

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Cergol, K., 2016. Vpliv bočne refrakcije na merjenje horizontalnih smeri. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Ambrožič, T., somentor Štebe, G.): 43 str.

Datum arhiviranja: 11-07-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Cergol, K., 2016. Vpliv bočne refrakcije na merjenje horizontalnih smeri. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Ambrožič, T., co-supervisor Štebe, G.): 43 pp.

Archiving Date: 11-07-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GEODEZIJA
SMER GEODEZIJA V
INŽENIRSTVU**

Kandidatka:

KATJA CERGOL

**VPLIV BOČNE REFRAKCIJE NA MERJENJE
HORIZONTALNIH SMERI**

Diplomska naloga št.: 425/GI

**INFLUENCE OF LATERAL REFRACTION ON
MEASURED HORIZONTAL DIRECTIONS**

Graduation thesis No.: 425/GI

Mentor:

izr. prof. dr. Tomaž Ambrožič

Somentor:

asist. Gašper Štebe

Ljubljana, 29. 06. 2016

ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Ta stran je namenoma prazna.

IZJAVE

Spodaj podpisana študentka KATJA CERGOL, vpisna številka 26202657, avtorica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: VPLIV BOČNE REFRAKCIJE NA MERJENJE HORIZONTALNIH SMERI

IZJAVLJAM

1. Obkrožite eno od variant a) ali b)

a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobila vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označila;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnala v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: Ljubljani

Datum: 21. 6. 2016

Podpis študentke: _____

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.3(043.2)
Avtor:	Katja Cergol
Mentor:	izr. prof. dr. Tomaž Ambrožič
Somentor:	asist. Gašper Štebe
Naslov:	Vpliv bočne refrakcije na merjenje horizontalnih smeri
Obseg in oprema:	43 str., 12 pregl., 27 sl., 6 graf., 24 en.
Ključne besede:	refrakcija, lom svetlobe, bočna refrakcija, refrakcijski kot, temperaturni gradient

Izvleček

Teoretični del diplomske naloge, ki je razdeljena na dva dela, opisuje refrakcijo kot fizikalni pojav. V prvem delu so predstavljene osnovne lastnosti svetlobe kot elektromagnetnega valovanja z osnovami lomnega zakona, v drugem delu pa je refrakcija predstavljena kot pogrešek, ki se pojavlja pri geodetskih meritvah.

V praktičnem delu naloge je na podlagi terenskih meritev predstavljena izmera horizontalne refrakcije. Vpliv smo skušali prikazati pod različnimi pogoji, in sicer glede na temperaturo, oddaljenost vizure od objekta, oddaljenost objekta od instrumenta in glede na dolžino vizure, pri čemer smo za objekt vzeli osebni avtomobil. Nato smo s pomočjo enačb, ki so predstavljene v tuji literaturi, poskušali izračunati refrakcijski kot in njegov vpliv na meritve.

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALIST INFORMATION

UDC: 528.3(043.2)
Author: Katja Cergol
Supervisor: assoc. prof. Tomaž Ambrožič, Ph.D.
Co–advisor: assist. Gašper Štebe
Title: Influence of lateral refraction on measured horizontal directions
Notes: 43 p., 12 tab., 27 fig., 6 graph., 24 eq.
Key words: refraction, diffraction, lateral refraction, angle of refraction, temperature gradient

Abstract

The theoretical part of the thesis is divided into two parts and it describes the refraction as a physical phenomenon. The first part represents the basic characteristics of the light as an electromagnetic wave according to the law of refraction. The second part presents the refraction as a measurement error, which shows up in geodetical measurements.

The practical part presents the reading of the horizontal refraction, based on the field measurement. Our goal was to describe the influence under different circumstances, such as: the temperature, the distance of line of sight from the object, the distance of the object from the instrument, and the length of line of sight. The object of our measurement was an automobile. With the help of the equations presents in foreign literature, our next step was to calculate the angle of refraction and its influence on the measurements.

Ta stran je namenoma prazna.

ZAHVALA

Za vso pomoč, vodenje in številne nasvete se iskreno zahvaljujem mentorju dr. Tomažu Ambrožiču in somentorju Gašperju Štebetu.

Posebna zahvala gre moji družini, predvsem staršem, ki so mi stali ob strani in me podpirali skozi vsa študijska leta, ter mojemu Aleksandru za vso potrpežljivost in spodbujanje pri zadnjih korakih do uspeha.

Hvala Karmen in Manci za vso pomoč in nepozabne trenutke v času študija ter vsem, ki ste verjeli in še vedno verjamete vame.

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	III
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	V
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALIST INFORMATION	VII
ZAHVALA.....	IX
1 UVOD	1
2 REFRAKCIJA KOT FIZIKALNI POJAV	2
2.1 Lom svetlobe v atmosferi (v ozračju).....	2
2.2 Svetloba kot elektromagnetno valovanje	5
2.3 Lomni količnik	7
2.4 Lomni zakon.....	8
3 REFRAKCIJA PRI GEODETSKIH MERITVAH.....	10
3.1 Vertikalna refrakcija.....	10
3.1.1 Koeficient refrakcije in vpliv ukrivljenosti Zemlje	10
3.1.2 Trigonometrično višinomerstvo	11
3.1.3 Geometrični nivelman	13
3.1.4 Zmanjševanje vpliva pogreška refrakcije pri niveliranju	14
3.2 Horizontalna oz. bočna refrakcija	15
3.2.1 Pogreški pri merjenju Hz smeri.....	15
3.2.1.1 Pogreški delovnega okolja	15
3.2.1.2 Instrumentalni pogreški.....	16
3.2.1.3 Pogreški operaterja.....	16
3.2.2 Pregled literature, ki obravnava bočno refrakcijo	16
4 IZMERA VELIKOSTI HORIZONTALNE REFRAKCIJE	20
4.1 Opis uporabljenega instrumenta.....	20
4.1.1 Leica TS30	20
4.1.2 Podnožje, nosilec reflektorja in reflektor	21
4.1.3 Psihrometer.....	22
4.1.4 Tupalni termometer	23
4.1.5 Stožci in avtomobil.....	24
4.2 Vzpostavitev terenskih meritev	24
4.2.1 Izbira geometrije točk.....	25
4.2.2 Postavljanje avtomobila	26
4.3 Metoda in postopek merjenja	27
4.3.1 Girusna metoda	27
4.3.2 Postopek merjenja	27
4.4 Obdelava in rezultati meritev	28
4.4.1 Obdelava meritev	28
4.4.2 Izračun refrakcijskega kota na podlagi terenskih meritev	30
4.4.2.1 Horizontalne smeri	30
4.4.3 Teoretični izračun refrakcijskega kota	34

5	ZAKLJUČEK.....	40
VIRI.....		41

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Lomni količnik snovi [12,13].....	7
Preglednica 2: Tehnični podatki tahimetra Leica Geosystems TS30 [20]	21
Preglednica 3: Tehnični podatki Testo 110 [22]	23
Preglednica 4: Rezultati terenskih meritev.....	28
Preglednica 5: Sredine horizontalnih smeri, zenitnih razdalj in poševnih dolžin s pripadajočimi standardnimi deviacijami.....	29
Preglednica 6: Sredine in standardne deviacije merjenih horizontalnih smeri.....	30
Preglednica 7: Rezultati testiranja stabilnosti stativov.....	33
Preglednica 8: Refrakcijski kot	34
Preglednica 9: Izračun krivulje temperaturnega gradienta (1. primer).....	35
Preglednica 10: Izračun krivulje temperaturnega gradienta (2. primer).....	36
Preglednica 11: Izmerjeni podatki in izračun refrakcijskega kota po enačbi (16)	37
Preglednica 12: Izračun refrakcijskega kota po enačbi (16), če smo temperaturo na vizuri pri objektu – avtomobilu izbrali.....	39

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Vpliv refrakcije glede na oddaljenost avtomobila od instrumenta	31
Grafikon 2: Stabilnost stativov v času merjenja.....	31
Grafikon 3: Refrakcijski kot z natančnostjo.....	34
Grafikon 4: Krivulja temperaturnega gradienta (1. primer)	35
Grafikon 5: Krivulja temperaturnega gradienta (2. primer)	36
Grafikon 6: Prikaz refrakcijskega kota z izmerjenimi vrednostmi in vrednostmi, izračunanimi iz enačbe (16)	39

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO SLIK

Slika 1: Odboj in lom svetlobe [S1]	2
Slika 2: Mavrica [S2]	3
Slika 3: Pot žarkov, ki po lomu in odbojih tvorijo notranji in zunanji lok mavrice [S3]	4
Slika 4: Fata morgana v Severni Sahari [S4]	4
Slika 5: Spodnje (slika levo) in zgornje (slika desno) zračno zrcaljenje [S5]	4
Slika 6: Elektromagnetno valovanje [S6]	5
Slika 7: Sinusno transversalno valovanje v nekem trenutku ($t = 0$ s) [S7]	6
Slika 8: Spekter EMV je širok [S8]	6
Slika 9: Lom žarka k vpadni pravokotnici, kjer velja $n_2 > n_1$	8
Slika 10: Lom žarka od vpadne pravokotnice, kjer velja $n_2 < n_1$	9
Slika 11: Popolni odboj svetlobnega žarka	9
Slika 12: Refrakcijska krivulja	10
Slika 13: Vpliv ukrivljenosti Zemlje in vpliv refrakcije	11
Slika 14: Princip trigonometričnega višinomerstva z upoštevanjem vpliva vertikalne refrakcije in vpliva ukrivljenosti Zemlje	12
Slika 15: Osnovni princip geometričnega nivelmana [S10]	13
Slika 16: Osnovni princip geometričnega nivelmana z uporabo izmenišč [S11]	13
Slika 17: Nivelmanska refrakcija [S12]	14
Slika 18: Zmanjševanje vpliva bočne refrakcije pri odmikanju vizure od objekta [S13]	18
Slika 19: Tahimeter Leica Geosystems TS30 [S14]	20
Slika 20: Precizni reflektor Leica Geosystems GPH1P [S15]	21
Slika 21: Nosilec reflektorja Leica Geosystems GZR3 [S16] in podnožje Leica Geosystems GDF121[S17]	22
Slika 22: Aspiracijski psihrometer	22
Slika 23: Tiplni termometer Testo 110	23
Slika 24: Prometni stožci kot signalizacija točk	24
Slika 25: Geometrija merskega polja	26
Slika 26: Postavljanje avtomobila na različnih točkah	27
Slika 27: Izpis meritev iz instrumenta Leica Geosystems TS30	29

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

Refrakcija je eden izmed dejavnikov, ki lahko v majhni ali veliki meri vpliva na geodetska merjenja. Kljub zavedanju in izkušnjam se lahko zgodi, da pri merjenju pride do večjih odstopanj, zlasti pri meritvah, kjer vizure potekajo ob različnih objektih, ki se zaradi meteoroloških lastnosti različno obnašajo.

S podobnimi situacijami se v stroki srečujemo praktično vsak dan. Pri obdelavi izmerjenih količin uporabljamo vrsto izračunov za različne popravke, poleg tega pa moramo upoštevati pogreške, na katere sami vplivamo, in tudi tiste, na katere kot strokovnjaki nimamo vpliva, vendar jih lahko na različne načine zmanjšamo ali celo odpravimo. Med take pogreške štejemo vpliv refrakcije, ki je posledica vpliva različne optične gostote sredstva, v katerem potuje svetlobno valovanje. Poznamo vertikalno refrakcijo, ki se pojavlja pri merjenju vertikalnih kotov, in horizontalno refrakcijo, ki se pojavlja pri merjenju horizontalnih smeri.

V primerjavi z vertikalno refrakcijo je problem horizontalne oz. bočne refrakcije slabše predstavljen in predvsem velikokrat zanemarjen.

Pri merjenju horizontalnih smeri se velikokrat zgodi, da vizura poteka tik ob raznih objektih, ki se jim zaradi terenskih danosti ne moremo izogniti. Na podlagi praktičnega primera v naravi bomo s pomočjo sicer premičnega objekta, tj. avtomobila, prikazali vpliv bočne refrakcije pri merjenju horizontalnih smeri pod različnimi pogoji, in sicer glede na temperaturo objekta in ozračja, glede na oddaljenost vizure od objekta, oddaljenost objekta od instrumenta in dolžine vizure.

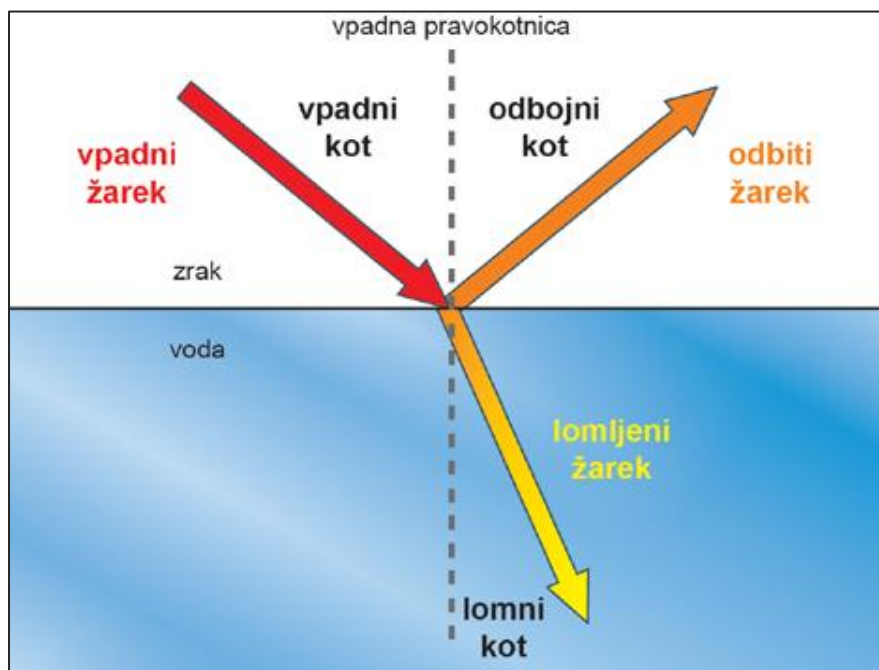
Izmerjene rezultate bomo primerjali z rezultati, izračunanimi s pomočjo enačb iz literature.

2 REFRAKCIJA KOT FIZIKALNI POJAV

Pojem refrakcija izvira iz latinske besede »refractio«, kar v splošnem pomeni prelom, s fizikalnega vidika pa pomeni spremembo smeri valovanja pri prehodu iz ene snovi v drugo. Poznamo refrakcijo svetlobe, refrakcijo zvoka pa tudi atmosfersko refrakcijo, kjer svetloba pri prehodu skozi ozračje spremeni smer [1].

Lom svetlobe je torej fizikalni pojav, pri katerem pride do spremembe smeri svetlobnega žarka, ko ta spreminja hitrost razširjanja valovanja med različnimi snovmi z različno gostoto, kot so npr. voda, zrak, steklo ... Pri prehodu med (različnimi) snovmi se svetloba lahko odbija, lomi in vpija, lahko pa dela vse hkrati. Lomi se, ko prehaja iz optično gostejšega v optično redkejše sredstvo, del žarka pa se v vsakem primeru odbije [2].

Pojav najlažje predstavimo s primerom, ko svetloba prehaja iz zraka v vodo. Pri vpadu svetlobe na mejno ploskev med zrakom in vodo se del svetlobe odbije, preostali del pa prehaja v vodo. Pri tem se vpadnemu žarku spremeni smer; pravimo, da se lomi [3]. Na Sliki 1 sta prikazana odboj in lom svetlobe za različne snovi.



