

## Automatizacija mjerenja atmosferskih parametara pri preciznom mjerenju duljina

Nikola SOLARIĆ, Đuro BARKOVIĆ, Mladen ZRINJSKI –  
Zagreb<sup>1</sup>

*SAŽETAK. U radu je prikazano automatizirano mjerenje atmosferskih parametara pomoću dva senzora Väisälä WXT510 i notebook računala, u svrhu preciznih mjerenja duljina na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Za vrijeme preciznih mjerenja duljina vrlo je važno što točnije izmjeriti atmosferske parametre: temperaturu, tlak i relativnu vlažnost zraka. Pogreška u mjerenju temperature od 1 °C uzrokuje pogrešku u mjerenoj duljini od 1 mm na 1000 m. Stoga je za precizno mjerenje duljina temperaturu potrebno mjeriti s točnošću od  $\pm 0,1$  °C. U tu je svrhu, da bi se što točnije mogli izmjeriti atmosferski parametri, razvijena automatizacija zapisa atmosferskih parametara, izmjerenih s pomoću senzora Väisälä. Ispitivanjima u Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta utvrđeno je da nakon priključivanja električnog napona na senzor Väisälä treba pričekati približno 70 minuta da se on stabilizira. Na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta utvrđeno je da radi točnijeg mjerenja temperature senzore Väisälä treba postaviti na pet ravnomjerno raspoređenih mjesta kalibracijske baze, na duljini od 1000 m. Nakon automatskog prikupljanja atmosferskih parametara te njihove automatizirane obrade, dobivaju se rezultati za prosječnu temperaturu, tlak i relativnu vlažnost zraka, koji su potrebni pri daljnjoj automatiziranoj obradi i izjednačenju duljina izmjerenih preciznim elektrooptičkim daljinomjerom.*

*Ključne riječi: automatizirano mjerenje atmosferskih parametara, Väisälä WXT510, WeatherTransmitter, precizno mjerenje duljina.*

---

<sup>1</sup> Prof. emer. dr. sc. Nikola Solarić, član emeritus Akademije tehničkih znanosti Hrvatske, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: nikola.solaric@geof.hr, prof. dr. sc. Đuro Barković, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: djuro.barkovic@geof.hr, dr. sc. Mladen Zrinjski, corresponding author, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: mladen.zrinjski@geof.hr.

## 1. Uvod

Prilikom preciznih mjerenja duljina na kalibracijskoj bazi elektrooptičkim daljinomjerima vrlo je važno što točnije izmjeriti atmosferske parametre zraka kroz koji prolazi elektromagnetski val: temperaturu, tlak i relativnu vlažnost zraka.

Pogreška u mjerenju temperature od  $\pm 1$  °C uzrokuje pogrešku u mjerenoj duljini od 1 mm na 1000 m. Stoga je za precizno mjerenje duljina potrebno temperaturu mjeriti s točnošću od  $\pm 0,1$  °C. Pogreška u mjerenju tlaka zraka od  $\pm 3$  hPa uzrokuje pogrešku u mjerenoj duljini od 1 mm na 1000 m. Pogreška u mjerenju relativne vlažnosti zraka od  $\pm 15\%$  uzrokuje pogrešku u mjerenju duljine od samo 0,1 mm na 1000 m (Zrinjski 2010). Stoga mjerenju relativne vlažnosti ne treba posvećivati tako veliku pozornost kao mjerenju temperature i tlaka zraka.

Mjerenje temperature zraka posebno je osjetljivo jer se obično duž putanje mjernog elektromagnetskog vala (čak i na horizontalnom terenu) temperatura često mijenja i za nekoliko Celzijevih stupnjeva. Zbog toga se, prilikom preciznih mjerenja duljina na kalibracijskoj bazi, atmosferski parametri trebaju mjeriti na više mjesta duž putanje elektromagnetskog vala. Do sada se to obično izvodilo postavljanjem više psihrometara i tlakomjera duž putanje elektromagnetskog vala, a uz svaki od njih stajao je pomoćnik, koji je morao očitavati i zapisivati vrijednosti atmosferskih parametara. Prilikom obrade tih podataka trebalo je uzeti u obzir umjeravanje termometara na psihrometrima i tlakomjera, izračunati vlažnost iz suhog i vlažnog termometra te konačno izračunati srednje vrijednosti atmosferskih parametara između svih stajališta.

Da bi se pojednostavilo prikupljanje i pohranjivanje atmosferskih parametara prilikom mjerenja duljina elektrooptičkim daljinomjerima te ubrzala njihova obrada, izvedena je automatizacija prikupljanja i obrade atmosferskih parametara s pomoću dva senzora Väisälä WXT510 i notebook računala.

## 2. Senzor Väisälä WXT510

Za mjerenje atmosferskih parametara odabran je senzor Väisälä WXT510 (slika 1) jer omogućava automatizaciju mjerenja temperature, tlaka i relativne vlažnosti zraka te brzine i smjera vjetra. Taj senzor ima zadovoljavajuću točnost mjerenja atmosferskih parametara, koja je potrebna za precizno mjerenje duljina.

U senzoru Väisälä WXT510 nalaze se senzori za mjerenje temperature, tlaka i relativne vlažnosti zraka, senzori za mjerenje brzine i smjera vjetra, te senzor za brojenje kapi kiše. Mjerni princip temelji se na unaprijedenom RC-oscilatoru (Resistance-Capacitance Oscillator, URL 2) i dva referentna kondenzatora, u odnosu na koje se kontinuirano mjeri kapacitet, odnosno atmosferski parametri (temperatura, tlak i vlažnost zraka).

Senzor Väisälä WXT510 sastoji se od (Väisälä 2005):

- kapacitativnoga keramičkog THERMOCAP senzora za mjerenje temperature zraka, koji ima vremensku konstantu (zaostajanje) od 2,6 sekundi, tj. relativno brzo reagira, ali i masa kućišta utječe na brzinu reakcije, tako da je brzina reakcije nažalost manja, odnosno vremenska konstanta, tj. zaostajanje je veće. Prema



Slika 1. Senzor Väisälä WXT510 za mjerenje atmosferskih parametara (URL 1).

ispitivanjima koja su provedena na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta, vremensko zaostajanje iznosilo je približno dvije do tri minute (vidi sliku 12)

- kapacitativnog silikonskog BAROCAP senzora za mjerenje tlaka zraka
- kapacitativnog tankog filma polimera HUMICAP 180 senzora za mjerenje vlažnosti zraka
- WINDCAP senzora s tri ultrazvučna pretvarača na piezoelektričnom principu za mjerenje brzine i smjera vjetra
- RAINCAP senzora za mjerenje padavina (kiše).

Dva posljednja senzora nije potrebno koristiti pri preciznom mjerenju duljina, jer parametri koji se njima mjere ne utječu na točnost mjerenja duljina.

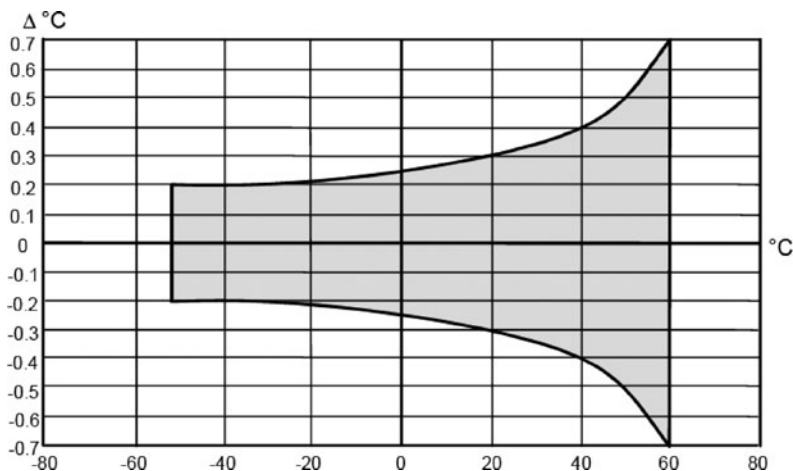
## 2.1. Tehnički podaci za senzor Väisälä WXT510

Tehnički podaci za mjerenje temperature zraka senzorom Väisälä WXT510 prikazani su u tablici 1 (Väisälä 2005).

