

**Tuulegeneraatorite labade jäätumist põhjustavate
meteoroloogiliste tingimuste statistiline analüüs Narva tuulepargi
näitel**

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Markus Arm

Juhendajad: Arne Männik, Meresüsteemide instituut, kaasprofessor tenuuris

Alari Adoson, Enefit Green AS, andmeanalüütik

Õppekava: YAFB02/20

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Markus Arm

[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Arne Männik

[allkiri ja kuupäev]

Juhendaja: Alari Adoson

[allkiri ja kuupäev]

Töö on lubatud kaitsmisele.

Kaitsmiskomisjoni esimees: [nimi]

[allkiri ja kuupäev]

Annotatsioon

Käesolev lõputöö keskendub Narva tuulepargi tuulikute labade jäätumise analüüsile, uurides jäätumissündmuste esinemist ja nende tekkepõhjuseid. Uurimuse tulemused aitavad töötada välja tuulikute labade jäätumiste hoiatuste süsteemi, mis võimaldab hooldusmeeskonnal operatiivsemalt reageerida, vähendades seeläbi tuulikute seisakuaega soodsate tuuleolude korral.

Töös analüüsitakse Narva tuulepargi jäätumissündmusi perioodil 2012-2022, keskendudes talvisele perioodile. Uurimuses esitatakse statistiline analüüs, meteoroloogiliste parameetrite analüüs ning loodi jäätumissündmuste esinemise tõenäosuste kuumuskaardid. Töö demonstreerib, et jäätumissündmuste varieeruvus on aastate lõikes suur ning kõige rohkem sündmusi esines jaanuarikuus. Enamik jäätumissündmusi kestavad kuni 24 tundi, kuid esineb ka juhtumeid, kus jäätumisest tingitud seisak kestab mitmeid päevi. Töö näitab, et peamiselt sõltuvad jäätumissündmused madalatest õhutemperatuuridest ja kõrgetest suhtelistest õhuniiskustest, kuid jäätumissündmusi esineb nende parameetrite üsna laias vahemikus. Töös tuvastati ka tuule suuna ja kõrgema õhurõhu mõju jäätumissündmuse esinemisele. Jäätumissündmuste esinemise tõenäosuste kuumuskaardid annavad võimaluse hinnata jäätumissündmuse esinemise tõenäosust teades põhiliste meteoroloogiliste suuruste prognoosi spetsiifilise jäätumishoiatuste süsteemi mudeli puudumisel.

Antud uurimus annab väärtuslikku teavet tuulepargi hoolduse ja operatsioonide parandamiseks, aidates arendada hoiatuste süsteemi, mis võimaldaks kiiremat reageerimist jäätumissündmustele ning lühemat seisakuaega tuulikutele soodsate tuuleolude ajal.

Abstract

Statistical Analysis of Meteorological Conditions Causing Wind Turbine Blade Icing: A Case Study of Narva Wind Farm

This study analyses ice accretion on wind turbine blades in the Narva wind park. The objective is to identify statistical trends and meteorological factors contributing to blade icing, using Enefit Green's Narva wind park as a case study. The research aims to develop heat maps of icing probabilities based on selected weather parameters to assist in the development of a blade icing warning system. The study covers the period from 2012 to 2022, focusing on winter data when icing events occurred. Results show significant variation in icing occurrences, with the highest frequency in January. Temperature and relative humidity have the most significant impact on icing, while wind direction also plays a role. Heat maps indicate specific meteorological conditions that favour icing. The findings contribute to improved maintenance practices and operations, reducing downtime during favourable wind conditions.

Sisukord

1. Sissejuhatus	6
2. Teooria	8
2.1 Tuuliku ehitus ja tuulepargid Eestis.....	8
2.2 Jäätumine ja selle mõju tuulegeneraatorite jõudlusele ja ohutusele	10
2.3 Jäätuvastusmeetodid ja nende rakendamine energiatootmises	11
3. Andmed ja metoodika.....	13
3.1 Meteoroloogilised vaatlused ja jäätumisalarmid.....	13
3.2 Ilmajaamast ja SCADA-st saadud alarmide töötlemine	13
4. Tulemused	15
4.1 Jäätumissündmuste üldine statistika	15
4.2 Jäätumissündmusi põhjustavate meteoroloogiliste tingimuste analüüs	17
4.3 Jäätumissündmusi mõjutavate atmosfäärinähtuste ja meteoroloogiliste tingimuste tõenäosuste kuumuskaardid	22
5. Kokkuvõte.....	28
6. Kasutatud kirjandus	29
Lisad.....	30
Lisa 1	30

1. Sissejuhatus

Energiakriis on tänapäeva ühiskonna üks olulisemaid väljakutseid, millel on ulatuslikud ja mitmekülgsed mõjud. See kriis tuleneb peamiselt suurenevast energiatarbimisest koos kasvava rahvastiku, tööstuse ja tehnoloogia arenguga. Globaalse energianõudluse rahuldamiseks on traditsiooniliste fossiilkütuste ressursid ammendumas ning süsinikuheitmed tekitavad tõsiseid keskkonnaprobleeme. Seetõttu on vältimatu vajadus leida uusi jätkusuutlikke ja puhtaid energiaallikaid, mis suudavad katta meie praegust ja tulevast energiavajadust.

Energiakriis ei möödunud ka Eestist ning 2022 aastal tõusid elektrihinnad kohati ulmelistesse kõrgustesse. Kuigi Eesti on traditsiooniliselt sõltunud põlevkivist kui peamisest energiaallikast, on viimastel aastatel tehtud märkimisväärseid edusamme taastuenergia arendamisel. Juba varasemalt oli Euroopa Liit ja Euroopa Komisjon algatanud poliitilise strateegia, et aastaks 2050. saavutada kliimanetraalsus, mis tähendab suurenenud energia tootmist rohelistest allikatest [1]. Üheks atraktiivsemaks rohelse energia tootmise võimaluseks rannikualadel on tuuleenergia, sest tuult saab ekvaatori ja pooluste soojenemise kiiruste erinevuse ning *Coriolisi* efekti tõttu pidada peaaegu piiramatuks ressursiks.

Tuuleparkidel ja -generaatoritel (edaspidi tuulikud) esineb mitmeid probleeme, mille hulgas on ka külmadel perioodidel esinev tuuliku labade jäätumine. Jäätumise korral toimib tuulik alguses piiratud režiimis, kuid lõpuks peab ennast seiskama, mis omakorda toob kaasa elektritoodangu seiskumise, kui tuule kiirus ületab teatud tuule kiirust. Näiteks võttes aluseks 2021. aasta detsembri keskmise elektrihinna, tähendaks tuulikute seiskumine ühe tunni jooksul ühe tuuliku kohta umbes 450€ kahju, ning kogu pargi peale arvestatuna ulatuks kahjum ligikaudu 7650€ tunnis.

Enefit Greeni tuuleparkidest on Narva pargis tuuliku labade jäätumisega seotud probleemid olnud kõige tõsisemad. Näiteks 2020. aasta detsembrist kuni 2021. aasta jaanuarini oli seal kokku 3522 tunni jagu seiskumisi 17 tuuliku peale. See tähendab, et keskmiselt seisid Narva tuulepargi tuulikud 2 kuu jooksul üle 207 tunni ühe tuuliku kohta. Selline seisakuperiood moodustab peaaegu 14% kogu ajast, kus tuulikud oleksid võinud toota elektrit.

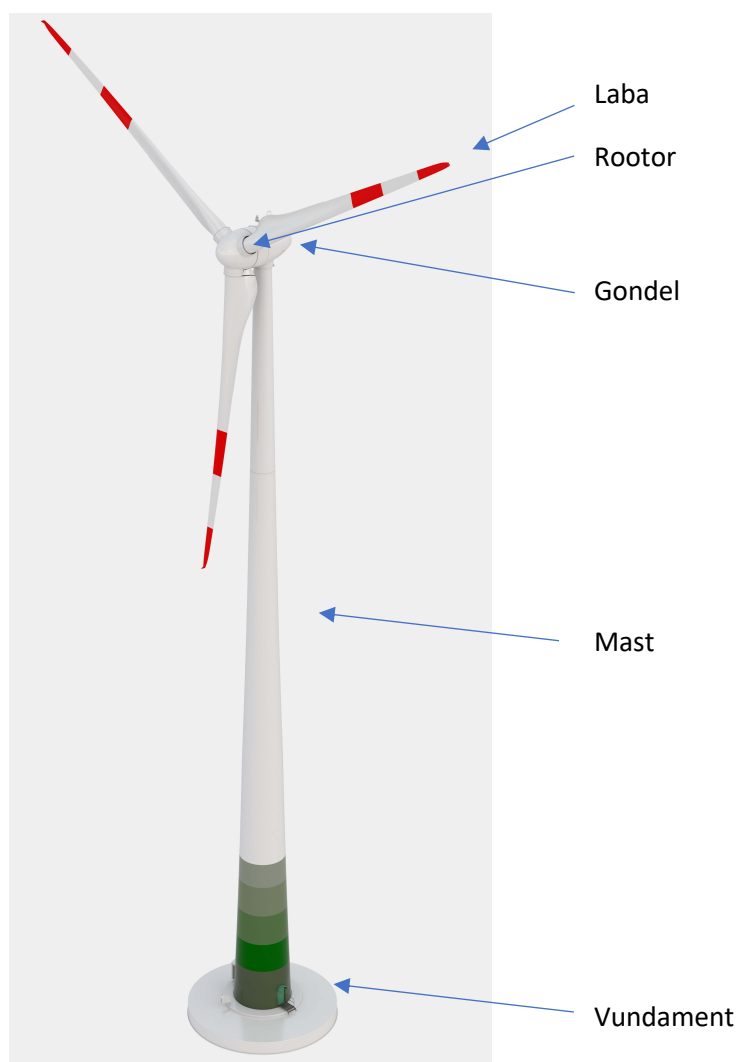
Seni pole loodud kindlaid ennustusmudeleid, mis võiksid täpselt ette ennustada tuulikute labade jäätumist ning töötada igat tüüpi tuulikute puhul sõltumata asukohast. Kuigi maailmas on tehtud mitmeid uuringuid tuulikute labade jäätumise kohta, on nende tulemused enamasti piiratud konkreetsete tuuleparkide või piirkondadega ning seetõttu pole neid alati võimalik üldistada teistele parkidele või erinevatele kliimatingimustele. Eestis pole seni tehtud sarnaseid uuringuid, mis keskendusid tuulikute labade jäätumisele. Siiski on teada, et iga talv toob kaasa märkimisväärse kahjumi elektritootmisele, kuna labade jäätumine põhjustab tuulikute seisakuid ning vähendab märkimisväärselt elektritoodangut. Selle tulemusena kaasneb majanduslik kahju nii tuulikute operaatoritele kui ka üldisele energiatootmisele.

Käesoleva töö eesmärk on Eesti tuuleparkidele probleeme valmistavate tuulikute labade jäätumissündmuste ja nende tekkepõhjuste statistiline analüüs Enefit Greeni Narva tuulepargi näitel. Töös selgitatakse välja millistes meteoroloogilistes tingimustes tuulikute labade jäätumist esineb ning koostatakse valitud meteoroloogiliste parameetrite kohta labade jäätumise esinemise tõenäosuste kuumuskaardid. Tegemist on ettevalmistava uurimusega, et töötada välja tuulikute labade jäätumiste hoiatuste süsteem, mis aitaks tulevikus edasi arendada võimalusi labade jäätumiste seisakute kestvuse vähendamiseks hooldusmeeskonna operatiivsema reageerimisega. Kiirem reageerimine omakorda tähendaks lühemat aega, kui turbiin soodsate tuule kiirustega elektrit ei toodaks.

2. Teooria

2.1 Tuuliku ehitus ja tuulepargid Eestis

Tuulik koosneb mitmest osast (vt Joonis 1): kõige alumine osa tuulikust on vundament (Joonis 1), mis hoiab tuulikut maa sees, vundamendi peale on püsti pandud mast (Joonis 1), mille otsas omakorda gondel (Joonis 1), gondli külge on kinnitatud rootor, mille küljes on üldiselt 3 laba. Gondli kõrgus vundamendist võib ulatuda üle 200 meetri, kuid sellised tuulikud on enamasti meretuuleparkides. Gondli sees on enamik elektri tootmiseks vajalikest komponentidest nagu näiteks generaator, käigukast ja kontrollid. Gondli külge on kinnitatud rootor (Joonis 1), mille küljes on üldiselt 3 laba (Joonis 1). Rootori ja labade diameetrid ulatuvad üle 160 meetri.



