

Klimatološka analiza vertikalnih profila iz atmosferske reanalize ERA5 na području Hrvatske

Sušanj, Dario

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:959554>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Dario Sušanj

Klimatološka analiza vertikalnih profila iz
atmosferske reanalize ERA5 na području
Hrvatske

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA
SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGRAFIJA

Dario Sušanj

Diplomski rad

**Klimatološka analiza vertikalnih profila iz
atmosferske reanalize ERA5 na području
Hrvatske**

Voditelj diplomskog rada: dr. sc. Ivan Güttler

Suvoditeljica diplomskog rada: dr. sc. Maja Telišman Prtenjak

Zagreb, 2024.

Sažetak

U radu je analizirano podudaranje temperature i relativne vlažnosti iz reanalize ERA5 sa stvarnim vrijednostima dobivenim mjerenjima pomoću radiosondaža. Analiza je provedena na 37 vertikalnih nivoa za područje Zagreba i Zadra, tijekom cijele godine te za zimsku i ljetnu sezonu i za podatke u ponoć, podne te njihov srednjak. Uspoređene su srednje vrijednosti i standardne devijacije za odabrano razdoblje uz popratne t-testove za srednje vrijednosti i F-testove za standardne devijacije uz nivo značajnosti od 5%. Dobiveno je jako dobro slaganje srednjih vrijednosti temperature te precjenjivanje relativne vlažnosti ERA5 na skoro svim vertikalnim nivoima zbog njene lošije prognoze. Promjenom lokacije, sezone ili doba dana rezultat je da jedino sezona primjetno utječe na vrijednosti i odnos između krivulja. Izračunate su i grafički prikazane anomalije temperature, relativne vlažnosti i specifične vlažnosti za cijelo dostupno razdoblje reanalize ERA5 te je pokazano zagrijavanje troposfere i hlađenje stratosfere kao i porast specifične vlažnosti u zadnjem desetljeću. Prijelazom s cijele godine na odabrane sezone, pozitivne i negativne anomalije postaju intenzivnije. Također su analizirani i prikazani trendovi temperature, relativne vlažnosti i specifične vlažnosti za podatke iz reanalize ERA5 s vrijednostima po dekadama uz pripadajuće t-testove. Dobiveni trendovi temperature i specifične vlažnosti su značajni za skoro sve vertikalne nivoe, dok za relativnu vlažnost većinom nisu bili statistički značajni.

Ključne riječi: reanaliza, radiosondaža, temperatura, relativna vlažnost, specifična vlažnost, anomalije, trendovi

Climatological analysis of vertical profiles from the atmospheric reanalysis ERA5 over Croatia

Abstract

In the thesis the comparison between temperature and relative humidity from ERA5 reanalysis with actual values obtained from radiosonde measurements was analysed. The analysis was conducted at 37 vertical levels for the Zagreb and Zadar regions throughout the year, as well as for the winter and summer seasons, considering data at midnight, noon, and their averages. Mean values and standard deviations were compared for the selected period, with accompanying t-tests for mean values and F-tests for standard deviations at a significance level of 5%. A strong match was found for the mean temperature values, while ERA5 exceeded the relative humidity for almost all vertical levels due to its lower predictability. When changing location, season, or time of day, the results showed that only the season noticeably affected the values and the relationship between curves. Anomalies of temperature, relative humidity, and specific humidity were calculated and graphically represented for the entire available ERA5 period, demonstrating tropospheric warming, stratospheric cooling, and an increase in specific humidity in the last decade. Transitioning from the entire year to selected seasons intensified positive and negative anomalies. Trends in temperature, relative humidity, and specific humidity for ERA5 data were also analyzed, presented with values per decade along with corresponding t-tests. Significant trends were observed for temperature and specific humidity for almost all vertical levels, while trends for relative humidity were mostly statistically insignificant.

Keywords: reanalysis, radiosondage, temperature, relative humidity, specific humidity, anomalies, trends

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Teorijska pozadina	1
1.1.1. Zagrijavanje troposfere	1
1.1.2. Hlađenje stratosfere	1
1.2. Primjeri dosadašnjih istraživanja	2
1.3. Motivacija i cilj istraživanja	5
2. Podaci i metode	6
2.1. Podaci	6
2.1.1. Reanaliza ERA5	6
2.1.2. Radiosondaže	7
2.2. Metode	9
2.2.1. Statistički parametri	9
2.2.2. Linearna regresija	9
2.2.3. Statistički testovi	10
3. Rezultati i diskusija	11
3.1. Usporedba ERA5 i radiosondaža	11
3.1.1. Referentni prikazi	13
3.1.2. Utjecaj lokacije	16
3.1.3. Utjecaj sezone	18
3.1.4. Utjecaj doba dana	24
3.2. Anomalije	29
3.2.1. Referentni prikazi	29
3.2.2. Utjecaj lokacije	32
3.2.3. Utjecaj sezone	34
3.2.4. Utjecaj doba dana	38
3.3. Trendovi	41
3.3.1. Referentni prikazi	41
3.3.2. Utjecaj lokacije	43
3.3.3. Utjecaj sezone	45
3.3.4. Utjecaj doba dana	47
4. Zaključak	50
Literatura	52
Popis kratica	54

1. Uvod

1.1. *Teorijska pozadina*

Zagrijavanje klimatskog sustava je očito, a od 1950. godine, nastale promjene su neviđene u zabilježenoj ljudskoj povijesti. Količina stakleničkih plinova je narasla, atmosfera i oceani su se zagrijali, snježni i ledeni pokrov se smanjio, a razina mora se povećala. Površina Zemlje toplija je u svakom od posljednja tri desetljeća od prethodnog, a temperatura je narasla za 1.5 °C od predindustrijskog razdoblja do 2023. godine, dok projekcije temperature predviđaju porast i od 3 °C do 2100. godine (npr. Schleussner i sur., 2016; IPCC, 2023) što prelazi dogovorenu granicu Ujedinjenih naroda od 2 °C koja je postavljena Pariškim sporazumom u 2016. godini.

1.1.1. **Zagrijavanje troposfere**

Troposfera je najniži dio atmosfere. Temperatura u troposferi smanjuje se s porastom visine otprilike 0.65 °C svakih 100 metara te se zbog toga topliji, lakši zrak diže s površine, a hladniji, teži zrak spušta prema površini. Kratkovalno zračenje koje dolazi sa Sunca grije površinu Zemlje, a ona se hladi emisijom dugovalnog zračenja. Količinu odlaznog zračenja apsorbiraju plinovi u atmosferi koji ponovo emitiraju zračenje prema Zemlji. U slučaju povećane koncentracije stakleničkih plinova, dolazi do intenzivnog zagrijavanja nazvanog efekt staklenika zbog zarobljavanja plinova u Zemljinoj atmosferi (Shahzad, 2015). Povećanjem temperature, zrak se širi, postaje lakši te može u sebe primiti više vodene pare. Relativna vlažnost koja je definirana kao omjer stvarnog tlaka vodene pare i zasićenog tlaka vodene pare pri jednakoj temperaturi time se smanjuje, jer čest zraka može primiti više vodene pare, a specifična vlažnost, definirana kao omjer mase vodene pare u česti zraka i ukupne mase česti, povećava se zbog porasta mase vodene pare u česti.

1.1.2. **Hlađenje stratosfere**

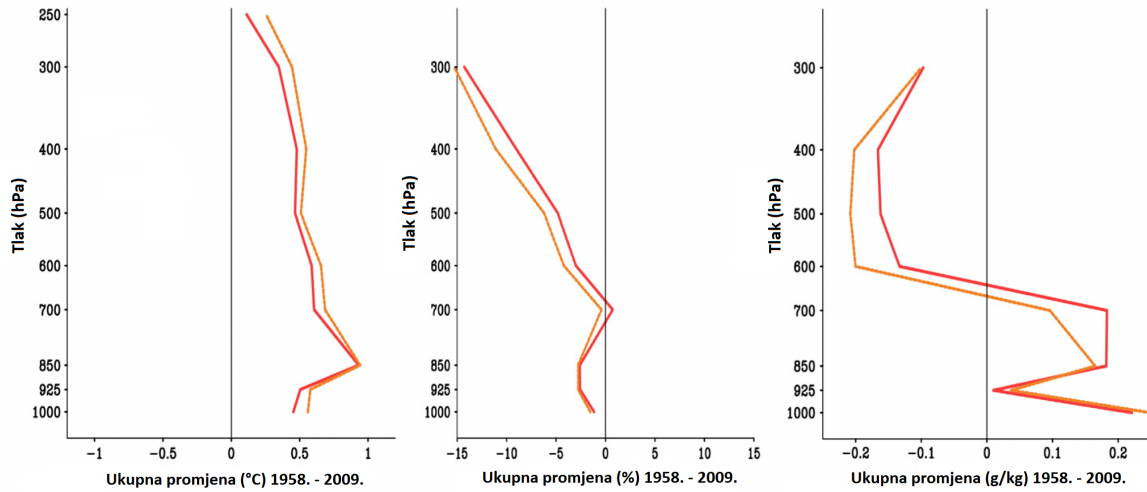
Druga pojava koja je rjeđe u fokusu istraživanja je hlađenje stratosfere, nastalo također zbog povećanja količine stakleničkih plinova. Ovisno o tome je li ukupna promjena zračenja stakleničkih plinova pozitivna ili negativna, dolazi do grijanja ili hlađenja

atmosfere. Ako dominira apsorpcija zračenja, staklenički plinovi griju atmosferu, a ako dominira emisija, hlade ju. Gornja atmosfera, za razliku od troposfere, ima vrlo nizak tlak i mali udio vodene pare što znači da od stakleničkih plinova prevladavaju CO₂ i ozon s različitim spektrima apsorpcije. U pojasu zračenja gdje CO₂ mnogo apsorbira, povećana koncentracija CO₂ u troposferi otežava fotonima da dođu do stratosfere. Infracrveno zračenje usmjereno prema gore dolazi sve više od vodene pare ili oblaka, koji se zbog suhe gornje atmosfere ne apsorbiraju značajno u stratosferi. S druge strane, gledajući prema dolje, povećana koncentracija CO₂ u stratosferi ima manje radijacije za apsorbirati, ali emitira više, od čega polovica odlazi u svemir. Radi se dakle o manje apsorpcije i više emisije što rezultira hlađenjem te je taj efekt izraženiji daljnjim povećanjem visine (Santer, 2020).

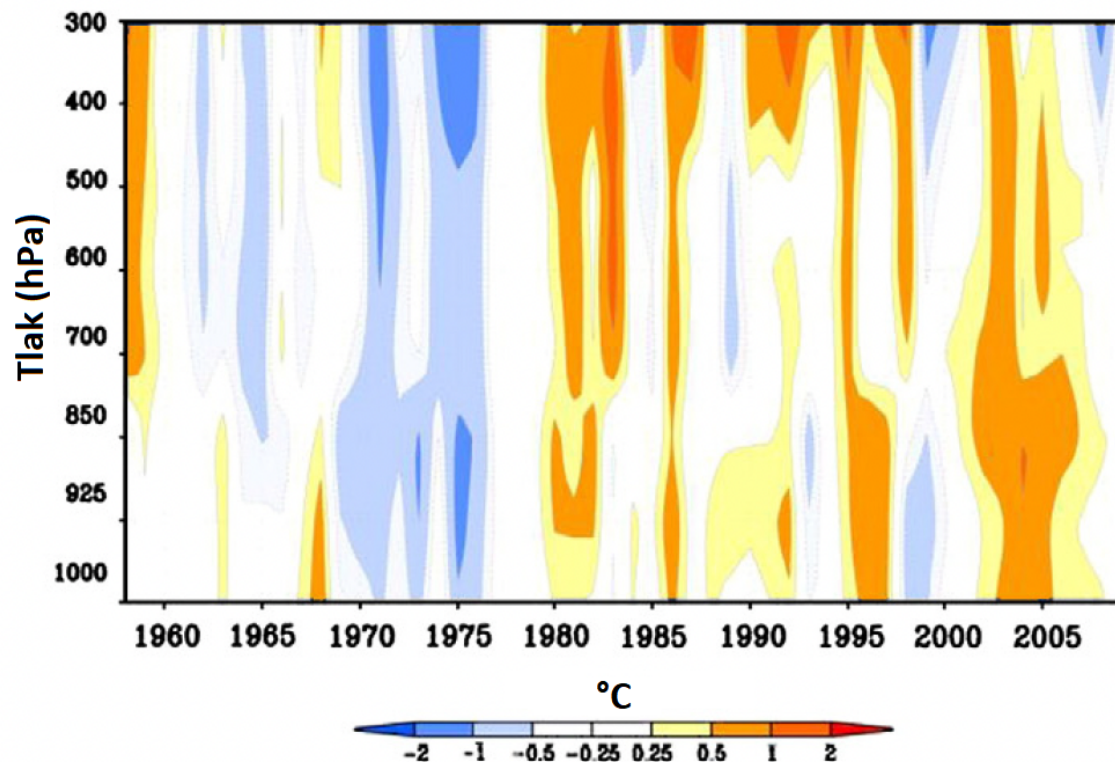
1.2. Primjeri dosadašnjih istraživanja

Analiza provedena na području Havaja za razdoblje od 1958. do 2009. godine s podacima iz reanalize NCEP (Diaz i sur., 2011) pokazala je porast temperature od 0.5 °C na prizemnom nivou te rast do 1 °C na 850 hPa plohi (Slika 1.2.1. lijevo). Kako analiza nije napravljena za tlakove manje od 250 hPa, graf ne prikazuje hlađenje donjeg dijela stratosfere. Na grafu trenda relativne vlažnosti (Slika 1.2.1. sredina) primjećuje se pad za skoro sve odabrane geopotencijalne plohe, dok se za specifičnu vlažnost (Slika 1.2.1. desno) uočava porast u sloju do 700 hPa uzrokovano porastom temperature u tom sloju. Negativni trend specifične vlažnosti u gornjoj troposferi i stratosferi dolazi od geografskog položaja Havaja u tropskom pojasu, a mehanizam je opisan u Nowack i sur. (2023).

U radu su također izračunate i analizirane godišnje anomalije temperature za razdoblje od 1958. do 2009. godine (Slika 1.2.2) za područje Havaja do visine 300 hPa plohe (unutar troposfere). Pozitivne anomalije temperature su i dalje vidljive, osobito u zadnjem desetljeću, no kao i kod trendova, bez potvrde o stratosferskom ohlađivanju.

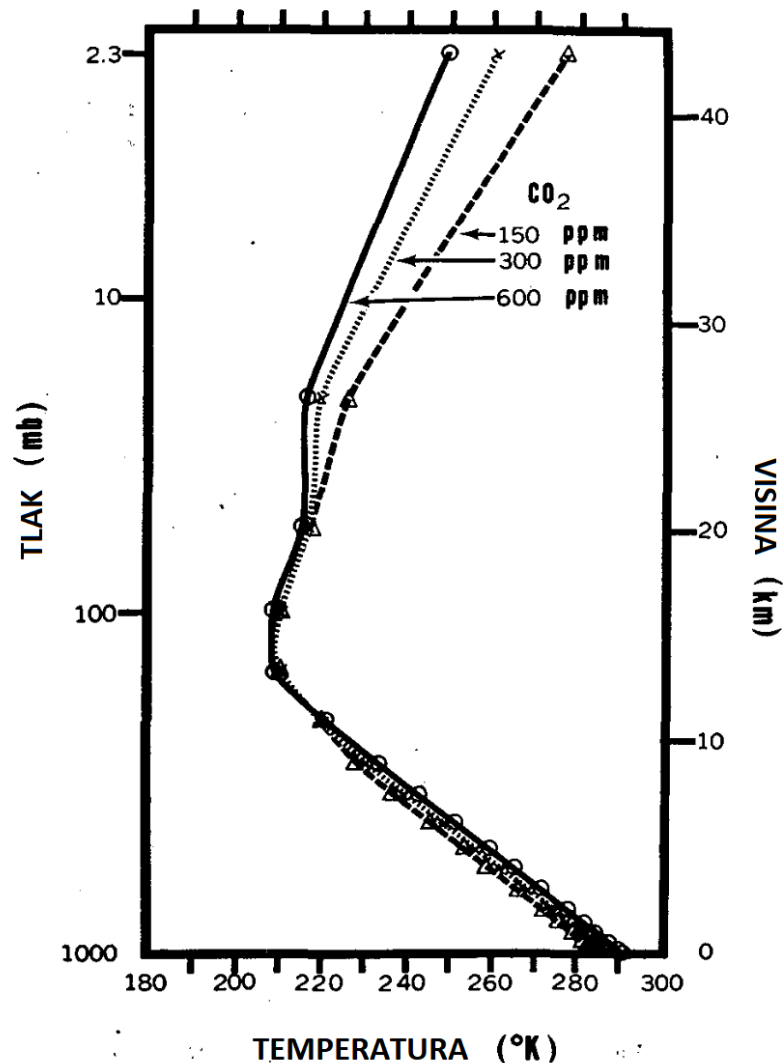


Slika 1.2.1: Trendovi srednje godišnje temperature (lijevo), relativne vlažnosti (sredina) i specifične vlažnosti (desno) na standardnim izobarnim plohama za razdoblje od 1958. do 2009. godine. Crvene linije predstavljaju vremenski niz godišnjih vrijednosti, a narančaste izračun korištenjem petogodišnjeg srednjaka radi uklanjanja varijabilnosti (prilagođeno iz Diaz i sur., 2011).



Slika 1.2.2: Anomalije temperature iznad Havaja za razdoblje 1958. - 2009. u troposferi (prilagođeno iz Diaz i sur., 2011).

Uzrok hlađenja stratosfere detaljno je analiziran u radu od Manabe (1967.) uz grafički prikaz vertikalne raspodjele temperature uz mijenjanje raznih parametara. Jedan od tih parametara koji su uzeti u obzir je količina CO₂ u atmosferi. U spomenutom radu koristi se model s radijacijskom ravnotežom, odnosno uzima se da je dugovalno zračenje koje Zemlja emitira jednako kratkovalnom koje apsorbira od Sunca. Slika 1.2.3 prikazuje vertikalnu razdiobu ravnotežne temperature uz vrijednosti CO₂ od 150, 300 i 600 ppm. Rezultati pokazuju kako ravnotežna temperatura u troposferi raste porastom koncentracije CO₂ u atmosferi. Ta razlike se zatim, kako se približavamo tropopauzi, smanjuju. Nakon tropopauze vidimo da veća koncentracija CO₂ uzrokuje manje ravnotežne temperature u stratosferi, uz mnogo primjetljiviju razliku nego u troposferi.



Slika 1.2.3: Vertikalna razdioba ravnotežne temperature za tri različite koncentracije CO₂ u atmosferi (prilagođeno iz Manabe, 1967).

1.3. Motivacija i cilj istraživanja

Zagrijavanje troposfere jedan je od glavnih problema s kojim se ljudska vrsta danas suočava, a objašnjenje i analiza trenutnog i prošlih stanja atmosfere ključna je za dublje razumijevanje problema i njegovo (buduće) rješavanje. Cilj istraživanja u ovom radu je provedba usporedbe podataka o temperaturi i relativnoj vlažnosti koji su dobiveni iz dva izvora, reanalize ERA5 te iz stvarnih radiosondažnih podataka na području Zagreba i Zadra. Usporedbom se želi utvrditi točnost/vjerodostojnost podataka iz reanalize ERA5 koja daje gušća prostorno-vremenska obilježja same atmosfere te omogućava dodatne analize u odnosu na radiosondažna mjerenja. Stoga će se s podacima iz ERA5 prikazati trendovi i anomalije temperature, relativne vlažnosti i specifične vlažnosti te vidjeti kako se slažu s teorijom, prijašnjim radovima i dosadašnjim opažanjima u atmosferi obuhvaćajući troposferu, ali i stratosferu koja je malo zastupljena u dosadašnjim istraživanjima.

2. Podaci i metode

2.1. Podaci

2.1.1. Reanaliza ERA5

Reanaliza ERA5 reanaliza je pete generacije Europskog centra za srednjoročnu prognozu vremena (ECMWF-a) te njezina javno dostupna arhiva sadržava satne vrijednosti za velik broj atmosferskih, kopnenih i oceanskih klimatskih varijabli za razdoblje od 1940. godine do danas. Reanaliza pokriva područje cijelog svijeta kombinirajući podatke iz modela s razlučivanjem od 0.25° i s 37 vertikalnih razina od 1000 do 1 hPa s mjerenjima. To načelo zove se asimilacija podataka. Bazira se na metodi koja se koristi za numeričku prognozu vremena, gdje se svaki određen broj sati, u slučaju ECMWF-a 12h, daje novi proračun stanja atmosfere, zvano analiza, gdje se prethodna prognoza kombinira s novim mjerenjima iz koje se dobiva poboljšana prognoza. Reanaliza funkcionira na jednak način, ali nema ograničenje izdavanja pravodobnih prognoza. Pritom koristi grublju razlučivost na uštrb duljine vremenske intergracije kako bi se omogućilo dobivanje što dužih vremenskih nizova stanja atmosfere unatrag nekoliko desetljeća.

Reanaliza ERA5 zamijenila je dugogodišnju bazu podataka (prethodne) reanalize ERA-Interim. Prethodno dostupno razdoblje prošireno je s 40 godina od 1979. do 2019. na trenutnih 82, od 1940. do danas. Podaci reanalize ERA-Interim bili su dostupni nakon 2 do 3 mjeseca uz prostornu razlučivost od 79 km, dok su preliminarni podaci za ERA5 dostupni već nakon 5 dana uz razlučivost od 31 km. Također, broj vertikalnih nivoa povećao se sa 60 na 137 (Hersbach i sur., 2018).

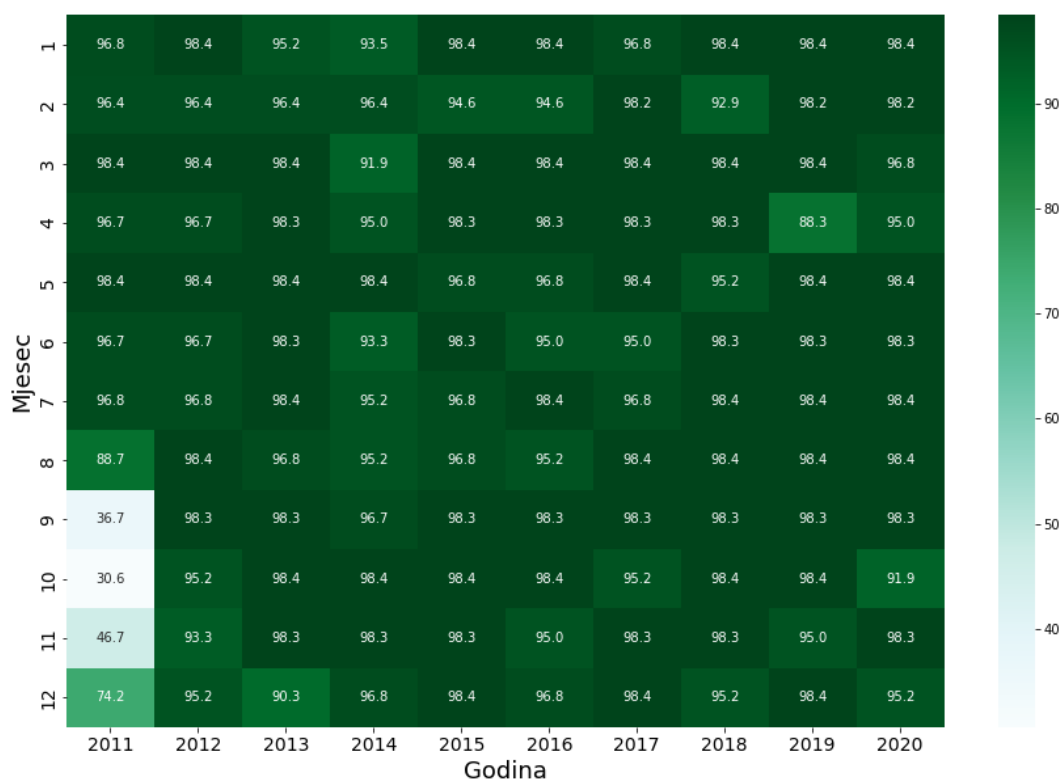
U ovom radu iz reanalize ERA5 preuzeti su podaci o temperaturi zraka, relativnoj vlažnosti i specifičnoj vlažnosti na svih 37 vertikalnih razina za Zagreb i Zadar od 1940. do 2022. godine sa stranice <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels-monthly-means?tab=form>. Pritom su za lokacije Zagreb i Zadar u radu korišteni podaci radiosondažnih postaja Zagreb Maksimir ($45.82^\circ\text{N } 16.03^\circ\text{E}$, 123 m n.v.) i zračne luke Zadar ($44.1^\circ\text{N } 15.35^\circ\text{E}$, 79 m) Stoga su iz reanalize ERA5 uzete najbliže kopnene točke za usporedbu; za Zagreb ($45.75^\circ\text{N } 16^\circ\text{E}$) te Zadar ($44^\circ\text{N } 15.25^\circ\text{E}$).

