

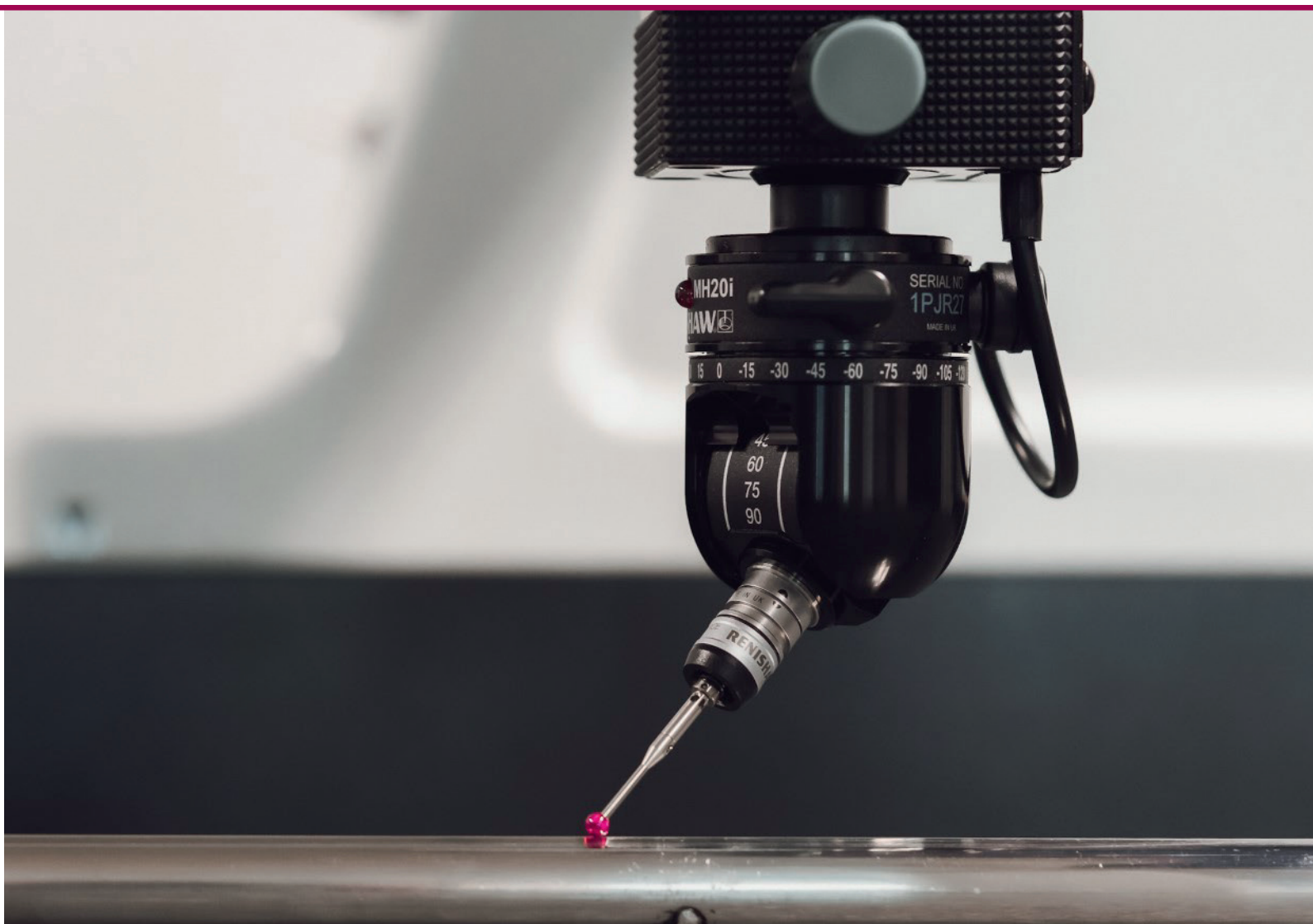


RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

**Ernests Jansons**

# **GAISA MITRUMA, GAISA UN LEDUS TEMPERATŪRAS IETEKME UZ BERZES PĀRA NERŪSĒJOŠAIS TĒRAUDS-LEDUS SLĪDĒŠANU RAKSTUROJOŠIEM PARAMETRIEM**

Promocijas darba kopsavilkums



# RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte  
Mehānikas un mašīnbūves institūts

**Ernests Jansons**

Doktora studiju programmas “Ražošanas tehnoloģija” doktorants

## **GAISA MITRUMA, GAISA UN LEDUS TEMPERATŪRAS IETEKME UZ BERZES PĀRA NERŪSĒJOŠAIS TĒRAUDS-LEDUS SLĪDĒŠANU RAKSTUROJOŠIEM PARAMETRIEM**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

profesore *Dr. sc. ing.*  
IRĪNA BOIKO

profesors *Dr. sc. ing.*  
KĀRLIS AGRIS GROSS

profesors *Dr. habil. sc. ing.*  
**JĀNIS RUDZĪTIS**

RTU Izdevniecība  
Rīga 2022

Jansons E. Gaisa mitruma, gaisa un ledus temperatūras ietekme uz berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošiem parametriem. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. – 40 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-16” 2021. gada 24. septembra lēmumu, protokols Nr. 1.

Šis darbs izstrādāts un finansēts sadarbībā ar:

- Eiropas reģionālā attīstības fonda (ERAF) projektu “Virsmas īpašību ietekmes uz slīdamību pa ledu pētījumi” (*The Quest for Disclosing how Surface Characteristics Affect Slideability*). Projekta Nr.1.1.1.1/16/A/129;



INVESTING IN YOUR FUTURE

- Valsts pētījumu programmas (VPP) “Inovatīvi materiāli un viedās tehnoloģijas vides drošumam” projektu Nr. 6 “Metāla virsmas apstrāde berzes un nodiluma samazināšanai”. Projekta Nr. Y8085.6;

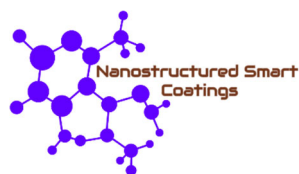


- SAM 8.2.2. “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projektu Rīgas Tehniskajā universitātē Nr. 8.2.2.0/18/A/017;



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

- LZP projektu Z19/1-0385 “Ar oglekli bagātināti daudzfunkcionāli nanostrukturētie viedie pārklājumi (NVP) augsto tehnoloģiju lietojumiem un to iegūšana izmantojot lieljaudas magnētiski saspiestās plazmas metodi”.



- Ārvalstu mobilitātes izmaksas finansēja Austrian COMET programme (Project K2 InTribology, no. 872176) un “Excellence Centre of Tribology” (AC2T research GmbH) sadarbībā ar V-Research GmbH. Austrian Cooperative Research (ACR).

Vāka attēla autors – Jānis Lungevičs.

<https://doi.org/10.7250/9789934227233>

ISBN 978-9934-22-723-3

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 28. janvārī Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6b, 417. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Ēriks Geriņš,  
Rīgas Tehniskā universitāte

*Ph. D.* Vadims Savičs,  
Baltkrievijas zinātņu akadēmijas valsts zinātniskā institūcija “Pulvermetalurģijas institūts”,  
Baltkrievija

Profesors *Ph. D.* Bojan Podgornik,  
Metālu un tehnoloģiju institūts, Slovēnija

## APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Ernests Jansons ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, noslēgums un secinājumi, literatūras saraksts, 48 attēli, 14 tabulas, 11 pielikumi, kopā 105 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 104 nosaukumi.

# SATURS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
Tēmas aktualitāte.....	5
Darba mērķis un uzdevumi.....	5
Pētījumu metodes .....	6
Zinātniskā novitāte .....	7
Aizstāvēšanai izvirzītie pētījumu rezultāti .....	7
Praktiskā nozīmība .....	8
Darba aprobācija.....	8
PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTIE APZĪMĒJUMI UN TERMINI .....	10
1. LITERATŪRAS APSKATS.....	11
1.1. Robežslānis un berzes režīmi, paraugam slīdot pa ledu .....	11
1.2. Parauga slīdēšanu pa ledu ietekmējošie faktori.....	11
2. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI .....	14
2.1. Eksperimentālā parauga slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas iekārta.....	14
2.2. Ledus virsmas izpēte .....	16
2.3. Ledus tekstūras ietekme uz parauga slīdēšanu pa ledu.....	17
2.4. Eksperimentālā parauga vibrāciju analīze .....	18
2.5. Eksperimentālā parauga virsmas tekstūras ietekme uz slīdēšanu pa ledu.....	19
2.6. Reālu apstākļu eksperimentu procedūra .....	19
2.7. Vides apstākļu ietekme uz slīdēšanas laiku.....	22
3. SLĪDĒŠANAS LAIKA PROGNOZĒŠANAS MODELIS UN METODIKA.....	25
3.1. Vides apstākļu sakarības ar slīdēšanas laiku .....	25
3.2. Slīdēšanas laika daudzfaktoru prognozēšanas modelis .....	25
3.3. Slīdēšanas laika mērīšanas un prognozēšanas metodikas izstrāde .....	29
4. PROGNOZĒŠANAS MODEĻA APROBĀCIJA UN TĀLĀKĀS IZPĒTES VIRZIENI ..	32
4.1. Prognozēšanas modeļa aprobācija un salīdzinājums ar skeletoņa sacensību rezultātiem .....	32
4.2. Vides apstākļu un virsmas raupjuma ietekme uz berzes koeficientu laboratorijā.....	33
PĒTĪJUMA BŪTISKĀKIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI.....	36
INFORMĀCIJAS AVOTI .....	38

# DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## Tēmas aktualitāte

Zemais berzes koeficients ledum tiek skaidrots ar to, ka starp paraugu, kas slīd pa ledu, un ledus virskārtu veidojās plāna ūdens kārtiņa jeb robežslānis (angļu val. *liquid-like layer*), kura biezums lielā mērā ietekmē slīdēšanu [1–4]. Attiecīgi robežslāņa biezumu ietekmē vides apstākļi, slīdošais paraugs, ledus un izvēlētā berzes pāra sistēmas mērījumu metode (1.2. att.). Izmērīt robežslāņa biezumu uz ledus virsmas un prognozēt tā ietekmi uz parauga slīdēšanu pa ledu ledus berzes pētniekiem joprojām ir neatrisināts jautājums.

Līdz šim zinātnieku pētījumos, kas saistīti ar ledu [1;5–14], pilnvērtīgi nav definēti apstākļi, kādos norisinās eksperiments (1.1. tab.), lielākoties kā eksperimentu apstākļus raksturojošo parametru ņemot vērā tikai ledus temperatūru. Taču, norādot tikai ledus temperatūru un neņemot vērā citus parametrus, piemēram, gaisa mitrumu un gaisa temperatūru, kas ietekmē robežslāņa biezumu un attiecīgi parauga slīdēšanu pa ledu [15], rodas neizskaidrojami eksperimentu rezultāti, un zūd dažādu autoru darbu salīdzināšanas iespējas. Rezultātā, ja tiek pētītas, piemēram, parauga slīdošās virsmas tekstūras izmaiņas, var rasties būtiski atšķirīgi rezultāti ar dažādām slīdēšanas raksturojošu parametru (slīdēšanas laiks, slīdēšanas ātrums, berzes koeficients u. c.) mērīšanas metodēm pie it kā līdzīgiem, nepietiekami definētiem, eksperimentu uzstādījumiem. Turklāt nav izpratnes par to, kā dažādu vides aprakstošo parametru mijiedarbība ietekmē parauga slīdēšanu pa ledu.

Ņemot vērā iepriekš minēto, promocijas darbs, kurā analizēta vides apstākļu ietekme uz berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu un izstrādāts prognozēšanas modelis, ar ko prognozēti slīdēšanu raksturojoši parametri atkarībā no gaisa, ledus temperatūras un gaisa mitruma, ir aktuāls.

Hipotēze: gaisa un ledus temperatūra, gaisa mitrums mijiedarbojoties ietekmē berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus parauga slīdēšanas pa ledu raksturojošos parametrus. Zinot vides parametru ietekmi, būtu iespējams prognozēt berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošus parametrus atkarībā no vides apstākļiem, kā arī nodrošināt slīdēšanu pa ledu raksturojošu parametru mērījumu precizitāti un eksperimentu reproducējamību.

## Darba mērķis un uzdevumi

Šī promocijas darba mērķis ir noteikt likumsakarības starp slīdēšanas laiku un vides parametriem (gaisa, ledus temperatūras un gaisa mitruma) berzes pārim nerūsējošais tērauds-ledus, lai nodrošinātu mērījumu precizitāti un eksperimentu reproducējamību reālu apstākļu eksperimentu režīmā.

Mērķa sasniegšanai, izpildīti vairāki uzdevumi.

1. Līdzšinējo pētījumu izpēte un analīze.
2. Slīdēšanas laika mērīšanas procedūras izstrāde reālu apstākļu eksperimentu režīmā.
3. Eksperimentālie pētījumi.

4. Slīdēšanas laika prognozēšanas modeļa izstrāde atkarībā no vides parametru (gaisa temperatūra, ledus temperatūra, gaisa mitrums) mijiedarbības.
5. Slīdēšanas laika mērīšanas un prognozēšanas metodikas izstrāde.
6. Prognozēšanas modeļa aprobācija un tālākās izpētes virzienu izstrāde.

## Pētījumu metodes

Lai sasniegtu definēto mērķi un atrisinātu uzdevumus, izmantotas kvantitatīvās un kvalitatīvās pētījumu metodes, kā arī uzskaitītais eksperimentu veikšanas tehniskais nodrošinājums.

Empīriski iegūti triboloģiskie mērījumi veikti, izmantojot virsmu slīdēšanu raksturojošu parametru noteikšanas mēriekārtu, balstītu slīpās plaknes principā. Izstrādājot triboloģijas mērījumu procedūru, veikti šādi papildu kvantitatīvie pētījumi – pārbaudīta ledus tekstūras ietekme uz slīdēšanu raksturojošiem parametriem, slīdošā parauga virsmas tekstūras ietekme, kā arī vibrāciju analīze. Veikti ledus virsmas vizuālie novērojumi laika gaitā un ledus cietības mērījumi ar nanoindentoru *Hysitron TI980* (ASV) ar papildu saldēšanas moduli ASV uzņēmumā “*Bruker*”. Sadarbībā ar uzņēmumu *V-Research GmbH (Industrial Research and Development)* veikti papildu triboloģijas mērījumi Austrijā, izmērot vides parametru ietekmi uz berzes koeficientu, ar ledus berzes pētniecībā biežāk izmantoto tipa iekārtu – *RVM 1000* (Austrija) lineāro tribometru.

Virsmas tekstūras mērījumi slieču un laboratorijas paraugiem veikti, izmantojot *Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50* (*Taylor Hobson*, Lielbritānija) kontakta tipa profilometru un lāzerskenējošo mikroskopu *Confocal microscope VK-X250/260* (*Keyence International NV/SA, Mechelen*, Beļģija), slieču ģeometrija mērīta ar *Mitutoyo CRYSTA-PLUS M500* (*Mitutoyo*, Japāna) manuālo koordinātu mērīšanas iekārtu. Ledus virsmas tekstūras mērīšanai izmantots portatīvais mikroskops *1000x USB Digital Microscope* (*Gaosuo*, Ķīna), datu apstrādei – *Adobe Photoshop* datorprogramma. Vibrācijas mērītas, izmantojot portatīvo akselometru *X16-1D* (*GCDC*, ASV). Ledus temperatūras mērīšanai izmantots termopāris *TP-122-100-MT-K* (*Czaki*, Polija), kas savienots ar *Proscan 520* (*Dostmann*, Vācija). Gaisa temperatūra un gaisa mitrums mērīts ar *P330 Temp* (*Dostmann*, Vācija). Slieču temperatūra pirms eksperimentu veikšanas mērīta ar termokameru *Thermal Imager Testo 871* (*Testo*, Vācija).

Datu apstrādē izmantotas statistikas metodes: aprakstošā/deskriptīvā statistika, prognozēšanas modeļa izstrādē izmantota sakarību noteikšanas secinošā statistikas metode – daudzfaktoru regresijas analīze un korelācijas analīze. Rezultātu attēlošana nodrošināta grafiku, attēlu un tabulu veidā. CAD modeļu izstrādē izmantota *Solidworks 2019* datorprogramma.

## Zinātniskā novitāte

- Pierādīts, ka nerūsējošā tērauda slīdēšanu pa ledu būtiski ietekmē trīs vides apstākļu aprakstošo parametru – gaisa un ledus temperatūra, gaisa mitrums – mijiedarbība, proti, nodrošinot augstu gaisa mitrumu (~90 %), ledus temperatūru diapazonā aptuveni no 5 °C līdz –3 °C un gaisa temperatūru diapazonā aptuveni no 0 °C līdz +4 °C, tiek sasniegtas optimālās slīdēšanu raksturojošo parametru vērtības, samazinot berzi starp paraugu un ledu.
- Izstrādāts jauns berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošu parametru prognozēšanas modelis, kas iekļauj trīs vides aprakstošu parametru mijiedarbību. Uz modeļa pamata izveidota funkcionāla sakarība, kas ļauj samazināt slīdēšanas laika prognozēšanas vidējo procentuālo kļūdu par vismaz 40 % nekā tad, ja tiek izmantotas sakarības, kas apraksta vienu (gaisa mitrums vai gaisa temperatūras, vai ledus temperatūras) vides parametra ietekmi uz slīdēšanas laiku. Balstoties uz prognozēšanas modeli, izstrādāta berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas un prognozēšanas metodika.
- Konstatēts, ka eksperimentos reālos apstākļos nerūsējošā tērauda parauga virsmas tekstūrai izpētītajā diapazonā ( $Sa$  0,02–0,22  $\mu\text{m}$ ) nav būtiska ietekme uz slīdēšanu pa ledu raksturojošiem parametriem, turpretī kontrolētos un stabilos laboratorijas apstākļos parauga virsmas tekstūra berzes koeficienta vērtību ietekmē līdz pat 3,8 reizēm.

