac na desnoj strani za svaku postaju odnosi se na frekvenciju subrefrakcija iznad visine 8000 m.

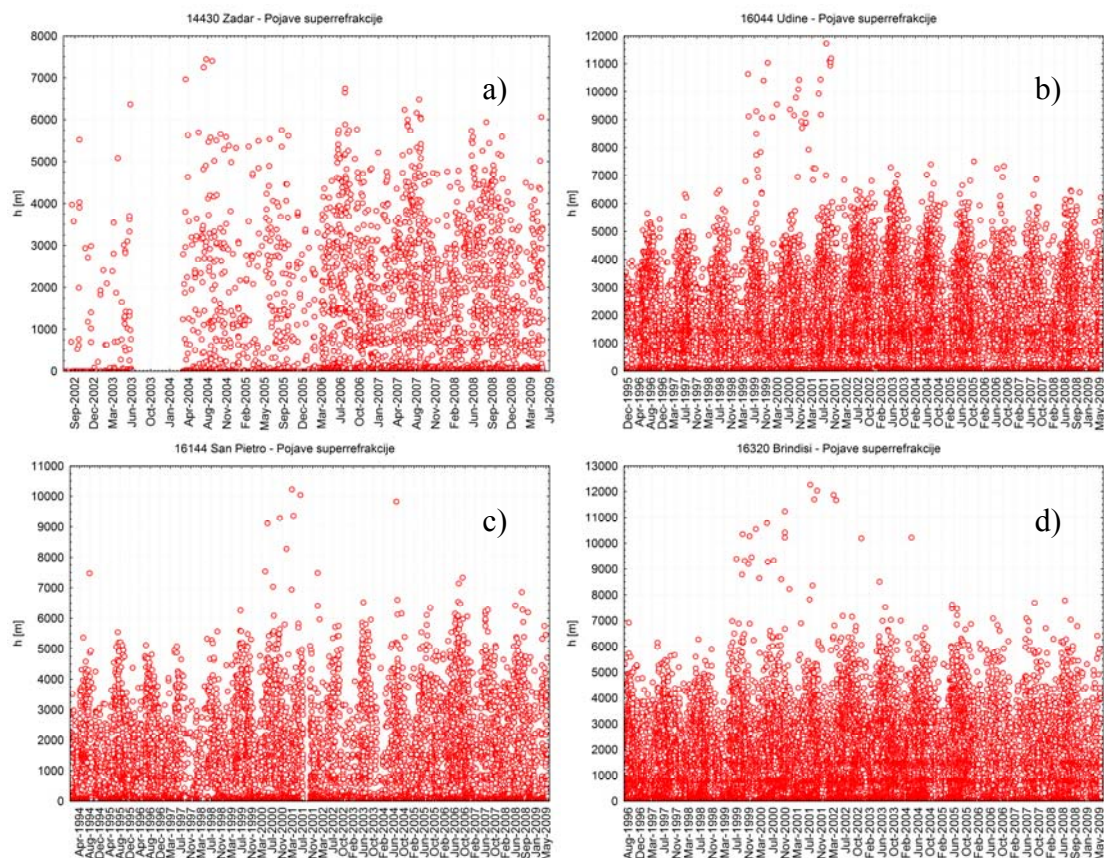
Tablica 3.9 Statistički parametri vertikalnog profila pojava subrefrakcija iznad jadranskih postaja: Min predstavlja najmanju visinu, a Max najveću visinu na kojoj je detektirana pojava subrefrakcija, 95% predstavlja graničnu visinu ispod koje se javlja 95% pojava subrefrakcija

Aerološka postaja	Visina iznad tla [m]				Ukupni broj pojava nestandardne refrakcije	Omjer broja pojava i sondaža O/S
	Min [m]	Med [m]	95 % [m]	Max [m]		
14430 Zadar	0	981	5676	22964	3646	0.99238
16044 Udine	0	2089	6403	33470	12995	0.77356
16144 San Pietro	0	1538	5843	35194	7810	0.93365
16320 Brindisi	0	1500	6129	35954	17657	1.14723

3.3.3 Pojave superrefrakcije nad Jadranom

Superrefrakcija je najčešća pojava nestandardne refrakcije koja se na svim jadranskim postajama javlja većinom u donjoj polovici troposfere. Kvalitativno, to je vidljivo iz dijagrama pojava superrefrakcija po visini tijekom cijelog razdoblja koji su prikazani na slikama 3.9a do 3.9d. U slučaju aerološke postaje Zadar, na slici 3.9a primjećuje se povećani broj pojava superrefrakcija od 2006. godine nadalje što je posljedica promjene metodologije rada i prilagođavanja ove automatske postaje na osjetljiviju detekciju značajnih razina.

Vertikalna distribucija pojava superrefrakcije prikazana je na dijagramu 3.10. Najveći broj superrefrakcija zabilježen je pri površini, ali je udio visinskih subrefrakcija do visina 5 km relativno velik. Poput vertikalnih distribucija kanala i subrefrakcija, vertikalna distribucija superrefrakcija ne može se prilagoditi niti jednoj teorijskoj razdiobi; zato preporučamo graničnu visinu ispod koje se javlja 95% slučajeva superrefrakcije, kao i medijansku visinu kao parametre koji je statistički opisuju u Tablici 3.10.

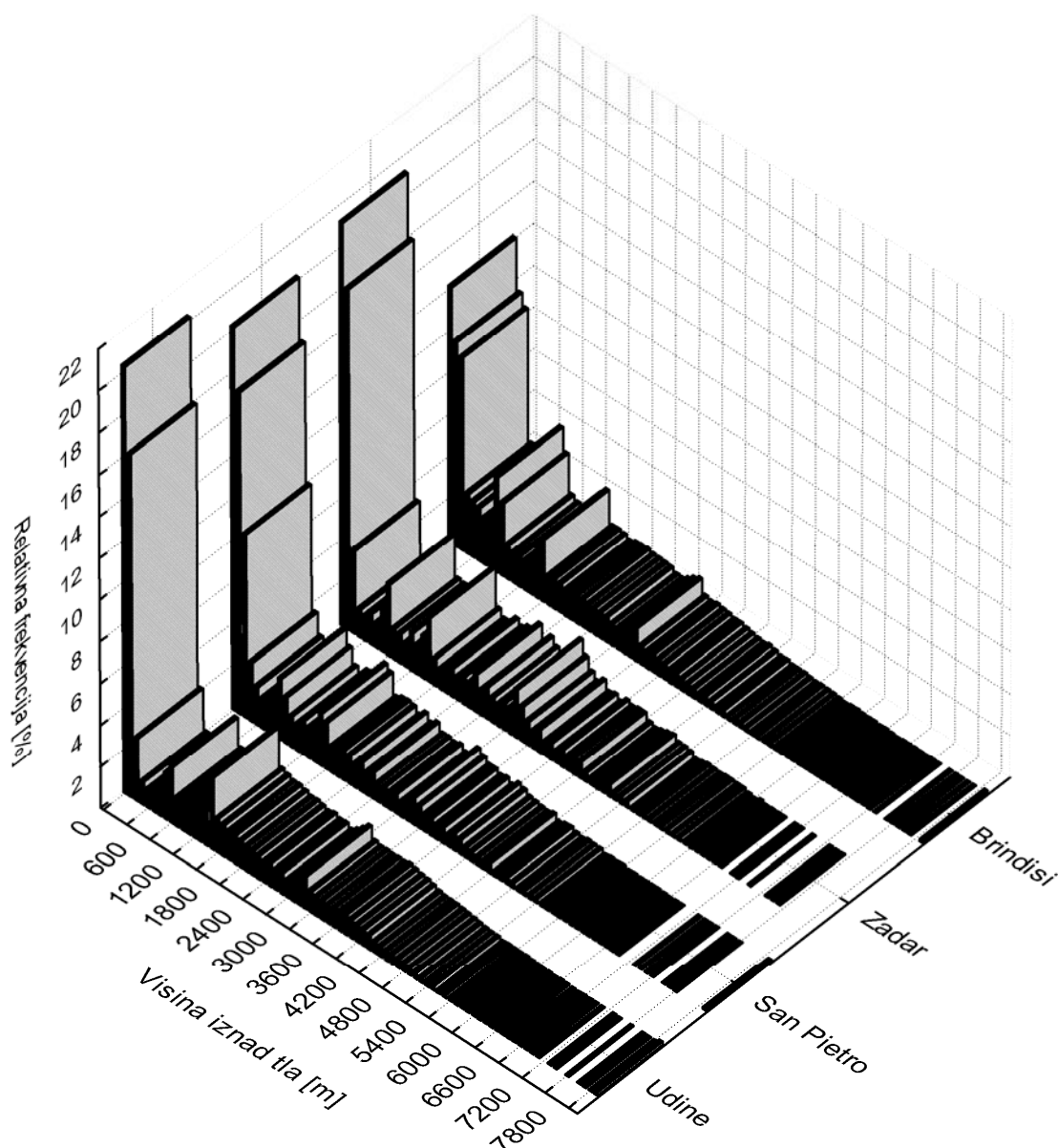


Slika 3.9 Visine pojava superrefrakcija iznad aeroloških postaja: a) Zadar, b) Udine, c) San Pietro i d) Brindisi. Svaki kružić predstavlja visinu na kojoj je detektirana pojava superefrakcije. Vertikalna os dijagrama h odnosi se na visinu iznad tla.

Tablica 3.10 Statistički parametri vertikalnog profila pojava superrefrakcija iznad jadranskih postaja: Min predstavlja najmanju visinu, a Max najveću visinu na kojoj je detektirana pojava superrefrakcija, 95% predstavlja graničnu visinu ispod koje se javlja 95% pojava superrefrakcija

Aerološka postaja	Visina iznad tla [m]				Ukupni broj pojava nestandardne refrakcije	Omjer broja pojava i sondaža O/S
	Min [m]	Med [m]	95 % [m]	Max [m]		
14430 Zadar	0	765	4355	7436	3173	0.86364
16044 Udine	0	862	4398	15856	18136	1.07959
16144 San Pietro	0	568.5	4015	10219	10258	1.22630
16320 Brindisi	0	822	4229	17035	20407	1.32590

Vertikalna distribucija superrefrakcija



Slika 3.10 Čestine pojava superrefrakcija iznad četiri jadranske postaje izračunatih iz omjera ukupnog broja pojava superrefrakcija i broja pojava unutar pojaseva visina po 100 m za svaku postaju posebno.

Na vertikalnoj distribuciji čestina opaža se nekoliko maksimuma na visinama od 800 - 1600 m, a granica 95% vjerojatnosti pojave nalazi se na 4000 - 4400 m. Medijan je također podjednak na sve četiri postaje i nalazi se na 570 - 860 m. Promatramo li podatke samo za talijanske postaje može se zaključiti iz Tablice 3.10 kako su superrefrakcije nad južnim Jadranom češće i to za 25% u odnosu na njegov sjeverni dio. Omjer broja pojava superrefrakcija/broj sondaža (O/S) je u Tablici 3.10 za tri postaje veći od 1.0 što pokazuje kako su višestruke pojave superrefrakcije u jednoj sondaži česte.

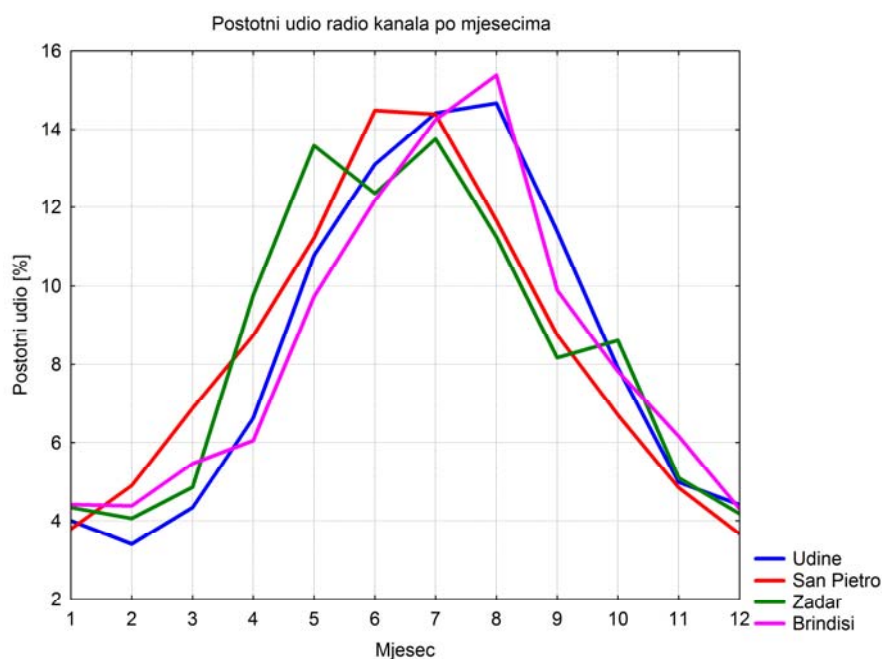
3.4 Godišnji hodovi nestandardnih refrakcija nad Jadranom

Promatrajući pojave refrakcije po tipu: standardna, subrefrakcija, superrefrakcija i radio kanal, primjećujemo izražene godišnje hodove po broju pojava i po tipičnim visinama na kojima se one javljaju. To je u skladu s godišnjim hodovima temperature zraka (sl. 2.8) i relativne vlažnosti zraka nad Jadranom (sl. 2.14) kao najvažnijim parametrima koji određuju iznos indeksa loma prema (1.19). Povećanje broja pojava nestandardne refrakcije, kao i visine na kojima se one javljaju može se kvalitativno pratiti za radio kanale na slici 3.5, za subrefrakcije na slici 3.7 i za superrefrakcije na slici 3.9.