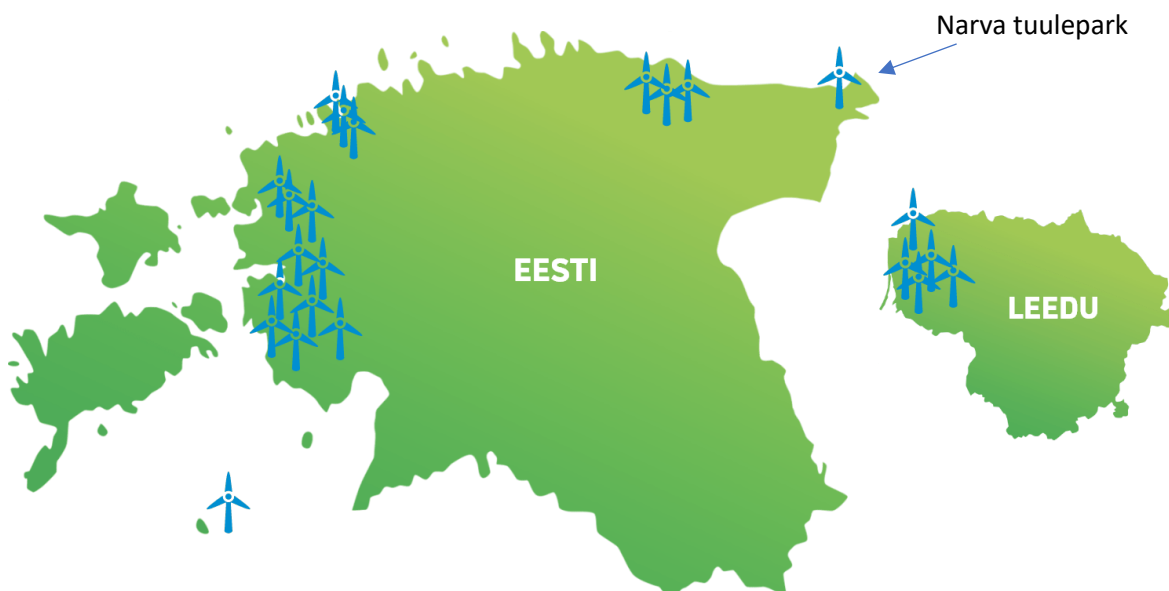
Joonis 1. Tuuliku ehitus [2]

Käesolevas töös analüüsiks kasutatav tuulepark on Narva tuulepark, kus kasutatakse firma Enercon poolt toodetud tuulikuid. Enercon on Saksamaa ettevõtte, mis tegutseb aastast 1984 ning tegeleb

tuulegeneraatorite tootmisega. Ettevõttel on erineva võimsuse ja suurusega tuulikuid. Enefit Greenil on tootmisportfellis mitmeid erinevaid Enerconi mudelid. Mudelite erinevused seisnevad peamiselt tootmisvõimustes, gondli kõrguses ja rootori läbimõõduga. Kõige suurem ja võimsam Enerconi mudel on võimsusega 6 MW ning rootori läbimõõduga 175 meetrit. Enefit Greenis on kõige väiksema tootmisvõimsusega tuuliku mudel 0,6 MW ning kõige võimsam mudel 2,35 MW. [3]

Narva tuulepark asub Ida-Viru maakonnas (vt Joonis 2) ning see alustas tööd 2012. aasta detsembris ja regulaarse hooldusega peaks tuuliku eluiga olema veel vähemalt 20 aastat. Narva tuulepargi tuulikute gondli kõrgus on maapinnast 107,1 meetrit ning rootori ja labade diameeter on 82 meetrit. Narva tuulepargis on kokku 17 tuulikut võimusega 2,3 MW ning pargi koguvõimsus on 39,1 MW.

Eestis on kokku 31 tuuleparki koguvõimsusega 319,96 MW, millest üle 50% ehk 18 parki kuuluvad Enefit Greenile [4]. Pargid on välja toodud Joonis 2 esitatud kaardil. Lisaks Eesti parkidele on Enefit Greenil 5 parki ka Leedus. Eestis on tuuleparkide tuulikutel 7 erinevat tootjat. Eesti kõige suurema tootmisvõimsusega tuulepark on Aulepa tuulepark, mis asub Lääne maakonnas ning on koguvõimsusega 48 MW. Uuritav Narva tuulepark on Eestis võimsuselt kolmas. Nende kahe pargi vahele jääb veel Paldiski tuulepark, mis asub Harju maakonnas ja mille koguvõimsus on 45 MW. Kõik need kolm parki kuuluvad Enefit Greeni tootmisportfelli. Arendusjärgus on ka mitmeid uusi võimsaid tuuleparke Eestis, Leedus ja Soomes. Võimsaim neist tuleb Pärnumaale, koguvõimsusega 255 MW.



Joonis 2 Enefit Greeni opereerivate tuuleparkide asukohad. Kaardil märgitud Narva tuulepark

2.2 Jäätumine ja selle mõju tuulegeneraatorite jõudlusele ja ohutusele

Jäätumine on jaheda ja arktilise kliimaga aladel, kus õhu temperatuur langeb sageli alla 0 °C, tuulikute puhul sagedasti esinev probleem. Olenemata õhutemperatuurist sisaldab atmosfäär alati teatud koguses vett vähemalt ühes kolmest olekust: aur, vesi või lumi/jää. Isegi kui temperatuur on tugevalt miinuses, leidub allajahtunud veepiisakesi koos veeauru ja jääosakestega. Seetõttu on ka kaks peamist protsessi, mis võivad viia vee kogunemiseni labadele- jäätumiseni. Üks protsess, mis tekitab härmatist ja jääladestust, on veeauru sublimeerumine pindadele nagu labad ja turbiini torn. Jääladestus tekib objekti tuulepoolsele küljele ning seda tekib enim kui ilm on udune või pilves. Teine protsess on jäide või jäävihm. See on veelgi kriitilisem, sest allajahtunud veepiisad tabavad pindu, mille temperatuur on alla külmumispunkti ning vesi külmub koheselt ja kleepub pinnale ja muutub jääks. Selline jäide on eriti ohtlik nii kaablitele kui ka lennundusele. Kui jäide tekib autoteele, on see samuti ohtlik ning on tuntud ka kui „must jää“. [5]

2020. aastal kirjutatud artiklis [6] leiti, et vaatamata tugevale tuulele, pöörlevad külma kliimaga aladel jäätunud tuulikud palju aeglasemalt, tuues kaasa kuni 80% võimsuskadu ning kui labadele tekib liiga palju jääd lülituvad tuulikud välja, mis võib tuua kaasa rohkem kui 20% kadu aastasest energiatoodangust. Artiklist selgus veel, et jää tekkis enamasti tuuliku laba tippu ning selle paksus ulatus kuni 0,3 meetrini.

Härmatis, lumi ja jäide muudavad turbiinide staatilisi ja dünaamilisi omadusi. Labad muutuvad raskemaks ning äärmuslikel juhtudel võib see ohustada ka labade ja rootori vahelise ühenduse stabiilsust. Tagajärjed dünaamikale võivad põhjustada nii väljundvõimsuse kadu kui ka suurenemist (suurenemine toimub pigem harva). 2020. aastal kirjutatud artiklis [6] leiti, et vaatamata tugevale tuulele, pöörlevad külma kliimaga aladel jäätunud tuulikud palju aeglasemalt, tuues kaasa kuni 80% võimsuskadu ning kui labadele tekib liiga palju jääd lülituvad tuulikud välja, mis võib tuua kaasa rohkem kui 20% kadu aastasest energiatoodangust.. Tuulikutele, mille labade nurka rootori suhtes muuta ei saa, võib suhteliselt väike jää kogus tekitada oluliselt suurema jõudluse kao. Need kaod tulenevad labade pinna kareduse suurenemisest mistõttu laba ei ole enam nii aerodünaamiline. Tuvastatud on ka jäätumise positiivne mõju - nimivõimsus suurenes 16%, kuna suurte laba nurkade puhul toimis jää nagu esiserva klapp, suurendades seeläbi õhutiiva tõstejõudu. Lisaks selgus veel artiklist, et jää tekkis enamasti tuuliku laba tippu ning selle paksus ulatus kuni 0,3 meetrini. Labade jäätumise tagajärjel tuulik üldiselt opereerima ei jää ning ohutuse kaalutustel tuulik seiskab ennast.

Tuulikulabade jäätumisel on mitu erinevat faasi. Täpsemalt eristatakse 4 faasi jäätumistsükliks. Need on kirjeldatud järgnevalt: [7]

1. Jäätumiseelne faas (i.k. *pre-icing*) – inkubatsiooniperiood, mille jooksul tuuleturbiin meteoroloogiliste jäätumisnähtude tõttu võimsust ei vähenda.
2. Jäätumise ajal opereerimise faas (i.k. *operational-icing*) – periood, mille ajal hakkavad tekkima juba märgatavad piirangud tootmisvõimsuses, kuni turbiin seiskub täielikult.

3. Jäätumisest tingitud seisaku faas (i.k. *stopped icing*) – tuulik ei tooda midagi ja seisab, kuni jää on lahti sulanud või maha raputatud.
4. Jäätumisjärgne faas (i.k. *post-icing*) – tuulik jätkab energiatootmist, kuni saavutab täisvõimsuse.

Liikuvatelt labadelt lahti lendavad jäätükid on tuuleturbiini lähiümbrusele väga suureks ohuks. Labade ja maapinna minimaalne vahemaa Narva tuulepargi tuulikutel on üle 66 meetri ning maksimaalne vahemaa ligi 150 meetri. Kui labade külge moodustuvad suured jäätükid, siis lahti kukkunud või pöörlemise käigus lahti lennanud jäätükid võivad olla eluohtlikud nii inimestele kui ka loomadele. Lisaks võivad suured tükid kahjustada ka ümbruses olevaid esemeid ning hooneid. Turbiini enda konstruktsioonilist terviklikkust mõjutab enim tekkiv suur tasakaalutus ebasümmeetrilise jää eraldumise tõttu, mis on põhjustatud komponentide muutunud omasagedustest ja ületavad projekteeritud koormusi.[6]

2.3 Jäätuvastusmeetodid ja nende rakendamine energiatootmises

Suuremat osa erinevatest meetoditest jäätumise tuvastamiseks uuriti 2006. aastal avaldatud töös [8]. Jäätumist saab tuvastada kas otseselt või kaudselt. Otsesed meetodid tuvastavad labadele jää kogunemisest põhjustatud turbiini omaduste muutusi. Tuvastatavate omaduste hulka kuuluvad mass, peegeldusomadused, elektri- või soojusjuhtivus, dielektriline koefitsient ja induktiivsus. Kaudsed meetodid põhinevad jäätumist põhjustavate meteoroloogiliste tingimuste (niiskus ja temperatuur) või jäätumise mõjude (elektritootmise vähenemine) tuvastamisel. Saadud ülevaade näitas, et puuduvad andurid, mis suudaksid täpselt tuvastada jäätumist. Jäätuvastusmeetodid, mis andsid kõige parema tulemuse olid järgmised:

- Laba tippu paigaldatavad infrapuna-spektroskoopia sensorid läbi fiiberoptiliste kaablite.
- Painduv resoneeriv diafragma.
- Laba seest tulev ultraheli ja mahtuvus.
- Induktiivsusel või näivtakistusel põhinev andur.

Need tuvastusmeetodid valiti, kuna need mõõdavad otseselt jää omadusi ning on väga tundlikud õhukeste jääkihtide suhtes ja neid andureid on kerge paigaldada. Lennukitel kasutatavatest jäätuvastusmeetoditest tunduvad tuuleturbiinidele sobivaimad need, mis põhinevad mahtuvusel ja laba seest tulevul ultrahelil. Sondide resonantssagedusel põhinevad meetodid ei ole osutunud edukaks. [8]

Narva tuulepargis kasutatavate Enerconi poolt toodetud tuulikute puhul on esimene võimalus jäätumist tuvastada kasutades meteoroloogilisi andmeid. Pikaajaliste keskmiste väärtustena registreeritakse ja salvestatakse tuuliku- ja pargispetsiifilised vastastikused seosed tuule kiiruse, rootori pöörelemiskiiruse, labade nurga ja väljundvõimsuse vahel temperatuuril üle +2,0 °C. Kui temperatuur langeb alla +2,0 °C, võrreldakse jooksvaid tööandmeid varasemalt salvestatud keskmiste väärtustega. Üle 30 minuti kestvate oluliste kõrvalekallete korral eeldatakse jää,

härmatise või lume kogunemist. Kui jäätumine on tuvastatud, tuuleenergia muundur peatub ja ootab kuni temperatuur tõuseb üle +2,0 °C, et jää lahti sulaks.[9]

Tuulikul töötab paralleelselt ka teine jäätuvastussüsteem, mis on aktiivne ainult siis, kui tuuleenergia muundur töötab. See jäätuvastussüsteem toimib võimsuskõvera analüüsi meetodi põhjal ning monitoorib reaajas võimsuskõvera muutusi. Kui temperatuuril alla 2,0 °C tuvastab süsteem tavapärasel võimsuskõveras muutusi, siis tuulik seisatakse. Enerconi jäätuvastussüsteem on sõltumatute instituutide poolt nagu Meteotest hinnatud oma kõrge töökindluse tõttu. [10]

Kui tuulik on tuvastatud jäätumine, siis aega labade jääst lahti sulamiseni arvestatakse välistemperatuuri järgi. Tuulik ei käivitu automaatselt enne, kui süsteemi poolt arvatud sulamisperiod on möödas. Kui sulamine pole lõplikult läbi saanud, aga kontrollsüsteem tuvastab uue jäätumise, siis algab kogu protsess uuesti. Visuaalsele läbivaatusele tuginedes saab peale jäätumist tuuliku käivitada manuaalselt, kuid siis jääb kogu vastutus tuuliku käivitamise tagajärjel ükskõik millise kahjustuse tekkimisel operaatorile ja/või omanikule. Jäätumistuvastussüsteem jääb aktiivseks ja peatab tuuliku, kui tuvastab uuesti jäätumise. Manuaalsel käivitamisel on suur tõenäosus, et veel labade küljes olevad jäätükid, mis pole lahti sulanud, kukuvad alla, sest labade liikuma hakkamisel tekkiv vibratsioon ja raputus on piisav, et jää laba pinnalt lahti lüüa. [10]

Jääst vabastamiseks on olemas ka labade soojendus, kuid seda süsteemi ei ole kuigi paljudel tuulikutel. Süsteem soojendab labad üles ja see kiirendab jäävabastusprotsessi ning vähendab seisaku kestvust. Labade soojendust saab sisse ja välja lülitada tuuliku juhtimiskeskusest. Piirkondades, kuhu jää kukkumise tagajärjel on ebatõenäoline, et tekib kahju või keegi saab vigastada, võidakse lülitada labade soojenemine sisse ka siis kui tuulik on veel töös.[10]

Narva tuulepargi tuulikutel labade soojendust ei ole. Seal toimub labade jääst vabastamine tavapärase sulamisega välisõhu soojenemisel ning manuaalsel käivitamisel, kui jää raputatakse ohutust tagades maha.