Tablica 1. Tehnički podaci za mjerenje temperature zraka senzorom Väisälä WXT510.

Mjerenje temperature zraka	
Mjerno područje	-52 °C do +60 °C
Mjerna nesigurnost ( $k = 1$ )	0,3 °C (do +20 °C)
Podatak očitavanja	0,1 °C

Mjerna nesigurnost mjerenja temperature zraka za cijelo mjerno područje prikazana je na slici 2 kao razlika referentne temperature i temperature izmjerene sen-



Slika 2. Mjerna nesigurnost mjerenja temperature zraka senzorom Väisälä WXT510 za cijelo mjerno područje (Väisälä 2005).

zorom Väisälä WXT510 ( $T_{\text{ref}} - T$ ) (Väisälä 2005). Iz prikaza mjerne nesigurnosti mjerenja temperature zraka (slika 2) vidi se da je precizno mjerenje duljina na kalibracijskoj bazi najpovoljnije izvoditi pri temperaturama do  $+20\text{ °C}$ .

Tehnički podaci za mjerenje tlaka zraka senzorom Väisälä WXT510 prikazani su u tablici 2 (Väisälä 2005).

Tablica 2. Tehnički podaci za mjerenje tlaka zraka senzorom Väisälä WXT510.

Mjerenje tlaka zraka	
Mjerno područje	600 hPa do 1100 hPa
Mjerna nesigurnost ( $k = 1$ )	0,5 hPa (od $0\text{ °C}$ do $+30\text{ °C}$ )
Podatak očitavanja	0,1 hPa

Tehnički podaci za mjerenje relativne vlažnosti zraka (oznaka RH) senzorom Väisälä WXT510 prikazani su u tablici 3 (Väisälä 2005).

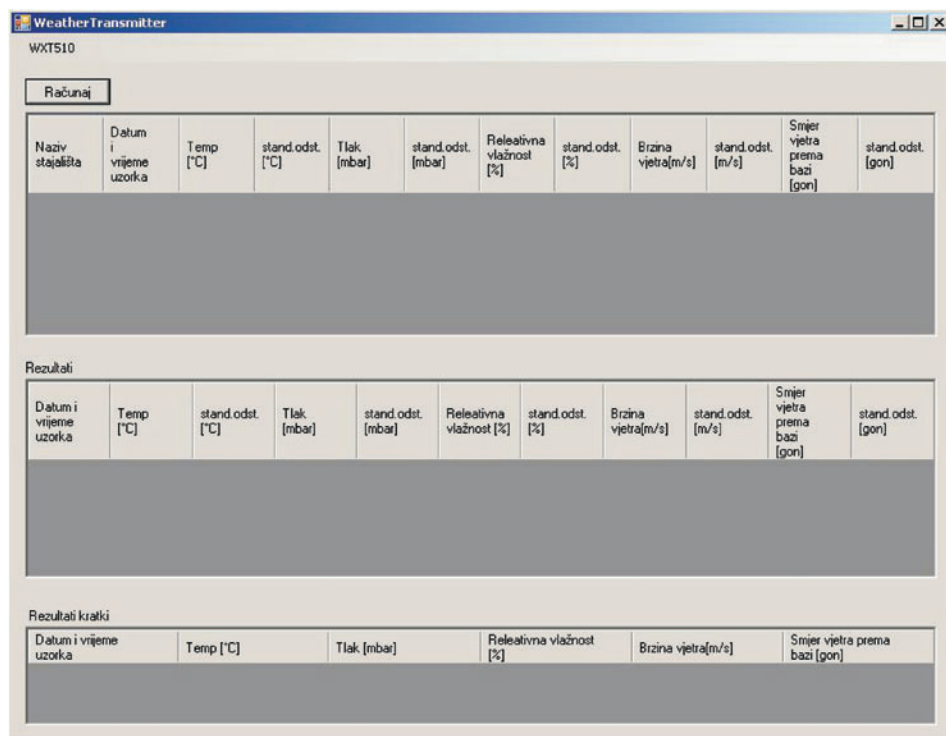
Tablica 3. Tehnički podaci za mjerenje relativne vlažnosti zraka senzorom Väisälä WXT510.

Mjerenje relativne vlažnosti zraka	
Mjerno područje	0% RH do 100% RH
Mjerna nesigurnost ( $k = 1$ )	3% RH (od 0% RH do 90% RH)
Podatak očitavanja	0,1% RH

Za vrijeme mjerenja tim senzorom napon napajanja mora biti od 5,3 V do 30 V DC (istosmjerni napon).

### 3. Softver za automatizirano mjerenje atmosferskih parametara senzorom Väisälä WXT510

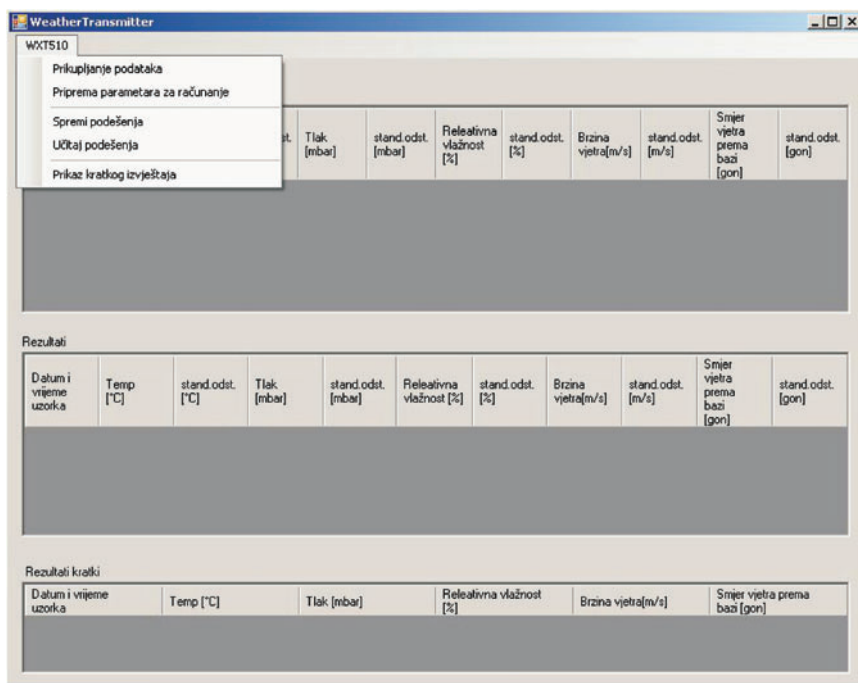
Za automatizirano prikupljanje, pohranjivanje i obradu atmosferskih parametara, mjerenih senzorom Väisälä WXT510, napravljen je softver *WeatherTransmitter* (Zrinjski 2010, slika 3), koji je izrađen u Visual C++.



Slika 3. Softver *WeatherTransmitter*.

Nakon spajanja senzora Väisälä WXT510 s notebook računalom te pokretanja softvera *WeatherTransmitter* na računalu i odabirom opcije *WXT510* otvaraju se izbornici (slika 4):

- *Prikupljanje podataka*
- *Priprema parametara za računanje*
- *Spremi podešenja*
- *Učitaj podešenja*
- *Računaj*
- *Kratko izvješće*
- *Izvješće po stajalištu.*



Slika 4. Izbornici u softveru WeatherTransmitter.