Iako se u reanalizi ERA5 asimiliraju stvarni podaci prikupljeni radiosondažama, iz navedena dva izvora podataka ne očekuju se identični vertikalni profili. Razlike postoje zbog različitog predstavljanja meteorološke informacije u vremenu i prostoru. Radiosondažna mjerenja prikazuju ustvari točkasta mjerenja po vertikali. Vertikalne informacije iz reanalize su ustvari prostorno usrednjeni profili unutar ćelija trodimenzionalne mreže (odnosno volumna informacija) za koju se izrađuje reanaliza.

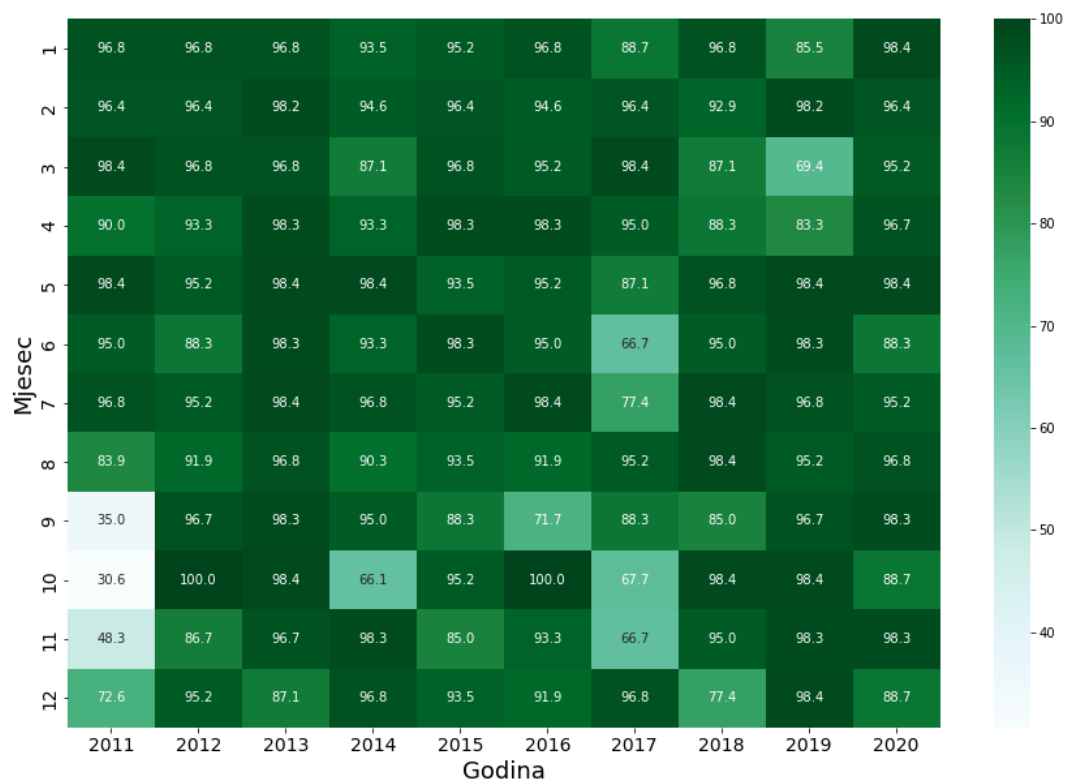
2.1.2. Radiosondaže

Radiosondažna mjerenja obavljaju se u Zagrebu i Zadru dva puta dnevno, u ponoć (00 UTC) i u podne (12 UTC), a obavljaju se pomoću radiosonde koja je obješena na balon koji se diže kroz atmosferu te tako prikuplja visinske podatke o temperaturi, tlaku, vlažnosti i horizontalnom vjetru. Radiosondažni podaci preuzeti su sa stranice <https://weather.uwo.edu/upperair/sounding.html> za razdoblje od 2011. do 2020. godine.

Za razliku od ERA5 podataka, u kojima uvijek postoji vrijednost za svaku razinu i vrijeme, razine tlaka na kojemu su mjereni podaci se djelomično razlikuju za svaku sondažu. Naime svaka radiosondaža sadrži standardne i značajne nivoe te se prema značajnim nivoima radiosondaže međusobno razlikuju. Broj dostupnih radiosondaža također varira iz mjeseca u mjesec, a na slikama 2.1.2.1. i 2.1.2.2. prikazani su postoci dostupnosti za svaki mjesec kroz odabrano desetogodišnje razdoblje za Zagreb i Zadar. Zagreb je jako dobro pokriven radiosondažnim podacima kroz cijelo desetljeće osim velikog pada broja dostupnih mjerenja u jesen 2011. godine. Za Zadar se ipak primjećuju veće praznine u podacima, posebice kroz 2017. godinu uz isti nedostatak podataka u jesen 2011. godine kao i u Zagrebu.



Slika 2.1.2.1: Mjesečni postotak postojanja radiosondažnih podataka od 2011. do 2020. godine za Zagreb.



Slika 2.1.2.2: Mjesečni postotak postojanja radiosondažnih podataka od 2011. do 2020. godine za Zadar.

2.2. Metode

Podaci su obrađeni u programskom jeziku Python uz pakete `numpy` za manipuliranje podacima, `scipy` za statističku analizu te `matplotlib` i `seaborn` za grafički prikaz rezultata. Sav računalni kôd, analizu i grafove moguće je pronaći na sljedećem repozitoriju: <https://github.com/oyrad/diplomski/tree/1f6d0c5a7ced3b0d7589418c120a5bfa3f3951f5>.

2.2.1. Statistički parametri

Pri statističkoj analizi podataka korišteni su sljedeći parametri za opis tendencije određenog skupa podataka.

Neka je $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ skup mjerenih vrijednosti, srednja vrijednost ili **srednjak** \bar{X} , njihova je aritmetička sredina:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N x_i. \quad (2.1.)$$

Neka je $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ skup mjerenih vrijednosti. **Standardna devijacija**, σ , srednje je kvadratno odstupanje mjerenih vrijednosti od srednjaka:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (2.2.)$$

Kvadrat standardne devijacije, σ^2 , je **varijanca**.

2.2.2. Linearna regresija

Linearna regresija linearan je pristup modeliranju odnosa između dvije varijable. Neka su $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ i $Y = \{y_1, \dots, y_N\}$ dva uzorka, metodom najmanjih kvadrata dobiva se pravac $Y = aX + b$ takav da je:

$$\sum_{i=1}^N (y_i - ax_i - b)^2 \rightarrow \min. \quad (2.3.)$$

Nagib, a i odsječak na osi y , b , računaju se pomoću:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{n \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2}, \quad b = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^N y_i - a \sum_{i=1}^N x_i \right). \quad (2.4.)$$

U radu je za linearnu regresiju korištena funkcija OLS iz paketa `statsmodels.api`.

2.2.3. Statistički testovi

Vrsta statističke analize kojom se uspoređuju srednje vrijednosti i utvrđuje postoji li veća vjerojatnost da je razlika između njih slučajna je **t-test**. Ako se t-test provodi na jednom uzorku i predodređenoj srednjoj vrijednosti, statistika se računa pomoću:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}, \quad (2.5.)$$

gdje je \bar{x} srednja vrijednost uzorka, μ_0 je vrijednost određena u nul-hipotezi, s standardna devijacija i n duljina uzorka. nakon izračunate vrijednosti t -statistike i određenih stupnjeva slobode ($n - 1$), pronalazi se p -vrijednost pomoću tablice. Ako je p -vrijednost manja od određene razine značajnosti, može se reći da je razlika statistički značajna te se nul-hipoteza odbacuje.

F-test je statistički test kojim se mogu usporediti varijance ili standardne devijacije dva uzorka. Statistika F računa se pomoću:

$$F = \frac{S_X^2}{S_Y^2}, \quad (2.6.)$$

gdje su S_X^2 i S_Y^2 varijance dva uzorka X i Y duljina m i n uz $m - 1$ i $n - 1$ stupnjeva slobode. Za računanje korištena je funkcija `f.cdf` iz paketa `scipy.stats`.

3. Rezultati i diskusija

3.1. Usporedba ERA5 i radiosondaža

Uspoređeni su vertikalni profili temperature i relativne vlažnosti za vrijednosti dobivene iz reanalize ERA5 i izmjerenih radiosondaža u razdoblju od 2011. do 2020. godine. Pritom su postojala dva ograničenja koje je trebalo premostiti.

Prvi problem bio je ujednačavanje vertikalnih nivoa reanalize ERA5 i radiosondaža te je za provedbu usporedbe podataka uvedena jedinstvena vertikalna mreža koja će odgovarati vertikalnim nivoima definiranim određenim izobarnim plohama u reanalizi ERA5. U radiosondažnim profilima osim standardnih izobarnih ploha (prema meteorološkom ključu TEMP¹; 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 100, 70, 50, 30 i 10 hPa), postoji niz značajnih nivoa na različitim izobarnim plohama (prisutni i za temperaturu i za vlažnost atmosfere i za vjetar) koji se mijenjaju od termina do termina ovisno o obilježjima atmosferskih parametara. Kako su vertikalni nivoi definirani istim odabranim izobarnim plohama u reanalizi ERA5 kroz čitavo razdoblje te iako gušćim, učestalo varirajućim u radiosondažama, radi bolje usporedbe vertikalnih profila, radiosondažni podaci su linearno interpolirani na vertikalne nivoe definirane reanalizom ERA5 (Tablica 3.1.1.).

Drugi problem kod usporedbe bila je zadnja zabilježena visina tijekom mjerenja radiosondažom. Često radiosondaža ne doseže izobarne plohe 10 ili 5 hPa (35 – 40 km nad tlom), odnosno ne mjeri meteorološke parametre tako da se iznad tog tlaka, ako uopće postoje, nalaze usrednjene vrijednosti iz nepotpunog skupa podataka.

Uvodeći jedinstvenu vertikalnu mrežu, bilo je moguće napraviti na temelju interpoliranih vertikalnih profila prikaze za dvije lokacije, Zagreb i Zadar. Prikazi su rađeni za cijelu godinu te za dvije tipične sezone, zimsku (engl. *December, January, February*; DJF) i ljetnu (engl. *June, July, August*; JJA) te za dva doba dana ponoć i podne, kao i za njihov srednjak.

¹<https://meteor.geol.iastate.edu/classes/mt311/extras/Codul-TEMP.pdf>

Tablica 3.1.1. Izobarne plohe u reanalizi ERA5

Ploha	Tlak (hPa)
1	1000
2	975
3	950
4	925
5	900
6	875
7	850
8	825
9	800
10	775
11	750
12	700
13	650
14	600
15	550
16	500
17	450
18	400
19	350
20	300
21	250
22	225
23	200
24	175
25	150
26	125
27	100
28	70
29	50
30	30
31	20
32	10
33	7
34	5
35	3
36	2
37	1

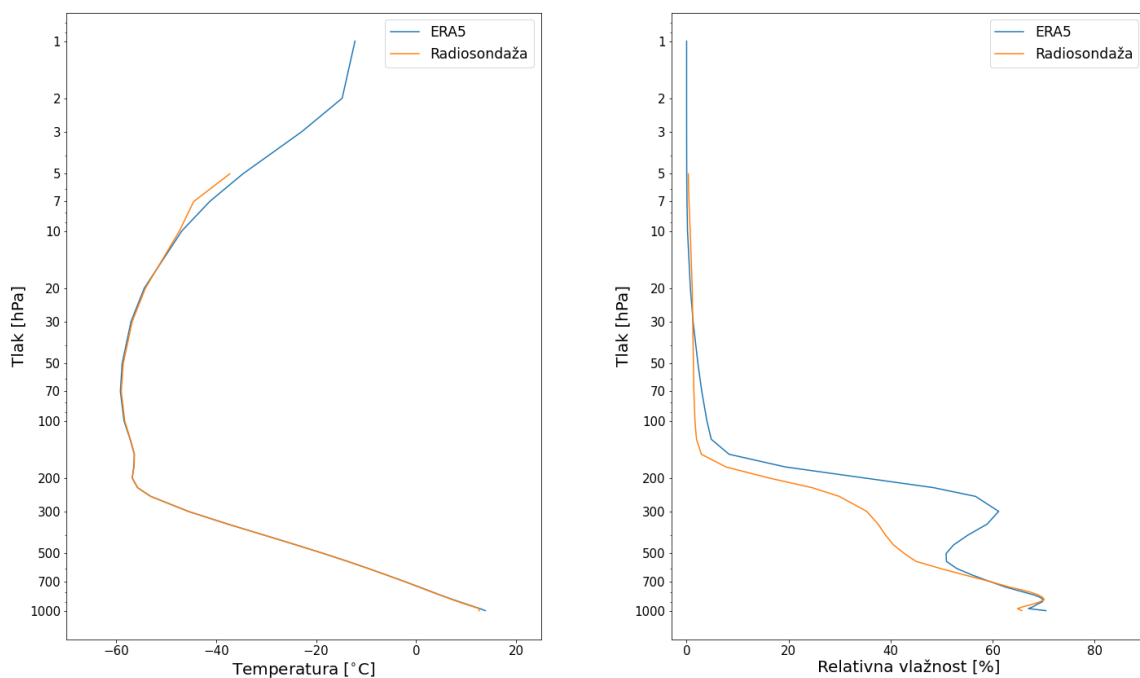
3.1.1. Referentni prikazi

Kao referentan rezultat, uzeta je usporedba u Zagrebu, tijekom cijele godine, usrednjena po danu te je prikazana na slici 3.1.1.1. Primjećuje se kako se temperatura iz reanalize ERA5 jako dobro podudara s radiosondažnim mjerenjima. Razlike se uočavaju na višim izobarnim nivoima (iznad 10 hPa) zbog već prethodno diskutiranog razloga. Relativna vlažnost iz reanalize ERA5 se vrlo dobro slaže do 700 hPa nakon čega reanaliza značajno precjenjuje stvarne vrijednosti sve do 40 hPa. Na tim visinama vrijednosti oba izvora podataka padaju na nulu zbog malog udjela vodene pare u atmosferi. Bolje slaganje temperature očekivano je zbog njezine sporije prostorno-vremenske varijabilnosti pa tako i jednostavnijeg modeliranja u odnosu na veličine povezane s vodenom parom.

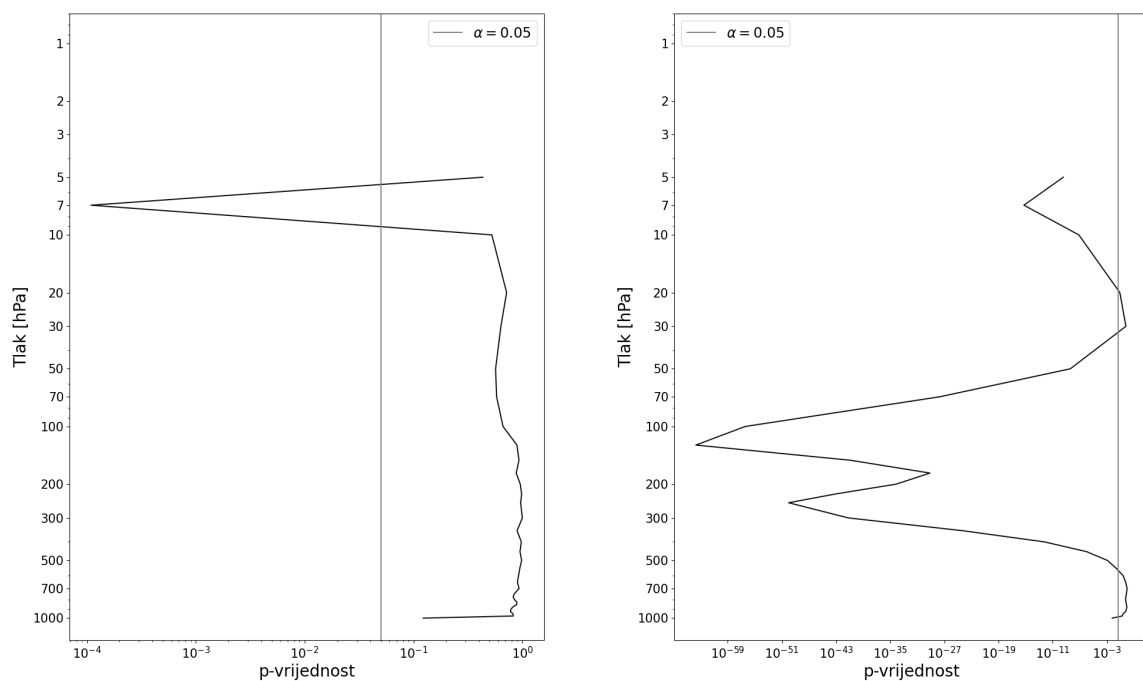
Na slici 3.1.1.2. prikazan je pripadajući t-test po nivoima za usporedbu srednjih vrijednosti. Uz razinu značajnosti od 5 % vidimo da je razlika u temperaturama dovoljno mala da rezultat nije statistički značajan na svim nivoima, dok se za relativnu vlažnost pokazuje kako je za većinu nivoa, osim onih u kojemu se dvije krivulje srednjih vrijednosti preklapaju, statistički značajan.

Na slici 3.1.1.3. su grafovi standardnih devijacija po nivoima. Standardna devijacije temperature su za svaki tlak manje kod ERA5 nego kod radiosondaža, no oba grafa se slično kreću po nivoima dok za relativnu vlažnost podaci iz radiosondaža imaju mnogo veću standardnu devijaciju za veće tlakove od ERA5. Razlog tome je što ERA5 prikazuje srednje stanje po ćeliji koja je određena prostornom razlučivosti modela. Takve usrednjene vrijednosti manje su varijabilne od stvarnih vrijednosti dobivenih radiosondažnim mjerenjima.

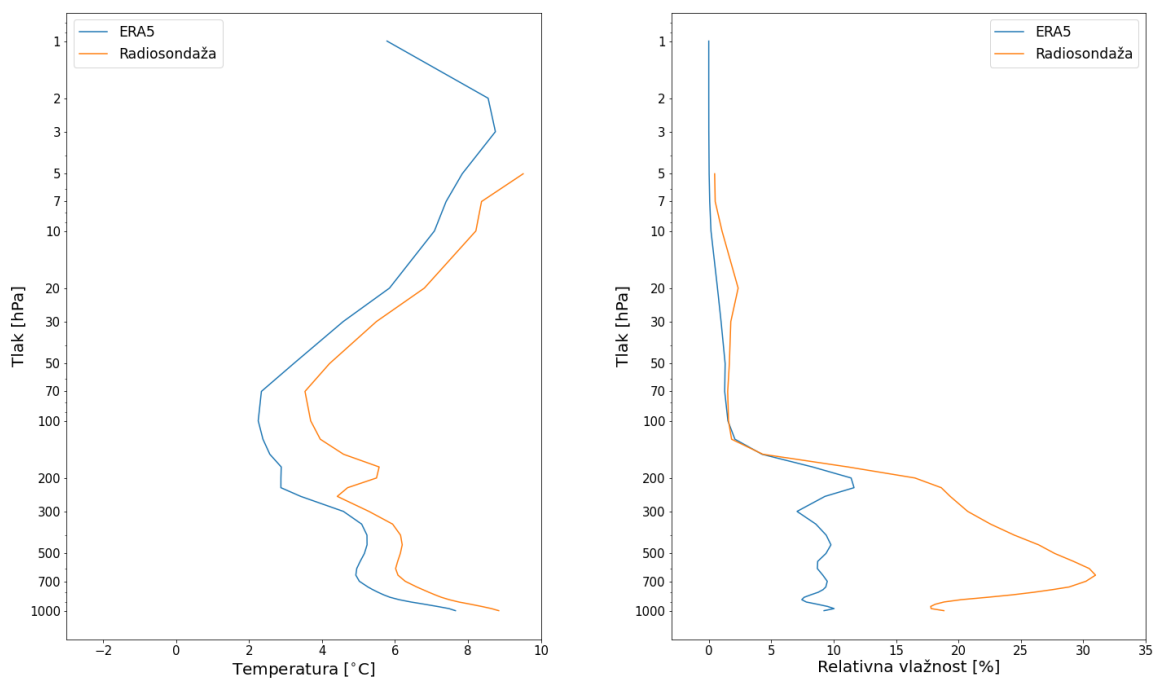
Pripadajući F-test nalazi se na slici 3.1.1.4. koji potvrđuje statističku značajnost u razlikama standardnih devijacija temperature i relativne vlažnosti.



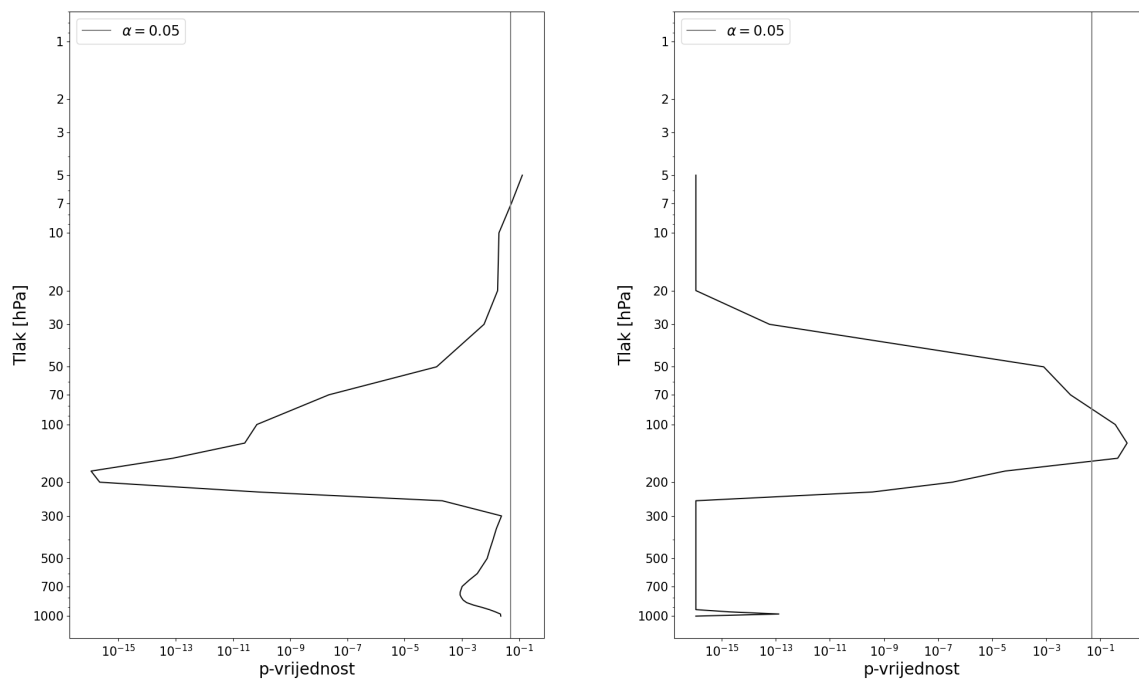
Slika 3.1.1.1: Usporedba srednjih vrijednosti vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za Zagreb za razdoblje od 2011. do 2020. godine.



Slika 3.1.1.2: T-test za usporedbu srednjih vrijednosti vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za Zagreb za razdoblje od 2011. do 2020. godine.



Slika 3.1.1.3: Usporedba standardnih devijacija vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za Zagreb za razdoblje od 2011. do 2020. godine.