Käesoleva tööga haakub 2020. aastal tehtud uuring [11], mis keskendus labade jäätumist enim mõjutavate meteoroloogiliste parameetrite leidmisele. Uuringus kasutati kahte masinõppe mudelit - Support Vector Machine (SVM) ja Neural Network (NN). Tulemustest selgus, et mõlema masinõppe mudeli puhul oli väline temperatuur kõige olulisem tegur jäätumise tekkimisel, kus madalam temperatuur suurendas jäätumise tõenäosust. Teiseks oluliseks teguriks olid tuulesuund ja õhurõhk, mis mõlemad avaldasid positiivset mõju jäätumisele. Kõrgem õhurõhk ja teatud tuulesuunad soodustasid jäätumise tekkimist. Lisaks mängis suhteline õhuniiskus olulist rolli, kus kõrgem õhuniiskus oli seotud suurema tõenäosusega jäätumiseks. Siiski täheldati huvitavat negatiivset efekti välise temperatuuri ja tuulesuuna kombinatsioonil, mis ei parandanud mudeli tulemusi. Kokkuvõttes näitab uuring, et väline temperatuur on kõige olulisem tegur jäätumise tekkimisel, mida toetavad tuulesuund, õhurõhk ja suhteline õhuniiskus, kuid teatud välise temperatuuri ja tuulesuuna kombinatsioonidel puudub positiivne mõju ennustusmudeli tulemustele.

3. Andmed ja metoodika

3.1 Meteoroloogilised vaatlused ja jäätumisalarmid

Käesolevas töös on kasutatud kahte tüüpi andmeid: jäätumisandmeid Narva tuulepargist ja meteoroloogilisi vaatlusi nii Narva ilmajaamast kui ka tuulikute enda süsteemide poolt registreeritud ilmaparameetreid.

Narva ilmajaama meteoroloogilised andmed pärinevad Keskkonnaagentuuri ajalooliste ilmaandmete arhiivist, mis on kättesaadavad Keskkonnaagentuuri veebisaidilt, mis hõlmavad perioodi aastatel 2012-2022. Meteoroloogilised vaatlused on antud tunniajaliste intervallidega ning parameetritena kasutati õhurõhku, suhtelist õhuniiskust, välisõhu temperatuuri, tuule suunda ja tuule kiirust. Lisaks eelnevalt loetletud parameetritele saadi Keskkonnaagentuurist ka atmosfäärinähtuste andmed, mis olid salvestatud samuti tunniajaste intervallidega, kuid need andmed olid saadaval ainult alates 2014 aastast. Andmed olid saadaval xlsx-vormingus.

Tuulegeneraatori lokaalsete ilmajaamade andmed 2012-2022 perioodi kohta olid kogutud tuulepargi poolt rutiinse töö käigus. Mõõtmised on salvestatud 10-minutiliste intervallidega ning töös kasutati tuule kiirust ja välisõhu temperatuuri gondli kõrguselt. Andmed olid saadaval csv-vormingus. Tuulegeneraatorite andmete eeliseks võrreldes Narva ilmajaama andmetega on nende mõõtmiste asukoht geograafilises ja tuuliku paiknemise kõrguse mõttes.

Narva tuulepargi poolt on kogutud jäätumise andmed, mis sisaldavad tuulegeneraatori numbrit, kus jäätumine tuvastati, koos kuupäeva, kellaaja ja kestusega. Jäätumisandmed pärinevad tuulegeneraatori lokaalsest SCADA-süsteemist (Supervisory Control and Data Acquisition). SCADA on tuuliku erinevate komponentide jälgimise ja tööandmete logimise süsteem. SCADA salvestab teavet tuule kiiruse, selle suuna, genereeritud võimsuse ja paljude muude parameetrite kohta. [12]. Jäätumise hoiatused salvestati SCADA-süsteemi sekundise täpsusega. SCADA andmed saadi csv-vormingus.

Enerconi tuulikute SCADA-sse genereeritud alarmidest eraldati analüüsiks järgmist tüüpi jäätumisalarmid:

- „Ice detection : Turbine stopped preventive“ – Ennetav alarm.
- „Ice detection : Rotor (power measurement)“ – Võimsuskõveras tuvastatud muutusest tingitud alarm.
- „Ice detection : Rotor (blade angle)“ – Labade nurga muutusest tingitud alarm.

3.2 Ilmajaamast ja SCADA-st saadud alarmide töötlemine

Peale meteoroloogiliste andmete kättesaamist ilmajaamast alustati Enerconi SCADA-st saadud alarmide faili eeltöötlusega Microsoft Exceli programmis. Seejärel filtreeriti välja ainult

huvipakkuvad alarmid, ehk antud töö puhul jäätumise alarmid, ja eemaldati valealarmid. Kui alarmid olid välja sorteeritud, siis ümardati kellaaeg koos kuupäevaga lähimale tunnile, sest ilmajaama andmed on tunniajaste intervallidega salvestatud. Järgmiseks sorteeriti ilmajaama andmetest välja perioodid, kui oli esinenud jäätumine ning neile eelnevalt ning järgnevalt 1 kuu, et vajadusel pikemat perioodi enne ja pärast jäätumist analüüsida.

Lisaks jäätumise alarmile oli salvestatud ka tuule kiirus jäätumise hetkel ning igal tunnil keskmine tuule kiirus kõigil tuulikutel. Tuule kiirust mõõdetakse tuuliku gondli kõrguselt. Igal tuulikul on tuule kiiruse mõõtmiseks oma ilmajaam, kus on anemomeeter, mis teeb kogu pargi peale kokku kuni 17 erinevat mõõtmist. Kuna iga tuulik salvestab tuulekiiruse eraldi, siis andmemahu vähendamise eesmärgil leiti jäätumisele keskmine tuule kiirus. Keskmise tuule kiiruse leidmiseks kasutati meetodit, kus igale ajahetkele mõõdetud 17 tuule kiirusest leiti keskmine.

Lisaks eelnimetatud failidele kasutati ka tuulikust mõõdetud temperatuure. Temperatuuri mõõdab lokaalne ilmajaam tuuliku gondlil ja maapinnal. Temperatuure oli 2 erinevat: üks tuuliku gondlilt mõõdetud 107 meetri kõrgusel ning teine maapinnal. Andmed pärinevad ka Enerconi SCADA-st, kuid need pole salvestatud jäätumise hetkel, vaid iga 10 minuti tagant. Need mõõtmised ja salvestused olid tehtud samuti igas tuulikus eraldi ning iga ajahetke kohta genereeriti 17 väärtust.

Esialgne tuulikult saadud temperatuuride failid olid formaadis .csv ning seal oli lisaks gondli ja maapinna temperatuurile ka palju muid andmeid (näiteks erinevate komponentide temperatuuri ja labade kaldenurgad), mis võiksid anda lisaväärtust jäätumise põhjuste analüüsile. Käesoleva töö eesmärk oli aga analüüsida meteoroloogiliste nähtuste mõju jää tekkimisele labadele ja seega on need andmed jäetud praegu uurimata. Kuna andmemahud oli suur ning korraka kogu perioodi alla laadida ei olnud võimalik, tekitati 10 erinevat faili, iga talve kohta eraldi. Analüüsiks kasutatud Pythoni kood on lisatud lisadena (Lisa 1)

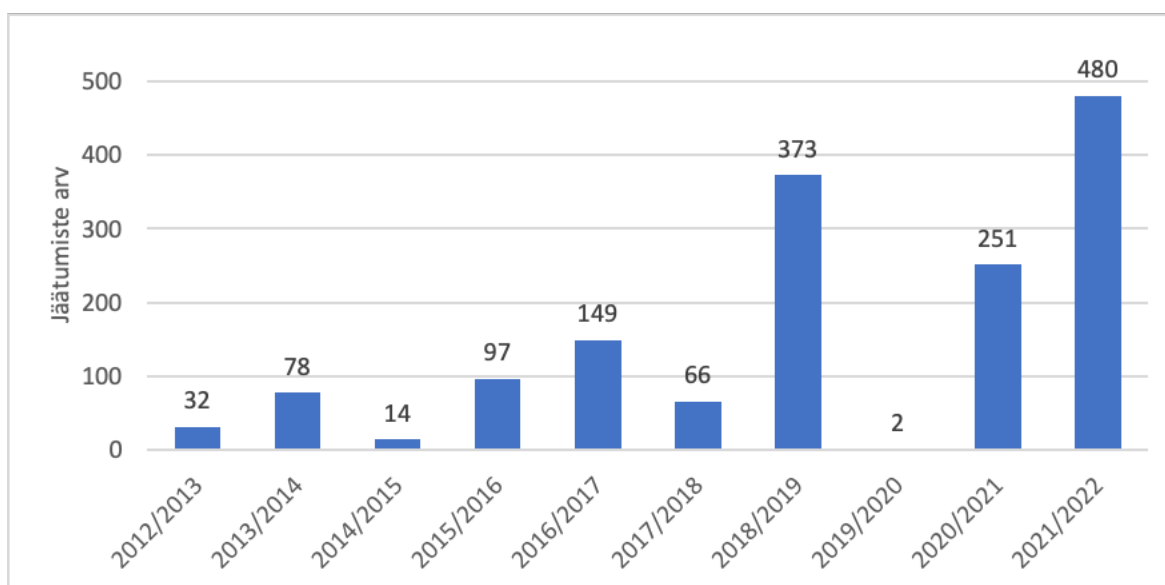
Esimesena kõrvutati Keskkonnaagentuuri andmeid ja jäätumiste andmeid. Kuna andmemahud olid sellistes piirides, et Microsoft Excel suutis neid andmeid käsitleda, siis kasutati analüüsi läbiviimiseks Microsoft Exceli programmi. Esmalt pandi ühte Exceli faili nii ilmajaamast saadud andmed kui SCADA-st saadud alarmide andmed. Järgmiseks ümardati jäätumise esinemise kellaaeg lähimale tunnile (kui jäätumine oli 13:15, ümardati 13:00ks ning kui jäätumine oli 13:45 siis ümardati 14:00ks). Kasutati unikaalseid väärtuseid, mis tähendab, et kui mingil kuupäeval ja kellaajal esines jäätumine ainult 1 tuulikul, siis on see kuupäev ka arvesse võetud ühe jäätumisega ning kui jäätumine esines kõigil 17-l tuulikul samal tunnil, siis see arvestati samuti ühe jäätumisega. Jäätumiste alarmidele lisaks salvestati SCADA-s ka tuule kiirused alarmi genereerimise hetkel ning neid andmeid on kasutatud ka eraldi tuule kiiruse analüüsiks jäätumise hetkel.

4. Tulemused

4.1 Jäätumissündmuste üldine statistika

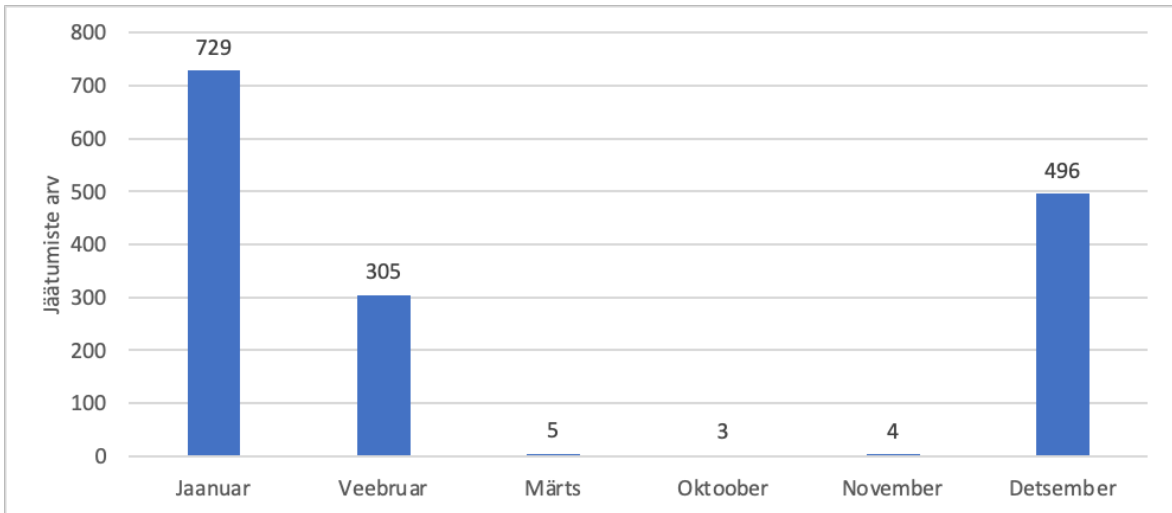
Tuulikute labade jäätumine on oluline probleem tuuleenergia tööstuses, mis võib oluliselt mõjutada tuulikute efektiivsust ja töökindlust. Jäätumisprobleemi ulatuse mõistmiseks Narva tuulepargis koostati jäätumissündmuste kohta üldine statistika. Jäätumiste üldise statistika visualiseerimiseks kasutati tulpdiaagrammi.