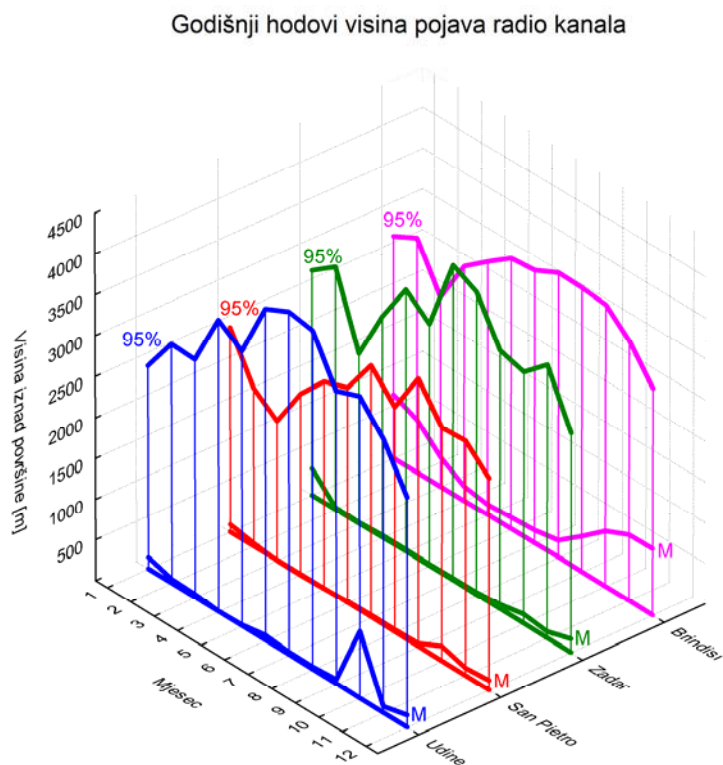
3.4.1 Godišnji hodovi pojava radio-kanala

Broj pojava radio kanala pokazuje izražen godišnji hod za sve jadranske postaje (sl. 3.11). Najveći broj pojava kanala javlja se u ljetnim mjesecima, od lipnja do kolovoza. U istom razdoblju meteorološke postaje na Jadranu bilježe minimum relativne vlažnosti (sl. 2.14) i maksimum temperatura zraka (sl. 2.8). Povoljni uvjeti za pojavu radio kanala iznad površine nastaju kad indeks loma N ima ekstremno niske vrijednosti, a to se događa, prema (1.19), u slučajevima niskih vrijednosti relativne vlažnosti uz istovremeno visoke temperature zraka.

Na godišnjem hodu pojava radio kanala za postaju Zadar primjećujemo manja odstupanja od pravilnosti pojave koju pokazuju talijanske stanice. Uzrok tome je relativna nehomogenost u nizu zadarskih sondaža, posebno do 2006. godine kad ta postaja bilježi razmjerno malo meteorološki značajnih razina. Naglo povećanje broja pojava radio-kanala počinje već u ožujku, na svim postajama, što je posljedica povećanja temperature zraka, a iznos indeksa loma je prema (1.19) obrnuto proporcionalan kvadratu temperature zraka. Godišnji hodovi visina pojava radio kanala iznad jadranskih postaja prikazani su na slici 3.12 i kvantitativno u prilogu A.1. Usporedno s porastom broja pojava (slika 3.11) povećava se i visina na kojoj se radio kanali pojavljuju što možemo pratiti po povećanju iznosa granične vrijednosti visine 95% pojava. U ljetnim mjesecima na slici 3.12 zapažamo i snižavanje medijanske visine što znači kako se najveći broj radio kanala ljeti pojavljuje na malim visinama. U slučaju postaje Brindisi bilježimo osjetno više iznose medijanske visine (usporediti sl. 3.12 i tablicu A.1 u Prilogu A) što je vjerojatno posljedica utjecaja Sredozemnog mora.



Slika 3.11 Postotni udio pojava radio kanala po mjesecima. Zbog različitih duljina nizova postotni udio izračunat je za svaku postaju posebno.

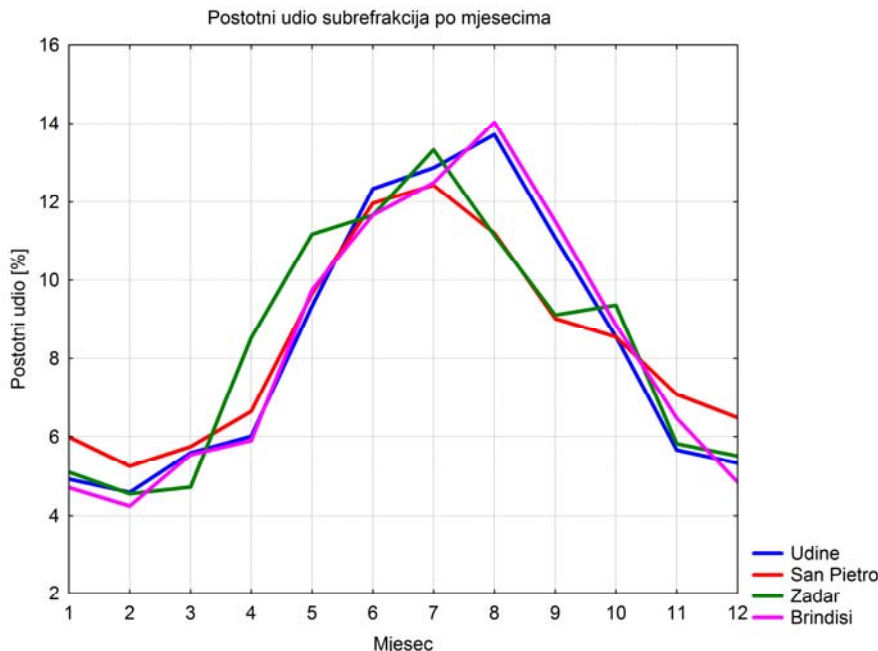


Slika 3.12 Godišnji hodovi visina pojava radio kanala za četiri jadranske postaje. M predstavlja medijansku visinu, a 95% graničnu visinu ispod koje se javlja 95% pojava radio kanala (usporediti s tablicom A.1 u Prilogu A).

Možemo zaključiti kako je povećani broj radio kanala u ljetnim mjesecima posljedica minimuma u godišnjem hodu relativne vlažnosti uz istovremeni maksimum temperatura zraka na površini, prema (1.19). U mjesecima s minimalnom relativnom vlažnosti do izražaja dolazi utjecaj promjene temperature zraka. Nagle promjene temperature zraka u ljetnim mjesecima pri površini uzrok su jakih gradijenata indeksa loma za radio valove, sve do ekstremnih iznosa, koji uzrokuju pojavu radio kanala.

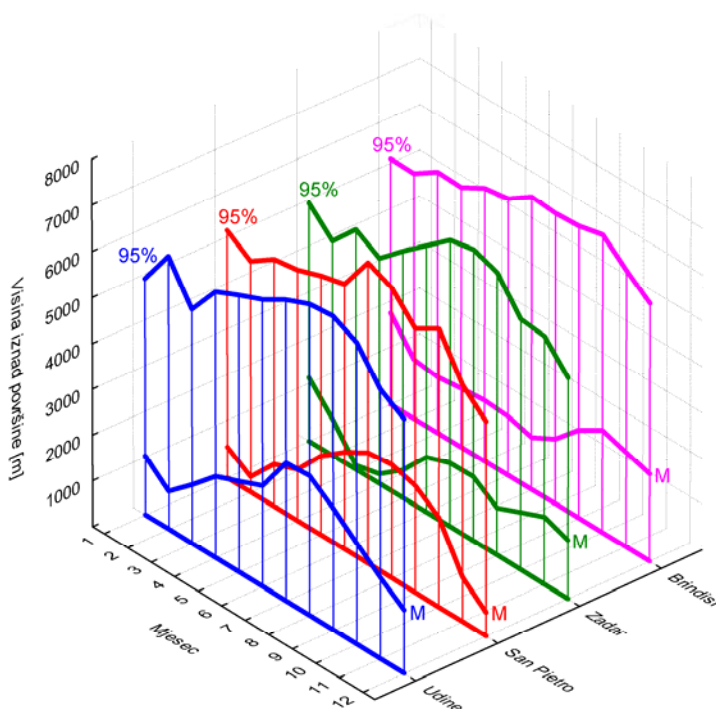
3.4.2 Godišnji hodovi pojava subrefrakcija

Subrefrakcija je tip nestandardne refrakcije koji se, u odnosu na ostale pojave nestandardne refrakcije, najčešće pojavljuje na visini (usporediti sl. 3.7 i 3.8 te tablicu A.2 u Prilogu A). Snižanjem temperature zraka se, prema (1.19), povećava iznos indeksa loma što posljedično dovodi do otklanjanja radio valova u veće visine, gdje je indeks loma niži. U ljetnim mjesecima s niskim iznosima relativne vlažnosti (sl. 2.14) povoljni uvjeti za pojavu subrefrakcije nastaju u slučajevima ekstremno niskih temperatura zraka.



Slika 3.13 Postotni udio pojava subrefrakcija po mjesecima. Zbog različitih duljina nizova postotni udio izračunat je za svaku postaju posebno.

Godišnji hodovi visina pojava subrefrakcija



Slika 3.14 Godišnji hodovi visina pojava subrefrakcija za četiri jadranske postaje. M predstavlja medijansku visinu, a 95% graničnu visinu ispod koje se javlja 95% pojava subrefrakcija (usporediti a tablicom A.2 u prilogu).

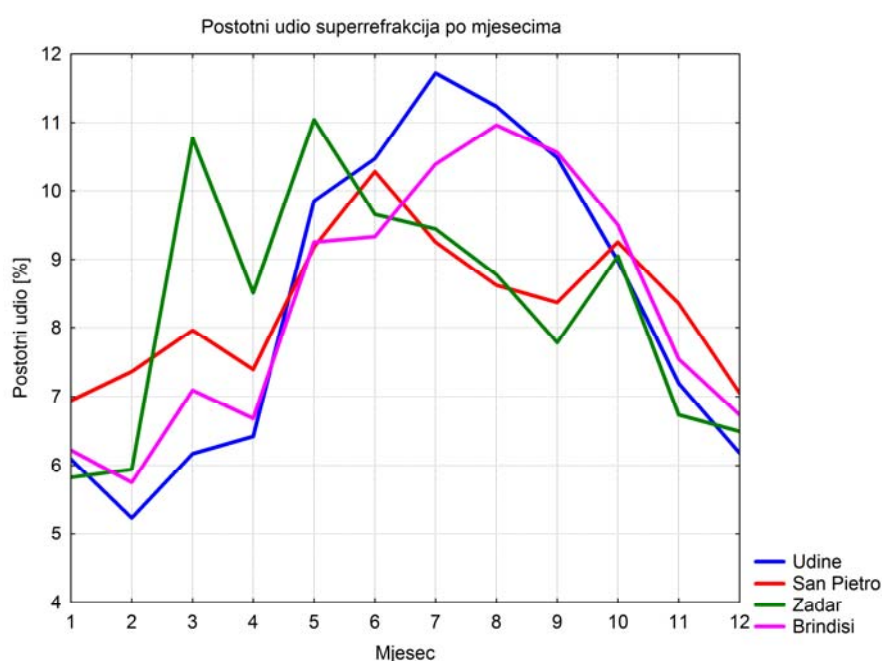
Na godišnjim hodovima pojava subrefrakcija iznad Jadrana, prikazanim na slici 3.14 i kvantitativno u tablici A.2 u Prilogu A zapažamo kako je broj pojava i do 2.5 puta veći u razdoblju od srpnja do kolovoza, u odnosu na hladni dio godine, osobito u veljači, kad broj subrefrakcija ima svoj minimum. Relativno velika medijanska visina u godišnjem hodu subrefrakcija, u hladnom dijelu godine, posebno je izražena kod postaje Brindisi, što može biti povezano sa supsidencijom u anticiklonama nad Sredozemljem.

3.4.3 Godišnji hodovi pojava superrefrakcija

Godišnji hod pojava superrefrakcija je, poput pojava radio kanala, povezan s godišnjim hodom relativne vlažnosti zraka nad Jadranom (sl. 2.14). S padom relativne vlažnosti zraka, prema (1.19), sve veći utjecaj imaju promjene temperature zraka. Povećanje temperature zraka izazvano meteorološkim pojavama dovodi do sniženja iznosa indeksa loma zbog čega se radio valovi mogu zadržati na manjim visinama i njihove trajektorije se otklanjaju prema površini. Temperaturne anomalije (značajna odstupanja profila temperature zraka u odnosu na vertikalni profil temperature u standardnoj atmosferi) su česte, zato su i

superrefrakcije najčešće nestandardne pojave. Radio kanali su rjeđi jer oni predstavljaju ekstremne slučajeve anomalija u profilima vlažnosti i temperature.

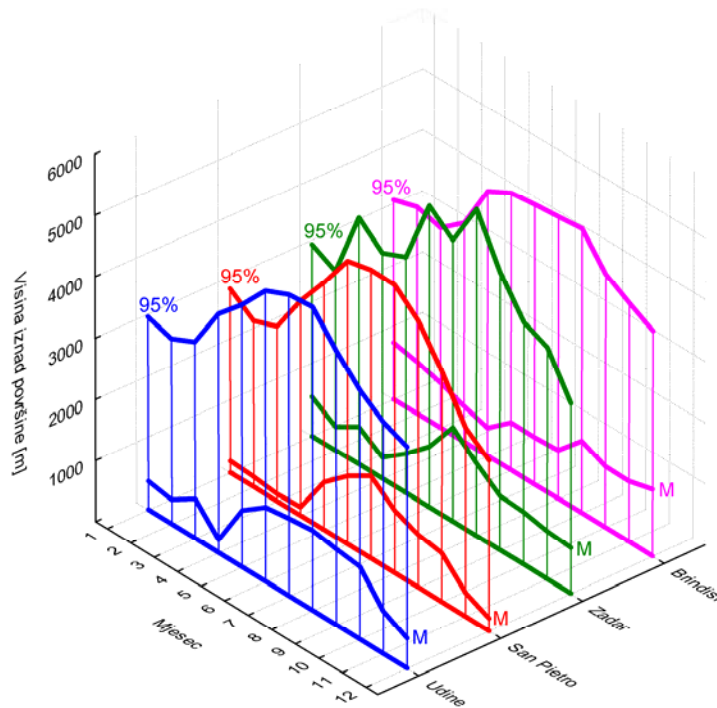
Pravilnosti u godišnjem hodu broja pojava nešto su slabije izražene na postajama Zadar (usporediti sl. 3.15 i tablicu A.3a u Prilogu A) i San Pietro (usporediti sl. 3.15 i tablicu A.3c u Prilogu A). Porast broja pojava superrefrakcija bilježi se u svibnju na talijanskim postajama i već u travnju u Zadru, ali je zadarski niz mjerenja najkraći i najmanje homogen pa zapažanje o ranijem početku porasta broja pojava u Zadru treba uzeti s rezervom, dok ne budu dostupni duži i homogeniji nizovi aeroloških mjerenja.