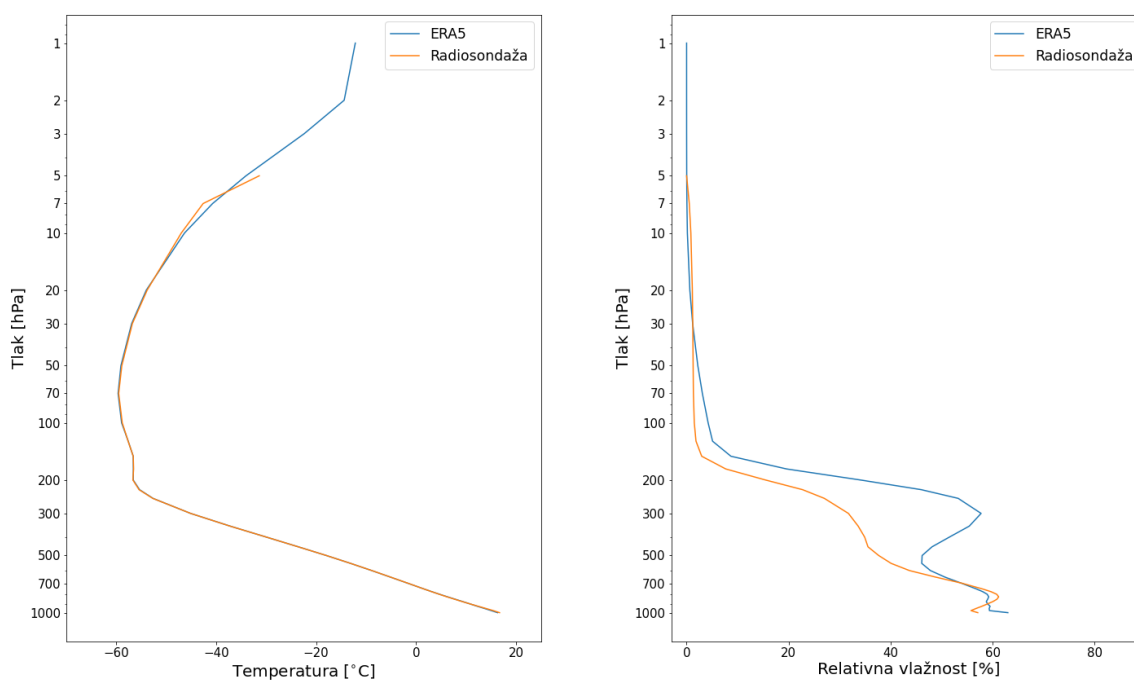


Slika 3.1.1.4: F-test za usporedbu standardnih devijacija vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za Zagreb za razdoblje od 2011. do 2020. godine.

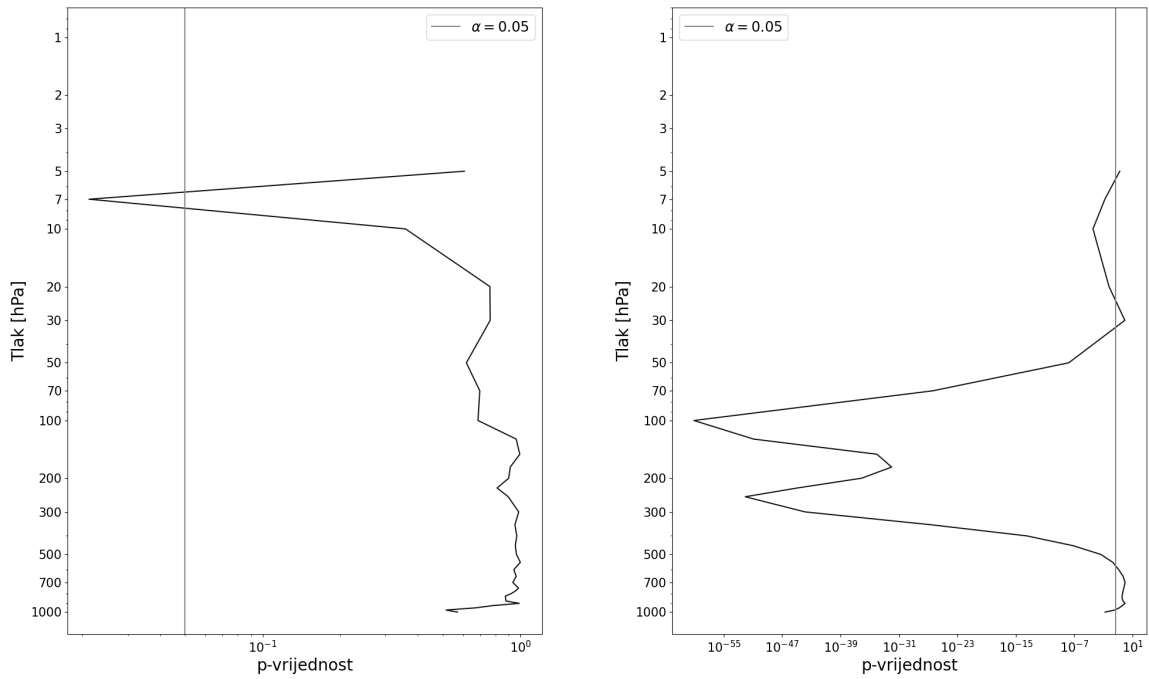
3.1.2. Utjecaj lokacije

Za proučavanje utjecaja lokacije, parametri sezone i doba dana ostaju nepromijenjeni dok se za lokaciju uzima Zadar. Na grafu srednjih vrijednosti na slici 3.1.2.1. ne vidi se znatna promjena u odnosu na Zagreb osim što se kod relativne vlažnosti iz reanalize ERA5 ne uočava inverzija pri tlu koja postoji u radiosondažnim mjerenjima. Pripadajući t-test (Slika 3.1.2.2.) time također daje slične rezultate kao za Zagreb.

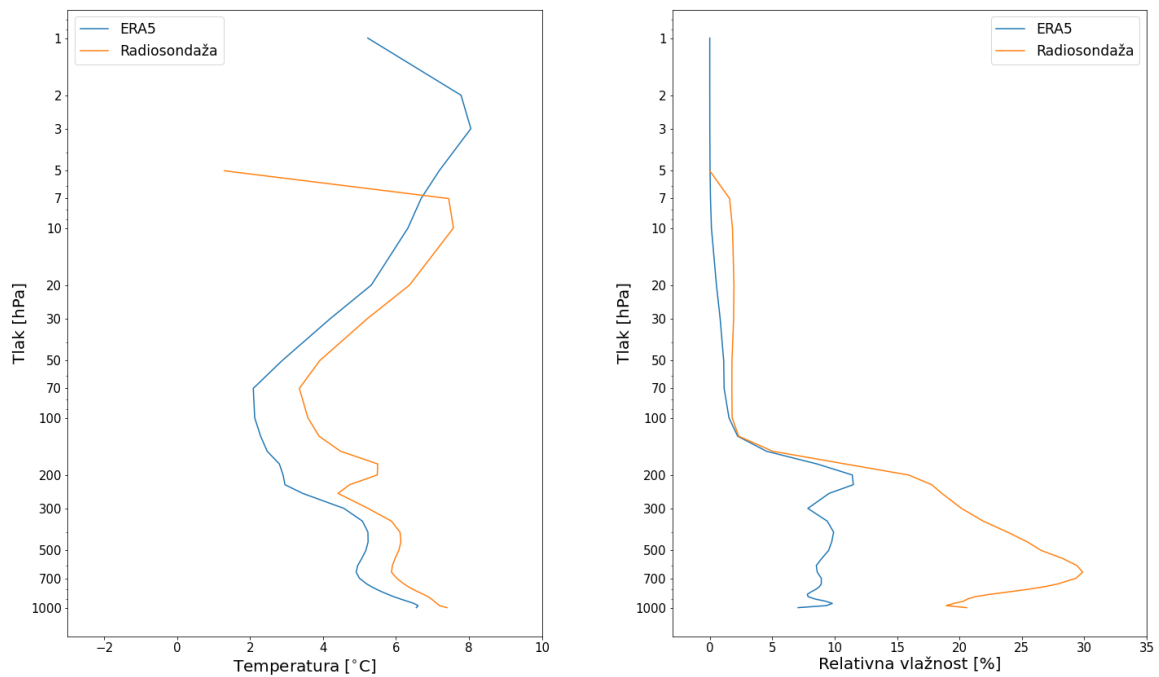
Kod prikaza standardne devijacije (Slika 3.1.2.3.) također se ne primjećuje bitna razlika između Zagreba i Zadra sa sličnim razlikama između reanalize ERA5 i radiosondaža po vertikalnim nivoima. Zbog toga se i F-testovi (Slika 3.1.2.4.) ne razlikuju od onih za Zagreb. Zaključak je stoga da promjena lokacije (Zagreb ili Zadar), ne utječe bitno na razliku između vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža.



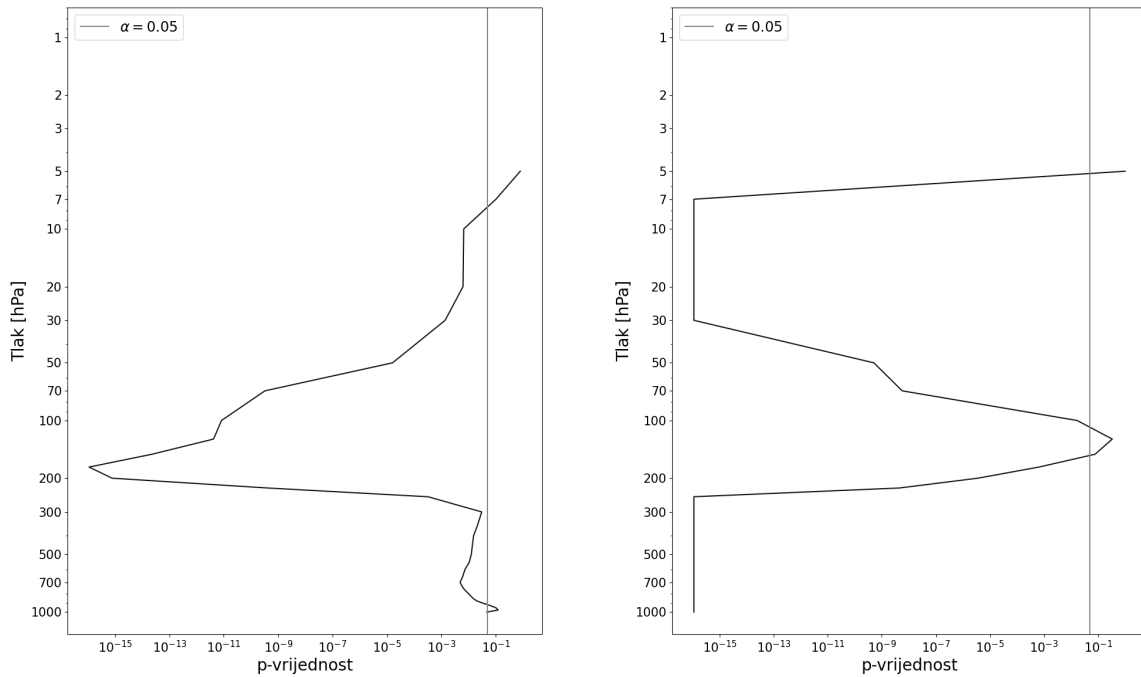
Slika 3.1.2.1: Usporedba srednjih vrijednosti vertikalnih profila ERA5 i radiosondaža za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za Zadar za razdoblje od 2011. do 2020. godine.



Slika 3.1.2.2: T-test za usporedbu srednjih vrijednosti vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za Zadar za razdoblje od 2011. do 2020. godine.



Slika 3.1.2.3: Usporedba standardnih devijacija vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za Zadar za razdoblje od 2011. do 2020. godine.



Slika 3.1.2.4: F-test za usporedbu standardnih devijacija vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za Zadar za razdoblje od 2011. do 2020. godine.

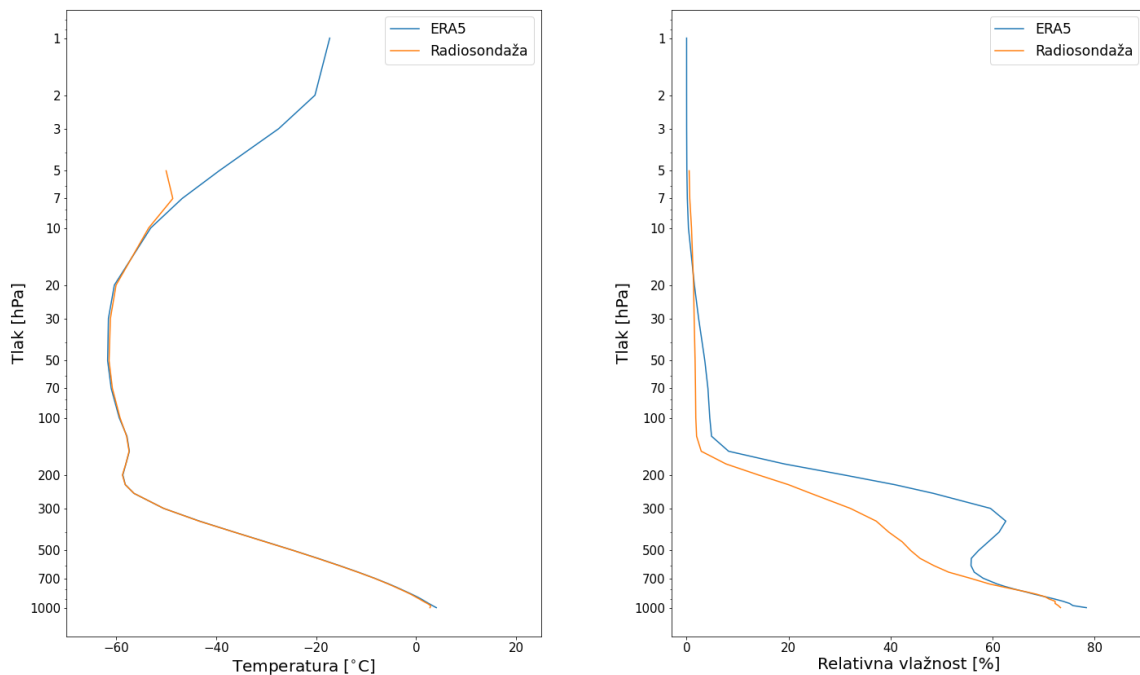
3.1.3. Utjecaj sezone

Kako bi se provjerio utjecaj sezone na razlike između vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža, uz podatke za cijelu godinu za Zagreb, tijekom cijelog dana, promatrane su i zimska sezona (DJF) i ljetna sezona (JJA).

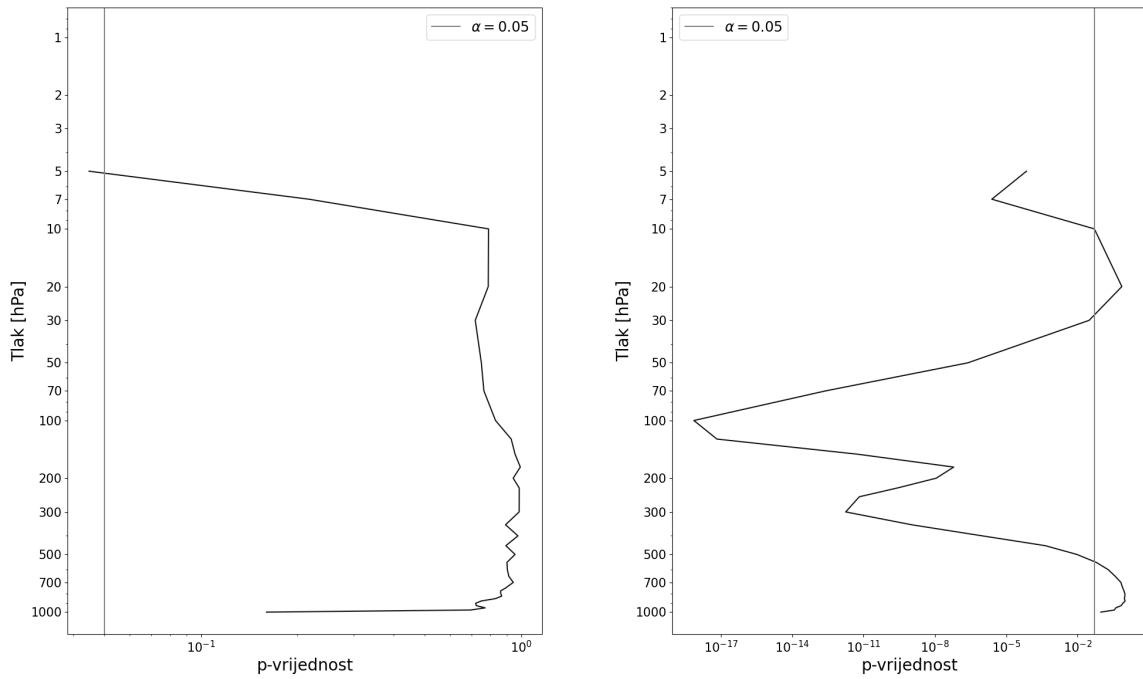
Zimsku sezonu (DJF) čine tri mjeseca, prosinac, siječanj i veljača za razdoblje od 2011. do 2020. godine formirajući zimsku sezonu s time da se uz siječanj i veljaču iz jedne godine uzima prosinac iz prethodne.

Slike 3.1.3.1. i 3.1.3.2. prikazuju usporedbu srednjih sezonskih zimskih vrijednosti temperature i relativne vlažnosti te pripadajuće t-testove. Kod temperatura nema znatnih promjena dok inverzija relativne vlažnosti pri tlu koja postoji kod referentnih profila za oba skupa podataka se ne uočava u zimskoj sezoni. Potrebna je detaljnija analiza cijelogodišnjih i sezonskih podataka kako bi se došlo do razloga nepostojanja inverzije. Također je t-testom potvrđeno kako usporedba temperatura nije statistički značajna za sve vertikalne nivoe dok je značajna za skoro sve nivoe za relativnu vlažnost.

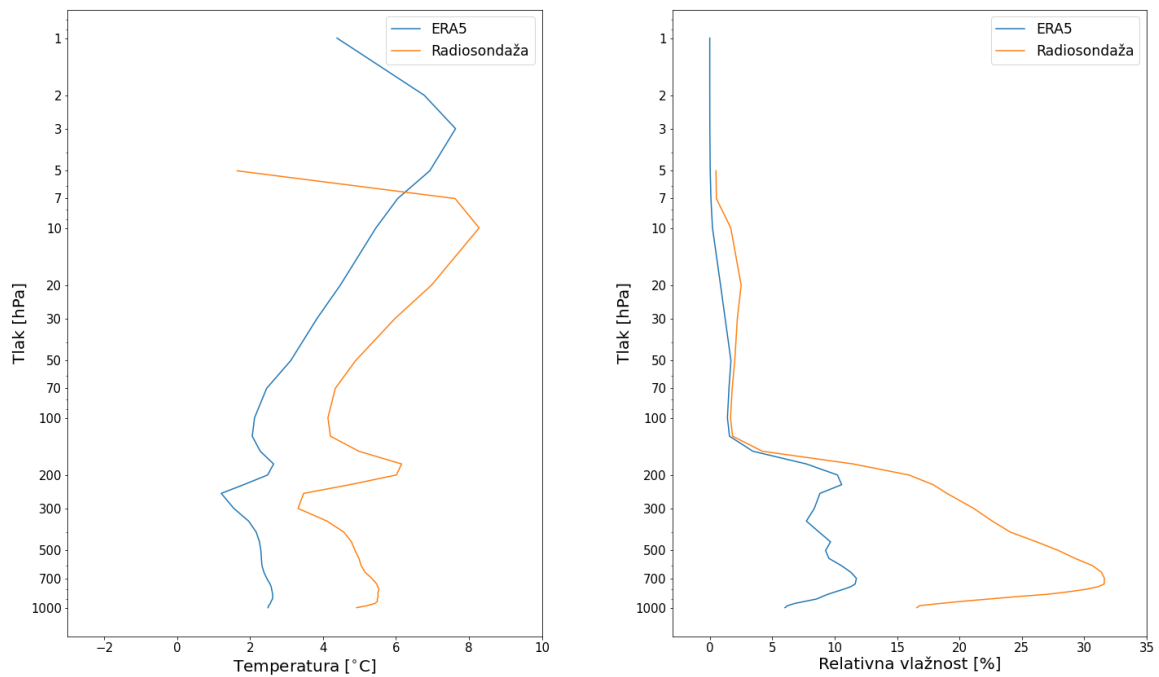
Na slikama 3.1.3.3. i 3.1.3.4. prikazane su usporedbe standardnih devijacija i pripadajućeg F-testa. U odnosu na referentnu usporedbu standardnih devijacija (Slika 3.1.2.3), razlika temperature između podataka iz reanalize ERA5 i radiosondaža veća je za zimsko razdoblje te iznosi između 2 °C i 3 °C na vertikalnim nivoima umjesto 1 °C do 2 °C kao što je vidljivo na referentnom prikazu. Ta pojava se može pripisati nesavršenosti reanalize. Standardna devijacija temperature također je manja u oba skupa podataka za niže vertikalne nivoe zbog manje varijacije u vrijednostima temperature kroz zimsko razdoblje u odnosu na cijelu godinu. Kod standardnih devijacija relativne vlažnosti nema veće razlike u odnosu na referentni profil. Zbog veće razlike u standardnim devijacijama temperature, p vrijednosti F-testa su manje te je time rezultat statistički značajniji.



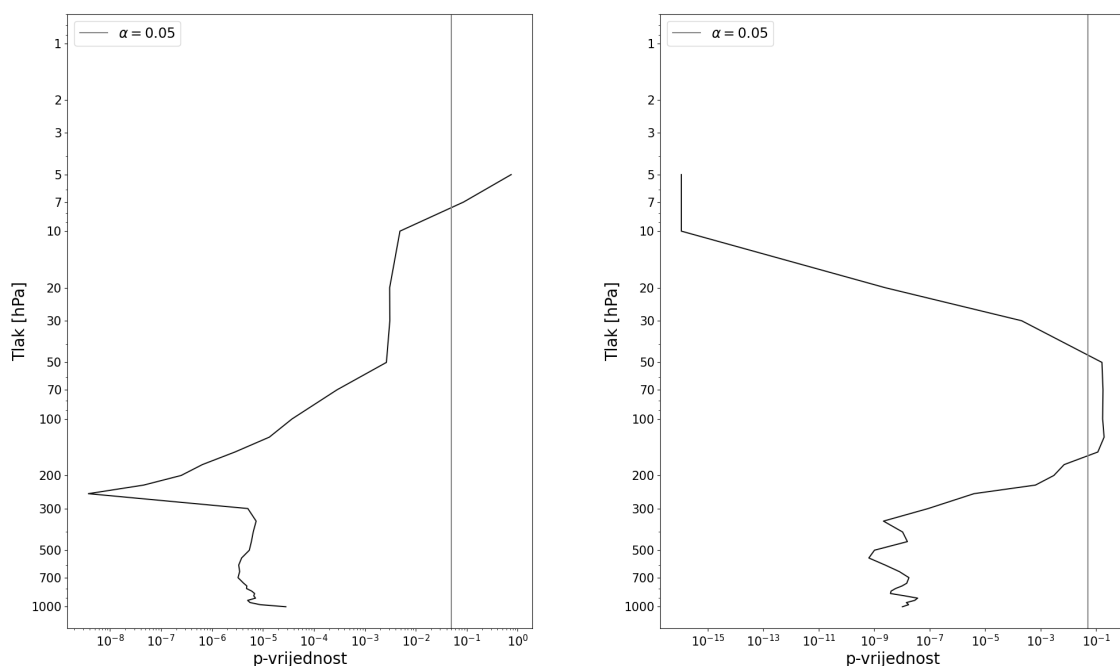
Slika 3.1.3.1: Usporedba srednjih vrijednosti vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža u zimskoj sezoni za Zagreb: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za razdoblje od 2011. do 2020. godine.



Slika 3.1.3.2: T-test za usporedbu srednjih vrijednosti vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža u zimskoj sezoni za Zagreb: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) u zimskoj sezoni za Zagreb za razdoblje od 2011. do 2020. godine.



Slika 3.1.3.3: Usporedba standardnih devijacija vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža u zimskoj sezoni za Zagreb: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za razdoblje od 2011. do 2020. godine.