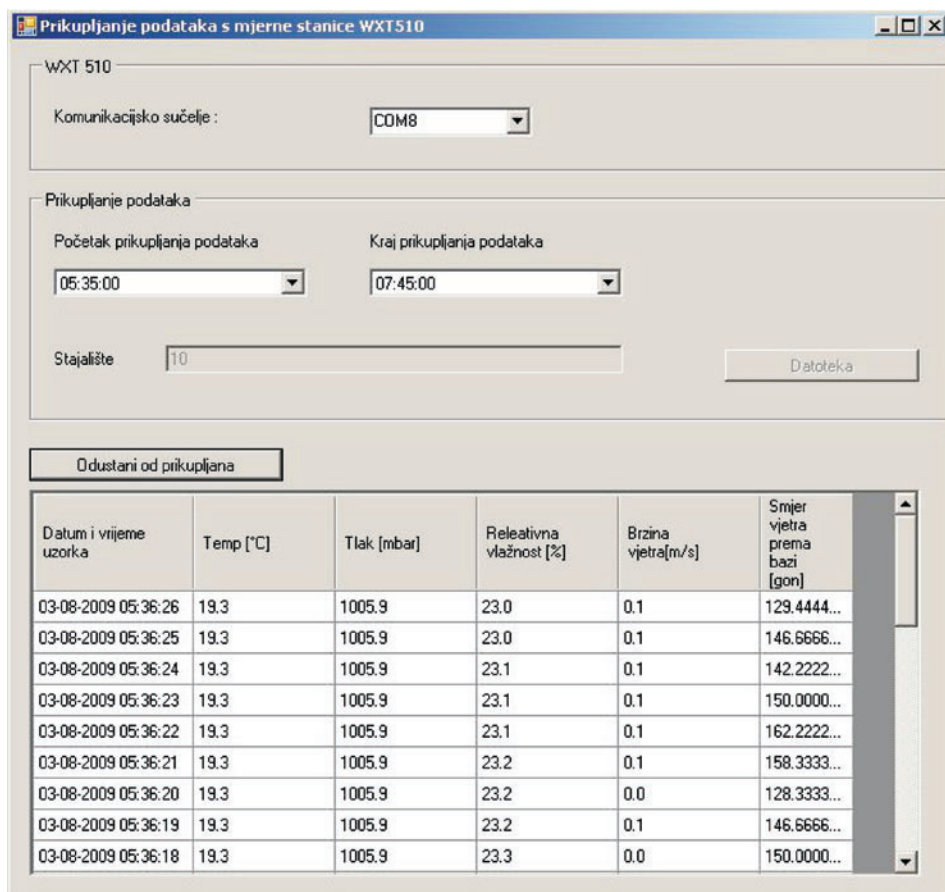
Prije početka mjerenja, najprije se otvara izbornik *Prikupljanje podataka* (slika 5). U tom izborniku potrebno je upisati:

- *Komunikacijsko sučelje* – odabrati COM port
- *Početak prikupljanja podataka* – upisati datum, sat, minutu i sekundu početka prikupljanja podataka
- *Kraj prikupljanja podataka* – upisati datum, sat, minutu i sekundu kraja prikupljanja podataka
- *Stajalište* – upisati ime stajališta
- *Datoteka* – upisati ime datoteke u koju će se pohraniti podaci mjerenja.

Nakon što se upišu navedeni podaci, odabere se opcija *Pokreni prikupljanje podataka*. Prikupljanje atmosferskih parametara početak će u jedinici vremena koja je definirana kao početak prikupljanja podataka te će se prikupljati i pohranjivati za svaku vremensku sekundu (slika 5).

Nakon obavljenog mjerenja, prikupljene podatke atmosferskih parametara sa svih notebook računala na koja su pohranjivani podaci sa senzora Väisälä treba prenijeti na jedno računalo, na kojem će se ti podaci obraditi.

Zatim se odabere izbornik *Priprema parametara za računanje* (slika 6), gdje se učitaju datoteke sa svih stajališta na kojima su obavljena mjerenja sensorima Väisälä, kako bi se izračunale srednje vrijednosti atmosferskih parametara. Pritom se može učitati proizvoljan broj datoteka mjerenja. Pogrešno unesene datoteke mogu se obrisati.



Slika 5. Prikupljanje atmosferskih parametara senzorom Väisälä WXT510.

Nakon toga potrebno je upisati *Pune minute* za koje se računaju sredine – za upisana vremena izračunat će se sredine za sve izmjerene atmosferske parametre (sa svih stajališta). To su vremena u kojima su mjerene duljine na kalibracijskoj bazi s pomoću elektrooptičkog daljinomjera. Ti podaci mogu se dodavati i brisati, a računalo ih samo razvrstava po vremenima.

Slijedi unos *Broj uzoraka za računanje sredine*, i to:

- *Prije pune minute* – broj uzoraka (sekundi) prije pune minute za koju će se računati sredine. Za mjerenja na kalibracijskoj bazi to je obično 15 sekundi, a može biti do 600 uzoraka (sekundi).
- *Poslije pune minute* – broj sekundi poslije pune minute za koju će se računati sredine. Za mjerenja na kalibracijskoj bazi to je obično 15 sekundi, a može biti do 600 uzoraka (sekundi).

Na taj se način integriraju, odnosno osrednjuju atmosferski parametri, čime se postiže bolja točnost njihova mjerenja.

**Priprema za računanje**

Podaci iz kojih se računaju sredine

Datoteke s podacima

Odabir datoteke

Obrisi

Pune minute za koje se računaju sredine

Minute 05:50 03, kolovoz

Sati	Minute	Dan	Mjesec	Godina

Dodaj

Obrisi

Broj uzoraka za računanje sredine

Prije pune minute 0

Poslije pune minute 0

Odustani

Prihvati

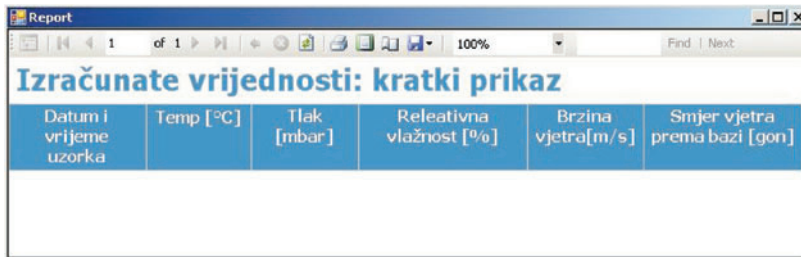
Slika 6. Priprema parametara za računanje.

Nakon toga odabere se izbornik *Spremi podešenja*, gdje se upisuje ime datoteke u koju će biti pohranjeni parametri za računanje. Ako su parametri za računanje bili prije pohranjeni, može se odabrati izbornik *Učitaj podešenja* te odabrati odgovarajuća datoteka.

Nakon što su podešeni parametri za računanje, slijedi računanje odabirom na izbornik *Računaj*. Kao rezultati računanja dobiju se:

- *Rezultati po stajalištima*
- *Rezultati (sredine od svih stajališta)*
- *Rezultati (kratki prikaz)* (slika 7).





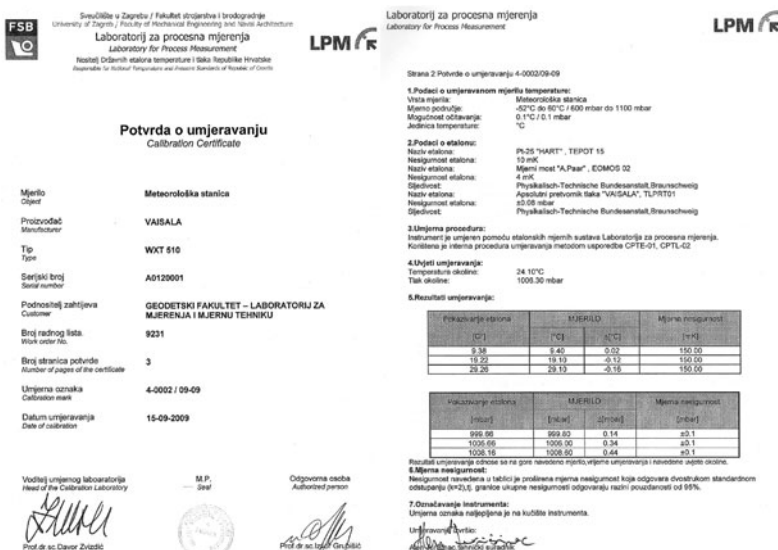
Slika 7. Izbornik: Kratki prikaz izračunatih vrijednosti (sredine od svih stajališta).

