



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

GEODEZIJOS IR KADASTRO KATEDRA

Žymantas Gražulis

**AUKŠTYBINIŲ STATINIŲ HORIZONTALIŲ DEFORMACIJŲ
NUSTATYTŲ GEODEZINIAIS METODAIS TIKSLUMO ANALIZĖ**

**AN ANALYSIS OF THE ACCURACY OF THE HORIZONTAL
DEFORMATIONS OF THE HIGH-RISE CONSTRUCTIONS DETECTED BY
GEODETIC METHODS**

Baigiamasis magistro darbas

Geodezijos ir kartografijos studijų programa, valstybinis kodas 621H14003

Geografinių informacinių sistemų specializacija

Bendrosios inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2018

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Aplinkos inžinerijos fakultetas
Geodezijos ir kadastro katedra

ISBN _____ ISSN _____
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Geodezijos ir kartografijos** programos magistro baigiamasis darbas 4 (geografinės informacinės sistemos)

Pavadinimas **Aukštybinių statinių horizontaliųjų deformacijų nustatytų geodeziniais metodais tikslumo analizė**
Autorius **Žymantas Gražulis**
Vadovas **Dominykas Šlikas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamojo magistro darbo tikslas – nustatyti dviejų dūmtraukių horizontaliąsias deformacijas, naudojant skirtingus matavimo prietaisus: antžeminį lazerinį skenerį ir elektroninį tacheometrą. Taip pat siekiama tarpusavyje palyginti gautus rezultatus, įvertinti tikslumą bei išnagrinėti duomenų apdorojimo ypatumus.

Apžvelgtos bendros žinios apie statinių deformacijas, jų atsiradimo priežastis. Aprašyti aukštybinių statinių horizontaliųjų deformacijų nustatymo metodai, matavimo prietaisų konstrukciniai elementai ir pagrindiniai parametrai. Aptarti matavimo klaidų šaltiniai. Atlikti dūmtraukių horizontaliųjų deformacijų geodeziniai matavimai skirtingais prietaisais. Apdoroti ir palyginti matavimo rezultatai. Atliktas antžeminio lazerinio skenerio gautų rezultatų palyginimas, naudojant skirtingą taškų tankį, bei tikslumo analizė.

Baigiamojo magistro darbo struktūra: įvadas, literatūros apžvalga, 4 skyriai, išvados ir pasiūlymai, literatūra ir kiti šaltiniai.

Baigiamojo magistro darbo apimtis – 88 puslapiai be priedų. Darbe yra 50 paveikslų, 31 lentelė, 66 literatūros šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: antžeminis lazerinis skeneris, aukštybiniai statiniai, dūmtraukio vertikalumas, horizontaliosios deformacijos.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Environmental Engineering
Department of Geodesy and Cadastre

ISBN ISSN
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Geodesy and Cartography** study programme Master Graduation Thesis 4 (Geographic Information Systems)

Title **An Analysis of the Accuracy of the Horizontal Deformations of the High-Rise Constructions Detected by Geodetic Methods**

Author **Žymantas Gražulis**

Academic supervisor **Dominykas Šlikas**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The main aim of this master thesis is to determine the horizontal deformations of two chimneys using different measuring instruments: a terrestrial laser scanner and an electronic total station. It also aims to compare the results, to estimate accuracy and to analyze the data processing specificities.

General knowledge about deformations of the buildings and the reasons for their occurrence were reviewed. The measurement error sources were discussed. Measurements of horizontal deformation were carried out using the terrestrial laser scanner and electronic total station. Horizontal deformations of chimneys of thermal power plants were investigated using corresponding methods. Deformation indicators and evaluated measurement accuracies between different methods were compared. A comparison of the results of a terrestrial laser scanner using a different point density and an analysis of precision were implemented.

Thesis structure: introduction, literature review, 4 chapters, conclusions and suggestions, references and other sources.

Thesis consists of: 88 p. text without appendices, 50 illustrations, 31 tables and 66 references.

Keywords: High-rise constructions, horizontal deformations, terrestrial laser scanner, vertical of chimney.

Turinys

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	11
ĮVADAS.....	13
LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA	15
1. BENDROSIOS ŽINIOS APIE DEFORMACIJAS IR JŲ STEBĖJIMUS	18
1.1. Techniniai reikalavimai dūmtraukio horizontaliųjų deformacijų (posvyrio) matavimams ir analizei.....	18
1.2. Statinių deformacijos ir jų atsiradimo priežastys.....	19
1.3. Aukštybinių statinių deformacijos	21
1.4. Aukštybinių statinių horizontaliųjų deformacijų nustatymo metodai.....	22
1.4.1. Klasikiniai horizontaliųjų deformacijų matavimo metodai.....	23
1.4.2. GPS horizontaliųjų deformacijų matavimo metodas.....	27
1.4.3. Fotogrametrijos metodai matuojant horizontaliąsias deformacijas.....	29
1.4.4. Lazerinis skenavimas matuojant horizontaliąsias deformacijas.....	29
2. MATAVIMO PRIETAISŲ KONSTRUKCINIAI ELEMENTAI IR PAGRINDINIAI PARAMETRAI	33
2.1. Atstumo matavimo metodai.....	33
2.1.1. Tiesioginio lazerio signalo sklidimas.....	35
2.1.2. Amplitudės modeliavimo (fazių skirtumų) metodas.....	35
2.1.3. Trianguliacija	37
2.2. Kampų matavimo metodai	38
2.3. Lazerio krypties keitimo būdai	39
2.4. Klaidų šaltiniai	40
2.4.1. Instrumentinės klaidos	40
2.4.2. Klaidos, susijusios su nuskaityto objekto forma ir charakteristikomis	43
2.4.3. Klaidos, kurias sukelia aplinkos savybės, kurioje atliekamas matavimas.....	44

2.4.4. Metodologinės klaidos	45
3. AUKŠTYBINIŲ STATINIŲ HORIZONTALIŲJŲ DEFORMACIJŲ TYRIMAS.....	47
3.1. Matavimo prietaisai horizontaliosioms deformacijoms nustatyti	48
3.1.1. GPS imtuvas <i>Leica Viva GNSS GS12</i>	48
3.1.2. Elektroninis tacheometras <i>Leica TS30</i>	49
3.1.3. Antžeminis lazerinis skeneris <i>Leica Scanstation C10</i>	52
3.2. Matavimo metodai ir tiriamas objektas	54
3.3. Matavimo rezultatų apdorojimas	57
3.4. Gautų rezultatų palyginimas	63
4. DŪMTRAUKIŲ HORIZONTALIŲJŲ DEFORMACIJŲ, NUSTATYTŲ PAGAL MATAVIMO DUOMENIS GAUTUS ANTŽEMINIŲ LAZERINIŲ SKENERIŲ MATUOJANT SKIRTINGA SKIRIAMĄJĄ GEBĄ, PALYGINIMAS	66
4.1. Dūmtraukio Nr.1 matavimo rezultatų, gautų skenuojant skirtingomis skiriamosiomis gebomis, tikslumo analizė.....	66
4.2. Dūmtraukio Nr.2 matavimo rezultatų, gautų skenuojant skirtingomis skiriamosiomis gebomis, tikslumo analizė.....	74
IŠVADOS	83
PASIŪLYMAI.....	83
LITERATŪRA IR KITI ŠALTINIAI.....	84
PRIEDAI.....	89

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1. pav. Aukštybinių bokštinių statinių horizontaliųjų deformacijos tipai (A – įlinkis, B – posvyris, C – perstūmimas) (Gocał <i>et al.</i> 1980).....	22
1.2. pav. Matavimų schema bisektoriniu metodu (Dumalski <i>et al.</i> 2013).....	23
1.3 pav. Matavimų sektoriai (Anigacz 2008)	24
1.4 pav. Nuokrypiai nuo apskritimo:	26
1.5 pav. Esamo skepspjūvio taškų padėties nustatymas apskritimo atžvilgiu (Aksamitauskas 2000)	26
1.6 pav. Principinė horizontaliųjų deformacijų matavimo (Kuttykadamov <i>et al.</i> 2016).....	28
1.7 pav. Antžeminių lazerinių skenerių tipai ir jų pritaikymo galimybės (Ingensand 2006)	30
1.8 pav. Antžeminio lazerinio skenerio sudedamųjų dalių veikimo schema (Petrie and Toth 2008) 30	
1.9 pav. Antžeminių lazerinių skenerių tipai pagal matymo lauką (Petrie and Toth 2008)	31
2.1 pav. Elektro-optiniai atstumo matavimo metodai (Zogg 2008)	33
2.2 pav. Fazių poslinkis (http://www.bom.gov.au/australia/radar/about/phase_changes.shtml)	34
2.3 pav. Atstumo matavimo veikimo principai fazinių ir lazerio signalo sklaidimo laiko intervalo (Hiremagalur <i>et al.</i> 2007).....	34
2.4 pav. Tiesioginio lazerio signalo sklaidimo metodo principinė schema (János 2008)	35
2.5 pav. Amplitudės modeliavimo (fazių skirtumo) metodo principinė schema (János 2008).....	35
2.6 pav. Trianguliacijos metodo principas (Zogg, 2008)	37
2.7 pav. Matavimo atrama (<i>angl. measurement arm</i>) (Faro 2018).....	38
2.8 pav. Stiklinė apskritiminė skalė, elektro-optinis barjeras ir išėjimo signalas bei kampo keitiklis (Schulz 2007).....	38
2.9 pav. Binariniu (absoliutiniu) metodu naudojamas skritulys ir kodas (Schulz 2007).....	38
2.10 pav. Svyruojantys veidrodžiai (Staiger 2007)	39
2.11 pav. Basisukantys veidrodžiai (Staiger 2007)	39
2.12 pav. Riboto kampo veidrodžiai (Staiger 2007).....	40
2.13 pav. Lazerio pluošto spindulio liemuo ir divergencijos kampas (Andrews and Phillips 1998) 41	
2.14 pav. Klaidingi matavimai ties briauna. (a) užtušotas apskritimas, kuris yra padalintas, yra lazerio pėdsakas (<i>footprint</i>); (b) grafikas, kuris vaizduoja realius ir išmatuotus briaunos centrus (Sotoodeh 2006)	42
2.15 pav. Difuzinis atspindėjimas (Coșarcă <i>et al.</i> 2009)	43
2.16 pav. Refrakcija ir atspindėjimas (Coșarcă <i>et al.</i> 2009)	44
3.1 pav. Dūmtraukio griūties pavyzdys (Anigacz 2008).....	47
3.2 pav. GPS imtuvas <i>Leica Viva GNSS GS12</i> (http://surveyequipment.com/leica-viva-gs15)	48

3.3 pav. Elektroninis tacheometras Leica <i>TS30</i> (Leica 2009)	50
3.4 pav. Elektroninio tacheometro <i>Leica TS30</i> atstumo matavimo paklaidos (Leica 2009)	51
3.5 pav. Horizontaliųjų kampų atskaitymo tyrimo rezultatai (Hašková, Lipták 2011)	51
3.6 pav. Antžeminis lazerinis skeneris <i>Leica Scanstation C10</i> (Leica 2009).....	52
3.7 pav. Antžeminiu lazeriniu skeneriu <i>Leica Scanstation C10</i> matuotų atstumų nuo 1 iki 15 metrų sistemingųjų pataisų grafikas (Šlikas 2013)	53
3.8 pav. Matavimo schema	55
3.9 pav. Principinė schema, matuojant elektroniniu tacheometru	56
3.10 pav. Principinė schema, matuojant antžeminiu lazeriniu skeneriu.....	57
3.11 pav. Dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti elektroniniu tacheometru	59
3.12 pav. Izometrinis (3D) dūmtraukio Nr.1 principinis brėžinys, išmatuotas elektroniniu tacheometru, kuriame vaizduojami nuokrypiai nuo vertikalės.....	59
3.13 pav. Dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti elektroniniu tacheometru	60
3.14 pav. Izometrinis (3D) dūmtraukio Nr.2 principinis brėžinys, išmatuotas elektroniniu tacheometru, kuriame vaizduojami nuokrypiai nuo vertikalės.....	61
3.15 pav. Dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti antžeminiu lazeriniu skeneriu.....	62
3.16 pav. Dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti antžeminiu lazeriniu skeneriu.....	63
4.1 pav. Dūmtraukio Nr.1 nuokrypiai pagal X ašį.....	69
4.2 pav. Dūmtraukio Nr.1 nuokrypiai pagal Y ašį.....	69
4.3 pav. Dūmtraukio Nr.1 nuokrypiai pagal X ir Y ašis.....	70
4.4 pav. Nuokrypiai nuo vertikalės skirtingomis skiriamosiomis gebomis (kairėje nuokrypiai pagal X ašį, dešinėje pagal Y ašį)	73
4.5 pav. Izometriniai (3D) dūmtraukio Nr.1 brėžiniai, vaizduojantys nuokrypius nuo vertikalės skirtingomis skiriamosiomis gebomis	74
4.6 pav. Dūmtraukio Nr.2 nuokrypiai pagal X ašį.....	76
4.7 pav. Dūmtraukio Nr.2 nuokrypiai pagal Y ašį.....	77
4.8 pav. Dūmtraukio Nr.2 nuokrypiai pagal X ir Y ašis.....	78
4.9 pav. Nuokrypiai nuo vertikalės pagal X ir Y ašis skirtingomis skiriamosiomis gebomis.....	81
4.10 pav. Izometriniai (3D) dūmtraukio Nr.2 brėžiniai, vaizduojantys nuokrypius nuo vertikalės skirtingomis skiriamosiomis gebomis	82

LENTELIŲ SĄRAŠAS

3.1 lentelė. GPS imtuvas Leica Viva GNSS GS12 techninės charakteristikos (http://www.gsb.lt/gnssgps-systems/leica-viva-gnss/leica-viva-gs12).....	49
3.2 lentelė. Elektroninio tacheometro <i>Leica TS30</i> specifikacijos (Leica 2009)	50
3.3 lentelė. Antžeminio lazerinio skenerio <i>Leica Scanstation C10</i> specifikacijos (Leica 2009)	53
3.4 lentelė. Antžeminio lazerinio skenerio <i>Leica Scanstation C10</i> horizontalių kampų matavimo sistemos kalibravimo rezultatai (Šlikas 2013).....	54
3.5 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti elektroniniu tacheometru	58
3.6 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti elektroniniu tacheometru	60
3.7 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti antžeminiu lazeriniu skeneriu.....	61
3.8 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti antžeminiu lazeriniu skeneriu.....	62
3.9 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas.....	64
3.10 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas..	64
4.1 lentelė. Antžeminio lazerinio skenerio <i>Leica Scanstation C10</i> skiriamosios gebos (Leica 2009)	67
4.2 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (žema skiriamoji geba)	67
4.3 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (vidutinė skiriamoji geba)	67
4.4 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (aukšta skiriamoji geba)	68
4.5 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (aukščiausia skiriamoji geba).....	68
4.6 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp žemos ir vidutinės skiriamosios gebos	70
4.7 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp žemos ir aukštos skiriamosios gebos	71
4.8 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp žemos ir aukščiausios skiriamosios gebos.....	71

4.9 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp vidutinės ir aukštos skiriamosios gebos	71
4.10 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp vidutinės ir aukščiausios skiriamosios gebos	72
4.11 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp aukštos ir aukščiausios skiriamosios gebos.....	72
4.12 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (žema skiriamoji geba)	75
4.13 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (vidutinė skiriamoji geba)	75
4.14 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (aukšta skiriamoji geba)	75
4.15 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (aukščiausia skiriamoji geba)	76
4.16 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp žemos ir vidutinės skiriamosios gebos	78
4.17 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp žemos ir aukštos skiriamosios gebos	79
4.18 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp žemos ir aukščiausios skiriamosios gebos.....	79
4.19 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp vidutinės ir aukštos skiriamosios gebos	79
4.20 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp vidutinės ir aukščiausios skiriamosios gebos	80
4.21 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp aukštos ir aukščiausios skiriamosios gebos	80

IVADAS

Problemos formulavimas

Didelių konstrukcijų horizontaliųjų deformacijų matavimai, ypač aukštybinių statinių (dūmtraukių, aušinimo bokštų, televizijos bokštų ir antenų, vandens bokštų ir t. t.), yra vienas iš svarbiausių klausimų, sprendžiamų geodezijoje. Dūmtraukis yra būtina šiluminių elektrinių, naftos perdirbimo ir daugelio kitų pramoninių pastatų rūšių dalis. Labai svarbu matuoti dūmtraukio deformacijas reguliariai, nes statinio griūtis gali padaryti milžiniškų nuostolių ar nusinešti žmonių gyvybes. Pagrindinis uždavinys yra išmatuoti statinio nuokrypius nuo vertikalės, o tai padaryti galima tik netiesioginiu būdu (Zheng *et al.* 2012: 226–234). Matavimo prietaisai ir metodai daugiausia paremti šioje srityje matuojant atskirus taškus (Kregar *et al.* 2015: 354–363). Nepaisant patobulėjusių geodezinių prietaisų, vis dar plačiai naudojami klasikiniai matavimo metodai.

Šiais laikais, be klasikinių metodų, skirtų statinių posvyriams matuoti, dar naudojami lazeriniai skeneriai, kurie tiriamą objektą išmatuoja per trumpą laiką, gaunant tankų taškų „debesį“ (Uchański, Soerensen 2010: 415–424). Antžeminiai lazeriniai skeneriai, dėl tankaus taškų skaičiaus, įgauna didelę dėmesį, matuojant smulkias deformacijas (Tsakiri *et al.* 2006). Iš ankstesnių tyrimų žinoma, kad antžeminiai lazeriniai skeneriai gali atlikti kur kas daugiau matavimų palyginti per trumpą laiką. Tai lemia patikimesnius matavimo rezultatus, nepaisant to, kad vieno taško tikslumas yra mažesnis negu matuojant klasikiniiais metodais (Girardeau-Montaut *et al.* 2005; Park *et al.* 2007: 19–30). Vis dėlto, atliekant matavimus lazeriniu skeneriu, tikslumas neapsiriboja vieno taško tikslumu, nes paviršiniai elementai yra sudaryti iš didelio taškų skaičiaus, kurie naudojami deformacijoms analizuoti (Tang *et al.* 2010: 829–843; Bosche, Haas 2008: 499–512; Schneider 2006: 22–24).

Darbo aktualumas

Šiais laikais visame pasaulyje, taip pat ir Lietuvoje, yra itin aktualus trimačio modelio kūrimas taikant antžeminį lazerinį skenerį. Antžeminiai lazeriniai skeneriai vis dažniau naudojami statinių deformacijoms tirti, ypač smulkioms deformacijoms. Vis dėlto, labai mažas dėmesys yra skiriamas gautiems skenavimo rezultatams su klasikiniiais matavimo metodais palyginti ir tikslumui įvertinti. Baigiamajame magistro darbe siekiama nustatyti aukštybinių statinių horizontaliąsias deformacijas, naudojant antžeminį lazerinį skenerį ir elektroninį tacheometrą, ir tarpusavyje palyginti gautus rezultatus.

Tiriamasis objektas

„Vilniaus energijai“ priklausantys du dūmtraukiai, esantys Vilniaus m. sav., Panerių sen., Trakų Vokėje.

Darbo tikslas – nustatyti dūmtraukių horizontaliąsias deformacijas, naudojant antžeminį lazerinį skenerį ir elektroninį tacheometrą; taip pat tarpusavyje palyginti gautus rezultatus, įvertinti tikslumą bei išnagrinėti duomenų apdorojimo ypatumus.

Darbo uždaviniai

1. Išnagrinėti aukštybinių statinių horizontaliųjų deformacijų nustatymo metodus.
2. Atlikti dūmtraukių deformacijų matavimus, naudojant elektroninį tacheometrą ir antžeminį lazerinį skenerį.
3. Apskaičiuoti dviejų dūmtraukių horizontaliąsias deformacijas, išmatuotas skirtingais matavimo prietaisais.
4. Palyginti gautus rezultatus bei įvertinti matavimų tikslumą.

Tyrimo metodai

Aukštybinių statinių horizontaliųjų deformacijų tyrimai atlikti antžeminiu lazeriniu skeneriu ir elektroniniu tacheometru. Gauti matavimo rezultatai susisteminti, apdoroti matematiniais-statistiniais metodais ir palyginti tarpusavyje, įvertintas matavimo tikslumas.

Darbo mokslinis naujumas

Aukštybinių statinių horizontaliųjų deformacijų tyrimas dažniausiai atliekamas klasikiais matavimo metodais. Baigiamajame magistro darbe apibrėžiama pakankamai naujos metodikos taikymo galimybės horizontaliųjų deformacijų tyrimuose. Matavimai atliekami antžeminiu lazeriniu skeneriu, kai tikslumas neapsiriboja vieno taško tikslumu, nes paviršiaus elementai yra sudaryti iš didelio taškų skaičiaus, naudojamų horizontaliosioms deformacijoms analizuoti.

Darbo praktinė reikšmė

Naudojantis baigiamojo magistro darbo metodika, gautais rezultatais ir išvadomis bus galima pasirinkti tinkamiausią matavimo metodą, tobulinti horizontaliųjų deformacijų nustatymo apdorojimo metodiką. Be to, nustatyti tirtų dūmtraukių, esančių Trakų Vokėje, horizontalių deformacijų rezultatai, gali būti svarbūs atliekant tolimesnius dūmtraukių būklės tyrimus.

Darbo rezultatų aprobavimas

Tyrimo rezultatai paskelbti 10-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Environmental Engineering“, vykusioje 2017 m. balandžio 27–28 d. Pranešimo tema: „*The Horizontal Deformation Analysis of High-rise Buildings*“.

LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

Siekiant suprasti aukštybinių statinių deformacijas ir jų atsiradimo priežastis, horizontaliųjų deformacijų nustatymo metodus, matavimo prietaisus ir jų konstrukcinius elementus, ir pagrindinius parametrus, buvo nagrinėjami moksliniai darbai ir straipsniai. Remiantis surinkta informacija yra atlikta literatūros šaltinių apžvalga.

Statinių deformacijų tyrimus nagrinėjo labai daug mokslininkų. Vienas iš daugiausiai publikacijų lietuvių kalba apie statinių deformacijas parašęs Lietuvos mokslininkas – prof. dr. V. Č. Aksamitauskas. Profesorius yra aprašęs inžinerinių statinių deformacijų tyrimus geodeziniais metodais, deformacijų matavimų geodeziniais metodais klaidų šaltinių tyrimus. Taip pat jis yra vienas iš straipsnio „*Cilindro formos statinių skerspjūvių deformacijų nustatymas*“ autorių. Pagal atstumus tarp realios padėties ir glaudžiojo apskritimo taškų, šiame straipsnyje autorius tiria nuokrypius nuo apskritimo.

Kinijos autoriai Shunyi Zheng *et al.* straipsnyje „*A novel measurement method based on silhouette for chimney quasi-static deformation monitoring*“ aprašė aušinimo dūmtraukių horizontaliųjų deformacijų tyrimą. Matavimai buvo atliekami naudojant elektroninį tacheometrą ir antžeminį lazerinį skenerį. Dūmtraukiai buvo padalinti į pjūvius. Dūmtraukio posvyris buvo apskaičiuotas pagal centro koordinatas. Pasak straipsnio autorių horizontaliųjų deformacijų matavimų tikslumas siekia 0,020 m.

Lenkų mokslininkai A. Dumalski *et al.* straipsnyje „*Classical and laser scanner methods in determining slender objects verticality*“ palygino klasikinį metodą su antžeminiu lazeriniu skeneriu, siekdami nustatyti dūmtraukio vertikalumą. Autoriai tyrė dūmtraukio ašies posvyrius, naudodami kryptčių (bisektorinį) metodą. Jie naudojo automatinį apskritimo atpažinimą pagal 3 taškus iš taškų „debesio“. Mokslininkai įžvelgė automatinio atpažinimo privalumų (sumažintas žmogiškasis faktorius). Taip pat autoriai nustatė, kad matavimai buvo tikslesni ir greitesni naudojant antžeminį lazerinį skenerį, tačiau nustatė ir trūkumų – duomenų apdorojimas lėtesnis negu naudojant klasikinius metodus.

Vokietijos Dreseno technologijų universiteto mokslininkas D. Schneideris straipsnyje „*Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water dams*“ išnagrinėjo aukštybinių statinių ir vandens užtvankų deformacijų stebėjimo metodus. Straipsnyje aprašomi metodai, kuriais leidžiantis būtų galima naudotis lazeriniais skeneriais. Autorius atliko matavimus naudodamas antžeminį lazerinį skenerį – Riegl LMS-Z420i. Metodai yra paremti matavimais, kurie neapsiriboja vieno taško tikslumu, nes paviršiniai elementai yra sudaryti iš didelio taškų skaičiaus, kurie naudojami deformacijoms analizuoti. Straipsnyje pateiktas praktinis pavyzdys – televizijos bokšto ašinės linijos horizontaliųjų deformacijų nustatymas. Metodika yra

paremta trimačio duomenų modelio suskaidymu į horizontalius pjūvius. Televizijos bokšto modelio pjūvių centro koordinatės buvo lyginamos su pagrindinio, t. y. apatinio pjūvio centro koordinatėmis. Gautos centro koordinatės paklaidos neviršija 13 mm, atliekant matavimus apie 130 m atstumu.

Turkijos Yildiz technikos universiteto mokslininkai M. O. Selbesoglu, T. Bakirman, O. Gokbayrak straipsnyje „*Deformation measurement using terrestrial laser scanner for cultural heritage*“ išmatavo minareto deformacijas naudojant antžeminį lazerinį skenerį. Autoriai, norėdami pasiekti labai didelį tikslumą, minaretą padalino net į 31 sektorių kas 30 cm. Gauti rezultatai rodo, kad deformacijos vertikalioje minareto plokštumoje siekia 40,63 cm.

Dar vieni Turkijos autoriai S. Erol, B. Erol, T. Ayan straipsnyje „*A general review of the deformation monitoring techniques and a case study: analysing deformations using GPS/levelling*“ aprašė deformacijų stebėjimo tyrimus, skirtus įvairiems statiniams, tokiems kaip aukštybiniai statiniai, užtvankos, tiltai, viadukai ir t. t. Autoriai išnagrinėjo statinių deformacijų matavimo prietaisus ir suskirstė į: klasikinius (antžeminiai, tokie kaip niveliavimas, kampų ir atstumo matavimai ir kt.), fotogrametrinius (antžeminiai, aerofotografiniai ir kosminiai vaizdai), palydovinius (GPS, InSAR) ir kai kuriuos specialius metodus.

Lenkų mokslininkas Gocał aprašė metodiką apie horizontaliųjų deformacijų tipus (įlinkis, posvyris, perstūmimas). Taip pat nagrinėjo kokie yra veiksniai, įtakojantys aukštybinių statinių konstrukcijas.

Šveicarų mokslininkas Hans Martin Zogg aprašė antžeminių lazerinių skenerių konstrukcinius elementus bei pagrindinius parametrus. Išnagrinėjo kampų ir tris skirtingus atstumo matavimo metodus: interferometrinį, lazerinio signalo sklaidimo laiko intervalo (*TOF – Time Of Flight*) ir trianguliacinį. Taip pat aprašė antžeminių lazerinių skenerių vystymąsi, bei pateikė antžeminių lazerinių skenerių kalibravimo metodiką.

Slovėnijos Liubianos universiteto mokslininkai K. Kregar, T. Ambrožič, D. Kogoj, R. Vezočnik, A. Marjetič straipsnyje „*Determining the inclination of tall chimneys using the TPS and TLS approach*“ pasiūlė bendresnę ir griežtesnę procedūrą, kuri apima lazerinio skenerio matavimus, ir paaiškino taškų „debesio“ duomenų apdorojimą. Tyrimo metu buvo panaudota dviejų tipų šiuolaikiniai geodeziniai prietaisai: vienas iš tiksliausių elektroninių tacheometrų „*Leica TS30*“ ir antžeminis lazerinis skeneris „*Riegl VZ-400*“. Rezultatų apdorojimas buvo atliekamas su skirtingu skaičiumi taškų. Taškų skaičius, gautas matuojant *Leica TS30* yra apie 320, o „*Riegl VZ-400*“ apie 12000. Dūmtraukių posvyris buvo skaičiuojamas pagal ašinę statinio liniją. Gautos vidutinės kvadratinės klaidos, matuojant elektroniniu tacheometru (1 cm) ir antžeminiu lazeriniu skeneriu (1,2 cm), galima sakyti lygios. Autoriai padarė išvadą, kad lyginat du prietaisus, t. y. dvi skirtingas matavimo technologijas, yra neįmanoma pasakyti galutinį atsakymą, kuris yra geresnis ir

tinkamesnis. Antžeminis lazerinis skeneris yra greitesnis ir juo naudojantis galime gauti daugiau matavimo taškų (tankiau išmatuotas objekto paviršius), tačiau jis yra brangus, o registracijos ir filtravimo procesas yra gana sudėtingas. Kita vertus, elektroninis tacheometras yra palyginti pigus, tačiau greičiu ir taškų skaičiumi negali konkuruoti su lazeriniu skeneriu.

Bukarešto Statybos technikos universiteto mokslininkai C. Coșarcă, A. Jocea ir A. Savu straipsnyje „*Analysis of error sources in Terrestrial Laser Scanning*“ aprašė lazerinio skenavimo klaidų šaltinius. Iš šių testavimo rezultatų paaiškėjo klaidų šaltiniai, kurie gali turėti įtakos matavimams naudojant antžeminius lazerinius skenerius. Klaidų šaltiniai suskirstyti į keturias kategorijas: klaidas, susijusias su nuskaityto objekto forma ir jo charakteristikomis. Taip pat aprašomos aplinkos savybės dėl kurių gaunamos paklaidos, atliekant skenavimą, bei instrumentinės, metodologinės klaidos. Instrumentinės klaidos dar yra skirstomos į grupes: dėl lazerio pluošto pločio, t. y. spindulio pėdsako (*ang. Footprint*) didėjimas dėl spindulio liemens (*ang. Beam Waist*) ir divergencijos kampo; briaunų (ribų) poveikio; atstumo tikslumo; kampinio tikslumo.

Kazachstano mokslininkai M. E. Kuttykadamov, K. B. Rysbekov, I. Milev, K. A. Ystykul, B. K. Bektur straipsnyje „*Geodetic monitoring methods of high-rise constructions deformations with modern technologies application*“ pateikiama aukštybinių statinių ir jų konstrukcijų deformacijų stebėjimas naudojant geodezinių metodus. Autoriai išskyrė keturis matavimo metodus: niveliavimą, GPS ir matavimus naudojant, tacheometrą bei antžeminį lazerinį skenerį. Buvo palyginti prietaisų tikslumai, matavimo greitis, našumas.

1. BENDROSIOS ŽINIOS APIE DEFORMACIJAS IR JŲ STEBĖJIMUS

1.1. Techniniai reikalavimai dūmtraukio horizontaliųjų deformacijų (posvyrio) matavimams ir analizei

Baigiamajame magistro darbe, prieš atliekant tiriamąją dalį, buvo susipažinta su galiojančiu Lietuvos Respublikoje statybos įstatymu, techniniais reikalavimų reglamentais (STR 2.02.02:2004, GKTR 2.11.03:2014) bei taisyklėmis. Paruoštoje dokumentacijoje visi priimti sprendimai garantuoja geodezinių matavimų ir analizės tikslumą, leisiantį užtikrinti statinio mechaninį atsparumą ir pastovumą.

Visuomeninės paskirties statiniai privalo būti suprojektuoti bei pastatyti taip, kad apkrovos, kurios gali statinį veikti statybos ir naudojimo metu, nesukeltų tam tikrų pasekmių:

- viso statinio ar jo dalies griūtis,
- didesnių negu leistinos deformacijos,
- žalos kitoms statinio dalims,
- įrenginiams arba statiniuose arba šalia jų sumontuotai įrangai,
- žalos dėl aplinkybių, kurių be didelių sunkumų ir išlaidų galima jas apriboti arba visiškai išvengti (perkrova, sprogimas, smūgis, žmonių padarytos klaidos).

Saugos ribinė būklė ir tinkamumo ribinė būklė sąlygoja statinio mechaninį atsparumą ir konstrukcijų pastovumą. Įgyvendinant esminį reikalavimą, atsižvelgiama į:

- nuolatinis poveikis (deformacijas, atsiradusias statybos metu, grunto ar skysčių slėgį, gravitacinius ir kitus);
- laikinus poveikis (perdangas, denginį bei kitas statinio dalis, kurias veikia apkrovos, išskyrus vėjo ir sniego, sniego ir ledo apkrovas, vėjo poveikį (dinaminį ir statinį), vandens ir bangų slėgį, šaltį, temperatūros poveikį, silosų ir rezervuarų apkrovas, transporto priemonių poveikį tiltams ir grindiniams, kranų keliamąją galią bei statybos metu atsirandančias apkrovas ir kitus poveikius) (STR 2.02.02:2004).

Jeigu nėra galimybės taikyti skaičiavimo metodų arba abejojama, kad skaičiavimo rezultatų patikimumu, tuomet taikomi bandymo metodai, kurie leidžia užtikrinti, kad su tam tikra išlyga statybos produktų naudojimo savybės atitiktų nurodytąsias techninėse specifikacijose (STR 2.02.02:2004).

Žala statiniams dėl įvykių, kurių pasekmės yra neadekvačios jų sukėlusiai ypatingai priežasčiai, likviduojama arba kiek įmanoma mažinama pasirinkus vieną ar daugiau iš toliau nurodytų priemonių:

- vykdant visas galimas priemones, kurios leistų išvengti konstrukcijos griūtis;

- pasirenkant tokią statinių konstrukcijos formą, kurią mažiausiai veiktų išoriniai poveikiai;
- parenkant tokią adekvataus deformatyvumo konstrukciją, kuri galėtų absorbuoti energiją (STR 2.02.02:2004).

Mechaninio atsparumo ir pastovumo reikalavimas turi būti užtikrinamas visuma priemonių, numatomų pradedant statinių sumanymu, projektavimu, statymu ir baigiant eksploataavimo metu, taip pat statybos naudojimo charakteristikomis, produktų kokybiniais rodikliais ir reikalavimais (STR 2.02.02:2004).

Pagrindinis reikalavimas privalo būti užtikrinamas taikant įvairius projektavimo modelius (jei reikia, atliekant ir papildomus bandymus), įvertinus visus esminius parametrus. Šie modeliai privalo būti parenkami įvertinus konstrukcijų savybes, pastovumą užtikrinančias sąlygas statinio statybos metu, projektavimo leistinus išeities parametrų dydžius ir projektavimo leistinus parametrus, taip pat užtikrinimo naudojimo metu galimybes (STR 2.02.02:2004).

Mechaninis atsparumas ir pastovumas privalo būti užtikrinti su tam tikra išlyga per ekonomiškai pagrįstą statinio eksploataavimo laikotarpį.

Statinio arba jo dalių reikalavimai nustatomi statinio projekto techninėse specifikacijose A kategorijos techninių specifikacijų-statybos techninių reglamentų ir statiniui bei jo dalims skirtų standartų pagrindu, o statybos produktų reikalavimai – statinio projekto techninėse specifikacijose B kategorijos techninių specifikacijų – statybos produktų standartų ir techninių liudijimų pagrindu (STR 2.02.02:2004).

1.2. Statinių deformacijos ir jų atsiradimo priežastys

Statiniai, pastatyti ar statomi ant suspaudžiamų gruntų, nėra stabilūs, todėl kinta jų padėtis erdvėje. Šie pokyčiai vadinami statinių deformacijomis. Statinių deformacijos erdvėje vyrauja dviejų tipų: vertikaliosios ir horizontaliosios. Pokytis horizontalioje plokštumoje vadinamas horizontaliosiomis deformacijomis arba poslinkiu, vertikalioje – vertikaliosiomis deformacijomis arba nuosėdžiu.

Deformacijų priežastys yra skirtingos ir jų specifika priklauso nuo objekto ir jo pamatų, taip pat deformacijos savo pasireiškimo forma yra įvairiapusiškos. Deformacijų vystymasis vyksta daugybės, aplinkos ar technogeninės kilmės, faktorių įtakoje. Konstrukcijų deformacijų priežastimi kai kuriais atvejais būna visi faktoriai, o kituose - svarbiausias faktorius yra tik vienas. Ne visada galima vienareikšmiškai įvertinti konkretaus faktoriaus vaidmenį arba jų sudėtingas tarpusavio sąveikas (Улицкий *et al.* 2006).

Veikiant didelėms apkrovoms į pamatus gruntai ir pagrindai susispaudžia ir dėl to atsiranda pastatų vertikaliosios deformacijos. Jeigu gruntai po pamatais susispaudžia nevienodai, arba apkrova skirtingose pamato vietose ne ta pati, vertikaliosios deformacijos tampa nevienodos ir atsiranda statinių pokrypiai, persisukimai, išlinkimai, persikirtimai ir t. t. Esant ženklioms deformacijoms statiniuose atsiranda plyšiai.