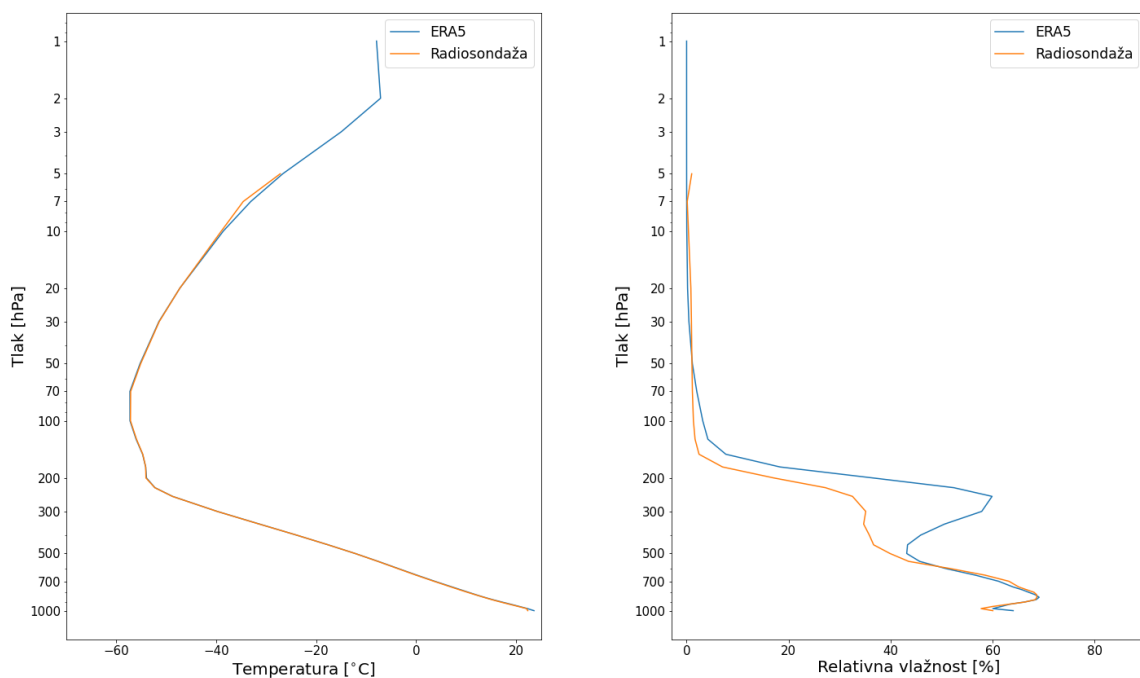
Slika 3.1.3.4: F-test za usporedbu standardnih devijacija vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža u zimskoj sezoni za Zagreb: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za razdoblje od 2011. do 2020. godine.

Ljetnu sezonu (JJA) čine mjeseci lipanj, srpanj i kolovoz u razdoblju od 2011. do 2020. godine.

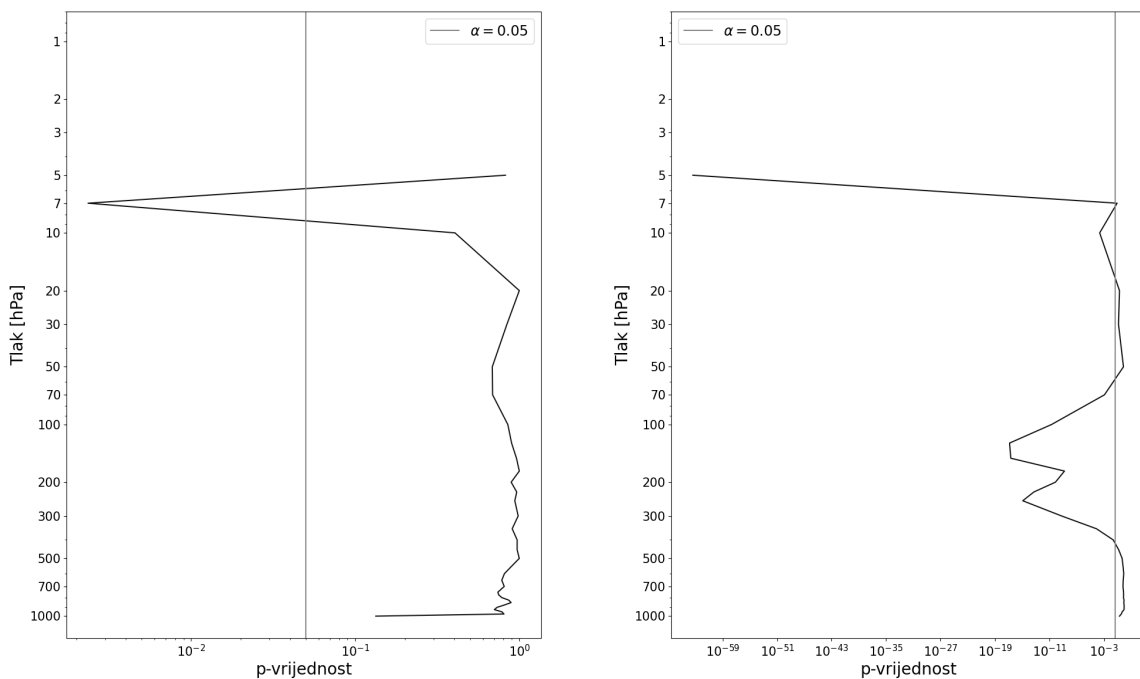
Slike 3.1.3.5. i 3.1.3.6. prikazuju usporedbu srednjih ljetnih vrijednosti temperature i relativne vlažnosti te pripadajuće t-testove. Inverzija relativne vlažnosti pri tlu koja je odsutna u zimskoj sezoni, u ljetnoj je povećana u odnosu na cijelu godinu.

Usporedba standardnih devijacija (Slika 3.1.3.7.) ponovo pokazuje manje vrijednosti za oba skupa podataka, no ovoga puta i na višim vertikalnim nivoima uz također i veću razliku između podataka iz reanalize ERA5 i radiosondaža. Standardna devijacija relativne vlažnosti je manja za više vertikalne nivoe za oba skupa podataka. F-test (Slika 3.1.3.8.) ovoga puta pokazuje kako su razlike između standardnih devijacija temperature statistički značajne na svim vertikalnim nivoima za odabranu razinu značajnosti.

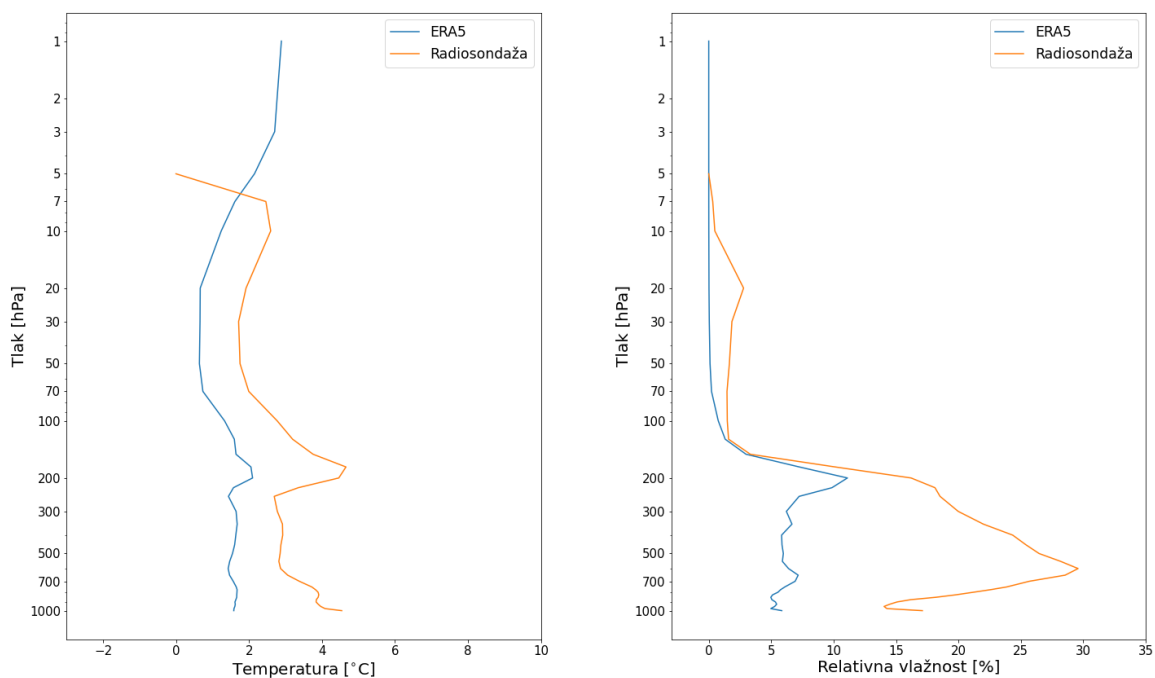
Odabir sezone dakle utječe na odnos između podataka od ERA5 i radiosondaža. Inverzija relativne vlažnosti pri tlu se povećava u ljetnoj ili nestaje u zimskoj sezoni, dok se standardna devijacija temperature smanjuje za oba skupa podataka u obje sezone. Standardna devijacija je još uvijek manja kod ERA5 te se razlika povećava u odnosu na radiosondaže u obje sezone.



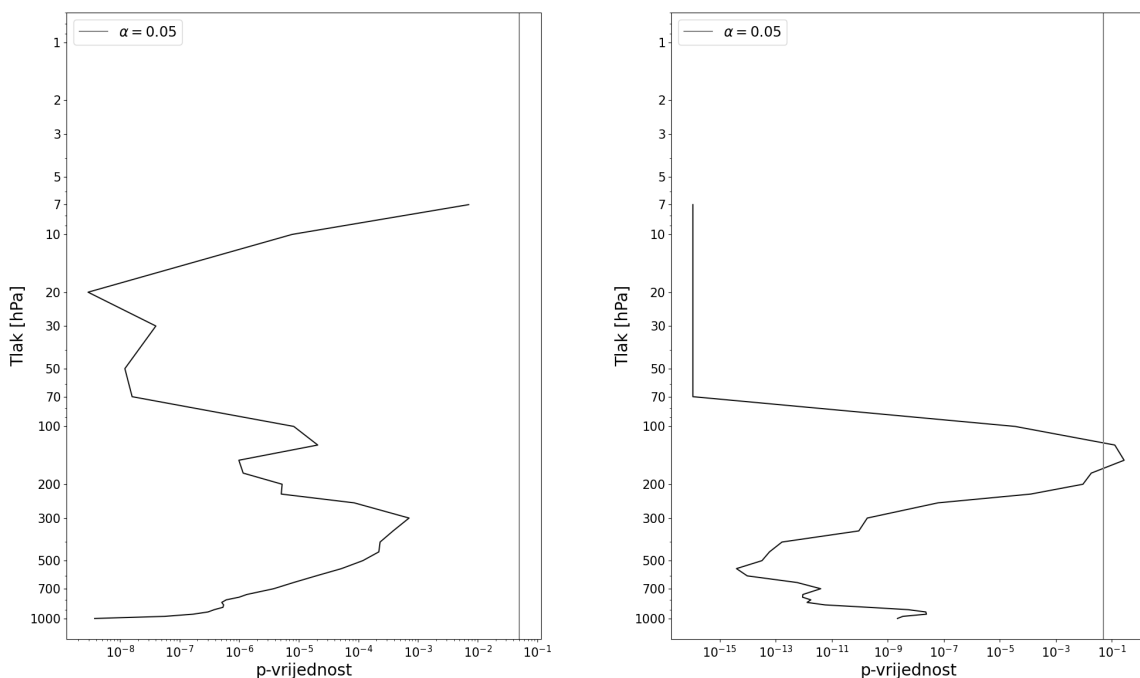
Slika 3.1.3.5: Usporedba srednjih vrijednosti vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža u ljetnoj sezoni za Zagreb: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za razdoblje od 2010. do 2020. godine.



Slika 3.1.3.6: T-test za usporedbu srednjih vrijednosti vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža u ljetnoj sezoni za Zagreb: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za razdoblje od 2010. do 2020. godine.



Slika 3.1.3.7: Usporedba standardnih devijacija vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža u ljetnoj sezoni za Zagreb: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za razdoblje od 2010. do 2020. godine.



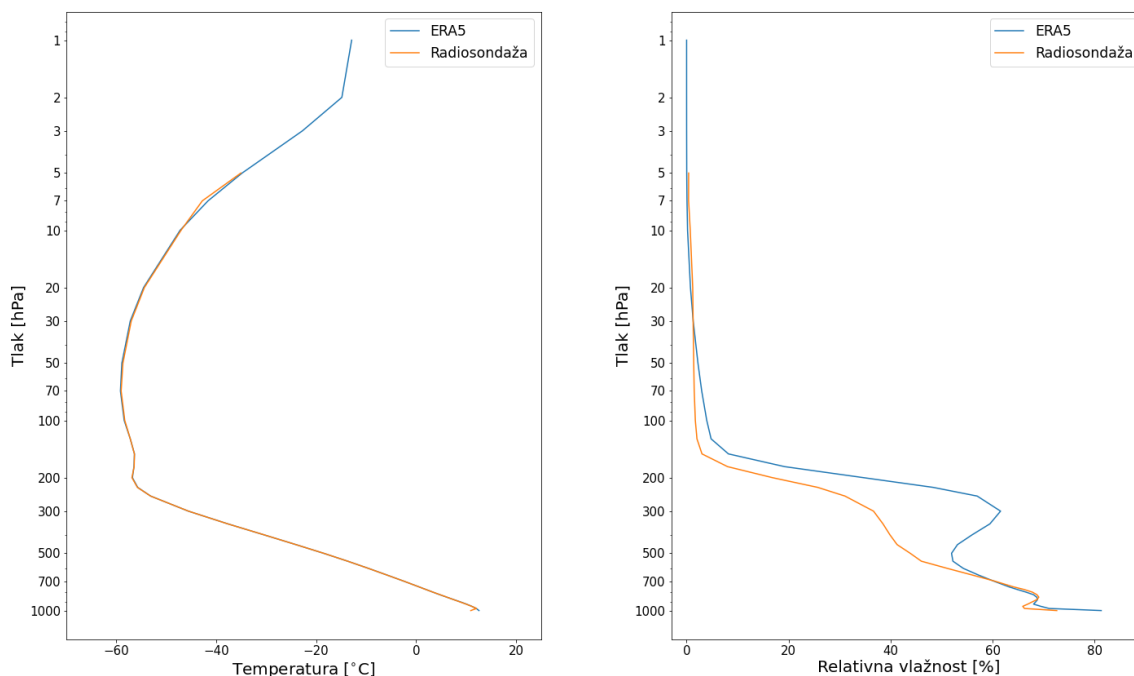
Slika 3.1.3.8: F-test za usporedbu standardnih devijacija vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža u ljetnoj sezoni za Zagreb: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za razdoblje od 2010. do 2020. godine.

3.1.4. Utjecaj doba dana

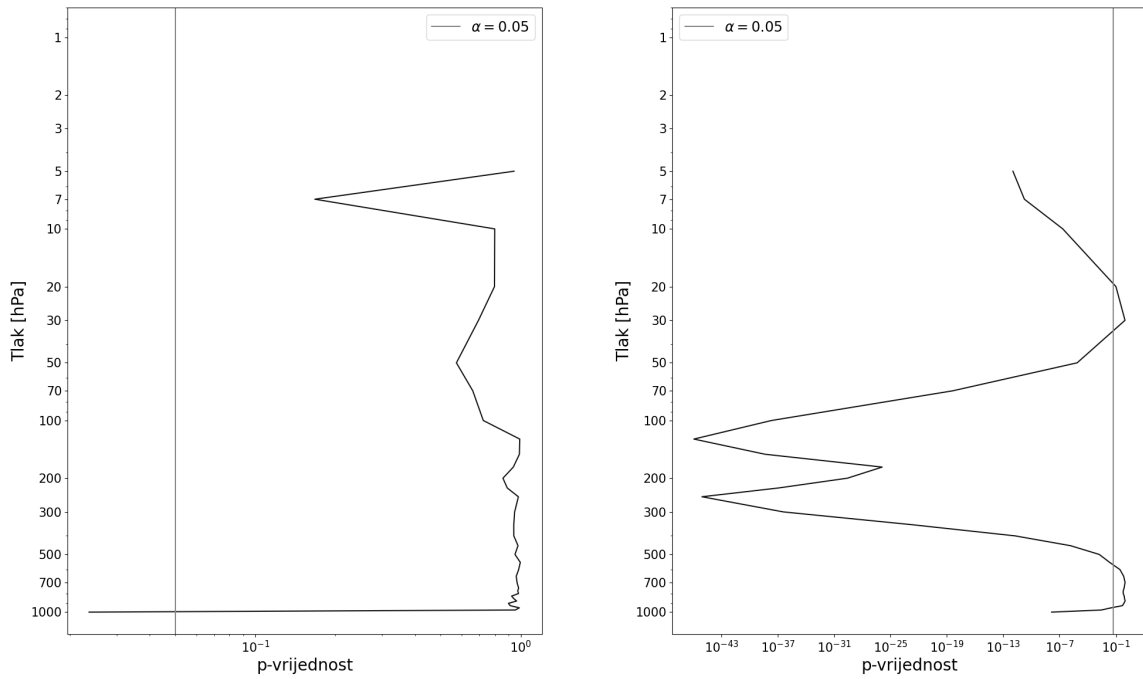
Za provjeru utjecaja doba dana na razlike između vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža, napravljena je analiza samo s podacima od ponoći i podneva te se uspoređuje s referentnim profilima gdje su njihove vrijednosti usrednjene tijekom cijelog dana. Ostali parametri ostaju nepromijenjeni.

Usporedba profila za **ponoć** prikazana je na slici 3.1.4.1. Rezultati se znatno ne razlikuju od referentnih osim povećane relativne vlažnosti iz reanalize ERA5 pri tlu. Time je i pripadajući t-test (Slika 3.1.4.2.) vrlo sličan referentnom. Standardne devijacije su također slične (Slika 3.1.4.3.), a i F-testovi (Slika 3.1.4.4.).

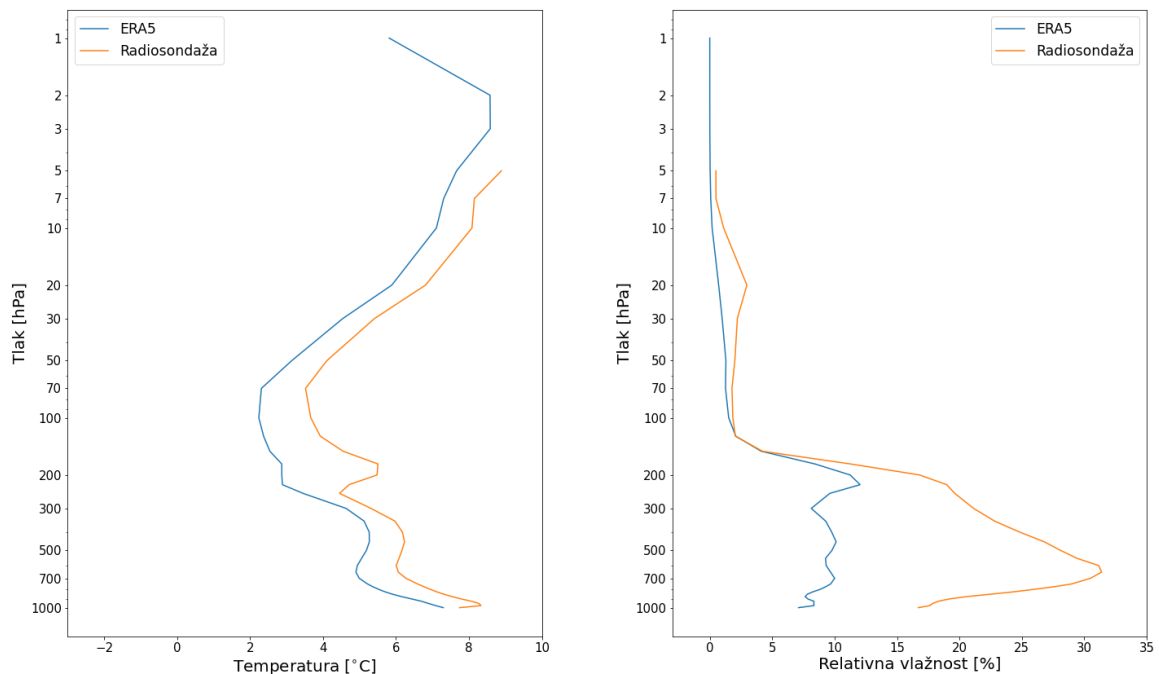
Na slikama usrednjenih profila srednjih vrijednosti u **podne** (Slika 3.1.4.5.), t-testa (Slika 3.1.4.6.), standardnih devijacija (Slika 3.1.4.7.) te F-testa (Slika 3.1.4.8.) uočava se znatnija razlika jedino za relativnu vlažnost pri tlu gdje se ponovo vidi pojačano obilježje inverzije u odnosu na odabran referentni skup podataka. Gledajući rezultate i za 00 UTC i za 12 UTC, utjecaj doba dana na krajnji rezultat nije jako primjetan.



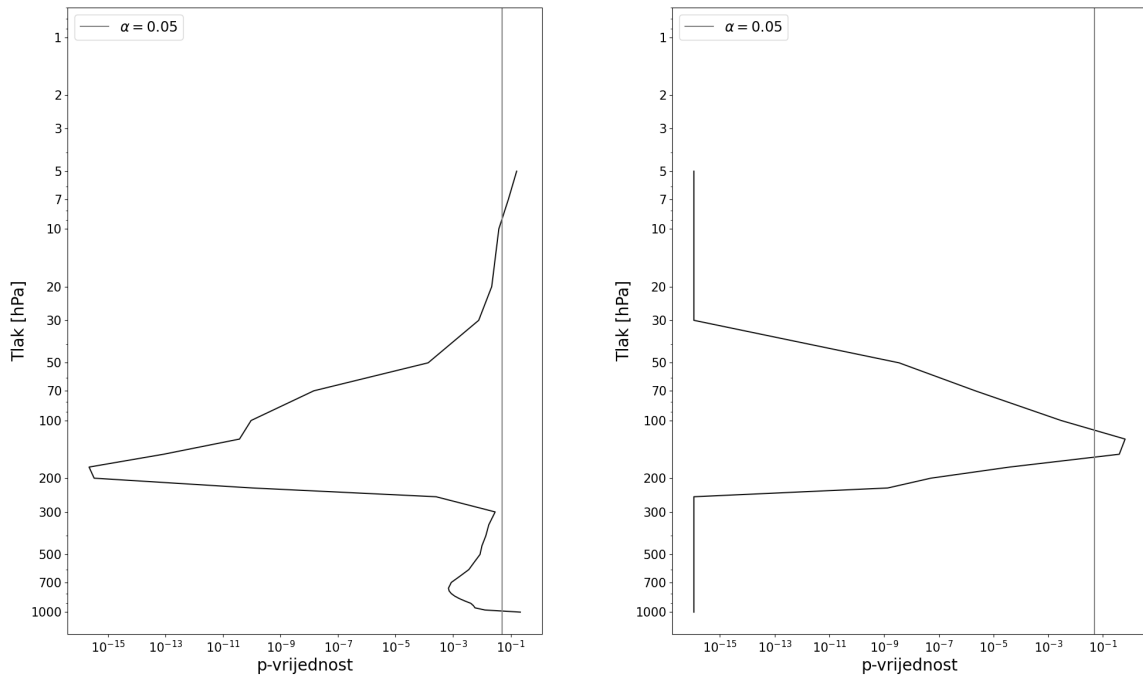
Slika 3.1.4.1: Usporedba srednjih vrijednosti vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža za Zagreb, tijekom cijele godine u ponoć: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za razdoblje od 2011. do 2020. godine.