Kako bi se mogli analizirati rezultati mjerenja atmosferskih parametara s različitim stajališta, može se ispisati *Izuješće po stajalištima*. Ti rezultati mogu se učitati u MS Excel ili Adobe Reader radi daljnje obrade i analize (Zrinjski 2010).

### 4. Ispitivanje senzora Väisälä WXT510 u Laboratoriju

Da bi se mogli točno mjeriti atmosferski parametri s pomoću dva senzora Väisälä WXT510, senzore je potrebno umjeriti. To je posebno nužno pri preciznom mjerenju duljina na kalibracijskoj bazi. Stoga su oba senzora Väisälä WXT510 umjerena u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu te su izdane dvije Potvrde o umjerenju (FSB 2009, slika 8). Za umjerenje temperature zraka primijenjeni su etaloni:

- Pt-25 “HART”, TEPOT 15, mjerne nesigurnosti 10 mK
- mjerni most “A.Paar”, EOMOS 02, mjerne nesigurnosti 4 mK.



Slika 8. Potvrda o umjerenju senzora Väisälä WXT510 (prva i druga strana).

Za umjeravanje tlaka zraka primijenjen je etalon: Apsolutni pretvornik tlaka "VAISALA", TLPRT01, mjerne nesigurnosti 0,08 mbar. Kao rezultat umjeravanja senzora Väisälä WXT510 dobivene su (FSB 2009):

- mjerna nesigurnost za temperaturu zraka: 150 mK
- mjerna nesigurnost za tlak zraka: 0,1 mbar,

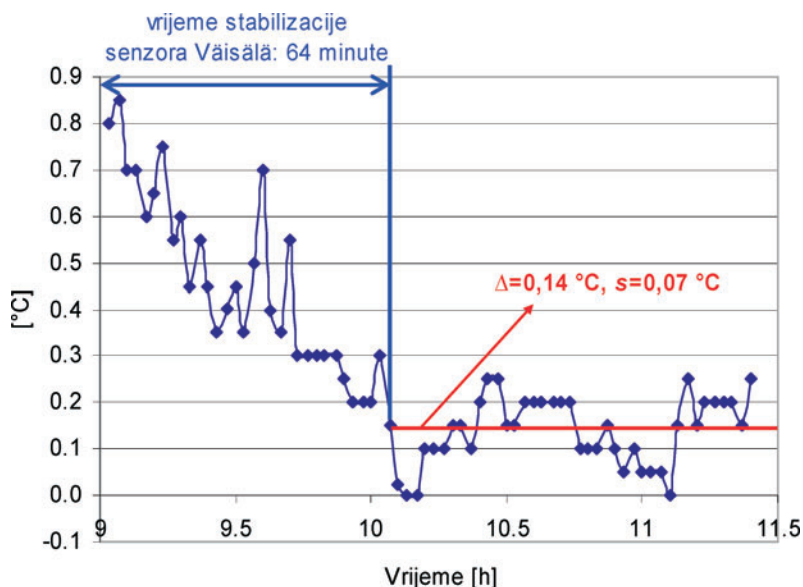
uz faktor proširenja  $k = 2$ .

Prema tome, s umjerenim senzorom Väisälä WXT510 mogu se postići mjerne nesigurnosti bolje od 0,3 °C i 0,5 hPa, koje su navedene u tehničkim podacima proizvođača.

Prije mjerenja atmosferskih parametara na kalibracijskoj bazi, u Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu izmjereni su i uspoređeni rezultati atmosferskih parametara, dobiveni s pomoću tri različita mjerna uređaja:

- senzorom Väisälä WXT510
- psihrometrom Rössel-Thermometer
- elektroničkom meteostanicom Thommen HM30 (URL 3).

Nakon priključenja senzora Väisälä WXT510 na napon od 9 V, do njegove stabilizacije došlo je nakon 64 minute (slika 9), iako su senzor Väisälä WXT510 i psihrometar Rössel-Thermometer bili cijelu noć u istoj prostoriji. Stoga je senzore Väisälä WXT510 potrebno uključiti 64 minute prije početka mjerenja atmosferskih parametara (ili još bolje približno 70 minuta prije početka mjerenja). Vrijeme stabilizacije senzora ovisi o temperaturi okoline.



Slika 9. Razlike temperatura izmjerenih psihrometrom Rössel-Thermometer i senzorom Väisälä WXT510 u Laboratoriju.

Iz prikaza na slici 9 vidi se da je razlika između temperatura izmjerenih psihrometrom Rössel-Thermometer i senzorom Väisälä WXT510 nakon njegove stabilizacije bila prosječno  $\Delta = 0,14$  °C, a standardno odstupanje određivanja razlike temperature  $s = 0,07$  °C.

## 5. Mjerenje atmosferskih parametara na kalibracijskoj bazi

Mjerenje atmosferskih parametara na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (slika 10) obavljena su 3. kolovoza 2009. godine, s pomoću dva senzora Väisälä WXT510 koja su bila postavljena na početnoj i završnoj točki mjerene duljine od 1000 m. Senzor Väisälä 1 bio je postavljen na stajalištu 0 (početak kalibracijske baze), a Väisälä 2 na stajalištu 10 (na 1000 m). U isto vrijeme napravljena su, također, mjerenja psihrometrima (psihrometar 1 na stajalištu 0, a psihrometar 2 na stajalištu 10) te meteostanicom Thommen HM30 (na stajalištu 0). Precizno mjerenje duljina obavljeno je pomoću precizne mjerne stanice Leica TCA2003, mjerne nesigurnosti (0,3–1 mm + 1 ppm) (URL 4).



Slika 10. Kalibracijska baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Kalibracijska baza ukupne duljine 3100 m, s ukupno 25 stupova, nalazi se na nasipu odteretnoga kanala Sava–Odra (Solarić i dr. 1992) u Donjoj Lomnici. Nasip je star 45 godina, povišen je približno 4 m iznad okolnog terena i približno horizontalan, tako da su duž baze povoljno ujednačene atmosferske prilike. Takvi uvjeti povoljni su, kako za mjerenja elektrooptičkim daljinomjerima, tako i za GNSS-mjerenja.

## 5.1. Mjerenje temperature zraka

Kako su ova mjerenja atmosferskih parametara na kalibracijskoj bazi s pomoću dva senzora Väisälä WXT510 obavljena prvi put, za kontrolu su mjerenja izvedena i s pomoću dva psihrometra Rössel-Thermometer te elektroničkom meteostanicom Thommen HM30 (URL 3). Senzori Väisälä, psihrometri i meteostanica postavljani su na visinu objekta instrumenta TCA2003 i bili su zaštićeni od direktnog Sunčeva zračenja (slika 11).