Deformacijų priežastimis gali būti:

- Nevienoda grunto pagrindo geologinė sąranga;
- Molinių gruntų susitraukimą ir brinkimą dėl sezoninių permainų, ar medžius ir krūmus, kurie gali sukelti atitinkamus poslinkius;
- Hidrometeorologinės sąlygos susijusios su gruntinio vandens lygio pokyčiais;
- Grunto pakėlimas (pūtimasis) dėl šalčio įtakos, drėgmės bei grunto atšilimo;
- Slėgio pasikeitimas į gruntą pasikeitus statinio svoriui;
- Netolygus slėgio pasiskirstymas priklausomai nuo statinio svorio po pamatais;
- Grunto iškilimas prieš įrengiant pamatus;
- Pamatų matmenys, kietumas, forma;
- Dinaminės apkrovos į pagrindus;
- Aplink statomų statinių įtaka;
- Iš statinių sklindanti šiluma arba šaltis;
- Grunte, esančių tirpiųjų medžiagų, pvz.: klintis, gipsas, druskos;
- Dėl žmonių įtakos, dirbančių mechanizmų, transporto ir dėl to atsiradusios vibracijos.

Nuo pastatų nuosavo svorio atsiradusios vertikaliosios deformacijos po kurio laiko išnyksta ir be to, kaip taisyklė, esant smėlingiems gruntams, pasireiškia ryškios vertikaliosios deformacijos, kurios greitai stabilizuojasi. Esant molingiems gruntams atvirkščiai, didėjant apkrovai vertikaliosios deformacijos trunka labai ilgą laiko tarpą, kol gruntas po pamatais stabilizuojasi. Jeigu yra durpingi arba silpni gruntai, juos reikia tankinti (Kazakevičius *et al.* 1979).

Vertikaliosios deformacijos gali būti tolygios ir netolygios. Tuo atveju, kai pamatų vertikaliosios deformacijos yra vienodos visose pamato dalyse vadinami tolygiomis vertikaliosiomis deformacijomis, priešingu atveju – netolygiomis vertikaliosiomis deformacijomis. Labai didelę įtaką statinių ilgaamžiškumui turi netolygios vertikaliosios deformacijos, dėl kurių atsiveria plyšiai, o esant tolygioms vertikaliosioms deformacijoms statinių ilgaamžiškumui tai neatsiliepia. Dideli vertikaliosios deformacijos pasireiškia tada, kai sudrėksta ar užliejamas statinio pagrindas požeminiais vandenimis (Kazakevičius *et al.* 1979).

Statinių ir jų pamatų deformacijos charakterizuojamos tokiais parametrais:

- S – absoliučios pamato arba statybos bloko vertikalios deformacijos;

- S_{vid} – vidutinės pamato arba statinio vertikaliosios deformacijos;
- ΔS – vertikaliųjų deformacijų pokytis (pamatų ir pastatų vertikaliųjų deformacijų skirtumas);
- $\Delta S/l$ – netolygios santykinės vertikaliosios deformacijos (pamatų posvyris), t. y. santykis tarp vertikaliųjų deformacijų skirtumo ir tarp taškų esančio atstumo;
- f/l – santykinis įlinkis, t. y. įlinkio dydžio santykis su atstumu, o taip pat horizontaliu statinio poslinkiu – statinio padėties pokyčiu horizontalioje padėtyje.

Leidžiamos ribinės deformacijos turi neviršyti leidžiamų, atitinkamiems statiniams, normų. Leidžiamos ribinės deformacijos priklauso nuo technologinių, architektūrinių ir statinių eksploatacinių parametrų savybių. Statinių vertikaliųjų deformacijų matavimai pradedami pradėjus statinio statybą, t. y. jau tik įrengus pamatus. Statinių deformacijų matavimus reglamentuoja speciali techninė užduotis darbams. Ji sudaroma statiniams, atsižvelgiant į statinio konstrukciją (statybos tipą, dydį, aukštį) bei grunto geologinę sąrangą.

1.3. Aukštybinių statinių deformacijos

Aukštybinių statinių horizontaliųjų deformacijų (nuokrypių nuo vertikalės) stebėjimai yra viena iš pagrindinių užduočių atliekant statybos darbus. Horizontaliųjų deformacijų matavimai atliekami ne tik statybos metu, bet ir eksploatacijos laikotarpiu. Geodeziniai matavimai atliekami periodiškai, priklausomai nuo statinio būklės ir horizontaliųjų deformacijų dydžio. Taip pat gali būti, kad matuojami pastoviai, t. y. atliekamas monitoringas, todėl dėl šios priežasties tinkamiausias metodas turėtų ne tik pasižymėti tikslumu, tačiau ir greitu apdorojimu.

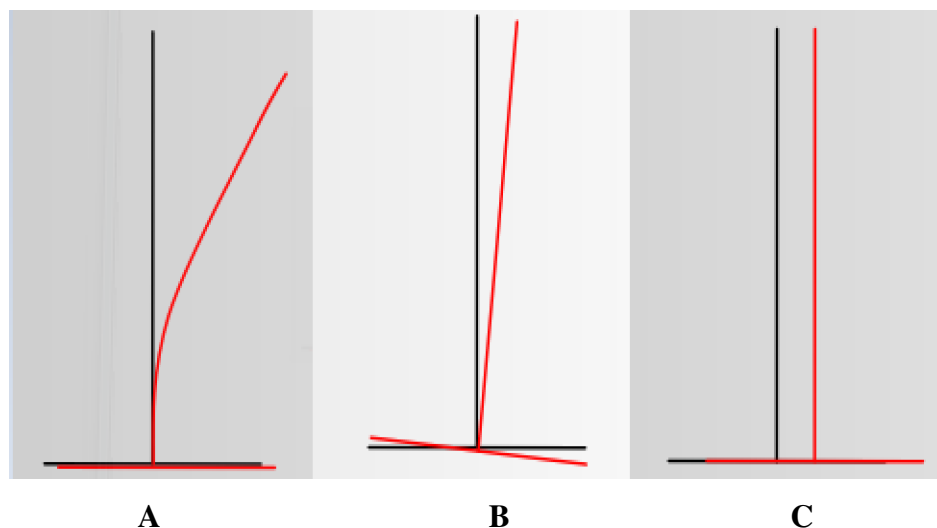
Aukštybiniai bokštiniai statiniai yra vadinami tokie, kurie atitinka sąlygą:

$$\frac{h}{b_{\max}} \geq 5 \quad (1.1)$$

Kur h – statinio aukštis, $b_{\max}$ – statinio didžiausias plotis.

Tokią sąlygą atitinka dūmtraukiai, televizijos bokštai, varpinės ir kiti pramoniniai statiniai (Gocał *et al.* 1980).

Aukštybinių bokštinių statinių horizontaliųjų deformacijų tipai: lenkimas, posvyris, perstūmimas (1.1. pav.).



1.1. pav. Aukštybinių bokštinių statinių horizontaliųjų deformacijos tipai (A – įlinkis, B – posvyris, C – perstūmimas) (Gocał *et al.* 1980)

Aukštybinių statinių konstrukcijos yra veikiamos daugelio veiksnių:

- 1) Mechaniniai veiksniai – statinių svorio įtaka, vėjo poveikis, grunto judesiai, pavyzdžiui, dėl šalčio įtakos, drėgmės bei grunto atšilimo;
- 2) Terminiai – netolygus statinio temperatūros kitimas;
- 3) Fizikiniai-cheminiai – metalo, betono, mūro ar kitų medžiagų irimas chemiškai agresyvioje terpėje (Gocał *et al.* 1980).

1.4. Aukštybinių statinių horizontaliųjų deformacijų nustatymo metodai

Pagrindinė aukštybinių statinių sąlyga ta, kad vertikali teodolito sukimosi ašis sutaptų su vertikalės kryptimi. Matavimai, atliekami klasikiniiais metodais, leidžia nustatyti tikrosios pastato ašies nukrypimą nuo teorinės vertės. Pagrindinis matavimo tikslas yra nustatyti deformacijas įlinkio, posvyrio ar poslinkio formoje. Įlinkis nurodo pačio pastato deformacijas, posvyris – ne vertikalumą lyginant su žemės paviršiumi, o poslinkis – lygiagretus pastato pajudėjimas nuo tikrosios reikšmės (Gocał *et al.* 1994).

Praktiškai, norint nustatyti pastato vertikalumą, naudojami tokie metodai (Erol *et al.* 2004):

- 1) Klasikiniai matavimo metodai (teodolitas, tacheometras);
- 2) GPS;
- 3) Fotogrametrija;
- 4) Lazerinis skenavimas.

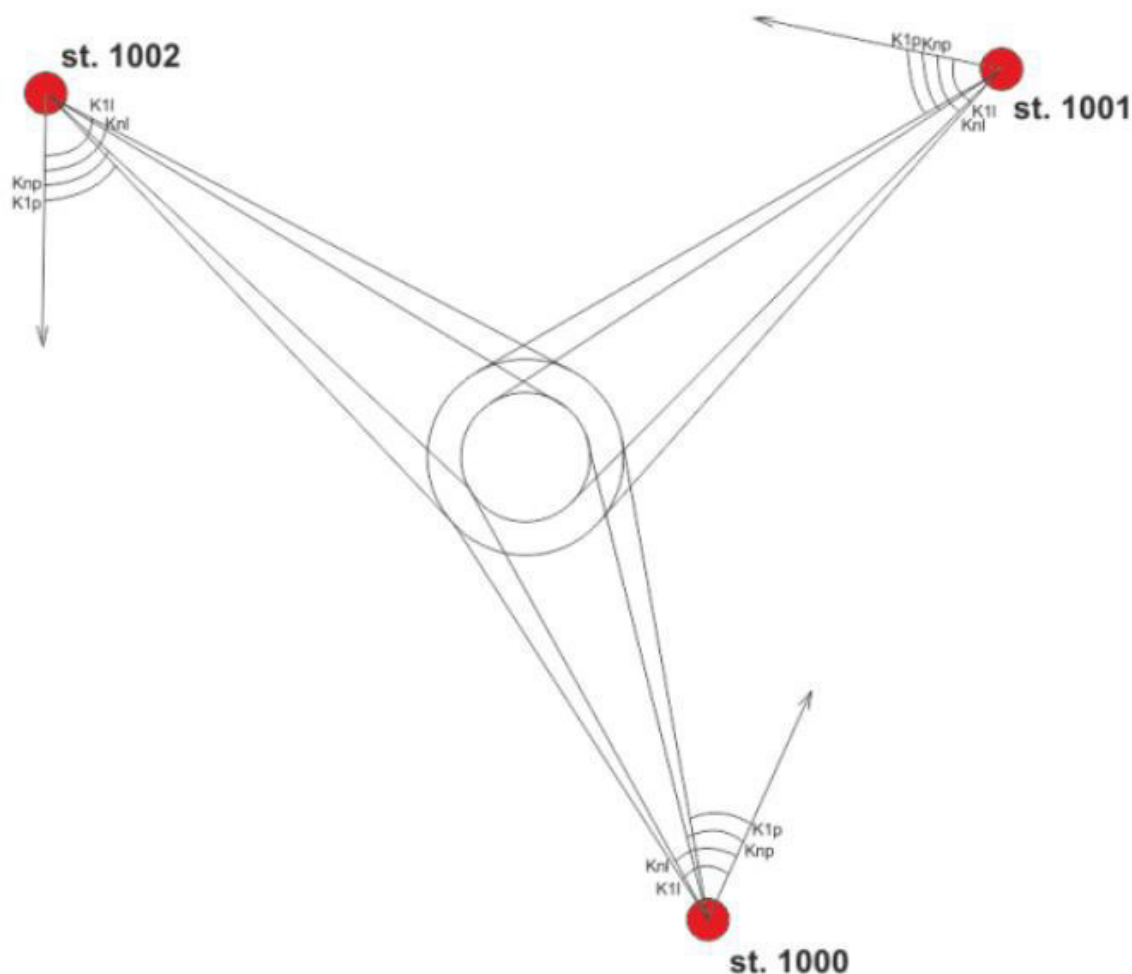
Toliau trumpai aprašomi deformacijų nustatymų matavimo metodai.

1.4.1. Klasikiniai horizontaliųjų deformacijų matavimo metodai

Klasikiniai horizontaliųjų deformacijų matavimo metodai paremti tikslaus atstumo, aukščio ir kampų matavimais. Horizontaliosioms deformacijoms matuoti šiuo metu dažniausiai naudojamas elektroninis tacheometras. Matavimo principas paremtas poliniu matavimo metodu. Elektroniniai tacheometrai matuoja horizontalius ir vertikalius kampus bei atstumus iki tam tikro objekto. Apskritai klasikiniai matavimo metodai pasižymi labai dideliu tikslumu. Atstumus gali išmatuoti milimetrų tikslumu, o kampus iki 1" (priklausomai nuo prietaisų techninių charakteristikų ir pasirinktų matavimo metodų).

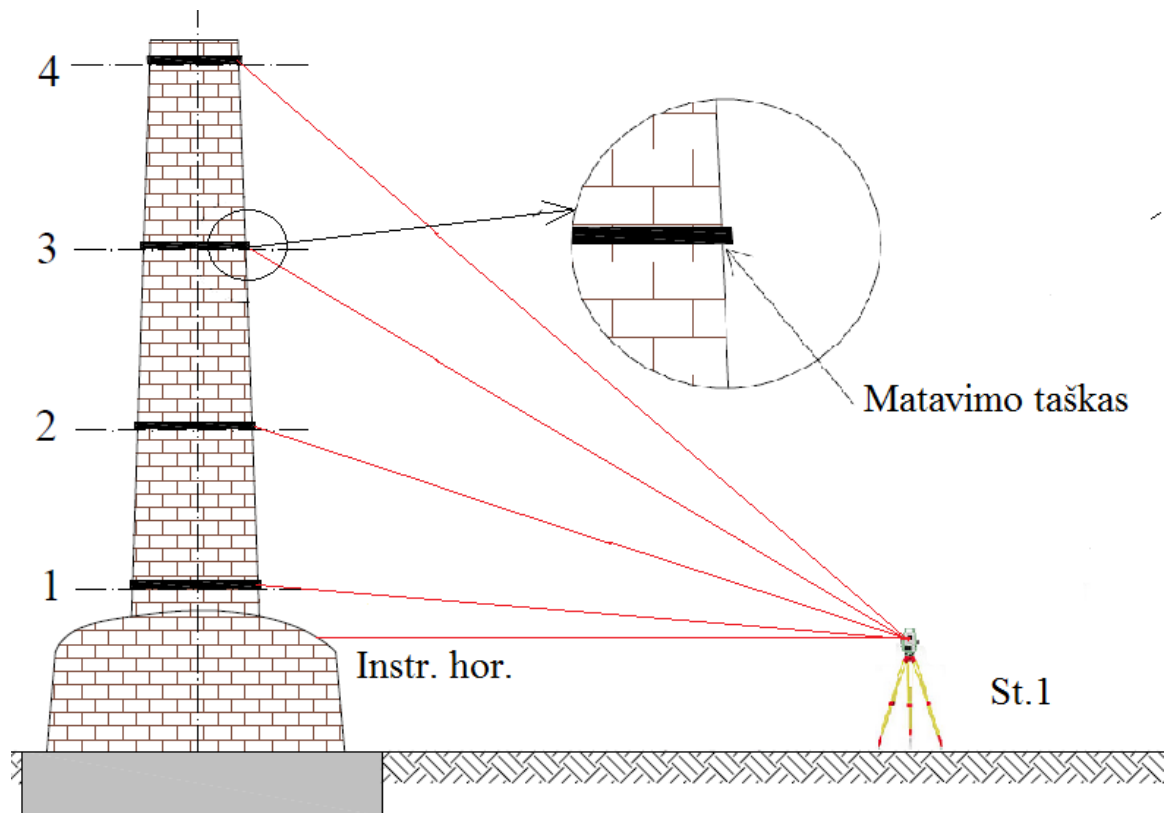
1.4.1.1. Krypčių (bisektorinis sankirtos) metodas

Krypčių (bisektorinis sankirtos) metodas – tai vienas iš populiariausių klasikinių matavimo metodų, naudojamas nustatyti horizontaliąsias deformacijas. Šio metodo esmė yra matuoti kryptis, atitinkančias pastatų paviršių pasirinktuose lygmenyse, iš kiekvienos matavimo stoties (1.2. pav.). (Dumalski *et al.* 2013).



1.2. pav. Matavimų schema bisektoriniu metodu (Dumalski *et al.* 2013)

Labai svarbi šio metodo dalis – nustatyti konkrečius lygmenis skirtingose horizontaliosiose kamino dalyse, kuriose bus atliekami matavimai. Paprastai tokias vietas vaizduojami žiedai ar juostos ant plono pastatų paviršiaus (1.3 pav.). Esminė metodo dalis yra tokia, kad yra daroma prielaida, jog ašis praeina per pastato centrą (Dumalski *et al.* 2013).



1.3 pav. Matavimų sektoriai (Anigacz 2008)

Matavimai susideda iš objekto abiejų krypčių horizontaliųjų kampų nustatymo kiekviename skerspjūvyje (K_L^i ir K_P^i). Tuose pačiuose sektoriuose matavimai atliekami iš trijų matavimo stočių. Rekomenduojama, kad tinklo forma būtų panaši į lygiakraštį trikampį, kurio viduje būtų matuojamasis objektas (1.2 pav.). Matavimai atliekami tuo pačiu principu visuose matavimo sektoriuose (lygmenyse) (Gawałkiewicz *et al.* 2011).

$$K^i = \frac{K_L^i + K_P^i}{2} \quad (1.2)$$

K^i – kryptis į objekto ašį.

Vėliau yra nustatomas skirtumas tarp K^i ir K^l . K^l – parametras, kuris yra apatiniaame sektoriuje, t. y. arčiausiai pastato pagrindo (Gocał *et al.* 1994).

$$\Delta K = K^i - K^l \quad (1.3)$$

Naudojant aukščiau nurodytą skirtumą (1.3), galima apskaičiuoti kamino posvyrio parametrus iš skirtingų matavimo stočių (Dumalski *et al.* 2013):

$$P_i = \frac{\Delta K^i}{\rho} d \quad (1.4)$$

d – atstumas tarp prietaiso ir objekto ašies ($\rho=206265''$). Norint pateikti matavimo rezultatus į vietinę koordinatų sistemą ir apskaičiuoti nuokrypio komponentes, pateikiamos šios formulės (Dumalski *et al.* 2013):

$$R_x = \frac{P_2 \cos \alpha_1 - P_1 \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}, \quad (1.5)$$

$$R_y = \frac{P_2 \sin \alpha_1 - P_1 \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}, \quad (1.6)$$

$$R_x = \frac{P_3 \cos \alpha_2 - P_2 \cos \alpha_3}{\sin(\alpha_3 - \alpha_2)}, \quad (1.7)$$

$$R_y = \frac{P_3 \sin \alpha_2 - P_2 \sin \alpha_3}{\sin(\alpha_3 - \alpha_2)}. \quad (1.8)$$

Kur:

P_1, P_2, P_3 – nuokrypio komponentės iš skirtingų matavimo stočių;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – horizontalūs kampai.

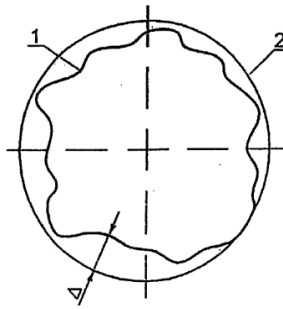
Kadangi matavimai atliekami iš trijų stočių, tai gaunamos kelios to paties pjūvio (horizonto) vertikalės padėties. Gauti rezultatai iš dviejų porų formulių, kad būtų galima padaryti kontrolę tarp matavimų ir skaičiavimų (Dumalski *et al.* 2013). Teoriškai gauti rezultatai turėtų sutapti, tačiau dėl matavimo klaidų, statinio geometrijos netobulumo, vibracijų ir kitų veiksnių gaunami skirtingi rezultatai (Gałda *et al.* 1994). Polinkio vektoriaus reikšmė yra apskaičiuojama pagal formulę:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (1.9)$$

1.4.1.2. Cilindro formos aukštybinių statinių deformacijų nustatymas

Dažniausiai susiduriama su nuokrypių nuo apskritimo problemomis atliekant mechaninių įrangų ar mašinų matavimus. Tokius pačius matavimo metodus galima taikyti ir cilindro formos statinių (bokštų, dūmtraukių, televizijos bokštų ir t. t.) deformacijoms nustatyti. Idealiai pastačius cilindrinį statinį, geometriniai jo centrai turi sutapti su statinio ašimi, o atlikus statinio pjūvį, plokštumą, statmena jo ašiai, turėtų būti gauta apskritimo formos paviršiui.

Pagrindinės formos ir padėties geometrinės sąlygos, būtinos statybinių konstrukcijų montavimo procese, yra tiesumas, plokštumas, atitinkamos linijos bei paviršiaus formos išlaikymas, lygiagretumas, statmenumas, bendra ašis ir kt. Nesilaikant bent vienos iš šių sąlygų, atsiras padėties bei formos nuokrypių, nulemiančių viso statinio deformacijas. Nuokrypiai nuo apskritimo – tai didžiausias atstumas tarp realios padėties ir glaudžiojo apskritimo taškų (1.4 pav.) (Aksamitauskas 2000).



1.4 pav. Nuokrypiai nuo apskritimo:
1-esamas pjūvis, 2 – glaudžiamasis apskritimas (Aksamitauskas 2000)

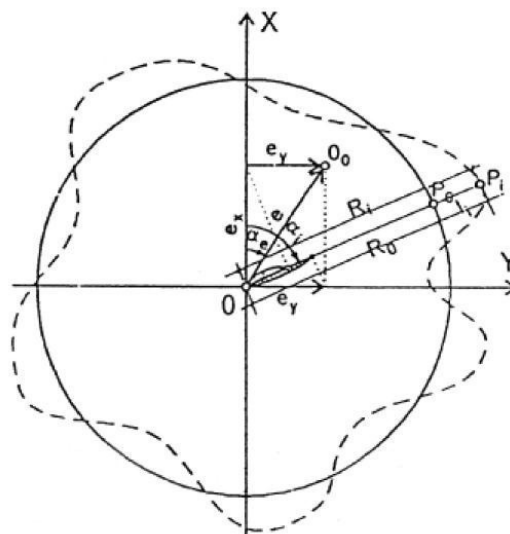
Taikant geodezinius matavimo metodus galima rasti taškų, kurie išsidėstę cilindrinio statinio skerspjūvyje, koordinates. Pagal šių taškų koordinates galima nustatyti tiriamojo ir baziniu laikomo skerspjūvių formas. Bazinio apskritimo nustatymas priklauso nuo profilio nukrypimo nuo apskritimo pobūdžio, tarkime, kai apskritimai yra glaudžiamieji, įbrėžtiniai.

Pasitaikančių žymių nuokrypių nuo projekcinės padėties reikšmėms nustatyti dažnai taikomas optimizavimo metodas. Tarkime, cilindrinės formos statinio darbinis skerspjūvis nužymėtas netaisyklingai ir beformiškai kreivai, jo apytikslis centras yra lygus 0, o projektuojamojo apskritimo centras – taške O^0 (1.5 pav.).

Iš nulinio taško išreiškiamos polinės koordinatės: α_i , R_i punktų P_i ($i = 1, 2, \dots, n$) darbinių skerspjūvių. Kiekvieną punktą P_i atitinka projektinis punktą P_o , esantis projekciniame skerspjūvyje. Uždaviniui išspręsti sudaromos pataisų lygtys. Pataisos yra:

$$\cos \alpha_i \cdot e_x + \sin \alpha_i \cdot e_y + l_i = V_i \quad (1.10)$$

čia: $e_x = e \cos \alpha_e$, $e_y = e \sin \alpha_e$, $l_i = R_o - R_i$, e_x , e_y – statinio skerspjūvio centro nuokrypis nuo projekcinės padėties; $e = 00^\circ$ (0 – esamas statinio skerspjūvio centras), 0° – projektinis statinio centras, L_i – laisvasis narys; R_o – projektinis apskritimo spindulys; α_e – nuokrypio orientavimo kampas (Aksamitauskas 2000).



1.5 pav. Esamo skerspjūvio taškų padėties nustatymas apskritimo atžvilgiu (Aksamitauskas 2000)

Sudarius pataisų lygtis ir jas pertvarkius į normalines lygtis ir išsprendus, gaunami dydžiai e_x , e_y . Kryptinis kampas ir apytikslinis linijinis dydis yra apskaičiuojamas iš formulių:

$$\alpha_e = \arctg \frac{e_y}{e_x} \quad (1.11)$$

$$e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} = \frac{e_y}{\sin \alpha_e} = \frac{e_x}{\cos \alpha_e} \quad (1.12)$$

čia: e_x , e_y – nuokrypių projekcijos į koordinačių ašis; e – darbinio kontūro nuokrypio atstojamoji, α_e – darbinio kontūro nuokrypio kampas.

Po to galima apskaičiuoti pataisų dydžius, reikalingus darbinio kontūro statiniui užtvirtinti projektinėje padėtyje.

Bazinių apskritimų metodas yra patogus nužymėti apskritimams, nes galima naudotis įbrėžtiniu, apibrėžtiniu ir vidutiniu apskritimais. Tai priklauso nuo deformacijos pobūdžio (rūšies, formos) (Aksamitauskas 2000).

1.4.2. GPS horizontalių deformacijų matavimo metodas

Iki pat 1980-ųjų pradžios inžinerinių statinių deformacijos buvo nustatytos tik naudojant įprastus klasikinius geodezinius matavimo metodus. Po to, pradėdant naudoti GPS matavimo techniką geodezijos srityje, ši labai tiksli padėties nustatymo palydovinė sistema pradėta naudoti ir deformacijų matavimuose (Erol 1999). Globalios padėties nustatymo sistema suteikia pranašumą prieš įprastus antžeminius geodezinius metodus. Matomumas tarp stočių nėra būtina reikalingas, todėl stočių vietos pasirinkimas yra daug lankstesnis lyginant su įprastais antžemniais metodais. Matavimai gali vykti bet kuriuo laiko tarpu, nepriklausomai dieną ar naktį, ir bet kokiomis oro sąlygomis (Anonym 2002).

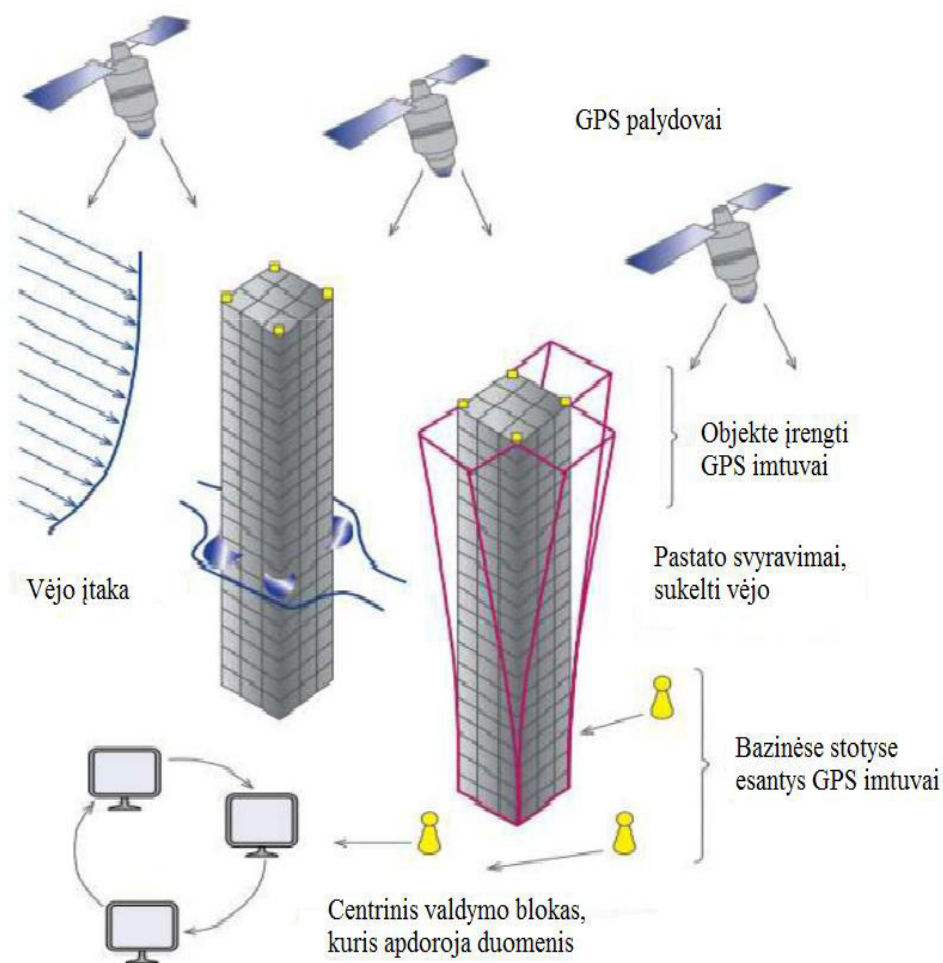
Naudojant GPS metodą galima realiu laiku, su dideliu tikslumu nustatyti 3D poziciją. Vis dėlto, naudojant šį metodą yra vertikalios padėties nustatymo problemų. Aukštis yra mažiausiai tiksliai nustatomas, lyginant su X ir Y koordinatėmis, dėl daugiausiai būdingo geometrinio trūkumo ir atmosferos paklaidų (Featherstone *et al.* 1998: 278–296; Çelik *et al.* 2001).

Todėl, naudojant GPS matavimo metodą deformacijų matavimams su milimetrinio dydžio tikslumu, reikia imtis tam tikrų specialių priemonių, kurios padidintų matavimo tikslumą, šalinant arba mažinant klaidų šaltinius. Pavyzdžiui, naudojant priverstinio centravimo įrangą, taikant specialias matavimo metodikas, tokias kaip greitas statinis (*Rapid Static*) matavimo metodas, arba įmontuota specialia įranga, kuri tiksliai nustatytų antenos aukštį (Erol, Ayan 2003).

Kai kuriais atvejais, net šios priemonės gali būti nepakankamos, norint pasiekti reikiamą tikslumo lygį. Patartina, atliekant matavimus, naudoti skirtingus metodus, kad gautus rezultatus būtų galima palyginti (Erol, 2004).

Taigi, aukštybinių statinių horizontaliosios deformacijos gali būti nustatomos GPS metodu. Matavimai turėtų būti atliekami naudojant dvi grupes imtuvų: vieni nustatytiuose objekte įrengtuose taškuose, o kiti taškuose su žinomomis koordinatėmis (bazinėse stotyse). Dviejų grupių imtuvai leidžia nustatyti ne tik absoliutines objekto koordinates, bet ir jų poziciją į norimą koordinatinių sistemą pagal žinomas koordinates. Pažymima, kad matavimų tikslumas siekia milimetrinį tikslumą (Kuttykadamov *et al.* 2016).

Atsižvelgiant į tai, GPS sistemos gali būti veiksminga priemonė dinaminių rodiklių nustatymui, nustatant aukštų pastatų svyravimus, pavyzdžiui, nuo vėjo poveikio. Principinė horizontaliųjų deformacijų matavimo schema pavaizduota 1.6 paveiksle (Kuttykadamov *et al.* 2016).



1.6 pav. Principinė horizontaliųjų deformacijų matavimo (Kuttykadamov *et al.* 2016)

1.4.3. Fotogrametrijos metodai matuojant horizontaliąsias deformacijas

Fotogrametrija yra menas, mokslas ir technologija, leidžianti gauti patikimą informaciją apie fizinius objektus ir aplinką per įrašymo, matavimo ir interpretavimo procesus, naudojantis fotografuojamų spinduliuojančių elektromagnetinių energijos ir kitų reiškinių fotografijų vaizdus ir modelius (Wolf and Dewitt, 2000; McGlone, 2004). Kitaip sakant tai mokslo šaka, nagrinėjanti objektų padėties, dydžio ir formos nustatymo metodus iš vienos ar daugiau fotografijų (Luhmann 2003). Fotogrametrija yra beveik tokia pat sena, kaip ir fotografija. Maždaug prieš 150 metų pradėti taikyti fotogrametriniai metodai. Galiausiai tobulėjant kompiuterinei technikai, fotogrametrija tapo skaitmenine, pagrįsta skaitmeninėmis fotonuotrukėmis (Aber *et al.* 2010). Skaitmeninė fotogrametrija sudaryta iš: antžeminių, aerofotografinių ir kosminių vaizdų (fotonuotraukų) (Draganova *et al.* 2004).

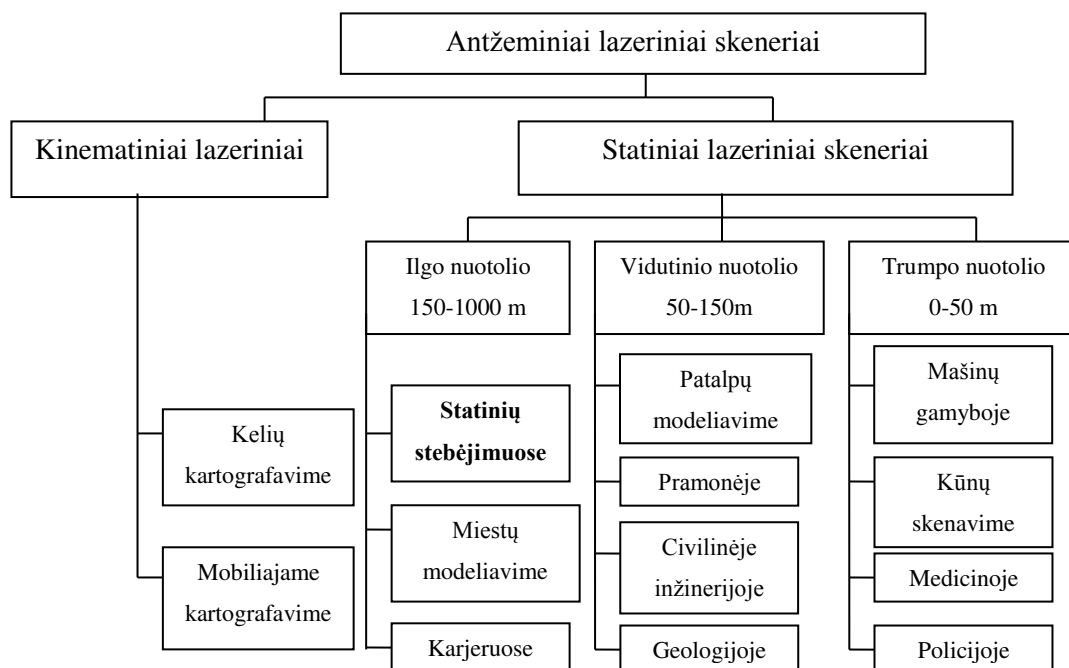
Aerofotografiniai ir kosminiai vaizdai yra vieni iš pagrindinių ir svarbiausių informacijos apie Žemės paviršių ir jame esančių objektų rinkimo priemonių. Tai kartografavimo ir objektų aprašymo bei įvertinimo metodų techninis pagrindas. Be jų dabar neįmanoma padaryti topografinės Žemės paviršiaus nuotraukos, sudaryti topografinius bei teminius žemėlapius, atlikti miškotvarkos bei žemėtvarkos darbus (Gudritienė ir Aleknavičius 2007).

Antžeminis metodas dažniausiai naudojamas deformacijoms tirti. Deformacijų tyrimas reikalauja kokybiškos įrangos, kuri pasižymėtų dideliu tikslumu, skiriamąja geba, greitu apdorojimu ir t. t. (Armer 2001).

Taigi fotogrametrija yra netiesioginis matavimo metodas. Matavimo jutiklis – fotoaparatas, kuris yra pasyvus jutiklis. Antžeminio matavimo metodu matavimo diapazonas svyruoja nuo kelių centimetrų iki kelių šimtų metrų. Matavimo tikslumas gali skirtis nuo milimetrų iki kelių decimetrų, priklausomai nuo taikymo (Zogg 2008).

1.4.4. Lazerinis skenavimas matuojant horizontaliąsias deformacijas

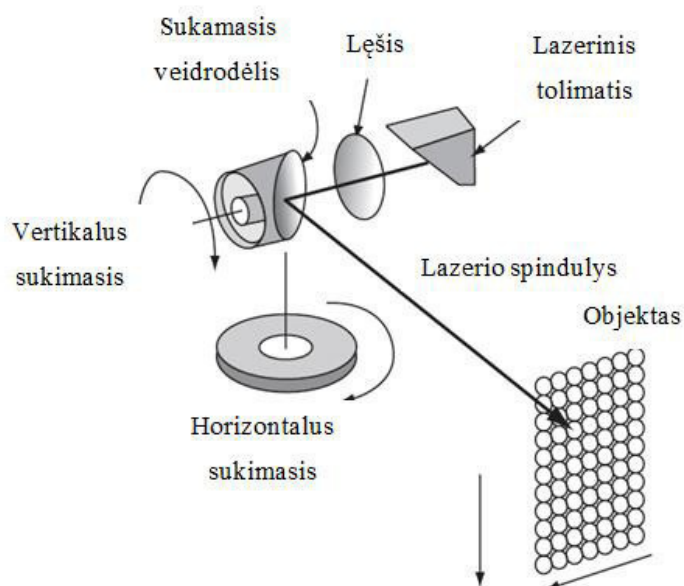
Antžeminiai lazeriniai skeneriai pasaulyje yra skirstomi į kinematinčius (dinaminius) ir statinius. Statinių stebėjimai atliekami statiniu lazeriniu skenavimu. Antžeminių lazerinių skenerių pritaikymo galimybės pateiktos 1.7 paveiksle.