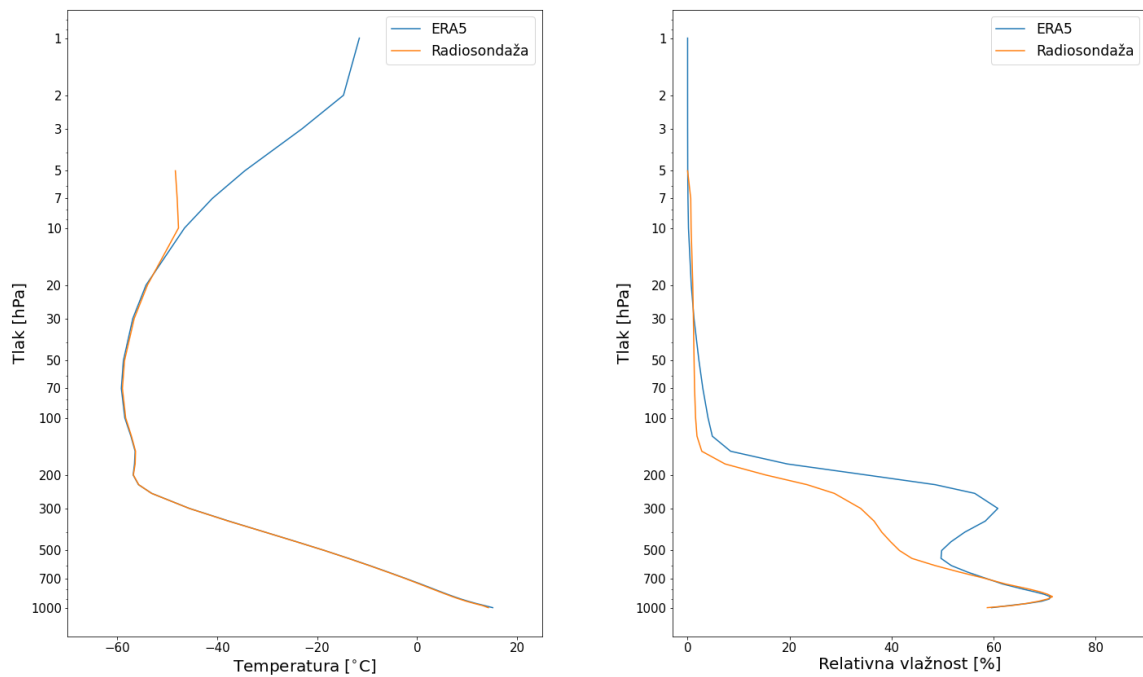
Slika 3.1.4.2: T-test za usporedbu srednjih vrijednosti vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža za Zagreb, tijekom cijele godine u ponoć: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za razdoblje od 2011. do 2020. godine.



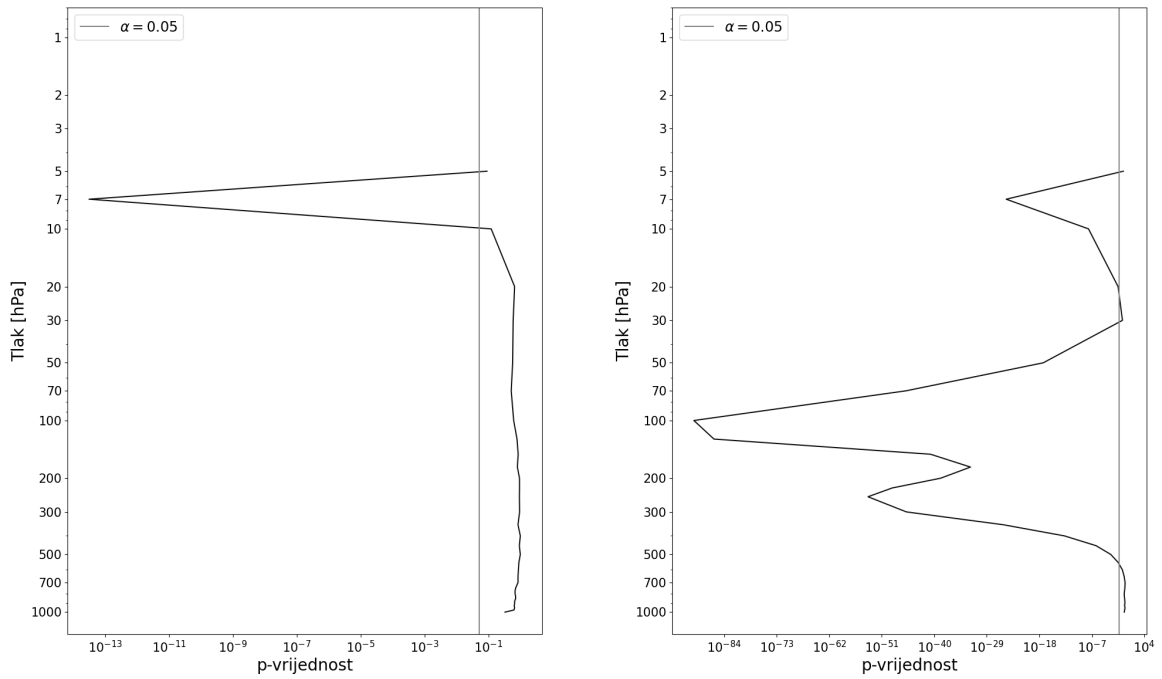
Slika 3.1.4.3: Usporedba standardnih devijacija vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža za Zagreb, tijekom cijele godine u ponoć: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za razdoblje od 2011. do 2020. godine.



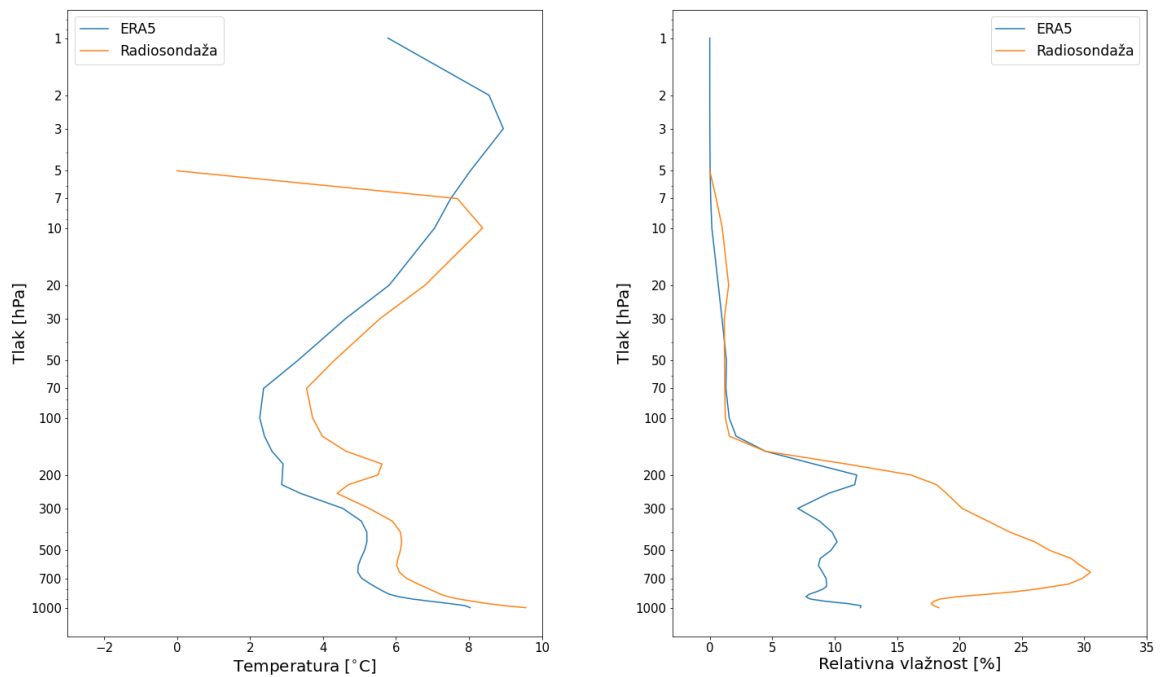
Slika 3.1.4.4: F-test za usporedbu standardnih devijacija vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža za Zagreb, tijekom cijele godine u ponoć: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za razdoblje od 2011. do 2020. godine.



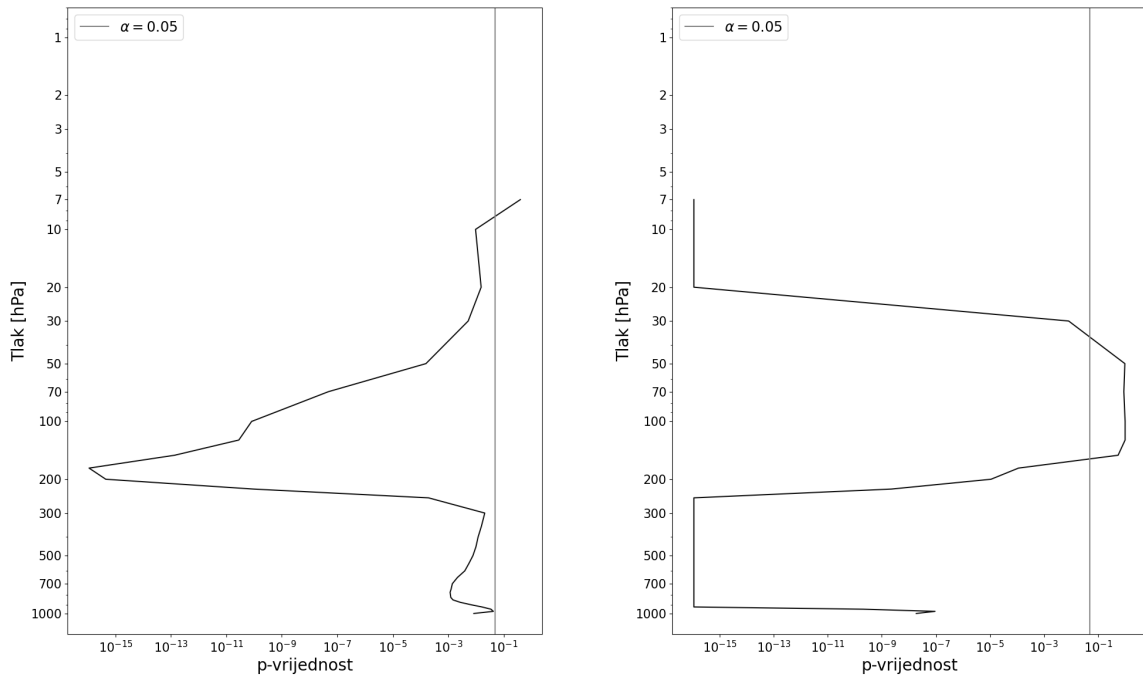
Slika 3.1.4.5: Usporedba srednjih vrijednosti vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža za Zagreb, tijekom cijele godine u podne: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za razdoblje od 2011. do 2020. godine.



Slika 3.1.4.6: T-test za usporedbu srednjih vrijednosti vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža za Zagreb, tijekom cijele godine u podne: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za razdoblje od 2011. do 2020. godine.



Slika 3.1.4.7: Usporedba standardnih devijacija vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža za Zagreb, tijekom cijele godine u podne: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za razdoblje od 2011. do 2020. godine.



Slika 3.1.4.8: F-test za usporedbu standardnih devijacija vertikalnih profila iz reanalize ERA5 i radiosondaža za Zagreb, tijekom cijele godine u podne: za temperaturu (lijevo) i relativnu vlažnost (desno) za razdoblje od 2011. do 2020. godine.

3.2. Anomalije

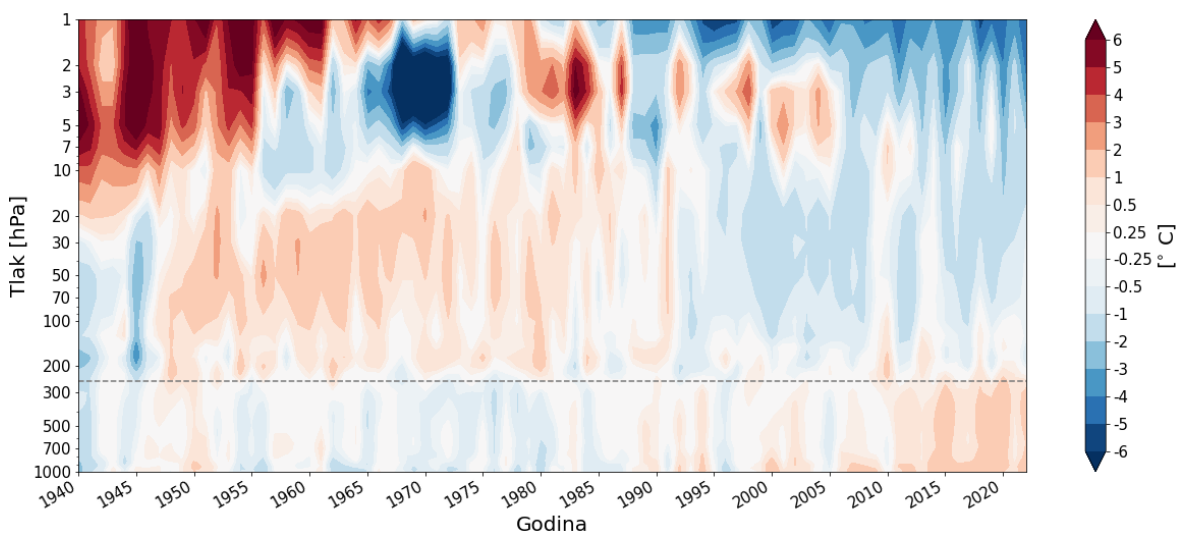
Za klimatološko razdoblje od 1940. do 2022. godine, izračunate su i grafički prikazane mjesečne anomalije temperature, relativne vlažnosti i specifične vlažnosti iz podataka reanalize ERA5. Anomalije su dobivene oduzimanjem srednje mjesečne vrijednosti od klimatološkog srednjaka. Analiza je provedena za Zagreb i Zadar, za cijelu godinu te za zimsku i ljetnu sezonu. Također je napravljena analiza i na dnevnoj skali; za cijeli dan te ponoć i podne.

3.2.1. Referentni prikazi

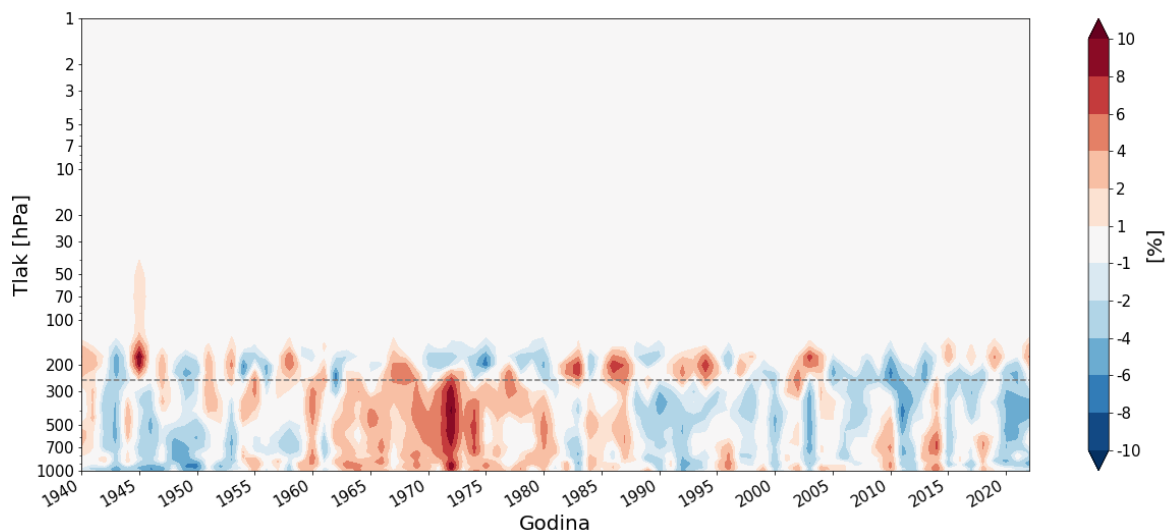
Kao referentan rezultat ponovo je odabran Zagreb, tijekom cijele godine, usrednjen po danu. Na slici 3.2.1.1. vidljiva je višegodišnja promjena temperaturnih anomalija. Od 60-ih do 80-ih godina prošlog stoljeća uočava se hladnije odstupanje od klimatološke normale u nižim slojevima atmosfere. Istovremeno uz zahladnjenje u nižim slojevima prisutno je zatopljenje u višim slojevima troposfere i stratosfere. Takav rezultat nije neočekivan i u skladu je s npr. rezultatima dobivenim za klimatske indekse koji se bazi-
raju isključivo na temperaturnim obilježjima i primjenjuju u agrometeorologiji. Iznosi temperaturnih (bio)klimatskih indeksa ukazuju na izraženije negativno odstupanje za kontinentalne postaje i to na području Balkanskog poluotoka, a i šire; npr. u Sloveniji (Vršič i sur., 2014), Italiji (Fioravanti i sur., 2016) i Srbiji (Ruml i sur., 2022). Početak 80-ih u 20. stoljeću se često uzima kao kritično razdoblje u vremenskom nizu kada trendovi temperature, a samim tim i svi (bio)klimatski indeksi koji ju koriste kao osnovu, počinju rasti. Prema analizama u objavljenim istraživanjima (npr. Broecker, 1975.) trend smanjenja temperature sredinom 20. stoljeća vjerojatno je bio posljedica široko rasprostranjenog smanjenja površinskog Sunčevog zračenja. U istoj studiji zaključeno je da je opaženo hladnije razdoblje uzrokovano prirodnim klimatskim ciklusom koji je privremeno nadvladao doprinos zagrijavanja uslijed povećane koncentracije CO₂ u atmosferi. Broecker je dao prognozu u kojoj će učinak zagrijavanja atmosfere premašiti učinak hlađenja uzrokovan prirodnom varijabilnošću klime zbog daljnjeg eksponencijalnoga porasta koncentracije plinova staklenika prema kraju stoljeća što je vidljivo i ovdje, na slici 3.2.1.1. U 21. stoljeću trend povećanja temperature u donjim slojevima troposfere se nastavlja te je istovremeno popraćeno s hlađenjem stratosfere zbog povećane količine koncentracije plina CO₂. Ovakav rezultat za troposferu i stratosferu u

skladu je s rezultatima (Diaz i sur., 2011 i Manabe, 1967).

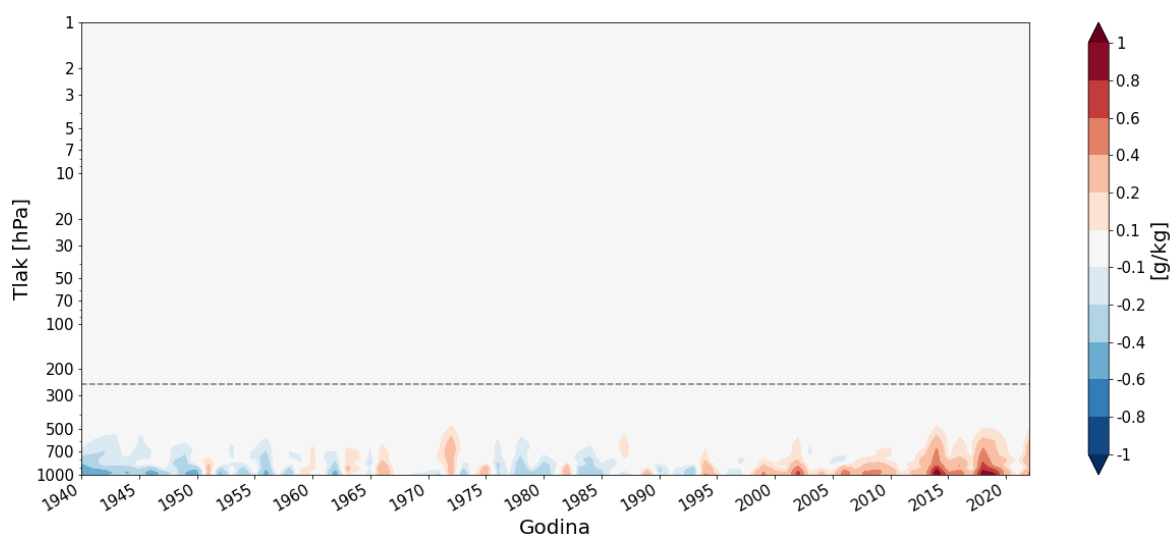
Anomalije relativne vlažnosti (Slika 3.2.1.2.) postoje do 100 hPa zbog nedostatka vodene pare na višim vertikalnim nivoima. Uočavaju se pozitivne anomalije u prethodno diskutiranom razdoblju negativnih anomalija temperature zraka od 60-ih do 80-ih godina prošlog stoljeća te pretežito negativne anomalije od 90-ih godina prošlog stoljeća do danas. Na grafičkom prikazu anomalija specifične vlažnosti (Slika 3.2.1.3.) vidi se zadnjih godina porast specifične vlažnosti kao što je i očekivano zbog rasta temperature zraka u tim slojevima jer prema Clausius-Clapeyron-ovoj jednadžbi, veća temperatura znači pojačano primanje vodene pare u atmosferu.



Slika 3.2.1.1: Anomalije temperature u Zagrebu, tijekom cijele godine, usrednjene po danu, u isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.



Slika 3.2.1.2: Anomalije relativne vlažnosti u Zagrebu, tijekom cijele godine, usrednjene po danu, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.

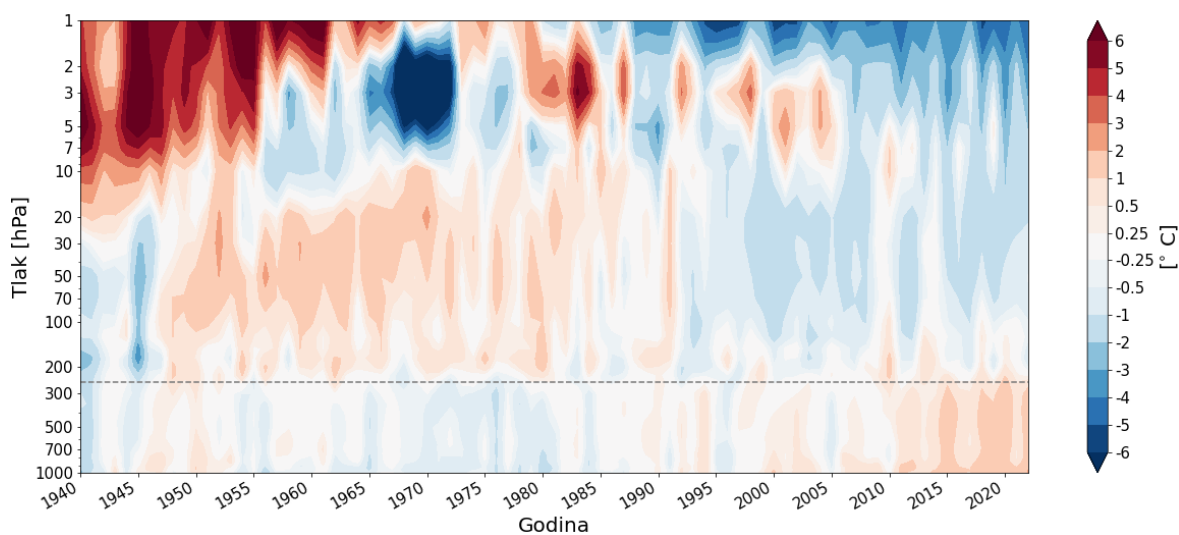


Slika 3.2.1.3: Anomalije specifične vlažnosti u Zagrebu, tijekom cijele godine, usrednjene po danu, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.

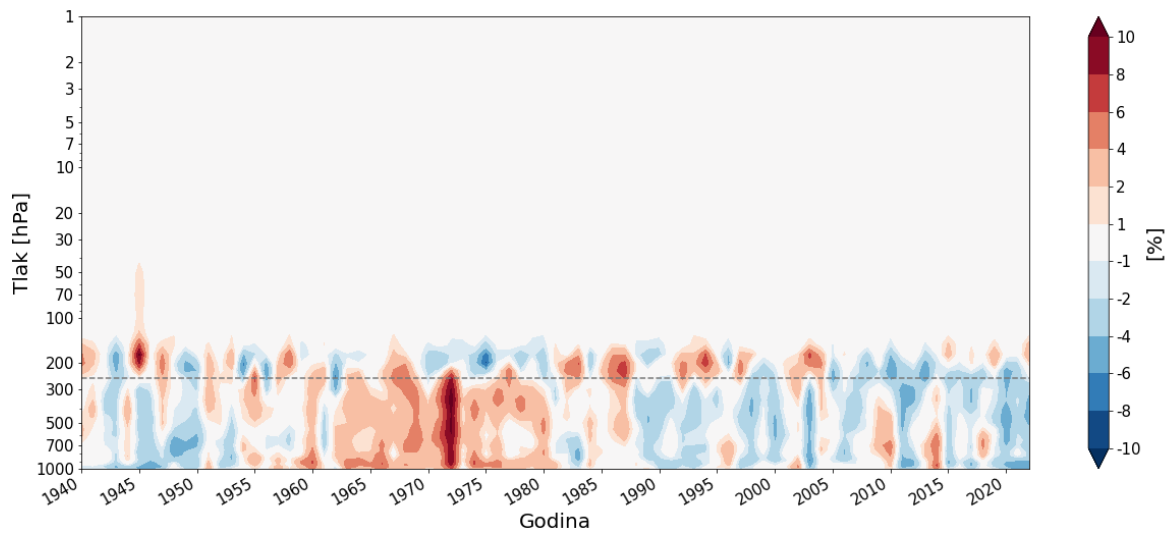
3.2.2. Utjecaj lokacije

Kako bi se proučio utjecaj lokacije na anomalijama, uspoređuju se rezultati za Zadar s referentnim grafičkim prikazima. Slike 3.2.2.1. – 3.2.2.3. prikazuju anomalije temperature, relativne vlažnosti i specifične vlažnosti. Pri tlu se uočavaju blaže i pozitivne i negativne anomalije temperature što sugerira na manje intenzivne toplije i hladnije mjesece kada se uspoređuje s cijelim razdobljem. U ostatku vertikalnih nivoa ne primjećuje se znatna razlika.