Slika 3.15 Postotni udio pojava superrefrakcija po mjesecima. Zbog različitih duljina nizova postotni udio izračunat je za svaku postaju posebno.

Godišnji hod visine medijana i 95% pojava svrstava superrefrakcije po visini između pojava radio-kanala i subrefrakcija (usporediti sl. 3.12, 3.14 i 3.16). Po učestalosti su superrefrakcije najčešće s maksimumom broja pojava u srpnju i kolovozu kao posljedicu minimuma u godišnjem hodu relativne vlažnosti zraka (sl. 2.14) i maksimuma u godišnjem hodu temperature zraka (sl. 2.8).

Godišnji hodovi visina pojava superrefrakcija



Slika 3.16 Godišnji hodovi visina pojava superrefrakcija za četiri jadranske postaje. M predstavlja medijansku visinu, a 95% graničnu visinu ispod koje se javlja 95% pojava superrefrakcija (tablica A.3 u prilogu).

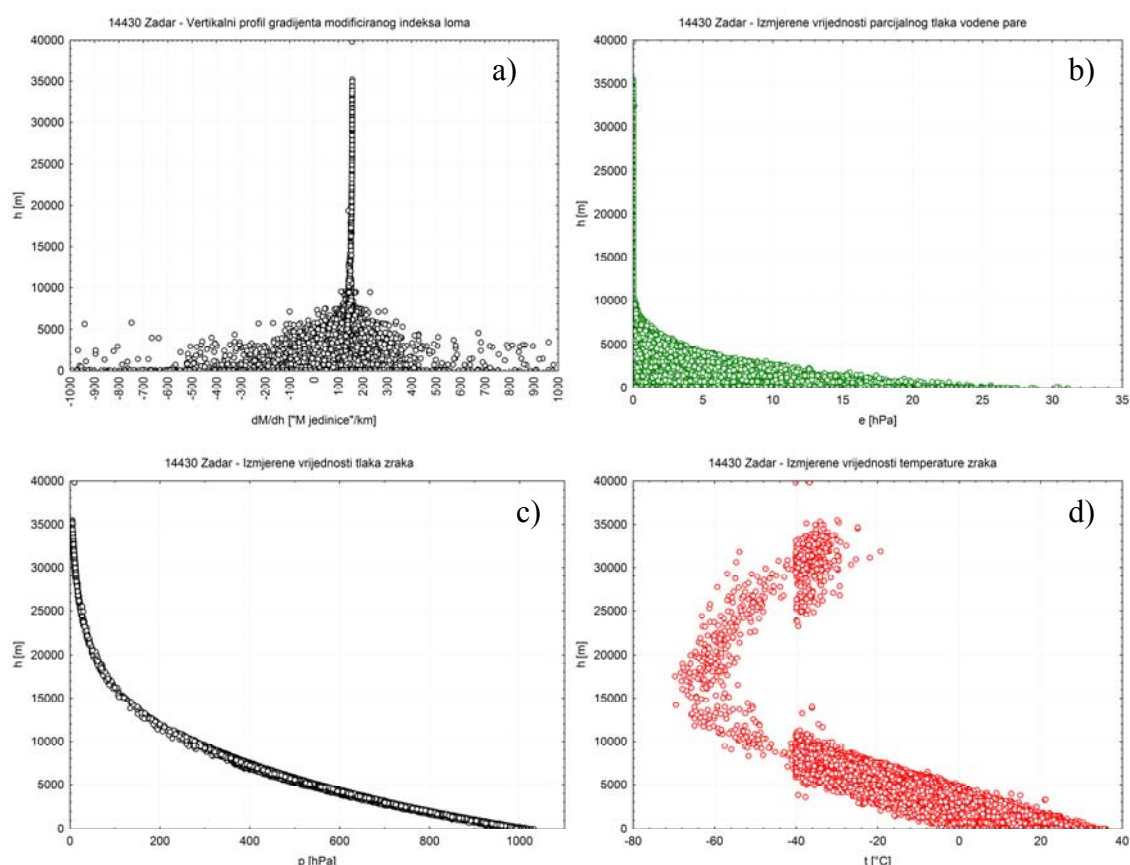
3.5 Vertikalni profil gradijenta modificiranog indeksa do visina 40 km

Vertikalni gradijent modificiranog indeksa loma $\Delta M/\Delta h$ određuje propagacijske uvjete u atmosferi i opis njegovog vertikalnog profila do visine 40 km je jedan od najvažnijih rezultata ovog rada. U poglavlju 3.1 opisali smo: eksponencijalni model profila (3.1) koji vrijedi za visine do oko 2000 m, linearni model (3.3) koji vrijedi u stratosferi i polinomni model petog stupnja (3.2) koji dobro opisuje profil modificiranog indeksa loma od površine sve do visine od oko 40 - 45 km. Granične vrijednosti gradijenta modificiranog indeksa loma $\Delta M/\Delta h$ prikazane su u tablici 3.11 za svaki tip refrakcija (Battan, 1973; Barrios i Patterson, 2002; Patterson i sur., 1994). Radi usporedbe, prikazani su i iznosi graničnih vrijednosti indeksa loma $\Delta N/\Delta h$ uz napomenu, kako on vrijedi, prema (1.24) i (1.25), samo na površini.

Na slikama 3.17 do 3.20 prikazani su gradijenti modificiranog indeksa loma za sve četiri postaje kao i izmjerene vrijednosti parcijalnog tlaka vodene pare, tlaka zraka i temperature o kojima, prema (1.19) do (1.22) te (1.23) i (1.24), ovisi iznos modificiranog indeksa loma.

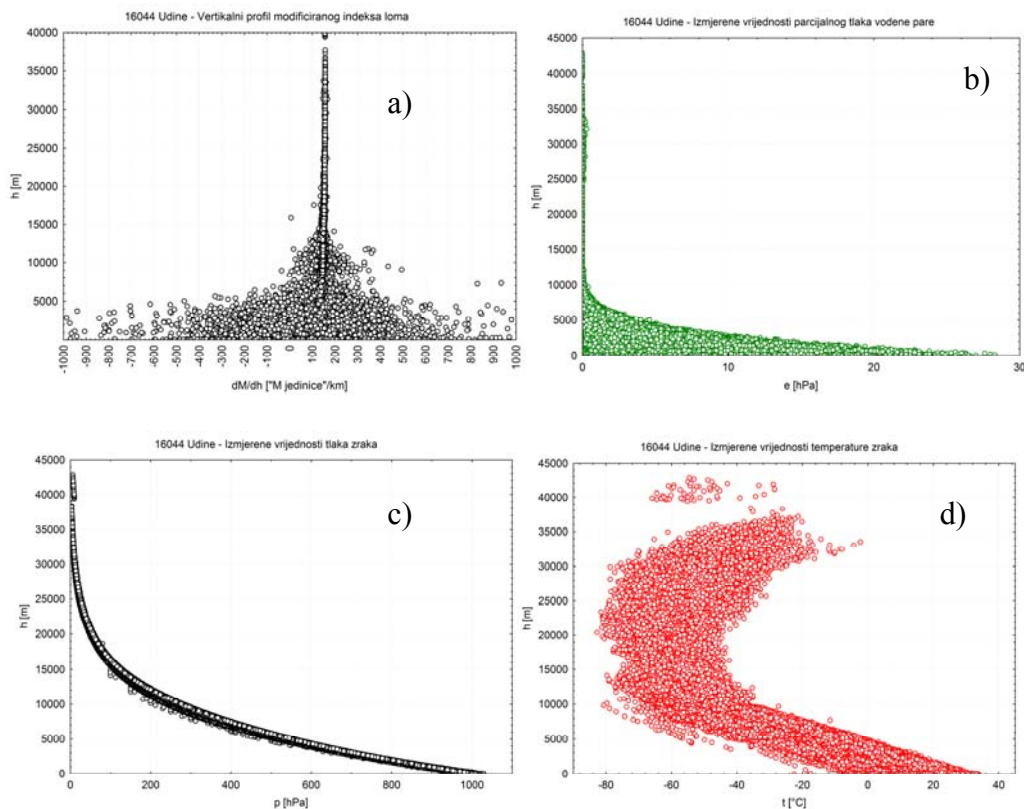
Tablica 3.11 Tipovi refrakcija i granične vrijednosti gradijenta indeksa loma $\Delta N/\Delta h$ i gradijenta modificiranog indeksa loma $\Delta M/\Delta h$ (IEEE, 1990)

Tip refrakcije	Gradijent indeksa loma $\Delta N/\Delta h$ [km^{-1}]	Gradijent modificiranog indeksa loma $\Delta M/\Delta h$ [km^{-1}]
Radio kanal	$\Delta N/\Delta h \leq -157$	$\Delta M/\Delta h < 0$
Superrefrakcija	$-157 < \Delta N/\Delta h \leq -79$	$0 < \Delta M/\Delta h \leq 78$
Normalna refrakcija	$-79 < \Delta N/\Delta h \leq 0$	$78 < \Delta M/\Delta h \leq 157$
Subrefrakcija	$\Delta N/\Delta h > 0$	$\Delta M/\Delta h > 157$

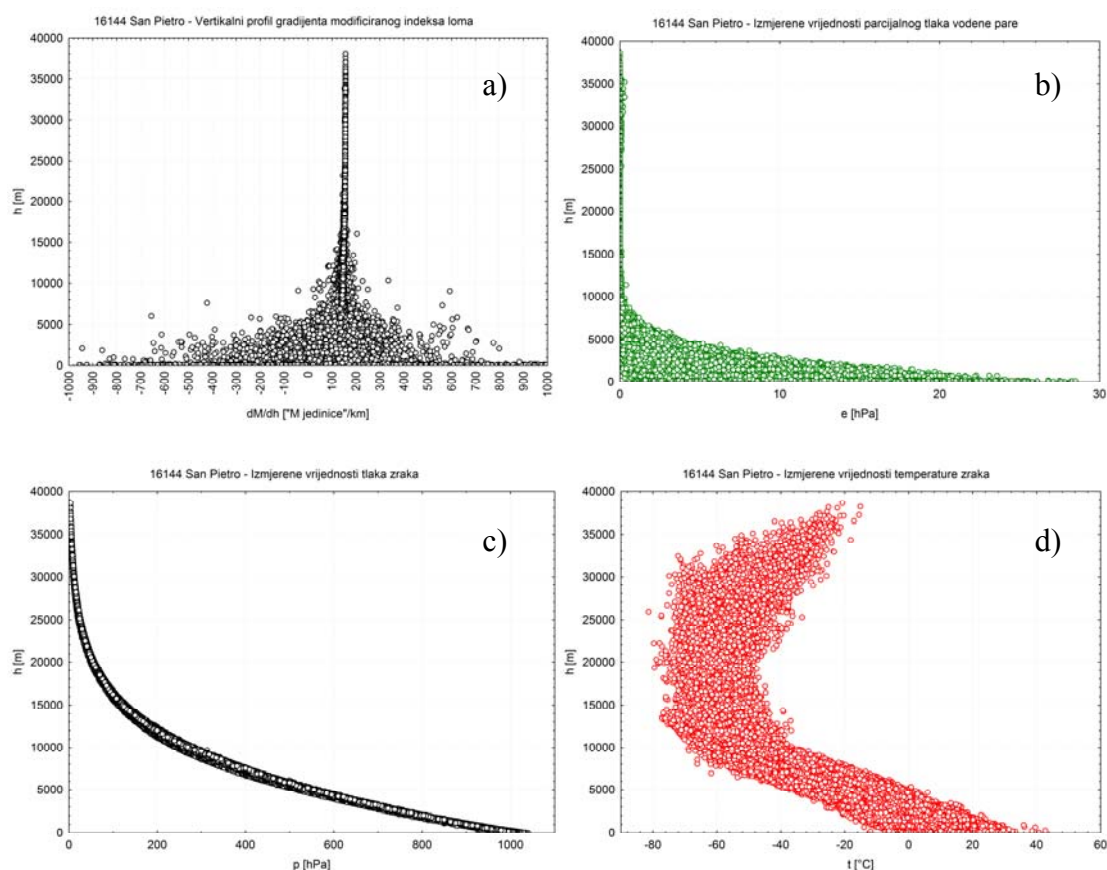


Slika 3.17 Za postaju Zadar: (a) vertikalni gradijent modificiranog indeksa loma, (b) vertikalni profil tlaka vodene pare (koji može imati iznose od 0 hPa (suhi zrak) do zasićenja ovisno o temperaturi zraka), (c) vertikalni profil tlaka zraka (pokazuje tek manja odstupanja od hidrostatičke ravnoteže), (d) vertikalni profil temperatura zraka. U velikom broju sondaža senzor za mjerenje temperature zraka bio je ograničen na mjerenje temperatura viših od -40°C što je dovelo do gubitka podataka iz gornjih slojeva troposfere i stratosfere do visina oko 25-30 km.