1.7 pav. Antžeminių lazerinių skenerių tipai ir jų pritaikymo galimybės (Ingensand 2006)

Kinematinių skenerių matavimo technologija suteikia galimybę matuoti judant. Dažniausiai tokia technologija taikoma, kai prietaisas montuojamas ant transporto priemonės, su kuria judėdami, matuojame aplinkui esančius objektus (Glennie 2007).

Statiniai antžeminiai lazeriniai skeneriai yra statomi pasirinktoje vietoje, kurioje matuojama pastovi statiška padėtis aplink instrumentą. Matavimai atliekami su tolimačiu ir dviejų kampinių dydžių skaitytuvais (1.8 pav.). Matuojant yra parenkami kampinio žingsnio dydžiai, tokiu būdu antžeminis lazerinis skeneris tam tikru tankumu, priklausomai nuo atstumo, užpildo erdvę aplink instrumentą taškais (Petrie and Toth 2008).



1.8 pav. Antžeminio lazerinio skenerio sudedamųjų dalių veikimo schema (Petrie and Toth 2008)

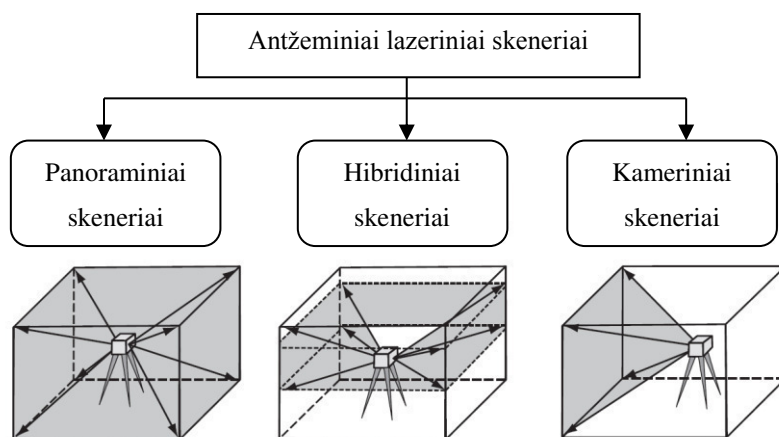
Statiniai antžeminiai lazeriniai skeneriai yra skirstomi pagal matuojamo objekto nuotolį, matymo lauką, atstumo matavimo būdą ir lazerio krypties keitimo būdą. Yra trys pagrindinės skenerių rūšys: trumpo, vidutinio ir ilgo nuotolio skeneriai. Trumpo nuotolio antžeminiai lazeriniai skeneriai yra tokie, kurie matuoja iki 50–60 metrų atstumą, jie dažniausiai būna faziniai. Vidutinio nuotolio antžeminiai lazeriniai skeneriai matuoja, geriausiai, nuo 150 iki 350 metrų atstumą lazerio signalo sklaidimo laiko intervalo matavimo principu. Ilgo nuotolio skeneriai taiko taip pat lazerio signalo sklaidimo laiko intervalo matavimo principą ir matuoja apie 1000 metrų atstumu (Petrie, Toth 2008).

Pagal matymo lauką antžeminiai lazeriniai skeneriai skirstomi į: panoraminius, hibridinius, kamerinius (1.9 pav.).

1. **Panoraminiai skeneriai** horizontalioje plokštumoje gali matuoti aplink savo vertikalią ašį 360° , o vertikalioje plokštumoje – iki 320° . Panoraminiai skeneriai plačiai taikomi atliekant matavimus architektūriniuose objektuose, karjeruose, šachtose ir panašiai.

2. **Hibridiniai skeneriai** gali išmatuoti aplink esančius objektus 360° kampu, tačiau vertikalios kampo matymo laukas yra ribotas ir siekia iki 50° – 60° . Šie skeneriai gali būti panaudoti topografinių žemėlapių sudaryme, kur nėra svarbu kurią objekto vietą pamatuoti, nes jis vis tiek atvaizduojamas horizontalioje plokštumoje arba kitaip sakant projekcijoje, pvz.: pastato kontūrą galime išmatuoti tam tikrame aukštyje, o ne visą pastatą.

3. **Kameriniai skeneriai** turi pranašumą – gali skenuoti iš labai toli. Tačiau jų matymo laukas tik apie $40^\circ \times 40^\circ$. Tokių skenerių pritaikymas ypač efektyvus kalnuotose vietovėse (Petrie, Toth 2008).



1.9 pav. Antžeminių lazerinių skenerių tipai pagal matymo lauką (Petrie and Toth 2008)

Statinių ir pastatų deformacijos gali būti matuojamas lazerinio skenavimo metodu. Taip pat, gali būti atliktas žemės paviršiaus skenavimas, pavyzdžiui, Gedimino pilies kalno nuošliaužoms stebėti.

Lazerinio skenavimo technologijos esmė – objekto erdvinių koordinačių nustatymas. Statinių deformacijų stebėjimams atlikti dažniausiai naudojami antžeminiai lazeriniai skeneriai. Pirmiausiai matavimams atlikti yra parenkamas stočių skaičius ir jų išdėstymas. Skenavimo stotys turi būti išdėstytos taip, kad nuskenuotame vaizde nebūtų šešėlių. Taip pat labai svarbu parinkti optimalų atstumą iki skenuojamojo objekto. Skenavimo tikslumas kinta pagal atitinkamas funkcijas nuo atstumo iki skenuojamojo objekto (Schulz 2007).

Kitas svarbus etapas tai taikinių padėčių pasirinkimas. Taikinius reikia išdėstyti taip, kad mažiausiai du tie patys taikiniai matytųsi iš dviejų gretimų skenavimo stočių. Be to, taikinius reikia išdėlioti vienodai tankiai po visą matavimo darbų zoną. Skenuojant objektą sukuriamas trijų dimensių taškų visumos modelis (taškų „debesis“). Taškų tankis labai didelis – iki keleto, keliolikos ar kelių dešimčių taškų viename kvadratiname paviršiaus metre. Paprastai taškų kiekis taškų „debesyje“ gali būti nuo kelių šimtų tūkstančių iki kelių milijonų.

Dažnai susiduriama su duomenų apdorojimu problemomis, nes reikia dirbti su ypatingai dideliu duomenų kiekiu ir trimačio modeliavimo funkcijomis. Specializuotos programos gali vykdyti ir kitas funkcijas dirbant su taškų „debesimis“, matuojant ir filtruojant duomenis pagal jų kvalifikavimą (pastatų sienos, stogas ir panašiai).

Iš kiekvienos stebėjimo stoties gauti taškų „debesys“ sujungiami į vieną visumą specialiame programiniame modulyje. Kad būtų įmanomas toks sujungimas, privaloma gauti taškų „debesis“ su tarpusavio persidengiančiomis zonomis. Sujungti matavimo duomenis yra naudojami taikiniai arba išraiškingos statinių vietos.

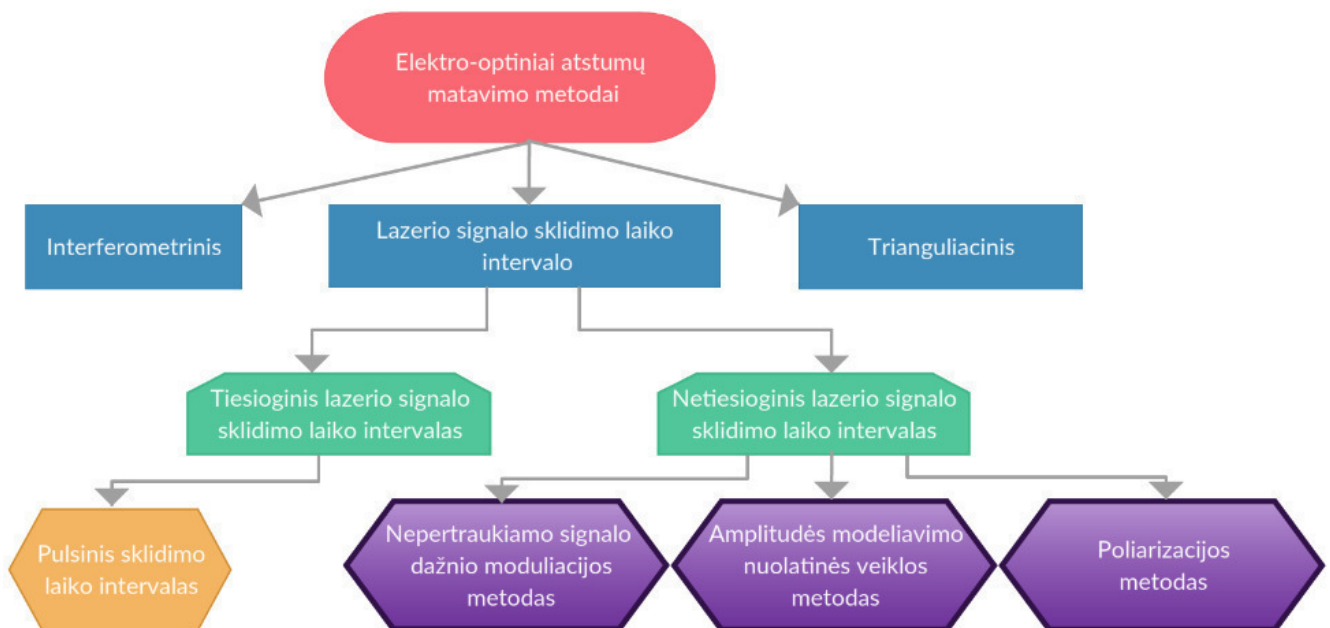
Palyginus ankstesnius matavimus duomenis galima nustatyti statinių deformacijas.

2. MATAVIMO PRIETAISŲ KONSTRUKCINIAI ELEMENTAI IR PAGRINDINIAI PARAMETRAI

2.1. Atstumo matavimo metodai

Antžeminiai lazeriniai skeneriai matuoja horizontalius ir vertikalius kampus tuo pačiu metodu, tačiau atstumus matuoja skirtingais metodais. Yra trys pagrindiniai elektro-optiniai matavimo principai (2.1 pav.), pagal kuriuos nustatomi atstumai, tarp matavimo prietaiso spindulio šaltinio ir objekto:

- interferometrinis,
- lazerinio signalo sklaidimo laiko intervalo (*TOF – Time Of Flight*);
- trianguliacinis (Zogg 2008).



2.1 pav. Elektro-optiniai atstumo matavimo metodai (Zogg 2008)

Dažniausiai naudojamas atstumo matavimo metodas, paremtas lazerio signalo sklaidimo laiko intervalo matavimu: tiesioginiu ir netiesioginiu lazerio signalo sklaidimo laiko intervalu.

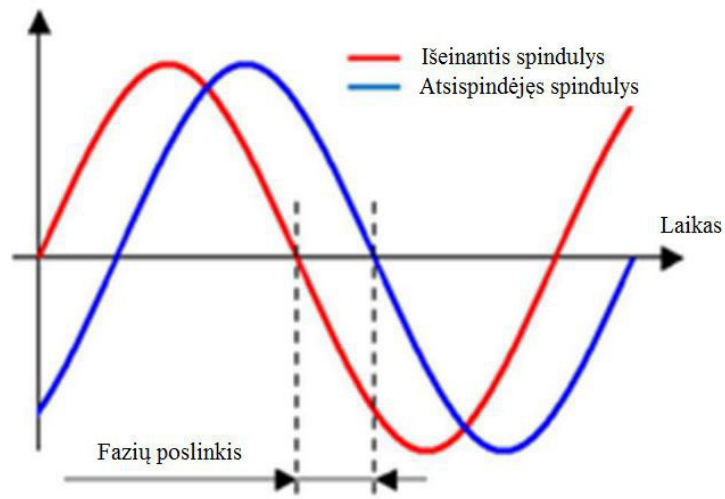
Tiesioginis metodas, pagrįstas pulsinio sklaidimo laiko intervalo nustatymu, t. y. naudojamas laiko skaitytuvas, kuris nustato laiko tarpą nuo impulso išsiuntimo iš jutiklio iki objekto, nuo kurio impulsas atsimuša nuo kliūties ir grįžta atgal (Kankare et al. 2015: 1839–1857).

Kadangi yra žinomas šviesos greitis, galime apskaičiuoti atstumą (Серебовиц et al. 2009):

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (2.1)$$

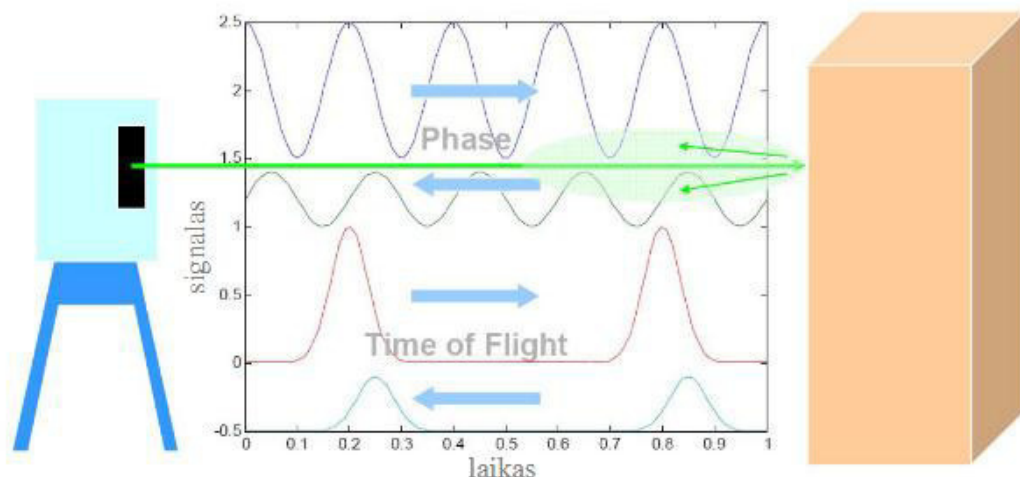
Čia: d – atstumas, c – šviesos greitis, $c=2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$, t – nuo impulso išsiuntimo iš jutiklio iki objekto, nuo kurio impulsas atsimuša nuo kliūties ir grįžta atgal.

Netiesioginis metodas, pagrįstas fazių poslinkio nustatymu. Fazinio poslinkio matavimai naudoja nuolatinį fazės moduluotą impulsą ir matuoja grįžtančio impulso fazę (2.2 pav.) (Kankare 2015: 1839–1857).



2.2 pav. Fazių poslinkis (http://www.bom.gov.au/australia/radar/about/phase_changes.shtml)

Dažniausiai naudojami metodai (2.3 pav.) - tiesioginio lazerio signalo sklaidimo laiko intervalo (*pulsed time-of-flight*) ir amplitudės modeliavimo nuolatinės veiklos (*AMCW – modulated continuous wave method*) metodas. Nepertraukiamo signalo dažnio moduliacijos (*FMCW – frequency-modulated continuous wave method*) ir poliarizacijos metodas retai taikomi antžeminiuose lazeriniuose skeneriuose (Zogg 2008).



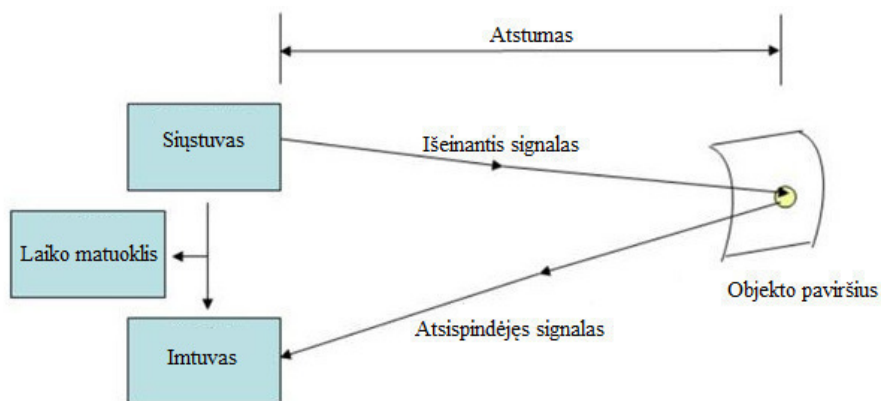
2.3 pav. Atstumo matavimo veikimo principai fazinių ir lazerio signalo sklaidimo laiko intervalo (Hiremagalur *et al.* 2007)

2.1.1. Tiesioginio lazerio signalo sklaidimas

Atstumų matavimas yra paremtas laiko intervalo, per kurį lazerio signalas sklinda nuo emiterio iki objekto ir grįžta į imtuvą, nustatymu. Atstumas apskaičiuojamas pagal formulę (2.2).

$$\Delta d = \frac{1}{2} \cdot c \Delta t \quad (2.2)$$

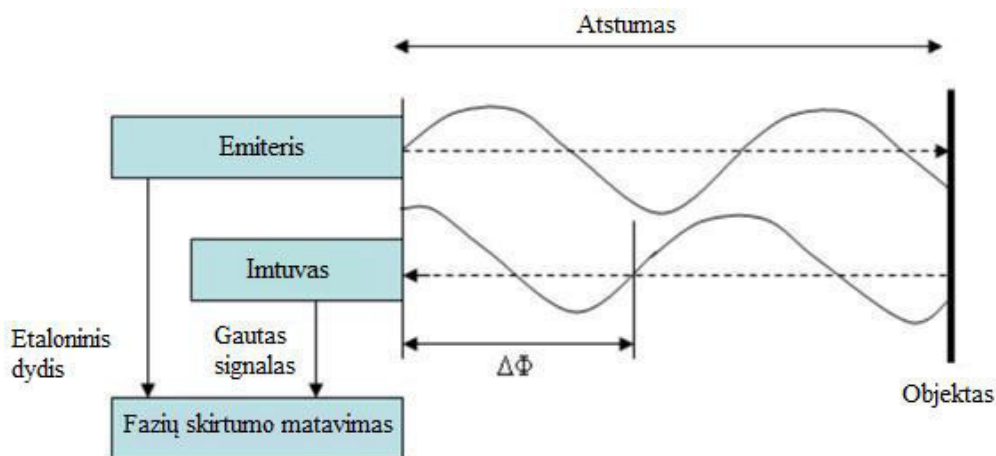
Tiesioginio lazerio signalo sklaidimo metodu išmatuotas atstumas Δd priklauso nuo laiko intervalo (Šlikas 2013). Norint išmatuoti atstumą milimetrų tikslumu, reikalingas preciziško tikslumo laiko matuoklis, kuris atskaitytų laiko intervalą pikometrų tikslumu. Tiesioginio lazerio signalo sklaidimo metodo principinė schema (2.4 pav.).



2.4 pav. Tiesioginio lazerio signalo sklaidimo metodo principinė schema (János 2008)

2.1.2. Amplitudės modeliavimo (fazių skirtumų) metodas

Taikant nenutrūkstamos bangos amplitudės moduliacijos (arba fazės skirtumų) metodą, kai nustatomas fazių skirtumas tarp išsiunčiamos ir grįžtančios bangų (2.5 pav.) (Skeivalas 2004, 2010).



2.5 pav. Amplitudės modeliavimo (fazių skirtumų) metodo principinė schema (János 2008)

Moduliuotojo, pavyzdžiui, sinusoidinio ar stačiakampio formos lazerio signalo sklidimo laiko intervalas t yra tiesiogiai proporcingas fazių skirtumui φ tarp išsiųsto ir gauto signalo (Zogg 2008). Atstumas yra apskaičiuojamas pagal formulę (2.3):

$$d = \frac{c}{2} \cdot \frac{\varphi}{\omega} = \frac{c}{2} \cdot \frac{\varphi}{2\pi} T \quad (2.3)$$

Čia: d – atstumas tarp emiterio ir objekto,

T – laiko intervalas,

c – vidutinis šviesos greitis,

φ – fazių skirtumas tarp išsiųsto ir gauto signalo (Zogg 2008).

Atstumas apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę yra naudojamas, kai atstumas mažesnis už pusę moduliuotojo signalo bangos ilgio. Absoliutūs intervalai apskaičiuojami pagal formulę (Zogg 2008):

$$s = \frac{1}{2} \left(N \cdot \lambda + \lambda \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \quad (2.4)$$

$$\lambda = c \cdot T \quad (2.5)$$

Čia N – bangų skaičius.

Fazės skirtumų metodu išmatuotų atstumų matavimo tikslumas yra apskaičiuojamas (Goor 2011):

$$\sigma_{Phase}^2 = \left(\frac{c}{2\omega} \right)^2 \cdot \sigma_{\varphi}^2 \quad (2.6)$$

Kaip matoma iš 2.6 formulės, atstumų matavimo tikslumas priklauso nuo fazių skirtumo matavimo tikslumo, jeigu c ir ω yra konstantos. Kuo mažesnis kampinis dažnis ω , tuo didesnis tikslumas. Todėl galima daryti išvadą, kad signalas su didesniu dažniu lemia geresnį atstumų matavimo tikslumą (Goor 2011).

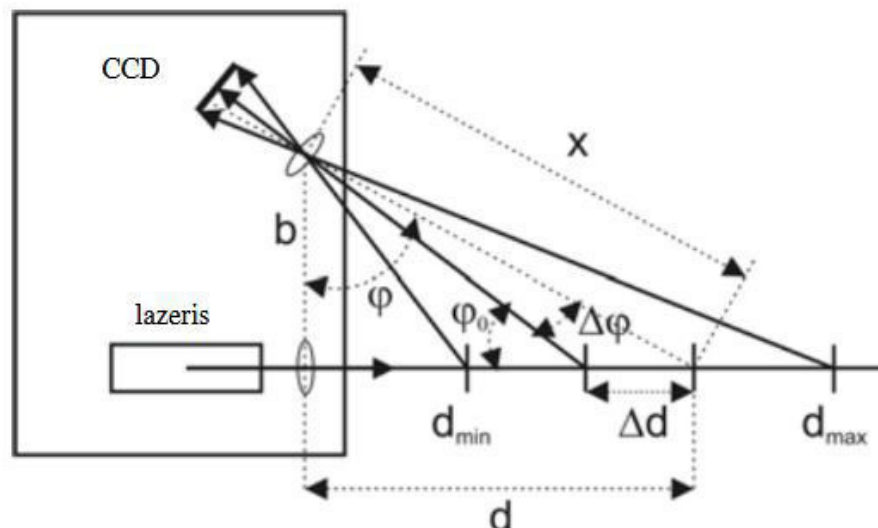
Matavimo tikslumas, gautas matuojant tiesioginio lazerio signalo sklidimo ar fazės skirtumo metodais, yra panašus, tačiau matavimo dažnis skiriasi. Naudojant tiesioginio lazerio signalo sklidimo metodą, impulsas gali būti paleidžiamas tik tada, kai grįžta ankstesnis signalas. Fazių skirtumu veikiančiomis sistemomis matavimai atliekami nuolat, todėl didesnis matavimo dažnis negu naudojant tiesioginio lazerio signalo sklidimo metodą. Pavyzdžiui, gali būti dešimt kartų didesnis matavimo dažnis negu tiesioginio lazerio signalo sklidimo (TOF) metodą naudojančios sistemos (Goor 2011).

Tai lemia, kad fazių skirtumų metodu galima gauti iki 1 000 000 taškų per sekundę, o TOF – iki 50 000 taškų per sekundę. Vis dėlto, TOF metodu yra matuojami objektai, nutolę didesniu

atstumu. Matuojamas maksimalus atstumas iki 1000 m. Atsižvelgiant į tyrimo tikslus, gali būti pasirenkamas tinkamiausiu matavimo metodu veikiantis lazerinis skeneris (Goor 2011).

2.1.3. Trianguliacija

Atstumų matavimas, pagal trianguliacijos principą, yra grindžiamas santykiais tarp trikampio žinomų ir nežinomų parametrų reikšmių. Taip pat trianguliacijos principą galime išskirti į pasyvią ir aktyvią. Pasyvi trianguliacija yra gerai žinoma iš geodezinių matavimų elektroniniais tacheometrais (Zogg 2008). O aktyvioje trianguliacijoje vienas daviklis yra šviesos šaltinis, o kitas – CCD jutiklis. Trianguliacija susidaro paleidus iš šviesos šaltinio lazerio spindulį, kuris atsimaša į objektą ir atsispindi į imtuvo CCD jutiklį. 3.4 paveiksle pavaizduota aktyvios trianguliacijos principinė schema. Minimalūs ir maksimalūs atstumai (d_{min} ir d_{max}), kuriuos reikia išmatuoti, priklauso nuo CCD jutiklio įlinkio φ_0 ir pagrindo ilgio b (Balthasar, Hummel 2008; Donges, Noll 1993).



2.6 pav. Trianguliacijos metodo principas (Zogg, 2008)

Atstumų skirtumas Δd gali būti apskaičiuotas pagal formulę:

$$\Delta d = b \cdot \frac{1}{\cos^2(\varphi)} \cdot \Delta \varphi = \frac{b^2 + d^2}{b} \cdot \Delta \varphi \cdot t = \frac{\varphi}{\omega} \quad (2.7)$$

Taigi, galime daryti išvadą, kad atstumų skirtumai Δd netiesiškai priklauso nuo atspindžio kampo. Tačiau, lazerinis skeneris matuojantis pagal trianguliacijos principą, paprastai naudoja visą lazerio liniją, vietoj vieno lazerio taško (Zogg, 2008).

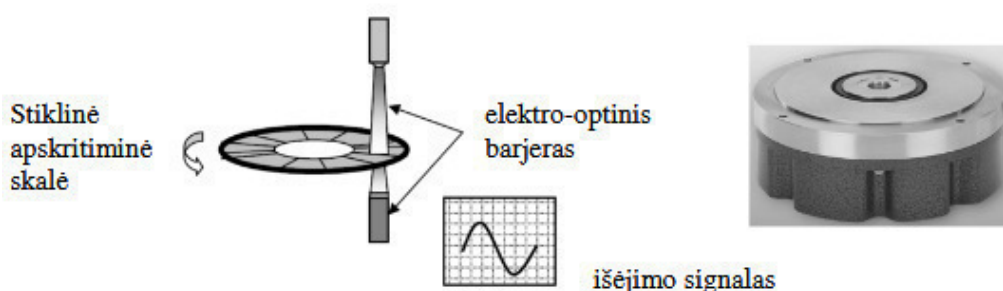
Apskritai trianguliacijos principai yra naudojami pramonėje, o ne inžinerinėje geodezijoje. Šis metodas yra tikslus, juo galima pasiekti milimetrinį tikslumą. Lazeriniai skeneriai, naudojantys trianguliacijos principą, yra dažnai naudojami kartu su matavimo atramomis (*angl. measurement arms*) (3.5 pav.) (Faro 2018) arba bėgiais (Steinbichler 2008).



2.7 pav. Matavimo atrama (*angl. measurement arm*) (Faro 2018)

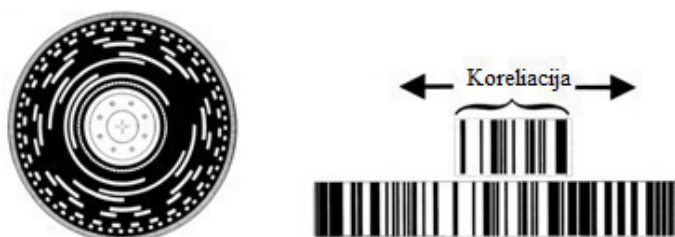
2.2. Kampų matavimo metodai

Antžeminiais lazeriniais skeneriais matuojami horizontalūs ir vertikalūs kampai, naudojantis elektrooptiniais įrenginiais. Elektrooptinis matavimo metodas paremtas skleidžiama ir atsispindinčia lazerio šviesa. Daugeliuose antžeminiuose lazeriniuose skeneriuose yra taikoma dvejetainis kodavimas, nes skiriamoji geba yra pakankamai aukšta (2.8 pav.) (Schulz 2007).



2.8 pav. Stiklinė apskritiminė skalė, elektro-optinis barjeras ir išėjimo signalas bei kampo keitiklis (Schulz 2007)

Dvejetainio kodavimo metodas taip pat yra vadinamas, kaip binarinis (absoliutus) metodas, nes atskaitos bazė yra fiziškai pažymėta ant stiklinio skritulio (2.9 pav.). Šviesa iš šviesos šaltinio eina per stiklinį skritulį, kuris yra sužymėtas su gradacijos skaičiaus dvejetainiais kodais. Tam tikra kampo reikšmė atitinka dvejetainį kodą, kurie yra paženklinėti skaidriais arba nepermatomais elementais (Schulz 2007).

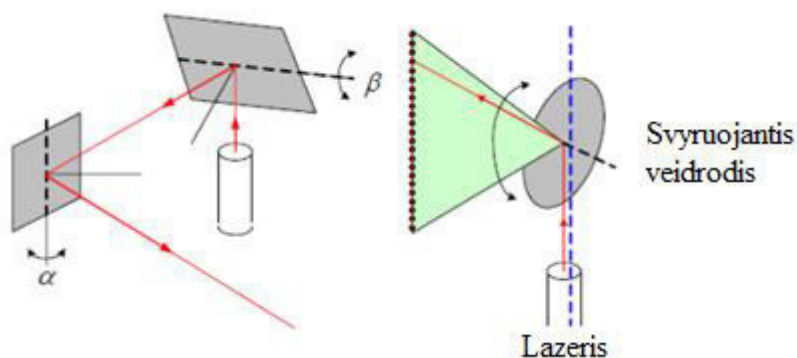


2.9 pav. Binariniu (absoliutiniu) metodu naudojamas skritulis ir kodas (Schulz 2007)

2.3. Lazerio krypties keitimo būdai

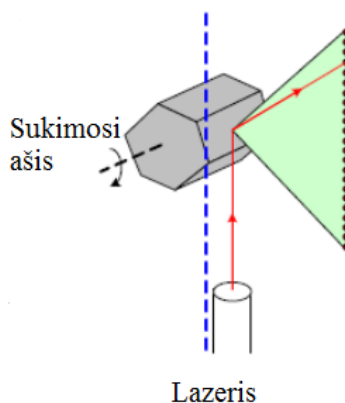
Antžeminiai skeneriai yra skirstomi pagal lazerio krypties keitimo būdą. Lazerio krypties keitimo būdai buvo detalčiai diskutuojama straipsnyje (Kern 2003), kuria aprašoma krypties keitimas naudojant plokščius veidrodžius, daugiakampius (pavyzdžiui, šešiakampis) ar prizmes. Kita galimybė keisti kryptį yra skirtingas veidrodžių judėjimas. Jie gali svyruoti (virpėti) arba tiesiog sukis (Schulz 2007). Taigi, antžeminiai skeneriai, pagal lazerio krypties keitimo būdą, skirstomi:

- 1) **Svyruojantys (virpantys) veidrodžiai** (*Oscillating Mirrors*). Antžeminiai skeneriai, turintys tokio tipo veidrodžius yra vadinami kameriniais skeneriais. Lazeris yra įmontuotas, t. y. stovi vietoje, o veidrodis horizontaliai ir vertikalčiai keičia kampą (2.10 pav.).



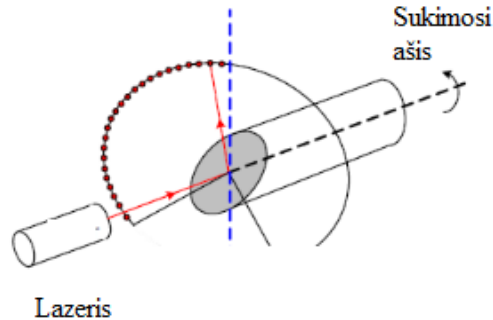
2.10 pav. Svyrųojantys veidrodžiai (Staiger 2007)

- 2) **Besisukantys veidrodžiai** (*Rotating Polygons Mirrors*). Antžeminiai skeneriai, turintys tokio tipo veidrodžius yra vadinami hibridiniais skeneriais. Jų konstrukcija sudaryta iš šviesos šaltinio ir šešiakampio veidrodžio, kuris sukasi apie savo ašį (2.11 pav.).



2.11 pav. Besisukantys veidrodžiai (Staiger 2007)

- 3) **Riboto kampo** („*Monogon*“ *flat Rotating Mirrors*) **veidrodžiai**. Antžeminiai skeneriai, turintys tokio tipo veidrodžius yra vadinami panoraminiais skeneriais. Tai didžiausią apimtį turintys skeneriai (2.12 pav.).



2.12 pav. Riboto kampo veidrodžiai (Staiger 2007)

2.4. Klaidų šaltiniai

Iki dabar, keletas mokslinių tyrimų įvykdė keletą testavimų naudojantis skirtingais lazerinių skenerių modeliais. Iš šių testavimo rezultatų paaiškėjo klaidų šaltiniai, kurie gali turėti įtakos matavimams naudojant antžeminius lazerinius skenerius. Šie klaidų šaltiniai gali būti atskirti į 4 grupes:

1. Instrumentinės klaidos;
2. Klaidos, susijusios su nuskaityto objekto forma ir charakteristikomis;
3. Klaidos, kurias sukelia aplinkos savybės, kurioje atliekamas skenavimas;
4. Metodologinės klaidos (Coşarcă et al. 2009).

Praktinė patirtis parodė, kad šių klaidų sumažinimas ar pašalinimas priklauso nuo kiekvieno prietaiso individualaus kalibravimo ir nuo atsargumo priemonių, kurių buvo imtasi naudojantis prietaisu (Coşarcă et al. 2009).

2.4.1. Instrumentinės klaidos

Instrumentinės klaidas galima suskirstyti į sistemines ir atsitiktines klaidas. Atsitiktinės paklaidos daugiausiai įtakoja atstumo ir kampų matavimų tikslumą tais atvejais, kai naudojami impulsiniai (*ang. Time Of Flight*) prietaisai. Sistemines klaidas gali sukelti temperatūros pokyčiai, kurie gali labai paveikti atstumo matavimus (Coşarcă et al. 2009).

2.4.1.1. Lazerio pluošto plotis

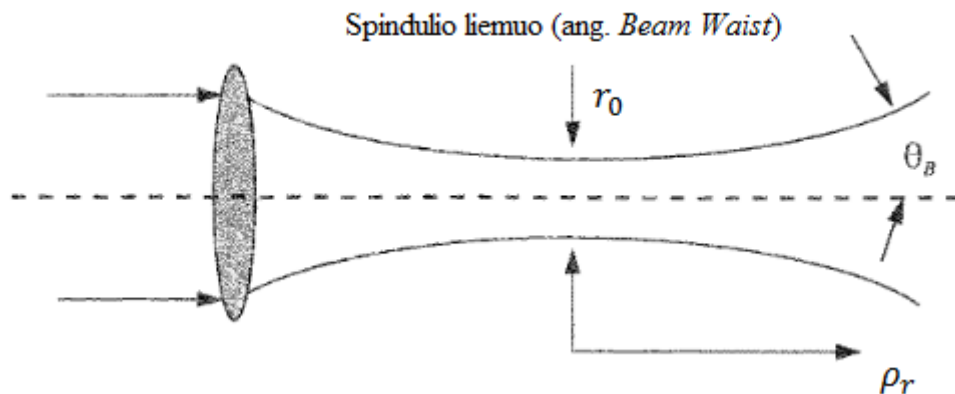
Viena iš svarbių skenerio savybių, kuri labai įtakoja tiek taško debesies, tiek padėties neapibrėžtumą, yra lazerio spindulių plotis. Lazerio pluošto spindulio plotis proporcingai didėja nueitam spindulio atstumui (Coșarcă et al. 2009). Tiesioginio lazerio signalo sklaidimo laiko intervalo ir amplitudės modeliavimo metodais paremta matavimų technologija tikslumas mažėja didėjant atstumui iki objekto dėl to, kad grįžtantis spindulis silpnėja, bei didėja spindulio pėdsako (*ang. Footprint*) dydis (Soudarissanane et al. 2007). Pagal Weichel (1990) lazerio spindulių plotis gali būti išreikštas kaip:

$$r(\rho_r) = r_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \rho_r}{\pi r_0^2}\right)^2} \quad (2.8)$$

Čia: ρ_r – atstumas iki lazerio pluošto liemens vietos;

r – lazerio pluošto spindulio ilgis;

r_0 – mažiausias lazerio pluošto spindulys, vadinamas spindulio liemeniu (*ang. Beam Waist*).