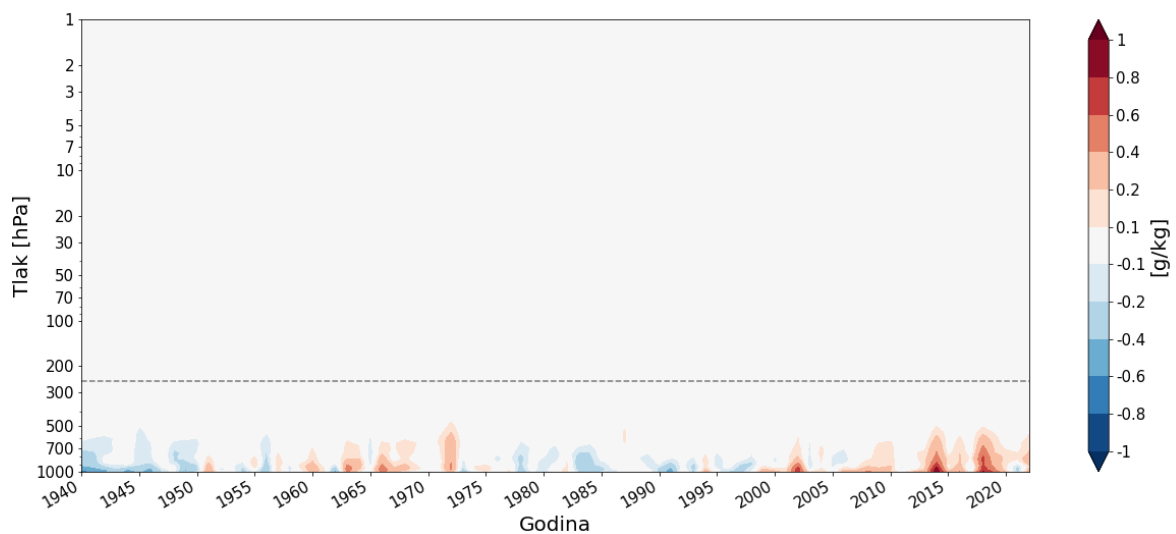
Na grafičkim prikazima relativne i specifične vlažnosti također se vide intenzivnije pozitivne i negativne anomalije pri površini. Odabir lokacije dakle utječe jedino na anomalije na površini.



Slika 3.2.2.1: Anomalije temperature u Zadru, tijekom cijele godine, usrednjene po danu, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.



Slika 3.2.2.2: Anomalije relativne vlažnosti u Zadru, tijekom cijele godine, usrednjene po danu, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.



Slika 3.2.2.3: Anomalije specifične vlažnosti u Zadru, tijekom cijele godine, usrednjene po danu, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.

3.2.3. Utjecaj sezone

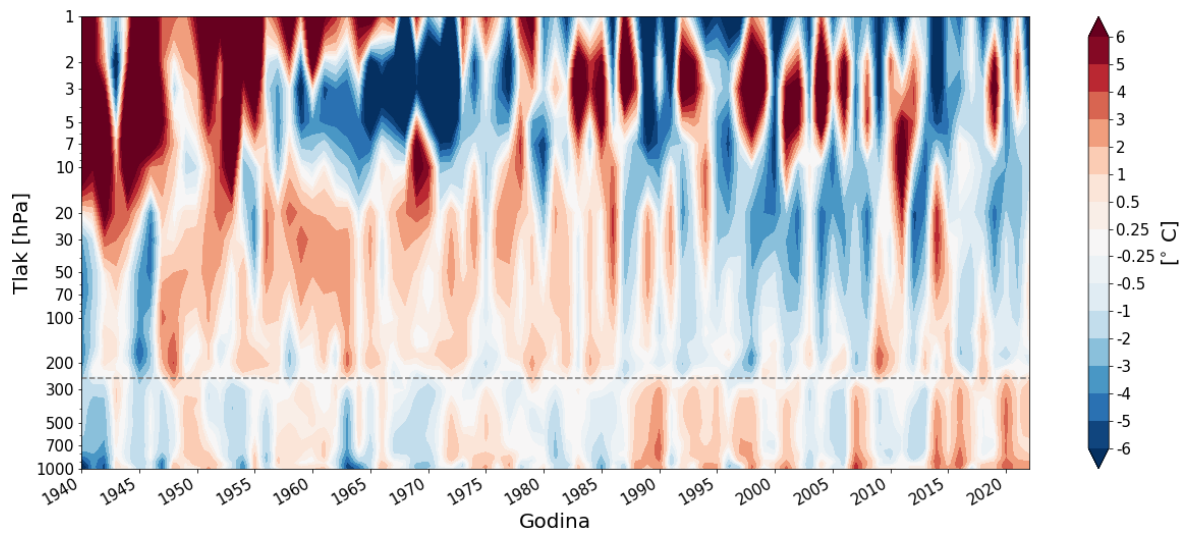
Za proučavanje utjecaja odabira sezone utječe na anomalije, ponovo je napravljena analiza za zimsku i ljetnu sezonu u Zagrebu, usrednjena po danu.

Anomalije za **zimsku sezonu** prikazane su na slikama 3.2.3.1. – 3.2.3.3. za temperaturu, relativnu i specifičnu vlažnost. Na cijelom prikazu anomalija temperature se uočavaju intenzivniji topliji i hladniji mjeseci od referentnog grafa. Današnje hlađenje stratosfere manje je očito u zimskom razdoblju zbog mnogobrojnih kratkih skupova pozitivnih anomalija.

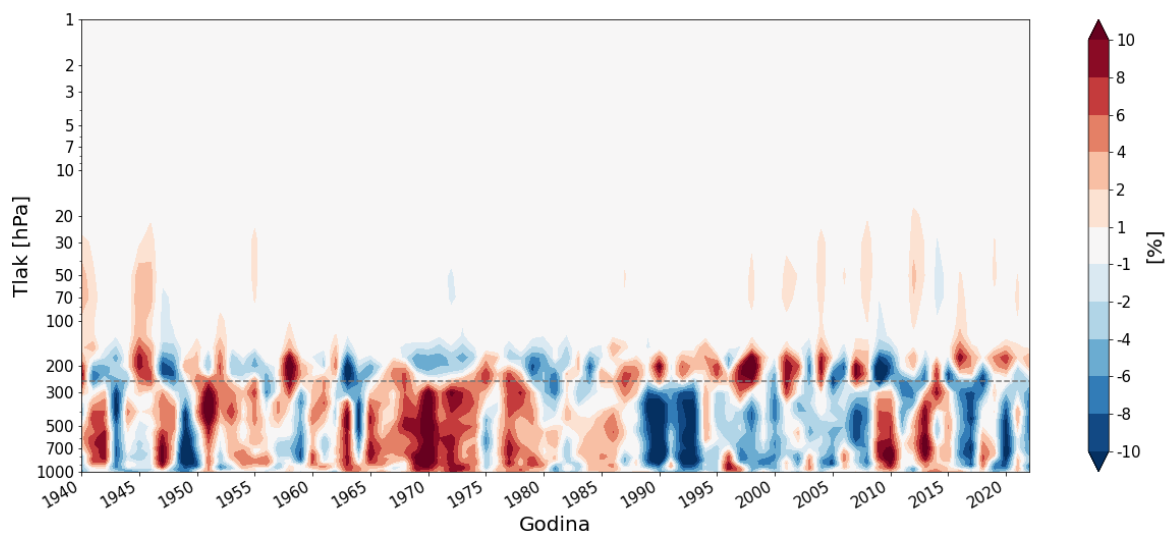
Vertikalni presjeci anomalija relativne vlažnosti (Slika 3.2.3.2.) i specifične vlažnosti (Slika 3.2.3.3.) također su vrlo slični u odnosu na referentne rezultate s pojačanim intenzitetom.

Anomalije temperature, relativne i specifične vlažnosti za **ljetnu sezonu** prikazane su na slikama 3.2.3.4. – 3.2.3.6.. U ljetnoj sezoni anomalije temperature ponovo su intenzivnije od anomalija tijekom cijele godine, no ipak manje intenzivne nego tijekom zimske sezone te se vidi izostanak naglih nastupanja pozitivnih anomalija u stratosferi (u sloju približno od 100 do 1 hPa) zbog čega je njeno hlađenje jasnije vidljivo.

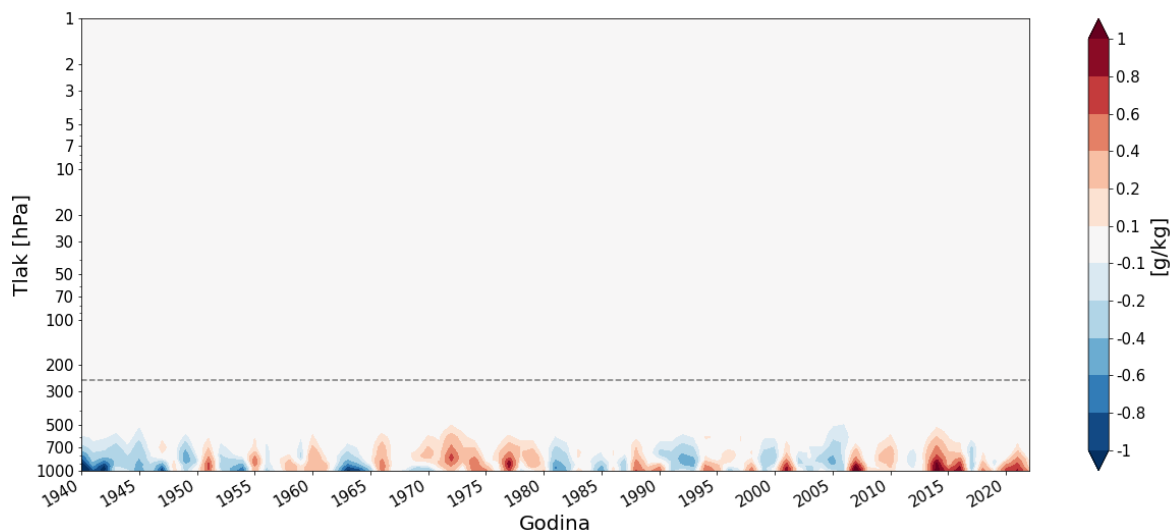
Anomalije vlažnosti su ponovo intenzivnije od referentnih, no manje od onih u zimskoj sezoni. Ponovo se ističu se pozitivne anomalije specifične vlažnosti u zadnjih 25 godina koje su češće i prodiru u viši dio troposfere. Odabir sezone utječe na pozitivne i negativne anomalije temperature te relativne i specifične vlažnosti pojačavajući njihov intenzitet.



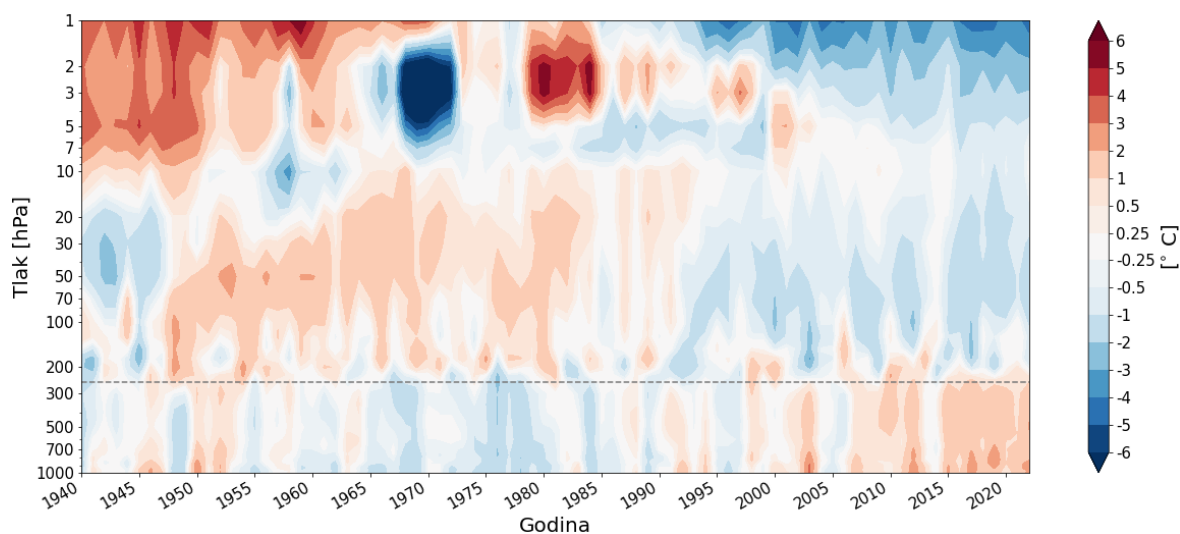
Slika 3.2.3.1: Anomalije temperature u Zagrebu, tijekom zimske sezone, usrednjene po danu, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.



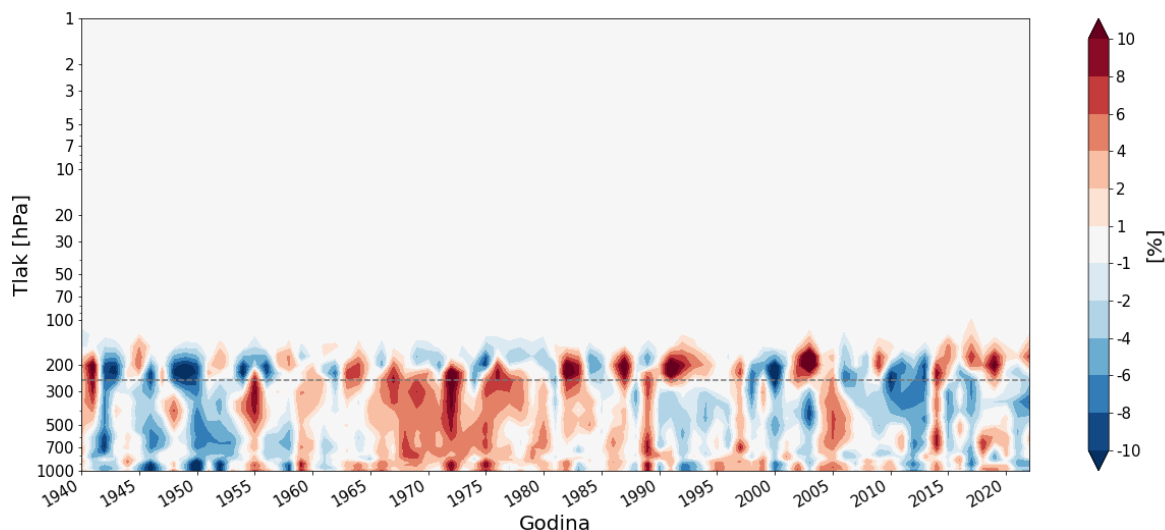
Slika 3.2.3.2: Anomalije relativne vlažnosti u Zagrebu, tijekom zimske sezone, usrednjene po danu, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.



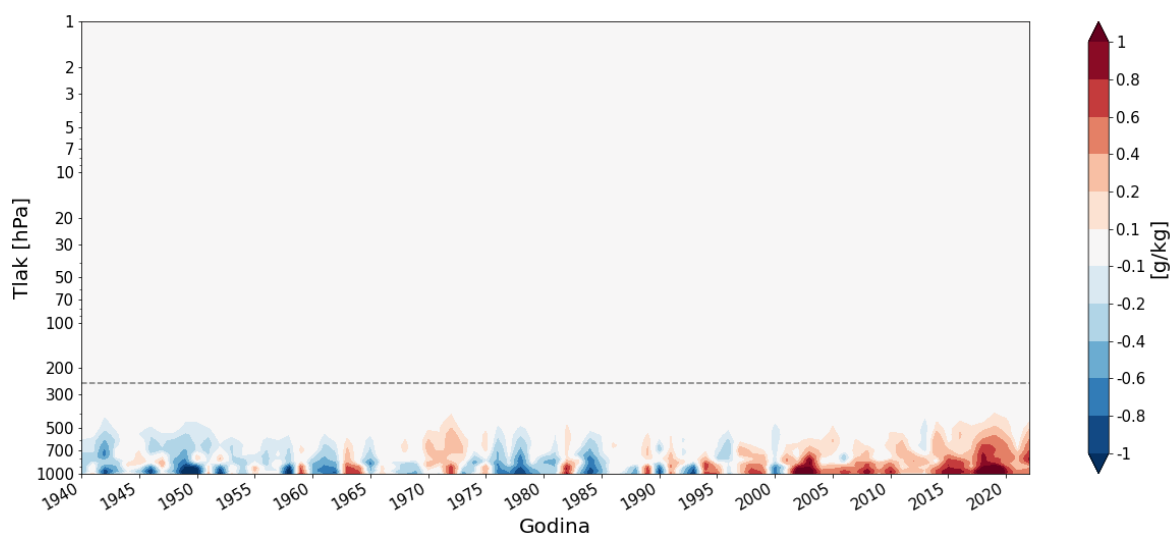
Slika 3.2.3.3: Anomalije specifične vlažnosti u Zagrebu, tijekom zimske sezone, usrednjene po danu, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.



Slika 3.2.3.4: Anomalije temperature u Zagrebu, tijekom ljetne sezone, usrednjene po danu, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.



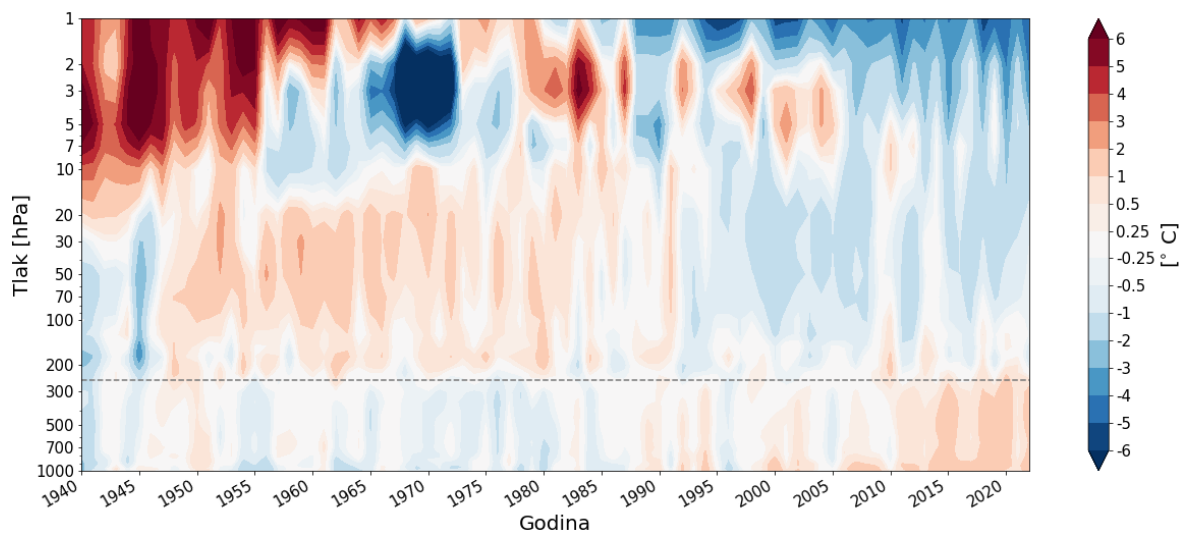
Slika 3.2.3.5: Anomalije relativne vlažnosti u Zagrebu, tijekom ljetne sezone, usrednjene po danu, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.



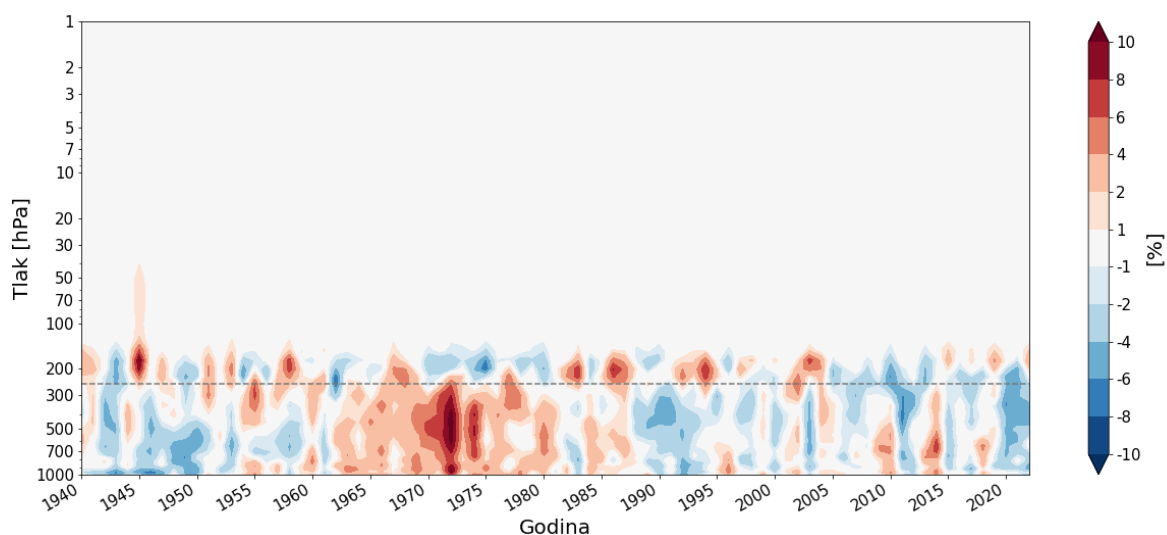
Slika 3.2.3.6: Anomalije specifične vlažnosti u Zagrebu, tijekom ljetne sezone, usrednjene po danu, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.

3.2.4. Utjecaj doba dana

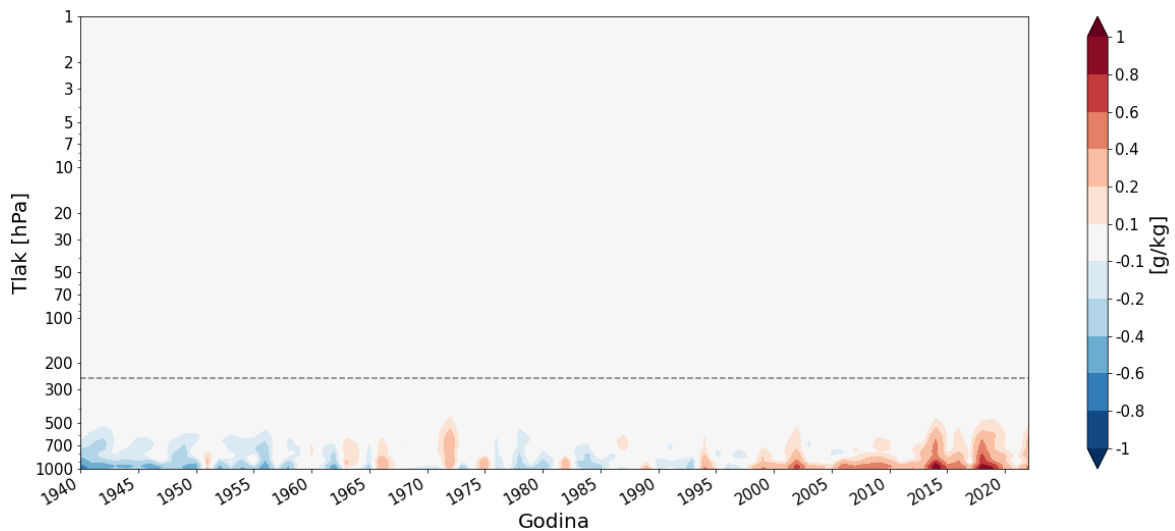
Kako bi se proučio utjecaj doba dana na anomalije, uspoređuju se rezultati u ponoć i podne s usrednjenim referentnim grafovima.