Slika 1: Odboj in lom svetlobe [S1]

2.1 Lom svetlobe v atmosferi (v ozračju)

Vesolje velja za prazen prostor, kjer je gostota snovi podobna vakuumu. Svetloba, ki iz vesolja prihaja na Zemljo, pada premočrtno. Ker pa prehaja skozi ozračje, ki je sestavljeno iz več plasti in mu gostota narašča proti zemeljskemu površju, se žarek vse bolj lomi in posledično spreminja smer. Gostota zraka

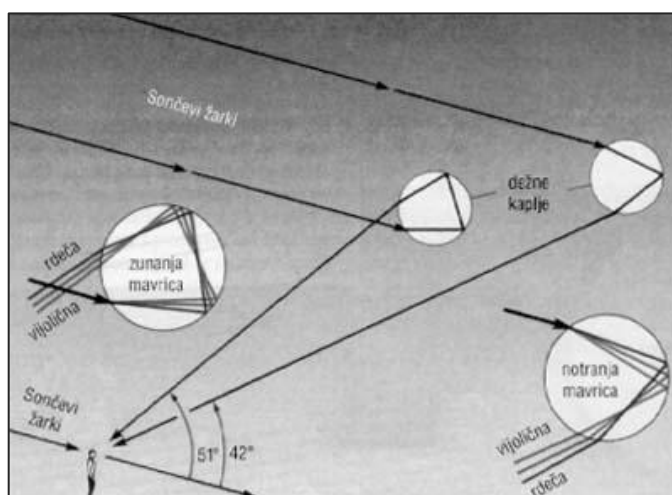
pada z naraščanjem nadmorske višine, na spremembo smeri pa vplivata tudi tlak in temperatura zraka [4].

S pojavi loma svetlobe se praktično srečujemo vsak dan. Najbolj zanimivi primeri, ki jih zaznamo, so mavrica, fata morgana, mežikanje zvezd itn.

Mavrica, je pojav, ki nastane v ozračju zaradi loma in odboja svetlobnih žarkov na vodnih kapljicah. Opazimo jo lahko, ko v deževnem vremenu posije sonce, ob slapovih, na morskih valovih pa tudi ko z razpršenim curkom vode zalivamo vrt, pri vsem tem pa nam mora Sonce sijati za hrbtom. Pojavi se v obliki dveh polkrožnih lokov ali polnih krogov, kar je odvisno od lege opazovalca. Z letal ali visokih gora jo vidimo v obliki kroga. Notranji (prednji) lok je običajno intenzivnejši in sestavljen iz celotnega spektra barv, torej od vijolične spodaj do rdeče zgoraj. Zunanji (zadnji) pa je šibkejši, ni vedno viden, barve pa si sledijo v obratnem zaporedju tj. od rdeče spodaj do vijolične zgoraj. Temnemu pasu med obema lokoma pravimo **Aleksandrov temni pas**, ki je dobil ime po grškem filozofu Aleksandru [5]. Na Sliki 2 prikazujemo pojav mavrice v naravi. Slika 3 pa opisuje pot žarkov, ki po lomu in odbojih tvorijo oba loka mavrice.



Slika 2: Mavrica [S2]



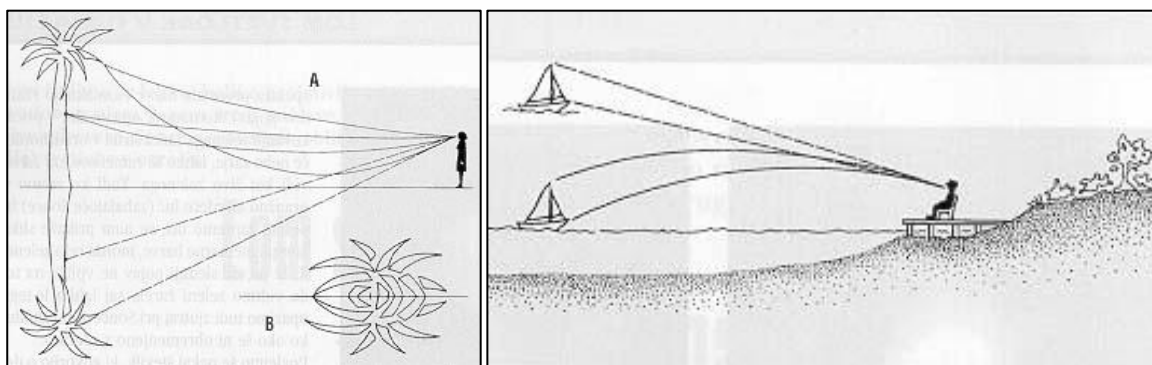
Slika 3: Pot žarkov, ki po lomu in odbojih tvorijo notranji in zunanji lok mavrice [S3]

Fata morgana ali **zračno zrcaljenje**, pojav, ki je prikazan na Sliki 4, nastane zaradi temperaturnih razmer v ozračju. Zračne plasti z različnimi temperaturami imajo različno gostoto in posledično različne lomne količnike. Svetlobni žarki, ki prehajajo skozi plasti, se ob tem različno lomijo in odbijajo ter povzročajo preslikave in celo privide. Včasih je videti, da je na vroči in suhi cesti mlaka vode, v puščavi se naenkrat pojavi jezero, v daljavi vidimo migetanje itd.



Slika 4: Fata morgana v Severni Sahari [S4]

Poznamo dve obliki fata morgane, in sicer **spodnje zračno zrcaljenje** in **zgornje zračno zrcaljenje**, ki sta predstavljena na Sliki 5. Pri spodnjem zračnem zrcaljenju se topel zrak zadržuje nad vročimi tlemi (npr. asfalt ali pesek), z višino pa temperatura pada. Svetloba se lomi tako, da vidimo predmet prezrcaljen in sliko obrnjeno. Zgornje zračno zrcaljenje pa je posledica mrzlega zraka, ki se nabira nad tlemi in je občutno hladnejši kot v višjih plasteh. Svetlobni žarki se zato ukrivljajo in predmet vidimo višje, kot je njegova prava lega [6].



Slika 5: Spodnje (slika levo) in zgornje (slika desno) zračno zrcaljenje [S5]

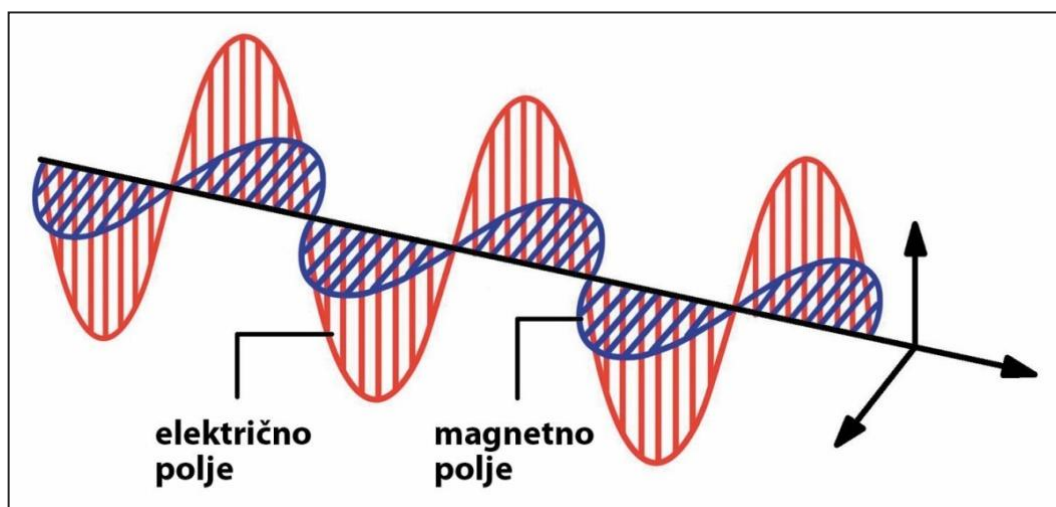
Mežikanje zvezd je tudi pojav, ki je posledica lomljena svetlobe. Zračni delci se zbirajo v zračne mehurje, ki se v trenutku izmenjujejo. Hladnejši mehurji delujejo kot zbiralna leča, zaradi česar

vidimo vir svetlobe svetlejši in večji, toplejši mehurji pa delujejo kot razpršilna leča, zaradi česar v oko prihaja manj svetlobe. Mežikanje zvezd lahko opazujemo tudi v barvah, kar je posledica lomljenja svetlobe različnih barv, ki se pri prehajanju skozi zračne mehurje različno lomijo [7].

2.2 Svetloba kot elektromagnetno valovanje

Ko govorimo o svetlobi, moramo seveda poznati njeno »delovanje«. Vemo, da se svetloba v prostoru širi z valovanjem. Svetlobni valovi lahko potujejo skozi »prazen« prostor, torej atmosfero, ali pa skozi neko propustno stvar. Pri vsem tem pa ne gre za nam najbolj predstavljajoče valove, kot so vodni, ampak za valove, ki jih ne vidimo. Govorimo o elektromagnetnem valovanju (v nadaljevanju EMV), ki ga opisuje elektromagnetna teorija svetlobe, ki jo je razvil škotski fizik in matematik James Clerk Maxwell. V njej razlaga, da je EMV transversalno valovanje električnega in magnetnega polja. Vse osnovne zakone svetlobe, elektrike in magnetizma je izrazil v matematičnih enačbah, ki so znane kot "Maxwellove enačbe" [2,8].

Električno polje je pravokotno na smer širjenja valovanja, sledi pa mu magnetno polje, ki je ravno tako pravokotno na smer širjenja valovanja, hkrati pa pravokotno na električno polje [9], kot je prikazano na Sliki 6.

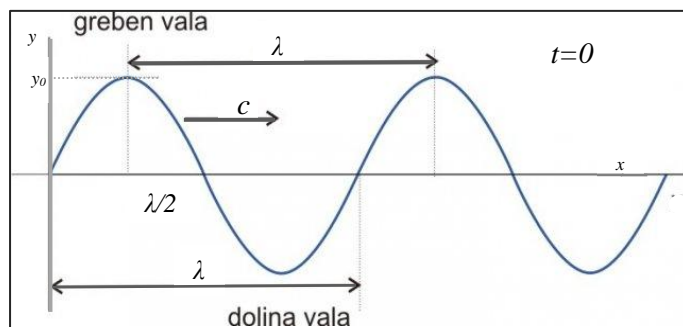


Slika 6: Elektromagnetno valovanje [S6]

EMV opredelimo s tremi lastnostmi, in sicer z [9]:

- valovno dolžino,
- frekvenco,
- amplitudo.

Na Sliki 7 grafično prikazujemo sinusno transversalno valovanje v določenem trenutku.

Slika 7: Sinusno transversalno valovanje v nekem trenutku ($t = 0$ s) [S7]

Valovno dolžino označujemo z grško črko λ (lambda) in pomeni najkrajšo razdaljo med dvema zaporednima točkama v valovanju, ki nihata z enako fazo (greben – dolina) oz. nihata sočasno. Valovna dolžina se lahko tudi spreminja in je odvisna od frekvence valovanja.

Amplituda označuje maksimalni odmik valovanja od ničelne lege. Označujemo jo z y_0 .

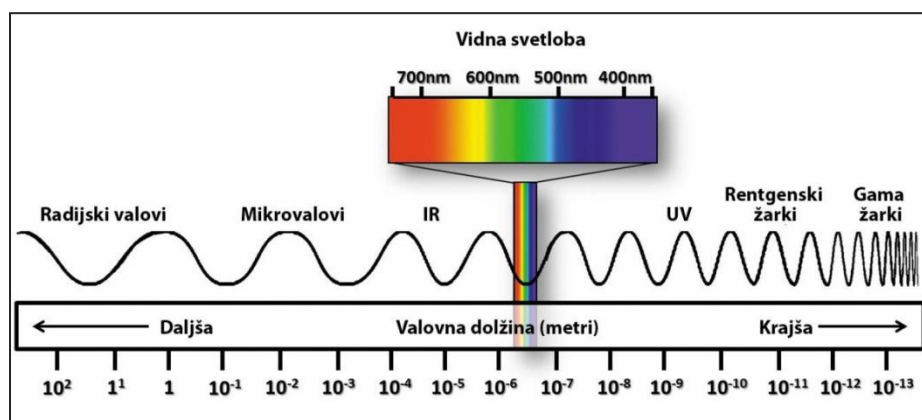
Frekvenca je merilo za število nihajev v enoti časa oz. nam pove, kolikokrat val v enoti časa zaniha. Označujemo jo s črko f . Z valovno dolžino sta obratno sorazmerni. Povezuje ju hitrost valovanja c :

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

kjer je:

c ... svetlobna hitrost [m/s]

Glede na valovno dolžino delimo elektromagnetno valovanje na radijske valove, mikrovalove, infrardeče valove, vidno svetlobo, ultravijolično svetlobo, rentgenske žarke in gama žarke. Govorimo o spektru EMV, ki ga prikazuje Slika 8.



Slika 8: Spekter EMV je širok [S8]

EMV z valovno dolžino v območju od 750 do 380 nm predstavljajo rdeča, oranžna, rumena, zelena, turkizna, modra in vijolična barva. To je območje, ki ga človeške oči zaznajo kot vidno svetlobo.

Valovanje s krajšimi valovnimi dolžinami in posledično z večjo frekvenco pomeni večjo energijo in obratno [9].

2.3 Lomni količnik

V brezračnem prostoru (vakuumu) je hitrost svetlobe določena kot snovna konstanta in znaša $c \approx 300\,000\text{ km/s}$. Natančno znaša $299\,792\,458\text{ m/s}$, saj je bila tako določena 1983 z definicijo metra [10] in je po Einsteinovi posebni teoriji relativnosti največja možna hitrost [11]. V vseh drugih snoveh je hitrost manjša. Na meji med snovmi se svetlobnemu žarku (valu) spremeni smer, njegova valovna dolžina pa se poveča ali zmanjša, medtem ko frekvenca ostaja konstantna. Čim manjša je hitrost svetlobe v snovi, bolj se bo svetloba lomila. Razmerje med hitrostjo svetlobe v vakuumu in hitrostjo svetlobe v snovi imenujemo **lomni količnik** snovi (glej Preglednico 1), ki je definiran kot število, ki nam pove, za kolikokrat počasneje svetloba potuje skozi snov kot pa skozi vakuum [12]:

$$n = \frac{c}{c_s} \quad (2)$$

kjer je:

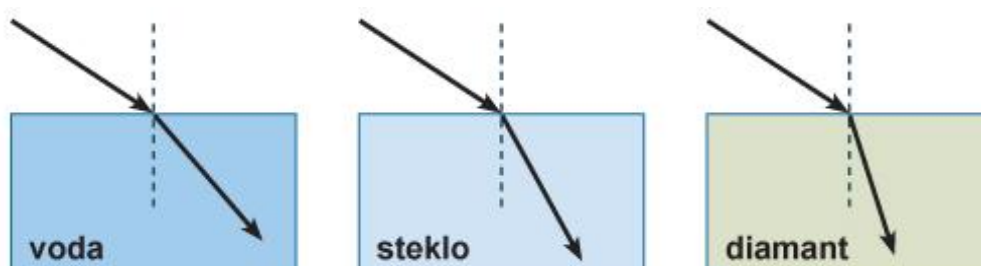
c ... hitrost svetlobe v vakuumu [m/s]

c_s ... hitrost svetlobe v snovi [m/s]

Preglednica 1: Lomni količnik snovi [12,13]

Snov	Lomni količnik
Vakuum	1
Zrak	1,000294
Voda	1,33
Steklo	1,45–1,90
Diamant	2,417

Manjši lomni količnik pomeni optično redkejšo snov, večji pa optično gostejšo. Slika 9 prikazuje lomljenje svetlobnega žarka skozi različne snovi.