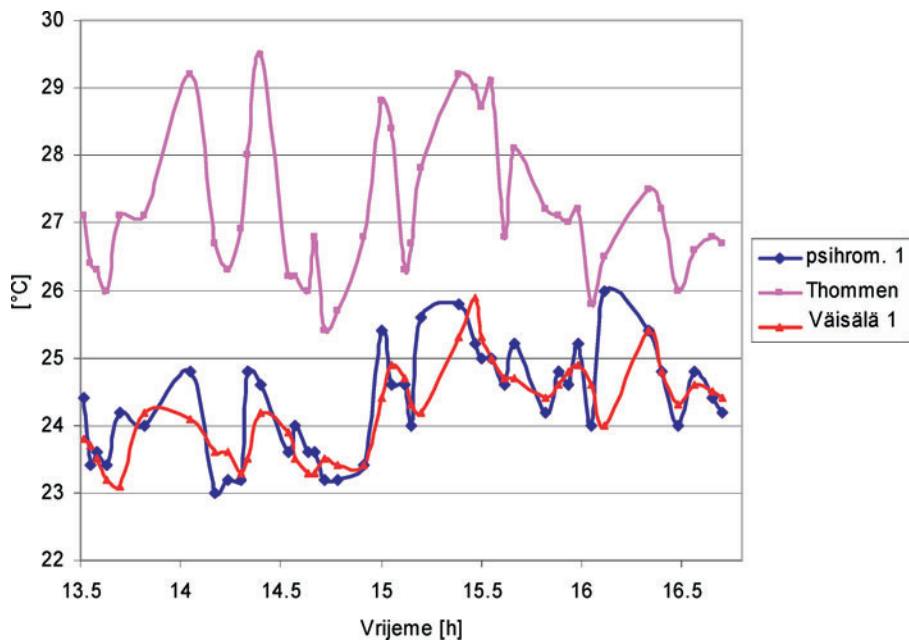
Slika 11. Zaštita meteoroloških senzora od direktnog Sunčeva zračenja (stajališta 0 i 10).

Prethodna precizna mjerenja kalibracijske baze Geodetskog fakulteta obavljena su Mekometrom ME5000, 1996. godine, u suradnji s prof. dr. sc. Klausom Schnädelbachom i dr. sc. Wolfgangom Maurerom s Technische Universität München (Geodätisches Institut) (Maurer i dr. 2001). Atmosferski parametri tada su mjereni pomoću dva psihrometra, pri čemu je primijenjena ista zaštita od direktnog Sunčeva zračenja.

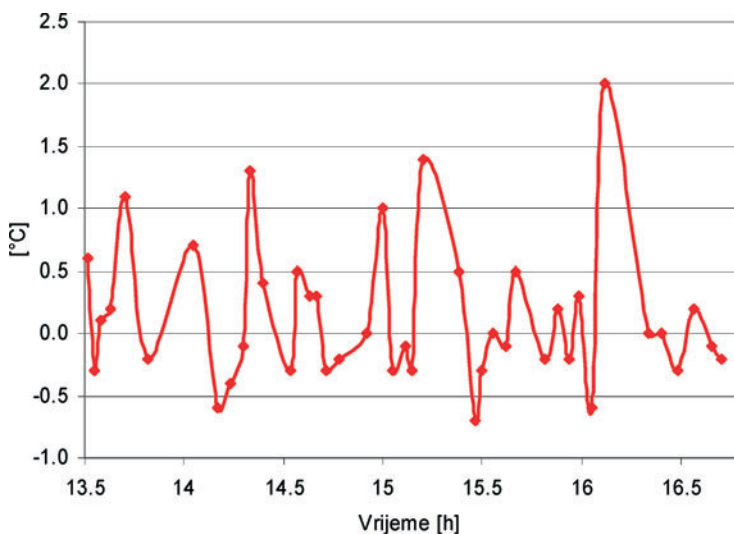
Na slici 12 prikazane su vrijednosti temperature zraka na stajalištu 0 (uz stup 0), dobivene pomoću senzora Väisälä 1, psihrometra 1 i meteostanice Thommen, izmjerene tijekom preciznog mjerenja duljina na kalibracijskoj bazi 2009. godine. Na slici 12 vidi se da rezultati mjerenja s pomoću meteostanice Thommen odstupaju i do 5 °C od mjerenja dobivenih sensorom Väisälä i psihrometrom. Odstupanja se javljaju zbog toga što meteostanica Thommen nije umjerena posljednjih 8 godina.

Na slici 13 prikazane su razlike izmjerenih vrijednosti temperature zraka na stajalištu 0: psihrometar 1 minus Väisälä 1.

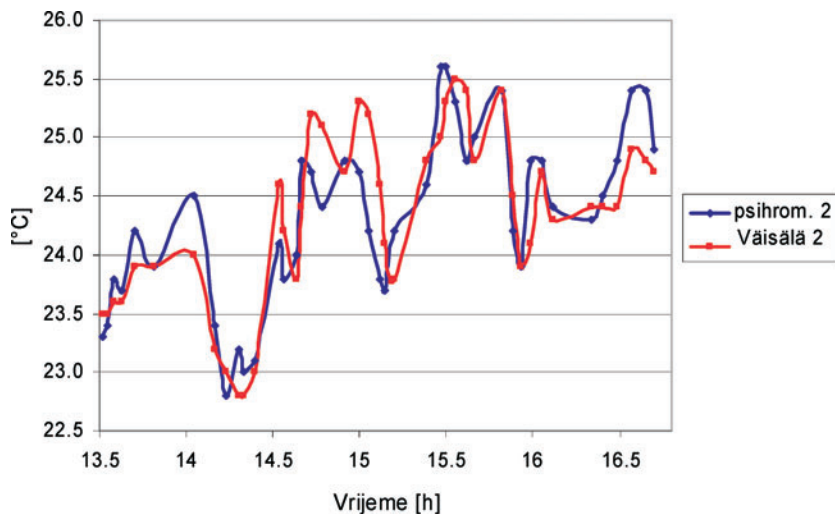
Na slici 14 prikazane su izmjerene vrijednosti temperature zraka na stajalištu 10 (uz stup 10), dobivene pomoću senzora Väisälä 2 i psihrometra 2, za vrijeme preciznog mjerenja duljina na kalibracijskoj bazi.



Slika 12. Temperature zraka izmjerene na stajalištu 0, dobivene pomoću senzora Väisälä 1, psihrometra 1 i meteostanice Thommen, za vrijeme preciznog mjerenja duljina na kalibracijskoj bazi.

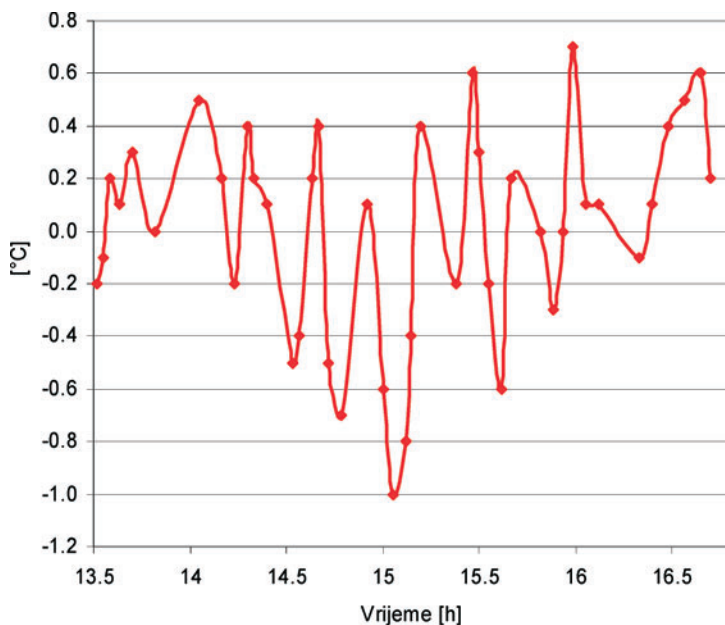


Slika 13. Razlike temperatura zraka izmjerenih na stajalištu 0: psihrometar 1 minus Väisälä 1.