## Aizstāvēšanai izvirzītie pētījumu rezultāti

- Eksperimentālo pētījumu rezultāti, kas apraksta berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus likumsakarības starp vides apstākļiem un slīdēšanas laiku. Apskatītajā vides apstākļu diapazonā (relatīvais gaisa mitrums no 55 % līdz 95 %; gaisa temperatūra no –4 °C līdz +10 °C; ledus temperatūra no –6 °C līdz –1 °C), relatīvā gaisa mitruma gadījumā iegūta lineāra sakarība, gaisa mitrumam palielinoties, samazinās slīdēšanas laiks. Gaisa temperatūras un ledus temperatūras gadījumā iegūtos rezultātus raksturo 2. kārtas polinoma līkne. Palielinoties temperatūrai, slīdēšanas laiks samazinās, sasniedzot optimuma vērtību (gaisa temperatūra aptuveni no +24 °C līdz +4 °C; ledus temperatūra no –4 °C līdz –3 °C), pēc tam slīdēšanas laiks palielinās.
- Izstrādātais slīdēšanas laika prognozēšanas modelis atkarībā no gaisa, ledus temperatūras un gaisa mitruma mijiedarbības. Izmantotā trīs vides apstākļu mijiedarbība būtiski ietekmē parauga slīdēšanas raksturojošus parametrus (slīdēšanas laiks, slīdēšanas ātrums, berzes koeficients u. c.) pa ledu. Slīdēšanas laika prognozēšanas kļūda, izmantojot izstrādāto prognozēšanas modeli, tika samazināta vismaz par 40 %.
- Izstrādātā slīdēšanas laika mērīšanas un prognozēšanas metodika atkarībā no vides apstākļiem. Izmantojot metodiku, mērījumu rezultāti iekļaujas absolūto kļūdu robežās: gaisa mitrums  $\pm 4$  %, gaisa temperatūra  $\pm 1,5$  °C, ledus temperatūra  $\pm 1$  °C, slīdēšanas laiks  $\pm 0,01$  s pie ticamības līmeņa 95 %, kas nodrošina mērījumu precizitāti. Izmantojot izstrādāto metodiku, prognozēšanas modeļa atbilstības novērtēšanas kritēriji iekļaujas



robežās, kas liecina par korektu modeļa izstrādi. Metodika nosaka mērīšanas procedūras vadlīnijas vides apstākļu diapazonā: relatīvais gaisa mitrums no 50 % līdz 95 %, gaisa temperatūra no  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  līdz  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ledus temperatūra no  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  līdz  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## Praktiskā nozīmība

Promocijas darbā iegūtie rezultāti kalpos kā pierādījums, ka ir nepieciešams pilnvērtīgāk raksturot ledus berzes eksperimentu apstākļus. Ledus pētniecībā būtu iespējams paaugstināt dažādu pētnieku darbu salīdzināšanas iespējas. Zināšanas par vides parametru savstarpēju ietekmi uz nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošiem parametriem nodrošinātu citu parametru kvalitatīvāku izpēti, t. i., ja ir zināma vides apstākļu ietekme, ir iespējams pilnvērtīgāk analizēt citu nerūsējošais tērauds-ledus parametru ietekmi, piemēram, virsmas tekstūras, spiediena, formas u. c.

Attīstot promocijas darba rezultātus, būtu iespējams tos izmantot ar ledu saistītās nozarēs, piemēram, ceļu uzturēšanā, kuģniecībā, kā arī ledu sporta veidu pārstāvjiem, ļaujot izvēlēties atbilstošas slieces, slidas, kas var sniegt priekšrocības attiecīgos apstākļos. Izstrādātais prognozēšanas modelis izmantots Latvijas skeletoņa izlases treniņos, lai prognozētu skeletoņa slīdēšanu raksturojošus parametrus noteiktos vides apstākļos, attiecīgi pielāgojot slieces. To apliecina promocijas darba pilnajā versijā 10. pielikumā pievienotā Latvijas skeletoņa izlases trenera D. Dukura vēstule.

## Darba aprobācija

**Starptautiskās zinātniskās konferences** (kopā: 8, norādītas būtiskākās)

1. Jansons E., Irbe M., Kalniņa I., Gross K. A. The influence of environmental conditions on sliding over ice: An experimental study from bobsled push-start facility. 7th European Conference on Tribology, June 12–14, 2019, Wien, Austria. *Ar nopublicētu tēzi.*
2. Jansons E., Gross K. A., The Influence of Ice Topography on Sliding over Ice. ICTIE 2018: 20th International Conference on Tribology and Interface Engineering, November 14–15, 2018, Venice, Italy. *Ar nopublicētu tēzi.*
3. Jansons E. Regularities of friction pair steel – ice sliding properties depending on ambient conditions. The RTU 60th International Scientific Conference. October 14, 2019, Riga, Latvia.
4. Jansons E., Boiko I. The effect of Temperature and Humidity on Steel-Ice Sliding Ability. The RTU 61st international Scientific Conference on Mechanical Engineering and Technology and Heat Engineering. October 14, 2020, Riga, Latvia. *Ar nopublicētu tēzi.*

## Patenta pieteikums

1. Jansons E., Lungevičs J., Boiko I. Portable sliding ability measurement device and method used in on-field type experiments. Pat. pieteikuma nr. LVP2020000098, 04.03.2021, īpašnieks – RTU.

## Publikācijas (kopā: 12, norādītas būtiskākās)

### Publikācijas zinātniskajos žurnālos (SCOPUS)

1. Jansons, E., Irbe, M., Gross, K. A. Influence of weather conditions on sliding over ice at a push-start bobsled facility. *Biotribology*, 2021, Vol. 25. ISSN 2352-5738. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.biotri.2020.100152>.
2. Lungevics, J., Jansons, E., Boiko, I., Velkavrh, I., Voyer, J., Wright, T. A Holistic Approach Towards Surface Topography Analyses for Ice Tribology Applications, *Front. Mech. Eng.* 7 (2021) 56. Pieejams: <https://doi.org/10.3389/FMECH.2021.691485>.
3. Jansons, E., Lungevičs, J., Stiprais, K., Plūduma, L., Gross, K. A. Measurement of Sliding Velocity on Ice, as a Function of Temperature, Runner Load and Roughness, in a Skeleton Push-Start Facility. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, Vol. 151, 260.–266. lpp. ISSN 0165-232X. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.03.015>.
4. Jansons, E., Gross, K. A., Lungevičs, J., Plūduma, L. The Influence of Ice Texture on Sliding Over Ice. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2018, Vol. 55, No. 5, 54.–64. lpp. ISSN 0868-8257. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0036>.

### Raksts pilna teksta konferenču rakstu krājumā (SCOPUS)

1. Lungevičs, J., Jansons, E., Gross, K. Skeleton Runner Roughness and Surface Contact Area Influence on Sliding Ability: Field Experiments. *Key Engineering Materials*, Latvia, Riga, October 26, 2018. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd., 2019, 303.–307. lpp. ISSN 1013-9826. e-ISSN 1662-9795. Pieejams: [doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.800.303](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.800.303).
2. Jansons, E., Gross, K. The Impact of Ice Texture on Coefficient of Friction for Stainless Steel with Different Surface Roughness. *Key Engineering Materials*, Latvia, Riga, October 26, 2018. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd., 2019, 308.–312. lpp. ISSN 1013-9826. e-ISSN 1662-9795. Pieejams: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.800.308>.
3. Velkavrh, I., Voyer, J., Wright T., Lungevičs J., Jansons, E., Boiko, I., Variations of ice friction regimes in relation to surface topography and applied operating parameters, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1140 (2021) 012033. Pieejams: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1140/1/012033>.

## PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTIE APZĪMĒJUMI UN TERMINI

$\mu$  – berzes koeficients;

$Ra$  – vidējā aritmētiskā novirze negludumiem, mērot profilu,  $\mu\text{m}$ ;

$Sa$  – vidējā aritmētiskā novirze negludumiem, mērot virsmu,  $\mu\text{m}$ ;

$b_0, b_1 \dots b_n$  – regresijas koeficienti;

$x_1, x_2 \dots x_n$  – neatkarīgie saistītie mainīgie;

$\sigma$  – standartnovirze jeb vidējā kvadrātiskā novirze;

$RH$  – izmērītais relatīvais gaisa mitrums, %;

$T_{gaisa}$  – izmērītā gaisa temperatūra,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{ledus}$  – izmērītā ledus temperatūra,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{ks}$  – izstrādātā prognozēšanas modeļa – berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus – slīdēšanu raksturojošs parametrs,  $s$ ;

$r$  – korelācijas koeficients;

$R^2$  – determinācijas koeficients;

$\bar{R}^2$  – koriģētais determinācijas koeficients;

$\sigma_{reg}$  – daudzfaktoru regresijas modeļa standartnovirze.

Nerūsējošais tērauds – promocijas darbā izmantots nerūsējošais tērauds *Uddeholm Ramax HH*.

Ledus – promocijas darbā, kur nav izcelts robežslānis, termins (ledus) apzīmē gan ledus pamatni, gan robežslāni, kas veidojas uz tā.

Robežslānis – promocijas darbā apzīmē slāni uz ledus virskārtas (angļu val. *liquid-like layer*).

Eksperimentālais vai slīdošais paraugs – promocijas darbā apzīmē slīdni (angļu val. *slider*), kas ir saskarsmē ar ledu. Atšķirties var materiāls, ģeometrija, svars u. c. parametri.

Slīdēšanu raksturojošie parametri – promocijas darbā apzīmē parametrus, ar kuriem var raksturot parauga slīdēšanu pa ledu (angļu val. *sliding ability*). Tie var būt slīdēšanas laiks, ātrums, berzes koeficients u. c.

Slīdēšanas laiks – promocijas darbā apzīmē izmērīto kopējo slīdēšanas laiku 24 m garā posmā.

Reālu apstākļu eksperimenti – promocijas darbā apzīmē eksperimentus, kas tiek veikti ārpus laboratorijas (angļu val. *field experiments*).

Vides apstākļi – promocijas darbā apzīmē relatīvo gaisa mitrumu, gaisa temperatūru, ledus temperatūru.

Renes sporta veidi – promocijas darbā apzīmē bobsleju, skeletonu, kamaniņu sportu.

Eksperimentu sesija – promocijas darbā apzīmē vismaz 10 secīgus slīdēšanas laika mērījumus reālu apstākļu eksperimentu režīmā.

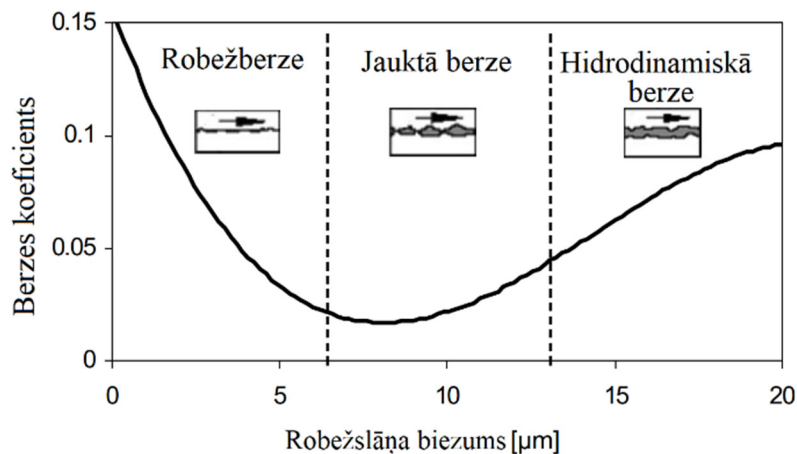
*IBSF* – Internacionālā bobsleja un skeletona federācija.

# 1. LITERATŪRAS APSKATS

## 1.1. Robežslānis un berzes režīmi, paraugam slidot pa ledu

Uz ledus virskārtas veidojās robežslānis, kas padara ledu slidenu un kam ir liela nozīme ar slīdēšanu pa ledu saistītos procesos. Vēsturiski tiek izšķirtas trīs galvenās teorijas par to, kā uz ledus virsmas rodas ūdens kārtiņa: spiediena rezultātā tiek kausēts ledus (angļu val. *Pressure melting*); ledus virsmas kušana jeb robežslāņa veidošanās no brīvajām ūdens molekulām (angļu val. *Surface melting*); ledus uzsilšana berzes rezultātā (angļu val. *Frictional heating*) [15–18].

Ledus berzē ir pieņemts izšķirt trīs berzes režīmus: robežberze (angļu val. *boundary friction*); jauktā berze (angļu val. *mixed friction*); hidrodinamiskā berze (angļu val. *hydrodynamic friction*). Kāds berzes režīms teorētiski tiek novērots, ir atkarīgs no robežslāņa biezuma starp paraugu un ledus virsmu (1.1. att.) [15,19]. Robežslāņa biezums savukārt ir atkarīgs no vides apstākļiem un eksperimentu uzstādījumiem.



1.1. att. Robežslāņa biezuma ietekme uz berzes koeficientu [15, 19, 20].

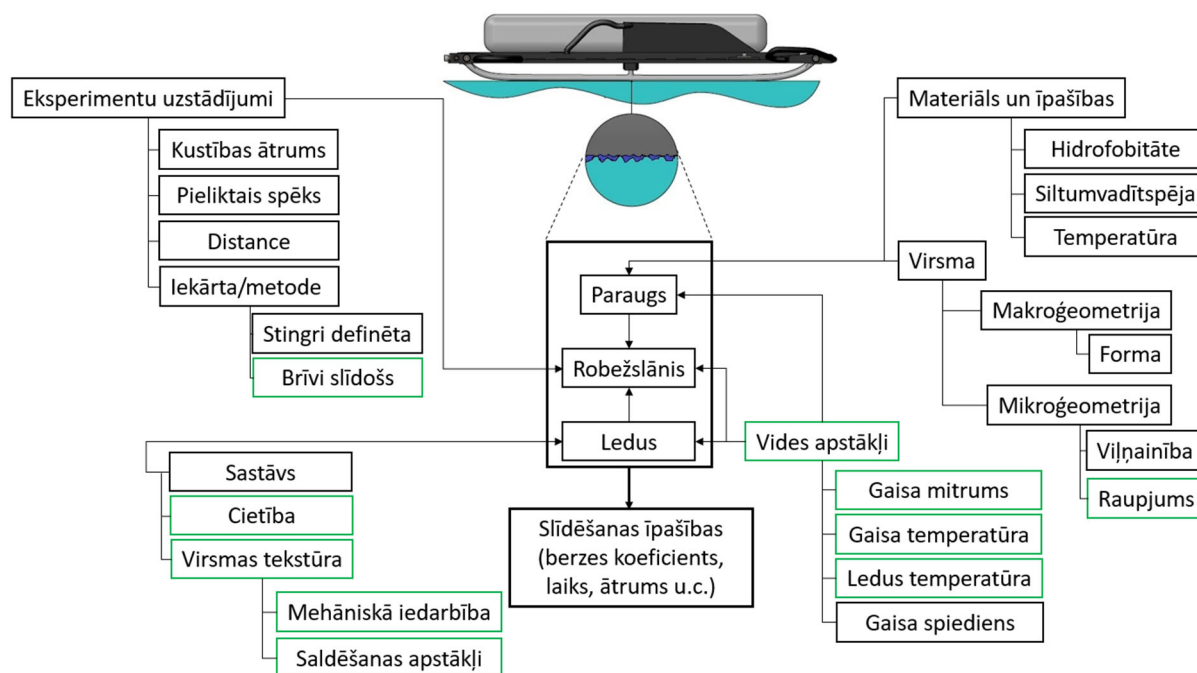
Robežslāņa biezums ietekmē berzes koeficientu starp slīdošo paraugu un ledu. Slānim palielinoties, samazinās berzes koeficients, arvien vairāk pārnesot tiešu kontaktu starp ledus izciļņiem uz jauktu kontaktu starp izciļņiem un robežslāni, līdz tiek sasniegta optimuma vērtība (1.1. att.). Jauktās berzes režīms ledus berzē tiek uzskatīts par apstākļiem [5, 10, 15, 19], kas nodrošinātu teorētiski zemāko berzes koeficientu. Pie hidrodinamiskās berzes, kad kontakts teorētiski notiek tikai pa robežslāni, berzes koeficients pieaug. To var skaidrot ar viskozo pretestību (angļu val. *viscous drag*) starp parauga virsmu un robežslāni [15, 19].

## 1.2. Parauga slīdēšanu pa ledu ietekmējošie faktori

Nerūsējošais tērauds-ledus un citu berzes pāru pētījumos jāapskata gan paraugu, kas slīd pa ledu, piemēram, slidas hokejā, ātrslidošanā, slieces renes sporta veidos, gan ledus virskārtu, kas ir atkarīga no apkārtējiem apstākļiem: 1) vides apstākļiem; 2) apstākļiem, kas veidojušies no mehāniskas iedarbības uz ledu virsmu (1.2. att.).

Vairāki pētnieki ir veikuši būtisku ieguldījumu ledu berzes izpētē. Eksperimenti ir veikti laboratorijas apstākļos, kas dod stabilus un kontrolējamus vides apstākļus, taču ir ierobežojumi

izmēru ziņā [5–8, 10, 21]. Eksperimentu apstākļi, t. i., pieliktais spēks un slīdēšanas ātrums, laboratorijā ir ierobežots, kas būtiski atšķiras no reālās dzīves situācijām. Reālu apstākļu eksperimenti iespēju robežās nodrošina eksperimentu pielāgošanu reālās dzīves situācijām, taču tie pārsvarā ir veikti ar cilvēka līdzdalību [11, 16, 22–24]. Ir eksperimenti, kur tas ir pieļaujams un nepieciešams, taču, lai nodrošinātu augstu mērījumu precizitāti, pētot parauga slīdēšanu pa ledu, ir jābūt maksimālai kontrolei pār eksperimentu.



1.2. att. Nerūsējošais tērauds-ledus ietekmējošie faktori (zaļā krāsā izcelti parametri, kas apskatīti šajā promocijas darbā).