Slika 3.2.4.1: Anomalije temperature u Zagrebu u ponoć, tijekom cijele godine, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.

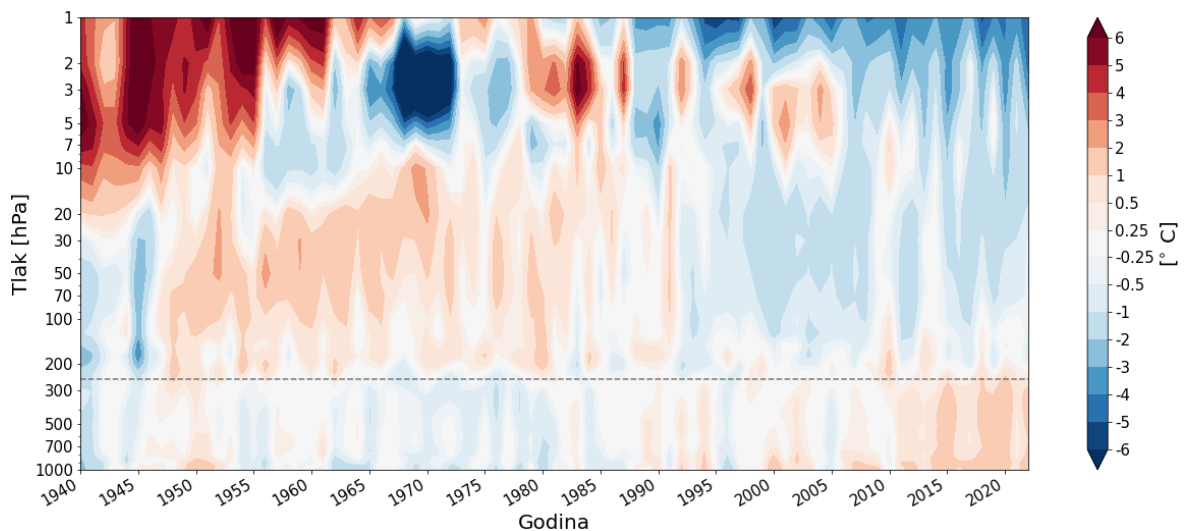


Slika 3.2.4.2: Anomalije relativne vlažnosti u Zagrebu u ponoć, tijekom cijele godine, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.

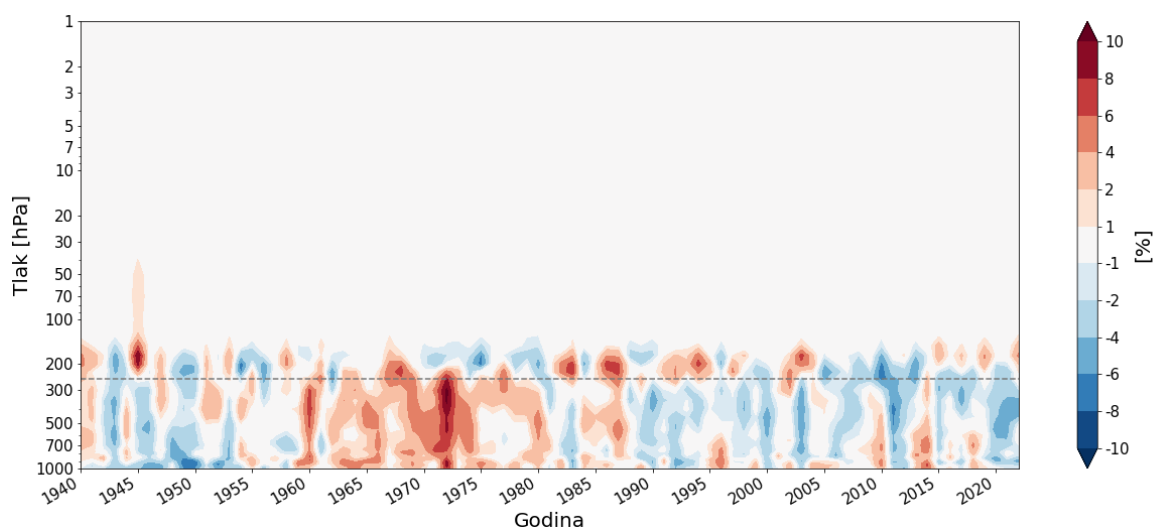


Slika 3.2.4.3: Anomalije specifične vlažnosti u Zagrebu u ponoć, tijekom cijele godine, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.

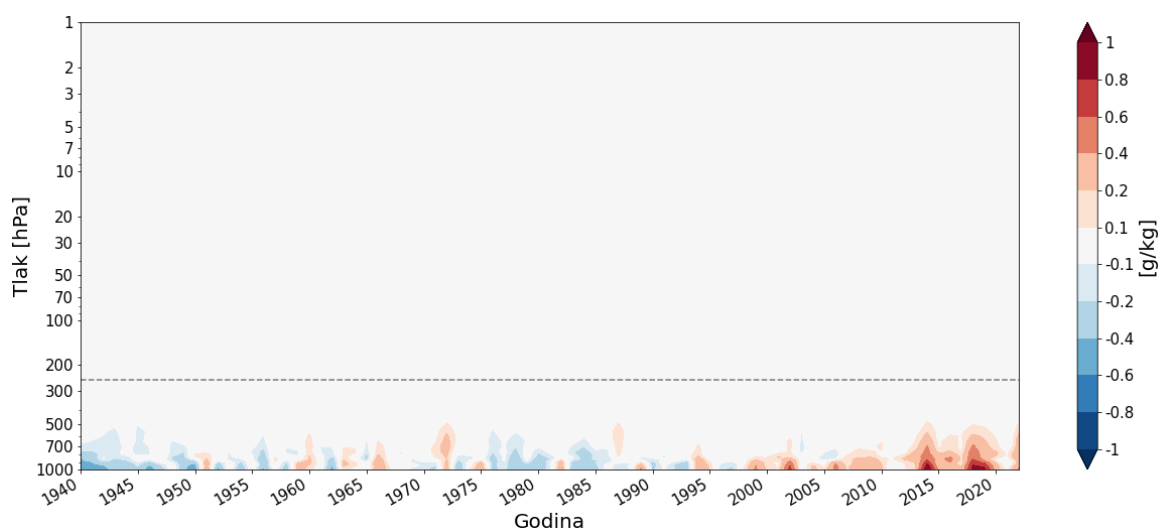
Na vertikalnim prikazima anomalija temperature za **ponoć** (Slika 3.2.4.1.), vide se minimalne razlike u gornjem dijelu atmosfere u odnosu na referentan rezultat. Isto vrijedi i za grafove anomalija relativne vlažnosti (Slika 3.2.4.2.) i specifične vlažnosti (Slika 3.2.4.3.).



Slika 3.2.4.4: Anomalije temperature u Zagrebu u podne, tijekom cijele godine, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.



Slika 3.2.4.5: Anomalije relativne vlažnosti u Zagrebu u podne, tijekom cijele godine, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.



Slika 3.2.4.6: Anomalije specifične vlažnosti u Zagrebu u podne, tijekom cijele godine, u odnosu na razdoblje od 1940. do 2022. godine. Prosječna visina troposfere označena je sivom isprekidanom linijom, a vrh stratosfere približno odgovara vertikalnom nivou od 1 hPa.

Na vertikalnim prikazima anomalija temperature za **podne** (Slika 3.2.4.4.), relativne (Slika 3.2.4.5.) i specifične vlažnosti (Slika 3.2.4.6.) u Zagrebu, tijekom cijele godine, u podne, ponovo se uočavaju male razlike u odnosu na referentne rezultate, no ipak su veće od onih u podne intenzitetom ali i trajanjem pozitivnih i negativnih anomalija. Odabir doba dana ima minimalan utjecaj na anomalije meteoroloških varijabli (vlažnost zraka).

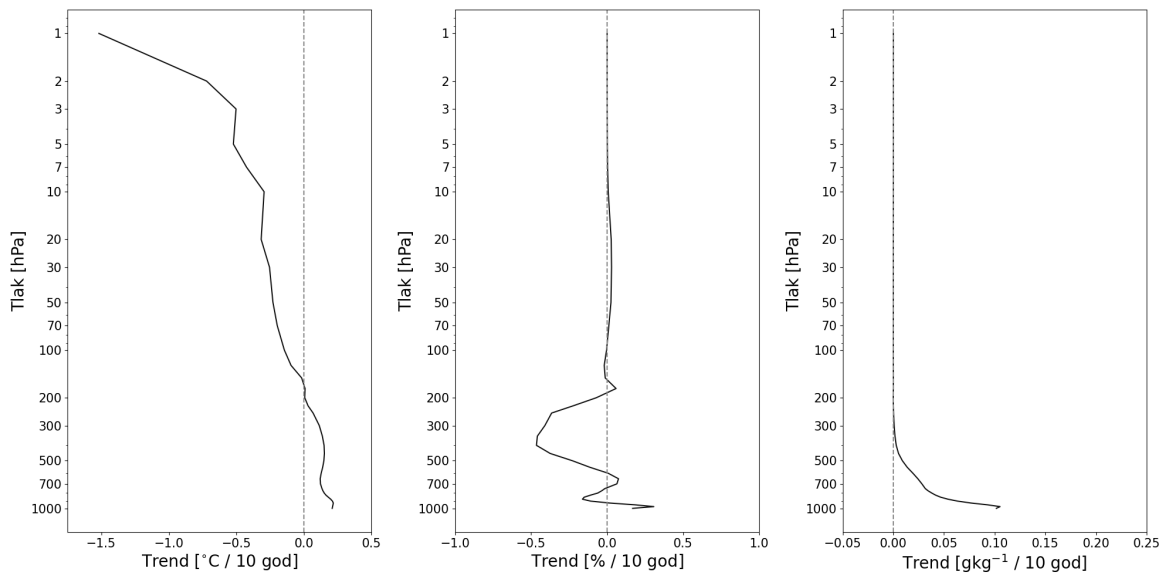
3.3. Trendovi

Nakon izračunatih i grafički prikazanih anomalija temperature, relativne i specifične vlažnosti, slijedi njihov prikaz trendova, odnosno prikaz ukupne promjene svakog parametra u odabranom razdoblju po vertikalnim nivoima. Trend se računa nalaženjem nagiba pravca anomalija linearnom regresijom koji je zatim pomnožen s 10 kako bi se dobio prikaz promjene parametra po desetljeću.

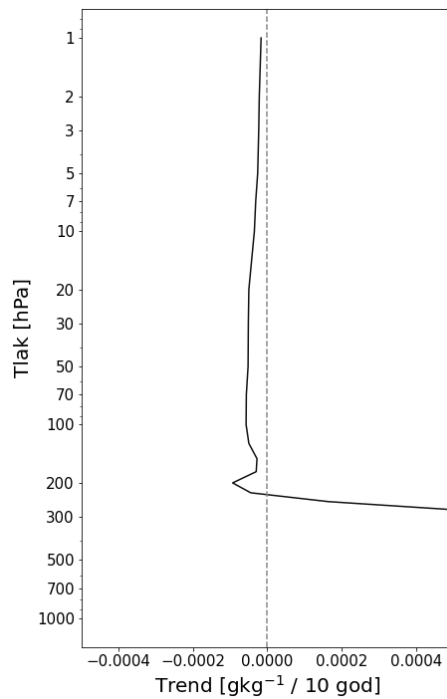
3.3.1. Referentni prikazi

Referentni grafovi za Zagreb, tijekom cijele godine s vrijednostima usrednjenima po danu, prikazani su na slici 3.3.1.1. Uočava se porast temperature u troposferi sve do 200 hPa. Nakon kratkoga dijela bez promjene, ponovo se vidi hlađenje u stratosferi koje se povećava smanjenjem tlaka. Za relativnu vlažnost se također vidi porast u prizemnom dijelu atmosfere, zatim slijedi pad od 500 do 100 hPa te nakon toga nema promjene zbog nedostatka vodene pare. Trend specifične vlažnosti je također pozitivan u prizemnom sloju zbog porasta temperature kao što je već diskutirano. Slika 3.3.1.2. prikazuje uvećani trend specifične vlažnosti kako bi se vidjelo da vrijednost ne pada na nulu. Negativna vrijednost je puno manja od one u Diaz i sur. (2011.) jer se ovdje promatrane lokacije ne nalaze u tropskom pojasu.

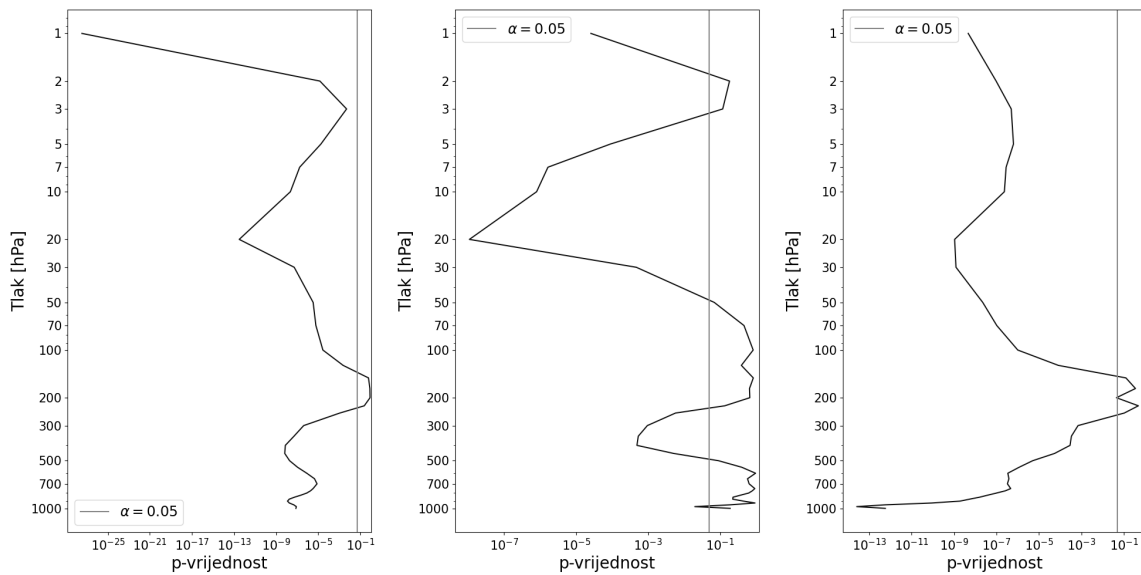
Na slici 3.3.1.3. prikazani su t-testovi za ranije diskutirane trendove. Test za trend temperature pokazuje da su različite od nule dovoljno velike kako bi rezultat bio statistički značajan za razinu značajnosti od 5%. Za relativnu vlažnost otprilike pola rezultata nije statistički značajno, posebice trendovi u donjoj troposferi. Rezultat za specifičnu vlažnost je pak značajan u donjoj troposferi.



Slika 3.3.1.1: Trendovi temperature, relativne i specifične vlažnosti za razdoblje od 1940. do 2022. godine u Zagrebu, tijekom cijele godine, usrednjeni po danu.



Slika 3.3.1.2: Uvećani prikaz trenda specifične vlažnosti za razdoblje od 1940. do 2022. godine u Zagrebu, tijekom cijele godine, usrednjeni po danu.

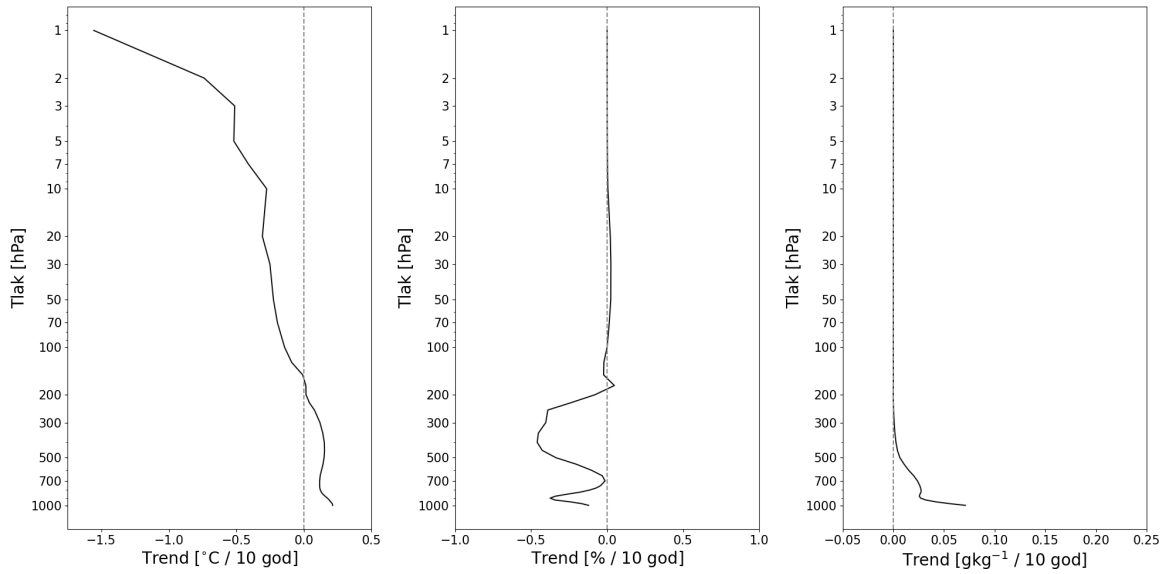


Slika 3.3.1.3: Pripadajući t-test za trendove temperature, relativne i specifične vlažnosti za razdoblje od 1940. do 2022. godine u Zagrebu, tijekom cijele godine, usrednjeni po danu.

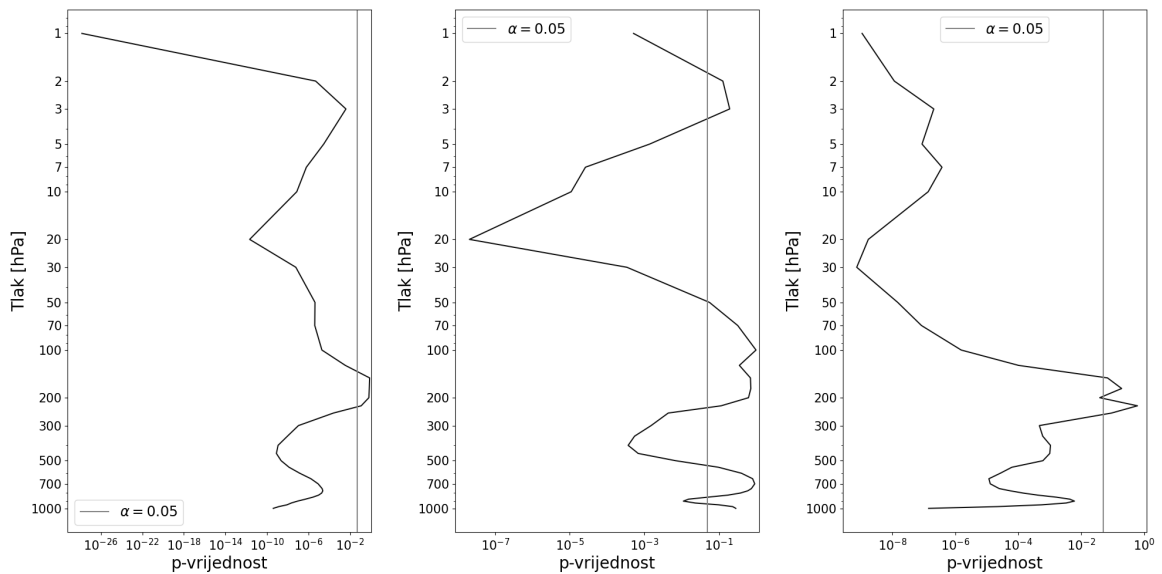
3.3.2. Utjecaj lokacije

Na slici 3.3.2.1. prikazani su trendovi za Zadar, tijekom cijele godine, usrednjeni po danu. Trendovi su vrlo slični onima za Zagreb, no kod trenda temperature ne uočava se inverzija pri tlu, trend relativne vlažnosti pri tlu je sada negativan, a pozitivan trend specifične vlažnosti manje je izražen.

Pripadajući t-testovi (Slika 3.3.2.2.) također prikazuju sličan rezultat te su usprkos manjim razlikama u p vrijednostima, trendovi na istim nivoima za Zagreb i Zadar statistički značajni.



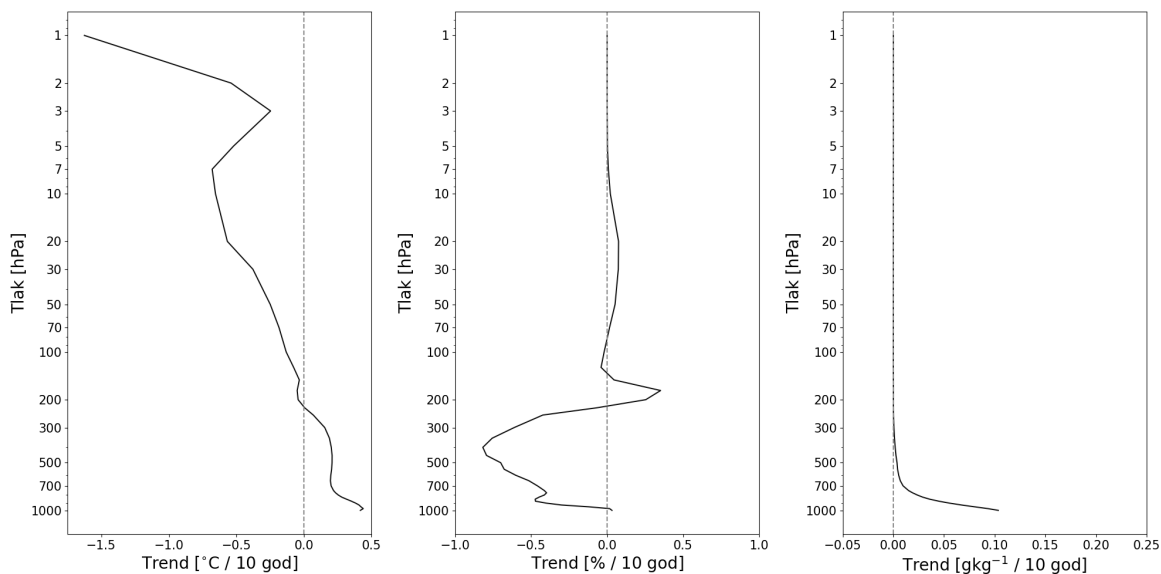
Slika 3.3.2.1: Trendovi temperature, relativne i specifične vlažnosti za razdoblje od 1940. do 2022. godine u Zadru, tijekom cijele godine, usrednjeni po danu.



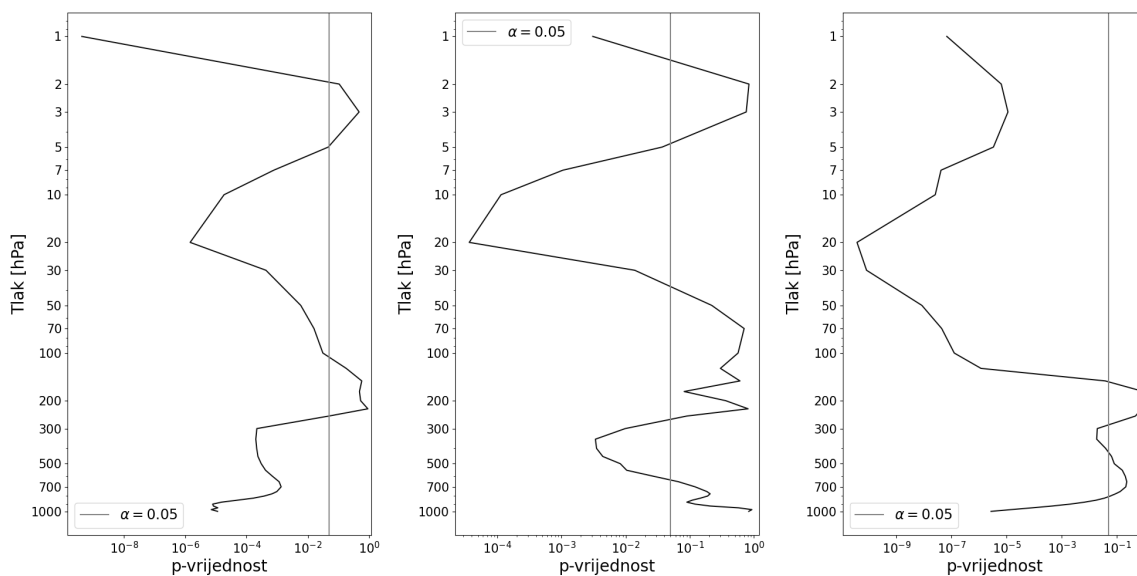
Slika 3.3.2.2: Pripadajući t-test za trendove temperature, relativne i specifične vlažnosti za razdoblje od 1940. do 2022. godine u Zadru, tijekom cijele godine, usrednjeni po danu.