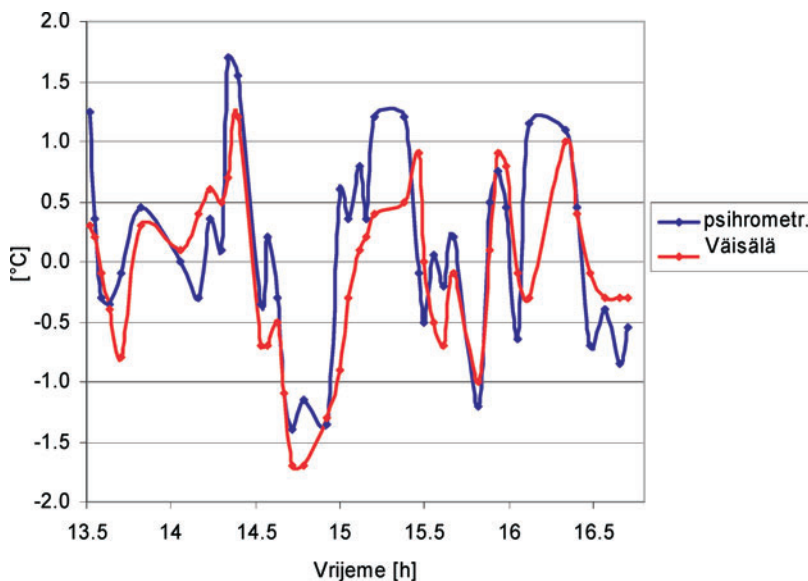
Slika 14. Temperature zraka izmjerene na stajalištu 10, dobivene pomoću senzora Väisälä 2 i psihrometra 2, za vrijeme preciznog mjerenja duljina na kalibracijskoj bazi.

Na slici 15 prikazane su razlike izmjerenih vrijednosti temperature zraka na stajalištu 10: psihrometar 2 minus Väisälä 2.



Slika 15. Razlike temperatura zraka izmjerenih na stajalištu 10: psihrometar 2 minus Väisälä 2.

Na slici 16 prikazane su razlike izmjerenih vrijednosti temperature zraka između stajališta 0 i 10, dobivene sensorima Väisälä i psihrometrima. Na slici se vidi da razlike u temperaturi zraka između stajališta 0 i 10 variraju i do 1,7 °C. Stoga bi za točnije mjerenje temperature zraka bilo potrebno postaviti još 2 do 3 senzora Väisälä (ravnomojerno raspoređenih) na duljini kalibracijske baze od 1000 m. Time bi se postigla točnost mjerenja temperature zraka od  $\pm 0,1$  °C, koja je potrebna za precizna mjerenja duljina na kalibracijskoj bazi.

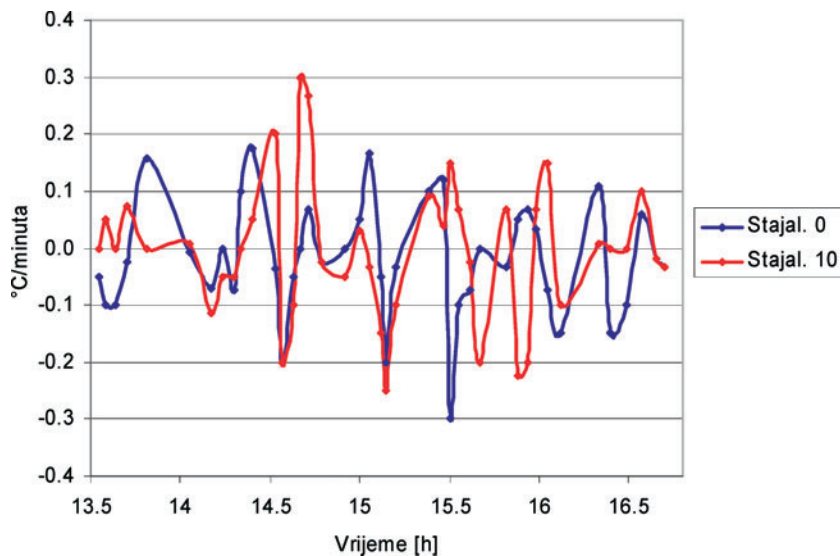


Slika 16. Razlike temperatura zraka izmjerenih između stajališta 0 i 10, dobivene sensorima Väisälä i psihrometrima.

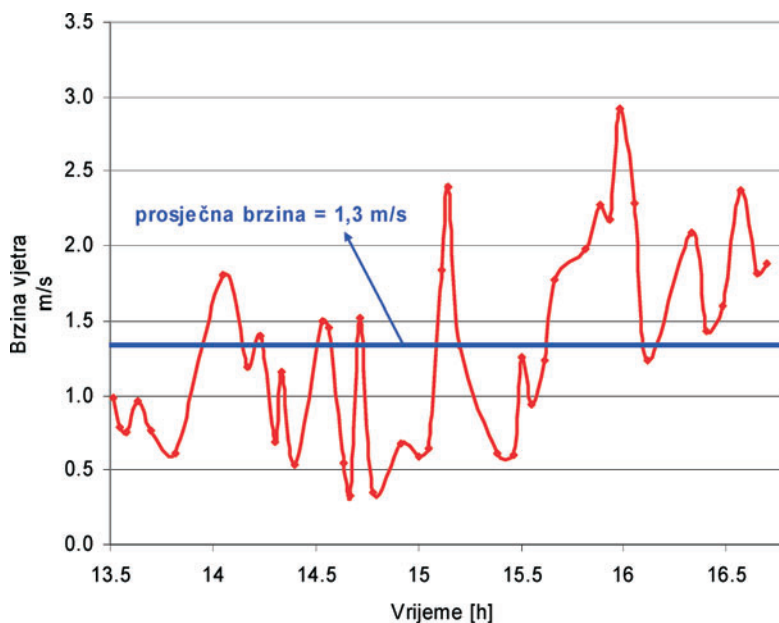
Na slici 17 prikazane su brzine promjena temperature zraka u jednoj vremenskoj minuti, izmjerene na stajalištima 0 i 10. Na slici se vidi da je najveća brzina promjene temperature zraka iznosila 0,3 °C u jednoj vremenskoj minuti. Iz tog podatka može se zaključiti da bi za računanje korekcija duljina zbog utjecaja atmosferskih parametara bilo potrebno srednje vrijednosti atmosferskih parametara izračunati ne samo za sat i punu minutu, nego i za sekundu.

Na slici 18 prikazane su srednje vrijednosti brzine vjetra između stajališta 0 i 10. Za cijelo razdoblje mjerenja, dobivena je prosječna brzina vjetra od 1,3 m/s.

Prema ovim ispitivanjima vidljivo je da se temperatura zraka može točnije mjeriti sensorima Väisälä nego psihrometrima.



Slika 17. Brzine promjena temperature zraka u jednoj vremenskoj minuti, izmjerene na stajalištima 0 i 10.

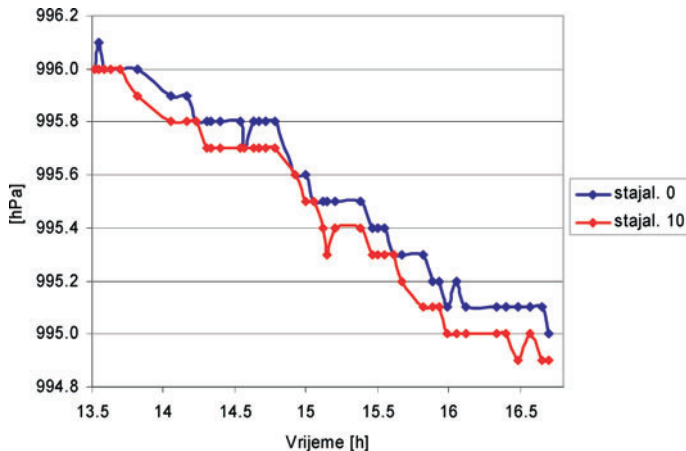


Slika 18. Srednje vrijednosti brzine vjetra između stajališta 0 i 10.