Vertikalni gradijent modificiranog indeksa loma, prikazan na slikama 3.17a, 3.18a, 3.19a i 3.20a, pokazuje vrlo veliku varijabilnost u donjoj polovici troposfere, nešto manju, ali još uvijek značajnu varijabilnost u gornjoj troposferi i zatim naglo smirivanje gradijenta na vrijednosti 152 km^{-1} koja se zadržava u stratosferi do visine 40 km. To je u potpunom suglasju s vertikalnom distribucijom pojava nestandardne refrakcije opisanim u poglavlju 3.3.

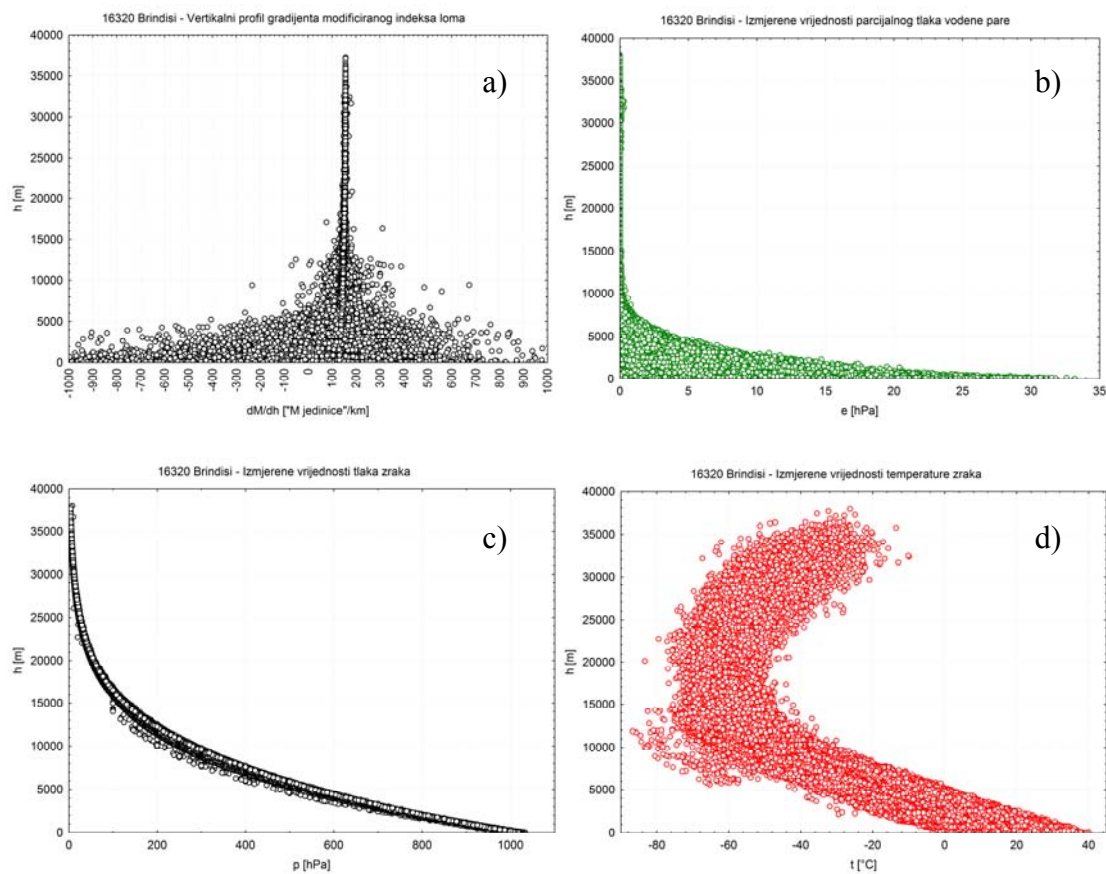


Slika 3.18 Iznosi vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma za postaju Udine a) pokazuju kako se pojave nestandardne refrakcije (Tablica 3.11) javljaju u najvećem broju u donjoj polovici troposfere. Iznosi tlaka vodene pare b) mogu biti u rasponu od suhog do zasićenog zraka. Vertikalni profil tlaka zraka c) slijedi hidrostatičku ravnotežu. Vertikalni gradijent temperature zraka na slici d) slijedi skoro linearni pad temperature s visinom od $-6.5^\circ\text{C}/\text{km}$ u troposferi. U stratosferi, unatoč velikim promjenama temperature zraka, na slici d), iznos gradijenta indeksa loma ostaje konstantno na 152 km^{-1} .



Slika 3.19 Iznosi vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma za postaju Udine a) pokazuju kako se pojave nestandardne refrakcije (Tablica 3.11) javljaju u najvećem broju u donjoj polovici troposfere. Iznosi tlaka vodene pare b) mogu biti u rasponu od suhog do zasićenog zraka. Vertikalni profil tlaka zraka c) slijedi hidrostatičku ravnotežu. Vertikalni gradijent temperature zraka na slici d) slijedi skoro linearni pad temperature s visinom od $-6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ u troposferi. U stratosferi, profil temperatura, na slici d), razlikuje se od Udina na slici 3.18, ali unatoč tome iznos gradijenta indeksa loma ostaje konstantno na 152 km^{-1} .

Vertikalni profil tlaka zraka (sl. 3.17c, 3.18c, 3.19c i 3.20c) ne pokazuje veća odstupanja od hidrostatičke ravnoteže. Velike varijacije vertikalnog profila gradijenta modificiranog indeksa loma povezane su s velikim varijabilnostima u vlažnosti zraka (sl. 3.17b, 3.18b, 3.19b i 3.20b), koji su karakteristične za donji dio troposfere. S padom parcijalnog tlaka vodene pare u zraku dolazi do naglog smanjenja broja pojava nestandardne refrakcije na visini. U stratosferi, unatoč varijabilnosti temperature koja je veća od one u troposferi (sl. 3.17d, 3.18d, 3.19d i 3.20d), vertikalni gradijent modificiranog indeksa loma stabilizira se oko vrijednosti 152 km^{-1} . To je posljedica niske temperature zraka u stratosferi, na kojoj je zrak praktično suh i na iznos indeksa loma dominantan utjecaj ima "suhi član" u izrazu (1.19).

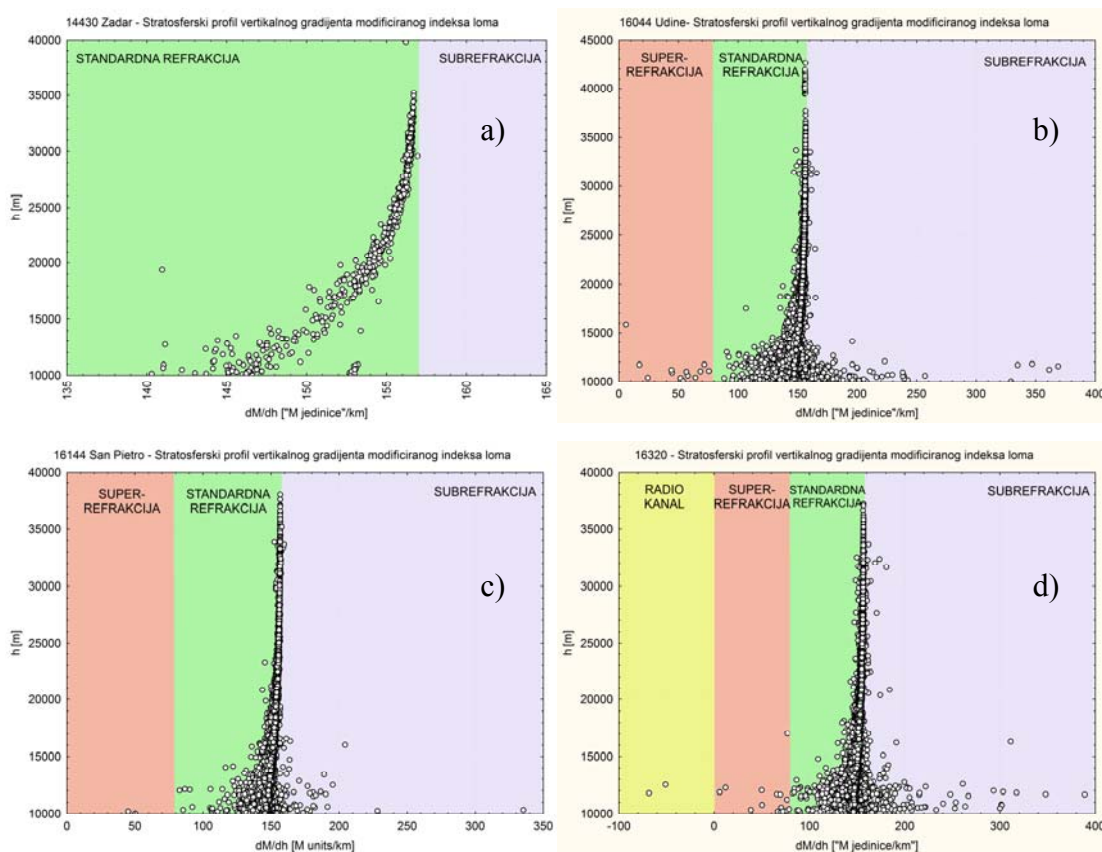


Slika 3.20 Iznosi vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma za postaju Udine a) pokazuju kako se pojave nestandardne refrakcije (Tablica 3.11) javljaju u najvećem broju u donjoj polovici troposfere. Iznosi tlaka vodene pare b) mogu biti u rasponu od suhog do zasićenog zraka. Vertikalni profil tlaka zraka c) slijedi hidrostatičku ravnotežu. Vertikalni gradijent temperature zraka na slici d) slijedi skoro linearni pad temperature s visinom od $-6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ u troposferi. U stratosferi, unatoč velikim promjenama temperature zraka, na slici d), iznos gradijenta indeksa loma ostaje konstantno na 152 km^{-1} .

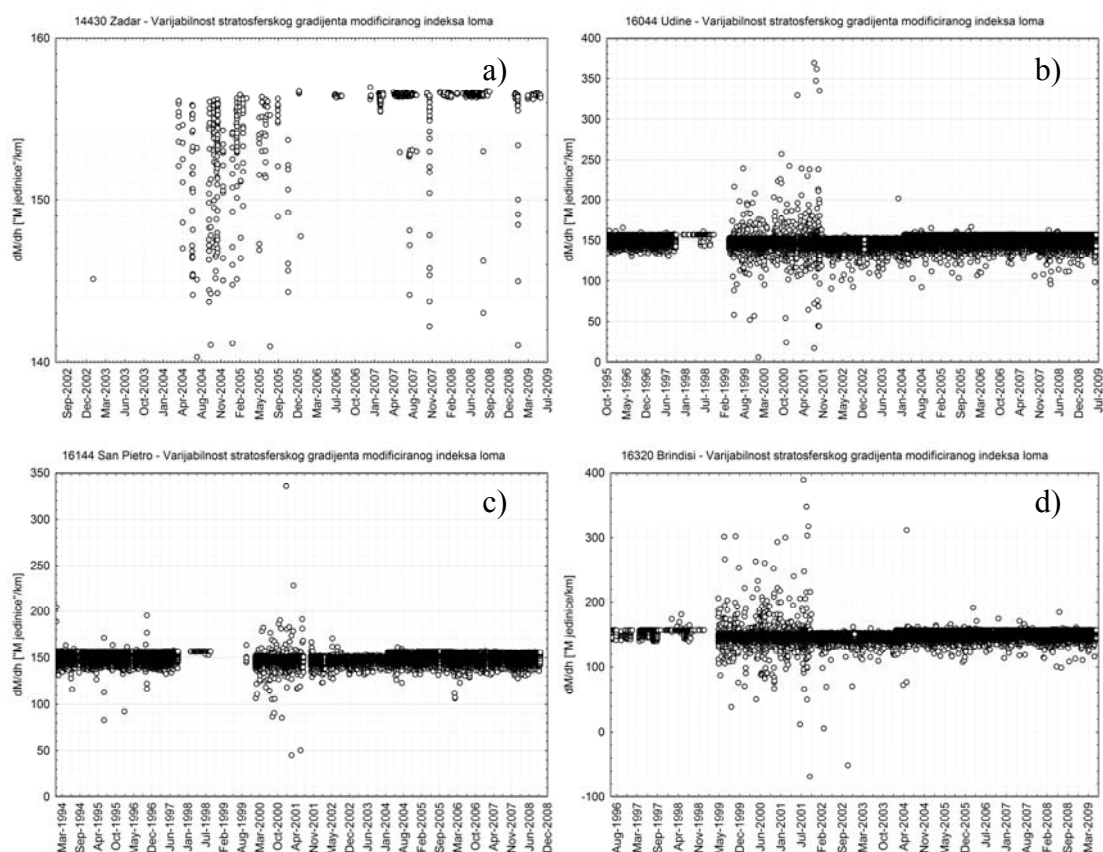
3.6 Modificirani indeks loma u stratosferi

Unatoč tome što broj sondaža ne doseže stratosferske visine, možemo doći do objektivnih zaključaka i realne slike o refrakcijskim uvjetima u stratosferi do visina 40-45 km, koliko dosežu redovita aerološka balonska sondiranja. Kvalitetnije nizove podataka o stratosferi, redovite i homogene, imaju samo postaje 16044 Udine i 16320 Brindisi i to samo u zadnjem razdoblju, od 2004. do 2009. godine (sl. 2.3 i 2.5).

Na slici 3.21 su prikazani vertikalni profili modificiranog indeksa loma u stratosferi za sve četiri jadranske postaje. Prividna eksponencijalna funkcija dM/dh zabilježena na postaju Zadar posljedica je nedostatka mnogih podataka s temperaturama nižim od -40°C do visina 25-30 km (usporediti sa sl. 3.17d) zbog kojih nisu zabilježeni visoki iznosi gradijenta modificiranog indeksa loma kao što je to slučaj s drugim postajama.



Slika 3.21 Vertikalni gradijenti modificiranog indeksa loma u stratosferi za postaje: a) Zadar, b) Udine, c) San Pietro i d) Brindisi dobiven iz izraza (1.24). Na slici su označene granica između tipova refrakcija: radio kanala, superrefrakcije, standardne refrakcije i subrefrakcije. Primjećujemo kako je u stratosferi iznos vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma 152 km^{-1} što je vrlo blizu graničnog iznosa za pojavu subrefrakcije.