Perioodil 2012. detsember – 2022. märts, kokku 10 talvel ja talvele eelnevatel ning järgenvatel külmematel kuudel (oktoober-märts), tuvastas SCADA süsteem jäätumisega seotud alarme kõigi 17 tuuliku peale kokku 1542 (Joonis 3). See teeb keskmiselt 90,8 alarmi tuuliku kohta. Talve jooksul oli keskmiselt 154,2 alarmi, mis teeb keskmiselt 9,1 alarmi ühe tuuliku kohta ühe talve jooksul.



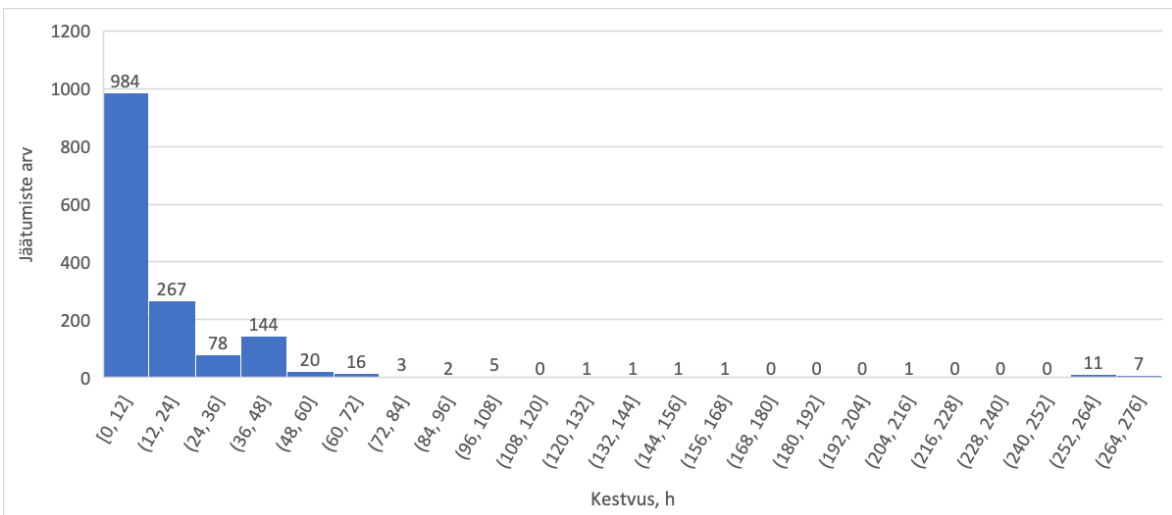
Joonis 3 Rikete jaotumine talvede lõikes kõikide tuulikute peale kokku

Joonis 3 on esitatud tuulikute labade jäätumiste esinemine uuritud perioodi talvedel. Jooniselt on näha, et jäätumise esinemine külmal hooajal on aastast-aastasse tugevalt kõikuv. Kõige suurema jäätumiste arvuga oli 2021/2022 aasta talv, kus registreeriti kokku 480 alarmi külma hooaja kohta. Minimaalse jäätumiste arvuga talv oli 2019/2020 aastal, kui jäätumist esines kõigest 2 korda kõigi tuulikute peale kokku külma hooaja jooksul. Kümne talve peale registreeriti kokku 349 unikaalset ajahetke (tunni täpsusega), kus tuvastati vähemalt ühes tuulikus jäätumine, mis omakorda tähendab ligi 35 jäätumissündmuse ühe talve kohta. Lisaks jäätumiste kordadele saab välja tuua, et jäätumist esines 10 talve jooksul kokku 110 päeval, mis teeb keskmiseks ühe talve kohta 11 päeva.



Joonis 4 Jäätumiste arv kuude lõikes kõikide tuulikute peale.

Joonis 4 on välja toodud jäätumiste esinemine antud perioodil kuude lõikes. Jooniselt on näha, et jaanuar on jäätumiste koguarvu poolest teistest talvekuudest üle. Jaanuaris on kõikide tuulikute peale kokku 729 jäätumist, seega ligi pooled jäätumise alarmid esinevad jaanuaris. Teisel kohal on detsember 496 jäätumisega ning kolmandal kohal veebruar 305 jäätumisega. Märtsis, oktoobris ja novembris on samuti jäätumisi esinenud, kuid selgelt vähem kui ülejäänud kuudel. Jaanuaris on keskmiselt esinenud ligi 73 alarmi kõikide tuulikute peale, veebruaris on üle poole vähem kui jaanuaris, keskmiselt 30,5 alarmi ning detsembris keskmiselt 49,6 alarmi kõikide tuulikute peale.

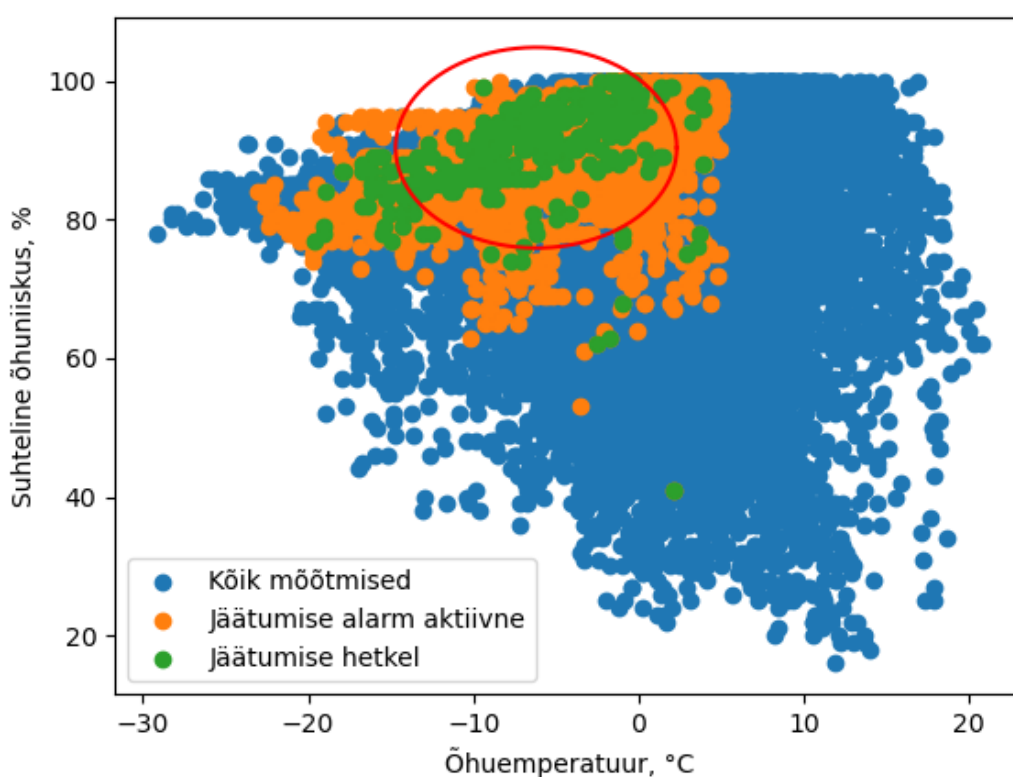


Joonis 5 Jäätumiste keskmine kestvus tundides.

Kõigi tuulikute peale oli kogu perioodil jäätumise alarmide kogukestvus ligi 24641 tundi, mis teeb ühe talve jooksul keskmiseks 2464,1 tundi. Ühe tuuliku kohta teeb see alarmide kogu kestvuseks 144,95 tundi talve jooksul ja ühe alarmi keskmiseks kestvuseks 16,08 tundi. Joonis 5 on esitatud tundides mõõdetud jäätumiste ajalise kestvuse jaotus. Joonisel on näha, et enim jäätumisi on kestvusega 0-12 tundi (984 juhtumit), järgnevad 12-24 tunnised jäätumised (267 juhtumit) ning kolmandaks on 36-48 tunnised jäätumised (144 juhtumit). Märkimisväärsed on ka 18 juhtumit, mille kestvus on kokku üle 252 tunni ehk üle 10 ööpäeva.

4.2 Jäätumissündmuse põhjustavate meteoroloogiliste tingimuste analüüs

Tuvastamiseks statistilisi seoseid ja eripärasid jäätumissündmuste ja meteoroloogiliste tingimuste vahel uuriti meteoroloogilisi tingimusi, mis esinesid jäätumise alarmi aktiveerumise hetkel, jäätumise ajal ning kogu jäätumiste perioodil. Tulemused on esitatud peamiselt hajvusdiagrammidena. Hajuvusdiagrammi x-teljel oli üks meteoroloogiline parameeter ning y-telje teine meteoroloogiline parameeter ning eesmärk oli leida andmete koonduvust kindlate tingimuste korral jäätumiste hetkel. Lisaks on diagrammile lisatud ellips, mis aitab paremini esile tuua andmete koonduvust. Ellipsi leidmiseks on kasutatud Gaussi ellipsit usaldustasemega 95% [13].



Joonis 6 Hajuvusdiagramm suhtelise õhuniiskuse ja õhuperatuuri kohta. Õhuperatuur pärineb tuulikult, suhteline õhuniiskus ilmajaamast. Sinised punktid tähistavad kogu uuritava perioodi jooksul tehtud mõõtmisi, oranžid punktid tähistavad mõõtmisi, mis on tehtud sellel perioodil kui jäätumise alarm on aktiivne ning tuulik seisab, rohelised punktid tähistavad mõõtmisi, mis on tehtud jäätumise alarmi aktiveerumisega samal tunnil. Punane ellips on Gaussi ellips usaldustasemega 95%.

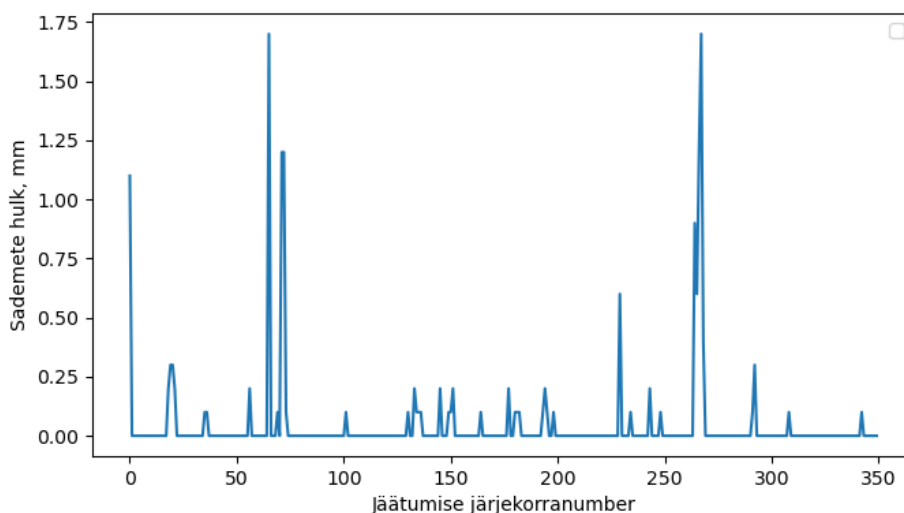
Joonis 6 on kujutatud temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse vaatlusandmete hajuvusdiagramm perioodi 2012-2022 talvekuudel koos jäätumise ajal esinenud parameetrite eristusega. Jooniselt selgub, et temperatuurivahemik, milles jäätumissündmused esinevad on üsna lai, kuid madalam kui 5 °C. Lisaks selgub, et jäätumissündmused on registreeritud vähe, kui temperatuur on madalam kui -20 °C. See võib tähendada, et suuremate külmakraadide korral pole tingimused jäätumiseks sobivad kuna sellistel temperatuuridel on õhus vähe niiskust, kuid ka seda, et temperatuur langeb

vaikselt ja enne kui on langenud $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ on jäätumise alarm aktiveerunud. Jooniselt on näha, et jäätumissündmusi esineb ka siis kui temperatuur on üle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Plusskraadidega esinenud jäätumissündmustel oli kaks peamist põhjendust:

1. Tegu on valealarmiga, mille tuulik on välja andnud ning need on andmetest eemaldatud. Valealarmid on võimalik liigitada omakorda kaheks:
 - 1) Valealarm, mis aktiveerus sooja ilmaga. Käesolevas töös sai selliseks valealarmiks liigitada 2 alarmi, kus temperatuur oli alarmi aktiveerumise hetkel ning sellele eelneval 12-tunnisel perioodil üle $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja ei tuvastatud ühtegi põhjust, miks alarm seoses ilmastikuga oleks pidanud aktiveeruma.
 - 2) Valealarm, mille kestvus on väga lühike. Käesolevas töös oli 8 sellist juhtumit, kus temperatuur oli üle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, alarm läks aktiivseks ning kestis alla 5 minuti. Arvestades jää kogust labadel, millest alates tuulik seisma jääb, ei ole võimalik, et jää kõigest mõne plusskraadiga labade küljest nii kiirelt lahti sulab.
2. Alarmile eelneval perioodil oli temperatuur alla $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ning koos vaigse temperatuuri tõusuga tõusis oluliselt ka õhuniiskus. Sellest saab järeldada, et külmaperioodi järgselt on peale tulnud soojem ja niiskem õhumass, mis on jäätunud labade pinnale, sest labade temperatuur on jätkuvalt alla $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

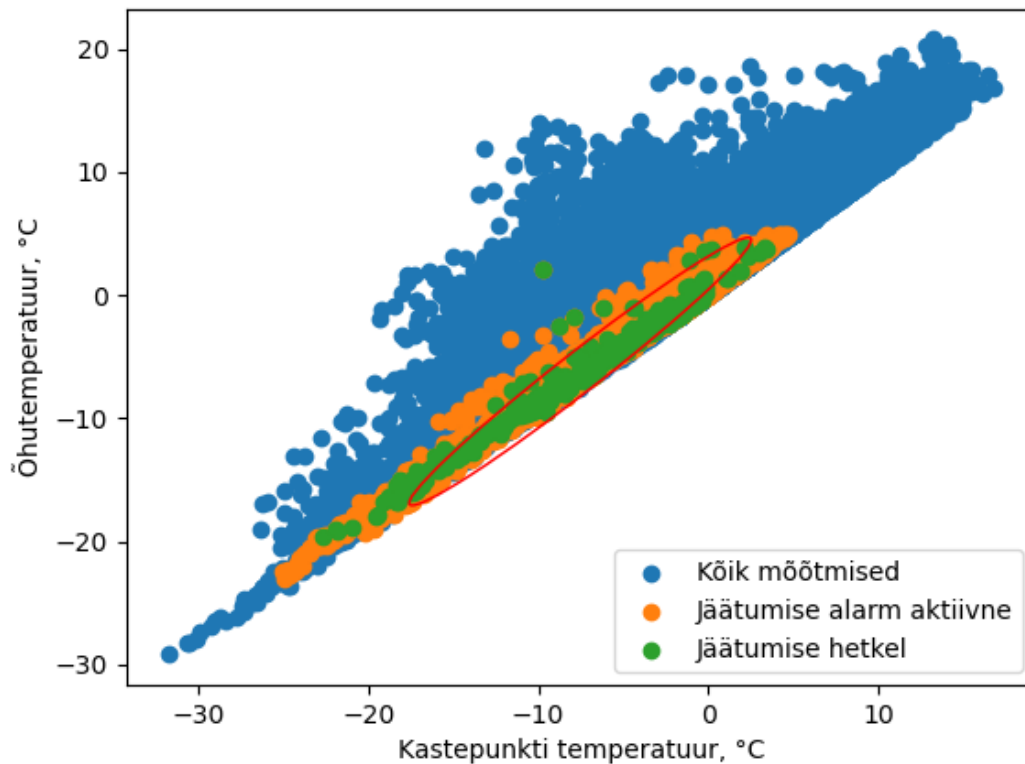
Joonis 6 saab järeldada, et alla 80% suhtelise õhuniiskuse korral on jäätumine harva esinev nähtus ja suurem tõenäosus jäätumiseks on üle 90% suhtelise õhuniiskuse korral. Kõrgem õhuniiskus annab aimu sellest, et jää tekkimiseks labadele on vaja, et õhus oleks niiskuse tase kõrge.

Joonis 6 tuleb välja piirkond, kus andmepunktide sagedus on suurem. Graafiku järgi saab öelda, et temperatuuri langedes langeb ka suhteline õhuniiskus jäätumise hetkel. Tulemustest võib näha, et iga $^{\circ}\text{C}$ võrra, mis temperatuur tõuseb, tõuseb ka niiskus 0,484 % võrra. Tulemused võivad olla mõjutatud ka sellest, et suuremate miinuskraadide juures on õhuniiskus madalam. Antud graafiku põhjal saab hakata esimesi järeldusi tegema, sest kujuneb välja selge piirkond ja sirge mille ümber andmepunktid koonduvad.



Joonis 7 Sademete hulk jäätumise hetkel. Y-teljel on sademete hulk jäätumise hetkel ning x-teljel on jäätumise järjekorranumber.

Sademetekeskmine hulk jäätumise ajal on madal- keskmise sademetekeskmine hulk oli ~ 0,03 mm. Sellest saab järeldada, et sademed ei mängi jäätumise hetkel olulist rolli, küll aga võib sademetel olla mõju mõned tunnid enne jäätumist, kui labadele sajab lumi, lörts või jäide, mis hakkab jäätuma. Joonis 7 on joondiagramm sademetekeskmine hulk kohta jäätumise alarmi aktiveerumise tunnil. Jooniselt eristuvad 6 juhtu 350-st jäätumisest, mille ajal oli sademetekeskmine hulk selgelt kõrgem võrreldes teistega, see tähendab, et suuremate sademetekeskmine korral on jäätumine pigem harva esinev nähtus.



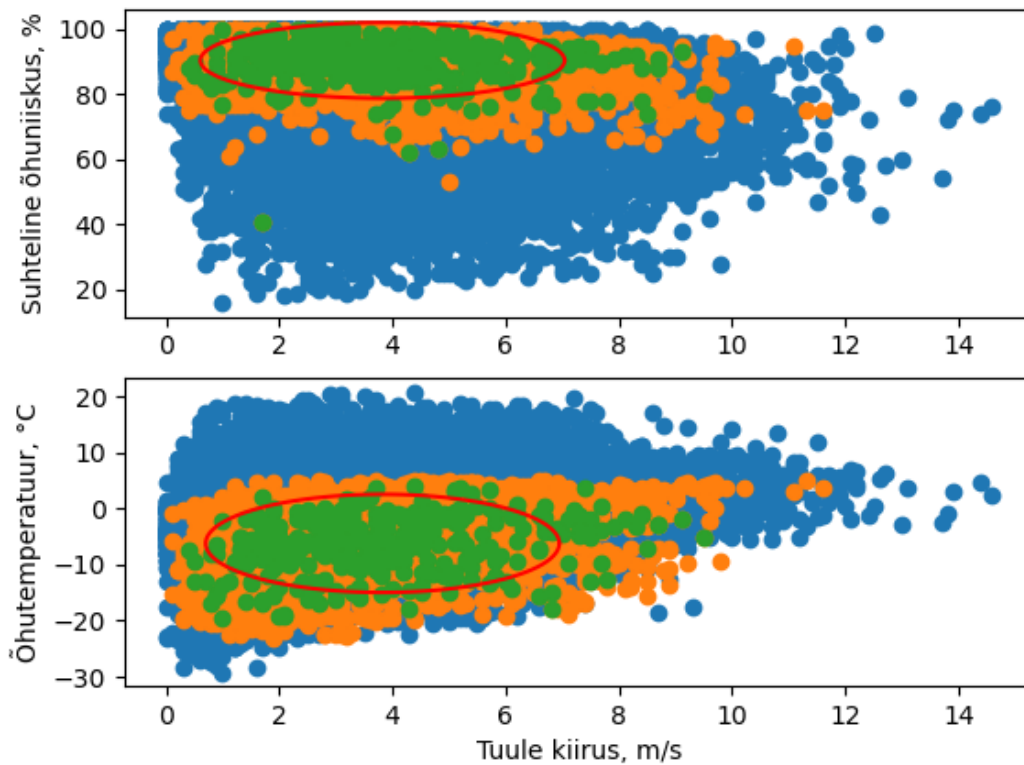
Joonis 8 Kastepunkti ja õhuteratuuri hajvusdiagramm. Õhuteratuur pärineb tuulikult ja arvutamiseks kasutatud suhteline õhuniiskus pärineb ilmajaamast. Sinised punktid tähistavad kogu uuritava perioodi jooksul tehtud mõõtmisi, oranžid punktid tähistavad mõõtmisi, mis on tehtud sellel perioodil kui jäätumise alarm on aktiivne ning tuulik seisab, rohelised punktid tähistavad mõõtmisi, mis on tehtud jäätumise alarmi aktiveerumisega samal tunnil. Punane ellips on Gaussi ellips usaldustasemega 95%.

Andmete põhjal arvutati lisaks ka kastepunkti temperatuur. Kastepunkt (ehk kastepunkti temperatuur) on temperatuur, mille juures niiskes õhus on veemolekulide osaline aururõhk piisav selleks, et õhk saavutaks küllastuse. Teisisõnu, kastepunkti temperatuuril on veemolekulide osaline aururõhk võrdne õhu osalise küllastumise rõhuga [14]. Kastepunkti leidmiseks kasutati Magnuse valemit, mis annab väärtuse suhtelise veaga < 0,4%, vahemikus $-40^{\circ}\text{C} \leq t \leq 50^{\circ}\text{C}$ [15]:

$$t_d = \frac{B_1 * x}{A_1 - x} \quad (1)$$

kus, $x = \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \left(\frac{A_1 * t}{B_1 + t}\right)$, $A_1 \approx 17,625$, $B_1 \approx 243,04$, t_d – kastepunkti temperatuur, RH – suhteline õhuniiskus ja t – õhuteratuur.

Joonisel 8 on näha, et kastepunkti väärtused kõiguvad üsna suurtes piirides, kuid siiski eristub joonisel selge piirkond, kus andmed on rohkem koondunud. Kastepunkti temperatuur ei erine oluliselt õhutemperatuurist jäätumissündmuste ajal ning ka siis kui jäätumise alarm on aktiivne ei erine kastepunkti temperatuur oluliselt õhutemperatuurist. Seega võib väita, et jäätumissündmuste esinemine pole otseselt sõltuv veeauru kogusest atmosfääris vaid pigem peab veeaur olema küllastusolekule lähedal.



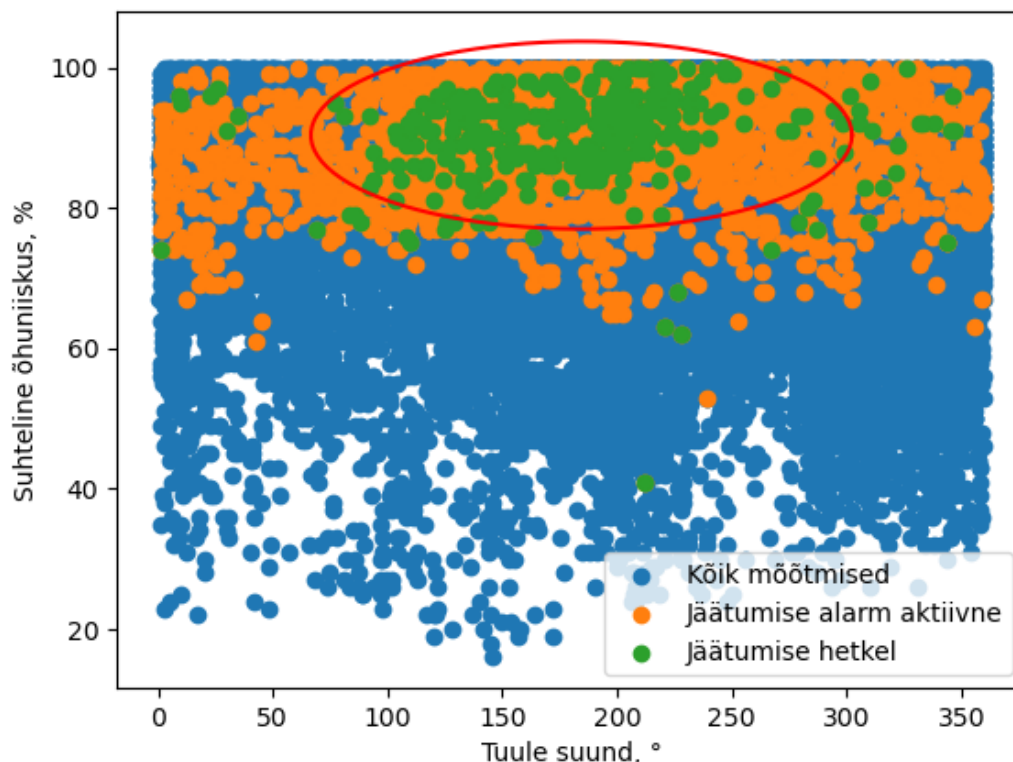
Joonis 9 Hajuvusdiagrammid suhtelise õhuniiskuse ja tuule kiiruse kohta ning õhutemperatuuri ja tuule kiiruse kohta. Suhteline õhuniiskus pärineb ilmajaamast ning tuule kiirus ja õhutemperatuur tuulikult. Sinised punktid tähistavad kogu uuritava perioodi jooksul tehtud mõõtmisi, oranžid punktid tähistavad mõõtmisi, mis on tehtud sellel perioodil kui jäätumise alarm on aktiivne ning tuulik seisab, rohelised punktid tähistavad mõõtmisi, mis on tehtud jäätumise alarmi aktiveerumisega samal tunnil. Punane ellips on Gaussi ellips usaldustasemega 95%.