Slika 9: Prikaz lomljenja žarka skozi različne snovi [S9]

2.4 Lomni zakon

Lomni zakon ali Snellov zakon je določil nizozemski matematik, fizik in astronom Willebrord Snell van Royen. Zakon opisuje lom valovanja, tj. svetlobe, pri prehodu iz ene snovi v drugo, pri čemer je lomni količnik snovi različen.

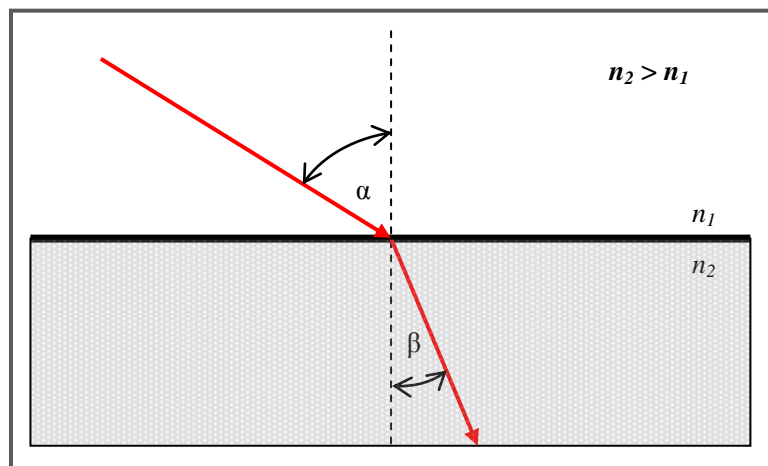
Kot že vemo, se svetloba na meji med snovmi deloma odbija in deloma lomi, pri čemer velja [12]:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \quad (3)$$

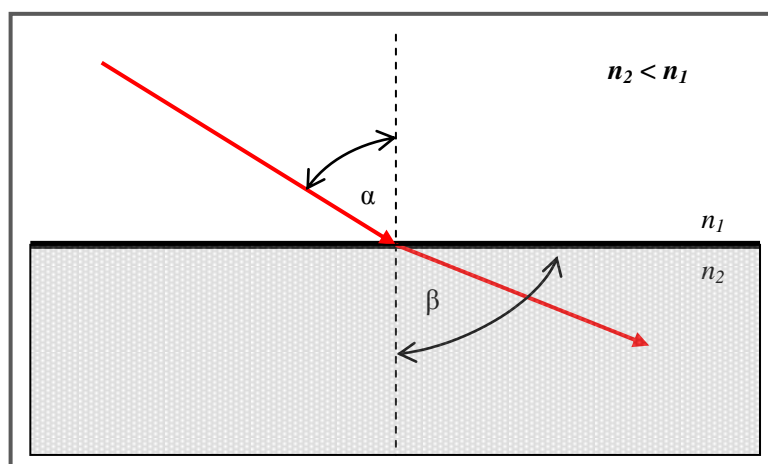
kjer je:

- $n_1 \dots$ lomni količnik prve snovi
- $\alpha \dots$ vpadni kot
- $n_2 \dots$ lomni količnik druge snovi
- $\beta \dots$ lomni kot

Ko se svetloba širi v optično gostejšo snov ($n_2 > n_1$), se lomni količnik poveča, žarek pa lomi k vpadni pravokotnici. Lomni kot je manjši od vpadnega [13] – glej Sliko 9.

Slika 9: Lom žarka k vpadni pravokotnici, kjer velja $n_2 > n_1$

V nasprotnem primeru, torej ko žarek prehaja iz optično gostejše snovi v redkejšo ($n_2 < n_1$), se lomi od vpadne pravokotnice. Lomni kot je večji od vpadnega [13] – glej Sliko 10.



Slika 10: Lom žarka od vpadne pravokotnice, kjer velja $n_2 < n_1$

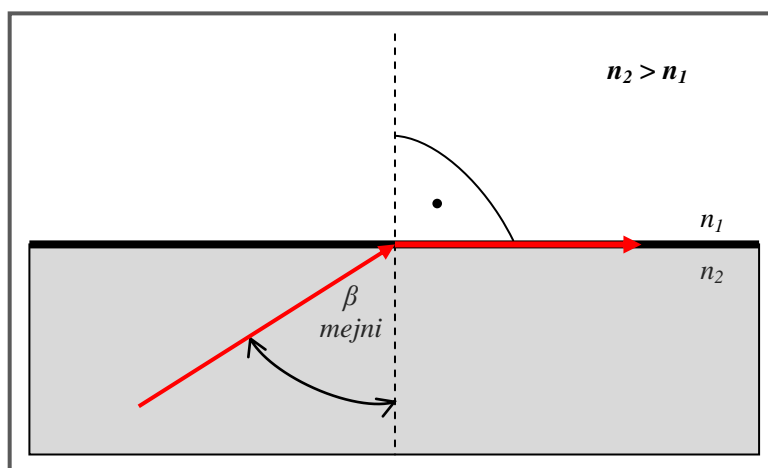
Lomni kot se povečuje sorazmerno z vpadnim kotom. Kotu, pri katerem se žarek lomi vzdolž mejne ploskve, torej pravokotno ($\beta = 90^\circ$), pravimo **mejni kot popolnega odboja**:

$$n_2 \cdot \sin \beta_{\text{mejni}} = n_1 \cdot \sin 90^\circ \quad (4)$$

kjer je:

β_{mejni} ... mejni kot popolnega odboja

Svetlobni žarek, ki na mejno ploskev pada pod mejnim kotom, iz ene snovi v drugo ne more preiti, ampak se na meji popolno odbije. Takemu pojavu pravimo **popolni (totalni) odboj svetlobe** [13] – glej Sliko 11.



Slika 11: Popolni odboj svetlobnega žarka

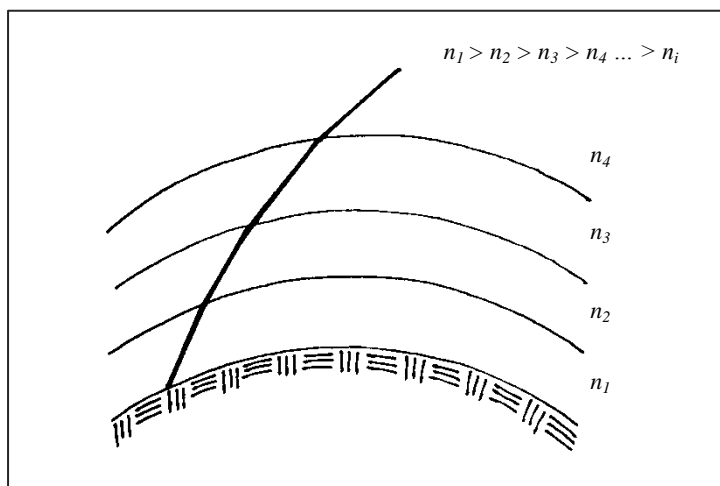
3 REFRAKCIJA PRI GEODETSKIH MERITVAH

Pri geodetskih meritvah se z refrakcijo srečujemo tako pri merjenju višinskih razlik – vertikalna refrakcija – kot pri merjenju horizontalnih smeri – horizontalna oz. bočna refrakcija. V stroki lahko tak pojav imenujemo tudi odklon vizure.

Vpliva refrakcije ne moremo predvideti, vemo pa, da se pojavlja ob različnih atmosferskih lastnostih.

3.1 Vertikalna refrakcija

Vertikalna refrakcija se pojavi pri merjenju vertikalnih kotov oziroma zenitnih razdalj zaradi sprememb v optičnih lastnostih zraka. Zrak ni homogena snov, ampak je sestavljen iz plasti, ki imajo zaradi različne gostote različne lomne količnike, ki povzročajo lomljenje vizure. Vizura posledično ne potuje skozi zrak po premi liniji, ampak po optično najkrajši poti. To pot geometrično opišemo s krivuljo, ki ji pravimo **refrakcijska krivulja** [13, 14]. Prikazujemo jo na Sliki 12.



Slika 12: Refrakcijska krivulja

3.1.1 Koeficient refrakcije in vpliv ukrivljenosti Zemlje

Koeficient refrakcije k opisuje ukrivljenost vertikalne komponente refrakcijske krivulje. Ker ga določamo na osnovi praktičnih meritev, je koeficient zaradi spreminjanja atmosferskih lastnosti spremenljiva količina. Raziskave kažejo, da se njegova vrednost giblje med 0,10 in 0,16. Vrednost, ki ga bo posamezna država uporabljala, je dogovorjena. Za Slovenijo velja $k = 0,13$.

Koeficient ima pomemben vpliv pri natančnejših izračunih višinske razlike med točkama, saj ponazarja razmerje med radijem refrakcijske krivulje r in radijem Zemlje R (6370 km) [13]:

$$k = \frac{R}{r} \quad (5)$$

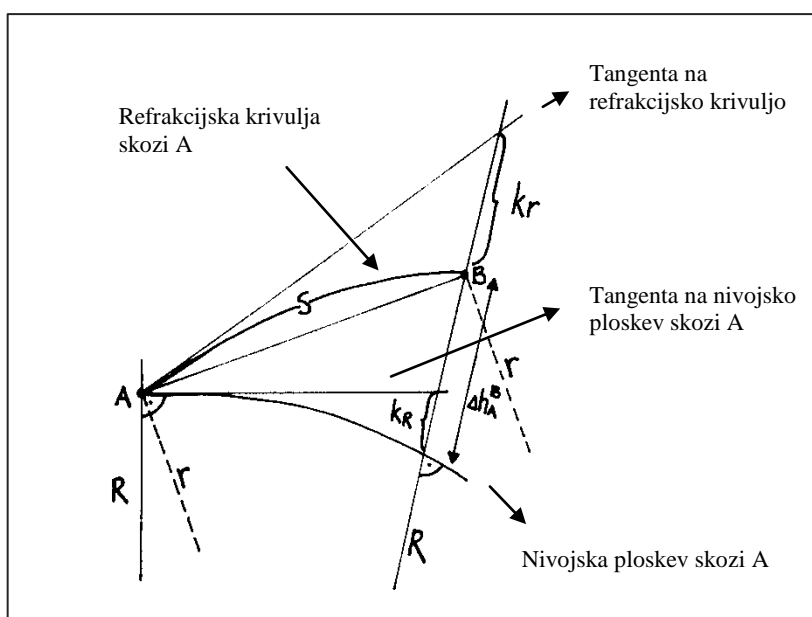
Vpliv refrakcije izračunamo z enačbo:

$$k_r = -\frac{S^2}{2 \cdot R} \cdot k \quad (6)$$

kjer je:

S ... dolžina med dvema točkama

Na Sliki 13 sta prikazana vpliv ukrivljenosti Zemlje in vpliv refrakcije.



Slika 13: Vpliv ukrivljenosti Zemlje in vpliv refrakcije

Poleg koeficienta refrakcije moramo pri računanju višinskih razlik upoštevati tudi vpliv ukrivljenosti Zemlje, ki mu drugače pravimo tudi **depresija**.

$$k_R = \frac{S^2}{2 \cdot R} \quad (7)$$

Vpliv ukrivljenosti Zemlje je približno 8-krat večji od vpliva refrakcije. Njegova velikost narašča s kvadratom razdalje med dvema točkama.

3.1.2 Trigonometrično višinomerstvo

Z metodo trigonometričnega višinomerstva lahko določamo višinske razlike med dvema točkama:

- na osnovi izmerjene zenitne razdalje ali vertikalnega kota in
- na osnovi izmerjene poševne dolžine med točkama ali horizontalne dolžine, izračunane iz koordinat.

Če upoštevamo ukrivljenost Zemlje in vertikalno refrakcijo, lahko višinsko razliko med dvema točkama izračunamo po naslednji enačbi [13]:

$$\Delta h = S_r \cdot \cos z + \frac{S_r^2}{2R} \cdot (1-k) \cdot \sin z + i_A - l_B \quad (8)$$

kjer je:

S_r ... merjena dolžina z upoštevanimi meteorološkimi popravki

Z ... zenitna razdalja

i_A ... višina instrumenta

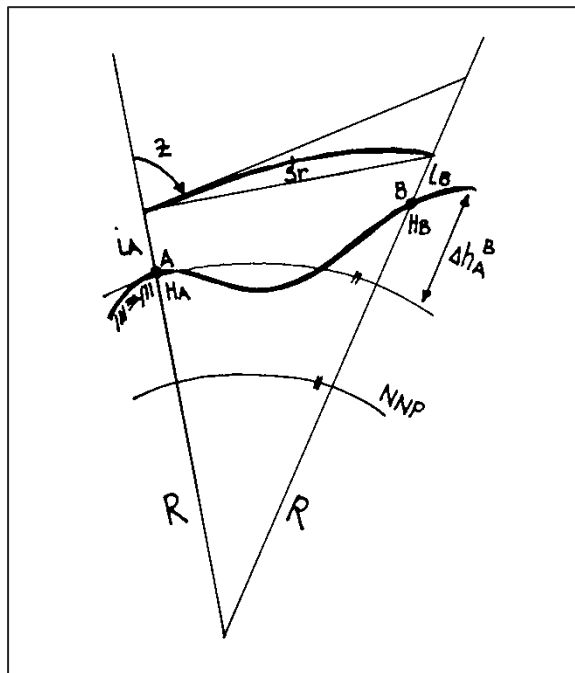
l_B ... višina prizme

in korekcijska člena:

$\frac{S_r^2}{2R} = k_R$... posledica vpliva ukrivljenosti Zemlje

$-k \cdot \frac{S_r^2}{2R} = k_r$... posledica vpliva refrakcije

Princip trigonometričnega višinomerstva z upoštevanjem vpliva vertikalne refrakcije in vpliva ukrivljenosti Zemlje prikazujemo na Sliki 14.



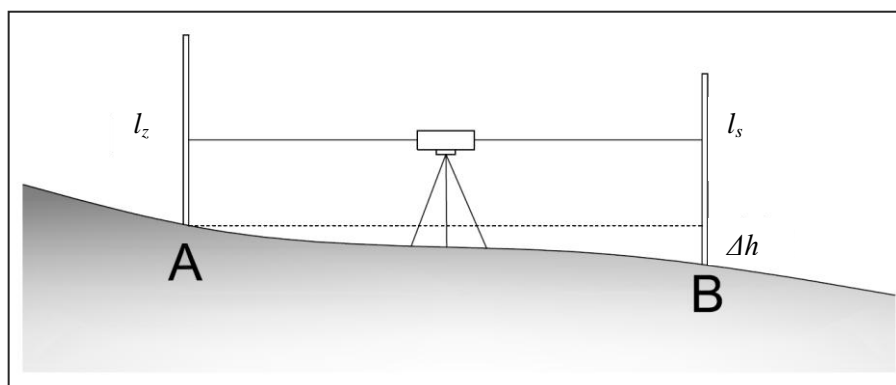
Slika 14: Princip trigonometričnega višinomerstva z upoštevanjem vpliva vertikalne refrakcije in vpliva ukrivljenosti Zemlje

Metoda trigonometričnega višinomerstva je primernejša za meritve v težje dostopnih, hribovitih območjih, predvsem pa je hitrejša in bolj ekonomična. Uporabimo jo, kadar zagotavlja zahtevano natančnost.

3.1.3 Geometrični nivelman

Geometrični nivelman (glej Sliko 15) je skupek geodetskih del in najnatančnejša klasična metoda, s katero določamo višinske razlike med trajno stabiliziranimi točkami, ki jih imenujemo reperji. Uporabljamo ga pri nalogah, ki navadno zahtevajo večjo natančnost merjenja višinske razlike.