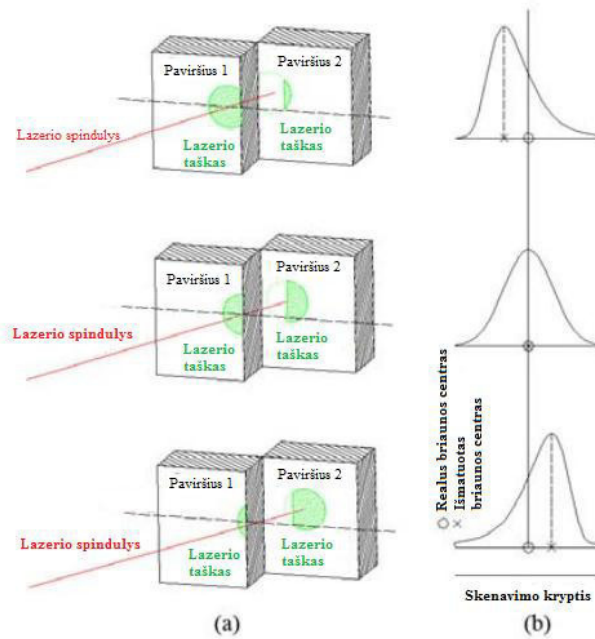


2.13 pav. Lazerio pluošto spindulio liemuo ir divergencijos kampas (Andrews and Phillips 1998)

Iš esmės, spindulio divergencija turi poveikį kampo matavimams. Remiantis praktine patirtimi neatitikimas nuo tikrosios vertės yra lygi $\frac{1}{4}$ spindulio skersmens (Coșarcă et al. 2009).

2.4.1.2. Briaunų (ribų) poveikis

Atliekant objekto matavimus, viena iš svarbiausių lazerio spindulio pasekmių yra briaunų (ribų) poveikis. Kadangi lazerio taškas nėra geometrinis taškas, o elipsė, todėl kai patenka į okliuzijos ribą, spindulio taškas padalijamas į dvi dalis. Viena dalis spindulio atsispindės nuo vienos plokštumos, o kita dalis spindulio nuo kitų paviršių, t. y. nuo už matuojamo paviršiaus ribos. Taigi, atsispindėta spindulio taško reikšmė bus svertinis vidurkis iš atsispindėtų abiejų paviršių (Coșarcă et al. 2009).



2.14 pav. Klaidingi matavimai ties briauna. (a) užtušiuotas apskritimas, kuris yra padalintas, yra lazerio pėdsakas (*footprint*); (b) grafikas, kuris vaizduoja realius ir išmatuotus briaunos centrus (Sotoodeh 2006)

2.4.1.3. Atstumo tikslumas

Antžeminiu lazeriniu skenavimu atstumo matavimas atliekamas trianguliacija arba impulsiniais matavimais, kada matuojamas laiko tarpas tarp išsiųsto ir gauto signalo (*ang. Time Of Flight*). Kita galimybė nustatyti atstumą yra matuojant fazinį skirtumą tarp perduoto ir priimto signalo (Coșarcă et al. 2009).

Atliekant matavimus trianguliacijos būdu, skiriamoji geba gali būti išreikšta:

$$\delta_z \approx \frac{Z^2}{f \cdot D} \delta_p \quad (2.9)$$

Kur: f – faktinė lazerio taško padėtis (židinio nuotolis);

D – trianguliacijos bazinės linijos ilgis;

δ_p – skiriamoji geba lazerio padėtyje. Tai priklauso nuo lazerio jutiklio tipo, detektoriaus algoritmo, signalo ir triukšmo santykio ir lazerio taško formos;

Z – atstumas iki skenuojamojo paviršiaus (Coșarcă et al. 2009).

Lazerinio signalo sklidimo laiko intervalo (*ang. Time Of Flight*) arba kitaip sakant impulsiniams skeneriams yra žinoma, kad atstumo tikslumas priklauso nuo laiko intervalo skaitiklio. Šiuo atveju atstumo tikslumas priklauso nuo (Coșarcă et al. 2009):

$$\delta_z \approx \frac{c \cdot T_t}{2\sqrt{SNR}} \quad (2.10)$$

Kur: T_t – laiko tarpas tarp impulsų;

SNR – signalo ir triukšmo santykis;

c – šviesos greitis.

Nepertraukiame signalo dažnio (netiesioginio lazerio sklidimo) metode lazerio intensyvumas moduluotas su tiksliai apibrėžta funkcija, pavyzdžiui, sinusoidinis ar kvadrato formos bangos signalas. Diapazono tikslumas priklauso tik nuo moduluoto bangos ilgio (λ_m) ir signalo ir triukšmo santykio ir gali būti aprašytas (Coșarcă et al. 2009):

$$\delta_z \approx \frac{\lambda_m}{4\pi \cdot \sqrt{SNR}} \quad (2.11)$$

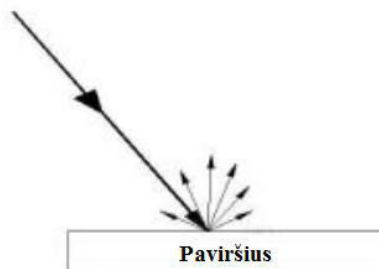
2.4.1.4. Kampinis tikslumas

Daugelyje lazerių skenerių yra naudojamas mažas sukamasis įrenginys (veidrodis, prizmė), kad nukreiptų lazerio impulsą tam tikra kryptimi. Bet koks mažas kampinis skirtumas priklauso nuo atstumo (nuo instrumento iki tiriamojo objekto) ir gali sukelti žymių klaidų taškų koordinatėse.

Praktiniai eksperimentai rodo, kad šių klaidų įtaką galima nustatyti matuojant mažus horizontalius kampus ir erdvinius atstumus tarp objektų (pvz., sferų), nutolusių tokiu pat atstumu nuo skaitytuvo, ir taip lyginant juos su matavimo rezultatais, gaunamais naudojant klasikinius matavimo prietaisus (Coșarcă et al. 2009).

2.4.2. Klaidos, susijusios su nuskaityto objekto forma ir charakteristikomis

Pradedant nuo hipotezės, kad lazeriniai skeneriai matuoja lazerio pluošto atspindžius nuo objekto paviršiaus, turime spręsti tiriamojo objekto medžiagų atspindžio ir optinių savybių fizines savybes. Monochromatinės šviesos spindulys palietęs paviršių atsispindi įvairiomis kryptimis (2.15 pav.) (Coșarcă et al. 2009).



2.15 pav. Difuzinis atspindėjimas (Coșarcă et al. 2009)

Šį difuzinio atspindžio tipą galima apibūdinti pagal Lambert lygtį:

$$I_{refl.}(\lambda) = I_i(\lambda) \cdot k_d(\lambda) \cdot \cos(\theta) \quad (2.12)$$

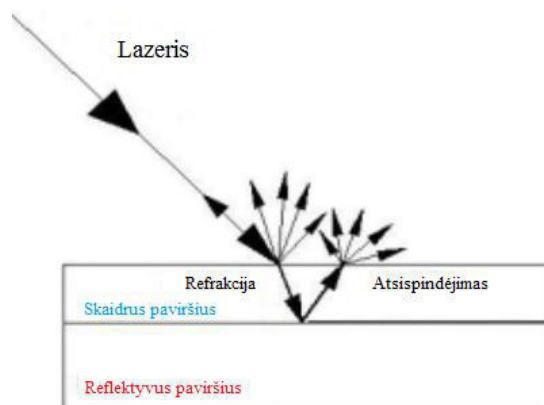
Čia: $I_i(\lambda)$ – šviesos intensyvumas kaip bangos ilgio (spalvos) funkcija;

$k_d(\lambda)$ – difuzinis atspindžio koeficientas, kuris taip pat yra bangos ilgio funkcija;

θ – kampas tarp krentančio šviesos spindulio ir normalinio vektoriaus į paviršių.

Ši formulė rodo, kad grįžtančiojo signalo stiprumas (tarp kitų faktorių, pavyzdžiui, atstumas, atmosferos sąlygos, kritimo kampas) įtakoja paviršiaus reflektyvumą. Tai reiškia, kad labai tamsiems paviršiams (juodiems), kurie sugeria daugumą matomojo spektro, atspindėtas signalas bus labai prastas. Taigi, taško tikslumas gautas iš matavimų bus paveiktas klaidų (triukšmo). Didelio reflektyvumą turintys paviršiai (pvz., balti paviršiai) stipraus signalo atspindžius. Tačiau jeigu objektas atspindžio koeficientas yra per didelis (blizgantį paviršių nėra lengva įrašyti), lazerio spindulys visiškai atsispindės ir pasieks kitą paviršių arba pasiskirstys, arba visiškai išsisklaidys. Kai lazerio spindulys išsisklaidytas į netaisyklingą paviršių, rezultatai atskleidžia atsitiktinį triukšmą, vadinamąjį spektrinį triukšmą (Coşarcă et al. 2009).

Be atspindžio efekto, yra ir atvejų, kai daugelyje medžiagų yra padengtos skaidria danga, kuri leidžia lazerio spindulį laužia (refrakcija) ir pasiekus paviršių atsispindi (refleksija) (2.16 pav.).



2.16 pav. Refrakcija ir atsispindėjimas (Coşarcă et al. 2009)

2.4.3. Klaidos, kurias sukelia aplinkos savybės, kurioje atliekamas matavimas

Matuojant elektroniniu tacheometru ar antžeminiu lazeriniu skeneriu susiduriama su klaidomis, kurias sukelia aplinkos savybės:

1. Temperatūra.

Būtina pažymėti, kad temperatūra prietaiso viduje gali būti didesnė už aplinkos temperatūrą dėl vidinių komponentų šildymo ir išorinių veiksnių (pvz., Saulės spindulių). Išorinis spinduliavimas gali turėti įtakos, pavyzdžiui, spinduliavimas vienai trikojo ar skenerio pusei, o tai gali sukelti nuskaitytų duomenų iškraipymą.

Be įrangos temperatūros, svarbus trikdymo veiksnys yra nuskaityto paviršiaus temperatūra. Pavyzdžiui, matuojant karštą objektą, atsiranda triukšmo bei sumažina atstumo matavimų tikslumą (Coşarcă et al. 2009).

2. Oro terpė.

Matavimo prietaisai veikia tinkamai, kai matuojant aplinkos objektus, yra pastovi temperatūra išilgai išmatuotų atstumų. Išmatuotų atstumų tikslumas bus paveiktas, kai matavimo lauke atsirastų temperatūrų skirtumai.

Aplinkos klaidos yra susijusios su oro temperatūros, slėgio ir drėgmės svyravimais. Visi faktoriai turi įtakos refrakcijos rodikliui ir elektromagnetinės bangos ilgiui. Tai reiškia, kad lazerio spinduliuotės greitis labai priklauso nuo oro tankio.

Dauguma prietaisų leidžia nustatyti atmosferos parametrus, siekiant sumažinti dėl aplinkos sukeliančias klaidas. Paprastai lazeriniai skeneriai yra iš anksto nustatomi pagal atmosferos parametrus (ISO standartus): 15°C ir $1013,25\text{ hPa}$. Jeigu kalbame apie ilgų atstumų ir aukšto tikslumo skenavimus, būtina įvesti tikslius atmosferos parametrus.

10°C oro temperatūros skirtumas arba 35 hPa oro slėgio skirtumas gali sukelti $1\text{mm}/100\text{m}$ skenuojamojo atstumo klaidą (Coşarcă et al. 2009).

3. Iškraipymai dėl judesių.

Dauguma lazerinių skaitytuvų gali skenuoti nuo 2000 iki 500000 taškų per sekundę. Nors tai yra labai didelis greitis, tačiau skenuojant didelės skiriamosios gebos režimu, skenavimas gali trukti 20-30 minučių naudojant lazerinio signalo sklidimo laiko intervalo (*TOF – Time Of Flight*), t. y. impulsinius skenerius, arba 10 minučių skeneriams, remiantis fazių skirtumo principu. Per šį laiką lazerinis skeneris yra jautrus vibracijai, dėl kurių gali atsirasti mažų poslinkių, vadinamų judesių iškreipimais.

Kadangi kiekvienas taškas yra išmatuotas skirtingu laiko tarpu, todėl bet koks skenuojamojo objekto ar antžeminio lazerinio skenerio judesys iškreipia išmatuotus duomenis. Dėl šios priežasties reikia, kad skeneris būtų montuojamas ant stabilios platformos, kad sumažėtų vibracijos reiškinys (Coşarcă et al. 2009).

2.4.4. Metodologinės klaidos

Metodologinės klaidos atsiranda dėl pasirinktos neteisingos matavimo metodo arba mažos matuotojo patirties, kuris nėra per daug susipažinęs su šia technologija. Pavyzdžiui, jeigu matuotojas, atliekant skenavimą, pasirenka per didelį taškų tankį (skiriamąją gebą), kuri yra didesnė negu lazerinio skenerio taško tikslumas. Tokiu atveju sukuriama papildoma triukšmas ir skenavimo procesas žymiai padidėja.

Kitas galimas klaidų šaltinis gali būti netinkamas antžeminio lazerinio skenerio pasirinkimas. Pavyzdžiui, kartais skenuojamas objektas yra nutolęs didesniu atstumu negu maksimalus prietaiso matavimo atstumas.

Kitos galimos metodologinės klaidos gali atsirasti registracijos metu. Šios klaidos priklauso nuo „taškų debesies“ registravimo metodo.

3. AUKŠTYBINIŲ STATINIŲ HORIZONTALIŲJŲ DEFORMACIJŲ TYRIMAS

Lietuvoje ir pasaulyje yra labai didelis kiekis aukštybinių pastatų, pavyzdžiui, dūmtraukių, aušinimo bokštų, televizijos bokštų, antenų, vandens bokštų ir kt., tačiau daugelio iš jų fizinė būklė yra nežinoma. Svarbu matuoti aukštybinių statinių deformacijas reguliariai, nes statinio griūtis (3.1 pav.) gali savininkui padaryti didelių piniginių nuostolių ar netgi nusinešti žmonių gyvybes.



3.1 pav. Dūmtraukio griūties pavyzdys (Anigacz 2008)

Aukštybinių statinių horizontaliosios deformacijos dažniausiai yra matuojamos tradiciniais arba, kitaip sakant, klasikiniiais metodais. Vis dėlto tobulėjantys geodeziniai prietaisai leidžia pagreitinti matavimus, pakeisdami matavimo metodikas. Aukštybinių statinių horizontaliųjų deformacijų nustatymo metodai yra aprašyti ne tik Lietuvos autorių, bet ir pasaulio mokslininkų literatūroje (V. Č. Aksamitauskas, Shunyi Zheng, A. Dumalski, D. Schneider, M. O. Selbesoglu, T. Bakirman, O. Gokbayrak, S. Erol, B. Erol, T. Ayan, S. Erol, B. Erol, T. Ayan ir kt.).

Vis dėlto autoriai per mažai dėmesio skyrė gautų rezultatų tikslumui įvertinti bei lazerinio skenavimo duomenims su klasikiniiais geodeziniais prietaisais palyginti, pavyzdžiui, teodolitais ar elektroniniais tacheometrais (Šlikas 2013).

Šiame skyriuje palyginsime aukštybinių statinių, t. y. dviejų dūmtraukių, horizontaliąsias deformacijas, kurių matavimai buvo atlikti naudojant antžeminį lazerinį skenerį *Leica Scanstation C10* ir elektroninį tacheometrą *Leica TS30*. Atlikta elektroninio tacheometro ir lazerinio skenavimo metodu gautų geometrinių objekto parametrų tikslumo analizė bei inžineriniai skaičiavimai dūmtraukių horizontaliosioms deformacijoms nustatyti.

Matavimų apdorojimui buvo naudojamos dvi programinės įrangos: *Leica Cyclone 9.0* ir *AutoCAD Civil 3D 2015*. Elektroniniu tacheometru buvo išmatuoti šeši skerspjūviai abiejuose dūmtraukiuose, o antžeminiu lazeriniu skeneriu – išmatuota apribota skenavimo erdvė, kurioje visu dydžiu patenka abu dūmtraukiai.

3.1. Matavimo prietaisai horizontaliosioms deformacijoms nustatyti

Tyrimui atlikti buvo naudojami kalibruoti prietaisai: GPS imtuvas *Leica Viva GNSS GS12*, elektroninis tacheometras *Leica TS30* ir antžeminis lazerinis skeneris *Leica Scanstation C10*.

3.1.1. GPS imtuvas *Leica Viva GNSS GS12*

GPS sistemomis galima nustatyti objektų padėtį žemės paviršiuje ir erdvėje aplink jį, objektų judėjimo vektorius. Šios sistemos taip pat pritaikytos geodezijos uždaviniams spręsti: nustatyti taškų geocentrines koordinates, žemės gravitacijos lauko parametrus, geodezijos konstantas ir kt. GPS sistemos sprendžia ir geoido nustatymo, žemės poliaus judėjimo, žemės potvynių ir atoslūgių, geodinamikos sričių uždavinius. Šiomis sistemomis yra sudaromi didelio tikslumo geodeziniai tinklai. GPS sudaro trys segmentai: kosminis, valdymo ir kontrolės bei vartotojų. Kosminio segmento palydovai išdėstyti šešiose orbitose taip, kad iš bet kurio žemės paviršiaus taško, bet kuriuo paros metu būtų ne mažiau kaip keturi palydovai, pakilę virš horizonto aukščiau kaip 10° . GPS metodu nustatomų taškų koordinatų tikslumas priklauso nuo palydovų orbitų parametrų tikslumo, signalų parametrų matavimo tikslumo, palydovų ir imtuvų tarpusavio išdėstymo. Absoliutiniu metodu taško geocentrinės koordinatės X, Y, Z nustatomos keliasdešimties metrų klaida. Diferenciniu metodu taško koordinatų prieaugiai kito taško koordinatų atžvilgiu – keleto centimetrų klaidomis. (V. Kriaučiūnaitė–Neklejonovienė 2008).



3.2 pav. GPS imtuvas *Leica Viva GNSS GS12* (<http://surveyequipment.com/leica-viva-gs15>)

Naudojantis GPS imtuvu *Leica Viva GNSS GS12* buvo sudarytas geodezinis pagrindas, tolesniems horizontaliųjų deformacijų matavimams. GPS imtuvo techninės charakteristikos yra pateiktos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. GPS imtuvas Leica Viva GNSS GS12 techninės charakteristikos (<http://www.gsb.lt/gnssgps-systems/leica-viva-gnss/leica-viva-gs12>)

Imtuvo tikslumas	
Statinis horiz. tikslumas	5mm ± 0.5ppm (RMS)**
Statinis vert. tikslumas	10mm ± 0.5ppm (RMS)**
RTK horiz. tikslumas	10 mm ± 1 ppm (RMS)**
RTK vert. tikslumas	20 mm ± 1 ppm (RMS)**
DGPS/RTCM tikslumas	0.25 (RMS)**

3.1.2. Elektroninis tacheometras *Leica TS30*

Elektroninis tacheometras – šiuolaikinis prietaisas, kuriuo galima matuoti atstumus, horizontalius ir vertikalius kampus, vietoje apskaičiuoti stoties bei matuojamų taškų koordinatės ir altitudės. Prietaiso kompleksą sudaro teodolitas, elektroninis (šviesos) tolimalis, mikroprocesorius su skaičiuokliu, duomenų registravimo įtaisas (kaupiklis) ir reflektoriai.

Pagrindinės dalys sudarančios elektroninį tacheometrą:

1. Teodolitas tikslus, elektroninis prietaisas su koduotais limbais. Limbų atskaitos patenka į šviesos indikatorius, į mikroprocesoriaus atmintį ir įrašomos registravimo įtaise. Yra elektroninių tacheometrų, kurių limbuose atskaita atskaičiuojama vizualiai mikroskopais arba mikrometrais.

2. Elektroninis tolimalis sujungtas su teodolitu. Pagal elektromagnetinių virpesių sklaidimo greitį ore prietaiso mikroprocesorius apskaičiuoja matuojamąjį atstumą.

3. Duomenys fiksuojami mikroprocesoriaus atmintyje, įsižiebia indikatoriuje arba įrašomi į registravimo įtaisą.

4. Mikroprocesorius valdo ir kontroliuoja matavimo procesą. Matavimo vietoje galima apskaičiuoti horizontalius atstumus, taškų stačiakampes koordinatės ir altitudės, išspręsti atvirkštinį geodezinį uždavinį, geodezines sankirtas ir kitą. Matavimo ir skaičiavimo modifikacija bei papildomi duomenys (stoties koordinatės ir altitudė, pradinis direkcinis kampas ir kt.) įvedami klaviatūra.

5. Duomenų registravimo įtaisas tai elektroninis lauko žurnalas, fiksuojantis lauke pamatuotus ir išskaičiuotus rezultatus bei kitą informaciją (piketų numeriai, kodai ir t. t.) (V. Kriaučiūnaitė–Neklejonovienė 2008)



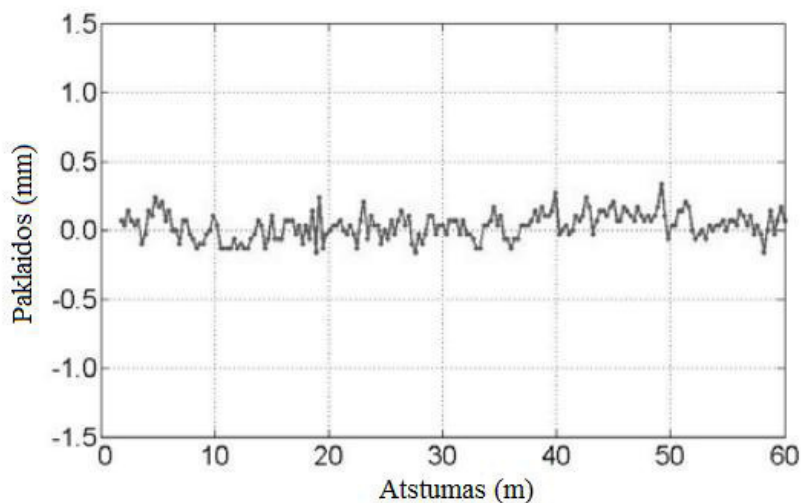
3.3 pav. Elektroninis tacheometras Leica TS30 (Leica 2009)

Žemiau pateiktoje 3.2 lentelėje yra aprašomos pagrindinės elektroninio tacheometro *Leica TS30* specifikacijos (Leica 2009).

3.2 lentelė. Elektroninio tacheometro *Leica TS30* specifikacijos (Leica 2009)

Techninės charakteristikos	
Kampo matavimas	
Kampo matavimo tikslumas Hz, V	0,5“ (0,15mgon)
Atstumo matavimas naudojant prizmę	
Naudojant GPR1 didelę prizmę	3500 m
Naudojant 360° prizmę	1500 m
Tikslumas/Matavimo laikas	Tikslus: 0,6 mm+1 ppm / apie 7 sek. Standartinis: 1 mm+1,5 ppm / apie 2,4 sek. Greitas: 3 mm+2 ppm / apie 0,8 sek.
Atstumo matavimas be prizmės	
Atstumas	1000 m
Tikslumas/Matavimo laikas	2 mm+ 2 ppm / apie 3 sek.
Lazerio taško dydis	7 mm x 10 mm prie 30 m. 8 mm x 20 mm prie 50 m.
Bendros charakteristikos	
Žiūronas	
Didinimas	30x
Objektyvo diametras	40 mm
Matymo laukas	1°30' / 2,7 m prie 100 m
Fokusavimo diapazonas	Nuo 1,7 m iki begalybės
Klaviatūra ir ekranas	
Ekranas	VGA 320x240 pikselių, lietimui jautrus, spalvotas
Klaviatūra	Raidinė - skaitmeninė klaviatūra 34 klavišai
Lazerinis centryras	
Taško diametras	2,5 mm prie 1,5 m. instrumento aukščio
Centravimo tikslumas	1,5 mm prie 1,5 m. instrumento aukščio

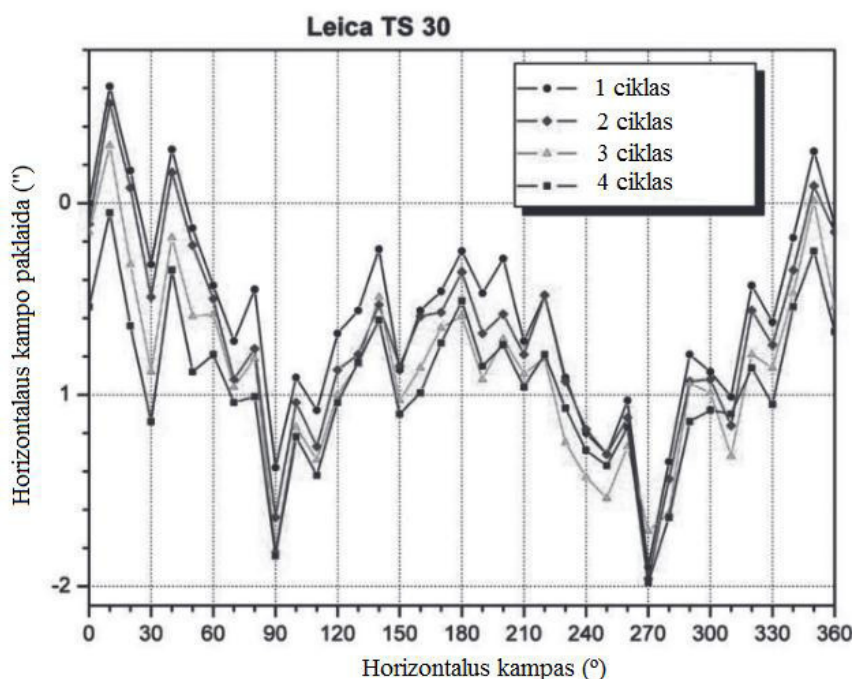
Elektroninio tacheometro atstumo matavimo tikslumas yra patikrintas *Leica Geosystems* patvirtintoje laboratorijoje lyginant išmatuotus atstumus ir nominalius, kurie yra išmatuoti naudojantis interferometru. Tyrimo rezultatai pavaizduoti 3.4 paveiksle.



3.4 pav. Elektroninio tacheometro *Leica TS30* atstumo matavimo paklaidos (Leica 2009)

Iš 3.4 paveikslo pastebima, kad laboratorijoje buvo tiriamas atstumo matavimo tikslumas atstumu nuo 1,5 iki 60 m. Atstumų matavimo paklaidos nėra tolygiai kintančios. Paklaidos siekia nuo -0,2 mm iki +0,3 mm.

Elektroninio tacheometro *Leica TS30* horizontalaus kampo atskaitymo tikslumą ištyrė Slovakijos mokslininkai V. Hašková ir M. Lipták. Tyrimas buvo atliktas iš keturių atskirų matavimo ciklų. Horizontalių kampų atskaitymo paklaidos pasiskirsčiusios trigonometrine funkcija, o jų dydžiai siekia nuo -2" iki +0,4". Tyrimo rezultatai yra pavaizduoti 3.5 paveiksle.



3.5 pav. Horizontaliųjų kampų atskaitymo tyrimo rezultatai (Hašková, Lipták 2011)

3.1.3. Antžeminis lazerinis skeneris *Leica Scanstation C10*

Pastaruoju dešimtmečiu vietovės erdvinių objektų informacijai gauti pradėtas taikyti naujas metodas – antžeminis lazerinis skenavimas (ang. *TLS – Terrestrial Laser Scanning*). Šiuo metodu vietovės objektai skenuojami lazeriniu skeneriu nuo Žemės paviršiaus. Lazerinis skeneris siunčia lazerio spindulius, kurie atspindėję nuo skenuojamojo paviršiaus yra registruojami – fiksuojama laiko trukmė nuo išspinduliavimo iki atspindėjimo. Gaunamas labai tankus tašų „debesis“ trimatėje erdvėje.

Antžeminis lazerinis skenavimo procesas ir duomenų apdorojimas yra visiškai automatizuotas. Šiuo metodu labai greitai gaunami skenuojamojo paviršiaus taškai, nusakomi trimatėmis koordinatėmis. Antžeminis lazerinis skenavimas taikomas kultūros paveldo objektams, architektūriniams paminklams, statinių deformacijoms stebėti, pramonės detalėms tyrinėti, miestų gatvių trimatei erdvei fiksuoti ir kt. (Ruzgienė 2008).

Antžeminiame lazeriniame skeneryje *Leica Scanstation C10* (3.6 pav.) yra naudojama impulsinio tiesioginio lazerio signalo sklidimo laiko intervalo (*pulsed time-of-flight*) atstumo matavimo metodas. Atstumo matavimo diapazonas yra 0,1-300 m. Prietaise yra įmontuota Smart X-Mirror™ spindulio nukreipimo sistema. Lazerio krypties keitimo būdas – besisukantys veidrodžiai. Besisukančių veidrodžių konstrukcija sudaro galimybę išplėsti iki 360 laipsnių (horizontalaus) ir 270 laipsnių (vertikalaus) skenavimo diapazoną (Leica 2009).



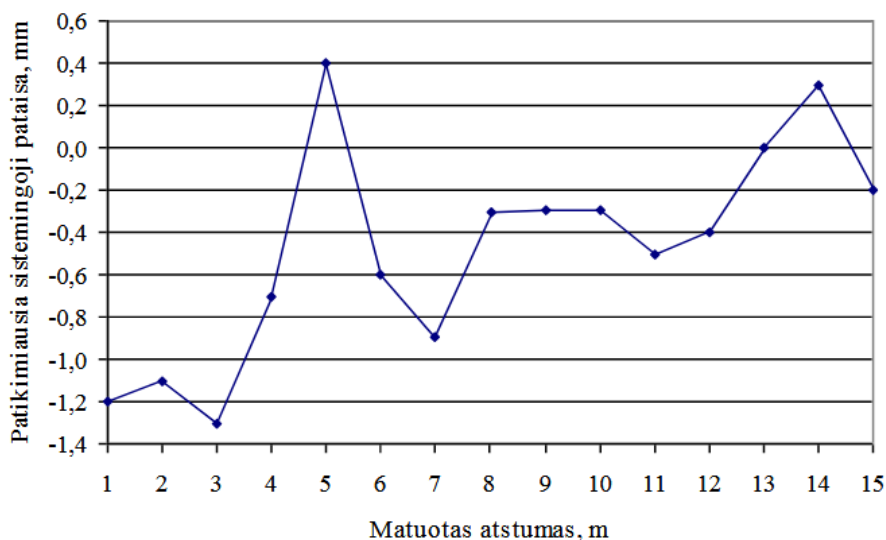
3.6 pav. Antžeminis lazerinis skeneris *Leica Scanstation C10* (Leica 2009)

Žemiau pateiktoje 3.2 lentelėje yra aprašomos pagrindinės antžeminio lazerinio skenerio *Leica Scanstation C10* specifikacijos (Leica 2009).

3.3 lentelė. Antžeminio lazerinio skenerio *Leica Scanstation C10* specifikacijos (Leica 2009)

<i>Leica Scanstation C10</i> techniniai duomenys	
Sistemos duomenys	
Skenavimo principas	Vertikaliai besisukantis veidrodis ant horizontaliai besisukančio pagrindo
Maksimalus diapazonas nurodytu atspindžiu	300/90% (minimalus atstumas 0,1 m)
Pavienio taško tikslumas: Atstumas Kampas (horizontalus/vertikalus)	4 mm 60 μ rad / 60 μ rad (12'' / 12'')
Skenavimo diapazonas	360 Horizontalus, 270 Vertikalus
Skenavimo greitis	~ 50 000 taškų per sekundę
Kompensatoriaus veikimo ribos	$\pm 5'$
Kompensatoriaus tikslumas	1,5''
Lazerinis svambalas: Centravimo tikslumas Lazerio tašo diametras	1.5 mm @ 1.5 m 2.5 mm @ 1.5 m
Integruota skaitmeninė kamera	Vieno 17° x 17° paveikslo: 1920 x 1920 pikseliai (4 megapiksiliai). Pilno 360° x 270° skliauto paveikslo;
Darbo aplinka	
Darbo temperatūra	Nuo 0 C iki +40 C
Saugojimo temperatūra	Nuo -25 C iki +65 C
Dulkės/drėgmė	IP54
Fizinės savybės	
Gabaritai	238 mm x 358 mm x 395 mm
Masė	13 kg (su baterijomis)

Antžeminio lazerinio skenerio atstumo matavimo tikslumą ištyrė Lietuvos autorius dr. D. Šlikas. Atstumo matavimo tikslumas buvo atliekamas iš dviejų etapų. Pirmuoju tyrimu buvo atliekami matavimai, kurie siekė nuo 1 iki 15 metrų. Kaip matome 3.7 paveiksle patikimiausios sistemingosios pataisos kinta nuo -1,3 mm iki 0,4 mm.



3.7 pav. Antžeminiu lazeriniu skeneriu *Leica Scanstation C10* matuotų atstumų nuo 1 iki 15 metrų sistemingųjų pataisų grafikas (Šlikas 2013)

Antrasis tyrimas buvo atliekamas Kyviškių kalibravimo bazėje, kurioje buvo matuojami ilgesni atstumai. Didėjant matuojamam atstumui, gaunamos ir didesnės paklaidos. Kaip matome iš 3.4 lentelės, patikimiausia sistemingoji pataisa kinta nuo -16,9 mm iki 3,7 mm, o lazerinio skenerio atstumų matavimo konstanta gauta -8,5 mm. Matavimo rezultatų standartinio nuokrypio įverčiai svyruoja nuo 0,0 mm iki 0,5 mm, o išmatuotų atstumų aritmetinio vidurkio standartinio nuokrypio įverčiai siekia nuo 0,0 mm iki 0,1 mm. Pastebimas patikimiausios sistemingosios pataisos žymus padidėjimas matuojant atstumus virš 100 m (Šlikas 2013).

Taip pat Šliko buvo atlikta ir antžeminio lazerinio skenerio *Leica Scanstation C10* kampo matavimo patikimiausios sistemingosios pataisos nustatymo tyrimas, kurio rezultatai pavaizduoti 3.4 lentelėje.

Iš pateiktų tyrimo rezultatų, galime teigti, kad kampo matavimo patikimiausia sistemingoji pataisa kinta nuo -0,3" iki 14,9" priklausomai nuo kampo smailumo, o lazerinio skenerio kampinė konstanta, įvertinus visas patikimiausias sistemingasias pataisas, gauta 4,3", Matavimo rezultatų standartinio nuokrypio įvertis svyruoja nuo 2,3" iki 6,0", o jų vidurkio standartinio nuokrypio įvertis siekia nuo 0,7" iki 1,9" (Šlikas 2013).

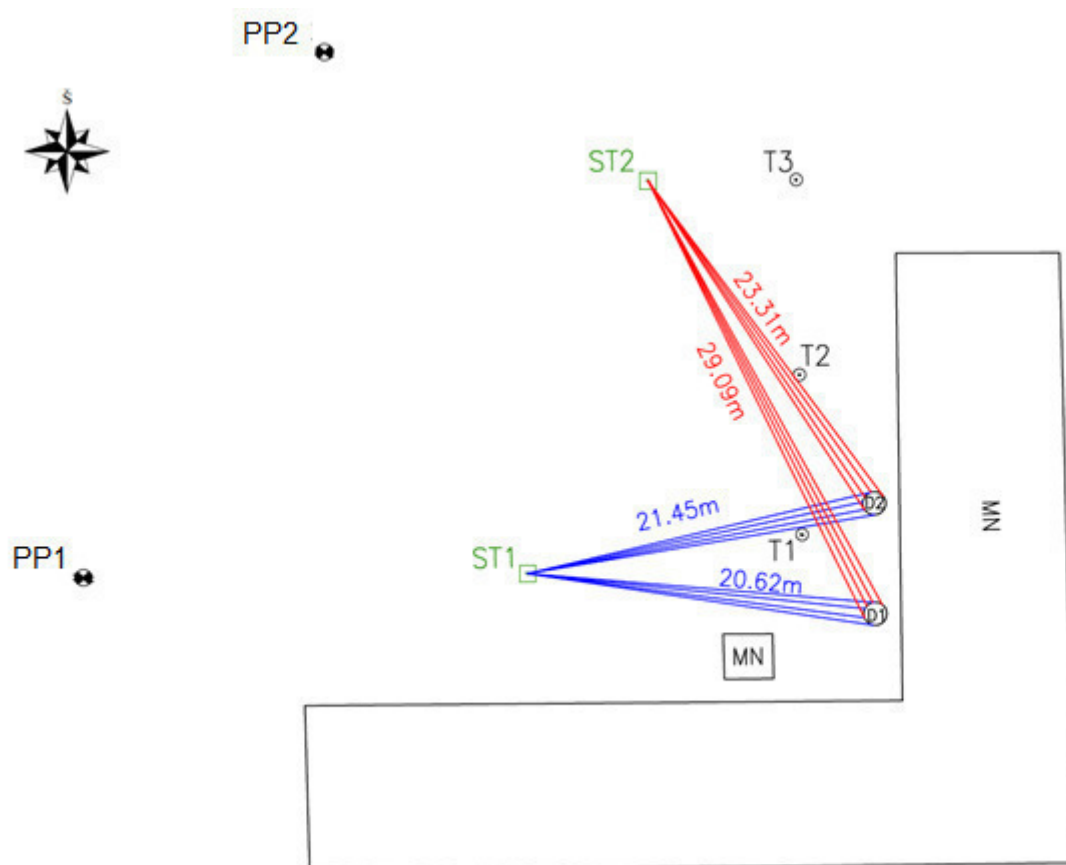
3.4 lentelė. Antžeminio lazerinio skenerio *Leica Scanstation C10* horizontalių kampų matavimo sistemos kalibravimo rezultatai (Šlikas 2013)

Kalibravimo metu matuoti atstumai	Etaloninis atstumas S_E , m	Išmatuotas vidutinis atstumas $\bar{S}$, m	Patikimiausia sistemingoji pataisa $\bar{\Delta}_{S_i}$, mm	Matavimo rezultatų standartinio nuokrypio įvertis m_{Δ_S} , mm	Išmatuotų atstumų aritmetinio vidurkio standartinio nuokrypio įvertis $m_{\bar{\Delta}_S}$, mm
20	20,0102	20,0095	0,7	0,0	0,0
100	100,1632	100,1595	3,7	0,2	0,1
180	180,0930	180,1070	-14,0	0,4	0,1
200	200,1032	200,1191	-15,9	0,4	0,1
260	260,0118	260,0287	-16,9	0,5	0,1
			R = -8,5		

3.2. Matavimo metodai ir tiriamas objektas

AB „Vilniaus energija“ Trakų Vokės katilinėje, kuri tiekia šilumos energiją šio miestelio vartotojams, pastatyti du 20 m aukščio dūmtraukiai.