Slika 3.22 Vremenski hod stratosferskog iznosa modificiranog indeksa loma za postaje a) Zadar, b) Udine, c) San Pietro i d) Brindisi ne pokazuje godišnje ni dnevne hodove. U većini slučajeva iznos modificiranog indeksa loma u stratosferi iznad Jadranskog mora iznosi 152 km^{-1} .

Unatoč činjenici kako je varijabilnost temperature u stratosferi velika (sl. 3.17d, 3.18d, 3.19d i 3.20d), vertikalni gradijent modificiranog indeksa loma ponaša se skoro stacionarno za cijelu stratosferu. Ovo zapažanje potvrđuju i vremenski hodovi modificiranog indeksa loma na slikama 3.22a do 3.22d na kojima se ne zapažaju nikakve periodične promjene. Povećana varijabilnost iznosa gradijenta dM/dh u razdoblju 1999. - 2001. godina, na talijanskim postajama, posljedica je promjene metodologije rada, što možemo vidjeti i po povećanom broju podataka koji dosežu redovito do standardne razine 100 hPa (sl. 2.3, 2.4 i 2.5). Zaključujemo da povećana varijabilnost iznosa vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma u ovom razdoblju (sl. 3.22b, 3.22c i 3.22d) nije rezultat geofizičkog procesa, već promjene metodologije rada aerološke postaje (usporediti sa slikama 2.3, 2.4 i 2.5).

Zaključak

Unatoč skoro stogodišnjem proučavanju pojava propagacije radio valova u atmosferi, refrakcijski uvjeti nad Jadranom, koliko je nama poznato, do sada nisu detaljnije proučavani. Zbog velike prometne i sigurnosne važnosti Jadrana poznavanje refrakcijskih uvjeta ima praktični značaj jer o propagaciji radio valova ovisi rad elektroničkih sustava; radio komunikacija, radara, radio navigacijskih uređaja kao i sustava za elektroničko izviđanje i elektroničku borbu. Pored prometnih i sigurnosnih aplikacija, poznavanje refrakcijskih uvjeta važno je i za projektiranje radio i TV difuznih mreža.

U ovom radu ukupno je izračunato i obrađeno 1 375 779 podataka o indeksu loma na temelju mjerenja 43 019 aeroloških sondaža odaslanih sa četiri postaje na obali Jadrana, do visina 40 km, u vremenskim nizovima duljina od 7 do 15 godina. Na temelju ovog velikog i višegodišnjeg niza možemo zaključiti kako su pojave nestandardne refrakcije nad Jadranskim morem česte. Na površini se javljaju u više od 50% slučajeva, a u čak 90% sondaža zabilježen je jedan ili više slojeva u kojima se pojavila nestandardna refrakcija.

Rezultati su pokazali kako se za područje Jadrana može koristiti jednostavan eksponencijalni model vertikalnog profila modificiranog indeksa loma sve do visine oko 2000 m. Pokazalo se da za stratosferu vrijedi još jednostavniji, linearni model vertikalnog profila modificiranog indeksa loma koji upućuje na konstantni iznos vertikalnog gradijenta od 152 km^{-1} , što je također izvorni rezultat. Predložen je i novi, polinomni model petog stupnja koji se može primijeniti od površine do visina 40 km. Na taj način ovaj rad predstavlja dopunu preporuci ITU-R P.453-9 (ITU, 2003). Promjena refrakcijskih uvjeta u troposferi navodi na promjenu pojma "standardna refrakcija" u pojam "standardna troposferska refrakcija".

Statistička razdioba iznosa površinskog indeksa loma je zvonolikog oblika, ali značajno odstupa od normalne razdiobe. Umjesto složenog i nepraktičnog izraza za statističku distribuciju površinskog indeksa loma navedenog u Preporuci ITU-R P.453-9 predlaže se izračunavanje koeficijenata spljoštenosti i asimetrije te se preporuča navođenje medijanske vrijednosti površinskog indeksa loma kao reprezentativne vrijednosti površinskog indeksa loma za konkretnu lokaciju.

Promatrano po tipovima nestandardnih refrakcija radio kanali se javljaju najrjeđe, ali je njihov utjecaj na propagaciju radio valova najveći pa su kao pojava posebno zanimljivi. Radio kanali se u najvećem broju slučajeva javljaju neposredno iznad površine, a na visini se u značajnijem broju javljaju u donjoj trećini troposfere. Kanali se često javljaju u uvjetima temperaturnih inverzija pri tlu, jer je vlažnost zraka u inverznom sloju uglavnom relativno visoka, a povećanju iznosa indeksa loma s visinom doprinosi i naglo povećanje temperature zraka na gornjoj granici inverznog sloja. Subrefrakcije su pojave nestandardne refrakcije koje se češće od drugih anomalnih pojava javljaju na visini. Povoljni uvjeti za pojavu subrefrakcija su u suhom i hladnom zraku što je čest slučaj u visini. Supsidencija hladnog i suhog zraka u anticiklonama također je preduvjet za pojavu subrefrakcija, a jakom utjecaju subtropskih anticiklona može se pripisati i velik broj visinskih subrefrakcija zabilježen nad južnim dijelom Jadrana. Superrefrakcije predstavljaju najčešći tip nestandardne refrakcije i javljaju se često u donjoj polovici troposfere. Pogoduju im isti preduvjeti kao i kanalima s tim što varijabilnosti temperature i vlažnosti ne moraju biti ekstremno velike.

Svi tipovi nestandardnih refrakcija pokazuju izraženi godišnji hod broja pojava i promjene vertikalne distribucije čestine pojava. To je povezano s godišnjim hodovima temperatura i vlažnosti zabilježenim na jadranskim postajama. Povećanje broja anomalnih pojava počinje u ožujku i travnju s povećanjem temperature zraka, a najviše ih se javlja u razdoblju srpnja i kolovoza, kad je relativna vlažnost zraka nad Jadranom najmanja pa dominantan utjecaj počinju dobivati nagle promjene temperature zraka.

Vertikalni profil modificiranog indeksa loma pruža krivu sliku o pravilnosti i predvidivosti refrakcijskih uvjeta u donjim slojevima atmosfere. Umjesto njega, pozornost treba obratiti na vertikalni profil gradijenta modificiranog indeksa loma koji predstavlja najvažniju fizikalnu veličinu koja uvjetuje način propagacije elektromagnetskih valova u atmosferi. Na vertikalni profil gradijenta modificiranog indeksa loma dominantan utjecaj ima vlažnost zraka čiji vertikalni profili pokazuju veliku varijabilnost u rasponu od suhog do zasićenog, odnosno oblačnog, zraka. Udio vodene pare naglo pada u gornjoj polovici troposfere čime i slabi utjecaj vlažnosti na iznos indeksa loma. Suhi zrak u stratosferi ima visok iznos modificiranog indeksa loma, a raspoloživi podaci o stratosferi pokazuju kako je iznos od 152 km^{-1} stalan za stratosferu do visine 40 km i ne pokazuje godišnji hod.

Obrada velikog broja aeroloških sondaža omogućila je po prvi put detaljan opis čestina i vertikalnih razdioba sva tri tipa nestandardnih refrakcija kao i njihovih godišnjih hodova nad Jadranom. Ipak, moramo biti svjesni i ograničenja metodologije korištenja aeroloških sondaža. Aerološki baloni relativno brzo prolete kroz donju troposferu i ne mogu pružiti detaljnu sliku o pojavama u atmosferskom graničnom sloju (Parlange i Brutsaert, 1990), a u tom sloju se javlja velik broj pojava nestandardne refrakcije. Aerološke sondaže, zbog relativno dugog vremena između mjerenja, ne pružaju kvalitetnu informaciju o perzistenciji pojava nestandardne refrakcije. Možemo pretpostaviti da je broj pojava nestandardne refrakcije još i veći jer nismo u mogućnosti zabilježiti kratkoperiodične pojave koje se mogu pojaviti u razdoblju između sondiranja.

Za detaljniji opis pojava anomalnih refrakcija koji bi uključio i njihovu prostornu razdiobu nad Jadranom bit će nužno adaptirati numeričke mezoskalne modele koji mogu dobro opisati tokove topline i vlažnosti u donjim dijelovima troposfere, posebice u graničnom sloju. Prema rezultatima ovog rada, mogu se izabrati optimalne sheme s optimalnom vertikalnom rezolucijom u skladu s vertikalnom razdiobom čestina anomalnih pojava. Osim boljeg uvida u razvoj i prostornu raširenost pojave, numerički modeli omogućit će i prognozu pojava anomalnih refrakcija što ima praktičan značaj za sve spomenute radio sustave. Krajnji cilj bio bi uspostaviti operativni model praćenja i predviđanja pojava nestandardne refrakcije radio valova koji bi se redovito distribuirao korisnicima i po mogućnosti bi se mogao postupno proširiti na susjedne regije.

Literatura

1. Alberoni, P. P., V. Ducrocq, G. Gregoric, G. Haase, I. Holleman, M. Lindskog, B. Macpherson, M. Nuret, and A. Rossa (2003): *Quality and assimilation of radar data for NWP*, COST 717 Document, 38 str.
2. Altshuler, E.E., P.M. Kalaghan (1974): *Tropospheric range error corrections for the NAVSTAR system*, Interim scientific report Air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford, Massachusetts, AFCRL-TR-74-0198, 13 str.
3. Altschuler, E.E., K. Mano (1982): *Tropospheric refraction corrections using exoatmospheric sources*, Rome Air Development Center, Air Force Systems Command, Griffiss AFB, New York, RADC-TR-82-7, 18 str.
4. Angus-Leppan, P.V., 1960: A study of refraction in the lower atmosphere, *Department of Surveying, University of Natal, South Africa*, 122, 166-177.
5. Askne, J.I.H., E.R. Westwater (1986): A review of ground-based remote sensing of temperature and moisture by passive microwave radiometers, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **3**, 340-352.
6. Atkinson, B.W., M. Zhu (2006): Coastal effects on radar propagation in atmospheric ducting conditions, *Meteorological Applications*, **13**, 53-62.
7. Baby, H.B., P. Golé, J. Lavergnat (1988): A model for the tropospheric excess path length of radio waves from surface meteorological measurements, *Radio Science*, **23**, 1023-1038.
8. Bajić, M. (1986): *Radarske antene*, Centar vojnotehničkih škola KoV JNA "General armije Ivan Gošnjak", Zagreb, 254 str.
9. Bajić, M., M. Viher (1993): Jednostavni statistički model potencijalne vidljivosti i GIS za radare, *Bilten Savjeta za daljinska istraživanja i fotointerpretaciju HAZU*, **12**, 19-36.
10. Barrios, A.E., W.L. Patterson (2002): *Advanced propagation model v.1.3.1 computer software configuration item (CSCI) documents*, SPAWAR Systems Center, San Diego, Technical Document **3145**, 475 str.
11. Barrios, A.E. (1994): A terrain parabolic equation model for propagation in the troposphere, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **42**, 90-98.
12. Battan, L.J. (1973): *Radar observation of the atmosphere*, University of Chicago Press, Chicago, 324 str.
13. Baumgartner, G.B., H.V. Hitney, R.A. Pappert (1983): Duct propagation modelling for the integrated-refractive-effects prediction programs (IREPS), *IEEE Proceedings*, **130**, 630-642.
14. Baumgartner, G.B. (1983): *A waveguide program for trilinear tropospheric ducts*, Tech. Doc. **610**, Naval Ocean Systems Center, 16 str.
15. Bech, J., J. Toda, B. Codina, J. Lorente, D. Bebbington (2004): Using mesoscale NWP model data to identify radar anomalous propagation events, *Proceedings of ERAD*, 310-314.
16. Bech, J., Codina B., Lorente J. (2003a): A quality control for weather radar data using NWP mesoscale output, *EU COST 717 Working Document, WG2*, 7 str.
17. Bech, J., Codina B., Lorente J., Bebbington D. (2003b): The sensitivity of single polarization weather radar beam blockage correction to variability in the vertical refractivity gradient, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technologies*, **20**, 845-855.
18. Bech, J., Codina B., Lorente J. (2003c): Forecasting weather radar propagation conditions using NWP mesoscale model data, *25th EWGLAM – 10th SRNWP Meeting, October 2003, Lisbon*, 5 str.