Paraugs-ledus berzi ietekmē daudz faktori gan no parauga, kas slīd pa ledu, gan ledu puses, tāpēc ir rūpīgi jādefinē eksperimentu apstākļi (1.2. att.). Tāds parametrs kā gaisa mitrums (1.1. tab.) praktiski netiek mērīts, lai gan literatūrā ir minēts, ka gaisa mitrumam varētu būt būtiska ietekme uz slīdēšanu starp paraugu un ledu. *Calabrese* pētīja gaisa mitruma ietekmi uz berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus berzes koeficientu pie  $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$  un ieguva datus, ka lielāks gaisa mitrums samazina berzes koeficientu [15]. Ņemot vērā zināmās literatūras analīzi, nav datu par gaisa mitruma ietekmi uz slīdēšanu raksturojošiem parametriem citos berzes režīmos. Gaisa mitrums ir ūdens tvaika koncentrācija gaisā. Tam palielinoties, arī ūdens tvaiks gaisā palielinās. Gaiss ir kontaktā ar virsmām un uz ledu esošo robežslāni, tāpēc gaisā esošajām ūdens tvaika molekulām kohēzijas rezultātā ir tendence sajaukties ar ūdens molekulām starpmolekulāro ūdeņraža saišu dēļ [25]. Ņemot vērā šo aspektu un *Calabrese* pētījumu, gaisa mitrumam visos berzes režīmos vajadzētu būt ietekmei uz robežslāņa biezumu, tādējādi – arī uz parauga slīdēšanu pa ledu.

Izmantojot regresijas analīzi, pētījumos secināts, ka slīdošā parauga temperatūrai ir lielāka ietekme nekā materiāla īpašībām, slīdēšanas ātrumam un slodzei [6]. Ledus temperatūra, kas attiecīgi ietekmē ledu cietību, galvenokārt tiek izmantota kā noteicošais parametrs apstākļu definēšanā gan teorētisko modeļu izveidē [26, 27], gan praktisko eksperimentu veikšanā

[7, 11, 12, 28]. Teorētiski vienādos apstākļos, izmantojot atšķirīgas ledus berzes teorijas, berzes koeficienta vērtības var atšķirties līdz pat divām reizēm [3, 26]. Iegūtās eksperimentālās vērtības variē vēl lielākā diapazonā [15], kas liek domāt, ka ledus temperatūra kā vienīgais vides apstākļu aprakstošs parametrs nav pietiekams. Ņemot vērā, ka teorētiskie modeļi, lai aprakstītu ledus berzi, pēc savas būtības ir sarežģīti un iekļauj reāli neizmērāmus parametrus, ir potenciāls izmantot regresijas analīzi, kas balstīta empīriski iegūtos eksperimentu rezultātos.

1.1. tabula

Pētnieku veikto eksperimentu apkopojums

	Eksperiments	Atsauce	Slīdēšanas ātrums, m/s	Vides apstākļi		
				Gaisa temperatūra, °C	Ledus temperatūra, °C	Gaisa mitrums, %
Eksperimenti laboratorijas apstākļos	Lodīte pret disku tribometrs	<i>Spagni</i> [5]	0,25...1	-2; -6; -10; -13; -17	?	?
	Lodīte pret disku mikrotribometrs	<i>Scherge</i> [7]	1...65	?	-6; -10; -17	?
	Ø 1,8 m tribometrs	<i>Baurle</i> [8]	0,5...20	-20...1	-7...-5	?
	Ø 3,8 m tribometrs	<i>Scherge</i> [9]	2,8...28	?	-12...-2	?
	Lineārs tribometrs	<i>Ducret</i> [10]	0,003	-15...5	?	?
	Lineārs tribometrs	<i>Marmo</i> [12]	0,01...0,4	?	-27...-0,5	?
	Lineārs tribometrs	<i>Bottcher</i> [28]	1	?	-2; -6; -10	?
	Lineārs tribometrs	<i>Rohm</i> [29]	0,1...12	-2; -3,5; -6,3; -9,8	-3,2; -4,6; -7,4; -11,7*	79...82
	Reometrs	<i>Kietzig</i> [1]	0,1...1,2	-4	-14...-2	?
	Rotācijas tipa tribometrs	<i>Akkok</i> [6]	0,05...5	-30...-10	-30...-10	?
	Rotācijas tipa tribometrs	<i>Liefferink</i> [14]	0...1	?	-110...0	?
	Lineārs tribometrs	<i>Kim</i> [13]	0,003	?	-18...-2	?
Reālu apstākļu eksperimenti	Rāmis ar 4 bobsleja sliecēm	<i>Poirier</i> [11]	1...10	?	-4,6...-2,2	?
	Cilvēks uz slidām	<i>Koning</i> [22]	4...11	12	-11...-2	55
	Cilvēks uz slidām	<i>Colbeck</i> [23]	?	?	-13,5...-2,5	?
	Rāmis ar slidām	<i>Federolf</i> [24]	1...2	14...16	-6...-5	17...26
Gadījumu skaits				<b>8 no 16</b>	<b>14 no 16</b>	<b>3 no 16</b>

\* Eksperimenti veikti uz sapresēta sniega, nevis ledus.

Ņemot vērā veikto literatūras analīzi, var secināt, ka pārsvarā netiek veikta pilnvērtīga ledus berzes eksperimentu uzstādījumu aprakstīšana. Trīs vides apstākļu (gaisa temperatūra, ledus temperatūra un gaisa mitrums) mijiedarbība var būtiski ietekmēt slīdēšanu raksturojošus parametrus starp paraugu un ledu. Zinot šo apstākļu potenciālo ietekmi uz rezultātu, varētu samazināt neprecizitātes jau tā sarežģītajos ledus berzes pētījumos un uzlabot dažādu autoru darbu salīdzināšanas iespējas.

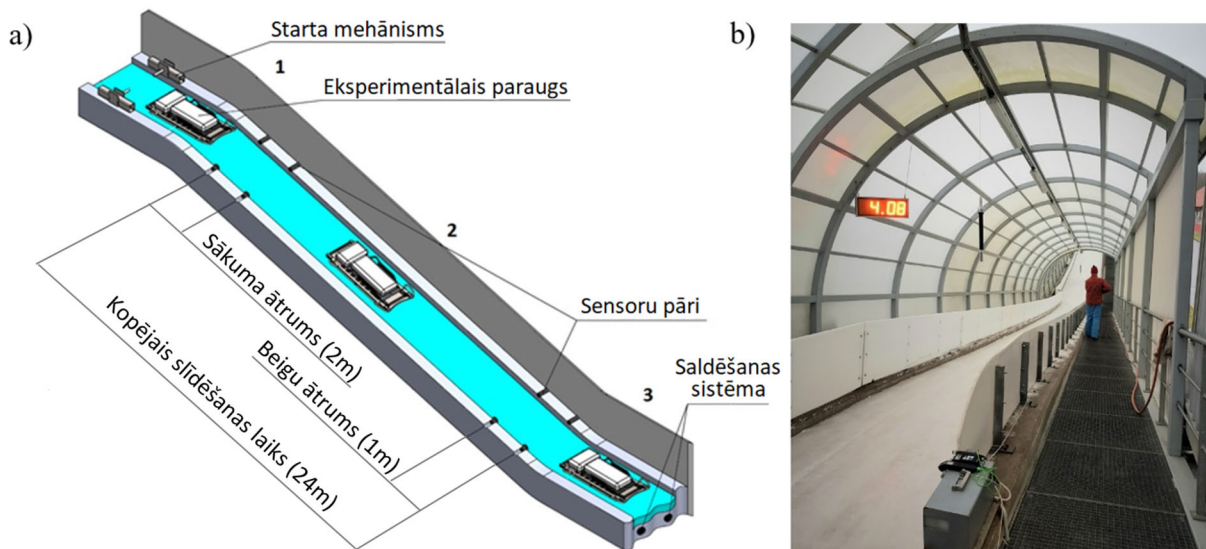
## 2. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

### 2.1. Eksperimentālā parauga slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas iekārta

Ņemot vērā apskatīto literatūru un tehnoloģisko nodrošinājumu, lai iegūtu eksperimentu apstākļus, kas maksimāli pietuvināti reālās dzīves situācijām, jāveic reālu apstākļu eksperimenti. Ņemot vērā literatūras analīzi, lai to veiksmīgi izmantotu, jānodrošina, ka cilvēka faktors nevar ietekmēt slīdēšanas mērījumus, jābūt kontrolētai kustības trajektorijai, kā arī pilnvērtīgi jāapraksta vides apstākļi.

#### Slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas iekārta

Reālu apstākļu eksperimenti tika veikti, izmantojot virsmu slīdēšanu raksturojošu parametru noteikšanas mēriekārtu, balstītu slīpās plaknes principā, bobsleja, skeletona un kamaniņu starta treniņu estakādē. Estakāde ir daļēji noslēgta, novēršot vēja, sniega, lietus un tiešu saules staru ietekmi, taču gaisa temperatūra un mitrums ir tieši atkarīgs no vides apstākļiem. Estakāde ir iedalīta divās daļās – kamaniņu starta treniņu estakāde un bobsleja, skeletona treniņu estakāde. Eksperimentiem tika izmantota kamaniņu starta treniņu estakādes puse (kopējā distance – 24 m), jo ir iespējams, neveicot lielas ledus trases modifikācijas, fiksēt eksperimentālā parauga starta pozīciju, kā arī slīpuma leņķis ( $\sim 14^\circ$ ), nodrošina parauga kustības sākšanu no miera stāvokļa jebkādos eksperimentu vides apstākļos (2.1. att.). Estakādes daļa ir aprīkota ar četriem optiskajiem sensoriem, kas fiksē slīdēšanas laiku, sākuma un beigu ātrumu (2.1. a att.).



2.1. att. Kamaniņu starta treniņu estakāde: a) CAD shēma; b) foto.

Ledus saldēšana tika veikta ar iestrādātu saldēšanas sistēmu. Iegūstot nepieciešamo ledus kārtas biezumu, tas tika apstrādāts ar pielāgotu ēveli, nogludinot tā virskārtu. Lai nodrošinātu parauga kustības trajektorijas stabilitāti, ledus virskārtā tika iestrādāta  $\varnothing 20$  mm grope paralēli slīdēšanas virzienam, kas nodrošina kontrolētu kustību pa to (2.2. b att.).

## Eksperimentālais paraugs

Eksperimentos tika izmantots skeletons ar divām sliecēm. Slieču diametrs – 16 mm, garums ~1 m. Tās ir veidotas atbilstoši 2019. gada *IBSF* standartam [30]. Slieču materiāls – nerūsējošais tērauds *Uddeholm Ramax HH*. Slieces pie skeletona tika spriegotas ar izliekuma iestatīšanas skrūvi, tādējādi mainot teorētisko kontakta laukumu un skeletona slieču augstumu no ledus virsmas [31]. Spriegojums tika izvēlēts 9 mm no “nulles” spriegojuma (slieces nav spriegotas), iegūstot rādiusu ~11500 m (izmērīts ar *Mitutoyo CRYSTA-PLUS M500* (*Mitutoyo*, Japāna) manuālo koordinātu mērīšanas iekārtu). Izmērs tika kontrolēts ar dziļuma mērīšanas bīdmēru (nolasīšanas precizitāte 0,05 mm). Šāds spriegojums nodrošina pietuvinātus apstākļus sacīkšu režīmam, kā arī skeletona vadāmību – lielāks spriegojums padara skeletonu mazāk vadāmu un var pieaugt gadījuma kļūdu skaits.

Skeletona slieces tika pulētas, izmantojot 600, 1500 un 3000 *3M* smilšpapīrus uz auduma bāzes, līdz tika iegūta spoguļgluda virsma ( $Sa \sim 0,03 \mu\text{m}$ ). Lai iegūtu saskrāpētu slieci, tika izmantots 600 *3M* smilšpapīrs, un sliece skrāpēta ar konstantu skrāpēšanas spēku un ceļu [32, 33], iegūstot  $Sa \sim 0,12 \mu\text{m}$ . Tekstūras mērījumi tika veikti atbilstoši *EN ISO 25178* standartam [34], izmantojot *Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50* (*Taylor Hobson*, Lielbritānija) profilometru.

## Eksperimentu apstākļi

Lai nodrošinātu pietuvinātus apstākļus sacīkšu režīmam, skeletonam tika pievienota papildu masa – 65 kg, kas atbilst sievietu un vieglāku vīriešu sportistu masai, sasniedzot kopējo eksperimentālā parauga masu – 95 kg. Papildu masa tika nodrošināta ar smilšu maisiem, kas pielīmēti pie parauga nemainīgā pozīcijā (2.2. a att.). Pieliktā spēka ietekme uz slīdēšanu apskatīta [33] publikācijā. Eksperimentālā parauga sākuma pozīcija tika saglabāta nemainīga dažādos eksperimentos ar ķēdes palīdzību. Pirms parauga palaišanas no miera stāvokļa ķēde pie roktura un ķēde piestiprināta pie parauga tika savienotas ar tapu un nospriegotas. Eksperimentālais paraugs iesāk kustību, kad tapa starp ķēdēm tiek izrauta.



2.2. att. Eksperimentālā parauga attēlojums starta treniņu estakādē: a) skeletons pirms eksperimentiem un vides apstākļu mēraparāti; b) skeletona sliece iestrādātajā ledus gropē.



Katrā eksperimenta sesijā tika veikti vismaz 10 slīdēšanas laika mērījumi. Parasti praksē ir pieņemts, ka slīdēšanas aprakstošais parametrs ir berzes koeficients [5, 7, 15, 29]. Šajā gadījumā tika mērīts slīdēšanas laiks (īsāks slīdēšanas laiks ir ekvivalents mazākam berzes koeficientam).

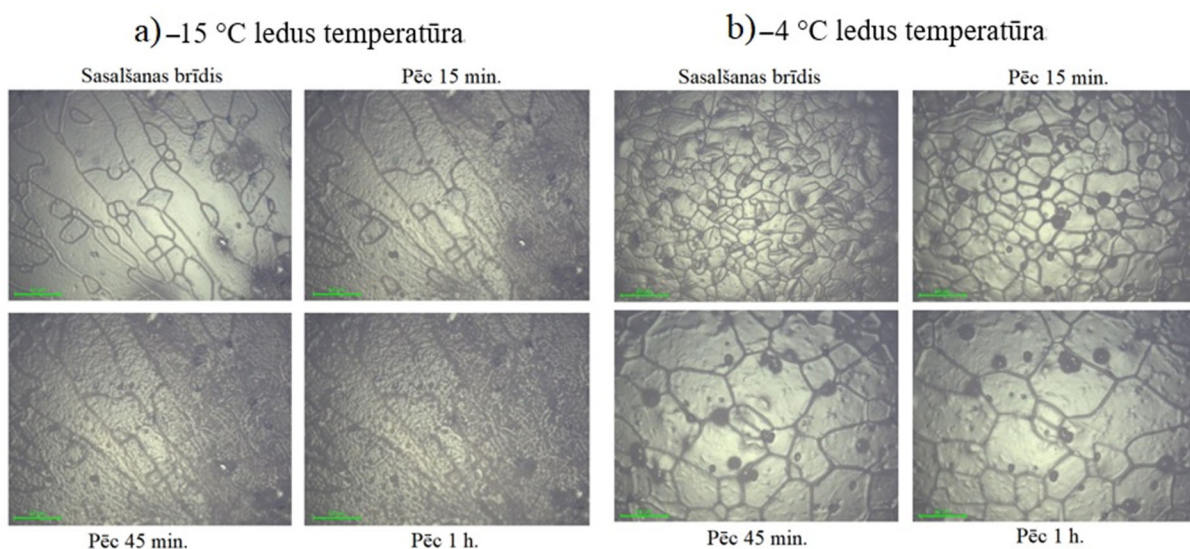
### Vides apstākļu mērījumi

Ledus temperatūra tika mērīta, izmantojot kontakta tipa termopāri *TP-122-100-MT-K* (Czaki, Polija), savienotu ar *Proscan 520* (Dostmann, Vācija) termometru. Ledus berzes pētījumos ledus temperatūru mēdz pieņemt atkarībā no eksperimentos iestatītās ledus temperatūras, nenorādot mērīšanas paņēmieni [10, 35, 36] vai pieņemot pēc gaisa temperatūras saldēšana kamerā [5]. Citos gadījumos tiek izmantoti termopāri [8, 28, 29]. Gaisa temperatūra un gaisa mitrums tika mērīts ar *P330 Temp* (Dostmann electronic, Vācija) termometru. Abas iekārtas, veicot eksperimentus, tika novietotas vienā pozīcijā (2.2. a att.). Vides apstākļu mērījumi tika fiksēti pirms katra slīdēšanas laika mērījuma eksperimentu sesijā. Slieču temperatūra tika mērīta ar termokameru *Thermal imager Testo 871* (Testo, Vācija).

## 2.2. Ledus virsmas izpēte

Eksperimenti tika veikti ar nanoindentoru *Hysitron TI980* (ASV) ar papildu saldēšanas moduli uzņēmumā “Bruker” Minesotā ASV ārvalstu mobilitātes ietvaros. Promocijas darba kopsavilkumā apskatītas ledus virsmas vizuālās izmaiņas dažādās ledus temperatūrās. Ledus cietības un robežslāņa biezuma mērījumi apskatīti promocijas darba pilnajā versijā.

Novērojumu aprakstīšanā tiek izmantoti termini – raupjāka un gludāka ledus virsma, kam ir tikai vizuāls pamatojums. Tika veikti divi eksperimenti: pirmajā eksperimentā ledus tika sasaldēts pie  $-4\text{ °C}$  un noturēts  $-15\text{ °C}$  ledus temperatūrā vienu stundu (2.3. a att.). Sasalšanas brīdī ir labi redzamas kristālu robežas, un virsma ir gluda. Turpinoties novērojumiem, kristālu robežas paliek grūtāk nosakāmas, turklāt virsma izskatās raupjāka nekā sasalšanas brīdī. Otrajā eksperimentā ledus tika sasaldēts pie  $-15\text{ °C}$  un noturēts pie  $-4\text{ °C}$  ledus temperatūras vienu stundu (2.3. b att.). Salīdzinot ar pirmo eksperimentu, sasalšanas brīdī redzami vairāk un mazāki kristāli, taču, novērojumiem turpinoties, kristālu robežas saplūst, un veidojas lielāki, gludāki kristāli.