3.3.3. Utjecaj sezone

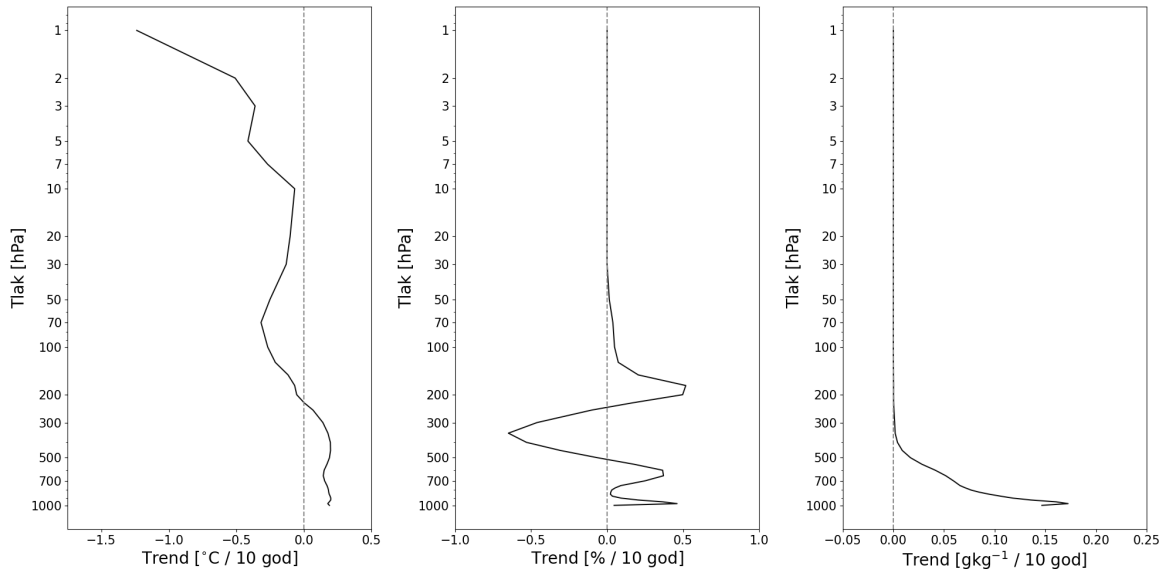
Za proučavanje utjecaja sezone, ponovo se promatraju zimska i ljetna sezona u odnosu na rezultate za cijelu godinu u Zagrebu, usrednjeni po danu.



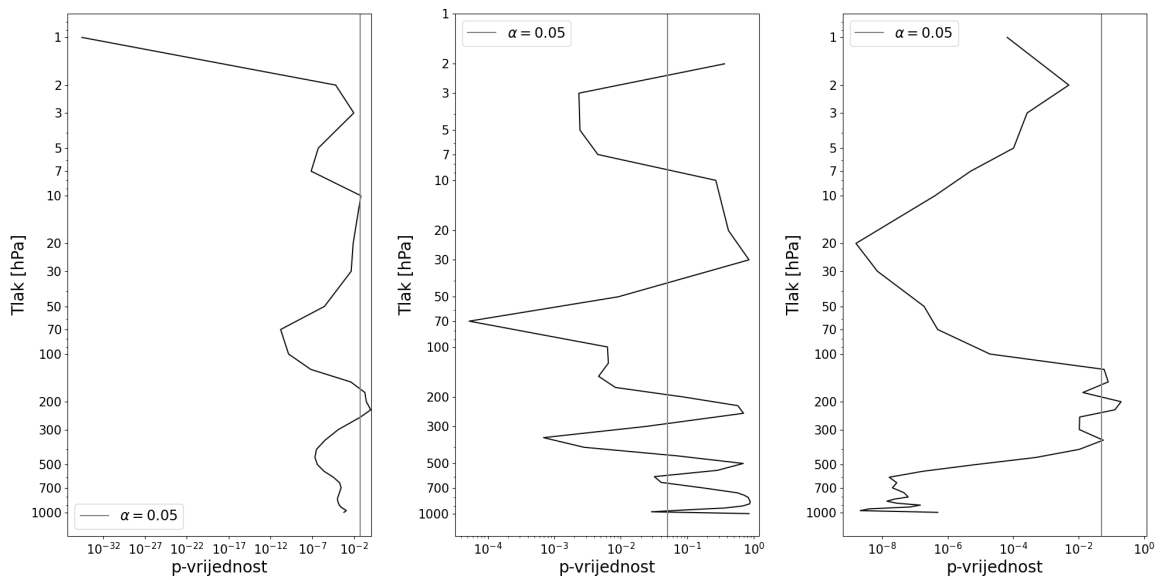
Slika 3.3.3.1: Trendovi temperature, relativne i specifične vlažnosti za razdoblje od 1940. do 2022. godine u Zagrebu, u zimskoj sezoni, usrednjeni po danu.



Slika 3.3.3.2: Pripadajući t-test za trendove temperature, relativne i specifične vlažnosti za razdoblje od 1940. do 2022. godine u Zagrebu, u zimskoj sezoni, usrednjeni po danu.



Slika 3.3.3.3: Trendovi temperature, relativne i specifične vlažnosti za razdoblje od 1940. do 2022. godine u Zagrebu, u ljetnoj sezoni, usrednjeni po danu.



Slika 3.3.3.4: Pripadajući t-test za trendove temperature, relativne i specifične vlažnosti za razdoblje od 1940. do 2022. godine u Zagrebu, u ljetnoj sezoni, usrednjeni po danu.

Kod trendova za **zimsku sezonu** (Slika 3.3.3.1.) primjećuju se značajnije razlike u odnosu na promjenu lokacije. Trend temperature u donjoj troposferi je veći te iznosi skoro $0.5\text{ }^{\circ}\text{C} / 10\text{ god.}$ pri tlu. Također se u stratosferi vidi porast trenda na oko 5 hPa kao što je već diskutirano na grafovima anomalija za zimsku sezonu. Trend relativne vlažnosti je također izraženiji te uz nepostojanje promjene pri tlu, vrijednost se spušta preko $-0.75\% / 10\text{ god.}$ Trend specifične vlažnosti uz manje razlike ostaje nepromijenjen.

Statistički značajni rezultati po nivoima, dobiveni t-testom (Slika 3.3.3.2.) ponovo su slični referentnima.

Na grafovima trendova (Slika 3.3.3.3.) za **ljetnu sezonu** ne primjećuje se tolika razlika kao kod zimske sezone te su grafovi sličniji referentnima. Uočava se veća vrijednost trenda temperature na oko 10 hPa te veći raspon u vrijednosti trenda relativne vlažnosti. Kao što je prethodno pokazano pomoću anomalija, trend specifične vlažnosti veći je u prizemnom sloju.

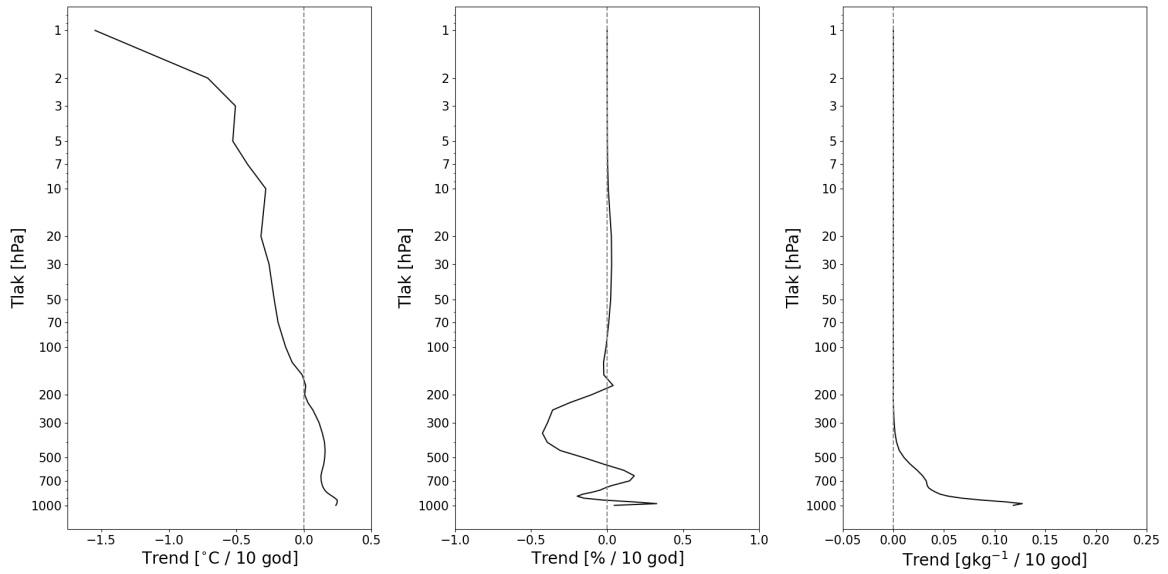
Statistički značajni rezultati po nivoima, dobiveni t-testom (Slika 3.3.3.4.) ponovo su slični referentnima.

3.3.4. Utjecaj doba dana

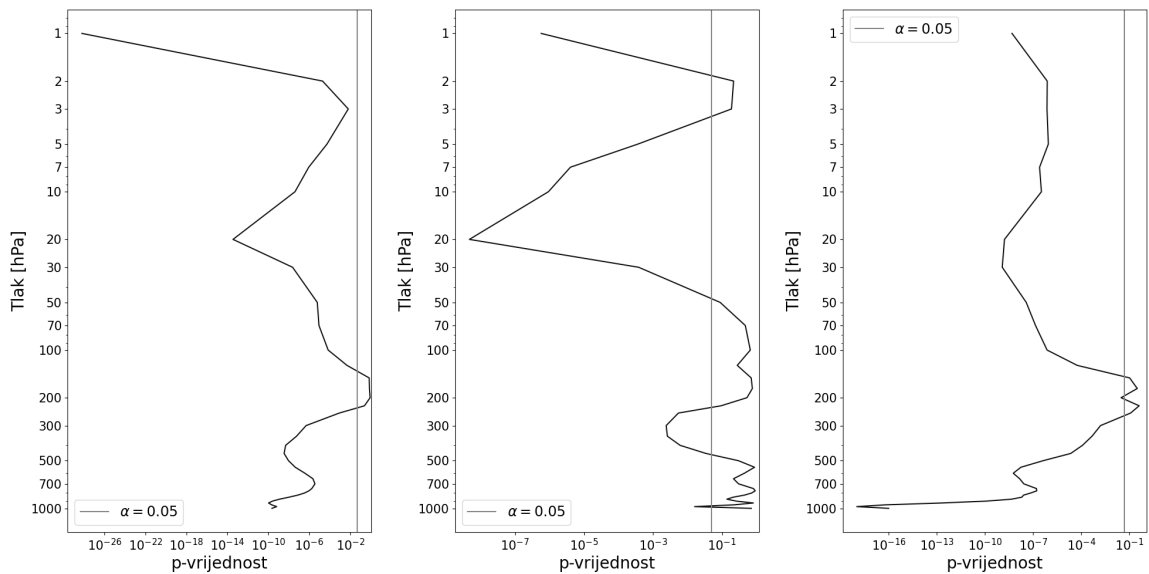
Za proučavanje utjecaja doba dana, ponovo se promatraju ponoć i podne u odnosu na rezultate za usrednjene rezultate u Zagrebu tijekom cijele godine.

Trendovi izračunati s podacima za **ponoć** prikazani su na slici 3.3.4.1. Razlike i u ovom slučaju nisu velike, trendovi imaju iste oblike jedino se malo razlikuju u vrijednostima. Očitija razlika je u većoj vrijednosti prizemnog trenda specifična vlažnosti. Time su i t-testovi (Slika 3.3.4.2.) slični referentnima.

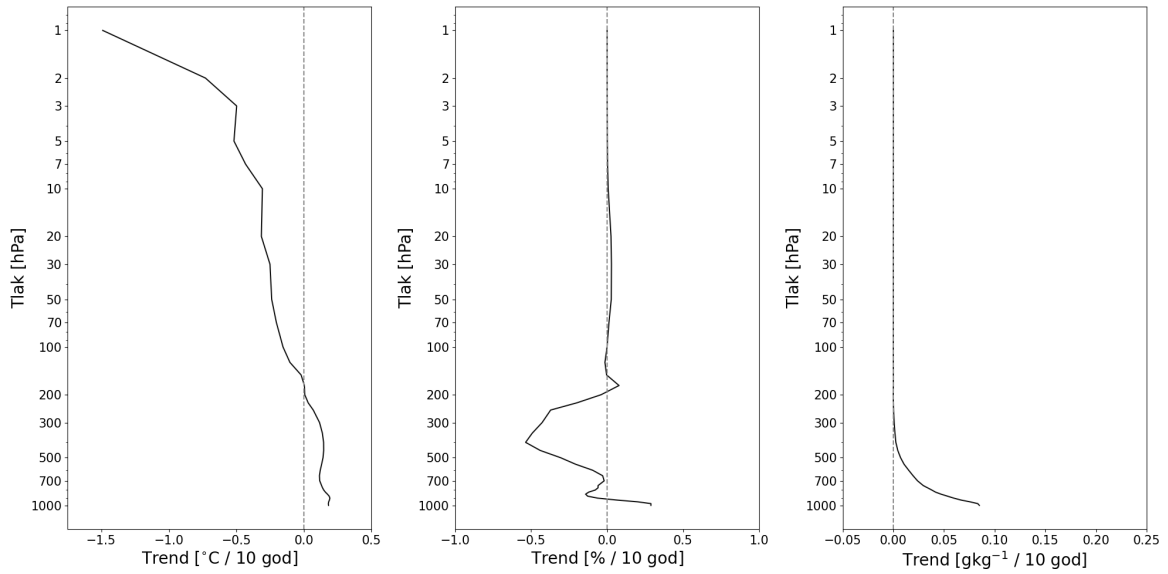
Na trendovima za **podne** (Slika 3.3.4.3.) vidi se slična stvar, no ovoga puta prizemne vrijednosti za specifičnu vlažnost manje su od referentnih. p-vrijednosti t-testova (Slika 3.3.4.4.) također su ispod razine značajnosti za iste nivoe tlaka kao referentni.



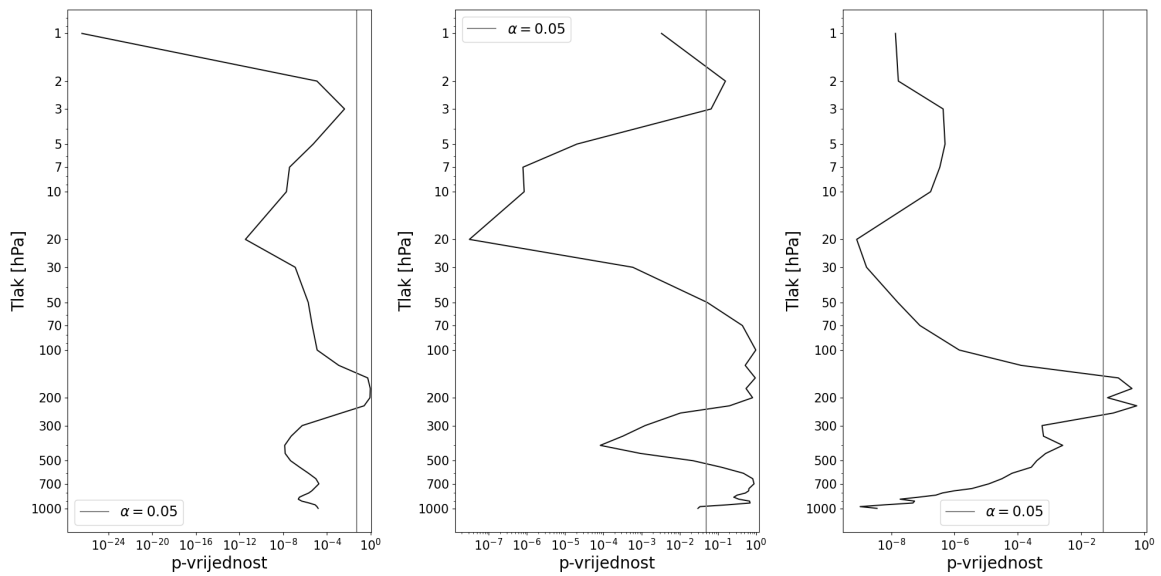
Slika 3.3.4.1: Trendovi temperature, relativne i specifične vlažnosti za razdoblje od 1940. do 2022. godine u Zagrebu, tijekom cijele godine, u ponoć.



Slika 3.3.4.2: Pripadajući t-test za trendove temperature, relativne i specifične vlažnosti za razdoblje od 1940. do 2022. godine u Zagrebu, tijekom cijele godine, u ponoć.



Slika 3.3.4.3: Trendovi temperature, relativne i specifične vlažnosti za razdoblje od 1940. do 2022. godine u Zagrebu, tijekom cijele godine, u podne.



Slika 3.3.4.4: Pripadajući t-test za trendove temperature, relativne i specifične vlažnosti za razdoblje od 1940. do 2022. godine u Zagrebu, tijekom cijele godine, u podne.

4. Zaključak

U ovom radu analizirano je podudaranje temperature i relativne vlažnosti iz reanalize ERA5 sa stvarnim vrijednostima dobivenim pomoću radiosondaža. Također su izračunate i grafički prikazane anomalije i trendovi temperature, relativne vlažnosti i specifične vlažnosti za cijelo dostupno razdoblje reanalize ERA5. Analiza je provedena za područje Zagreba i Zadra, tijekom cijele godine te posebno za zimsku i ljetnu sezonu te za podatke u ponoć, podne kao i njihov srednjak.

U tu svrhu napravljena je usporedba vrijednosti temperature i relativne vlažnosti dobivenih radiosondažama i reanalizom ERA5 za razdoblje od 2011. do 2020. godine. Analiza je provedena na 37 vertikalnih nivoa ERA5 za Zagreb i Zadar, za cijelu godinu, zimsku i ljetnu sezonu te za podatke u ponoć, podne i njihov srednjak. Za sve usporedbe uzeti su referentni rezultati za Zagreb, tijekom cijele godine, usrednjeni po danu.

Temperature iz reanalize ERA5 jako se dobro slaže sa stvarnim podacima radiosondaža dok relativna vlažnost iz ERA5 odstupa od radiosondaža za skoro sve vertikalne nivoe. Također je dobiveno da je standardna devijacija podataka iz reanalize ERA5 manja od standardne devijacije stvarnih vrijednosti. Promjena lokacije na Zadar nije promijenila izgled krivulje (obilježja) temperature, dok kod relativne vlažnosti iz reanalize ERA5 ne postoji sloj inverzije pri tlu postojan u stvarnim vrijednostima. Uspoređujući sezone, sloj inverzije pri tlu relativne vlažnosti u zimskoj sezoni ne postoji za oba seta podataka dok je u ljetnoj sezoni on izražen. Uspoređujući vrijeme dana dobiveno da je ponoćna relativna vlažnost veća pri tlu kod podataka reanalize ERA5 dok se za podne ponovo javlja veća inverzija pri tlu. Temperatura ostaje nepromijenjena.

Analizirane su i anomalije temperature, relativne vlažnosti i specifične vlažnosti na podacima reanalize ERA5 za razdoblje od 1940. do 2022. Na referentnim vertikalnim profilima za višedesetljetno razdoblje, pokazano je zagrijavanje donje troposfere, ali i hlađenje stratosfere. Promjena lokacije utječe jedino na intenzitet pozitivnih i negativnih anomalija pri tlu. Za zimsku sezonu, anomalije u cijelom vertikalnom stupcu su intenzivnije od onih u referentnom grafičkom prikazu, a slično vrijedi i za ljetnu sezonu, no anomalije su manje intenzivne nego u zimskoj sezoni. Za promjenu doba

dana razlike su minimalne.

Na kraju su izračunati i grafički prikazani trendovi temperature, relativne vlažnosti i specifične vlažnosti za podatke iz ERA5 od 1940. do 2022. Ponovo se vidi rast temperature u donjem dijelu troposfere i pad u stratosferi, većinom statistički neznačajno ponašanje relativne vlažnosti te rast specifične vlažnosti pri tlu. Lokacija minimalno utječe na izgled trendova uz vrlo sličnu statističku značajnost po vertikalnim nivoima. Zimska sezona ipak donosi veće promjene. Trend temperature veći je u donjoj troposferi, dok je trend relativne vlažnosti izraženiji u svim nivoima koji sadrže vodenu paru. Trendovi u ljetnoj sezoni su sličniji referentnima od zimske uz manje razlike. Raspon trenda relativne vlažnosti je također veći, kao i trend specifične vlažnosti pri tlu. Kod promjene doba dana, ponovo se ne uočavaju bitne razlike u odnosu na referentne trendove.

Istraživanje se dalje može proširiti uzimanjem dužeg razdoblja radiosondažnih mjerenja, odabirom drugih lokacija koje pokriva reanaliza ERA5 u Hrvatskoj i svijetu, usporedbom reanalize ERA5 s drugim reanalizama ili analizom dodatnih parametara.

Literatura

- Broecker, W. S. (1975): Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming? *New Series*, 189, 460–463.
- Diaz, H., Giambelluca, T., Eischeid, J. (2011): Changes in the vertical profiles of mean temperature and humidity in the Hawaiian Islands. *Global and Planetary Change* 77 (2011), 21-25.
- Fioravanti, G., Piervitali, E., i Desiato, F. (2016): Recent changes of temperature extremes over Italy: an index-based analysis. *Theor Appl Climatol*, 123, 473–486, <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1362-1>.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2018): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).
- IPCC (2023): Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- Manabe, S., Wetherald, R.T. (1967): Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity. *Journal of Atmospheric Sciences* 24 (1967).
- Nowack, P., Ceppi, P., Davis, S., Chiodo, G., Ball, W., Diallo, M., Hassler, Y., Keeble, J., Joshi, M. (2023): Response of stratospheric water vapour to warming constrained by satellite observations. *Nat. Geosci.* 16, 577–583 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01183-6>
- Ruml, M., Gregorić, E., Matović, G., Radovanović, S., i Počuča, V. (2022): Uneven trends of temperature indices during the growing season and dormancy in Serbia. *Theor Appl Climatol*, 147, 1277–1295, <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03859-8>.
- Santer, B.D., Po-Chedley, S., Zhao L., Zou C., Fu, Q., Solomon, S., Thompson, D.W.J., Mears C., Taylor, K.E. (2020): Exceptional stratospheric contribution to human

fingerprints on atmospheric temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 120, 2023. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.2300758120>.

Schleussner, C.-F., Rogelj, J., Schaeffer, M., Lissner, T., Licker, R., Fischer, E.M., Knutti, R., Levermann, A., Freiler, K., Hare, W. (2016): Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. *Nature Climate Change*, 6(9), pp.827–835. Available at: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nclimate3096>.

Shahzad, U. (2015): *Global Warming: Causes, Effects and Solutions*.

Vršič, S., Šuštar, V., Pulko, B., i Šumenjak, T. K. (2014): Trends in climate parameters affecting winegrape ripening in northeastern Slovenia. *Clim Res*, 58, 257–266, <https://doi.org/10.3354/cr01197>.

Popis kratica

DJF	Zimska sezona (prosinac, siječanj, veljača)
ECMWF	Europski centar za srednjoročne vremenske prognoze (engl. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)
ERA	ECMWF ReAnaliza (engl. ECMFW ReAnalysis)
JJA	Ljetna sezona (lipanj, srpanj, kolovoz)
NCEP	Nacionalni centri za predviđanje okoliša (engl. National Centers for enviromental predictions)