Višinsko razliko med reperjema izračunamo na osnovi čitanja razdelbe na vertikalno postavljenih nivelmanskih latah z instrumentom, ki zagotavlja horizontalno vizuro, tj. nivelirjem, in sicer po naslednji enačbi [15]:



Slika 15: Osnovni princip geometričnega nivelmana [S10]

$$\Delta h = l_z - l_s \quad (9)$$

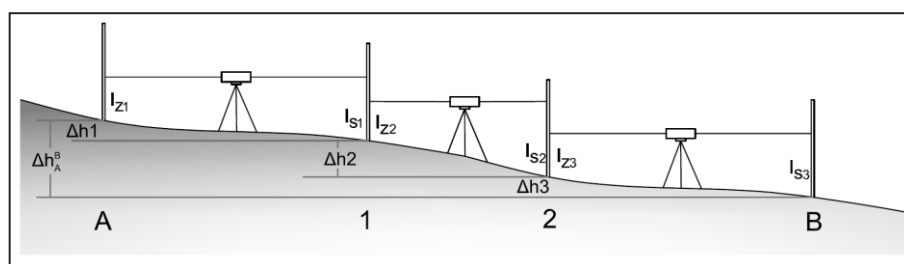
kjer je:

Δh ... višinska razlika med reperjema

l_z ... odčitek na lati zadaj

l_s ... odčitek na lati spredaj

V kolikor sta oddaljenost in višinska razlika med reperjema veliki, prenašamo višine točk z uporabo izmenišč, tj. z uporabo začasno stabiliziranih točk (glej Sliko 16).



Slika 16: Osnovni princip geometričnega nivelmana z uporabo izmenišč [S11]

Višinske razlike tako računamo s seštevanjem vsot delnih višinskih razlik [15]:

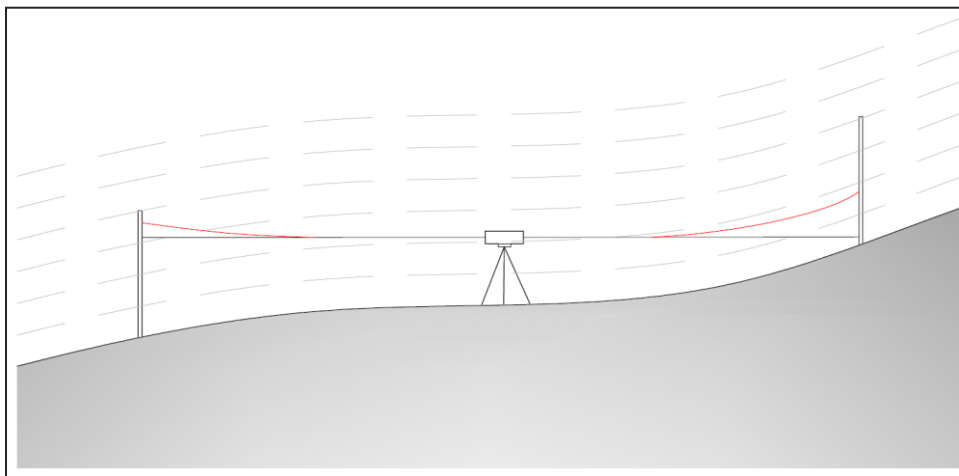
$$\Delta h_A^B = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3$$

$$\Delta h_A^B = l_{z1} - l_{s1} + l_{z2} - l_{s2} + l_{z3} - l_{s3} \quad (10)$$

$$\Delta h_A^B = \sum l_z + \sum l_s$$

Prikazane enačbe veljajo za sistem, kjer sta vpliv ukrivljenosti Zemlje in vpliv refrakcije zanemarjena, ki ju sicer moramo upoštevati.

Refrakcija pri niveliranju se pojavi zaradi pogojev v prizemnih plasteh atmosfere, kjer se zrak segreva neposredno s tal in ne neposredno od Sonca. V prizemnih plasteh je spreminjanje temperature glede na višino tako največje. Pojavu pravimo **vertikalni temperaturni gradient**. Zaradi takega načina segrevanja zraka so zračne plasti z enako gostoto vzporedne tlom. Posledica je, da je toplejši in hkrati redkejši zrak bližje tlom, zaradi česar je refrakcijska krivulja proti površju obrnjena s konveksno stranjo (glej Sliko 17) in rezultat je večji odčitek na lati [15].



Slika 17: Nivelmanska refrakcija [S12]

Nivelmanska refrakcija je glede na vrsto terena in nagiba tal različna. Vpliv ukrivljenosti Zemlje je sicer pri niveliranju zelo majhen, pri natančnejših meritvah pa ga vendarle moramo upoštevati.

3.1.4 Zmanjševanje vpliva pogojev refrakcije pri niveliranju

Vpliv refrakcije lahko predstavlja veliko težavo pri niveliranju, kjer so višinske razlike velike. Glavni vzroki za pojav refrakcije in ravnanje, da vpliv zmanjšamo:

- Nagnjenost terena: vpliv nagiba terena lahko zmanjšamo z izbiro primernejše poti. Nivelmanskih poligonov ne načrtujemo na strmih vzponih ali spustih.

- Vertikalni temperaturni gradient: ta vpliv lahko zmanjšamo s primernejšo izbiro načina merjenja, in sicer niveliranje iz sredine, saj je v tem primeru vpliv refrakcije na odčitka na letah podoben in se zato eliminira. Pri tem pazimo, da vizura poteka minimalno 0,6 m in maksimalno 2,8 m od tal, odčitek na lati, postavljeni na reper, pa naj bo večji od 0,20 m in manjši od 2,80 m [16].
- Izbira časa in vremena: na zmanjšanje vpliva refrakcije prav tako vpliva izbira primernega časa in vremena, v katerem se bodo meritve izvajale [15].

3.2 Horizontalna oz. bočna refrakcija

Horizontalno oz. bočno refrakcijo definiramo kot nepremočrtnost vizure v horizontalni ravnini, kar posledično privede do spremembe velikosti merjene horizontalne smeri. Refrakcija je nepredvidljiva in je odvisna od:

- lokacije meritev,
- dnevnega časa,
- letnega časa,
- oddaljenosti vizure od objekta,
- materiala objekta,
- barve objekta.

Refrakcijo zelo težko ovrednotimo, vendar ima lahko velik vpliv na meritev. Ta vpliv skušamo zmanjšati z izbiro primernega časa za izvajanje meritev ter z izogibanjem vizuram, ki potekajo blizu objektov, ki zaradi temperaturnega segrevanja sevajo toploto. Včasih pa to seveda ni mogoče [15].

3.2.1 Pogreški pri merjenju Hz smeri

Pri merjenju horizontalnih smeri poleg refrakcije poznamo pogreške, ki jih delimo glede na njihov izvor. Ti so:

- pogreški delovnega okolja,
- instrumentalni pogreški,
- pogreški operaterja.

3.2.1.1 Pogreški delovnega okolja

Ti pogreški nastajajo zaradi atmosferskih pogojev in oblike zemeljskega površja. Vizura posledično potuje po najkrajši optični poti, tj. refrakcijski krivulji. Sem sodijo [13]:

- bočna oz. horizontalna refrakcija,
- pogrešek zaradi neenakomerne osvetljenosti vizurnih ciljev oz. pogrešek faze,

- pogrešek centriranja,
- pogrešek signaliziranja.

3.2.1.2 Instrumentalni pogreški

Najpomembnejši instrumentalni pogreški, ki imajo vpliv pri merjenju horizontalnih kotov in zenitnih razdalj oz. vertikalnih kotov, so:

- kolimacijski pogrešek, ki nastane zaradi nepravokotnosti Y - in X -osi, pri čemer X -os pri zvrčanju daljnogleda opisuje plašč stožca namesto ravnine;
- pogrešek nehorizontalnosti osi Y – vrtilne osi daljnogleda, ki nastane zaradi nepravokotnosti Y - in Z -osi, pri čemer X -os pri zvrčanju daljnogleda opisuje poševno namesto vertikalno ravnino;
- pogrešek alhidadne libele, ki nastane zaradi nepravokotnosti Z - in L -osi, pri čemer X -os pri zvrčanju daljnogleda opisuje poševno namesto vertikalno ravnino;
- indeksni pogrešek, ki nastane pri merjenju vertikalnih kotov, ker indeks čitanja pri vertikalnem krogu ni na pravem mestu, pri čemer indeks čitanja in center vertikalnega kroga pri vrtenju alhidade okrog osi Z opišeta stožec namesto horizontalne ravnine.

3.2.1.3 Pogreški operaterja

Naštejmo le nekaj pogreškov operaterja:

- pogrešek viziranja,
- pogrešek koincidiranja,
- pogrešek čitanja na horizontalnem krogu,
- pogrešek čitanja na vertikalnem krogu.

3.2.2 Pregled literature, ki obravnava bočno refrakcijo

Pri iskanju literature, ki obravnava bočno refrakcijo, smo prišli do spoznanja, da je problem malo raziskan. Večina del in raziskav opozarja, da je pri merjenju tako horizontalnih smeri kot višinskih razlik vpliv bočne refrakcije treba upoštevati zlasti, kadar gre za meritve večje natančnosti. Le redko pa je podan prikaz vpliva refrakcije in s tem povezani izračuni.

V nadaljevanju je opisanih nekaj raziskav tujih strokovnjakov s poudarkom na enačbah za izračun refrakcijskega kota.

V znanstvenem članku, objavljenem v hrvaškem Geodetskem listu, trije strokovnjaki Geodetske fakultete v Zagrebu (Redovniković, L., Džapo, M., in Kapović, Z.) [17], predstavijo zahtevnost in kompleksnost meritev v predorih glede na natančnost preboja. Vpliv bočne refrakcije na merjenje horizontalnih smeri so analizirali v predoru Dolje na Hrvaškem.

V delu je omenjenih nekaj enačb za popravek merjene smeri zaradi vpliva bočne refrakcije – oznake uporabljamo enake kot v originalnem članku:

$$\delta'' = \frac{\rho''}{d} \sum_{i=1}^j l_i L_i \cdot 0.29993 \cdot 10^{-6} \frac{P}{\alpha T_i^2} \text{ grad } T \quad (11)$$

kjer je:

δ'' ... refrakcijski kot ["]

L_i ... oddaljenost od instrumenta do sredine objekta, ki povzroča refrakcijo [m]

d ... dolžina vizure med dvema točkama [m]

l_i ... dolžina stene v predoru, ki povzroča bočno refrakcijo [m]

p ... zračni tlak [mbar]

α ... razteznostni koeficient zraka = $1/273,2$ [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

T_i ... temperatura [K]

$\text{grad } T$... horizontalni temperaturni gradient [K/m]

Leta 1988 sta W. Wilhelm in H. J. Matthias proučevala vpliv refrakcije na 9 različnih objektih in za izračun refrakcijskega kota uporabila [17] – oznake uporabljamo enake kot v originalnem članku:

$$\delta = \int_{s=0}^{s=D} \frac{D-s}{D} \kappa(s) ds$$
$$\delta \approx \sum_{i=1}^{i=n} \frac{D-s}{D} \kappa_{si} \Delta s_i \quad (12)$$

$$\kappa = -2.28 \frac{P}{T^2} 29.3 \frac{dt}{dx}$$

kjer je:

D ... dolžina vizure med dvema točkama [m]

s ... dolžina stene v predoru, ki povzroča bočno refrakcijo [m]

$\frac{dt}{dx}$... horizontalni temperaturni gradient [K/m] – grad T

P ... srednji zračni tlak [mmHg]

T ... srednja temperatura zraka [K]

κ ... radij ukrivljenosti svetlobnega žarka – vizure [cc/m]

Δs ... dolžina objekta [m]

δ ... refrakcijski kot [cc]

$dt = T_2 - T_1$... temperaturna razlika med temperaturo objekta T_2 in temperaturo na vizuri T_1 [K]

$dx = x_2 - x_1$... oddaljenost od objekta x_2 do vizure x_1 [m]

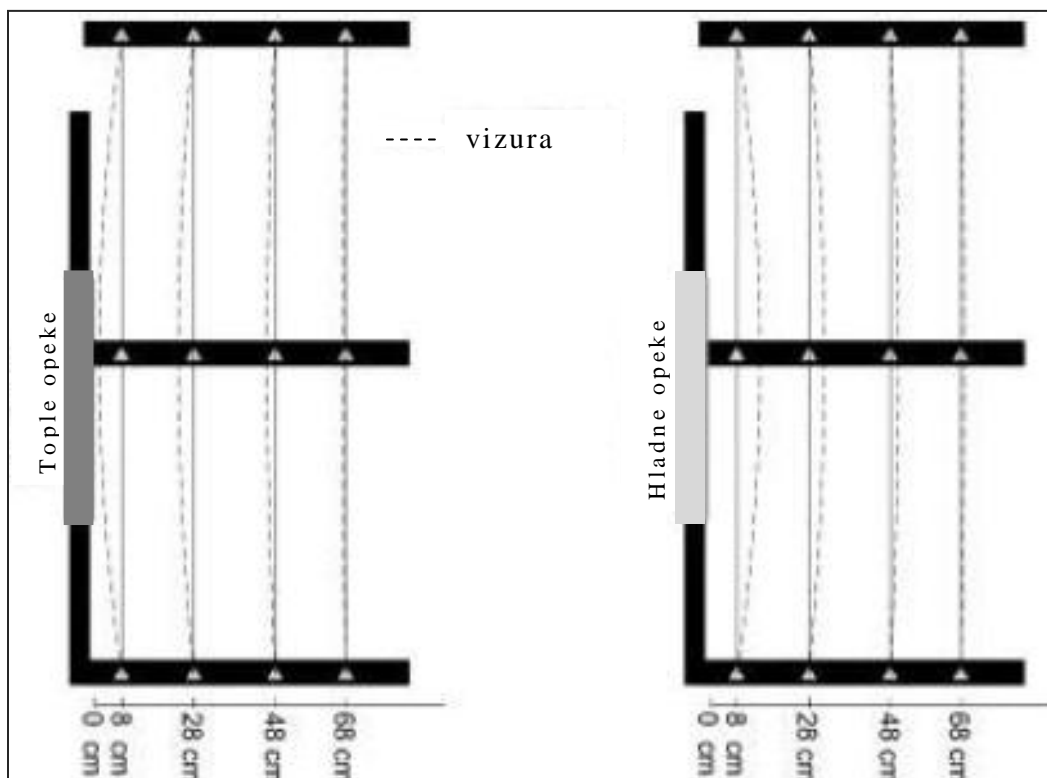
Na osnovi predstavljenih enačb in preizkusov zaključujejo, da obstaja nekaj različnih pristopov k reševanju problema refrakcije, pri čemer igra pomembno vlogo horizontalni temperaturni gradient. Pri meritvah v krajših predorih (do cca 200 m) je priporočljivo upoštevati naslednja pravila [17]:

- vpliv bočne refrakcije bo manjši, v kolikor sta temperaturi v predoru in izven podobni,
- vpliv bo manjši, če je stojišče oddaljeno od stene predora,
- da se vpliv zmanjša, je priporočljivo poligonske vlake razvijati v »cik-cak« obliko.

V primeru preboja daljših predorov, kjer so temperaturne razlike vzdolž vizure velike, je smiselno za merjene smeri upoštevati popravke (11) ali (12) [17].

Naslednji primer opisuje laboratorijske meritve na Geodetski fakulteti v Zagrebu, kjer so L. Redovniković, I. Ališić in A. Luketić [18] na 10-ih različnih primerih analizirali in izračunali refrakcijski kot na osnovi izračunov predhodnih raziskav. Kot objekt, ki bi povzročil bočno refrakcijo, so uporabili opeke. Postavljali so jih različno – različna oddaljenost od instrumenta, različna dolžina vizure, različna oddaljenost vizure od opek in različna temperatura opek.