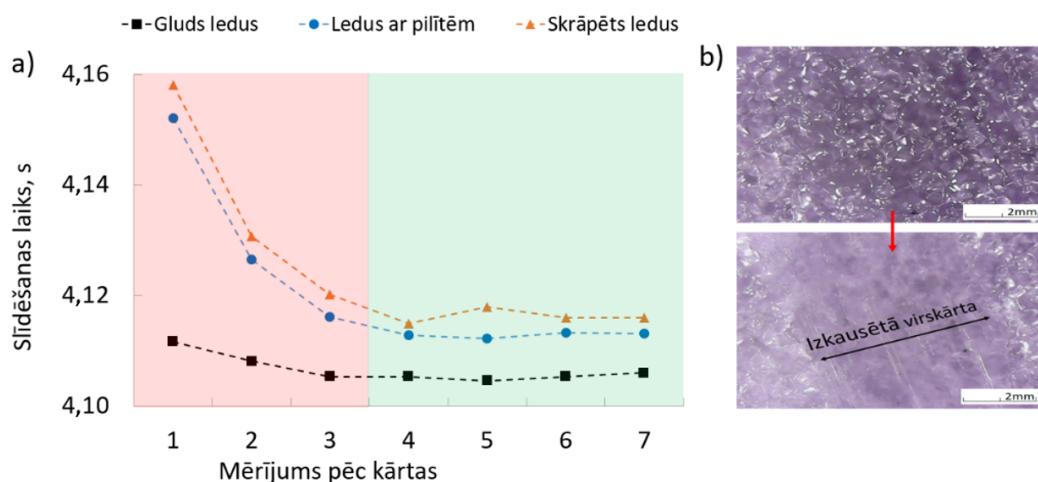
2.3. att. Ledus virsmas novērojumi: a) pie  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ledus temperatūras; b) pie  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ledus temperatūras.

Ņemot vērā novērojumus divos dažādos apstākļos, var secināt, ka zemākā ledus temperatūrā ledus virsma paliek raupjāka, iespējams, ka plānā ūdens kārtiņa uz virskārtas sasilst, savukārt siltākā temperatūrā ūdens kārtiņa saglabājas, veicinot kristālu saplūšanu un gludāku ledus virsmu.

### 2.3. Ledus tekstūras ietekme uz parauga slīdēšanu pa ledu

Ņemot vērā to, ka vides apstākļi un mehāniskā iedarbība uz ledus virsmu var radīt ledus virskārtas tekstūras izmaiņas, tika speciāli izveidotas dažāda tipa ledus virsmas (gluda, skrāpēta un ar ūdens pilītēm (skat. promocijas darba 4. pielikumu)), un pēc tam tika eksperimentāli pārbaudīta to ietekme uz parauga slīdēšanas laiku.

Ledus sagatavošanas procedūra, iegūstot dažāda tipa ledus virsmas, aprakstīta [37, 38] literatūras avotos. Ledus apstrāde tika veikta visā estakādes garumā gan gropē, gan uz gludās ledus virsmas. Pa sagatavotajām trīs ledus virsmām tika veikti slīdēšanas laika mērījumi trīs dažādās eksperimentu dienās, katrā no tām uzrādot līdzīgu tendenci, tādēļ grafiskā reprezentācija (2.4. att. a) ir norādīta tikai vienai eksperimentu dienai ar šādiem apstākļiem – ledus temp.  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; gaisa temp.  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; relatīvais gaisa mitrums 69 %. Pēc grafika datiem redzams, ka uz visām ledus virsmām ir novērojama tendence slīdēšanas laikam samazināties pirmajos trīs mērījumos, pēc tam stabilizējoties.



2.4. att. a) Ledus virsmas ietekme uz slīdēšanas laiku; b) ledus virsmas izmaiņas pirms un pēc viena mērījuma.

Ledus virskārta tika apskatīta ar portatīvo mikroskopu *1000x USB Digital Microscope* (Gaosuo, Ķīna), lai noteiktu izmaiņas pirms mērījuma veikšanas un pēc viena mērījuma (2.4. b att.) ledum ar pilītēm. Redzams, ka ir izteiktas slieces slīdēšanas pēdas un virsmas tekstūras deformācija. Iespējams, ka, skeletonam slīdot, ir jāpatērē enerģija, nolīdzinot ledus tekstūras virskārtu, līdz tā ir gluda un stabilizējas slīdēšanas laiks [39].

Šajā darbā uzsvars ir likts uz eksperimentiem reālu apstākļu režīmā, taču, pētot, kā ledus virskārta ietekmē slīdēšanas ātrumu un statisko berzes koeficientu laboratorijas apstākļos, ar vieglākiem paraugiem tika iegūti rezultāti, ka ledus ar ūdens pilītēm nodrošina mazāko berzes koeficientu [37, 40]. Tas tika skaidrots ar teorētiski mazo kontakta laukumu starp ledu un paraugu, līdz ar to adhēzijas spēks nav tik izteikts, kā arī mazāka parauga masa nodrošina kustību pāri ledus virskārtai, nevis enerģijas patērēšanu virskārtas izlīdzināšanai. Teorētiski, ja tiktu nodrošināta lielāka pilišu cietība, iespējams, ka slīdēšanas rezultāti, kas redzami 2.4. attēlā, būtu pretēji.

Eksperimentā tika pierādīts, ka ledus virskārta var būtiski ietekmēt slīdēšanas rezultātus. Ir nepieciešami vismaz trīs testa mērījumi, kas netiek ņemti vērā, pirms tiek sākts aktuālais eksperiments.

## 2.4. Eksperimentālā parauga vibrāciju analīze

Eksperimentālajam paraugam slīdot pa ledus trasi, tika veikta vibrāciju analīze. Dati tika iegūti ar trīs asu akselometru *XI6-ID* (ASV). Akselometrs tika piestiprināts zem parauga masas centrā. Skeletonam slīdot lejā pa ledus trasi, paātrinājumi tika mērīti slīdēšanas virzienā ( $x$  ass), šķērsvirzienā ( $y$  ass) un vertikālā ( $z$  ass) virzienā. Dati tika ierakstīti 5 sekundes, kas ir laiks, kāds nepieciešams, lai skeletons izmantotajā ledus trases posmā veiktu pilnu 24 m distanci no pirmā sensora līdz pēdējam.

Eksperimenti tika veikti divās būtiski atšķirīgās eksperimentu dienās. Pirmais eksperiments: gaisa temp. un ledus temp.  $-10,5$  °C, relatīvais gaisa mitrums 70 % – iespējams robežberzes režīms. Otrais eksperiments: gaisa temp.  $2$  °C; ledus temp.  $-4$  °C, relatīvais gaisa mitrums

70 % – iespējams jauktās berzes režīms), iegūstot informāciju par trases profilu, ledu un gropes kvalitāti un vibrāciju ietekmi uz slīdēšanu raksturojošiem parametriem atšķirīgos vides apstākļos (atšķirīgiem berzes režīmiem). Tālāk tekstā, lai raksturotu abus eksperimentus, izmantoti termini – robežberzes režīms un jauktās berzes režīms. Izvēlētajiem apzīmējumiem ir tikai paskaidrojoša nozīme, balstoties uz ledus berzes režīmu līkni (1.1. att.).

Tika izmērīts trases profils, iegūstot informāciju, ka trases beigās ir vērā ņemams noapaļojums. Turklāt, palielinoties slīdēšanas ātrumam, paātrinājumu svārstību amplitūdai ir tendence pieaugt, līdz ar to var būt neprecizitātes iegūstamo parametru mērījumos, ja ir lielāks slīdēšanas ātrums. Jauktās berzes režīmā paātrinājuma standartnovirzes vērtības gan slīdēšanas virzienā, gan vertikālā virzienā ir ~20 % mazākas nekā robežberzes režīmā, kas liecina par “mierīgāku” skeletoņa slīdēšanu un attiecīgi var ietekmēt slīdēšanas laika mērījumus. Paātrinājuma mērījumi šķērsvirzienā norāda par potenciālo gropes efektu uz slīdēšanu. Pretēji paātrinājumiem  $x$  un  $z$  ass virzienos,  $y$  ass virzienā standartnovirze paātrinājuma mērījumiem mazāka tika novērota robežberzes režīmā nekā jauktās berzes režīmā (starpība ~10 %). Šāds novērojums varētu liecināt par augstāku gropes kvalitāti, samazinoties ledus temperatūrai. To varētu izskaidrot ledus cietības pieaugums.

Plašāka informācija un attēli – promocijas darba pilnajā versijā un [32] literatūras avotā.

## **2.5. Eksperimentālā parauga virsmas tekstūras ietekme uz slīdēšanu pa ledu**

Tā kā parauga slieces pirms eksperimentiem tika apstrādātas manuāli un netika veikta virsmas kvalitātes kontrole pirms katra eksperimenta, tika veikta nevēlamu skrāpējumu uz slieču virsmas ietekmes uz slīdēšanas laiku izpēte. Tika veikti pieci eksperimenti atšķirīgos vides apstākļos. Sākotnēji slieces tika nopulētas, iegūstot virsmas raupjumu  $Sa \sim 0,03 \pm 0,01 \mu\text{m}$ . Tika veikts eksperiments ar vismaz 10 mērījumiem, iegūstot slīdēšanas laiku. Pēc tam tās pašas slieces tika saskrāpētas kustības virzienā ar 600 3M smilšpapīru [33], iegūstot virsmas raupjumu  $Sa \sim 0,12 \pm 0,03 \mu\text{m}$ , un atkārtota eksperimentu procedūra.

Vidējā procentuālā starpība starp slīdēšanas laika rezultātiem ar pulētām un skrāpētām sliecēm sasniedza 0,07 % (iekļaujas mērījumu standartnovirzes robežās). Slīdēšanas laika vidējā % starpība starp eksperimentu dienām – 0,77 %.

Kā pierādīts publikācijās [5, 15, 29, 41, 42], slīdošā parauga virsmas tekstūra var būtiski ietekmēt slīdēšanas rezultātus, taču eksperimentu apstākļi – pieliktais spēks, ātrums – ir krasi atšķirīgi, salīdzinot ar reālu apstākļu eksperimentiem, līdz ar to šāda tipa eksperimentos lielāka ietekme uz slīdēšanas rezultātiem ir vides apstākļiem, nevis slieču raupjumam apskatītajā diapazonā.

Plašāka informācija un attēli – promocijas darba pilnajā versijā un [32] literatūras avotā.

## **2.6. Reālu apstākļu eksperimentu procedūra**

Ņemot vērā eksperimentāli iegūtos datus, tika izstrādāta reālu apstākļu eksperimentu veikšanas procedūra. Pilns eksperimentu procedūras apraksts, kas ietver nepieciešamos

mērīšanas līdzekļus, aprīkojumu u. c., aprakstīts promocijas darba pilnajā versijā un promocijas darba 11. pielikumā. Veicot tiešos mērījumus ar optisko sensoru palīdzību, iegūst slīdēšanu raksturojošu parametru – slīdēšanas laiks, s.

### **1. Mērīšanas procedūras apraksts**

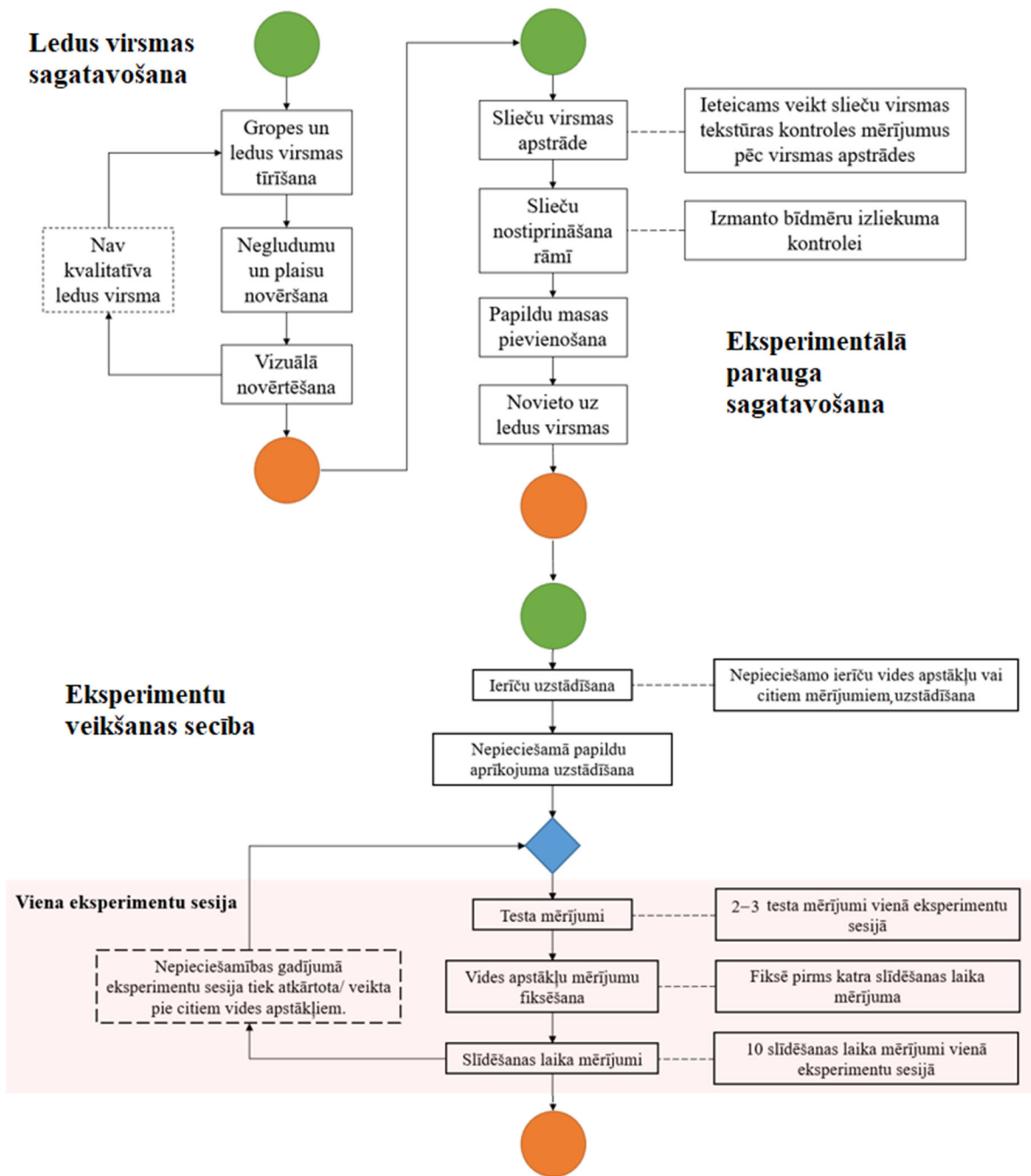
Mērīšanas procedūras algoritms redzams 2.5. attēlā.

Ledus virsmas sagatavošanas daļa apraksta soļus, kā ir jāapstrādā ledus virsma pirms eksperimentu sākšanas, pieņemot, ka ledus virsma ar iestrādātu gropi paralēli kustības virzienam ir sagatavota iepriekš.

Eksperimentālā parauga un slieču sagatavošanas daļa apraksta, kā ir jāgatavo slieces (*Sa* robežās no 0,02 μm līdz 0,15 μm (mērot pēc standarta *EN ISO 25178* [34])), kāds spriegojums jāizmanto (izliekuma rādiuss ~ 11500 m jeb 9 mm no “nulles” spriegojuma), tiek pievienota papildu masa (65 kg), kā arī aprakstīts, kas un kāds laiks (10–15 min) ir jāievēro, paraugu novietojot uz ledus virsmas atdzišanai.

Eksperimentu veikšanas secības daļa apraksta secību pa soļiem, kā tiek veikts eksperiments, pieņemot, ka ir izpildītas iepriekš aprakstītās darbības. Sākotnēji tiek uzstādītas vides apstākļu mērījumu ierīces, kā arī pārbaudīta optisko sensoru darbība, pēc tam – nepieciešamais papildu aprīkojums, kas nodrošina eksperimentālā parauga palaišanu no miera stāvokļa, kā arī tā nogādāšanu atpakaļ starta pozīcijā. Kad eksperimentu sagatavošanās process ir veikts, tiek veikti slīdēšanas laika mērījumi.

Pēc vienas eksperimentu sesijas, ja nepieciešams, var tikt veiktas attiecīgās manipulācijas, piemēram, sliecēm, ledus trasei, eksperimentālajam paraugam.



2.5. att. Berzes pāra nerūsējošais tērauds–ledus slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas procedūras algoritms (sadalīts trīs secīgās daļās).

## 2. Reālu apstākļu eksperimentu procedūras novērtēšanas kritēriji

Lai novērtētu veiktās reālu apstākļu eksperimentu procedūras kvalitāti, var tikt definēti vairāki kritēriji (šajā gadījumā, balstoties uz standarta *EN ISO 9000:2005* [43] terminu skaidrojumiem). Tiem ir jābūt izpildītiem, lai iegūtos mērījumu datus var izmantot tālākai apstrādei. Eksperimentu procedūras novērtēšanas kritēriji ir šādi:

- slieču virsmas tekstūras raupjuma raksturojošais parametrs  $S_a$  robežās no  $0,02 \mu\text{m}$  līdz  $0,15 \mu\text{m}$ , mērot pēc standarta *EN ISO 25178* [34];

- vides apstākļu mērījumu vienas eksperimentu sesijas absolūtā kļūda relatīvajam gaisam mitrumam  $\pm 5\%$ , gaisa temperatūrai  $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ , ledus temperatūrai  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- vienas sesijas kopējā slīdēšanas laika absolūtā kļūda ne lielāka par  $\pm 0,01\text{ s}$ ;
- kopējais vienas sesijas eksperimenta laiks – līdz 20 min.

Ja eksperimentu sesija ir ilgāka, ņemot vērā, ka eksperimenti tiek veikti reālu apstākļu eksperimentu režīmā, var būtiski mainīties kāds no vides apstākļiem, attiecīgi ietekmējot mērāmo slīdēšanas laiku.

### 3. Reālu apstākļu eksperimentu procedūru salīdzinājums

Izstrādātā reālu apstākļu eksperimentu veikšanas procedūra tika salīdzināta ar zināmajā literatūrā atrodamajām eksperimentu procedūrām, kas teorētiski varētu nodrošināt vides apstākļu ietekmes uz berzes pāra nerūsējošais tērauds–ledus izpēti (2.1. tab.).