Joonis 9 on esitatud 2 hajuvusdiagrammi, esimene neist on suhtelise õhuniiskuse ja tuule kiiruse hajuvusdiagramm ning teine õhutemperatuuri ja tuule kiiruse hajuvusdiagramm. Peamine resultaat mida nendelt hajuvusdiagrammidelt saab välja lugeda on asjaolu, et suurte tuulekiirustel ei esine jäätumist. Sellest tulenevalt saab järeldada, et tuulel on jäätumisele väheoluline mõju suurema kiiruse korral. Keskmise tuule kiirus jäätumise hetkel oli 4,8 m/s, mis on uuritava perioodi talvisest keskmisest veidi madalam. Tuulik on kõige efektiivsem, kui tuule kiirus on vahemikus 11-14 m/s, seega saab öelda, et jäätumissündmused esinevad peamiselt tunduvalt väiksematel tuulekiirustel kui kõige efektiivsem tuule kiirus.

Siiski tuleb märkida, et suhtelise õhuniiskuse ja tuule kiiruse diagrammil on andmepunktide teatud piirkond, kus on suurem andmete koondumus. Lisaks tuleb välja, et kui tuulekiirus on madalam siis

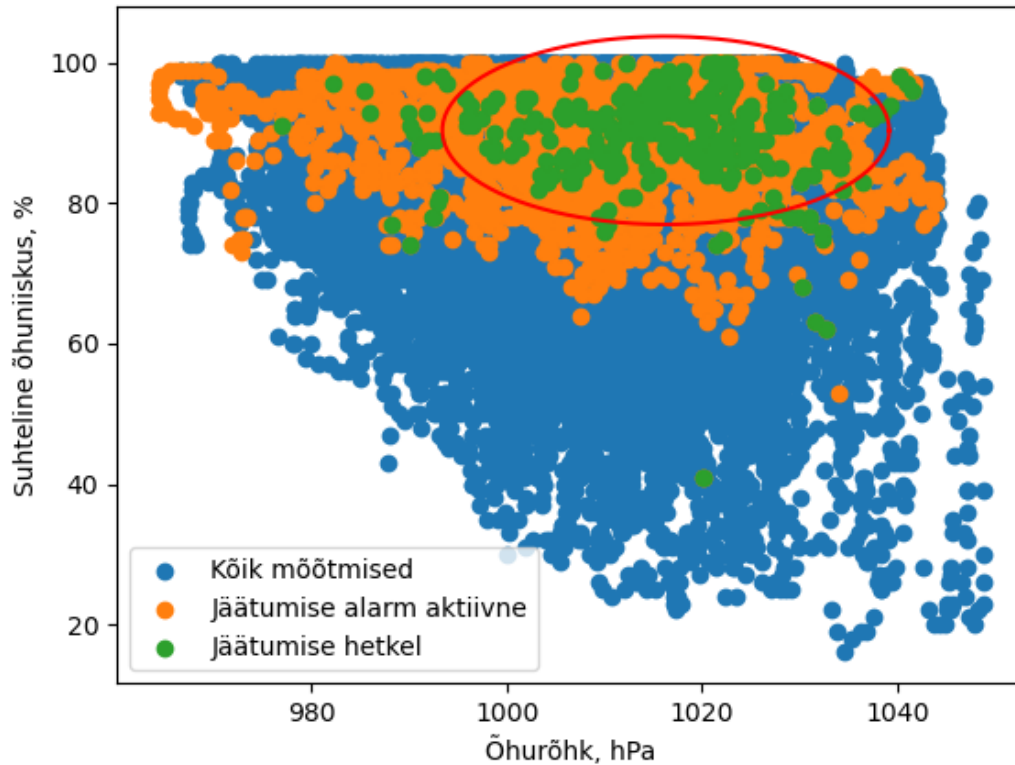
suhteline õhuniiskus on natuke kõrgem, kuid siiski õhuniiskuse vahemikus 80%-100% on andmed ühtlaselt jaotunud.

Joonise õhutemperatuuri ja tuule kiiruse hajuvusdiagrammil ei ilmne selgelt kindlat piirkonda suurema andmepunktide tihedusega. Erinevate tuule kiiruste korral ei täheldatud tulemustes olulist seost õhutemperatuuriga jäätumise perioodil. Madalamate tuulekiiruste puhul on juhtumid pigem ühtlaselt jaotunud ning kiirusesõltuvust ei täheldatud.



Joonis 10 Hajuvusdiagramm õhutemperatuuri ja tuule kiiruse kohta. Mõlemad andmed pärinevad ilmajaamast. Sinised punktid tähistavad kogu uuritava perioodi jooksul tehtud mõõtmisi, oranžid punktid tähistavad mõõtmisi, mis on tehtud sellel perioodil kui jäätumise alarm on aktiivne ning tuulik seisab, rohelised punktid tähistavad mõõtmisi, mis on tehtud jäätumise alarmi aktiveerumisega samal tunnil. Punane ellips on Gaussi ellips usaldustasemega 95%.

Joonis 10 on esitatud suhtelise õhuniiskuse ja tuule suuna hajuvusdiagramm. Jooniselt tuleb välja laiem piirkond, kus andmepunktide tihedus on suurem. Selgub, et jäätumist tekib rohkem, kui tuul puhub 100-250 kraadi pealt ehk vahemikus kagu-lõuna-edel. Põhja-, loode- ja kirdetuultega esineb jäätumissündmuseid harva. Meri on tuulepargist vähem kui 10 km kaugusel põhjasuunas. Seega võib eeldada mere olulist mõju sellise suunasõltuvuse kujunemisel. Mere jäätumissündmuse vähendav mõju võib viidata ka sellele, et meretuulepargid kannatavad jäätumisprobleemide all vähem kui maismaa tuulepargid. Lõuna poolt puhuvate tuulte puhul võib olulist rolli mängida Narva veehoidla ületamisel kaasa haaratud niiskus. Jäätumise alarmi aktiveerumise hetkel on tuulesuund selgesti eristatav aga jäätumise alarmile järgneval seisaku perioodil, pole tuule suunal enam suurt rolli.



Joonis 11 Hajuvusdiagramm õhurõhu ja suhtelise õhuniiskuse kohta. Mõlemad andmed pärinevad ilmajaamast. Sinised punktid tähistavad kogu uuritava perioodi jooksul tehtud mõõtmisi, oranžid punktid tähistavad mõõtmisi, mis on tehtud sellel perioodil kui jäätumise alarm on aktiivne ning tuulik seisab, rohelised punktid tähistavad mõõtmisi, mis on tehtud jäätumise alarmi aktiveerumisega samal tunnil. Punane ellips on Gaussi ellips usaldustasemega 95%.

Joonis 11 on esitatud õhurõhu ja suhtelise õhuniiskuse hajuvusdiagramm. Jooniselt on näha, et iga õhurõhuga jäätumist ei teki. Keskmine õhurõhk jäätumise hetkel on olnud 1016,32 hPa, mis on madal- ja kõrgrõhkkonna piiril. Kui aga vaadata suuremat pilti, on näha, et madala niiskuse ja õhurõhu koosluse põhjal saab suure hulga tingimusi välistada. Vähest koonduvust on näha õhurõhu vahemikus 1010 – 1030 hPa ning üle 80% suhtelise õhuniiskuse korral. Kui tuulik on seisma jäänud, siis õhurõhk varieerub rohkem ning andmeid on terve skaala ulatuses, kuid siiski eristatava koonduvusega diagrammi keskel. Kõrge õhurõhuga ei ole alarm aktiivseks läinud ja ka aktiivse alarmi ajal pole õhurõhk maksimumini tõusnud.

4.3 Jäätumissündmusi mõjutavate atmosfäärinähtuste ja meteoroloogiliste tingimuste tõenäosuste kuumuskaardid

Lisaks jäätumissündmuste ajal esinenud meteoroloogilistele parameetritele analüüsiti ka atmosfäärinähtuseid ning jäätumisele eelnevaid perioode. Atmosfäärinähtuste andmete juures tuleb arvesse võtta, et andmed on alates 2014. aasta jaanuarist, seega esimese 1 aasta ja 1 kuu jäätumiste kohta atmosfäärinähtuse andmed puuduvad. Kuna 2012/2013 talvel ning 2013 detsembris oli jäätumist kokku kõikide tuulikute peale 34, siis puudub 2,2% jäätumiste kohta info.

Antud peatükis kasutati kõikide tõenäosuste leidmiseks valemit [16]:

$$p(A) = \frac{m}{n}, \quad (2)$$

kus p – tõenäosus (antud töös jäätumise esinemise tõenäosus), A – sündmus (antud töös jäätumise esinemine), m – soodsate võimaluste arv sündmuse A toimumiseks ja n – kõikide võimaluste arv

	Viimase tunni atmosfäärinähtus, jäätumiste arv	Atmosfäärinähtus täistunnil, jäätumiste arv	Viimase tunni atmosfäärinähtus, tõenäosus jäätumiseks	Atmosfäärinähtus täistunnil, tõenäosus jäätumiseks
Selge, atm.nähtusi ei täheldata	92	134	0,5%	0,6%
Nõrk uduvihm, jäite tekkimisega	17	11	37,0%	40,7%
Nõrk lausvihm, tekitades jäite	9	2	17,6%	13,3%
Nõrk lauslumi	67	109	1,8%	2,2%
Lauslumi	16	0	3,1%	
Udu või jääudu	5	0	1,9%	
Uduvine	40	61	1,9%	2,0%
Jääkrubid, nõrk	1	2	8,3%	18,2%
Nõrk hooglumi	66	0	2,6%	
Nõrk hoogvihm	9	0	0,5%	
Nõrk vihm (või uduvihm) koos lumega	2	1	0,4%	0,5%
Udu	4	8	1,5%	1,6%
Lausvihm	1	0	0,2%	
Möödukas lauslumi	1	0	0,6%	
Sademed	2	0	0,6%	
Vihm või uduvihm, tekitades jäite.	1	0	10,0%	
Nõrk lausvihm	1	2	0,1%	0,1%
Nõrk uduvihm	1	5	0,5%	0,7%
Sademed, jäite tekkimisega	28	15	23,5%	28,3%

Tabel 1 Atmosfäärinähtused jäätumise alarmi aktiveerumise hetkel. Esimene veerg (Viimase tunni atmosfäärinähtus, jäätumiste arv) näitab jäätumiste arvu, kui viimasel tunnil esines tabeli reas antud nähtus. Teine veerg (Atmosfäärinähtus täistunnil, jäätumiste arv) näitab jäätumiste arvu, kui täistunnil esines tabeli reas antud nähtus. Kolmas veerg (Viimase tunni atmosfäärinähtus, tõenäosus jäätumiseks) näitab, kui suur on tõenäosus jäätumiseks kui jäätumise tunnil esineb tabeli reas antud nähtus. Viimane ehk neljas veerg (Atmosfäärinähtus täistunnil, tõenäosus jäätumiseks) näitab kui suur on tõenäosus jäätumiseks kui jäätumise alarmi aktiveerumise tunni täistunnil esineb tabeli reas antud nähtus.

Tabel 1 tuleb välja, et koguliselt on selge ilmaga olnud jäätumisi kõige rohkem, kuid tõenäosus jäätumiseks selge ilma esinemisel on siiski väga väike kuna jäätumist mittepõhjustavate selgete ilmade hulk on väga suur. Suure jäätumissündmuste arvuga paistavad silma ka nõrgad lumesajud, kuid ka neil jäävad tõenäosused madalaks. Kõige suurema tõenäosusega esines jäätumissündmus, kui atmosfäärinähtuseks fikseeriti nii viimasel tunnil kui ka täistunnil „nõrk uduvihm, jäite

tekkimisega“. Selle nähtusega olid tõenäosused vastavalt 37% ja 40,7%, ehk üle kolmandiku juhtudest. Samas on tegemis üsna harvaesineva nähtusega.

Eraldi reana on tabelis kokku võetud ja välja toodud sademed, mille korral esines ka jäide ('Sademed, jäite tekkimisega'). Nendeks sademeteks on: nõrk uduvihm, jäite tekkimisega; nõrk lausvihm, jäite tekkimisega; jääkruubid, nõrk; vihm või uduvihm, tekitades jäite. Juhul kui viimasel tunnil esines üks neist atmosfäärinähtustest, oli tõenäosus jäätumiseks 23,5% ja kui täistunnil fikseeriti vaid üks neist, oli jäätumise tõenäosus 28,3%.