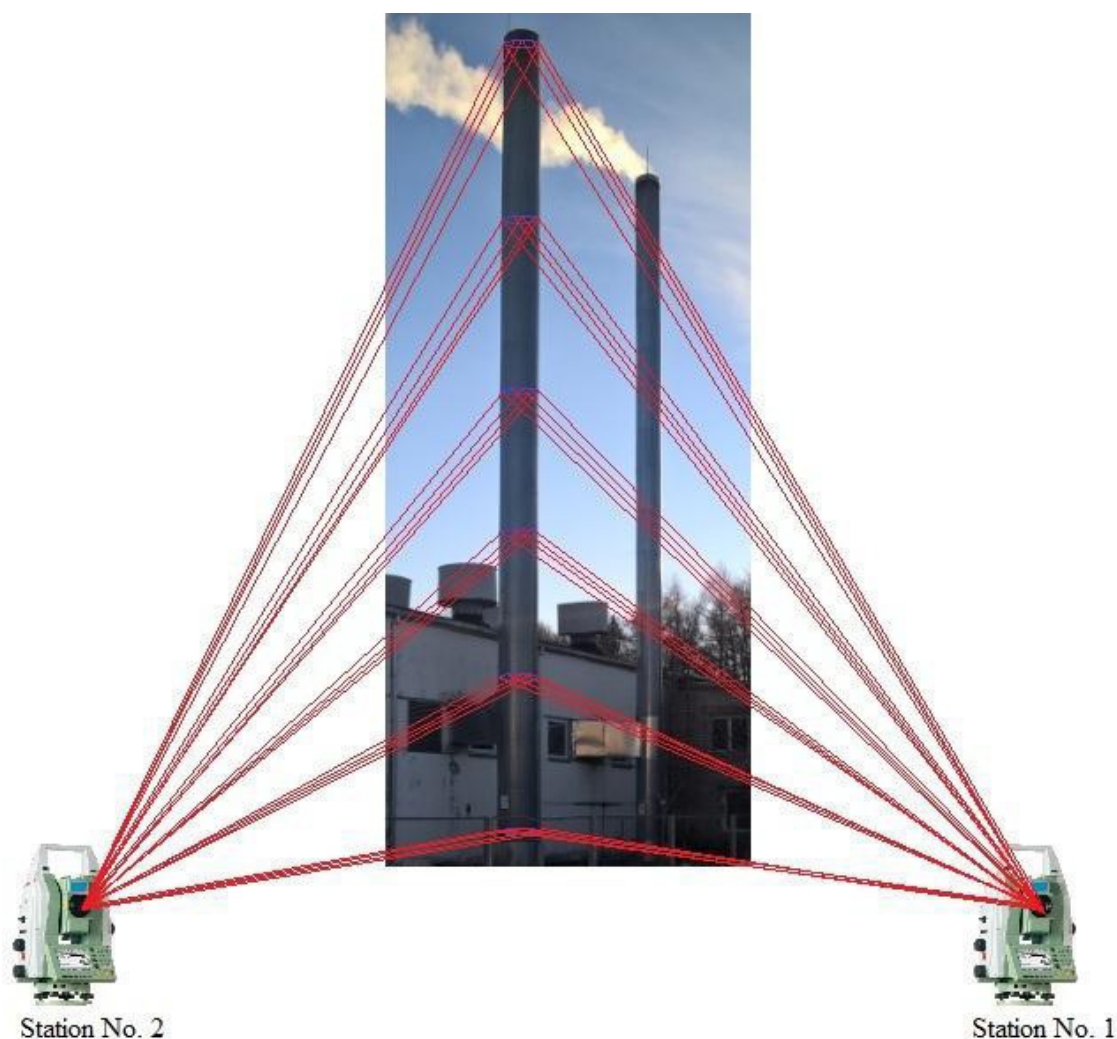
Dūmtraukių horizontaliųjų deformacijų matavimams buvo sudarytas geodezinis pagrindas.



3.8 pav. Matavimo schema

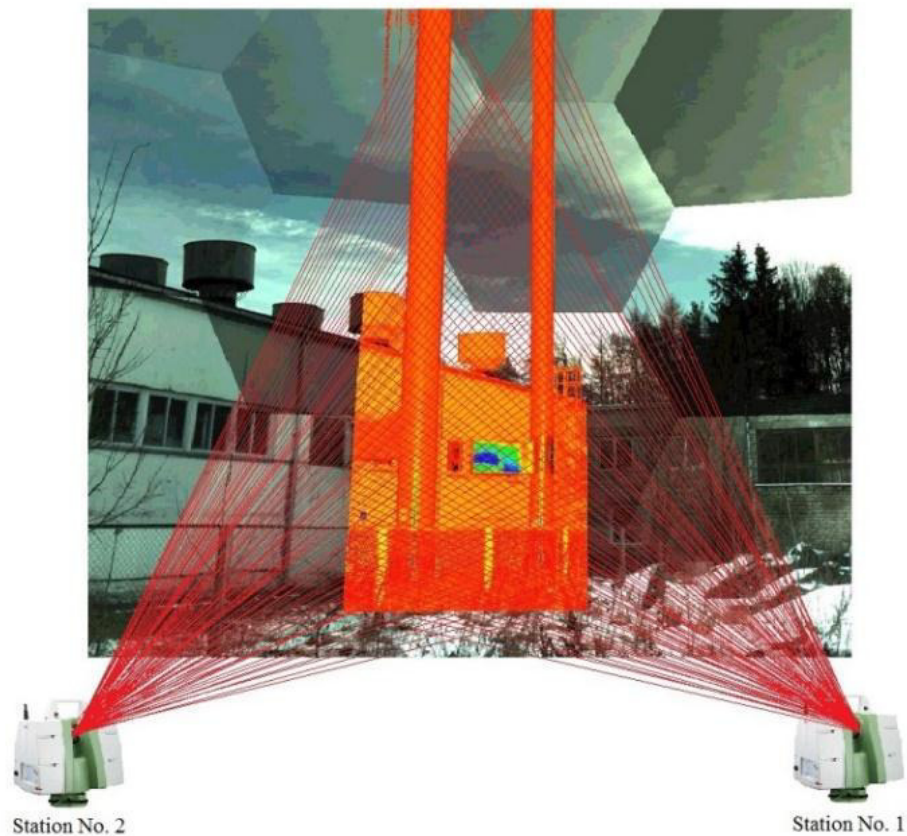
Geodezinį pagrindą sudaro du taškai, kurių koordinatės ir normaliniai aukščiai išmatuoti naudojantis GPS imtuvą *Leica Viva GNSS GS12*, taikant LITPOS nuolat veikiančių GNSS stočių tinklą. Horizontaliųjų deformacijų matavimas buvo atliktas, naudojant elektroninį tacheometrą *Leica TS30*, kurio kampo matavimo tikslumas 0,5", ir antžeminį lazerinį skenerį *Leica Scanstation C10*, kurio kampo matavimo tikslumas yra 12".

Dažniausiai matuojant horizontaliąsias deformacijas naudojami elektroniniai tacheometrai. Šiuo atveju pirmiausiai nustatomos tikslios matavimo stočių padėtys ir orientavimas nuo sudaryto geodezinio pagrindo punktų. Po to pasirinktuose skerspjūviuose atliekami dūmtraukių nuokrypių nuo vertikalės matavimai. Siekiama, kad iš visų stočių matavimai pasirinktame skerspjūvyje būtų atliekami tame pačiame dūmtraukio aukštyje. Matuojant kitoje stotyje, matavimai privalo būti atliekami tuose pačiuose skerspjūviuose. Matavimai buvo atlikti 6-iose skerspjūviuose iš 2-jų matavimo stočių (3.9 pav.).



3.9 pav. Principinė schema, matuojant elektroniniu tacheometru

Šiuo metu yra pažangesnis ir greitesnis geodezinis matavimo metodas, naudojant antžeminį lazerinį skenerį. Antžeminio lazerinio skenerio padėčiai ir orientavimui nustatyti buvo naudoti 3 taikiniai, kurių planinė ir vertikalioji padėtis nustatyta elektroniniu tacheometru nuo to paties geodezinio pagrindo punktų. Taikiniai (T1, T2 ir T3) išdėstyti taip, kad matytųsi iš abiejų matavimo stočių. Matuojant antžeminiu lazeriniu skeneriu dūmtraukių paviršius išmatuojamas visame dūmtraukio paviršiaus plote, o ne atskiruose skerspjūviuose (3.10 pav.).



3.10 pav. Principinė schema, matuojant antžeminiu lazeriniu skeneriu

3.3. Matavimo rezultatų apdorojimas

Kadangi tiriami objektai, dūmtraukiai, yra cilindro formos, tuomet kiekvienas skerspjūvis yra artimas apskritimui. Siekiant nustatyti nuokrypius nuo vertikalės kiekviename skerspjūvyje, turint išmatuotas dūmtraukių paviršiaus taškų koordinatės, reikia apskaičiuoti apskritimų centrus pagal išmatuotus taškus apskritimo lankuose kiekviename skerspjūvyje atskirai. Apskritimų centrų koordinatės apskaičiuojamos pagal žemiau pateiktas formules.

Apskritimo lanko taškų ir centro koordinatės su spinduliu galime susieti lygtimi:

$$(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 = R^2 \quad (3.1)$$

Čia: x_i ir y_i – dūmtraukio paviršiaus taškų koordinatės atitinkamame skerspjūvyje,

x_c ir y_c – to paties skerspjūvio centro koordinatės,

R – dūmtraukio skerspjūvio apskritimo spindulys.

Atlikę matematinius veiksmus ir pažymėjimus:

$$x_i^2 - 2x_ix_c + x_c^2 + y_i^2 - 2y_iy_c + y_c^2 - R^2 = 0, \quad (3.2)$$

$$\tau_1 = 2x_c, \quad (3.3)$$

$$\tau_2 = 2y_C, \quad (3.4)$$

$$\tau_3 = x_C^2 + y_C^2 - R^2, \quad (3.5)$$

$$l_i = x_i^2 + y_i^2, \quad (3.6)$$

Kiekvienam išmatuotam taškui gauta pataisų lygtis:

$$v_i = -x_i\tau_1 - y_i\tau_2 + \tau_3 + l_i, \quad (3.7)$$

Sudarę šias pataisų lygtis kiekvienam išmatuotam taškui ir mažiausiųjų kvadratų metodu suradę nežinomuosius τ_i apskaičiuosime apskritimo centro koordinatas ir spindulio vertę.

$$\begin{cases} x_C = \frac{\tau_1}{2} \\ y_C = \frac{\tau_2}{2} \end{cases} \quad (3.8)$$

$$2R = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 - 4\tau_3}, \quad (3.9)$$

Pagal pateiktas formules buvo apskaičiuotos abiejų dūmtraukių skerspjūvių centrų koordinatės ir atliktas dūmtraukio nuokrypio nuo vertikalės skaičiavimas nustatomas kiekviename skerspjūvyje apatinio skerspjūvio atžvilgiu. Taip pat skaičiuojamas atstojamosios direkcinis kampas:

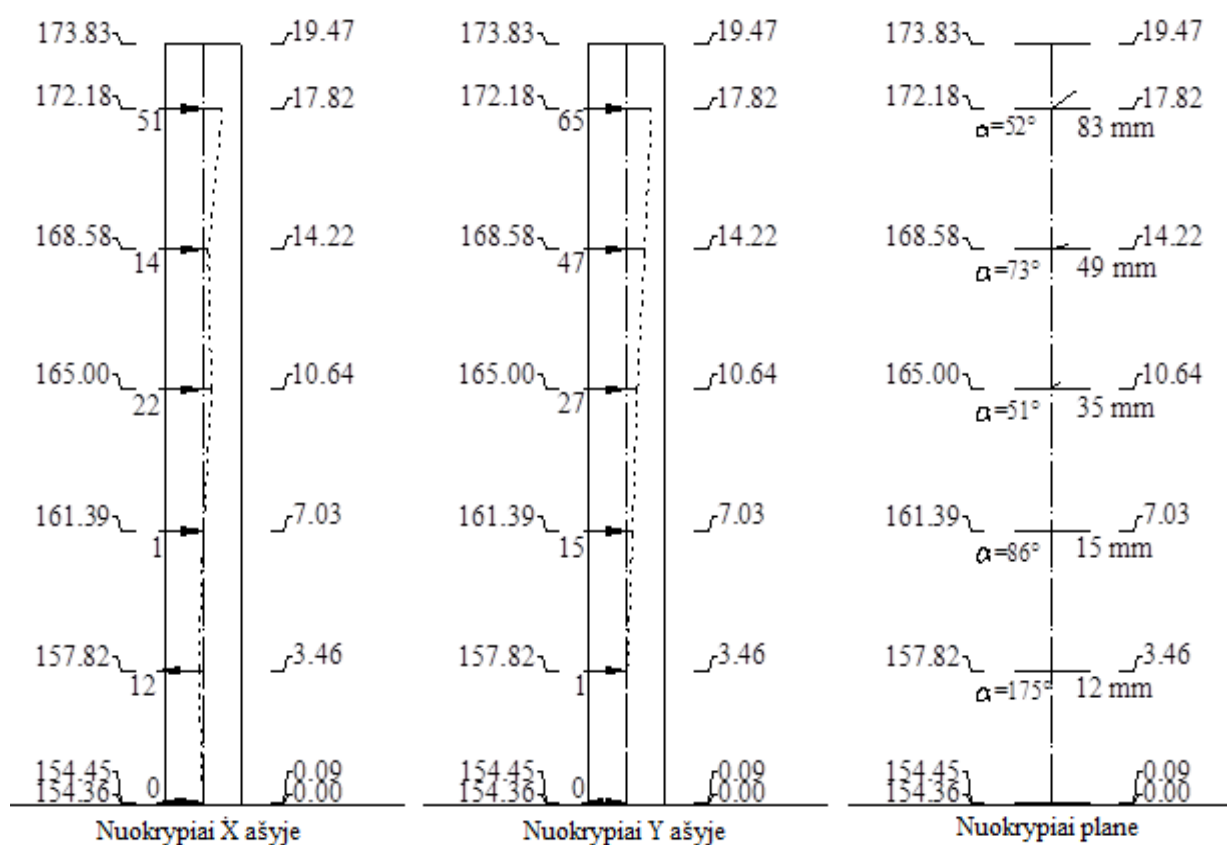
$$\alpha = \arctan \frac{\Delta y_C}{\Delta x_C} \quad (3.10)$$

Elektroniniu tacheometru išmatuota po 8 dūmtraukio paviršiaus taškus kiekviename skerspjūvyje.

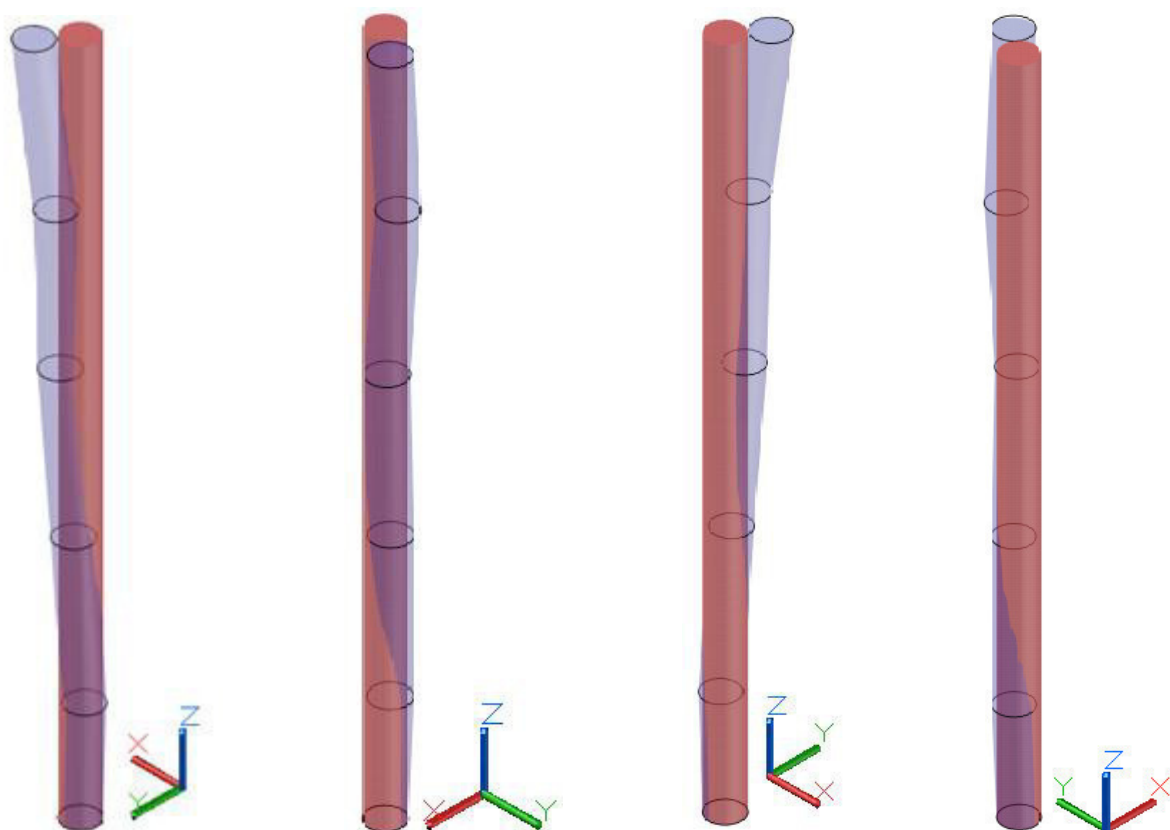
Dūmtraukių nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti elektroniniu tacheometru pateikti 3.5 ir 3.6 lentelėse bei 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 paveiksluose.

3.5 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti **elektroniniu tacheometru**

Skerspjūvio Nr.	Centro koordinatės, m		Skerspjūvio normalinis aukštis, m	Skerspjūvio aukštis apačios atžvilgiu, m	Nuokrypiai nuo vertikalės, mm			Direkcinis kampas	Orientavimas pasaulio šalių atžvilgiu
	x_C	y_C			Δx_T	Δy_T	Δl_T		
apačia	-	-	154,36	0,00	-	-	-	-	-
1	6055318,673	571389,061	154,45	0,09	0	0	0	0°	-
2	6055318,661	571389,062	157,82	3,46	-12	1	12	175°	PR
3	6055318,674	571389,076	161,39	7,03	1	15	15	86°	ŠR
4	6055318,695	571389,088	165,00	10,64	22	27	35	51°	ŠR
5	6055318,687	571389,108	168,58	14,22	14	47	49	73°	ŠR
6	6055318,724	571389,126	172,18	17,82	51	65	83	52°	ŠR
viršus	-	-	173,83	19,47	-	-	-	-	-



3.11 pav. Dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti elektroniniu tacheometru



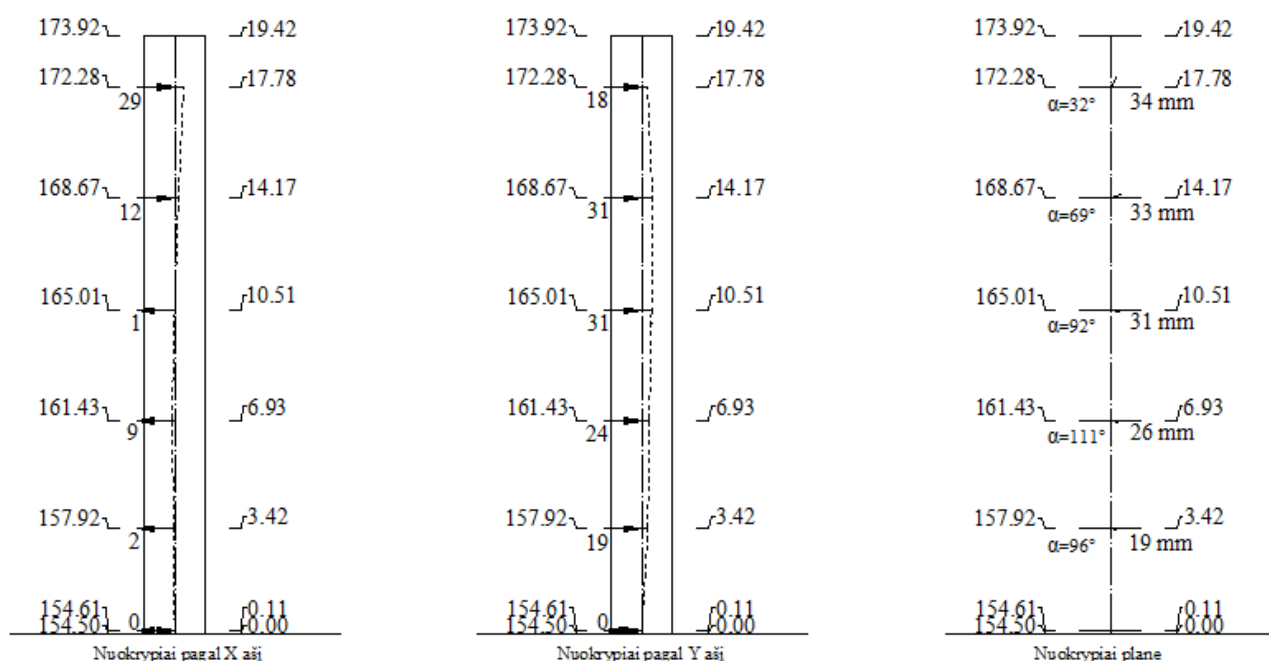
3.12 pav. Izometrinis (3D) dūmtraukio Nr.1 principinis brėžinys, išmatuotas elektroniniu tacheometru, kuriame vaizduojami nuokrypiai nuo vertikalės

3.5 lentelėje ir 3.11 paveiksle yra pateikti dūmtraukio Nr.1 horizontaliųjų deformacijų tyrimo rezultatai, kai matavimai buvo atliekami elektroniniu tacheometru. Nuokrypiai X ašyje svyruoja nuo -12 mm iki 51 mm, Y ašyje nuo 1 mm iki 65 mm, o bendras nuokrypis – nuo 12 mm iki 83 mm. Didžiausias nuokrypis nuo vertikalės yra 6 skerspjūvyje ir jis 8,3 cm. Iš gautų rezultatų galime daryti išvadą, kad didėjant aukščiui, kitaip sakant, skerspjūvio nr., nuokrypiai nuo vertikalės taip pat didėja.

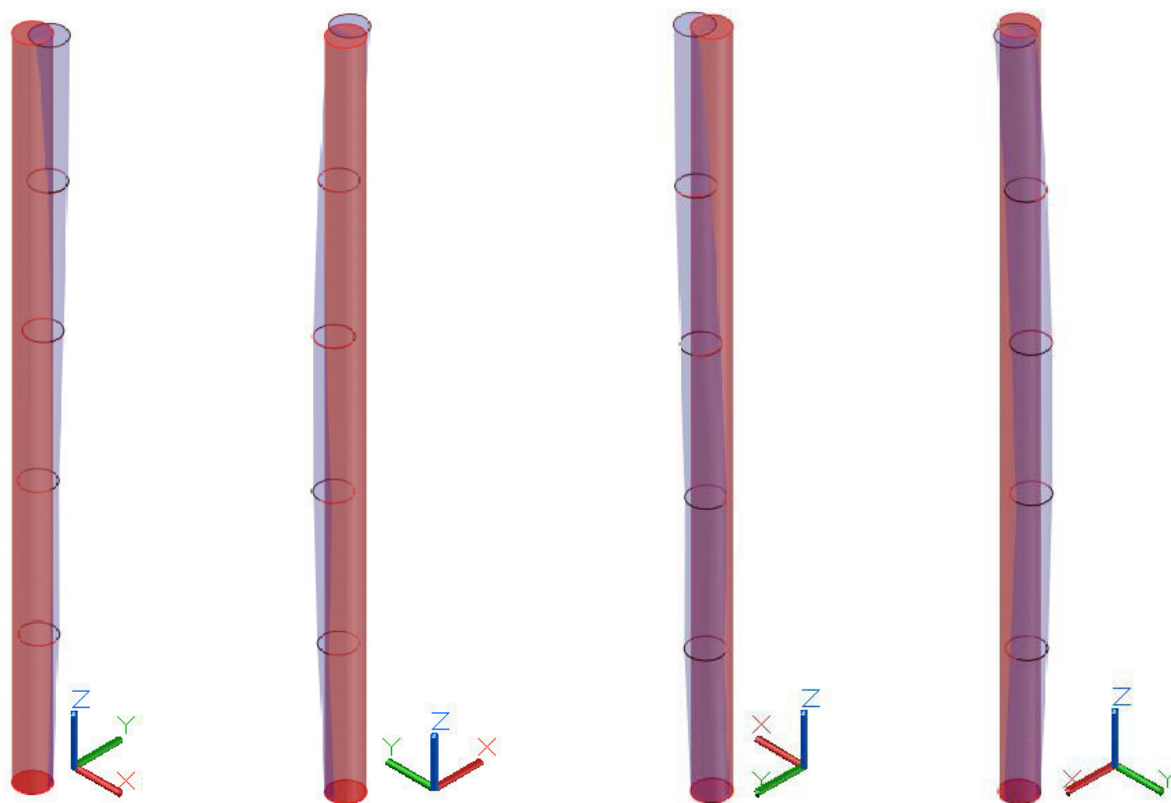
Norint dar aiškiau pamatyti nuokrypius nuo vertikalės sudaryti izometriniai (3D) brėžiniai. 3.12 paveiksle mėlyna spalva pavaizduota reali dūmtraukio Nr.1 padėtis, išmatuota elektroniniu tacheometru, o raudona vertikali dūmtraukio padėtis. Principinėje schemoje, kad būtų išraiškingesnis vaizdas, nuokrypiai nuo vertikalės padidinti 10 kartų.

3.6 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti **elektroniniu tacheometru**

Skerspjūvio Nr.	Centro koordinatės, m		Skerspjūvio normalinis aukštis, m	Skerspjūvio aukštis apačios atžvilgiu, m	Nuokrypiai nuo vertikalės, mm			Direkcinis kampas	Orientavimas pasaulio šalių atžvilgiu
	x_c	y_c			Δx_T	Δy_T	Δl_T		
apačia	-	-	154,50	0,00	-	-	-	-	-
1	6055325,391	571388,992	154,55	0,05	0	0	0	0°	-
2	6055325,389	571389,011	157,92	3,42	-2	19	19	96°	PR
3	6055325,382	571389,016	161,48	6,98	-9	24	26	111°	PR
4	6055325,390	571389,023	165,05	10,55	-1	31	31	92°	PR
5	6055325,403	571389,023	168,67	14,17	12	31	33	69°	ŠR
6	6055325,420	571389,010	172,28	17,78	29	18	34	32°	ŠR
viršus	-	-	173,92	19,42	-	-	-	-	-



3.13 pav. Dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti elektroniniu tacheometru



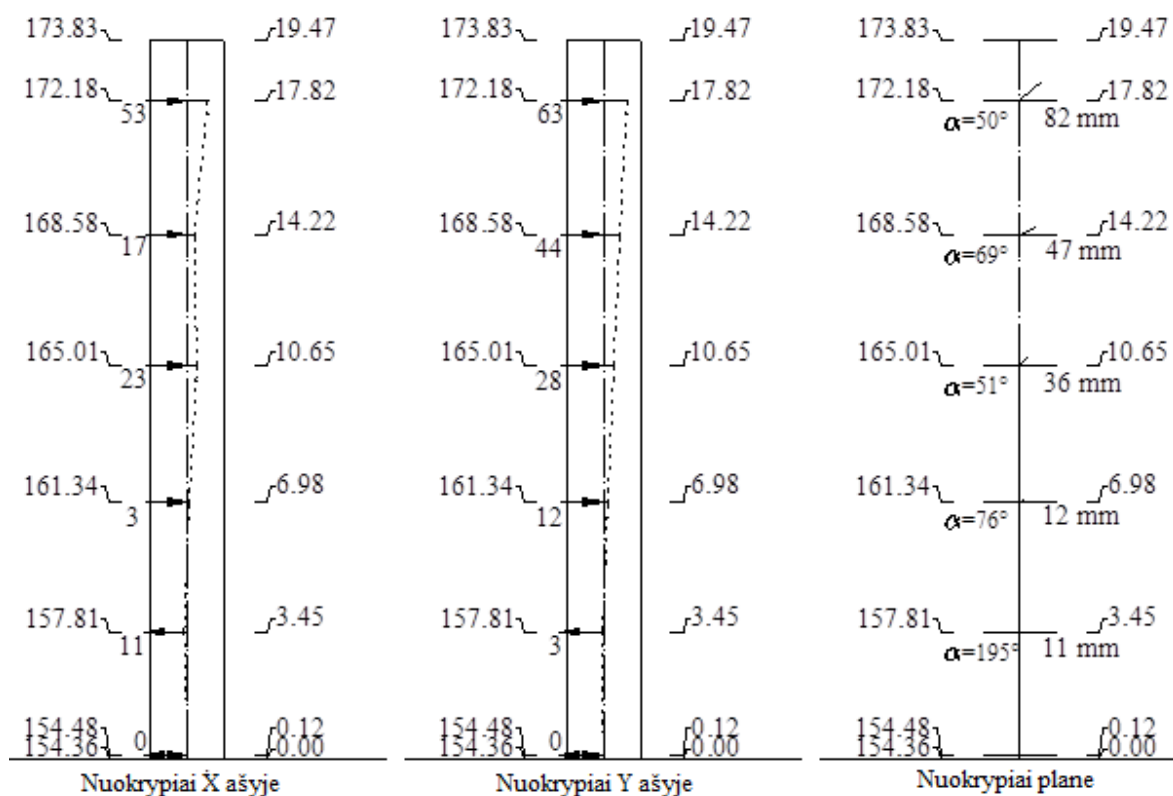
3.14 pav. Izometrinis (3D) dūmtraukio Nr.2 principinis brėžinys, išmatuotas elektroniniu tacheometru, kuriame vaizduojami nuokrypiai nuo vertikalės

3.6 lentelėje ir 3.13 paveiksle yra pateikti dūmtraukio Nr.2 horizontaliųjų deformacijų tyrimo rezultatai, kai matavimai buvo atliekami elektroniniu tacheometru. Nuokrypiai x ašyje svyruoja nuo -9 mm iki 29 mm, y ašyje nuo 18 mm iki 31 mm, o bendras nuokrypis – nuo 19 mm iki 34 mm. Didžiausias nuokrypis nuo vertikalės yra 6 skerspjūvyje ir jis siekia 3,4 cm. Taip pat, kaip ir 1-ame, taip ir 2-ame dūmtraukyje, iš gautų rezultatų galime daryti išvadą, kad didėjant aukščiui, kitaip sakant, skerspjūvio nr., nuokrypiai nuo vertikalės taip pat didėja.

3.14 paveiksle dūmtraukis Nr.2 vaizduojamas tokiais pačiais parametrais, kaip ir dūmtraukis Nr.1.

3.7 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti antžeminiu lazeriniu skeneriu

Skerspjūvio Nr.	Centro koordinatės, m		Skerspjūvio normalinis aukštis, m	Skerspjūvio aukštis apačios atžvilgiu, m	Nuokrypiai nuo vertikalės, mm			Direkcinis kampas	Orientavimas pasaulio šalių atžvilgiu
	x_c	y_c			Δx_s	Δy_s	Δl_s		
apačia	-	-	154,36	0,00	-	-	-	-	-
1	6055318,677	571389,065	154,48	0,12	0	0	0	0°	-
2	6055318,666	571389,062	157,81	3,45	-11	-3	11	195°	PV
3	6055318,680	571389,077	161,34	6,98	3	12	12	76°	ŠR
4	6055318,700	571389,093	165,01	10,65	23	28	36	51°	ŠR
5	6055318,694	571389,109	168,58	14,22	17	44	47	69°	ŠR
6	6055318,730	571389,128	172,18	17,82	53	63	82	50°	ŠR
viršus	-	-	173,83	19,47	-	-	-	-	-



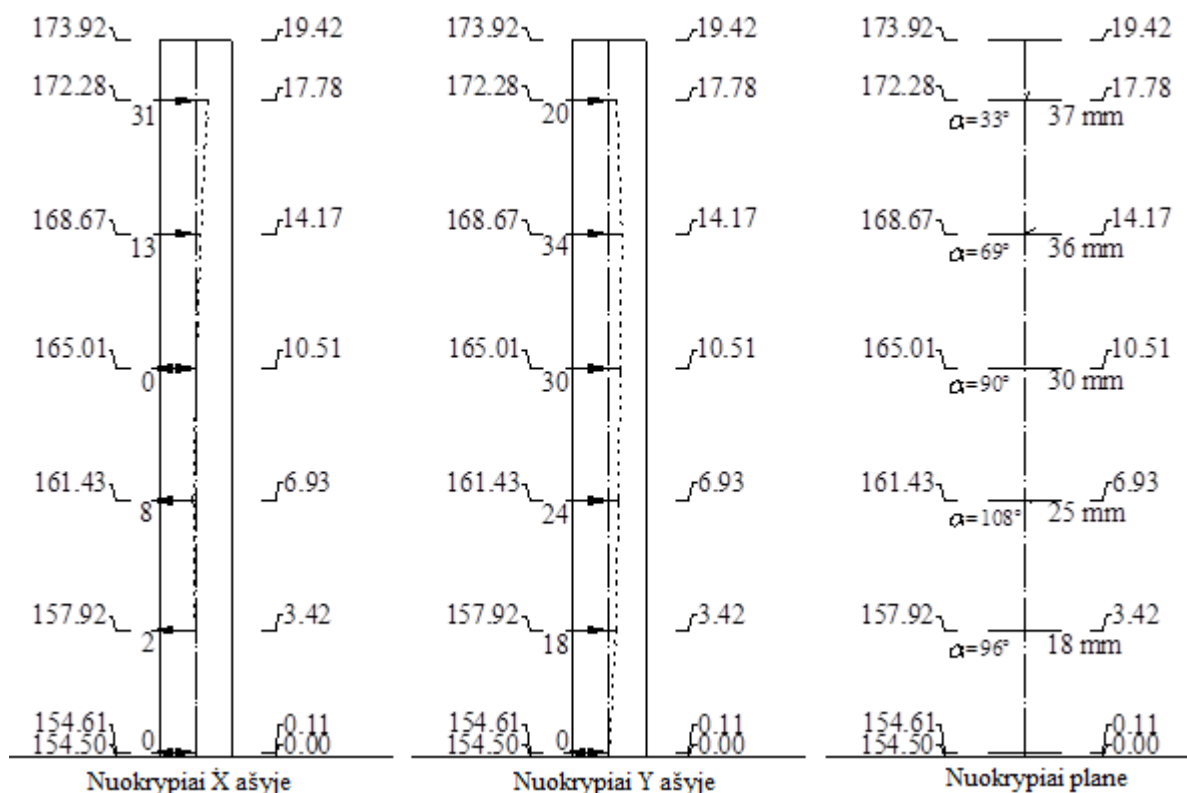
3.15 pav. Dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti antžeminiu lazeriniu skeneriu

3.7 lentelėje ir 3.15 paveiksle yra pateikti dūmtraukio Nr.1 horizontaliųjų deformacijų tyrimo rezultatai, kai matavimai buvo atliekami antžeminiu. Iš gautų rezultatų pastebėta, kad nuokrypiai x ašyje svyruoja nuo -11 mm iki 53 mm, y ašyje nuo -3 mm iki 63 mm, o bendras nuokrypis – nuo 11 mm iki 82 mm. Didžiausias nuokrypis nuo vertikalės yra 6 skerspjūvyje ir jis 8,2 cm. Iš gautų rezultatų galime daryti išvadą, kad didėjant aukščiui, kitaip sakant, skerspjūvio nr., nuokrypiai nuo vertikalės taip pat didėja.