Dokazali so, da se vizura drugače »obnaša« v odvisnosti temperature opeke in oddaljenosti vizure od opeke, kar lahko vidimo na Sliki 18.



Slika 18: Zmanjševanje vpliva bočne refrakcije pri odmikanju vizure od objekta [S13]

Na podlagi meritev so podali nove konstante pri enačbah (12) in (11) za izračun refrakcijskega kota:

$$\delta^{cc} \approx \sum_{i=1}^n \frac{D-s}{D} \left(-2.014535 \frac{P}{T^2} \frac{dt}{dx}\right) \Delta s_i \quad (13)$$

$$\delta^{cc} = \frac{\rho''}{d} \sum_{i=1}^n l_i L_i \cdot -8.41367 \cdot 10^{-9} \frac{P}{\alpha T_i^2} \text{grad } T \quad (14)$$

Tudi Wido Wilhelm je maja 1993 na švicarskem inštitutu za geodezijo in fotogrametrijo v praksi predstavil empirično določitev bočne refrakcije na desetih različnih objektih na podlagi izračuna temperaturnega gradienta in ostalih že predstavljenih enačb [19]:

$$\text{grad } T_{i,i+1} = \frac{T_{i+1} - T_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (15)$$

kjer je:

$T_i \dots$ temperaturna vrednost na položaju i

$x_i \dots$ oddaljenost objekta od vizure

Za konkretni primer v praksi je za izračun refrakcijskega kota uporabil enačbo:

$$\delta_s = \frac{D-s}{D} \kappa_s \Delta s \quad (16)$$

Za izračun radija ukrivljenosti svetlobnega žarka – vizure je uporabil enačbo (12).

4 IZMERA VELIKOSTI HORIZONTALNE REFRAKCIJE

4.1 Opis uporabljenega instrumenta

Za potrebe praktične izmere smo uporabili:

- Leica Geosystems TS30,
- 2 × reflektor,
- 3 × stativ,
- ročni merski trak,
- psihrometer,
- tipalni (kontaktni) termometer,
- prometni stožci,
- osebni avtomobil.

4.1.1 Leica TS30

Horizontalne smeri smo merili z avtomatiziranim elektronskim tahimetrom Leica Geosystems TS30 (glej Sliko 19). Instrument je last Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.



Slika 19: Tahimeter Leica Geosystems TS30 [S14]

V Preglednici 2 so navedeni tehnični podatki instrumenta.

Preglednica 2: Tehnični podatki tahimetra Leica Geosystems TS30 [20]

Kotna opazovanja		
Natančnost Hz- in V-kotov po standardu ISO 17123-3	HZ, V	0.5" (0.15 mgon)
	Resolucija zaslona	0.01" (0.01 mgon)
Dolžinska opazovanja		
Območje	Standardna tarča	3500 m
Natančnost dolžin po standardu ISO 17123-4	Precizna prizma	0.6 mm; 1 ppm
Motorizacija		
Pospešek in hitrost	Maksimalni pospešek	360° (400 gon)/s ²
	Največja hitrost rotiranja	180° (200 gon)/s
	Čas zamenjave krožne lege	2.9 s
	Pozicijski čas za 180 ° (200 gon)	2.3 s
Avtomatsko prepoznavanje tarče (APT)		
Doseg sistema AST	Standardna tarča	800 m
Doseg sistema AVT	Standardna tarča	1000 m
Avtomatsko iskanje tarče (AIT)	Čas iskanja tarče	5 s
Osnovni podatki		
Temperaturno območje delovanja	-20 °C do +50 °C	
Vlažnost	95 %	
Masa	7.6 kg	

4.1.2 Podnožje, nosilec reflektorja in reflektor

Za signalizacijo točk smo uporabili dva precizna merska reflektorja Leica Geosystems GPH1P (glej Sliko 20). Ker nismo poznali vrednosti bočne refrakcije, smo tudi pri izboru reflektorjev postopali podobno kot pri izboru instrumentarija. Izbrali smo najnatančnejša reflektorja, ki sta nam bila na razpolago.



Slika 20: Precizni reflektor Leica Geosystems GPH1P [S15]

Precizna reflektorja smo postavili na precizna nosilca reflektorjev Leica Geosystems GZR3 (glej Sliko 21 – levo). S preciznima nosilcema oziroma vgrajenima cevima libelama smo horizontalirali podnožji

Leica Geosystems GDF121 (glej Sliko 21 – desno). Ob predpostavki, da sta vizirani točki v času meritev stabilni, precizno horizontiranje podnožij ne bi bilo potrebno. Mi pa smo podnožji vseeno precizno horizontirali, da smo opravili kontrolo stabilnosti: po končanih meritvah sta libeli na obeh točkah še vedno vrhunili.



Slika 21: Nosilec reflektorja Leica Geosystems GZR3 [S16] in podnožje Leica Geosystems GDF121[S17]

4.1.3 Psihrometer

Psihrometer, ki ga prikazujemo na Sliki 22, je naprava, ki jo sestavljata dva termometra – suhi in mokri. Eden od njiju ima bučko ovito v krpico, ki je namočena v destilirano vodo. Ker izmeri mokro temperaturo, mu pravimo mokri termometer. Suhi termometer pa izmeri suho temperaturo. Navadno je mokra temperatura nižja, saj izhlapevanje destilirane vode odvzema toploto mokremu termometru. Le pri 100 % relativni vlažnosti ni izhlapevanja destilirane vode in takrat oba termometra kažeta enako temperaturo. Za pretok zraka okoli bučk termometrov poskrbi ventilator, ki je montiran na vrhu psihrometra. Iz odčitkov obeh termometrov lahko izračunamo delni tlak vodne pare [21].



Slika 22: Aspiracijski psihrometer

4.1.4 Tiplni termometer

Za merjenje temperature objekta, v našem primeru avtomobila, smo uporabili tiplni termometer, prikazan na Sliki 23. Toplotno prevodnost med zaključno ploskvico tipala termometra in avtomobilom smo povečali tako, da smo med ploskvico tipala in avtomobil dali moker košček papirnatega robčka. Ker smo z merjenjem temperature toliko počakali, da se je vlaga v robčku segrela na temperaturo avtomobila, nismo naredili dodatnega pogreška pri merjenju temperature avtomobila.



Slika 23: Tiplni termometer Testo 110

V Preglednici 3 so navedeni tehnični podatki uporabljenega termometra.

Preglednica 3: Tehnični podatki Testo 110 [22]

Temperatura skladiščenja	-40 do +70 °C
Delovna temperatura	-20 do +50 °C
Tip baterije	9V blok baterija, 6F22
Masa	171 g
Dimenzije	182 × 64 × 40 mm
Material ohišja	ABS
Sonda – NTC	
Merilno območje	-50 do +150 °C
Natančnost	±0.3 °C
Ločljivost	0.1 °C

4.1.5 Stožci in avtomobil

Da bi lažje izmerili vpliv bočne refrakcije na vizuro, smo potrebovali objekt, ob katerem naj bi vizura potekala. Ker smo želeli izmeriti vpliv bočne refrakcije na vizuro tudi v odvisnosti od oddaljenosti objekta, smo se odločili, da za objekt uporabimo avtomobil. Izbrali smo avtomobil temne barve, ki se je na Soncu bolj segrel, kot bi se avtomobil svetlejše barve. Tako je bil pričakovani vpliv bočne refrakcije večji.

Prometne stožce smo postavili za signalizacijo »točk« na vnaprej izbrani oddaljenosti od instrumenta in seveda v primerni bližini vizure, ki je potekala ob objektu, torej avtomobilu, ki je vizuro izpostavil vplivu bočne refrakcije (glej Sliko 24).



Slika 24: Prometni stožci kot signalizacija točk

4.2 Vzpostavitev terenskih meritev

Pri izbiri območja, kjer naj bi meritev potekala, je prevladal pogoj, da vizura od instrumenta do reflektorja poteka čim bolj nemoteno ter da je teren oz. podlaga čim bolj ravna. Zato smo za lokacijo določili veliko parkirišče na obrobju Ljubljane, ki je namenjeno Avtosejmu.

Vemo, da se večjemu vplivu bočne refrakcije izognemo z izbiro primerne časa za izvajanje meritev. Nas pa je zanimalo, kako bočna refrakcija na splošno vpliva na merjenje horizontalnih smeri, ki potekajo ob nekem objektu, če sta temperaturi zraka in objekta dokaj različni, ter kolikšna je velikost bočne refrakcije v odvisnosti od dolžine instrumenta – objekta.

Za izmero nismo potrebovali koordinat točk, kjer sta stala stativa z reflektorjema in niti koordinat stojiščne točke, kjer je bil postavljen instrument. Zato pa smo po drugi strani morali zagotoviti, da se stativa z reflektorjema in stativ z instrumentom niso premaknili med celotno meritvijo.

Meritve smo izvedli v času od 10.30 do 14.00. Temperatura zraka se je gibala od 18,1 °C pa do 20,3 °C. Podlaga, nad katero sta potekali vizuri, pa je bil makadam.

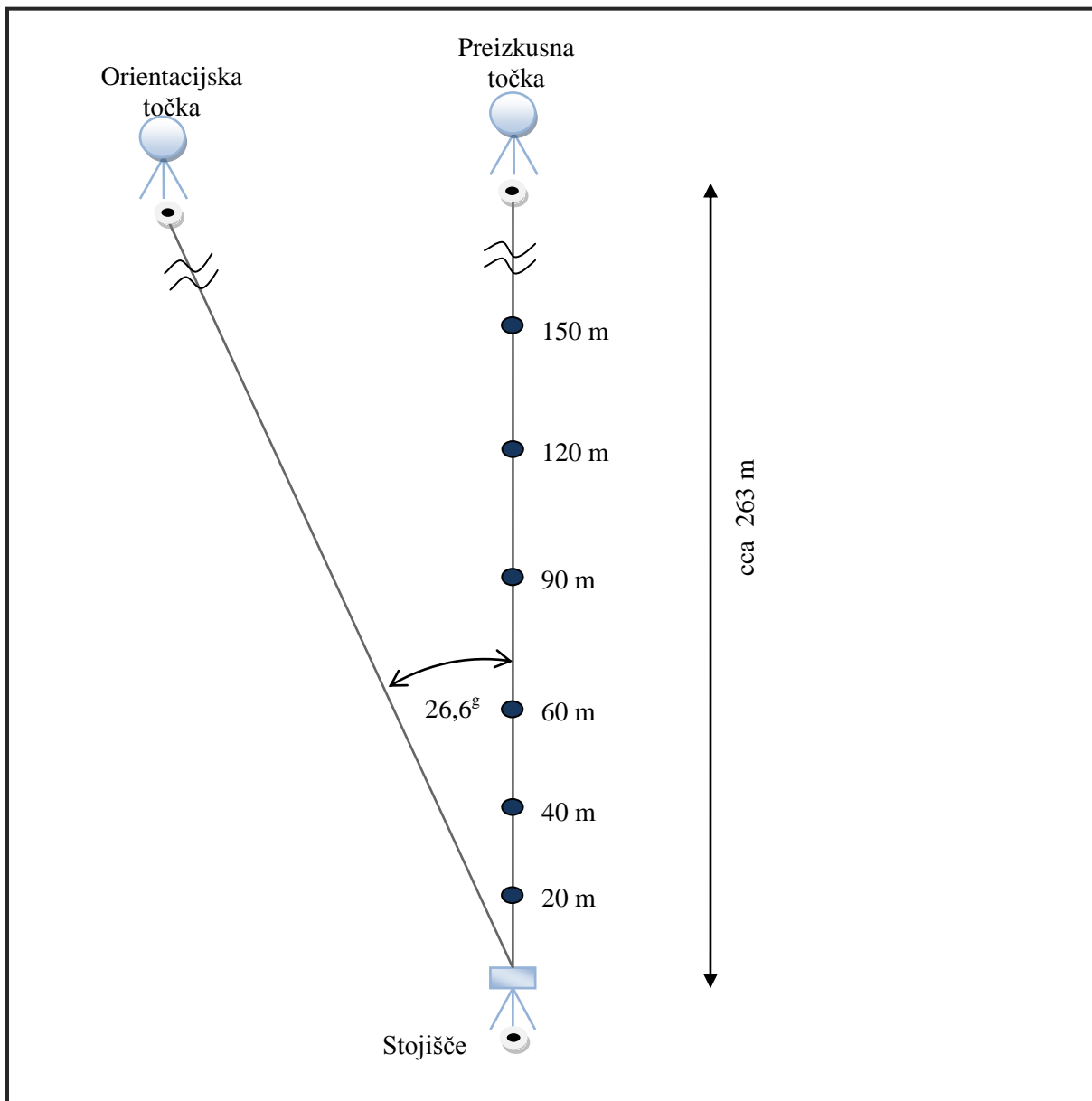
4.2.1 Izbira geometrije točk

Najprej smo si izbrali primerno stojišče. Na stativ smo privili instrument s srčnim vijakom in stativ močno pohodili, da je bil v času meritev pri miru. Instrument smo zaradi sončnega obsevanja zavarovali s senčnikom. Višino instrumenta in obeh prizem smo izbrali nizko zato, da je vizura proti preizkusni točki potekala ob boku avtomobila (pod stranskim ogledalom), kjer smo lahko s tipalnim termometrom enostavno merili temperaturo avtomobila. Višina instrumenta je bila približno 1,18 m.

Nato smo si izbrali dve točki: orientacijsko in preizkusno točko. Na ti dve točki smo postavili stativa z reflektorjema. Tudi ta stativa smo močno pohodili, da sta bila v času meritev pri miru. Vizura na orientacijsko točko je morala biti dovolj stran od vizure na preizkusno točko. Tako orientacijska vizura ni bila niti najmanj podvržena bočni refrakciji. Orientacijska točka je dodatno morala biti vsaj toliko oddaljena kot preizkusna, kar je splošno veljavno pravilo za orientacijske točke.

Orientacijska in preizkusna točka sta bili oddaljeni cca. 263 m od stojišča instrumenta.

Na Sliki 25 predstavljamo geometrijo merskega polja.



Slika 25: Geometrija merskega polja

4.2.2 Postavljanje avtomobila

Vizuro proti preizkusni točki smo izpostavili bočni refrakciji tako, da smo ob vizuri ustavili avtomobil, ki je zaradi mnogo višje temperature od ozračja povzročil bočno refrakcijo. Avtomobil smo ustavili na šestih oddaljenostih od instrumenta: 20 m, 40 m, 60 m, 90 m, 120 m in 150 m (glej Sliko 26). Izmerili smo tudi oddaljenost vizure od avtomobila z ročnim merskim trakom.



Slika 26: Postavljanje avtomobila na različnih točkah

4.3 Metoda in postopek merjenja

4.3.1 Girusna metoda

Girusna metoda je največkrat uporabljena metoda za merjenje horizontalnih kotov. Pri tej metodi lahko v obeh krožnih legah merimo več smeri hkrati.

4.3.2 Postopek merjenja

Najprej smo ustavili avtomobil na določeni oddaljenosti od instrumenta ob preizkusni vizuri. Če je bil avtomobil preblizu preizkusne vizure (cca 3 cm), smo ugotovili, da instrument zaradi prevelikega migetanja zraka ob avtomobilu ni mogel fino navizirati na preizkusno prizmo. To oddaljenost avtomobila od preizkusne vizure smo v nadaljevanju meritev upoštevali.

Nato smo v prvem polgirusu navizirali orientacijsko točko in nato preizkusno točko. Uporabili smo avtomatski način merjenja. Merjenje kota med orientacijsko in preizkusno točko smo izvedli v 10 girusih.