Temperatuur/Õhuniiskus	< 70	70...75	75...80	80...85	85...90	90...95	95...100
<-26			0,0%	0,0%	0,0%		
-26...-24			0,0%	0,0%	0,0%		
-24...-22		0,0%	15,0%	17,0%	0,0%	0,0%	
-22...-20	0,0%	0,0%	55,0%	14,0%	0,0%		
-20...-18	0,0%	13,0%	57,0%	40,0%	3,0%	80,0%	
-18...-16	0,0%	4,0%	27,0%	46,0%	27,0%	64,0%	
-16...-14	0,0%	6,0%	28,0%	37,0%	22,0%	44,0%	
-14...-12	0,0%	6,0%	29,0%	44,0%	32,0%	30,0%	
-12...-10	8,0%	3,0%	14,0%	30,0%	29,0%	18,0%	
-10...-8	7,0%	14,0%	16,0%	22,0%	23,0%	30,0%	41,0%
-8...-6	4,0%	15,0%	13,0%	6,0%	14,0%	28,0%	45,0%
-6...-4	2,0%	5,0%	6,0%	5,0%	10,0%	22,0%	27,0%
-4...-2	1,0%	0,0%	2,0%	4,0%	8,0%	12,0%	26,0%
-2...0	1,0%	4,0%	7,0%	8,0%	11,0%	16,0%	20,0%
0...2	0,0%	1,0%	5,0%	6,0%	6,0%	10,0%	11,0%
2...4	1,0%	4,0%	2,0%	1,0%	3,0%	7,0%	7,0%

Tabel 2 Tõenäosused tuuliku temperatuuri ja ilmajaama niiskuse põhjal. Punane värv tähistab suuremaid tõenäosuseid ning roheline madalamaid. Vasakul y-teljel on temperatuur, °C. Üleval x-teljel on suhteline õhuniiskus, %.

Tabel 2 on esitatud jäätumissündmuste esinemise tõenäosus tuuliku gondlilt mõõdetud õhutemperatuuri ja Narva meteojaamas mõõdetud suhtelise õhuniiskuse kategooriatele vastavalt. Temperatuur on mõõdetud igas tuulikus gondli kõrguselt iga 10 minuti tagant ning tabelis on arvatud tunni keskmised kõigi tuulikute põhjal. Temperatuur on jaotatud 2 °C kaupa lõikudeks alates -26 °C kuni +4 °C. Suhtelise õhuniiskuse sammu pikkuseks on võetud 5%, alates 70% kuni 100%.

Tabel 2 puhul on tegemist temperatuuri ja õhuniiskuse kategooriatele vastava kuumuskaardiga, mis annab võimaluse hinnata jäätumissündmuse tõenäosust kui on prognoositud vastavasse kategooriasse langevat ilma. Punane värv tähendab jäätumissündmuse suuremat tõenäosust ja mida rohelisemaks läheb, seda väiksemaks läheb väärtus. Valge värv näitab, et selle kategooria sündmuseid uuritud andmerekas ei esinenud. Sündmuse esinemiseks on arvestatud on ka need hetked, kus jäätumise alarm oli aktiivne ja tuulik seisis. Tabelis on mitmeid kategooriate paare mille puhul jäätumissündmuse esinemise tõenäosus on suurem kui 50%. Selline kuumuskaart annab ohutaseme hinnanguid, kui on prognoositud vastavasse kategooriasse langevad temperatuur ja suhteline õhuniiskus, mis võivad näiteks olla võetud numbrilisest ilmaprognoosist. Vastavalt ohutasemete hinnangutele on võimalik ettevõttel ka planeerida riske maandavaid tegevusi lävendipõhiselt.

Temperatuur/Õhuniiskus	< 70	70...75	75...80	80...85	85...90	90...95	95...100
< -26							
-26...-24							
-24...-22							
-22...-20							
-20...-18				0,0%			
-18...-16					0,0%		
-16...-14				100,0%	0,0%		
-14...-12				50,0%	0,0%	0,0%	
-12...-10					67,0%	0,0%	
-10...-8	0,0%			67,0%	83,0%	23,0%	
-8...-6	0,0%	33,0%	50,0%		71,0%	58,0%	100,0%
-6...-4	0,0%		75,0%		13,0%	78,0%	60,0%
-4...-2	29,0%	0,0%	0,0%	0,0%	29,0%	56,0%	54,0%
-2...0	14,0%	0,0%	100,0%	17,0%	6,0%	22,0%	35,0%
0...2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	8,0%	21,0%
2...4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabel 3 Tõenäosused, kui atmosfäärinähtuseks on sademed, koos jäitega. Punane värv tähistab suuremaid tõenäosuseid ning roheline madalamaid. Vasakul y-teljel on temperatuur, °C. Üleval x-teljel on suhteline õhuniiskus, %.

Tabel 3 esitatud tulemuste puhul on andmeid filtreeritud tingimusega, et atmosfäärinähtuseks on „Sademed, jäite tekkimisega“. „Sademed, jäite tekkimisega“ on samad, mis on kirjeldatud ka Tabel 1.

Võrreldes Tabeli 2-ga on välja jäänud jäätumised, kui temperatuur on alla -16°C ning suuremad tõenäosused on tabelis rohkem hajutatult, kuid kõrgemate tõenäosuste paiknemine on sarnane. Lisaks on tekkinud ka kombinatsioone, mille puhul jäätumissündmuse toimumine on 100% kindel, selliseid kombinatsioone on kokku 3. Kõrgemate tõenäosuste esinemiseks vajalikud meteoroloogilised tingimused olid temperatuuride puhul vahemikus -16°C kuni 0°C ning suhtelise õhuniiskuse puhul vahemikus 75%-100%. Sellise tabeliga on võimalik hinnata jäätumissündmuse tõenäosust olukorras kui rahvuslikus ilmaprognoosis on antud ka jäite esinemise hoiatus.

Kestvus	Temperatuur											
	Alla 2 °C	Alla 0 °C	Alla -2 °C	Alla -4 °C	Alla -6 °C	Alla -8 °C	Alla -10 °C	Alla -12 °C	Alla -14 °C	Alla -16 °C	Alla -18 °C	Alla -20 °C
1 tund	1,79%	2,59%	3,03%	3,75%	4,35%	5,13%	5,70%	6,35%	6,67%	3,90%	5,71%	0,00%
2 tundi	1,86%	2,76%	3,22%	3,99%	4,58%	5,44%	6,13%	6,74%	7,29%	4,29%	5,88%	0,00%
3 tundi	1,92%	2,84%	3,31%	4,14%	4,72%	5,68%	6,29%	7,02%	7,25%	3,65%	7,50%	0,00%
4 tundi	1,97%	2,92%	3,44%	4,31%	4,93%	5,92%	6,30%	7,06%	8,12%	3,39%	9,38%	
5 tundi	2,02%	2,98%	3,54%	4,43%	5,09%	6,06%	6,33%	7,32%	8,73%	3,88%	11,54%	
6 tundi	2,07%	3,05%	3,64%	4,55%	5,27%	6,36%	6,59%	7,53%	9,02%	4,49%	14,29%	
7 tundi	2,12%	3,10%	3,74%	4,66%	5,45%	6,53%	6,61%	7,71%	8,93%	5,00%	18,75%	
8 tundi	2,16%	3,17%	3,86%	4,79%	5,63%	6,77%	6,50%	7,68%	9,18%	5,63%	25,00%	
9 tundi	2,21%	3,22%	3,96%	4,89%	5,86%	7,08%	6,23%	7,76%	9,47%	6,45%	33,33%	
10 tundi	2,25%	3,29%	4,05%	4,99%	6,14%	7,32%	6,28%	7,59%	9,77%	7,41%	42,86%	
11 tundi	2,30%	3,36%	4,15%	5,08%	6,41%	7,62%	6,42%	7,84%	10,06%	8,33%	50,00%	
12 tundi	2,28%	3,22%	3,97%	4,77%	5,71%	6,73%	4,97%	5,34%	8,90%	9,09%	60,00%	

Tabel 4 Tõenäosused jäätumiseks kui temperatuur on mingil perioodil olnud alla teatud temperatuuri. Punane värv tähistab suuremaid tõenäosuseid ning roheline madalamaid. Vasakul y-teljel on periood, kava temperatuur on alla valitud temperatuuri olnud. Üleval x-teljel on temperatuur, alla mille uuritakse.

Jäätumine ei teki hetkega, vaid sellele eelneb periood, kus jää hakkab tuuliku labade külge moodustuma. Selleks, et jää moodustumise perioodi uurida, vaadeldi 12-tunnist perioodi, mis eelnes jäätumise alarmile. Tabel 4 on vertikaalteljel temperatuur ja horisontaalteljel kestvus, kui pikalt temperatuur alla mingi väärtuse püsis. Tabeli 4 tulemuseks on samuti kuumkaart, kus temperatuurid vähenevad 2 °C kaupa ning kestvused 1 tunni kaupa.

Tabeli 4 tulemustest on näha, et tõenäosused on küllaltki madalad. Kui õhutemperatuur langeb alla -18°C tõuseb tõenäosus märgatavalt. Samuti selgub saadud tulemustest, et pikema aja jooksul õhutemperatuur üksi ei oma olulist rolli jäätumissündmuse tekkimises, kui välja arvata temperatuurid alla -18 °C. Suurenenud tõenäosused alla -18 °C juures on tingitud sellest, et selliseid tingimusi, kus temperatuur püsib nii madalal üle 10 tunni, esineb Eesti kliimas harva.

Kestvus	Tingimused											
	Alla 2 °C ja alla 80%	Alla 0 °C ja alla 80%	Alla -2 °C ja alla 80%	Alla -4 °C ja alla 80%	Alla -6 °C ja alla 80%	Alla -8 °C ja alla 80%	Alla -10 °C ja alla 80%	Alla -12 °C ja alla 80%	Alla -14 °C ja alla 80%	Alla -16 °C ja alla 80%	Alla -18 °C ja alla 80%	Alla -20 °C ja alla 80%
1 tund	0,30%	0,29%	0,40%	0,58%	0,83%	1,04%	1,00%	0,90%	1,27%	1,44%	4,55%	0,00%
2 tundi	0,27%	0,29%	0,41%	0,58%	0,82%	0,98%	0,87%	0,69%	0,98%	1,64%	6,25%	0,00%
3 tundi	0,26%	0,35%	0,49%	0,69%	0,94%	0,82%	0,99%	0,77%	1,11%	1,83%	4,00%	
4 tundi	0,30%	0,40%	0,56%	0,78%	0,79%	0,90%	1,08%	0,84%	1,21%	2,04%	5,00%	
5 tundi	0,34%	0,45%	0,63%	0,86%	0,86%	0,97%	1,17%	0,90%	1,32%	2,27%	6,67%	
6 tundi	0,38%	0,51%	0,71%	0,95%	0,94%	1,05%	1,27%	0,96%	1,46%	2,53%	9,09%	
7 tundi	0,32%	0,42%	0,59%	0,78%	0,68%	0,74%	0,90%	0,51%	0,81%	1,43%	0,00%	
8 tundi	0,23%	0,31%	0,43%	0,57%	0,73%	0,79%	0,97%	0,53%	0,88%	1,61%	0,00%	
9 tundi	0,13%	0,17%	0,24%	0,31%	0,39%	0,41%	0,51%	0,55%	0,96%	1,82%	0,00%	
10 tundi	0,14%	0,18%	0,25%	0,32%	0,41%	0,43%	0,52%	0,57%	1,04%	2,04%	0,00%	
11 tundi	0,15%	0,19%	0,27%	0,34%	0,42%	0,44%	0,53%	0,58%	1,12%	2,33%		
12 tundi	0,16%	0,21%	0,28%	0,35%	0,43%	0,45%	0,55%	0,60%	1,20%	2,63%		

Kestvus	Tingimused											
	Alla 2 °C ja niiskus vahemikus 80% - 95%	Alla 0 °C ja niiskus vahemikus 80% - 95%	Alla -2 °C ja niiskus vahemikus 80% - 95%	Alla -4 °C ja niiskus vahemikus 80% - 95%	Alla -6 °C ja niiskus vahemikus 80% - 95%	Alla -8 °C ja niiskus vahemikus 80% - 95%	Alla -10 °C ja niiskus vahemikus 80% - 95%	Alla -12 °C ja niiskus vahemikus 80% - 95%	Alla -14 °C ja niiskus vahemikus 80% - 95%	Alla -16 °C ja niiskus vahemikus 80% - 95%	Alla -18 °C ja niiskus vahemikus 80% - 95%	Alla -20 °C ja niiskus vahemikus 80% - 95%
1 tund	1,62%	2,22%	2,70%	3,49%	4,28%	5,56%	6,35%	7,85%	9,20%	9,48%	4,08%	0,00%
2 tundi	1,64%	2,23%	2,72%	3,51%	4,35%	5,54%	6,56%	8,19%	9,06%	6,45%	5,26%	0,00%
3 tundi	1,67%	2,24%	2,76%	3,53%	4,33%	5,58%	6,70%	8,11%	8,37%	6,58%	6,90%	0,00%
4 tundi	1,72%	2,29%	2,82%	3,63%	4,47%	5,78%	6,75%	8,25%	7,61%	5,08%	9,09%	0,00%
5 tundi	1,75%	2,32%	2,91%	3,73%	4,70%	6,04%	6,87%	8,31%	8,61%	2,22%	6,25%	0,00%
6 tundi	1,80%	2,35%	3,00%	3,83%	4,89%	6,13%	7,10%	8,54%	10,08%	3,03%	8,33%	0,00%
7 tundi	1,79%	2,33%	3,02%	3,94%	5,09%	6,35%	7,58%	9,03%	10,53%	4,00%	10,00%	0,00%
8 tundi	1,84%	2,37%	3,09%	4,04%	5,38%	6,56%	7,55%	9,21%	9,46%	0,00%	0,00%	
9 tundi	1,84%	2,35%	3,10%	4,10%	5,51%	6,89%	7,40%	8,78%	10,71%	0,00%	0,00%	
10 tundi	1,84%	2,33%	3,09%	4,12%	5,57%	7,01%	6,89%	8,62%	12,50%	0,00%	0,00%	
11 tundi	1,88%	2,38%	3,15%	4,18%	5,80%	7,33%	7,21%	8,78%	17,86%	0,00%	0,00%	
12 tundi	1,90%	2,43%	3,20%	4,24%	6,09%	7,91%	7,86%	8,87%	29,41%	0,00%	0,00%	