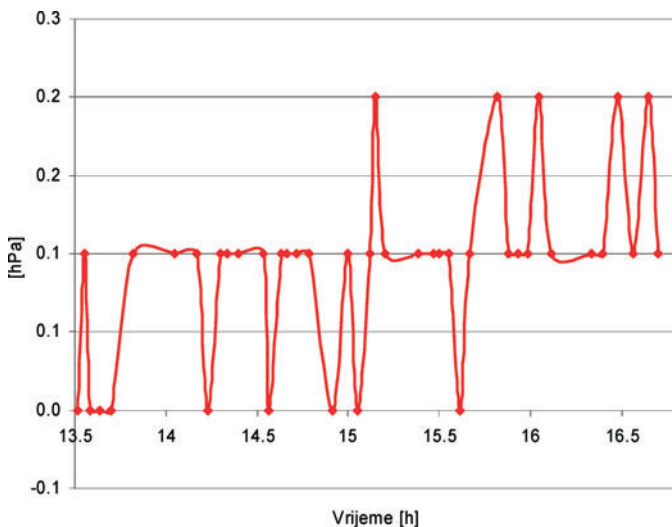
## 5.2. Mjerenje tlaka zraka

Tlak zraka također je mjereno senzorima Väisälä, tijekom preciznog mjerenja duljina. Na slici 19 prikazane su izmjerene vrijednosti tlaka zraka na stajalištima 0 i 10, dobivene pomoću senzora Väisälä. Na slici 19 vidi se da je tijekom cijelog mjerenja tlak zraka veći na stajalištu 0, i to zbog toga što je nadmorska visina stajališta 0 manja za oko 0,84 m. Također se vidi da se tijekom mjerenja, na oba stajališta, tlak zraka promijenio za samo 1,1 hPa.



Slika 19. Tlakovi zraka izmjereni na stajalištima 0 i 10, dobiveni senzorima Väisälä.

Na slici 20 prikazane su razlike tlakova zraka izmjerenih na stajalištima 0 i 10.



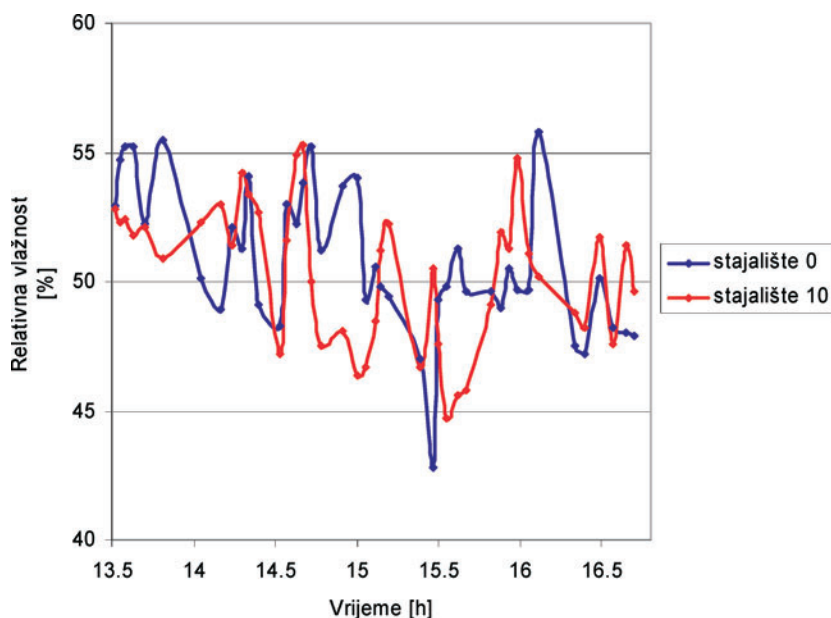
Slika 20. Razlike tlakova zraka izmjerenih na stajalištima 0 i 10.

Da bi se izračunala korekcija izmjerene duljine od 1000 m s točnošću od  $\pm 1$  mm, tlak zraka treba izmjeriti s točnošću od  $\pm 3$  hPa. Kako su razlike tlakova zraka na stajalištima 0 i 10 maksimalno 0,2 hPa, korekcija duljine može se, zbog utjecaja tlaka zraka, izračunati s točnošću boljom od  $\pm 0,1$  mm.

Prema slici 20 može se zaključiti da je tlak zraka dovoljno mjeriti samo na početku i kraju kalibracijske baze tijekom preciznog mjerenja duljina (nije ga nužno mjeriti na stajalištima između početka i kraja baze).

### 5.3. Mjerenje relativne vlažnosti zraka

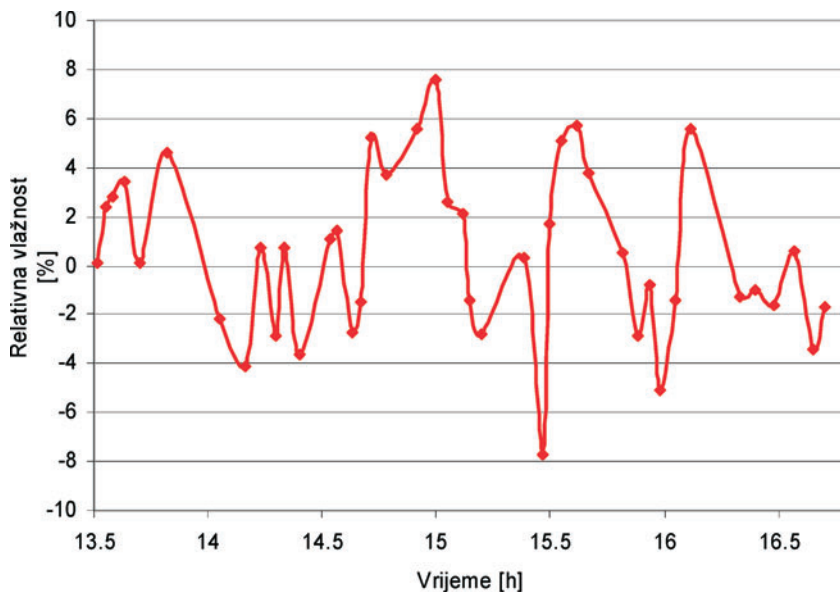
Relativna vlažnost zraka izmjerena je sensorima Väisälä, tijekom preciznog mjerenja duljina. Na slici 21 prikazane su izmjerene vrijednosti relativne vlažnosti zraka na stajalištima 0 i 10, dobivene sensorima Väisälä.



Slika 21. Relativne vlažnosti zraka izmjerene na stajalištima 0 i 10, dobivene sensorima Väisälä.

Na slici 22 prikazane su razlike relativnih vlažnosti zraka izmjerenih na stajalištima 0 i 10.

Kako su razlike relativnih vlažnosti zraka na stajalištima 0 i 10 maksimalno 8%, korekcija duljine može se, zbog utjecaja relativne vlažnosti zraka, izračunati s točnošću puno boljom od  $\pm 0,1$  mm. Prema slici 22 može se zaključiti da je relativnu vlažnost zraka dovoljno mjeriti samo na početku i kraju kalibracijske baze.



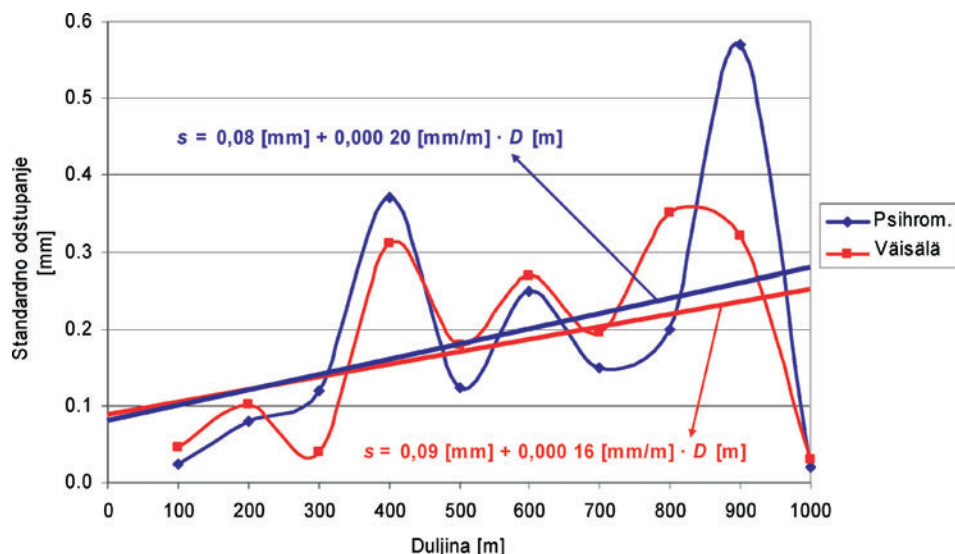
Slika 22. Razlike relativnih vlažnosti zraka izmjenjenih na stajalištima 0 i 10.