2.1. tabula

Eksperimentu procedūru salīdzinājums

Eksperimentu procedūra	Izslēgts cilvēka faktors	Kontrolēta kustības trajektorija	Pilnvērtīga vides apstākļu kontrole	Variācijas iespējas
<i>Federolf</i> eksperimenti [24]	Jā	Nē	Jā	Jā
<i>Poirier</i> eksperimenti [11]	Nē	Nē	Nē	Daļēji
<i>Hainzmaier</i> eksperimenti [16]	Nē	Nē	Nē	Nē
Izstrādātā procedūra	Jā	Jā	Jā	Daļēji

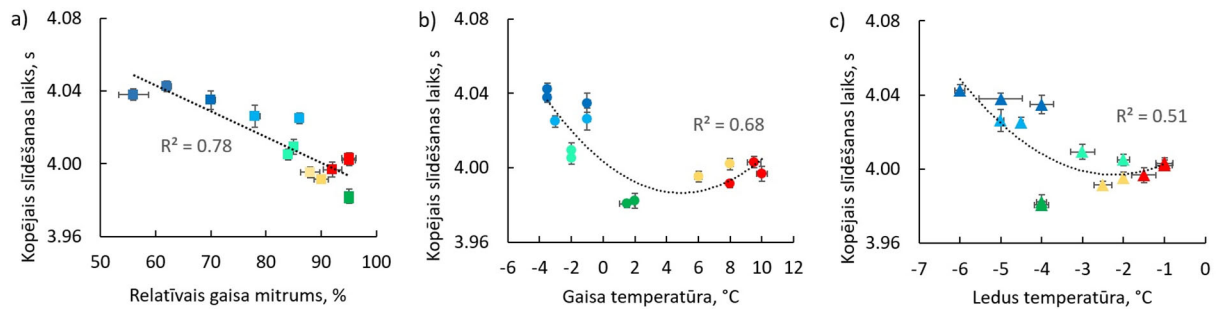
2.1. tabulā redzams, ka *Poirier* [11] un *Hainzmaier* [16] eksperimentu procedūras šajā gadījumā izmantot nevar, jo cilvēks tieši ietekmē eksperimentu rezultātu, līdz ar to kustības trajektorija var būtiski atšķirties. Pilnvērtīgu vides apstākļu kontroli varētu veikt *Poirier* eksperimentos. *Hainzmaier* eksperimentos tiek izmantota visa bobsleja trase, kur vides apstākļi dažādās trases vietās var atšķirties, turklāt tā nav pasargāta no klimatisko apstākļu ietekmes. *Federolf* [24] eksperimentu procedūra būtu vispiemērotākā, taču, to izmantojot, netiktu kontrolēta eksperimentālā parauga kustības trajektorija, kas radītu neprecizitātes rezultātos. Izstrādātā procedūra prasa specifisku infrastruktūru, taču ar to var izpildīt definētos kritērijus.

### 2.7. Vides apstākļu ietekme uz slīdēšanas laiku

Eksperimenti tika veikti reālu apstākļu režīmā, un vides apstākļu kontrole nebija iespējama, tādēļ tālākai analīzei tika ņemti vērā tikai tie eksperimenti, kur atšķīrās novērotie vides apstākļi (kopā 14). Mērījumi tika veikti pēc iepriekš aprakstītās procedūras. Mērījumu rezultāti – promocijas darba pilnajā versijā 2.6. tabulā.

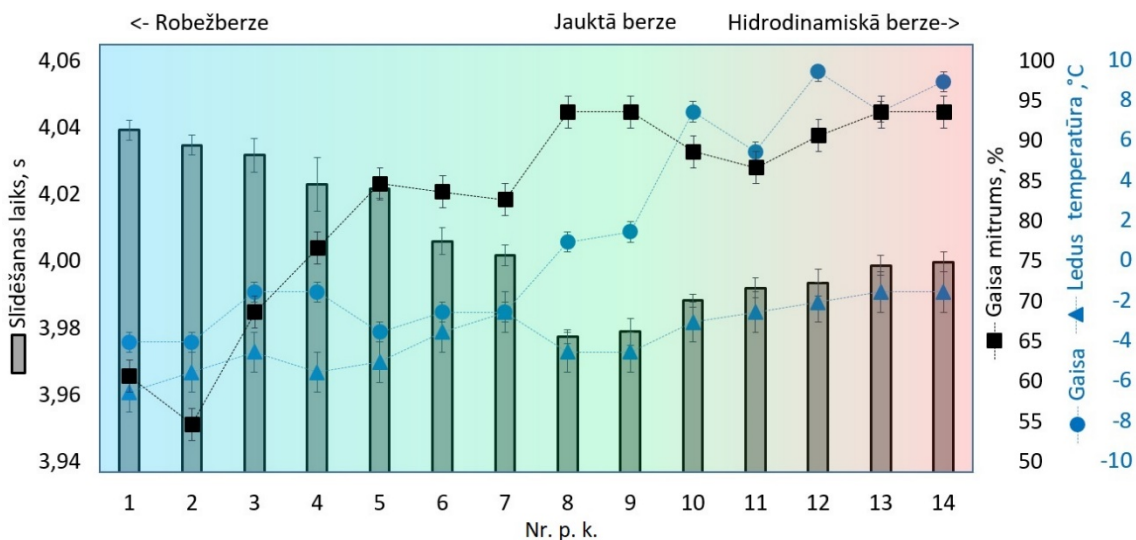
Rezultāti tika analizēti kā neatkarīgu parametru – gaisa mitruma, gaisa temperatūras un ledus temperatūras – ietekme uz slīdēšanas laiku (2.6. att.), kā arī kā trīs parametru savstarpējā mijiedarbība uz slīdēšanas laiku (2.7. att.). Katrs izmērītais vides apstākļu parametrs tika salīdzināts ar slīdēšanas laiku (2.6. att.), tādējādi iegūstot sakarības, kas tiktu iegūtas, ja mērīts būtu tikai kāds no trīs vides apstākļu aprakstošajiem parametriem, lai gan eksperimentu gaitā mainījās arī pārējie parametri. Izmantojot datorprogrammas *Microsoft Excel 2017* iespējas,

katram gadījumam tika iegūta līkne, kas raksturo konkrētu sakarību visciešāk [44]. Determinācijas koeficients  $R^2$  tika izmantots, lai novērtētu sakarības ciešumu [45].



2.6. att. Vides apstākļu un slīdēšanas laika sakarības: slīdēšanas laika atkarība no: a) relatīvā gaisa mitruma; b) no gaisa temp.; c) no ledus temp. [32].

Lai iegūtu vairāk informācijas par eksperimentu apstākļiem un to sakarību ar slīdēšanas laiku, tika izveidots 2.7. attēls. Slīdēšanas laiks attēlots stabiņu veidā un sakārtots, balstoties uz apkārtējiem vides apstākļiem no aukstākiem un sausākiem uz siltākiem un mitrākiem. Rezultātu skaidrojumam pievienoti teorētiskie berzes režīmi (balstoties uz [15, 19, 20] un datiem, kas redzami 1.1. att.). Zilā krāsa apzīmē reģionu, kur berze teorētiski tuvojas robežberzes režīmam, zaļā apzīmē jauktās berzes režīmu, sarkanā – hidrodinamiskās.



2.7. att. Slīdēšanas laika atkarība no gaisa temp., ledus temp. un relatīvā gaisa mitruma. Eksperimenti ir sakārtoti no aukstākiem un sausākiem uz siltākiem un mitrākiem vides apstākļiem, balstoties uz ledus berzes režīmu līkni [32].

Mazākais slīdēšanas laiks tika iegūts astotajā un devītajā eksperimentā, kad gaisa mitrums ir augstākais (~95 %), gaisa temp. ir ~2 °C, ledus temp. ~ -4 °C (2.7. att.). Balstoties uz berzes režīmiem, šis reģions tika pieņemts kā jauktās berzes režīms, kas nodrošina ātrākos slīdēšanas apstākļus [11]. 10.–14. eksperimentā slīdēšanas laiki ir savstarpēji līdzīgi. Augstās gaisa un ledus temperatūras dēļ šis reģions tika pieņemts kā hidrodinamiskās berzes režīms. Gaisa



mitrumam un temperatūrām krītoties (no septītā uz pirmo eksperimentu), slīdēšanas laiks pieaug.

Kā tika novērots parauga vibrāciju analīzes eksperimentos, izmaiņas svārstību amplitūdā iespējamās robežberzes un jauktās berzes gadījumā tika novērotas ap 20 % reālu apstākļu eksperimentu režīmā, līdz ar to ir iespējams, ka slīdēšanas laiks aukstākos apstākļos var tikt pastarpināti ietekmēts lielāku vibrāciju dēļ. Šo novērojumu var skaidrot ar *Seymour–Pierce* eksperimentu rezultātiem [39], proti, lielākas vibrācijas aukstākos vides apstākļos var rasties plaisu, negludumu dēļ ledus virskārtā, kas ir veidojušies iepriekšējos eksperimentos. Siltākos apstākļos skeletoņa kustība lejup pa ledus trasi veicina robežslāņa kušanu un virsmas cietības samazināšanos, kas attiecīgi rada virsmas rekristalizāciju un gludāku ledus virskārtu nākamajos mērījumos. Turklāt, apskatot 2.3. attēlu, kur ir attēlota ledus virskārta  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  un  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrā un kā tā mainās laika gaitā, redzams, ka siltākā ledus temperatūrā ledus virskārtā kristālu robežas saplūst, tie veidojās lielāki, taču to ir mazāk, un vizuāli ledus virsma izskatās gludāka. Savukārt zemākā ledus temperatūrā tika novērots, ka pēc sasalšanas brīža ledus virsma paliek raupjāka. Lai gan, precīzi definēt ledus virskārtas izmaiņas šajā eksperimentā nebija iespējams, tomēr vizuāli novērojumi pamato ledus virsmas iespējamo raupjumu. Iespējams, ka eksperimentu metode ar uzspiestu kustību (tribometri) varētu nodrošināt datus, izslēdzot iespējamo vibrāciju ietekmi. Izmantotā eksperimentu procedūra ir tuvāk reālās dzīves apstākļiem, tāpēc, iespējams, novērotais vibrāciju pieaugums vides apstākļu dēļ ir pamatots un tā ietekmi nedrīkst izslēgt, kā arī, visticamāk, ņemot vērā apskatīto literatūru [7, 15], ar uzspiestu eksperimentu metodi tiktu iegūtas līdzīgas sakarības.

### 3. SLĪDĒŠANAS LAIKA PROGNOZĒŠANAS MODELIS UN METODIKA

#### 3.1. Vides apstākļu sakarības ar slīdēšanas laiku

Lai apskatītu sakarību starp izmērīto un prognozējamo slīdēšanas laiku, izmantojot vienu vides apstākļu aprakstošu parametru, sākotnēji tika izveidoti attiecīgi grafiki (2.6. att.). No iegūtajiem grafikiem ar *Microsoft Excel 2017* datorprogrammas palīdzību iegūts vienādojums, kas raksturo konkrēta vides parametra un slīdēšanas laika sakarību. Determinācijas koeficients  $R^2$  tika izmantots, lai novērtētu sakarību ciešumu (3.1. tab.).

Izmērītā slīdēšanas laika un aprēķinātā slīdēšanas laika atkarība no relatīvā gaisa mitruma, gaisa temperatūras un ledus temperatūras, izmantojot 3.1.–3.3. vienādojumu, kā arī absolūtās un procentuālās kļūdas, ir apkopots promocijas darba pilnās versijā 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Slīdēšanas laika atkarība no gaisa mitruma, temperatūras un ledus temperatūras

	Iegūtais vienādojums	$R^2$
Slīdēšanas laiks atkarībā no relatīvā gaisa mitruma	$T_{ks(RH)} = -1,4 \cdot 10^{-3} \cdot RH + 4,128, (3.1.)$	0,78
Slīdēšanas laiks atkarībā no gaisa temperatūras	$T_{ks(gaiss)} = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_{gaiss}^2 - 6,9 \cdot 10^{-3} \cdot T_{gaiss} + 4,003, (3.2.)$	0,68
Slīdēšanas laiks atkarībā no ledus temperatūras	$T_{ks(ledus)} = 3,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_{ledus}^2 + 16,4 \cdot 10^{-3} \cdot T_{ledus} + 4,015. (3.3.)$	0,51

Iegūtie rezultāti rāda, ka slīdēšanas laika prognozēšanā vidējā procentuālā kļūda ir vismaz 0,20 %, ja tiek izmantots viens konkrēts vides parametrs (šajā gadījumā – relatīvais gaisa mitrums). Augstākā vidējā procentuālā prognozēšanas kļūda – 0,26 % un lielākā kļūda – 0,86 % tika iegūta, ja slīdēšanas laika prognozēšanā tiek izmantota ledus temperatūra.

#### 3.2. Slīdēšanas laika daudzfaktoru prognozēšanas modelis

Prognozēšanas modeļa izstrādei tika izmantoti promocijas darba pilnajā versijā 2.6. tabulā apkopotie izmērītie neatkarīgie saistītie mainīgie – relatīvais gaisa mitrums, gaisa temperatūra un ledus temperatūra, kā arī rezultējošais atkarīgais mainīgais – slīdēšanas laiks. Novērtējot iegūtās sakarības starp vides apstākļiem un slīdēšanas laiku, gaisa mitruma sakarību visciešāk raksturo taisnes vienādojums, gaisa temperatūrai un ledus temperatūrai – otrās pakāpes polinoma vienādojums. Regresijas vienādojums tika veidots, ņemot vērā novērotās tendences. Modelis joprojām tiek uzskatīts par lineāru, lai arī satur nelineāras sakarības neatkarīgajiem mainīgajiem, jo regresijas koeficienti ir lineāri [45]. Daudzfaktoru regresijas modelis veidots šādi:

$$T_{ks} = b_0 + b_1 T_{gaiss} + b_2 T_{ledus} + b_3 T_{gaiss} T_{ledus} + b_4 T_{gaiss}^2 + b_5 T_{ledus}^2 + b_6 RH, \quad (3.4.)$$

kur  $b_0, b_1 \dots b_n$  – regresijas koeficienti;

$RH$  – izmērītais relatīvais gaisa mitrums, %;

$T_{gaiiss}$  – izmērītā gaisa temperatūra, °C;

$T_{ledus}$  – izmērītā ledus temperatūra, °C.

Darbā izmantots *Microsoft Excel Data Solver*, taču var veiksmīgi izmantot arī citas statistikas programmas, piemēram, *MatLab*, *MiniTab* u. c., lai aprēķinātu regresijas koeficientus –  $b_0; b_1; b_2; b_3; b_4; b_5; b_6$ . Datorprogrammā koeficienti aprēķināti pēc mazāko kvadrātu metodes [45]. Iegūtie koeficienti ievietoti 3.4. formulā, iegūstot:

$$T_{ks} = 4,064 + 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot T_{gaiiss} - 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot T_{ledus} + 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot T_{gaiiss} \cdot T_{ledus} - 5,5 \cdot 10^{-5} \cdot T_{gaiiss}^2 - 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot T_{ledus}^2 - 9 \cdot 10^{-4} \cdot RH. \quad (3.5.)$$

Iegūtajam vienādojumam veikta atbilstības pārbaude. Pīrsona korelācijas koeficients  $r$ , kas raksturo lineāras sakarības ciešuma pakāpi [45, 46], aprēķināts 0,94, liecinot par ciešu sakarību starp izmērīto un aprēķināto. Lai pārlicinātos, ka iegūto korelācijas koeficientu var izmantot atkarības vērtēšanai, tas salīdzināts ar kritisko vērtību  $r_{\alpha;n}$  [46]. 14 gadījumos nolasītā kritiskā vērtība  $r_{\alpha;n}$  ir 0,532. Korelācija ir ticama, ja  $r_{\alpha;n} < r$ .

Lai analizētu daudzfaktoru regresijas aprēķināto vērtību atbilstību izmērītajām, izmantots koriģētais determinācijas koeficients, ņemot vērā neatkarīgo mainīgo skaitu un mērījumu skaitu [45]:

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - p - 1}, \quad (3.6.)$$

kur  $p$  – neatkarīgo mainīgo skaits;

$n$  – gadījumu skaits.

Iegūtais koriģētais determinācijas koeficients  $\bar{R}^2 = 0,80$ , kas liecina par ciešu sakarību starp aprēķinātajām vērtībām un mērījumu rezultātiem, proti 80 % mērījumus var izskaidrot ar izmantoto daudzfaktoru regresijas modeli.

Regresijas modeļa standartnovirze, kas parāda regresijas modeļa precizitāti – jo mazāka iegūtā vērtība, jo regresijas modelis ir precīzāks – ir 0,009. Regresijas modeļa standartnovirze ir absolūts parametrs, kas parāda vidējo attālumu, kādā datu punkti atrodas no regresijas līnijas [45]:

$$\sigma_{reg} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{apr.} - y_{izm.})^2}{n - p - 1}, \quad (3.7.)$$

kur  $y_{izm.}$  – eksperimentāli izmērītās slīdēšanas laika vērtības;

$y_{apr.}$  – aprēķinātās slīdēšanas laika vērtības, izmantojot regresijas analīzi.

Izmantojot *Microsoft Excel Data Solver* datorprogrammas nodrošinājumu, empīriskam prognozēšanas modelim statistiskais nozīmīgums tika novērtēts ar dispersijas analīzes metodi (*ANOVA (Analysis of Variance)*). Ja regresijas vienādojumam pēc Fišera kritērija  $F$  testa  $p$  vērtība nesasniedz 0,05, tad izstrādātais regresijas modelis ir statistiski nozīmīgs jeb dati ir uzticami [45, 47, 48]. Tika iegūta  $p$  vērtība daudzfaktoru regresijas modelim – 0,004.

3.2. tabula

## Daudzfaktoru regresijas modeļa sakarību ciešuma pētīšana

Korelācijas koeficients $r$	Determinācijas koeficients $R^2$	Koriģētais determinācijas koeficients $\bar{R}^2$	Regresijas modeļa standartnovirze $\sigma_{reg}$	$P$ vērtība
0,94	0,89	0,80	0,009	0,004

Izmantojot 3.5. formulu, tika aprēķināts slīdēšanas laiks (3.3. tab.). Ņemot vērā iegūtos datus, var secināt, ka vidējā procentuālā prognozēšanas kļūda, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzi, ir par 40 % mazāka nekā tad, ja tiek izmantota relatīvā gaisa mitruma un slīdēšanas laika sakarība (0,20 % pret 0,12 %).