Kestvus	Tingimused											
	Alla 2 °C ja niiskus üle 95%	Alla 0 °C ja niiskus üle 95%	Alla -2 °C ja niiskus üle 95%	Alla -4 °C ja niiskus üle 95%	Alla -6 °C ja niiskus üle 95%	Alla -8 °C ja niiskus üle 95%	Alla -10 °C ja niiskus üle 95%	Alla -12 °C ja niiskus üle 95%	Alla -14 °C ja niiskus üle 95%	Alla -16 °C ja niiskus üle 95%	Alla -18 °C ja niiskus üle 95%	Alla -20 °C ja niiskus üle 95%
1 tund	2,38%	4,99%	7,74%	11,53%	12,95%	17,95%	66,67%	100,00%	100,00%			
2 tundi	2,44%	5,49%	9,32%	13,17%	14,81%	22,73%	100,00%	100,00%	100,00%			
3 tundi	2,58%	6,27%	11,37%	15,71%	14,55%	14,29%						
4 tundi	2,68%	6,88%	13,81%	18,81%	15,79%	11,11%						
5 tundi	2,69%	7,34%	16,35%	20,83%	16,00%	14,29%						
6 tundi	2,83%	8,40%	19,47%	20,83%	11,76%	20,00%						
7 tundi	2,98%	9,75%	22,67%	20,00%	9,09%	0,00%						
8 tundi	3,10%	11,72%	31,37%	23,53%	0,00%	0,00%						
9 tundi	2,96%	13,00%	39,39%	33,33%	0,00%							
10 tundi	2,94%	14,57%	44,00%	42,86%	0,00%							
11 tundi	2,96%	16,95%	55,56%	60,00%	0,00%							
12 tundi	3,07%	19,15%	75,00%	75,00%	0,00%							

Tabel 5 Tõenäosused jäätumiseks kui temperatuur on mingil perioodil olnud alla teatud temperatuuri ja samal ajal suhteline õhuniiskus vastab teatud tingimustele. Punane värv tähistab suuremaid tõenäosuseid ning roheline madalamaid. Vasakul y-teljel on periood, kaua temperatuur on alla valitud temperatuuri olnud. Üleval x-teljel on temperatuur, alla mille uuritakse ja suhteline õhuniiskus, üle mille uuritakse.

Lisades Tabel 4-le ka õhuniiskused, paranevad eelnevad tulemused ning tõenäosused kasvavad. Tabel 5 valiti igas alamtabelis õhutemperatuuri puhul 2 °C samm. Tabel 5 ülemises tabelis on valitud juhtumid kus suhteline õhuniiskus on alla 80%, keskmises tabelis vahemik 80% - 95% ning alumises üle 95%.

Tabel 5 tulemustest selgub, et alla 80% suhtelise õhuniiskusega on tõenäosused jätkuvalt madalad, olenemata õhutemperatuurist välja arvatud juhul kui õhutemperatuur langeb alla -18°C , mille puhul jäätumissündmuste tõenäosused tõusevad 9%-ni. Kui suhteline õhuniiskus jääb vahemiku 80% - 95%, siis jäätumissündmuste tõenäosused tõusevad võrreldes 80% suhtelise õhuniiskusega, kuid ei tõuse üle 30%. Üle 95% suhtelise õhuniiskusega tõusevad jäätumissündmuste tõenäosused juba märgatavalt, ulatudes mõnel 100%-ni. 100% tõenäosused on juhul kui 2 tunni jooksul on õhutemperatuur püsinud alla -10°C ning suhteline õhuniiskus üle 95%. Kõrge jäätumissündmuse tõenäosus on ka juhul kui 12 tunni jooksul on õhutemperatuur püsinud alla -2°C ning suhteline õhuniiskus üle 95%, antud juhul on jäätumissündmuse esinemise tõenäosus 75%. Saadud tulemuste põhjal on võimalik ette prognoosida jäätumisi ning tänu sellele viia läbi ennetavaid tegevusi jäätumisest tingitud kahjude vähendamiseks.

Kestvus	Tuule suund N	Tuule suund E	Tuule suund S	Tuule suund W
1 tund	0,72%	6,29%	5,92%	1,82%
2 tundi	1,10%	11,60%	10,02%	2,89%
3 tundi	1,07%	13,80%	10,73%	3,23%
4 tundi	0,58%	15,62%	10,87%	2,62%
5 tundi	0,37%	17,01%	11,64%	2,70%
6 tundi	0,46%	17,68%	12,29%	2,47%
7 tundi	0,52%	19,33%	12,65%	2,31%
8 tundi	0,58%	20,37%	13,48%	2,00%
9 tundi	0,81%	23,31%	14,68%	1,38%
10 tundi	0,99%	24,53%	15,29%	1,06%
11 tundi	1,05%	25,96%	15,98%	0,60%
12 tundi	1,11%	27,00%	15,31%	0,72%

Tabel 6 Tõenäosused jäätumiseks kui tuul puhub teatud periood ühest suunast. Punane värv tähistab suuremaid tõenäosuseid ning roheline madalamaid. Vasakul y-teljel on periood, kaua tuule suund on püsinud vastavast suunast. Üleval x-teljel on tuule suund mida uuritakse.

Lisaks temperatuurile ja niiskusele vaadati ka tuule suunda enne jäätumissündmuse esinemist. Tuule suund oli algselt kraadides ning kraadid teisendati ümber N – põhjatuul, E – idatuul, S – lõunatuul, ja W – läänetuul. Põhjatuul oli kraadidel 0° - 90° , idatuul 90° - 180° , lõunatuul 180° - 270° ning läänetuul 270° - 360° .

Tabel 6 tulemustest selgub, et jäätumisele eelneval perioodil oli kõige sagedasem tuule suund ida ning lõuna. Arvestades pargi asukohta, saab öelda, et kui tuul puhub üle Narva veehoidla, on jäätumissündmuseks kõige suurem tõenäosus. Tõenäosused ei ole üle 30%, kuid annavad siiski infot, et üle Narva veehoidla puhuv tuul toob sagedamini kaasa jäätumist.

Arvestades saadud tulemusi, kus ida- ja lõunatuulel üle Narva veehoidla on suurenenud tõenäosused, siis võib järeldada, et ida- ja lõunatuul toovad kaasa jäätumissündmuseks soodsaid tingimusi, milleks võib olla suurenenud suhtelise õhuniiskuse tase, kuid see vajab täiendavat uurimist.

5. Kokkuvõte

Käesolevas töös on analüüsitud Narva tuulepargi jäätumissündmuseid perioodil 2012-2022, kasutatud on talvise perioodi andmeid. Töö raames viidi läbi jäätumiste statistiline analüüs, meteoroloogiliste parameetrite analüüs ning loodi meteoroloogiliste parameetrite tõenäosuste kuumuskaardid.

Töös on esitatud jäätumissündmuste üldine statistika Narva tuulepargis. Analüüsi tulemused näitasid, et aastate lõikes on jäätumissündmuste varieeruvus suur. Kõige rohkem sündmusi esineb jaanuarikuus ja rõhuv enamus jäätumissündmusi on kestusega kuni 24 tundi. Samas oli ka erandeid kui jäätumissündmus kestis kokku mitmeid päevi.

Jäätumissündmuste ajal vaadeldud meteoroloogiliste parameetrite analüüs näitas, et õhutemperatuur ja suhteline õhuniiskus omavad kõige olulisemat mõju jäätumisele, kuid nad varieeruvad jäätumissündmuste ajal üsna laiaades piirides. Niiskuse puhul oli määravaks pigem veeauru kaugus küllastusolekust mitte niivõrd veeauru hulk atmosfääris. Lisaks õhutemperatuurile ja suhtelisele õhuniiskusele mõjutab jäätumissündmuste tekkimist teatud määral ka tuule suund ja tugevus nii, et enamik jäätumissündmusi esines lõunapoolsete tuultega ja tugevate tuultega jäätumissündmuseid pigem ei toimunud. Ka aluspinna rõhu puhul oli esines suurem osa jäätumissündmuseid kõrgematel aluspinnarõhkudel. Nähtustega võrreldes esines tuulikulabade jäätumist kõige rohkem selgete ilmadega ja nõrkade lumesadude ajal kuid seejuures olid jäätumise tõenäosused üsna madalad. Samal ajal jäite esinemisel oli tuuliku labade jäätumise tõenäosus kõrge kuigi jäite juhtumite arv oli madal.

Töö käigus loodi ka jäätumissündmuste esinemise tõenäosuste kuumuskaardid. Sellised kaardid võimaldavad hinnata tuuliku labade jäätumise tõenäosust olukorras kus on teada prognoositud niiskus ja temperatuur või kui prognoosiga kaasneb ka jäite hoiatus. See on lihtne võimalus luua lävendipõhiseid ohuhinnanguid ilma keeruliste mudelsüsteemideta, mis võib osutada kasulikuks toimepidevuse kriitilistes olukordades.

Järgnevas tegevuseks, et tulemusi ennustumudeliks edasi arendada oleks leida sobiv masinõppe mudel ning hakata seda treenima tööst leitud seoste põhjal, et oleks võimalik prognoosida jäätumist ja vähendada kahjumit talvistel perioodidel. Kui prognoosmudel osutub edukaks siis saaks rakendada sarnast lähenemist ka teistele probleemsetele tuuleparkidele.

6. Kasutatud kirjandus

1. Euroopa Liidu kliimaeesmärgid. 2023 [viidatud 2023 Apr 24] Saadaval: <https://envir.ee/euroopa-liidu-kliimaeesmargid>
2. Complete view of Enercon E82 wind turbine. 2022 [viidatud 2022 Dets 4]. Saadaval: <https://www.enercon.de/en/products/ep-2/e-82/>
3. Overview of Enercon platform. 2022 [viidatud 2022 Dets 10]. Saadaval <https://www.enercon.de/en/products/>
4. Tuulepargi Eestis. 2023 [viidatud 2023 Apr 30]. Saadaval: <https://tuuleenergia.ee/tuuleenergia-eestis/>
5. Emeis S. Wind Energy Meteorology - Second Edition. Springer. 2020. p 239-240
6. Gao. L, Tao. T, Liu. Y, Hui. H. A field study of ice accretion and its effects on the power production of utility-scale wind turbiines. 2020.
7. Gao. L, Dasari. T, Hong. J. Wind farm icing loss forecast pertinent to winter extremes. 2021
8. Homola M. C, Nicklasson P. J, Sundsbø P. A. Ice sensors for wind turbiines. Cold Regions science and technology. 2006. p 125-131
9. Operating manual. ENERCON Wind Energy Converter E-82 E2 / 2300/2000 kW. Enercon GmbH. p 93-94 & 126
10. Enercon De-Icing. 2022 [viidatud 2022 Dets 10]. Saadaval <https://www.enercon.de/en/technology/wec-features/>
11. Kreutz. M, Alla. A. A, Varasteh. K, Lütjen. M, Freitag. M, Thoben. K-D. Investigation of icing causes on wind turbine rotor blades using machine learning models, minimalistic input data and a full-factorial design. 2020
12. Delgade. I, Fahim. M, Wind Turbine Data Analysis and LSTM-Based Prediction in SCADA System. 2020
13. Erten. O, Deutsch. C. V. Combination of Multivariate Gaussian Distributions through Error Ellipses. 2020.
14. Lawrence A. W. The Use of Dew-Point Temperature in Humidity Calculations. 1970.
15. Lawrence M. G. The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air. 2005. p 225-234
16. Ash. R. B. Basic probability theory. 2008. p 16

Lisad

Lisa 1

```
import os
import glob
import pandas as pd
import numpy as np

#list all csv files only
files = glob.glob('/Users/markusarm/Documents/Lõputöö/Temperatuur/**/*.*csv', recursive =
True)
# Dataframe andmetele
koik = pd.DataFrame()
#append kõik failid kokku
for file in files:
    uhekordne = pd.read_csv(file, sep=',')
    koik = koik.append(uhekordne, ignore_index=True)

# Valin milliseid tulpi kasutan
andmed=koik[["Plant", "Serial no.", "Time", " Temp. Nacelle outside 1 [°C]", " Temp. Ground outside
[°C]"]]
# Tühi list gondli temperatuuridele
Nacelle=[]
# Asendan koma punktiga
for x in andmed[" Temp. Nacelle outside 1 [°C]"]:
    y=x.replace(",",".")
    Nacelle.append(int(float(y)))

# Asendan andmed DataFrame-s Gondli temperatuuriga
andmed[" Temp. Nacelle outside 1 [°C]"] = Nacelle
# Sama asi maapinna temperatuuride kohta
Ground=[]
for xx in andmed[" Temp. Ground outside [°C]"]:
    yy=xx.replace(",",".")
    Ground.append(int(float(yy)))
andmed[" Temp. Ground outside [°C]"] = Ground
# Arvutan keskimised igale ajahetkele
andmed1=andmed.groupby("Time").mean()
# Salvestan excelisse
andmed1.to_excel("Temperatuur tuulikust.xlsx")
```