Izometriniai (3D) brėžiniai, kuriuose yra dūmtraukiai Nr.1 ir Nr.2, nuskenuoti antžeminiu lazeriniu skeneriu, yra nevaizduojami, nes nuokrypiai yra maži ir jie vizualiai atrodo taip pačiai, kaip matuoti elektroniniu tacheometru.

3.8 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti antžeminiu lazeriniu skeneriu

Skerspjūvio Nr.	Centro koordinatės, m		Skerspjūvio normalinis aukštis, m	Skerspjūvio aukštis apačios atžvilgiu, m	Nuokrypiai nuo vertikalės, mm			Direkcinis kampas	Orientavimas pasaulio šalių atžvilgiu
	x_c	y_c			Δx_s	Δy_s	Δl_s		
apačia	-	-	154,50	0,00	-	-	-	-	-
1	6055325,394	571388,993	154,61	0,11	0	0	0	0°	-
2	6055325,392	571389,011	157,96	3,46	-2	18	18	96°	PR
3	6055325,386	571389,017	161,43	6,93	-8	24	25	108°	PR
4	6055325,394	571389,023	165,01	10,51	0	30	30	90°	R
5	6055325,407	571389,027	168,67	14,17	13	34	36	69°	ŠR
6	6055325,425	571389,013	172,28	17,78	31	20	37	33°	ŠR
viršus	-	-	173,92	19,42	-	-	-	-	-



3.16 pav. Dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti antžeminiu lazeriniu skeneriu

3.8 lentelėje ir 3.16 paveiksle yra pateikti dūmtraukio Nr.2 horizontaliųjų deformacijų tyrimo rezultatai, kai matavimai buvo atliekami antžeminiu. Iš gautų rezultatų pastebima, kad nuokrypiai x ašyje svyruoja nuo -8 mm iki 31 mm, y ašyje nuo 18 mm iki 34 mm, o bendras nuokrypis – 18 mm iki 37 mm. Didžiausias nuokrypis nuo vertikalės yra 6 skerspjūvyje ir jis 3,7 cm. Taip pat, kaip ir 1-ame, taip ir 2-ame dūmtraukyje, iš gautų rezultatų galime daryti išvadą, kad didėjant aukščiui, kitaip sakant, skerspjūvio nr., nuokrypiai nuo vertikalės taip pat didėja.

Lentelėse yra pateikiama dūmtraukių centrų kiekviename skerspjūvyje koordinatės LKS94 koordinatinių sistemoje, normaliniai aukščiai LAS07 aukščių sistemoje bei sąlyginiai aukščiai dūmtraukio apačios atžvilgiu. Taip pat yra apskaičiuoti koordinatinių skirtumai (dūmtraukių nuokrypiai nuo vertikalės) x ir y ašimis bei linijinis ir jo krypties kampas, pirmojo skerspjūvio atžvilgiu.

3.4. Gautų rezultatų palyginimas

Siekiant nustatyti gautus rezultatų panašumą, išmatavus skirtingais instrumentais, reikia palyginti dūmtraukių nuokrypius nuo vertikalės, kurie išmatuoti elektroniniu tacheometru ir antžeminiu lazeriniu skeneriu.

Kadangi nuokrypiai nustatyti dviem metodais ir daryta prielaida, kad jie yra vienodo tikslumo, dūmtraukio nuokrypio nuo vertikalės vienu metodu nustatymo tikslumo įvertinimas atliktas pagal dvigubųjų matavimų rezultatų skirtumus.

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{2n}} \quad (3.11)$$

Čia: ε – dvigubųjų matavimų rezultatų skirtumai;

n – skirtumų kiekis.

Galima nuokrypius apskaičiuoti pagal vidurkį, nustatytą abiem metodais, tada nuokrypio vidutinė kvadratinė paklaida būtų

$$m_v = m/\sqrt{2} \quad (3.12)$$

3.9 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas

Skerspjūvio Nr.	Nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti elektroniniu tacheometru, mm			Nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti antžeminiu lazeriniu skeneriu, mm			Nuokrypių nuo vertikalės skirtumai		
	Δx_T	Δy_T	Δl_T	Δx_S	Δy_S	Δl_S	ε_x^2	ε_y^2	ε_l^2
1	0	0	0	0	0	0			
2	-12	1	12	-11	-3	11	1	16	1
3	1	15	15	3	12	12	4	9	9
4	22	27	35	23	28	36	1	1	1
5	14	47	49	17	44	47	9	9	4
6	51	65	83	53	63	82	4	4	1
						Σ	19	39	16
						m	1,4	2,0	1,3

3.10 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas

Skerspjūvio Nr.	Nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti elektroniniu tacheometru, mm			Nuokrypiai nuo vertikalės išmatuoti antžeminiu lazeriniu skeneriu, mm			Nuokrypių nuo vertikalės skirtumai		
	Δx_T	Δy_T	Δl_T	Δx_S	Δy_S	Δl_S	ε_x^2	ε_y^2	ε_l^2
1	0	0	0	0	0	0			
2	-2	19	19	-2	18	18	0	1	1
3	-9	24	26	-8	24	25	1	0	1
4	-1	31	31	0	30	30	1	1	1
5	12	31	33	13	34	36	1	9	9
6	29	18	34	31	20	37	4	4	9
						Σ	7	15	21
						m	0,8	1,2	1,4

Naudojantis *AutoCAD Civil 3D 2015* programine įranga, palyginome dviejų skirtingų matavimo prietaisų gautus rezultatus, t. y. nuokrypių nuo vertikalės skirtumus, ir vizualiai jie yra

pateikti. 3.11, 3.13, 3.15 ir 3.16 paveiksluose yra pavaizduoti dūmtraukių Nr.1 ir Nr.2 dvimačiai (2D) modeliai, o 3.12 ir 3.14 paveiksluose trimačiai (3D) modeliai.

Abiejų dūmtraukių nuokrypių nuo vertikalės rezultatų nesutapimai, išmatuoti skirtingais prietaisais ir matavimo metodais, neviršija 4 mm. Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad X ašyje nuokrypio nuo vertikalės vidutinė kvadratinė paklaida neviršija 1,4 mm, Y ašyje – 2 mm, o vidurkio iš abiem metodais gautų rezultatų vidutinė kvadratinė paklaida neviršija 1,4 mm.

4. DŪMTRAUKIŲ HORIZONTALIŲJŲ DEFORMACIJŲ, NUSTATYTŲ PAGAL MATAVIMO DUOMENIS GAUTUS ANTŽEMINIŲ LAZERINIŲ SKENERIŲ MATUOJANT SKIRTINGĄ SKIRIAMĄJĄ GEBĄ, PALYGINIMAS

Lazeriniai skenavimo prietaisai vis dažniau naudojami įvairiose srityse, įskaitant, urbanizuotų vietovių modelių sudarymą, aukštybinių ar pramoninių statinių vertikalų deformacijų ar posvyrių nustatymą, architektūrinių paminklų renovaciją, medicininius ar kriminalinės policijos darbus ir pan. Nors tikslumo reikalavimai kiekvienai sričiai gali labai skirtis, tačiau erdvinė skiriamoji geba yra svarbus bet kurio lazerinio skenerio aspektas. Skirtingai negu klasikiniai geodeziniai matavimo metodai, antžeminiai lazeriniai skeneriai apima ne tik vieno taško tikslumą, bet ir apibrėžia 3D paviršiaus modeliavimo tikslumą (Zhu *et al.* 2008). Nuo skenavimo skiriamosios gebos priklauso taškų „debesies“ tankis. Skiriamoji geba nustato identifikuojamo objekto detalumą, kuris yra ypač svarbus, tarkim, kultūros paveldo objektų smulkių detalių nustatymui (Litchi *et al.* 2006: 141–160).

Skiriamoji geba yra klasifikuojama pagal kampą, atstumą ir intensyvumą. Matavimai dažniausiai atliekami naudojant kampinę skiriamąją gebą, kuri dar vadinama skiriamosios gebos rodikliu. Yra du pagrindiniai veiksniai, įtakojantys skiriamąją gebą, tai – erdvinis imties intervalas ir lazerio spindulio liemuo (*ang. Beam Waist*). Aukštesnė skiriamoji geba bus tada, kai bus didesnis taškų tankis ir mažesnis lazerio spindulio liemuo. Be to, jei skenavimo atstumas iki objekto padidės, tada taškų tankis sumažės ir lazerio spindulio liemuo padidės, tokiu būdu faktinė kampinė skiriamoji geba sumažės. Taip pat ir bet koks skenavimo kampo pokytis turi įtakos kampinei skiriamajai gebai (Zhu *et al.* 2008).

Šiame skyriuje yra palyginti abiejų dūmtraukių horizontaliosios deformacijos, kurių matavimams buvo naudojamas antžeminis lazerinis skeneris *Leica Scanstation C10*, o pats skenavimas buvo atliktas keturiomis skirtingomis skiriamosiomis gebomis (*ang. resolution*).

Taip pat atlikta skirtingomis skiriamosiomis gebomis gautų parametrų tikslumo analizė bei inžineriniai skaičiavimai dūmtraukių horizontaliosioms deformacijoms nustatyti.

4.1. Dūmtraukio Nr.1 matavimo rezultatų, gautų skenuojant skirtingomis skiriamosiomis gebomis, tikslumo analizė

Šiame poskyryje yra išnagrinėtos dūmtraukio Nr.1 horizontaliosios deformacijos, kurios apskaičiuotos naudojantis antžeminio lazerinio skenerio duomenimis, gautais skenuojant keturiomis skirtingomis skiriamosiomis gebomis: žema (*ang. low*), vidutine (*ang. medium*), aukšta (*ang. high*), aukščiausia (*ang. highest*).

11 lentelė. Antžeminio lazerinio skenerio *Leica Scanstation C10* skiriamosios gebos (Leica 2009)

Skiriamoji geba	Horizontalus atstumas tarp matuojamųjų taškų	Vertikalus atstumas tarp matuojamųjų taškų	Atstumas
Žema (<i>low</i>)	0,2 m	0,2 m	100 m
Vidutinė (<i>medium</i>)	0,1 m	0,1 m	100 m
Aukšta (<i>high</i>)	0,05 m	0,05 m	100 m
Auščiausia (<i>highest</i>)	0,02 m	0,02 m	100 m

Matavimai buvo atliekami iš dviejų stočių ST1 ir ST2. Atstumas nuo stoties ST1 iki 1-ojo dūmtraukio skerspjuvio Nr. 1 centro yra 20,62 m, o nuo stoties ST2 iki 1-ojo dūmtraukio skerspjuvio Nr. 1 centro – 29,09 m. Atliekant matavimus žema skiriamąja geba, objekto vidutinis taškų tankis yra apie 130 tšk./m², vidutine skiriamąja geba – apie 470 tšk./m², aukšta skiriamąja geba – apie 1880 tšk./m², aukščiausia skiriamąja geba – apie 22600 tšk./m².

Matavimo rezultatų apdorojimas atliktas naudojantis ta pačia metodika, kaip ir ankstesniuose skaičiavimuose, kuri yra aprašyta 3.3 poskyryje. Skaičiavimai visose skiriamosiose gebose atlikti tuose pačiuose 6 skerspjuviuose, t. y. skerspjuvių normaliniai aukščiai skirtingose skiriamose gebose yra vienodi. Gauti rezultatai pateikti 4.2, 4.3, 4.4 ir 4.5 lentelėse.

12 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (žema skiriamoji geba)

Skerspjuvio Nr.	Centro koordinatės, m		Skerspjuvio normalinis aukštis, m	Skerspjuvio aukštis apačios atžvilgiu, m	Nuokrypiai nuo vertikalės, mm			Direkcinis kampas	Orientavimas pasaulio šalių atžvilgiu
	x_c	y_c			Δx_{low}	Δy_{low}	Δl_{low}		
apačia	-	-	154,36	0,00	-	-	-	-	-
1	6055318,678	571389,062	154,45	0,09	0	0	0	0°	-
2	6055318,670	571389,062	157,82	3,46	-8	0	8	180°	P
3	6055318,680	571389,078	161,39	7,03	2	16	16	83°	ŠR
4	6055318,698	571389,098	165,00	10,64	20	36	41	61°	ŠR
5	6055318,692	571389,112	168,58	14,22	14	50	52	74°	ŠR
6	6055318,730	571389,129	172,18	17,82	52	67	85	52°	ŠR
viršus	-	-	173,83	19,47	-	-	-	-	-

13 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (vidutinė skiriamoji geba)

Skerspjuvio Nr.	Centro koordinatės, m		Skerspjuvio normalinis aukštis, m	Skerspjuvio aukštis apačios atžvilgiu, m	Nuokrypiai nuo vertikalės, mm			Direkcinis kampas	Orientavimas pasaulio šalių atžvilgiu
	x_c	y_c			Δx_{med}	Δy_{med}	Δl_{med}		
apačia	-	-	154,36	0,00	-	-	-	-	-
1	6055318,677	571389,069	154,45	0,09	0	0	0	0°	-
2	6055318,670	571389,062	157,82	3,46	-7	-7	10	225°	PV
3	6055318,679	571389,083	161,39	7,03	2	14	14	82°	ŠR
4	6055318,699	571389,094	165,00	10,64	22	25	33	49°	ŠR
5	6055318,693	571389,118	168,58	14,22	16	49	52	72°	ŠR
6	6055318,731	571389,131	172,18	17,82	54	62	82	49°	ŠR
viršus	-	-	173,83	19,47	-	-	-	-	-

14 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (aukšta skiriamoji geba)

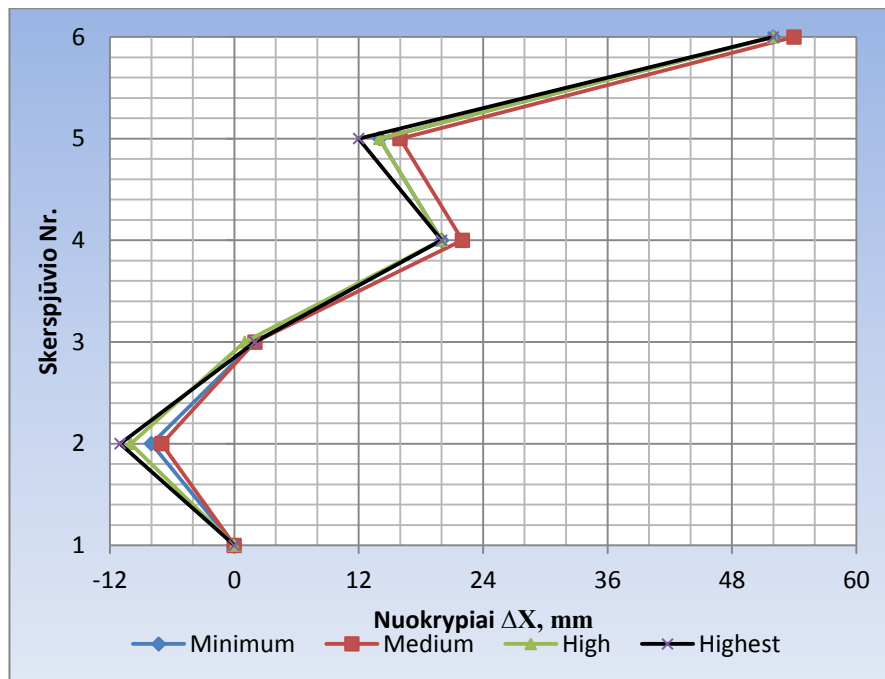
Skerspjūvio Nr.	Centro koordinatės, m		Skerspjūvio normalinis aukštis, m	Skerspjūvio aukštis apačios atžvilgiu, m	Nuokrypiai nuo vertikalės, mm			Direkcinis kampas	Orientavimas pasaulio šalių atžvilgiu
	x_c	y_c			Δx_{high}	Δy_{high}	Δl_{high}		
apačia	-	-	154,36	0,00	-	-	-	-	-
1	6055318,678	571389,065	154,45	0,09	0	0	0	0°	-
2	6055318,668	571389,063	157,82	3,46	-10	-2	10	191°	PV
3	6055318,679	571389,084	161,39	7,03	1	19	19	87°	ŠR
4	6055318,698	571389,095	165,00	10,64	20	30	36	56°	ŠR
5	6055318,692	571389,118	168,58	14,22	14	53	55	75°	ŠR
6	6055318,730	571389,129	172,18	17,82	52	64	82	51°	ŠR
viršus	-	-	173,83	19,47	-	-	-	-	-

15 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (aukščiausia skiriamoji geba)

Skerspjūvio Nr.	Centro koordinatės, m		Skerspjūvio normalinis aukštis, m	Skerspjūvio aukštis apačios atžvilgiu, m	Nuokrypiai nuo vertikalės, mm			Direkcinis kampas	Orientavimas pasaulio šalių atžvilgiu
	x_c	y_c			Δx_{high}	Δy_{high}	Δl_{high}		
apačia	-	-	154,36	0,00	-	-	-	-	-
1	6055318,678	571389,065	154,45	0,09	0	0	0	0°	-
2	6055318,667	571389,063	157,82	3,46	-11	-2	11	190°	PV
3	6055318,680	571389,084	161,39	7,03	2	19	19	84°	ŠR
4	6055318,698	571389,095	165,00	10,64	20	30	36	56°	ŠR
5	6055318,690	571389,119	168,58	14,22	12	54	55	77°	ŠR
6	6055318,730	571389,130	172,18	17,82	52	65	83	51°	ŠR
viršus	-	-	173,83	19,47	-	-	-	-	-

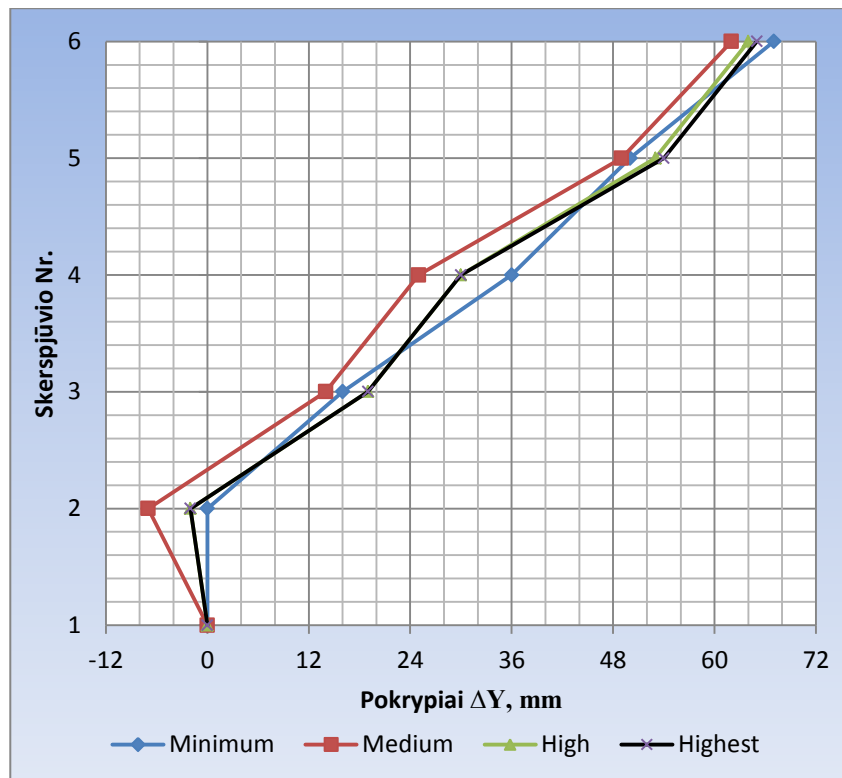
Iš gautų rezultatų pastebima, kad nuokrypiai nuo vertikalės, visomis skiriamosiomis gebomis, yra panašūs. Bendrai žiūrint į visas lenteles, nuokrypiai x ašyje svyruoja nuo -11 mm iki 52 mm, y ašyje nuo -7 mm iki 67 mm, o bendras nuokrypis – nuo 8 mm iki 83 mm. Didžiausias nuokrypis nuo vertikalės yra 6 skerspjūvyje, kai matavimai buvo atlikti žema skiriamąja geba, ir jis yra lygus 8,5 cm.

Visų dūmtraukio Nr.1 matavimų, skirtingomis skiriamosiomis gebomis, apskaičiuoti nuokrypiai nuo vertikalės yra pavaizduoti 4.1, 4.2 ir 4.3 paveiksluose.



4.1 pav. Dūmtraukio Nr.1 nuokrypiai pagal X ašį

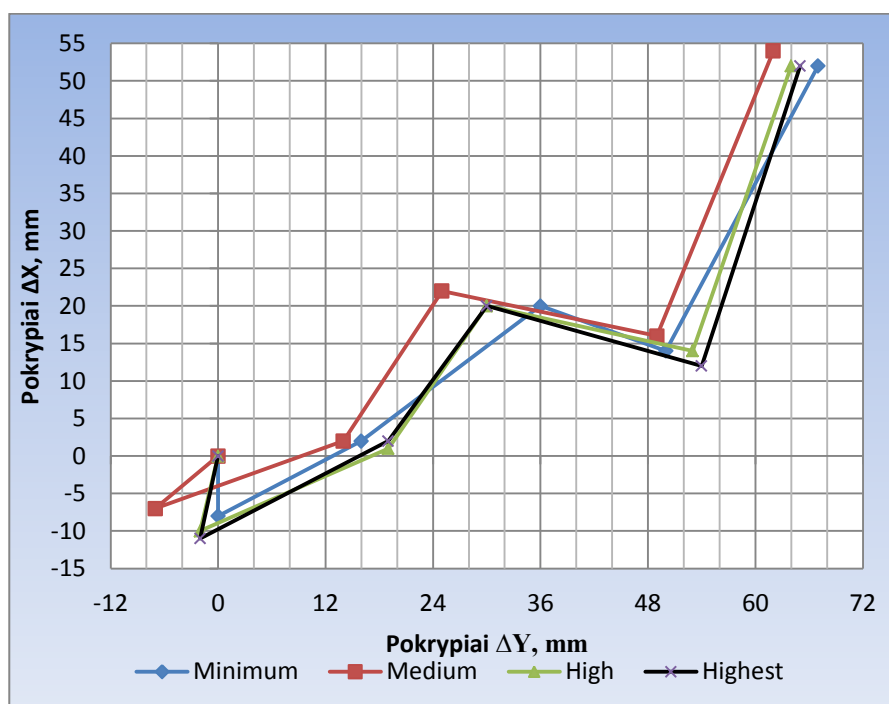
Iš 4.1 pav. matome, kad nuokrypiai pagal X ašį, skirtingomis skiriamosiomis gebomis, yra netolygūs. Didžiausia sklaida tarp rezultatų yra 2 ir 5 skerspjūviuose, o mažiausia – 3 ir 6 skerspjūviuose. Be to, mažiausi tarpusavio nuokrypių skirtumai yra tarp aukštos (*high*) ir aukščiausios (*highest*) skiriamųjų gebų.



4.2 pav. Dūmtraukio Nr.1 nuokrypiai pagal Y ašį

Iš 4.2 pav. matome, kad nuokrypiai pagal Y ašį, skirtingomis skiriamosiomis gebomis, taip pat yra netolygūs. Tarpusavio nuokrypių skirtumai tarp aukštos (*high*) ir aukščiausios (*highest*)

skiriamųjų gebų yra minimalūs. Kaip matome nuokrypiai pagal Y ašį yra didesni, lyginat pagal X ašį. Didžiausia sklaida tarp rezultatų yra 4 skerspjūvyje.



4.3 pav. Dūmtraukio Nr.1 nuokrypiai pagal X ir Y ašis

Iš 4.3 paveikslo matyti, kad nuokrypiai pagal X ir Y ašis skirtingomis skiriamosiomis gebomis, kaip ir visuose paveiksluose ir šitame yra netolygūs. Tarpusavio nuokrypių skirtumai tarp aukštos (*high*) ir aukščiausios (*highest*) skiriamųjų gebų yra minimalūs, o tarp žemos (*low*) ir vidutinės (*medium*) skirtumai yra didesni.

Taip pat buvo nustatyti dūmtraukio, išmatuoto skirtingomis skiriamosiomis gebomis, skirtumai ir jie tarpusavyje palyginti pagal 3.4 poskyryje aprašytą metodiką. Gauti rezultatai pateikti 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 ir 4.11 lentelėse.

16 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp žemos ir vidutinės skiriamosios gebos

Skerspjūvio Nr.	Nuokrypiai nuo vertikalės žemos skiriamosios gebos, mm			Nuokrypiai nuo vertikalės vidutinės skiriamosios gebos, mm			Nuokrypių nuo vertikalės skirtumai		
	Δx_{low}	Δy_{low}	Δl_{low}	Δx_{med}	Δy_{med}	Δl_{med}	ε_x^2	ε_y^2	ε_l^2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-8	0	8	-7	-7	10	1	49	4
3	2	16	16	2	14	14	0	4	4
4	20	36	41	22	25	33	4	121	64
5	14	50	52	16	49	52	4	1	0
6	52	67	85	54	62	82	4	25	9
						Σ	13	200	81
						m	1,1	4,5	2,8

17 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp žemos ir aukštos skiriamosios gebos

Skerspjūvio Nr.	Nuokrypiai nuo vertikalės <i>žemos</i> skiriamosios gebos, mm			Nuokrypiai nuo vertikalės <i>aukštos</i> skiriamosios gebos, mm			Nuokrypių nuo vertikalės skirtumai		
	Δx_{low}	Δy_{low}	Δl_{low}	Δx_{high}	Δy_{high}	Δl_{high}	ε_x^2	ε_y^2	ε_l^2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-8	0	8	-10	-2	10	4	4	4
3	2	16	1	16	19	19	1	9	9
4	20	36	41	20	30	36	0	36	25
5	14	50	52	14	53	55	0	9	9
6	52	67	85	52	64	82	0	9	9
						Σ	5	67	56
						m	0,7	2,6	2,4

18 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp žemos ir aukščiausios skiriamosios gebos

Skerspjūvio Nr.	Nuokrypiai nuo vertikalės <i>žemos</i> skiriamosios gebos, mm			Nuokrypiai nuo vertikalės <i>aukščiausios</i> skiriamosios gebos, mm			Nuokrypių nuo vertikalės skirtumai		
	Δx_{low}	Δy_{low}	Δl_{low}	$\Delta x_{highest}$	$\Delta y_{highest}$	$\Delta l_{highest}$	ε_x^2	ε_y^2	ε_l^2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-8	0	8	-11	-2	11	9	4	9
3	2	16	16	2	19	19	0	9	9
4	20	36	41	20	30	36	0	36	25
5	14	50	52	12	54	55	4	16	9
6	52	67	85	52	65	83	0	4	4
						Σ	13	69	56
						m	1,1	2,6	2,4

19 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp vidutinės ir aukštos skiriamosios gebos

Skerspjūvio Nr.	Nuokrypiai nuo vertikalės <i>vidutinės</i> skiriamosios gebos, mm			Nuokrypiai nuo vertikalės <i>aukštos</i> skiriamosios gebos, mm			Nuokrypių nuo vertikalės skirtumai		
	Δx_{med}	Δy_{med}	Δl_{med}	Δx_{high}	Δy_{high}	Δl_{high}	ε_x^2	ε_y^2	ε_l^2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-7	-7	10	-10	-2	10	9	25	0
3	2	14	14	1	19	19	1	25	25
4	22	25	33	20	30	36	4	25	9
5	16	49	52	14	53	55	4	16	9
6	54	62	82	52	64	82	4	4	0
						Σ	22	95	43
						m	1,5	3,1	2,1

20 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp vidutinės ir aukščiausios skiriamosios gebos

Skerspjūvio Nr.	Nuokrypiai nuo vertikalės vidutinės skiriamosios gebos, mm			Nuokrypiai nuo vertikalės aukščiausios skiriamosios gebos, mm			Nuokrypių nuo vertikalės skirtumai		
	Δx_{med}	Δy_{med}	Δl_{med}	$\Delta x_{highest}$	$\Delta y_{highest}$	$\Delta l_{highest}$	ε_x^2	ε_y^2	ε_l^2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-7	-7	10	-11	-2	11	16	25	1
3	2	14	14	2	19	19	0	25	25
4	22	25	33	20	30	36	4	25	9
5	16	49	52	12	54	55	16	25	9
6	54	62	82	52	65	83	4	9	1
						Σ	40	109	45
						m	2,0	3,3	2,1

21 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.1 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp aukštos ir aukščiausios skiriamosios gebos

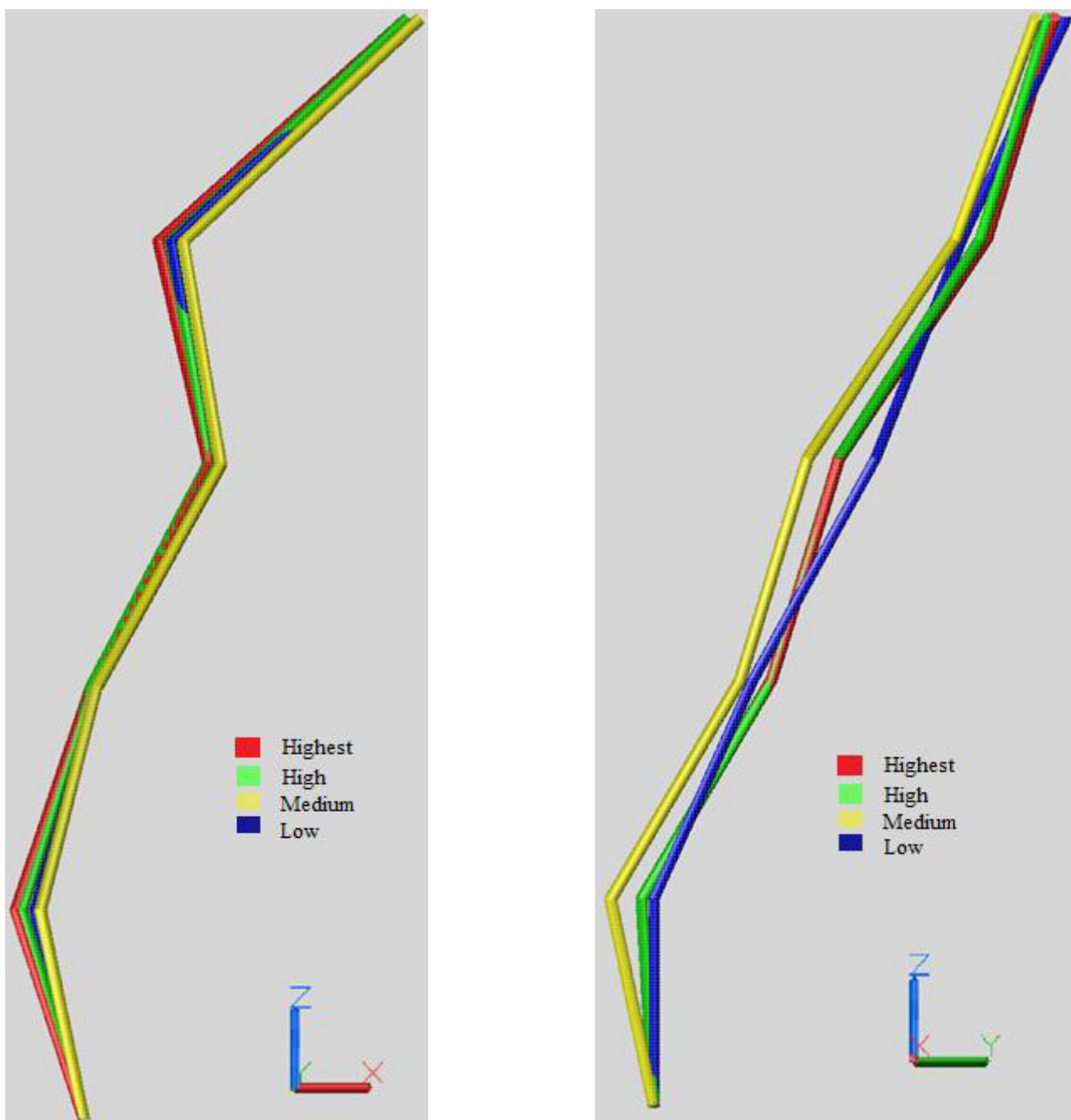
Skerspjūvio Nr.	Nuokrypiai nuo vertikalės aukštos skiriamosios gebos, mm			Nuokrypiai nuo vertikalės aukščiausios skiriamosios gebos, mm			Nuokrypių nuo vertikalės skirtumai		
	Δx_{high}	Δy_{high}	Δl_{high}	$\Delta x_{highest}$	$\Delta y_{highest}$	$\Delta l_{highest}$	ε_x^2	ε_y^2	ε_l^2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-10	-2	10	-11	-2	11	1	0	1
3	1	19	19	2	19	19	1	0	0
4	20	30	36	20	30	36	0	0	0
5	14	53	55	12	54	55	4	1	0
6	52	64	82	52	65	83	0	1	1
						Σ	6	2	2
						m	0,8	0,4	0,4

Dūmtraukio Nr.1 nuokrypių nuo vertikalės rezultatų nesutapimai, išmatuoti skirtingomis skiriamosiomis gebomis, pagal X ašį neviršija 4 mm, o pagal Y ašį neviršija 6 mm. Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad X ašyje nuokrypio nuo vertikalės vidutinė kvadratinė paklaida neviršija 2 mm, Y ašyje – 4,5 mm, o vidurkio iš skenuojant keturiomis skirtingomis skiriamosiomis gebomis gautų rezultatų vid. kv. paklaida neviršija 2,8 mm.

Mažiausi nuokrypių nuo vertikalės skirtumai buvo užfiksuoti, kaip ir galima buvo tikėtis, tarp aukštos ir aukščiausios skiriamosios gebos. Nuokrypių nuo vertikalės rezultatų nesutapimai pagal X ašį neviršijo 2 mm, o pagal Y ašį – 1 mm. Taip pat X ašyje nuokrypio nuo vertikalės vidutinė kvadratinė paklaida neviršija 0,8 mm, Y ašyje – 0,4 mm, o gautų rezultatų vidutinė kvadratinė paklaida neviršija 0,4 mm. Mažiausi nuokrypiai užfiksuoti, nes skaičiavimai buvo atliekami iš didelio kiekio taškų (anksčiau buvo minėta, kad aukšta skiriamąja geba – apie 1880 tšk./m², aukščiausia skiriamąja geba – apie 22600 tšk./m²).

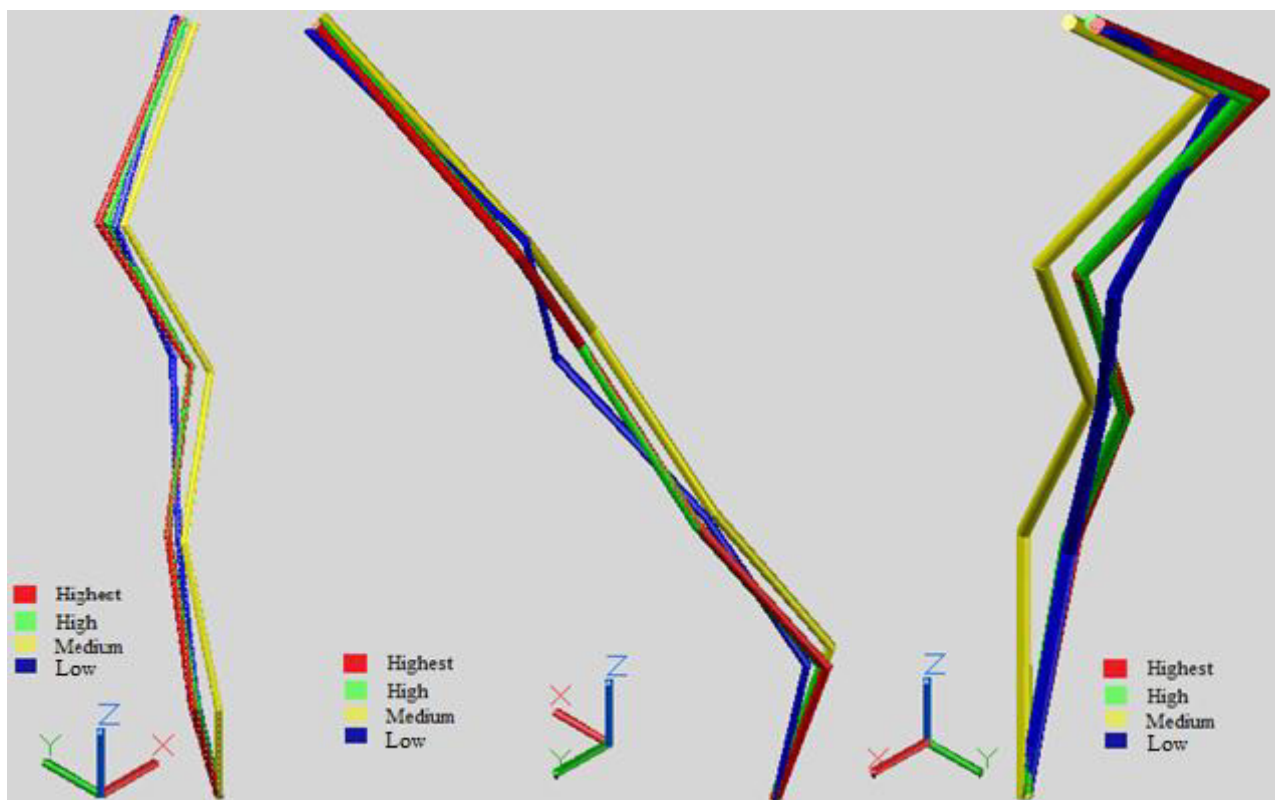
Didžiausi nuokrypių nuo vertikalės skirtumai pagal X ašį yra tarp vidutinės ir aukščiausios skiriamosios gebos, kurios vidutinė kvadratinė paklaida siekė 2 mm. Pagal Y ašį, tarp žemos ir vidutinės skiriamosios gebos, vidutinė kvadratinė paklaida yra 4,6 mm, o gautų rezultatų vid. kv. paklaida siekė 2,8 mm.