## 6. Standardna odstupanja srednjih vrijednosti duljina

Kako bi se dobila objektivna procjena kvalitete prikupljenih atmosferskih parametara sensorima Väisälä, u odnosu na parametre prikupljene psihrometrima, napravljena je korekcija duljina mjerenih naprijed i natrag, za utjecaj atmosferskih parametara prikupljenih tim dvjema vrstama senzora.

Nakon uvedenih korekcija, izračunata su standardna odstupanja srednjih vrijednosti duljina, dobivenih iz mjerenja naprijed i natrag. Tako izračunata standardna odstupanja daju relativno objektivnu procjenu točnosti prikupljenih atmosferskih parametara tim sensorima, jer se duljine naprijed i natrag ne mjere u istoj jedinici vremena.

Na slici 23 prikazana su standardna odstupanja srednjih vrijednosti duljina, dobivenih iz mjerenja naprijed i natrag, nakon obračuna korekcije zbog utjecaja atmosferskih parametara koji su izmjereni sensorima Väisälä te psihrometrima (Zrinjski 2010). Na slici se vidi da su standardna odstupanja duljina nakon uzimanja u račun korekcije za atmosferske parametre prikupljene sensorima Väisälä nešto manja na velikim duljinama, nego ista dobivena iz mjerenja psihrometrima. Razlog je takvih standardnih odstupanja što se temperatura zraka sensorima Väisälä može mjeriti nešto točnije nego psihrometrima.



Slika 23. Standardna odstupanja srednjih vrijednosti duljina, dobivenih iz mjerenja naprijed i natrag nakon obračuna korekcije zbog utjecaja atmosferskih parametara.

## 7. Zaključak

Automatiziranim postupkom mjerenja atmosferskih parametara sensorima Väisälä uz pomoć softvera *WeatherTransmitter* znatno je olakšano prikupljanje tih podataka te obrada podataka mjerenja, koja je prije bila dugotrajna. Sam postupak prikupljanja i obrade atmosferskih parametara u potpunosti je automatiziran, što daje veliku prednost primjeni senzora Väisälä u postupku mjerenja.

Pri preciznom mjerenju duljina na kalibracijskoj bazi važno je odabrati vrijeme kada su atmosferske prilike povoljne. Poželjno je da je oblačno vrijeme, da zrak ne treperi, da puše vrlo slab vjetar te da su tijekom mjerenja vrlo male promjene temperature. Stoga je mjerenje najbolje obaviti tijekom noći ili rano ujutro, prije izlaska Sunca, kada nema rose.

Prilikom mjerenja temperature zraka pomoću psihrometara, bilo je potrebno računati vlažnost iz suhog i vlažnog termometra, uzeti u obzir umjeravanje termometara i tlakomjera te iz svih stajališta na kojima su mjereni atmosferski parametri izračunati srednju vrijednost za temperaturu, tlak i vlažnost zraka. Lošije strane mjerenja atmosferskih parametara pomoću psihrometara i tlakomjera bile su mogućnost manje pogreške očitavanja tih senzora te po jedan pomoćni radnik za očitavanje na svakom stajalištu gdje su bili senzori.

Mjerenja, obavljena 3. kolovoza 2009. godine, pokazala su da je na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu poželjno atmosferske parametre (posebice temperaturu zraka) mjeriti na 5 mjesta (ravnomjerno raspoređenih) duž putanje elektromagnetskog vala, s pomoću 5 senzora Väisälä, kako bi se dobile točnije vrijednosti za atmosferske parametre duž cijele duljine mjerenja. Automa-

tizirana obrada podataka mjerenja atmosferskih parametara jednako je brza neovisno o broju senzora Väisälä.

Koliko je autorima ovoga rada poznato iz dostupne literature, tijekom preciznog mjerenja duljina na kalibracijskoj bazi prvi je put primijenjeno automatizirano prikupljanje atmosferskih parametara i njihova obrada.

## Literatura

FSB (2009): Potvrda o umjeravanju, Laboratorij za procesna mjerenja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

Maurer, W., Schnädelbach, K., Solarić, N., Novaković, G. (2001): Povezivanje Münchenske i zagrebačke baze za ispitivanje i umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera, Geodetski list, 3, 177–194.

Solarić, N., Solarić, M., Benčić, D. (1992): Projekt i izgradnja kalibracijske baze Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Geodetski list, 1, 7–25.

Väisälä (2005): Weather Transmitter WXT510 – User's Guide, Väisälä Oyj, Helsinki, Finland.

Zrinjski, M. (2010): Definiranje mjerila kalibracijske baze Geodetskog fakulteta primjenom preciznog elektrooptičkog daljinomjera i GPS-a, Doktorska disertacija, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

URL 1: Väisälä – Weather Multi-Sensor,  
<http://www.vaisala.com/instruments/products/weathermultisensor.html>,  
(15.02.2011.).

URL 2: Electronics Tutorials – RC Oscillator,  
[http://www.electronics-tutorials.ws/oscillator/rc\\_oscillator.html](http://www.electronics-tutorials.ws/oscillator/rc_oscillator.html), (16.02.2011.).

URL 3: THOMMEN Meteo Station HM30,  
<http://www.cameroninstruments.com/pdfs/HM30.pdf>, (19.02.2011.).

URL 4: Leica TCA1800/TCA2003/TC2003,  
[http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/tps2000/brochures/TPS2000\\_brochure\\_en.pdf](http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/tps2000/brochures/TPS2000_brochure_en.pdf), (20.02.2011.).

## Automation of the Measurement of Atmospheric Parameters in Precise Distance Measurement

*ABSTRACT.* This paper presents the developed automated measurement of atmospheric parameters by means of two sensors Väisälä WXT510 and the notebook for the purpose of precise distance measurements at the calibration baseline of the Faculty of Geodesy, University of Zagreb. During the precise distance measurements, it is very important to measure the atmospheric parameters as precisely as possible: temperature, pressure and relative air humidity. The error in temperature measurement of 1 °C causes the error in the measured distance of 1 mm at 1000 m. For precise distance measurements it is therefore necessary to measure the temperature with the accuracy of  $\pm 0.1$  °C. For this purpose, in order to measure the atmospheric parameters as accurately as possible, the automation of recording the atmospheric parameters measured by means of the sensors Väisälä has been developed. The testing in the Laboratory for Measurements and Measuring Techniques of the Faculty of Geodesy has shown that after the connection to the voltage one should wait approximately 70 minutes for it to be stabilized. At the calibration baseline of the Faculty of Geodesy it has been found out, that the sensors Väisälä need to be set on 5 equally arranged places at the calibration baseline at the distance of 1000 m for the purpose more accurate temperature measurement. After the automatic gathering of atmospheric parameters and their automated processing, we obtain the results for average temperature, pressure and relative air humidity needed in further automated processing and adjustment of distances measured with precise electro-optical distance meter.

*Keywords:* automated measurement of atmospheric parameters, Väisälä WXT510, WeatherTransmitter, precise distance measurements.

*Primljeno:* 2011-03-25

*Prihvaćeno:* 2012-09-05