3.3. tabula

## Ar regresijas analīzi prognozētā slīdēšanas laika salīdzinājums ar izmērīto

Ekspiments	Izmērītais slīdēšanas laiks, s	Aprēķinātais slīdēšanas laiks, s izmantojot 3.5. vienādojumu, s	$\Delta$ Slīdēšanas laiks, s	$\Delta$ Slīdēšanas laiks, %	Ekspiments	Izmērītais slīdēšanas laiks, s	Aprēķinātais slīdēšanas laiks, s izmantojot 3.5. vienādojumu, s	$\Delta$ Slīdēšanas laiks, s	$\Delta$ Slīdēšanas laiks, %
1	3,991	3,988	0,004	0,09	8	4,025	4,019	0,006	0,14
2	3,982	3,988	0,006	0,14	9	4,005	4,005	0,000	0,00
3	3,981	3,990	0,009	0,24	10	4,009	4,011	0,002	0,05
4	4,002	4,001	0,001	0,03	11	4,038	4,050	0,012	0,29
5	3,997	3,998	0,001	0,04	12	4,043	4,043	0,000	0,03
6	3,995	3,998	0,003	0,07	13	4,026	4,014	0,012	0,30
7	4,003	4,002	0,001	0,02	14	4,035	4,024	0,011	0,28
Vidējā kļūda								0,005	0,12
Lielākā kļūda								0,012	0,30

Lai noteiktu, kurš no vides apstākļu parametriem ir nozīmīgāks, prognozējot slīdēšanas laiku, tika veikta regresijas koeficientu standartizācija. Regresijas koeficientu standartizāciju izmanto, ja viena regresijas vienādojuma koeficienti nav savstarpēji salīdzināmi. Izmantojot regresijas koeficientu standartizāciju, visi mainīgie tiek izteikti standartnovirzēs no aritmētiskā vidējā [49] :

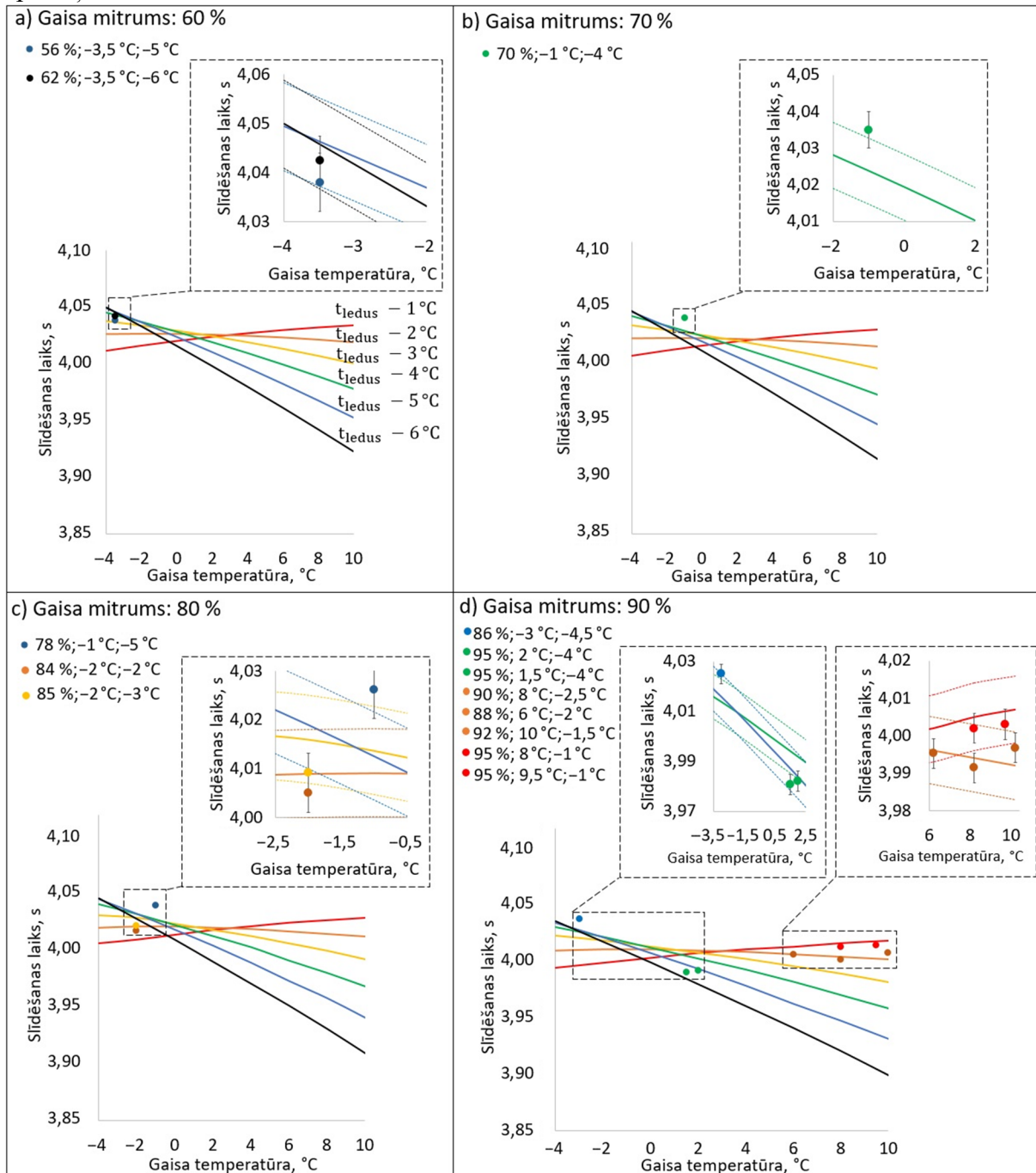
$$\frac{x_1 - \bar{x}_1}{\sigma_1}; \frac{x_2 - \bar{x}_2}{\sigma_2}; \dots \frac{x_k - \bar{x}_k}{\sigma_k}. \quad (3.8.)$$

Rezultātā tika iegūts šāds regresijas vienādojums:

$$T_{ks(stand)} = 2,2 \cdot 10^{-14} + 1 \cdot T_{gaiss(stand)} - 0,9 \cdot T_{ledus(stand)} + 1,3 \cdot T_{gaiss(stand)} \cdot T_{ledus(stand)} - 0,09 \cdot T_{gaiss(stand)}^2 - 0,9 \cdot T_{ledus(stand)}^2 - 0,6 \cdot RH_{(stand)}. \quad (3.9.)$$

Regresijas koeficientus (3.9. vienādojums) var savstarpēji salīdzināt, lai iegūtu vispārēju ieskatu par parametru ietekmi (jo lielāks koeficients, jo lielāka ietekme). Mazākā ietekme ir gaisa mitrumam (0,6), taču tas nav ievērojami zemāks kā ledus vai gaisa temperatūrai (0,9; 1), līdz ar to šajā gadījumā no regresijas vienādojuma nevar izslēgt kādu konkrētu parametru.

Iegūtais rezultāts liecina par to, ka visi trīs vides parametri ir nozīmīgi, lai skaidrotu vides apstākļu ietekmi uz slīdēšanas laiku.



3.1. att. Aprēķinātā slīdēšanas laika salīdzinājums ar eksperimentāli iegūto slīdēšanas laiku: a) pie relatīvā gaisa mitruma 60 %; b) pie relatīvā gaisa mitruma 70 %; c) pie relatīvā gaisa mitruma 80 %; d) pie relatīvā gaisa mitruma 90 %. Norādītās teorētiski aprēķinātās ledus temperatūras: a) atbilst arī b), c), d).

Eksperimentālo mērījumu salīdzināšanai ar aprēķinātajām vērtībām tika izveidots 3.1. attēls.

Tas ir iedalīts četrās daļās, balstoties uz gaisa mitrumu (relatīvais gaisa mitrums 60–90 %). Izmantojot prognozēšanas modeli (3.5. vienādojums), tika aprēķinātas teorētiskās slīdēšanas

laika līknes sešās ledus temperatūrās (no  $-1$  līdz  $-6$  °C) norādītajā relatīvā gaisa mitruma un gaisa temperatūras diapazonā (no  $-4$  līdz  $+10$  °C). Attiecīgi iegūtie eksperimentu rezultāti (punkti grafikos) tika analizēti atbilstoši norādītajiem vides apstākļiem. Raustītās tievākās līnijas rāda regresijas modeļa standartnovirzes robežas ( $\pm 0,009$ ).

Ņemot vērā datus, kas redzami 3.1. attēlā, var secināt, ka eksperimentāli iegūtie slīdēšanas laika rezultāti, regresijas modeļa standartnovirzes un eksperimentāli iegūto punktu standartnovirzes robežās atbilst teorētiski aprēķinātajam slīdēšanas laikam. Tas liecina, ka teorētisko modeli var izmantot, lai prognozētu slīdēšanu raksturojošus parametrus atkarībā no vides apstākļiem. Lai arī eksperimentāli iegūtie punkti standartnovirzes robežās atbilst aprēķinātajai līknei, tomēr ir novērojamas zināmas neprecizitātes (zaļais punkts, ja gaisa mitrums ir 70 %; zilais punkts, ja gaisa mitrums ir 80 %; zaļie punkti, ja pie gaisa mitrums ir 90 %). Tās var tikt skaidrotas ar to, ka teorētiskās līknes ir aprēķinātas konkrētā gaisa mitrumā, taču eksperimentālie punkti ir iegūti nedaudz atšķirīgos apstākļos.

Lai arī modelis atļauj prognozēt rezultātu jebkādos apstākļos, tomēr ātrākie rezultāti (3.1. att.) ir jāvērtē ar zināmu piesardzību, jo eksperimentos nebija apstākļi, kad ir augsta gaisa temperatūra un zema ledus temperatūra, līdz ar to apgalvot, ka šādi apstākļi dos ātrākos rezultātus, nav droši. Pārbaudītai rezultātu iegūšanai vides apstākļiem jābūt šādās robežās: ledus temperatūra – no  $-6$  līdz  $-1$  °C; gaisa temperatūra – no  $-4$  līdz  $10$  °C; gaisa mitrums – no 60 % līdz 95 %. Neprecizitātes var rasties arī tad, ja gaisa temperatūra ir robežās no aptuveni  $5$  °C līdz  $10$  °C un ledus temperatūra ir zemāka par  $-4$  °C. Prognozēšanas modeļa robežas sastādītas, pamatojoties uz veikto eksperimentu datiem.

### **3.3. Slīdēšanas laika mērīšanas un prognozēšanas metodikas izstrāde**

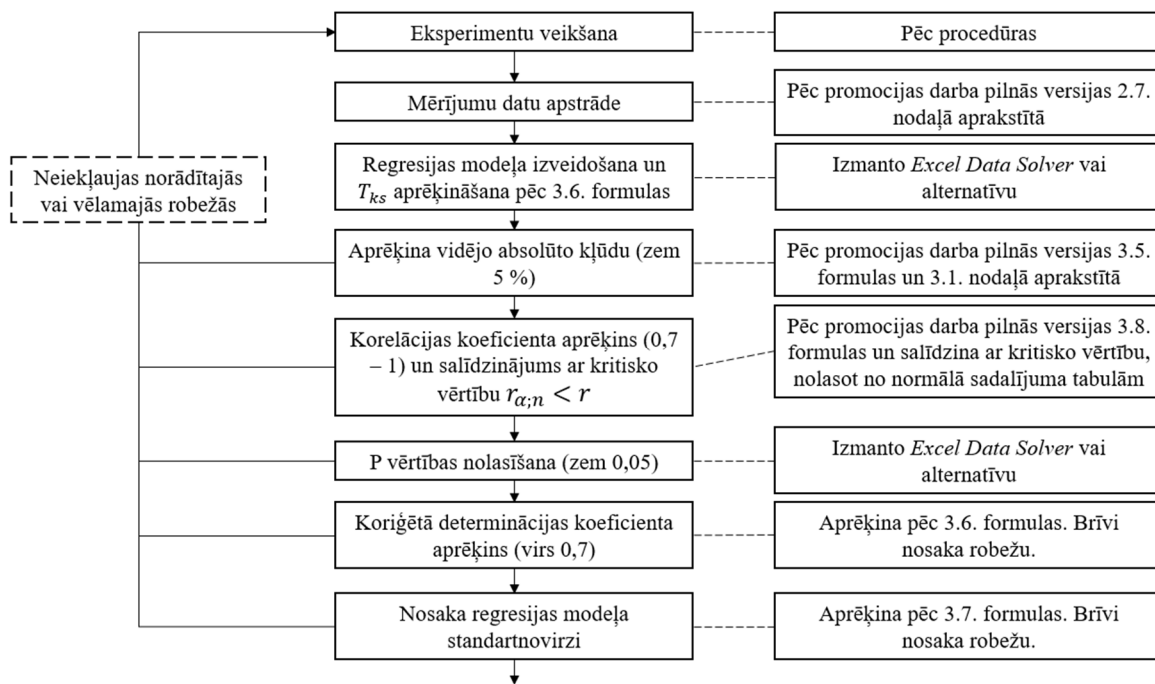
Izstrādātā berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošu parametru mērīšanas un prognozēšanas metodika reālu apstākļu eksperimentu režīmā pievienota promocijas darba 11. pielikumā.

Mērīšanas un prognozēšanas metodika paredzēta eksperimentālā parauga slīdēšanas raksturojoša parametra, slīdēšanas laiks,  $s$ , kā arī vides apstākļu – relatīvais gaisa mitrums, %, gaisa temperatūra, °C, ledus temperatūra, °C – mērīšanai un prognozēšanas modeļa, kas prognozē slīdēšanas laiku atkarībā no vides apstākļiem, izstrādei reālu apstākļu eksperimentu režīmā.

#### **Eksperimentālie un teorētiskie pētījumi**

Lai eksperimentāli iegūtie dati būtu izmantojami prognozēšanas metodikas izstrādē, tika izstrādāta slīdēšanas laika mērīšanas procedūra (skat. 2.6. nodaļu). Parametra  $T_{ks}$  prognozēšanas metodikas izstrādē tiek pieņemts, ka eksperimentālie pētījumi ir veikti atbilstoši mērīšanas procedūrai un iegūtie slīdēšanas laika mērījumu rezultāti iekļaujas definētajos kritērijos.

Pēc veiktajiem eksperimentālajiem pētījumiem veikta iegūto datu apstrāde, teorētiskā prognozēšanas modeļa izstrāde un novērtēšana. Datu apstrādē izmantotas statistikas metodes: aprakstošā/deskriptīvā statistika, prognozēšanas modeļa izstrādē izmantota sakarību noteikšanas secinošā statistikas metode – daudzfaktoru regresijas analīze un korelācijas analīze.



3.2. att. Prognozēšanas modeļa izstrādes un novērtēšanas algoritms.

Slīdēšanas laika parametra  $T_{ks}$ , kas raksturo parauga slīdēšanu pa ledu atkarībā no vides apstākļiem, aprēķināšanas un novērtēšanas algoritms (3.2. att.) pa soļiem ir šāds.

1. Parametra  $T_{ks}$  aprēķināšanai tiek veidots daudzfaktoru regresijas modelis pēc 3.4. formulas. Lai aprēķinātu regresijas koeficientus  $b_0; b_1; b_2; b_3; b_4; b_5; b_6$ , tiek izmantots *Microsoft Excel Data Solver*, taču var veiksmīgi izmantot arī citas statistikas programmas, piemēram, *MatLab*, *MiniTab* u. c.
2. Aprēķinātās vērtības salīdzina ar izmērītājam, aprēķinot vidējo absolūto procentuālo kļūdu. Lai arī zināmajā literatūrā vidējā absolūtā procentuālā kļūda zem 10 % tiek uzskatīta ar augstu aproksimācijas precizitāti [50], tomēr, ņemot vērā to, ka tā ir tieši atkarīga no mērāmā parametra vērtības, augstas aproksimācijas precizitātes robežas ir jāvērtē ar zināmu piesardzību [51]. Ja tiek mērīts slīdēšanas laiks pēc izstrādātās metodikas, autors rekomendē vidējās absolūtās procentuālās kļūdas robežu samazināt vismaz divas reizes.
3. Vispārējai sakarības novērtēšanai primāri tiek izmantots korelācijas koeficients  $r$  (robežās no  $-1$  līdz  $1$ ), kas raksturo lineāras sakarības ciešuma pakāpi.
4. Lai pārliecinātos, ka iegūto korelācijas koeficientu var izmantot atkarības vērtēšanai, tas jāsalīdzina ar kritisko vērtību  $r_{\alpha,n}$  (nolasa no normālā sadalījuma tabulām, nosakot korelācijas koeficienta kritisko vērtību atkarībā no gadījumu skaita [56]). Korelācija ir ticama, ja  $r_{\alpha,n} < r$ .
5. Izmantojot iegūto dispersijas analīzi, nosaka  $p$  vērtību daudzfaktoru regresijas modelim, lai novērtētu, vai izstrādātais modelis ir statistiski nozīmīgs (rezultāts nav attiecināms uz nejaušību). Ja  $p$  vērtība ir mazāka par  $0,05$ , izstrādātais modelis ir statistiski nozīmīgs.
6. Ar 3.6. formulu tiek aprēķināts koriģētais determinācijas koeficients  $\bar{R}^2$ , lai novērtētu, cik eksperimentālos mērījumus procentuāli var izskaidrot ar iegūto teorētisko

prognozēšanas modeli. Determinācijas koeficienta (robežās no 0 līdz 1) pieļaujamā vērtība, kas liecina par – konkrētā gadījumā – ciešu sakarību, zināmajā literatūrā nav stingri definēta, līdz ar to pieļaujamā robeža var tikt brīvi izvēlēta. Autors uzskata, ka tai ir jābūt lielākai par 0,7.

7. Regresijas modeļa standartnovirze, kas parāda regresijas modeļa analīzes precizitāti, tiek aprēķināta ar 3.7. formulu. Regresijas modeļa standartnovirze parāda vidējo attālumu, kādā datu punkti atrodas no regresijas līnijas. Arī šajā gadījumā apmierinošs regresijas modeļa standartnovirzes lielums tiek brīvi izvēlēts.