19. Bech, J., B. Codina, J. Lorente, D. Bebbington (2002a): Monthly and daily variations of radar anomalous propagation conditions: How "normal" is normal propagation?, *Proceedings of ERAD, Copernicus GmbH*, 310-314.
20. Bech, J., B. Codina, J. Lorente, D. Bebbington (2002b): Seasonal variations of radar anomalous propagation conditions in a coastal area, *URSI Commission-F Open Symposium on Radiowave Propagation and Remote Sensing*, Institut für Hochfrequenztechnik; Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, 3 str.
21. Bech, J., B. Codina, J. Lorente, D. Bebbington (2002c): On the effect of anomalous propagation on weather radar beam blockage corrections, *EU COST 717 Working Document, WG2*, 9 str.
22. Bech, J., A. Sairouni, B. Codina, J. Lorente, D. Bebbington (2000): Weather radar anaprop conditions at a Mediterranean coastal site. *Phys. Chem. of the Earth (B)*, **25**, str. 829-832.
23. Bech, J., D. Bebbington, B. Codina, A. Sairouni, J. Lorente (1998): Evaluation of atmospheric anomalous propagation conditions: an application for weather radars, *EUROPTO Conference on Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology, Barcelona, Spain*, SPIE 3499, 5 str.
24. Beutler, G.I., I. Bauersima, W. Gurtner, M. Rothacher, T. Schildknecht, A. Geiger, 1987: Atmospheric refraction and other important biases in GPS carrier phase observations, *University of Berne, Berne, Switzerland*, **22**, 26 str.
25. Bevis, M.S., S. Businger, T.A. Herring, C. Rocken, R.A. Anthes, R.H. Ware (1992): GPS meteorology, Remote sensing of atmospheric water vapour using the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, **97**, 787-801.
26. Black, H.D., A. Eisner (1984): Correcting satellite Doppler data for tropospheric effects, *Journal of Geophysical Research*, **20**, 2626-2638.
27. Brooks, I.M. (2001): Air-sea interaction and spatial variability at the surface ecaporation duct in a coastal environment, *Geophysical Research Letter*, **28**, 2009-2012.
28. Brown, A, F. van Diggelen (1994): Boundary layer tropospheric effects on airborne on-the-fly ambiguity resolution, KIS94, *Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Alberta, Canada*, 99-108.
29. Brunner, F.K. (1992): *Wave propagation in refractive media: A progress report*, Report of International Association of Geodesy Special Study Group 4, 12 str.
30. Brunner, F.K., W.M. Welsch (1993): Effect of the troposphere on GPS measurements, *GPS World*, **4**, 42-51.
31. Brunner, F.K., P. Tregoning (1994): Tropospheric propagation effects in GPS height results using meteorological observations, *Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying*, **60**, 49-65.
32. Brücher, W., Sperling, T., Steffany F., M.J. Kerschgens (1999): *Wind-Transport und Klimatologie-Programmsystem, Dokumentation und Benutzeranleitung version 2.5*, Institut Für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, 233 str.
33. Brücher, W (1997): *Numerische Studien zum Mehrfachnesting mit einem nicht-hydrostatischen Modell*, Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, 115 str.
34. Burk, S.D., T. Haack, L.T. Rogers, L.J. Wagner (2003): Island wake dynamics and wake influence on the evaporation duct and radar propagation, *Journal of Applied Meteorology*, **42**, 349-367.
35. Burk, S.D. T. Haack (2003a): Refractivity in the coastal atmospheric boundary layer, *Fifth Conference of Coastal Atmospheric & Oceanic, Seattle, WA*, 147-150.

36. Burk, S.D. T. Haack (2003b): Refractivity in the coastal atmospheric boundary layer, *BACIMO, Monterey, CA*, <http://www.nrlmry.navy.mil/refract/refract.htm>
37. Burk, S. D., T. Haack (2004): A mesoscale modeling study of Wallops 2000 EM refractivity conditions, *Proceedings, National Radio Science Meeting, 20-25 June*, Monterey, CA, 260-272
38. Burk, S, T. Haack, R. Marshall, E. Burgess, R. Rottier, K. Davidson, P. Fredrickson (2005): Coastal EM refractivity conditions: an observational and mesoscale modeling study, *Naval Research Laboratory Review*, 6 str.
39. Burk, S.D., T. Haack (2005): Coastal atmospheric boundary layer impacts on refractivity and EM propagation, 6th Coastal Conf., San Diego, 11 str.
40. Burrows, C. R., S. S. Attwood (1949): *Radio wave propagation*, Academic Press, Inc., New York, 34 str.
41. Cole, A.E., A.J. Kantor (1978): *Air Force reference atmospheres*, Air Force Geophysics Laboratory, Meteorology Division, Hanscom AFB, Massachusetts, 28 February, AFGL-TR-78-0051, AFGL-AFSG-382, 78 str.
42. Collier, C.G. (1996): *Applications of weather radar systems*, John Wiley&Sons, 390 str.
43. Craig, K.H., M.F. Levy (1991): Parabolic equation modelling of the effects of multipath and ducting on radar systems, *IEEE Proceedings F*, **138**, 153-162.
44. Craig, K.H. (1988): Propagation modelling in the troposphere: Parabolic equation model, *IEEE Electronic Letters*, **24**, 1136-1139.
45. David, P., J. Voge (1969): *Propagation of waves*, Pergamon Press, New York, 320 str.
46. Davis, J.L., G. Elgered, A.E. Niell, C.E. Kuehn (1993): Ground-based measurements of gradients in the "wet" radio refractivity of air, *Radio Science, November-December*, **28**, 1003-1018.
47. Dockery, G.D. (1988): Modeling electromagnetic wave propagation in the troposphere using parabolic equation, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, **36**, 1464-1470.
48. Elgered G., H.-P. Plag, H. van der Marel, S. Barlag, J. Nash (2004): *COST Action 716: Exploitation of ground-based GPS for climate and numerical weather prediction applications, Final Report*, 252 str.
49. Elgered, G. (1993): *Tropospheric radio-path delay from ground-based microwave radiometry*, pretisak iz 5. poglavlja knjige *Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry*, urednik M.A. Janssen, John Wiley & Sons Inc., 215-258.
50. Elgered, G. (1992a): Correction of the electrical path delay by microwave radiometry, *Proceedings of the Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Applications, Boulder, Colorado*, 311-316.
51. Elgered, G. (1992b): Refraction in the troposphere, *Proceedings of Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy*, **36**, 13-19.
52. Elgered, G.K., G. Lundqvist (1984a): A three-year study of wave propagation delays due to tropospheric water vapour, *IEEE Transactios on Antennas and Propagation*, **4**, 390-395.
53. Elgered, G.K., G. Lundqvist (1984b): *Calibration of the Excess Propagation Path for Radio Waves in the Neutral Atmosphere*, Onsala Space Observatory Technical Memorandum 1984.07.06, Onsala, Sweden, 36 str.
54. Emery, W.J., G.H. Born, D.G. Baldwin, C.L. Norris (1990): Satellite-derived water vapour corrections for Geosat altimetry, *Journal of Geophysical Research*, **95**, 2953-2964.

55. England, M.N., F.J. Schmidlin, J.M. Johansson (1993): Atmospheric moisture measurements: a microwave radiometer – radiosonde comparison, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **31**, 389-398.
56. Flock, W.L. (1987): *Propagation effects on satellite systems at frequencies below 10 GHz, second edition, a handbook of satellite systems design*, NASA Scientific and Technical Systems Division, NASA Reference Publication 1102(02), 497 str.
57. Frühwald, D. (2000): Using radar observations for parametrizations and validation of atmospheric models strategy of COST 717 WG2, *Physics and Chemistry of the Earth*, **25**, 1251-1253.
58. Gallini, T.E. (1994): *A survey of tropospheric refraction models*, Contract report for Space and Missile Systems Center, Air Force Materiel Command, Los Angeles, California, Aerospace Report TOR-94(4488)-11, 32 str.
59. Gerstoft, P., D.F. Gingras, L.T. Rogers, W.S. Hodgkiss (2000): Estimation of radio refractivity structure using matched-field array processing, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **48**, 345-355.
60. Goldhirsh, G., D. Dockery, J.H. Meyer (1994): 3 years of C-band signal measurements for overwater line-of-sight links in the mid-Atlantic coast Meteorological aspects of sustained deep fades, *Radio Science*, **29**, 1433-1447.
61. Haack, T., S.D. Burk (2001): Summertime marine refractivity conditions along coastal California, *Journal of Applied Meteorology*, **40**, 673-687.
62. Haack, T., S.D. Burk (2003): Seasonal variability of refractivity conditions along the U.S. West Coast: A comparison of monthly averaged ducting properties, *BACIMO, Monterey, CA*, <http://www.nrlmry.navy.mil/refract/refract.htm>
63. Haack, T., S. D. Burk (2004): Coastal and seasonal variability of marine layer electromagnetic trapping conditions, *Proceedings, National Radio Science Meeting, 20-25 June, Monterey, CA*, 26-31.
64. Haack, T., S. D. Burk, (2005a): Ducting and electromagnetic propagation around the Korean Peninsula, *Proceedings, BACIMO 2005, 12-14 October, Monterey, CA*, 6-11.
65. Haack, T., S. D. Burk (2005b): Synoptic, mesoscale, and diurnal impacts on EM trapping conditions, *Proceedings, National Radio Science Meeting, 5-8 January, Boulder, CO*, 25-36.
66. Hall, M.P.M., L.W. Barclay (urednici) (1989): *Radiowave propagation*, Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 277 str.
67. Hill, R.J., R.S. Lawrence, J.T. Priestley (1982): Theoretical and calculational aspects of the radio refractive index of water vapour, *Radio Science*, **17**, 1251-1257.
68. Hanyok, R.J. (2001): Skunks, bogies, silent hounds and the flying fish: the Gulf of Tonkin mystery 2-4 August 1964, *Cryptologic Quarterly, Winter 2000/spring 2001 Edition*, **19**, 56 str.
69. Hitney, H.V. (1992): Hybrid ray optics and parabolic equation methods for radar propagation modelling, *IEEE International Conference 365, "Radar 92"*, 58-61.
70. Hitney, H.V., J.H. Richter, R.A. Pappert, K.D. Anderson, G.B. Baumgartner (1985): Tropospheric Radio Propagation Assessment, *Proceedings of the IEEE*, **73**, 265-283.
71. Ifadis, I. (1986): *The atmospheric delay of radio waves: Modelling the elevation dependence on a global scale*, School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, November, Technical Report 38L, 115 str.
72. International Radio Consultative Committee, IRCC (1986): *Recommendations and reports of the CCIR*, 1986, XVIth plenary assembly, Dubrovnik, 19. str.
73. International Telecommunications Union (ITU) (2003): *Recommendation ITU-R P.453-9 the radio refractive index; its formula and refractivity data*, ITU, 27 str.

74. Ippolito L.J. (1989): *Propagation Effects Handbook for Satellite Systems Design, A Summary of Propagation Impairments on 10 - 100 GHz Satellite Links With Techniques for System Design*, NASA Scientific and Technical Program, NASA Reference Publication 1082(04), 516 str.
75. Ippolito L.J. (1999): *Propagation effects handbook for satellite systems design, fifth edition*, Stanford Telecom ACS / NASA Jet Propulsion Laboratory, 210 str.
76. International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (1963): Resolutions, 13th General Assembly, 19-31 August 1963, Berkeley, California, USA. *Bulletin Géodésique*, **70**, 390 str.
77. Iribarne, J.V., W.L. Godson (1973): *Atmospheric thermodynamics*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, Vol. 6 of Geophysics and Astrophysics Monographs, 220 str.
78. Ishiguro, M., T. Kanzawa, T. Kasuga (1990): Monitoring of atmospheric phase fluctuations using geostationary satellite signals, *Proceedings of the Symposium on Radio Astronomical Seeing*, Eds. Baldwin and Wang, International Academic Publishers, Oxford, England, str. 60-63.
79. Johnson, C., D. Harrison, B. Golding (1999): *Use of atmospheric profile information in the identification of anaprop in weather radar images. Observation Based Products Technical Report No. 17*, Forecasting Systems, UK Meteorological Office, 30 str.
80. de Jong, C. (1991): *GPS – Satellite orbits and atmospheric effects*, Delft University of Technology, Mathematical and Physical Geodesy, Delft, Netherlands, February, Reports of the Faculty of Geodetic Engineering 91.1, 112 str.
81. Kaniuth, K., H. Tremel (1992): Analysis of spatial and temporal correlations of meteorological parameters associated with tropospheric delay modelling, *Proceedings of Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals*, Eds. J.C. de Munck, T.A. Spoelstra, Hague, Netherlands, 19-22 May, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, **36**, 21-24.
82. Kantor, A.J., P. Tattelman (1984): *Profiles of temperature and density based on 1 and 10-percent extremes in the stratosphere and troposphere*, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Massachusetts, 27 December, AFGL-TR-84-0336, AFSG 447, 64 str.
83. Koch, S. E., W. C. Skillman, P. J. Kocin, P. J. Wetzel, K. F. Brill, D. A. Keyser, M. C. McCumber (1985): Synoptic scale forecast skill and systematic errors in the MASS 2.0 model, *Monthly Weather Review*, **113**, str. 1714-1737.
84. Kopp C. (2004): *TROPPO – A tropospheric propagation simulator*, Technical Report 2004/161, Monash University, Australia, 21 str.
85. Krajewski, W.F., B. Vignal (2001): Evaluation of anomalous propagation echo detection in WSR-88D data a large sample case study, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technologies*, **18**, 807-814.
86. Lane, J.A. (1961): The radio refractive index gradient over the British Isles, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **21**, 157-166.
87. Langley, R.B. (1992): The effect of the ionosphere and troposphere on satellite positioning systems, *Proceedings of Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals*, Eds. J.C. de Munck, T.A. Th. Spoelstra, Hague, Netherlands, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, Delft, **36**, New Series, 97 str.
88. Lear, M.W. (1980): *Computing atmospheric scale height for refraction corrections*, NASA Mission Planning and Analysis Division, Lyndon B. Johnson Space Center, 25 str.