Pagal gautus rezultatus yra pateiktas 4.4 paveikslas, kuriame yra pavaizduoti nuokrypiai nuo vertikalės skirtingomis skiriamosiomis gebomis. Kad būtų išraiškingesnis vaizdas buvo sumažintas dūmtraukio spindulys iki 10 cm, o nuokrypiai nuo vertikalės padidinti 100 kartų. Mėlyna spalva žymima žema skiriamąja geba skenuotas dūmtraukis, vidutine skiriamąja geba – geltona spalva, aukšta skiriamąja geba – žalia spalva, o aukščiausia skiriamąja geba – raudona spalva.



4.4 pav. Nuokrypiai nuo vertikalės skirtingomis skiriamosiomis gebomis (kairėje nuokrypiai pagal X ašį, dešinėje pagal Y ašį)

Norint dar aiškiau pamatyti nuokrypius nuo vertikalės skirtingomis skiriamosiomis gebomis sudaryti izometriniai, kitaip sakant 3D brėžiniai. Mėlyna spalva žymima žema skiriamąja geba skenuotas dūmtraukis, vidutine skiriamąja geba – geltona spalva, aukšta skiriamąja geba – žalia spalva, o aukščiausia skiriamąja geba – raudona spalva.



4.5 pav. Izometriniai (3D) dūmtraukio Nr.1 brėžiniai, vaizduojantys nuokrypius nuo vertikalės skirtingomis skiriamosiomis gebomis

4.2. Dūmtraukio Nr.2 matavimo rezultatų, gautų skenuojant skirtingomis skiriamosiomis gebomis, tikslumo analizė

Kaip ir 4.1 poskyryje, taip ir šitame išnagrinėta jau nebe 1-ojo, o 2-ojo dūmtraukio horizontaliosios deformacijos, kurios apskaičiuotos naudojantis antžeminio lazerinio skenerio duomenimis, gautais skenuojant keturiomis skirtingomis skiriamosiomis gebomis.

Matavimai taip pat buvo atlikti iš tų pačių dviejų stočių ST1 ir ST2. Atstumas nuo stoties ST1 iki 2-ojo dūmtraukio skerspjūvio Nr. 1 centro yra 21,45 m, o nuo stoties ST2 iki 2-ojo dūmtraukio skerspjūvio Nr. 2 centro – 23,31 m. Atliekant matavimus žema skiriamąja geba, objekto vidutinis taškų tankis yra apie 190 tšk./m², vidutine skiriamąja geba – apie 730 tšk./m², aukšta skiriamąja geba – apie 2830 tšk./m², aukščiausia skiriamąja geba – apie 33000 tšk./m².

Matavimo rezultatų apdorojimas atliktas naudojantis ta pačia metodika, kaip ir ankstesniuose skaičiavimuose, kuri yra aprašyta 3.3 poskyryje. Skaičiavimai visose skiriamosiose gebose atlikti tuose pačiuose 6 skerspjūviuose. Gauti rezultatai pateikti 4.12, 4.13, 4.14 ir 4.15 lentelėse.

22 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (žema skiriamoji geba)

Skerspjūvio Nr.	Centro koordinatės, m		Skerspjūvio normalinis aukštis, m	Skerspjūvio aukštis apačios atžvilgiu, m	Nuokrypiai nuo vertikalės, mm			Direkcinis kampas	Orientavimas pasaulio šalių atžvilgiu
	x_c	y_c			Δx_{low}	Δy_{low}	Δl_{low}		
apačia	-	-	154,50	0,00	-	-	-	-	-
1	6055325,394	571388,990	154,55	0,05	0	0	0	0°	-
2	6055325,394	571389,012	157,92	3,42	0	22	22	90°	R
3	6055325,385	571389,020	161,39	6,89	-9	30	31	107°	PR
4	6055325,394	571389,022	165,00	10,50	0	32	32	90°	R
5	6055325,406	571389,031	168,58	14,08	12	41	43	74°	ŠR
6	6055325,423	571389,016	172,18	17,68	29	26	39	42°	ŠR
viršus	-	-	173,92	19,42	-	-	-	-	-

23 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (vidutinė skiriamoji geba)

Skerspjūvio Nr.	Centro koordinatės, m		Skerspjūvio normalinis aukštis, m	Skerspjūvio aukštis apačios atžvilgiu, m	Nuokrypiai nuo vertikalės, mm			Direkcinis kampas	Orientavimas pasaulio šalių atžvilgiu
	x_c	y_c			Δx_{med}	Δy_{med}	Δl_{med}		
apačia	-	-	154,50	0,00	-	-	-	-	-
1	6055325,393	571388,990	154,55	0,05	0	0	0	0°	-
2	6055325,394	571389,013	157,92	3,42	1	23	23	88°	ŠR
3	6055325,385	571389,022	161,39	6,89	-8	32	33	104°	PR
4	6055325,395	571389,025	165,00	10,50	2	35	35	87°	ŠR
5	6055325,408	571389,036	168,58	14,08	15	46	48	72°	ŠR
6	6055325,426	571389,021	172,18	17,68	33	31	45	43°	ŠR
viršus	-	-	173,92	19,42	-	-	-	-	-

24 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (aukšta skiriamoji geba)

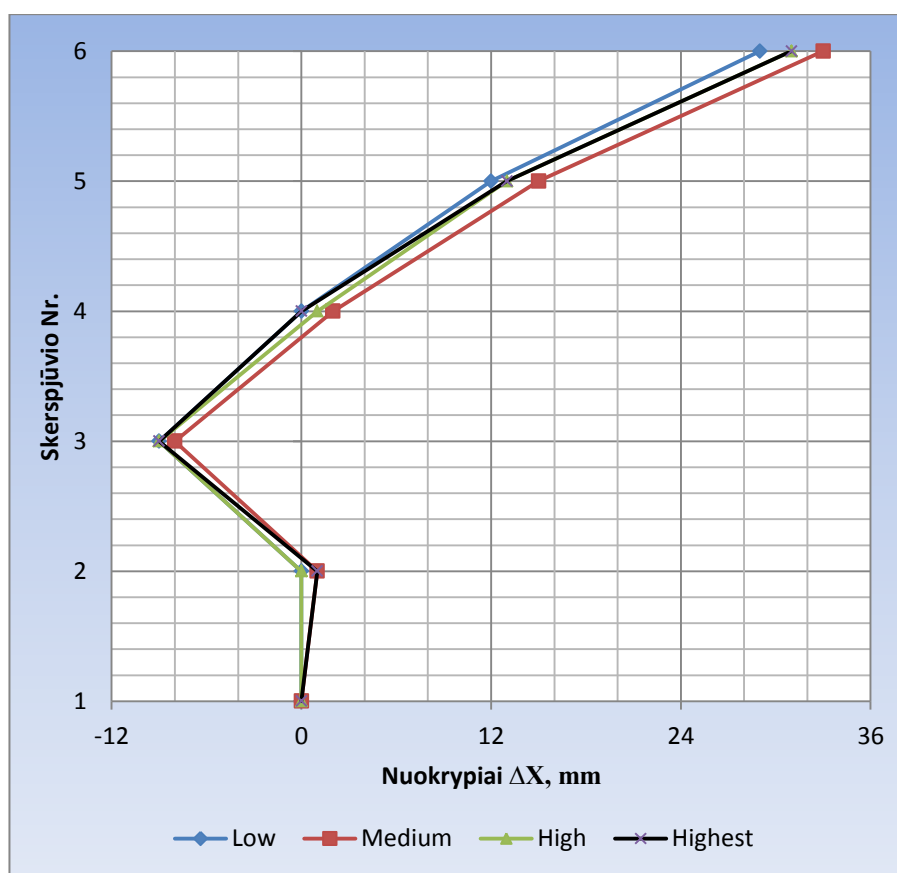
Skerspjūvio Nr.	Centro koordinatės, m		Skerspjūvio normalinis aukštis, m	Skerspjūvio aukštis apačios atžvilgiu, m	Nuokrypiai nuo vertikalės, mm			Direkcinis kampas	Orientavimas pasaulio šalių atžvilgiu
	x_c	y_c			Δx_{high}	Δy_{high}	Δl_{high}		
apačia	-	-	154,50	0,00	-	-	-	-	-
1	6055325,394	571388,989	154,55	0,05	0	0	0	0°	-
2	6055325,394	571389,013	157,92	3,42	0	24	24	90°	R
3	6055325,385	571389,023	161,39	6,89	-9	34	35	105°	PR
4	6055325,395	571389,024	165,00	10,50	1	35	35	88°	ŠR
5	6055325,407	571389,035	168,58	14,08	13	46	48	74°	ŠR
6	6055325,425	571389,017	172,18	17,68	31	28	42	42°	ŠR
viršus	-	-	173,92	19,42	-	-	-	-	-

25 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypiai nuo vertikalės (aukščiausia skiriamoji geba)

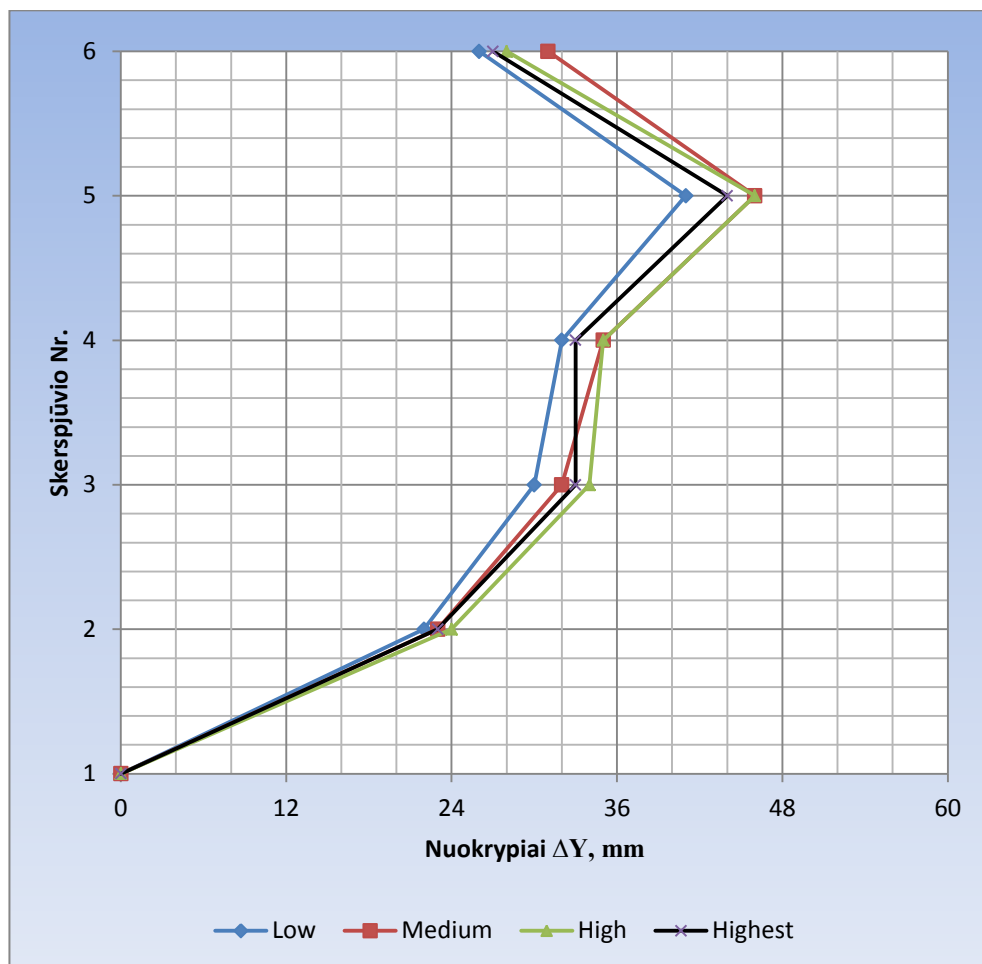
Skerspjūvio Nr.	Centro koordinatės, m		Skerspjūvio normalinis aukštis, m	Skerspjūvio aukštis apačios atžvilgiu, m	Nuokrypiai nuo vertikalės, mm			Direkcinis kampas	Orientavimas pasaulio šalių atžvilgiu
	x_c	y_c			Δx_{high}	Δy_{high}	Δl_{high}		
apačia	-	-	154,50	0,00	-	-	-	-	-
1	6055325,394	571388,990	154,55	0,05	0	0	0	0°	-
2	6055325,395	571389,013	157,92	3,42	1	23	23	88°	ŠR
3	6055325,385	571389,023	161,39	6,89	-9	33	34	105°	PR
4	6055325,394	571389,023	165,00	10,50	0	33	33	90°	R
5	6055325,407	571389,034	168,58	14,08	13	44	46	74°	ŠR
6	6055325,425	571389,017	172,18	17,68	31	27	41	41°	ŠR
viršus	-	-	173,92	19,42	-	-	-	-	-

Iš gautų rezultatų matyti, kad nuokrypiai nuo vertikalės, visomis skiriamosiomis gebomis, kiekviename sektoriuje yra panašūs. Bendrai žiūrint į visas lenteles, nuokrypiai x ašyje svyruoja nuo -9 mm iki 33 mm, y ašyje nuo 22 mm iki 46 mm, o bendras nuokrypis – nuo 22 mm iki 48 mm. Didžiausias nuokrypis nuo vertikalės yra 5 skerspjūvyje, kai matavimai buvo atlikti vidutine ir aukšta skiriamąja geba, ir jis yra lygus 4,8 cm.

Visų dūmtraukio Nr.2 matavimų, skirtingomis skiriamosiomis gebomis, apskaičiuoti skerspjūvių nuokrypiai nuo vertikalės yra pavaizduoti 4.6, 4.7 ir 4.8 paveiksluose.

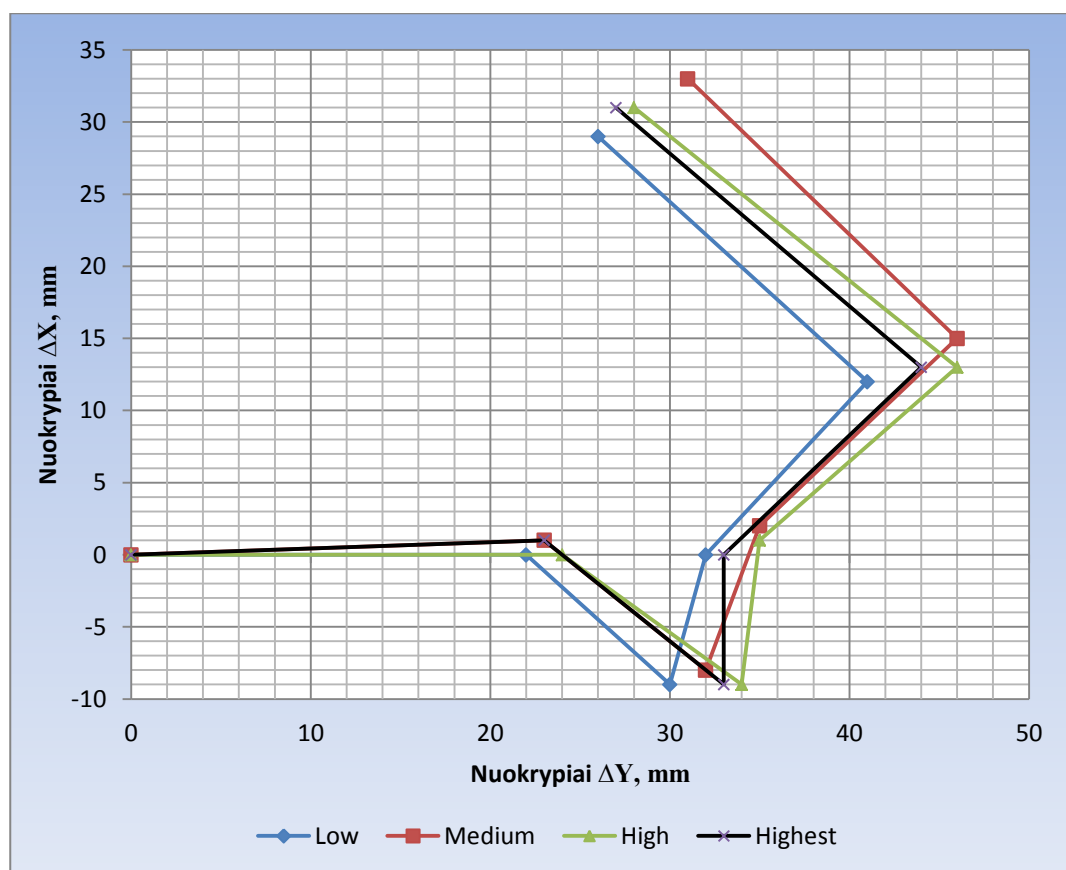
**4.6 pav.** Dūmtraukio Nr.2 nuokrypiai pagal X ašį

4.6 paveiksle matyti, kad nuokrypiai pagal X ašį, skirtingomis skiriamosiomis gebomis, yra netolygūs iki skerspjūvio Nr.3, o nuo Nr.4 iki Nr.6 galima įžvelgti tolygiai kintančią tendenciją. Didžiausia sklaida tarp rezultatų yra 5 ir 6 skerspjūviuose, o mažiausia – 2 ir 3 skerspjūviuose. Taip pat, mažiausi tarpusavio nuokrypių skirtumai yra tarp aukštos (*high*) ir aukščiausios (*highest*) skiriamųjų gebų.



4.7 pav. Dūmtraukio Nr.2 nuokrypiai pagal Y ašį

Iš 4.7 paveikslo matyti, kad nuokrypiai pagal Y ašį, skirtingomis skiriamosiomis gebomis, yra netolygūs. Priešingai negu pagal X ašį, pastebimi didesni tarpusavio nuokrypių skirtumai tarp aukštos (*high*) ir aukščiausios (*highest*) skiriamųjų gebų. Nuokrypiai pagal Y ašį yra didesni, lyginat pagal X ašį. Didžiausia sklaida tarp rezultatų taip pat yra 5 ir 6 skerspjūvyje, o mažiausia – 2 skerspjūvyje.



4.8 pav. Dūmtraukio Nr.2 nuokrypiai pagal X ir Y ašis

Iš 4.8 paveikslo matyti, kad nuokrypiai pagal X ir Y ašis, skirtingomis skiriamosiomis gebomis, taip pat yra netolygūs. Tarpusavio nuokrypių skirtumai tarp aukštos (*high*) ir aukščiausios (*highest*) skiriamųjų gebų mažiausiai skiriasi, o tarp žemos (*low*) ir vidutinės (*medium*) skirtumai yra didesni.

Taip pat buvo nustatyti dūmtraukio Nr.2, išmatuoto skirtingomis skiriamosiomis gebomis, skirtumai ir jie tarpusavyje palyginti pagal 3.4 poskyryje aprašytą metodiką. Gauti rezultatai pateikti 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 ir 4.21 lentelėse.

26 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp žemos ir vidutinės skiriamosios gebos

Skerspjuvio Nr.	Nuokrypiai nuo vertikalės žemos skiriamosios gebos, mm			Nuokrypiai nuo vertikalės vidutinės skiriamosios gebos, mm			Nuokrypių nuo vertikalės skirtumai		
	Δx_{low}	Δy_{low}	Δl_{low}	Δx_{med}	Δy_{med}	Δl_{med}	ε_x^2	ε_y^2	ε_l^2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	22	22	1	23	23	1	1	1
3	-9	30	31	-8	32	33	1	4	4
4	0	32	32	2	35	35	4	9	9
5	12	41	43	15	46	48	9	25	25
6	29	26	39	33	31	45	16	25	36
						Σ	31	64	75
						m	1,8	2,5	2,7

27 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp žemos ir aukštos skiriamosios gebos

Skerspjūvio Nr.	Nuokrypiai nuo vertikalės žemos skiriamosios gebos, mm			Nuokrypiai nuo vertikalės aukštos skiriamosios gebos, mm			Nuokrypių nuo vertikalės skirtumai		
	Δx_{low}	Δy_{low}	Δl_{low}	Δx_{high}	Δy_{high}	Δl_{high}	ε_x^2	ε_y^2	ε_l^2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	22	22	0	24	24	0	4	4
3	-9	30	31	-9	34	35	0	16	16
4	0	32	32	1	35	35	1	9	9
5	12	41	43	13	46	48	1	25	25
6	29	26	39	31	28	42	4	4	9
						Σ	6	58	63
						m	0,8	2,4	2,5

28 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp žemos ir aukščiausios skiriamosios gebos

Skerspjūvio Nr.	Nuokrypiai nuo vertikalės žemos skiriamosios gebos, mm			Nuokrypiai nuo vertikalės aukščiausios skiriamosios gebos, mm			Nuokrypių nuo vertikalės skirtumai		
	Δx_{low}	Δy_{low}	Δl_{low}	$\Delta x_{highest}$	$\Delta y_{highest}$	$\Delta l_{highest}$	ε_x^2	ε_y^2	ε_l^2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	22	22	1	23	23	1	1	1
3	-9	30	31	-9	33	34	0	9	9
4	0	32	32	0	33	33	0	1	1
5	12	41	43	13	44	46	1	9	9
6	29	26	39	31	27	41	4	1	4
						Σ	6	21	24
						m	0,8	1,4	1,5

29 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp vidutinės ir aukštos skiriamosios gebos

Skerspjūvio Nr.	Nuokrypiai nuo vertikalės vidutinės skiriamosios gebos, mm			Nuokrypiai nuo vertikalės aukštos skiriamosios gebos, mm			Nuokrypių nuo vertikalės skirtumai		
	Δx_{med}	Δy_{med}	Δl_{med}	Δx_{high}	Δy_{high}	Δl_{high}	ε_x^2	ε_y^2	ε_l^2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	23	23	0	24	24	1	1	1
3	-8	32	33	-9	34	35	1	4	4
4	2	35	35	1	35	35	1	0	0
5	15	46	48	13	46	48	4	0	0
6	33	31	45	31	28	42	4	9	9
						Σ	11	14	14
						m	1,0	1,2	1,2

30 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp vidutinės ir aukščiausios skiriamosios gebos

Skerspjūvio Nr.	Nuokrypiai nuo vertikalės vidutinės skiriamosios gebos, mm			Nuokrypiai nuo vertikalės aukščiausios skiriamosios gebos, mm			Nuokrypių nuo vertikalės skirtumai		
	Δx_{med}	Δy_{med}	Δl_{med}	$\Delta x_{highest}$	$\Delta y_{highest}$	$\Delta l_{highest}$	ε_x^2	ε_y^2	ε_l^2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	23	23	1	23	23	0	0	0
3	-8	32	33	-9	33	34	1	1	1
4	2	35	35	0	33	33	4	4	4
5	15	46	48	13	44	46	4	4	4
6	33	31	45	31	27	41	4	16	16
						Σ	13	25	25
						m	1,1	1,6	1,6

31 lentelė. Trakų Vokės dūmtraukio Nr.2 H=20 m nuokrypių nustatymo tikslumo įvertinimas tarp aukštos ir aukščiausios skiriamosios gebos

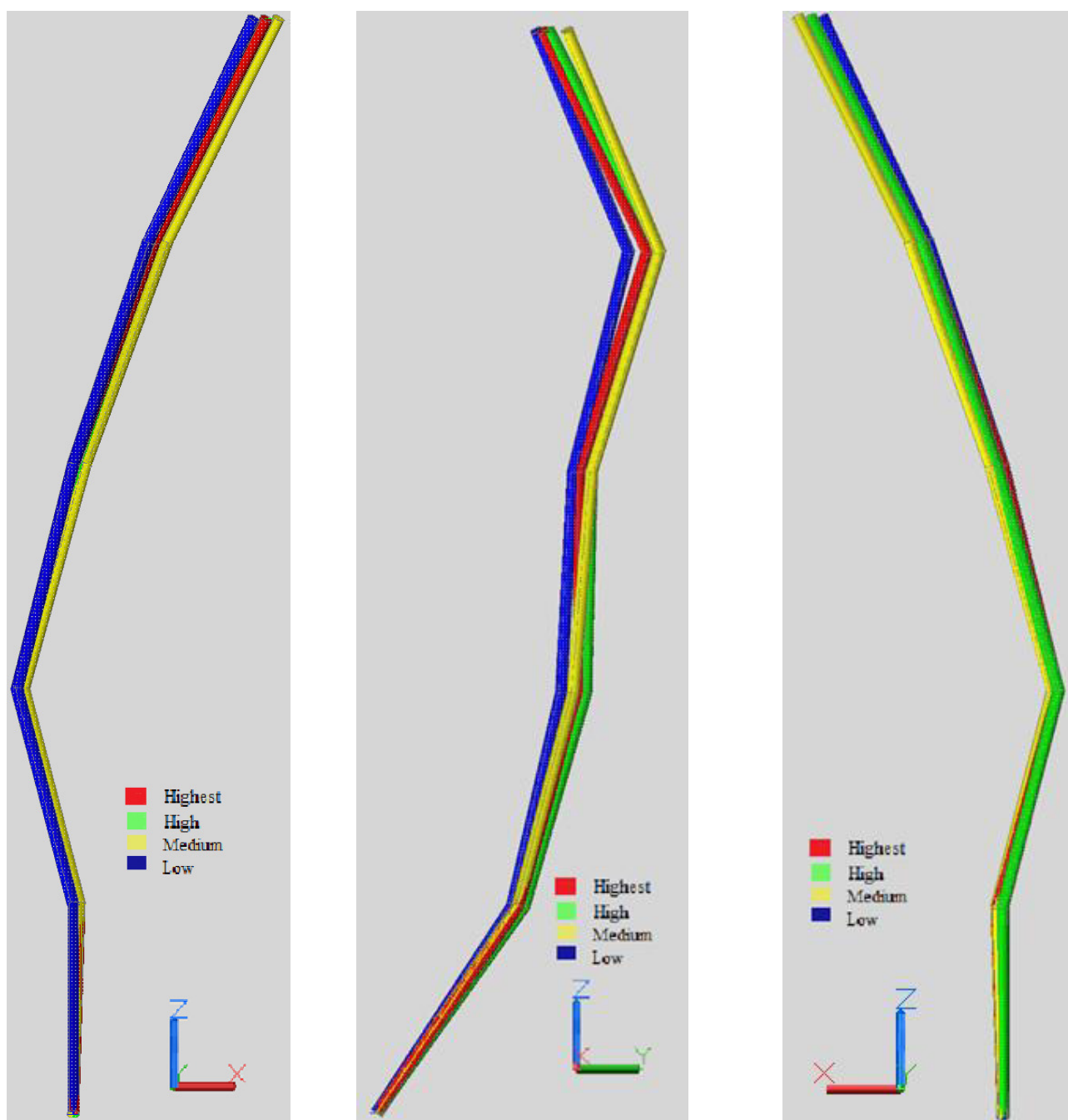
Skerspjūvio Nr.	Nuokrypiai nuo vertikalės aukštos skiriamosios gebos, mm			Nuokrypiai nuo vertikalės aukščiausios skiriamosios gebos, mm			Nuokrypių nuo vertikalės skirtumai		
	Δx_{high}	Δy_{high}	Δl_{high}	$\Delta x_{highest}$	$\Delta y_{highest}$	$\Delta l_{highest}$	ε_x^2	ε_y^2	ε_l^2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	24	24	1	23	23	1	1	1
3	-9	34	35	-9	33	34	0	1	1
4	1	35	35	0	33	33	1	4	4
5	13	46	48	13	44	46	0	4	4
6	31	28	42	31	27	41	0	1	1
						Σ	2	11	11
						m	0,4	1,0	1,0

Dūmtraukio Nr.2 nuokrypių nuo vertikalės rezultatų nesutapimai, išmatuoti skirtingomis skiriamosiomis gebomis, pagal X ašį neviršija 4 mm, o pagal Y ašį neviršija 5 mm. Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad X ašyje nuokrypio nuo vertikalės vidutinė kvadratinė paklaida neviršija 1,8 mm, Y ašyje – 2,5 mm, o vidurkio iš skenuojant keturiomis skirtingomis skiriamosiomis gebomis gautų rezultatų vidutinė kvadratinė paklaida neviršija 2,7 mm.

Mažiausi nuokrypių nuo vertikalės skirtumai buvo užfiksuoti, kaip ir dūmtraukio Nr.1, tarp aukštos ir aukščiausios skiriamosios gebos. Nuokrypių nuo vertikalės rezultatų nesutapimai pagal X ašį neviršijo 1 mm, o pagal Y ašį – 2 mm. Taip pat X ašyje nuokrypio nuo vertikalės vidutinė kvadratinė paklaida neviršija 0,4 mm, Y ašyje – 1,0 mm, o gautų rezultatų vid. kv. paklaida neviršija 1 mm. Mažiausi nuokrypiai užfiksuoti, kai skaičiavimai buvo atliekami iš didelio kiekio taškų. Taškų tankumas skenuojant aukštą skiriamąją gebą buvo apie 2830 tšk./m², o aukščiausia skiriamąją gebą – apie 33000 tšk./m².

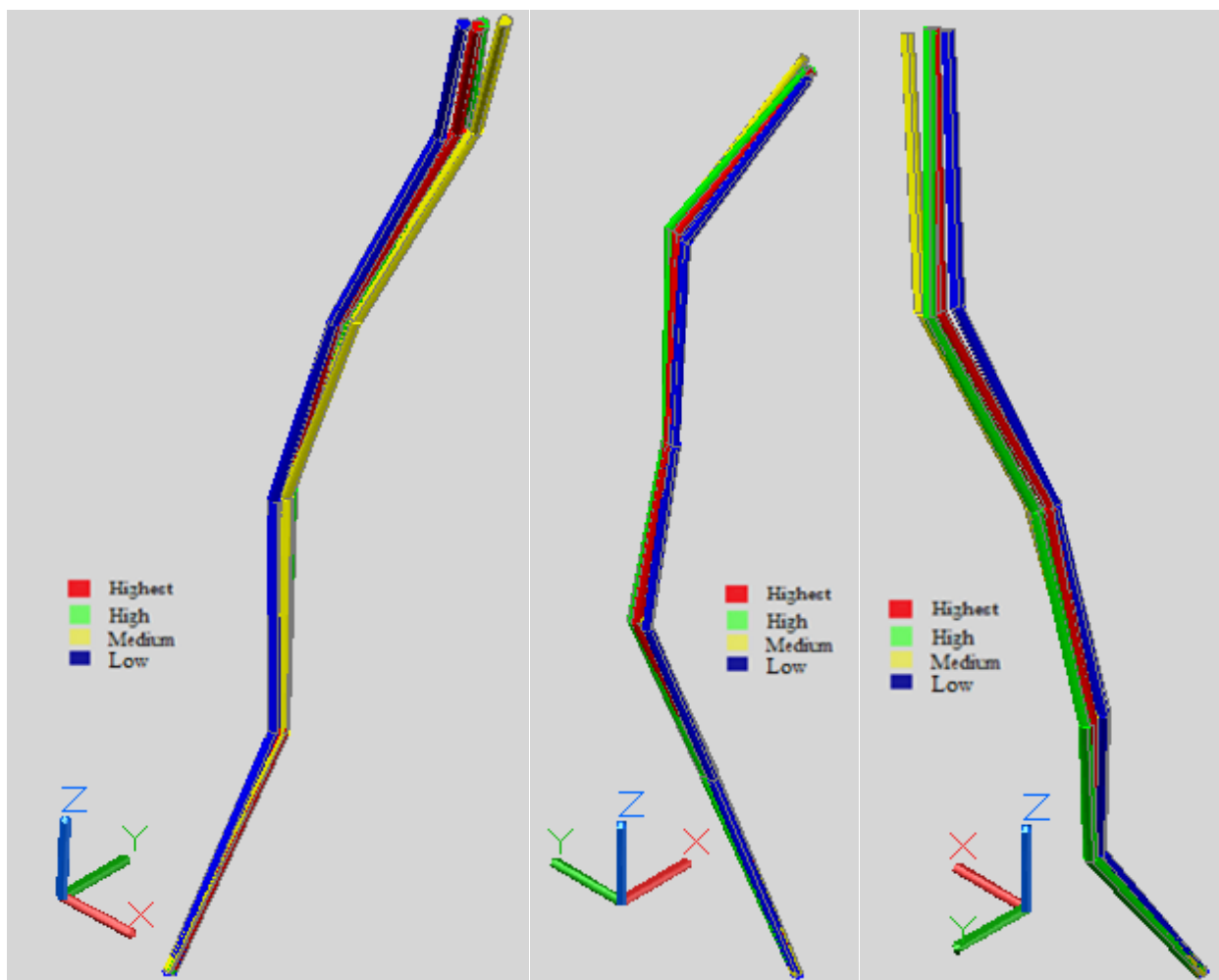
Didžiausi nuokrypių nuo vertikalės skirtumai pagal X ašį yra tarp žemos ir vidutinės skiriamosios gebos, kurios vidutinė kvadratinė paklaida siekė 1,8 mm. Pagal Y ašį, taip pat tarp žemos ir vidutinės skiriamosios gebos, kurios vidutinė kvadratinė paklaida yra 2,5 mm, o gautų rezultatų vidutinė kvadratinė paklaida siekė 2,7 mm.

Pagal gautus rezultatus yra pateiktas 4.9 paveikslas, kuriame yra vaizduojami dūmtraukio Nr.2 nuokrypiai nuo vertikalės skirtingomis skiriamosiomis gebomis. Kad būtų išraiškingesnis vaizdas buvo sumažintas dūmtraukio spindulys iki 10 cm, o nuokrypiai nuo vertikalės padidinti 100 kartų. Mėlyna spalva žymima žema skiriamąja geba skenuotas dūmtraukis, vidutine skiriamąja geba – geltona spalva, aukšta skiriamąja geba – žalia spalva, o aukščiausia skiriamąja geba – raudona spalva.



4.9 pav. Nuokrypiai nuo vertikalės pagal X ir Y ašis skirtingomis skiriamosiomis gebomis

Norint dar aiškiau pamatyti nuokrypius nuo vertikalės skirtingomis skiriamosiomis gebomis sudaryti izometriniai (3D) brėžiniai (4.10 pav.). Spalvos išliko tokios pačios: mėlyna spalva žymima žema skiriamąja geba skenuotas dūmtraukis, vidutine skiriamąja geba – geltona spalva, aukšta skiriamąja geba – žalia spalva, o aukščiausia skiriamąja geba – raudona spalva.



4.10 pav. Izometriniai (3D) dūmtraukio Nr.2 brėžiniai, vaizduojantys nuokrypius nuo vertikalės skirtingomis skiriamosiomis gebomis

Galima daryti išvadą, kad dūmtraukio Nr.1 užfiksuoti nuokrypių nuo vertikalės skirtumai yra didesni, lyginat su dūmtraukiu Nr.2. Prastesnis tikslumas pasiektas, nes atstumai tarp stočių ir dūmtraukio Nr. 1 buvo didesni negu dūmtraukio Nr.2. Tai lėmė nevienodas išmatuotų taškų skaičius ant dūmtraukių paviršių. Didesnis taškų kiekis turėjo didesnę įtaką tikslumui žemoje ir vidutinėje skiriamosiose gebose.