Ja kādā no aprakstītajiem soļiem neizpildās noteiktās vai vēlamās prasības, tiek veikti papildu eksperimentālie mērījumi, vēlams – citos vides apstākļos, pēc aprakstītās reālu apstākļu eksperimentu veikšanas procedūras un modificēts prognozēšanas modelis.

### **Metodikas vērtējums**

Izstrādātā slīdēšanas laika mērīšanas un prognozēšanas metodika atkarībā no vides parametriem (gaisa mitrums, gaisa un ledus temperatūra) balstīta eksperimentālos mērījumos, detalizēti aprakstot slīdēšanas laika mērīšanas procedūru reālu apstākļu eksperimentu režīmā. Tiek aprēķināts prognozēšanas parametrs  $T_{ks}$ , kas raksturo parauga slīdēšanu pa ledu atkarībā no vides apstākļiem, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzi, un veikts regresijas modeļa novērtējums.

Metodika reālu apstākļu eksperimentu režīmā prasa pietiekami specifisku tehnisko nodrošinājumu, kas var tikt modificēts pēc vajadzības. Promocijas darba pilnajā versijā 2.6. nodaļā “Reālu apstākļu eksperimenta procedūra” aprakstīta iespēja izstrādāt iekārtu (patenta pieteikuma Nr. LVP2020000098), ar kuras palīdzību varētu veikt līdzīga tipa eksperimentus ne tikai estakādē, bet arī pa plakanu virsmu (piemēram, hokeja laukums). Tas atvieglotu eksperimentu veikšanas procedūru, un varētu iegūt datus dažādos slīdēšanas ātrumos. Rezultātā varētu izstrādāt precīzāku teorētisko slīdēšanu raksturojošu parametru prognozēšanas modeli.



## 4. PROGNOZĒŠANAS MODEĻA APROBĀCIJA UN TĀLĀKĀS IZPĒTES VIRZIENI

### 4.1. Prognozēšanas modeļa aprobācija un salīdzinājums ar skeletoņa sacensību rezultātiem

#### Praktiskā aprobācija

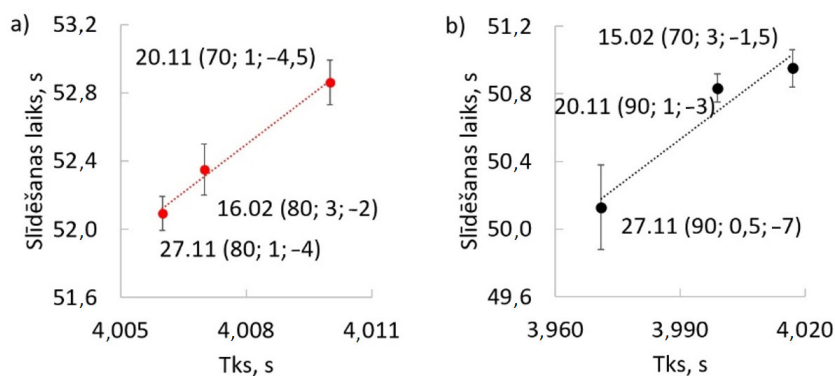
Izstrādātais slīdēšanu raksturojošu parametru prognozēšanas modelis praktiski aprobēts Latvijas skeletoņa komandas treniņos Siguldas bobsleja un kamaniņu trasē, kā arī starta treniņu estakādē. Modelis tika izmantots, lai prognozētu slīdēšanas laiku atkarībā no vides apstākļiem, mainot gan ledus temperatūru, gan veicot treniņus dažādās dienās. Līdz ar to tika analizēts, kuru skeletoņa slieču pāri sportistiem jāizmanto konkrētos vides apstākļos. Aprobācijas atzinuma vēstule – promocijas darba 10. pielikumā.

#### Salīdzinājums ar skeletoņa sacensībām

Lai pārbaudītu, kā berzes pāra nerūsējošais tērauds–ledus slīdēšanu raksturojošie parametri, kas iegūti, balstoties uz vides apstākļu likumsakarībām ( $T_{ks}$ ), korelē ar *IBSF* Pasaules kausa skeletoņa sacensībās uzrādītiem sportistu rezultātiem, tika veikts salīdzinājums.

Parametrs  $T_{ks}$  tika aprēķināts pēc 3.5. formulas atkarībā no vides apstākļiem sacensību norises laikā. Kā *IBSF* Pasaules kausa skeletoņa sacensību salīdzināmais rezultāts tika izvēlēts 2. brauciena 5.–10. vietas vidējais kopējais slīdēšanas laiks gan vīriešu, gan sievietu sportistu ieskaitē. *IBSF* Pasaules kausa skeletoņa sacensību rezultāti iegūti no trīs pēdējiem posmiem Siguldas bobsleja un skeletoņa sacensību trasē. Ledus un gaisa temperatūras vērtības tika pieņemtas no oficiālajiem mērījumiem pirms 2. brauciena. Relatīvais gaisa mitrums attiecīgi tika noteikts no vērtībām, kas uzrādītas meteoroloģisko novērojumu stacijā (vērtības – promocijas darba 4.1. tab.).

Datu salīdzināšanai tika izveidots 4.1. attēls, kur uz  $x$  ass norādīta aprēķinātā  $T_{ks}$  vērtība, uz  $y$  ass – 5.–10. pozīcijas vidējais slīdēšanas laiks 2. braucienā: a) sievietu sacensību rezultāti; b) vīriešu sacensību rezultāti. Pēc attēlā redzamajiem datiem var novērot lineāru sakarību starp  $T_{ks}$  un 5.–10. pozīcijas vidējo slīdēšanas laiku gan sievietu, gan vīriešu sacensībās, proti, ja samazinās prognozētais slīdēšanas laika parametrs atkarībā no vides apstākļiem  $T_{ks}$ , samazinās arī sacensībās uzrādītais vidējais slīdēšanas laiks. Būtiski ātrākais slīdēšanas laiks sacensībās un mazākais  $T_{ks}$  tika iegūts 27.11.2020. vīriešu sacensību dienā (vides apstākļi: gaisa mitrums 90 %; gaisa temperatūra 0,5 °C, ledus temperatūra –7 °C). Šāds rezultāts netieši norāda, ka salīdzinoši liela gaisa un ledus temperatūras starpība pie augsta gaisa mitruma nodrošina ātrāku slīdēšanas laiku (zemāku berzes koeficientu) un sasaucas ar izstrādātā prognozēšanas modeļa tendencēm.



4.1. att. 2. brauciena 5.–10. pozīcijas vidējais slīdēšanas laiks pret  $T_{ks}$ : a) sieviešu sacensību rezultāti; b) vīriešu sacensību rezultāti. Pie rezultātu punktiem pievienota šāda informācija: datums; iekavās (gaisa mitrums, %; gaisa temp., °C; ledus temp., °C).

Iegūtie rezultāti, salīdzinot sacensībās sportistu uzrādītos slīdēšanas laikus ar aprēķināto parametru  $T_{ks}$ , šobrīd ir daļējs apstiprinājums tam, ka izveidoto prognozēšanas modeli var veiksmīgi izmantot, lai prognozētu slīdēšanas tendences atkarībā no vides apstākļiem arī reālu sacensību režīmā.

## 4.2. Vides apstākļu un virsmas raupjuma ietekme uz berzes koeficientu laboratorijā

Lai iegūtu vispārēju ieskatu par to, cik liela ietekme uz cita veida iegūstamo rezultātu (berzes koeficientu) ir vides apstākļu izmaiņām, tika veikti papildu pētījumi *V-Research GmbH (Industrial Research and Development)* Austrijā ārvalstu mobilitātes ietvaros.

Pētījumiem tika izmantots lineārais tribometrs *RVM 1000 (Austrija)* ar saldēšanas kameru. Līdzīga tipa iekārtas ir izmantotas arī citos pētījumos [10, 12, 28, 29], tādējādi ir iespējams novērot tendences, kas, visticamāk, atkārtotos attiecīgi citu autoru darbos. Ar tribometru kā slīdēšanas aprakstošais parametrs tika mērīts dinamiskais berzes koeficients.

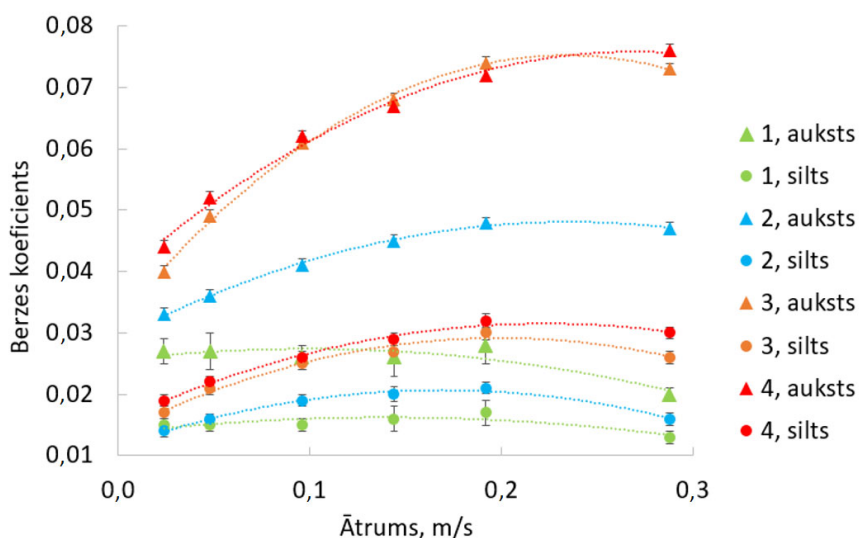
Eksperimentālie paraugi tika izgatavoti taisnstūrveida paralēlskaldņa paraugi ar dimensijām – (35 mm × 18 mm × 14 mm) ± 0,1 mm. Paraugu masa – 68 g ± 0,5 g. Paraugi tika frēzēti un plakanslīpēti no vienas sagataves. Materiāls – nerūsējošais tērauds *Uddeholm Ramax HH*. Darba virsma tika pulēta ar *Mecatech 334 TI 15 (Presi, Francija)* autopulētāju, nodrošinot virsmas raupjumu –  $Sa \sim 0,03 \mu\text{m}$ . Lai iegūtu dažādas pakāpes virsmas raupjumu, paraugi tika skrāpēti ar dažāda raupjuma smilšpapīriem uz auduma bāzes (400; 600; 1500 (3M)) paralēli parauga slīdēšanas virzienam [41] ar konstantu 10 N slodzi un kopējo distanci 2400 mm. Rezultātā tika iegūti četri paraugi ar šādu virsmas raupjumu:  $Sa \sim 0,02 \mu\text{m}$  (paraugs netika skrāpēts un pulēts); 0,07  $\mu\text{m}$ ; 0,14  $\mu\text{m}$ ; 0,22  $\mu\text{m}$ . Raupjums tika mērīts ar lāzerskenējošo mikroskopu *Confocal microscope VK-X250/260 (Keyence International NV/SA, Mechelen, Beļģija)* 2 mm × 2 mm lielam laukumam. Mērīšanas uzstādījumi atbilstoši *EN ISO 4288* un *EN ISO 3274* [52, 53].

Ledus pirms katras eksperimentu sērijas tika sagatavots no jauna speciāli izveidotā ledus saldēšanas traukā (20 mm × 80 mm × 5 mm). Ledus tika saldēts no saldēšanas trauka apakšas,

virskārtā iegūstot aptuveni  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūru. Ledus temperatūra tika mērīta ar kontakta tipa termometru *JUMO dTRANS T04* (*JUMO*, Vācija), gaisa temperatūra un relatīvais gaisa mitrums attiecīgi ar *Dostmann electronic LOG 110-EXF* (*Dostmann electronic*, Vācija) termometru.

Eksperimenti tika veikti divos vides apstākļos (apzīmēti ar: “auksti” un “silts”), sešos dažādos slīdēšanas ātrumos ( $0,024\text{--}0,288\text{ m/s}$ ) ar četriem paraugiem ar dažādas pakāpes virsmas raupjumu (vairāk informācijas – promocijas darba pilnajā versijā). Eksperimentu būtība aprakstīta [54–56] literatūras avotā. Aprakstītie rezultāti iekļauti [55] literatūras avotā. Lai definētu vides apstākļus, tika aprēķināts teorētiski šādos apstākļos iegūstamais parametrs  $T_{ks}$ , izmantojot 3.5. formulu. Iegūtā procentuālā starpība starp vides apstākļiem ir  $\sim 2\%$ . Šajā gadījumā  $T_{ks}$  tiek izmantots tikai kā indikators, lai teorētiski raksturotu vides apstākļu ietekmi uz parauga slīdēšanu pa ledu (lielāks  $T_{ks}$  atbilst lielākam slīdēšanas laikam, līdz ar to – lēnākai slīdēšanai pa ledu).

Iegūtie dati reprezentēti 4.2. attēlā. Zaļā krāsa apzīmē 1. paraugu ( $Sa \sim 0,02\text{ }\mu\text{m}$ ), zilā – 2. paraugu ( $Sa \sim 0,07\text{ }\mu\text{m}$ ), oranžā – 3. paraugu ( $Sa \sim 0,14\text{ }\mu\text{m}$ ), sarkanā – 4. paraugu ( $Sa \sim 0,22\text{ }\mu\text{m}$ ). Trijstūris apzīmē mērījumus “aukstajos” apstākļos, aplis – “siltajos” apstākļos. Ņemot vērā iegūtos datus, redzams, ka berzes koeficienta vērtība visiem paraugiem būtiski atšķiras (vairāk kā 2 reizes) starp diviem vides apstākļu mērījumiem. Saistībā ar vides apstākļiem to var skaidrot šādi: pie  $2\%$  izmaiņām  $T_{ks}$  ietekme uz berzes koeficientu attiecīgi ir  $70\%$  pirmajam paraugam,  $129\%$  otrajam,  $144\%$  trešajam,  $134\%$  ceturtajam. Ja no otrā līdz ceturtajam paraugam izmaiņas berzes koeficientā ir līdzīgas, tad pirmajam paraugam tās ir aptuveni divas reizes mazākas nekā pārējiem. Iespējams, eksperimentālo paraugu virsmām ar mazāku virsmas raupjumu (pulētām) vides apstākļu ietekme uz rezultātu ir mazāka nekā virsmām ar lielāku virsmas raupjumu.



4.2. att. Dinamiskā berzes koeficienta vērtības paraugiem 1 ( $Sa \sim 0,02\text{ }\mu\text{m}$ ); 2 ( $Sa \sim 0,07\text{ }\mu\text{m}$ ); 3 ( $Sa \sim 0,14\text{ }\mu\text{m}$ ); 4 ( $Sa \sim 0,22\text{ }\mu\text{m}$ ) atkarībā no vides apstākļiem (“auksts” – gaisa temp.  $\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ledus temp.  $\sim -9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; mitrums  $\sim 20\%$ . “silts” – gaisa temp.  $\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ledus temp.  $\sim -9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; mitrums  $\sim 60\%$ .) un slīdēšanas ātruma.

Šāds novērojums sasaucās ar *Spagni* [5] darbā novēroto, proti, tika testēti trīs paraugi ar atšķirīgu virsmas raupjumu ( $Ra \sim 0,1 \mu\text{m}$ ;  $1,4 \mu\text{m}$ ;  $2,6 \mu\text{m}$ ), un, palielinoties raupjumam, atšķirība starp izmērīto berzes koeficientu piecās dažādās ledus temperatūrās (no  $-2 \text{ }^\circ\text{C}$  līdz  $-17 \text{ }^\circ\text{C}$ ) attiecīgi palielinājās no  $\sim 0,007$  (gludākajam paraugam) līdz  $\sim 0,018$  (raupjākajam paraugam). Iespējams, ka raupjākiem paraugiem, palielinoties ledus temperatūrai, līdz ar to ledus cietībai, virsmas negludumi kalpo kā nosacīts arkls, kas saskarē ar ledus virskārtu veicina berzes koeficienta palielināšanos. Paraugiem ar mazāku virsmas raupjumu negludumu augstums ir mazāks, līdz ar to saskarē ar ledu neveidojas papildu pretestība, ja palielinās ledus cietība.

Pēc eksperimentiem *V-Research GmbH (Industrial Research and Development)* laboratorijā var secināt, ka eksperimentos, kuros tiek mērīts berzes koeficients, vēl būtiskāk ir pilnvērtīgi definēt vides apstākļus. Vairāk informācijas promocijas darba pilnajā versijā.