Po opravljenih desetih girusih smo nato avtomobil odmaknili in ponovno v 10 girusih izmerili kot med orientacijsko in preizkusno vizuro. Ta izmerjen kot je bil torej brez bočne refrakcije in je služil za kontrolo stabilnosti instrumenta, obeh prizem na orientacijski in preizkusni točki ter »stabilnosti« ozračja.

Pri vsakem sklopu girusnih meritev smo izmerili temperaturo zraka, oddaljenost preizkusne vizure od avtomobila ter temperaturo avtomobila. Ker ima na bočno refrakcijo zračni tlak majhen vpliv, dodatno pa je bilo ozračje stabilno, smo zračni tlak izmerili samo na začetku meritev.

Rezultate meritev podajamo v Preglednici 4.

Preglednica 4: Rezultati terenskih meritev

Zap. št. poizkusa	Oddaljenost od stojišča [m]	Oddaljenost vizure od objekta [cm]	T zraka [°C]	T avtomobila [°C]
1	20 m	(20,21) 13 cm od avtomobila	18,1 °C	39 °C
		(25,26) kontrolna meritev	17,6 °C	
2	40 m	(40,41) 16 cm od avtomobila	18,8 °C	42 °C
		(45,46) kontrolna	18,6 °C	
3	60 m	(60,61) 16 cm od avtomobila	18,7 °C	38 °C
		(65,66) kontrolna	18,6 °C	
4	90 m	(90,91) 13 cm od avtomobila	18,0 °C	39 °C
		(95,96) kontrolna	20,0 °C	
Opomba: pri prvih 4-ih girusih 4. poizkusa se je pojavljal oblak – nihanje temperature				
5	120 m	(120,121) 14 cm od avtomobila	19,3 °C	35 °C
		(125,126) kontrolna	20,0 °C	
6	150 m	(150,151) 17 cm od avtomobila	20,0 °C	33 °C
		(155,156) kontrolna	20,3 °C	
Opomba: zadnji 3 girusi oblak in močnejši veter				
Opomba: izmerjen srednji zračni tlak 985 mbar				
Opomba: v tretjem stolpcu te preglednice sta v oklepajih navedeni imeni viziranih točk, ki smo jih vtipkali v instrument				

4.4 Obdelava in rezultati meritev

Po končani terenski izmeri smo v pisarni na fakulteti prenesli izmerjene podatke z instrumenta v računalnik. Nato smo meritve obdelali in izračunali refrakcijske kote v odvisnosti od temperature objekta, oddaljenosti vizure od objekta in dolžine vizure od instrumenta do objekta. Izmerjene vrednosti smo želeli primerjati tudi z rezultati, ki smo jih izračunali iz enačb iz literature. V nadaljevanju naloge bomo predstavili, kako smo obdelali rezultate meritev, kako smo izračunali refrakcijske kote s spoznanji iz literature in kako smo izračunali refrakcijske kote na podlagi meritev.

4.4.1 Obdelava meritev

Najprej smo prenesli shranjene podatke iz instrumenta Leica Geosystems TS30 v računalnik. Začetek datoteke prikazujemo na Sliki 27. Prvi stolpec prikazuje zaporedne številke registriranega podatka z imenom vizirane točke. V drugem stolpcu so prikazane vrednosti horizontalnih smeri, v tretjem stolpcu vrednosti zenitnih razdalj, v četrtem so vrednosti poševnih dolžin, v petem pa vrednosti adicijske konstante. Šesti, sedmi in osmi stolpec prikazujejo dan meritev, v zadnjih štirih stolpcih pa je zabeležena ura meritev.

*110001+0000000STOJ_0201	21...2+0000000351162910	22...2+0000000099817800	31...0+0000000000000000	51...+000000000000+000	2015	9	9	10	56	3.680
*110003+0000000000000000	21...2+0000000321661520	22...2+0000000099980810	31...0+00000221007.5000	51...+000000000000+000	2015	9	9	11	4	57.350
*110004+0000000000000000	21...2+0000000348260680	22...2+0000000099995260	31...0+00000263537.3000	51...+000000000000+000	2015	9	9	11	7	9.970
*110005+0000000000000000	21...2+0000000148260280	22...2+0000000300008170	31...0+00000263537.2000	51...+000000000000+000	2015	9	9	11	7	25.870
*110006+0000000000000000	21...2+0000000121661070	22...2+0000000300019750	31...0+00000221007.6000	51...+000000000000+000	2015	9	9	11	7	32.970
*110007+0000000000000000	21...2+0000000321662810	22...2+0000000099981760	31...0+00000221007.5000	51...+000000000000+000	2015	9	9	11	7	56.050
*110008+0000000000000000	21...2+0000000348259950	22...2+0000000099992890	31...0+00000263537.6000	51...+000000000000+000	2015	9	9	11	8	13.260
*110009+0000000000000000	21...2+0000000148259760	22...2+0000000300009140	31...0+00000263537.4000	51...+000000000000+000	2015	9	9	11	8	14.280
*110010+0000000000000000	21...2+0000000121660940	22...2+0000000300022450	31...0+00000221007.4000	51...+000000000000+000	2015	9	9	11	8	21.350

Slika 27: Izpis meritev iz instrumenta Leica Geosystems TS30

Nato smo izračunali sredine merjenih horizontalnih smeri, zenitnih razdalj in poševnih dolžin, kar prikazujemo v Preglednici 5. Poleg sredin navajamo še dosežene standardne deviacije meritev.

Preglednica 5: Sredine horizontalnih smeri, zenitnih razdalj in poševnih dolžin s pripadajočimi standardnimi deviacijami

Vizura	Sredine					
	H_z [g]	σ_{ng} [cc]	Z [g]	σ_z [cc]	D [m]	σ_D [m]
20	0	0	99,98011	4,6	221,00747	0,00014
21	26,59958	3,4	99,99352	10,7	263,53739	0,00015
25	0	1,4	99,97948	5	221,00754	0,00014
26	26,59798	1,4	99,99157	7,5	263,53743	0,00018
40	0	3,8	99,98043	5	221,00729	0,00018
41	26,59915	3,8	99,99321	5,4	263,53724	0,00016
45	0	1,9	99,98017	5,9	221,00732	0,00014
46	26,59823	1,9	99,99298	11,8	263,53724	0,00016
60	0	2,8	99,98096	4	221,00724	0,00019
61	26,59893	2,8	99,9933	10,2	263,53706	0,00042
65	0	2,5	99,98064	5,1	221,00717	0,00010
66	26,5982	2,5	99,99351	14,4	263,53707	0,00018
90	0	1,6	99,9799	8	221,00726	0,00020
91	26,59834	1,6	99,99239	8,3	263,53692	0,00016
95	0	1,5	99,9806	5,3	221,00711	0,00012
96	26,59824	1,5	99,99348	8,2	263,53692	0,00016
120	0	2,9	99,98033	7,9	221,00707	0,00020
121	26,59842	2,9	99,9927	9,6	263,53697	0,00022
125	0	1,5	99,98063	7,3	221,00705	0,00020
126	26,59822	1,5	99,99371	7,2	263,53690	0,00012
150	0	1,3	99,98137	8,9	221,00697	0,00013
151	26,59805	1,3	99,99456	9,5	263,53690	0,00018
155	0	1,3	99,98176	13,3	221,00702	0,00020
156	26,59788	1,3	99,99487	7,3	263,53676	0,00017

4.4.2 Izračun refrakcijskega kota na podlagi terenskih meritev

4.4.2.1 Horizontalne smeri

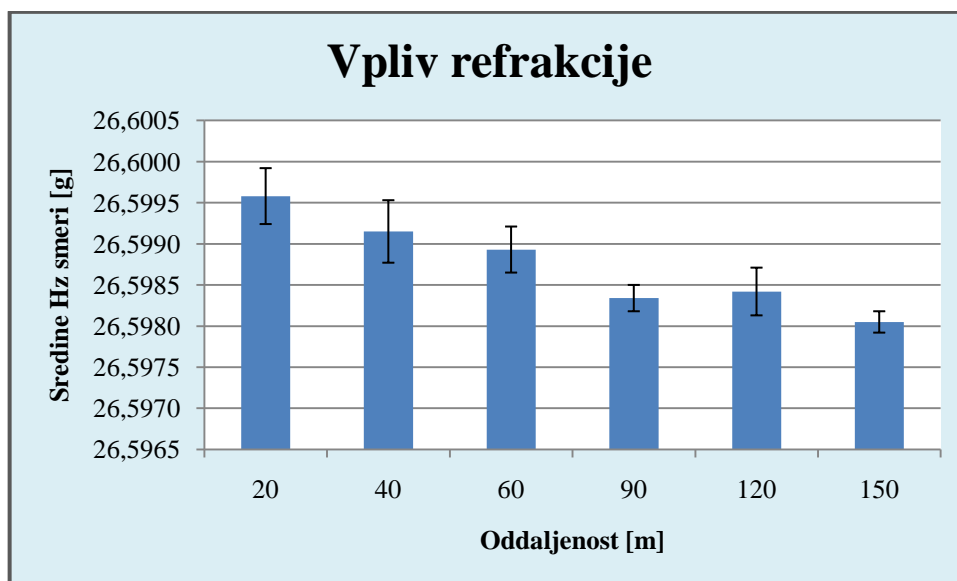
Od izmerjenih količin smo obravnavali samo horizontalne smeri, saj so edine podvržene bočni refrakciji. V Preglednici 6 podajamo sredine Hz smeri, oceno natančnosti merjenja Hz smeri iz odstopanj od aritmetične sredine σ_{smer} , standardne deviacije opazovane smeri v enem girusu z upoštevanjem pogreška začetne smeri σ_{Ig} , standardno deviacijo merjene Hz smeri v n girusih z upoštevanjem pogreška začetne smeri σ_{ng} ter standardno deviacijo reducirane smeri σ_{red} .

Oceno natančnosti merjenja Hz smeri, pri kateri so pogoj nadštevilne meritve, opravimo zato, da izračunamo standardne deviacije meritev in da lažje odkrijemo morebitne grobe in sistematične pogreške.

Preglednica 6: Sredine in standardne deviacije merjenih horizontalnih smeri

Vizura	Sredina [g]	σ_{smer} [cc]	σ_{Ig} [cc]	σ_{ng} [cc]	σ_{red} [cc]	σ_{ng} [g]
20	0	0				
21	26,59958	14,4	10,7	3,4	15,1	0,00034
25	0	0				
26	26,59798	6,1	4,5	1,4	6,4	0,00014
40	0	0				
41	26,59915	16,1	12	3,8	16,9	0,00038
45	0	0				
46	26,59823	7,9	5,9	1,9	8,4	0,00019
60	0	0				
61	26,59893	11,9	8,9	2,8	12,6	0,00028
65	0	0				
66	26,5982	10,5	7,8	2,5	11	0,00025
90	0	0				
91	26,59834	6,9	5,2	1,6	7,3	0,00016
95	0	0				
96	26,59824	6,2	4,6	1,5	6,5	0,00015
120	0	0				
121	26,59842	12,5	9,3	2,9	13,1	0,00029
125	0	0				
126	26,59822	6,2	4,6	1,5	6,5	0,00015
150	0	0				
151	26,59805	5,7	4,2	1,3	6	0,00013
155	0	0				
156	26,59788	5,4	4,1	1,3	5,7	0,00013

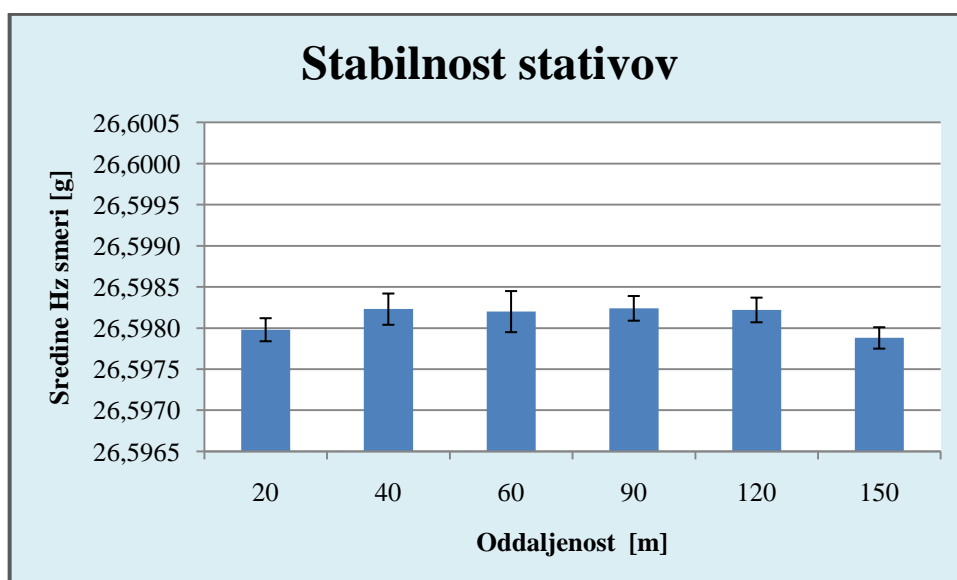
Na Grafikonu 1 prikazujemo vpliv refrakcije glede na oddaljenost avtomobila do instrumenta.



Grafikon 1: Vpliv refrakcije glede na oddaljenost avtomobila od instrumenta

Iz Preglednice 6 in Grafikona 1 lahko vidimo, da je bil vpliv refrakcije največji, ko je bil avtomobil najbližje instrumentu, in da pada oz. se manjša z oddaljenostjo od instrumenta, kar je pričakovan rezultat.

Nadzorovali smo tudi stabilnost stativov v času meritev. Stabilnost stativov dobimo kot razliko kotov med orientacijsko in preizkusno vizuro, ko ta ne poteka ob avtomobilu, kar prikazujemo na Grafikonu 2.



Grafikon 2: Stabilnost stativov v času merjenja

Na podlagi rezultatov v Preglednici 6 lahko izračunamo, če so stativi v času meritev stabilni. Predpostavimo, da so pogreški meritev normalno porazdeljeni. Enako so porazdeljene tudi količine, ki so linearne funkcije meritev [23]. Stabilnost stativov izračunamo po naslednjem postopku:

- Izberemo si stopnjo značilnosti testa 5 %.
- Postavimo ničelno in alternativno hipotezo:
 - H_0 : stativ se ni statistično značilno premaknil,
 - H_1 : stativ se je statistično značilno premaknil.
- Iz preglednic za standardizirano normalno porazdelitev izračunamo kritično vrednost T_{krit} za dvostranski test, ki je 1,96.
- Izračun srednje vrednosti Hz smeri na preizkusno točko, ko vizura ne poteka ob avtomobilu:

$$Hz_{sred} = \frac{Hz_{26} + Hz_{46} + Hz_{66} + Hz_{96} + Hz_{126} + Hz_{156}}{6} = \frac{\sum_1^6 Hz_i}{6}, i = 26, 46, 66, 96, 126, 156 \quad (17)$$

- Izračun standardne deviacije srednje vrednosti Hz smeri:

$$\sigma_{Hz_{sred}} = \sqrt{\frac{\sum_1^6 (Hz_i - Hz_{sred})^2}{6-1}} \quad (18)$$

- Izračun razlike za posamezno oddaljenost avtomobila do instrumenta med posamezno vrednostjo Hz smeri na preizkusno točko $i = 26, 46, 66, 96, 126, 156$, ko vizura ne poteka ob avtomobilu Hz_i in srednjo vrednostjo Hz smeri Hz_{sred} :

$$raz_i = Hz_i - Hz_{sred} \quad (19)$$

- Izračun standardne deviacije razlike raz_i z uporabo zakona o prenosu varianc in kovarianc:

$$\sigma_{raz_i} = \sqrt{\sigma_{ng_i}^2 + \sigma_{Hz_{sred}}^2} \quad (20)$$

- Izračun testne statistike T :

$$T = \frac{raz_i}{\sigma_{raz_i}} \quad (21)$$

- Primerjava testne statistike T s kritično vrednostjo T_{krit} :

Če je $T < T_{krit}$, potem ne moremo zavrni ničelne hipoteze ob tveganju 5 %, torej stativ se ni statistično značilno premaknil.