89. Leiterer, U., H. Dier, D. Nagel, T. Naebert (2002): *Method for correction of RS80 A-humicap humidity profiles*, German Weather Service, Meteorological Observatory Lindenberg, Am Observatorium 12, 11 str.
90. Levy, M.F. (1990a): Horizontal parabolic equation solution of radiowave propagation problems on large domains, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **43**, 137-144.
91. Levy, M.F. (1990b): Parabolic equation modelling of propagation over irregular terrain, *IEEE Electronic Letters*, **26**, 1153-1155.
92. Liebe, H.J. (1992): Atmospheric spectral properties between 10 and 350 GHz: New laboratory measurements and models, *Proceedings of the Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Applications, Boulder, Colorado*, 189-196.
93. Moszkowicz, S., G.J. Ciach, W.F. Krajewski (1994): Statistical detection of anomalous propagation in radar reflectivity patterns, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technologies*, **11**, 1026-1034.
94. Nesbitt, S. (2004): *Preliminary report on siting S-Pol for NAME, results from beam blockage simulations*, Radar Meteorology Group, Colorado State University, http://radarmet.atmos.colostate.edu/name/NAME_S-pol_prelim_siting_report.pdf, 14 str.
95. Newby, S. (1989): *The spatial correction of meteorological measurements in tropospheric delay modelling*, SE 6910 graduate seminar, University of New Brunswick, 15 str.
96. Newby, S. (1992): *The refraction of electromagnetic signal in the atmosphere*, Department of Surveying Engineering, University of Brunswick, July, 10 str.
97. North, G.R. (1990): Satellite measurements of moisture variables and global change, *Modern Radio Science*, Oxford University Press, Oxford, England, 103-112.
98. Pan, W.Y., H.M. Shen (1994): The influence of random variations in the tropospheric refractive index on the focusing of an intense microwave beam from a phased array, *Radio Science*, **29**, 1231-1236.
99. Parlange, M.B., W. Brutsaert (1990): Are radiosonde time scales appropriate to characterize boundary layer wind profiles?, *Journal of Applied Meteorology*, March 1990, 249-255.
100. Patterson, W.L., C.P. Hattan, G.E. Lindem, R.A. Paulus, H.V. Hitney, K.D. Anderson, A.E. Barrios (1994): *Engineer's Refractive Effects Prediction System (EREPS)*, Naval Command Control and Ocean Surveillance Center, San Diego CA, 130 str.
101. Penzar, B., Penzar, I., Orlić, M. (2001): *Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana*, Nakladna kuća "Dr. Feletar", Zagreb, 258 str.
102. Peebles, P.Z. (1998): *Radar Principles*, John Wiley & Sons Inc., New York, 766 str.
103. Pittman, T.S. (1999): *Historical electromagnetic propagation condition database description*, Technical Document 1149, US Air Force Institute of Technology, 184 str.
104. Radinović, Đ. (1969): *Analiza vremena*, Zavod za izdavanje udžbenika SR Srbije, Beograd, 367 str.
105. Ramo, S., J. R. Whinnery, T. Van Duzer (1984): *Fields and waves in communication electronics, 2. izdanje*, John Wiley & Sons, New York, 340 str.
106. Rossa A., Dalezios N., P. Burlando, C. Simmer, I. Zawadzky (2004): *Use of radar observations in hydrological and NWP models*, COST 717 Final Report, 42 str.
107. Rotherham, S. (1989): *Clear air aspects of the troposphere and their effects on propagation mechanisms from VHF to millimetre waves, Chapter 9 in Radiowave Propagation*, Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 150-172.

108. Rüeger, J. M. (2002): *Refractive index formula for electronic distance Measurement with Radio and Millimetre Waves*, Unisurv Report S-68, School of surveying and spatial information systems, University of New South Wales, UNSW SYDNEY NSW 2052, Australia, 1-52.
109. Saha, K. (2008): *The Earth's atmosphere its physics and dynamics*, Springer-Verlag, Berlin, 367 str.
110. Salapura, V. (1990): *Analiza dijagrama pokrića radara na temelju digitalnog modela reljefa*, interni NIR zadatak; Sistematizacija i procesiranje produkata elektronskog osmatranja, Centar vojnotehničkih škola KoV "General armije I. Gošnjak", Katedra radarsko-računarske tehnike, Zagreb, 41 str.
111. Skolnik, M. (1980): *Introduction to radar systems*, McGraw-Hill, New York, 581 str.
112. Skolnik, M. I. (urednik) (1990): *Radar handbook*, 2. izdanje, McGraw-Hill Publishing Co., New York, 788 str.
113. Smith, P.L.Jr. (1998): On the maximum useful elevation angle for weather surveillance radar scans, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **15**, 841-843.
114. Smith, E.K., S. Weintraub (1953): The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies, *Proceedings of IRE*, **4**, 1035-1037.
115. Spoelstra, T.A.T. (1986): *Correcting refraction in radio astronomy*, Netherlands Foundation for Radio Astronomy, Dwingeloo, 43 str.
116. Stacey, D. (2008): *Aeronautical radio communication systems and networks*, Willey & Sons, 350 str.
117. Telišman Prtenjak, M., M. Viher, J. Jurković (2010): Sea/land breeze development during a summer bora event along the north-eastern Adriatic coast, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **136**, 1554-1571
118. Thayer, G.D. (1974): An improved equation for the radio refractive index of air, *Radio Science*, **9**, 803-807.
119. Thompson, W. T., S. D. Burk, M. C. Jablecki, L. T. Rogers (2005): *Evaluation of a new approach to microwave refractivity analysis*, Proceedings, BACIMO 2005, 12-14 October, Monterey, CA, 6 str.
120. Viher, M. (1995): A practical method of modified refraction index computing for the microwave radiation using atmospheric probing measurements, *Bulletin of the Croatian Meteorological Society*, **30**, 63-70.
121. Viher M. (2006): A Study of the Modified Refraction Indices over Alpine and Sub-Alpine Region, *Meteorologische Zeitschrift*, **15**, 625-630.
122. Viher M. (2007): Pojave nestandardne refrakcije radiovalova u višegodišnjem nizu sondaža aerološke postaje Zagreb-Maksimir, *Hrvatski meteorološki časopis*, **41**, 35-44.
123. Wang C., P.A. Clark, T. Haack, S. Millington (2009): *Mesoscale modelling for radar propagation prediction during the Wallops-2000 experiment*, Naval Research Laboratory report 18 B.2, 14 str.
124. Westwater, E.R. (1993): *Ground based sensing of meteorological variables, Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry*, Wiley & Sons, 145-213.
125. Wilks, D.S. (1995): *Statistical methods in the atmospheric sciences: An introduction*, Academic Press Inc., 467 str.

Prilog A: Godišnji hodovi pojava nestandardne refrakcije

Tablica A.1a: 14430 Zadar – Pojave radio kanala po mjesecima												
Visina ⁶ u m	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
median	331	28.5	16	33	33	26.5	34	35	60	118	82	172
95%	2756	2975	2087	2716	3219	2973	3867	3712	3170	3088	3347	2694
max	3446	3769	5131	5496	7055	6046	20069	5676	5608	5082	4699	4427
%-tni udio	4,34	4,06	4,86	9,76	13,59	12,34	13,75	11,24	8,17	8,61	5,10	4,18

Tablica A.1b: 16044 Udine - Pojave radio kanala po mjesecima												
Visina u m	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
median	144	48	40	8	17	70	42	39	60	822	81	150
95%	2494	2934	2917.5	3575	3367	4058	4197	4143	3584	3695	3353	2812
max	4497	6747	8932	5448	5820	5879	7259	6921	5827	5934	8373	6481
%-tni udio	4,00	3,40	4,34	6,62	10,78	13,10	14,41	14,66	11,38	7,91	4,99	4,41

Tablica A.1c: 16144 San Pietro - Pojave radio kanala po mjesecima												
Visina u m	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
median	93.5	36.5	0	0	8	26	34	34	43	183	96	123.5
95%	2509	1944	1717	2221	2549	2647	3092	2762	3285	2861	2877	2593
max	7604	3549	4011	5260	4920	9094	5678	5528	5970	5299	4903	4861
%-tni udio	3,79	4,90	6,87	8,74	11,22	14,47	14,39	11,66	8,75	6,70	4,85	3,66

Tablica A.1d: 16320 Brindisi - Pojave radio kanala po mjesecima												
Visina u m	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
median	787	655	368	184	139	154	167.5	219	445	686	816.5	818.5
95%	2731	2882	2325	2881	3114	3329	3355	3497	3489	3455	3183	2782
max	5792	5305	9191	5754	9392	9479	6000	6523	8116	12525	6082	8093
%-tni udio	4,42	4,38	5,47	6,05	9,73	12,16	14,25	15,36	9,89	7,82	6,16	4,31

⁶ sve visine u ovom radu odnose se na visine iznad površine

Tablica A.2a: 14430 Zadar – Pojave subrefrakcija po mjesecima												
Visina u m	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
median	1402	804	94.5	220	618	1212	1399.5	1410.5	1036.5	1251	1464.5	1272
95%	5197	4687	5246	4930	5398	5829	6252	6356	6178	5476	5412	4818
max	7232	6042	6915	7034	7625	7466	22964	9466	7456	7724	7344	7211
%-tni udio	5,10	4,55	4,72	8,53	11,17	11,66	13,33	11,14	9,11	9,36	5,82	5,51

Tablica A.2b: 16044 Udine – Pojave subrefrakcija po mjesecima												
Visina u m	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
median	1297.5	838	1286.5	1780	1990	2206	3015	3045	2650.5	2195	1766.5	1383
95%	5173	5963	5120	5814	6047	6265	6565	6784	6832	6580	5865	5528
max	16769	32441	11537	20101	26748	32363	33470	26778	33261	13975	29572	31325
%-tni udio	4,92	4,59	5,59	6,01	9,35	12,34	12,87	13,70	11,08	8,56	5,66	5,33

Tablica A.2c: 16144 San Pietro – Pojave subrefrakcija po mjesecima												
Visina u m	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
median	683	343	928	1128.5	1734	2131	2429	2486	2332.5	1956	963	521
95%	5410	5057	5405	5483	5666	5794	6571	6335	5762	6066	5154	4670
max	32417	32343	11792	14083	16551	16423	35194	10732	16346	14736	11519	10708
%-tni udio	5,99	5,25	5,76	6,63	9,65	11,97	12,43	11,20	9,02	8,55	7,07	6,48

Tablica A.2d: 16320 Brindisi – Pojave subrefrakcija po mjesecima												
Visina u m	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
median	2009	1301	1229	1292	1340.5	1301	1148	1427	1937	2235.5	2076	1909
95%	5362	5351	5694	5670	5957	6038	6386	6343	6375	6494	6041	5630
max	35954	32376	27369	33666	31836	31548	32287	30426	33052	31519	33739	30378
%-tni udio	4,71	4,24	5,54	5,90	9,75	11,67	12,49	14,03	11,50	8,86	6,47	4,84

Tablica A.3a: 14430 Zadar – Pojave superrefrakcija po mjesecima												
Visina u m	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
median	648	396	621	357	651	1003.5	1546	1199	891	865.5	788	750
95%	3139	2929	4040	3695	3860	4934.5	4602	5339	4546	3965	3792	3115
max	5215	4503	6062	6966	6062	6362	7436	7396	5763	5658	5586	5326
%-tni udio	5,82	5,94	10,77	8,51	11,04	9,65	9,44	8,78	7,78	9,05	6,73	6,49

Tablica A.3b: 16044 Udine – Pojave superrefrakcija po mjesecima												
Visina u m	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
median	471	402	651	216	932	1217	1266.5	1307.5	1239	1187.5	700	494
95%	3164	3041	3224	3908	4288	4741	4918	4950	4487	4069	3785	3610
max	15856	7926	9544	7248	10636	10438	9362	11734	11187	10426	8934	11028
%-tni udio	6,09	5,22	6,17	6,42	9,85	10,47	11,72	11,23	10,48	8,98	7,19	6,18

Tablica A.3c: 16144 San Pietro – Pojave superrefrakcija po mjesecima												
Visina u m	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
median	200	177	129	145	789.5	1121	1355	1026	866	799	392	216
95%	3014	2731	2872	3517	4044	4628	4714	4700	4360	3768	3088	2783
max	7482	6936	10219	7530	9113	10042	9825	7472	7332	9283	6061	8277
%-tni udio	6,94	7,36	7,96	7,39	9,18	10,28	9,25	8,62	8,37	9,25	8,35	7,05

Tablica A.3d: 16320 Brindisi – Pojave superrefrakcija po mjesecima												
Visina u m	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
median	936	856	743	594	468.5	790	783	802	1189	1002	997.5	1098
95%	3270	3384	3275	3584	4335	4537	4583	4616	4656	4137	3905	3687.5
max	10547	8647	11868	10220	17035	8505	12260	11691	12032	9314	11235	10190
%-tni udio	6,22	5,75	7,09	6,68	9,25	9,33	10,39	10,96	10,56	9,50	7,54	6,73

Kazalo

- Advanced Propagation Model*, 1, 2, 66, 77
Advanced REfraction Prediction System, 2, 77
amplitude godišnjih hodova temperature, 23
anaprop, 14
anomalne propagacije, 14
Appleton, 1
apsolutna pogreška ΔM , 28
AREPS, 2, 77
balonski sondažni podaci, 16
BAROCAP, 30
Distance Measuring Equipment, 15
efektivni polumjer Zemlje, 6
ekspozicionajni model, 31, 32, 33, 34, 56
EREPS, 71, 77
Global Navigational Satellite System, 15
GPS, 1, 15, 28, 67, 68, 70, 77, 78
HUMICAP, 30
indeks loma za radio valove, 10, 11
Instrumental Landing System, 15
International Telecommunication Union, 31
ITU-R P.453-9, 31, 32, 38, 63, 69
Koeficijent asimetričnosti, 39
Koeficijent spljoštenosti, 38, 39
Linearni model, 5, 36
M jedinica, 12
MASS, 70
Međunarodno udruženje za telekomunikacije, 31
Microwave Landing System, 15
MIL, 77
modificirani indeks loma, 11
N jedinica, 11
National Oceanic and Atmospheric Agency, 29
Naval Research Laboratory, 1, 72, 77
parabolički model, 1, 77
Polinomni model, 33
Potencijalna radarska vidljivost, 2, 78
Površinski indeks loma, 37
radio kanal, 13
RAOB, 29
ray tracing model, 8
RS-80, 28, 29, 30
RS-90, 28, 29, 30
Snellov zakon, 4, 5, 6
standardna atmosfera, 7
subrefrakcija, 13
subrefrakcije, 13
superrefrakcija, 13
superrefrakcije, 13
Temperatura površine mora, 23
termokap, 20
THERMOCAP, 30
Trajektorija radio zrake, 13
Vertikalni profil modificiranog indeksa loma, 64
World Meteorological Organisation, 3
ZMID, 1
ZMIN, 1