## PĒTĪJUMA BŪTISKĀKIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

1. Ņemot vērā zināmās literatūras analīzi, tika secināts, ka eksperimentu apstākļu aprakstīšana dažādu pētnieku darbos ir nepietiekama. Līdz ar to veidojas nesalīdzināmi, haotiski rezultāti. Ņemot vērā, ka pārsvarā vides apstākļi tiek aprakstīti ar ledus temperatūru, retāk ar gaisa temperatūru vai gaisa mitrumu, šie parametri tika izvēlēti vides apstākļu ietekmes uz parauga slīdēšanu pa ledu izpētē.
2. Līdz šim izmantotās reālu apstākļu eksperimentu veikšanas procedūras ir nepilnīgas, kas liek apšaubīt iegūto rezultātu kvalitāti, tāpēc tika izstrādāta reālu apstākļu eksperimentu veikšanas procedūra, kas novērš iepriekš zināmo procedūru trūkumus.
3. No empīriski iegūtām katra vides parametra (relatīvais gaisa mitrums, ledus temperatūra un gaisa temperatūra) sakarībām ar slīdēšanas laiku tika secināts, ka, lai izskaidrotu rezultātus, ir nepieciešama informācija par trīs apskatītajiem vides parametriem. Slīdēšanas laiks samazinās, ja palielinās gaisa mitrums, ledus temperatūra ir aptuveni  $-4\text{ °C}$  un gaisa temperatūra ir aptuveni no  $0\text{ °C}$  līdz  $+4\text{ °C}$ .
4. Tika izstrādāts slīdēšanas laika prognozēšanas modelis, ņemot vērā trīs vides apstākļu aprakstošu parametru mijiedarbību, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzi (vides apstākļu diapazons: gaisa temp. – no  $-4\text{ °C}$  līdz  $10\text{ °C}$ ; ledus temp. – no  $-6\text{ °C}$  līdz  $-1\text{ °C}$ ; relatīvais gaisa mirums – no  $60\%$  līdz  $95\%$ ). Modelim tika veikta tā atbilstības pārbaude, iegūstot korektu tā izveidi. Prognozēšanas vidējā procentuālā kļūda, izmantojot izstrādāto prognozēšanas modeli, tika aprēķināta par vismaz  $40\%$  mazāka nekā tad, ja tiek izmantots viens vides apstākļu aprakstošs parametrs (relatīvo gaisa mitrumu), kas veido visciešāko sakarību ar slīdēšanas laiku.
5. Izstrādāta slīdēšanas laika atkarībā no vides apstākļiem mērīšanas un prognozēšanas metodika. Mērīšanas un prognozēšanas metodika nosaka izmantotās mērījumu metodes, prasības mērinstrumentiem, palīgierīcēm, materiāliem, prasības operatoru kvalifikācijai un drošības prasības, prasības mērījumu apstākļiem un mērījumu veikšanas kārtību, mērījumu rezultātu apstrādi un precizitātes kontroli, prasības mērījumu precizitātei.
6. Ar prognozēšanas modeļa regresijas koeficientu standartizācijas palīdzību konstatēts, ka būtisku ietekmi uz slīdēšanas laiku dod visi trīs aprēķinos izmantotie vides apstākļu raksturojošie parametri.
7. Izstrādājot prognozēšanas modeli, konstatēts, ka, lai samazinātu slīdēšanas laiku, ir jābūt augstam gaisa mitrumam ( $\sim 90\%$ ) un lielai gaisa un ledus temperatūras starpībai. Lai šo rezultātu apstiprinātu, jāveic eksperimenti laboratorijas apstākļos ar iespēju nodrošināt šādus apstākļus. Skeletona sacensību analīze norādīja, ka šāda likumsakarība pastāv, jo tika iegūts būtiski ātrāks vidējais slīdēšanas laiks šādos vides apstākļos: gaisa mitrums ir  $90\%$ , gaisa temperatūra ir  $0,5\text{ °C}$ , ledus temperatūra ir  $-7\text{ °C}$ .
8. Vides apstākļu ietekme, mērot dinamisko berzes koeficientu laboratorijas apstākļos, tika novērota vēl būtiskāka nekā reālu apstākļu eksperimentu režīmā.  $2\%$  vides apstākļu izmaiņas (raksturotas ar prognozēšanas modeļa slīdēšanas laika parametru  $T_{ks}$ ) rada vismaz  $70\%$  izmaiņas berzes koeficienta vērtībā.

9. Slīdošā parauga virsmas tekstūra (raupjuma diapazons:  $Sa$  0,03–0,12  $\mu\text{m}$ ) nebūtiski ietekmē slīdēšanas laika rezultātu reālu apstākļu eksperimentu režīmā. Laboratorijas apstākļos virsmas tekstūras (raupjuma diapazons:  $Sa$  0,02–0,22  $\mu\text{m}$ ) ietekme ir būtiska, un berzes koeficienta vērtības var atšķirties līdz pat četrām reizēm.

Iegūtie darba rezultāti liecina par būtisku vides apstākļu ietekmi uz slīdēšanu starp nerūsējošo tēraudu un ledu, kā arī nepieciešamību vides apstākļus aprakstīt ar vairāk nekā vienu raksturojošo parametru. Līdz ar to var secināt, ka izvirzītā hipotēze – gaisa un ledus temperatūra, gaisa mitrums mijiedarbojoties ietekmē berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus parauga slīdēšanas pa ledu raksturojošos parametrus; zinot vides parametru ietekmi, būtu iespējams prognozēt berzes pāra nerūsējošais tērauds-ledus slīdēšanu raksturojošus parametrus atkarībā no vides apstākļiem, kā arī nodrošināt slīdēšanu pa ledu raksturojošu parametru mērījumu precizitāti un eksperimentu reproducējamību – promocijas darbā ir apstiprināta.

## INFORMĀCIJAS AVOTI

- [1] A.-M. Kietzig, S.G. Hatzikiriakos, P. Englezos, Ice friction: The effects of surface roughness, structure, and hydrophobicity, *J. Appl. Phys.* 106 (2009) 024303. <https://doi.org/10.1063/1.3173346>.
- [2] A. Döppenschmidt, H.-J. Butt, Measuring the Thickness of the Liquid-like Layer on Ice Surfaces with Atomic Force Microscopy, *Langmuir*. 16 (2000) 6709–6714. <https://doi.org/10.1021/la990799w>.
- [3] E. Lozowski, K. Szilder, L. Poirier, A bobsleigh ice friction model, *Int. J. Offshore Polar Eng.* 24 (2014) 52–60.
- [4] A. M. Kietzig, S.G. Hatzikiriakos, P. Englezos, Physics of ice friction, *J. Appl. Phys.* 107 (2010) 081101. <https://doi.org/10.1063/1.3340792>.
- [5] A. Spagni, A. Berardo, D. Marchetto, E. Gualtieri, N. M. Pugno, S. Valeri, Friction of rough surfaces on ice: Experiments and modeling, *Wear*. 368–369 (2016) 258–266. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.10.001>.
- [6] M. Akkok, C. M. M. C. Ettles, S. J. Calabrese, Parameters affecting the kinetic friction of ice, *J. Tribol.* 109 (1987) 552–559. <https://doi.org/10.1115/1.3261503>.
- [7] M. Scherge, R. Böttcher, A. Spagni, D. Marchetto, High-Speed Measurements of Steel–Ice Friction: Experiment vs. Calculation, *Lubricants*. 6 (2018) 26. <https://doi.org/10.3390/lubricants6010026>.
- [8] L. Bäurle, D. Szabó, M. Fauve, H. Rhyner, N.D. Spencer, Sliding friction of polyethylene on ice: tribometer measurements, *Tribol. Lett.* 24 (2006) 77–84. <https://doi.org/10.1007/s11249-006-9147-z>.
- [9] M. Scherge, R. Bottcher, M. Richter, U. Gurgel, High-Speed Ice Friction Experiments under Lab Conditions: On the Influence of Speed and Normal Force, *ISRN Tribol.* 2013 (2013) 1–6. <https://doi.org/10.5402/2013/703202>.
- [10] S. Ducret, H. Zahouani, A. Midol, P. Lanteri, T.G. Mathia, Friction and abrasive wear of UHMWPE sliding on ice, no: *Wear*, 2005: 26–31. lpp. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.026>.
- [11] L. Poirier, E. P. Lozowski, S. Maw, D. J. Stefanyszyn, R. I. Thompson, Experimental analysis of ice friction in the sport of bobsleigh, *Sport. Eng.* 14 (2011) 67–72. <https://doi.org/10.1007/s12283-011-0077-0>.
- [12] B. A. Marmo, J. R. Blackford, C. E. Jeffree, Ice friction, wear features and their dependence on sliding velocity and temperature, *J. Glaciol.* 51 (2005) 391–398. <https://doi.org/10.3189/172756505781829304>.
- [13] S. Kim, H. Kang, D. Kim, Y.-Z. Lee, J. Lee, Measurement of sliding friction coefficient of micro-line patterned surfaces on ice, *Appl. Phys. Lett.* 111 (2017) 211601. <https://doi.org/10.1063/1.4995493>.
- [14] R. W. Liefferink, F. C. Hsia, B. Weber, D. Bonn, Friction on Ice: How Temperature, Pressure, and Speed Control the Slipperiness of Ice, *Phys. Rev. X*. 11 (2021) 011025. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.11.011025>.
- [15] A. M. Kietzig, S. G. Hatzikiriakos, P. Englezos, Physics of ice friction, *J. Appl. Phys.* 107 (2010) 081101. <https://doi.org/10.1063/1.3340792>.
- [16] C. Hainzmaier, PhD: A new tribologically optimized bobsleigh runner, Munich, 2005.
- [17] R. Rosenberg, Why Is Ice Slippery?, *Phys. Today*. 58 (2005) 50–54. <https://doi.org/10.1063/1.2169444>.
- [18] S. C. Colbeck, Pressure melting and ice skating, *Am. J. Phys.* 63 (1995) 888–890. <https://doi.org/10.1119/1.18028>.
- [19] B. Bhushan, *Introduction to tribology*, Wiley, New York, 2013.
- [20] S. C. Colbeck, *A Review of the Processes That Control Snow Friction*, Hanover, N. H.: U. S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory., 1992. <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a252362.pdf>.
- [21] J. Lungevics, E. Jansons, K. A. Gross, An Ice Track Equipped with Optical Sensors for Determining the Influence of Experimental Conditions on the Sliding Velocity, *Latv. J. Phys. Tech. Sci.* 55 (2018). <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0007>.
- [22] J. J. de Koning, G. de Groot, G. J. van Ingen Schenau, Ice friction during speed skating., *J. Biomech.* 25 (1992) 565–71. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1517252>.
- [23] S. C. Colbeck, L. Najarian, H. B. Smith, Sliding temperatures of ice skates, <http://jobs.aapt.org/>. (1998). <https://doi.org/10.1119/1.18576>.
- [24] P. A. Federolf, R. Mills, B. Nigg, Ice friction of flared ice hockey skate blades., *J. Sports Sci.* 26 (2008) 1201–8. <https://doi.org/10.1080/02640410802027360>.
- [25] Adhesion and Cohesion of Water, (b. g.). [https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/adhesion-and-cohesion-water?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/adhesion-and-cohesion-water?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects) (skatīts 2020. gada 23. jūlijā).
- [26] L. Makkonen, M. Tikanmäki, Modeling the friction of ice, *Cold Reg. Sci. Technol.* 102 (2014) 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.03.002>.
- [27] E. P. Lozowski, K. Szilder, S. Maw, A. Morris, A model of ice friction for skeleton sled runners, *Proc. Int. Offshore Polar Eng. Conf.* (2014).

- [28] R. Böttcher, M. Seidelmann, M. Scherge, Sliding of UHMWPE on ice: Experiment vs. modeling, *Cold Reg. Sci. Technol.* 141 (2017) 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.06.010>.
- [29] S. Rohm, M. Hasler, C. Knoflach, J. van Putten, S. H. Unterberger, K. Schindelwig, R. Lackner, W. Nachbauer, Friction Between Steel and Snow in Dependence of the Steel Roughness, *Tribol. Lett.* 59 (2015) 27. <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0554-x>.
- [30] 2019 International Rules SKELETON, (2019). [https://www.ibsf.org/images/documents/downloads/Rules/2019\\_2020/2019\\_International\\_Rules\\_SKEL\\_ETON\\_cl.pdf](https://www.ibsf.org/images/documents/downloads/Rules/2019_2020/2019_International_Rules_SKEL_ETON_cl.pdf) (skatīts 2020. gada 1. jūlijā).
- [31] J. Lungevics, E. Jansons, K. A. Gross, Skeleton Runner Roughness and Surface Contact Area Influence on Sliding Ability: Field Experiments, *Key Eng. Mater.* 800 (2019) 303–307. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.800.303>.
- [32] E. Jansons, M. Irbe, K. A. Gross, Influence of weather conditions on sliding over ice at a push-start training facility, *Biotribology.* 25 (2020) 100152. <https://doi.org/10.1016/j.biotri.2020.100152>.
- [33] E. Jansons, J. Lungevics, K. Stiprais, L. Pluduma, K. A. Gross, Measurement of sliding velocity on ice, as a function of temperature, runner load and roughness, in a skeleton push-start facility, *Cold Reg. Sci. Technol.* 151 (2018) 260–266. <https://doi.org/10.1016/J.COLDREGIONS.2018.03.015>.
- [34] ISO 25178-2:2012(en), Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters, (b. g.). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:25178:-2:ed-1:v1:en> (skatīts 2020. gada 1. jūlijā).
- [35] A. M. Kietzig, S. G. Hatzikiriakos, P. Englezos, Ice friction: The effects of surface roughness, structure, and hydrophobicity, *J. Appl. Phys.* 106 (2009) 024303. <https://doi.org/10.1063/1.3173346>.
- [36] N. Maeno, M. Arakawa, A. Yasutome, N. Mizukami, S. Kanazawa, Ice-ice friction measurements, and water lubrication and adhesion-shear mechanisms, *Can. J. Phys.* 81 (2003) 241–249. <https://doi.org/10.1139/p03-023>.
- [37] E. Jansons, K. A. Gross, J. Lungevics, L. Pluduma, The Influence of Ice Texture on Sliding Over Ice, *Latv. J. Phys. Tech. Sci.* 55 (2018) 54–64. <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0036>.
- [38] E. Jansons, K. A. Gross, The impact of ice texture on coefficient of friction for stainless steel with different surface roughness, no: *Key Eng. Mater.*, Trans Tech Publications Ltd, 2019: 308–312. lpp. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.800.308>.
- [39] A. Seymour-Pierce, B. Lishman, P. Sammonds, Recrystallization and damage of ice in winter sports, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 375 (2017) 20150353. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0353>.
- [40] E. Jansons, K. A. Gross, The impact of ice texture on coefficient of friction for stainless steel with different surface roughness, 2019. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.800.308>.
- [41] E. Jansons, J. Lungevics, K. A. Gross, Surface roughness measure that best correlates to ease of sliding, no: *Eng. Rural Dev.*, 2016.
- [42] E. Jansons, J. Lungevics, I. Jerane, K. A. Gross, A smaller bearing ratio, as a surface texture measure, promotes faster sliding on ice, *J. Tribol.* 143 (2021) 1–17. <https://doi.org/10.1115/1.4049704>.
- [43] ISO – ISO 9000:2005 – Quality management systems – Fundamentals and vocabulary, (b. g.). <https://www.iso.org/standard/42180.html> (skatīts 2021. gada 14. aprīlī).
- [44] Rīgas Tehniskā universitāte. Inženiermatemātikas katedra. Lekciju konspekts: Nelineāra regresija. [https://estudijas.rtu.lv/pluginfile.php/634599/mod\\_resource/content/0/Matematiska\\_statistika/Nelineara\\_regresija.pdf](https://estudijas.rtu.lv/pluginfile.php/634599/mod_resource/content/0/Matematiska_statistika/Nelineara_regresija.pdf), Rīga, b. g.
- [45] W. C. Navidi, *Statistics for engineers and scientists*, 2015. [https://mirlyn.lib.umich.edu/Record/014865504\\_CN\\_QA\\_276.4\\_N38\\_2015](https://mirlyn.lib.umich.edu/Record/014865504_CN_QA_276.4_N38_2015).
- [46] Vienkāršā lineārā regresija un korelācija, no: RTU Inženiermatemātikas Katedr. Lēc. konspekts, RTU lekciju konspekts, b. g. [https://estudijas.rtu.lv/file.php/63844/Matematiska\\_statistika/regresija\\_un\\_korelacija.pdf](https://estudijas.rtu.lv/file.php/63844/Matematiska_statistika/regresija_un_korelacija.pdf) (skatīts 2020. gada 1. jūlijā).
- [47] O. Krastiņš, *Statistika un ekonometrija, Mācību grāmata augstskolām.*, Rīga, 1998. [http://ezis.appspot.com/Statistika/d.00\\_ievads.htm](http://ezis.appspot.com/Statistika/d.00_ievads.htm) (skatīts 2020. gada 1. jūlijā).
- [48] R. L. Mason, R. F. Gunst, J. L. Hess, *Statistical Design and Analysis of Experiments, with Applications to Engineering and Science*, Second edition, A JOHN WILEY & SONS PUBLICATION, New Jersey, 2003. <https://www.abebooks.com/9780471372165/Statistical-Design-Analysis-Experiments-Applications-0471372161/plp> (skatīts 2020. gada 30. novembrī).
- [49] Standardized Regression Coefficient – an overview | ScienceDirect Topics, (b. g.). <https://www.sciencedirect.com/topics/mathematics/standardized-regression-coefficient> (skatīts 2021. gada 2. martā).
- [50] M. Gilliland, *The Business Forecasting Deal: Exposing Myths, Eliminating Bad Practices, Providing Practical Solutions: Forecasting FAQs*, no: *Bus. Forecast. Deal*, John Wiley & Sons, Inc., 2015: 193–



246. lpp. <https://doi.org/10.1002/9781119199885.app1>.
- [51] A. Davydenko, R. Fildes, Forecast error measures : Critical review and practical recommendations, *Bus. Forecast. Pract. Probl. Solut.* (2016) 1–12. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4539.5281>.
- [52] ISO 4288:1996 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture, (b. g.). <https://www.iso.org/standard/2096.html> (skatīts 2020. gada 1. jūlijā).
- [53] ISO 3274:1996 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Nominal characteristics of contact (stylus) instruments, (b. g.). <https://www.iso.org/standard/1916.html> (skatīts 2020. gada 1. jūlijā).
- [54] Velkavrh, Lungevičs, Jansons, Klien, Voyer, Ausserer, The Influence of Isotropic Surface Roughness of Steel Sliders on Ice Friction Under Different Testing Conditions, *Lubricants*. 7 (2019) 106. <https://doi.org/10.3390/lubricants7120106>.
- [55] I. Velkavrh, J. Voyer, T. Wright, J. Lungevičs, E. Jansons, I. Boiko, Variations of ice friction regimes in relation to surface topography and applied operating parameters, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1140 (2021) 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1140/1/012033>.
- [56] J. Lungevics, E. Jansons, I. Boiko, I. Velkavrh, J. Voyer, T. Wright, A Holistic Approach Towards Surface Topography Analyses for Ice Tribology Applications, *Front. Mech. Eng.* 7 (2021) 56. <https://doi.org/10.3389/FMECH.2021.691485>.



**Ernests Jansons** dzimis 1991. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis profesionālo bakalaura grādu mašīnu un aparātu būvniecībā un mehānikas inženiera kvalifikāciju (2014) un inženierzinātņu maģistra grādu mašīnbūves tehnoloģijā (2016). No 2014. gada līdz 2019. gadam strādājis par konstruktoru uzņēmumā "*Enertecgreen*". Paralēli pamatdarbam 2015. gadā sācis strādāt RTU, ieņemot zinātniskā asistenta amatu valsts pētījumu programmas projektā, pētot berzes un nodiluma samazināšanas iespējas metāla virsmām. 2017. gadā pētījumi turpināti ERAF projektā, ieņemot pētnieka amatu. Kopš 2019. gada strādā RTU Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, turpinot pētījumus saistībā ar triboloģijas un metroloģijas jomu, kā arī studentiem docējot studiju priekšmetus, kas risina konstruēšanas jautājumus.