Če je $T > T_{krit}$, potem zavrnemo ničelno hipotezo ob tveganju 5 %, torej stativ se je statistično značilno premaknil.

V našem primeru smo izračunali $Hz_{sred} = 26,59816$ g in $\sigma_{Hz_{sred}} = 0,00015$ g.

Ostale rezultate testiranja stabilnosti stativov prikazujemo v Preglednici 7, kjer lahko vidimo, da so bili stativi v času meritev stabilni.

Preglednica 7: Rezultati testiranja stabilnosti stativov

Oddaljenost [m]	Razlika raz_i [g]	St. dev. razlike σ_{raz_i} [g]	Testna statistika T	Stativ stabilen
20	-0,00014	0,00021	-0,69	da
40	0,00011	0,00025	0,43	da
60	0,00007	0,00029	0,26	da
90	0,00012	0,00022	0,53	da
120	0,00010	0,00022	0,44	da
150	-0,00024	0,00020	-1,21	da

Ker smo s kontrolnimi meritvami, ko vizura ni potekala ob avtomobilu, dokazali, da so stativi stabilni, smo v naslednjem koraku izračunali refrakcijski kot v odvisnosti od oddaljenosti avtomobila od instrumenta. Refrakcijski kot smo dobili kot razliko med vrednostjo sredine kota pri preizkusni vizuri ob avtomobilu in vrednostjo sredine kota pri preizkusni vizuri, ko avtomobila ni bilo zraven:

$$\delta = V_2 - V_1 \quad (22)$$

kjer je:

- δ ... refrakcijski kot
- V_2 ... vizura ob avtomobilu
- V_1 ... vizura brez avtomobila

Natančnost določitve refrakcijskega kota smo dobili s pomočjo zakona o prenosu varianc in kovarianc:

$$\sigma_\delta = \sqrt{\sigma_{V_2}^2 + \sigma_{V_1}^2} \quad (23)$$

kjer je:

- σ_δ ... natančnost refrakcijskega kota
- σ_{V_2} ... natančnost vizure ob avtomobilu
- σ_{V_1} ... natančnost vizure brez avtomobila

Izračunali smo tudi testno statistiko

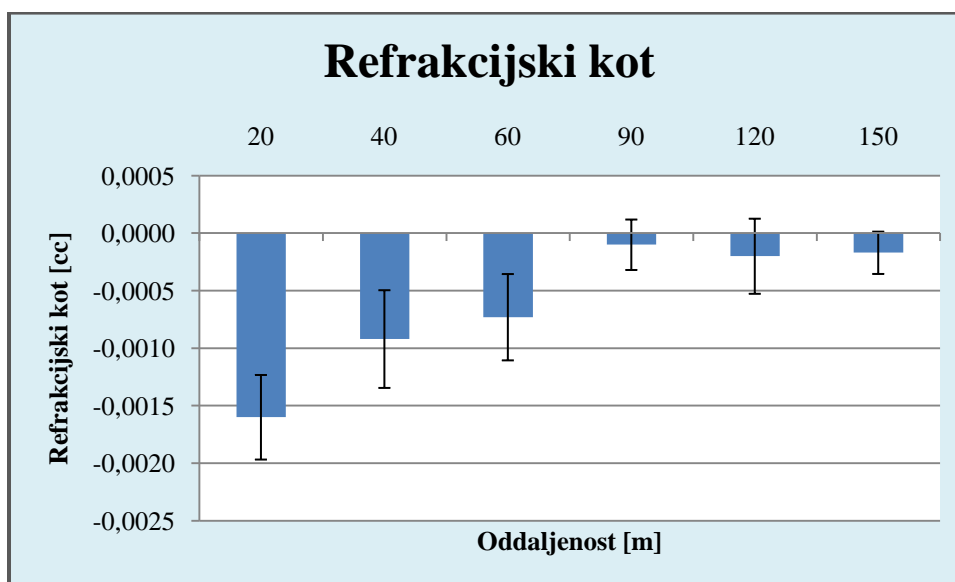
$$T = \frac{\delta_i}{\sigma_{\delta_i}}, \quad (24)$$

ki nam je služila za testiranje, ali je refrakcijski kot statistično značilno določen, kar prikazujemo v Preglednici 8. Stopnjo značilnosti testa smo izbrali enako kot pri testiranju stabilnosti stativov, torej 5 %. Posledično dobimo velikost kritične vednosti T_{krit} iz preglednic za standardizirano normalno

porazdelitev enako 1,96. Če je $T > T_{krit}$, potem ob tveganju 5 % trdimo, da je refrakcijski kot statistično značilno določen. Če je $T < T_{krit}$, pa lahko trdimo, da refrakcijski kot ni statistično značilno določen.

Preglednica 8: Refrakcijski kot

Oddaljenost [m]	Refrakcijski kot δ [g]	Natančnost kota σ_δ [g]	Natančnost kota σ_δ [cc]	Testna statistika T	Stat. značilen
20	-0,00160	0,00037	3,7	-4,35	da
40	-0,00092	0,00042	4,2	-2,17	da
60	-0,00073	0,00038	3,8	-1,94	ne
90	-0,00010	0,00022	2,2	-0,46	ne
120	-0,00020	0,00033	3,3	-0,61	ne
150	-0,00017	0,00018	1,8	-0,92	ne



Grafikon 3: Refrakcijski kot z natančnostjo

Iz Grafikona 3 vidimo, da je na oddaljenosti 90 m vpliv najmanjši – to pripisujemo dejstvu, da je v času merjenja na tej razdalji, pri prvih 4-ih girusih oblak zasenčil Sonce, kar je povzročilo zmanjšanje temperature avtomobila in posledično vplivalo na refrakcijski kot.

4.4.3 Teoretični izračun refrakcijskega kota

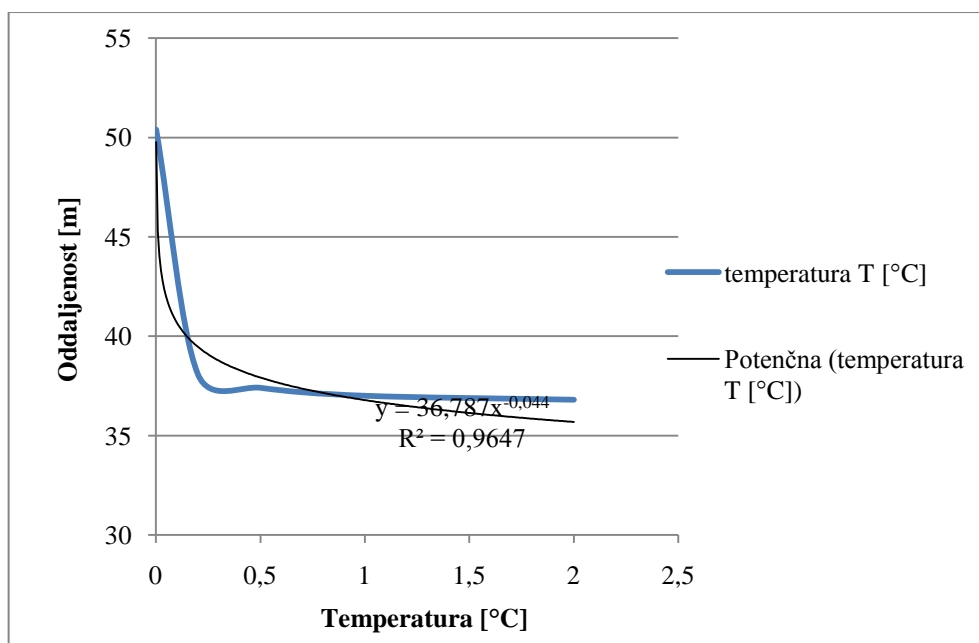
Po pregledu literature [17], [18] in [19] smo se odločili, da bi poskusili izračunati refrakcijski kot po enačbi (16). Za izračun refrakcijskega kota po tej enačbi potrebujemo dolžino vizure med dvema točkama D , dolžino do objekta, ki povzroča bočno refrakcijo s , radij ukrivljenosti svetlobnega žarka – vizure κ – in dolžino objekta, ki povzroča bočno refrakcijo Δs . Za izračun radija ukrivljenosti svetlobnega žarka – vizure κ – enačba (12) potrebujemo srednji zračni tlak P , srednjo temperaturo zraka T in horizontalni temperaturni gradient $grad T$. Za izračun horizontalnega temperaturnega

gradienta $grad T$ – enačba (15) – potrebujemo temperaturi v dveh točkah i in $i+1$ ter oddaljenost teh dveh točk od objekta oz. v našem primeru od avtomobila. Temperaturo avtomobila T_1 smo izmerili, temperaturo zraka T_2 smo tudi izmerili (glej Preglednici 4 in 11), nismo pa izmerili temperature na vizuri pri objektu – avtomobilu T_v –, ker za to nismo imeli tehničnih možnosti. Tako smo se odločili, da bomo poskusili to vrednost izračunati.

Najprej smo se odločili, da bomo na podlagi podatkov iz literature [19] aproksimirali krivuljo padanja temperature v odvisnosti od oddaljenosti od objekta, ki povzroča refrakcijo. Wilhelm je v svojem delu [19] ugotavljal tudi, kako temperatura v odvisnosti od oddaljenosti od izvora refrakcije pada. Vrednosti za izračun aproksimacijske krivulje smo odčitali iz tabel Tab. II.01, stran II/11, in Abb. II.04, stran II/9 – glej Preglednici 9,10 in Grafikona 4,5.

Preglednica 9: Izračun krivulje temperaturnega gradienta (1. primer)

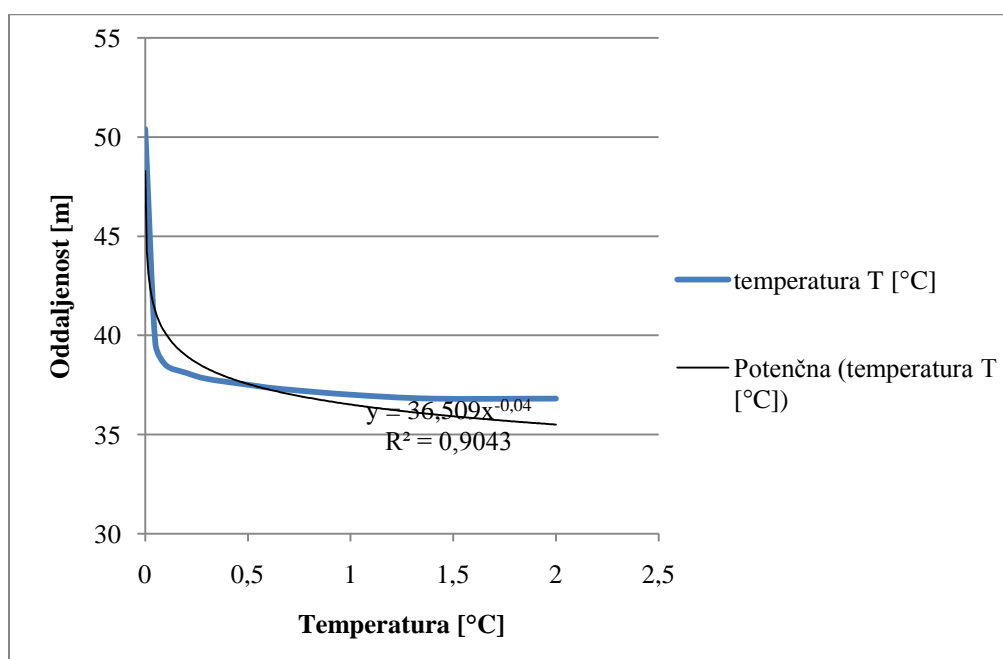
Oddaljenost x [m]	Temperatura T [°C]
0,001	50,4
0,2	38,1
0,5	37,4
1	37
2	36,8



Grafikon 4: Krivulja temperaturnega gradienta (1. primer)

Preglednica 10: Izračun krivulje temperaturnega gradienta (2. primer)

Oddaljenost x [m]	Temperatura T [°C]
0,001	50,4
0,05	39,6
0,1	38,5
0,2	38,1
0,3	37,8
0,5	37,5
0,65	37,3
1	37
1,4	36,8
2	36,8



Grafikon 5: Krivulja temperaturnega gradienta (2. primer)

Iz obeh grafov vidimo, da temperatura pada z oddaljenostjo po eksponentni krivulji. Pri uporabi te krivulje je bil korelacijski koeficient največji. Če smo uporabili druge funkcije, je bil korelacijski koeficient manjši.

Na podlagi naših izmerjenih vrednosti smo poskusili aproksimirati krivuljo padanja temperature v odvisnosti od oddaljenosti od objekta, ki povzroča refrakcijo. Podatke in rezultate izračunov prikazujemo v Preglednici 11 – po stolpcih za posamezno oddaljenost od instrumenta do sredine izvora bočne refrakcije, torej do sredine avtomobila. Koeficienta a in b v eksponentni aproksimacijski krivulji $y = a x^{-b}$ smo dobili s poskušanjem:

- odločili smo se, da na oddaljenosti x_2 (imenovali smo jo »oddaljenost zraka«) ni več vpliva segretega avtomobila; na podlagi Grafikonov 4 in 5 in literature [19] smo se odločili, da je to na razdalji 1,0 m od avtomobila, torej je $x_2 = 1,0$ m;
- koeficient a smo izbrali tako, da je imel vrednost temperature zraka T_2 ;
- koeficient b smo izbirali toliko časa, da je bila s funkcijo $y = a x^{-b}$ izračunana vrednost y enaka temperaturi avtomobila T_1 (pri tem smo privzeli, da je oddaljenost avtomobila 0,001 m, torej je $x_1 = 0,001$ m – v točki $x = 0$ funkcija $y = a x^{-b}$ ni definirana); rezultate v preglednici 10 podajamo v vrstici $y = f(x_1)$;
- na koncu smo za kontrolo izračunali še vrednost funkcije $y = a x^{-b}$ v točki x_2 , torej dobili smo morali temperaturo zraka; rezultate v Preglednici 11 podajamo v vrstici $y = f(x_2)$.

Ko smo dobili koeficienta posamezne aproksimacijske krivulje, smo lahko izračunali temperaturo T_v na oddaljenosti od avtomobila x_v – rezultate v Preglednici 11 podajamo v vrstici T_v .

Z izračunanimi temperaturami na mestu vizure T_v smo lahko izračunali horizontalni temperaturni gradient po enačbi (15), rezultate v Preglednici 11 podajamo v vrstici *grad T*, radij ukrivljenosti svetlobnega žarka – vizure po enačbi (12), rezultate v Preglednici 11 podajamo v vrstici κ , in končno refrakcijski kot po enačbi (16), rezultate v Preglednici 11 podajamo v vrstici δ .

Preglednica 11: Izmerjeni podatki in izračun refrakcijskega kota po enačbi (16)

Dolžina vizure od instrumenta do prizme	D	[m]	263,54	263,54	263,54	263,54	263,54	263,54
Dolžina vizure od instrumenta do sredine izvora bočne refrakcije	s	[m]	21,5	41,5	61,5	91,5	121,5	151,5
Dolžina izvora bočne refrakcije	Δs	[m]	4	4	4	4	4	4
Srednji zračni tlak	p	[mmHg]	738,8	738,8	738,8	738,8	738,8	738,8
Temperatura zraka	T_2	[°C]	18,1	18,5	18,7	20	19,3	20
Temperatura zraka	T_2	[K]	291,3	291,7	291,9	293,2	292,5	293,2
Temperatura izvora bočne refrakcije	T_1	[°C]	39	42	38	35	35	33

se nadaljuje...