Popis kratica

APM - Advanced Propagation Model, napredni propagacijski model
AREPS - Advanced REfraction Prediction System, Napredni sustav za predviđanje refrakcije
BAROCAP - senzor tlaka koji se temelji na promjeni kapaciteta
COAMPS - Coupled Ocean-Atmosphere Mesoscale Prediction System, Prognostički mezoskalni sustav na granici more-atmosfera
COST - COoperation in Science and Technology, suradnja u znanosti i tehnologiji
DLR - Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, njemački Centar za zrakoplovna i svemirska istraživanja
DME - Distance Measuring Equipment, oprema za mjerenje udaljenosti
ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Europski centar za srednjoročnu vremensku prognozu
EDH - Evaporation Duct Height, visina evaporacijskog radio-kanala
EREPS - Engineers' Refractive Effects Prediction System, Inženjerski model za predviđanje propagacijskih učinaka
GCOS - Global Climate Observation System, Globalni sustav za praćenje klime
GIS - Geographical Information System, geografski informacijski sustav
GNSS - Global Navigational Satellite System, globalni satelitski navigacijski sustav
GPS - Global Positioning System, Globalni pozicijski sustav
HRZ i PZO - Hrvatsko ratno zrakoplovstvo i protuzračna obrana
HUMICAP - senzor vlažnosti koji se temelji na promjeni kapaciteta
ILS - Instrumental Landing System, sustav za instrumentalno slijetanje
IROS - Institut za istraživanje i razvoj obrambenih sustava
ITU - International Telecommunication Union, Međunarodna telekomunikacijska unija
IUGG - International Union of Geodesy and Geophysics, Međunarodna udruga za geodeziju i geofiziku
JPL - Jet Propulsion Laboratory, Laboratorij za mlazni pogon
LC - elektronički titrajni krug koji se sastoji od zavojnice i kondenzatora
LORAN - Long-range navigation, radio-navigacijski sustav velikog dometa
MBL - Marine Boundary Layer, granični sloj iznad mora
MetUM - Meteorological Office Unified Model, Univerzalni (numerički) model Meteorološkog ureda
MIL - Modificirani indeks loma, naziv aplikacije
MLS - Microwave Landing System, mikrovalni sustav za slijetanje
MODRI9 - MODified Refraction Index 9.0, računalna aplikacija za računanje modificiranog indeksa loma iz aeroloških sondaža, inačica 9.0
NASA - National Aeronautic and Space Administration, Uprava za aeronautička i svemirska istraživanja
NATO - North Atlantic Treaty Organisation, Organizacija Sjevernoatlanskog ugovora
NCAR - National Center for Atmospheric Research, Nacionalni centar za atmosferska istraživanja
NOAA - National Oceanic and Atmospheric Agency, Nacionalna agencija za oceane i atmosferu
NRL - Naval Research Laboratory, Mornarički istraživački laboratorij
OAR - Osmatračko-akvizicijski radar
PM - parabolic model, parabolički model

PRV - Potencijalna radarska vidljivost
QPF - Quantitative Precipitation Forecasts, kvantitativne prognoze oborine
RADAR - RADio Detection And Range, otkrivanje i mjerenje udaljenosti uz pomoć radija
RAOB - Raw Aero sonde OBservation, izvorni podaci aerosondaža
RP - radarski položaj
SRTMM - Shuttle Radar Terrain Mapping Mission, Space Shuttleova misija radarskog mapiranja terena
TEMP - tekstualni format za radio-sondaže
THERMOCAP - senzor temperature koji se temelji na promjeni kapaciteta
TOUGH - Towards Operational Use of GPS Humidity Measurements in Meteorology, Prema operativnoj uporabi mjerenja vlažnosti pomoću GPS-a u meteorologiji
TV - televizija
UHF - Ultra high frequency, ultra visoka frekvencija
VHF - Very high frequency, vrlo visoka frekvencija
VOCAR - Variability of Coastal Atmospheric Refractivity, Varijabilnost atmosferske refrakcije na obali
WMO - World Meteorological Organisation, Svjetska meteorološka organizacija
ZMID - Zračno motrenje i dojavljivanje, danas ZMIN
ZMIN - Zračno motrenje i navođenje

Kratka biografija autora

mr.sc. Mladen Viher
rođen 1.3.1965. u Zagrebu
oženjen, dvoje djece

Školovanje

1971. - 1979. **OŠ "Vladimir Nemet", Varšavska 18, Zagreb**
1979. - 1983. **COUO "Ruđer Bošković", elektronika, Getaldićeva bb, Zagreb**
- elektroničar za računalnu tehniku
1983. - 1984. **Škola pričuvnih časnika, Postrojbeno PZO, raketni sustav KUB-M, Zadar**
- zapovjednik raketnog odjeljenja, pričuvni potporučnik
1984. - 1992. **Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, smjer: fizika, inženjerski smjer, geofizika, fizika atmosfere i mora**
- dipl.ing. fizike, fizika atmosfere i mora
1998. - 2002. **Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, poslijediplomski studij na Geofizičkom zavodu "Andrija Mohorovičić", Zagreb**
- mr.sc. fizike/geofizika/fizika atmosfere i mora
2003. **Napredna časnička škola, Hrvatsko vojno učilište, Zagreb**
- veza i elektroničko djelovanje
2006. **Vojno-diplomatska škola, Hrvatsko vojno učilište, Zagreb**
- međunarodna vojna suradnja
2006. - 2007. **Zapovjedno-stožerna škola "Blago Zadro", Hrvatsko vojno učilište, Zagreb**
- stožerni časnik, HRZ i PZO
2007. - 2011. **Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, doktorski studij na Geofizičkom zavodu "Andrija Mohorovičić", Zagreb**
- u postupku stjecanja doktorata znanosti izvan doktorskog studija

Zaposlenja

1991. - 1994. **Ministarstvo obrane Republike Hrvatske, Zagreb**
- stručni suradnik za optoelektroničke sustave/istraživač (Središnjica za elektroničko izviđanje)
- časnik za izbor radarskih položaja (brigada zračnog motrenja i navođenja)
- radarski tehničar (brigada zračnog motrenja i navođenja)
1994. - 1996. **Državni hidrometeorološki zavod, Centar za meteorološka istraživanja, Zagreb**
- stručni suradnik/istraživač u Odsjeku za atmosferske procese lokalnih i mezo razmjera
1996. - 2001. **Ministarstvo obrane Republike Hrvatske, Glavni stožer Oružanih snaga Republike Hrvatske, Središnjica za elektroničko izviđanje, Zagreb**
- načelnik Odjela za multisenzorsko elektroničko izviđanje
- donaćelnik odsjeka za istraživanje u Odjelu za multisenzorsko elektroničko izviđanje
- stručni suradnik, istraživač/tematski interpretator
2001. - 2006. **Ministarstvo obrane Republike Hrvatske, Institut za istraživanje i razvoj obrambenih sustava, Zagreb**
- viši stručni savjetnik za obrambene sustave
- viši savjetnik za računalnu potporu
2007. - 2008. **Ministarstvo obrane Republike Hrvatske, Uprava za obrambenu politiku, Služba za međunarodnu obrambenu suradnju, Zagreb**
- viši stručni savjetnik za bilateralnu obrambenu suradnju
2008. - **Zapovjedništvo Hrvatskog ratnog zrakoplovstva i protuzračne obrane, Zagreb**
- stožerni časnik za održavanje radara i komunikacijsko-informacijskih sustava

Popis objavljenih radova

Izvorni znanstveni rad u časopisu s međunarodnom recenzijom citiran u CC/SCI bazi

1. Viher, M. (2006) "A study of the modified refraction indices over the Alpine and sub-Alpine region", *Meteorologische Zeitschrift*, **15**, 625-630.
2. Telišman Prtenjak, M.; Viher M., Jurković, J. (2010) "Sea/land breeze development during a summer bora event along the north-eastern Adriatic coast", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. **136**, 651; 1554-1571.
3. Viher, M., Telišman Prtenjak, M. (2011) "A perennial study of radio-wave refractivity profiles above the Adriatic Sea up to 40 km height", u postupku recenzije za *Meteorologische Zeitschrift*.

Izvorni znanstveni radovi u časopisima s međunarodnom recenzijom

2. Vučetić, V., Bajić, A., Viher, M. (1996) "Local Wind in the Mountain Area of the Croatia", *Proceedings of the Alpine Meteorology Congress*, Warsaw 1996, 6 str.
3. Dobesch, H., Bajić, A., Cermak, J., Gerjević, M., Heseck, F., Kury, G., Kventon, V., Pristov, N., Stastny, P., Svoboda, J., Szalai, S., Viet Tran, H., Viher, M., Vučetić, V., Weilguni, V. (1997) "Wind Atlas for the Central European Countries", Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Beč, 105 str.

Izvorni znanstveni radovi u časopisima s domaćom recenzijom:

4. Bajić, M., Viher, M. (1993) "Jednostavni statistički model potencijalne vidljivosti i GIS za radare", *Bilten Savjeta za daljinska istraživanja i fotointerpretaciju HAZU*, **12**, 19-36.
5. Viher, M. (1996) "Digitalna obrada radarskih snimki intenziteta oborine - primjena operatora totalne promjene intenziteta", *Bilten Savjeta za daljinska istraživanja i fotointerpretaciju HAZU*, **14**, 89-112.

Stručni radovi u časopisima s domaćom recenzijom

6. Viher, M. (1999) "Automatska klasifikacija satelitskih snimki oblaka uz primjenu segmentacije", *Hrvatski meteorološki časopis*, **32**, 75-86.
7. Viher, M. (2001) "High-boost filter s naglaskom na visoke frekvencije", *Bilten Znanstvenog vijeća za daljinska istraživanja i fotointerpretaciju HAZU*, **15-16**, 179-192.

Prethodna priopćenja u časopisima s domaćom recenzijom

8. Kovač, T., Viher, M., Javorović, I. (1994) "Geokodiranje podataka prikupljenih daljinskim istraživanjima", *Bilten Savjeta za daljinska istraživanja i fotointerpretaciju HAZU*, **13**, 59-70.
9. Viher, M., Javorović, I. (1994) "Procjena grešaka kod geokodiranja vertikalnih snimaka za potrebe daljinskih istraživanja", *Bilten Savjeta za daljinska istraživanja i fotointerpretaciju HAZU*, **13**, 71-82.
10. Viher, M. (1995) "Praktična metoda izračunavanja modificiranog indeksa loma za mikrovalno zračenje iz aerosondažnih mjerenja", *Hrvatski meteorološki časopis*, **30**, 63-70.
11. Viher, M. (2007) "Pojave nestandardne refrakcije radio valova u višegodišnjem nizu sondaža aerološke postaje Zagreb-Maksimir", *Hrvatski meteorološki časopis*, **40**, 33-42.

Stručni i znanstveni radovi u zbornicima međunarodnih konferencija

12. Viher, M., Vučetić, V. (1998) "*Determination of Changes in Phenological Cycle of Oak-wood by Multispectral NOAA/AVHRR Images*", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXII, Part 7, ISSN 0256-1840. International Symposium on Resource and Environmental Monitoring; Local, Regional, Global, Budimpešta 1-4 rujna 1998.
13. Viher, M. (1998) "*High-Boost, filter za digitalnu obradu slike s naglaskom na visoke frekvencije*", Međunarodni sajam inovacija INOVA 98, Zagreb, nagrađen brončanom plakatom
14. Viher, M. (2003) "*High Boost Filter; An Application in Digital Image Processing*", NATO RTO SET059 Event on "Target Tracking and Sensor Data Fusion for Military Observation Systems", stručni rad, Budimpešta, Mađarska, 15. - 17. listopada 2003., objavljen na CD-u RTO-TR-057 u listopadu 2004.
15. Peić, R., Viher, M., Milošić, Z. (2004) "*A Speech Recognition Device Based on a Speaker Independent Sounds Recognition Algorithm*", Annals of Danube Adria Association for Automation and Manufacturing (DAAAM) for 2004 . 15th International DAAAM Symposium, Vienna 3-6th November 2004
16. Viher, M. (2004) "*Počeci vojne primjene umjetne inteligencije u meteorologiji*", radionica "Neuronske mreže i simulacije u vojnoj primjeni", Zbornik radova Konferencije Intelligent Information Systems - IIS2004, Varaždin, 22.-24.9.2004.
17. Telišman Prtenjak, M., Viher, M., Jurković, J. (2008) "*Sea/land breeze development during a summer bora event along the north-eastern Adriatic coast*" u *Recent advances in Adriatic oceanography and marine meteorology*. Orlić, Mirko; Pasarić, Mira (ur.), Andrija Mohorovičić Geophysical Institute, Faculty of Science, University of Zagreb, 2008.

Ostali radovi

17. Viher, M. (1992) "Programski modeli u analizi vremena", diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički zavod, 100 stranica.
18. Viher, M. (2000) "*Kratki pregled primjene tehnike umjetne inteligencije u meteorologiji*", Zbornik radova znanstvenog skupa posvećenog 140. godišnjici rođenja Andrije Mohorovičića, Zagreb, ožujak 1998., objavljeno 2000.
19. Bašić, T., Brkić, M., Hećimović, Ž., Šljivarić, M., Markovinović, D., Rezo, M., Jungwirth, E., Viher, M., Horvat, S. (2002) "*Osnovna mreža geomagnetske deklinacije Republike Hrvatske – prethodna studija*", Ministarstvo obrane Republike Hrvatske, Institut za istraživanje i razvoj obrambenih sustava, Zagreb.
20. Viher, M. (2002) "*Kombiniranje metode multispektralnog grupiranja i metode teksture pri klasifikaciji oblaka snimljenih sa satelita*", magistarski rad, Geofizički zavod Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, 198 str.
21. Viher, M. (2003) "*Sustav za modeliranje refrakcije radio valova u stvarnim uvjetima – prethodna studija*", Ministarstvo obrane Republike Hrvatske, Institut za istraživanje i razvoj obrambenih sustava, Zagreb, 54 str.
22. Viher, M., Franić, Z., Petrović, J., Barković, M., Tisanić, M., Bajić, M., Pandžić, K., Marki, A., Prlić, I. (2004) "*Sustav za modeliranje refrakcije radio valova u stvarnim uvjetima – studija izvodljivosti*", Ministarstvo obrane Republike Hrvatske, Institut za istraživanje i razvoj obrambenih sustava, Zagreb, 25 str.