IŠVADOS

1. Įvertinus dūmtraukių nuokrypių nuo vertikalės rezultatus galima teigti, kad nuokrypiams nuo vertikalės nustatyti galimi abu metodai.
2. Matuojant dūmtraukius antžeminiu lazeriniu skeneriu dėl didesnio taškų skaičiaus, per tą patį laiko tarpą, skerspjūvių centrų koordinatės nustatomos tiksliau, negu elektroniniu tacheometru.
3. Atlikus matavimus antžeminiu lazeriniu skeneriu galime apskaičiuoti bet kurio reikalingo skerspjūvio nuokrypį nuo vertikalės.
4. Abiejų dūmtraukių nuokrypių nuo vertikalės rezultatų nesutapimai, išmatuoti skirtingais prietaisais ir matavimo metodais, neviršija 4 mm. Nustatyta, kad X ašyje nuokrypio nuo vertikalės vidutinė kvadratinė paklaida neviršija 1,4 mm, Y ašyje – 2 mm, o vidurkio iš abiem metodais gautų rezultatų vid. kv. paklaida neviršija 1,4 mm.
5. Palyginus matavimo rezultatus skirtingomis skiriamosiomis gebomis, nustatyta, kad dūmtraukio Nr.1 nuokrypių nuo vertikalės rezultatų nesutapimai pagal X ašį neviršija 4 mm, o pagal Y ašį neviršija 6 mm. Vidutinė kvadratinė paklaida X ašyje neviršija 2 mm, o Y ašyje – 4,5 mm. Dūmtraukio Nr.2 nuokrypių nuo vertikalės rezultatų nesutapimai pagal X ašį neviršija 4 mm, o pagal Y ašį neviršija 5 mm. Vidutinė kvadratinė paklaida X ašyje neviršija 1,8 mm, o Y ašyje – 2,5 mm.
6. Mažiausi nuokrypių nuo vertikalės skirtumai užfiksuoti tarp aukštos ir aukščiausios skiriamosios gebos, nes matavimai buvo atliekami pagal didelio kiekio taškų „debesį“.

PASIŪLYMAI

1. Šiais laikais pravartu naudoti antžeminį lazerinį skenerį, norint išmatuoti aukštybinių statinių horizontaliąsias deformacijas (posvyrius). Jį naudojant per trumpą laiko tarpą gaunamas didelis taškų skaičius.
2. Reikėtų paruošti lazerinių skenerių naudojimo techninį reglamentą, naudojant lazerinius skenerius, kuris apibrėžtų matavimo darbų eigą, matavimo duomenų filtravimo ir apdorojimo taisykles bei tikslumo reikalavimus.
3. Prieš atliekant matavimus būtų tikslinga nusistatyti tinkamą skiriamą gebą (taškų tankį), atsižvelgiant į reikalaujamą matavimo tikslumą. Taip atliksime matavimus greičiau, sutaupysime kompiuterio resursus bei palengvinsime matavimų apdorojimą.
4. Matavimo rezultatai gali būti panaudojami tolimesniems dūmtraukių horizontaliųjų deformacijų stebėjimams.

LITERATŪRA IR KITI ŠALTINIAI

- Aber, J. S.; Marzolff, I.; Ries, J. 2010. Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications, *Elsevier*, Amsterdam.
- Andrews, L. C.; Phillips, R. L. 1998. Laser Beam Propagation through Random Media. *SPIE Optical Engineering Press*. Bellmham, Washington.
- Anigacz, W. 2008. Geodezja inżynieryjna. Wybrane zagadnienia. Wyznaczenie odchylenia osi komina od pionu. Opole p. 118.
- Anonym. 2002. *Structural Deformation Surveying* (EM 1110-2-1009), US Army Corps of Engineers, Washington, DC
- Aksamitauskas, V. Č.; Grala, M. 2012. Cilindro formos statinių skerspjūvių deformacijų nustatymas, *Geografija ir kartografija*, 164-166.
- Arner, G. S. T. 2001. Monitoring and Assessment of Structures, *McGraw Hill*, New York.
- Balthasar, M.; Hummel, B. 2008. Wegmessung. *Skript Messtechnisches Praktikum*. Institute of Measurement and Control Engineering, University of Karlsruhe, Germany.
- Bosche, F.; Haas, C.T. 2008. Automated retrieval of 3D CAD model objects in construction range images, *Automation in Construction* 17(4), 499–512. DOI: 10.1016/j.autcon.2007.09.001.
- Çelik, R. N.; Ayan, T.; *et. al.* 2001. Monitoring Deformation on Karasu Viaduct Using GPS and Precise Levelling Techniques, *Kluwer Academic Publisher*, Netherlands
- Coșarcă, C.; Jocsa, A.; Savu, A. 2009. Analysis of error sources in Terrestrial Laser Scanning, *Journal of Geodesy and Cadastre* 11, 115–124.
- Donges, A.; Noll, R. 1993. Lasermesstechnik - Grundlagen und Anwendungen, *Hüthig Buch Verlag*, Heidelberg, ISBN 3-7785-2216-7, 318 p.
- Draganova, N. P.; Hristova, G. E.; Marinov, B. D. 2004. Digital Photogrammetry at Graduated Study. In *UACEG*. UACEG, Faculty of Geodesy, Sofia, Bulgaria. ISPRS. Commission VI, WG VI/1.
- Dumalski, A.; Hejbudzka, K.; Łata, P.; Zienkiewicz, M. H. 2013. Classical and laser scanner methods in determining slender objects verticality, 203–212.
- Erol, S.; Ayan, T. 2003. An Investigation on Deformation Measurements of Engineering Structures With GPS And Levelling Data Case Study, *International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in the Globalizing World*, 6-7 November 2003, Sofia, Bulgaria
- Erol, S.; Erol, B.; Ayan, T. 2004. A general review of the deformation monitoring techniques and a case study: Analysing deformations using GPS/levelling, *a paper presented at XXth ISPRS Congress" Geo-Imagery Bridging Continents*, 12–23.

- Faro. 2018. FARO Technologies Inc. [interaktyvus]. [žiūrėta 2018 m. vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: < <http://www.faro.com> >
- Featherstone, W. E.; Dentith, M. C.; Kirby, J. F. 1998. Strategies for the Accurate Determination of Orthometric Heights from GPS, *Survey Review* 34(267): 278–296. DOI: 10.1179/003962698791484383.
- Gałda, M.; Kujawski, E.; Przewłocki, S. 1994. *Geodezja i miernictwo budowlane*. Warszawa-Wrocław: PPWK
- Gawalkiewicz, R.; Skulich, M.; Szafarczyk, A. 2011. Wykorzystanie nowoczesnych technologii geodezyjnych w procesie kontroli pionowości obiektów wysmukłych na przykładzie kominów przemysłowych. *Quarterly of the state school of technology and economics In Jarosław*, Vol.2, 5-23.
- Girardeau-Montaut, D.; Roux, M.; Marc, R.; Thibault, G. 2005. Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36(3): W19. DOI: 10.1.1.221.8313 .
- GKTR 2.11.03:2014 *Topografinių erdvinių objektų rinkinys ir topografinių erdvinių objektų sutartiniai ženklai*. Vilnius, 2014. 113 p.
- Glennie, C. 2007. Reign of point clouds. A kinematic terrestrial LIDAR scanning system. *Inside GNSS* vol. 2 Nr. 7, 22–31.
- Gocał, J. 1980. Zasady prowadzenia geodezyjnych badań hiperboloidalnych chłodni kominiowych. *Zesz. Nauk. AGH, Geodezja*, 61, 63–85.
- Gocał, J.; Kamińska-Czyż, K.; Janusz W. 1994. *Geodezja Inżynierska. Polskie Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych im. E. Romera*.
- Goor, B. 2011. *Change detection and deformation analysis using Terrestrial Laser Scanning*. Technical University of Delft.
- Gudritienė, D.; Aleknavičius, A. 2007. Skaitmeninė fotogrametrija. Kaunas: „Akademija“ p 70. [interaktyvus]. [žiūrėta 2018 m. vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://vuzf.asu.lt/wp-content/uploads/sites/6/2015/01/skaitmenine_fotogrametrija.pdf>
- Hašková V.; Lipták M. 2011. Processing of Calibration measurements on EZB-3. *Slovak Journal Of Civil Engineering*. Vol. XIX, 2011, No. 4, 18–23
- Hiremagalur, J.; Yen, K. S.; Akin, K.; Bui. T. 2007. Creating standards and specifications for the use of laser scanning in Caltrans projects. *AHMCT Research Center*, UC Davis, p. 93.
- Ingensand, H. 2006. Metrological aspects in terrestrial laser-scanning technology, in: *Proceedings of the 3rd IAG/12th FIG symposium*, Baden, May 22–24, 2006. p. 10.
- János, T. 2008. Land surveying and data management, in *Precision Agriculture*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2018 m. vasario 9 d.]. Prieiga per internetą:

- <https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0032_precizios_mezogazdasag/ch02s04.html>
- Kankare, V.; Vauhkonen, J.; Holopainen, M.; Vastaranta, M.; Hyypä, J.; Hyypä, H.; Alho, P. 2015. Sparse density, leaf-off airborne laser scanning data in aboveground biomass component prediction, *Forests* 6(6), 1839–1857. DOI: 10.3390/f6061839.
- Kazakevičius, S.; Klimašauskas, A.; Kosčiauskas, M.; Skeivalas, J.; Tulevičius, V.; Vainauskas, V.; Zakarevičius, A.; Žalnierukas, A. 1979. Taikomoji geodezija. Vilnius: „Mokslas“ p. 325.
- Kern, F. 2001. Supplementing laserscanner geometric data with photogrammetric images for modeling. *XVIII. International CIPA Symposium. Potsdam*, 18–21 September 2001, 454–461.
- Kregar, K.; Ambrožič, T.; Kogoj, D.; Vežočnik, R.; Marjetič A. 2015. Determining the inclination of tall chimneys using the TPS and TLS approach, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 75, 354–363. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.08.006 .
- Kriaučiūnaitė-Neklejonovienė V. 2008. Geodezijos praktikos metodika : mokomoji knyga. Kaunas : „Technologija“ p 59.
- Kuttykadamov, M. E.; Rysbekov, K. B.; Milev, I.; Ystykul, K. A.; Bektur, B. K. 2016. Geodetic monitoring methods of high-rise constructions deformations with modern technologies application, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* 93(1): 24–31.
- Leica. 2009. GIM – International. [interaktyvus]. [žiūrėta 2018 m. vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: < <https://www.gim-international.com> >
- Leica Viva GS15. [interaktyvus]. [žiūrėta 2018 m. vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.surveyequipment.com/leica-viva-gs15>>
- Litchi, D. D.; Jamtsho, S. 2006. Angular resolution of terrestrial laser scanners, *The Photogrammetric Record* 21(114), 141–160. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2006.00367.x .
- Luhmann, T. 2003. Nahbereichsphotogrammetrie. *Auflage*. Heidelberg: Wichmann Verlag.
- McGlone, J.; Mikhail, C. 2004. *Manual of photogrammetry. 5th Edition*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, USA
- Park H.S., Lee H.M., Adeli H., Lee I. 2007. A new approach for health monitoring of structures: Terrestrial laser scanning, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 22(1), 19–30. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2006.00466.x .
- Petrie, G.; Toth, C. K. 2008. Terrestrial Laser Scanner. *Topographic laser ranging and scanning, edit by Shan, J.; Toth, C. K., CRC Press: Taylor and Francis group* 87–128.
- Ruzgienė B. 2008. Fotogrametrija. Vilnius: „Technika“ p. 203.
- Schneider, D. 2006. Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water dams, *Proc. of 3rd IAG/12th FIG Symp., Baden, Austria, May*, 22–24.

- Schulz, T. 2007. *Calibration of a terrestrial laser scanner for engineering geodesy. PhD thesis, (ETH) Zurich*, p. 172.
- Selbesoglu, M. O.; Bakirman, T.; Gokbayrak, O. 2016. Deformation Measurement Using Terrestrial Laser Scanner for Cultural Heritage, *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W1*(October): 89–93. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W1-89-2016.
- Skeivalas, J. 2004. Elektroniniai geodeziniai prietaisai. Vilnius: „Technika“ p. 193
- Skeivalas, J. 2010. Elektroniniai geodeziniai prietaisai. Vilnius: „Technika“ p. 244.
- Sotoodeh, S. 2006. Outlier Detection in Laser Scanner Point Clouds, *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI5* 297e302 XXXVI(Jain), 297–302.
- Soudarissanane, S.; Ree, J. van; Bucksch A.; Lindenberg R. 2007. Error budget of terrestrial laser scanning: influence of the incidence angle on the scan quality. *3D – Nordost*, Berlin, Germany.
- Stahlberg, C. 1997. Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Ziel- und Kippachsenfehler auf die Winkelmessung. *Zeischrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)*, Vol. 5/1997, 225-235.
- Staiger, R. 2007. *Terrestrial Laserscanning – Scanners and Methods*. Prezentacija iš INTERGEO East, Sofia, Bulgaria, 1–2 March 2007.
- STR 2.02.02:2004 *Visuomeninės paskirties statiniai*. Vilnius, 2004. 22 p.
- Šlikas, D. 2013. *Antžeminių lazerinių skenerių kalibravimo metodikos parengimas ir skenavimo technologijos taikymai žemės paviršiui modeliuoti*. Daktaro disertacija. Vilnius, Technika.
- Tang, P.; Lipman, R.; Huber, D.; Lytle, A.; Akinci B. 2010. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques, *Automation in Construction* 19(7), 829–843.
- Tsakiri, M.; Lichti, D.; Pfeifer, N. 2006. Terrestrial Laser Scanning for Deformation Monitoring *Proceedings of the 3rd IAG and 12th FIG symposium*.
- Uchański, Ł.; Soerensen, L. 2010. Technologia naziemnego skaningu laserowego w zagadnieniach inżynierii odwrotnej oraz analiz procesów dynamicznych, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 21, 415–424.
- Weichel, H. 1990. Laser Beam Propagation in the Atmosphere. *Optical Engineering* v. TT3. Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press.
- Wolf, P. R.; Dewitt, B. A. 2000. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS, 3rd edition. Boston: McGraw-Hill.
- Zheng, S.; Ma, D.; Zhang, Z.; Hu, H.; Gui, L. 2012. A novel measurement method based on

- silhouette for chimney quasi-static deformation monitoring, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 45(3), 226–234. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.11.013.
- Zhu, L.; Mu, Y.; Shi, R. 2008. Study on the resolution of laser scanning point cloud *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. DOI: 10.1109/IGARSS.2008.4779200.
- Zogg, H. 2008. Investigations of high precision terrestrial laser scanning with emphasis on the development of a robust close-range 3D-laser scanning system. PhD thesis, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, p. 185.
- Серебовиц, В. А.; Комиссаров, А. В.; Комиссаров, Д. Б.; Широкова, Т. А. 2009. *Наземное лазерное сканирование*. Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию ГОУ ВПО Сибирская Государственная Геодезическая Академия. Новосибирск, СГГА.
- Улицкий, В. М.; Шашкин, А. Г.; Лисюк, М. Б. 2006. Ретроспективный анализ геотехнической ситуации с учетом взаимодействия здания и основания. *Развитие городов и геотехническое строительство*. №10/2006. 47-58.

PRIEDAI

A priedas. Mokslinis straipsnis, aprobuotas 10-ojoje tarptautinėje konferencijoje „*Environmental Engineering*“, vykusioje 2017 m. balandžio 27–28 d. Pranešimo tema: „*The Horizontal Deformation Analysis of High-rise Buildings*“.

The Horizontal Deformation Analysis of High-rise Buildings

Žymantas Gražulis¹, Boleslovas Krikštaponis², Algirdas Neseckas³, Darius Popovas⁴,
Raimundas Putrimas⁵, Dominykas Šlikas⁶, Evelina Zigmantiienė⁷

Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania

*E-mails: zymantas.grazulis@stud.vgtu.lt (corresponding author); boleslovas.krikstaponis@vgtu.lt;
algirdas.neseckas@vgtu.lt; darius.popovas@vgtu.lt; raimundas.putrimas@vgtu.lt;
dominykas.slikas@vgtu.lt; evelina.zigmantiene@vgtu.lt*

Abstract. The horizontal deformation analysis of high-rise buildings, quite often is complicated because buildings like chimneys, towers and etc, have complex and asymmetric shapes, consequently there is not always the possibility to apply the method of single points motion analysis. Furthermore, the horizontal deformation analysis is complicated using standard measurement methods like measurements with electronic total stations or optical theodolites. In such case the terrestrial laser scanner could be superior to traditional measurements. However, the terrestrial laser scanner still not widely used to survey building horizontal deformations using high precision measurements. The main aim of this work is to determine the suitability to measure deflections of buildings from the vertical using terrestrial laser scanners and to investigate point cloud data processing. Measurements of horizontal deformation were carried out using the over ground laser scanner and electronic total station. Horizontal deformations of chimneys of thermal power plants were investigated using corresponding methods. Deformation indicators and evaluated measurement accuracies between different methods were compared. Data analysis of terrestrial laser scanning is more complex, time consuming and requires sophisticated hardware resources in comparison with the traditional methods, however results are much more detailed and informative.

Keywords: deformations, vertical deflection of buildings, terrestrial laser scanner, geodetic observations.

Conference topic: Technologies of geodesy and cadastre.

Introduction

Deformation measurements of large structures, especially building tall buildings (chimneys, cooling towers, television towers and poles, water towers, etc.) are one of the most important issues of surveying engineering. A chimney is a necessary part of a heat-producing plant, a refinery and many other types of industrial buildings. It poses potential dangers for human safety and property because if it collapses, it may cause immeasurable damage to human lives and wealth. It is essential to monitor and measure the chimney deformation on a regular basis. The main task of the deformation measurement is to measure inclination of the centerline of a chimney from the vertical, while it only can be determined indirectly (Zheng *et al.* 2012). Measurement devices and techniques in this field are mainly based on the monitoring of discrete points (Kregar *et al.* 2015). Despite of the development of the innovative monitoring engineering techniques, in practice, traditional measurement methods are still widely used. Besides classical techniques, for the recording of surfaces nowadays laser scanners are used, which acquire dense point clouds in very short time (Uchański, Soerensen 2010). Small-scale deformation monitoring using terrestrial laser scanning is gaining considerable attention mainly due to the high spatial resolution of the acquired data (Tsakiri *et al.* 2006). As highlighted in numerous previous research works, TLS can provide surveyors with the means to conduct far more complete (dense) measurements in relatively short time. This would lead to more reliable dimensional control results, despite the fact that single point precision is mostly not sufficient (Girardeau-Montaut *et al.* 2005; Park *et al.* 2007). It appears that precision potential in these applications is not limited by the single point accuracy of laser scanners, since surface elements derived from a large number of points are used for deformation analysis (Tang *et al.* 2010; Bosche, Haas 2008; Schneider 2006).

In article, we present a comparison of TLS and classical deformation measurement of two chimneys. In TLS approach the point cloud was cut into thin layers and projected onto 2D planes in different height levels. Then a cylinder-fit algorithm was applied to these cross section point clouds, where the center points of the cylinders have a much higher precision than single laser scanner points (Akca 2004). The connection of center points of these cylinders at different heights represents the centerline (axis) of the chimney. The comparison with the results from total station measurements also presented.

Measurement methods and research object

The research object is two chimneys of joint-stock company “Vilniaus energija” in small town Trakų Vokė. The height of both chimneys are about 20 m and the diameters at the bottom are 0,74 m and 0,94 m respectively. Chimneys are part of heat producing facility located in Trakų Vokė.

To establish the geodetic control network for chimneys deformation monitoring the benchmarks were measured with GNSS receivers using LITPOS continuously operating GNSS stations network data as reference stations. For classical horizontal deformation measurements electronic total station Leica TCRP1200+, with angular accuracy of 1" was used, and for TLS measurements laser scanner Leica Scanstation C10 with angular accuracy of 12" was tested.

In most cases, deformation monitoring is performed by using electronic total stations. First of all the exact coordinates and heights of the monitoring benchmarks are derived and adjusted using geodetic methods. From these benchmarks the cross-sections at selected heights are measured. It is important that measurements from all stations is performed bisecting the same height (cross section) of the chimney. Chimney deformation is reflected by center displacement of each chimney cross-section. Measurements were carried from two stations at 6 cross-sections evenly distributed along the chimney (Fig. 1).

Terrestrial laser scanning is considered faster and more progressive geodetic measurement method. The terrestrial laser scanner position and orientation was set using three high reflective targets. Position of these targets was measured with electronic total station from the same geodetic control network points used in classical approach. The targets were positioned in a way that they will be visible from both measuring stations, and provided good geometric distribution for scanner position determination. Observations with the terrestrial laser scanner covered whole chimneys, not just chosen cross-sections (Fig. 2).

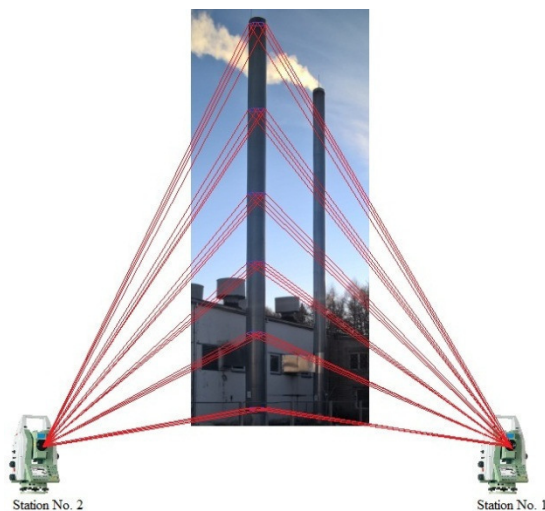


Fig. 1. Measurement setup using electronic total station

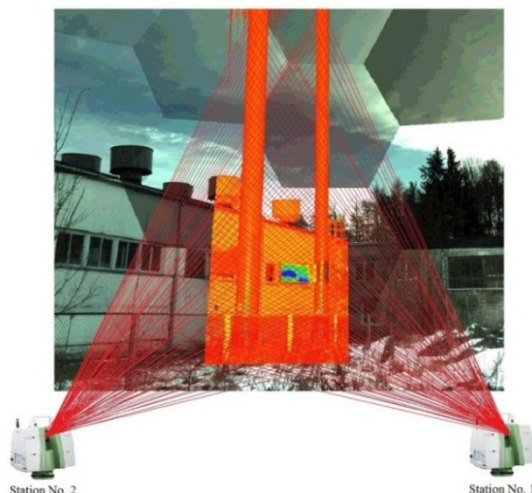


Fig. 2. Measurement setup using terrestrial laser scanner

Processing of measurement data.

The observed chimneys have cylindrical shape, therefore cross-sections has a circular form. In order to determine deviations from the vertical it is necessary to calculate the centers of the circles of each cross-section from measured points. The circle center coordinates are calculated according to the following formulas.

Circle arc points and the coordinates of the center can be linked with the radius by the equation:

$$(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 = R^2.$$

Here x_i and y_i – coordinates of chimney surface points in the corresponding cross-section, x_c ir y_c – the coordinates of a center of the cross-section, R – radius of the chimney cross-section.

After performing some mathematical operations:

$$x_i^2 - 2x_ix_c + x_c^2 + y_i^2 - 2y_iy_c + y_c^2 - R^2 = 0;$$

$$\tau_1 = 2x_c;$$

$$\tau_2 = 2y_c;$$

$$\tau_3 = x_c^2 + y_c^2 - R^2;$$

$$l_i = x_i^2 + y_i^2.$$

For each measured point we receive correction equation:

$$v_i = -x_i\tau_1 - y_i\tau_2 + \tau_3 + l_i.$$

Applying correction equations for each measured point and using the least squares approach to find unknowns τ_i we can estimate radius and center coordinates of the circle:

$$\begin{cases} x_c = \frac{\tau_1}{2} \\ y_c = \frac{\tau_2}{2} \end{cases};$$

$$2R = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 - 4\tau_3}.$$

Using the formulas above, cross-section center coordinates of both chimneys was calculated and chimneys deviations from the vertical were estimated. Deviations were estimated in each cross-section with respect to the lowest cross-section.

In each cross-section 8 surface points of the chimney were measured using total station. Estimated vertical deviations of the chimneys from total station measurements presented in tables 1 and 2, and figure 3 and 4.

Table 1. Vertical deviations of chimney No.1 (total station measurements)

Cross-section No.	Center coordinates, m		Height of the cross-section, m	Cross-section height from the chimney base m	Deviation from the vertical, mm			Azimuth	Orientation
	x_c	y_c			Δx_T	Δy_T	Δl_T		
bottom	—	—	154.36	0.00	—	—	—	—	—
1	6 055 318.673	571 389.061	154.45	0.09	0	0	0	0°	—
2	6 055 318.661	571 389.062	157.82	3.46	−12	1	12	175°	SE
3	6 055 318.674	571 389.076	161.39	7.03	1	15	15	86°	NE
4	6 055 318.695	571 389.088	165.00	10.64	22	27	35	51°	NE
5	6 055 318.687	571 389.108	168.58	14.22	14	47	49	73°	NE
6	6 055 318.724	571 389.126	172.18	17.82	51	65	83	52°	NE
top	—	—	173.83	19.47	—	—	—	—	—

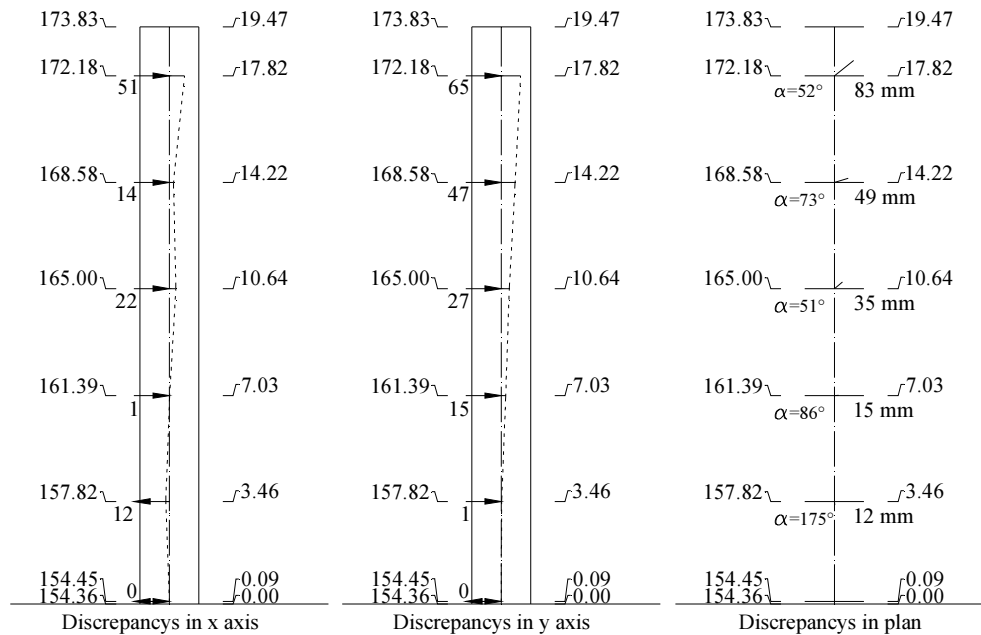


Fig. 3. Vertical deviations of chimney No. 1 (total station measurements)

Table 2. Vertical deviations of chimney No. 2 (total station measurements)

Cross-section No..	Center coordinates, m		Height of the cross-section, m	Cross-section height from the chimney base m	Deviation from the vertical, mm			Azimuth	Orientation
	x_c	y_c			Δx_T	Δy_T	Δl_T		
bottom	—	—	154.50	0.00	—	—	—	—	—
1	6 055 325.391	571 388.992	154.55	0.05	0	0	0	0°	—
2	6 055 325.389	571 389.011	157.92	3.42	−2	19	19	96°	SE
3	6 055 325.382	571 389.016	161.48	6.98	−9	24	26	111°	SE
4	6 055 325.390	571 389.023	165.05	10.55	−1	31	31	92°	SE
5	6 055 325.403	571 389.023	168.67	14.17	12	31	33	69°	NE
6	6 055 325.420	571 389.010	172.28	17.78	29	18	34	32°	NE
top	—	—	173.92	19.42	—	—	—	—	—

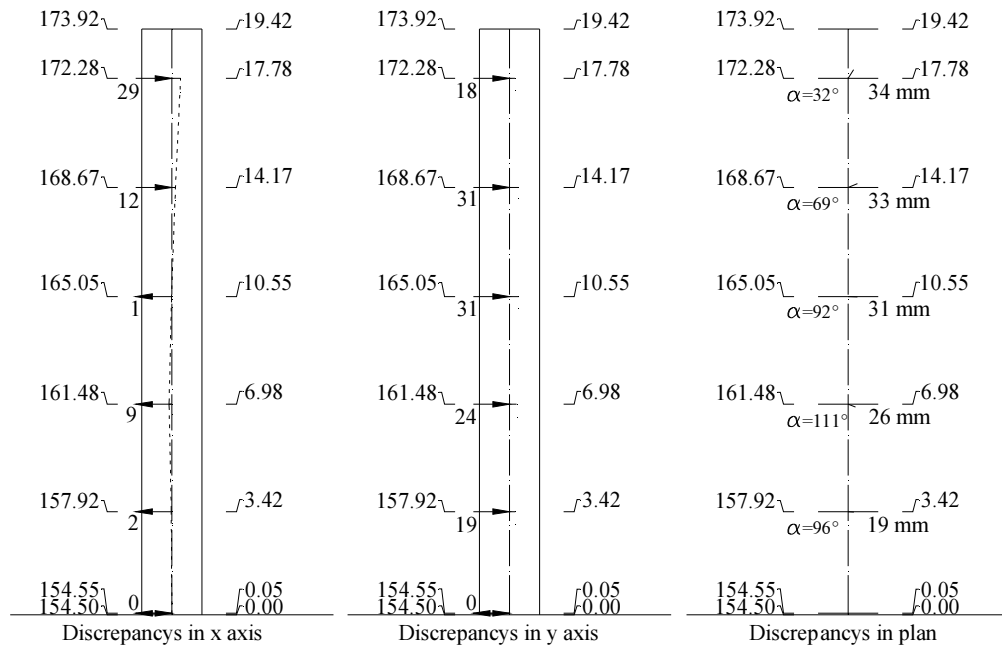


Fig. 4. Vertical deviations of chimney No. 2 (total station measurements)

Measurements with terrestrial laser scanner were performed with density 1point/1mm² across all surface of the chimney. From the point cloud 8 thin layers in different height levels (the same heights as total station measurements) was cut and center coordinates of these point cloud cross-sections were estimated. Center coordinates of each cross-section were computed from around one thousand points.

Estimated vertical deviations of the chimneys from TLS measurements presented in tables 3 and 4, and figures 5 and 6.

Table 3. Vertical deviations of chimney No.1 (TLS measurements)

Cross-section No..	Center coordinates, m		Height of the cross-section, m	Cross-section height from the chimney base m	Deviation from the vertical, mm			Azimuth h	Orientation
	x_c	y_c			Δx_S	Δy_S	Δl_S		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bottom	—	—	154.36	0.00	—	—	—	—	—
1	6 055 318.677	571 389.065	154.48	0.12	0	0	0	0°	—

End of Table 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	6 055 318.666	571 389.062	157.81	3.45	−11	−3	11	195°	SW
3	6 055 318.680	571 389.077	161.34	6.98	3	12	12	76°	NE
4	6 055 318.700	571 389.093	165.01	10.65	23	28	36	51°	NE
5	6 055 318.694	571 389.109	168.58	14.22	17	44	47	69°	NE
6	6 055 318.730	571 389.128	172.18	17.82	53	63	82	50°	NE
top	—	—	173.83	19.47	—	—	—	—	—

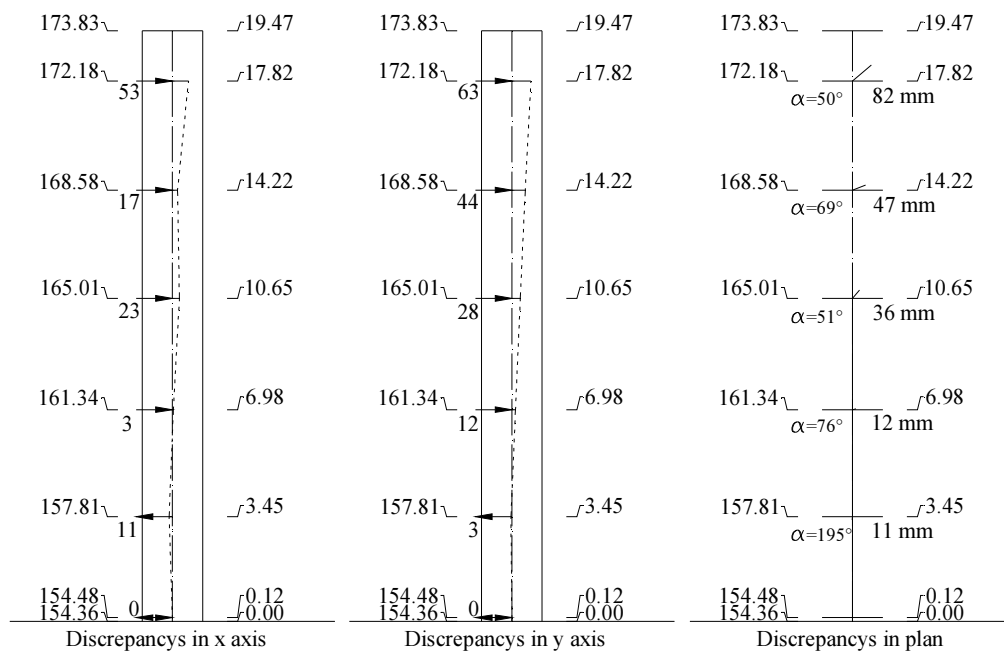


Fig. 5. Vertical deviations of chimney No. 1 (TLS measurements)

Table 4. Vertical deviations of chimney No. 2 (TLS measurements)

Cross-section No..	Center coordinates, m		Height of the cross-section, m	Cross-section height from the chimney base m	Deviation from the vertical, mm			Azimuth	Orientation
	x_c	y_c			Δx_s	Δy_s	Δl_s		
bottom	—	—	154.50	0.00	—	—	—	—	—
1	6 055 325.394	571 388.993	154.61	0.11	0	0	0	0°	—
2	6 055 325.392	571 389.011	157.96	3.46	−2	18	18	96°	SE
3	6 055 325.386	571 389.017	161.43	6.93	−8	24	25	108°	SE
4	6 055 325.394	571 389.023	165.01	10.51	0	30	30	90°	E
5	6 055 325.407	571 389.027	168.67	14.17	13	34	36	69°	NE
6	6 055 325.425	571 389.013	172.28	17.78	31	20	37	33°	NE
top	—	—	173.92	19.42	—	—	—	—	—

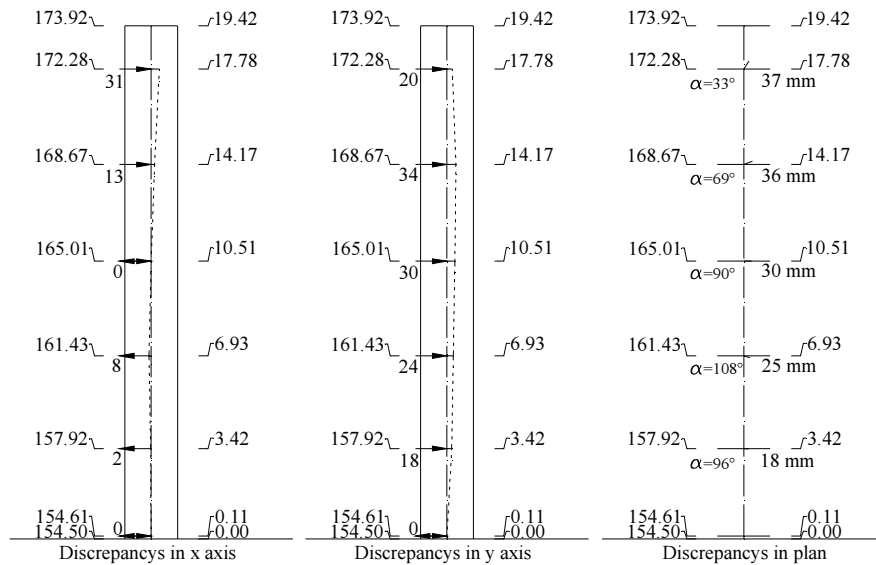


Fig. 6. Vertical deviations of chimney No. 2 (TLS measurements)

In the tables above, the center coordinates of the cross-sections expressed in LKS94 coordinate system, normal heights in LAS07 height system and the relative heights of the chimney expressed in relation with the bottom of the chimney. There are coordinate differences (chimney deviations from the vertical) in x and y components and linear deviation presented as well.

Comparison of the results

We compared estimated chimney deviations of the vertical from different measurement methods.

Deviation determination was done using the two methods and assuming that they have more less same accuracy, chimney deviation accuracy assessment was carried out by double measurements differences.

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}{2n}},$$

where: ϵ – differences of double measurements, n – number of differences.

It is also possible to calculate the deviations from the averages from the two methods, then the mean squared error of the deviation is:

$$m_v = m/\sqrt{2}.$$

Deviation accuracy assessments presented in tables 5 and 6.

Table 5. Deviation accuracy assessment of chimney No.1

Cross-section No.	Deviation from the vertical from total station measurements, mm			Deviation from the vertical from TLS measurements, mm			Differences of deviations		
	Δx_T	Δy_T	Δl_T	Δx_S	Δy_S	Δl_S	ϵ_x^2	ϵ_y^2	ϵ_l^2
1	0	0	0	0	0	0			
2	-12	1	12	-11	-3	11	1	16	1
3	1	15	15	3	12	12	4	9	9
4	22	27	35	23	28	36	1	1	1
5	14	47	49	17	44	47	9	9	4
6	51	65	83	53	63	82	4	4	1
Σ							19	39	16
m							1.4	2.0	1.3