..nadaljevanje Preglednice 11

Temperatura izvora bočne refrakcije	T_1	[K]	312	315	311	308	308	306
Oddaljenost izvora bočne refrakcije	x_1	[m]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Oddaljenost zraka	x_2	[m]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Oddaljenost vizure od izvora bočne refrakcije	x_v	[m]	0,13	0,16	0,16	0,20	0,14	0,17
Izračun koeficientov eksponentne krivulje $y = a x^b$	a		18,1	18,5	18,7	20	19,3	20
	b		-0,111	-0,119	-0,103	-0,081	-0,086	-0,072
	$y = f(x_1)$	[°C]	39	42	38	35	35	33
Kontrola	$y = f(x_2)$	[°C]	18,1	18,5	18,7	20	19,3	20
Temperatura na x_v , izračunana z eksponentno krivuljo	T_v	[°C]	22,7	23,0	22,6	22,8	22,9	22,7
Temperatura na x_v , izračunana z eksponentno krivuljo	T_v	[K]	295,9	296,2	295,7	295,9	296,0	295,9
Horizontalni temperaturni gradient	grad T	[°C/m]	-126,4	-119,4	-97,0	-61,4	-87,4	-60,8
Radij ukrivljenosti vizure	κ	[cc/m]	71,245	67,209	54,708	34,591	49,212	34,288
Refrakcijski kot - enačba (16)	δ	[cc]	262	227	168	90	106	58
Izmerjen	δ	[cc]	16	9,2	7,3	1	2	1,7

Če primerjamo rezultate izračunov, ki jih prikazujemo v Preglednici 11, ko smo za izračun refrakcijskega kota uporabili enačbe iz literature [19], in rezultate naših meritev, lahko zaključimo, da dobimo zelo velike razlike v vrednosti refrakcijskih kotov.

V nadaljevanju smo poskušali ugotoviti, zakaj je prišlo do velikih razlik med izmerjenim in izračunanim refrakcijskim kotom po [19]. Poskusili smo spreminjati temperaturo na vizuri pri objektu

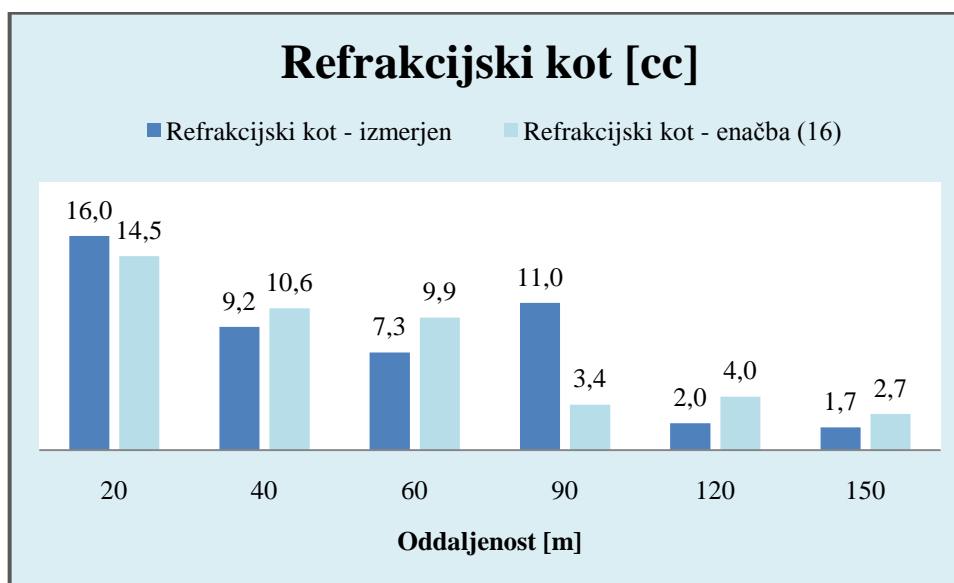
– avtomobilu T_v . Če smo jo spremenili na vrednosti, ki jih prikazujemo v Preglednici 12 v vrstici T_v , dobimo refrakcijske kote podobne izmerjenim.

Preglednica 12: Izračun refrakcijskega kota po enačbi (16), če smo temperaturo na vizuri pri objektu – avtomobilu izbrali

Temperatura na x_v , ocenjena	T_v	[°C]	38	41	37	34,5	34,5	32,5
Temperatura na x_v , ocenjena	T_v	[K]	311,2	314,2	310,2	307,7	307,7	305,7
Horizontalni temperaturni gradient	grad t	[°C/m]	-7,8	-6,3	-6,3	-2,5	-3,6	-3,0
Radij ukrivljenosti vizure	κ	[cm ³ /m]	3,952	3,145	3,227	1,310	1,876	1,563
Refrakcijski kot - enačba (16)	δ	[cc]	14,5	10,6	9,9	3,4	4,0	2,7
Izmerjen	δ	[cc]	16	9,2	7,3	1	2	1,7

Na podlagi rezultatov iz Preglednice 12 lahko zaključimo, da je temperatura na vizuri pri objektu – avtomobilu T_v – precej podobna izmerjeni temperaturi avtomobila T_1 . Z aproksimacijsko eksponentno krivuljo dobimo to temperaturo precej nižjo.

Če predpostavimo, da je horizontalni temperaturni gradient mnogo manjši kot izračunan po enačbah iz literature [19], pa dobimo z enačbami podobne vrednosti refrakcijskega kota kot smo ga sami izmerili, kar prikazujemo na Grafikonu 6.



Grafikon 6: Prikaz refrakcijskega kota z izmerjenimi vrednostmi in vrednostmi, izračunanimi iz enačbe (16)

5 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo poskušali ugotoviti velikost vpliva bočne refrakcije na merjenje horizontalnih smeri s teodolitom. Moja naloga je bila izmeriti in analizirati vpliv bočne refrakcije na osnovi meritev, ki smo jih izvedli na terenu. Pri tem smo si pomagali z avtomobilom, ki je služil kot izvor bočne refrakcije. Od stojišča smo proti preizkusni točki opravili dve ponovitvi meritev, in sicer najprej je potekala vizura ob avtomobilu, ki je povzročal bočno refrakcijo in smo ga parkirali na različnih oddaljenostih od instrumenta, nato smo avtomobil odstranili in je vizura potekala nemoteno proti preizkusni točki.

V času meritev je bilo vreme stabilno in temperature dokaj visoke, na trenutke pa je zapihal rahel veter, ki je prinesel nekaj oblakov, kar je povzročilo malenkosten padec temperature in mešanje zračnih plasti, kar je bilo za naš preizkus idealno, saj smo tako lažje primerjali vpliv bočne refrakcije glede na vremenske pogoje.

Iz raziskav, tako tujih kot tudi iz praktičnega primera, ki smo ga izvedli, lahko sklepamo, da ima temperatura pri meritvah horizontalnih smeri velik pomen, saj višja kot je, bolj vpliva na zračne plasti in posledično je tudi vpliv bočne refrakcije večji.

Tako trdimo, da je vpliv bočne refrakcije na merjenje horizontalnih smeri pogrešek, ki ga v veliki večini primerov ne bi smeli zanemariti, zlasti če imamo opravka z meritvami, ki zahtevajo visoko natančnost meritev. V predorih pa pride vpliv bočne refrakcije močno do izraza.

Na osnovi terenskih meritev lahko zaključimo, da se vpliv refrakcije manjša:

- z oddaljenostjo objekta, ki povzroča bočno refrakcijo, od instrumenta ter dolžine vizure,
- če vizura poteka čimdlje od objekta, ki povzroča bočno refrakcijo,
- če temperaturi ozračja in objekta, ki povzročata bočno refrakcijo, nista previsoki.

V primeru, ko se vizuram, ki potekajo blizu izvora, ki povzroča bočno refrakcijo, ne moremo izogniti, lahko njen vpliv zmanjšamo tako, da meritve izvedemo v oblačnem vremenu z zmernimi temperaturami.

VIRI

- [1] SSKJ. 2014.
http://bos.zrc-sazu.si/cgi/a03.exe?name=sskj_testa&expression=refrakcija&hs=1 (Pridobljeno 20. 12. 2015.)
- [2] Adlešič, M. 1957. Svet žive fizike ... 1. knjiga: Svet svetlobe in barv. Ljubljana, Mladinska knjiga: str. 17–50.
- [3] Štuhec, M. 2007. Fizika. Zbirka: Tematski leksikoni. Tržič, Učila International: str. 197–199.
- [4] Prosen, M. 1991. Zakaj vidimo Sonce ob obzorju sploščeno. Presek 18, 4: 248–251.
<http://www.presek.si/18/1050-Prosen.pdf> (Pridobljeno 20. 12. 2015.)
- [5] Pirc, M. 2011. Mavrica. 2015.
<http://www-f1.ijs.si/~rudi/sola/Mavrica.pdf> (Pridobljeno 20. 12. 2015.)
- [6] Duh, D. 1999. Fata morgana. Seminar pri predmetu Fizika II.
<http://www.fizika.si/seminarji/fatamorgana/fatamorg.html> (Pridobljeno 6. 3. 2016.)
- [7] Mezgec, I. 1994. Ponatis članka iz revije Spika. 2016.
<http://www.kvarkadabra.net/lom-ozracje> (Pridobljeno 22. 3. 2016.)
- [8] Maxwell, J. C. 2016. Wikipedija, prosta enciklopedija. 2016.
https://sl.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell (Pridobljeno 4. 1. 2016.)
- [9] Oštir, K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Založba ZRC: str. 21–24.
- [10] Hitrost svetlobe. 2016.
https://sl.wikipedia.org/wiki/Hitrost_svetlobe (Pridobljeno 25. 2. 2016.)
- [11] Hitrost svetlobe v praznem prostoru. 2016.
http://wiki.fmf.uni-lj.si/wiki/Hitrost_svetlobe_v_vakuumu (Pridobljen 25. 2. 2016.)
- [12] Kladnik, R. 1996. Fizika za srednješolce. +1, Pot k maturi iz fizike. Ljubljana, DZS: str. 189, 194–195.
- [13] Ambrožič, T. 2009. Predavanja Geodezija 2. Neobjavljeno študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 268 str.
- [14] Ježovnik, V. 2004. Predavanja Geodezija 1. Neobjavljeno študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 198 str.
- [15] Zore, A. 2012. Vplivi temperaturnih sprememb pri merjenju z digitalnim nivelirjem. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Zore): 49 str. in 5 str. pril.
- [16] Navodilo za izmero preciznega nivelmana. 2016.
http://www.gu.gov.si/fileadmin/gu.gov.si/pageuploads/JVN_2015/JNMV/8_Izvedba_merit_nivel_Grosuplje-NM-Metilika/Priloga_Navodilo_za_izmero_preciznega_nivelmana.pdf (Pridobljeno 1. 3. 2016.)
- [17] Redovniković, L., Džapo, M., Kapović, Z. 2011. Ispitivanje utjecaja bočne refrakcije na merjenja horizontalnih pravaca u tunelu. Geodetski list 65 (88), 3: 241–259.
<http://hrcak.srce.hr/77844> (Pridobljeno 7. 7. 2015.)

-
- [18] Redovniković, L., Ališić, I., Luketić, A. 2013. Influence of lateral refraction on measured horizontal directions. *Survey review* 45, 331: 285–295.
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/1752270612Y.0000000037?journalCode=ysre20>
(Pridobljeno 7. 7. 2015.)
- [19] Wilhelm, W. 1993. Empirische Bestimmung der Seitenrefraktion an 10 Objekten in der Praxis. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Institut für Geodäsie und Fotogrammetrie: 229 str. http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/Graue_Berichte_PDF/219.pdf (Pridobljeno 7. 7. 2015.)
- [20] Meterc, Š. 2011. Izmera položajne geodetske mreže za potrebe analize izračuna prostega stojišča. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Š. Meterc): 52 str. in 70 str. pril.
- [21] Kogoj, D. 2005. Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljmeri. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 159 str.
- [22] Testo 110 – 1 Channel NTC Thermometer. 2016.
<http://www.testolimited.com/testo-110-1-channel-ntc-thermometer> (Pridobljeno 11. 3. 2016.)
- [23] Turk, G. 2011. Verjetnostni račun in statistika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 240 str.

VIRI SLIK

- [S1] Lom svetlobe. 2016.
<http://www.iucbeniki.si/fizika8/143/index1.html> (Pridobljeno 11. 3. 2016.)
- [S2] Fotografije Jans|PictureSlovenia. Mavrica da te kap. 2016.
<http://www.pictureslovenia.com/en/foto/?u=1304> (Pridobljeno 5. 3. 2016.)
- [S3] Mezgec, I. 1994. Optični pojavi v atmosferi. Ponatis članka iz revije Spika. 2016.
<http://www.kvarkadabra.net/optika-atmosfera> (Pridobljeno 28. 3. 2016.)
- [S4] Fatamorgana. 2016.
https://sl.wikipedia.org/wiki/Fatamorgana#/media/File:Fatamorgana_3156.jpg
(Pridobljeno 12. 3. 2016.)
- [S5] Mezgec, I. 1994. Lom svetlobe v ozračju. Ponatis članka iz revije Spika. 2016.
<http://www.kvarkadabra.net/lom-ozracje> (Pridobljeno 18. 3. 2016.)
- [S6] Elektromagnetno valovanje. 2016.
<http://www.monitor.si/clanek/pozor-sevanje/167593/> (Pridobljeno 25. 1. 2016.)
- [S7] Sinusno transversalno valovanje. 2016.
http://si.openprof.com/wb/potujo%C4%8De_transverzalno_valovanje?ch=333
(Pridobljeno 12. 1. 2016.)
- [S8] Spekter elektromagnetnega valovanja. 2016.
<http://www.monitor.si/clanek/pozor-sevanje/167593/> (Pridobljeno 25. 1. 2016.)
- [S9] Lomni zakon. 2016.
<https://eucbeniki.sio.si/fizika8/143/index2.html> (Pridobljen 3. 3. 2016.)
- [S10] Zore, A. 2012. Vplivi temperaturnih sprememb pri merjenju z digitalnim nivelirjem. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Zore): str. 3.
- [S11] Zore, A. 2012. Vplivi temperaturnih sprememb pri merjenju z digitalnim nivelirjem. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Zore): str. 4.
- [S12] Zore, A. 2012. Vplivi temperaturnih sprememb pri merjenju z digitalnim nivelirjem. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Zore): str. 15.
- [S13] Redovniković, L., Ališić, I., Luketić, A. 2013. Influence of lateral refraction on measured horizontal directions. Survey review 45 331: str. 293.
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/1752270612Y.0000000037?journalCode=ysre20>
(Pridobljeno 7. 7. 2015.)
- [S14] Tahimeter Leica Geosystems TS30. 2016.
<http://www.surveyequipment.com/images/TM30.jpg> (Pridobljeno 10. 9. 2016.)
- [S15] Precizni reflektor Leica GPH1P. 2016.
<http://surveyequipment.com/leica-gph1p-precision-prism/> (Pridobljeno 30. 3. 2016.)
- [S16] Nosilec reflektorja Leica Geosystems GZR3. 2015.

<http://www.geotrade.nl/alle-categorieen/accessoires/dragers/prismadrager-gzr3-libelle-optisch-lood-voor-gebr-met-gdf2> (Pridobljeno 10. 9. 2015.)

[S17] Slika Podnožje Leica Geosystems GDF121. 2015.
<http://www.geosolution.com/lc-667304.html#.Vvw4lpyLRdg> (Pridobljeno 14. 9. 2015.)